

제 출 문

본 보고서를 「교정용 측정기기 표준 교정 방법에 관한 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2002. 12. 31

연구책임자 : 박 병 권(대림대학)

연 구 원 : 한 희 철(대림대학)

이 한 영(대림대학)

연구보조원 : 이 병 철(대림대학)

박 승 하(대림대학)

요 약 문

1. 과제명 : 교정용 측정기기 표준 교정 방법에 관한 연구
2. 연구 기간 : 2002년 2월 1일 ~ 2002년 12월 31일
3. 연구책임자 : 박 병 권
4. 계획 대 진도

가. 월별 추진 내용

세부연구내용	연구 자	월별 추진 일정												비 고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 논문 및 관련자료 조사· 분석	박병권 외 4인					→								
○ 전자파 분야 6개 항목 에 대한 교정 기술 확립														
- 표준 교정 절차서 작성														
- 불확도 및 BMC 산출														
- 유효성 검증														
○ 국내의 교정기관과 측정량 비교 평가를 통한 측정 신뢰도 향상 방안 연구														
- 국내의 국가 교정 기관 과의 절차서 및 측정기 술 비교 연구														
- 측정 분야별 비교 숙련 도 참가 방안 연구														
○ 최종보고서 작성														
분기별 수행 진도(%)		20			30			30			20			100

————→ : 당초계획 → : 실적

나. 세부 과제별 추진 사항

- 1) 논문 및 관련자료 조사·분석 완료
- 2) 전자파 분야 12개 항목에 대한 교정 기술 확립
 - 표준 교정 절차서 작성완료
 - 불확도 및 BMC 산출완료
 - 유효성 검증하여 절차서 작성 완료
- 3) 국내의 교정기관과 측정량 비교 평가를 통한 측정 신뢰도 향상 방안 연구
 - 국내의 국가교정 기관과 절차서 및 측정기술 비교 연구완료
 - 전자파 분야 비교 숙련도 참가 방안 연구완료

5. 연구 결과

- 1) 전자파 교정절차 및 불확도 관련자료 조사·분석
- 2) 전자파 전력이론 및 측정 방법에 따른 불확도 요인 분석
- 3) 전자파 감쇠량 측정 이론 및 불확도 요인 분석
- 4) 회로망 분석기를 이용한 반사계수 및 감쇠량 측정 불확도 산출
- 5) 전자기장의 세기 측정 및 안테나 교정 원리
- 6) 표준 교정 절차서 작성 및 불확도 요인 분석
: 동축형 서미스터 마운트, 동축형 열전대 전력 감지기, 터미네이션, 부정합, 정재파 비, 동축형 고정 감쇠기, 동축형 가변 감쇠기, 고주파 스펙트럼 분석기, RF 신호 발생기 및 변조기 등의 교정 지침서를 작성 완료함.
- 7) 전파 연구소, 한국통신, 무선국 관리사업단, 삼성교정기술원 등 국내의 18개 전자파 측정 관련 기관이 참여하는 동축형 고정 감쇠기 숙련도 시험계획이 확정되어 시행되고 있음.

6. 기대효과

- 1) 국제표준에 규정한 요구조건을 충족시킬 수 있는 교정방법 및 교정절차를 확립할 수 있게되어 전자과 분야의 교정 분야 확대 추진에 기여하리라 봄.
- 2) 전자과 분야 핵심 측정 기술의 확립으로 EMC 분야 국가 지정 기준 시험장으로서의 국·내외적 위상제고에 기여하리라 봄.
- 3) EMC 관련 안테나 표준 및 안테나 교정 기술에 대한 기반기술 확립으로 향후 EMC 측정용 표준 안테나 개발 및 안테나 교정 기술을 제고시키는데 기여하리라 봄.
- 4) EMC 측정 기술의 원천 기술인 전자과 분야의 교정 기술 확립으로 상호인정협정(MRA)의 상호 적합성 평가의 기반 마련에 기여하리라 봄.

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유 현황	확보 방안	비 고
RF 신호발생기 (RF Signal Generator)	10 MHz ~ 27 GHz	1	신호 공급	보유		
전력계 (Power Meter)	$\pm 1\%$ of full scale	1	전력 측정	보유		
써미스터 마운터 (Thermistor Mount)	CAL Factor : $\pm \sim 3\%$	2	전력 측정	보유		
전력계 (Power Meter)	-70 dBm ~ 20 dBm	1	전력 측정	보유		
전력 감지기 (Power Sensor)	50 MHz ~ 26.5 GHz	1	전력 측정	보유		
고정 감쇠기 (Fixed Attenuator)	10 dB	1	전력 감지기 교정	보유		

시설 · 장비명	규격	수량	용도	보유 현황	확보 방안	비 고
가변 감쇠기 (Step Attenuator)	0 dB ~ 11 dB, 1 dB step	1	감쇠량 측정	보유		
가변 감쇠기 (Step Attenuator)	0 dB ~ 110 dB, 10 dB step	1	감쇠량 측정	보유		
방향성 결합기 (Directional Coupler)	20 dB	1	전력 감지기 교정	미보 유	추후 확보	
회로망 분석기 (Network Analyzer)	300 kHz ~ 3 GHz	1	임피던스 측정	보유		
주파수계수기 (Frequency Counter)	0 ~ 100 MHz	1	주파수 측정	보유		
GPS Receiver	2.0×10^{-11}	1	기준 신호 공급	보유		
표준정합 (Standard Termination)	SWR : 1.08 이하	1	임피던스 종단	보유		
전력 분배기 (Power Splitter)	DC ~ 2.7 GHz	1	전자파 계측기 교정	보유		
Measuring Receiver	150 kHz ~ 1.3 GHz	1	전자파 계측기 교정	보유		

8. 기타 사항

“특별한 사항 없음”

SUMMARY

This study has been carried out for the establishment of the the standard calibration method of the precision measurement instruments to be used in calibration of rf and microwave instruments.

Theoretical consideration and practical measurement techniques are described for the calibration and the uncertainty evaluation of : electromagnetic power, impedance, attenuation, antennas, and important instruments such as rf spectrum analyzer, rf signal generator and measuring receiver. The guide books for the calibration of electromagnetic thermistor mount, electromagnetic power sensor, reflection coefficient, impedance, VSWR, fixed attenuator, variable attenuator, rf spectrum analyzer, rf signal generator and measuring receiver are included.

This research results can be used as guidances for those calibration laboratories which have to capture and calculate their rf and microwave measurement instrumentation to meets the requirements of calibration laboratory competency when being assessed to ISO/IEC 17025(2000-01).

This report, which shows how electromagnetic measurement discipline is using uncertainty subjects, is can be used as a guide book for electromagnetic measurement laboratories, laboratory quality assessors using ISO/IEC 17025, product manufacturer, and people providing education and training on electromagnetic measurement.

목 차

표 목 차	9
그 립 목 차	10
제 1 장 서 론	12
제 2 장 2-포트 회로망의 해석	13
제 1 절 산란계수	13
제 2 절 2-포트 회로망의 입 · 출력 반사계수	14
제 3 절 2-포트 회로망의 입 · 출력 전력	16
제 4 절 2-포트 회로망의 전송특성	19
제 3 장 신호 흐름도를 이용한 마이크로파 회로망의 해석	22
제 4 장 감쇠량 측정	25
제 1 절 감쇠량의 정의	25
제 2 절 고정 감쇠량의 측정	26
제 3 절 가변 감쇠량 측정	29
제 5 장 3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정	33
제 1 절 3-포트 회로망의 신호 흐름도	33
제 2 절 3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정원리	36
제 3 절 power splitter와 방향성 결합기	40
제 4 절 전력 감지기 교정의 불확도	49

제 6 장 벡터 회로망 분석기(VANA)의 측정 오차 분석	53
제 1 절 회로망 분석기의 기본 개념	53
제 2 절 회로망 분석기의 측정 오차 모델	54
제 3 절 계통 측정 오차	56
제 4 절 회로망 분석기의 오차 분석	64
제 5 절 회로망 분석기의 오차 계산 예	74
제 7 장 전자기장의 세기 측정 및 안테나 교정법	77
제 1 절 안테나에서 복사된 전자기장의 특성.....	77
제 2 절 안테나 인자와 안테나 정수의 관계.....	82
제 3 절 전자기장의 세기 측정법.....	88
제 4 절 안테나 교정법.....	91
제 5 절 복사성 EMC 측정에 안테나 특성이 미치는 영향.....	100
제 8 장 결 론	105
참 고 문 헌	106
부록 1. 동축형 써미스터 마운터 교정 지침서	108
부록 2. 동축형 열전대 감지기 교정 지침서	150
부록 3. 반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서	199
부록 4. 동축형 고정 감쇠기 교정 지침서	224
부록 5. 동축형 가변 감쇠기 교정 지침서	242
부록 6. 고주파 스펙트럼 분석기 교정 지침서	267
부록 7. RF 신호원 교정 지침서	330
부록 8. 변조기 교정 지침서	359

표 목 차

표 6-1 회로망 분석기를 이용한 측정량	53
표 6-2 HP8753D의 특성	65
표 6-3 컨넥터 반복도	67
표 7-1 전자기장의 세기 측정량과 측정 단위	80
표 7-2 불확도 요인 총괄	102
표 7-3 불확도 총괄표	103
표 7-4 복사방출 불확도 중 안테나의 영향	104

그 립 목 차

그림 2-1	2-포트 회로망	14
그림 2-2	신호원과 2-포트 회로망 사이의 반사파	15
그림 3-1	S-파라미터를 신호 흐름도로 표현	23
그림 3-2	2-포트 회로망의 신호 흐름도	24
그림 4-1	감쇠량 측정 원리	25
그림 4-2	부정합 오차(감쇠량 20 dB 이상)	28
그림 4-3	가변 감쇠량의 측정 원리	30
그림 5-1	3-포트 회로망 해석	34
그림 5-2	3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정 시스템 구성	37
그림 5-3	power splitter의 종류	40
그림 5-4	2개의 저항으로 구성된 power splitter의 특성 파라미터 변화의 영향	41
그림 5-5	유효 신호원에 대한 등가의 신호 흐름도	43
그림 5-6	2개의 저항으로 구성된 power splitter의 S 파라미터	44
그림 5-7	3개의 저항으로 구성된 power splitter의 S 파라미터	45
그림 5-8	방향성 결합기	47
그림 6-1	회로망 분석기의 블록도	54
그림 6-2	측정 오차	54
그림 6-3	계통 측정 오차	57
그림 6-4	방향성 결합기의 방향성 영향	57
그림 6-5	신호원 정합의 영향(source match)	58
그림 6-6	부하 정합의 영향(load match)	59

그림 6-7	반사계수 측정의 오차원인	60
그림 6-8	S_{11} 의 측정	61
그림 6-9	2-포트 소자의 전송계수 측정의 주된 오차원인	62
그림 6-10	전 2-포트 오차 모델	62
그림 6-11	동작영역 정확도	66
그림 6-12	케이블의 안정도의 측정 예 (C_{R1} , C_{R2})	68
그림 6-13	케이블의 양방향 전송 안정도	69
그림 6-14	케이블의 양방향 위상 안정도	69
그림 6-15	반사계수 측정 오차(크기 및 위상)	75
그림 6-16	전송계수 측정 오차(크기 및 위상)	76
그림 7-1	안테나에서 복사된 장의 분류	78
그림 7-2	안테나에서 복사되는 전자기장의 특성	79
그림 7-3	안테나 정수들 사이의 관계	83
그림 7-4	전기장 측정 시스템	89
그림 7-5	자기장 측정 시스템	90
그림 7-6	표준 안테나 법을 이용한 안테나 인자 교정법	92
그림 7-7	기준 시험장 법을 이용한 안테나 인자 교정법	94
그림 7-8	표준 전기장 법을 이용한 안테나 교정법	97
그림 7-9	기준 점에서 전기장의 세기를 구하기 위한 기하학적 구조	98
그림 7-10	표준 자기장 법을 이용한 안테나 교정법	99
그림 7-11	복사성 방출 측정을 위한 장비의 기본구성	101

제 1 장 서 론

WTO 체제의 출범 후 세계 각 국은 무한 경쟁이 이루어지고 있는 세계 무역 시장에서 자국의 경제적 이익 보장과 보호를 위하여 EU, NAFTA나 ASIAN 등에서 보듯이 경제 블록화가 뚜렷하게 나타나고 있으며 이러한 현상은 앞으로 더욱 심화되리라고 보는 것이 일반적인 견해이다.

특히, WTO 체제 하에서 각 국은 상호간의 무역상의 기술장벽 해소와 수출상품에 대한 이중 검사를 방지하기 위해서 국가간 또는 다자간 상호인정협정(MRA)의 체결 및 적합성 평가 활동이 국제적으로 활발히 전개되고 있다.

우리나라도 ISO(International Organization for Standardization : 국제표준화기구), IEC (International Electro-technical Commission:국제전기기술위원회), ILAC(The International Laboratory Accreditation Cooperation : 국제시험소인정기구), PASC(Pacific Area Standards Congress: 태평양지역표준회의) 및 APEC(Asia Pacific Economic Cooperation: 아시아태평양경제협력체) 등의 국제기구를 통한 활동이 활발하다. 특히 APEC 산하 기구인 SCSC (Sub Committee on Standards and Conformance: 표준적합소위원회), TEL (Telecommunications Working Group) 및 EWG(Energy Working Group) 등의 활동에 각 부처가 참여하여 여러 분야에서 상호인정협정이 추진중에 있으며 이러한 활동은 지역간 또는 국제적으로 더욱 활발하게 진행될 것이다.

이와 같이 국제적으로 활발하게 논의되고 있는 MRA의 원활한 시행을 위해서는 국제적 변화 추세에 능동적으로 대처 가능한 국내 기반 기술의 확립이 무엇보다도 시급하게 해결해야할 과제이다. 특히, 무선통신과 EMC 분야의 MRA를 통한 시험소간 상호인정협정에 앞서 우선적으로 확립해야 할 원천 기술인 전자파 분야의 표준을 국제적 기준에 적합하도록 확립시키는 것이 필요한 시점이다.

본 연구인 “교정용 측정기기 표준 교정방법 연구”는 전자파를 이용하는 무선 통신 분야의 시험·적합성 평가 및 국제 교역의 토대를 구축하는데 기반이 되는 전자파 측정기술을 개발하여 국제 표준의 요건에 적합한 교정기술 및 교정절차를 확립함으로써 국제적 요건을 충족시키는 국가교정 기관으로서 위상을 정립하고, 국제적 변화에 능동적으로 대처할 기반을 마련하는 것이다.

제 2 장 2-포트 회로망의 해석

제 1 절 산란계수

그림 2-1과 같이 신호원과 부하 사이에 2-포트 회로망이 연결되어 있는 경우 2-포트 회로망의 특성을 산란계수(S-parameter)를 이용하여 표현하여 보자. 그림 2-1에서 a_1 과 b_1 은 각각 2-포트 회로망의 입력에서 입사파와 반사파의 진폭을 나타내고, a_2 와 b_2 는 2-포트 회로망의 출력에서 입사파와 반사파의 진폭을 나타낸다. 이들의 관계를 산란계수로 나타내면 식 (2-1)과 같다.

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 \quad (2-1 \text{ a})$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 \quad (2-1 \text{ b})$$

식 (2-1)의 산란계수인 S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} 의 정의와 특성을 살펴보면 식 (2-2)와 같다.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2-2 \text{ a})$$

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_2=0} \quad (2-2 \text{ b})$$

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_1} \Big|_{a_1=0} \quad (2-2 \text{ c})$$

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big|_{a_1=0} \quad (2-2 \text{ d})$$

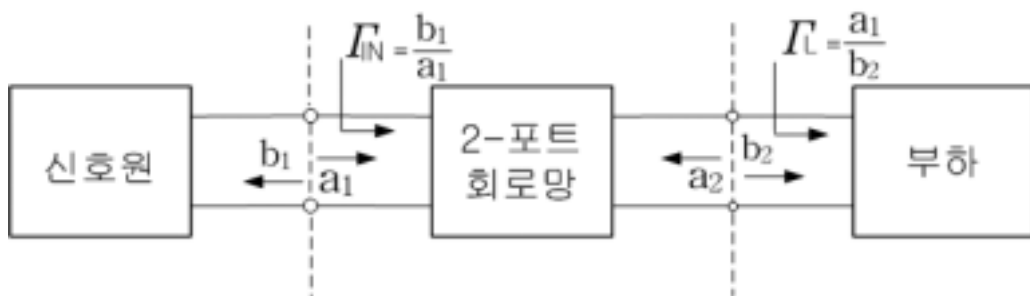


그림 2-1 2-포트 회로망

식 (2-2 a)의 S_{11} 은 2-포트 회로망의 부하가 무반사 부하인 경우 2-포트 회로망의 입력, 즉 포트-1에서 2-포트 회로망의 입력 방향을 바라본 반사계수를 나타낸다. 식 (2-2 b)의 S_{21} 은 포트-2의 부하가 무반사 부하인 경우 2-포트 회로망의 입력 신호 진폭과 출력 신호 진폭의 비로 순방향 전송계수를 나타낸다. 식 (2-2 c)의 S_{22} 는 2-포트 회로망의 입력인 포트-1의 부하(신호원 임피던스)가 무반사 부하인 경우 2-포트 회로망의 출력, 즉 포트-2에서 2-포트 회로망의 출력 방향을 바라본 반사계수를 나타낸다. 식 (2-2 d)의 S_{12} 는 포트-1의 부하(신호원 임피던스)가 무반사 부하인 경우 2-포트 회로망의 출력 신호 진폭과 입력 신호 진폭의 비로 역방향 전송계수를 나타낸다.

제 2 절 2-포트 회로망의 입 · 출력 반사계수

2-포트 회로망의 입력과 출력에서 반사계수를 구하기 위하여 그림 2-2를 생각하여 보자.

그림 2-2 에서 b_S 는 2-포트 회로망의 입력이 정합 된 경우 즉, $\Gamma_{IN} = 0$ 인 경우 신호원에서 공급되는 파의 진폭이다. 그러나 일반적으로 완전하게 정합 된 경우는 없으므로 2-포트 회로망에 입사한 파 b_S 는 2-포트 회로망의 입력에서 반사되어 신호원으로 되돌아가고 ($b_S \Gamma_{IN}$), 이는 신호원에서 다시 반사되어 돌아온다($b_S \Gamma_{IN} \Gamma_S$). 이와 같은 과정이 반복되어 신호원으로 돌아온 파의 합은 식 (2-3)과 같이 나타내진다.

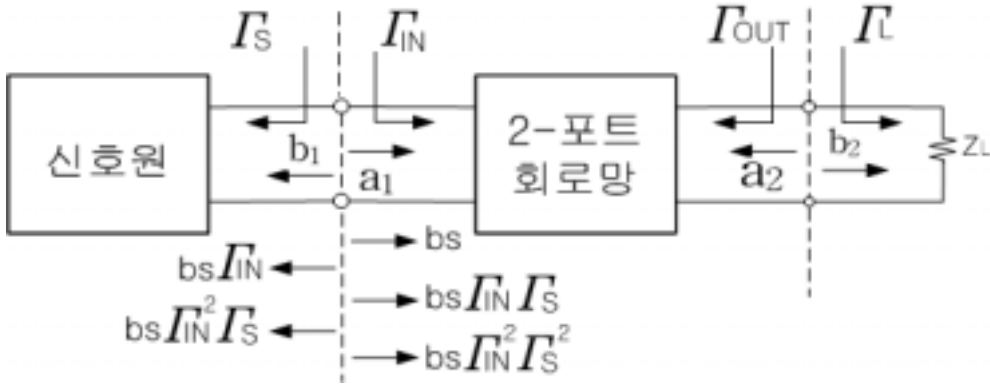


그림 2-2 신호원과 2-포트 회로망 사이의 반사파

$$\begin{aligned}
 b_1 &= b_S \Gamma_{IN} [1 + \Gamma_{IN} \Gamma_S + (\Gamma_{IN} \Gamma_S)^2 + \dots] \\
 &= \frac{b_S \Gamma_{IN}}{1 - \Gamma_{IN} \Gamma_S}
 \end{aligned} \tag{2-3}$$

식 (2-3)에서

$$\Gamma_{IN} = \frac{b_1}{a_1} = \frac{Z_{IN} - Z_0}{Z_{IN} + Z_0} \tag{2-4}$$

$$\Gamma_S = \frac{Z_S - Z_0}{Z_S + Z_0} \tag{2-5}$$

이다.

식 (2-4)와 식 (2-5)에서 Z_{IN} 과 Z_0 는 각각 회로망의 입력 임피던스와 특성임피던스를 나타낸다.

식 (2-3)에 식 (2-4)를 대입하면 식 (2-6)을 얻는다.

$$b_1 = \frac{b_S b_1}{a_1 - \Gamma_S b_1} \tag{2-6}$$

식 (2-4)와 식 (2-6)으로부터 2- 포트 회로망의 입력에 입사하는 신호인 a_1 은 식 (2-7)과 같이 구해진다.

$$a_1 = \frac{b_S}{1 - \Gamma_{IN} \Gamma_S} \quad (2-7)$$

그림 2-2의 출력에서 2-포트 회로망의 출력 반사계수 Γ_{OUT} 과 부하 반사계수 Γ_L 은 각각 식 (2-8)과 식 (2-9)와 같다.

$$\Gamma_{OUT} = \frac{b_2}{a_2} \quad (2-8)$$

$$\Gamma_L = \frac{a_2}{b_2} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2-9)$$

제 3 절 2-포트 회로망의 입 · 출력 전력

그림 2-2의 2-포트 회로망의 입력에 전달되는 전력과 2- 포트 회로망에 연결된 부하에 전달되는 전력을 2-포트 회로망의 산란계수와 반사계수를 이용하여 구하는 방법에 대하여 살펴보자.

식 (2-1)에 식 (2-9)를 대입하면 식 (2-10)을 얻는다.

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} \Gamma_L b_2 \quad (2-10 \text{ a})$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} \Gamma_L b_2 \quad (2-10 \text{ b})$$

식 (2-10)에서 b_2 를 소거하고 Γ_{IN} 을 구하면 식 (2-11)과 같다.

$$\Gamma_{IN} = \frac{b_1}{a_1} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} = \frac{S_{11} - \Delta \Gamma_L}{1 - S_{22}\Gamma_L} \quad (2-11)$$

같은 방법으로 식 (2-1)에 식 (2-5)를 대입하고, b_1 를 소거하고 Γ_{OUT} 을 구하면 식 (1-12)와 같다.

$$\Gamma_{OUT} = \frac{b_2}{a_2} = S_{22} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} = \frac{S_{22} - \Delta \Gamma_S}{1 - S_{11}\Gamma_S} \quad (2-12)$$

식 (2-11)과 식 (2-12)에서 $\Delta = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$ 이다.

신호원으로부터 2-포트 회로망에 전달되는 전력은 회로망에 입사한 전력에서 반사한 전력의 차에 해당함으로 식 (2-13)과 같이 구해진다.

$$P_{D1} = \frac{|a_1|^2}{Z_0} - \frac{|b_1|^2}{Z_0} = \frac{|a_1|^2}{Z_0}(1 - |\Gamma_{IN}|^2) \quad (2-13)$$

식 (2-13)에 식 (2-7)을 대입하면 식 (2-14)를 얻는다.

$$P_{D1} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{(1 - |\Gamma_{IN}|^2)}{|1 - \Gamma_{IN}\Gamma_S|^2} \quad (2-14)$$

식 (1-14)는 식 (1-15 a)와 식 (1-15 b)와 같이 입사파 전력과 반사파 전력으로 구성된다.

$$P_{D1} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{1}{|1 - \Gamma_{IN}\Gamma_S|^2} \quad (2-15 \text{ a})$$

$$P_{DR1} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{|\Gamma_{IN}|^2}{|1 - \Gamma_{IN}\Gamma_S|^2} \quad (2-15 \text{ b})$$

신호원에서 가용 가능한 전력 P_{AVS} 는 신호원에서 회로망에 공급할 수 있는 최대 전력이다. 이는 신호원 임피던스와 회로망의 입력 임피던스가 공액 복소수로 같을 때이다. 따라서 (2-14)에서 $\Gamma_{IN} = \Gamma_S^*$ 인 경우 식 (2-16)과 같이 구해진다.

$$P_{AVS} = P_{DI} \mid_{\Gamma_{IN} = \Gamma_S^*} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{1}{1 - |\Gamma_S|^2} \quad (2-16)$$

식 (2-16)은 식 (2-17 a)와 식 (2-17 b)와 같이 입사파와 반사파로 구성된다.

$$P_{AVSI} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{1}{(1 - |\Gamma_S|^2)^2} = \frac{P_{AVS}}{1 - |\Gamma_S|^2} \quad (2-17 \text{ a})$$

$$P_{AVSR} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \frac{|\Gamma_S|^2}{(1 - |\Gamma_S|^2)^2} = P_{AVS} \frac{|\Gamma_S|^2}{1 - |\Gamma_S|^2} \quad (2-17 \text{ b})$$

2-포트 회로망의 입력이 무반사 조건을 만족시키면 2-포트 회로망의 입력에 전달되는 순 전력은 식 (2-14)로부터 식 (2-18)과 같이 나타내 진다.

$$P_{01} = \frac{|b_S|^2}{Z_0} \quad (2-18)$$

식 (2-16)과 식 (2-18)을 비교하여볼 때 P_{01} 은 신호원이 무반사일 경우 ($\Gamma_S = 0$)에는 P_{AVS} 와 같지만 그 외에는 작은 값을 갖는다.

마찬가지로 부하에 공급되는 전력은 식 (2-19)과 같이 구해진다.

$$P_{DL} = \frac{|b_2|^2}{Z_0} - \frac{|a_2|^2}{Z_0} = \frac{|b_2|^2}{Z_0}(1 - |\Gamma_L|^2) \quad (2-19)$$

회로망에서 가용 가능한 전력 P_{AVN} 은 회로망에서 부하에 공급할 수 있는 최대 전력이다. 이는 회로망의 출력 임피던스와 부하 임피던스가 공액 복소수로 같을 때이다. 따라서 식 (2-19)로 부터 $\Gamma_L = \Gamma_{OUT}^*$ 인 경우 식 (2-20)과 같이 구해진다.

$$P_{AVN} = P_{DL} |_{\Gamma_L = \Gamma_{OUT}^*} = \frac{1}{Z_0} |b_2|^2 (1 - |\Gamma_{OUT}|^2) \quad (2-20)$$

신호원에서 입사하는 입사파 b_s 와 회로망에서 부하로 입사하는 b_2 의 비는 식 (2-7)과 식 (2-10 b)로부터 식 (2-21)과 같이 구해진다.

$$\frac{b_2}{b_s} = \frac{S_{21}}{(1 - S_{22}\Gamma_L)(1 - \Gamma_{IN}\Gamma_S)} \quad (2-21)$$

식 (2-21)에 식 (2-11)을 대입하면 회로망에서 부하로 입사하는 파와 신호원에서 회로망으로 입사하는 파의 비를 나타내는 식 (2-22)를 얻는다.

$$\frac{b_2}{b_s} = \frac{S_{21}}{(1 - S_{11}\Gamma_S)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_S\Gamma_L} \quad (2-22)$$

제 4 절 2-포트 회로망의 전송특성

2-포트 회로망의 전송 특성을 분석하기 위해서는 대체 손실(substitution loss)의 개념을 이해하는 것이 중요하다. 이 대체 손실의 개념을 이해함으로써

이 대체 손실의 특별한 경우인 변환손실, 삽입 손실 및 감쇠량의 개념을 이해할 수 있게 된다.

1. 대체손실

그림 2-2의 2-포트 회로망 시스템에서 하나의 2-포트 회로망이 신호원과 부하 사이에서 제거되고 다른 2-포트 회로망이 연결될 때 부하에 전달되는 순전력의 비를 dB 단위로 표시한 것을 대체손실이라 한다.

식 (2-22)를 이용하여 대체 손실을 구하면 식 (2-23)과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 L_S &= 10 \log_{10} \frac{i_{P_{DL}}}{f_{P_{DL}}} \\
 &= 20 \log_{10} \left| \frac{i_{S_{21}}[(1-f_{S_{11}\Gamma_S})(1-f_{S_{22}\Gamma_L})-f_{S_{12}}f_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}]}{f_{S_{21}}[(1-i_{S_{11}\Gamma_S})(1-i_{S_{22}\Gamma_L})-i_{S_{12}}i_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}]} \right| \quad (2-23)
 \end{aligned}$$

식 (2-23)에서 i 와 f 표기는 초기조건과 최종 조건을 각각 나타낸다. 이 식의 조건은 2-포트 회로망을 교체했을 때 신호원과 부하의 반사계수는 2-포트 회로망에 의하여 영향을 받지 않는다는 점이다.

식 (2-23)은 증폭기 등의 이득을 나타낼 때에는 - 값을 가지게 될 것이고, 특히 가변 감쇠기의 감쇠량을 측정할 경우에 감쇠량의 한 값에서 다른 값으로 감쇠량 값을 변화시킬 경우 물리적으로는 감쇠기를 제거하고 다른 감쇠기를 연결하는 것은 아니지만 원리적으로는 같은 효과가 나타나기 때문에 유용하게 이용되는 식이다.

2. 변환 손실

대체 손실의 특별한 경우로서 초기의 결합 조건이 완전한 변환기인 경우 신호원으로부터 가용 전력은 모두 부하에 전달된다. 여기서 완전한 변환기라 함은 무손실이고 부하 임피던스가 신호원 임피던스와 공액 복소수의 관계가 있는 경우이다. 식 (2-16), 식 (2-19)와 식 (2-22)로부터 변환 손실을 구하면

식 (2-24)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 L_T &= 10 \log_{10} \frac{P_{AVS}}{P_{DL}} \\
 &= 10 \log_{10} \frac{|(1 - S_{11}\Gamma_S)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_S\Gamma_L|^2}{|S_{21}|^2(1 - |\Gamma_S|^2)(1 - |\Gamma_L|^2)} \quad (2-24)
 \end{aligned}$$

3. 삽입 손실

대체 손실의 또 다른 특별한 경우로서 초기의 2-포트 회로망이 완전한 컨넥터와 어댑터인 경우에 부하에 전달되는 전력 사이의 비로 나타내는 것이 삽입 손실이다. 여기서 완전하다는 말은 손실이 없고, 반사와 위상 천이가 없는 경우를 말한다.

식 (2-14)에서 Γ_{IN} 을 Γ_L 로 대치하고, 식 (2-19)와 비를 취한 뒤 식 (2-22)를 대입하면 식 (2-25)를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 L_I &= 10 \log_{10} \frac{i_{P_{DL}}}{f_{P_{DL}}} \\
 &= 10 \log_{10} \frac{|(1 - S_{11}\Gamma_S)(1 - S_{22}\Gamma_L) - S_{12}S_{21}\Gamma_S\Gamma_L|^2}{|S_{21}(1 - \Gamma_S\Gamma_L)|^2} \quad (2-25)
 \end{aligned}$$

4. 감쇠량 (특성 삽입손실)

2-포트 회로망의 특성을 나타내는 유용한 방법이 감쇠량이다. 이 감쇠량은 무반사 시스템에 위치시킨 2-포트 회로망의 변환 손실 또는 삽입 손실로 나타낼 수 있다. 식 (2-24)와 식 (2-25)에서 $\Gamma_S = \Gamma_L = 0$ 인 경우 식 (2-26)을 얻는다.

$$A = 10 \log_{10} \frac{1}{|S_{21}|^2} \quad (1-26)$$

식 (2-26)으로 나타낸 감쇠량이 감쇠량 표준 확립시 실제 측정하기 위한 감쇠량 값이다.

제 3 장 신호 흐름도를 이용한 마이크로파 회로망의 해석

신호 흐름도는 RF와 마이크로파 회로의 전자기파의 전송과 반사 특성을 분석을 통하여 도입된 아주 유용한 기술이다. 신호 흐름도가 완성되면 각 변수들간의 관계는 Mason의 법칙에 의하여 구할 수 있다. 이 신호 흐름도를 이해하면 감쇠량이나 전력 측정 및 증폭기 등의 회로 특성 등을 쉽게 유추해 낼 수 있다.

신호 흐름도를 만드는 규칙은 다음과 같다:

- (1) 각 변수들은 절점(node)들로 나타낸다.
- (2) S-파라미터들이나 반사계수들은 가지(branch)들로 나타낸다.
- (3) 가지들은 종속 변수 절점으로 들어가고, 독립 변수 절점들에서 나온다.

식 (2-1)로 주어지는 2-포트 회로망의 입·출력에서 반사파의 진폭인 b_1 과 b_2 를 신호 흐름도를 만드는 규칙을 이용하여 나타내면 그림 3-1과 같다.

그림 3-1에서 b_1 과 b_2 는 종속 절점이고, a_1 과 a_2 는 독립 절점이다.

그림 3-1은 그림 2-1의 2-포트 회로망의 입·출력 특성을 나타낸 것으로 2-포트 회로망의 포트-1에 입사하는 파의 진폭인 a_1 의 일부는 전송되어 ($S_{21}a_1$)서 b_2 의 일부가 되고, 일부는 반사되어($S_{11}a_1$)서 b_1 의 일부가 된다. 또한 포트-2에 입사하는 파의 진폭인 a_2 의 일부는 전송되어($S_{12}a_2$)서 b_1 의 일부가 되고, 일부는 반사되어($S_{22}a_2$)서 b_2 의 일부가 된다.

RF나 마이크로파 회로의 신호 흐름도를 얻기 위해서는 내부 임피던스를 가지는 신호원의 신호 흐름도와 부하 임피던스의 신호 흐름도가 필요하다. 신호원과 부하의 신호 흐름도를 고려하여 그림 2-2의 2-포트 회로망을 신호 흐름도로 나타내면 그림 3-2와 같이 된다.

신호 흐름도에서 독립변수에 대한 종속변수의 비(또는 전달함수)를 구하기 위하여 Mason의 법칙을 사용한다.

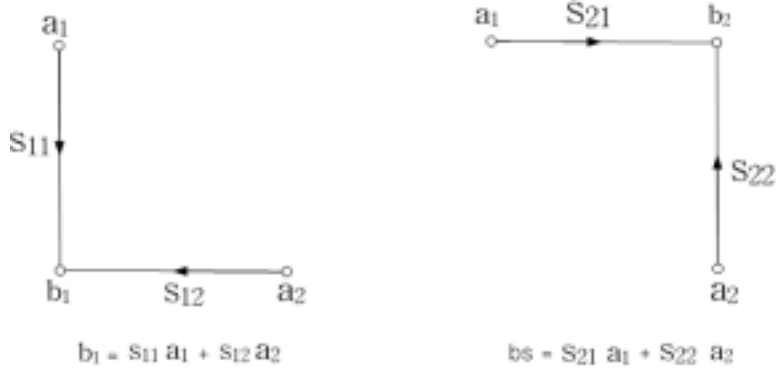


그림 3-1 S-파라미터를 신호 흐름도로 표현

$$T = \frac{P_1[1 - \sum L(1)^{(1)} + \sum L(2)^{(2)} - \dots] + P_2[1 - \sum L(1)^{(2)} + \dots] + \dots}{1 - \sum L(1) + \sum L(2) - L(3) + \dots} \quad (3-1)$$

식 (3-1)에서 P_1, P_2, P_3, \dots 등은 독립변수들과 종속변수들을 연결하는 다른 경로들을 나타낸다. 여기서 경로라 함은 독립 절점에서 종속 절점에 도달하는 모든 독립된 경로를 말한다. 이 때 경로의 값은 경로를 따른 모든 가지의 계수들의 곱이다. 예를 들어 그림 3-2에서 b_S 만이 독립변수이다. b_1/b_S 의 비를 구하기 위해서 필요한 경로는 $P_1 = S_{11}$ 과 $P_2 = S_{21}\Gamma_L S_{12}$ 이다.

$\sum L(1)$ 은 1차 루프의 합이다. 1차 루프는 한 절점에서 화살표를 따라 되돌아가는 루프에서 만나는 가지 계수들의 곱이다. 그림 3-2에서 $S_{11}\Gamma_S$, $S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S$ 과 $S_{22}\Gamma_L$ 등이 1차 루프이다.

$\sum L(2)$ 는 모든 2차 루프들의 합이다. 2차 루프는 서로 접촉이 없는 두 개의 1차 루프들의 곱이다. 그림 3-2에서 $S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L$ 이 2차 루프이다.

$\sum L(3)$ 는 모든 3차 루프들의 합이다. 3차 루프는 서로 접촉이 없는 세 개의 1차 루프들의 곱이다. 그림 3-2의 경우는 3차 루프들이 없다.

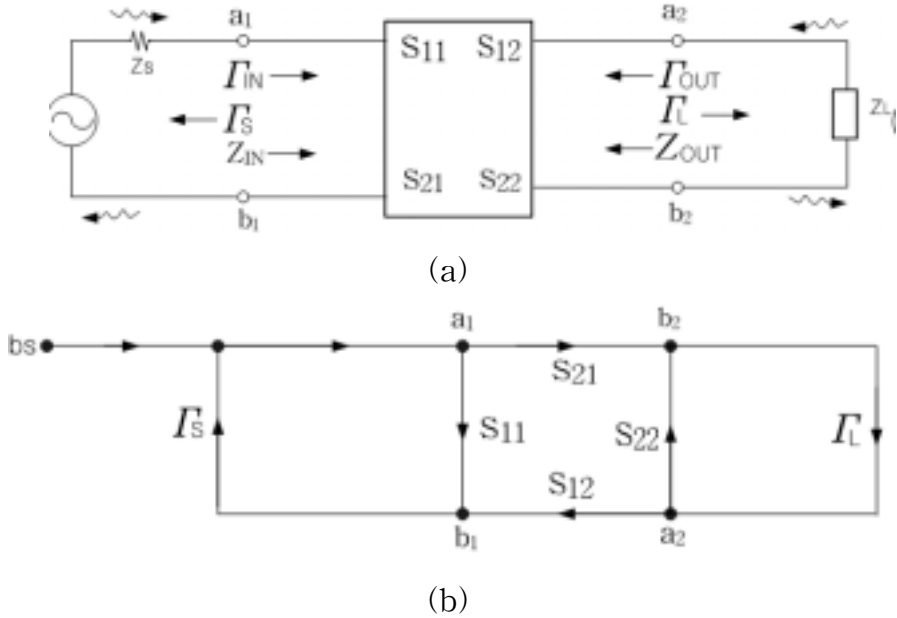


그림 3-2 2-포트 회로망의 신호 흐름도

$\sum L(4)$, $\sum L(5)$ 등은 4차, 5차 등의 고차 루프들을 나타낸다.

$\sum L(1)^{(b)}$ 는 독립변수와 종속변수 사이를 연결하는 경로 P와 접촉이 없는 모든 1차 루프의 합이다. 그림 3-1에서 경로 $P_1 = S_{11}$ 에 있어서는 $\sum L(1)^{(1)} = \Gamma_L S_{22}$ 이다. 그리고 경로 $P_2 = S_{21} \Gamma_L S_{12}$ 에 있어서는 $\sum L(1)^{(2)} = 0$ 이다.

$\sum L(2)^{(b)}$ 는 독립변수와 종속변수 사이를 연결하는 경로 P와 접촉이 없는 모든 2차 루프의 합이다. $\sum L(3)^{(b)}$ 과 $\sum L(4)^{(b)}$ 등은 경로 P와 접촉이 없는 고차 루프를 나타낸다.

따라서 그림 3-2의 신호 흐름도에 Mason의 정리를 이용하여 b_1/b_s 을 구하면 식 (3-2)와 같다.

$$\frac{b_1}{b_s} = \frac{S_{11}(1 - \Gamma_L S_{22}) + S_{21} \Gamma_S S_{12}}{(1 - S_{11} \Gamma_S)(1 - S_{22} \Gamma_L) - S_{21} \Gamma_L S_{12} \Gamma_S} \quad (3-2)$$

제 4 장 감쇠량 측정

제 1 절 감쇠량의 정의

그림 2-2에서 2-포트 회로망을 제거하고 신호원과 부하가 직접 연결된 그림 4-1 (a)에서 부하에 전달되는 전력을 P_{d1} 이라 하고, 신호원과 부하 사이에 2-포트 회로망이 연결된 그림 4-1 (b)에서 부하에 전달되는 전력을 P_{d2} 이라 하면 삽입 손실은 식 (4-1)와 같이 정의된다.

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{P_{d1}}{P_{d2}} \quad (4-1)$$

감쇠량은 정의에 의하여 $\Gamma_S = 0$, $\Gamma_L = 0$ 인 경우의 삽입 손실이다.

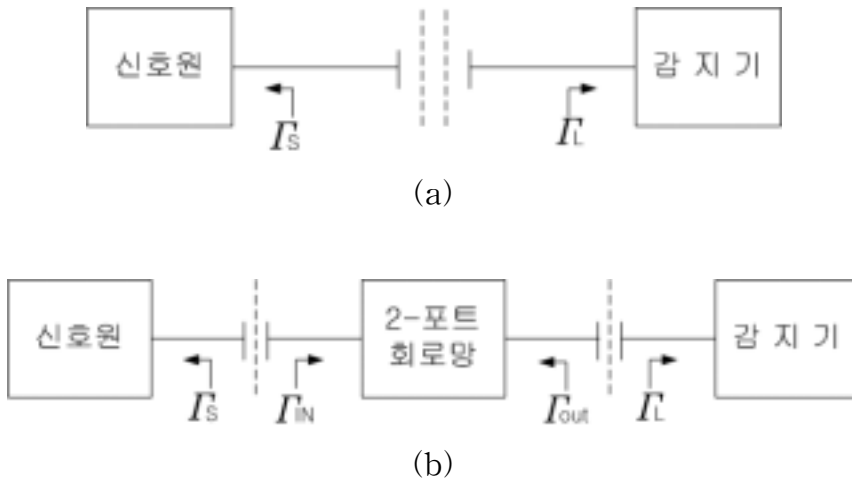


그림 4-1 감쇠량 측정 원리

(a) 측정 시스템, (b) 측정 시스템에 2-포트 회로망 삽입

제 2 절 고정 감쇠량의 측정

1. 고정 감쇠량 표현

그림 3-2의 신호 흐름도에 Mason 정리를 이용하여 b_2/b_S 를 구하기 위해
서 필요한 값은 $P_1 = S_{21}$, , $\sum L(1) = S_{11}\Gamma_S + S_{22}\Gamma_L + S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S$,
 $\sum L(2) = S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L$ 과 $\sum L(1)^{(1)} = 0$ 이다. 따라서 식 (3-1)을 이용하면
식 (4-2)을 얻는다.

$$\frac{b_2}{b_S} = \frac{S_{21}}{1 - (S_{11}\Gamma_S + S_{22}\Gamma_L + S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S) + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L} \quad (4-2)$$

P_{d2} 는 식 (2-19)와 같으므로 식 (4-3)와 같이 나타내진다.

$$P_{d2} = \frac{|b_2|^2}{Z_0} - \frac{|a_2|^2}{Z_0} = \frac{|b_2|^2}{Z_0} (1 - |\Gamma_L|^2) \quad (4-3)$$

식 (4-2)를 b_2 에 대하여 정리하여 식 (4-3)에 대입하면 식 (4-4)를 얻는다.

$$P_{d2} = \frac{|b_S|^2 |S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)}{Z_0 |1 - (S_{11}\Gamma_S + S_{22}\Gamma_L + S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S) + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L|^2} \quad (4-4)$$

P_{d1} 은 식 (4-4)에서 $S_{11}=0$, $S_{22}=0$ 와 $S_{21}=S_{12}=1$ 인 경우에 해당함
으로 식 (4-5)로 나타내 진다.

$$P_{d2} = \frac{|b_S|^2 (1 - |\Gamma_L|^2)}{Z_0 |1 - \Gamma_L \Gamma_S|^2} \quad (4-5)$$

식 (4-4)와 식 (4-5)를 식 (4-1)에 대입하면 삽입 손실은 식 (4-6)과 같이 구해진다.

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{|1 - (S_{11}\Gamma_S + S_{22}\Gamma_L + S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S) + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L|^2}{|S_{21}|^2 |1 - \Gamma_S \Gamma_L|^2} \quad (4-6)$$

식 (4-6)은 식 (2-25)와 같은 결과가 됨을 알 수 있다.

2-포트 회로망의 감쇠량은 삽입손실을 나타내는 식 (4-6)에서 $\Gamma_S = 0$, $\Gamma_L = 0$ 인 경우이므로 식 (4-7)과 같이 구해진다.

$$A = 10 \log_{10} \frac{1}{|S_{21}|^2} \quad (4-7)$$

2. 고정 감쇠량에 포함된 부정합 오차

2-포트 회로망의 감쇠량 측정시 신호원과 부하가 완전하게 정합이 되어 있지 않으면 측정결과에 오차가 포함되게 되는데 이를 부정합 오차라 부른다. 이는 감쇠량을 측정하는 것이 아니라 삽입 손실을 측정하기 때문이며, 식 (4-6)과 식 (4-7)로부터 식 (4-8)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} M &= L_I - A \\ &= 10 \log_{10} \frac{|1 - (S_{11}\Gamma_S + S_{22}\Gamma_L + S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S) + S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_L|^2} \end{aligned} \quad (4-8)$$

식 (4-8)을 살펴볼 때 모든 변수들은 복소수로 크기와 위상을 갖게된다. 따라서 식 (4-8)의 오차 범위는 식 (4-9)로 나타내 진다.

$$M_{error} = 20 \log_{10} \frac{1 \pm |S_{11}\Gamma_S| \pm |S_{22}\Gamma_L| \pm |S_{21}\Gamma_L S_{12}\Gamma_S| \pm |S_{11}\Gamma_S S_{22}\Gamma_L|}{|1 \mp \Gamma_S \Gamma_L|} \quad (4-9)$$

그림 4-2는 감쇠량이 20 dB보다 큰 경우 식 (4-9)를 이용하여 구한 감쇠량 값에 포함된 부정합 오차들을 나타내는 곡선이다. 이 그림에는 반사계수 대신에 VSWR을 이용하여 부정합 오차를 계산하였다. 반사계수의 크기와 VSWR과의 관계는 식 (4-10)으로부터 구해진다.

$$VSWR = \frac{1 + |F|}{1 - |F|} \quad (4-10)$$

2-포트 회로망이 대칭적이고 VSWR이 1.05인 경우에 부정합 오차를 0.001 dB 이하로 하기 위해서는 신호원과 부하 VSWR을 1.005이하로 하여야함을 그림 4-2으로 부터 알 수 있다.

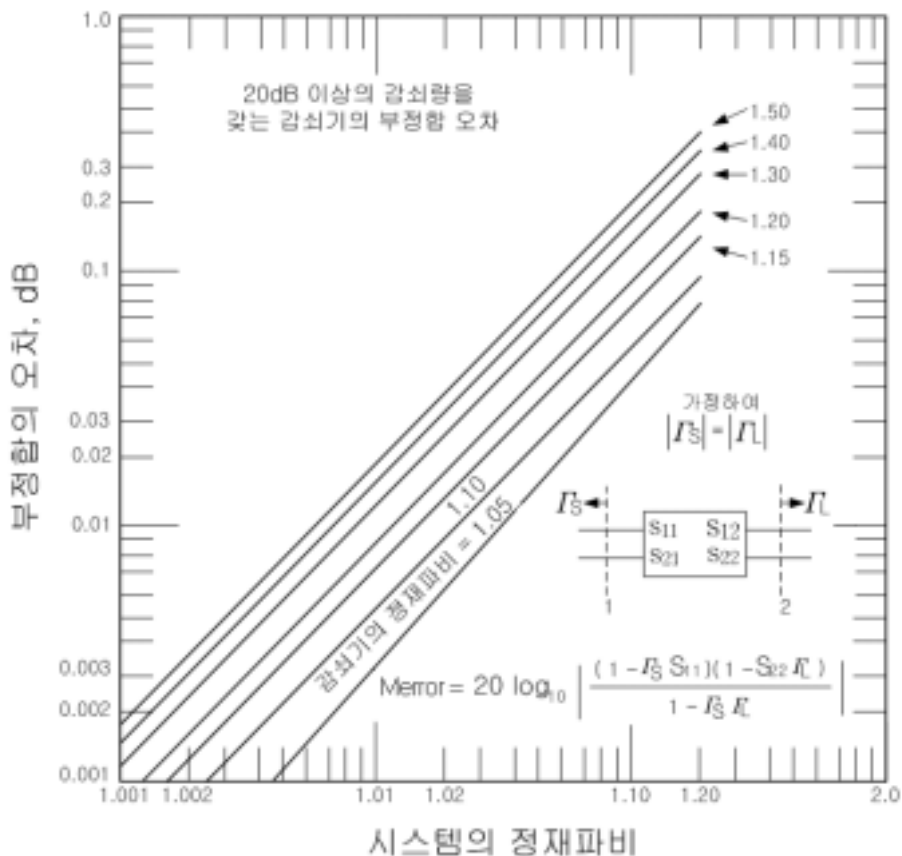


그림 4-2 부정합 오차(감쇠량 20 dB 이상)

제 3 절 가변 감쇠량 측정

1. 가변 감쇠량의 표현

제2절에서 다른 고정 감쇠량에 대한 내용을 가변 감쇠기로 확장하여 생각하여 보자. 특히 감쇠량의 변화에 따른 오차는 가변 감쇠량의 측정이나 감쇠량값이 큰 감쇠기의 교정시 매우 중요하다.

가변 감쇠기의 교정은 감쇠기를 기준 값에서 다른 값으로 변화시킬 때 무반사 신호원과 무반사 부하 사이에서 측정하면 구할 수 있으나 실제의 경우 무반사 신호원과 무반사 부하 조건을 만족시키는 경우가 드물므로 측정값에 부정합 오차가 포함된다.

가변 감쇠에는 연속적으로 감쇠량 값을 변화시킬 수 있는 감쇠기와 스텝 별로 변화시킬 수 있는 감쇠기가 있다. 가변 감쇠량 값을 구하기 위하여 한 기준 감쇠량에서 다른 감쇠량으로 변화시키는 것은 그림 4-3과 같이 한 감쇠기를 제거하고 다른 감쇠기를 연결하는 것과 같은 효과를 가진다.

가변 감쇠기의 초기 기준 값에서 dB로 표시한 삽입 손실은 식 (4-6)으로부터 식 (4-11)과 같이 구해진다.

$$i_L = 20 \log_{10} \left| \frac{(1 - i_{S_{11}\Gamma_S})(1 - i_{S_{22}\Gamma_L}) - i_{S_{12}} i_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}}{i_{S_{21}}(1 - \Gamma_S\Gamma_L)} \right| \quad (4-11)$$

식 (4-11)에서 Γ_S 와 Γ_L 은 신호원과 부하의 반사계수를 각각 나타내고, 이들은 감쇠기가 삽입되는 점에서 측정된다. 산란계수 S_{11} , S_{12} , S_{21} 과 S_{22} 는 가변감쇠기의 초기 기준 값에서 측정한 값이다.

가변 감쇠기를 초기값에서 변화시켜 다른 값으로 조정했을 때 의 삽입 손실은 식 (4-12)과 같다.

$$f_L = 20 \log_{10} \left| \frac{(1 - f_{S_{11}\Gamma_S})(1 - f_{S_{22}\Gamma_L}) - f_{S_{12}} f_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}}{f_{S_{21}}(1 - \Gamma_S\Gamma_L)} \right| \quad (4-12)$$

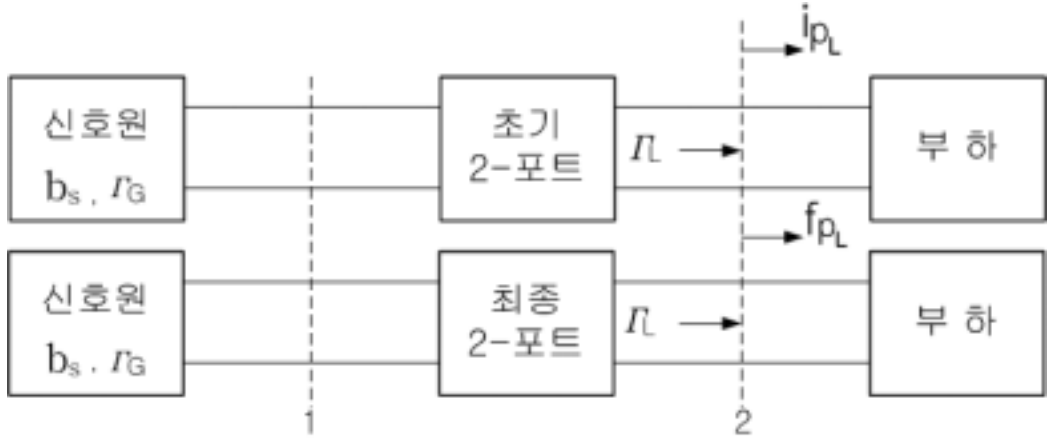


그림 4-3 가변 감쇠량의 측정 원리

식 (4-12)에서 식 (4-11)을 빼서 삽입 손실을 구하면 식 (4-12)을 얻는다.

$$\begin{aligned} \Delta L &= f_L - i_L \\ &= 20 \log_{10} \left| \frac{i_{S_{21}}[(1 - f_{S_{11}\Gamma_S})(1 - f_{S_{22}\Gamma_L}) - f_{S_{12}}f_{S_{21}}\Gamma_S\Gamma_L]}{f_{S_{21}}[(1 - i_{S_{11}\Gamma_S})(1 - i_{S_{22}\Gamma_L}) - i_{S_{12}}i_{S_{21}}\Gamma_S\Gamma_L]} \right| \quad (4-13) \end{aligned}$$

식 (4-13)는 식 (2-23)의 대체 손실과 같은 값이 된다.

식 (4-13)에서 가변 감쇠기의 감쇠량 값을 얻기 위하여 $\Gamma_S = 0$ 과 $\Gamma_L = 0$ 을 대입하면 식 (4-14)와 같이 구해진다. 이 값이 가변 감쇠기의 증분 감쇠량이다.

$$\Delta A = = 20 \log_{10} \left| \frac{i_{S_{21}}}{f_{S_{21}}} \right| \quad (4-14)$$

2. 가변 감쇠량에 포함된 부정합 오차

가변 감쇠기의 순수한 감쇠량 변화는 식 (4-14)이다. 따라서 삽입 손실의

변화를 나타내는 식 (4-13)에는 부정합 오차가 포함되어있다.

부정합 오차를 구하기 위하여 식 (4-13)를 정리하면 식 (4-15)와 같이 나타내진다.

$$\begin{aligned}
 \Delta L &= 20 \log_{10} \left| \frac{i_{S_{21}}[(1-f_{S_{11}\Gamma_S})(1-f_{S_{22}\Gamma_L})-f_{S_{12}}f_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}]}{f_{S_{21}}[(1-i_{S_{11}\Gamma_S})(1-i_{S_{22}\Gamma_L})-i_{S_{12}}i_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}]} \right| \\
 &= 20 \log_{10} \frac{1}{|f_{S_{21}}|} - 20 \log_{10} \frac{1}{|i_{S_{21}}|} \\
 &\quad + 20 \log_{10} \left| \frac{(1-f_{S_{11}\Gamma_S})(1-f_{S_{22}\Gamma_L})-f_{S_{12}}f_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}}{(1-i_{S_{11}\Gamma_S})(1-i_{S_{22}\Gamma_L})-i_{S_{12}}i_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}} \right| \\
 &= f_A - i_A + M
 \end{aligned} \tag{4-15}$$

식 (4-15)로부터 f_A , i_A 및 M 은 각각 식 (4-16), 식 (4-17) 및 식 (4-18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_A = 20 \log_{10} \frac{1}{|f_{S_{21}}|} \tag{4-16}$$

$$i_A = 20 \log_{10} \frac{1}{|i_{S_{21}}|} \tag{4-17}$$

$$M = 20 \log_{10} \left| \frac{(1-f_{S_{11}\Gamma_S})(1-f_{S_{22}\Gamma_L})-f_{S_{12}}f_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}}{(1-i_{S_{11}\Gamma_S})(1-i_{S_{22}\Gamma_L})-i_{S_{12}}i_{S_{21}\Gamma_S\Gamma_L}} \right| \tag{4-18}$$

식 (4-16)은 가변 감쇠기의 최종 조절시의 전체 감쇠량이고, 식 (4-17)은 가변 감쇠기의 초기 기준값에 대한 감쇠량이다. 즉, 이 두 값의 차가 가변 감쇠기의 증분 감쇠량으로 식 (4-14)과 같이 구해진다. 식 (4-18)은 가변 감쇠기의 증분 감쇠량 측정시 측정 시스템 및 가변 감쇠기의 부정합이 감쇠량 측정에 영향을 미치는 항이다.

식 (4-18)은 식 (2-11)로부터 식 (4-19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M = 20 \log_{10} \left| \frac{(1 - f_{\Gamma_{IN}\Gamma_S})(1 - f_{S_{22}\Gamma_L})}{(1 - i_{\Gamma_{IN}\Gamma_S})(1 - i_{S_{22}\Gamma_L})} \right| \quad (4-19)$$

식 (4-19)에 나타난 각 반사계수를 측정하여 대입하면 부정합 오차를 구할 수 있다. 만약 각 반사계수의 크기와 위상을 측정하지 못하고 크기만 측정한다면 식 (4-19)은 식 (4-20)와 같은 부정합 오차 범위를 갖는다.

$$M_{error} = 20 \log_{10} \frac{(1 \pm |f_{\Gamma_{IN}\Gamma_S}|)(1 \pm |f_{S_{22}\Gamma_L}|)}{(1 \mp |i_{\Gamma_{IN}\Gamma_S}|)(1 \mp |i_{S_{22}\Gamma_L}|)} \quad (4-20)$$

따라서 부정합 오차를 줄이는 1차적인 방법은 신호원 반사계수 Γ_S 와 부하 반사계수 Γ_L 을 가능하면 줄이는 것이 중요함을 알 수 있다. 이 두 값이 작다면 반사계수들의 크기만 측정하여도 오차가 크게 줄어들게 된다.

제 5 장 3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정

제 1 절 3-포트 회로망의 신호 흐름도

RF나 마이크로파대의 측정에 많이 이용되는 3-포트 회로망은 그림 5-1 (a)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 각 포트에 입사와 반사하는 파의 진폭과 3-포트 회로망의 S-파라미터들과는 식 (5-1)과 같은 관계가 있다.

$$b_1 = S_{11} a_1 + S_{12} a_2 + S_{13} a_3 \quad (5-1 \text{ a})$$

$$b_2 = S_{21} a_1 + S_{22} a_2 + S_{23} a_3 \quad (5-1 \text{ b})$$

$$b_3 = S_{31} a_1 + S_{32} a_2 + S_{33} a_3 \quad (5-1 \text{ c})$$

각 포트에서 3-포트 회로망으로 입사하는 파의 진폭은 식(5-2)와 같이 나타내진다.

$$a_1 = b_S + b_1 \Gamma_S \quad (5-2 \text{ a})$$

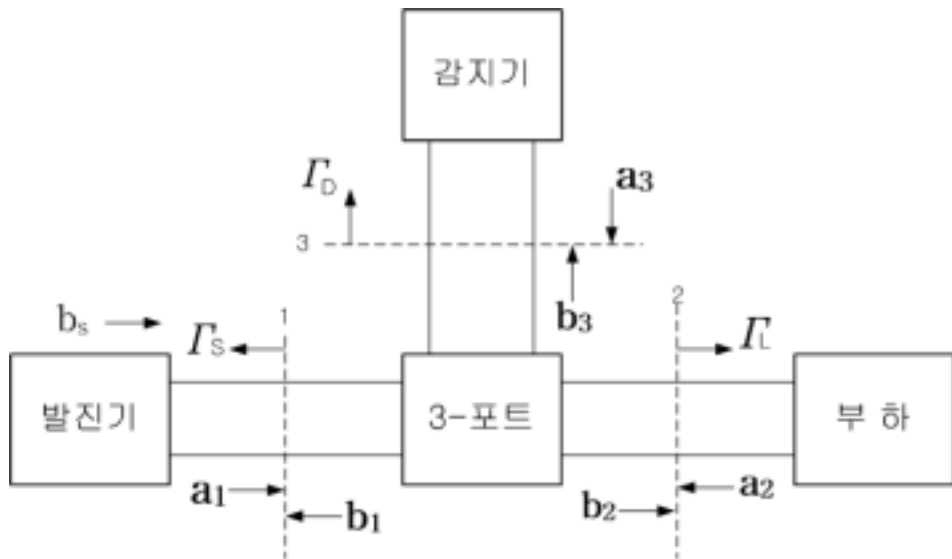
$$a_2 = b_2 \Gamma_L \quad (5-2 \text{ b})$$

$$a_3 = b_3 \Gamma_D \quad (5-2 \text{ c})$$

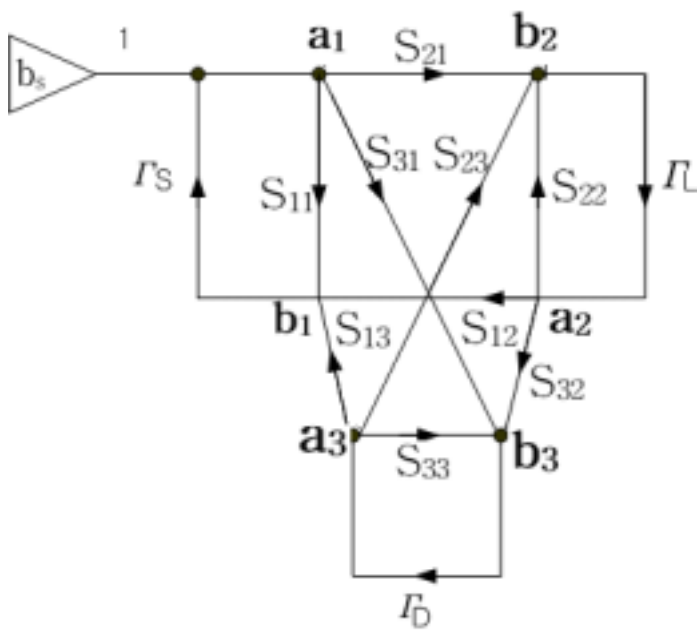
식 (5-2)에서 Γ_S , Γ_L 과 Γ_D 는 각각 신호원 반사계수, 부하 반사계수 및 감지기의 반사계수를 나타낸다.

3-포트 회로망을 Mason의 정리를 이용하여 해석하기 위하여 그림 5-1 (a)를 신호 흐름도로 나타내면 그림 5-1 (b)와 같이 된다.

그림 5-1 (b)에 Mason 정리를 적용하여 각 루프들을 구하여 보면 다음과 같다.



(a)



(b)

그림 5-1 3-포트 회로망 해석

(a) 측정 시스템과 연결된 3-포트 회로망,

(b) 3-포트 회로망의 신호 흐름도

- 1 차 루프 : $\Gamma_S S_{11}, \Gamma_L S_{22}, \Gamma_D S_{33}, \Gamma_S S_{21} \Gamma_L S_{12}, \Gamma_S S_{21} \Gamma_L S_{32} \Gamma_D S_{13},$
 $\Gamma_S S_{31} \Gamma_D S_{13}, \Gamma_L S_{32} \Gamma_D S_{23}, S_{12} \Gamma_S S_{31} \Gamma_D S_{23} \Gamma_L$
- 2 차 루프 : $\Gamma_S S_{11} \Gamma_L S_{22}, \Gamma_S S_{11} \Gamma_D S_{33}, \Gamma_L S_{22} \Gamma_D S_{33}, \Gamma_S S_{21} \Gamma_L S_{12} \Gamma_D S_{33},$
 $\Gamma_S S_{11} \Gamma_L S_{32} \Gamma_D S_{23}, \Gamma_L S_{22} \Gamma_S S_{31} \Gamma_D S_{13}$
- 3 차 루프 : $\Gamma_S S_{11} \Gamma_L S_{22} \Gamma_D S_{33}$

그림 5-1 (a)의 3-포트 회로망의 신호원으로부터 나오는 파의 진폭인 b_S 와 포트-2에서 나오는 파의 진폭 b_2 의 비를 구하는 방법에 대하여 살펴보자.

Mason의 정리에 의하여 경로 $P_1 = S_{21}$ 과 접촉이 없는 1차 루프는 $\Gamma_D S_{33}$ 이고, 경로 $P_2 = S_{31} \Gamma_D S_{23}$ 와 접촉이 없는 1 차 루프는 없다. 또한 $P_1 = S_{21}$ 과 $P_2 = S_{31} \Gamma_D S_{23}$ 와 접촉이 없는 고차 루프들도 존재하지 않는다. 따라서 식 (3-1)을 이용하여 b_2/b_S 를 구하면 식 (5-3)과 같다.

$$\frac{b_2}{b_S} = \frac{S_{21}(1 - \Gamma_D S_{33}) + S_{31} \Gamma_D S_{23}}{D} \quad (5-3)$$

식 (5-3)에서 D는 식 (5-4)와 같다.

$$D = 1 - (1\text{차 루프의 합}) + (2\text{차 루프의 합}) - (3\text{차 루프의 합}) \quad (5-4)$$

같은 방법으로 b_3/b_S 를 구하면 식 (5-5)와 같이 된다.

$$\frac{b_3}{b_S} = \frac{S_{31}(1 - \Gamma_L S_{22}) + S_{21} \Gamma_L S_{32}}{D} \quad (5-5)$$

그림 5-1 (a)에서 부하에 입사하는 전력 P_{IL} 과 감지기에 입사하는 전력 P_{ID} 의 비는 식 (5-6)과 같이 나타내진다.

$$\frac{P_{ID}}{P_{IL}} = \frac{|b_3|^2(1 - |\Gamma_D|^2)}{|b_2|^2(1 - |\Gamma_L|^2)} \quad (5-6)$$

따라서 식 (5-3)와 식 (5-5)를 이용하여 b_3/b_2 를 구하여 식 (5-6)에 대입하여 정리하면 식 (5-7)을 얻는다.

$$\frac{P_{ID}}{P_{IL}} = \frac{|S_{31}|^2}{|S_{21}|^2} \frac{(1 - |\Gamma_2\Gamma_D|^2)}{(1 - |\Gamma_3\Gamma_L|^2)} \frac{(1 - |\Gamma_D|^2)}{(1 - |\Gamma_L|^2)} \quad (5-7)$$

식 (5-7)에서 Γ_2 와 Γ_3 는 각각 식 (5-8 a) 식 (5-8 b)와 같다.

$$\Gamma_2 = S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \quad (5-8 \text{ a})$$

$$\Gamma_3 = S_{33} - \frac{S_{31}S_{23}}{S_{21}} \quad (5-8 \text{ b})$$

식 (5-7)과 식 (5-8)은 전자파 전력 감지기를 교정하는 기본 식으로 이용된다.

제 2 절 3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정원리

그림 5-1의 3-포트 회로망은 포트-3을 신호원의 전력을 일정하게 유지시키기 위한 leveling 포트나 3-포트 회로망의 전력을 감시하기 위한 monitoring 포트로 사용하고, 포트-3을 전력 측정 포트로서 하여 기준 전력 감지기와 교정용 감지기가 연결되는 경우 그림 5-2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 5-1과 그림 5-2를 비교하여 보면 측정 포트에 기준 감지기가 연결된 경우 식 (5-7)은 식 (5-9)와 같이 된다.

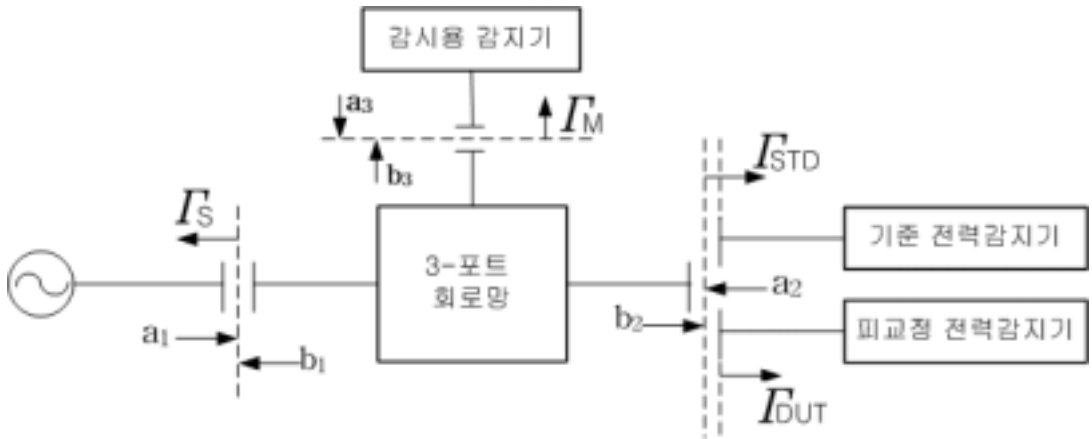


그림 5-2 3-포트 회로망을 이용한 전력 감지기 교정 시스템 구성

$$\frac{P_{MS}}{P_{STD}} = \frac{|S_{31}|^2}{|S_{21}|^2} \frac{(|1 - \Gamma_2 \Gamma_M|^2)}{(|1 - \Gamma_3 \Gamma_{STD}|^2)} \frac{(1 - |\Gamma_M|^2)}{(1 - |\Gamma_{STD}|^2)} \quad (5-9)$$

식 (5-9)에서 P_{MS} : 포트-2에 기준 감지기가 연결될 때의 감시 포트에 입사하는 전력

Γ_M : 감시용 감지기의 반사계수

Γ_{STD} : 기준 감지기의 반사계수

를 각각 나타낸다.

측정 포트에 피 교정용 전력 감지기가 연결된 경우에는 식 (5-9)는 식 (5-10)과 같이 나타내 진다.

$$\frac{P_{MD}}{P_{DUT}} = \frac{|S_{31}|^2}{|S_{21}|^2} \frac{(|1 - \Gamma_2 \Gamma_M|^2)}{(|1 - \Gamma_3 \Gamma_{DUT}|^2)} \frac{(1 - |\Gamma_M|^2)}{(1 - |\Gamma_{DUT}|^2)} \quad (5-10)$$

전자와 전력 측정용 감지기의 교정인자(K), 효율(η) 및 반사계수(Γ) 사이에는 식 (5-11)과 같은 관계가 있다.

$$K = \eta(1 - |\Gamma|^2) \quad (5-11)$$

또한, 감지기에 연결된 전력계의 지시값(I), 감지기에 입사하는 전력(P)와 감지기의 효율(η)과의 관계는 식 (5-12)와 같이 표현된다.

$$I = P\eta = P \frac{K}{1 - |\Gamma|^2} \quad (5-12)$$

따라서 기준기인 경우와 피교정 감지기의 경우에 각각 STD와 DUT라는 첩자를 사용하여 식 (5-12)를 변형하여 나타내면 식 (5-13)과 같다.

$$P_{STD} = I_{STD} \frac{1 - |\Gamma_{STD}|^2}{K_{STD}} \quad (5-13 \text{ a})$$

$$P_{MS} = I_{MS} \frac{1 - |\Gamma_M|^2}{K_M} \quad (5-13 \text{ b})$$

$$P_{DUT} = I_{DUT} \frac{1 - |\Gamma_{DUT}|^2}{K_{DUT}} \quad (5-13 \text{ c})$$

$$P_{MD} = I_{MD} \frac{1 - |\Gamma_M|^2}{K_M} \quad (5-13 \text{ d})$$

식 (5-13)을 이용하면 식 (5-14 a)와 식 (5-14 b)를 얻는다.

$$\frac{P_{MS}}{P_{STD}} = \frac{I_{MS}}{I_{STD}} \frac{1 - |\Gamma_M|^2}{1 - |\Gamma_{STD}|^2} \frac{K_{STD}}{K_M} \quad (5-14 \text{ a})$$

$$\frac{P_{MD}}{P_{DUT}} = \frac{I_{MD}}{I_{DUT}} \frac{1 - |\Gamma_M|^2}{1 - |\Gamma_{DUT}|^2} \frac{K_{DUT}}{K_M} \quad (5-14 \text{ b})$$

식 (5-9), 식 (5-10) 및 식 (5-14)를 이용하여 피교정 감지기의 교정인자는 식 (5-15)와 같이 구해 진다.

$$K_{DUT} = K_{STD} \frac{I_{MS}}{I_{MD}} \frac{I_{DUT}}{I_{STD}} \frac{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{STD}|^2}{|1 - \Gamma_2 \Gamma_{DUT}|^2} \quad (5-15)$$

식 (5-15)에서

K_{DUT} : 피교정 전력 감지기의 교정인자,

K_{STD} : 기준 전력 감지기의 교정인자,

I_{MS} : 측정포트에 기준 감지기가 연결될 때 감시기의 읽은 값,

I_{MD} : 측정포트에 피교정 감지기가 연결될 때 감시기의 읽은 값,

Γ_2 : 측정포트의 유효 반사계수

Γ_{STD} : 기준 감지기의 반사계수

Γ_{DUT} : 피교정 감지기의 반사계수

를 각각 나타낸다.

식 (5-15)에서 Γ_2 는 식 (5-8 a)를 다시 쓰면 식 (5-16)과 같다.

$$\Gamma_2 = S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \quad (5-16)$$

식 (5-16)을 유효 신호원 반사계수(the effective generator reflection coefficient)라 한다.

피교정 전력 감지기의 교정인자의 측정값을 나타내는 식 (5-15)를 살펴볼 때 유효 반사계수 Γ_2 를 제외한 모든 나머지 파라미터들은 장비의 지시 값으로부터 직접 구할 수 있다. 따라서 유효 반사계수 Γ_2 의 정확한 측정방법을 확립하는 것이 중요하며, 이로부터 부정합 오차가 구해진다.

제 3 절 power splitter와 방향성 결합기

전력 측정용 감지기들의 교정 장치에 이용되는 대표적인 3-포트 회로망이 power splitter와 방향성 결합기 이다. 이들의 특성을 살펴보고 전력 감지기 교정 시스템에 이용할 때의 장단점에 대하여 살펴보자.

1. power splitter

저항성 분배원리를 이용한 power splitter에는 그 용도에 따라 그림 5-3과 같이 2개의 저항을 이용한 것과 3개의 저항을 이용한 것이 있다. 3개의 저항으로 만든 power splitter는 입력 신호를 2개의 같은 크기로 분배하여 비교측정의 용도로 오래 전부터 사용되어 왔으며, 2개의 저항을 이용하여 만든 power splitter는 leveling loop이나 비율측정을 통하여 신호원의 유효 출력 정합 특성을 개선하기 위하여 사용된다. 2개의 저항을 사용한 power splitter는 신호원의 유효 출력 전력에 영향을 미치는 2가지 주요 요인인 신호원 출력의 실제변화와 부하 반사계수의 변화를 고찰하여 보면 신호원의 정합특성이 개선됨을 이해할 수 있다.

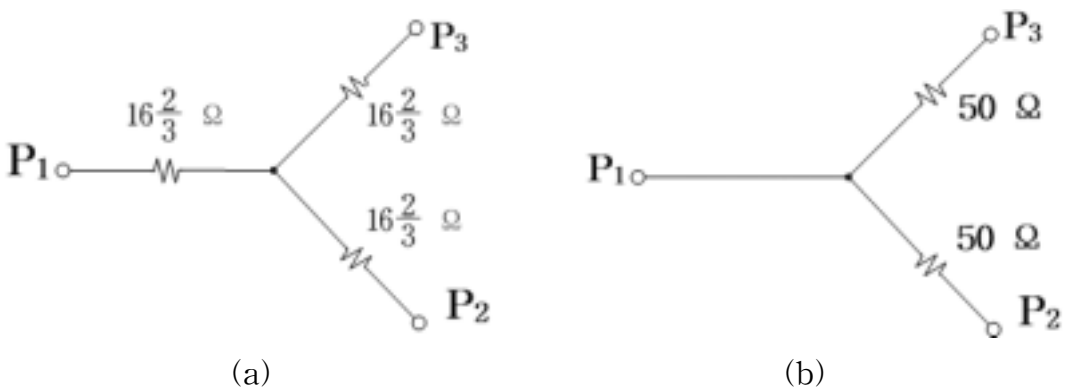


그림 5-3 power splitter의 종류

- (a) 3개의 저항으로 만든 power splitter,
- (b) 2개의 저항으로 만든 power splitter

그림 5-4는 leveling loop이나 비율 측정기로 채택하는 경우 포트-2가 유효 신호원 출력이 됨을 나타내고 있다. 그림 5-4(a)를 살펴볼 때 저항이 대칭적으로 분포되며 포트-1에 연결된 신호원 전력은 출력 포트(포트-2)와 기준 포트(포트-3)로 동등하게 나누어진다. 이 두 포트의 전력 변화는 입력전력의 변화와 같게 되지만 leveling loop이나 비율측정을 통하여 보상될 수 있다. 그림 5-4(b)는 부하에서 반사된 신호의 일부가 power splitter에서 재 반사되어 부하로 되돌아가고, 나머지는 기준 포트(포트-3)로 전달되는 모습을 나타내고 있다. 2개의 저항을 이용하여 만든 power splitter의 경우에는 이 두 신호의 크기가 같게 된다.

이와 같이 두 신호가 같게 되어 부하 반사의 원인에 의한 출력 전력의 변화는 기준 포트에서 관찰 할 수 있고, 이 변화는 leveling loop이자 비율 측정 방법을 통하여 보상할 수 있음을 알 수 있다.

3개의 저항으로 만든 power splitter는 splitter의 입력 단이 선로의 특성 임피던스로 종단이 된 경우 양호한 임피던스 정합 특성을 지닌다.

이에 따라 비교측정 등에 이용 가능하게 입력 신호를 두 출력에 같은 크기로 나누어 공급할 수 있다. 그러나 이 splitter는 양호한 신호원 정합특성을 얻기 위하여 leveling loop이나 비율 측정에는 사용할 수 없다. 그 이유는 부

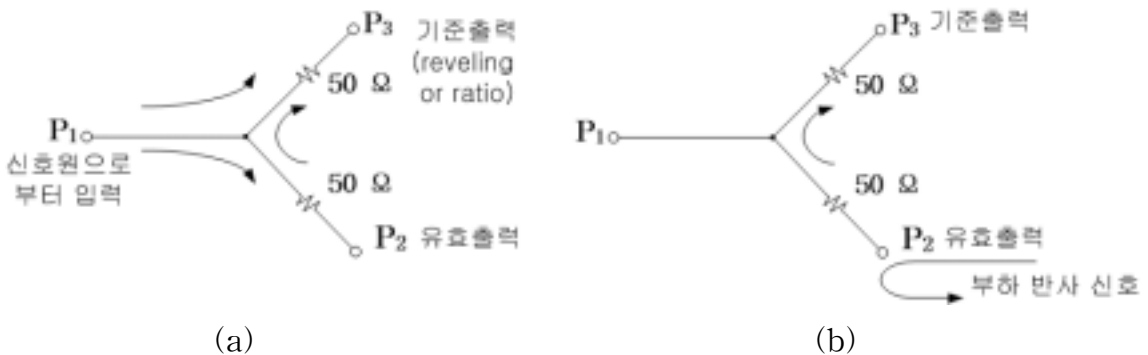


그림 5-4 2개의 저항으로 구성된 power splitter의 특성 파라미터 변화의 영향

(a) 신호원 전력의 분배 특성, (b) 부하 반사 신호의 전달 특성

하에서 반사되어 온 반사파가 splitter에 의하여 재 반사되어 부하로 되돌아가고 이 반사파의 아주 작은 일부분만 기준 포트(포트-3)로 전송되어 열악한 신호원 정합이 되는 결과를 초래하기 때문이다.

포트-2에서 신호원 정합(출력레벨이 조정된 유효 출력)은 leveling loop을 통하여 절대적으로 또는 비율 측정기를 통하여 상대적으로 포트-3에서 신호의 크기를 일정하게 유지시킬 때 개선된다. 따라서 포트-3에 입사하는 신호 (b_3)가 일정 할 때 포트-1로부터 포트-2로의 전송특성을 그림 5-1(b)의 신호 흐름도를 이용하여 고찰하여 보자.

$$b_3 = T_{31}b_s = K \text{ (일정)} \quad (5-17)$$

$$b_2 = T_{21}b_sb_2 \quad (5-18)$$

식 (5-17)과 식 (5-18)에서 T_{31} 과 T_{21} 은 각각 포트-1과 포트-3 사이와 포트-1과 포트-2사이의 전송특성을 나타낸다. T_{31} 은 식(5-5)와 같고 T_{21} 은 식(5-4)와 같다.

식 (5-17)과 식 (5-18)로 부터 식 (5-19)을 얻는다.

$$b_2 = \frac{T_{21}}{T_{31}} K \quad (5-19)$$

식 (5-19)에서 b_2 는 유효 신호원 출력으로 T_{31} , T_{21} 과 K 로 부터 구해진다. 각 항들의 특성과 유효 신호원 정합에 대하여 살펴보자.

식 (5-19)에 식 (5-3)과 식 (5-5)를 대입하여 정리하면 식 (5-20)을 얻는다.

$$b_2 = \frac{S_{21}(1 - \Gamma_D S_{33}) + S_{31}\Gamma_D S_{23}}{S_{31}(1 - \Gamma_L S_{22}) + S_{21}\Gamma_L S_{32}} K \quad (5-20)$$

식 (5-20)을 정리하면 식 (5-21)과 같이 표시 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 b_2 &= \frac{S_{21}}{S_{31}} \frac{1 - (S_{33} - S_{31}S_{23}/S_{21})}{1 - (S_{22} - S_{21}S_{32}/S_{31})} K \\
 &= \frac{b_{EQ}}{1 - \Gamma_{EQ}\Gamma_L}
 \end{aligned} \tag{5-21}$$

식(5-21)에서

$$\Gamma_{EQ} = S_{22} - S_{21}\left(\frac{S_{32}}{S_{31}}\right) \tag{5-22}$$

$$b_{EQ} = \left(\frac{S_{21}}{S_{31}}\right) \{1 - (S_{33} - S_{31}\frac{S_{23}}{S_{21}})\Gamma_D\} K \tag{5-23}$$

이다.

식 (5-21)에서 Γ_L 은 부하 임피던스에 의한 반사계수이기 때문에 b_{EQ} 와 Γ_{EQ} 는 leveled 시스템(또는 비율 측정 시스템)의 등가 신호원에서 회로망에 공급되는 파의 진폭과 반사계수로 생각할 수 있다. 식 (5-21)를 신호 흐름도를 이용하여 나타내면 그림 5-5와 같다.

식 (5-22)는 leveling loop이나 비율측정을 위해서 사용되는 2개의 저항으로 구성된 power splitter의 유효 신호원 정합을 결정하기 위하여 사용될 수 있다. S_{22} , S_{21} , S_{31} 과 S_{32} 는 2개의 저항을 사용한 power splitter가 이상적인

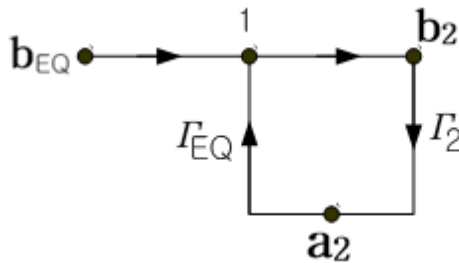
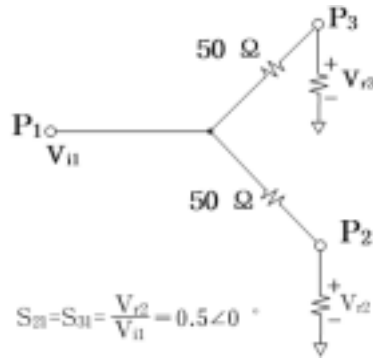


그림 5-5 유효 신호원에 대한 등가의 신호 흐름도

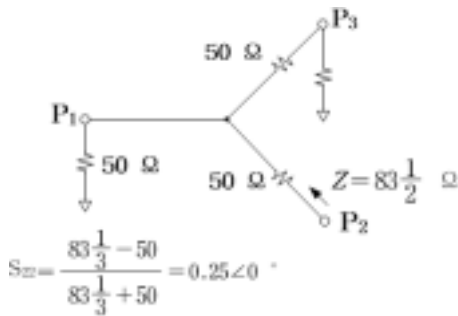
경우 그림 5-6을 사용하여 계산할 수 있다. 각 값들은 식 (5-22)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Gamma_{EQ} &= S_{22} - S_{21} \frac{S_{32}}{S_{31}} \\ &= 0.25 - 0.5 \times 0.25/0.5 = 0\end{aligned}$$

모든 소자들이 저항 성분으로 구성되어 모두 4개의 S-파라미터들의 위상은 0이고, 이상적인 경우 완전한 상쇄특성을 얻을 수 있다. 2개의 저항으로 만들어진 power splitter의 경우 S_{21} 과 S_{31} 이 같고, S_{22} 와 S_{32} 가 같기 때문에 완전한 상쇄특성을 얻을 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 5-6 2개의 저항으로 구성된 power splitter의 S파라미터

S_{21} 과 S_{31} 이 같다는 것은 신호원의 출력 전력이 기준 포트(포트-3)와 출력 포트(포트-2)에 같은 크기로 나누어 전달된다는 의미이고, S_{22} 와 S_{32} 가 같다는 의미는 power splitter에 의하여 재반사 되는 부하 반사량과 기준 포트에 전달되는 부하 반사량이 같다는 의미이다.

실제적으로 HP 11667A power splitter의 경우 등가 신호원 정합 특성을 구하여 정재파 비로 나타내면 8 GHz 까지는 1.1 보다 작고, 8 GHz에서 18 GHz의 범위에서는 1.2 보다 작다.

3개의 저항으로 구성된 그림 5-7의 power splitter에 대하여 생각하여 보자. 그림 5-7의 S파라미터들을 식 (5-22)에 대입하면 다음과 같다.

$$\Gamma_{EQ} = S_{22} - S_{21} \frac{S_{32}}{S_{31}} = 0 - 0.5 \times 0.5 / 0.5 = 0.5 \quad (3:1 \text{ SWR})$$

따라서 3개의 저항으로 구성된 power splitter는 leveling loop이나 비율 측정법 등의 용도로는 사용 불가함을 알 수 있다. 이 3:1 SWR은 대부분의 unlevelled 신호원의 규격보다 나쁜 결과이다.

그림 5-7은 3개의 저항으로 구성된 power splitter로 신호원 전력을 반으로 나누어 사용할 필요가 있는 시스템에 유용하게 쓰일 수 있음을 나타내고 있다. S_{22} 와 S_{33} 가 0이 되는 것은 전력이 동일하게 나누어지도록 하고, 각 출

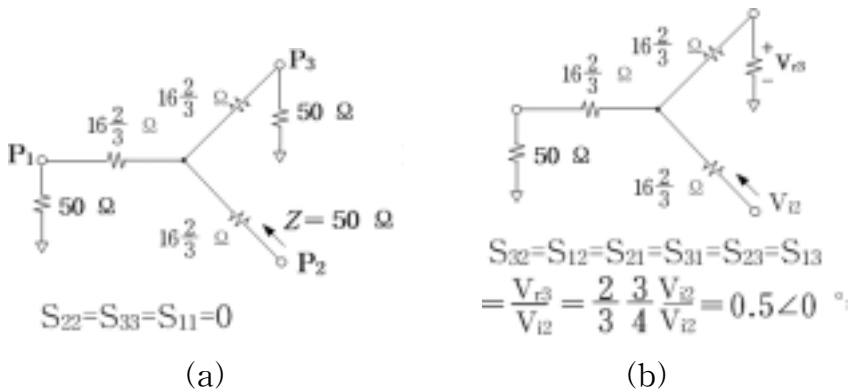


그림 5-7 3개의 저항으로 구성된 power splitter의 S 파라미터

력에서 양호한 정합 특성을 얻을 수 있음을 나타낸다. 반면에 2개의 저항으로 구성된 power splitter의 경우에는 S_{22} 와 S_{33} 가 0.25로 전력을 분배하는 용도로 사용할 경우 정합특성이 나쁘게 된다.

결과적으로 고주파 측정용 감지기 교정 시스템에는 2개의 저항으로 만든 power splitter가 적당함을 알 수 있다.

2. 방향성 결합기

방향성 결합기는 무손실의 4-포트 회로망으로 다루어지고 있으나 각 포트중 한 포트가 내부적으로 종단이 되어 있으면 3-포트 회로망이 된다. 그림 5-8과 같이 3-포트 회로망으로 나타낸 방향성 결합기에서 포트-3(P_3)는 포트-1(P_1)에 입사하는 파에 결합한다. 이 결합 정도를 나타내는 결합 비는 결합기의 포트-2가 무반사 부하로 종단되었을 때 포트-3에 연결된 무반사 감지기에서 측정되는 전력에 대한 입사하는 전력의 비로 나타낸다.

포트-2와 포트-3가 무반사 조건인 $a_2 = 0$, $a_3 = 0$ 인 경우 결합도는 식 (5-24)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} C &= 10 \log_{10} \left| \frac{a_1}{b_3} \right|^2 \\ &= -10 \log \left| S_{31} \right|^2 \end{aligned} \quad (5-24)$$

만약 그림 5-8의 방향성 결합기가 가역적인 특성을 만족시킨다면 식 (5-24)는 식 (5-25)과 같이 dB로 나타낸다.

$$C = -10 \log_{10} \left| S_{13} S_{31} \right| \quad (5-25)$$

방향성 결합기의 또 다른 중요한 특성 중의 하나가 방향성(directionality)이라 불리는 양으로 각 포트가 무반사 조건을 만족시킬 때 포트-1에 입사하는

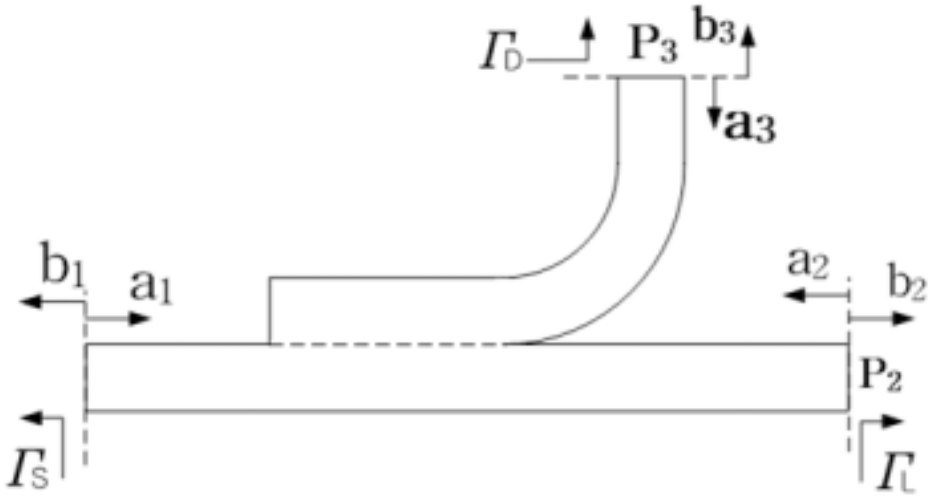


그림 5-8 방향성 결합기

전력에 의하여 포트-3에서 결합되는 전력 ($|S_{31}|^2$)과 포트-2에 포트-1과 같은 전력을 입사시킬 때 포트-3에서 결합되는 전력 ($|S_{32}|^2$)의 비로 식 (5-26)과 같이 dB로 나타낸다.

$$D = 10 \log_{10} \frac{|S_{31}|^2}{|S_{32}|^2} \quad (5-26)$$

방향성 결합기가 가역적인 경우 식(5-26)은 식(5-27)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} D &= 10 \log_{10} \frac{|S_{13}S_{31}|}{|S_{23}S_{32}|} \\ &= 20 \log_{10} \frac{|S_{31}|}{|S_{32}|} \end{aligned} \quad (5-27)$$

방향성을 측정하는 실제적인 경우 포트-1에 입사하는 전력을 측정하는 것보다는 포트-2에 전달되는 전력을 측정하는 것이 편리하다. 이 경우 방향

성은 포트-1을 입력으로 할 때 포트-3에서 결합되는 전력과 포트-2를 입력으로 했을 때 포트-3에서 결합되는 전력의 비로 정의된다. 단, 포트-1을 입력으로 했을 때 포트-2에서의 전력과 포트-2를 입력으로 했을 때 포트-1에서의 전력은 같아야 한다.

방향성 결합기의 특성은 방향성 결합기를 3-포트 회로망으로 보고, 신호 흐름도를 적용하면 구할 수 있으며, 등가의 신호원 반사계수도 구할 수 있다. 따라서 식 (5-22)을 방향성 결합기를 사용한 시스템의 등가 신호원 반사계수를 계산하기 위하여 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned}\Gamma_{EQ} &= S_{22} - S_{21}\left(\frac{S_{32}}{S_{31}}\right) \\ &= S_{22} - S_{21}D\end{aligned}\quad (5-28)$$

식 (5-28)에서 방향성 결합기의 포트-1과 포트-2의 전송손실인 S_{21} 은 거의 1에 가깝고, 방향성 D 의 크기는 보통 매우 작다 (<0.03). 따라서 S_{21} 과 D 의 곱은 S_{22} 에 비하여 작기 때문에 방향성 결합기의 등가 신호원 반사계수는 S_{22} 에 아주 가까운 값이 된다. 일반적으로 1 옥타브 대역폭을 지니는 방향성 결합기는 사용하는 컨넥터와 주파수에 따라 SWR로 나타내면 1.3~1.4 정도이다.

3. power splitter와 방향성 결합기의 특성 비교

약 18 GHz의 주파수 범위에서 2개의 저항으로 구성된 power splitter와 방향성 결합기의 신호원 정합특성과 출력 포트들 사이의 주파수에 대한 출력 평탄 특성을 비교하여 볼 때 2개의 저항으로 구성된 power splitter가 좋은 특성을 지닌다. power splitter로 leveling loop과 비율 측정 시스템을 구성한 경우의 등가 신호원 정합 특성은 정재파비가 약 1.2보다 작은 반면 수 옥타브 대역폭을 지니는 방향성 결합기를 사용한 경우 약 1.4보다 작다.

power splitter의 출력 포트 사이에 주파수에 따른 출력 평탄도의 편차는

± 0.25 dB보다 작은 반면 방향성 결합기는 방향성이 큰 제품의 경우 약 ± 0.5 dB 정도이다. 출력 포트들 사이의 출력 평탄 특성은 주파수 응답 오차를 최소화하는데 중요하다.

방향성 결합기에 비하여 power splitter의 단점은 포트-1과 포트-2 또는 포트-1과 포트-3 사이의 손실이 6 dB 이 되는 것이다. ($S_{21}=S_{31}=0.5$, 6 dB) 이는 신호원의 출력 전력을 6 dB 감소시키는 결과이다. 광대역의 동축형 방향성 결합기의 경우 포트1과 포트-2사이의 손실이 1 dB 이하로 매우 작다.

제 4 절 전력 감지기 교정의 불확도

전력 감지기 교정의 불확도를 살펴보기 위하여 식 (5-15)를 정리한 식 (5-29)를 생각하여보자.

$$\begin{aligned} K_D &= K_S \frac{P_D P_{MS}}{P_S P_{MD}} \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2} \\ &= K_S R_M R_S M \end{aligned} \quad (5-29)$$

식 (5-29)에서

K_D : 피측정 써미스터 마운터의 교정인자

K_S : 표준 써미스터 마운터1의 교정인자

P_S, P_{MS} : 표준 써미스터 마운터1 연결시 방향성 결합의 Test

port(main arm)와 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

P_D, P_{MD} : 피측정 써미스터 마운터 연결시 방향성 결합기의 Test

port(main arm)와 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

Γ_{GE} : 방향성 결합기의 등가 신호원 반사계수

Γ_S : 표준 써미스터 마운트의 반사계수

Γ_D : 피교정 감지기의 반사계수

$$R_D = \frac{P_D}{P_{MD}}, \quad R_S = \frac{P_S}{P_{MD}}$$

$$M = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2}$$

이다.

식 (5-29)를 이용하여 전력 감지기의 안테나 인자를 구할 때 포함된 합성 표준 불확도를 산출하여 보면 식 (5-30)과 같이 구해진다.

$$u_c(K_D) = \sqrt{\left(\frac{\partial K_D}{\partial K_S}\right)^2 u_c^2(K_S) + \left(\frac{\partial K_D}{\partial R_D}\right)^2 u_c^2(R_D) + \left(\frac{\partial K_D}{\partial R_S}\right)^2 u_c^2(R_S) + \left(\frac{\partial K_D}{\partial M}\right)^2 u_c^2(M)} \quad (5-30)$$

식 (5-30)에서 각 감도계수를 구하면 식 (5-31)과 같다.

$$\frac{\partial K_D}{\partial K_S} = \frac{K_D}{K_S}, \quad \frac{\partial K_D}{\partial R_M} = \frac{K_D}{R_M}, \quad \frac{\partial K_D}{\partial R_S} = \frac{K_D}{R_S}, \quad \frac{\partial K_D}{\partial M} = \frac{K_D}{M} \quad (5-31)$$

식 (5-30)의 각 표준 불확도에 대하여 살펴보자.

- $u_c(K_S)$: 표준 써미스터 마운터의 합성 표준 불확도로 상급 국가 교정 기관으로부터 얻은 확장 불확도 (U)와 포함인자 (k)로부터 구할 수 있다.

$$u_c(K_S) = \frac{U(K_S)}{k} \quad (k=2) \quad (5-32)$$

- $u_c(R_D)$: 피 교정 감지기가 측정한 전력과 모니터 단자에서 측정한 전력과 전력 측정비를 구할 때 포함된 합성 표준 불확도로 전력비 반복 측정에 의한 Type A 불확도와 측정 장비에 의한 Type B 불확도가 있다.

- $u_c(R_S)$: 표준 써미스터 마운트가 측정한 전력과 모니터 단자에서 측정한 전력과 전력 측정비를 구할 때 포함된 합성 표준 불확도로 전력비 반복 측정에 의한 Type A 불확도와 측정 장비에 의한 Type B 불확도가 있다.

- $u_c^2(M)$: 측정이 이루어지는 면에서의 부정합에 의한 불확도로 식 (5-29)에서 부정합 인자 M 을 정리하면 식 (5-33)를 얻는다.

$$M = \frac{1 - 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + |\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|^2}{1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2} \quad (5-33)$$

식 (5-33)의 부정합 인자 측정에 포함된 합성 표준 불확도는 식 (5-34)로 나타낼 수 있다.

$$u_c(M) = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_S|}\right)^2 u_c^2(|\Gamma_S|) + \left(\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_D|}\right)^2 u_c^2(|\Gamma_D|) + \left(\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_{GE}|}\right)^2 u_c^2(|\Gamma_{GE}|) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Theta_S}\right)^2 u_c^2(\Theta_S) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Theta_D}\right)^2 u_c^2(\Theta_D) + \left(\frac{\partial M}{\partial \Theta_{GE}}\right)^2 u_c^2(\Theta_{GE})} \quad (5-34)$$

식 (5-34)의 감도계수는 다음과 같이 구해진다.

$$-\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_S|} = -\frac{(1 - 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + |\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|^2)(-2|\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|^2)}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} \quad (5-35 \text{ a})$$

$$-\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_D|} = \frac{(-2|\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|^2)}{1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2} \quad (5-35 \text{ b})$$

$$-\frac{\partial M}{\partial |\Gamma_{GE}|} = \frac{(-2|\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|^2)}{1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2} \quad (5-35 \text{ c})$$

$$-\frac{\partial M}{\partial \Theta_S} = -\frac{(-2|\Gamma_D|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + 2|\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|)(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} - \frac{(1 - 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + |\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|^2)(-2|\Gamma_S|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + 2|\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|)}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} \quad (5-35 \text{ d})$$

$$-\frac{\partial M}{\partial \Theta_S} = -\frac{(1 - 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + |\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|^2) - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\sin(\Theta_S + \Theta_{GE})}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} \quad (5-35 \text{ e})$$

$$- \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial \Theta_D} = \frac{2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\sin(\Theta_D + \Theta_{GE})}{1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2} \quad (5-35 \text{ f})$$

$$\begin{aligned} - \frac{\partial \mathcal{M}}{\partial \Theta_{GE}} &= \frac{2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\sin(\Theta_D + \Theta_{GE})}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} (1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2) \\ &\quad - \frac{2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\sin(\Theta_S + \Theta_{GE})}{(1 - 2|\Gamma_S||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_S + \Theta_{GE}) + |\Gamma_S|^2|\Gamma_{GE}|^2)^2} (1 - 2|\Gamma_D||\Gamma_{GE}|\cos(\Theta_D + \Theta_{GE}) + |\Gamma_D|^2|\Gamma_{GE}|^2) \end{aligned} \quad (5-35 \text{ g})$$

식 (5-34)의 각 반사계수 측정의 표준 불확도에는 반복 측정에 의한 Type A 불확도와 반사계수 측정 시스템의 Type B 불확도를 고려하여 산출하여야 한다.

제 6 장 벡터 회로망 분석기(VANA)의 측정 오차 분석

제 1 절 회로망 분석기의 기본 개념

벡터 회로망 분석기는 피측정(DUT) 소자나 부품 또는 회로망의 응답 특성을 측정하기 위하여 응답특성의 크기와 위상을 측정하는 독특한 기능을 지니는 장비이다. 이를 이용하여 측정할 수 있는 양들을 살펴보면 표 6-1과 같다.

표 6-1 회로망 분석기를 이용한 측정량

반사량 측정	전송량 측정
정재파비	이득 및 손실
S-파라미터(S_{11} , S_{22})	S-파라미터(S_{12} , S_{21})
반사계수	전송계수
임피던스(또는 어드미턴스)	삽입위상(insertion phase)
반사손실	그룹지연(group delay)

벡터 회로망 분석기를 이용하여 표 6-1의 양들을 측정하기 위해서는 피 측정 장치에 입사하는 입사파와 피측정 장치로부터의 반사파 및 피측정 장치로부터 부하에 전송되는 신호들을 측정해야 된다. 이에 필요한 회로망 분석기의 주요 구성요소들을 그림 6-1의 블록도에 나타내낸 것과 같이 신호원과 신호의 분리 소자, 신호 감지를 위한 감지부 및 측정 결과를 계산하고 화면에 나타내기 위한 프로세서/표시 부 등으로 구성되어있다.

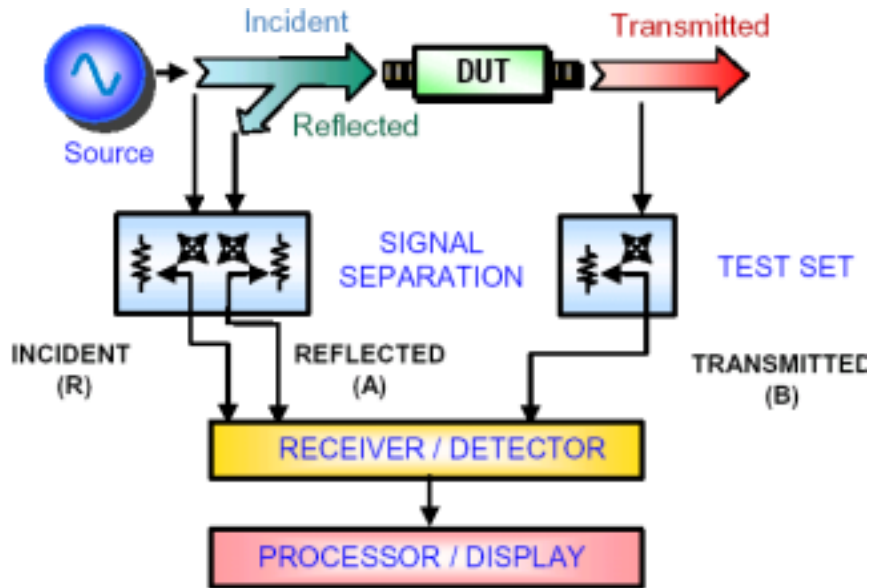


그림 6-1 회로망 분석기의 블록도

제 2 절 회로망 분석기의 측정 오차 모델

회로망 분석기를 이용한 측정 오차는 그림 6-2에서와 같이 계통 (systematic) 오차, 우연(random) 오차 및 drift 오차로 나누어 생각할 수 있다.

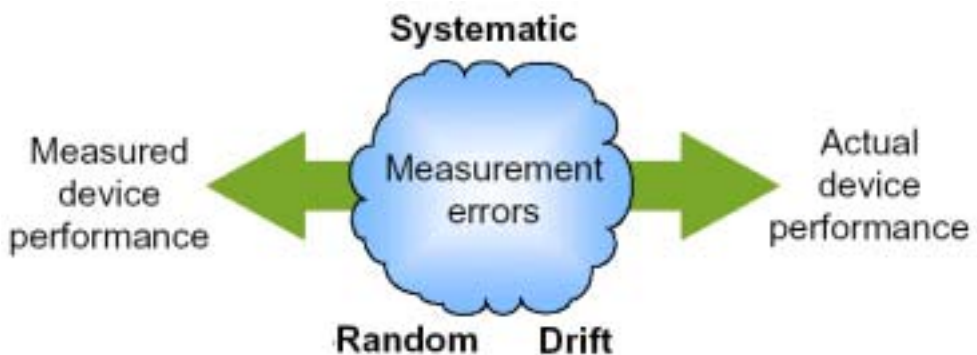


그림 6-2 측정 오차

1. 계통 오차의 원인

계통 오차는 회로망 분석기와 시험 설비의 불완전성에 기인하는 것으로 예측 가능하고 시간의 변화에 불변하는 반복 특성을 지니는 오차이다. 모든 측정은 동작 정확도에 의하여 영향을 받는다. 이 계통 오차는 교정이라는 과정을 통하여 특성을 기술할 수 있고, 측정 과정에서 수학적으로 제거가 가능하다. 회로망 분석기를 이용하여 측정되는 양의 대표적인 경우인 반사특성과 전송특성 측정시 오차의 원인을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 반사계수 측정의 오차 원인

- Residual Directivity
- Residual Source Match
- Residual Reflection Tracking

(2) 전송 특성 측정

- Residual Directivity
- Residual Source Match
- Residual Reflection Tracking
- Residual Load Match
- Residual Cross Talk
- Residual Transmission Tracking

2. 우연 오차의 원인

우연 오차는 예측이 불가능하게 시간에 따라 변하여 불규칙적인 오차로 교정에 의하여 제거할 수 없는 양이다. 이 오차의 주된 원인은 장치의 잡음(신호원, IF 바닥 잡음 등), 스위치의 반복도 및 연결기의 반복도 및 상호 연결 케이블의 안정도 등을 들 수 있다.

가. 잡음

잡음에 의한 오차는 저준위 잡음과 고준위 잡음으로 나누어 생각할 수 있다. 저준위 잡음은 광대역의 바닥 잡음을 의미하며 수신기의 잡음 특성이 원인이 된다. 저준위 잡음은 IF 평균이나 IF 대역폭을 조정하여 감소시킬 수 있다. 고 준위 잡음은 바닥 잡음과 장비 내의 국부 발진기의 위상잡음에 의하여 IF 대역폭을 줄임으로서 감소시킬 수 있다.

나. 연결기의 반복도

연결기 반복도에 의한 오차는 RF 연결기 쌍을 연결할 때 나타나는 불규칙한 변화를 나타낸다.

다. 케이블의 안정도

케이블 안정도에 의한 오차는 사용하는 케이블과 교정 및 측정시 케이블의 움직임에 기인한다.

3. Drift 오차

Drift 오차는 시스템을 교정한 후 장비나 시험 시스템의 성능 변화에 기인하는 것으로 온도 변화가 주원인이다. 이 오차는 재 교정에 의하여 제거가 가능하다.

제 3 절 계통 측정 오차

그림 6-3은 회로망 분석기를 이용하여 회로망을 측정할 때 나타나는 주된 계통 오차를 나타내고 있다. 여기서 신호의 누설과 관계 있는 오차는 방향성과 crosstalk(isolation)이고, 신호의 반사와 관련 있는 오차는 신호원과 부하의 부정합 오차이다. 또한 수신기의 주파수 응답(tracking)에는 reflection tracking과 transmission tracking이 있다.

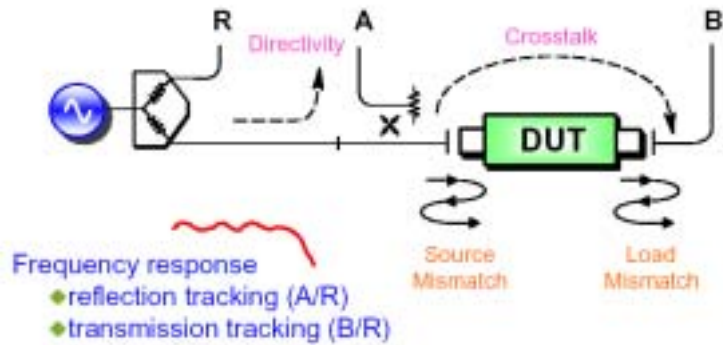


그림 6-3 계통 측정 오차

1. 방향성

순 방향 진행파와 역 방향 진행파를 분류할 수 있는 소자(방향성 브릿지나 방향성 결합기 등)는 DUT로부터 반사되어오는 신호의 측정에 이용할 수 있다. 이상적인 방향성 결합기는 입사파와 반사파를 완전하게 분리할 수 있고, 반사파는 결합 포트에만 나타난다. 그러나 실제의 방향성 결합기는 그림 6-4 와 같이 아주 작은 양의 입사파 성분이 결합 포트에 나타나서 누설의 원인이 된다. 이는 DUT에 의한 반사 신호와 합쳐져서 불확도의 원인이 된다.

방향성 결합기가 순 방향 진행파와 역 방향 진행파를 분류할 수 있는 능력이 방향성이다. 방향성이 클수록 신호를 분리하는 능력이 우수하다. 시스템의 방향성은 회로망 분석기의 입력에 나타나는 모든 누설 신호의 벡터 합이다. 방향성에 기인하는 오차는 DUT의 특성과 관련이 없으며, 낮은 반사계수 측정에 영향을 미치게 된다.

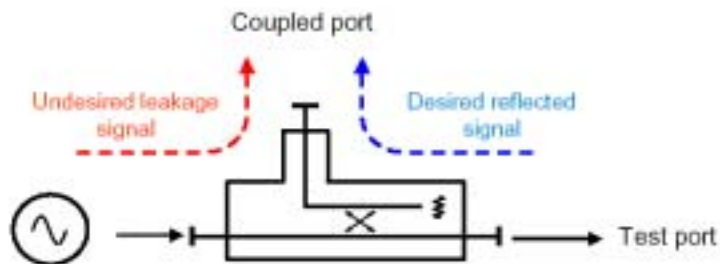


그림 6-4 방향성 결합기의 방향성 영향

2. Crosstalk (Isolation)

회로망 분석기의 신호 경로 사이의 누설로 반사특성 측정시의 방향성과 같이 전송 특성 측정시 오차의 원인이 된다. crosstalk는 기준 신호 경로와 측정 신호 경로 사이의 crosstalk에 기인하여 회로망 분석기의 감지기에 나타나는 신호들의 벡터 합이다. 이는 시험 장치와 수신기의 RF 및 IF 부내의 누설 신호들을 포함한다. crosstalk에 의한 에러는 DUT의 특성에 의하여 좌우되며, 특히 높은 손실의 전송 특성 측정시 고려되어야 한다. 회로망 분석기 시스템의 crosstalk는 대부분의 측정에서 요구하는 것보다 매우 크기 때문에 고려하지 않는 경우가 많다.

3. 신호원 정합

신호원 부정합은 DUT에서 신호원 방향으로 되돌아볼 때 임피던스 부정합에 기인하여 회로망 분석기 수신기 입력에 나타나는 신호들의 벡터 합이다. 반사특성 측정시에 신호원 정합 오차 신호는 그림 6-5와 같이 DUT로 되돌아가 다시 DUT에 의하여 반사됨으로 DUT에 의한 원래의 반사 신호의 일부와 같이 보이게 되어 오차의 원인이 된다. 전송 특성 측정시에는 신호원으로부터 반사되어 DUT에서 재 반사의 원인이 된다.

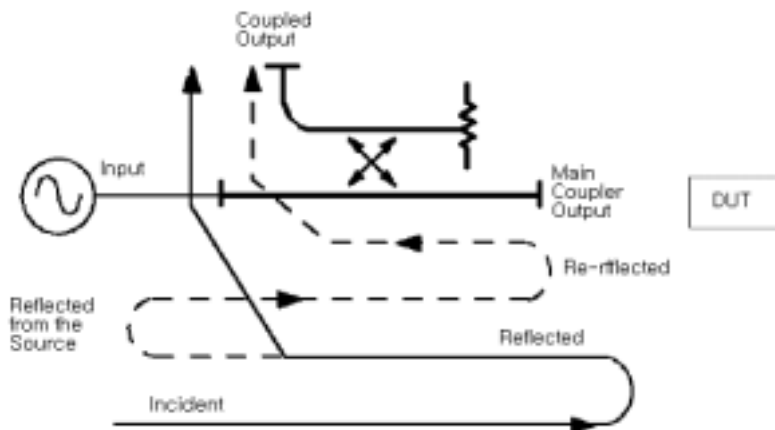


그림 6-5 신호원 정합의 영향(source match)

신호원의 정합 특성에 의한 오차는 DUT의 실제적인 입력 임피던스와 신호원의 등가 정합 특성에 의하여 설명할 수 있다. 이 오차는 반사와 전송 특성 측정에 영향을 미치는 요소로 특히 측정면의 부정합이 클 때 문제가 된다.

4. 부하 정합

부하 정합 오차는 DUT의 출력에서 불완전한 정합 때문이며, DUT의 출력과 회로망 분석기의 포트-2사이의 임피던스 부정합이 원인이다. 그림 6-6과 같이 전송된 신호의 일부가 포트-2에서 반사되어 DUT의 출력으로 되돌아 가게 된다. 이파의 일부는 DUT로부터 되 반사되어 포트-2로 되돌아오고, 일부는 DUT를 통과하여 포트-1에 나타난다. 만약 DUT가 필터의 통과대역과 같이 손실이 적다면 포트-2로부터 반사된 신호와 신호원에서 재반사된 신호는 DUT에 의하여 감쇠가 적기 때문에 심각한 오차 원인이 된다.

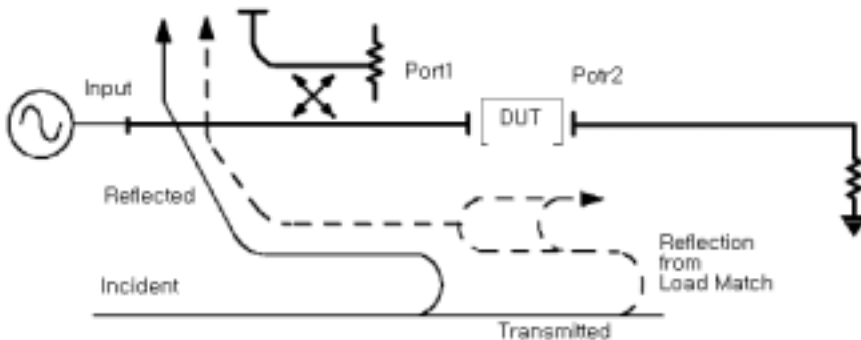


그림 6-6 부하 정합의 영향(load match)

5. Tracking(Frequency response)

Tracking에 의한 오차는 주파수의 함수로 시험 장치에서 변화하는 모든 크기와 위상의 벡터 합이다. 이는 신호 분리 소자, 컨넥터, 케이블 및 기준 신호 경로와 측정 신호 경로 사이의 변화 등을 포함 한다. 이 오차는 반사 특성과 전송 특성에 모두 영향을 미치게 된다.

6. 1-포트 오차 모델

DUT 반사계수의 크기와 위상 측정시 아무리 조심을 하여 측정한다 하여도 측정 값과 실제값 사이에는 차이가 존재하게 된다. 반사계수 측정시 회로망 분석기의 주된 오차 원인은 앞에서 설명하였듯이 방향성, 신호원 정합 및 반사 신호경로 주파수 응답(tracking)으로 그림 6-7에 나타내었다.

1-포트를 갖는 DUT의 반사계수 측정시 오차를 살펴보기 위하여 오차 원인인 방향성, 신호원 정합 및 반사 신호경로 주파수 응답(tracking) 등을 고려하여 신호 흐름도로 표시하면 그림 6-8과 같이 된다. 그림 6-8에서 측정된 값 S_{11M} 은 식 (6-1)과 같이된다.

$$S_{11M} = E_{DF} + \frac{S_{11A}E_{RF}}{1 - E_S S_{11A}} \quad (6-1)$$

식 (6-1)은 S_{11A} 를 구하기 위한 1-포트 오차 모델이다. 교정 과정을 통하여 3 개의 오차와 S_{11M} 이 측정되었기 때문에 DUT의 반사계수는 식 (6-2)와 같이 구해진다.

$$S_{11A} = S_{11M} - \frac{E_{DF}}{E_{SF}(S_{11M} - E_{DF}) + E_{RF}} \quad (6-2)$$



그림 6-7 반사계수 측정의 오차원인

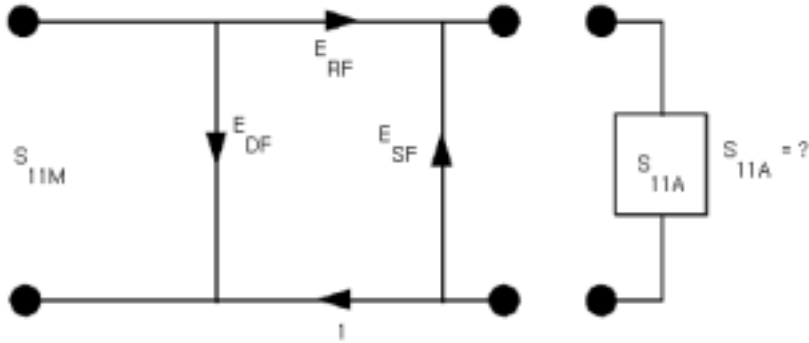


그림 6-8 S_{11} 의 측정

식 (6-2)에서

- E_{DF} = forward residual directivity
- E_{SF} = forward residual source match
- E_{RF} = forward residual reflection tracking

이다.

2-포트를 가지는 DUT의 경우도 같은 기술을 적용할 수 있지만 DUT의 포트-2s는 시스템의 특성 임피던스로 종단이 되어있어야 한다. 그렇지 않으면 추가적인 반사 오차가 발생하며, 이는 1-포트 오차 모델에 포함되지 않은 오차이다.

7. 2-포트 오차 모델

2-포트 소자의 전송계수의 크기와 위상을 측정하기 위한 오차 모델은 비슷한 방법으로 유도될 수 있다. 오차를 발생시키는 주된 원인은 그림 6-9와 같이 방향성, crosstalk(isolation), 신호원과 부하의 정합특성과 주파수응답(tracking)등 이다. 이 오차 원인들을 전 2-포트 오차 모델을 통하여 유효 적절하게 제거 가능하다.

그림 6-9의 오차 원인을 회로망 분석기의 시스템에 적용하여 순 방향과 역 방향에 대하여 신호 흐름도로 표시하면 그림 6-10과 같이 된다.

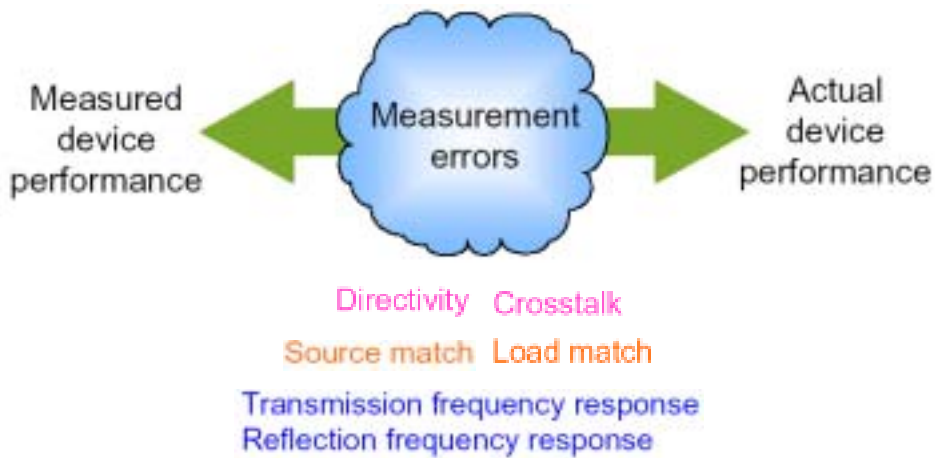


그림 6-9 2-포트 소자의 전송계수 측정의 주된 오차원인

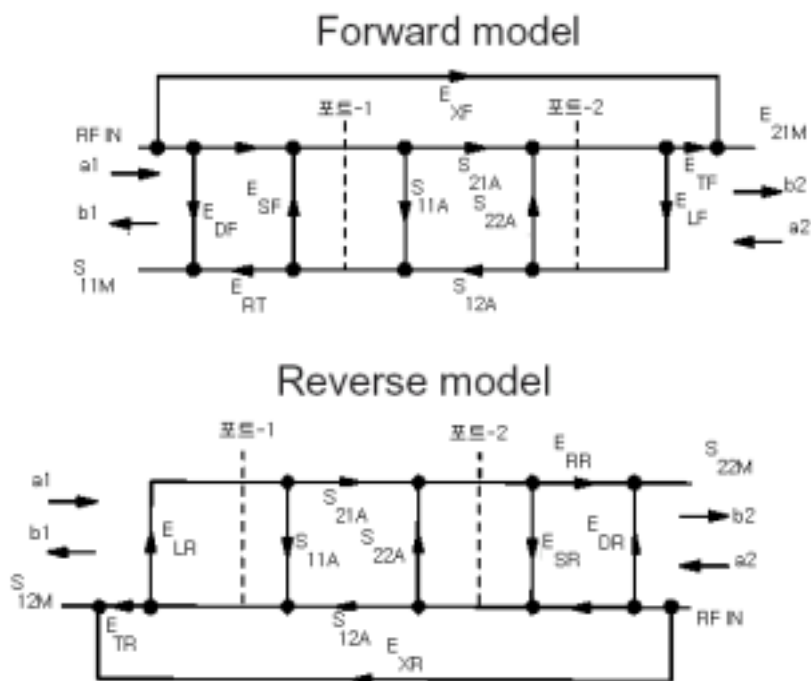


그림 6-10 전 2-포트 오차 모델

그림 6-10의 오차 모델을 이용하여 2-포트 회로망의 S 파라미터는 다음과 같이 구해진다.

$$S_{11A} = \frac{\left[\left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) \right] \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} \right]}{\left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) E_{SF} \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) E_{SR} \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} E_{LR} \right]} \quad (6-3)$$

$$S_{21A} = \frac{\left[1 - \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) (E_{SR} - E_{LF}) \right] \left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right)}{\left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) E_{SR} \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} E_{LR} \right]} \quad (6-4)$$

$$S_{12A} = \frac{\left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) (E_{SF} - E_{LR}) \right] \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right)}{\left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) E_{SF} \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) E_{SR} \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} E_{LR} \right]} \quad (6-5)$$

$$S_{22A} = \frac{\left[\left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) \left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) E_{SF} \right] \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LR} \right]}{\left[1 + \left(\frac{S_{11M} - E_{DF}}{E_{RF}} \right) E_{SF} \right] \left[1 + \left(\frac{S_{22M} - E_{DR}}{E_{RR}} \right) \right] - \left[\left(\frac{S_{21M} - E_{XF}}{E_{TF}} \right) \left(\frac{S_{12M} - E_{XR}}{E_{TR}} \right) E_{LF} E_{LR} \right]} \quad (6-6)$$

식 (6-3) ~ 식 (6-6)에서

- E_{DF} = forward residual directivity
- E_{SF} = forward residual source match
- E_{RF} = forward residual reflection tracking
- E_{XF} = forward crosstalk

- E_{LF} = forward load match
- E_{TF} = forward transmission tracking
- E_{DR} = reverse residual directivity
- E_{SR} = reverse residual source match
- E_{RR} = reverse residual reflection tracking
- E_{XR} = reverse crosstalk
- E_{LR} = reverse load match
- E_{TR} = reverse transmission tracking

이다.

제 4 절 회로망 분석기의 오차 분석

1. Systematic 오차의 원인

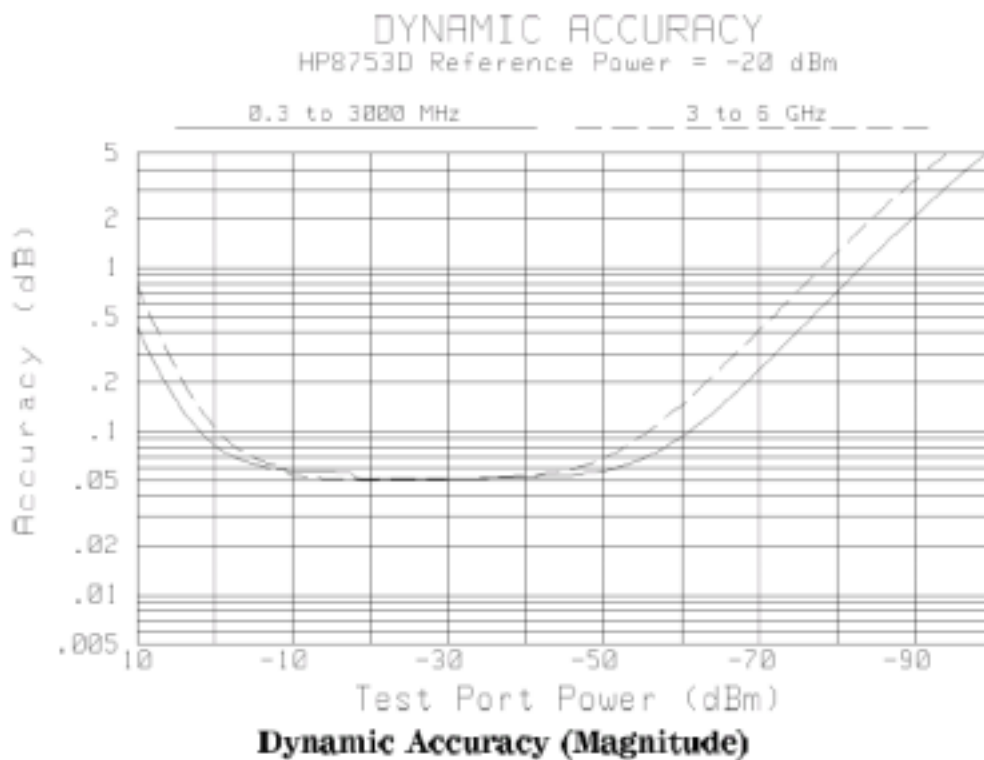
- E_{DF} = forward residual directivity
- E_{SF} = forward residual source match
- E_{RF} = forward residual reflection tracking
- E_{XF} = forward crosstalk
- E_{LF} = forward load match
- E_{TF} = forward transmission tracking
- E_{DR} = reverse residual directivity
- E_{SR} = reverse residual source match
- E_{RR} = reverse residual reflection tracking
- E_{XR} = reverse crosstalk
- E_{LR} = reverse load match
- E_{TR} = reverse transmission tracking
- A_M = magnitude dynamic accuracy
- AP = phase dynamic accuracy

가. HP8753D의 측정 포트 특성 (50 Ω , Type-N)

표 6-2 HP8753D의 특성

	주파수 범위			
	30 kHz~300 kHz	300 kHz~1.3 GHz	1.3 GHz~3 GHz	3 GHz~6 GHz
Directivity	50 dB	50 dB	47 dB	40 dB
Source Match	49 dB	42 dB	36 dB	32 dB
Load Match	50 dB	50 dB	47 dB	40 dB
Reflection Tracking	± 0.005 dB	± 0.009 dB	± 0.019 dB	± 0.070 dB
Transmission Tracking	± 0.014 dB	± 0.013 dB	± 0.026 dB	± 0.065 dB

나. 동작영역 정확도



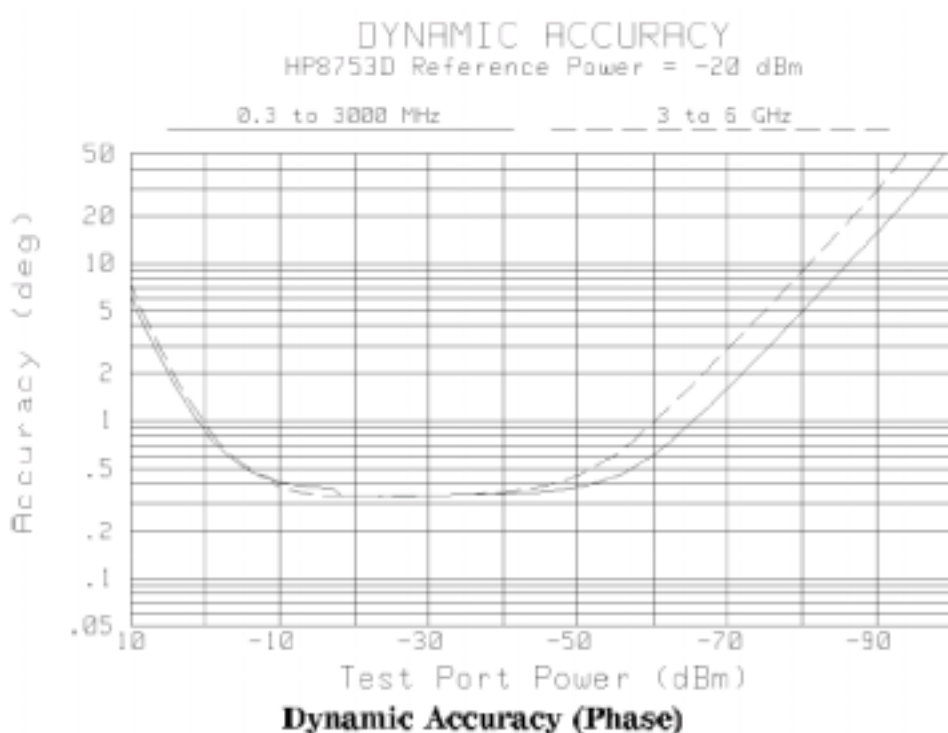


그림 6-11 크기 및 위상 측정시 동작영역 정확도

2. 우연 오차의 원인

- N_F = noise floor
- N_T = trace noise
- C_{R1} = port 1 cable reflection stability
- C_{TM1} = port 1 cable magnitude transmission stability
- C_{TP1} = port 1 cable phase transmission stability
- C_{R2} = port 2 cable reflection stability
- C_{TM2} = port 2 cable magnitude transmission stability
- C_{TP2} = port 2 cable phase transmission stability
- R_{R1} = port 1 connector reflection repeatability
- R_{T1} = port 1 connector transmission repeatability

- R_{R2} = port 2 connector reflection repeatability
- R_{T2} = port 2 connector transmission repeatability

가. 크기의 특성

- Display resolution : 0.01 dB/Division
- Marker resolution : 0.001 dB
- Trace noise : - 30 kHz ~ 3 GHz : < 0.006 dB rms
- 3 GHz ~ 6 GHz : < 0.010 dB rms
- Reference level resolution : 0.001 dB
- Stability : - 30 kHz ~ 3 GHz : 0.02 dB/°C
- 3 GHz ~ 6 GHz : 0.04 dB/°C

나. 위상의 특성

- Display resolution : 0.01°/Division
- Marker resolution : 0.01°
- Trace noise : - 30 kHz ~ 3 GHz : < 0.038°rms
- 3 GHz ~ 6 GHz : < 0.070°rms
- Reference level resolution : 0.01°
- Stability : - 30 kHz ~ 3 GHz : 0.05°/°C
- 3 GHz ~ 6 GHz : 0.2°/°C

다. 컨넥터 반복도 : R_{R1} , R_{T1} , R_{R2} , R_{T2}

적절히 연결한 경우의 컨넥터 반복도를 표 6-3에 나타내었다.

표 6-3 컨넥터 반복도

Type-N	
0 ~ 2 GHz	0.0006
2 ~ 8 GHz	0.0006
8 ~ 12 GHz	0.0010

라. 케이블의 안정도 : C_{R1} , C_{R2} , C_{TM1} , C_{TM2} , C_{TP1} , C_{TP2}

케이블의 반사 안정도인 C_{R1} 과 C_{R2} 의 측정은 측정 케이블의 끝에 고정된 부하를 연결하고 케이블의 이동범위를 움직여서 반사계수의 변화로부터 구한다. 그림 6-12은 이를 측정한 예이다. 이 그림에서는 60 dB에서 침두값이 나타나므로 $10^{(-60/20)} = 0.001$ 이 케이블의 반사 안정도이다.

케이블의 전송 안정도는 케이블의 한쪽 끝에 SHORT를 연결하고 케이블의 위치에 따라 반사계수의 변화로부터 측정한다. 이 경우 측정되는 양이 양방향이므로 이 값의 반을 구하여 케이블 안정도를 측정한다. 그림 6-12는 양방향 케이블 안정도를 측정한 예이다. 이 그림에서는 0.01360 dB에서 침두 값이 나타나므로 $10^{(0.013/40)} - 1 = 0.00075$ 가 케이블의 전송 안정도 안정도이다. 위상의 경우도 단방향 케이블 위상 안정도는 양방향 위상 안정도의 1/2이다. 양방향 전송 안정도와 위상 안정도의 측정값을 각각 그림 6-13과 그림 6-14에 나타내었다.

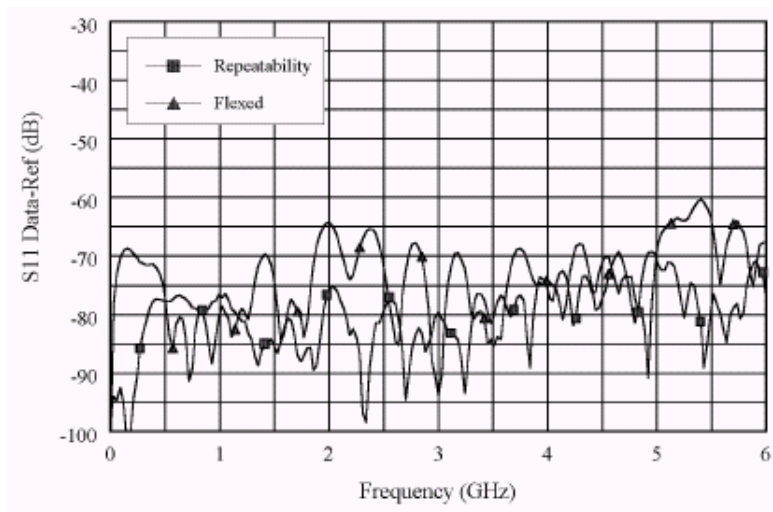


그림 6-12 케이블의 안정도의 측정 예 (C_{R1} , C_{R2})

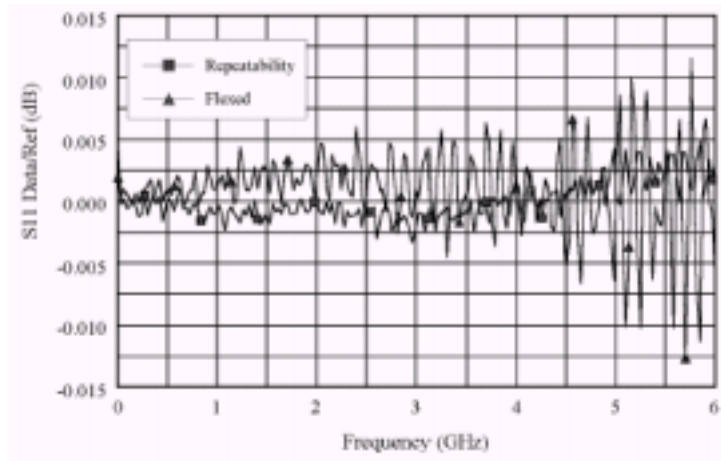


그림 6-13 케이블의 양방향 전송 안정도

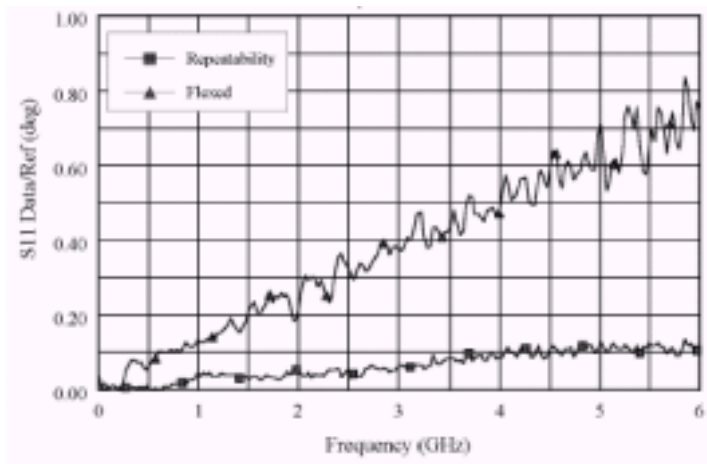


그림 6-14 케이블의 양방향 위상 안정도

3. 측정 불확도 방정식

가. 순방향 반사계수의 크기 측정 불확도

$$\Delta S_{11(\text{mag})} = \sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2} \quad (6-6)$$

식 (6-6)에서

$$\text{Systematic} = E_{DF} + E_{RF} S_{11} + E_{SF} S_{11}^2 + E_{LF} S_{21} S_{12} + A_M S_{11}$$

$$\text{Stability} = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = C_{RM1}^2 (1 + S_{11}^2) + 4C_{TM1}^2 S_{11}^2 + C_{RM2}^2 S_{21}^2 S_{12}^2$$

$$R^2 = (R_{R1}(1 + S_{11}^2) + 2R_{T1} S_{11})^2 + (R_{R2} S_{21} S_{12})^2$$

$$\text{Noise}^2 = (N_T S_{11})^2 + N_F^2$$

이다.

나. 순방향 반사계수의 위상 측정 불확도

$$\Delta S_{11(\text{phase})} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(\text{Systematic} + \text{Stability})^2 + \text{Noise}^2}}{S_{11}} \right) + 2C_{TP1} \quad (6-7)$$

식 (6-7)에서

$$\text{Systematic} = E_{DF} + E_{RF} S_{11} + E_{SF} S_{11}^2 + E_{LF} S_{21} S_{12} + \sin(A_p) S_{11}$$

$$\text{Stability} = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = C_{RM1}^2 (1 + S_{11}^2) + 4C_{TM1}^2 S_{11}^2 + C_{RM2}^2 S_{21}^2 S_{12}^2$$

$$R^2 = (R_{R1}(1 + S_{11}^2) + 2R_{T1} S_{11})^2 + (R_{R2} S_{21} S_{12})^2$$

$$\text{Noise}^2 = (N_T S_{11})^2 + N_F^2$$

이다.

다. 순방향 전송특성의 크기측정 불확도

$$\Delta S_{21(\text{mag})} = \sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2} \quad (6-8)$$

식 (6-8)에서

Systemic=

$$E_{XF} + S_{21} (E_{TF} + E_{SF} S_{11} + E_{LF} S_{22} + E_{SF} E_{LF} S_{21} S_{12} + A_M)$$

$$Stability = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = S_{21}^2 (C_{TM1}^2 + C_{TM2}^2 + (C_{R1} S_{11})^2 + (C_{R2} S_{22})^2)$$

$$R^2 = S_{21}^2 ((R_{T1} + R_{R1} S_{11})^2 + (R_{T2} + R_{R2} S_{22})^2)$$

$$Noise^2 = (N_T S_{21})^2 + N_F^2$$

이다.

라. 순방향 전송특성의 위상측정 불확도

$$\Delta S_{21(\text{phase})}$$

$$= \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2}}{S_{21}} \right) + C_{TP1} + C_{TP2}$$

(6-9)

식 (6-9)에서

Systematics =

$$E_{XF} + S_{21} (E_{TF} + E_{SF} S_{11} + E_{LF} S_{22} + E_{SF} E_{LF} S_{21} S_{12} + \sin(A_p))$$

$$Stability = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$\begin{aligned}
C^2 &= S_{21}^2 (C_{TM1}^2 + C_{TM2}^2 + (C_{R1} S_{11})^2 + (C_{R2} S_{22})^2) \\
R^2 &= S_{21}^2 ((R_{T1} + R_{R1} S_{11})^2 (R_{T2} + R_{R2} S_{22})^2) \\
Noise^2 &= (N_T S_{21})^2 + N_F^2
\end{aligned}$$

이다.

마. 역방향 반사계수의 크기 측정 불확도

$$\Delta S_{22(\text{mag})} = \sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2} \quad (6-10)$$

식 (6-10)에서

$$\begin{aligned}
Systematic &= E_{DR} + E_{RR} S_{22} + E_{SR} S_{22}^2 + E_{LR} S_{21} S_{12} + A_M S_{22} \\
Stability &= \sqrt{C^2 + R^2} \\
C^2 &= C_{RM2}^2 (1 + S_{22}^4) + 4C_{TM2}^2 S_{22}^2 + C_{RM1}^2 S_{21}^2 S_{12}^2 \\
R^2 &= (R_{R2} (1 + S_{22}^2) + 2R_{T2} R_{22}) + (R_{R1} S_{21} S_{12})^2 \\
Noise^2 &= (N_T S_{21})^2 + N_F^2
\end{aligned}$$

이다.

바. 역방향 반사계수의 위상 측정 불확도

$$\Delta S_{22(\text{phase})} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2}}{S_{22}} \right) + 2C_{TP2} \quad (6-11)$$

식 (6-11)에서

$$Systematic = E_{DR} + E_{RR} S_{22} + E_{SR} S_{22}^2 + E_{LR} S_{21} S_{12} + \sin(A_p) S_{22}$$

$$Stability = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = C_{RM2}^2 (1 + S_{22}^4) + 4C_{TM2}^2 S_{22}^2 + C_{RM1}^2 S_{21}^2 S_{12}^2$$

$$R^2 = (R_{R2} (1 + S_{22}^2) + 2R_{T2} R_{22}) + (R_{R1} S_{21} S_{12})^2$$

$$Noise^2 = (N_T S_{21})^2 + N_F^2$$

이다.

사. 역방향 전송특성의 크기측정 불확도

$$\Delta S_{12(mag)} = \sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2} \quad (6-12)$$

식 (6-12)에서

Systematic =

$$E_{XR} + S_{12} (E_{TR} + E_{SR} S_{22} + E_{LR} S_{11} + E_{SR} E_{LR} S_{22} S_{12} + A_M)$$

$$Stability = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = S_{12}^2 (C_{TM1}^2 + C_{TM2}^2 + (C_{R1} S_{11})^2 + (C_{R2} S_{22})^2)$$

$$R^2 = S_{12}^2 ((R_{T1} + R_{R1} S_{11})^2 + (R_{T2} + R_{R2} S_{22})^2)$$

$$Noise^2 = (N_T S_{12})^2 + N_F^2$$

이다.

아. 역방향 전송특성의 위상측정 불확도

$$\Delta S_{12(phase)}$$

$$= \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{(Systematic + Stability)^2 + Noise^2}}{S_{12}} \right) + C_{TP1} + C_{TP2} \quad (6-13)$$

식 (6-13)에서

$$Systematic = E_{XR} + S_{12} (E_{TR} + E_{SR} S_{22} + E_{LR} S_{11} + E_{SR} E_{LR} S_{22} S_{12} + \sin(A_P))$$

$$Stability = \sqrt{C^2 + R^2}$$

$$C^2 = S_{12}^2 (C_{TM1}^2 + C_{TM2}^2 + (C_{R1} S_{11})^2 + (C_{R2} S_{22})^2)$$

$$R^2 = S_{12}^2 ((R_{T1} + R_{R1} S_{11})^2 + (R_{T2} + R_{R2} S_{22})^2)$$

$$Noise^2 = (N_T S_{12})^2 + N_F^2$$

이다.

제 5 절 회로망 분석기의 오차계산 예

제 4 절의 결과를 이용하여 반사계수의 크기 및 위상 측정 오차를 계산하여보면 그림 6-15와 같고, 전송계수의 크기 및 위상 측정 오차를 계산하여보면 그림 6-16과 같다.

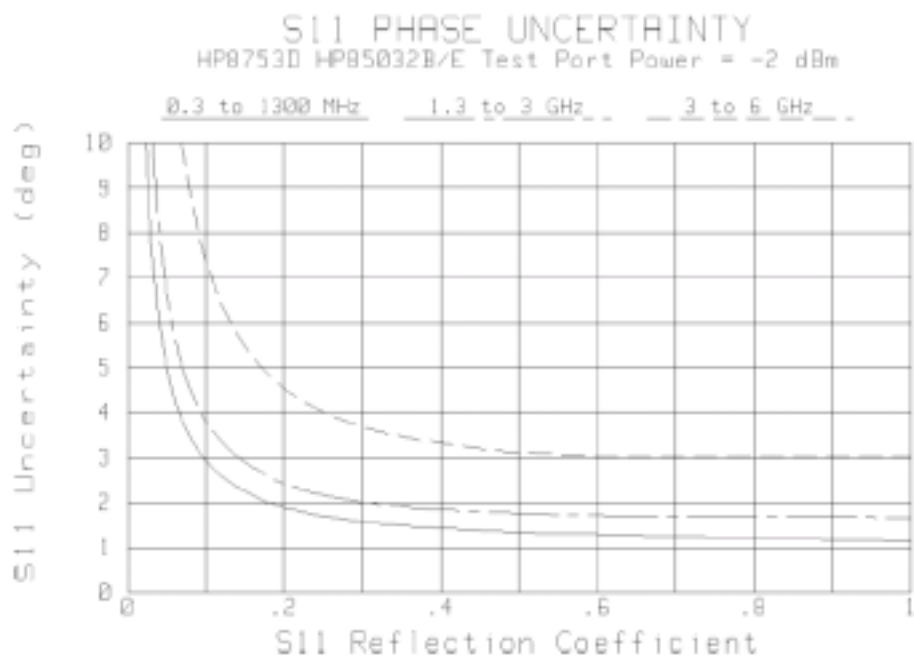
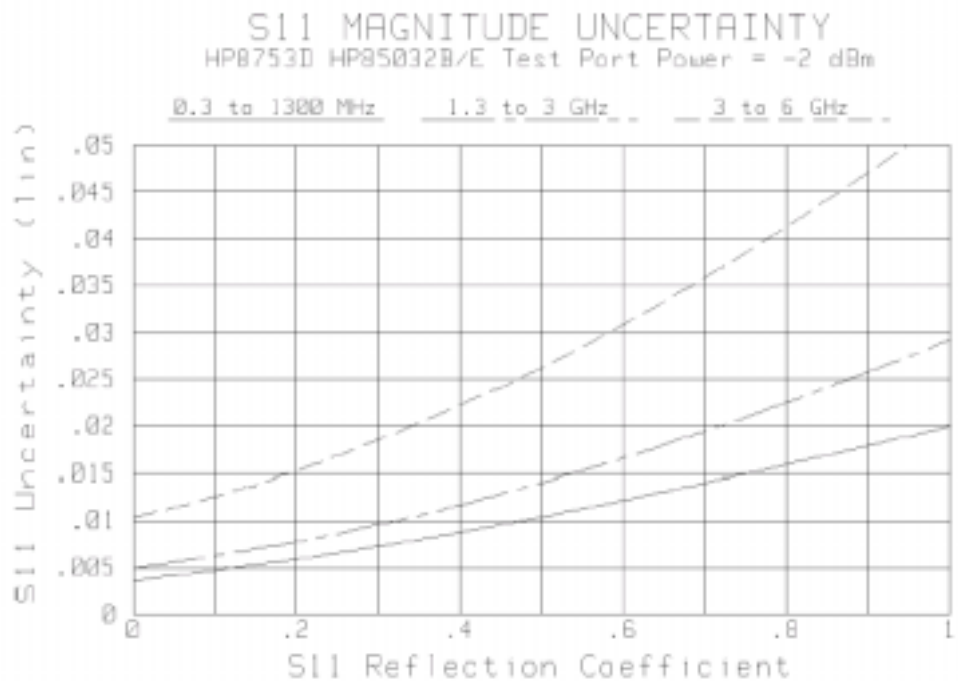


그림 6-15 반사계수 측정 오차(크기 및 위상)

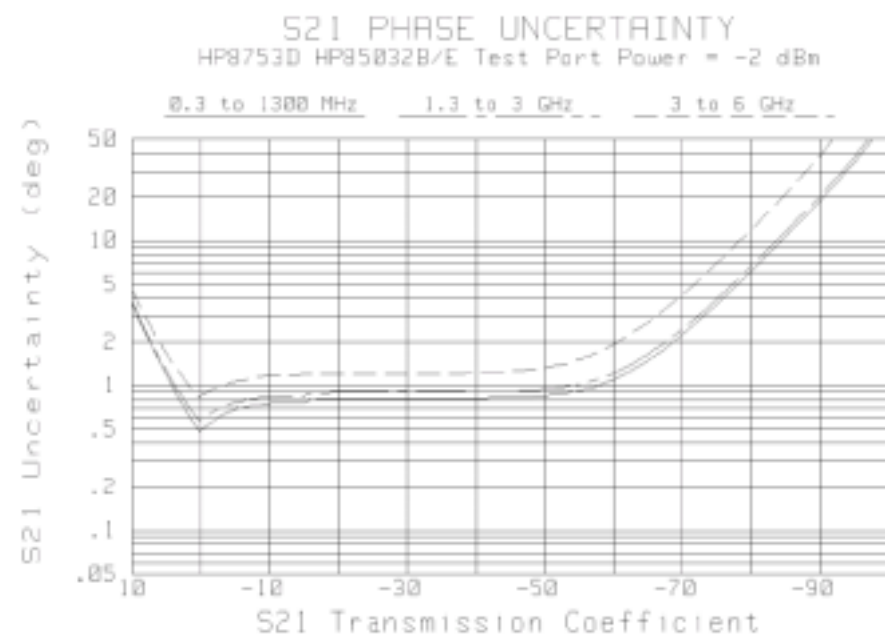
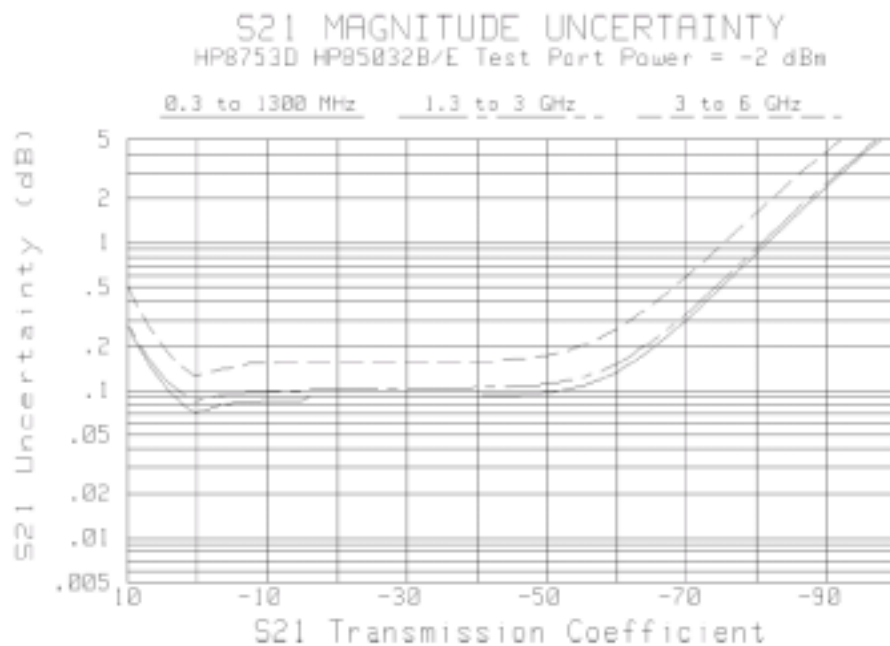


그림 6-16 전송계수 측정 오차(크기 및 위상)

제 7 장 전자기장의 세기측정 및 안테나 교정법

제 1 절 안테나에서 복사된 전자기장의 특성

1. 근방 영역과 원방 영역에서 전파의 특성

안테나에서 전파가 복사될 때 안테나의 종류 및 구조에 따라 안테나에서 근접한 근방영역과 안테나에서 멀리 떨어진 원방 영역의 구분도 달라지게 되고, 근방영역과 원방 영역에서 안테나에서 복사된 전자기장의 특성도 다르게 된다. 안테나에서 전파가 복사될 때 안테나 주위의 장의 영역을 구분하여보면 그림 7-1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 7-1에서 원방 영역장은 Fraunhofer 영역으로도 불리며 이 영역에서의 복사 전자기장은 평면파가 된다. 원방 영역장에서 복사되는 전파의 전력 밀도(또는 포인팅 전력)는 식 7-1과 같이 나타낸다.

$$P_d = E \times H \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (7-1)$$

식 7-2에서

E : 전기장의 세기 [V/m]

H : 자기장의 세기 [A/m]

이다.

안테나의 크기가 D 이고 안테나로 부터의 거리를 r 이라 할 때 원방영역의 경계는 일반적으로 식 7-2와 같이 나타낸다.

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (D \ll \lambda) \quad (7-2 \text{ a})$$

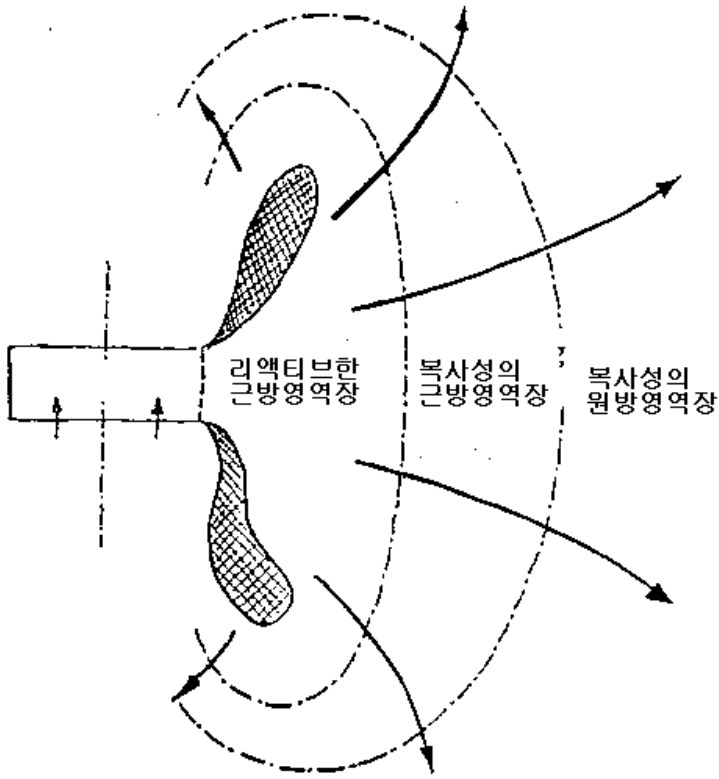


그림 7-1 안테나에서 복사된 장의 분류

$$r = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (D \gg \lambda/2) \quad (7-2 \text{ b})$$

평면파의 전기장의 세기와 자기장의 세기는 파동 임피던스와 식 (7-3)의 관계가 있다.

$$Z_0 = \frac{E}{H} = 120\pi [\Omega] = 377 [\Omega] \quad (7-3)$$

복사성의 근방 영역은 Fresnel 영역으로도 불리며 복사성의 원방 영역과 리액티브한 근방 영역의 사이에 해당하며 식 (7-4)로 나타내지는 영역이다.

$$0.62\sqrt{D^3/\lambda} \leq r < 2D^2/\lambda \quad (7-4)$$

이 영역의 복사 전자기장은 평면파를 형성하지 않고 파동 임피던스도 $377 [\Omega]$ 이 되지 않는다.

근방 영역에서 안테나가 자기장을 복사시키는 저 임피던스 안테나인 루프 안테나와 같은 경우에는 파동 임피던스가 $377 [\Omega]$ 보다 매우 작고, 안테나가 전기장을 복사시키는 고 임피던스 안테나인 모노폴 안테나와 같은 경우에는 파동 임피던스가 $377 [\Omega]$ 보다 매우 크다.

리액티브한 근방 영역은 안테나에 아주 근접한 영역으로 식 (7-5)로 나타내지는 영역이다.

$$r < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (7-5)$$

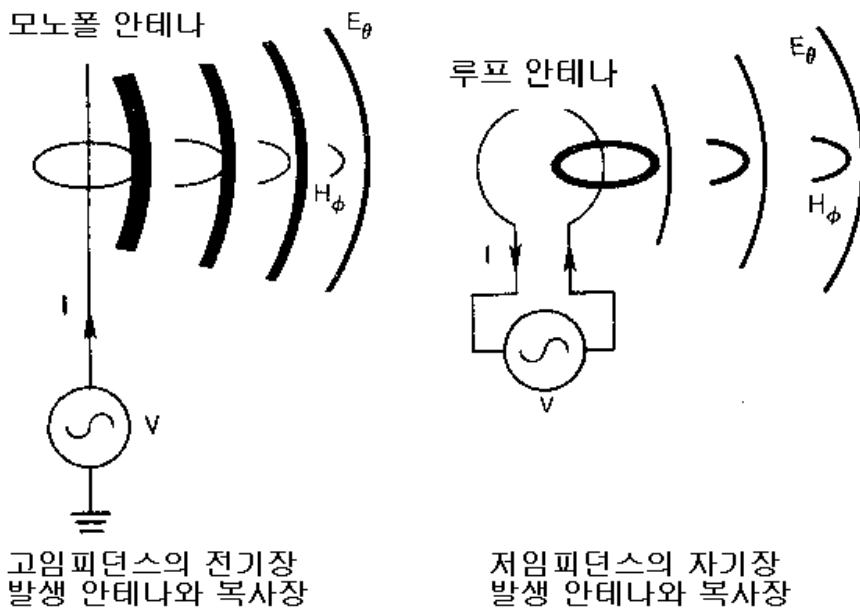


그림 7-2 안테나에서 복사되는 전자기장의 특성

2. 전자기장의 세기 측정량과 단위

안테나에서 복사되는 전자기장의 세기의 측정량과 단위는 측정에 사용되

는 안테나 및 측정이 이루어지는 영역의 전자기장의 특성에 따라 다르게된다.

앞에서 살펴 본 것과 같이 안테나 주위의 장의 영역 중에서 복사성의 근방영역에서는 주로 전기장의 세기 (E [V/m]), 자기장의 세기 (H [A/m]) 나 자속밀도 (B [Wb/m²], [T])를 측정한다.

복사성의 원방 영역에서는 평면파가 복사되며 이 영역에서는 식 (7-6)과 같이 전력 밀도를 측정한다. 또한 평면파의 경우 복사 전기장과 복사 자기장의 비가 전파의 자유공간 파동 임피던스를 나타내므로 식 (7-7)의 전기장이나 식 (7-8)의 자기장을 측정한다.

$$P_d = \frac{E^2}{377} = 377H^2 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (7-6)$$

$$E = \sqrt{377P_d} = 377H \text{ [V/m]} \quad (7-7)$$

$$H = \sqrt{P_d/377} = E/377 \text{ [A/m]} \quad (7-8)$$

전자기장의 세기의 측정에 이용되는 중요한 측정량 및 단위를 나타내면 표 7-1과 같다.

전자파의 세기를 나타낼 때 마이크로파를 다루는 영역에서는 일반적으로 전력 밀도를 다루나 EMC나 방송 분야에서는 전기장의 세기를 선호한다. 각종 EMC 규격을 살펴볼 때 전기장이나 전자기장의 세기로 한계 값을 정하고 있다.

표 7-1 전자기장의 세기 측정량과 측정 단위

측정량	응용단위	실용 단위	dB 단위
전기장의 세기	V/m	$\mu\text{V/m}$	dBV/m, dB $\mu\text{V/m}$
자기장의 세기	A/m	$\mu\text{A/m}$	dBA/m, dB $\mu\text{A/m}$
자속 밀도	T [Wb/m ²] 1 [T] = 10 ⁴ [G]	pT	dB T, dBpT
전력 밀도	W/m ²	mW/cm ²	dBW/m ² , dBmW/cm ²

EMC 분야에서 실용적인 측면에서 측정량 및 단위의 관계를 살펴보는 것도 매우 중요하리라 생각된다. 자유 공간의 한 지점에서 전기장의 세기, 파동 임피던스와 전력 밀도(포인팅 전력)의 관계는 식 (7-9 a) ~ 식 (7-9 c)와 같으며, 평면파의 경우 $Z_w = Z_0 = 377 [\Omega]$ 이므로 전기장의 세기로 나타내면 식 (7-10)과 같이 구해진다.

$$P_d = \frac{E^2}{Z_w} \quad [W/m^2] \quad (7-9 \text{ a})$$

$$P \quad [dBW/m^2] = 20\log E \quad [V/m] - 10\log Z_w \quad (7-9 \text{ b})$$

$$\begin{aligned} P \quad [dBm/m^2] &= E \quad [dBV/m] - 10\log Z + 30 \quad [dB] \\ &= E \quad [dB\mu V/m] - 90 \quad [dB] - 10\log Z_w \\ &= E \quad [dB\mu V/m] - 116 \quad [dB] \end{aligned} \quad (7-9 \text{ c})$$

$$E \quad [dB\mu V/m] = P \quad [dBm/m^2] + 116 \quad [dB] \quad (7-10)$$

EMC 분야에서 자기장의 세기의 측정은 자기자의 세기와 전기장의 세기 및 파동 임피던스와의 관계로부터 식 (7-11 a) ~ 식 (7-11 b) 나타낼 수 있으며 자유 공간의 경우 파동 임피던스는 $Z_w = Z_0 = 377 [\Omega]$ 이므로 식 (7-12)와 같이 구해진다.

$$H \quad [A/m] = \frac{E \quad [V/m]}{Z_w \quad [\Omega]} \quad (7-11 \text{ a})$$

$$H \quad [\mu A/m] = \frac{E \quad [\mu V/m]}{Z_w} \quad [\Omega] \quad (7-11 \text{ b})$$

$$H \quad [dB\mu A/m] = E \quad [dB\mu V/m] - 20\log Z_w \quad (7-11 \text{ c})$$

$$H [\text{dB}\mu\text{A/m}] = E [\text{dB}\mu\text{V/m}] - 52 [\text{dB}] \quad (7-12)$$

EMC 분야에서 자기장의 세기 측정시 자기장의 세기와 더불어 자속밀도로 규격을 정하는 경우가 있으며 이에 대하여 살펴보자. 자기장의 세기와 자속 밀도와의 관계는 식 (7-13 a) ~ 식 (7-13 c)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 H [\text{T}] \quad (1 [\text{T}] = 1 [\text{Wb/m}^2] = 10^4 \text{ G}) \\ &= 4\pi \times 10^{-7} [\text{H/m}] \times H [\text{A/m}] \end{aligned} \quad (7-13 \text{ a})$$

$$\begin{aligned} B [\text{dB T}] &= H [\text{dBA/m}] - 118 [\text{dB}] \\ &= H [\text{dB}\mu\text{A/m}] - 238 [\text{dB}] \end{aligned} \quad (7-13 \text{ b})$$

$$\begin{aligned} B [\text{dBpT}] &= B [\text{dB T}] + 240 [\text{dB}] \\ &= H [\text{dBA/m}] + 122 [\text{dB}] \end{aligned} \quad (7-13 \text{ c})$$

전기장의 세기와 자속밀도는 식 (7-14 a)~식 (7-14 b)로 나타내 진다.

$$B [\text{T}] = \mu_0 H = \mu_0 \frac{E}{Z_w} \quad (7-14 \text{ a})$$

$$B [\text{dBpT}] = E [\text{dBV/m}] + 190 [\text{dBpT}/\mu\text{V/m}] \quad (7-14 \text{ b})$$

제 2 절 안테나 인자와 안테나 정수의 관계

1. 안테나 인자의 정의

안테나 인자와 안테나 정수와의 관계를 나타낸 그림 7-3에서 안테나 인자는 수신안테나가 위치한 지점의 전기장의 세기와 안테나에 연결된 50 Ω 부하에서 읽히는 전압의 비로 식 (7-15)와 같이 정의한다.

$$AF = \frac{E}{V_L} [1/m] \quad (7-15)$$

식 (7-15)에서

$E [V/m]$: 안테나가 위치한 지점의 전기장의 세기

$V_L [V]$ or $[\mu V]$: 안테나에 연결된 50Ω 부하의 전압

를 나타낸다.

안테나의 교정 결과로부터 안테나 인자를 알고 있을 때 안테나에 입사하는 전기장의 세기는 식 (7-16)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E [dB\mu V/m] = V [dB\mu V] + AF [dB/m] \quad (7-16)$$

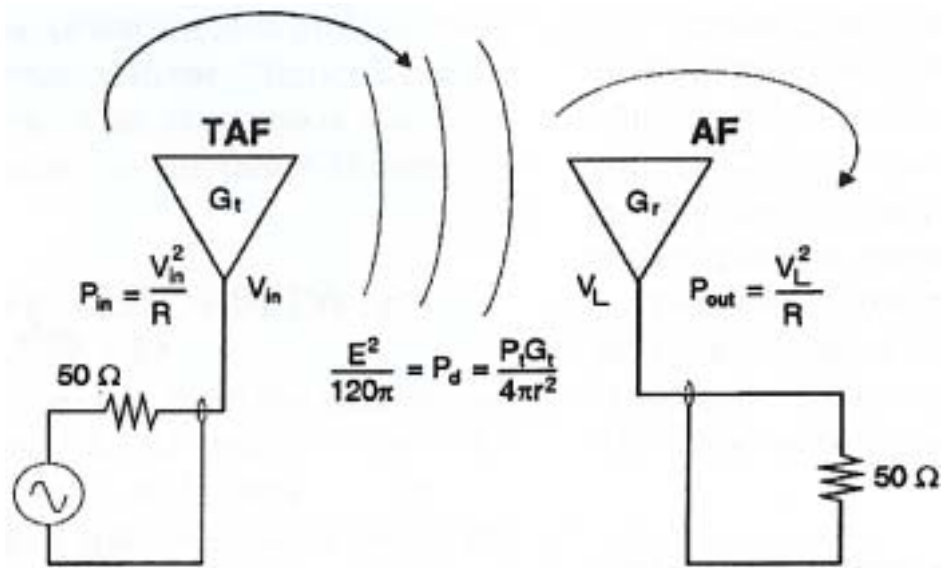


그림 7-3 안테나 정수들 사이의 관계

2. 안테나의 실효 길이와 효율에 의한 안테나 인자

안테나 인자의 또 다른 정의는 안테나의 실효 길이와 안테나에 유기된 전압을 부하에 전달할 때의 효율로 식 (7-17)로 나타내진다.

$$AF = \frac{1}{h_e A_e} [1/m] \quad (7-17 \text{ a})$$

$$AF [dB/m] = -h_e [dB/m] - A_e [dB] \quad (7-17 \text{ b})$$

식 (7-17)에서

h_e : 안테나의 실효 길이 [m]

A_e : 안테나 효율 [V_1/V_0]

V_{oc} : 안테나에 유기된 개방회로 전압

V_L : 안테나에 유기된 전압이 안테나에 연결된 부하에
전달된 전압(부하는 주로 $50 [\Omega]$ EMC 수신기임)

이다.

따라서 안테나 인자에 대한 앞의 두 정의를 합쳐서 생각하여보면 식 (7-18)을 얻는다.

$$AF = \frac{E}{V_L} = \frac{V_{oc}}{h_e V_L} [1/m] \quad (7-18)$$

3. 안테나 실효면적과 이득에 의한 안테나 인자

안테나 실효 면적은 안테나가 위치한 지점의 전력 밀도와 그 안테나에 연결된 부하에 전달되는 전력의 비로 식 (7-19)와 같이 구해진다.

$$A_e = \frac{P_{out}}{P_d} [m^2] \quad (7-19)$$

식 (7-19)에서

A_e : 수신 안테나의 실효 면적

P_{out} : 안테나에 연결된 부하에 전달된 전력 [W]

P_d : 안테나에 입사하는 전력 밀도 [W/m^2]

이다.

식 (7-19)를 정리하면 식 (7-20)을 얻는다.

$$P_{out} = P_d A_e [W] \quad (7-20)$$

식 (7-20)에서

$$P_{out} = \frac{V_L^2}{50}$$

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi}$$

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

이다.

따라서 식 (7-20)은 식 (7-21)과 같이 된다.

$$\frac{V_L^2}{50} = \frac{E^2}{120\pi} \times \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (7-21)$$

안테나 인자의 정의로부터 식 (7-21)을 이용하여 안테나 인자를 구하면 식 (7-22)와 같이된다.

$$AF = \frac{E}{V_L} = \sqrt{\frac{480\pi^2}{50\lambda^2 G_r}} = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G_r}} [1/m] \quad (7-22 \text{ a})$$

$$AF [\text{dB}/m] = 19.8 [\text{dB}] - 20\log(\lambda) - 10\log(G_r) \quad (7-22 \text{ b})$$

4. 송신 안테나 인자

그림 7-3에서 송신 안테나 인자는 식 (7-23)과 같이 송신 안테나에서 일정하게 떨어진 지점의 전기장의 세기와 송신기로부터 송신 안테나에 가해진 전압의 비로 정의한다.

$$TAF = \frac{E}{V_{in}} [1/m] \quad (7-23)$$

안테나에서 복사된 전기장의 세기는 무손실 안테나의 경우 송신안테나의 이득 (G_t), 안테나에 공급된 전력 (P_{in}) 및 안테나에서 측정 점까지의 거리 (r)로 식 (7-24)와 같이 구해진다.

$$E = \frac{1}{r} \sqrt{30P_{in}G_t} \quad (7-24)$$

식 (7-24)는

$$P_d = \frac{P_{in}G_t}{4\pi^2} : \text{송신 안테나에서 } r \text{인 지점의 전력 밀도}$$

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi} : \text{송신 안테나에서 } r \text{인 지점에서 전계의 세기와 전력 밀도와의 관계}$$

로부터 구해진 전기장의 세기이다.

안테나 입력에 가해지는 전압 (V_{in})과 안테나의 입력 저항 (R) 및 안테나에 전달되는 전력 (P_{in})과는 식 (7-25)의 관계가 있다.

$$V_{in} = \sqrt{P_{in}R} \quad (7-25)$$

따라서 송신 안테나 인자는 식 (7-26)과 같이 구해진다.

$$TAF = \frac{E}{V_{in}} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{30G_t}{R}} \quad (7-26)$$

식 (7-26)을 살펴볼 때 송신 안테나 입력 저항을 알고있다면 송신 안테나 인자는 안테나 입력에 가해지는 전력과는 관계가 없고 안테나의 거리에 반비례하며 송신 안테나 이득의 제곱근에 비례함을 알 수 있다. 그러나 송신 안테나 인자를 구하는 실제의 경우에는 안테나 효율, 부정합의 효과 및 다른 손실 요인들을 고려하여야 한다.

5. 수신 안테나 인자 (AF)와 송신 안테나 인자(TAF)의 관계

식 (7-22 b)로 나타낸 안테나 인자를 정리하여 안테나 이득을 구하면 식 (7-27)을 얻는다.

$$G_r [\text{dB}] = 20 \log(f[\text{MHz}]) - AF[\text{dB/m}] - 29.79 [\text{dB}] \quad (7-27)$$

따라서 수신 안테나 인자 (AF)와 송신 안테나 인자(TAF)의 관계는 식 (7-28) 과 같이 구해진다.

$$TAF [\text{dB}] = 20 \log(f[\text{MHz}]) - AF[\text{dB/m}] - 32.0 [\text{dB}] - 20 \log r [\text{m}] \quad (7-28)$$

식 (7-28)의 관계식은 안테나 인자(AF)나 송신 안테나 인자 (TAF) 중에 하나가 측정된 조건에서만 유효하다. 만약 안테나 인자(AF)를 OATS와 같은 접지판에서 측정하였다면, 이 안테나 인자(AF)로부터 계산한 송신 안테나 인자(TAF)는 비슷한 조건에서 유효하다.

제 3 절 전자기장의 세기 측정법

1. 전기장의 세기 측정

복사성의 EMC 측정시 측정장비에서 측정되는 측정량은 일반적으로 RF 전압이나 RF 전력이지만 복사성 방출(RE)량 측정을 위해서 필요한 것은 피 측정 장비에서 복사되는 전자기장의 세기이다. 복사성 내성(RS)을 측정하기 위해서는 피 측정 장비가 위치한 지점에 규정된 전자기장의 세기를 만들어야 한다. 이것은 안테나 인자를 알고있는 안테나를 이용하면 측정 가능하며, 이에 대하여 생각하여 보자.

그림 7-4에서 측정에 사용하는 안테나의 안테나 인자 (AF)를 알고있고, 이 안테나에 연결된 50Ω 수신기로 전압(V_L)을 측정한 경우에 안테나가 위치하고 있는 지점의 전기장의 세기는 식 (7-29)로부터 구해진다.

$$E [V/m] = AF \times V_L \quad (7-29 \text{ a})$$

$$E [dB\mu V/m] = AF [dB/m] \times V_L [dB\mu V] \quad (7-29 \text{ b})$$

또한 안테나의 이득(G)을 알고 수신 전력(P_{out})을 측정한 경우의 전기장의 세기는 식 (7-30)을 이용하여 구할 수 있다.

$$E [V/m] = \frac{\pi f [MHz]}{75} \sqrt{\frac{30P_{out}}{G}} \quad (7-30 \text{ a})$$

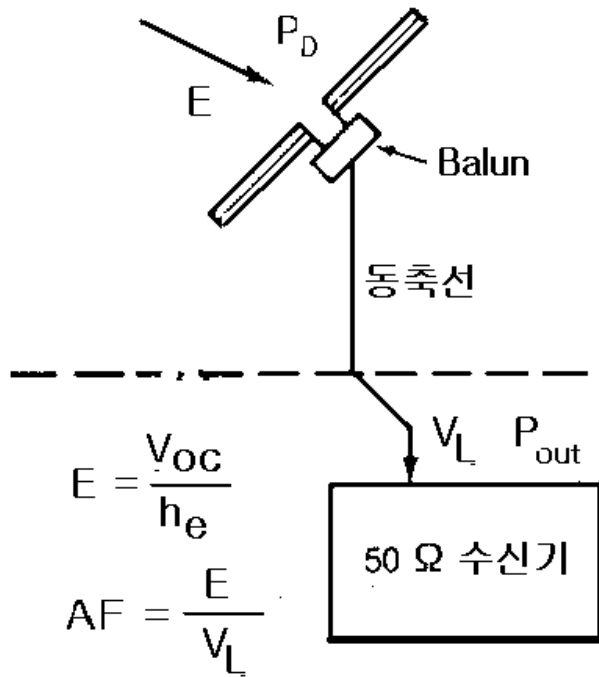


그림 7-4 전기장 측정 시스템

$$\begin{aligned}
 E \text{ [dB}\mu\text{V/m]} &= 20 \log f \text{ [MHz]} - G \text{ [dB]} - 29.79 \text{ [dB]} \\
 &+ P_{out} \text{ [dBm]} + 107 \text{ [dB]}
 \end{aligned}
 \tag{7-30 b}$$

2. 자기장의 세기 측정

루프 안테나를 이용한 자기장의 측정은 그림 7-5와 같은 측정 시스템의 구성에서 수신기로 수신전압을 측정하면 가능하다. 이 때 수신용으로 이용되는 안테나의 안테나 인자에 따라서 식 (7-31) ~ 식 (7-33)과 같은 방법으로 자기장을 측정할 수 있다.

그림 7-5에서 루프 안테나에 도래하는 자기장의 세기를 측정하기 위하여 사용하는 안테나의 안테나 인자가 식 (7-31 a)와 같이 주어진 경우에는 식 (7-31 b)를 이용하여 자기장의 세기를 구할 수 있다.

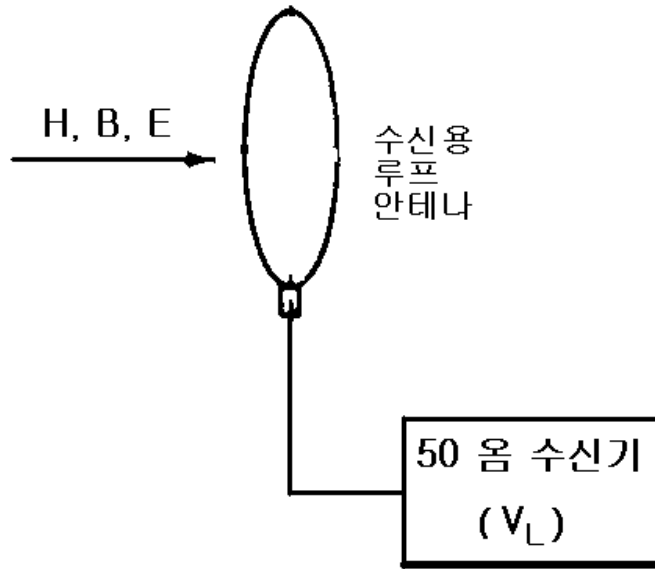


그림 7-5 자기장 측정 시스템

$$AF_1 [\text{S/m}] = \frac{H [\text{A/m}]}{V_L [\text{V}]} \quad (7-31 \text{ a})$$

$$H [\text{dB } \mu\text{A/m}] = AF_1 [\text{dB S/m}] + V_L [\text{dB } \mu\text{V}] \quad (7-31 \text{ b})$$

그림 7-5에서 루프 안테나에 도래하는 자기장의 세기를 측정하기 위하여 사용하는 안테나의 안테나 인자가 식 (7-32 a)와 같이 주어진 경우에는 식 (7-32 b)를 이용하여 자속밀도를 구하고 이로부터 기장의 세기를 구할 수 있다.

$$AF_2 [\text{pT/V}] = \frac{B [\text{pT}]}{V_L [\mu\text{V}]} \quad (7-32 \text{ a})$$

$$B [\text{dB pT}] = V_L [\text{dB } \mu\text{V}] + AF_2 [\text{dB pT}/\mu\text{V}] \quad (7-32 \text{ b})$$

그림 7-5에서 루프 안테나에 도래하는 자기장의 세기를 측정하기 위하여 사용하는 안테나의 안테나 인자가 식 (7-33 a)와 같이 주어진 경우에는

식 (7-33 b)를 이용하여 자속밀도를 구하고 이로부터 자기장의 세기를 구할 수 있다.

$$AF_3 [1/m] = \frac{E [V/m]}{V_L [V]} \quad (7-33 a)$$

$$H [dBA/m] = E [dB\mu V/m] - 51.5 [dB] \quad (7-33 b)$$

제 4 절 안테나 교정법

EMC 측정용 안테나의 교정을 위하여 국제적으로 표준화되어 사용하는 방법으로는 표준 안테나 법, 표준 전자기장 법, 표준 시험장 법 등이 있으며, 이외에 일부 국가 및 기관에서 사용하고있는 수직 방향 주사 법 등이 있다. 이들에 대하여 살펴봄으로서 안테나 표준 확립에 기초 자료로 활용할 수 있도록 하고자 한다.

1. 표준 안테나 법

안테나가 위치한 지점의 전자기장의 세기를 표준 안테나를 이용하여 측정하고, 그 위치에 피 측정용 안테나를 위치시킨 뒤 이 안테나에 연결된 수신기의 지시 값과 비교하여 안테나 인자를 측정하는 방법이다.

그림 7-6은 각 국가의 국가표준기관에서 주로 사용하는 표준 안테나 법을 나타내며 25 MHz ~1 000 MHz의 주파수 영역에서 사용되는 Dipole 안테나, Biconical 안테나 및 Logperiodic 안테나 등 전기장의 세기 측정용 안테나의 교정에 이용하는 방법이다.

교정 방법을 간단히 살펴보면 송신 안테나에서 전파를 복사할 때 수신용 표준 이극 안테나가 위치한 지점에서의 전기장의 세기를 안테나의 실효 길이 (h_e)와 안테나에 유기된 개방 회로 전압 (V_{oc})을 측정하여 식 (7-34)과 같이 수신 안테나가 위치한 지점의 전기장의 세기를 구한 뒤, 수신용 표준 안테나가 위치한 지점에 피 측정 안테나를 위치시킨 후 안테나에 연결된 수

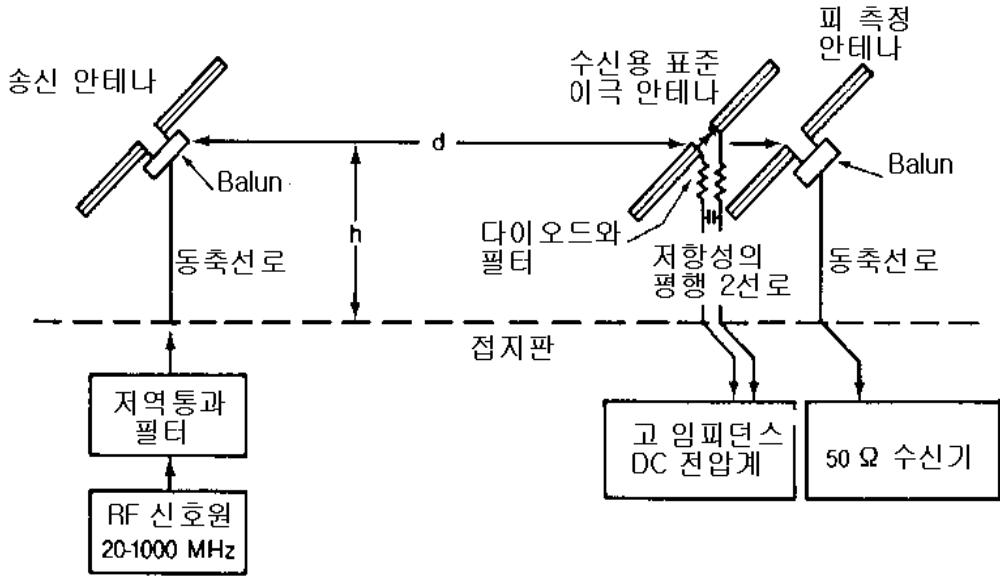


그림 7-6 표준 안테나 법을 이용한 안테나 인자 교정법

신기의 지시전압 (V_L)을 측정하여 식 (7-35)로 표시되는 안테나 인자 (AF)를 구한다.

$$E = \frac{V_{oc}}{h_e} \text{ [V/m]} \quad (7-34)$$

식(7-34)를 이용하여 수신용 표준안테나가 위치한 지점에서 전기장의 세기를 측정하기 위해서는 수신용 표준 안테나의 실효길이를 알고있어야 하고, 수신용 표준 안테나의 출력에 유기 되는 개방회로 전압을 측정하는 기술이 개발되어야 한다.

수신용 표준 안테나는 공진형 반파장 다이폴 안테나가 이용된다. 이 표준 안테나는 안테나의 사용 주파수에서 임피던스의 리액턴스 성분이 0이 되는 공진 길이를 정하고 이 공진 길이에서 안테나에 분포하는 정재파 전류로부터 실효길이를 계산한다.

수신용 표준 안테나에 유기되는 개방 회로 전압의 측정은 수신용 표준 안테나의 출력에 연결된 안테나 전압계를 이용한다. 이 안테나 전압계는 다이오드와 필터로 구성되며 사용하기 전에 교정되어야 한다. 이 안테나 전압계의 교정은 RF 전압표준에 소급되는 RF-DC차의 측정과 주파수 응답 특성을 측정하는 것이다. 또한 피 측정 안테나에 연결된 RF 동축선의 손실과 안테나 전압계에 연결된 선로의 손실도 측정하여야 한다.

이와 같이 식 (7-34)를 이용하여 수신용 표준 안테나를 이용하여 수신용 표준 안테나가 위치한 지점에서 전기장의 세기를 측정하게 되면 식 (7-35)를 이용하여 피 측정 안테나의 안테나 인자를 구할 수 있게 된다.

$$AF = \frac{E}{V_L} [1/m] \quad (7-35)$$

식 (7-35)에서 E는 피 측정 안테나가 위치한 지점의 전기장의 세기로 식 (7-34)로 주어진 것이고, V_L 은 피 측정 안테나에 연결된 임피던스 50 Ω 의 수신기의 지시값과 피 측정 안테나와 수신기를 연결하는 RF 케이블의 손실을 더한 값이다.

2. 기준 시험장 법

그림 7-7의 기준 시험장 법은 ANSI C63.5 방법에 의하여 안테나를 교정하는 방법으로 적용 주파수 범위는 30 MHz ~ 1 000 MHz 이다. 기준 시험장 법은 국제적으로 많은 EMC 관련 기관에서 전기장의 세기 측정용 안테나의 안테나 인자를 측정하기 위하여 사용하고 있다.

기준 시험장 법은 안테나 인자 측정 장소인 야외 시험장이 이상적이라는 가정 하에 3개의 안테나를 적절히 조합하여 각 안테나 조합에서 시험장에서 전송 손실(시험장 감쇠량)을 측정하면 각 안테나의 안테나 인자를 구할 수 있다. 이 때 각 안테나 조합에서 수신용으로 이용하는 안테나는 최대 값을 지시하도록 접지면 위 1 m에서 4 m까지 수직으로 이동한다. 세 안테나를 Ant1, Ant2 와 Ant3라고 하고, Ant1을 송신 안테나로 하고 Ant2와 Ant3를

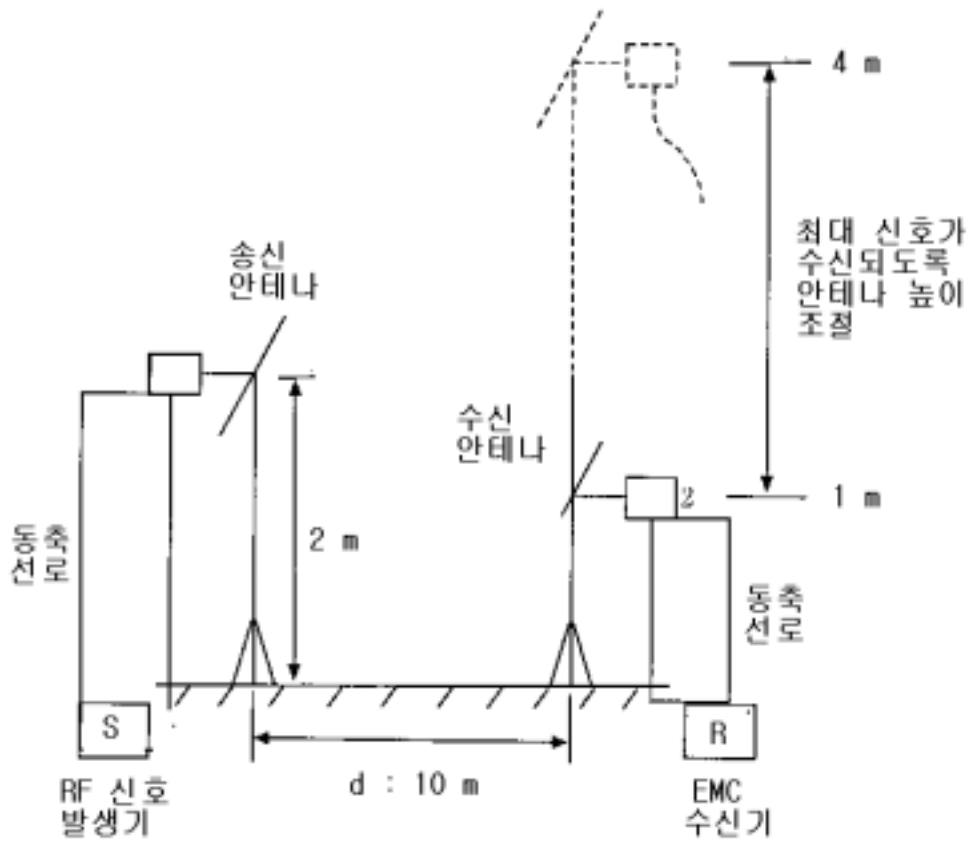


그림 7-7 기준 시험장 법을 이용한 안테나 인자 교정법

수신 안테나로 하여 각 안테나 조합 사이의 전송손실 (A_{21} , A_{31})을 측정하고, Ant2를 송신 안테나로 하고 Ant3를 수신 안테나로 하여 안테나 사이의 전송손실 (A_{32})을 측정하면 식 (7-36 a) ~ 식 (7-36 c)와 같이 각 안테나의 안테나 인자를 구할 수 있다.

$$AF_1 = 10\log(f) - 24.46 + \frac{1}{2}(ED_{\max} + A_{21} + A_{31} - A_{32}) \quad (7-36 \text{ a})$$

$$AF_2 = 10\log(f) - 24.46 + \frac{1}{2}(ED_{\max} + A_{21} + A_{32} - A_{31}) \quad (7-36 \text{ b})$$

$$AF_3 = 10\log(f) - 24.46 + \frac{1}{2}(ED_{\max} + A_{32} + A_{31} - A_{21}) \quad (7-36 \text{ c})$$

식 (7-36 a) ~ 식 (7-36 c)에서

AF_i : 각 안테나들의 안테나 인자 ($I= 1, 2, 3$) [dB/m]

f [MHz] : 주파수

A_{ij} : 각 안테나 조합시 전송손실(시험장 감쇠량)

ED_{\max} : 최대 전기장의 세기

이다.

3. 두 안테나 방법

그림 7-7의 기준 시험장 법에서는 3개의 안테나를 조합하여 송신 안테나는 접지면 위 2 m에 고정시키고 수신 안테나를 접지면 위 1 m에서 4 m까지 수직으로 이동하면서 신호가 최대가 될 때 안테나 사이의 전송손실(시험장 감쇠량)을 측정하여 안테나 인자를 구하였다. 반면에 두 안테나 법은 두 개의 안테나를 사용하며, 이때에는 두 안테나의 특성이 같다는 가정 하에서 이루어진다. 만약 두 안테나의 특성이 다르게되면 그만큼 오차가 커지게 되고, 두 안테나 중 하나의 안테나가 특성이 아주 다른 경우에는 이 방법을 사용할 수 없다.

두 개의 안테나의 특성이 같다면 앞의 기준 시험장 법에서 Ant1과 Ant2가 같은 경우 식 (7-37)을 이용하여 안테나 인자를 구할 수 있다.

$$AF = 10\log(f) - 24.46 + \frac{1}{2}(ED_{\max} + A_{21}) \quad (7-37)$$

식 (7-37)에서

AF : Ant1과 Ant2의 안테나 인자 [dB/m]

f [MHz] : 주파수

A_{21} : 각 안테나 조합시 전송손실(시험장 감쇠량)

ED_{max} : 최대 전기장의 세기

이다.

또 다른 두 안테나 법으로 수직방향 주사법 (height scanning method)이 있으며 이 방법은 극히 일부 기관에서 이용하고 있다. 이 방법은 그림 7-7에서와 같은 야외 시험장에서 송신 안테나와 수신 안테나를 일정거리 (3 m 또는 10 m)에 잘 마주 보도록 정돈하고 송신 안테나와 수신 안테나를 같은 높이를 유지하면서 약 4 m ~ 약 6 m 까지 수직이동 한다.

이 때 수직 이동하면서 전압이나 전력의 평균값을 취하게 되면 두 안테나 사이의 자유공간 전송 손실을 얻게되고 이로부터 자유 공간의 안테나 인자를 구할 수 있게된다.

수직방향 주사법도 앞의 두 안테나 법과 같이 두 안테나의 특성이 같다는 가정 하에서 이루어진다. 만약 두 안테나의 특성이 다르게되면 그만큼 오차가 커지게 되고, 두 안테나 중 하나의 안테나가 특성이 아주 다른 경우에는 이 방법을 사용할 수 없다.

4. 표준 전자기장 법

가. 표준 전기장 법

표준 전기장 법을 이용한 안테나 교정 시스템은 그림 7-8과 같으며, 이 방법을 이용하여 교정하는 안테나는 주로 모노폴 안테나로 교정 주파수 범위는 10 kHz ~300 MHz이다.

그림 7-8에서 송신용 안테나의 길이가 $\lambda/4$ 에 가까운 약 25 MHz 이상의 주파수에서는 thermocouple로 안테나에 흐르는 전류를 측정하여 표준 모노폴 안테나에서 복사하는 전기장의 세기를 식 (7-38 a) ~ 식 (7-38 c)를 이용하여 계산한다. 낮은 주파수 영역에서는 안테나의 길이가 짧게되어 등가

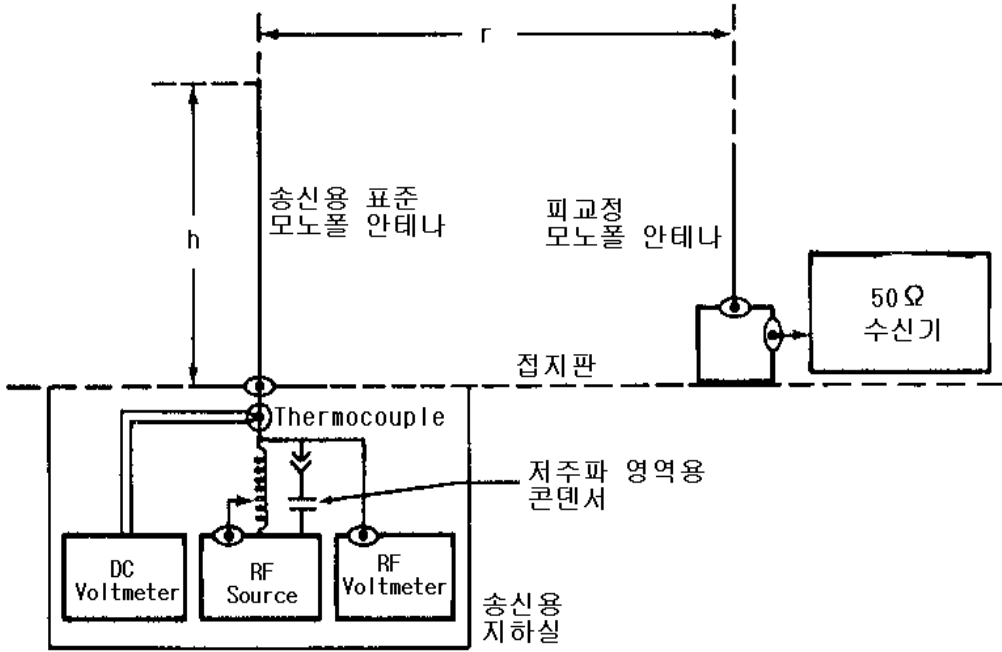


그림 7-8 표준 전기장 법을 이용한 안테나 교정법

적으로 용량성이 되기 때문에 송신 회로에 콘덴서를 추가하고 RF 전압계로 안테나에 가해지는 RF 전압을 고 임피던스 RF 전압계로 측정하고 안테나 임피던스를 이용하여 안테나에 흐르는 전류를 구하여 모노폴 안테나에서 복사하턴스를 이용하여 안테나에 흐르는 전류를 구하여 모노폴 안테나에서 복사하는 전기장의 세기를 계산한다.

접지 판이 완전한 도체로 되어있는 경우 그림 7-9에 나타낸 전기장의 세기 기준 점에서의 전기장의 세기를 안테나에 흐르는 전류, 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 거리, 송신 안테나의 최고점에서 전기장의 세기 기준 점까지의 거리 및 송신 안테나의 영상 안테나 최고점에서 전기장의 세기 기준 점까지의 거리등을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$E_z = 30I_0 \left(\frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} + \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} \right) \text{ [V/m]} \quad (7-38 \text{ a})$$

$$E_r = \frac{30I_0}{r} \left\{ \frac{e^{-j\beta r_1}}{r_1} \left(z - \frac{\lambda}{4} \right) + \frac{e^{-j\beta r_2}}{r_2} \left(z + \frac{\lambda}{4} \right) \right\} \text{ [V/m]} \quad (7-38 \text{ b})$$

$$H_\phi = \frac{I_0}{4\pi} (e^{-j\beta r_1} + e^{-j\beta r_2}) \text{ [A/m]} \quad (7-38 \text{ c})$$

식 (7-38 a) ~ 식 (7-38 b)에서

E_z : 전기장 세기의 수직 성분 [V/m]

E_r : 전기장 세기의 수평 성분 [V/m]

H_ϕ : 표준 모노폴을 감싸고 도는 자기장의 세기 [A/m]

I_0 : 표준 모노폴 기저부에서 측정된 RF 전류의 실효값 [A]

z, r, r_1, r_2 : 전기장의 세기 기준점 까지의 거리 [m]

이다.

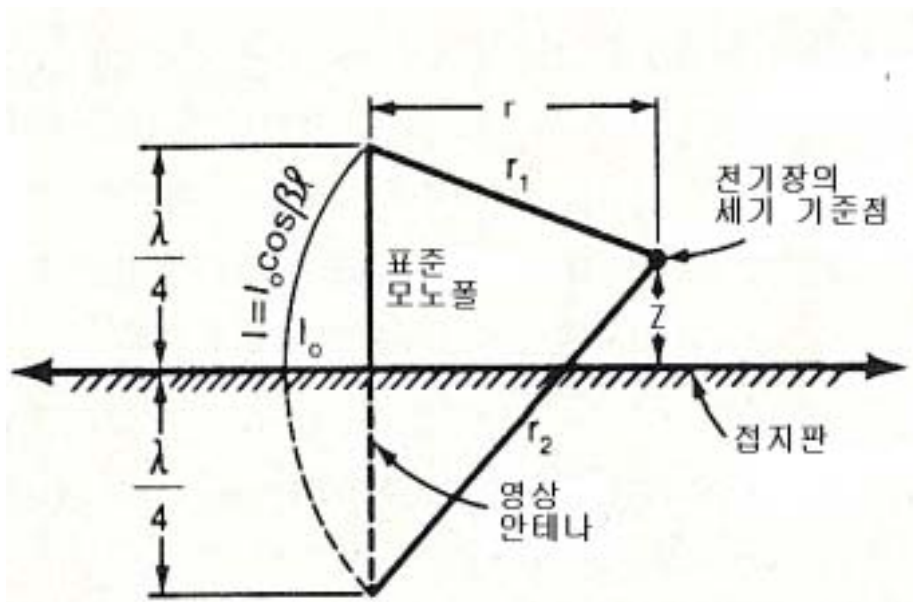


그림 7-9 기준 점에서 전기장의 세기를 구하기 위한 기하학적 구조

나. 표준 자기장 법

표준 자기장 법은 표준 송신 안테나에서 복사되는 자기장의 세기를 알 수 있을 때 표준 안테나에서 일정하게 떨어진 지점의 자기장과 피 측정 안테나에 연결된 수신기의 지시 값을 이용하여 안테나 인자를 구하는 방법이다. 안테나 교정 주파수 범위는 1 kHz ~ 50 MHz 정도이다.

그림 7-10은 표준 자기장 법을 이용하여 루프 안테나를 교정하는 방법으로 표준 송신 안테나에서 일정하게 떨어진 d 지점에 복사되는 자기장 (H)은 안테나에 흐르는 RF 전류를 측정하면 식 (7-39)를 이용하여 구할 수 있게 된다.

$$H = \frac{Ir_1^2}{2R_0^3} \left\{ 1 + \frac{15}{8} \left(\frac{r_1 r_2}{R_0^2} \right)^2 \right\} \sqrt{1 + \beta^2 R_0^2} \quad [\text{A/m}] \quad (7-39)$$

식 (7-39)에서

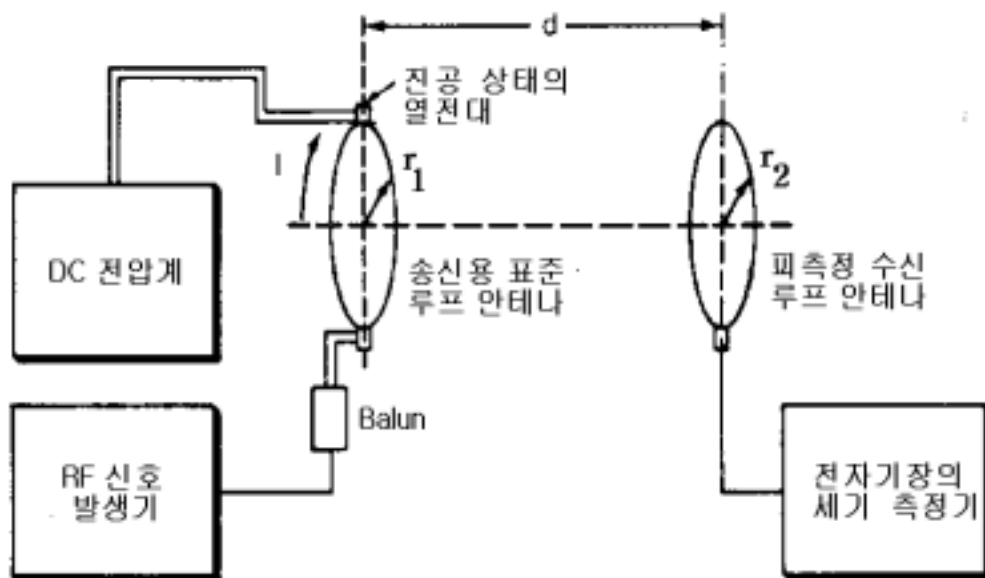


그림 7-10 표준 자기장 법을 이용한 안테나 교정법

$I [A]$: 송신 루프 안테나에 흐르는 전류의 실효값

$r_1 [m]$: 송신 루프 안테나 반경

$r_2 [m]$: 수신 루프 안테나 반경

$$R_o = \sqrt{d^2 + r_1^2 + r_2^2}$$

$d [m]$: 루프 안테나 사이의 축간 거리

를 나타낸다.

자기장의 세기를 알고 있는 지점에 피 측정 수신 안테나를 위치시키고 자기장과 수신 안테나에 연결된 수신기의 지시전압 (V_L)을 측정하여 안테나 인자 (AF)를 식 (7-40)을 이용하여 구한다.

$$AF_1 = \frac{H}{V_L} [S/m] \quad (7-40)$$

그럼 7-10에서 진공 상태의 열전대는 송신용 표준 루프 안테나에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 사용한다. 따라서 이 열전대는 안테나에 부착하기 전에 열전대를 통하여 흐르는 전류와 열전대 출력 전압 사이의 관계를 측정하여야 하고, 주파수 특성을 측정하여야 한다.

제 5 절 복사성 EMC 측정에 안테나 특성이 미치는 영향

EMC 측정에 대한 오차 요인을 다루고있는 국제 및 지역 표준 문서로는 CISPR 16-4 © IEC 2002와 UKAS : LAB 34가 있다. EMC 측정 항목 중 복사성 EMC 측정의 경우 CISPR 16-4 © IEC 2002는 복사성 방출에 대한 불확도 만을 다루고 있고, UKAS : LAB 34에서는 복사 방출과 복사 내성에 대한 내용을 다루고 있다.

여기서는 CISPR 16-4 © IEC 2002에서 다루고있는 복사성 방출 측정의 불확도 요인에 대하여 살펴보고 이중 안테나의 특성이 불확도에 미치는 영향을 살펴 보고자 한다.

1. 기본 장치의 구성 및 불확도 인자

각 국의 EMC 표준은 IEC나 CISPR의 표준 문서를 대부분 따르기 때문에 거의 비슷하다. 복사성 방출의 측정장치의 구성을 평면적으로 나타내면 그림 7-11과 같다.

그림 7-11에서 ① : 안테나 인자 [dB/m], ② : 동축선로 1의 손실, ③ : 전단 증폭기의 이득 [dB], ④ : 동축선로 2의 손실, ⑤ : EMC 수신기의 지시 값이다.

그림 7-11에서 EMC 수신기의 지시 값은 식 (7-41)로 나타낼 수 있다.

$$E \text{ [dB } \mu\text{V/m]} = V \text{ [dB } \mu\text{V]} + CL_1 \text{ [dB]} - \text{PAG [dB]} + CL_2 \text{ [dB]} + AF \text{ [dB/m]} \quad (7-41)$$

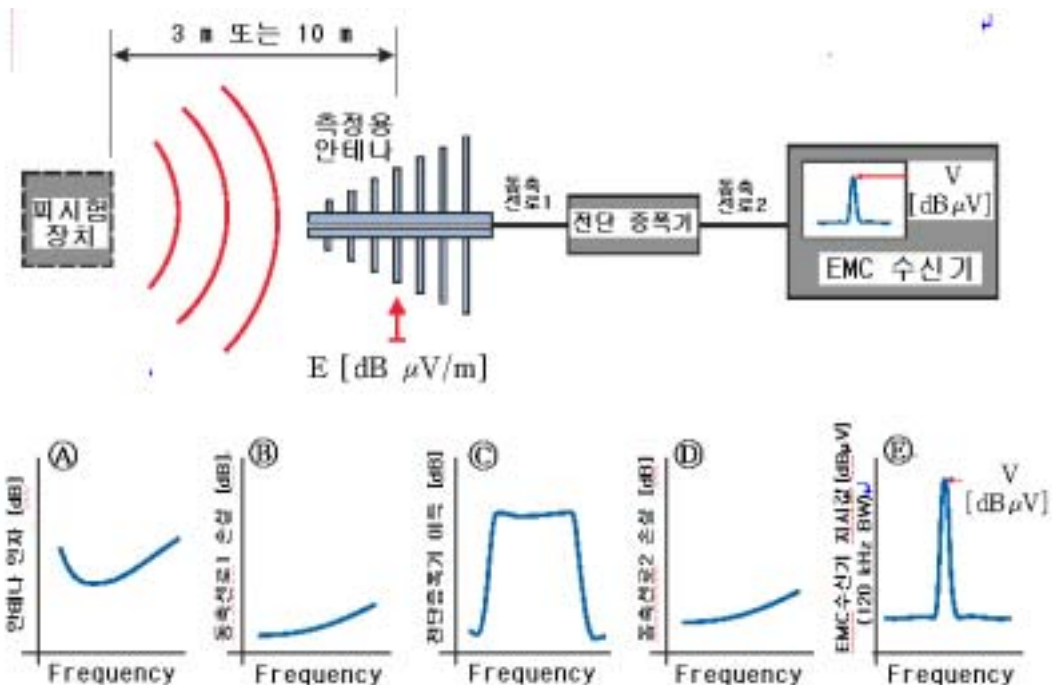


그림 7-11 복사성 방출 측정을 위한 장비의 기본구성

복사성 방출 측정의 불확도는 식 (4-41)의 각 측정량에 포함된 불확도로 부터 계산된다. CISPR 16-4에서 다루고 있는 측정 모델은 식 (7-42)와 같다.

$$\begin{aligned}
 E = & V_r + L_c + AF + \delta V_{sw} + \delta V_{pa} + \delta V_{pr} \\
 & + \delta V_{nf} + \delta M + \delta AF_f + \delta AF_h + \delta A_{dir} + \delta A_{ph} \\
 & + \delta A_{cp} + \delta A_{bal} + \delta SA + \delta d + \delta h
 \end{aligned}
 \tag{7-42}$$

식 (7-42)에 포함된 불확도 요인들은 표 7-2와 같다

표 7-2 불확도 요인 총괄

불확도 요인		단 위
표 기	설 명	
V_r	EMC 수신기의 읽은 값	dB μ V
L_c	사용한 동축선의 손실	dB
AF	안테나 인자	dB/m
δV_{sw}	EMC 수신기의 sin파 전압응답에 대한 부정확도 보정	dB
δV_{pa}	EMC 수신기의 불완전한 펄스응답에 대한 보정	dB
δV_{pr}	EMC 수신기의 불완전한 펄스 반복율 응답에 대한 보정	dB
δV_{nf}	EMC 수신기 바닥 잡음 영향에 대한 보정	dB
δM	부정합이 원인이 되는 오차에 대한 보정	dB
δAF_f	안테나 인자 내삽법 오차에 대한 보정	dB
δAF_h	안테나 높이에 따른 다이폴 안테나의 안테나 인자 변화와 사용하는 안테나 인자의 높이에 따른 변화차 보정	dB
δA_{dir}	안테나 지향성에 대한 보정	dB

표 7-2 불확도 요인 총괄(계속)

불확도 요인		단 위
표 기	설 명	
δA_{ph}	안테나 위상 중심에 대한 보정	dB
δA_{cp}	안테나 교차편파에 대한 보정	dB
δA_{bal}	안테나 불평형에 대한 보정	dB
δSA	불완전한 시험장 감쇠량에 대한 보정	dB
δd	불완전한 안테나 거리에 대한 보정	dB
δh	불완전한 접지판 위 안테나 높이에 대한 보정	dB

표 7-2의 각 오차 원인을 분석하여 CISPRI 16-4에서 산출한 복사 방출 측정 불확도(k=2 적용 : 95 % 신뢰 구간)는 표 7-3과 같다.

표7-3 불확도 총괄표

<div> <div>안테나</div> <div>측정거리</div> </div>	Biconical Antenna (30 MHz ~ 200 MHz)		LP Antenna (200 MHz ~ 1000 MHz)	
	Horizontal [dB μ V/m]	Vertical [dB μ V/m]	Horizontal [dB μ V/m]	Vertical [dB μ V/m]
3 m	4.95	5.06	5.19	5.18
10 m	4.94	5.04	5.06	5.05
30 m	4.94	5.02	5.02	5.01

표 7-3의 불확도에서 복사성 방출 측정에 사용하는 안테나의 영향을 살펴보면 표 7-4와 같다. 안테나와 관련된 주된 불확도 요인들은 안테나 인자 교정 불확도, 수신기와 안테나 사이의 부정합 불확도 및 안테나 보정 항들을 들 수 있다. 안테나 인자 교정 불확도는 ± 1 dB 이내로 유지하도록 국제적으로 의견이 조율되고 있으며, 안테나 보정항으로는 교정 주파수 외의

주표7-4 복사 방출 측정 불확도 중 안테나의 영향

안테나 측정거리	Biconical Antenna (30 MHz ~ 200 MHz)		LP Antenna (200 MHz ~ 1000 MHz)	
	Horizontal [dB μ V/m]	Vertical [dB μ V/m]	Horizontal [dB μ V/m]	Vertical [dB μ V/m]
3 m	2.52	2.73	2.96	2.95
10 m	2.52	2.73	2.75	2.73
30 m	2.52	2.68	2.68	2.66

파수에서 테나 인자를 구하기 위한 내삽법에 의한 안테나 인자의 불확도, 안테나 높이의 편차에 의한 안테나 인자 불확도, 안테나의 복사 지향성 차, 복사된 전자기장의 위상 중심의 위치 및 안테나의 평형성 등에 의한 오차를 고려하여야 한다.

표 7-2를 살펴볼 때 복사성 방출의 불확도 요인 중 안테나의 특성과 관련된 항목이 7개 항목이며, 표 7-4와 표 7-3을 비교하여볼 때 안테나의 특성에서 주어지는 불확도가 전체 불확도의 50 % 정도를 차지하게 됨을 알 수 있다.

제 8 장 결 론

전자파를 이용한 무선통신 기술이 빠른 속도로 발전해 감에 따라 새로운 기술 및 고도화된 기술이 출현하면서 이에 필요한 기반 기술인 전자파 정밀 측정 기술의 개발과 새로운 표준의 확립이 절실히 요구되고 있다. 한편, 전기 • 전자 분야뿐만 아니라 자동차, 항공기 등 정밀 전자 기술을 이용하는 전 분야에 이용되는 전자제품들이 정밀화, 소형화 및 고집적화의 추세로 나아가고 있기 때문에 외부 환경 변화에 취약하게되는 단점이 나타나게되었다. 따라서 이에 대한 대책기술을 확립하고, 분석 및 측정기술의 확립에 전자파 환경 공학 측면에서 필요한 기술 또한 전자파 측정 기술이다.

본 연구에서는 고주파 회로망을 전자파 측정량과 연관지어 해석하여 국제 표준의 요건에 부합되는 전자파 측정량 들에 대한 표준 교정방법을 개발 하였으며, 안테나 교정방법 및 복사성 EMC 측정 시 안테나 인자의 영향 등을 살펴봄으로서 향후 EMC 측정용 안테나 교정 기술의 확립에 필요한 개발 방향을 제시하였다.

또한 교정 기관간 측정 기술의 상호 비교 평가를 통하여 측정 신뢰도 구축을 목적으로 추진하고 있는 전자파 분야 비교 숙련도 시험에 참가하고 있으며 이를 통하여 개발한 교정 방법을 평가받을 수 있는 기회를 가질 수 있으리라 생각한다. 본 비교 숙련도 시험은 한국계량측정협회의 지원과 산업기술시험원이 주관하는 전자파 고정 감쇠기의 감쇠량 측정으로 전파연구소, 한국통신, 삼성교정기술원 등 총 18개 기관이 참가하고 있다.

본 연구를 통하여 개발한 교정용 측정기기 표준 교정 방법은 국제 표준인 ISO/IEC 17025 (2001)의 요구 조건에 부합시킨 방법으로 이를 활용함으로써 국제적 요건을 충족시키는 교정 기관으로서의 위상 정립이 가능하리라 보며, 국가 교정 기관의 인정 기준에 적합한 교정 기술 확립으로 대외 신뢰도 구축을 기대할 수 있으리라 본다. 또한, 근래에 국가간 지역간 또는 국제간에 활발하게 논의되고 있는 전자파 분야의 측정 기술 및 EMI/EMC 분야의 상호 인정협정(MRA) 등 국제적 변화에도 대처할 수 있는 기술적 기반을 마련할 수 있으리라 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] 정 낙삼, 김정환, 신 준 “동축형 고정 감쇠기의 표준교정 절차서”, 한국측정기기교정협회, KASTO 88-14-102-041, 1988년 3월
- [2] 김 덕섭, “동축형 저항의 표준 교정 절차서”, 한국측정기기교정협회, KASTO 98-14-207-198, 1998년 12월 23일
- [3] 박 병권, 박정일, 강웅택, “전력계의 표준 교정 절차서”, 한국측정기기교정협회, KASTO 94-14-405-109, 1994년 12월 30일
- [4] 김 정환, 박정일, 강웅택, “동축형 써미스터 마운트의 표준 교정절차서”, 한국측정기기교정협회, KASTO 96-14-4010-029, 1996년 12월 3일
- [5] I. A. Harris, C.Eng, etc., "Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation", IEE Pproc., Vol. 128, pt. H, No.1, pp. 35~41, Feb., 1981
- [6] Calibration of coaxial step attenuator at a setting of 30 dB, Ea-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, pp. 47~50, Dec. 1999.
- [7] Gian Luigi Madonna, "Testing Microwave Device Under Different Source Impedance Values-A Novel Technique for On-Line Measurement of Source and Device Reflection Coefficients", IEEE , Trans. on IM, Vol.49, No.2, pp. 285~289, April, 2000
- [8] Rissell A. Johnson, "Understanding Microwave Power Splitters", Microwave Journal, pp. 49~56, Dec., 1975
- [9] E. M. Livingston, R. T. Adair, " Performance Evaluation of Radiofrequency, Microwave, and Millimeter Wave Power Meters", NIST Technical Note 1310, Dec. 1988
- [10] M.P. Weidman, " Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibration", NIST/TN-1379, Jan., 1996
- [11] D. Russell, and W. Larson, "RF Attenuation", Proceeding of IEEE, Vol. 55, No.6, pp. 942~959, June, 1967
- [12] J.K. Hunton, " Analysis of Microwave Measurement Techniques by

- Means of Signal Flow Graphs", IRE Trans. on MTT, March, 1959
- [13] Bill Bruce, "Calibration of Precision Step Attenuators", 1998 NCSL Workshop & Symposium, pp. 1~13, 1998
- [14] F. L. Warner, C. Eng., "New expression for mismatch uncertainty when measuring microwave attenuation", IEE Proc. Vol. 127, Pt. H, No. 2, pp. 66~69, April, 1980
- [15] E. L. Komar, and P.V. Tryon, " An Application of the Power equation Concept and Automation Techniques to Precision Bolometer Unit Calibration", IEEE MTT, Vol. MTT-22, No. 12, pp. 1260~1267, Dec. 1974
- [16] A. Torok, D. Janik, W. Peinelt, D. Stumpe, and U. Stumper, " Efficient Broadband Method for Equivalent Source Reflection Coefficient Measurements", IEEE Trans. on IM, Vol.5, No. 2, pp. 361~363, April, 2001
- [17] A. Y. Rumfelt, and L. B. Elwell, "Radio Frequency Power Measurements", Proc. of the IEEE, Vol. 55, No. 6, pp. 837~950, June, 1967
- [18] R. W. Beatty, " Application of Waveguide and Circuit Theory to the Development of Accurate Microwave Measurement Methods and Standards", NBS Monograph 137, Aug., 1973
- [19] "Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements ", Agilent AN 1287-3
- [20] "Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements", HP Application Note 64-1 C
- [21] Motohisa kanda, Ezra B. Larsen, et al., "Standards for Electromagnetic Field Measurements", Proc. of the IEEE, Vol. 74, No. 1, Jan, 1986
- [22] Donald, N. Heirman, "CISPR Subcommittee A Uncertainty Activity", IEEE Trans., on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, No. 1, pp. 125~129, Feb., 2002

부 록 1

동축형 써미스터 마운터 교정 지침서

동축형 써미스터 마운터 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	동축형 써미스터 마운트 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/40

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/40

1. 적용범위

본 교정 지침서는 10 MHz ~ 18 GHz의 주파수 범위와 10 μ W ~ 10 mW의 전력 범위 내에서 동작하는 동축형 써미스터 마운터의 교정에 적용한다.

2. 작성기준

본 교정 지침서는 절차의 유효성 확보를 위하여 한국측정기기교정협회에서 발간한 동축형 써미스터 마운터의 표준교정절차(KASTO 96-14-401-029)서를 기준으로 작성한 것이다.

3. 교정주기

교정주기는 국가교정기관 지정제도 운영세칙 별표 1에서 정한 표준교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

4. 용어의 정의 및 명칭

4.1 전력계 (power meter)

써미스터 마운터 등의 전력감지기와 연결되어 전력감지기로 감지된 전자파 전력의 크기를 나타내는 기기로서 브릿지 회로, 증폭기, 미터 지시부 등의 전자회로로 구성되어 있다. 일반적으로 전력계는 써미스터 마운트용과 열전대 전력감지기용으로 구분된다.

4.2 전력 감지기

써미스터 마운터(thermistor mount), 열전대(thermocouple) 감지기, 다이오드(diode) 감지기 등 전자파 에너지를 감지하는 기기를 말한다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/40

4.3 전력감지소자

써미스터, 열전대, 다이오드 등 전력 감지기 내에서 전자파 에너지를 직접 감지하는 부분을 말한다.

4.4 STD 1, STD 2

표준 써미스터 마운터 1, 2의 약자로서 상급 교정절차기관에서 교정되어 그 교정인자를 알고 있는 써미스터 마운터를 말한다.

4.5 DUT

교정하고자 하는 기기를 의미하며 피 측정기기(device under test)의 약자 이다.

4.6 실효 효율 (effective efficiency)

전자파 전력의 측정은 전력감지기에 입사하는 전자파의 에너지가 등가량을 갖는 DC 신호로 대체되고, 그 대체신호를 측정함으로써 이루어진다. 그러나 전력감지소자에서의 전자파와 DC 신호간의 상이한 전류분포 및 감지기 벽면에서의 손실로 인하여 대체효과가 존재하게 되는데 이를 고려한 것이 실효 효율로서 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_e (\text{실효 효율}) = \frac{\text{DC 대체 전력}}{\text{전력 감지기에 들어오는 순전력}} = \frac{P_{su}}{P_{gl}}$$

전력감지기의 실효 효율은 주파수의 변화에 따라 달라지며, 써미스터 마운트의 경우에는 전력의 크기에는 거의 무관하지만 다른 종류의 감지기는 전력의 크기에 따른 비 선형성을 갖는다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/40

4.7 교정인자 (calibration factor)

측정하고자 하는 전자파 전력은 신호원 기기의 출력단에서 전송 선로의 특성 임피던스(Z_0)를 갖는 부하에 인가되는 전력 $P_0 Z_0$ 인 경우가 대부분이다. 그러나 반사계수 Γ_L 을 갖는 전력감지기에는 $|\Gamma_L|^2$ 만큼의 전력이 반사되어 신호원으로 되돌아가고 나머지 전력이 측정되므로 이를 고려해야 한다. 교정인자는 전력 감지기의 실효 효율 η_e 와 Γ_L 을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$K = \eta_e(1 - |\Gamma_L|^2)$$

4.8 dB(decibel)의 정의

증폭기의 이득(gain)이나 감쇠기의 감쇠량, 전력비 및 상대 전력을 나타내는데 이용되는 dB는 임의의 기준전력(P_{ref})에 대한 피측정 전력의 비에 상용대수를 취하여 10배한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

4.9 dBm의 정의

dB가 상대전력을 나타내는데 비하여 dBm은 절대전력의 측정에 이용되며, 1 mW에 대한 전력의 비에 상용대수를 취하여 10배한 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$dBm = 10 \log_{10} \frac{P [mW]}{1 [mW]}$$

5. 교정내용

본 교정 절차는 10 MHz 이상의 RF 및 마이크로파 영역에서 교정된 동축형 써미스터 마운터를 이용하여 피교정 동축형 써미스터 마운터의 교정인자를 구하기 위한 절차이다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/40

6. 필요장비 명세

NO	장비명	최소사용규격		사용장비
1	RF 신호발생기 (RF Signal Generator)	Range	10 MHz ~ 27 GHz	ROHDE&SCHWARZ SMR27
		Accuracy	± 1 dB	
2	전력계 (Power Meter)	Accuracy	± 1 % of full scale	HP432A
3	써미스터 마운터 (Thermistor Mount)	Accuracy	CAL Factor : ± ~ 3 %	HP 8478B
4	전력계 (Power Meter)	Range	-70 dBm ~ 20 dBm	HP E4419B
		Accuracy	± 2 %	
5	전력 감지기 (Power Sensor)	Range	50 MHz ~ 26.5 GHz	HP E4413A
		Accuracy	± 2 %	
6	고정 감쇠기(Fixed Attenuator)	Range	10 dB	HP
		Accuracy	0.19 dB	
7	방향성 결합기 (Directional Coupler)	Range	20 dB	HP 773D
		Accuracy	± 0.9 dB	
8	전력분배기 (Power Splitter)	Range	DC ~ 2.7 GHz	ROHDE&SCHWARZ
		Accuracy	SWR : 1.15 이하	
9	회로망 분석기 (Network Analyzer)	Range	300 kHz ~ 3 GHz	HP 8753C
		Accuracy	Level : ±0.05 dB	

7. 준비사항

7.1 그림 1과 같이 장비를 연결한다. 각종 cable과 connector 등은 되도록 같은 형태의 것을 사용하며, 각 장비들은 측정 도중에 흔들리지 않도록 견고하게 유지시켜야 한다. 또한 각 연결부에 무리한 힘이 가해지지 않도록 수평과 균형을 유지하는 것이 중요하다.

7.2. 동축형 써미스터 마운터는 그 동작 저항이 200 Ω이므로 전력계의 저항 단자를 200 Ω에 놓는다.

7.3 신호원 기기는 출력과 주파수가 안정되기 위하여 약 1시간 정도의 예열이 필요하다. 따라서 측정을 시작하기 전에 전력계, 신호원 기기, 회로망분석기 및 측정

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	6/40

에 이용되는 모든 장비들을 켜놓은 채로 약 1시간 정도 예열 시킨다. 이 때 신호원 기기의 출력은 충분히 낮추어 놓는다.

- 7.4. 측정값의 정리와 교정인자의 계산을 위하여 data sheet를 준비하여 STD 1, STD 2의 교정인자를 기록하여 둔다.

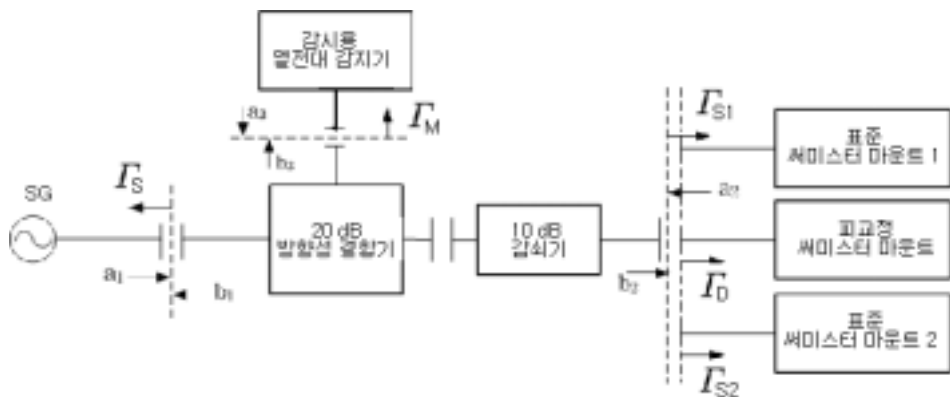


그림 1

8. 반사계수 측정

- 8.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.
- 8.2 type-N calibration kit를 사용하여 2-port calibration을 실행한다.
- 8.3 벡터 회로망분석기의 측정값 평균회수를 16번 이상으로 setting 한다.
- 8.4 측정 주파수대역의 시작 및 끝 주파수를 측정하고자 하는 주파수 대역으로 setting 한다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	7/40

8.5 측정 단자에 STD 1을 연결하고 측정 주파수에서 반사계수의 크기 및 위상을 측정하여 (Γ_{S1})표 8-1에 기록한다.

8.6 측정단자로부터 분리한 후, (60° , 120° , 180° , 240° , 300°) 회전시켜 다시 연결하여 측정하고자 하는 각 주파수 점의 반사계수 크기 및 위상을 측정하여 측정 결과를 표 8-1에 기입한다.

8.7 STD 2를 연결하고 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다(Γ_{S2}).

8.8 DUT를 연결하고 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다(Γ_D).

8.9 측정 port인 Directional Coupler에 연결된 감쇠기 출력 port에서 신호원 등가 반사계수(Γ_{EG})를 측정하기 위해서 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다.

표 8-1 반사계수 측정결과

i	Γ_{S1}		Γ_{S2}		Γ_D		Γ_{GE}^*	
	$ \Gamma_{S1} $	θ_{S1}	$ \Gamma_{S2} $	θ_{S2}	$ \Gamma_D $	θ_D	$ \Gamma_{GE} $	θ_{GE}
1(0도)								
2(60)								
3(120)								
4(180)								
5(240)								
6(300)								

* 등가 신호원 반사계수 : $\Gamma_{GE} = S_{22} - S_{21}S_{32}/S_{31}$ ▶ 측정에 사용한 방향성 결합기의 coupling factor가 20 dB이고, Directivity가 30 dB인 경우 측정단에 10 dB 감쇠기 사용하

면 $S_{21}S_{32}/S_{31} = 0.01$ 이 되어 신호원 반사계수는 약 $\Gamma_{GE} = S_{22}$ 가 된다. (단 S_{22} 는 방향성 결합기에 연결된 감쇠기 출력에서 신호원 방향의 반사계수이다.)

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/40

9. 반사계수의 크기 및 위상에 대한 평균값 계산

9.1 표 8-1의 반사계수와 위상의 반복 측정 데이터로부터 반사계수의 크기와 위상에 대한 평균값을 구하여 표 9-1에 기록한다.

표 9-1 반사계수의 크기와 위상 평균

Γ_{S1}		Γ_{S2}		Γ_D		Γ_{GE}	
$\overline{\Gamma_{S1}}$	$\overline{\theta_{S1}}$	$\overline{\Gamma_{S2}}$	$\overline{\theta_{S2}}$	$\overline{\Gamma_D}$	$\overline{\theta_D}$	$\overline{\Gamma_{GE}}$	$\overline{\theta_{GE}}$

10. 써미스터 마운터의 교정순서

10.1 신호원 기기를 충분히 한 후 그림 1과 같이 장비를 연결한다.

10.2 신호원 기기의 RF를 켜지 않은 상태에서 전력계의 COARSE ZERO를 맞춘다. COARSE ZERO를 맞춘 후 RANGE 단자를 최소 RANGE로 바꾸어 FINE ZERO를 눌러 준다 (영점 조정)

10.3 영점 조정이 된 후 RANGE 단자를 측정 RANGE에 놓는다. 이때 모니터 단자 (Sidearm)에 연결된 전력계와 Test port에 연결되는 전력계 측정 RANGE는 10 mW 에 있어야 한다.

10.4 Test Port (main arm)에서의 전력 측정은 전력 측정기 (HP 432)의 뒷면의 V_{COMP} 와 V_{RF} 출력을 이용하여 다음 식을 이용한다. 이 식에서 R은 써미스터 마운터의 저항으로 일반적으로 동축형 써미스터 마운터의 경우 200 Ω 이고 도 파관형 써미스터 마운터의 경우에는 100 Ω 이다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	9/40

$$P_{RF} = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{4R} \quad W$$

10.5 표준 써미스터 1을 연결하고 신호원 기기의 출력을 서서히 증가시켜 Test Port (main arm)의 전력계가 약 10 mW 정도를 읽게 한다. 신호원 기기의 출력이 너무 커서 OVER RANGE가 될 경우에는 출력을 줄여서 OVER RANGE를 벗어나게 한다.

10.6 전력계의 지시값을 읽어 모니터 단자 (Side arm)의 전력계 지시값은 표 10-1 data sheet 1의 [1-1] P_{MSI} 에 기록하고 main arm에서의 전력을 측정하여 표 10-1 data sheet 1의 [1-2] (P_{SI})에 기록한다.

10.7 신호원 기기의 출력을 60 dB 이상 줄여서 전력계의 ZERO가 맞는지 확인하고 천이(drift)가 있는 경우 그 값을 가감하여 data sheet에 기재하며 그 천이 값이 대단히 큰 경우에는 ZERO를 다시 맞춘 후 10.2~10.5의 과정을 반복한다.

10.8 Test port (Main arm)에서 STD 1을 떼어내고 DUT를 연결한 후 10.2~10.5의 과정을 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-1 data sheet 1의 [1-3]에 Test Port (main arm)에서의 전력 측정값은 [1-4]에 각각 기록한다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/40

표 10-1 data sheet 1

n	STD 1		DUT		R_{D1}	R_{S1}	K_{D1}
	P_{MS1}	P_{S1}	P_{MD1}	P_{D1}	$\frac{[1-4]}{[1-3]}$	$\frac{[1-2]}{[1-1]}$	
	[1-1]	[1-2]	[1-3]	[1-4]	[1-5]	[1-6]	$K_{S1} \frac{[1-5]}{[1-6]} M1$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

10.9 Test port (Main arm)에서 DUT를 떼어내고 STD 2를 연결한 후 10.2~10.5의 과정을 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-2 data sheet 2의 [2-1]에 Test Port (main arm)에서의 전력 측정값은 [2-2]에 각각 기록한다.

10.10 Test port (Main arm)에서 STD 2를 떼어내고 DUT를 연결한 후 10.2~10.5의 과정을 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-2 data sheet 2의 [2-3]에 Test Port (main arm)의 지시값은 [2-4]에 각각 기록한다.

10.11 10.2~10.5의 과정을 6회 반복하여 측정한 결과를 data sheet에 기록한다.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/40

표 10-2 data sheet 2

i	STD 2		DUT		R_{D2}	R_{S2}	K_{D2}
	P_{MS2}	P_{S2}	P_{MD2}	P_{D2}	$\frac{[2-4]}{[2-3]}$	$\frac{[2-2]}{[2-1]}$	
	[2-1]	[2-2]	[2-3]	[2-4]	[2-5]	[2-6]	$K_{S2} \frac{[2-5]}{[2-6]} M2$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

10.12 DUT의 교정 인자(K_D)는 다음과 같이 구해진다.

$$K_D = \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2}$$

$$K_{D1} = K_{S1} \frac{P_{D1} P_{MS1}}{P_{S1} P_{MD1}} M_1, \quad M_1 = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_{S1} \Gamma_{GE}|^2}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	12/40

$$K_{D2} = K_{S2} \frac{P_{D2} P_{MS2}}{P_{S2} P_{MD2}} M_2, \quad M_2 = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_{S2} \Gamma_{GE}|^2}$$

K_{S1} : 표준 써미스터 마운터1의 교정인자

K_{S2} : 표준 써미스터 마운터2의 교정인자

P_{S1}, P_{MS1} : 표준 써미스터 마운터1 연결시 방향성 결합의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

P_{D1}, P_{MD1} : 표준 써미스터 마운터 1 연결시 피측정 써미스터 마운터 연결시 방향성 결합기의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

K_{D1} : 표준 써미스터 마운터1을 이용하여 측정한 피측정 써미스터 마운터의 교정인자.

P_{S2}, P_{MS2} : 표준 써미스터 마운터 2 연결시 방향성 결합의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

P_{D2}, P_{MD2} : 표준 써미스터 마운터 2 연결시 피측정 써미스터 마운터 연결시 방향성 결합기의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

K_{D2} : 표준 써미스터 마운터1을 이용하여 측정한 피측정 써미스터 마운터의 교정인자.

11. 측정 결과의 검증

표 10-1과 표 10-2로부터 다음 값을 계산하여 $0.97 \leq C \leq 1.03$ 의 범위에 들지 않으면 모든 측정을 다시 반복한다.

$$C = \frac{[1-1][2-2][1-6]}{[1-2][2-1][2-6]}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	13/40

12. 교정인자 측정의 불확도 평가

12.1 수학적 모델 설정

가. 수학적 모델

$$K_D = K_S \frac{P_D P_{MS}}{P_S P_{MD}} \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2}$$

$$= K_S \frac{R_D}{R_S} M$$

$$- R_D = \frac{P_D}{P_{MD}}, \quad R_S = \frac{P_S}{P_{MS}}, \quad M = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2}$$

나. 불확도 산출 수식

$$u_c(K_D) = \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_S) + c_2^2 u_c^2(R_D) + c_3^2 u_c^2(R_S) + c_4^2 u_c^2(M)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial K_D}{\partial K_S} = \frac{K_D}{K_S}, \quad c_2 = \frac{\partial K_D}{\partial R_D} = \frac{K_D}{R_D},$$

$$c_3 = \frac{\partial K_D}{\partial R_S} = -\frac{K_D}{R_S}, \quad c_4 = \frac{\partial K_D}{\partial M} = \frac{K_D}{M}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KD} = \frac{u_c^4(K_D)}{\frac{u_c^4(K_S)}{\nu_{KS}} + \frac{u_c^4(R_D)}{\nu_{R_D}} + \frac{u_c^4(R_S)}{\nu_{KS}} + \frac{u_c^4(M)}{\nu_M}}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/40

12.2 불확도 평가 분석

12.2.1 표준 써미스터 마운터의 합성 표준 불확도 : $u_c(K_S)$

표준 써미스터 마운터(STD1, STD2)의 불확도는 상급 교정기관으로부터 얻은 확장 불확도 (U)와 포함인자 (k)로부터 구할 수 있다.

$$u_c(K_S) = \frac{U(K_S)}{k} \quad (k=2)$$

12.2.2 피교정 써미스터 마운트가 측정 포트에 연결될 때 모니터 단자에서의 전력과 피교정 써미스터 마운트에서의 전력 측정비에 포함된 합성 표준 불확도 : $u_c(R_D)$

$$R_D = \frac{P_D}{P_{MD}}$$

$$P_D = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

가. 표10-1과 표10-2에서 R_{D1} 과 R_{D2} 의 반복 측정에 대한 A형 : $u_A(R_D)$

◦ 평균

$$\overline{R_D} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_D(i)$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_D) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_D(i) - \overline{R_D})^2}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	15/40

- 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_D}) = \frac{s(R_D)}{\sqrt{6}}$$

- A형 표준 불확도

$$u_A(R_D) = s(\overline{R_D})$$

- A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_D) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_D) + c_2^2 u^2(P_{MD})}$$

$$c_1 = \frac{\partial R_D}{\partial P_D} = \frac{R_D}{P_D}, \quad c_2 = \frac{\partial R_D}{\partial P_{MD}} = -\frac{R_D}{P_{MD}}$$

- (2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

- HP E4491B

전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1 mW의 전력을 측정하는 경우

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	16/40

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\approx 0 \%$$

- 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

- $u(P_{MD}) = 0.0007$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운트를 이용하여 경우 약 10 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 5 V의 전압을 측정함

$$◦ P_D = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

$$◦ u_B(P_D) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{COMP}) + c_2^2 u^2(V_{RF})}$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_D}{\partial V_{COMP}} = \frac{V_{COMP}}{400}$$

$$- c_2 = \frac{\partial P_D}{\partial V_{RF}} = - \frac{V_{RF}}{400}$$

$$- u(V_{COMP}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts})$$

$$- u(V_{RF}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts})$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	17/40

◦ 전력계의 불확도

$$\begin{aligned}
 - \text{Zero Carryover} &= \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \\
 - \text{Instrumentation error} &= \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012 \\
 - u(\text{MET}) &= \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031
 \end{aligned}$$

$$\circ u(P_D) = \sqrt{u_B^2(P_D) + u^2(\text{MET})}$$

다. 피교정 써미스터 마운트 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_D) = \sqrt{u_A^2(R_D) + u_B^2(R_D)}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RD} = \frac{u_c^4(R_D)}{\frac{u_A^4(R_D)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(R_D)}{\nu_B}}$$

12.2.3 표준 써미스터 마운터가 측정 포트에 연결될 때 모니터 단자에서의 전력
과 표준 써미스터 마운터에서의 전력 측정비에 포함된 합성 표준 불확도
: $u_c(R_S)$

$$R_S = \frac{P_S}{P_{MS}}$$

$$- P_S = \frac{V_{\text{COMP}}^2 - V_{\text{RF}}^2}{800}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	18/40

가. 표10-1과 표10-2에서 R_{S1} 과 R_{S2} 의 반복 측정에 대한 A형 : $u_A(R_S)$

◦ 평균

$$\overline{R_S} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_S(i)$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_S) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_S(i) - \overline{R_S})^2}$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_S}) = \frac{s(R_S)}{\sqrt{6}}$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(\overline{R_S}) = s(\overline{R_S})$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_S) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_S) + c_2^2 u^2(P_{MS})}$$

$$c_1 = \frac{\partial R_S}{\partial P_S} = \frac{R_S}{P_S}, \quad c_2 = \frac{\partial R_S}{\partial P_{MS}} = -\frac{R_S}{P_{MS}}$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/40

- HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1 mW의 전력을 측정하는 경우

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

- 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

- $u(P_{MS}) = 0.0007$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운트를 이용하여 경우 약 10 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

$$◦ P_S = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

$$◦ u_B(P_S) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{COMP}) + c_2^2 u^2(V_{RF})}$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_S}{\partial V_{COMP}} = \frac{V_{COMP}}{400}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	20/40

$$\begin{aligned}
- \quad c_2 &= \frac{\partial P_S}{\partial V_{RF}} = - \frac{V_{RF}}{400} \\
- \quad u(V_{COMP}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts}) \\
- \quad u(V_{RF}) &= \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts})
\end{aligned}$$

◦ 전력계의 불확도

$$\begin{aligned}
- \quad \text{Zero Carryover} &= \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029 \\
- \quad \text{Instrumentation error} &= \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012 \\
- \quad u(\text{MET}) &= \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031
\end{aligned}$$

$$\circ \quad u(P_S) = \sqrt{u_B^2(P_S) + u^2(\text{MET})}$$

다. 표준 써미스터 마운트의 전력비 측정 합성 표준 불확도

$$u_c(R_S) = \sqrt{u_A^2(R_S) + u_B^2(R_S)}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RS} = \frac{u_c^4(R_D)}{\frac{u_A^4(R_S)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(R_S)}{\nu_B}}$$

12.2.4 부정합 불확도 : $u_c(M)$

가. 부정합의 영향

$$M = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2} = \frac{M_D}{M_S}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	21/40

나. 측정 포트와 피측정 열전대 전력 감지기 사이의 부정합 불확도

$$u_{M_D} = \frac{2 | \Gamma_D | | \Gamma_{GE} |}{\sqrt{2}}$$

다. 측정 포트와 표준 써미스터 마운터 사이의 부정합 불확도

$$u_{M_S} = \frac{2 | \Gamma_S | | \Gamma_{GE} |}{\sqrt{2}}$$

라. 부정합 불확도

$$u_c(M) = \sqrt{u_{M_D}^2 + u_{M_S}^2}$$

마. 유효 자유도

$$\nu_M = \frac{u_c^4(M)}{\frac{u^4(M_D)}{\nu_{MD}} + \frac{u^4(M_S)}{\nu_{MS}}}$$

13. 교정인자 교정 결과 처리

13.1 교정 인자

가. 2 개의 표준 써미스터 마운터를 이용하여 교정함으로 측정한 피교정 써미스터 마운터의 교정인자를 평균하여 교정 인자를 구한다.

나. 교정 인자

$$K_D = \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2}$$

- K_{D1} : 표준 써미스터 마운터 1(K_{S1})을 이용하여 구한 교정인자
- K_{D2} : 표준 써미스터 마운터 2(K_{S2})을 이용하여 구한 교정인자

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/40

13.2 교정 불확도

가. 합성 표준 불확도

$$u_c(K_D) = \frac{\sqrt{u_c^2(K_{D1}) + u_c^2(K_{D2})}}{\sqrt{2}}$$

나. 확장 불확도

$$U = k u_c(K_D) \quad (k=2)$$

14. 써미스터 마운터 교정 예

14.1 측정 조건

가. 측정 주파수 : 1 GHz

나. 시료 : HP8478B

다. 교정인자 : $K_{S1} = 98.99$ (0.5 %), $K_{S2} = 99.20$ (0.5 %)

14.2 반사계수의 크기측정

Γ_{S1}	Γ_{S2}	Γ_D	Γ_{GE}
0.019	0.023	0.018	0.048

가. 표준 써미스터 마운터 1과 측정면

$$M_{S1} = |1 - \Gamma_{S1} \Gamma_{GE}|^2 = 0.998, \quad u_{M_{S1}} = \frac{2 |\Gamma_{S1}| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.001$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/40

나. 표준 써미스터 마운터 2와 측정면

$$M_{S2} = |1 - \Gamma_{S2} \Gamma_{GE}|^2 = 0.998, \quad u_{M_{S2}} = \frac{2 |\Gamma_{S2}| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.002$$

다. 피 측정 써미스터 마운터와 측정면

$$M_D = |1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2 = 0.998, \quad u_{M_D} = \frac{2 |\Gamma_D| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.001$$

라. 부정합 불확도

$$M_1 = \frac{M_D}{M_{S1}} = 1, \quad u_c(M_1) = 0.0014$$

$$M_2 = \frac{M_D}{M_{S2}} = 1, \quad u_c(M_2) = 0.0022$$

마. 유효 자유도

$$\nu_{M1} = \infty, \quad \nu_{M2} = \infty$$

14.3 표준 써미스터1을 이용한 피 교정 써미스터 마운터 교정

14.3.1 전력 측정 결과

i	STD1				DUT			
	P _{MS1} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{S1} [mW]	P _{MD1} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{D1} [mW]
1	1.23	5.12531	4.46102	7.960	1.23	5.12560	4.46512	7.918
2	1.23	5.12542	4.46105	7.961	1.23	5.12548	4.46516	7.916
3	1.23	5.12562	4.46107	7.963	1.23	5.12562	4.46514	7.918
4	1.23	5.12522	4.46106	7.968	1.23	5.12554	4.46513	7.916
5	1.23	5.12581	4.46108	7.966	1.23	5.12548	4.46515	7.916
6	1.23	5.12600	4.46105	7.962	1.23	5.12548	4.46518	7.916

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	24/40

14.3.2 전력비 계산

i	1	2	3	4	5	6
R _{S1}	6.472	6.472	6.474	6.478	6.476	6.473
R _{D1}	6.437	6.436	6.437	6.436	6.436	6.436

14.3.3 표준 써미스터 마운터와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{S1})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{S1}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{S1}(i) = 6.474$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{S1}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{S1}(i) - \overline{R_{S1}})^2} = 0.0024$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{S1}}) = \frac{s(R_{S1})}{\sqrt{6}} = 0.0010$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{S1}) = s(\overline{R_{S1}}) = 0.0010$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 25/40

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{S1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{S1}) + c_2^2 u^2(P_{MS1})} = 0.0045$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{S1}}{\partial P_{S1}} = \frac{R_{S1}}{P_{S1}} = \frac{6.474}{7.963} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{S1}}{\partial P_{MS1}} = -\frac{R_{S1}}{P_{MS1}} = -\frac{6.474}{1.23} = -5.263$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{1.23 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{1.23 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 26/40

$$\circ u(P_{MS1}) = 0.0007$$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.96 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

$$\circ P_{S1} = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

$$\circ u_B(P_{S1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{COMP}) + c_2^2 u^2(V_{RF})} = 0$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_{COMP}} = \frac{5.12566}{400} = 0.0128$$

$$- c_2 = \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_{RF}} = -\frac{4.46106}{400} = -0.0112$$

$$- u(V_{COMP}) = \frac{5.12566}{\sqrt{3}} = 0.0009$$

$$- u(V_{RF}) = \frac{4.46106}{\sqrt{3}} = 0.0008$$

◦ 전력계의 불확도

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

$$- u(\text{MET}) = \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031$$

$$\circ u(P_{S1}) = \sqrt{u_B^2(P_{S1}) + u^2(\text{MET})} = 0.0031$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	27/40

다. 표준 써미스터 1을 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_{SI}) = \sqrt{u_A^2(R_{SI}) + u_B^2(R_{SI})} = \sqrt{0.0045^2 + 0.0010^2} \\ = 0.0046$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RSI} = \frac{0.0046^4}{\frac{0.0010^4}{5} + \frac{0.0045^4}{\infty}} = 2\,239$$

14.3.4 피측정 써미스터 마운터와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{D1})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{D1}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{D1}(i) = 6.437$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{D1}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{D1}(i) - \overline{R_{D1}})^2} = 0.0005$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{D1}}) = \frac{s(R_{D1})}{\sqrt{6}} = 0.0002$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{D1}) = s(\overline{R_{D1}}) = 0.0002$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	28/40

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{D1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{D1}) + c_2^2 u^2(P_{MD1})} = 0.0044$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{D1}}{\partial P_{D1}} = \frac{R_{D1}}{P_{D1}} = \frac{6.437}{7.917} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{D1}}{\partial P_{MD1}} = -\frac{R_{D1}}{P_{MD1}} = -\frac{6.474}{1.23} = -5.233$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{1.23 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{1.23 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.001 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

◦ $u(P_{MD1}) = 0.0007$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	29/40

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.92 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 5 V의 전압을 측정함

$$\circ P_{D1} = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

$$\circ u_B(P_{D1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{COMP}) + c_2^2 u^2(V_{RF})} \approx 0$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_{D1}}{\partial V_{COMP}} = \frac{5.12559}{400} = 0.0128$$

$$- c_2 = \frac{\partial P_{D1}}{\partial V_{RF}} = \frac{4.46515}{400} = 0.0112$$

$$- u(V_{COMP}) = \frac{0.00154}{\sqrt{3}} = 0.00089$$

$$- u(V_{RF}) = \frac{0.00134}{\sqrt{3}} = 0.00077$$

◦ 전력계의 불확도

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

$$- u(\text{MET}) = \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031$$

$$\circ u(P_{D1}) = \sqrt{u_B^2(P_{D1}) + u^2(\text{MET})} = 0.0031$$

다. 피교정 써미스터와 모니터단 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(R_{D1}) &= \sqrt{u_A^2(R_{D1}) + u_B^2(R_{D1})} = \sqrt{0.0002^2 + 0.0044^2} \\ &= 0.0044 \end{aligned}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	30/40

라. 유효 자유도

$$\nu_{RDI} = \frac{0.0044^4}{\frac{0.0002^4}{5} + \frac{0.0044^4}{\infty}} = 2\ 1\ 171\ 280$$

14.3.5 표준 써미스터 마운터 1을 이용한 피교정 써미스터 마운트 교정 결과

가. 교정인자

$$\begin{aligned} K_{D1} &= K_{S1} \times \frac{R_{D1}}{R_{S1}} \times M1 = 0.9899 \times \frac{6.437}{6.474} \times 1 \\ &= 0.9842 \text{ (98.42 \%)} \end{aligned}$$

나. 합성 불확도

$$\begin{aligned} u_c(K_{D1}) &= \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_{S1}) + c_2^2 u_c^2(R_{D1}) + c_3^2 u_c^2(R_{S1}) + c_4^2 u_c^2(M_1)} \\ &= 0.0030 \end{aligned}$$

다. 감도계수

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\partial K_{D1}}{\partial K_{S1}} = \frac{K_{D1}}{K_{S1}} = 0.9942, & c_2 &= \frac{\partial K_{D1}}{\partial R_{D1}} = \frac{K_{D1}}{R_{D1}} = 0.153, \\ c_3 &= \frac{\partial K_{D1}}{\partial R_{S1}} = -\frac{K_{D1}}{R_{S1}} = -0.152, & c_4 &= \frac{\partial K_{D1}}{\partial M_1} = \frac{K_{D1}}{M_1} = 0.9842 \end{aligned}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KDI} = \frac{0.003^4}{\frac{0.0025^4}{\infty} + \frac{0.0044^4}{1171280} + \frac{0.0046^4}{2239} + \frac{0.001^4}{\infty}} = 44\ 933\ 564$$

마. 확장 불확도

$$U_{D1} = k u_c(K_{D1}) = 0.0030 \times 2 = 0.0060 \text{ (} k=2 \text{)}$$

RRL	동축형 써미스터 마운트 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	31/40

14.3.6 표준 써미스터 마운트 1을 이용한 써미스터 마운트의 교정 불확도 총괄표

표기	불확도 요인	불확도	확률 분포	적용인자	감도계 수	불확도 기여
K_{S1}	표준 써미스터 마운트의 교정인자	0.005	정규	2	0.9942	0.0025
R_{D1}	모니터부와 피교정 써미스터와의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{D1})=0.002$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MD1})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{D1})=0.0031$	0.0044	정규	1	0.153	0.0007
R_{S1}	모니터부와 표준 써미스터와의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{S1})=0.002$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MS1})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{S1})=0.0031$	0.0046	정규	1	0.152	0.0007
M_1	부정합 인자비 -측정포트와 표준기: $U_{MS1}=0.01$ -측정포트와 피교정기: $U_{MD1}=0.01$	0.0020	U	$\sqrt{2}$	0.9842	0.0014
$u_c(K_{D1})$	합성표준 불확도					0.0030
U_{D1}	합성 불확도 ($k=2$)					0.0060

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	32/40

14.4 표준 써미스터 2을 이용한 피 교정 써미스터 마운터 교정

14.4.1 전력 측정 결과

	STD2				DUT			
i	P _{MS2} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{S2} [mW]	P _{MD2} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{D2} [mW]
1	1.23	5.12551	4.45910	7.984	1.23	5.12553	4.46485	7.920
2	1.23	5.12560	4.45920	7.984	1.23	5.12561	4.46480	7.922
3	1.23	5.12565	4.45922	7.984	1.23	5.12562	4.46495	7.925
4	1.23	5.12560	4.45912	7.985	1.23	5.12560	4.46490	7.920
5	1.23	5.12558	4.45910	7.985	1.23	5.12558	4.46495	7.920
6	1.23	5.12559	4.45915	7.985	1.23	5.12559	4.46496	7.920

14.4.2 전력비 계산

i	1	2	3	4	5	6
R _{S2}	6.491	6.491	6.491	6.492	6.492	6.492
R _{D2}	6.439	6.441	6.443	6.439	6.439	6.439

14.4.3 표준 써미스터 마운터 2와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{S2})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{S2}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{S2}(i) = 6.492$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	33/40

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{S2}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{S2}(i) - \overline{R_{S2}})^2} = 0.0008$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{S2}}) = \frac{s(R_{S2})}{\sqrt{6}} = 0.0003$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{S2}) = s(\overline{R_{S2}}) = 0.0003$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{S2}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{S2}) + c_2^2 u^2(P_{MS2})} = 0.0045$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{S2}}{\partial P_{S2}} = \frac{R_{S2}}{P_{S2}} = \frac{6.492}{7.985} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{S2}}{\partial P_{MS2}} = -\frac{R_{S2}}{P_{MS2}} = -\frac{6.492}{1.23} = -5.278$$

(2) 측정 포트의 전력 측정 불확도

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.985 mW 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

$$\circ u(P_{S2}) = 0.0031$$

- DVM을 이용한 전력 측정 불확도 ≈ 0

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	34/40

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

(3) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

$$\circ u(P_{MS2}) = 0.0007$$

- 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

- 전력계의 잡음과 Drift 영향 무시

다. 표준 써미스터 2를 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_{S2}) = \sqrt{u_A^2(R_{S2}) + u_B^2(R_{S2})} = \sqrt{0.0003^2 + 0.0045^2} \\ = 0.0045$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RS2} = \frac{0.0045^4}{\frac{0.0003^4}{5} + \frac{0.0045^4}{\infty}} = 253 \text{ } 125$$

14.4.4 피측정 써미스터 마운터와 모니터 단자의 전력비 불확도

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	35/40

• 평균

$$\overline{R_{D2}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{D2}(i) = 6.441$$

• 실험 표준편차

$$s(R_{D2}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{D2}(i) - \overline{R_{D2}})^2} = 0.002$$

• 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{D2}}) = \frac{s(R_{D1})}{\sqrt{6}} = 0.0008$$

• A형 표준 불확도

$$u_A(R_{D2}) = s(\overline{R_{D2}}) = 0.0008$$

• A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{D2}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{D2}) + c_2^2 u^2(P_{MD2})} = 0.0044$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{D2}}{\partial P_{D2}} = \frac{R_{D2}}{P_{D2}} = \frac{6.441}{7.922} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{D2}}{\partial P_{MD2}} = -\frac{R_{D2}}{P_{MD2}} = -\frac{6.441}{1.23} = -5.237$$

(2) 측정 포트의 전력 측정 불확도

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.922 mW 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	36/40

- $u(P_{D2}) = 0.0031$
 - DVM을 이용한 전력 측정 불확도 ≈ 0
 - Zero Carryover = $\frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$
 - Instrumentation error = $\frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$

(3) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

- $u(P_{MD2}) = 0.0007$
 - 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)
 - $u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$
 - 전력계의 잡음과 Drift 영향 무시

다. 표준 써미스터 2를 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_{D2}) = \sqrt{u_A^2(R_{D2}) + u_B^2(R_{D2})} = \sqrt{0.0008^2 + 0.0044^2} = 0.0045$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RD2} = \frac{0.0045^4}{\frac{0.0008^4}{5} + \frac{0.0044^4}{\infty}} = 5.0006$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	37/40

14.4.5 표준 써미스터 마운터 2을 이용한 피교정 써미스터 마운터 교정 결과

가. 교정인자

$$K_{D2} = K_{S2} \times \frac{R_{D2}}{R_{S2}} \times M_2 = 0.9922 \times \frac{7.922}{7.985} \times 1$$

$$= 0.9844 \text{ (98.42 \%)}$$

나. 합성 불확도

$$u_c(K_{D2}) = \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_{S2}) + c_2^2 u_c^2(R_{D2}) + c_3^2 u_c^2(R_{S2}) + c_4^2 u_c^2(M_2)}$$

$$= 0.0035$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial K_{S2}} = \frac{K_{D2}}{K_{S2}} = 0.9921, \quad c_2 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial R_{D2}} = \frac{K_{D2}}{R_{D2}} = 0.153,$$

$$c_3 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial R_{S2}} = -\frac{K_{D2}}{R_{S2}} = -0.152, \quad c_4 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial M_2} = \frac{K_{D2}}{M_2} = 0.9844$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KD2} = \frac{0.0070^4}{\frac{0.0025^4}{\infty} + \frac{0.0045^4}{5006} + \frac{0.0045^4}{253125} + \frac{0.0022^4}{\infty}} \approx \infty$$

마. 확장 불확도

$$U_{D2} = k u_c(K_{D2}) = 0.0035 \times 2 = 0.0070 \text{ (} k=2 \text{)}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	38/40

14.4.6 표준 써미스터 마운터 1을 이용한 써미스터 마운터의 교정 불확도 총괄표

표기	불확도 요인	불확도	확률 분포	적용인자	감도계수	불확도 기여
K_{S2}	표준 써미스터 마운트의 교정인자	0.005	정규	2	0.9942	0.0025
R_{D2}	모니터부와 피교정 써미스터와의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{D2})=0.0008$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MD2})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{D2})=0.0031$	0.0045	정규	1	0.153	0.0007
R_{S2}	모니터부와 표준 써미스터와의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{S2})=0.0003$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MS2})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{S2})=0.0031$	0.0046	정규	1	0.152	0.0007
$M2$	부정합 인자비 -측정포트와 표준기: $U_{MS2}=0.002$ -측정포트와 피교정기: $U_{MD2}=0.001$	0.0032	U	$\sqrt{2}$	0.9842	0.0022
$u_c(K_{D2})$	합성 표준 불확도					0.0035
U_{D2}	합성 불확도 ($k=2$)					0.0070

14.5 교정 결과

가. 교정인자

$$\begin{aligned}
 K_D &= \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2} = \frac{0.9844 + 0.9842}{2} \\
 &= 0.9843 \text{ (98.43 \%)}
 \end{aligned}$$

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	39/40

나. 불확도

$$U_D = \frac{\sqrt{U_{D1}^2 + U_{D2}^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{0.0060^2 + 0.0070^2}}{\sqrt{2}} = 0.0065 \text{ (0.65 \%)}$$

15. 교정 성적서 작성법

15.1 한국 시험·교정 기관 인증기구(KORLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목은 명확한 근거에 의하여 작성

15.2 교정 성적서 상에 기록하는 교정 환경 자료, 모든 측정 데이터 및 불확도 산출 등 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존

16. 참고 문서

16.1 동축형 써미스터 마운터의 표준교정절차(KASTO 96-14-401-029) : 한국측정기기교정협회, 1996년 12월

16.2 Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibrations : NIST, Jan., 1996년

16.3 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration : EA-4/02

16.4 Radio Frequency Power Measurements : Proceedings of The IEEE, June, 1967

16.5 Fundamental of RF and Microwave power Measurement : Agilent technologies : Agilent AN 64-1C

16.6 Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements : Agilent AN 1287-3

RRL	동축형 써미스터 마운터 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermistor Mount	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	40/40

16.7 8 Hints for Making Better Network Analyzer Measurements : Agilent
AN 1291-1

부 록 2

동축형 열전대 전력 감지기의 교정 지침서

동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power
Sensor

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/47

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/47

1. 적용범위

본 교정 지침서는 10 MHz ~ 3 GHz의 주파수 범위와 + 20 dBm ~ -70 dBm의 전력 범위내에서 동작하는 열전대 전력 감지기의 교정에 적용한다.

2. 작성기준

본 교정 지침서는 절차의 유효성 확보를 위하여 한국측정기기교정협회에서 발간한 동축형 열전대 전력 감지기 표준교정절차(KASTO 98-14-4030-032)서를 기준으로 작성한 것이다.

3. 교정주기

교정주기는 국가교정기관 지정제도 운영세칙 별표 1에서 정한 표준교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

4. 용어의 정의 및 명칭

4.1 전력계 (power meter)

써미스터 마운트 등의 전력감지기와 연결되어 전력감지기로 감지된 전자파 전력의 크기를 나타내는 기기로서 브릿지 회로, 증폭기, 미터 지시부 등의 전자회로로 구성되어 있다. 일반적으로 전력계는 써미스터 마운트용과 열전대 전력감지기용으로 구분된다.

4.2 전력 감지기

써미스터 마운트(thermistor mount), 열전대(thermocouple) 감지기, 다이오드(diode) 감지기 등 전자파 에너지를 감지하는 기기를 말한다.

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/47

4.3 전력감지소자

써미스터, 열전대, 다이오드 등 전력 감지기 내에서 전자파 에너지를 직접 감지하는 부분을 말한다.

4.4 STD 1, STD 2

표준 써미스터 마운터 1, 2의 약자로서 상급 교정절차기관에서 교정되어 그 교정인자를 알고 있는 써미스터 마운터를 말한다.

4.5 DUT

교정하고자 하는 기기를 의미하며 피 측정기기(device under test)의 약자이다.

4.6 실효 효율 (effective efficiency)

전자파 전력의 측정은 전력감지기에 입사하는 전자파의 에너지가 등가량을 가지는 DC 신호로 대체되고, 그 대체신호를 측정함으로써 이루어진다. 그러나 전력 감지 소자에서의 전자파와 DC 신호간의 상이한 전류분포 및 감지기 벽면에서의 손실로 인하여 대체효과가 존재하게 되는데 이를 고려한 것이 실효 효율로서 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_e (\text{실효 효율}) = \frac{\text{DC 대체 전력}}{\text{전력 감지기에 들어오는 순전력}} = \frac{P_{su}}{P_{gl}}$$

전력감지기의 실효 효율은 주파수의 변화에 따라 달라지며, 써미스터 마운트의 경우에는 전력의 크기에는 거의 무관하지만 다른 종류의 감지기는 전력의 크기에 따른 비 선형성을 갖는다.

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/47

4.7 교정인자 (calibration factor)

측정하고자 하는 전자파 전력은 신호원 기기의 출력단에서 전송 선로의 특성 임피던스(Z_0)를 갖는 부하에 인가되는 전력 $P_0 Z_0$ 인 경우가 대부분이다. 그러나 반사계수 Γ_L 을 갖는 전력감지기에는 $|\Gamma_L|^2$ 만큼의 전력이 반사되어 신호원으로 되돌아가고 나머지 전력이 측정되므로 이를 고려해야 한다. 교정인자는 전력 감지기의 실효 효율 η_e 와 Γ_L 을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$K = \eta_e(1 - |\Gamma_L|^2)$$

4.8 dB(decibel)의 정의

증폭기의 이득(gain)이나 감쇠기의 감쇠량, 전력비 및 상대 전력을 나타내는데 이용되는 dB는 임의의 기준전력(P_{ref})에 대한 피측정 전력의 비에 상용대수를 취하여 10배한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

4.9 dBm의 정의

dB가 상대전력을 나타내는데 비하여 dBm은 절대전력의 측정에 이용되며, 1 mW에 대한 전력의 비에 상용대수를 취하여 10배한 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$dBm = 10 \log_{10} \frac{P [mW]}{1 [mW]}$$

5. 교정내용

본 교정 절차는 10 MHz 이상의 RF 및 마이크로파 영역에서 교정된 동축형 써미스터 마운터를 이용하여 피측정 동축형 열전대 전력 감지기의 교정인자를 구하기 위한 절차이다.

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/47

6. 필요장비 명세

NO	장비명	최소사용규격		사용장비
1	RF 신호발생기 (RF Signal Generator)	Range	10 MHz ~ 27 GHz	ROHDE&SCHWARZ SMR27
		Accuracy	± 1 dB	
2	전력계 (Power Meter)	Accuracy	± 1 % of full scale	HP432A
3	써미스터 마운트 (Thermistor Mount)	Accuracy	CAL Factor : $\pm \sim 3$ %	HP 8478B
4	전력계 (Power Meter)	Range	-70 dBm ~ 20 dBm	HP E4419B
		Accuracy	± 2 %	
5	전력 감지기 (Power Sensor)	Range	50 MHz ~ 26.5 GHz	HP E4413A
		Accuracy	± 2 %	
6	고정 감쇠기(Fixed Attenuator)	Range	10 dB	HP
		Accuracy	0.19 dB	
7	방향성 결합기 (Directional Coupler)	Range	20 dB	HP 773D
		Accuracy	± 0.9 dB	
8	전력분배기 (Power Splitter)	Range	DC ~ 2.7 GHz	ROHDE&SCHWARZ
		Accuracy	SWR : 1.15 이하	
9	회로망 분석기 (Network Analyzer)	Range	300 kHz ~ 3 GHz	HP 8753C
		Accuracy	Level : ± 0.05 dB	

7. 준비사항

7.1 그림 1과 같이 장비를 연결한다. 각종 cable과 connector 등은 되도록 같은 형태의 것을사용하며, 각 장비들은 측정 도중에 흔들리지 않도록 견고하게 유지시켜야한다. 또한 각 연결부에 무리한 힘이 가해지지 않도록 수평과 균형을 유지하는 것이 중요하다.

7.2. 동축형 써미스터 마운터는 그 동작 저항이 200 Ω 이므로 전력계의 저항 단자를 200 Ω 에 놓는다.

7.3 신호원 기기는 출력과 주파수가 안정되기 위하여 약 1시간 정도의 예열이 필요하다. 따라서 측정을 시작하기 전에 전력계, 신호원 기기, 회로망분석기 및 측정에

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	6/47

이용되는 모든 장비들을 약 1시간 정도 예열 시킨다. 이 때 신호원 기기의 출력은 충분히 낮추어 놓는다.

7.4. 측정값의 정리와 교정인자의 계산을 위하여 data sheet를 준비하여 STD 1, STD 2의 교정인자를 기록하여 둔다.

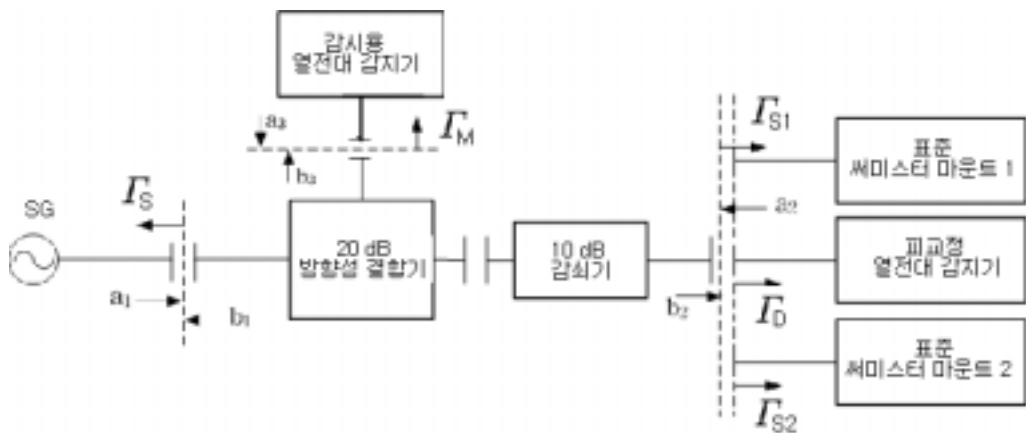


그림 1

8. 반사계수 측정

8.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.

8.2 type-N calibration kit를 사용하여 2-port calibration을 실행한다.

8.3 벡터 회로망분석기의 측정값 평균회수를 16번 이상으로 setting 한다.

8.4 측정 주파수대역의 시작 및 끝 주파수를 측정하고자 하는 주파수 대역으로 setting 한다.

8.5 측정 단자에 STD 1을 연결하고 측정 주파수에서 반사계수의 크기 및 위상을 측정하여 (Γ_{S1})표 8-1에 기록한다.

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/47

8.6 측정단자로부터 분리한 후, (60° , 120° , 180° , 240° , 300°) 회전시켜 다시 연결하여 측정하고자 하는 각 주파수 점의 반사계수 크기 및 위상을 측정하여 측정 결과를 표 8-1에 기입한다.

8.7 STD 2를 연결하고 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다(Γ_{S2}).

8.8 DUT를 연결하고 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다(Γ_D).

8.9 측정 port인 Directional Coupler에 연결된 감쇠기 출력 port에서 신호원 등가 반사계수(Γ_{EG})를 측정하기 위해서 8.5와 8.6의 과정을 반복 수행한다.

표 8-1 반사계수 측정결과

i	Γ_{S1}		Γ_{S2}		Γ_D		Γ_{GE}^*	
	$ \Gamma_{S1} $	θ_{S1}	$ \Gamma_{S2} $	θ_{S2}	$ \Gamma_D $	θ_D	$ \Gamma_{GE} $	θ_{GE}
1(0도)								
2(60)								
3(120)								
4(180)								
5(240)								
6(300)								

* 등가 신호원 반사계수 : $\Gamma_{GE} = S_{22} - S_{21}S_{32}/S_{31}$ ▶ 측정에 사용한 방향성 결합기의 coupling factor가 20 dB이고, Directivity가 30 dB인 경우 측정단에 10 dB 감쇠기 사용하

면 $S_{21}S_{32}/S_{31} = 0.01$ 이 되어 신호원 반사계수는 약 $\Gamma_{GE} = S_{22}$ 가 된다. (단 S_{22} 는 방향성 결합기에 연결된 감쇠기 출력에서 신호원 방향의 반사계수이다.)

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/47

9. 반사계수의 크기 및 위상에 대한 평균값 계산

9.1 표 8-1의 반사계수와 위상의 반복 측정 데이터로부터 반사계수의 크기와 위상에 대한 평균값을 구하여 표 9-1에 기록한다.

표 9-1 반사계수의 크기와 위상 평균

Γ_{S1}		Γ_{S2}		Γ_D		Γ_{GE}	
$\overline{\Gamma_{S1}}$	$\overline{\theta_{S1}}$	$\overline{\Gamma_{S2}}$	$\overline{\theta_{S2}}$	$\overline{\Gamma_D}$	$\overline{\theta_D}$	$\overline{\Gamma_{GE}}$	$\overline{\theta_{GE}}$

10. 써미스터 마운터의 교정순서

10.1 신호원 기기를 충분히 한 후 그림 1과 같이 장비를 연결한다.

10.2 신호원 기기의 RF를 켜지 않은 상태에서 전력계의 COARSE ZERO를 맞춘다. COARSE ZERO를 맞춘 후 RANGE 단자를 최소 RANGE로 바꾸어 FINE ZERO를 눌러 준다 (영점 조정)

10.3 영점 조정이 된 후 RANGE 단자를 측정 RANGE에 놓는다. 이때 모니터 단자 (Sidearm)에 연결된 전력계와 피측정 전력 감지기의 측정 RANGE는 10 mW에 있어야 한다.

10.4 Test Port (main arm)에서의 전력 측정은 전력 측정기 (HP 432)의 뒷면의 V_{COMP} 와 V_{RF} 출력을 이용하여 다음 식을 이용한다. 이 식에서 R은 써미스터 마운터의 저항으로 일반적으로 동축형 써미스터 마운터의 경우 200 Ω 이고 도 파관형 써미스터 마운터의 경우에는 100 Ω 이다.

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/47

$$P_{RF} = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{4R} W$$

10.5 표준 써미스터 1을 연결하고 신호원 기기의 출력을 서서히 증가시켜 Test Port (main arm)의 전력계가 약 10 mW 정도를 읽게 한다. 신호원 기기의 출력이 너무 커서 OVER RANGE가 될 경우에는 출력을 줄여서 OVER RANGE를 벗어나게 한다.

10.6 전력계의 지시값을 읽어 모니터 단자 (Side arm)의 전력계 지시값은 표 10-1 data sheet 1의 [1-1] P_{MS1} 에 기록하고 main arm에서의 전력을 측정하여 표 10-1 data sheet 1의 [1-2] (P_{S1}) 에 기록한다.

10.7 신호원 기기의 출력을 60 dB 이상 줄여서 전력계의 ZERO 가 맞는지 확인하고 천이(drift)가 있는 경우 그 값을 가감하여 data sheet에 기재하며 그 천이 값이 대단히 큰 경우에는 ZERO를 다시 맞춘 후 10.2~10.5 의 과정을 반복 한다.

10.8 Test port (Main arm)에서 STD 1을 떼어내고 DUT를 연결한 후 10.2~10.5 의 과정을 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-1 data sheet 1의 [1-3]에 Test Port (main arm)에서의 전력 측정값은 [1-4]에 각각 기록한다.

표 10-1 data sheet 1

n	STD 1		DUT		R_{D1}	R_{S1}	K_{D1}
	P_{MS1}	P_{S1}	P_{MD1}	P_{D1}	$\frac{[1-4]}{[1-3]}$	$\frac{[1-2]}{[1-1]}$	
	[1-1]	[1-2]	[1-3]	[1-4]	[1-5]	[1-6]	$K_{S1} \frac{[1-5]}{[1-6]} M1$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/47

10.9 Test port (Main arm)에서 DUT를 떼어내고 STD 2를 연결한 후 10.2~10.5의 과정을 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-2 data sheet 2의 [2-1]에 Test Port (main arm)에서의 전력 측정값은 [2-2]에 각각 기록한다.

10.10 Test port (Main arm)에서 STD 2를 떼어내고 DUT를 연결한 후 10.2~10.5의 반복한다. 이때 모니터 단자(Side arm)의 지시값은 표 10-2 data sheet 2의 [2-3]에 Test Port (main arm)의 지시값은 [2-4]에 각각기록한다.

10.11 10.2~10.5의 과정을 6회 반복하여 측정한 결과를 data sheet에 기록한다.

표 10-2 data sheet 2

i	STD 2		DUT		R_{D2}	R_{S2}	K_{D2}
	P_{MS2}	P_{S2}	P_{MD2}	P_{D2}	$\frac{[2-4]}{[2-3]}$	$\frac{[2-2]}{[2-1]}$	
	[2-1]	[2-2]	[2-3]	[2-4]	[2-5]	[2-6]	$K_{S2} \frac{[2-5]}{[2-6]} M2$
1							
2							
3							
4							
5							
6							

10.12 DUT의 교정 인자(K_D)는 다음과 같이 구해진다.

$$K_D = \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2}$$

$$K_{D1} = K_{S1} \frac{P_{D1} P_{MS1}}{P_{S1} P_{MD1}} M_1, \quad M_1 = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_{S1} \Gamma_{GE}|^2}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	11/47

$$K_{D2} = K_{52} \frac{P_{D2} P_{MS2}}{P_{S2} P_{MD2}} M_2, \quad M_2 = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_{S2} \Gamma_{GE}|^2}$$

K_{S1} : 표준 써미스터 마운터1의 교정인자

K_{S2} : 표준 써미스터 마운터2의 교정인자

P_{S1} , P_{MS1} : 표준 써미스터 마운터1 연결시 방향성 결합의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

P_{D1} , P_{MD1} : 표준 써미스터 마운터 1 연결시 피측정 열전대 전력 감지기 연결시 방향성 결합기의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

K_{D1} : 표준 써미스터 마운터1을 이용하여 측정한 피측정 열전대 전력 감지기의 교정인자.

P_{S2} , P_{MS2} : 표준 써미스터 마운터 2 연결시 방향성 결합의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

P_{D2} , P_{MD2} : 표준 써미스터 마운터 2 연결시 피측정 열전대 전력 감지기 연결시 방향성 결합기의 Test port(main arm)과 Monitor port(side arm)에서 측정되는 전력

K_{D2} : 표준 써미스터 마운터1을 이용하여 측정한 피측정 열전대 전력 감지기의 교정인자.

11. 측정 결과의 검증

표 10-1과 표 10-2로부터 다음 값을 계산하여 $0.97 \leq C \leq 1.03$ 의 범위에 들지 않으면 모든 측정을 다시 반복한다.

$$C = \frac{[1-1][2-2][1-6]}{[1-2][2-1][2-6]}$$

12. 교정인자 측정의 불확도 평가

12.1 수학적 모델 설정

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 12/47

가. 수학적 모델

$$\begin{aligned}
 K_D &= K_S \frac{P_D P_{MS}}{P_S P_{MD}} \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_{S1} \Gamma_{GE}|^2} \\
 &= K_S \frac{R_D}{R_S} M \\
 - R_D &= \frac{P_D}{P_{MD}}, \quad R_S = \frac{P_S}{P_{MS}}, \quad M = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2}
 \end{aligned}$$

나. 불확도 산출 수식

$$u_c(K_D) = \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_S) + c_2^2 u_c^2(R_D) + c_3^2 u_c^2(R_S) + c_4^2 u_c^2(M)}$$

다. 감도계수

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \frac{\partial K_D}{\partial K_S} = \frac{K_D}{K_S}, \quad c_2 = \frac{\partial K_D}{\partial R_D} = \frac{K_D}{R_D}, \\
 c_3 &= \frac{\partial K_D}{\partial R_S} = -\frac{K_D}{R_S}, \quad c_4 = \frac{\partial K_D}{\partial M} = \frac{K_D}{M}
 \end{aligned}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KD} = \frac{u_c^4(K_D)}{\frac{u_c^4(K_S)}{\nu_{K_S}} + \frac{u_c^4(R_D)}{\nu_{R_D}} + \frac{u_c^4(R_S)}{\nu_{K_S}} + \frac{u_c^4(M)}{\nu_M}}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	13/47

12.2 불확도 평가 분석

12.2.1 표준 써미스터 마운터의 합성 표준 불확도 : $u_c(K_S)$

표준 써미스터 마운터(STD1, STD2)의 불확도는 상급 교정기관으로부터 얻은 확장 불확도 (U)와 포함인자 (k)로부터 구할 수 있다.

$$u_c(K_S) = \frac{U(K_S)}{k} \quad (k=2)$$

12.2.2 피측정 열전대 전력 감지기가 측정 포트에 연결될 때 모니터 단자에서의 전력과 피측정 열전대 전력 감지기에서의 전력 측정비에 포함된 합성 표준 불확도 : $u_c(R_D)$

$$R_D = \frac{P_D}{P_{MD}}$$

가. 표10-1과 표10-2에서 R_{D1} 과 R_{D2} 의 반복 측정에 대한 A형 : $u_A(R_D)$

◦ 평균

$$\overline{R_D} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_D(i)$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_D) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_D(i) - \overline{R_D})^2}$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_D}) = \frac{s(R_D)}{\sqrt{6}}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 14/47

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_D) = s(\overline{R_D})$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_D) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_D) + c_2^2 u^2(P_{MD})}$$

$$c_1 = \frac{\partial R_D}{\partial P_D} = \frac{R_D}{P_D}, \quad c_2 = \frac{\partial R_D}{\partial P_{MD}} = -\frac{R_D}{P_{MD}}$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/47

$$\circ u(P_{MD}) = 0.0007$$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP E4419B 전력계와 HP E4413A 전력 감지기를 이용하여 전력을 측정하는 경우 전력계에 의한 Type B 불확도에 대하여 생각하여 보자.

$$P_D = \frac{M_u(P_m - (t + D))}{P_1 K_b m}$$

$$\circ m = \frac{M_{uc}(P_{mc} - t)}{K_c P_{cal}}$$

- m : 전력계의 이득항
- M_{uc} : 전력 측정용 센서와 전력계 내부 교정 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
- P_{mc} : 교정기간 동안 전력계가 지시한 전력 레벨
- t : 전력계의 zero offset
- K_c : 전력 측정용 센서의 교정 주파수에서 교정인자
- P_{cal} : 전력계 교정출력에서 Z_0 에 전달되는 전력

$$\circ M_u : \text{전력 측정용 센서와 신호원 사이의 부정합에 의한 이득}$$

$$\circ P_m : \text{전력계가 읽은값}$$

$$\circ P_1 : \text{전력 측정용 센서의 비선형 항}$$

$$\circ K_b : \text{측정 주파수에서 전력 측정용 센서의 교정인자}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 16/47

- $t = Z_s + Z_c + N$
 - Z_s : 전력계의 zero set
 - Z_c : 전력계의 zero carryover
 - N : 전력계 잡음
- D : 전력계 Drift

(4) Type-B 상대 불확도

$$\frac{u(P_D)}{P_D} = \sqrt{\frac{u^2(M_u)}{M_u^2} + \frac{u^2(P_m)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(D)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + \frac{u^2(m_{uc})}{M_{uc}^2} + \frac{u^2(P_{mc})}{(P_{mc} - t)^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{1}{(P_{mc} - t)^2} - \frac{1}{K_c P_{cal} m \{P_m - (t+D)\}} \right) \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}}$$

- 다음의 경우에 대하여 Type-B 상대 불확도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & - M_u = 1, M_{uc} = 1, P_{mc} = P_{cal}, Z_s = 0, Z_c = 0, N = 0, D = 0, t = 0, m = \frac{1}{K_c} \\ & - \frac{u(P_D)}{P_D} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}} \end{aligned}$$

- $u(M_u)$: 센서와 측정 주파수에서 측정 Port 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : Γ_S
- 측정 Port의 반사계수 : Γ_{GE}

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 17/47

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = \frac{\Gamma_S \times \Gamma_{GE}}{\sqrt{2}}$$

- $u(M_{uc})$: 센서와 전력 측정기의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : Γ_S

- Power Meter의 교정 출력 반사계수 : Γ_G

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = \frac{\Gamma_S \times \Gamma_G}{\sqrt{2}}$$

- $u(P_m) = \pm 0.5 \%$: 전력 측정기의 instrumentation 불확도

$$- \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(P_{mc}) = \pm 0.5 \%$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{P_m} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

- $u(K_b) = 0 \%$: 측정 주파수에서 센서의 교정인자 불확도로 0으로 취급

$$- \frac{u(K_b)}{K_b} = 0 \%$$

- $u(K_c) = \pm 0.5 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.5}{2} = 0.25 \%$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 18/47

- $u(P_1) = 0 \%$: 센서의 비선형 불확도로 교정점을 고정함으로 0으로 취급

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = 0 \%$$

- $u(P_{cal}) = \pm 0.9 \%$: 전력계의 50 MHz 교정출력 불확도

$$- \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.45 \%$$

- $u(Z_s) = \pm 50 \text{ pW}$: 전력계의 zero set 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

- $u(Z_c) = 0$: 전력계의 zero carryover는 instrumentation 불확도에 포함됨

$$- u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}}$$

다. 피교정 열전대 감지기 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_D) = \sqrt{u_A^2(R_D) + u_B^2(R_D)}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RD} = \frac{u_c^4(R_D)}{\frac{u_A^4(R_D)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(R_D)}{\nu_B}}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/47

12.2.4 표준 써미스터 마운터가 측정 포트에 연결될 때 모니터 단자에서의 전력 과 표준 써미스터 마운터에서의 전력 측정비에 포함된 합성 표준 불확도

: $u_c(R_S)$

$$R_S = \frac{P_S}{P_{MS}}$$

$$P_S = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

가. 표10-1과 표10-2에서 R_{S1} 과 R_{S2} 의 반복 측정에 대한 A형 : $u_A(R_S)$

◦ 평균

$$\overline{R_S} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_S(i)$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_S) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_S(i) - \overline{R_S})^2}$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_S}) = \frac{s(R_S)}{\sqrt{6}}$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(\overline{R_S}) = s(\overline{R_S})$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	20/47

$$(1) u_B(R_S) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_S) + c_2^2 u^2(P_{MS})}$$

$$c_1 = \frac{\partial R_S}{\partial P_S} = \frac{R_S}{P_S}, \quad c_2 = \frac{\partial R_S}{\partial P_{MS}} = -\frac{R_S}{P_{MS}}$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

◦ $u(P_{MS}) = 0.0007$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운트를 이용하여 경우 약 10 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	21/47

$$\circ P_S = \frac{V_{\text{COMP}}^2 - V_{\text{RF}}^2}{800}$$

$$\circ u_B(P_S) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{\text{COMP}}) + c_2^2 u^2(V_{\text{RF}})}$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_S}{\partial V_{\text{COMP}}} = \frac{V_{\text{COMP}}}{400}$$

$$- c_2 = \frac{\partial P_S}{\partial V_{\text{RF}}} = -\frac{V_{\text{RF}}}{400}$$

$$- u(V_{\text{COMP}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts})$$

$$- u(V_{\text{RF}}) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (a = 0.03 \% \text{ of reading} + 2 \text{ counts})$$

◦ 전력계의 불확도

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

$$- u(\text{MET}) = \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031$$

$$\circ u(P_S) = \sqrt{u_B^2(P_S) + u^2(\text{MET})}$$

다. 피교정 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_S) = \sqrt{u_A^2(R_S) + u_B^2(R_S)}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RS} = \frac{u_c^4(R_D)}{\frac{u_A^4(R_S)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(R_S)}{\nu_B}}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 22/47

12.2.5 부정합 불확도 : $u_c(M)$

가. 부정합의 영향

$$M = \frac{|1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{GE}|^2} = \frac{M_D}{M_S}$$

나. 측정 포트와 피측정 열전대 전력 감지기 사이의 부정합 불확도

$$u_{M_D} = \frac{2 |\Gamma_D| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}}$$

다. 측정 포트와 표준 써미스터 마운터 사이의 부정합 불확도

$$u_{M_S} = \frac{2 |\Gamma_S| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}}$$

라. 부정합 불확도

$$u_c(M) = \sqrt{u_{M_D}^2 + u_{M_S}^2}$$

마. 유효 자유도

$$\nu_{M=} = \frac{u_c^4(M)}{\frac{u^4(M_D)}{\nu_{MD}} + \frac{u^4(M_S)}{\nu_{MS}}}$$

13. 교정인자 교정 결과 처리

13.1 교정 인자

가. 2 개의 표준 써미스터 마운터를 이용하여 교정함으로 측정한 피교정 써미스터 마운터의 교정인자를 평균하여 교정 인자를 구한다.

나. 교정 인자

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 23/47

$$K_D = \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2}$$

- K_{D1} : 표준 써미스터 마운터 1(K_{S1})을 이용하여 구한 교정인자
- K_{D2} : 표준 써미스터 마운터 2(K_{S2})을 이용하여 구한 교정인자

13.2 교정 불확도

가. 합성 표준 불확도

$$u_c(K_D) = \frac{\sqrt{u_c^2(K_{D1}) + u_c^2(K_{D2})}}{\sqrt{2}}$$

나. 확장 불확도

$$U = k u_c(K_D) \quad (k=2)$$

14. 써미스터 마운터 교정 예

14.1 측정 조건

가. 측정 주파수 : 1 GHz

나. 시료 : HP8478B

다. 교정인자 : $K_{S1} = 98.99$ (0.5 %), $K_{S2} = 99.20$ (0.5 %)

14.2 반사계수의 크기 측정

Γ_{S1}	Γ_{S2}	Γ_D	Γ_{GE}
0.019	0.023	0.087	0.048

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 24/47

가. 표준 써미스터 마운터 1과 측정면

$$M_{S1} = |1 - \Gamma_{S1} \Gamma_{GE}|^2 = 0.998, \quad u_{M_{S1}} = \frac{2 |\Gamma_{S1}| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.001$$

나. 표준 써미스터 마운터 2와 측정면

$$M_{S2} = |1 - \Gamma_{S2} \Gamma_{GE}|^2 = 0.998, \quad u_{M_{S2}} = \frac{2 |\Gamma_{S2}| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.002$$

다. 피 측정 써미스터 마운터와 측정면

$$M_D = |1 - \Gamma_D \Gamma_{GE}|^2 = 0.992, \quad u_{M_D} = \frac{2 |\Gamma_D| |\Gamma_{GE}|}{\sqrt{2}} = 0.006$$

라. 부정합 불확도

$$M_1 = \frac{M_D}{M_{S1}} = 0.994, \quad u_c(M_1) = 0.0060$$

$$M_2 = \frac{M_D}{M_{S2}} = 0.994, \quad u_c(M_2) = 0.0063$$

마. 유효 자유도

$$\nu_{M1} = \infty, \quad \nu_{M2} = \infty$$

14.3 표준 써미스터1을 이용한 피측정 전력 감지기 교정

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	25/47

14.3.1 전력 측정 결과

i	STD1					DUT		
	P _{MS1} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{S1} [mW]	R _{S1}	P _{MD1} [mW]	P _{D1} [mW]	R _{D1}
1	1.23	5.12531	4.46102	7.960	6.472	1.23	8.075	6.565
2	1.23	5.12542	4.46105	7.961	6.472	1.23	8.076	6.566
3	1.23	5.12562	4.46107	7.963	6.474	1.23	8.075	6.565
4	1.23	5.12522	4.46106	7.968	6.478	1.23	8.075	6.565
5	1.23	5.12581	4.46108	7.966	6.476	1.23	8.076	6.566
6	1.23	5.12600	4.46105	7.962	6.473	1.23	8.075	6.565

14.3.2 표준 써미스터 마운터 1과 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{S1})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{S1}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{S1}(i) = 6.474$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{S1}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{S1}(i) - \overline{R_{S1}})^2} = 0.0024$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{S1}}) = \frac{s(R_{S1})}{\sqrt{6}} = 0.0010$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{S1}) = s(\overline{R_{S1}}) = 0.0010$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	26/47

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{S1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{S1}) + c_2^2 u^2(P_{MS1})} = 0.0045$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{S1}}{\partial P_{S1}} = \frac{R_{S1}}{P_{S1}} = \frac{6.474}{7.963} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{S1}}{\partial P_{MS1}} = -\frac{R_{S1}}{P_{MS1}} = -\frac{6.474}{1.23} = -5.263$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{1.23 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{1.23 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	27/47

$$\circ u(P_{MS1}) = 0.0007$$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.96 mW의 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

$$\circ P_{S1} = \frac{V_{COMP}^2 - V_{RF}^2}{800}$$

$$\circ u_B(P_{S1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_{COMP}) + c_2^2 u^2(V_{RF})} = 0$$

$$- c_1 = \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_{COMP}} = \frac{5.12566}{400} = 0.0128$$

$$- c_2 = \frac{\partial P_{S1}}{\partial V_{RF}} = -\frac{4.46106}{400} = -0.0112$$

$$- u(V_{COMP}) = \frac{5.12566}{\sqrt{3}} = 0.0009$$

$$- u(V_{RF}) = \frac{4.46106}{\sqrt{3}} = 0.0008$$

◦ 전력계의 불확도

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

$$- u(MET) = \sqrt{0.0029^2 + 0.0012^2} = 0.0031$$

$$\circ u(P_{S1}) = \sqrt{u_B^2(P_{S1}) + u^2(MET)} = 0.0031$$

다. 표준 써미스터 1을 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	28/47

$$u_c(R_{S1}) = \sqrt{u_A^2(R_{S1}) + u_B^2(R_{S1})} = \sqrt{0.0045^2 + 0.0010^2} \\ = 0.0046$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RS1} = \frac{0.0046^4}{\frac{0.0010^4}{5} + \frac{0.0045^4}{\infty}} = 2\,239$$

14.3.3 피측정 열전대 감지기와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{D1})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{D1}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{D1}(i) = 6.437$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{D1}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{D1}(i) - \overline{R_{D1}})^2} = 0.0005$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{D1}}) = \frac{s(R_{D1})}{\sqrt{6}} = 0.0002$$

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{D1}) = s(\overline{R_{D1}}) = 0.0002$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	29/47

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{D1}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{D1}) + c_2^2 u^2(P_{MD1})} = 0.0345$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{D1}}{\partial P_{D1}} = \frac{R_{D1}}{P_{D1}} = \frac{6.565}{8.075} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{D1}}{\partial P_{MD1}} = -\frac{R_{D1}}{P_{MD1}} = -\frac{6.565}{1.23} = -5.337$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

◦ HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 약 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{1.23 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{1.23 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0 \%$$

◦ 분해능 불확도 (분해능 : 0.001 dB)

$$- u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

◦ $u(P_{MD1}) = 0.0007$

(3) 측정 포트의 전력 측정 :

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	30/47

HP E4419B 전력계와 HP E4413A 전력 감지기를 이용하여 $P_{D1} = 8.075$ mW의 전력을 측정하는 경우 전력계에 의한 Type B 불확도에 대하여 생각하여 보자.

$$P_D = \frac{M_u(P_m - (t + D))}{P_1 K_b m}$$

- $m = \frac{M_{uc}(P_{mc} - t)}{K_c P_{cal}}$
 - m : 전력계의 이득항
 - M_{uc} : 전력 측정용 센서와 전력계 내부 교정 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
 - P_{mc} : 교정기간 동안 전력계가 지시한 전력 레벨
 - t : 전력계의 zero offset
 - K_c : 전력 측정용 센서의 교정 주파수에서 교정인자
 - P_{cal} : 전력계 교정출력에서 Z_0 에 전달되는 전력
- M_u : 전력 측정용 센서와 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
- P_m : 전력계가 읽은값
- P_1 : 전력 측정용 센서의 비선형 항
- K_b : 측정 주파수에서 전력 측정용 센서의 교정인자
- $t = Z_s + Z_c + N$
 - Z_s : 전력계의 zero set
 - Z_c : 전력계의 zero carryover
 - N : 전력계 잡음

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	31/47

◦ D : 전력계 Drift

◦ Type-B 상대 불확도

$$\frac{u(P_D)}{P_D} = \sqrt{\frac{u^2(M_u)}{M_u^2} + \frac{u^2(P_m)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(D)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + \frac{u^2(m_{uc})}{M_{uc}^2} + \frac{u^2(P_{mc})}{(P_{mc} - t)^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{1}{(P_{mc} - t)^2} - \frac{1}{K_c P_{cal} m \{P_m - (t+D)\}} \right) \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}}$$

◦ 다음의 경우에 대하여 Type-B 상대 불확도

$$- M_u = 1, M_{uc} = 1, P_{mc} = P_{cal}, Z_s = 0, Z_c = 0, N = 0, D = 0, t = 0, m = \frac{1}{K_c}$$

$$- \frac{u(P_D)}{P_D} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_l)}{P_l^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}}$$

◦ $u(M_u)$: 센서와 측정 주파수에서 측정 Port 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : Γ_S

- 측정 Port의 반사계수 : Γ_{GE}

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = \frac{\Gamma_S \times \Gamma_{GE}}{\sqrt{2}} = \frac{0.019 \times 0.0048}{\sqrt{2}} = 0.0006$$

◦ $u(M_{uc})$: 센서와 전력 측정기의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : Γ_S

- Power Meter의 교정 출력 반사계수 : Γ_G

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 32/47

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = \frac{\Gamma_S \times \Gamma_G}{\sqrt{2}} = \frac{0.019 \times 0.038}{\sqrt{2}} = 0.0005$$

- $u(P_m) = \pm 0.5 \%$: 전력 측정기의 instrumentation 불확도

$$- \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$$

- $u(P_{mc}) = \pm 0.5 \%$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$$

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{8.075 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

- $u(K_b) = 0 \%$: 측정 주파수에서 센서의 교정인자 불확도로 0으로 취급

$$- \frac{u(K_b)}{K_b} = 0$$

- $u(K_c) = \pm 0.5 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.5}{2} = 0.0025$$

- $u(P_l) = 0 \%$: 센서의 비선형 불확도로 교정점을 고정함으로 0으로 취급

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = 0$$

- $u(P_{cal}) = \pm 0.9 \%$: 전력계의 50 MHz 교정출력 불확도

$$- \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.0045$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 33/47

- $u(Z_s) = \pm 50 \text{ pW}$: 전력계의 zero set 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{8.075 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

- $u(Z_c) = 0$: 전력계의 zero carryover는 instrumentation 불확도에 포함됨

$$- u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{8.075 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

$$\begin{aligned} \circ u(P_{D1}) &= 8.075 \times \sqrt{.0006^2 + .0003^2 + .0005^2 + .0003^2 + .0025^2 + .0045^2} \\ &= 0.0422 \end{aligned}$$

다. 피교정 써미스터와 모니터단 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(R_{D1}) &= \sqrt{u_A^2(R_{D1}) + u_B^2(R_{D1})} = \sqrt{0.0002^2 + 0.0345^2} \\ &= 0.0345 \end{aligned}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RD1} = \frac{0.0345^4}{\frac{0.0002^4}{5} + \frac{0.0345^4}{\infty}} \approx \infty$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	34/47

마. 전력비 측정의 불확도 총괄

기 호	불확도 원인	값, $\pm \%$	확률분포	적용인자	표준 불확도
M_{u1}	측정 Port와 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_S = 0.019$ $ \Gamma_{GE} = 0.048$	U	1	0.0006
M_{uc}	전력계의 교정원과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_S = 0.019$ $ \Gamma_G = 0.038$	U	1	0.0005
P_m	전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.003
P_{mc}	교정기간 동안 전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.003
D	전력계 drift	± 15 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
K_c	50 MHz에서 센서 교정인자	0	직각	—	0.0025
P_{cal}	전력계 교정 출력 전력	0.9 %	정규	2	0.0045
Z_s	전력계 zero set	± 50 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
Z_c	전력계 zero carryover	0	직각	$\sqrt{3}$	0.000
N	전력계와 센서 잡음	± 70 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
$u_A(R_{D1})$	전력비 측정의 Type-A 불확도	0.2 %	정규	1	0.0002
$u_C(R_{D1})$	합성 불확도				0.0345

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	35/47

14.3.4 표준 써미스터 마운트 1을 이용한 피교정 써미스터 마운트 교정 결과

가. 교정인자

$$K_{D1} = K_{S1} \times \frac{R_{D1}}{R_{S1}} \times M_1 = 0.9899 \times \frac{6.565}{6.474} \times 0.994$$

$$= 0.9978 \text{ (99.78 \%)}$$

나. 합성 불확도

$$u_c(K_{D1}) = \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_{S1}) + c_2^2 u_c^2(R_{D1}) + c_3^2 u_c^2(R_{S1}) + c_4^2 u_c^2(M_1)}$$

$$= 0.0083$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial K_{D1}}{\partial K_{S1}} = \frac{K_{D1}}{K_{S1}} = 0.9942, \quad c_2 = \frac{\partial K_{D1}}{\partial R_{D1}} = \frac{K_{D1}}{R_{D1}} = 0.1499,$$

$$c_3 = \frac{\partial K_{D1}}{\partial R_{S1}} = -\frac{K_{D1}}{R_{S1}} = -0.152, \quad c_4 = \frac{\partial K_{D1}}{\partial M_1} = \frac{K_{D1}}{M_1} = 0.9901$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KD1} = \frac{0.0166^4}{\frac{0.0025^4}{\infty} + \frac{0.0345^4}{\infty} + \frac{0.0046^4}{2239} + \frac{0.0060^4}{\infty}} = 379.713$$

마. 확장 불확도

$$U_{D1} = k u_c(K_{D1}) = 0.0083 \times 2 = 0.0166 \text{ (k=2)}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	36/47

14.3.5 표준 써미스터 마운트 1을 이용한 열전대 전력 감지기 교정 불확도 총괄표

표기	불확도 요인	불확도	확률 분포	적용인자	감도계 수	불확도 기여
K_{S1}	표준 써미스터 마운트의 교정인자	0.005	정규	2	0.9942	0.0025
R_{D1}	피교정 써미스터와 모니터부의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{D1})=0.0002$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MD1})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{D1})=0.0422$	0.0345	정규	1	0.153	0.0053
R_{S1}	표준 써미스터와 모니터부의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{S1})=0.010$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MS1})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{S1})=0.0031$	0.0046	정규	1	0.152	0.0007
M_1	부정합 인자비 -측정포트와 표준기: $U_{MS1}=0.01$ -측정포트와 피교정기: $U_{MD1}=0.006$	0.0085	U	$\sqrt{2}$	0.9901	0.0060
$u_c(K_{D1})$	합성 표준 불확도					0.0083
U_{D1}	합성 불확도 ($k=2$)					0.0166

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	37/47

14.4 표준 써미스터 2를 이용한 피측정 전력 감지기 교정

14.4.1 전력 측정 결과

i	STD2					DUT		
	P _{MS2} [mW]	V _{COMP} [V]	V _{RF} [V]	P _{S2} [mW]	R _{S2}	P _{MD2} [mW]	P _{D2} [mW]	R _{D2}
1	1.23	5.12551	4.45910	7.984	6.491	1.23	8.076	6.566
2	1.23	5.12560	4.45920	7.984	6.491	1.23	8.077	6.567
3	1.23	5.12565	4.45922	7.984	6.491	1.23	8.076	6.566
4	1.23	5.12560	4.45912	7.985	6.492	1.23	8.076	6.566
5	1.23	5.12558	4.45910	7.985	6.492	1.23	8.077	6.567
6	1.23	5.12559	4.45915	7.985	6.492	1.23	8.076	6.566

14.4.2 표준 써미스터 마운터 2와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{S2})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{S2}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{S2}(i) = 6.492$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{S2}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{S2}(i) - \overline{R_{S2}})^2} = 0.0008$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{S2}}) = \frac{s(R_{S2})}{\sqrt{6}} = 0.0003$$

◦ A형 표준 불확도

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	38/47

$$u_A(R_{S2}) = s(\overline{R_{S2}}) = 0.0003$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) \quad u_B(R_{S2}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{S2}) + c_2^2 u^2(P_{MS2})} = 0.0045$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{S2}}{\partial P_{S2}} = \frac{R_{S2}}{P_{S2}} = \frac{6.492}{7.985} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{S2}}{\partial P_{MS2}} = -\frac{R_{S2}}{P_{MS2}} = -\frac{6.492}{1.23} = -5.278$$

(2) 측정 포트의 전력 측정 불확도

HP 432A와 HP 8478B 써미스터 마운터를 이용하여 경우 7.985 mW 전력을 측정하는 경우 DVM은 약 5 V의 전압을 측정함

$$\circ u(P_{S2}) = 0.0031$$

- DVM을 이용한 전력 측정 불확도 ≈ 0

$$- \text{Zero Carryover} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.0029$$

$$- \text{Instrumentation error} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.0012$$

(3) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 39/47

- $u(P_{MS2}) = 0.0007$
 - 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)
- $u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$
- 전력계의 잡음과 Drift 영향 무시

다. 표준 써미스터 2를 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(R_{S2}) = \sqrt{u_A^2(R_{S2}) + u_B^2(R_{S2})} = \sqrt{0.0003^2 + 0.0045^2} = 0.0045$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RS2} = \frac{0.0045^4}{\frac{0.0003^4}{5} + \frac{0.0045^4}{\infty}} = 253 \ 125$$

14.4.3 피 측정 열전대 전력 감지기와 모니터 단자의 전력비 불확도 : $u_c(R_{D2})$

가. 반복 측정에 의한 Type A 불확도

◦ 평균

$$\overline{R_{D2}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 R_{D2}(i) = 6.566$$

◦ 실험 표준편차

$$s(R_{D2}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (R_{D2}(i) - \overline{R_{D2}})^2} = 0.0006$$

◦ 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{R_{D2}}) = \frac{s(R_{D1})}{\sqrt{6}} = 0.0003$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 40/47

◦ A형 표준 불확도

$$u_A(R_{D2}) = s(\overline{R_{D2}}) = 0.0003$$

◦ A형 표준 불확도의 자유도

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

나. 전력비 측정의 Type B 불확도

$$(1) u_B(R_{D2}) = \sqrt{c_1^2 u^2(P_{D2}) + c_2^2 u^2(P_{MD2})} = 0.0345$$

$$c_1 = \frac{\partial R_{D2}}{\partial P_{D2}} = \frac{R_{D2}}{P_{D2}} = \frac{6.566}{8.076} = 0.813$$

$$c_2 = \frac{\partial R_{D2}}{\partial P_{MD2}} = -\frac{R_{D2}}{P_{MD2}} = -\frac{6.566}{1.23} = -5.338$$

(2) 모니터 포트의 전력 측정 : 절대 전력의 측정이 아니므로 전력계나 센서의 안정도나 분해능이 중요함.

HP E4491B 전력계와 E4413A 센서를 사용하여 1.23 mW의 전력을 측정하는 경우

$$\circ u(P_{MD2}) = 0.0007$$

- 분해능 불확도 (분해능 : 0.01 dB)

$$u(R) = \frac{0.00231}{2\sqrt{3}} = 0.0007$$

- 전력계의 잡음과 Drift 영향 무시

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 41/47

(3) 측정 포트의 전력 측정 불확도

HP E4419B 전력계와 HP E4413A 전력 감지기를 이용하여 $P_{DI} = 8.075 \text{ mW}$ 의 전력을 측정하는 경우 전력계에 의한 Type B 불확도에 대하여 생각하여 보자.

$$- \frac{u(P_D)}{P_D} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_l)}{P_l^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}}\right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}}$$

$$\circ \frac{u(M_u)}{M_u} = \frac{I_S \times I_{GE}}{\sqrt{2}} = \frac{0.019 \times 0.0048}{\sqrt{2}} = 0.0006$$

$$\circ \frac{u(M_{uc})}{M_{uc}} = \frac{I_S \times I_G}{\sqrt{2}} = \frac{0.019 \times 0.038}{\sqrt{2}} = 0.0005$$

$$\circ \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$$

$$\circ \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003$$

$$\circ \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{8.076 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

$$\circ \frac{u(K_b)}{K_b} = 0$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	42/47

$$\circ \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.5}{2} = 0.0025$$

$$\circ \frac{u(K_c)}{K_c} = 0$$

$$\circ \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.0045$$

$$\circ u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{8.076 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

$$\circ u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

$$\circ u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{8.076 \times 10^{-3}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0$$

$$\begin{aligned} \circ u(P_{D2}) &= 8.076 \times \sqrt{.0006^2 + .0003^2 + .0005^2 + .0003^2 + .0025^2 + .0045^2} \\ &= 0.0422 \end{aligned}$$

다. 표준 써미스터 2를 이용한 전력비 측정의 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(R_{D2}) &= \sqrt{u_A^2(R_{D2}) + u_B^2(R_{D2})} = \sqrt{0.0003^2 + 0.0345^2} \\ &= 0.0345 \end{aligned}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{RD2} = \frac{0.0345^4}{\frac{0.0003^4}{5} + \frac{0.0345^4}{\infty}} \approx \infty$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	43/47

마. 전력비 측정의 불확도 총괄

기 호	불확도 원인	값, $\pm \%$	확률분포	적용인자	표준 불확도
M_{u2}	측정 Port와 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_S = 0.019$ $ \Gamma_{GE} = 0.048$	U	1	0.0006
M_{uc}	전력계의 교정원과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_S = 0.019$ $ \Gamma_G = 0.038$	U	1	0.0005
P_m	전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.003
P_{mc}	교정기간 동안 전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.003
D	전력계 drift	± 15 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
K_c	50 MHz에서 센서 교정인자	0	직각	—	0.0025
P_{cal}	전력계 교정 출력 전력	0.9 %	정규	2	0.0045
Z_s	전력계 zero set	± 50 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
Z_c	전력계 zero carryover	0	직각	$\sqrt{3}$	0.000
N	전력계와 센서 잡음	± 70 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.000
$u_A(R_{D2})$	전력비 측정의 Type-A 불확도	0.03 %	정규	1	0.0003
$u_c(R_{D1})$	합성 불확도				0.0345

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	44/47

14.4.4 표준 써미스터 마운트 2을 이용한 피교정 써미스터 마운트 교정 결과

가. 교정인자

$$K_{D2} = K_{S2} \times \frac{R_{D2}}{R_{S2}} \times M_2 = 0.9920 \times \frac{6.566}{6.492} \times 0.994$$

$$= 0.9973 \text{ (99.73 \%)}$$

나. 합성 불확도

$$u_c(K_{D2}) = \sqrt{c_1^2 u_c^2(K_{S2}) + c_2^2 u_c^2(R_{D2}) + c_3^2 u_c^2(R_{S2}) + c_4^2 u_c^2(M_2)}$$

$$= 0.0086$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial K_{S2}} = \frac{K_{D2}}{K_{S2}} = 1.0053, \quad c_2 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial R_{D2}} = \frac{K_{D2}}{R_{D2}} = 0.1519,$$

$$c_3 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial R_{S2}} = -\frac{K_{D2}}{R_{S2}} = -0.1536, \quad c_4 = \frac{\partial K_{D2}}{\partial M_2} = \frac{K_{D2}}{M_2} = 1.0033$$

마. 확장 불확도

$$U_{D2} = k u_c(K_{D2}) = 0.0086 \times 2 = 0.0172 \text{ (} k=2 \text{)}$$

라. 유효 자유도

$$\nu_{KD2} = \frac{0.0086^4}{\frac{0.0025^4}{\infty} + \frac{0.0345^4}{5006} + \frac{0.0045^4}{253125} + \frac{0.0063^4}{\infty}} \approx \infty$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	45/47

14.4.5 표준 써미스터 마운트 2를 이용한 열전대 전력 감지기 교정 불확도 총괄표

표기	불확도 요인	불확도	확률 분포	적용인자	감도계수	불확도 기여
K_{S2}	표준 써미스터 마운트의 교정인자	0.005	정규	2	1.0053	0.0025
R_{D2}	피교정 감지기 와 모니터부의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{D2})=0.0003$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MD2})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{D2})=0.0422$	0.0345	정규	1	0.1519	0.0052
R_{S2}	표준 써미스터와 모니터부의 전력비 -반복측정 : $u_A(R_{S2})=0.0003$ -모니터부의 전력측정: $u(R_{MS2})=0.0007$ -측정포트의 전력측정: $u(P_{S2})=0.0031$	0.0045	정규	1	0.1536	0.0007
M_1	부정합 인자비 -측정포트와 표준기: $U_{MS2}=0.002$ -측정포트와 피교정기: $U_{MD2}=0.006$	0.0089	U	$\sqrt{2}$	1.0033	0.0063
$u_c(K_{D1})$	합성 표준 불확도					0.0083
U_{D1}	합성 불확도 ($k=2$)					0.0166

14.5 교정 결과

가. 교정인자

$$\begin{aligned}
 K_D &= \frac{K_{D1} + K_{D2}}{2} = \frac{0.9978 + 0.9973}{2} \\
 &= 0.9976 \text{ (99.76 \%)}
 \end{aligned}$$

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 46/47

나. 불확도

$$U_D = \frac{\sqrt{U_{D1}^2 + U_{D2}^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{0.0166^2 + 0.0172^2}}{\sqrt{2}} = 0.0169 \text{ (1.69 \%)}$$

15. 교정 성적서 작성법

15.1 한국 시험·교정 기관 인증기구(KORLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목은 명확한 근거에 의하여 작성

15.2 교정 성적서 상에 기록하는 교정 환경 자료, 모든 측정 데이터 및 불확도 산출 등 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존

16. 참고 문서

16.1 동축형 써미스터 마운터의 표준교정절차(KASTO 96-14-401-029) : 한국측정기기교정협회, 1996년 12월

16.2 Direct Comparison Transfer of Microwave Power Sensor Calibrations : NIST, Jan., 1996년

16.3 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration : EA-4/02

16.4 Radio Frequency Power Measurements : Proceedings of The IEEE, June, 1967

16.5 Fundamental of RF and Microwave power Measurement : Agilent technologies : Agilent AN 64-1C

RRL	동축형 열전대 전력 감지기 교정지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Thermocouple Power Sensor	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	47/47

16.6 Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements : Agilent
AN 1287-3

16.7 8 Hints for Making Better Network Analyzer Measurements : Agilent
AN 1291-1

부 록 3

반사계수, 정재파비, 부정합 및
터미네이션 교정 지침서

반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient,
Standing Wave Ratio, Mismatch and Termination

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/23

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/23

1. 적용범위

본 교정 지침서는 다음의 범위 내에서 동작하는 동축형 연결기의 반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정에 적용한다.

1.1 주파수 범위 : 10 MHz ~ 3 GHz

1.2 반사계수 크기 : 0.01 ~ 1.0

1.3 반사계수의 위상 : $0^{\circ} \pm 180^{\circ}$

2. 작성기준

본 교정 지침서는 절차의 유효성 확보를 위하여 한국측정기기교정협회에서 발간한 동축형 저항의 표준교정절차(KASTO 98-14-207-198)서를 참조하여 작성한 것이다.

3. 교정주기

교정주기는 국가교정기관 지정제도 운영세칙 별표 1에서 정한 표준교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

4. 용어의 정의 및 명칭

4.1 임피던스(impedance)의 정의

교류 전류의 흐름을 방해하는 정도를 말하며, 교류회로에 가해진 전압(V)을 이 회로에 흐르는 교류 전류(i)로 나눈 값으로 복소량이다.

$$Z = \frac{V}{I} = R + jX \quad [\Omega]$$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/23

- R : 임피던스의 실수 부분으로 교류회로의 저항 값이다.
- X : 임피던스의 허수 부분으로 교류회로의 리액턴스 값이다.

4.2 정합 (matching)

교류회로에서 최대 전력의 전달 조건과 무 반사 조건에 따라 공액 임피던스 정합과 영상 임피던스 정합으로 구분한다. 공액 임피던스 정합은 최대 전력의 전달이 되도록 신호원과 부하의 임피던스가 공액 복소수의 관계가 되도록 한 것이고, 영상 임피던스 정합은 신호원 임피던스와 부하 임피던스를 같게 한 것이다. 저항회로인 경우에는 신호원 저항과 부하 저항을 같게 하면 이 두 정합 조건을 만족시킨다.

4.3 반사계수

교류회로에서 부하가 전송선로의 특성 임피던스와 다른 임피던스이면 이 부하에 입사하는 파의 일부가 반사하게된다. 이 때 입사파와 반사파의 비를 반사계수라하며 복소량이다.

4.4 반사 손실

반사계수의 크기에 상용로그를 취한 값으로 반사계수를 Γ 라고 할 때 이 반사계수와는 다음의 관계가 있다.

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad [\text{dB}]$$

4.5 정재파

부하 임피던스가 선로의 특성 임피던스와 다르면 교류회로는 정합이 이루어지지 않은 부정합 상태가 되고, 이에 따라 부하에 입사하는 파의 일부가 반사되어 신호원 방향으로 되돌아오게 된다. 이 때 선로 상에는 입사파와 반사파가 합쳐져

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/23

서 일정한 크기로 진동하는 파가 형성되게 되는데 이를 정재파라 한다.

이 정재파 진폭의 최대 값과 최소 값의 비를 정재파 비라 하며 반사계수나 반사 손실과 마찬가지로 고주파 회로의 정합 특성을 나타낸다.

4.6 무반사 조건

무반사 조건이란 감쇠기가 삽입되는 기준면에서 신호원 임피던스와 부하 임피던스가 전송선로의 특성 임피던스에 정합(matching)된 상태를 말한다.

5. 교정내용

본 교정 절차서는 벡터 회로망 분석기(VNA)를 활용하여 동축형 연결기에서 임피던스와 관련된 측정량인 반사계수, 정재파비, 임피던스를 측정하는 절차에 대하여 다루고 있다. 본 지침서의 기본 방법은 동축형 저항의 표준교정절차(KASTO 98-14-207-198)서를 참고하였다.

6. 필요장비 명세

HP 8753 회로망 분석기 및 교정 Kit

7. 반사계수 측정의 수학적 모델

7.1 반사계수 크기 측정의 수학적 모델 설정

가. 반사계수 크기 측정의 수학적 모델 설정

$$|\Gamma| = |\Gamma_m| + \delta |\Gamma|$$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/23

- $| \Gamma |$: 반사계수의 크기
- $| \Gamma_m |$: 측정값
- $\delta | \Gamma |$: 측정오차

나. 합성 불확도

$$u_c(\Gamma) = \sqrt{\frac{\partial^2 | \Gamma |}{\partial^2 | \Gamma_m |} u^2(| \Gamma_m |) + \frac{\partial^2 | \Gamma |}{\partial^2 \delta | \Gamma |} u^2(\delta | \Gamma |)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial | \Gamma |}{\partial | \Gamma_m |} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial | \Gamma |}{\partial \delta | \Gamma |} = 1$$

7.2 반사계수 위상 측정의 수학적 모델 설정

가. 위상 측정의 수학적 모델 설정

- $$\Theta = \Theta_m + \delta \Theta$$
- Θ : 감쇠기의 감쇠량
 - Θ_m : 측정값
 - $\delta \Theta$: 측정오차

나. 합성 불확도

$$u_c(\Theta) = \sqrt{\frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 \Theta_m} u^2(\Theta_m) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 \delta \Theta} u^2(\delta \Theta)}$$

다. 감도계수

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/23

$$c_1 = \frac{\partial \Theta}{\partial \Theta_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Theta}{\partial \delta \Theta} = 1$$

8. 반사계수 측정

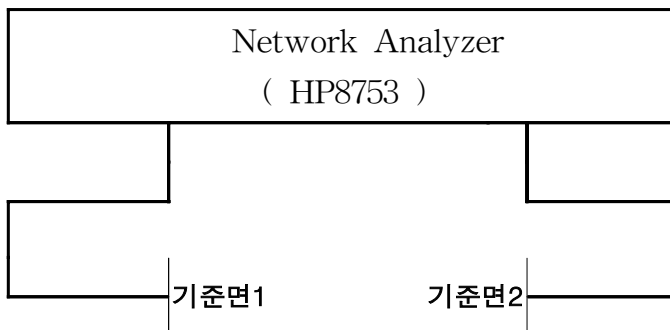
8.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.

8.2 type-N 교정 kit를 사용하여 다음 그림의 기준면 1과 기준면 2 에서 1-포트 교정이나 전 2-포트 교정을 실행한다.

8.3 주파수 대역을 측정하고자 하는 주파수 대역이 되도록 설정한다.

8.4 다음 그림의 기준면 1 또는 기준면 2 사이에 피 측정기를 연결하고 측정 주파수 별로 포트-1에서 측정한 S_{11} 은 반사계수 Γ_1 이고, 포트-2에서 측정한 S_{22} 는 반사계수 Γ_2 이다. 반사계수의 크기와 위상을 측정하여 표 8-1에 기록한다.

8.5 피 측정기를 떼었다가 두 기준면 사이에 다시 연결하고 8.4를 5번 더 반복한다.



RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/23

표 8-1 반사계수 측정 결과

i	Γ	
	$ \Gamma $	θ
1		
2		
3		
4		
5		
6		

9. 반사계수 크기 및 위상에 대한 평가

9.1 표 7-1의 측정 데이터에서 반사계수의 크기 및 위상에 대한 Type-A 표준 불확도를 산출한다.

가. 6회 측정에 대한 크기와 위상 평균을 구한다.

$$|\bar{\Gamma}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |\Gamma(i)|$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta(n)$$

나. 실험 표준편차

$$s(|\Gamma|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|\Gamma(i)| - |\bar{\Gamma}|)^2}$$

$$s(\theta) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta(i) - \bar{\theta})^2}$$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/23

다. 평균의 실험 표준 편차

$$s(|\Gamma|) = \frac{s(|\Gamma|)}{\sqrt{6}}, \quad s(\theta) = \frac{s(\theta)}{\sqrt{6}}$$

라. Type-A 표준 불확도

$$u_A(|\Gamma|) = s(|\Gamma|)$$

$$u_A(\theta) = s(\theta)$$

마. Type-A 표준 불확도의 자유도

$$\nu_r = 6 - 1 = 5, \quad \nu_\theta = 6 - 1 = 5$$

9.2 Type-B 표준 불확도

가. 반사계수의 크기 측정 불확도

- $E_{rm}(\text{linear}) = V_r + S_{r1} \times T_{rd}(\text{maginitude})$
- $E_{rm}(\log) = 20 \log(1 \pm E_{rm}/S_{21})$
- $u_B(|\Gamma|) = E_{rm}/2$

나. 반사계수의 위상 측정 불확도

- $E_{rp} = \sin^{-1}\{(V_r - A_m \times S_{11})/S_{11}\} + T_{rd}(\text{phase}) + 2S_{r1} + A_p$
- $u_B(\theta) = E_{rp}/2$

다. 가 항과 나 항에서

- $V_r = S_r + \sqrt{Y_r^2 + Z_r^2}$
- $S_r = D + S_{r1} + T_r \times S_{11} + (M_s + S_{r1}) \times S_{11}^2 + M_1 \times S_{21} \times S_{12} + A_m \times S_{11}$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/23

- $Y_r = R_{r1} + 2 \times T_{t1} \times S_{11} + R_{r1} \times S_{11}^2$
- $Z_r = R_{r2} \times S_{21} \times S_{12}$

라. 자유도

$$\nu_B = \infty$$

마. Type B 불확도 요인

표 9-1 불확도 요인 총괄

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
D	Directivity	-44	0.0063
M_s	Source Match	-35	0.0178
M_l	Load Match	-42	0.008
T_r	Reflection Tracking	0.06	0.007
T_t	Transmission Tracking	0.05	0.006
C	Crosstalk	-100	0.00001
R_{r1}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T_{t1}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/23

표 9-1 불확도 요인 총괄 (계속)

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
R_{r2}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T_{t2}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
N_l	Low-Level Noise	-100 dBm	
N_h	High-Level Noise	0.004	0.00046
A_m	Mag. Dynamic Accuracy Error	0.05	0.00577
A_p	Phase Dynamic Accuracy Error	0.331, degrees	
S_{t1}	Port 1 Cable Transmission Phase Stability	$0.05 \times f[\text{GHz}]$, degrees	
S_{r1}	Port 1 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
S_{t2}	Port 2 Cable Transmission Phase Stability	$0.05 \times f[\text{GHz}]$, degrees	
S_{r2}	Port 2 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
T_{td}	Transmission Tracking Drift	Magnitude : $0.0015 \times \Delta^\circ\text{C}$, linear Phase : $\{0.1 + 0.15 \times f[\text{GHz}]\} \times \Delta^\circ\text{C}$, degrees	
T_{rd}	Reflection Tracking Drift	Magnitude : $0.0015 \times \Delta^\circ\text{C}$, linear Phase : $\{0.1 + 0.15 \times f[\text{GHz}]\} \times \Delta^\circ\text{C}$, degrees	

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/23

바. S_{11} (S_{22})에 대한 Type B 불확도

◦ Reference power level : -20 dBm($A_m = 0.00577$, $A_p = 0.331$ (deg))

표 9-2 반사계수에 대한 Type B 불확도 ($u_B(|\Gamma|)$, $u_B(\theta)$)

주파수 (GHz)	0.01		0.05		0.1		0.2		0.5		1.0	
	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상	크기	위상
1	0.007	48.3	0.008	10.5	0.01	6.4	0.01	4.4	0.02	3.5	0.05	3.6
2		49.1		11.3		7.2		5.3		4.4		4.5
3		50.0		12.2		8.1		6.1		5.2		5.3

9.3 합성 표준 불확도

$$u_c(|\Gamma|) = \sqrt{u_A^2(|\Gamma|) + u_B^2(|\Gamma|)} , \quad u_c(\theta) = \sqrt{u_A^2(\theta) + u_B^2(\theta)}$$

9.4 유효 자유도

$$\nu_c^{|\Gamma|} = \frac{u_c^4(|\Gamma|)}{\frac{u_A^4(|\Gamma|)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(|\Gamma|)}{\nu_B}} , \quad \nu_c^{\theta} = \frac{u_c^4(\theta)}{\frac{u_A^4(\theta)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(\theta)}{\nu_B}}$$

9.5 확장 불확도

$$U_F = k u_c(|\Gamma|) , \quad U_{\theta} = k u_c(\theta)$$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	12/23

9.6 Γ 의 크기 및 위상에 대한 평균값과 확장 불확도를 표 9-3에 기록한다.

표 9-3 반사계수의 크기 및 위상의 데이터 처리결과

Γ (반사계수)					
크 기			위 상		
$ \bar{\Gamma} $	U_{Γ}	ν_c^{Γ}	$\bar{\theta}$	U_{θ}	ν_c^{θ}

10. 측정 예

10.1 측정 결과 : 1 GHz에서 측정한 반사계수

- $|\Gamma| = 0.22, 0.20, 0.21, 0.21, 0.20, 0.22$
- $\theta = 110.7^{\circ}, 110.5^{\circ}, 110.4^{\circ}, 161.3^{\circ}, 110.2^{\circ}, 110.8^{\circ}$

10.2 Type-A 불확도 평가

◦ 평균

$$\begin{aligned}
 - \quad |\bar{\Gamma}| &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |\Gamma(i)| = 0.21 \\
 - \quad \bar{\theta} &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta(i) = 110.5^{\circ}
 \end{aligned}$$

◦ 실험 표준편차

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	13/23

$$- s(|\Gamma|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|\Gamma(i)| - |\bar{\Gamma}|)^2} = 0.0089$$

$$- s(\theta) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta(i) - \bar{\theta})^2} = 0.23^\circ$$

◦ Type-A 표준 불확도(평균의 실험 표준편차)

$$u_A(|\Gamma|) = \frac{s(|\Gamma|)}{\sqrt{6}} = 0.004$$

$$u_A(\theta) = \frac{s(\theta)}{\sqrt{6}} = 0.093^\circ$$

◦ 자유도

$$\nu_{|\Gamma|} = 5$$

$$\nu_{\theta} = 5$$

10.3 Type-B 불확도 평가 : 표 9-1과 표 9-2로부터

$$\circ u_B(|\Gamma|) = 0.02$$

$$\circ u_B(\theta) = 4.40^\circ$$

10.4 합성 표준 불확도

◦ 반사계수 크기

$$\begin{aligned} u_C(|\Gamma|) &= \sqrt{u_A^2(|\Gamma|) + u_B^2(|\Gamma|)} \\ &= \sqrt{0.004^2 + 0.02^2} \\ &= 0.02 \end{aligned}$$

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/23

◦ 반사계수 위상

$$\begin{aligned}
 u_c(\theta) &= \sqrt{u_A^2(\theta) + u_B^2(\theta)} \\
 &= \sqrt{0.093^2 + 4.40^2} \\
 &= 4.40^\circ
 \end{aligned}$$

10.5 유효 자유도

◦ 반사계수 크기

$$\nu_c^{|I|} = \frac{u_c^4(|I|)}{\frac{u_A^4(|I|)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(|I|)}{\nu_B}} = \frac{0.02^4}{\frac{0.004^4}{5} + \frac{0.02^4}{\infty}} = 3\,125$$

◦ 반사계수 위상

$$\nu_c^\theta = \frac{u_c^4(\theta)}{\frac{u_A^4(\theta)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(\theta)}{\nu_B}} = \frac{4.40^4}{\frac{0.093^4}{5} + \frac{4.40^4}{\infty}} = 25\,052\,375$$

10.6 확장 불확도

$$U_{|I|} = k u_c(|I|) = 2 \times 0.02 = 0.04$$

$$U_\theta = k u_c(\theta) = 2 \times 4.4^\circ = 8.8^\circ$$

10.7 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/23

(1) 반사계수 크기 측정 불확도

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(\Gamma)$	Type A 불확도	0.004	정규	1	0.004
$u_B(\Gamma)$	Type A 불확도	0.04	정규	2	0.02
$u_c(\Gamma)$	합성 표준 불확도 : RSS	—	—	—	0.02
$U_{ \Gamma }$	확장 불확도	K=2	t		0.04

(2) 반사계수의 위상 측정 불확도

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(\theta)$	Type A 불확도	0.093°	정규	1	0.093°
$u_B(\theta)$	Type A 불확도	8.80°	정규	2	4.40°
$u_c(\theta)$	합성 표준 불확도 : RSS	—	—	—	4.40°
U_θ	확장 불확도	K=2	t		8.80°

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/23

11. 정재파 비의 측정

11.1 정재파비 산출 식

- 반사계수와 전압 정재파비(S)와는 다음의 관계가 있다.

$$S = \frac{1 + | \Gamma |}{1 - | \Gamma |}$$

11.2 표준 불확도 산출

- 표준 불확도

$$u_c(S) = \frac{\partial S}{\partial | \Gamma |} u_c(| \Gamma |)$$

- 감도계수

$$\frac{\partial S}{\partial | \Gamma |} = \frac{2 | \Gamma |}{(1 - | \Gamma |)^2}$$

11.3 유효 자유도 산출

$$\nu_c^S = \frac{u_c^4(|S|)}{\frac{u_c^4(|\Gamma|)}{\nu_c^{|\Gamma|}}}$$

11.4 10항의 측정 데이터로 정재파비 계산

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	17/23

◦ 정재파비

$$S = \frac{1 + | \Gamma |}{1 - | \Gamma |} = \frac{1 + 0.21}{1 - 0.21} = 1.53$$

◦ 표준 불확도

$$u_c(S) = \frac{\partial S}{\partial | \Gamma |} u_c(| \Gamma |) = \frac{2 \times 0.21}{(1 - 0.21)^2} \times 0.02 = 0.013$$

◦ 감도계수

$$\frac{\partial S}{\partial | \Gamma |} = \frac{2 | \Gamma |}{(1 - | \Gamma |)^2} = 0.68$$

◦ 유효 자유도

$$\nu_c^S = \frac{\frac{u_c^4(|S|)}{u_c^4(|\Gamma|)}}{\frac{\nu_c^{| \Gamma |}}{3125}} = \frac{.013^4}{.02^4} = 558$$

◦ 확장 불확도

$$U_S = k \times u_c(S) = 2 \times 0.013 = 0.026$$

12. 임피던스 측정

12.1 임피던스 산출 식

- 임피던스와 반사계수 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	18/23

$$\begin{aligned}
Z &= Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \\
&= Z_0 \frac{1-|\Gamma|^2}{1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2} + jZ_0 \frac{2|\Gamma|\sin\Theta}{1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2} \\
&= Z_r + jZ_i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
- Z_r &= Z_0 \frac{1-|\Gamma|^2}{1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2} \\
- Z_i &= Z_0 \frac{2|\Gamma|\sin\Theta}{1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2}
\end{aligned}$$

12.2 표준 불확도 산출

가. 임피던스 실수부의 불확도

◦ 표준 불확도

$$u_c(Z_r) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_r}{\partial |\Gamma|}\right)^2 u_c^2 |\Gamma| + \left(\frac{\partial Z_r}{\partial \Theta}\right)^2 u_c^2 \Theta}$$

◦ 감도계수

$$\frac{\partial Z_r}{\partial |\Gamma|} = 2Z_0 \frac{\cos\Theta(1+2|\Gamma|^2)-2|\Gamma|}{(1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2)^2}$$

$$\frac{\partial Z_r}{\partial \Theta} = 2Z_0 \frac{|\Gamma|\sin\Theta(1-|\Gamma|^2)}{(1-2|\Gamma|\cos\Theta+|\Gamma|^2)^2}$$

나. 임피던스 허수부의 불확도

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/23

◦ 표준 불확도

$$u_c(Z_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_i}{\partial | \Gamma |}\right)^2 u_c^2 | \Gamma | + \left(\frac{\partial Z_i}{\partial \theta}\right)^2 u_c^2 \theta}$$

◦ 감도계수

$$\frac{\partial Z_i}{\partial | \Gamma |} = 2Z_0 \frac{\sin \theta (1 - | \Gamma |^2)}{(1 - 2 | \Gamma | \cos \theta + | \Gamma |^2)^2}$$

$$\frac{\partial Z_i}{\partial \theta} = 2Z_0 \frac{| \Gamma | \cos \theta (1 + | \Gamma |^2) - 2 | \Gamma |^2}{(1 - 2 | \Gamma | \cos \theta + | \Gamma |^2)^2}$$

12.3 유효 자유도 산출

$$\nu_c^{Z_r} = \frac{u_c^4(Z_r)}{\frac{u_c^4(| \Gamma |)}{\nu_c^{| \Gamma |}} + \frac{u_c^4(\theta)}{\nu_c^{\theta}}}$$

$$\nu_c^{Z_i} = \frac{u_c^4(Z_i)}{\frac{u_c^4(| \Gamma |)}{\nu_c^{| \Gamma |}} + \frac{u_c^4(\theta)}{\nu_c^{\theta}}}$$

12.4 확장 불확도

$$U_{Z_r} = k \times u_c(Z_r)$$

$$U_{Z_i} = k \times u_c(Z_i)$$

12.5 10항의 측정 데이터로부터 임피던스 계산

가. 임피던스

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	20/23

$$\begin{aligned} \circ Z &= Z_0 \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} = 50 \frac{1+0.21\angle 110.5^\circ}{1-0.21\angle 110.5^\circ} \\ &= 40.124 + j16.513 \end{aligned}$$

$$\circ Z_r = 40.124$$

$$\circ Z_i = 16.513$$

나. 임피던스 실수부의 표준 불확도

◦ 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(Z_r) &= \sqrt{\left(\frac{\partial Z_r}{\partial |\Gamma|}\right)^2 u_c^2(|\Gamma|) + \left(\frac{\partial Z_r}{\partial \Theta}\right)^2 u_c^2(\Theta)} \\ &= \sqrt{55.368^2 \times 0.02^2 + 13.251^2 \times \left(\frac{4.4}{180}\right)^2} \\ &= 1.154 \, \Omega \end{aligned}$$

◦ 감도계수

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z_r}{\partial |\Gamma|} &= 2Z_0 \frac{\cos \Theta (1 + 2|\Gamma|^2) - 2|\Gamma|}{(1 - 2|\Gamma| \cos \Theta + |\Gamma|^2)^2} = -55.368 \\ \frac{\partial Z_r}{\partial \Theta} &= 2Z_0 \frac{|\Gamma| \sin \Theta (1 - |\Gamma|^2)}{(1 - 2|\Gamma| \cos \Theta + |\Gamma|^2)^2} = 13.251 \end{aligned}$$

◦ 유효 자유도

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	21/23

$$\nu_c^{Z_r} = \frac{u_c^4(Z_r)}{\frac{u_c^4(|\Gamma|)}{\nu_c^{|\Gamma|}} + \frac{u_c^4(\theta)}{\nu_c^\theta}} = \frac{1.154^4}{\frac{0.02^4}{3125} + \frac{4.4^4}{25052375}}$$

$$\approx \infty$$

◦ 확장 불확도

$$U_{Z_r} = k \times u_c(Z_r) \times 2 \times 1.154 = 2.308 \, \Omega$$

다. 임피던스 허수부의 표준 불확도

◦ 표준 불확도

$$u_c(Z_i) = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_i}{\partial |\Gamma|}\right)^2 u_c^2(|\Gamma|) + \left(\frac{\partial Z_i}{\partial \theta}\right)^2 u_c^2(\theta)}$$

$$= \sqrt{63.1^2 \times 0.02^2 + 11.63^2 \times \left(\frac{4.4}{180}\right)^2}$$

$$= 1.294 \, \Omega$$

◦ 감도계수

$$\frac{\partial Z_i}{\partial |\Gamma|} = 2Z_0 \frac{\sin \theta (1 - |\Gamma|^2)}{(1 - 2|\Gamma| \cos \theta + |\Gamma|^2)^2} = 63.1$$

$$\frac{\partial Z_i}{\partial \theta} = 2Z_0 \frac{|\Gamma| \cos \theta (1 + |\Gamma|^2) - 2|\Gamma|^2}{(1 - 2|\Gamma| \cos \theta + |\Gamma|^2)^2} = 11.63$$

◦ 유효 자유도

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/23

$$\nu_c^{Z_i} = \frac{u_c^4(Z_i)}{\frac{u_c^4(|\Gamma|)}{\nu_c^{|\Gamma|}} + \frac{u_c^4(\theta)}{\nu_c^\theta}} = \frac{1.294^4}{\frac{0.02^4}{3125} + \frac{4.4^4}{25052375}}$$

$$\approx \infty$$

◦ 확장 불확도

$$U_{Z_i} = k \times u_c(Z_i) \times 2 \times 1.294 = 2.588 \Omega$$

13. 교정 성적서 작성법

13.1 임피던스와 관련된 측정량인 반사계수, 정재파비, 임피던스 값등을 수요자의 요구에 따라 선택하여 제공한다.

13.2 한국 시험·교정 기관 인증기구(KORLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목은 명확한 근거에 의하여 작성한다.

13.3 교정 성적서 상에 기록하는 교정 환경 자료, 모든 측정 데이터 및 불확도 산출 등 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존한다.

14. 참고 문서

14.1 동축형 저항의 표준교정절차(KASTO 98-14-207-198), 1998년 12월 23일

14.2 Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation : IEE PROC., VOL. 128, pT.H, Feb., 1981

14.3 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration : EA-4/02

RRL	반사계수, 정재파비, 부정합 및 터미네이션의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Reflection Coefficient, Mismatch, Standing Wave Ratio and Termination	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/23

14.4 Applying Error Correction to Network Analyzer Measureemnts : Agilent AN 1287-3

부 록 4

동축형 고정 감쇠기 교정 지침서

동축형 고정 감쇠기 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Coaxial Fixed Attenuator

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/16

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/16

1. 적용범위

본 교정 지침서는 다음의 범위 내에서 동작하는 동축형 고정 감쇠기의 교정에 적용한다.

1.1 주파수 범위 : 10 MHz ~ 3 GHz

1.2 감쇠량 범위 : (0 ~ 50) dB

2. 작성기준

본 교정 지침서는 절차의 유효성 확보를 위하여 한국측정기기교정협회에서 발간한 동축형 고정 감쇠기의 표준교정절차(KASTO 088-14-102-041)서를 기준으로 작성한 것이다.

3. 교정주기

교정주기는 국가교정기관 지정제도 운영세칙 별표 1에서 정한 표준교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

4. 용어의 정의 및 명칭

4.1 감쇠량 (attenuation)의 정의

감쇠량은 무반사 신호원과 무반사 부하를 직접 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력 P 와 피측정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력 P' 의 비를 데시벨(dB) 단위로 나타낸 것이다.

$$A = 10 \log \frac{P}{P'} \text{ dB}$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/16

4.2 대체 손실의 정의 (substitution Loss)의 정의

대체손실은 무반사 신호원과 무반사 부하를 특정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력과 피측정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력의 비를 데시벨 단위로 나타낸 것이다.

4.3 무반사 조건

무반사 조건이란 감쇠기가 삽입되는 기준면에서 신호원 임피던스와 부하 임피던스가 전송선로의 특성 임피던스에 정합(matching)된 상태를 말한다.

5. 교정내용

본 교정 절차서는 감쇠량을 교정하기 위하여 벡터 회로망 분석기(VNA)를 활용하여 동축형 고정 감쇠기의 감쇠량을 측정하는 절차에 대하여 다루고 있다. 감쇠량 측정의 기본 방법은 표준교정절차(KASTO 088 -14-102-041)서를 참고한다.

6. 필요장비 명세

HP 8753C 회로망분석기 및 교정 Kit

7. 감쇠량 측정의 수학적 모델

7.1 감쇠기의 감쇠량 측정 수학적 모델 설정

가. 감쇠량 측정의 수학적 모델 설정

$$ATT = ATT_m + \delta ATT$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/16

- ATT : 감쇠기의 감쇠량
- ATT_m : 측정값
- δATT : 측정오차

나. 합성 불확도

$$u_c(ATT) = \sqrt{\frac{\partial^2 ATT}{\partial^2 ATT_m} u^2(ATT_m) + \frac{\partial^2 ATT}{\partial^2 \delta ATT} u^2(\delta ATT)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial ATT}{\partial ATT_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial ATT}{\partial \delta ATT} = 1$$

7.2 감쇠기 위상 측정의 수학적 모델 설정

가. 위상 측정의 수학적 모델 설정

$$\Theta = \Theta_m + \delta \Theta$$

- Θ : 감쇠기의 감쇠량
- Θ_m : 측정값
- $\delta \Theta$: 측정오차

나. 합성 불확도

$$u_c(\text{Phase}) = \sqrt{\frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 \Theta_m} u^2(\Theta_m) + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial^2 \delta \Theta} u^2(\delta \Theta)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Theta}{\partial \Theta_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Theta}{\partial \delta \Theta} = 1$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/16

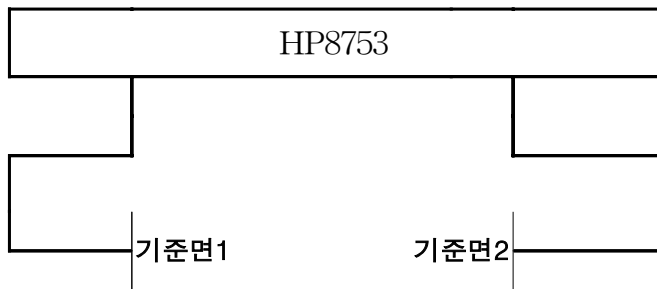
8. 감쇠기의 산란계수 측정

8.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.

8.2 type-N 교정 kit를 사용하여 다음 그림의 기준면 1과 기준면 2 사이에서 2-포트 교정을 실행한다.

8.3 주파수 대역을 측정하고자 하는 주파수 대역이 되도록 설정한다.

8.4 다음 그림의 기준면 1과 기준면 2 사이에 피측정 감쇠기를 연결하고 측정 주파수 별로 S_{11} , S_{22} 와 S_{21} , S_{12} 의 크기 및 위상을 측정하여 표 1에 기록한다.



8.5 피측정 감쇠기를 떼었다가 두 기준면 사이에 다시 연결하고 8.4를 5번 더 반복한다.

9. 표 1에 있는 S_{11} 과 S_{22} 의 크기 및 위상에 대한 평균을 구하여 표2에 기록한다.
(jj는 11 또는 22 이다.)

$$|\overline{S_{jj}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{jj}(i)|$$

$$\overline{\theta_{S_{jj}}} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta_{S_{jj}}(n)$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/16

10. S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상에 대한 데이터 처리

10.1 표 1의 측정 데이터에서 S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상에 대한 Type-A 표준 불확도를 산출한다.

가. 6회 측정에 대한 크기와 위상 평균을 구한다. (jk는 12 또는 21 이다.)

$$|\overline{S_{jk}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{jk}(i)|$$

$$\overline{\theta_{Sjk}} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta_{jk}(n)$$

나. 실험 표준편차

$$s(|S_{jk}|_i) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{jk}(i)| - |\overline{S_{jk}}|)^2}$$

$$s(\theta_{Sjk_i}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{jk}(i) - \overline{\theta_{jk}})^2}$$

다. 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{|S_{jk}|}) = \frac{s(|S_{jk}|_i)}{\sqrt{6}}, \quad s(\overline{\theta_{Sjk}}) = \frac{s(\theta_{Sjk_i})}{\sqrt{6}}$$

라. Type-A 표준 불확도

$$u_A(|S_{jk}|) = s(\overline{|S_{jk}|})$$

$$u_A(\theta_{Sjk}) = s(\overline{\theta_{Sjk}})$$

마. Type-A 표준 불확도의 자유도

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/16

$$\nu_A = 6 - 1 = 5$$

10.2 Type-B 표준 불확도

가. $S_{21}(S_{12})$ 의 크기 측정 불확도

- $E_{tm}(\text{linear}) = V_t + S_{21} \times T_{td}(\text{maginitude})$
- $E_{tm}(\log) = 20 \log(1 \pm E_{tm}/S_{21})$
- $u_B(|S_{jk}|) = E_{tm}/2$

나. $S_{21}(S_{12})$ 의 위상 측정 불확도

- $E_{tp} = \sin^{-1}\{(V_t - A_m \times S_{21})/S_{21}\} + T_{td}(\text{phase}) + S_{t1} + S_{t2} + A_p$
- $u_B(\theta_{Sjk}) = E_{tp}/2$

다. 가 항과 나 항에서

- $V_t = S_t + \sqrt{Y_t^2 + Z_t^2}$
- $S_t = C + T_t \times S_{21} + (M_s + S_{r1}) \times S_{11} \times S_{21} + (M_1 + S_{r2}) \times S_{21} \times S_{22} + A_m \times S_{21}$
- $Y_t = T_{t1} \times S_{21} + R_{r1} \times S_{11} \times S_{21}$
- $Z_t = T_{t2} \times S_{21} + R_{r2} \times S_{22} \times S_{21}$

라. 자유도

$$\nu_B = \infty$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/16

마. Type B 불확도 요인

표 9-1 불확도 요인 총괄

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
D	Directivity	-44	0.0063
M _s	Source Match	-35	0.0178
M _l	Load Match	-42	0.008
T _r	Reflection Tracking	0.06	0.007
T _t	Transmission Tracking	0.05	0.006
C	Crosstalk	-100	0.00001
R _{r1}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t1}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
R _{r2}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t2}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
N _l	Low-Level Noise	-100 dBm	
N _h	High-Level Noise	0.004	0.00046
A _m	Mag. Dynamic Accuracy Error	0.05	0.00577
A _p	Phase Dynamic Accuracy Error	0.331, degrees	
S _{t1}	Port 1 Cable Transmission Phase Stability	0.05 × f[GHz], degrees	
S _{r1}	Port 1 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
S _{t2}	Port 2 Cable Transmission Phase Stability	0.05 × f[GHz], degrees	
S _{r2}	Port 2 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
T _{td}	Transmission Tracking Drift	Magnitude : 0.0015 × Δ℃, linear Phase : {0.1 + 0.15 × f[GHz]} × Δ℃, degrees	
T _{rd}	Reflection Tracking Drift	Magnitude : 0.0015 × Δ℃, linear Phase : {0.1 + 0.15 × f[GHz]} × Δ℃, degrees	

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/16

바. S_{12} (S_{21})에 대한 Type B 불확도

- Reference power level : 0 dBm
($A_m = 0.035$, $A_p = 5$ (deg))
- $S_{11} = S_{22} = 0.1$

표 9-2 S_{12} (S_{21})에 대한 Type B 불확도

주파수 (GHz)	10 dB		20 dB		30 dB		40 dB		50 dB	
	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)
1	0.434	6.85	0.433	6.673	0.435	6.857	0.440	6.894	0.459	7.030
2		7.70		7.523		7.707		7.744		7.880
3		8.55		8.373		8.557		8.594		8.730

10.3 합성 표준 불확도

$$u_C(|S_{jk}|) = \sqrt{u_A^2(|S_{jk}|) + u_B^2(|S_{jk}|)} , \quad u_C(\theta_{Sjk}) = \sqrt{u_A^2(\theta_{Sjk}) + u_B^2(\theta_{Sjk})}$$

10.4 유효 자유도

$$\nu_c^{mag} = \frac{u_c^4(|S_{jk}|)}{\frac{u_A^4(|S_{jk}|)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(|S_{jk}|)}{\nu_B}} , \quad \nu_c^{pha} = \frac{u_c^4(\theta_{Sjk})}{\frac{u_A^4(\theta_{Sjk})}{\nu_A} + \frac{u_B^4(\theta_{Sjk})}{\nu_B}}$$

10.5 확장 불확도

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/16

$$U_{S_{jk}} = ku_c(|S_{jk}|) \quad , \quad U_{\theta_{jk}} = ku_c(\theta_{S_{jk}})$$

10.6 S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상에 대한 평균값과 확장 불확도를 표 3에 기록 한다.

표 1 감쇠기의 산란계수 측정 결과

i	S_{11}		S_{22}		S_{21}		S_{12}	
	$ S_{11} $	$\theta_{S_{11}}$	$ S_{22} $	$\theta_{S_{22}}$	$ S_{21} $	$\theta_{S_{21}}$	$ S_{12} $	$\theta_{S_{12}}$
1								
2								
3								
4								
5								
6								

$|S_{11}|$: S_{11} 의 크기, $\theta_{S_{11}} = \angle S_{11}$: S_{11} 의 위상, $|S_{22}|$: S_{22} 의 크기
 $\theta_{S_{22}} = \angle S_{22}$: S_{22} 의 위상, $|S_{21}|$: S_{21} 의 크기, $\theta_{S_{21}} = \angle S_{21}$: S_{21} 의 위상
 $|S_{12}|$: S_{12} 의 크기, $\theta_{S_{12}} = \angle S_{12}$: S_{12} 의 위상

표 2 S_{11} 과 S_{22} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{11}		S_{22}	
크 기 평 균	위 상 평 균	크 기 평 균	위 상 평 균
$ \overline{S_{11}} $	$ \overline{\theta_{S_{11}}} $	$ \overline{S_{22}} $	$ \overline{\theta_{S_{22}}} $

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/16

표 3 S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{21}				S_{12}			
크 기		위 상		크 기		위 상	
$ \overline{S_{21}} $	U_{S21}	$ \overline{\theta_{S21}} $	$U_{\theta21}$	$ \overline{S_{12}} $	U_{S12}	$ \overline{\theta_{S12}} $	$U_{\theta12}$

11. 측정 예

11.1 측정 조건

- 감쇠기 : 10 dB, $|S_{11}| = |S_{22}| = 0.1$
- 측정 주파수 : 3 GHz

11.2 측정 결과 :

- $|S_{21}|$ [dB] = 10.05, 10.08, 10.07, 10.06, 10.05, 10.06
- θ_{S21} = 160.7°, 160.5°, 160.4°, 160.3°, 160.2°, 160.8°
- $|S_{12}|$ [dB] = 10.04, 10.07, 10.08, 10.05, 10.08, 10.05
- θ_{S12} = 160.9°, 160.5°, 160.6°, 160.3°, 160.4°, 160.6°,

11.3 Type-A 불확도 평가

- 평균

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 12/16

$$- \quad |\overline{S_{21}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{21}(i)| = 10.06 \text{ dB}$$

$$- \quad |\overline{S_{12}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{12}(i)| = 10.06 \text{ dB}$$

$$- \quad \overline{\theta_{S21}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta_{S21}(i) = 160.5^\circ$$

$$- \quad \overline{\theta_{S12}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta_{S12}(i) = 160.5^\circ$$

◦ 감쇠량

$$- \quad \text{ATT} = \frac{|\overline{S_{21}}| + |\overline{S_{12}}|}{2} = \frac{10.06 + 10.06}{2} = 10.06 \text{ dB}$$

◦ 위상

$$- \quad \text{Phase} = \frac{|\overline{\theta_{S21}}| + |\overline{\theta_{S12}}|}{2} = \frac{160.5 + 160.5}{2} = 160.5^\circ$$

◦ 실험 표준편차

$$- \quad s(|S_{21}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{21}(i)| - |\overline{S_{21}}|)^2} = 0.01 \text{ dB}$$

$$- \quad s(|S_{12}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{12}(i)| - |\overline{S_{12}}|)^2} = 0.02 \text{ dB}$$

$$- \quad s(\theta_{S21}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{S21}(i) - \overline{\theta_{S21}})^2} = 0.23^\circ$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	13/16

$$- s(\theta_{S12}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{S12}(i) - \overline{\theta_{S12}})^2} = 0.28^\circ$$

◦ Type-A 표준 불확도(평균의 실험 표준편차)

$$u_A(ATT) = \frac{s(|S_{21}|) + s(|S_{12}|)}{2\sqrt{6}} = 0.012 \text{ dB}$$

$$u_A(\text{Phase}) = \frac{s(\theta_{S21}) + s(\theta_{S12})}{2\sqrt{6}} = 0.10^\circ$$

◦ 자유도

$$\nu_{ATT} = 5$$

$$\nu_{Phase} = 5$$

11.4 Type-B 불확도 평가

◦ 표 9-2로부터 Type B 불확도 요인 E_{tm} 과 E_{tp} 는 다음과 같다.

$$- E_{tm} = \pm 0.434 \text{ dB}, E_{tp} = 8.56^\circ$$

$$◦ u_B(ATT) = u_B(|S_{21}|) = u_B(|S_{12}|) = \frac{E_{tm}}{2} [\text{dB}] = 0.217 \text{ dB}$$

$$◦ u_B(\text{Phase}) = u_B(\theta_{S21}) = u_B(\theta_{S12}) = \frac{E_{tp}}{2} [\text{dB}] = 4.28^\circ$$

11.5 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 ◦ u_C(ATT) &= \sqrt{u_A^2(ATT) + u_B^2(ATT)} \\
 &= \sqrt{0.012^2 + 0.217^2} \\
 &= 0.217 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 14/16

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad u_c(\text{Phase}) &= \sqrt{u_A^2(\text{Phase}) + u_B^2(\text{Phase})} \\
 &= \sqrt{0.10^2 + 4.28^2} \\
 &= 4.28^\circ
 \end{aligned}$$

11.6 유효 자유도

$$\bullet \quad \nu_c^{ATT} = \frac{u_c^4(ATT)}{\frac{u_A^4(ATT)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(ATT)}{\nu_B}} = \frac{0.217^4}{\frac{0.012^4}{5} + \frac{0.217^4}{\infty}} = 534\,668$$

$$\bullet \quad \nu_c^{Phase} = \frac{u_c^4(\text{Phase})}{\frac{u_A^4(\text{Phase})}{\nu_A} + \frac{u_B^4(\text{Phase})}{\nu_B}} = \frac{4.18^4}{\frac{0.10^4}{5} + \frac{4.18^4}{\infty}} = 526\,423$$

11.7 확장 불확도

$$U_{ATT} = k u_c(ATT) = 2 \times 0.217 \text{ dB} = 0.434 \text{ dB}$$

$$U_{\text{Phase}} = k u_c(\text{Phase}) = 2 \times 4.28^\circ = 8.56^\circ$$

11.8 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

(1) 10 dB 감쇠기의 감쇠량 측정 불확도

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/16

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(ATT)$	Type A 불확도	0.012 dB	정규	1	0.012 dB
$u_B(ATT)$	Type A 불확도	0.434 dB	정규	2	0.217 dB
$u_c(ATT)$	합성 표준 불확도 : RSS	-	-	-	0.217 dB
U_{ATT}	확장 불확도	K=2	t		0.434 dB

(2) 10 dB 감쇠기의 위상측정 불확도

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(\text{Phase})$	Type A 불확도	0.10°	정규	1	0.10°
$u_B(\text{Phase})$	Type A 불확도	8.56°	정규	2	4.28°
$u_c(\text{Phase})$	합성 표준 불확도 : RSS	-	-	-	4.28°
U_{Phase}	확장 불확도	K=2	t		8.56°

12. 교정 성적서 작성법

12.1 한국 시험 한국 시험 · 교정 기관 인증기구(KORLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11 개 항목은 명확한 근거에 의하여 작성

12.2 교정 성적서 상에 기록하는 교정 환경 자료, 모든 측정 데이터 및 불확도 산출 등 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존

RRL	동축형 고정 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Fixed Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/16

13. 참고 문서

13.1 동축형 고정 감쇠기 표준교정절차(KASTO 88-14-102-041) : 한국측정
기기교정협회, 1996년 12월

13.2 Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave
power and attenuation : IEE PROC., VOL. 128, pT.H, Feb., 1981

13.3 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration : EA-4/02

13.4 Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements : Agilent
AN 1287-3

부 록 5

동축형 가변 감쇠기 교정 지침서

동축형 가변 감쇠기 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/23

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	2/23

1. 적용범위

본 교정 지침서는 다음의 범위 내에서 동작하는 동축형 고정 감쇠기의 교정에 적용한다.

1.1 주파수 범위 : 10 MHz ~ 3 GHz

1.2 감쇠량 범위 : (0 ~ 50) dB

2. 작성기준

본 교정 지침서는 절차의 유효성 확보를 위하여 한국측정기기교정협회에서 발간한 동축형 고정 감쇠기의 표준교정절차(KASTO 088-14-102-041)서를 기준으로 작성한 것이다.

3. 교정주기

교정주기는 국가교정기관 지정제도 운영세칙 별표 1에서 정한 표준교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

4. 용어의 정의 및 명칭

4.1 감쇠량 (attenuation)의 정의

감쇠량은 무반사 신호원과 무반사 부하를 직접 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력 P 와 피측정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력 P' 의 비를 데시벨(dB) 단위로 나타낸 것이다.

$$A = 10 \log \frac{P}{P'} \text{ dB}$$

4.2 대체 손실의 정의 (substitution Loss)의 정의

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/23

대체손실은 무반사 신호원과 무반사 부하를 특정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력과 피측정 2-포트 기기를 통하여 연결하였을 때 부하에 전달되는 전력의 비를 데시벨 단위로 나타낸 것이다.

4.3 무반사 조건

무반사 조건이란 감쇠기가 삽입되는 기준면에서 신호원 임피던스와 부하 임피던스가 전송선로의 특성 임피던스에 정합(matching)된 상태를 말한다.

5. 교정내용

본 교정 절차서는 감쇠량을 교정하기 위하여 벡터 회로망 분석기(VNA)를 활용하여 동축형 고정 감쇠기의 감쇠량을 측정하는 절차에 대하여 다루고 있다. 감쇠량 측정의 기본 방법은 표준교정절차(KASTO 088 -14-102-041)서를 참고한다.

6. 필요장비 명세

HP 8753 회로망분석기 및 교정 Kit

7. 증분 감쇠량 측정의 수학적 모델

7.1 감쇠기의 증분 감쇠량 측정 수학적 모델 설정

가. 증분 감쇠량 측정의 수학적 모델 설정

$$\Delta A = (A_f + \delta A_f) - (A_i + \delta A_i)$$

- ΔA : 감쇠기의 증분 감쇠량
- A_f : 최종 감쇠량 설정후 측정값
- δA_f : 최종 감쇠량 측정오차

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/23

- A_i : 초기 감쇠량 설정후 측정값
- δA_i : 초기 감쇠량 측정오차

나. 합성 불확도

$$u_c(\Delta A) = \sqrt{\frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 A_f} u^2(A_f) + \frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 \delta A_f} u^2(\delta A_f) + \frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 A_i} u^2(A_i) + \frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 \delta A_i} u^2(\delta A_i)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Delta A}{\partial A_f} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta A}{\partial \delta A_f} = 1$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta A}{\partial A_i} = -1, \quad c_4 = \frac{\partial \Delta A}{\partial \delta A_i} = -1$$

7.2 증분 감쇠량 측정시 위상 변화량 측정 수학적 모델 설정

가. 위상 변화량 측정의 수학적 모델 설정

$$\Delta \theta = (\theta_f + \delta \theta_f) - (\theta_i + \delta \theta_i)$$

- $\Delta \theta$: 감쇠기의 위상 변화량
- θ_f : 최종 감쇠량 설정시 위상 측정값
- $\delta \theta_f$: 최종 감쇠량 설정시 위상 측정오차
- θ_i : 초기 감쇠량 설정시 위상 측정값
- $\delta \theta_i$: 초기 감쇠량 설정시 위상 측정오차

나. 합성 불확도

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/23

$$u_c(\Delta\Theta) = \sqrt{\frac{\partial^2 \Delta\Theta}{\partial^2 \Theta_f} u^2(\Theta_f) + \frac{\partial^2 \Delta\Theta}{\partial^2 \delta\Theta_f} u^2(\delta\Theta_f) + \frac{\partial^2 \Delta\Theta}{\partial^2 \Theta_i} u^2(\Theta_i) + \frac{\partial^2 \Delta\Theta}{\partial^2 \delta\Theta_i} u^2(\delta\Theta_i)}$$

다. 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial \Theta_f} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial \delta\Theta_f} = 1$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial \Theta_i} = -1, \quad c_4 = \frac{\partial \Delta\Theta}{\partial \delta\Theta_i} = -1$$

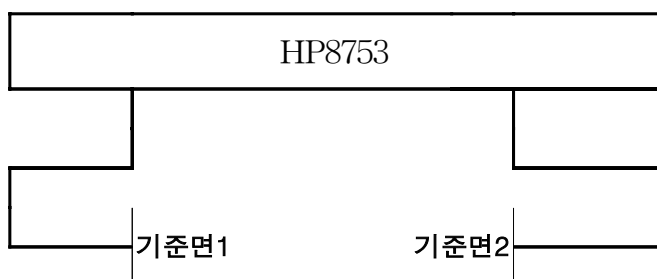
8. 감쇠기의 초기 감쇠량 측정

8.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.

8.2 type-N 교정 kit를 사용하여 다음 그림의 기준면 1과 기준면 2 사이에서 2-포트 교정을 실행한다.

8.3 주파수 대역을 측정하고자 하는 주파수 대역이 되도록 설정한다.

8.4 다음 그림의 기준면 1과 기준면 2 사이에 피측정 감쇠기를 연결하고 가변 감쇠기의 초기 감쇠량 값을 설정하고, 측정 주파수 별로 S_{11_i} , S_{22_i} , S_{21_i} , S_{12_i} 의 크기와 위상을 측정하여 표 8-1에 기록한다.



RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/23

8.5 초기 설정 값과 다른 감쇠량으로 이동하였다가 8.4항의 초기설정 값과 같이 감쇠량 값을 설정하고 S_{11_i} , S_{22_i} , S_{21_i} , S_{12_i} 의 크기와 위상을 측정하여 표 8-1에 기록한다.

8.6 8.5항을 4번 더 반복한다.

8.7 가변 감쇠기의 최종 감쇠량 값을 설정하고, 측정 주파 수 별로 S_{11_f} , S_{22_f} , S_{21_f} 및 S_{12_f} 의 크기 와 위상을 측정하여 표 8-2에 기록한다.

8.7 8.5항의 최종 감쇠량 설정 값과 다른 감쇠량으로 이동하였다가 다시 8.5항의 최종 값과 같이 감쇠량 값을 설정하고 S_{11_f} , S_{22_f} , S_{21_f} 및 S_{12_f} 의 크기 와 위상을 측정하여 표 8-2에 기록한다.

8.8 8.5항을 4번 더 반복한다.

표 8-1 초기 감쇠량 측정 결과

i	S_{11_i}		S_{22_i}		S_{21_i}		S_{12_i}	
	$ S_{11_i} $	θ_{11_i}	$ S_{22_i} $	θ_{22_i}	$ S_{21_i} $	θ_{21_i}	$ S_{12_i} $	θ_{12_i}
1								
2								
3								
4								
5								
6								

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/23

표 8-2 최종 감쇠량 측정 결과

i	S_{11_f}		S_{22_f}		S_{21_f}		S_{12_f}	
	$ S_{11_f} $	θ_{11_f}	$ S_{22_f} $	θ_{22_f}	$ S_{21_f} $	θ_{21_f}	$ S_{12_f} $	θ_{12_f}
1								
2								
3								
4								
5								
6								

9. 표 8-1에 있는 S_{11_i} 와 S_{22_i} 의 크기 및 위상에 대한 평균을 구하여 표 9-1에 기록한다. (jj는 11 또는 22 이다.)

$$|\overline{S_{jj}}|_i = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{jj}(i)|_i$$

$$\overline{\theta_{jj_i}} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta_{jj_i}(n)$$

표 9-1 S_{11_i} 과 S_{22_i} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{11_i}		S_{22_i}	
$ \overline{S_{11_i}} $	$ \overline{\theta_{11_i}} $	$ \overline{S_{22_i}} $	$ \overline{\theta_{22_i}} $

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/23

10. 표 8-2에 있는 S_{11_f} 와 S_{22_f} 의 크기 및 위상에 대한 평균을 구하여 표 10-1에 기록한다.
(jj 는 11 또는 22 이다.)

$$|\overline{S_{jj}}|_f = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{jj}(i)|_f$$

$$\overline{\theta_{jj_f}} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta_{jj_f}(n)$$

표 10-1 S_{11_f} 과 S_{22_f} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{11_f}		S_{22_f}	
$ \overline{S_{11_f}} $	$ \overline{\theta_{11_f}} $	$ \overline{S_{22_f}} $	$ \overline{\theta_{22_f}} $

11. S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상에 대한 데이터 처리

11.1 표 8-1과 표 8-2의 측정 데이터에서 S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상에 대한
Type-A 표준 불확도를 산출한다.

가. 6회 측정에 대한 크기 및 위상 평균과 Type A 불확도를 구하여 그림 11-1과
표 11-2에 기록한다. (jk 는 12 또는 21 이다.)

$$|\overline{S_{jk}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{jk}(i)|$$

$$\overline{\theta_{jk}} = \frac{1}{6} \sum_{n=1}^6 \theta_{jk}(n)$$

나. 실험 표준편차

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/23

$$s(|S_{jk}|_i) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{jk}(i)| - |\overline{S_{jk}}|)^2}$$

$$s(\theta_{jk_i}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{jk}(i) - \overline{\theta_{jk}})^2}$$

다. 평균의 실험 표준 편차

$$s(\overline{|S_{jk}|}) = \frac{s(|S_{jk}|_i)}{\sqrt{6}}, \quad s(\overline{\theta_{jk}}) = \frac{s(\theta_{jk_i})}{\sqrt{6}}$$

라. Type-A 표준 불확도

$$u_A(|S_{jk}|) = s(\overline{|S_{jk}|})$$

$$u_A(\theta_{jk}) = s(\overline{\theta_{jk}})$$

마. Type-A 표준 불확도의 자유도

$$\nu_{S_{jk}} = 6 - 1 = 5$$

$$\nu_{\theta_{jk}} = 6 - 1 = 5$$

표 11-1 S_{21_i} 과 S_{12_i} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{21_i}				S_{12_i}			
크 기		위 상		크 기		위 상	
$ \overline{S_{21_i}} $	$u_A(S_{21_i})$	$ \overline{\theta_{S21_i}} $	$u_A(\theta_{21_i})$	$ \overline{S_{12_i}} $	$u_A(S_{12_i})$	$ \overline{\theta_{12_i}} $	$u_A(\theta_{12_i})$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/23

표 11-2 S_{21} 과 S_{12} 의 크기 및 위상 데이터 처리결과

S_{21_i}				S_{12_i}			
크 기		위 상		크 기		위 상	
$ \overline{S_{21_f}} $	$u_A(S_{21_f})$	$ \overline{\theta_{21_f}} $	$u_A(\theta_{21_f})$	$ \overline{S_{12_f}} $	$u_A(S_{12_f})$	$ \overline{\theta_{12_f}} $	$u_A(\theta_{12_f})$

11.2 Type-B 표준 불확도

가. S_{21} (S_{12})의 크기 측정 불확도

- $E_{tm}(\text{linear}) = V_t + S_{21} \times T_{td}(\text{maginitude})$
- $E_{tm}(\log) = 20 \log(1 \pm E_{tm}/S_{21})$
- $u_B(|S_{jk}|) = E_{tm}/2$

나. S_{21} (S_{12})의 위상 측정 불확도

- $E_{tp} = \sin^{-1}\{(V_t - A_m \times S_{21})/S_{21}\} + T_{td}(\text{phase}) + S_{t1} + S_{t2} + A_p$
- $u_B(\theta_{sjk}) = E_{tpp}/2$

다. 가 항과 나 항에서

- $V_t = S_t + \sqrt{Y_t^2 + Z_t^2}$
- $S_t = C + T_t \times S_{21} + (M_s + S_{r1}) \times S_{11} \times S_{21} + (M_1 + S_{r2}) \times S_{21} \times S_{22} + A_m \times S_{21}$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/23

$$\circ Y_t = T_{t1} \times S_{21} + R_{r1} \times S_{11} \times S_{21}$$

$$\circ Z_t = T_{t2} \times S_{21} + R_{r2} \times S_{22} \times S_{21}$$

라. 자유도

$$\nu_B = \infty$$

마. Type B 불확도 요인

표 11-3 불확도 요인 총괄

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
D	Directivity	-44	0.0063
M _s	Source Match	-35	0.0178
M _l	Load Match	-42	0.008
T _r	Reflection Tracking	0.06	0.007
T _t	Transmission Tracking	0.05	0.006
C	Crosstalk	-100	0.00001
R _{r1}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t1}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
R _{r2}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t2}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
N _l	Low-Level Noise	-100 dBm	
N _h	High-Level Noise	0.004	0.00046

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	12/23

표 11-3 불확도 요인 총괄 (계속)

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
A_m	Mag. Dynamic Accuracy Error	0.05	0.00577
A_p	Phase Dynamic Accuracy Error	0.331, degrees	
S_{t1}	Port 1 Cable Transmission Phase Stability	$0.05 \times f[\text{GHz}]$, degrees	
S_{r1}	Port 1 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
S_{t2}	Port 2 Cable Transmission Phase Stability	$0.05 \times f[\text{GHz}]$, degrees	
S_{r2}	Port 2 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
T_{td}	Transmission Tracking Drift	Magnitude : $0.0015 \times \Delta^\circ\text{C}$, linear Phase : $\{0.1 + 0.15 \times f[\text{GHz}]\} \times \Delta^\circ\text{C}$, degrees	
T_{rd}	Reflection Tracking Drift	Magnitude : $0.0015 \times \Delta^\circ\text{C}$, linear Phase : $\{0.1 + 0.15 \times f[\text{GHz}]\} \times \Delta^\circ\text{C}$, degrees	

바. S_{12} (S_{21})에 대한 Type B 불확도

- Reference power level : 0 dBm
($A_m = 0.035$, $A_p = 5$ (deg))
- $S_{11} = S_{22} = 0.1$

표 11-4 S_{12} (S_{21})에 대한 Type B 불확도

주파수(GHz)	10 dB		20 dB		30 dB		40 dB		50 dB	
	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)	크기 (dB)	위상 (Deg)
1	0.434	6.85	0.433	6.673	0.435	6.857	0.440	6.894	0.459	7.030
2		7.70		7.523		7.707		7.744		7.880
3		8.55		8.373		8.557		8.594		8.730

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	13/23

11.3 가변 감쇠량

$$\Delta A = \frac{(|S_{12_f}|) + (|S_{21_f}|)}{2} - \frac{(|S_{12_i}|) + (|S_{21_i}|)}{2}$$

11.4 합성 표준 불확도

가. 초기값으로 감쇠기 설정시 합성 표준 불확도

$$u_C(|S_{21_i}|) = \sqrt{u_A^2(|S_{21_i}|) + u_B^2(|S_{21_i}|)}$$

$$u_C(\theta_{21_i}) = \sqrt{u_A^2(\theta_{21_i}) + u_B^2(\theta_{21_i})}$$

$$u_C(|S_{12_i}|) = \sqrt{u_A^2(|S_{12_i}|) + u_B^2(|S_{12_i}|)}$$

$$u_C(\theta_{12_i}) = \sqrt{u_A^2(\theta_{12_i}) + u_B^2(\theta_{12_i})}$$

$$u_c(A_i) = \frac{u_C(|S_{12_i}|) + u_C(|S_{21_i}|)}{2}$$

$$u_c(\theta_i) = \frac{u_C(\theta_{12_i}) + u_C(\theta_{21_i})}{2}$$

나. 최종값으로 감쇠기 설정시 합성 표준 불확도

$$u_C(|S_{21_f}|) = \sqrt{u_A^2(|S_{21_f}|) + u_B^2(|S_{21_f}|)}$$

$$u_C(\theta_{21_f}) = \sqrt{u_A^2(\theta_{21_f}) + u_B^2(\theta_{21_f})}$$

$$u_C(|S_{12_f}|) = \sqrt{u_A^2(|S_{12_f}|) + u_B^2(|S_{12_f}|)}$$

$$u_C(\theta_{12_f}) = \sqrt{u_A^2(\theta_{12_f}) + u_B^2(\theta_{12_f})}$$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/23

$$u_c(A_f) = \frac{u_c(|S_{12_f}|) + u_c(|S_{21_f}|)}{2}$$

$$u_c(\theta_f) = \frac{u_c(\theta_{12_f}) + u_c(\theta_{21_f})}{2}$$

다. 가변 감쇠량 측정의 합성 표준 불확도

$$u_c(\Delta A) = \sqrt{u_c^2(A_f) + u_c^2(A_i)}$$

$$u_c(\Delta \theta) = \sqrt{u_c^2(\theta_f) + u_c^2(\theta_i)}$$

11.5 유효 자유도

$$\nu_c^{mag} = \frac{u_c^4(\Delta A)}{\frac{u_A^4(A_f)}{\nu_{c_f}} + \frac{u_A^4(A_i)}{\nu_{c_i}}}, \quad \nu_c^{pha} = \frac{u_c^4(\Delta \theta)}{\frac{u_A^4(\theta_f)}{\nu_{c_f}} + \frac{u_A^4(\theta_i)}{\nu_{c_i}}}$$

11.6 확장 불확도

$$U_{\Delta A} = k u_c(\Delta A)$$

$$U_{\Delta \theta} = k u_c(\Delta \theta)$$

11. 측정 예

11.1 가변 감쇠기의 초기 설정값 측정

가. 측정 조건

- 감쇠기 : 0 dB, $|S_{11}| = |S_{22}| = 0.1$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/23

◦ 측정 주파수 : 3 GHz

나. 측정 결과 :

- $|S_{21_i}|$ [dB] = 0.45, 0.48, 0.47, 0.46, 0.45, 0.46
- θ_{21_i} = 60.7°, 60.5°, 60.4°, 60.3°, 60.2°, 60.8°
- $|S_{12_i}|$ [dB] = 0.44, 0.47, 0.48, 0.45, 0.48, 0.45
- θ_{12_i} = 60.9°, 60.5°, 60.6°, 60.3°, 60.4°, 60.6°

다. Type-A 불확도 평가

◦ 평균

- $|\overline{S_{21_i}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{21_i}(i)| = 0.46 \text{ dB}$
- $|\overline{S_{12_i}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{12_i}(i)| = 0.46 \text{ dB}$
- $\overline{\theta_{21_i}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta_{21_i}(i) = 60.5^\circ$
- $\overline{\theta_{12_i}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta_{12_i}(i) = 60.5^\circ$

◦ 초기 감쇠량

$$- A_i = \frac{|\overline{S_{21_i}}| + |\overline{S_{12_i}}|}{2} = \frac{0.46 + 0.46}{2} = 0.46 \text{ dB}$$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/23

◦ 초기 위상

$$- \theta_i = \frac{|\overline{\theta_{21_i}}| + |\overline{\theta_{21_i}}|}{2} = \frac{60.5 + 60.5}{2} = 60.5^\circ$$

◦ 실험 표준편차

$$- s(|S_{21_i}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{21_i}(i)| - |\overline{S_{21_i}}|)^2} = 0.01 \text{ dB}$$

$$- s(|S_{12_i}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{12_i}(i)| - |\overline{S_{12_i}}|)^2} = 0.02 \text{ dB}$$

$$- s(\theta_{21_i}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{21_i}(i) - \overline{\theta_{21_i}})^2} = 0.23^\circ$$

$$- s(\theta_{12_i}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\theta_{12_i}(i) - \overline{\theta_{12_i}})^2} = 0.28^\circ$$

◦ Type-A 표준 불확도(평균의 실험 표준편차)

$$u_A(A_i) = \frac{s(|S_{21_i}|) + s(|S_{12_i}|)}{2\sqrt{6}} = 0.012 \text{ dB}$$

$$u_A(\theta_i) = \frac{s(\theta_{21_i}) + s(\theta_{12_i})}{2\sqrt{6}} = 0.10^\circ$$

◦ 자유도

$$\nu_A(A_i) = 5$$

$$\nu_A(\theta_i) = 5$$

라. Type-B 불확도 평가

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	17/23

◦ 표 11-3로부터 Type B 불확도 요인 E_{tm} 과 E_{tp} 는 다음과 같다.

$$- E_{tm} = \pm 0.434 \text{ dB}, E_{tp} = 8.56^\circ$$

$$\circ u_B(A_i) = u_B(|S_{21}|) = u_B(|S_{12}|) = \frac{E_{tm}}{2} [\text{dB}] = 0.217 \text{ dB}$$

$$\circ u_B(\theta_i) = u_B(\theta_{S21}) = u_B(\theta_{S12}) = \frac{E_{tp}}{2} [\text{dB}] = 4.28^\circ$$

◦ 자유도

$$\nu_B(A_i) = \infty$$

$$\nu_B(\theta_i) = \infty$$

마. 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} \circ u_C(A_i) &= \sqrt{u_A^2(A_i) + u_B^2(A_i)} \\ &= \sqrt{0.012^2 + 0.217^2} \\ &= 0.217 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ u_C(\theta_i) &= \sqrt{u_A^2(\theta_i) + u_B^2(\theta_i)} \\ &= \sqrt{0.10^2 + 4.28^2} \\ &= 4.28^\circ \end{aligned}$$

바. 유효 자유도

$$\circ \nu_c^{ATT} = \frac{u_c^4(A_i)}{\frac{u_A^4(A)}{\nu_A} + \frac{u_B^4(A_i)}{\nu_B}} = \frac{0.217^4}{\frac{0.012^4}{5} + \frac{0.217^4}{\infty}} = 534 \text{ 668}$$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	18/23

$$\nu_c^{Phase} = \frac{u_c^4(\theta_i)}{\frac{u_A^4(\theta_i)}{\nu_A} + \frac{u_B^2(\theta_i)}{\nu_B}} = \frac{4.28^4}{\frac{0.10^4}{5} + \frac{4.28^4}{\infty}} = 16\,778\,188$$

11.2 가변 감쇠기의 최종 설정값 측정

가. 측정 조건

- 감쇠기 : 30 dB, $|S_{11}| = |S_{22}| = 0.1$
- 측정 주파수 : 3 GHz

나. 측정 결과 :

- $|S_{21_f}|$ [dB] = 30.47, 30.49, 30.48, 30.46, 30.45, 30.46
- θ_{21_f} = 80.9°, 80.5°, 80.4°, 80.3°, 80.7°, 80.6°
- $|S_{12_f}|$ [dB] = 30.44, 30.47, 30.48, 30.45, 30.48, 30.48
- θ_{12_f} = 80.4°, 80.7°, 80.6°, 80.3°, 80.4°, 80.6°

다. Type-A 불확도 평가

• 평균

- $|\overline{S_{21_f}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{21_f}(i)| = 30.47 \text{ dB}$
- $|\overline{S_{12_f}}| = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 |S_{12_f}(i)| = 30.47 \text{ dB}$
- $\overline{\theta_{21_f}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \theta_{21_f}(i) = 80.57^\circ$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/23

$$- \overline{\Theta}_{12_f} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 \Theta_{12_f}(i) = 80.5^\circ$$

◦ 최종 감쇠량

$$- A_f = \frac{|\overline{S_{21_f}}| + |\overline{S_{12_f}}|}{2} = \frac{30.47 + 30.47}{2} = 30.47 \text{ dB}$$

◦ 최종 위상

$$- \Theta_f = \frac{|\overline{\Theta_{21_f}}| + |\overline{\Theta_{12_f}}|}{2} = \frac{80.57 + 80.5}{2} = 80.54^\circ$$

◦ 실험 표준편차

$$- s(|S_{21_f}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{21_f}(i)| - |\overline{S_{21_f}}|)^2} = 0.01 \text{ dB}$$

$$- s(|S_{12_f}|) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (|S_{12_f}(i)| - |\overline{S_{12_f}}|)^2} = 0.02 \text{ dB}$$

$$- s(\Theta_{21_f}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\Theta_{21_f}(i) - \overline{\Theta_{21_f}})^2} = 0.22^\circ$$

$$- s(\Theta_{12_f}) = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (\Theta_{12_f}(i) - \overline{\Theta_{12_f}})^2} = 0.15^\circ$$

◦ Type-A 표준 불확도(평균의 실험 표준편차)

$$u_A(A_f) = \frac{s(|S_{21_f}|) + s(|S_{12_f}|)}{2\sqrt{6}} = 0.01 \text{ dB}$$

$$u_A(\Theta_f) = \frac{s(\Theta_{21_f}) + s(\Theta_{12_f})}{2\sqrt{6}} = 0.08^\circ$$

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	20/23

◦ 자유도

$$\nu_A(A_f) = 5$$

$$\nu_A(\theta_f) = 5$$

라. Type-B 불확도 평가

- 표119-3로부터 Type B 불확도 요인 E_{tm} 과 E_{tp} 는 다음과 같다.

$$- E_{tm} = \pm 0.434 \text{ dB}, E_{tp} = 8.56^\circ$$

$$\circ u_B(A_f) = u_B(|S_{21f}|) = u_B(|S_{12f}|) = \frac{E_{tm}}{2} [\text{dB}] = 0.217 \text{ dB}$$

$$\circ u_B(\theta_f) = u_B(\theta_{S21}) = u_B(\theta_{S12}) = \frac{E_{tp}}{2} [\text{dB}] = 4.28^\circ$$

◦ 자유도

$$\nu_B(A_f) = \infty$$

$$\nu_B(\theta_f) = \infty$$

마. 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} \circ u_C(A_f) &= \sqrt{u_A^2(A_f) + u_B^2(A_f)} \\ &= \sqrt{0.01^2 + 0.217^2} \\ &= 0.217 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \circ u_C(\theta_f) &= \sqrt{u_A^2(\theta_f) + u_B^2(\theta_f)} \\ &= \sqrt{0.08^2 + 4.28^2} \\ &= 4.28^\circ \end{aligned}$$

바. 유효 자유도

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	21/23

$$\nu_c^{ATT} = \frac{u_c^4(A_f)}{\frac{u_A^4(A)}{\nu_A} + \frac{u_B^2(A_f)}{\nu_B}} = \frac{0.217^4}{\frac{0.01^4}{5} + \frac{0.217^4}{\infty}} = 1\,108\,687$$

$$\nu_c^{Phase} = \frac{u_c^4(\Theta_f)}{\frac{u_A^4(\Theta_f)}{\nu_A} + \frac{u_B^2(\Theta_f)}{\nu_B}} = \frac{4.28^4}{\frac{0.08^4}{5} + \frac{4.28^4}{\infty}} = 40\,962\,375$$

11.3 가변 감쇠량 측정 결과

가. 가변 감쇠량

$$\Delta A = A_f - A_i = 30.47 - 0.46 = 30.01 \text{ dB}$$

나. 합성 표준 불확도

$$u_c(\Delta A) = \sqrt{u_c^2(A_f) + u_c^2(A_i)} = \sqrt{.217^2 + 0.217} = 0.307 \text{ dB}$$

$$u_c(\Delta \Theta) = \sqrt{u_c^2(\Theta_f) + u_c^2(\Theta_i)} = \sqrt{4.28^2 + 4.28^2} = 6.05^\circ$$

다. 확장 불확도

$$U_{\Delta A} = k u_c(\Delta A) = 2 \times 0.307 \text{ dB} = 0.614 \text{ dB}$$

$$U_{\Delta \Theta} = k u_c(\text{Phase}) = 2 \times 6.05^\circ = 12.1^\circ$$

11.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

가. 30 dB 증분 감쇠량 측정 불확도

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/23

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(A_i)$	Type A 불확도	0.010 dB	정규	1	0.010 dB
$u_B(A_i)$	Type A 불확도	0.434 dB	정규	2	0.217 dB
$u_A(A_f)$	Type A 불확도	0.012 dB	정규	1	0.012 dB
$u_B(A_f)$	Type A 불확도	0.434 dB	정규	2	0.217 dB
$u_c(\Delta A)$	합성 표준 불확도 : RSS	-	-	-	0.307 dB
$U_{\Delta A}$	확장 불확도	K=2	t		0.614 dB

나. 30 dB 증분 감쇠량 측정의 위상 불확도

기 호	불확도 원인	산출값	확율분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(\theta_i)$	Type A 불확도	0.08°	정규	1	0.08°
$u_B(\theta_i)$	Type A 불확도	8.56°	정규	2	4.28°
$u_A(\theta_f)$	Type A 불확도	0.10°	정규	1	0.10°
$u_B(\theta_f)$	Type A 불확도	8.56°	정규	2	4.28°
$u_c(\Delta \theta)$	합성 표준 불확도 : RSS	-	-	-	6.04°
$U_{\Delta \theta}$	확장 불확도	K=2	t		12.1°

RRL	동축형 가변 감쇠기 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Coaxial Variable Attenuator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/23

12. 교정 성적서 작성법

12.1 한국 시험·교정 기관 인증기구(KORLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목은 명확한 근거에 의하여 작성한다.

12.2 교정 성적서 상에 기록하는 교정 환경 자료, 모든 측정 데이터 및 불확도 산출 등 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존한다.

13. 참고 문서

13.1 동축형 고정 감쇠기 표준교정절차(KASTO 88-14-102-041) : 한국측정기기교정협회, 1996년 12월

13.2 Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation : IEE PROC., VOL. 128, pT.H, Feb., 1981

13.3 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration : EA-4/02

13.4 Applying Error Correction to Network Analyzer Measureemnts : Agilent AN 1287-3

부 록 6

고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서

고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/61

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/61

목 차

1. 적용범위
2. 교정주기
3. 작성기준
4. 불확도 산출
5. 용어의 정의 및 명칭
6. 교정내용
7. 필요장비명세
8. 준비사항
9. 교정방법 및 절차
10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 추정
11. 교정 성적서 작성법

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/61

1. 적용범위

본 교정 지침서는 100 kHz ~ 2 900 MHz의 주파수 범위에서 사용하는 고주파 스펙트럼 분석기(RF Spectrum Analyzer)의 교정에 적용한다.

2. 교정주기

교정 주기는 국가 교정기관 지정제도 운영세칙의 별표 1에서 정한 표준 교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

3. 작성 기준

본 교정 지침서는 교정 절차의 유효성 확보를 위해서 한국계량측정협회가 발간한 디지털 스펙트럼 분석기의 표준교정절차 (KAST0 02-14-9070-165)에서 제시한 방법을 기준으로 작성하였다.

4. 불확도 산출

4.1 Type-A 불확도

같은 조건에서 n번 반복 측정에 의한 우연오차로 다음 식과 같이 산출한다.

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

$$\text{반복 측정에 의한 표준 불확도 : } u_c(x_i) = s(\bar{x})$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/61

자유도 : n-1

4.2 Type-B 불확도

표준기의 교정 성적서와 교정 시스템의 불확도와 같이 4.1에서 다루지 않은 모든 불확도 요인으로부터 산출한다.

4.3 합성 표준 불확도

표준 불확도 산출시 측정에 의한 결과로부터 산출되지 않은 불확도는 적절한 감도계수를 이용하여 다음과 같이 바꾸어주어야 한다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}$$

윗 식에서

$$u_{c(y)} = c_i u_c(x_i)$$

- c_i : 감도계수
- $u_c(x_i)$: 표준 불확도

이다.

4.4 확장 불확도

$$U = k u_c(y) \quad (k=2)$$

5. 용어의 정의 및 명칭

5.1 스펙트럼분석기(Spectrum Analyzer)

전기적인 신호를 주파수 영역에서 분석 가능하도록 표시해주는 장비로 수평축은 주파수에 해당하며 수직축은 신호성분의 크기 및 변화를 선형이나 dB로 표시하는 장치이다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/61

5.2 주파수 분해능 (Resolution Bandwidth)

입력된 신호에 인접하게 나타나는 2개 또는 그 이상의 신호를 분리 할 수 있는 능력이다.

5.3 영상 필터(Video Bandwidth)

잡음 레벨(Noise Level) 부근의 작은 신호를 측정할 때 아주 유용하게 쓰이는 기능으로 화상 처리시 평균을 취함으로써 노이즈 성분을 최소화하는 기능을 지닌다.

5.4 주파수 범위 (Frequency Span)

스펙트럼 분석기의 화면상의 가로축의 범위를 설정하는 기능이다.

5.5 기준 레벨 (Reference Level)

스펙트럼 분석기 화면의 상단 눈금선에 해당하는 레벨을 기준레벨이라 하며 이 값에 따라 측정범위의 상한을 정할 수 있고 또한 상대적인 측정값을 구할 수 있다.

5.6 고조파(Harmonics Wave)

주기적으로 변화를 갖는 신호에있어서 기본파 주파수의 정수배 주파수를 가진 성분을 말한다. 예를 들면 기본파의 2배 주파수를 가진 것을 제2 고조파라 한다.

5.7 일반적인 용어는 KS C 1100(전자측정기 용어집)에 따른다.

6. 교정내용

주파수 분석시 필요한 스펙트럼 분석기의 각 기능에 대하여 기기의 규격에 적합하도록 정확하게 교정함으로써 정밀측정과 측정향상에 도움을 주는 것을 목적으로 하며, 다음의 각 기능을 교정한다.

- 기준 주파수 정확도 교정 (Calibration of the frequency accuracy of internal reference oscillator)
- 교정 출력단 레벨 정확도 교정 (Calibration of calibrator amplitude accuracy)

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/61

- RF 부분의 평균 잡음 레벨 교정 (Calibration of Average Noise Level of RF section)
- 주파수 분해능 대역폭 정확도 및 선택도 교정 (Calibration of Resolution Bandwidth Accuracy and Selectivity)
- 주파수 분해능 대역폭 변화 정확도 교정 (Calibration of Resolution Bandwidth Switching Accuracy)
- 주파수 표시 정확도 교정 (Calibration of Frequency Readout Marker Accuracy)
- 주파수 범위 정확도 교정 (Calibration of Frequency Span Accuracy)
- 눈금 충실도 교정 (Calibration of Scale Fidelity)
- 진폭 측정 정확도 교정 (Calibration of Absolute Amplitude Accuracy)

7. 필요 장비 명세

NO	장비명	최소사용규격		사용장비
1	RF 신호발생기 (RF Signal Generator)	Range	10 MHz ~ 27 GHz	ROHDE&SCHWARZ SMR27
		Accuracy	± 1 dB	
2	주파수계수기 (Frequency Counter)	Range	0 ~ 100 MHz	SRS SR620
3	GPS Receiver	Accuracy	2.0×10^{-11}	Odetics 425
4	전력계 (Power Meter)	Range	-70 dBm ~ 20 dBm	HP E4419B
		Accuracy	± 2 %	
5	전력 감지기 (Power Sensor)	Range	50 MHz ~ 26.5 GHz	HP E4413A
		Accuracy	± 2 %	
6	가변 감쇠기 (Step Attenuator)	Range	0 dB ~ 11 dB, 1 dB step	HP 8494B
		Accuracy	0.18 dB	
7	가변 감쇠기 (Step Attenuator)	Range	0 dB ~ 110 dB, 10 dB step	HP 8496B
		Accuracy	0.264 dB	
8	전력분배기 (Power Splitter)	Range	DC ~ 2.7 GHz	ROHDE&SCHWARZ
		Accuracy	SWR : 1.15 이하	
9	표준정합 (Standard Termination)	Range	DC ~ 18 GHz	HP
		Accuracy	SWR : 1.08 이하	

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/61

8. 준비사항

8.1 교정전 교정 절차 및 주의 사항을 숙지한다.

8.2 교정실은 국가교정기관지정제도운영요령 제21조 5항의 환경조건을 만족해야 한다.

8.3 교정을 시작하기 전에 피 교정기기 및 교정기기들을 충분히 예열(warmup)시킨다. 이 때 특 별한 사항이 없는 한 예열 시간은 각 기기 및 장비들의 매뉴얼에 따른다.

8.4 피교정기기와 교정장비를 연결할 때 입력과 출력 임피던스를 정합(matching)시켜야 한다.

9. 교정 방법 및 절차

9.1 기준 주파수 정확도 교정 (calibration of the frequency accuracy of internal reference oscillator)

9.1.1 그림 1과 같이 피 교정 스펙트럼 분석기의 기준 주파수 출력 (대부분 장비의 뒷면에 위치)을 주파수 계수기의 입력에 연결하고 측정을 수행한다.



그림 1 기준 주파수 교정 장치

9.2 교정 출력단 레벨 정확도 교정 (calibration of calibrator amplitude accuracy)

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/61

- 9.2.1 그림 2와 같이 스펙트럼 분석기의 전면에 위치한 “CAL OUTPUT” 출력단을 주파수 계수기에 연결하여 주파수 값을 측정하여 기록지에 기록한다.
- 9.2.2 주파수 계수기의 연결을 떼어낸다.
- 9.2.3 고주파 전력측정기(RF Power Meter)를 적절한 측정모드로 설정하고 그림 2와 같이 스펙트럼 분석기의 “CAL OUTPUT” 출력단에 연결한다.
- 9.2.4 스펙트럼 분석기의 “CAL OUTPUT” 출력 주파수에 해당하는 전력 감지기 (Power Sensor)의 "CAL FACTOR" 값을 고주파 전력측정기에 입력 후 측정된 전력을 기록지에 기록한다.
- 9.2.5 스펙트럼 분석기의 “CAL OUTPUT” 출력신호의 고조파 성분이 큰 경우에는 필터를 사용하여 측정한다.
- 9.2.6 스펙트럼 분석기의 “CAL OUTPUT” 출력단에서 전력 감지기를 떼어낸다.

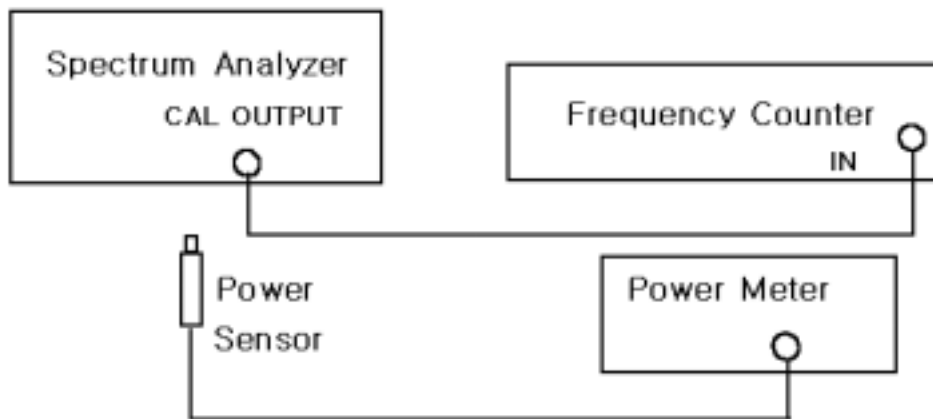


그림 2 교정 출력단 출력 측정 장치

- 9.3 RF 부분의 평균 잡음 레벨 교정(Average Noise Level Calibration of RF section)
- 9.3.1 스펙트럼 분석기를 초기화 시킨후 그림 3과와 같이 RF INPUT단에 50 Ω Termination을 연결한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/61

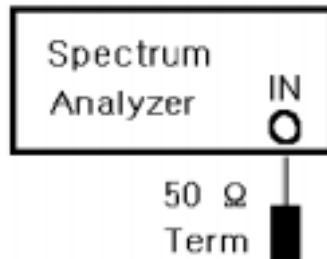


그림 3. 평균 잡음 레벨 측정 장치

9.3.2 스펙트럼 분석기를 다음의 절차에 따라 주파수별로 교정한다.

9.3.3 측정 주파수 : 400 kHz와 1 MHz

- Press "TRIG" : SWEEP CONT
- Press "FREQUENCY": CENTER FREQUENCY : 400 kHz 또는 1 MHz
- Press "SPAN" : 20 kHz
- Press "AMPLITUDE" : REF LVL -70 dBm, ATT 0 dB
- Press "BW" : IF BW MAN 30 Hz, AVG BW 30 Hz
- Press "TRACE" DETECTOR SMP
- Press: "SINGLE"
- Press "DISPLAY" : DSP LINE 을 "ON"하여 평균잡음 레벨을 측정하여 기록한다.
- PREAMP : "on"과 "off" 상태에서 측정한다.

9.3.4 측정 주파수 : 1 MHz to 2.9 GHz

- 다음과 같이 스펙트럼 분석기의 키를 누른다.
 - Press "TRIG" : SWEEP CONT
 - Press "FREQUENCY" : Band Lock , 0-2.9 GHz BAND 0
 - Press "FREQUENCY" : START FREQ 1 MHz, STOP FREQ 2.9 GHz
 - Reference Level : -70 dBm
 - Press "BW" : IF BW MAN 1 MHz, AVG BW MAN 10 kHz

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/61

- 다음과 같이 스펙트럼 분석기의 키를 누른다.
 - Press "SINGLE"
 - Press "TRACE" : AVG ON 10 Hz
 - Press "SINGLE"
 - ▶ “AVG 10” 이 화면의 왼쪽에 나타날 때까지 기다림
- Press : "PEAK SEARCH"
 - ▶ 주파수 범위 1 MHz to 2.9 GHz에서의 측정 주파수로 기록한다.
- 다음과 같이 스펙트럼 분석기의 키를 누른다.
 - Press "TRIG": SWEEP CONT
 - Press "TRACE" : VID AVG OFF, DETECTOR SMP
 - Press "AUTO COUPLE" : IF BW AUTO, AVG BW AUTO
 - Press "SPAN" : 10 kHz
 - Press "FREQUENCY" : 앞에서 기록한 측정 주파수를 중심 주파수로 한다.
 - Press "BW" : IF BW MAN 30 Hz, AVG BW MAN 30 Hz
 - Press "SINGLE"
 - Press "DISPLAY" :
 - Press "DISPLAY" : DSP LINE 을 “ON”하여 평균잡음 레벨을 측정하여 기록한다.
 - PREAMP : "on"과 “off” 상태에서 측정한다.

9.4 주파수 분해능 대역폭 정확도 및 선택도 교정 (Calibration of Resolution Bandwidth Accuracy and Selectivity)

- ##### 9.4.1 그림 4와 같이 스펙트럼 분석기의 10 MHz REF. OUTPUT 단자를 RF Signal Generator 의 REF. INPUT 단자에 연결하고 RF Signal Generator 의 RF 출력단을 스펙트럼 분석기의 RF 입력단에 연결한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/61

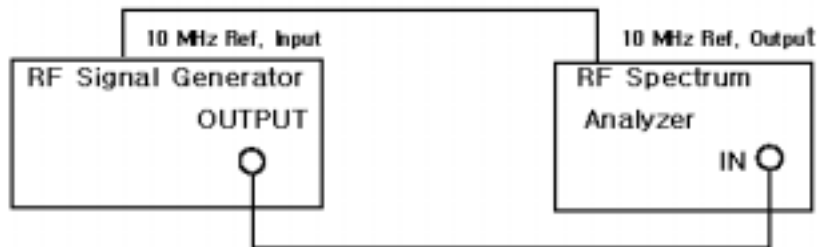


그림 4.

9.4.2 스펙트럼 분석기와 RF Signal Generator를 초기화한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator
 - Frequency 300 MHz
 - Output Level 0 dBm
 - Modulation off
- Spectrum Analyzer
 - Center Frequency 300 MHz
 - SPAN 10 MHz
 - RBW(Resolution Bandwidth) 3 kHz
 - VBW(Video Bandwidth) : MAN 1 kHz
 - LOG Scale 1 dB
 - Sweep Time 1 s

9.4.3 Signal Generator 의 출력을 'on' 시킨다.

9.4.4 Spectrum Analyzer를 "Signal Sweep"상태로 설정 후, 화면상에 파형이 안정하게 표시될 때까지 여러 번 Sweep 시킨다.

9.4.5 Sweep 이 완료되었을 때 Marker 가 Peak 점을 지시하게 한후 "△ Marker" 기능을 설정해 측정값이 0 이 되게 한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	12/61

9.4.6 Marker를 서서히 좌로 이동시켜 Marker Level 측정치가 -3 dB의 근사값이 되도록 한 후 "△ Marker" 기능을 설정하여 측정치가 0 이 되게 한다.

9.4.7 다시 Marker를 서서히 우로 이동시켜 Marker Level 측정치가 0 dB의 근사값이 되도록 한 후, 그때의 Marker Frequency 값을 읽어서 Data Sheet 에 기록한다.

9.4.8 Spectrum Analyzer의 Trigger를 Continue 로 설정한다.

9.4.9 Spectrum Analyzer의 Marker를 Marker Normal 로 설정한다.

9.4.10 표 1의 남아있는 항에 대하여 Step 9.4.4 부터 Step 9.4.9까지를 반복하여 측정한다.

9.4.11 기타 표 1에 표시되지 않은 RBW의 측정은 SPAN 값을 적당하게 설정하여 화면상에 파형이 전체 크기의 50 %이상을 차지하게 한 후, Step 9.4.9까지를 반복하여 측정한다.

9.4.12 주파수 분해능 정확도 교정이 끝난 후 스펙트럼 분석기를 아래와 같이 설정한다.

- Center Frequency 300 MHz
- SPAN 10 MHz
- RBW(Resolution Bandwidth) 3 kHz
- VBW(Video Bandwidth) : MAN 1 kHz
- LOG Scale 1 dB

9.4.13 스펙트럼 분석기를 "Single Sweep" 상태로 설정 후, 화면상에 파형이 안정하게 표시될 때까지 여러 번Sweep 시킨다.

9.4.14 Sweep 이 완료되었을 때 Marker 가 Peak 점을 지시하게 한후 "△ Marker" 기능을 설정해 측정치가 0 이 되게 한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	13/61

9.4.15 Marker를 서서히 좌로 이동시켜 Marker Level 측정치가 -60 dB의 근사값이 되도록 한 후, “△Marker” 기능을 설정하여 측정치가 0 이 되게 한다.

9.4.16 다시 Marker를 서서히 우로 이동시켜 Marker Level 측정치가 0 dB의 근사값이 되도록 한 후, 그때의 Marker Frequency 값을 읽어 기록한다.

표 1 주파수 분해능 및 선택도 교정

RBW Accuracy			RBW Selectivity		
RBW	SPAN	Result	RBW	SPAN	Result
3 MHz	10 MHz		3 MHz	10 MHz	
1 MHz	10 MHz		1 MHz	10 MHz	
300 kHz	500 kHz		300 kHz	500 kHz	
120 kHz	500 kHz		120 kHz	500 kHz	
100 kHz	500 kHz		100 kHz	500 kHz	
30 kHz	500 kHz		30 kHz	500 kHz	
10 kHz	50 kHz		10 kHz	50 kHz	
9 kHz	50 kHz		9 kHz	50 kHz	
3 kHz	50 kHz		3 kHz	50 kHz	
1 kHz	50 kHz		1 kHz	50 kHz	

9.4.17 아래의 수식에 대입하여 계산된 값을 Data Sheet 에 기록한다.

$$\text{Selectivity} = \frac{-60 \text{ dB 대역폭}(9.4.16)}{-3 \text{ dB 대역폭}(9.4.7)}$$

9.4.18 표 1의 남아있는 항에 대하여 Step 9.4.13부터 Step 9.4.17 까지를 반복하여 측정한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/61

9.4.19 Signal Generator 의 출력을 최소로 줄이고 Test Set-up을 제거한다.

9.5 절대 진폭 레벨의 교정 (Calibration of Absolute Amplitude)/주파수 분해능 대역폭 변화 교정 (Calibration of Resolution Bandwidth Switching)

9.5.1 그림 5와 같이 스펙트럼 분석기의 10 MHz REF. OUTPUT 단자를 RF Signal Generator의 REF. INPUT 단자에 연결하고 RF Signal Generator 의 RF 출력단을 스펙트럼 분석기의 RF 입력단에 연결한다.

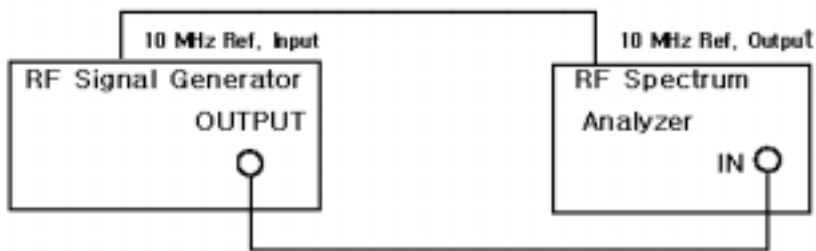


그림 5

9.5.2 주파수 분해능 대역폭 변화 교정 (Calibration of Resolution Bandwidth Switching)

1) 스펙트럼 분석기와 RF Signal Generator를 초기화한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator
 - Frequency 300 MHz
 - Output Level -20 dBm
 - Modulation off
- Spectrum Analyzer
 - Press "PRESET"

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/61

- Center Frequency 300 MHz
- SPAN 10 MHz
- AMPLITUDE : Amptd Unit dBm
- AMPLITUDE : Reference Level -20 dBm
- AMPLITUDE : SCALE LOG 1 dB

- Peak Research
- INPUT : VIEW CAL on
- Mark Track on
- Span 50 kHz
- BW : IF BW 3 kHz
- BW : AVG BW MAN 1 kHz

2) Press "AMPLITUDE"

- REF LVL을 조절하여 기준 레벨보다 1칸 아래에 신호가 나타나도록 조절한다.
- Spectrum Analyzer의 다음 기능을 수행한다.
 - Press " SINGLE"
 - Press "PEAK SEARCH" MARK ▲

3) 표 2에 주어진 IF BW와 SPAN로 스펙트럼 분석기를 조절한다.

4) Press "SINGLE", Press "PEAK SEARCH"를 수행하여 MARK ▲ TRK 값을 표 2-1에 기록한다.

5) 3)과 4)의 과정을 반복한다.

6) Spectrum Analyzer의 다음 기능을 수행한다.

- SPAN 50 kHz
- BW : IF BW 3 kHz

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/61

- Press " SINGLE"
- Press "PEAK SEARCH" MARK Δ

7) 표 3에 주어진 IF BW와 SPAN로 스펙트럼 분석기를 조절한다.

표 2-1 주파수 분해능 변화 정확도

Spectrum Analyzer		MARK Δ TRK Amplitude Reading [dB]
IF BW	SPAN	Δ dB
3 kHz	50 kHz	0 (Reference)
1 kHz	50 kHz	
9 kHz	50 kHz	
10 kHz	50 kHz	
30 kHz	500 kHz	
100 kHz	500 kHz	
120 kHz	500 kHz	
300 kHz	5 MHz	
1 MHz	10 MHz	
3 MHz	10 MHz	

8) Press "SINGLE", Press "PEAK SEARCH"를 수행하여 MARK Δ TRK 값을 표 2-2에 기록한다.

9) 7)과 8)의 과정을 반복한다.

표 2-2 협대역 주파수 분해능 변화 정확도

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	17/61

Spectrum Analyzer		MARK Δ TRK Amplitude Reading [dB]
3 kHz	50 kHz	0 (Reference)
300 Hz	1 kHz	
200 Hz	1 kHz	
100 Hz	1 kHz	
30 Hz	1 kHz	

9.6 주파수 표시 정확도 교정 (Calibration of Frequency Readout Marker Accuracy)

9.6.1 RF Signal Generator 와 Spectrum Analyzer를 그림5와 같이 연결한다.

9.6.2 RF Signal Generator 와 Spectrum Analyzer를 초기화 한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator
 - Frequency 1.5 GHz
 - Output Level -15 dBm
 - Modulation off
- Spectrum Analyzer
 - Press "PRESET"
 - Center Frequency 1.5 GHz
 - SPAN 20 MHz
 - AMPLITUDE : Reference Level -10 dBm
 - SWEEP 75 ms
 - Press "INPUT" : EMI 수신기의 경우에는 INPUT 2

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	18/61

9.6.3 "PEAK SEARCH"를 이용하여 주파수를 읽어서 표 3에 기록한다.

9.6.4 표 3의 각 span 과 bandwidth에서 step 9.6.3을 반복한다.

표 3 Frequency readout accyrcy

스펙트럼 분석기				RF Signal Generator (GHz)	Readout
	Center Frequency (GHz)	Span (MHz)	Bandwidth (kHz)		
RF Input (20 MHz ~ 2.9 GHz)	1.5	20	120	1.5	
	1.5	10	120	1.5	
	1.5	1	10	1.5	
	1.5	.12	.3	1.5	

9.7 주파수 범위 정확도 교정 (Calibration of Frequency Span Accuracy)

9.7.1 RF Signal Generator 와 Spectrum Analyzer를 그림 5와 같이 연결한다.

9.7.2 RF Signal Generator와 Spectrum Analyzer를 초기화 한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator
 - Frequency 200 MHz (LOW FREQ)
 - Output Level -15 dBm
 - Modulation off
- Spectrum Analyzer
 - Press "PRESET"
 - Center Frequency 900 MH

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/61

- SPAN 1.8 GHz
- AMPLITUDE : Reference Level -10 dBm
- SWEEP 75 ms

9.7.3 Spectrum Analyzer의 "MARKER"를 이용하여 주파수를 읽는다.

9.7.4 신호원의 주파수를 1 700 MHz (HIGH FREQ)로 조정한다.

표 4 주파수 범위 정확도

Spectrum Analyzer Setting			RF Signal Source Setting		△ MARKER 측정값
Span	IF BW	Center Freq	Low Freq.	High Freq.	
1.8 GHz	120 kHz	900 MHz	200 MHz	1 700 MHz	
10.10 MHz	120 kHz	70 MHz	66.000 MHz	74.000 MHz	
10. 00 MHz	3 kHz	70 MHz	66.000 MHz	74.000 MHz	
100.00 kHz	1 kHz	70 MHz	69.960 MHz	70.040 MHz	
99.00 kHz	300 Hz	70 MHz	69.960 MHz	70.040 MHz	
10.00 kHz	300 Hz	70 MHz	69.996 MHz	70.004 MHz	
1.00 kHz	100 Hz	70 MHz	69.999 6 MHz	70.000 4 MHz	

9.7.5 Spectrum Analyzer의 " △ MARKER"를 이용하여 step 9.7.3과의 주파수 차를 읽어서 표4에 기록한다.

9.7.6 표 4에 주어진 다른 값에 대하여 step 9.7.2 ~ 9.7.5를 반복한다.

9.7.7 Span 규격은 다음과 같다.

- Span ≤ 10 MHz: Span 값의 2 % + 10 Hz, Span ≥ 10 MHz:
Span 값의 3 %

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	20/61

9.8 눈금 충실도 교정 (Calibration of Scale Fidelity)

9.8.1 RF Signal Generator 와 Spectrum Analyzer를 그림 6과 같이 연결한다.



그림 6

9.8.2 그림 6에서 가변 감쇠기는 0~11 dB 까지 가변 가능한 1 dB step 감쇠기와 0~110 dB 까지 가변 가능한 10 dB step 감쇠기로 구성된다.

9.8.3 RF Signal Generator와 Spectrum Analyzer를 초기화 한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator

- Frequency 50 MHz
- Output Level +10 dBm
- AMPTD INCR 0.05 dB
- Modulation off

- Spectrum Analyzer

- Press "PRESET"
- AMPLITUDE : REF LVL 0 dBm
- Center Frequency 50 MHz
- SPAN 10 MHz
- PEAK SEARCH
- MARKER FUNCTION : MK TRACK ON

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	21/61

- SPAN : 50 kHz

- BW : IF BW

AVG BW

MAN 3 kHz

MAN 30 Hz

표 5 범위 충실도 측정

명목상의 RF Signal Generator 진폭	REF Level로 부터의 진폭차	오차 범위 [dB]	측정값 [dB] (MARKER Δ Reading)
+ 10 dBm	0	0 (Ref)	
+ 6 dBm	-4	-4.34 ~ -3.66	
+ 2 dBm	-8	-8.38 ~ -7.62	
- 2 dBm	-12	-12.42 ~ -11.58	
- 6 dBm	-16	-16.46 ~ -15.54	
- 10 dBm	-20	-20.50 ~ -19.50	
- 14 dBm	-24	-24.54 ~ -23.46	
- 18 dBm	-28	-28.58 ~ -27.42	
- 22 dBm	-32	-32.62 ~ -31.38	
- 26 dBm	-36	-36.66 ~ -35.34	
- 30 dBm	-40	-40.70 ~ -39.30	
- 34 dBm	-44	-44.74 ~ -43.26	
- 38 dBm	-48	-48.78 ~ -47.22	
- 42 dBm	-52	-52.82 ~ -51.18	
- 46 dBm	-56	-56.86 ~ -55.14	
- 50 dBm	-60	-60.90 ~ -59.10	
- 54 dBm	-64	-64.94 ~ -63.06	NA
- 58 dBm	-68	-68.98 ~ -67.02	NA

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/61

9.8.4 10 dB 감쇠기를 10 dB에 1 dB 감쇠기를 0 dB로하고, RF Signal Generator의 출력을 조절하여 Spectrum Analyzer의 MKR로 읽은 진폭이 0 dBm \pm 0.05 dB가 되도록 한다.

9.8.5 Spectrum Analyzer에서 "PEAK RESEARCH" : MARKER Δ 의 기능을 수행한다.

9.8.6 RF Signal Generator의 "AMPLITUDE INCREMENT"를 4 dB로 조정한다.

9.8.7 표 5에 나타난 다음 진폭이 되게 신호 레벨을 4 dB 감쇠시켜 Spectrum Analyzer에 가한다.

9.8.8 MARKER Δ 의 기능을 이용하여 step 9.8.5에서 읽은 값과의 진폭차를 측정한다.

9.8.9 표 5의 나머지 명목상의 진폭에 대하여 step 9.8.7과 step 9.8.8을 수행한다.

9.9 진폭 측정 정확도 교정 (Calibration of Absolute Amplitude Accuracy) :
Preamp off

9.9.1 Input 1 : 19 kHz ~ 50 MHz 주파수 범위

1) 그림 7-1과 같이 RF Signal Generator와 EMI 수신용 Spectrum Analyzer를 연결한다.



그림 7-1

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/61

2) RF Signal Generator와 Spectrum Analyzer를 초기화 한 후 아래와 같이 설정한다.

- RF Signal Generator
 - Frequency (CW) 9 kHz
 - Output Level -47 dBm
- Spectrum Analyzer
 - INPUT : INPUT 19 kHz - 50 MHz
 - AMPLITUDE : SCALE LIN, Units dBm
 - AMPLITUDE -45 dBm

3) 표 6-1에 나타낸 주파수가 되도록 RF Signal Generator를 조절하고, 스펙트럼 분석기를 주파수와 Span을 표 6과 같이 조절하고, Spectrum Analyzer의 "SINGLE"과 "PEAK SEARCH" 기능을 이용하여 level를 측정하고, RF Signal Generator의 출력 레벨과의 차를 표 6에 기록한다.

표 6 진폭 측정의 정확도

주파수 (MHz)	0.009	0.035	0.12	0.16	0.4	1.0	2	6	15	30	50
Span (kHz)	1	1	1	50	50	50	50	50	50	500	500
측정값 (dBm)											

9.9.2 Input 2 : 20 MHz ~ 2.9 GHz 주파수 범위

1) 그림 7-2와 같이 RF Signal Generator와 EMI 수신용 Spectrum Analyzer를 연결한다.

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	25/61

6) Sensor의 교정 인자 값으로 전력 값을 측정하고, 이 값으로 Spectrum Analyzer의 지시값을 빼서 표 6-2에 기록한다.

표 6-2 진폭 측정의 정확도

주파수 (MHz)	20	25	40	60	100	140	180	220	300	400	525	750	1000
Span (MHz)	.05	.05	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5	.5
분석기 측정값 (dBm)													
전력계 측정값 (dBm)													
전력차 (dB)													

10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 추정

10.1 기준 주파수 정확도 교정 : 그림 1

10.1.1 수학적 모델 설정

(1) Type A 불확도 : 기준 발진기의 단기 안정도 (allan variance)로 산정

◦ 상대 주파수 (relative frequency)

$$f_{rf} = \frac{f_c - f_n}{f_n}$$

f_c : 실제 발진주파수

f_n : 명목주파수

◦ 단기 안정도 (Allan Variance)

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	26/61

$$\sigma_y(\tau) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}{2 \times (M-1)} \right|^{1/2}$$

여기서 τ = 측정시간 (Sampling Time)

$y = i$ 번째 측정값 (실제발진 주파수)의 상대주파수

M = 데이터 (y_i)의 개수

(2) Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

(3) 주파수 측정의 수학적 모델

$$f = f_c + \delta f_{gps} + \delta f_{ac} + \delta f_{ls} + \delta f_r$$

f : 측정 주파수

f_c : 실제 측정한 주파수

δf_{gps} : GPS 수신기의 교정 성적서

δf_{ls} : Frequency counter의 장기 안정도

δf_r : Frequency counter의 분해능

(4) 합성 불확도

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial f_c}\right)^2 u^2(f_c) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}}\right)^2 u^2(\delta f_{gps}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}}\right)^2 u^2(\delta f_{ls}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_r}\right)^2 u^2(\delta f_r)}$$

(5) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial f_c} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}} = 1 \quad c_4 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_r} = 1$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	27/61

10.1.2 측정 데이터 : 게이트 시간을 1 s로 10회 측정한 측정 값 (단위 : MHz)

9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 96

10.1.3 불확도 산출

(1) Type A 불확도

평균 : $\bar{x} = 9.999\,999\,96 \text{ MHz}$

$$\sigma_y(1 \text{ s}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^9 (y_{i+1} - y_i)^2}}{2(10-1)} \cong 2.31 \times 10^{-9} \text{ (}\tau=1 \text{ s 에 대한 단기 안정도)}$$

$$u(f_c) = 2.31 \times 10^{-9} \times 10^7 \text{ Hz} = 2.31 \times 10^{-2} \text{ Hz}$$

자유도 : $\nu_c = \infty$

(2) Type B 불확도

◦ GPS 수신기의 교정 성적서로부터

$$u(f_{gps}) = \frac{2.0 \times 10^{-10}}{2} \times 10^7 \text{ Hz} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

자유도 : $\nu_{gps} = \infty$

◦ Frequency counter의 장기 안정도로부터

$$u(f_{ls}) = \frac{1.2 \times 10^{-10}}{\sqrt{3}} \times 10^7 \text{ Hz} = 0.7 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

자유도 : $\nu_{ls} = \infty$

◦ Frequency Counter의 분해능으로부터

$$u(f_r) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \text{ Hz} = 0.0289 \text{ Hz}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	28/61

자유도 : $\nu_r = \infty$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 u_c(f) &= \sqrt{u^2(f_{gps}) + u^2(f_{ac}) + u^2(f_{ls}) + u^2(f_r)} \\
 &= \sqrt{(2.31 \times 10^{-2})^2 + (1.1 \times 10^{-4})^2 + (0.7 \times 10^{-4})^2 + 0.0289^2} \\
 &= 0.037
 \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(f)}{\frac{u^4(f_c)}{\nu_c} + \frac{u^4(f_{gps})}{\nu_{gps}} + \frac{u^4(f_{ls})}{\nu_{ls}} + \frac{u^4(f_r)}{\nu_r}} \\
 &= \frac{0.037}{\frac{(2.31 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(1.1 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(0.7 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{0.0289^4}{\infty}} \\
 &= \infty
 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 0.037 \times 2 = 0.074 \text{ Hz}$$

(6) 불확도 총괄표

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	29/61

불확도 요인	종류	표준 불확도 [Hz]	감도계수	확률분포	적용인자	자유도
allan variance	Type A	2.31×10^{-2}	1	정 규	1	∞
GPS 수신기 성적서	Type A	1.1×10^{-4}	1	정 규	2	∞
Frequency Counter의 장기 안정도	Type B	0.7×10^{-4}	1	직 각	$1/\sqrt{3}$	∞
Frequency 의 분해능	Type B	0.0289	1	직 각	$1/2\sqrt{3}$	∞
$u_c(f)$	합성 표준 불확도	0.037		-	-	-
U	확장 불확도	0.074		t-분포	2	-

10.2 교정 출력단 레벨 정확도 교정 : 그림 2

10.2.1 신호레벨 측정의 수학적 모델 설정

$$P_{gZ_0} = \frac{M_u(P_m - (t + D))}{P_i K_b m}$$

$$\circ \quad m = \frac{M_{uc}(P_{mc} - t)}{K_c P_{cal}}$$

- m : 전력계의 이득항

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	30/61

- M_{uc} : 전력 측전용 센서와 전력계 내부 교정 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
- P_{mc} : 교정기간 동안 전력계가 지시한 전력 레벨
- t : 전력계의 zero offset
- K_c : 전력 측정용 센서의 교정 주파수에서 교정인자
- P_{cal} : 전력계 교정출력에서 Z_0 에 전달되는 전력

- M_u : 전력 측전용 센서와 신호원 사이의 부정합에 의한 이득

- P_m : 전력계가 읽은값

- P_l : 전력 측정용 센서의 비선형 항

- K_b : 측정 주파수에서 전력 측정용 센서의 교정인자

- $t = Z_s + Z_c + N$
 - Z_s : 전력계의 zero set
 - Z_c : 전력계의 zero carryover
 - N : 전력계 잡음

- D : 전력계 Drift

10.2.2 Type-B 상대 불확도

$$\frac{u(P_{gZ_0})}{P_{gZ_0}} = \sqrt{\frac{u^2(M_u)}{M_u^2} + \frac{u^2(P_m)}{\{P_m - (t + D)\}^2} + \frac{u^2(D)}{\{P_m - (t + D)\}^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + \frac{u^2(m_{uc})}{M_{uc}^2}}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	31/61

$$\begin{aligned}
& + \frac{u^2(P_{mc})}{(P_{mc}-t)^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{\{P_m-(t+D)\}^2} + \frac{1}{(P_{mc}-t)^2} \right. \\
& \left. - \frac{1}{K_c P_{cal} m \{P_m-(t+D)\}} \right) \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}
\end{aligned}$$

◦ 다음의 경우에 대하여 Type-B 상대 불확도를 구하면 다음과 같다.

$$- M_u = 1, M_{uc} = 1, P_{mc} = P_{cal}, Z_s = 0, Z_c = 0, N = 0, D = 0, t = 0, m = \frac{1}{K_c}$$

$$- \frac{u(P_{gZ_0})}{P_{gZ_0}} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2}}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_l)}{P_l^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}
\end{aligned}$$

◦ $u(M_u)$: 센서와 스펙트럼 분석기의 300 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.040$

- Spectrum Analyzer의 교정 출력 반사계수 : $\Gamma_g = 0.1$

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = 0.04 \times 0.1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.280 \%$$

◦ $u(M_{uc})$: 센서와 전력 측정기의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.038$

- Spectrum Analyzer의 교정 출력 반사계수 : $\Gamma_g = 0.1$

$$- \frac{u(M_{uc})}{M_{uc}} = 0.038 \times 0.1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.266 \%$$

◦ $u(P_m) = \pm 0.5 \%$: 전력 측정기의 instrumentation 불확도

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	32/61

$$- \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(P_{mc}) = \pm 0.5 \%$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- P_m = -20 \text{ dBm} \text{ 즉, } 10 \text{ uW} \text{이므로}$$

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10 \times 10^{-6}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0087 \%$$

- $u(K_b) = \pm 1 \%$: 300 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_b)}{K_b} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

- $u(K_c) = \pm 1 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

- $u(P_j) = \pm 3 \%$: 센서의 비선형 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.03}{2} = 1.5 \%$$

- $u(P_{cal}) = \pm 0.9 \%$: 전력계의 50 MHz 교정출력 불확도

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	33/61

$$- \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.45 \%$$

- $u(Z_s) = \pm 50 \text{ pW}$: 전력계의 zero set 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-6}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0003 \%$$

- $u(Z_c) = 0$: 전력계의 zero carryover는 instrumentation 불확도에 포함됨

$$- u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-6}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.00042 \%$$

$$\begin{aligned}
 \circ u_B(P_{gZ_0}) &= \sqrt{.0028^2 + 0.00266^2 + 0.003^2 + .003^2 + .000087^2 + 0.005^2 + 0.005^2} \\
 &\quad \sqrt{+ 0.015^2 + 0.0045^2 + 0.000003^2 + 0.0000042^2} \\
 &= 0.0179 = 1.79 \%
 \end{aligned}$$

10.2.3 측정 데이터 : 스펙트럼 분석기의 교정 출력을 10회 반복 측정한 값

19.97 dBm, 19.99 dBm, 19.96 dBm, 20.02 dBm, 20.00 dBm,
19.98 dBm, 19.94 dBm, 19.96 dBm, 20.04 dBm, 19.98 dBm

10.2.4 불확도 산출

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	34/61

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 19.984 \text{ dBm}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.030 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.0094 \text{ dB}$$

복 측정에 의한 출력레벨 불확도 :

$$u_A(P_{gZ0}) = s(\bar{x}) = 0.0094 \text{ dB} = 0.22 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(P_{gZ0}) = 5$$

(2) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(P_{gZ0}) &= \sqrt{u_A^2(P_{gZ0}) + u_B^2(P_{gZ0})} = \sqrt{0.0179^2 + 0.0022^2} \\ &= 0.0180 = 1.8 \% \end{aligned}$$

(3) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(P_{gZ0})}{\frac{u_A^4(P_{gZ0})}{\nu_A(P_{gZ0})} + \frac{u_B^4(P_{gZ0})}{\nu_B(P_{gZ0})}} \\ &= \frac{0.18^4}{\frac{0.0022^4}{9} + \frac{0.0179^4}{\infty}} \\ &= 269 \ 887 \ 547 \end{aligned}$$

(4) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(P_{gZ0})k = 1.8 \% \times 2 = 3.6 \% = 0.15 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	35/61

10.2.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값, $\pm \%$	확률분포	적용인자	표준 불확도
M_u	스펙트럼 분석기 교정 출력과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.04$	U	1	0.28 %
M_{uc}	전력계의 교정원과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.038$	U	1	0.17 %
P_m	전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
P_{mc}	교정기간 동안 전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
D	전력계 drift	± 15 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0087 %
K_b	센서 교정인자	1 %	정규	2	0.5 %
K_c	50 MHz에서 센서 교정인자	0	직각	—	0 %
P_1	센서 선형성	3.0 %	정규	2	1.5 %
P_{cal}	전력계 교정 출력 전력	0.9 %	정규	2	0.45 %
Z_s	전력계 zero set	± 50 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0005 %
Z_c	전력계 zero carryover	0	직각	$\sqrt{3}$	0 %
N	전력계와 센서 잡음	± 70 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0042 %
$u_A(P_{gz0})$	Type-A 불확도	0.21 %	정규	1	0.21 %
$u_c(P_{gz0})$	합성 불확도 : RSS				1.8 %
U	확장 불확도		K=2		3.6 % 0.15 dB

10.3 RF 부분의 평균 잡음 레벨 교정: 그림 3

10.3.1. 수학적 모델 설정

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	36/61

(1) 평균 잡음 레벨 측정의 수학적 모델 설정

$$NL_a = NL_m + \Delta NL_m$$

- NL_m : 측정한 값

- ΔNL_m : type-B 불확도로 이 경우 부하 50 이 측정에 영향을 미치지 않으므로 “0”이다.

(2) 합성 불확도

$$u_c(NL_a) = \frac{\partial(NL_a)}{\partial(NL_m)} u(NL_m)$$

(3) 감도계수

$$c = \frac{\partial(NL_a)}{\partial(NL_m)} = 1$$

10.3.2. 측정 data (단위 dBm, 측정 Frequency : 1 MHz)

-138.4 dBm, -139.2 dBm, -138.9 dBm, -138.7 dBm, -138.4 dBm,
-138.8 dBm, -140.0 dBm, -138.8 dBm, -140.1 dBm, -138.2 dBm

10.3.3. 불확도 산출

(1) Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 138.95 \text{ dBm}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.65 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.21 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	37/61

반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : $u_A(NL_a) = s(\bar{x}) = 0.21 \text{ dB}$

자유도 : $\nu_A(NL_a) = 9$

(2) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(NL_a) &= \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \\ &= \sqrt{0.21^2 + 0^2} = 0.21 \text{ dB} \end{aligned}$$

(3) 유효 자유도

$$\nu_{eff} = 9$$

(4) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(NL_a) \times 2 = 0.21 \times 2 = 0.42 \text{ dB}$$

10.3.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(NL_a)$	Type A 불확도	0.21 dB	정규	1	0.21 dB
$u_c(NL_a)$	합성 불확도 : RSS				0.21 dB
U	확장 불확도		K=2		0.42 dB

10.4 주파수 분해능 대역폭 정확도 및 선택도 교정 : 그림 4

10.4.1. 수학적 모델 설정

(1) 분해능 대역폭 측정의 수학적 모델 설정

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	38/61

$$BW = f_h - f_l$$

- f_h : 3 dB 대역폭에서 높은 주파수
- f_l : 3 dB 대역폭에서 낮은 주파수

(2) 합성 불확도

$$u(BW) = \sqrt{\frac{\partial^2(BW)}{\partial^2(f_h)} u^2(f_h) + \frac{\partial^2(BW)}{\partial^2(f_l)} u^2(f_l)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial(BW)}{\partial(f_h)} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(BW)}{\partial(f_l)} = -1$$

10.4.2. 측정 data (주파수: 300 MHz, RBW : 3 MHz, SPAN : 10 MHz)

3.025 MHz, 3.026 MHz, 3.027 MHz, 3.025 MHz, 3.023 MHz,
3.027 MHz, 3.026 MHz, 3.026 MHz, 3.025 MHz, 3.027 MHz

10.4.3. 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 3.0257 \text{ MHz}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 1.252 \text{ Hz}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 396 \text{ Hz}$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u_A(BW) = s(\bar{x}) = 0.0004 \text{ MHz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(BW) = 9$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	39/61

(2) Type B 불확도

◦ f_h 와 f_l 의 불확도는 다음과 같이 구해진다.

$$- \Delta f_h = SL_h \times MR_h$$

$$- \Delta f_l = SL_l \times MR_l$$

$$- SL_h = SL_l = (RBW \times 0.091) / \text{dB} : \text{IF 필터의 3 dB 대역폭 점의 기울기}$$

$$- MR_h = MR_l = \pm 0.04 \text{ dB} : \text{Marker의 분해능}$$

$$◦ u(f_h) = \frac{3 \text{ MHz} \times 0.09 / \text{dB} \times 0.04 \text{ dB}}{\sqrt{3}} = 6 \text{ 234 Hz}$$

$$- \text{자유도} : \nu_{fh} = \infty$$

$$◦ u(f_l) = \frac{3 \text{ MHz} \times 0.09 / \text{dB} \times 0.04 \text{ dB}}{\sqrt{3}} = 6 \text{ 234 Hz}$$

$$- \text{자유도} : \nu_{fl} = \infty$$

◦ 신호원 및 스펙트럼 분석기의 안정도 : 기준 주파수인 10 MHz를 공통으로 사용함으로

$$- \text{Frequency reference error} = \text{aging rate} + \text{period of time since last adjustment} + \text{initial achievable accuracy} + \text{temperature stability}$$

$$= 1 \times 10^{-7} + 2.2 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-8}$$

$$= 13.2 \times 10^{-7}$$

$$- u(s) = \frac{13.2 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \times 300 \text{ MHz} = 228.63 \text{ Hz}$$

$$- u(ss) = \sqrt{228.63^2 + 228.63^2} = 228.63 \text{ Hz}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	40/61

- 자유도 : $\nu_{ss} = \infty$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 u_c(BW) &= \sqrt{u_A^2(BW) + u^2(f_h) + u^2(f_l) + u^2(ss)} \\
 &= \sqrt{1252^2 + 6234^2 + 6234^2 + 228.63^2} = 8\,908 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(BW)}{\frac{u_A^4(BW)}{\nu_A(BW)} + \frac{u^4(f_h)}{\nu_{fh}} + \frac{u^4(f_l)}{\nu_{fl}} + \frac{u^4(ss)}{\nu_{ss}}} \\
 &= \frac{8908^4}{\frac{1252^4}{9} + \frac{6234^4}{\infty} + \frac{6234^4}{\infty} + \frac{228.63^4}{\infty}} \\
 &= \infty
 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(BW) \times 2 = 8\,908 \times 2 = 17\,816 \text{ Hz}$$

10.4.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(BW)$	Type A 불확도	1 252 Hz	정규	1	1 252 Hz
$u(f_h)$	Type B 불확도	10 978 Hz	직각	$\sqrt{3}$	6 234 Hz
$u(f_l)$	Type B 불확도	10 978 Hz	직각	$\sqrt{3}$	6 234 Hz
$u(ss)$	Type B 불확도	499.92 Hz	직각	$\sqrt{3}$	288.63 Hz
$u_c(BW)$	합성 표준 불확도 : RSS				8 908 Hz
U	확장 불확도		K=2		17 816 Hz

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	41/61

10.5 주파수 분해능 대역폭 변화 교정 : 그림 5

10.5.1. 수학적 모델 설정

(1) 분해능 대역폭 변화 교정 수학적 모델 설정

$$\Delta dB = \Delta dB_m + \Delta dB_s$$

- ΔdB_m : 측정된 값

- ΔdB_s : 신호원의 출력 진폭 계통오차

(2) 합성 불확도

$$u(\Delta dB) = \sqrt{\frac{\partial^2(\Delta dB)}{\partial^2(\Delta dB_m)} u^2(\Delta dB_m) + \frac{\partial^2(\Delta dB)}{\partial^2(\Delta dB_s)} u^2(\Delta dB_s)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta dB)}{\partial(\Delta dB_m)} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial(\Delta dB)}{\partial(\Delta dB_s)} = 1$$

10.5.2. 측정 data (기준 : RBW = 3 kHz, SPAN : 50 kHz, 측정 : RBW= 1 kHz)

0.01 dB, 0.02 dB, 0.00 dB, 0.01 dB, 0.02 dB, 0.01 dB, 0.00 dB,
0.01 dB, 0.02 dB, 0.00 dB

10.5.3. 불확도 산출

(1) Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 0.01 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	42/61

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.008 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.003 \text{ dB}$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u_A(\Delta dB_m) = s(\bar{x}) = 0.003 \text{ dB}$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(\Delta dB_m) = 9$$

(2) Type B 불확도

- 측정이 진행되는 동안 신호원의 출력 변화는 무시할 수 있으므로 고려 대상에서 제외

$$\text{표준기인 신호원의 불확도 : } u(\Delta dB_s) = 0$$

$$\text{자유도 : } \nu(\Delta dB_s) = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(\Delta dB) &= \sqrt{u_A^2(\Delta dB_m) + u^2(\Delta dB_s)} \\ &= \sqrt{0.003^2 + 0^2} = 0.003 \text{ dB} \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(\Delta dB)}{\frac{u_A^4(\Delta dB_m)}{\nu_A(\Delta dB_m)} + \frac{u^4(\Delta dB_s)}{\nu(\Delta dB_s)}} \\ &= \frac{0.003^4}{\frac{0.003^4}{9} + \frac{0^4}{\infty}} = 9 \end{aligned}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	43/61

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(\Delta dB) \times 2 = 0.003 \times 2 = 0.006 \text{ dB}$$

10.5.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(\Delta dB)$	Type A 불확도	0.003 dB	정규	1	0.003 dB
$u(\Delta dB_s)$	Type B 불확도	0	직각	$\sqrt{3}$	0 dB
$u_c(\Delta dB)$	합성 표준 불확도 : RSS				0.003 dB
U	확장 불확도		K=2		0.006 dB

10.6 주파수 표시 정확도 교정 : 그림 5

10.6.1. 수학적 모델 설정

(1) 주파수 표시 측정의 수학적 모델 설정

$$F = F_m + \Delta F_m$$

- F_m : 측정한 값

- ΔF_m : 표준기인 RF signal generator 및 스펙트럼 분석기의 type B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(F) = \sqrt{\frac{\partial^2 F}{\partial^2 F_m} u^2(F_m) + \frac{\partial^2 F}{\partial^2 \Delta F_m} u^2(\Delta F_m)}$$

(3) 감도계수

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	44/61

$$c_1 = \frac{\partial F}{\partial F_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial F}{\partial \Delta F_m} = 1$$

10.6.2. 측정data (측정 주파수 : 1.5 GHz, Span : 10 MHz, RBW : 120 kHz)

1.500 12 GHz, 1.500 07 GHz, 1.499 95 GHz, 1.499 99 GHz, 1.500 10 GHz,
1.500 08 GHz, 1.500 03 GHz, 1.499 98 GHz, 1.499 96 GHz, 1.500 12 GHz

10.6.3. 불확도 산출

(1) Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1.500\,04 \text{ GHz}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 66.3 \text{ kHz}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 21 \text{ kHz}$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u_A(F) = s(\bar{x}) = 21 \text{ kHz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(F) = 9$$

(2) Type B 불확도

◦ 신호원 및 스펙트럼 분석기의 안정도 : 기준 주파수인 10 MHz를 공통으로 사용함으로

- Ferquency reference error = aging rate + period of time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

$$= 1 \times 10^{-7} + 2.2 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-8} = 13.2 \times 10^{-8}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	45/61

$$- u(s) = \frac{13.2 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \times 1.5 \text{ GHz} = 1.143 \text{ kHz}$$

$$- u_{ss}(\Delta F_m) = \frac{\sqrt{1143^2 + 1143^2}}{\sqrt{3}} = 1.143 \text{ kHz}$$

$$- \text{자유도} : \nu_{ss}(\Delta F_m) = \infty$$

◦ Spectrum Analyzer 의 분해능 불확도

- Span 20 MHz : 분해능 100 kHz

스펙트럼 분석기의 분해능에 의한 불확도 :

$$u_{spa}(\Delta F_m) = \frac{100}{\sqrt{3}} = 57.74 \text{ kHz}$$

$$\text{자유도} : \nu_{spa}(\Delta F_m) = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(F) &= \sqrt{u_A^2(F) + u_{ss}^2(\Delta F_m) + u_{spa}^2(\Delta F_m)} \\ &= \sqrt{21^2 + 1.143^2 + 57.74^2} = 61.45 \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(F)}{\frac{u_A^4(F_m)}{\nu_A(F_m)} + \frac{u_{ss}^4(\Delta F_m)}{\nu_{ss}(\Delta F_m)} + \frac{u_{spa}^4(\Delta F_m)}{\nu_{spa}(\Delta F_m)}} \\ &= \frac{61.45^4}{\frac{21^4}{9} + \frac{1.143^4}{\infty} + \frac{57.74^4}{\infty}} = 659.86 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(F) \times 2 = 61.45 \text{ kHz} \times 2 = 122.9 \text{ kHz}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	46/61

10.6.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(F)$	Type A 불확도	21 kHz	정규	1	21 kHz
$u_{sig}(\Delta F_m)$	Type B 불확도	2.286 kHz	직각	$\sqrt{3}$	1.143 Hz
$u_{spa}(\Delta F_m)$	Type B 불확도	100 kHz	직각	$\sqrt{3}$	57.74 kHz
$u_c(F)$	합성 표준 불확도 : RSS				61.45 kHz
U	확장 불확도		K=2		122.9 kHz

10.7 주파수 범위 정확도 교정 (Calibration of Frequency Span Accuracy)

10.7.1 규격

- Span \leq 10 MHz: Span 값의 2 % + 10 Hz, Span \geq 10 MHz: Span 값의 3 %

10.7.2 수학적 모델 설정

(1) 주파수 범위 정확도 측정의 수학적 모델 설정

$$F_{span} = F_m + \Delta F_m$$

- F_m : 표 4에 의한 측정 결과
- ΔF : 표준기인 RF signal generator 및 스펙트럼 분석기의 type B 불확도

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	47/61

(2) 합성 불확도

$$u(F_{span}) = \sqrt{\frac{\partial^2 F_{span}}{\partial^2 F_m} u^2(F_m) + \frac{\partial^2 F_{span}}{\partial^2 \Delta F_m} u^2(\Delta F_m)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial F_{span}}{\partial F_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial F_{span}}{\partial \Delta F_m} = 1$$

10.7.3 측정 data (측정 중심 주파수 : 10 MHz, Span : 10 MHz, RBW : 3 kHz)

10.02 MHz, 10.05 MHz, 9.97 MHz, 10.00 MHz, 9.95 MHz, 10.08 MHz,
9.92 MHz, 9.97 MHz, 10.02 MHz, 9.98 MHz

10.7.4 불확도 산출

(1) Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 9.996 \text{ MHz}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.048 \text{ MHz}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.015 \text{ MHz}$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u_A(F_m) = s(\bar{x}) = 0.015 \text{ MHz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(F_m) = 9$$

(2) Type B 불확도

- 신호원 및 스펙트럼 분석기의 안정도 : 기준 주파수인 10 MHz를 공통으

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	48/61

로 사용함으로

- Frequency reference error = aging rate + period of time since last adjustment + initial achievable accuracy + temperature stability

$$= 1 \times 10^{-7} + 2.2 \times 10^{-8} + 1 \times 10^{-8}$$

$$= 13.2 \times 10^{-7}$$

$$- u(s) = \frac{13.2 \times 10^{-7}}{\sqrt{3}} \times 10 \text{ MHz} = 7.621 \text{ Hz}$$

$$- u_{ss}(\Delta F_m) = \frac{\sqrt{7.621^2 + 7.621^2}}{\sqrt{3}} = 6.223 \text{ Hz}$$

$$- \text{자유도} : \nu_{ss}(\Delta F_m) = \infty$$

◦ Spectrum Analyzer 의 분해능 불확도

- Span 20 MHz : 분해능 100 kHz

스펙트럼 분석기의 분해능에 의한 불확도 :

$$u_{spa}(\Delta F_m) = \frac{100}{\sqrt{3}} = 57.74 \text{ kHz}$$

$$\text{자유도} : \nu_{spa}(\Delta F_m) = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$u_c(F_{span}) = \sqrt{u_A^2(F_m) + u_{ss}^2(\Delta F_m) + u_{spa}^2(\Delta F_m)}$$

$$= \sqrt{15^2 + (6.223 \times 10^{-3})^2 + 57.74^2} = 59.66 \text{ kHz}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	49/61

(4) 유효 자유도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(F_{span})}{\frac{u_A^4(F_m)}{\nu_A(F_m)} + \frac{u_{ss}^4(\Delta F_m)}{\nu_{ss}(\Delta F_m)} + \frac{u_{spa}^4(\Delta F_m)}{\nu_{spa}(\Delta F_m)}} = \frac{59.66^4}{\frac{15^4}{9} + \frac{(6.223 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{57.74^4}{\infty}} = 2252$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(F) \times 2 = 59.66 \text{ kHz} \times 2 = 119.32 \text{ kHz}$$

10.7.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률 분포	적용 인자	표준 불확도
$u_A(F_{span})$	Type A 불확도	15 kHz	정규	1	15 kHz
$u_{sig}(\Delta F)$	Type B 불확도	$6.223 \times 10^{-3} \text{ Hz}$	직각	$\sqrt{3}$	0 Hz
$u_{spa}(\Delta F_m)$	Type B 불확도	100 kHz	직각	$\sqrt{3}$	57.74 kHz
$u_c(F)$	합성 표준 불확도 : RSS				59.66 kHz
U	확장 불확도		K=2		119.32 kHz

10.8 눈금 충실도 교정 (Calibration of Scale Fidelity)

10.8.1 규격 : 표 5 참조

10.8.2 수학적 모델 설정

(1) 눈금 충실도 측정의 수학적 모델 설정

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	50/61

$$SF = SF_m + \Delta SF_m$$

- SF_m : 표 5에 의한 측정 결과
- ΔF : 표준기인 RF signal generator, 감쇠기 및 스펙트럼 분석기의 type B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(SF) = \sqrt{\frac{\partial^2 SF}{\partial^2 SF_m} u^2(SF_m) + \frac{\partial^2 SF}{\partial^2 \Delta SF_m} u^2(\Delta SF_m)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial SF}{\partial SF_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial SF}{\partial \Delta SF_m} = 1$$

10.8.3 측정 data (측정주파수: 50 MHz, Span: 50 kHz, RBW: 3 kHz, 규격: 4 dB±0.04 dB)

4.01 dB, 4.02 dB, 3.99 dB, 4.01 dB, 3.98 dB, 4.00 dB, 3.99 dB,
3.98 dB, 4.00 dB, 4.01 dB

10.8.4 불확도 산출

(1) Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 3.999 \text{ dB}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.014 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.004 \text{ dB}$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u_A(SF_m) = s(\bar{x}) = 0.004 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	51/61

자유도 : $\nu_A(SF_m) = 9$

(2) Type B 불확도

◦ 측정이 진행되는 동안 신호원의 출력 변화는 무시할 수 있으므로 고려 대상에서 제외

표준기인 신호원의 불확도 : $u_{sig}(\Delta SF_m) = 0$

자유도 : $\nu_{sig}(\Delta SF_m) = \infty$

◦ Spectrum Analyzer 의 분해능 불확도

– 분해능 : 0.01 dB

스펙트럼 분석기의 분해능에 의한 불확도 :

$$u_{spa}(\Delta SF_m) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ dB}$$

자유도 : $\nu_{spa}(\Delta SF_m) = \infty$

◦ 가변 감쇠기의 불확도

가변 감쇠기	불확도 (dB)	적용인자	표준 불확도 (dB)	측정하기 위한 REF LEV로 부터의 dB차
1 dB Step (0 dB ~ 9 dB)	± 0.262	2	± 0.134	-4 dB ~ -50 dB
10 dB Step (0 dB ~ 40 dB)	± 0.18	2	± 0.09	

가변 감쇠기 의한 불확도 :

$$u_{ATT}(\Delta SF_m) = \sqrt{.134^2 + 0.09^2} = 0.161 \text{ dB}$$

자유도 : $\nu_{ATT}(\Delta SF_m) = \infty$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	52/61

(3) 합성 표준 불확도

$$u_c(SF) = \sqrt{u_A^2(SF_m) + u_{sig}^2(\Delta SF_m) + u_{spa}^2(\Delta SF_m) + u_{ATT}^2(\Delta SF_m)}$$

$$= \sqrt{0.004^2 + 0^2 + 0.0029^2 + 0.161^2} = 0.161 \text{ dB}$$

(4) 유효 자유도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(SF)}{\frac{u_A^4(SF_m)}{\nu_A(SF_m)} + \frac{u_{sig}^4(\Delta SF_m)}{\nu_{sig}(\Delta SF_m)} + \frac{u_{spa}^4(\Delta SF_m)}{\nu_{spa}(\Delta SF_m)} + \frac{u_{ATT}^4(\Delta SF_m)}{\nu_{ATT}(\Delta SF_m)}}$$

$$= \frac{0.161^4}{\frac{0.004^4}{9} + \frac{0^4}{\infty} + \frac{0.0029^4}{\infty} + \frac{0.161^4}{\infty}} = 2\,362\,142$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(SF) \times 2 = 0.161 \text{ dB} \times 2 = 0.322 \text{ dB}$$

10.8.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값	확률분포	적용인자	표준 불확도
$u_A(SF_m)$	Type A 불확도	0.004 dB	정규	1	0.004 dB
$u_{sig}(\Delta SF_m)$	Type B 불확도	0 dB	직각	$\sqrt{3}$	0 dB
$u_{spa}(\Delta SF_m)$	Type B 불확도	0.0050 dB	직각	$\sqrt{3}$	0.0029 dB
$u_{ATT}(\Delta SF_m)$	Type B 불확도	0.161 dB	정규	1	0.161 dB
$u_c(SF)$	합성 표준 불확도 : RSS				0.161 dB
U	확장 불확도		K=2		0.322 dB

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	53/61

10.9 진폭 측정 정확도 교정 (Calibration of Absolute Amplitude Accuracy)

10.9.1 수학적 모델 설정

(1) 진폭 측정 정확도 측정의 수학적 모델 설정

$$\Delta A = \Delta A_m + \Delta A_a$$

- ΔA : 전력계의 지시값과 스펙트럼 분석기 지시값의 차
- ΔA_m : 전력계의 지시값과 스펙트럼 분석기 지시값의 측정값
- ΔA_a : 전력계의 지시값과 스펙트럼 분석기 지시값 차 측정의 오차

(2) 합성 불확도

$$u(\Delta A) = \sqrt{\frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 \Delta A_m} u^2(\Delta A_m) + \frac{\partial^2 \Delta A}{\partial^2 \Delta A_a} u^2(\Delta A_a)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Delta A}{\partial \Delta A_m} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta A}{\partial \Delta A_a} = 1$$

10.9.2 측정 data (측정주파수: 1 000 MHz, Span: 500 kHz)

0.33 dB, 0.32 dB, 0.33 dB, 0.31 dB, 0.31 dB, 0.33 dB, 0.30 dB,
0.31 dB, 0.30 dB, 0.31 dB

10.9.3 불확도 산출

10.9.3.1 Type A형 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 0.315 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	54/61

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.004 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.001 \text{ dB}$$

반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 :

$$u_A(\Delta A) = s(\bar{x}) = 0.001 \text{ dB} = 0.023 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(\Delta A) = 9$$

10.9.3.2 Type B 불확도

(1) Spectrum Analyzer 의 분해능 불확도

- 분해능 : 0.01 dB

스펙트럼 분석기의 분해능에 의한 불확도 :

$$u_{spa}(\Delta A_a) = \frac{0.01}{2\sqrt{3}} = 0.0029 \text{ dB} = 0.067 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_{spa}(\Delta A_a) = \infty$$

(2) 전력계를 이용한 신호레벨 측정 및 불확도

$$P_{gz_0} = \frac{M_u(P_m - (t + D))}{P_l K_b m}$$

$$\circ m = \frac{M_{uc}(P_{mc} - t)}{K_c P_{cal}}$$

- m : 전력계의 이득항

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	55/61

– M_{uc} : 전력 측전용 센서와 전력계 내부 교정 신호원 사이의 부정합에 의한 이득

– P_{mc} : 교정기간 동안 전력계가 지시한 전력 레벨

– t : 전력계의 zero offset

– K_c : 전력 측정용 센서의 교정 주파수에서 교정인자

– P_{cal} : 전력계 교정출력에서 Z_0 에 전달되는 전력

◦ M_u : 전력 측전용 센서와 신호원 사이의 부정합에 의한 이득

◦ P_m : 전력계가 읽은값

◦ P_l : 전력 측정용 센서의 비선형 항

◦ K_b : 측정 주파수에서 전력 측정용 센서의 교정인자

◦ $t = Z_s + Z_c + N$

– Z_s : 전력계의 zero set

– Z_c : 전력계의 zero carryover

– N : 전력계 잡음

◦ D : 전력계 Drift

(3) 전력 측정의 Type-B 상대 불확도

$$\frac{u(P_{gZ_0})}{P_{gZ_0}} = \sqrt{\frac{u^2(M_u)}{M_u^2} + \frac{u^2(P_m)}{\{P_m - (t + D)\}^2} + \frac{u^2(D)}{\{P_m - (t + D)\}^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2}}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	56/61

$$\begin{aligned}
& + \frac{u^2(m_{uc})}{M_{uc}^2} + \frac{u^2(P_{mc})}{(P_{mc}-t)^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}} + \left(\frac{1}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \right. \\
& \left. \frac{1}{(P_{mc}-t)^2} - \frac{1}{K_c P_{cal} m \{P_m - (t+D)\}} \right) \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}
\end{aligned}$$

◦ 다음의 경우에 대하여 Type-B 상대 불확도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
- \quad & M_u=1, M_{uc}=1, P_{mc}=P_{cal}, Z_s=0, Z_c=0, N=0, D=0, t=0, m=\frac{1}{K_c} \\
- \quad & \frac{u(P_{gz_0})}{P_{gz_0}} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2}} \\
& + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_l)}{P_l^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}
\end{aligned}$$

◦ $u(M_u)$: 센서와 Power Splitter 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.040$

- Power Splitter의 반사계수 : $\Gamma_g = 0.1$ (VSWR=1.2)

$$- \quad \frac{u(M_u)}{M_u} = 0.04 \times 0.1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.280 \%$$

◦ $u(M_{uc})$: 센서와 전력 측정기의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.038$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	57/61

- Spectrum Analyzer의 교정 출력 반사계수 : $\Gamma_g = 0.1$

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = 0.038 \times 0.1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.266 \%$$

◦ $u(P_m) = \pm 0.5 \%$: 전력 측정기의 instrumentation 불확도

$$- \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

◦ $u(P_{mc}) = \pm 0.5 \%$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

◦ $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

- $P_m = -20 \text{ dBm}$ 즉, 10 uW 이므로

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10 \times 10^{-6}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0087 \%$$

◦ $u(K_b) = \pm 1 \%$: 300 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_b)}{K_b} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

◦ $u(K_c) = \pm 1 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	58/61

- $u(P_I) = \pm 3 \%$: 센서의 비선형 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.03}{2} = 1.5 \%$$

- $u(P_{cal}) = \pm 0.9 \%$: 전력계의 50 MHz 교정출력 불확도

$$- \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.45 \%$$

- $u(Z_s) = \pm 50 \text{ pW}$: 전력계의 zero set 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{79.432 \times 10^{-9}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \\ = 0.0004 \%$$

- $u(Z_c) = 0$: 전력계의 zero carryover는 instrumentation 불확도에 포함됨

$$- u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의 잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{79.432 \times 10^{-9}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0005 \%$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	59/61

$$\begin{aligned}
 \circ u_B(P_{gZ_0}) &= \sqrt{.0028^2 + 0.00266^2 + 0.003^2 + .003^2 + .000087^2 + 0.005^2} \\
 &\quad \sqrt{+0.005^2 + 0.015^2 + 0.0045^2 + 0.000004^2 + 0.000005^2} \\
 &= 0.0179 = 1.79 \%
 \end{aligned}$$

$$\circ \text{자유도 : } \nu_B(P_{gZ_0}) = \infty$$

10.9.4 불확도 산출

(1) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 u_c(\Delta A) &= \sqrt{u_A^2(\Delta A) + u_{spa}^2(\Delta A_a) + u_B^2(P_{gZ_0})} \\
 &= \sqrt{0.00023^2 + 0.00067^2 + 0.0179^2} \\
 &= 0.0180 = 1.8 \%
 \end{aligned}$$

(2) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(\Delta A)}{\frac{u_A^4(\Delta A)}{\nu_A(\Delta A)} + \frac{u_A^4(\Delta A_a)}{\nu_A(\Delta A_a)} + \frac{u_B^4(P_{gZ_0})}{\nu_B(P_{gZ_0})}} \\
 &= \frac{0.018^4}{\frac{0.00023^4}{9} + \frac{0.00067^4}{\infty} + \frac{0.0179^4}{\infty}} \\
 &= \infty
 \end{aligned}$$

(4) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(P_{gZ_0})k = 1.8 \% \times 2 = 3.6 \% = 0.15 \text{ dB}$$

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	60/61

10.9.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값, $\pm \%$	확율분포	적용인자	표준 불확도
M_u	스펙트럼 분석기 교정 출력과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.04$	U	1	0.28 %
M_{uc}	전력계의 교정원과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.038$	U	1	0.17 %
P_m	전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
P_{mc}	교정기간 동안 전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
D	전력계 drift	± 15 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0087 %
K_b	센서 교정인자	1 %	정규	2	0.5 %
K_c	50 MHz에서 센서 교정인자	0	직각	—	0 %
P_l	센서 선형성	3.0 %	정규	2	1.5 %
P_{cal}	전력계 교정 출력 전력	0.9 %	정규	2	0.45 %
Z_s	전력계 zero set	± 50 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0005 %
Z_c	전력계 zero carryover	0	직각	$\sqrt{3}$	0 %
N	전력계와 센서 잡음	± 70 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0042 %
$u_B(P_{gz0})$	Type-B 불확도	0.21 %	정규	1	1.79 %
$u_{spa}(\Delta A_a)$	Type-B 불확도	0.232 %	직각	$2\sqrt{3}$	0.067 %
$u_A(\Delta A)$	Type-A 불확도	0.023 %	정규	1	0.023 %
$u_c(P_{gz0})$	합성 불확도 : RSS				1.8 %
U	확장 불확도		K=2		3.6 % 0.15 dB

RRL	고주파 스펙트럼 분석기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Spectrum Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	61/61

11. 교정 성적서 작성법

11.1 한국 시험 교정기관 인증기구(KOLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목을 명확한 근거에 의하여 작성한다.

11.2 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존한다.

부 록 7

고주파 신호 발생기의 교정 지침서

고주파 신호 발생기의 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/27

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/27

목 차

1. 적용범위
2. 교정주기
3. 작성기준
4. 불확도 산출
5. 용어의 정의 및 명칭
6. 교정내용
7. 필요장비명세
8. 준비사항
9. 교정방법 및 절차
10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 추정
11. 교정 성적서 작성법

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/27

1. 적용범위

본 교정 지침서는 100 kHz ~ 1 300 MHz의 주파수 범위에서 사용하는 고주파 신호 발생기(RF Signal Generator)의 교정에 적용한다.

2. 교정주기

교정 주기는 국가 교정기관 지정제도 운영세칙의 별표 1에서 정한 표준 교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

3. 작성 기준

본 교정 지침서는 교정 절차의 유효성 확보를 위해서 한국계량측정협회가 발간한 고주파 신호 발생기 표준교정절차서 (KAST0 02-14-9050-164)에서 제시한 방법을 기준으로 작성 하였다.

4. 불확도 산출

4.1 Type-A 불확도

같은 조건에서 n번 반복 측정에 의한 우연오차로 다음 식과 같이 산출한다.

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/27

반복 측정에 의한 표준 불확도 : $u_c(x_i) = s(\bar{x})$

자유도 : n-1

4.2 Type-B 불확도

표준기의 교정 성적서와 교정 시스템의 불확도와 같이 4.1에서 다루지 않은 모든 불확도 요인으로부터 산출한다.

4.3 합성 표준 불확도

표준 불확도 산출시 측정에 의한 결과로부터 산출되지 않은 불확도는 적절한 감도계수를 이용하여 다음과 같이 바꾸어주어야 한다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}$$

윗 식에서

$$u_{c(y)} = c_i u_c(x_i)$$

- c_i : 감도계수
- $u_c(x_i)$: 표준 불확도

이다.

4.4 확장 불확도

$$U = k u_c(y) \quad (k=2)$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/27

5. 용어의 정의 및 명칭

5.1 변조 (modulation, FM/AM/PM)

반송파를 음성 또는 기타 신호파의 변화에 따라 변화시키는 조직을 말하며, 반송파에 신호파 크기에 따른 진폭 변화를 주는 것을 진폭 변조(amplitude modulation), 주파수 변화를 주는 것을 주파수 변조(frequency modulation) 위상 변화를 주는 것을 위상 변조(phase modulation)라 한다.

5.2 고조파 (harmonics wave)

주기적인 파의 주기 변화량에 있어 기본파 주파수의 정수배 주파수를 가진 성분

5.3 스퓨어리스 (non harmonic spurious)

주기적인 파의 기본적 주파수의 정수 배로 발생하는 고조파이외의 신호 성분

5.4 위상 동기 루프 (PLL, Phase Locked Loop)

귀환 신호를 이용하여 PLL의 출력 주파수와 위상을 PLL의 입력 주파수와 위상을 맞추는 것을 말한다.

6. 교정내용

신호 발생기(Signal Generator)의 각 기능에 대해 기기에 대해 기기의 사양에 적합하도록 정확하게 교정함으로써, 장비의 신뢰성을 높이고 장비의 성능 및 정확도를 판단함으로써, 정밀 측정 향상에 도움을 주는 것을 목적으로 하며 다음의 각 기능을 교정한다.

6.1 기준 주파수 정확도 (frequency accuracy of internal reference oscillator)

6.2 신호 레벨 정확도 (signal level accuracy)

6.3 변조도 정확도 (modulation accuracy)

6.4 신호 레벨 평탄도 정확도 (signal flatness accuracy)

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/27

7. 필요장비 명세

표준장비명	제조사	모델명	성능
Frequency Counter	SRS	SR620	Frequency Range : 10 Hz ~ 2.3 GHz
Network Analyzer	HP	8753C	300 kHz ~ 3 GHz
GPS Receiver	Odetics	425	2.0×10^{-11}
Measuring Receiver	HP	8902A	Frequency Range : 150 kHz ~ 1.3 GHz Power Range : +30 dBm ~ -127 dBm
Sensor Module	HP	11722A	Frequency Range : 150 kHz ~ 1.3 GHz Power Range : +30 dBm ~ -127 dBm
Spectrum Analyzer	HP	8542E	Frequency Range : 9 kHz ~ 2.9 GHz Power Range : +30 dBm ~ -146 dBm

8. 준비사항

8.1 교정전 교정 절차 및 주의 사항을 숙지한다.

8.2 교정실은 국가교정기관지정제도운영요령 제21조 5항의 환경조건을 만족해야 한다.

8.3 교정을 시작하기 전에 피 교정기기 및 교정기기들을 충분히 예열(warmup)시킨다. 이 때 특별한 사항이 없는 한 예열 시간은 각 기기 및 장비들의 매뉴얼에 따른다.

8.4 교정에 이용되는 모든 RF 장비의 특성 임피던스는 동일한 것으로 하며, 만약 다를 경우 임피던스 정합(matching) 시켜야 한다.

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/27

9. 교정방법 및 절차

9.1 기준 주파수 정확도 교정(frequency accuracy of internal reference oscillator)

그림 1과 같이 피 교정 고주파 신호 발생기의 기준 주파수 출력 (대부분 장비의 뒷면에위치)을 주파수 계수기의 입력에 연결한다.

주) 피 교정 신호 발생기의 동작방식이 PLL(Phase Locked Loop) 방식이 아닐 경우에는 여러 주파수를 설정하여 출력 값을 직접 측정하여 기록한다.



그림 1 기준 주파수 교정 장치

9.2 신호 레벨 정확도(signal level accuracy)

- (1) 고주파 신호 발생기의 출력단과 measuring receiver 입력단을 그림2.와 같이 연결한다.
- (2) 고주파 신호 발생기의 주파수 범위에 따라 적절히 설정한다.
- (3) 0 dBm을 측정시 주파수를 측정기의 사용빈도가 높은 지점으로 선택한 후 Measuring Receiver 로 측정을 하여 기준값으로 활용한다.
- (4) 0 dBm을 기준으로 설정값을 10 dB 간격으로 차례로 변경한 후 측정하여 기록한다.

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/27

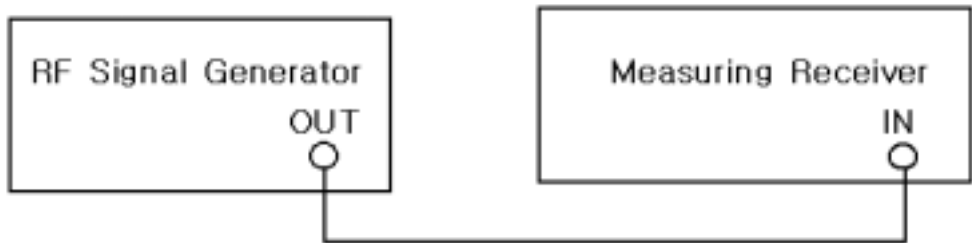


그림 2 고주파 신호원과 Measuring Receiver의 연결

9.3 변조도 정확도 (modulation accuracy)

- (1) 고주파 신호 발생기의 출력단과 Measuring Receiver 입력단을 그림2와 같이 연결한다.
- (2) 고주파 신호 발생기의 출력 레벨을 0 dBm으로 설정하고 적절한 주파수 범위에서 레벨 평탄도를 측정하여 기록한다.

9.4 신호 레벨 평탄도 정확도 (signal level flatness accuracy)

- (1) 고주파 신호발생기의 출력과 Spectrum analyzer의 입력단을 그림3과 같이 연결한다.
- (2) 고주파 신호 발생기의 출력 레벨을 -10 dBm으로 설정하고 적절한 주파수 범위에서 레벨 평탄도를 측정하여 기록한다.

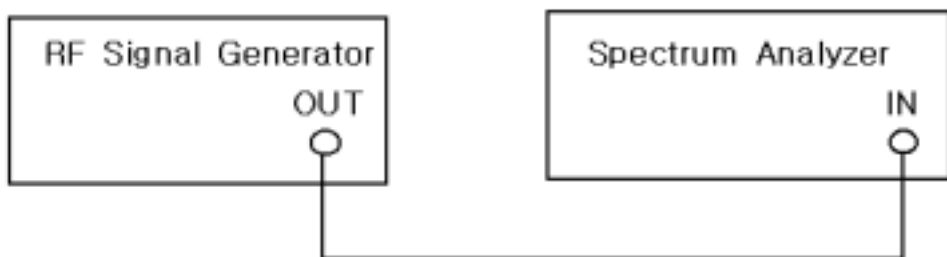


그림 3 고주파 신호원과 Spectrum Analyzer의 연결

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/27

10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 산출

10.1 기준 주파수 측정 및 불확도 산출 : 그림 1

10.1.1 수학적 모델 설정

(1) Type A 불확도 : 기준 발진기의 단기 안정도 (allan variance)로 산정

- 상대 주파수 (relative frequency)

$$f_{rf} = \frac{f_c - f_n}{f_n}$$

f_c : 실제 발진주파수

f_n : 명목주파수

- 단기 안정도 (Allan Variance)

$$\sigma_y(\tau) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}{2 \times (M-1)} \right|^{1/2}$$

여기서 τ = 측정시간 (Sampling Time)

y = i 번째 측정값 (실제 발진 주파수)의 상대주파수

M = 데이터 (y_i)의 개수

(2) Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

(3) 주파수 측정의 수학적 모델

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/27

$$f = f_c + \delta f_{gps} + \delta f_{ac} + \delta f_{ls} + \delta f_r$$

f : 측정 주파수

f_c : 실제 측정한 주파수

δf_{gps} : GPS 수신기의 교정 성적서

δf_{ls} : Frequency counter의 장기 안정도

δf_r : Frequency counter의 분해능

(4) 합성 불확도

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial f_c}\right)^2 u^2(f_c) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}}\right)^2 u^2(\delta f_{gps}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}}\right)^2 u^2(\delta f_{ls}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_r}\right)^2 u^2(\delta f_r)}$$

(5) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial f_c} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}} = 1 \quad c_4 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_r} = 1$$

10.1.2 측정 데이터 : 게이트 시간을 1 s로 10회 측정한 측정 값 (단위 : MHz)

9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 96

10.1.3 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균 : } \bar{x} = 9.999\,999\,96 \text{ MHz}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	11/27

$$\sigma_y(1\text{ s}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^9 (y_{i+1} - y_i)^2}}{2(10-1)} \cong 2.31 \times 10^{-9} \text{ (}\tau = 1\text{ s 에 대한 단기 안정도)}$$

$$u(f_c) = 2.31 \times 10^{-9} \times 10^7 \text{ Hz} = 2.31 \times 10^{-2} \text{ Hz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_c = \infty$$

(2) Type B 불확도

- GPS 수신기의 교정 성적서로부터

$$u(f_{gps}) = \frac{2.0 \times 10^{-10}}{2} \times 10^7 \text{ Hz} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_{gps} = \infty$$

- Frequency counter의 장기 안정도로부터

$$u(f_{fs}) = \frac{1.2 \times 10^{-10}}{\sqrt{3}} \times 10^7 \text{ Hz} = 0.7 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_{fs} = \infty$$

- Frequency Counter의 분해능으로부터

$$u(f_r) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \text{ Hz} = 0.0289 \text{ Hz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_r = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(f) &= \sqrt{u^2(f_{gps}) + u^2(f_{ac}) + u^2(f_{fs}) + u^2(f_r)} \\ &= \sqrt{(2.31 \times 10^{-2})^2 + (1.1 \times 10^{-4})^2 + (0.7 \times 10^{-4})^2 + 0.0289^2} \\ &= 0.037 \end{aligned}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	12/27

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(f)}{\frac{u^4(f_c)}{\nu_c} + \frac{u^4(f_{gps})}{\nu_{gps}} + \frac{u^4(f_{ls})}{\nu_{ls}} + \frac{u^4(f_r)}{\nu_r}} \\
 &= \frac{0.029}{\frac{(2.31 \times 10^{-2})^4}{\infty} + \frac{(1.1 \times 10^{-4})^4}{\infty} + \frac{(0.7 \times 10^{-4})^4}{\infty} + \frac{0.0289^4}{\infty}} \\
 &= \infty
 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 0.037 \times 2 = 0.074 \text{ Hz}$$

(6) ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	종류	확률분포	적용인자	감도계수	표준 불확도 [Hz]	자유도
Allan variance	Type A	정 규	1	1	2.31×10^{-2}	∞
GPS 수신기 성적서	Type A	정 규	2	1	1.1×10^{-4}	∞
Frequency Counter의 장기 안정도	Type B	직 각	$\sqrt{3}$	1	0.7×10^{-4}	∞
Frequency Counter의 분해능	Type B	직 각	$2\sqrt{3}$	1	0.0289	∞
측정 주파수	합성 표준 불확도	-	-	-	0.037	-
측정 주파수	확장 불확도	t-분포	2	-	0.074	-

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	13/27

10.2 신호 레벨의 불확도 산출 : 그림 2

10.2.1 수학적 모델 설정

(1) 신호레벨 측정의 수학적 모델 설정

$$P = P_m + \delta P_m + \delta P_{mm}$$

- P : 피교정 고주파 신호 발생기의 출력 레벨값
- P_m : 표준기인 Measuring Receiver로 측정한 값
- δP_m : 표준기인 Measuring Receiver의 Type B 불확도
- δP_{mm} : 측정면의 Mismatch에 의한 Type B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(P) = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial p_m}\right)^2 u^2(p_m) + \left(\frac{\partial p}{\partial \delta p_m}\right)^2 u^2(\delta p_m) + \left(\frac{\partial p}{\partial \delta p_{mm}}\right)^2 u^2(\delta p_{mm})}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial p}{\partial p_m} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial p}{\partial \delta p_m} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial p}{\partial \delta p_{mm}} = 1$$

10.2.2 측정 데이터 : 신호원 출력을 -30 dBm 으로 하고 6회 측정한 측정 값
-30.14, -29.98, -30.12, -29.97, -30.07, -30.09

10.2.3 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = -30.06$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/27

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.053$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.071$$

$$\text{반복 측정에 의한 출력레벨 불확도 : } u(p_m) = s(\bar{x}) = 0.071 \text{ dB}$$

$$\text{자유도 : } \nu_{pm} = 5$$

(2) 표준기인 measuring receiver의 Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

그림 2와 같이 연결하여 고주파 신호 발생기를 교정할 때 표준기인 measuring receiver의 전자파 전력 측정 불확도로 부터 산출 가능하며, 이를 표 1에 나타내었다.

◦ 0 dBm ~ -60 dBm 전력 범위의 type B 불확도

$$u(\delta P_m) = \sqrt{0.27^2 + 0.01^2 + 0.05^2 + 0.003^2} = 0.275$$

$$\text{자유도 : } \nu_m = \infty$$

◦ -60 dBm ~ -110 dBm 전력 범위의 type B 불확도

$$u(\delta P_m) = \sqrt{0.49^2 + 0.01^2 + 0.05^2 + 0.003^2} = 0.493$$

$$\text{자유도 : } \nu_{\delta p_m} = \infty$$

◦ 부정합 불확도

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	15/27

그림 2에서 고주파 신호원의 신호원 반사계수가 $|\Gamma_s| = 0.33$ 이고
measuring receiver의 반사계수가 $|\Gamma_m| = 0.07$ 이므로 전력 측정시 부정합
오차는 u형의 확률 분포로 보아 표1과 같이 구해진다.

$$u(\delta P_{mm}) = \frac{2 |\Gamma_s| |\Gamma_m|}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \times 0.33 \times 0.07 = 0.033 = 0.141 \text{ dB}$$

자유도 : $\nu_{\delta p_{mm}} = \infty$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(f) &= \sqrt{u^2(p_m) + u^2(\delta p_m) + u^2(\delta p_{mm})} \\ &= \sqrt{0.071^2 + 0.275^2 + 0.141^2} \\ &= 0.32 \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(f)}{\frac{u^4(p_m)}{\nu_{p_m}} + \frac{u^4(\delta P_m)}{\nu_{\delta p_m}} + \frac{u^4(\delta P_{mm})}{\nu_{\delta p_{mm}}}} \\ &= \frac{0.32^4}{\frac{0.071^4}{5} + \frac{0.275^4}{\infty} + \frac{0.141^4}{\infty}} \\ &= 2063 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f) k = 0.32 \times 2 = 0.64 \text{ dB}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/27

10.2.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

표 1 불확도 총괄표

불확도 요인	확률 분포	적용 인자	자유도	0 dBm ~ -60 dBm		-60 dBm ~ -110 dBm	
				값[dB]	표준 불확도 [dB]	값[dB]	표준 불확도 [dB]
Dynamic accuracy	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.47	0.27	0.85	0.49
Display Resolution	직각	$2\sqrt{3}$	∞	0.01	0.003	0.01	0.003
Zero set	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.02	0.01	0.02	0.01
Zero drift of Meter	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.001	0	0.001	0
Zero drift of Sensor	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.09	0.05	0.09	0.05
Mismatch Uncertainty	u	1	∞	0.14	0.14	0.14	0.14
합성 표준 불확도	직각	$\sqrt{3}$	-	0.32		-	
Mismatch Uncertainty	t	k=2	2063	0.64		-	

10.3 변조도 측정 및 불확도 산출 : 그림 2

10.3.1 주파수 변조

10.3.1.1 측정 범위

Frequency Range	Rate	Deviations
10 MHz ~ 1 300 MHz	400 Hz or 1 kHz	≤ 100 kHz

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	17/27

10.3.1.2 수학적 모델

(1) 주파수 변조도 측정의 수학적 모델

$$\Delta F_{peak} = \Delta F_c + \delta F_c$$

- ΔF_{peak} : 피교정 신호원의 peak deviation
- ΔF_c : Measuring receiver로 측정한 값
- δF_c : Measuring receiver의 type-B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(\Delta F_{peak}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \Delta F_c}\right)^2 u^2(\Delta F_c) + \left(\frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_c}\right)^2 u^2(\delta F_c)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \Delta F_c} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_c} = 1$$

10.3.1.3 : Rate 1 kHz에서 ΔF_{peak}

500.2 Hz, 500.4 Hz, 499.8 Hz, 499.0 Hz, 500.5 Hz, 500.4 Hz

10.3.1.4 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 500.05 \text{ Hz}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.572 \text{ Hz}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(\Delta F_c) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.233 \text{ Hz}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	18/27

자유도 : $\nu_{\Delta F_c} = 5$

(2) 표준기인 measuring receiver의 Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

• $\Delta F_{\text{peak}} < 4 \text{ kHz}$

$$u(\delta F_c) = \sqrt{20^2 + 2.039^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 0.289^2}$$

$$= 23.641$$

• $4 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 40 \text{ kHz}$

$$u(\delta F_c) = \sqrt{200^2 + 23.94^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 2.887^2}$$

$$= 201.733$$

• $40 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 100 \text{ kHz}$

$$u(\delta F_c) = \sqrt{500^2 + 57.735^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 28.868^2}$$

$$= 504.303$$

• 자유도 : $\nu_{\delta F_c} = \infty$

(3) 합성 표준 불확도

$$u_c(\Delta F_{\text{peak}}) = \sqrt{u^2(\Delta F_c) + u^2(\delta F_c)}$$

$$= \sqrt{0.233^2 + 23.641^2}$$

$$= 23.642 \text{ Hz}$$

(4) 유효 자유도

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\Delta F_{\text{peak}})}{\frac{u^4(\Delta F_c)}{\nu_{\Delta F_c}} + \frac{u^4(\delta F_c)}{\nu_{\delta F_c}}}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	19/27

$$= \frac{23.642^4}{\frac{0.233^4}{5} + \frac{23.641^4}{\infty}}$$

$$= 530\,008\,912$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 23.642 \times 2 = 47.284 \text{ Hz}$$

10.3.1.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	확률 분포	적용 인자	자유도	$\Delta F_{\text{peak}} < 4 \text{ kHz}$		$4 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 40 \text{ kHz}$		$40 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 100 \text{ kHz}$	
				값 (Hz)	표준 불확도	값(Hz)	표준 불확도	값(Hz)	표준 불확도
Accuracy	정규	2	∞	40	20	400	200	1000	500
Mod. Output Distortion	직각	$\sqrt{3}$	∞	4	2.039	40	23.094	100	57.735
AM Rejection	직각	$\sqrt{3}$	∞	20	11.547	20	11.547	20	11.547
Residual FM	직각	$\sqrt{3}$	∞	8	4.619	8	4.619	8	4.619
Maximum Resolution	직각	$2\sqrt{3}$	∞	1	0.289	10	2.887	100	28.868
합성 표준 불확도	-	-	∞	23.642 Hz		-		-	
확장 불확도	t	k=2	∞	47.284 Hz		-		-	

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	20/27

10.3.2 진폭 변조

10.3.2.1 측정 범위

Frequency Range	Rate	Depths
10 MHz ~ 1 300 MHz	400 Hz or 1 kHz	5 % ~ 99 %

10.3.2.2 수학적 모델 설정

(1) 진폭 변조도 측정의 모델

$$D = D_c + \delta D_c$$

D : 피교정 신호원의 depth

D_c : Measuring receiver로 측정한 값

δD_c : Measuring receiver의 type-B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(D) = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial D_c}\right)^2 u^2(D_c) + \left(\frac{\partial D}{\partial \delta D_c}\right)^2 u^2(\delta D_c)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial D}{\partial D_c} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial D}{\partial \delta D_c} = 1$$

10.3.2.3 측정 데이터 : Rate 1 kHz에서 Depth

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	21/27

50.2 %, 48.8 %, 49.3 %, 50.2 %, 51.2 %, 50.8 %

10.3.2.4 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 50.8 \%$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.900 \%$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(D_c) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.367 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_{D_c} = 5$$

(2) 표준기인 measuring receiver의 Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

$$\bullet \quad 5 \% \leq \text{AM}_{\text{peak}} < 40 \%$$

$$\begin{aligned} u(\delta D_c) &= \sqrt{0.2^2 + 0.0069^2 + 0.046^2 + 0.002^2 + 0.001^2} \\ &= 0.217 \% \end{aligned}$$

$$\bullet \quad 40 \% \leq \text{AM}_{\text{peak}} < 99 \%$$

$$\begin{aligned} u(\delta D_c) &= \sqrt{0.45^2 + 0.156^2 + 0.104^2 + 0.005^2 + 0.026^2} \\ &= 0.488 \% \end{aligned}$$

$$\bullet \quad \text{자유도 : } \nu_{\delta D_c} = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$u_c(D) = \sqrt{u^2(D_c) + u^2(\delta D_c)}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/27

$$= \sqrt{0.367^2 + 0.488^2}$$

$$= 0.611 \%$$

• 유효 자유도

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(D)}{\frac{u^4(D_c)}{\nu_{D_c}} + \frac{u^4(\delta D_c)}{\nu_{\delta D_c}}}$$

$$= \frac{0.611^4}{\frac{0.367^4}{5} + \frac{0.4884^4}{\infty}}$$

$$= 38.41$$

(4) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 0.611 \times 2 = 1.222 \%$$

10.3.2.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	확률 분포	적용 인자	자유도	5 % ≤ AM _{peak} < 40 %		40 % ≤ AM _{peak} < 99 %	
				값(%)	표준불확도	값(%)	표준불확도
Accuracy	정규	2	∞	0.4	0.2	0.9	0.45
Mod. Output Distortion	직각	√3	∞	0.12	0.069	0.27	0.156
AM Rejection	직각	√3	∞	0.08	0.046	0.18	0.104
Residual FM	직각	√3	∞	0.004	0.002	0.009	0.005
Maximum Resolution	직각	2√3	∞	0.004	0.001	0.09	0.026
합성 표준 불확도	—	√3	—	—		0.611	
확장 불확도	t	k=2	—	—		1.211	

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/27

10.4 신호레벨 평탄도 측정 및 불확도 산출 : 그림 3

10.4.1 수학적 모델 설정

(1) 평탄도 측정의 수학적 모델

$$P_{of} = P_{ofc} + \delta P_{ofc} + \delta P_{mm}$$

P_{of} : 피교정 신호원의 출력 평탄도

P_{ofc} : 스펙트럼 분석기로 측정한 값

δP_{ofc} : Measuring receiver의 type-B 불확도

δP_{mm} : 측정면의 부정합 불확도

(2) 합성 불확도

$$u_c(P_{of}) = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{of}}{\partial P_{ofc}}\right)^2 u^2(P_{ofc}) + \left(\frac{\partial P_{of}}{\partial \delta P_{ofc}}\right)^2 u^2(\delta P_{ofc}) + \left(\frac{\partial P_{of}}{\partial \delta P_{mm}}\right)^2 u^2(\delta P_{mm})}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial P_{of}}{\partial P_{ofc}} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial P_{of}}{\partial \delta P_{ofc}} = 1 \quad c_3 = \frac{\partial P_{of}}{\partial \delta P_{mm}} = 1$$

10.4.2 측정 데이터

그림 3의 연결에서 고주파 신호원과 스펙트럼 분석기를 다음과 같이 조절하고 스펙트럼 분석기의 파형에서 최대값과 최소값을 측정하고 그 평균값을 구한다. 이를 6번 측정하여 최대값의 평균과 최소값의 평균으로부터 평탄도를 구하고, 6번 측정한 최대값과 최소값의 평균값들을 이용하여 Type A 불확도를 구한다.

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	24/27

◦ 고주파 신호원

- Sweep 주파수 범위 : 2.5 MHz ~ 1 300 MHz
- 출력레벨 : -10 dBm

◦ 스펙트럼 분석기

- Reference level : 0 dBm
- Start frequency : 2.5 MHz
- Stop frequency : 1 300 MHz
- 다른 기능 : Auto

측정 회수	최대값 [dBm]	최소값 [dBm]	최대값과 최소값의 평균[dBm]
1	12.2	8.9	10.55
2	12.5	9.1	10.80
3	12.0	9.0	10.50
4	12.1	8.8	10.45
5	12.3	9.2	10.75
6	12.2	9.0	10.60

◦ 평탄도

- 최대값의 평균 : $P_M = 12.22$ dBm
- 최소값의 평균 : $P_m = 9.00$ dBm
- 평탄도 $= \pm \frac{P_M + P_m}{2} = \pm 1.61$ dB

10.4.3 불확도 산출

(1) 최대값과 최소값의 평균으로부터 Type A 불확도를 산출

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	25/27

◦ Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 10.61 \text{ dBm}$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.139 \text{ dB}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(\Delta F_c) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.057 \text{ dB}$$

$$\text{◦ 자유도 : } \nu_{\Delta F_c} = 5$$

(2) 표준기인 measuring receiver의 Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

◦ Type B 불확도

$$\begin{aligned} u(\delta P_{ofc}) &= \sqrt{0.338^2 + 0.109^2 + 0.070^2} \\ &= 0.362 = 1.342 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\text{◦ 자유도 : } \nu_{\delta P_{ofc}} = \infty$$

(3) 부정합 불확도

그림 3에서 고주파 신호원의 신호원 반사계수가 $|\Gamma_s| = 0.33$ 이고 spectrum analyzer 의 반사계수가 $|\Gamma_A| = 0.43$ 이므로 전력 측정시 부정합 오차는 u 형의 확률 분포로 보아 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \text{◦ } u(\delta P_{mm}) &= \frac{2 |\Gamma_s| |\Gamma_A|}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \times 0.33 \times 0.43 \\ &= 0.201 = 0.795 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\text{◦ 자유도 : } \nu_{\delta p_{mm}} = \infty$$

(4) 합성 표준 불확도

$$u_c(P_{of}) = \sqrt{1.342^2 + 0.795^2 + 0.057^2} = 1.561 \text{ dB}$$

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	26/27

(5) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(P_{of})}{\frac{u^4(P_{ofc})}{\nu_{P_{ofc}}} + \frac{u^4(\delta P_{ofc})}{\nu_{\delta P_{ofc}}} + \frac{u^4(\delta P_{mm})}{\nu_{\delta P_{mm}}}} \\
 &= \frac{1.561^4}{\frac{0.057^4}{5} + \frac{1.342^4}{\infty} + \frac{0.795^4}{\infty}} \\
 &= 2\,812\,433
 \end{aligned}$$

(6) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(P_{of})k = 1.561 \times 2 = 3.122 \text{ dB}$$

10.4.4 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	확률분포	적용인자	자유도	불확도		표준 불확도 (선형)
				dB	선형	
Spectrum Amplitude Accuracy	정규	2	∞	2	1.585	0.339
Average Noise Level	직각	$\sqrt{3}$	∞	-138	0	0
Gain Compression	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.75	1.189	0.109
Other Input Spurious	직각	$\sqrt{3}$	∞	-65	0	0
Residual Response	직각	$2\sqrt{3}$	∞	-117	0	0
Display Scale Fidelity	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.5	1.112	0.070
Resolution	직각	$2\sqrt{3}$	∞	0.01	1.0023	0
합성 표준 불확도	-	$\sqrt{3}$	-	1.561 dB		
확장 불확도	t	k=2	-	3.122 dB		

RRL	고주파 신호 발생기의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of RF Signal Generator	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	27/27

11. 교정 성적서 작성법

11.1 한국 시험·교정기관 인증기구(KOLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목을 명확한

근거에 의하여 작성한다.

11.2 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존한다.

부 록 8

변조계의 교정 지침서

변조계의 교정 지침서

Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer

표준 문서 번호 : 전파연

기 안	심 의	확 정

정보통신부 전파연구소

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	1/35

개정 번호	개정일자	개 정 내 용	작 성	검 토	승 인

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	2/35

목 차

1. 적용범위
2. 교정주기
3. 작성기준
4. 불확도 산출
5. 용어의 정의 및 명칭
6. 교정내용
7. 필요장비명세
8. 준비사항
9. 교정방법 및 절차
10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 추정
11. 교정 성적서 작성법

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	3/35

1. 적용범위

본 교정 지침서는 100 kHz ~ 1 300 MHz의 주파수 범위에서 사용하는 변조계의 (RF Modulation Analyzer)의 교정에 적용한다.

2. 교정주기

교정 주기는 국가 교정기관 지정제도 운영세칙의 별표 1에서 정한 표준 교정 주기를 따르는 것을 원칙으로 하나 고객이 요청할 경우 상호 협의에 의하여 변경 가능하다.

3. 작성 기준

본 교정 지침서는 교정 절차의 유효성 확보를 위해서 한국계량측정협회가 발간한 디지털 스펙트럼 분석기의 표준교정절차 (KAST0 02-14-9070-165)에서 제시한 방법을 기준으로 작성하였다.

4. 불확도 산출

4.1 Type-A 불확도

같은 조건에서 n번 반복 측정에 의한 우연오차로 다음 식과 같이 산출한다.

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

$$\text{반복 측정에 의한 표준 불확도 : } u_c(x_i) = s(\bar{x})$$

$$\text{자유도 : } n-1$$

4.2 Type-B 불확도

표준기의 교정 성적서와 교정 시스템의 불확도와 같이 4.1에서 다루지 않은 모든

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	4/35

불확도 요인으로부터 산출한다.

4.3 합성 표준 불확도

표준 불확도 산출시 측정에 의한 결과로부터 산출되지 않은 불확도는 적절한 감

도계수를 이용하여 다음과 같이 바꾸어주어야 한다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^m u_i^2(y)}$$

윗 식에서

$$u_{c(y)} = c_i u_c(x_i)$$

- c_i : 감도계수
- $u_c(x_i)$: 표준 불확도

이다.

4.4 확장 불확도

$$U = k u_c(y) \quad (k=2)$$

5. 용어의 정의

5.1 반송파(Carrier wave)

신호파(기저대역 신호)를 운반하는 고주파 신호를 말하며, 신호파 보다 충분히 높은 주파수를 지녀야 한다.

5.2 변조신호 (Modulation Signal)

정보를 포함하고있는 신호파를 말하며, 이를 운반하는 반송파의 주파수 보다 충분히 낮아야 한다.

5.3 변조(Modulation)

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	5/35

반송파(통과대역 신호)를 신호파(기저대역 신호)에 따라 변화시키는 조작을 말하며 신호파가 음성 신호와 같은 아날로그 신호이면 아날로그 변조라 하고, 신호파가 디지털 신호이면 디지털 변조라 한다.

아날로그 변조의 경우 신호파의 크기에 따라 반송파의 진폭을 변화시키는 방식을 진폭 변조(Amplitue Modulation, AM)라하고, 반송파의 주파수를 변화시키는 방식을 주파수 변조(Frequency Modulation, FM), 반송파의 위상을 변화시키는 방식을 위상 변조 (Phase Modulation, PM)라 한다.

디지털 변조의 경우 신호파의 크기에 따라 반송파의 진폭을 변화시키는 방식을 진폭 편이 변조(Amplitue Shift Keying, ASK)라하고, 반송파의 주파수를 변화시키는 방식을 주파수 편이 변조(Frequency Shift Keying, FSK), 반송파의 위상을 변화시키는 방식을 위상 편이 변조 (Phase Shift Keying, PSK)라 한다.

5.4 변조도

반송파가 신호파의 진폭에 따라 변화시키는 변조된 신호의 변조된 정도를 나타내는 척도를 변조도 또는 변조지수라한다. 진폭변조의 변조도는 신호파의 진폭을 반송파의 진폭으로 나눈 값이고, 주파수 변조의 변조도는 주파수 편이를 신호파 주파수로 나눈 값이다.

5.5 프리엠퍼시스(preemphasis)와 디엠퍼시스(deemphasis)

주파수 변조 수신기 출력에서 출력 잡음 전력의 스펙트럼 밀도는 주파수의 제곱에 비례하여 커지게 되어 검파기 입력단에 가해지는 백색잡음의 경우 높은 주파수 영역에서는 높은 레벨로 출력에 나타나게 된다. 이와 같이 주파수 성분이 각기 다른 주파수 성분에 대한 잡음의 영향을 해결해주는 방법이 FM 통신에서 사용하는 프리엠퍼시스(preemphasis)와 디엠퍼시스(deemphasis) 방법이다.

프리엠퍼시스(preemphasis)는 변조전에 고주파 성분의 진폭을 증가시키는 방법이고, 디엠퍼시스(deemphasis)는 복조후에 진폭을 감소시키는 방법이다.

5.6 필터 (Filter)

필요로 하는 주파수 대역 신호만을 통과시키거나 또는 불필요한 주파수 대역의 신호를 통과시키지 못하도록 하는 작용을 하는 회로를 말한다. 필터에는 저주파 대역 신호를 통과시키는 저역 통과 필터(low pass filter), 고주파 대역 신호를 통과시키는 고역 통과 필터(high pass filter), 원하는 일정한 주파수 대역만을 통과시키는

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	6/35

대역 통과 필터(band pass filter) 및 불필요한 일정한 주파수 대역을 통과하지 못하게 하는 대역대역 저지 필터(band stop filter or band rejection filter)가 있다.

5.7 정합(Matching)

교류회로에서 최대 전력의 전달 조건과 무 반사 조건에 따라 공역 임피던스 정합과 영상 임피던스 정합으로 구분한다.

공역 임피던스 정합은 최대 전력의 전달이 되도록 신호원과 부하의 임피던스가 공역 복소수의 관계가 되도록 한 것이고, 영상 임피던스 정합은 신호원 임피던스와 부하 임피던스를 같게 한 것이다.

저항회로인 경우에는 신호원 저항과 부하 저항을 같게 하면 이 두 정합 조건을 만족시킨다. 두 회로를 접속하여 전력을 보낼 때 접속 점에서 본 양자의 결보기의 임피던스를 조정하여 최대전력을 보낼 수 있게 하는 것, 임피던스 정합이라고도 한다.

5.8 일반적인 용어는 KS C 1100(전자측정기 용어집)에 따른다.

6. 교정내용

주파수 분석시 필요한 스펙트럼 분석기의 각 기능에 대하여 기기의 규격에 적합하도록 정확하게 교정함으로써 정밀측정과 측정향상에 도움을 주는 것을 목적으로 하며, 다음의 각 기능을 교정한다.

- 기준 주파수 정확도 측정 (Measurement of the internal reference oscillator frequency accuracy)
- 기준 출력단 레벨 정확도 측정 (Measurement of Reference output amplitude accuracy)
- Sensor Module과 Measuring Receiver의 반사계수 측정 (Reflection coefficient measurement of sensor module and measuring receiver)
- 진폭 변조도 측정 정확도시험 (Amplitude modulation measurement accuracy test)
- 주파수 변조도 측정 정확도(Frequency modulation measurement accuracy test)

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	7/35

7. 필요 장비 명세

NO	장비명	규 격		사용장비
1	RF 신호발생기 (RF Signal Generator)	Range	10 MHz ~ 27 GHz	ROHDE&SCHWARZ SMR27
		Accuracy	± 1 dB	
2	주파수계수기 (Frequency Counter)	Range	0 ~ 100 MHz	SRS SR620
3	GPS Receiver	Accuracy	2.0×10^{-11}	Odetics 425
4	전력계 (Power Meter)	Range	-70 dBm ~ 20 dBm	HP E4419B
		Accuracy	± 2 %	
5	전력 감지기 (Power Sensor)	Range	50 MHz ~ 26.5 GHz	HP E4413A
		Accuracy	± 2 %	
6	가변 감쇠기 (Step Attenuator)	Range	0 dB ~ 11 dB, 1 dB step	HP 8494B
		Accuracy	0.18 dB	
7	가변 감쇠기 (Step Attenuator)	Range	0 dB ~ 110 dB, 10 dB step	HP 8496B
		Accuracy	0.264 dB	
8	회로망 분석기 (Network Analyzer)	Range	300 kHz ~ 3 GHz	HP 8753C
		Accuracy	Level : ±0.05 dB	

8. 준비사항

8.1 교정전 교정 절차 및 주의 사항을 숙지한다.

8.2 교정실은 국가교정기관지정제도운영요령 제21조 5항의 환경조건을 만족해야 한다.

8.3 교정을 시작하기 전에 피 교정기기 및 교정기기들을 충분히 예열(warmup)시킨다.
이 때 특별한 사항이 없는 한 예열 시간은 각 기기 및 장비들의 매뉴얼에 따른다.

8.4 피교정기기와 교정장비를 연결할 때 입력과 출력 임피던스를 정합(matching)시켜야 한다.

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	8/35

9. 교정 방법 및 절차

9.1 기준 주파수 정확도 측정 (Measurement of the internal reference oscillator frequency accuracy)

9.1.1 그림 1과 같이 피 교정 Measuring Receiver의 기준 주파수 출력 (대부분 장비의 뒷면에 위치)을 주파수 계수기의 입력에 연결하고 측정을 수행한다.

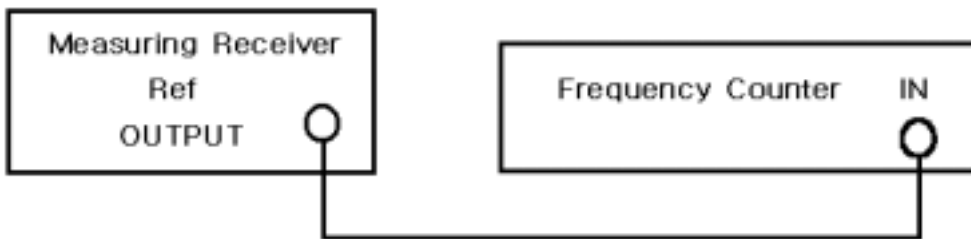


그림 1 기준 주파수 교정 장치

9.2 기준 출력단 레벨 정확도 측정 (Measurement of Reference output amplitude accuracy)

9.2.1 그림 2와 같이 Measuring Receiver 전면에 위치한 “CAL OUTPUT” 출력단을 주파수 계수기에 연결하여 주파수 값을 측정하여 기록지에 기록한다.

9.2.2 주파수 계수기의 연결을 떼어낸다.

9.2.3 고주파 전력측정기(RF Power Meter)를 적절한 측정모드로 설정하고 그림 2와 같이 Measuring Receiver의 “CAL OUTPUT” 출력단에 연결한다.

9.2.4 Measuring Receiver “CAL OUTPUT” 출력 주파수인 50 MHz에서 전력 감지기 (Power Sensor)의 "CAL FACTOR" 값을 고주파 전력측정기에 입력 후 측정된 전력을 기록지에 기록한다.

9.2.5 Measuring Receiver의 “CAL OUTPUT” 출력신호의 고조파 성분이 큰 경우에는 필터를 사용하여 측정한다.

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	9/35

9.2.6 Measuring Receiver의 “CAL OUTPUT” 출력단에서 전력 감지기를 떼어낸다.

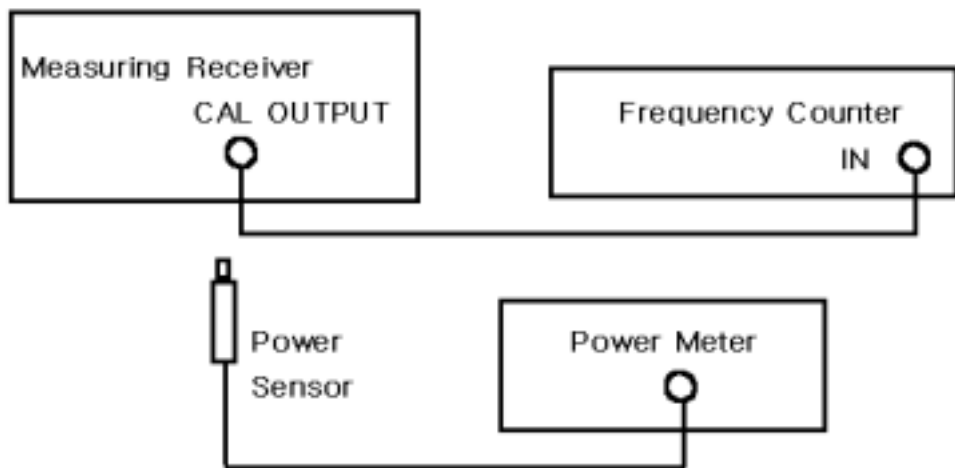


그림 2 교정 출력단 출력 측정 장치

9.3 Sensor Module과 Measuring Receiver의 반사계수 측정 (Reflection coefficient measurement of sensor module and measuring receiver)

- 9.3.1 벡터 회로망분석기를 사용하기 전에 1시간 이상 예열(warm up)을 한다.
- 9.3.2 type-N calibration kit를 사용하여 2-port calibration을 실행한다.
- 9.3.3 벡터 회로망분석기의 측정값 평균회수를 16번 이상으로 setting 한다.
- 9.3.4 측정 주파수대역을 2.5 MHz ~ 1 300 MHz으로 setting 한다.
- 9.3.5 그림 3에서 Measuring Receiver를 AUTOMATIC OPERATION 상태에서 회로망 분석기의 측정포트를 Measuring Receiver의 Sensor Module에 연결한다.

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	10/35

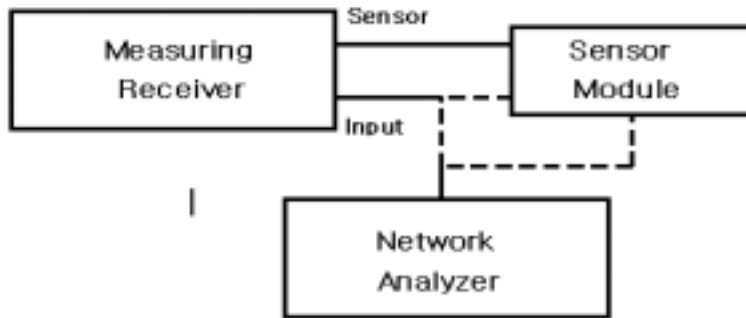


그림 3

9.3.6 회로망 분석기를 이용하여 측정한 데이터 중 반사계수가 가장 큰 값을 (Γ_S) 표 9-1에 기록한다.

9.3.7 측정단자로부터 분리한 후, (60°, 120°, 180°, 240°, 300°) 회전시켜 다시 연결하여 측정하고자 하는 각 주파수 점의 반사계수 크기 및 위상을 측정하여 측정결과를 표 9-1에 기입한다.

9.3.8 Measuring Receiver의 Range1, Range 2, Range 3와 14 dB 이득 Range 에서 step 9.3.5 ~ step 9.3.7를 반복한다. 각 range의 반사계수는 Γ_{ESR} , Γ_S , Γ_S ,와 Γ_S 이다.

표 9-1 Sensor Module의 반사계수 측정결과

i	Sensor Module의 SWR					Measuring Receiver Input의 SWR		
	$ \Gamma_S $	$ \Gamma_{ESR1} $	$ \Gamma_{ESR2} $	$ \Gamma_{ESR3} $	$ \Gamma_{ES14} $	$ \Gamma_{MR3} $	$ \Gamma_{MR2} $	$ \Gamma_{MR1} $
1(0도)								
2(60)								
3(120)								
4(180)								
5(240)								
6(300)								

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	11/35

9.3.9 그림 3에서 Measuring Receiver를 Range 3로 하고 회로망 분석기의 측정 포트를 Measuring Receiver의 Input에 연결한다.

9.3.10 회로망 분석기를 이용하여 측정한 데이터 중 반사계수가 가장 큰 값을 (Γ_{MR3})표 9-1에 기록한다.

9.3.11 측정단자로부터 분리한 후, (60° , 120° , 180° , 240° , 300°) 회전시켜 다시 연결하여 측정하고자 하는 각 주파수 점의 반사계수 크기 및 위상을 측정하여 측정결과를 표 9-1에 기입한다.

9.3.12 Measuring Receiver의 Range 2, Range1 에서 step 9.3.10 ~ step 9.3.11를 반복한다. 각 range의 반사계수는 Γ_{MR2} , 와 Γ_{MR1} 이다.

9.4 진폭 변조도 측정 정확도시험 (Amplitude modulation measurement accuracy test)

9.4.1 그림 4와 같이 Measuring Receiver의 Calibration AM/FM OUTPUT을 Measuring Receiver의 입력에 연결한다.

9.4.2 Measuring Receiver의 AM 단자를 누르고 AM Calibration Factor 40 % Range와 AM 단자를 누르고 AM Calibration Factor 100 % Range에서 CALIBRATION 단자를 눌러서 Measuring Receiver의 지시값을 읽고 기록한다.

AM Calibration Factor 40 % : 99 % _____ 101 %

AM Calibration Factor 100 % Range : 99 % _____ 101 %

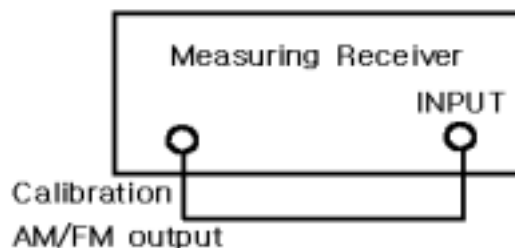


그림 4

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 12/35

9.4.3 그림 5와 같이 장비들을 연결하고 RF 신호원의 주파수를 측정하고자하는 주파수가 되도록 조정하고, 변조 신호와 변조도를 규격에 따라 설정하고 10 회 반복 측정한다.

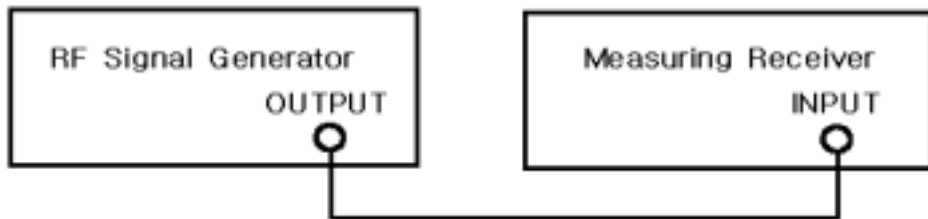


그림 5

9.4.5 실제의 변조도는 Step 9.4.2의 AM Calibration Factor Range에 따라서 측정한 값으로 Measuring Receiver의 읽은 값을 나누어주어야 한다.

9.5 주파수 변조도 측정 정확도(Frequency modulation measurement accuracy test)

9.5.1 그림 4와 같이 Measuring Receiver의 Calibration AM/FM OUTPUT을 Measuring Receiver의 입력에 연결한다.

9.5.2 Measuring Receiver의 FM 단자를 누르고 FM Calibrator; 40 kHz Modulation Range와 FM Calibrator; 400 kHz Modulation Range 단자를 눌러서 Measuring Receiver의 지시값을 읽고 기록 한다.

FM Calibration Factor;40 kHz Modulation Range: 99 % _____ 101 %

FM Calibration Factor;400 kHz Modulation Range: 99 % _____ 101 %

9.5.3 그림 5와 같이 장비들을 연결하고 RF 신호원의 주파수를 측정하고자하는 주파수가 되도록 조정하고, 변조 신호와 변조도를 규격에 따라 설정하고 10회 반복 측정한다.

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	13/35

9.5.4 실제의 변조도는 Step 9.5.2의 FM Calibration Factor Range에 따라서 측정한 값으로 Measuring Receiver의 읽은 값을 나누어주어야 한다.

10. 교정 데이터 처리 및 측정 불확도 추정

10.1 기준 주파수 정확도 측정 : 그림 1

10.1.1 수학적 모델 설정

(1) Type A 불확도 : 기준 발진기의 단기 안정도 (allan variance)로 산정

◦ 상대 주파수 (relative frequency)

$$f_{rf} = \frac{f_c - f_n}{f_n}$$

f_c : 실제 발진주파수

f_n : 명목주파수

◦ 단기 안정도 (Allan Variance)

$$\sigma_y(\tau) = \left| \frac{\sum_{i=1}^{M-1} (y_{i+1} - y_i)^2}{2 \times (M-1)} \right|^{1/2}$$

여기서 τ = 측정시간 (Sampling Time)

y = i 번째 측정값 (실제발진 주파수)의 상대주파수

M = 데이터 (y_i)의 개수

(2) Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

(3) 주파수 측정의 수학적 모델

$$f = f_c + \delta f_{gps} + \delta f_{ac} + \delta f_{ls} + \delta f_r$$

f : 측정 주파수

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	14/35

f_c : 실제 측정한 주파수

δf_{gps} : GPS 수신기의 교정 성적서

δf_{ls} : Frequency counter의 장기 안정도

δf_r : Frequency counter의 분해능

(4) 합성 불확도

$$u(f) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial f_c}\right)^2 u^2(f_c) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}}\right)^2 u^2(\delta f_{gps}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}}\right)^2 u^2(\delta f_{ls}) + \left(\frac{\partial f}{\partial \delta f_r}\right)^2 u^2(\delta f_r)}$$

(5) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial f}{\partial f_c} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{gps}} = 1$$

$$c_3 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_{ls}} = 1 \quad c_4 = \frac{\partial f}{\partial \delta f_r} = 1$$

10.1.2 측정 데이터 : 게이트 시간을 1 s로 10회 측정한 측정 값 (단위 : MHz)

9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 96, 9.999 999 98, 9.999 999 92, 9.999 999 96, 9.999 999 96

10.1.3 불확도 산출

(1) Type A 불확도

평균 : $\bar{x} = 9.999\,999\,96 \text{ MHz}$

$$\sigma_y(1 \text{ s}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^9 (y_{i+1} - y_i)^2}}{2(10-1)} \cong 2.31 \times 10^{-9} \quad (\tau = 1 \text{ s 에 대한 단기 안정도})$$

$$u(f_c) = 2.31 \times 10^{-9} \times 10^7 \text{ Hz} = 2.31 \times 10^{-2} \text{ Hz}$$

자유도 : $\nu_c = \infty$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	15/35

(2) Type B 불확도

- GPS 수신기의 교정 성적서로부터

$$u(f_{gps}) = \frac{2.0 \times 10^{-10}}{2} \times 10^7 \text{ Hz} = 1.1 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$\text{자유도} : \nu_{gps} = \infty$$

- Frequency counter의 장기 안정도로부터

$$u(f_{ls}) = \frac{1.2 \times 10^{-10}}{\sqrt{3}} \times 10^7 \text{ Hz} = 0.7 \times 10^{-4} \text{ Hz}$$

$$\text{자유도} : \nu_{ls} = \infty$$

- Frequency Counter의 분해능으로부터

$$u(f_r) = \frac{0.1}{2\sqrt{3}} \text{ Hz} = 0.0289 \text{ Hz}$$

$$\text{자유도} : \nu_r = \infty$$

(3) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(f) &= \sqrt{u^2(f_{gps}) + u^2(f_{ac}) + u^2(f_{ls}) + u^2(f_r)} \\ &= \sqrt{(2.31 \times 10^{-2})^2 + (1.1 \times 10^{-4})^2 + (0.7 \times 10^{-4})^2 + 0.0289^2} \\ &= 0.037 \end{aligned}$$

(4) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(f)}{\frac{u^4(f_c)}{\nu_c} + \frac{u^4(f_{gps})}{\nu_{gps}} + \frac{u^4(f_{ls})}{\nu_{ls}} + \frac{u^4(f_r)}{\nu_r}} \\ &= \frac{0.037^4}{\frac{(2.31 \times 10^{-3})^4}{\infty} + \frac{(1.1 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{(0.7 \times 10^{-5})^4}{\infty} + \frac{0.0289^4}{\infty}} \\ &= \infty \end{aligned}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	16/35

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 0.037 \times 2 = 0.074 \text{ Hz}$$

(6) 불확도 총괄표

불확도 요인	종류	표준 불확도 [Hz]	감도계수	확률분포	적용인자	자유도
allan variance	Type A	2.31×10^{-2}	1	정 규	1	∞
GPS 수신기 성적서	Type A	1.1×10^{-4}	1	정 규	2	∞
Frequency Counter의 장기 안정도	Type B	0.7×10^{-4}	1	직 각	$1/\sqrt{3}$	∞
Frequency의 분해능	Type B	0.0289	1	직 각	$1/2\sqrt{3}$	∞
$u_c(f)$	합성 표준 불확도	0.037		-	-	-
U	확장 불확도	0.074		t-분포	2	-

10.2 교정 출력단 레벨 정확도 측정 : 그림 2

10.2.1 신호레벨 측정의 수학적 모델 설정

$$P_{gZ_0} = \frac{M_u(P_m - (t + D))}{P_i K_b m}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	17/35

$$m = \frac{M_{uc}(P_{mc} - t)}{K_c P_{cal}}$$

- m : 전력계의 이득항
 - M_{uc} : 전력 측정용 센서와 전력계 내부 교정 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
 - P_{mc} : 교정기간 동안 전력계가 지시한 전력 레벨
 - t : 전력계의 zero offset
 - K_c : 전력 측정용 센서의 교정 주파수에서 교정인자
 - P_{cal} : 전력계 교정출력에서 Z_0 에 전달되는 전력
- M_u : 전력 측정용 센서와 신호원 사이의 부정합에 의한 이득
- P_m : 전력계가 읽은값
- P_l : 전력 측정용 센서의 비선형 항
- K_b : 측정 주파수에서 전력 측정용 센서의 교정인자
- $t = Z_s + Z_c + N$
- Z_s : 전력계의 zero set
 - Z_c : 전력계의 zero carryover
 - N : 전력계 잡음
- D : 전력계 Drift

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	18/35

10.2.2 Type-B 상대 불확도

$$\frac{u(P_{gZ_0})}{P_{gZ_0}} = \sqrt{\frac{u^2(M_u)}{M_u^2} + \frac{u^2(P_m)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(D)}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + \frac{u^2(m_{uc})}{M_{uc}^2} + \frac{u^2(P_{mc})}{(P_{mc} - t)^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{\{P_m - (t+D)\}^2} + \frac{1}{(P_{mc} - t)^2} - \frac{1}{K_c P_{cal} m \{P_m - (t+D)\}} \right) \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}}$$

◦ 다음의 경우에 대하여 Type-B 상대 불확도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & - M_u = 1, M_{uc} = 1, P_{mc} = P_{cal}, Z_s = 0, Z_c = 0, N = 0, D = 0, t = 0, m = \frac{1}{K_c} \\ & - \frac{u(P_{gZ_0})}{P_{gZ_0}} = \sqrt{u^2(M_u) + \frac{u^2(P_m)}{P_m^2} + \frac{u^2(D)}{P_m^2} + \frac{u^2(K_b)}{K_b^2} + u^2(m_{uc}) + \frac{u^2(P_{mc})}{P_{mc}^2} + \frac{u^2(K_c)}{K_c^2} + \frac{u^2(P_l)}{P_l^2} + \frac{u^2(P_{cal})}{P_{cal}^2} + \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right)^2 \{u^2(Z_s) + u^2(Z_c) + u^2(N)\}} \end{aligned}$$

◦ $u(M_u)$: 센서와 Measuring Receiver의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.040$

- Measuring Receiver의 교정 출력 반사계수 : $\Gamma_g = 0.024$

$$- \frac{u(M_u)}{M_u} = 0.04 \times 0.024 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.068 \%$$

◦ $u(M_{uc})$: 센서와 전력 측정기의 50 MHz 교정 출력 사이의 부정합 이득

- Sensor의 반사계수 : $\Gamma_s = 0.038$

- Spectrum Analyzer의 교정 출력 반사계수 : $\Gamma_g = 0.1$

$$- \frac{u(M_{uc})}{M_{uc}} = 0.038 \times 0.1 \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.266 \%$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	19/35

- $u(P_m) = \pm 0.5 \%$: 전력 측정기의 instrumentation 불확도

$$- \frac{u(P_m)}{P_m} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(P_{mc}) = \pm 0.5 \%$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- \frac{u(P_{mc})}{P_{mc}} = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.3 \%$$

- $u(D) = \pm 15 \text{ pW}$: 교정을 수행하는 동안 전력 측정기의 불확도

$$- P_m = 1 \text{ mW} \text{ 이므로}$$

$$- \frac{u(D)}{P_m} = \frac{15 \times 10^{-12}}{10 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0000087 \%$$

- $u(K_b) = \pm 1 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_b)}{K_b} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

- $u(K_c) = \pm 1 \%$: 50 MHz에서 센서의 교정인자 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.01}{2} = 0.5 \%$$

- $u(P_l) = \pm 3 \%$: 센서의 비선형 불확도

$$- \frac{u(K_c)}{K_c} = \frac{0.03}{2} = 1.5 \%$$

- $u(P_{cal}) = \pm 0.9 \%$: 전력계의 50 MHz 교정출력 불확도

$$- \frac{u(P_{cal})}{P_{cal}} = \frac{0.009}{2} = 0.45 \%$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 20/35

- $u(Z_s) = \pm 50 \text{ pW}$: 전력계의 zero set 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-6}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 50 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.0003 \%$$

- $u(Z_c) = 0$: 전력계의 zero carryover는 instrumentation 불확도에 포함됨

$$- u(Z_c) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = 0$$

- $u(N) = \pm 70 \text{ pW}$: 전력계의잡음 불확도

$$- u(Z_s) \left(\frac{1}{P_m} - \frac{1}{P_{cal}} \right) = \left(\frac{1}{10 \times 10^{-6}} - \frac{1}{10^{-3}} \right) \times 70 \times 10^{-12} \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.00042 \%$$

$$\begin{aligned} \circ u_B(P_{gZ_0}) &= \sqrt{.00068^2 + 0.00266^2 + 0.003^2 + .003^2 + .000000087^2 + 0.005^2 + 0.005^2} \\ &\quad + 0.015^2 + 0.0045^2 + 0.000003^2 + 0.0000042^2 \\ &= 0.0179 = 1.79 \% \end{aligned}$$

10.2.3 측정 데이터 : 스펙트럼 분석기의 교정 출력을 10회 반복 측정한 값
0.99 mW, 0.99 mW, 0.99 dBm, 1.00 dBm, 1.01 mW
1.00 mW, 1.00 mW, 1.01 mW, 1.01 mW, 1.00 mW

10.2.4 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1.00 \text{ mW}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	21/35

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(10-1)} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.00816 \text{ mW}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{10}} = 0.00258 \text{ mW}$$

반복 측정에 의한 출력레벨 불확도

$$\text{: } u_A(P_{gzo}) = s(\bar{x}) = 0.00258 \text{ mW} = 0.258 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_A(P_{gzo}) = 5$$

(2) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned} u_c(P_{gzo}) &= \sqrt{u_A^2(P_{gzo}) + u_B^2(P_{gzo})} = \sqrt{0.01790^2 + 0.00258^2} \\ &= 0.0181 = 1.81 \% \end{aligned}$$

(3) 유효 자유도

$$\begin{aligned} \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(P_{gzo})}{\frac{u_A^4(P_{gzo})}{\nu_A(P_{gzo})} + \frac{u_B^4(P_{gzo})}{\nu_B(P_{gzo})}} \\ &= \frac{0.16^4}{\frac{0.00258^4}{9} + \frac{0.0160^4}{\infty}} \\ &= 292.500 \end{aligned}$$

(4) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(P_{gzo})k = 1.81 \% \times 2 = 3.62 \% = 0.0362 \text{ mW}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	22/35

10.2.5 ISO 절차에 의한 불확도 총괄표

기 호	불확도 원인	값, $\pm \%$	확률분포	적용인자	표준 불확도
M_u	스펙트럼 분석기 교정 출력과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.04$	U	1	0.068 %
M_{uc}	전력계의 교정원과 센서 사이의 부정합 이득	$ \Gamma_g = 0.1$ $ \Gamma_s = 0.038$	U	1	0.266 %
P_m	전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
P_{mc}	교정기간 동안 전력계 instrumentation	0.5 %	직각	$\sqrt{3}$	0.3 %
D	전력계 drift	± 15 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0 %
K_b	센서 교정인자	1 %	정규	2	0.5 %
K_c	50 MHz에서 센서 교정인자	1 %	직각	—	0.5 %
P_1	센서 선형성	3.0 %	정규	2	1.5 %
P_{cal}	전력계 교정 출력 전력	0.9 %	정규	2	0.45 %
Z_s	전력계 zero set	± 50 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0005 %
Z_c	전력계 zero carryover	0	직각	$\sqrt{3}$	0 %
N	전력계와 센서 잡음	± 70 pW	직각	$\sqrt{3}$	0.0042 %
$u_A(P_{gz0})$	Type-A 불확도	0.21 %	정규	1	0.258 %
$u_c(P_{gz0})$	합성 불확도 : RSS				1.81 %
U	확장 불확도		K=2		3.62 % 0.0362 mW

10.3 Sensor Module과 Measuring Receiver의 반사계수 측정 (Reflection coefficient measurement of sensor module and measuring receiver)

10.3.1 측정 결과

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	23/35

i	Sensor Module의 SWR					Measuring Receiver Input의 SWR		
	$ \Gamma_S $	$ \Gamma_{ESR1} $	$ \Gamma_{ESR2} $	$ \Gamma_{ESR3} $	$ \Gamma_{ES14} $	$ \Gamma_{MR3} $	$ \Gamma_{MR2} $	$ \Gamma_{MR1} $
1(0도)	0.032	0.032	0.031	0.100	0.036	0.126	0.025	0.028
2(60)	0.033	0.033	0.032	0.101	0.035	0.127	0.024	0.029
3(120)	0.032	0.031	0.033	0.100	0.036	0.125	0.025	0.027
4(180)	0.031	0.031	0.032	0.099	0.037	0.126	0.026	0.028
5(240)	0.033	0.032	0.031	0.099	0.035	0.127	0.026	0.029
6(300)	0.031	0.033	0.0313	0.101	0.037	0.125	0.024	0.027

10.3.2 수학적 모델 설정

(1) 반사계수 크기 측정의 모델

$$\Gamma = \Gamma_m + \delta\Gamma$$

Γ : 반사계수

Γ_m : 회로망 분석기로 측정한 값

$\delta\Gamma$: 회로망 분석기의 type-B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(\Gamma) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \Gamma_m}\right)^2 u^2(\Gamma_m) + \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \delta\Gamma}\right)^2 u^2(\delta\Gamma)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Gamma}{\partial \Gamma_m} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Gamma}{\partial \delta\Gamma} = 1$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	24/35

10.3.3 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(I) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}}$$

$$\text{자유도 : } \nu_{I_c} = 6$$

(2) 표준기인 회로망 분석기의 Type B 불확도 : 반사계수의 크기 측정 불확도

- $E_{rm}(\text{linear}) = V_r + S_{r1} \times T_{rd}(\text{maginitude})$
- $E_{rm}(\log) = 20 \log(1 \pm E_{rm}/S_{21})$
- $u_B(|I|) = E_{rm}/2$

(3) (2) 항에서

- $V_r = S_r + \sqrt{Y_r^2 + Z_r^2}$
- $S_r = D + S_{r1} + T_r \times S_{11} + (M_s + S_{r1}) \times S_{11}^2 + M_1 \times S_{21} \times S_{12} + A_m \times S_{11}$
- $Y_r = R_{r1} + 2 \times T_{t1} \times S_{11} + R_{r1} \times S_{11}^2$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	25/35

$$\circ Z_r = R_{r2} \times S_{21} \times S_{12}$$

(4) 자유도

$$\nu_B = \infty$$

(5) Type B 불확도 요인

기호	오차 항	Residual (Accuracy Enhancement, Full Two-port Calibration)	
		dB	Linear
D	Directivity	-44	0.0063
M _s	Source Match	-35	0.0178
M _l	Load Match	-42	0.008
T _r	Reflection Tracking	0.06	0.007
T _t	Transmission Tracking	0.05	0.006
C	Crosstalk	-100	0.00001
R _{r1}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t1}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
R _{r2}	Port 1 Reflection Connector Repeatability	-65	0.00056
T _{t2}	Port 1 Transmission Connector Repeatability	-65	0.00056
N _l	Low-Level Noise	-100 dBm	
N _h	High-Level Noise	0.004	0.00046
A _m	Mag. Dynamic Accuracy Error	0.05	0.00577
A _p	Phase Dynamic Accuracy Error	0.331, degrees	
S _{t1}	Port 1 Cable Transmission Phase Stability	0.05 × f[GHz], degrees	
S _{r1}	Port 1 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
S _{t2}	Port 2 Cable Transmission Phase Stability	0.05 × f[GHz], degrees	
S _{r2}	Port 2 Cable Reflection Stability	-70	0.00032
T _{td}	Transmission Tracking Drift	Magnitude : 0.0015 × Δ℃, linear Phase : {0.1 + 0.15 × f[GHz]} × Δ℃, degrees	
T _{rd}	Reflection Tracking Drift	Magnitude : 0.0015 × Δ℃, linear Phase : {0.1 + 0.15 × f[GHz]} × Δ℃, degrees	

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	26/35

(6) S_{11} (S_{22})에 대한 Type B 불확도 : 반사계수 크기

• Reference power level : -20 dBm

($A_m = 0.00577$, $A_p = 0.331$ (deg))

주파수 (GHz)	반사계수의 크기					
	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1.0
1	0.007	0.008	0.01	0.01	0.02	0.05
2						
3						

(7) 합성 표준 불확도

$$u_c(|\Gamma|) = \sqrt{u_A^2(|\Gamma|) + u_B^2(|\Gamma|)}$$

(8) 유효 자유도

$$\nu_{|\Gamma|} = \frac{u_c^4(|\Gamma|)}{\frac{u_A^4(|\Gamma|)}{5} + \frac{u_B^2(|\Gamma|)}{\nu_B}}$$

(9) 확장 불확도

$$U_\Gamma = k u_c(|\Gamma|)$$

(10) 반사계수 크기 측정 불확도

i	Sensor Module의 SWR					Measuring Receiver Input의 SWR		
	$ \Gamma_S $	$ \Gamma_{ESR1} $	$ \Gamma_{ESR2} $	$ \Gamma_{ESR3} $	$ \Gamma_{ES14} $	$ \Gamma_{MR3} $	$ \Gamma_{MR2} $	$ \Gamma_{MR1} $
평균값	0.032	0.032	0.032	0.100	0.036	0.126	0.025	0.028
Type A 불확도	0.00365	0.00365	0.00365	0.00365	0.00365	0.00365	0.00365	0.00365
Type B 불확도	0.008	0.008	0.008	0.01	0.008	0.01	0.02	0.02
합성표준 불확도	0.0088	0.0088	0.0088	0.0106	0.0088	0.0106	0.0203	0.0203
유효 자유도	169	169	169	356	169	356	4784	4784
확장 불확도	0.018	0.018	0.018	0.021	0.018	0.021	0.041	0.041

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	27/35

10.4 진폭 변조

10.4.1 측정 범위

Frequency Range	Rate	Depths
10 MHz ~ 1 300 MHz	400 Hz or 1 kHz	5 % ~ 99 %

10.4.2 AM Calibration Factor 100 % Range : 99 % 100.14 101 %

10.4.3 수학적 모델 설정

(1) 진폭 변조도 측정의 모델

$$D = D_c + \delta D_c + \delta D_s$$

D : 측정 값

D_c : Measuring receiver 로 읽은 값

δD_c : Measuring receiver의 type-B 불확도

δD_s : RF 신호원의 type B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(D) = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial D_c}\right)^2 u^2(D_c) + \left(\frac{\partial D}{\partial \delta D_c}\right)^2 u^2(\delta D_c) + \left(\frac{\partial D}{\partial \delta D_s}\right)^2 u^2(\delta D_s)}$$

(3) 감도계수

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	28/35

$$c_1 = \frac{\partial D}{\partial D_c} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial D}{\partial \delta D_c} = 1, \quad c_3 = \frac{\partial D}{\partial \delta D_s} = 1$$

10.4.4 측정 데이터 : 1 GHz의 반송파를 1 kHz로 50 % AM 변조

50.04 %, 49.99 %, 49.98 %, 50.00 %, 50.02 %, 50.01 %

10.4.5 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 50.01 \%$$

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.007 \%$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(D_c) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.003 \%$$

$$\text{자유도 : } \nu_{D_c} = 5$$

(2) measuring receiver의 Type B 불확도

$$\bullet \quad 5 \% \leq \text{AM}_{\text{peak}} < 40 \%$$

$$\begin{aligned} u(\delta D_c) &= \sqrt{0.2^2 + 0.0069^2 + 0.046^2 + 0.002^2 + 0.001^2} \\ &= 0.217 \% \end{aligned}$$

$$\bullet \quad 40 \% \leq \text{AM}_{\text{peak}} < 99 \%$$

$$\begin{aligned} u(\delta D_c) &= \sqrt{0.45^2 + 0.156^2 + 0.104^2 + 0.005^2 + 0.026^2} \\ &= 0.488 \% \end{aligned}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	29/35

◦ 자유도 : $\nu_{\delta D_c} = \infty$

(3) 표준기인 RF 신호원의 Type B 불확도

- Resolution : 0.1 %
- Setting accuracy : 4 % of reading + 1 % = 3 %
- AM distortion : 3 %

$$\begin{aligned}
 u(\delta D_s) &= \sqrt{\left(\frac{0.1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2} \\
 &= 2.450 \%
 \end{aligned}$$

(4) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 u_c(D) &= \sqrt{u^2(D_c) + u^2(\delta D_c) + u^2(\delta D_s)} \\
 &= \sqrt{0.367^2 + 0.488^2 + 2.450^2} \\
 &= 2.52 \%
 \end{aligned}$$

◦ 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(D)}{\frac{u^4(D_c)}{\nu_{D_c}} + \frac{u^4(\delta D_c)}{\nu_{\delta D_c}} + \frac{u^4(\delta D_s)}{\nu_{\delta D_s}}} \\
 &= \frac{2.52^4}{\frac{0.367^4}{5} + \frac{0.4884^4}{\infty} + \frac{2.450^4}{\infty}} \\
 &= 11\ 115
 \end{aligned}$$

(5) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f) k = 2.520 \times 2 = 5.040 \%$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	30/35

10.4.6 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	확률 분포	적용 인자	자유도	5 % ≤ AM _{peak} < 40 %		40 % ≤ AM _{peak} < 99 %	
				값(%)	표준불확도	값(%)	표준불확도
Accuracy	정규	2	∞	0.4	0.2	0.9	0.45
Mod. Output Distortion	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.12	0.069	0.27	0.156
AM Rejection	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.08	0.046	0.18	0.104
Residual FM	직각	$\sqrt{3}$	∞	0.004	0.002	0.009	0.005
Maximum Resolution	직각	$2\sqrt{3}$	∞	0.004	0.001	0.09	0.026
Type A 불확도	직각	1	∞	-		0.003	0.003
신호원의 불확도	직각	$\sqrt{3}$	∞	-		4.244	2.450
합성 표준 불확도	-	$\sqrt{3}$	11 115	-		2.520 %	
확장 불확도	t	k=2	-	-		5.040 %	

10.5 주파수 변조도 측정 및 불확도 산출

10.5.1 측정 범위

Frequency Range	Rate	Deviations
10 MHz ~ 1 300 MHz	400 Hz or 1 kHz	≤100 kHz

10.5.2 FM Calibration Factor; 40 kHz Modulation Range:

99 % 100.09 101 %

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	31/35

10.5.3 수학적 모델

(1) 주파수 변조도 측정의 수학적 모델

$$\Delta F_{peak} = \Delta F_c + \delta F_c + \delta F_s$$

- ΔF_{peak} : 측정 값
- ΔF_c : Measuring receiver 로 읽은 값
- δF_c : Measuring receiver의 type-B 불확도
- δF_s : RF 신호원의 type B 불확도

(2) 합성 불확도

$$u(\Delta F_{peak}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \Delta F_c}\right)^2 u^2(\Delta F_c) + \left(\frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_c}\right)^2 u^2(\delta F_c) + \left(\frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_s}\right)^2 u^2(\delta F_s)}$$

(3) 감도계수

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \Delta F_c} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_c} = 1, \quad c_3 = \frac{\partial \Delta F_{peak}}{\partial \delta F_s} = 1$$

10.5.4 1 GHz의 반송파를 1 kHz로 주파수 변조 : ΔF_{peak}

500.1 Hz, 500.2 Hz, 499.8 Hz, 499.9 Hz, 500.0 Hz, 500.0 Hz

10.5.5 불확도 산출

(1) Type A 불확도

$$\text{평균값 : } \bar{x} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 x_i = 500.0 \text{ Hz}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호	쪽수	32/35

$$\text{표준편차 : } s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(6-1)} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.134 \text{ Hz}$$

$$\text{평균의 실험 표준편차 : } u(\Delta F_c) = s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{6}} = 0.055 \text{ Hz}$$

$$\text{자유도 : } \nu_{\Delta F_c} = 5$$

(2) 표준기인 measuring receiver의 Type B 불확도 : 교정 시스템의 불확도

$$\bullet \Delta F_{\text{peak}} < 4 \text{ kHz}$$

$$\begin{aligned} u(\delta F_c) &= \sqrt{20^2 + 2.039^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 0.289^2} \\ &= 23.641 \end{aligned}$$

$$\bullet 4 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 40 \text{ kHz}$$

$$\begin{aligned} u(\delta F_c) &= \sqrt{200^2 + 23.94^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 2.887^2} \\ &= 201.733 \end{aligned}$$

$$\bullet 40 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 100 \text{ kHz}$$

$$\begin{aligned} u(\delta F_c) &= \sqrt{500^2 + 57.735^2 + 11.547^2 + 4.619^2 + 28.868^2} \\ &= 504.303 \end{aligned}$$

$$\bullet \text{자유도 : } \nu_{\delta F_c} = \infty$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호		
		제정일자		
		개정일자		
		개정번호		쪽수 33/35

(3) 표준기인 RF 신호원의 Type B 불확도

- Resolution : 10 Hz
- Setting accuracy : 5 % of reading + 20 Hz = 45 Hz
- FM distortion : 0.5 % = 25 Hz

$$\begin{aligned}
 u(\delta F_s) &= \sqrt{\left(\frac{0.1}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{3}}\right)^2} \\
 &= 30 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

(4) 합성 표준 불확도

$$\begin{aligned}
 u_c(\Delta F_{peak}) &= \sqrt{u^2(\Delta F_c) + u^2(\delta F_c) + u^2(\delta F_s)} \\
 &= \sqrt{0.134^2 + 23.641^2 + 30^2} \\
 &= 38.196 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

(5) 유효 자유도

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{u_c^4(\Delta F_{peak})}{\frac{u^4(\Delta F_c)}{\nu_{\Delta F_c}} + \frac{u^4(\delta F_c)}{\nu_{\delta F_c}} + \frac{u^4(\delta F_s)}{\nu_{\delta F_s}}} \\
 &= \frac{38.196^4}{\frac{0.134^4}{5} + \frac{23.641^4}{\infty} + \frac{30^4}{\infty}} \\
 &\approx \infty
 \end{aligned}$$

(6) 확장 불확도 (k=2)

$$U = u_c(f)k = 38.196 \times 2 = 76.392 \text{ Hz}$$

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	34/35

10.5.6 ISO 절차에 의한 불확도 총괄

불확도 요인	확률 분포	적용 인자	자유도	$\Delta F_{\text{peak}} < 4 \text{ kHz}$		$4 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 40 \text{ kHz}$		$40 \text{ kHz} < \Delta F_{\text{peak}} \leq 100 \text{ kHz}$	
				값 (Hz)	표준 불확도	값(Hz)	표준 불확도	값(Hz)	표준 불확도
Accuracy	정규	2	∞	40	20	400	200	1000	500
Mod. Output Distortion	직각	$\sqrt{3}$	∞	4	2.039	40	23.094	100	57.735
AM Rejection	직각	$\sqrt{3}$	∞	20	11.547	20	11.547	20	11.547
Residual FM	직각	$\sqrt{3}$	∞	8	4.619	8	4.619	8	4.619
Maximum Resolution	직각	$2\sqrt{3}$	∞	1	0.289	10	2.887	100	28.868
Type A 불확도	직각	1	∞	8	0.134	-			
신호원의 불확도	직각	$\sqrt{3}$	∞	51.96	30	-			
합성 표준 불확도	-	-	∞	38.196 Hz		-		-	
확장 불확도	t	k=2	∞	76.392 Hz		-		-	

RRL	변조계의 교정 지침서 Guide Book for the Calibration of Modulation Analyzer	문서번호			
		제정일자			
		개정일자			
		개정번호		쪽수	35/35

11. 교정 성적서 작성법

11.1 한국 시험·교정기관 인증기구(KOLAS)에서 인정하는 교정 성적서 상의 11개 항목을 명확한 근거에 의하여 작성한다.

11.2 교정 결과에 중요한 영향을 미치는 모든 주요 데이터는 기록 보존한다.