

제 출 문

본 보고서를 「EMI측정설비 교정시스템의 불확도 산출에 관한 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002 .1 . .

연구책임자 : 통신사무관 김신겸(이천분소 기술과)

연구 원 : 공업연구사 박정규(이천분소 기술과)

전송주사보 이환상(이천분소 기술과)

전송주사보장경승 (이천분소 기술과)

연구보조원 : 연구보조사 박명선 (이천분소 기술과)

요 약 문

1993년도에 ISO가 IEC등 국제기구들과 합동으로 「Guide to Expression of uncertainty in Measurement」를 출간하여 공표 하였을 때 측정과학에서는 실질적으로 측정에 있어서 오차의 분석방법은 폐기된 것이나 마찬가지가 되되었다. 측정분야의 국제적인 경향은 측정결과의 신뢰성과 소급성을 보장하기 위하여 측정결과의 오차분석을 버리고 측정불확도를 분석한다. 본 보고서에서는 EMI 측정설비 교정시스템의 하나인 주파수카운터의 교정시스템과 고주파전압계의 교정시스템에 대하여 그 교정과정에서 야기되는 측정불확도를 산출하기 위하여 수학적모델을 설정하고 모든불확도 요인을 분석하였다. 고주파전압계 교정에 있어서는 케이블의 영향, 열전대감지기와 직류미터의 상관관계, 직류소스 및 RF소스, 감쇠기 및 그 반사계수 등을 분석하여 확장불확도를 산출하였고 주파수카운터는 교정시스템의 불확도요인과 알렌분산과 불확도와의 관계를 분석하였다.

1. 과 제 명 : EMI측정설비 교정시스템의 불확도 산출에 관한 연구
2. 연 구 기 간 : 2001.1.3 - 2001.12.31
3. 연구책임자 : 통신사무관 김신겸

4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부내용	연구자	월별 추진일정												비고
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
○ 측정불확도 자료수집 - 불확도지침서 - 불확도사례] - 관련논문	박정규													
○ 측정불확도 이론연구 - 확률분포연구 - 불확도요인분석연구	박정규													
○ EMI 측정장비 교정시스템 의 불확도 산출 - 고주파전압계 • B형불확도 요인분석 및 산출 • A형불확도 산출을 위한 측정 및 분석 • 주파수 및 전압별 확장불확도 산출	박정규 장경승													
- 주파수미터 & 계수기 • B형불확도 요인분석 및 산출 • A형불확도 산출을 위한 측정 및 분석 • 확장불확도 산출	박정규 이환상													
○ 측정결과분석 보고서작성	박정규													
분기별 수행진도(%)		25			25			25			25		100	

나. 세부 과제별 추진사항

1) 측정불확도 관련 자료수집

- Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results (NIST)
- Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration(EA)
- Measurement Good Practice Guide(NPL)
- 측정불확도 표현지침(한국표준과학연구원)
- 측정불확도 사례집(한국측정기기교정협회) 등

2) 측정불확도 이론연구

- 소급성의 개념
- 측정불확도의 개념 및 종류
- 측정불확도와 관련된 통계이론

3) EMI 측정장비 교정시스템의 측정불확도 산출

- 고주파전압계
 - 측정시스템의 분석
 - B형불확도 요인분석 및 요인별 불확도 산출
 - A형불확도 산출을 위한 반복측정 및 산출
- 주파수미터 & 계수기
 - 측정시스템의 분석
 - B형불확도 요인분석 및 요인별 불확도 산출
 - A형불확도 산출을 위한 반복측정 및 산출

5. 연구 결과

1) 고주파전압계의 측정불확도 산출

- 측정시스템의 수학적 모델링 설정
- 측정시스템의 각 구성 요소가 불확도에 미치는 영향 분석
 - 케이블의 영향 분석
 - 열전대감지기와 직류전압계의 상관관계 분석
 - 직류소스, RF소스의 불확도 요인 분석
 - 감쇠기 및 반사계수에 따른 불확도 산출
- 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 확장불확도 산출
- 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정절차 개정

2) 주파수미터 & 계수기의 측정불확도 산출

- Allan분산과 주파수교정시 측정불확도와의 관계분석
- Allan분산에 의한 측정불확도 산출

6. 기대효과

측정불확도의 기본개념을 정립하고 주파수카운터 및 고주파전압의 측정불확도를 산출함으로써 EMI측정설비의 교정시스템의 국제기에 적합한 기술요건을 충족하여 전자파분야 측정의 정확성과 신뢰성을 도모하게 되어 전자파측정기술 분야의 발전에 이바지 할 것으로 기대됨

7. 기자재 사용 내역

시설·장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
○ 고주파전압계 교정시스템						
• Signal Generator	R/S SMGL	1	RF신호원	보유		
• Multifunction Calibration	FLUKE 5700A	1	직류 신호원			
• Digital Multimeter	PREMA 6048	2	직류 전압계			
• AC/DC Transfer Standard	Ballantine 1605B	1	AC/DC 전달표준			
• Attenuator	Agilent	1	감쇠기			
• STD TVC	Ballantine 1395A 1396A	7	AC/DC 전달표준			
○ 주파수미터 및 계수기						
• SatSync II GPS Receiver	Odetics425	1	GPS 수신기			
• Universal Time Interval Counter	SR620	1	유니버설 카운터			
• Oscilloscope	Tek 246B	1	오시로스 코프			

8. 기타사항 : 없음

SUMMARY

It was virtually declared that measurement science must abandon the error analysis of measurement when ISO had published "Guide to Expression of uncertainty in Measurement". International inclination of measurement field in order to guarantee the traceability and confidence of measurement results discards the error concept and instead analyzes the measurement uncertainty.

In this report we establish a mathematical model of measurement and analyze all uncertainty factors as possible as for yielding the measurement uncertainty in the course of the calibration of RF multimeter using Transfer Standard, Thermal Voltage Converter & Frequency Counter calibrated by calibration system using GPS. We produce the expanded uncertainty by analyzing cable effects, correlation of thermocoupler and DC meter, DC source, RF source, attenuator, reflection coefficients and DUT for the calibration of RF multimeter. Also we analyze the Frequency Counter Calibration System and relationship of uncertainty and Allen Variance.

목 차

제 I 장 서론.....	
제 II 장 측정불확도의 개념.....	
제 1 절 소급성(Traceability)과 측정불확도(Measurement Uncertainty).....	
제 2 절 불확도의 종류.....	
제 3 절 불확도의 요인.....	
제 4 절 측정불확도 관련 주요 통계이론	
제 III 장 주파수카운터의 불확도.....	
제 1 절 개요.....	
제 2 절 주파수카운터 교정시스템의 구성.....	
제 3 절 알렌분산과 주파수안정도.....	
제 4 절 수학적 모델	
제 5 절 측정 불확도	
제 6절 소결	
제 III 장 고주파전압계의 불확도.....	
제 1 절 서론.....	
제 2 절 RF-DC 차.....	
제 3 절 측정시스템의 구성.....	
제 4 절 수학적 모델	
제 5 절 불확도 분석.....	
제 6 절 케이블특성	
제 7 절 열전대감지기와 직류전압계의 상관관계	
제 8 절 측정불확도 산출	

제9 절 소결	
제 IV 장 맺음말.....	
참고문헌	

제 I 장 서론

국제적인 교역이 확대되고 경제의 세계화가 진전됨에 따라 서로 다른 국가에서 이루어지는 측정결과를 신뢰하고 그 측정결과를 평가하고 표현하는 통일작업이 오랫동안 전개 되어왔다. 또한 측정과학에 오차와 오차분석이 아주 오랫동안 중요한 분야로 취급되어 왔음에도 불구하고 그 측정결과가 측정된 값을 얼마나 잘 나타내고 있는가에 대한 의심이 여전히 상존하고 있다는 것이 널리 인식되어 왔다. 이러한 의심스러운 정도를 일률적인 방법을 통하여 평가하고 그 측정결과를 사용자에게 알려주는 것이 측정결과와 평가를 올바르게 할 수 있는 기반이 된다는데 공통된 인식을 갖고 있던 바, 그에 따라 국제표준화기구(ISO)가 BIPM, IEC, IFCC, IUPAC, IUPAP 및 OIML 등의 국제기구와 합동으로 측정불확도 표현지침서 「Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement」를 1993년도에 발행하였다. 그렇게 함으로써 측정결과에 대한 오차분석은 사실상 폐기되게 되었다고 할 수 있다. 국제무선장해특별위원회(CISPR)도 2000년 5월에 CISPR 16-3의 첫 번째 판인 「Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods」에서 전파측정분야의 측정불확도를 언급함으로 해서 전파측정분야에 있어서 전파장해 한계를 결정하는데 통계적인 접근을 시도하고 있다.

본 보고서에서는 측정불확도에 대한 개념을 소개하고 그것을 바탕으로 전자파장해 측정 설비인 주파수카운터와 고주파전압계의 교정시의 측정불확도를 산출하였다.

제 II 장 측정불확도의 개념

1. 소급성(Traceability)과 측정불확도(Measurement Uncertainty)

소급성은 측정물리량이 상위의 표준과 비교되어 측정값의 정확성과 신뢰성을 유지하는 일련의 체계로서 ISO 용어사전에서는 「Property of the result of measurement or the value of a standard whereby it can be related to stated references, usually national or international standards, through an unbroken chain of comparison all having stated **uncertainties**」로 정의되어 있으며 그것의 국어번역은 「모든 **불확도**가 명확히 기술되고 끊어지지 않는 비교의 연결고리를 통하여 명확한 기준(국가 또는 국제표준)에 연관시킬수 있는 측정치 또는 표준치의 특성」이다. 국가표준기본법에서는 소급성을 「연구개발, 산업생산, 시험검사현장 등에서 측정한 결과가 명시된 **불확정 정도**의 범위에서 국가표준측정 또는 국제측정표준에 일치되도록 연속적으로 비교하고 교정하는 체계를 말한다.」으로 정의하고 있다. 이상에서 보는바와 같이 측정에 있어서 끊어지지 않는 비교고리를 유지하여 소급성이 유효하기 위해서는 측정불확도를 필수요소로서 구성하도록 하고 있다.

2. 불확도의 종류

측정불확도를 평가하기 위하여는 불확도의 원인이 되는 요인들을 면밀히 검토하여야 한다. 일반적으로 측정결과는 측정대상의 고유값의 추정치에 불과하며 따라서 불확도가 정량적으로 표시되어야만 완전하다. 국제적으로 불확도 평가방법은 A형평가와 B형평가로 구분하고 있다. A형불확도 평가는 반복측정의 결과를 통계적으로 처리하는 방법이고 B형불확도 평가는 그 이외의 모든 통계적인 방법을 통칭한다.

가. A형불확도의 평가

(1) 실험표준편차

측정량의 모집단에 대하여 모평균 μ 와 모분산 σ^2 을 안다면 일정횟수의 측정

을 시도하여 얻어진 표본집합 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 의 표본평균과 표본분산은 중심극한정리에 의하여 그 측정의 측정값의 분포는 평균 μ , 분산 $\frac{\sigma^2}{n}$ 인 유사정규분포로 표시할 수 있다. 그러나 실제로 모평균과 모분산은 알 수가 없기 때문에 그 모평균과 모분산을 표본집합의 표본평균 \bar{X} 와 표본분산 $s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}$ 으로 추정하는 것이 합리적이다. 그러면 그 측정의 표본집합 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 은 평균이 \bar{X} 이고 분산이 $\frac{s^2}{n}$ 인 유사정규분포가 된다.

(2) A형 표준불확도 공식

국제표준화기구 ISO와 여타의 다른 측정과 관계된 표준기구에서는 $\frac{s^2}{n}$ 의 제곱근을 반복측정에 있어서 A형 표준불확도로서 정의한다. 즉 A형 표준불확도를 u_A 로 표시하면 다음과 같다.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

나. B형표준불확도 평가

B형불확도 평가는 반복측정에 의한 통계적인 방법외의 모든 다른 통계적인 방법에 의한 불확도 평가방법을 말한다. A형불확도 평가에서 측정과정에서 필연적이지만 표본추출에서도 나타나지 않은 불확도 요인은 통계적 해석으로도 불가능하기 때문에 B형평가가 필요한 것이다. 그러므로 B형평가는 이미 알려진 정보를 이용하여 최악의 경우를 대비하여 분산의 추정값 u_B^2 을 구한다. 흔히 다음과 같은 정보가 이용된다.

- 과거의 측정 데이터
- 관련재료와 기기의 거동 및 특성에 대한 경험이나 일반지식
- 제작자 규격
- 교정성적서나 기타 인증서에 주어진 데이터
- 핸드북에서 인용한 참고자료의 불확도

B형평가시 분산의 추정값 u_B^2 을 구하는데 통계학적인 확률분포의 표준편차 공식을 사용하는데, 다음과 같은 분포가 많이 쓰인다.

- 직각분포
- 삼각형분포
- 정규분포
- U자형분포

다. 합성표준불확도

A형불확도와 B형불확도 측정 및 분석 계산되어지면 그 불확도성분을 합성함으로써 전체적인 불확도 계산이 마무리된다. 이러한 불확도성분의 합성은 불확도전과 법칙에 따른 공식이 이용된다. 다음과 같은 공식으로 요약된다.

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + \dots + c_n^2 u_n^2}$$

여기서 A형불확도는 1개지만 B형불확도는 여러개가 있을수 있으므로 위 식의 뒷항처럼 나타낼 수 있으며 c_i 는 감도계수로이다.

라. 최종적인 불확도의 표시 : 확장불확도(Expanded Uncertainty)

측정의 최종적인 불확도를 표시하는 방법은 측정에 관련된 국제기구들의 상이한 목적 때문에 다소간 의견의 차이가 있다. 국제도량형위원회(CGPM)는 측정과학의 발전을 주된 목적으로 하고 있기 때문에 최종불확도는 합성표준불확도로 표기하여 가능한 한 측정불확도가 작은 값으로 나타내어 지기를 원한다. 그러나

ISO나 IEC 같은 국제기구들은 국제교역을 원활히 하고 보건, 안전 등의 공공목적의 문제들을 취급하여야 하기 때문에 합성표준불확도에 보상계수를 곱하여 신뢰도를 높이고 분쟁의 소지를 제거하기 위하여 확장불확도의 개념을 도입하고 있다.

확장불확도 U 는 합성표준불확도 u_c 에 신뢰수준과 유효자유도에 따라 결정되는 보상계수 k 를 곱하여 구한다. 즉 $U = ku_c$ 인데 유효자유도 공식과 t 분포에 의해서 95% 이상의 신뢰수준에 따라 k 를 결정함으로써 최종불확도 표시인 확장불확도를 표시하게 된다.

3. 불확도의 요인

실제적인 측정에 있어서 불확도 요인은 많이 존재하며 일반적인 모습은 다음에서 기술하는 사항을 포함한다. 특정한 측정분야에서는 이 항목 이외에 그 분야에 고유한 불확도 요인을 분석하는 것도 필요하다.

- 측정량에 대한 불완전한 정의
- 측정량의 정의에 대한 불완전한 실현
- 대표성이 없는 표본 추출
- 측정환경에 대한 지식 부족 및 환경조건에 대한 불완전한 측정
- 아날로그 기기에서의 개인적인 판독의 차이
- 기기의 분해능과 검출한계
- 측정표준과 표준물질의 부정확한 값
- 외부자료에서 인용하여 데이터 분석에 사용한 상수와 파라미터의 부정확한 값
- 측정방법과 측정과정에서 사용되는 근사값과 여러가지 가정
- 외관상 같은 조건이지만 반복적인 측정에서 나타나는 변동

4. 측정불확도 관련 주요 통계이론

가. 확률분포의 종류

측정불확도를 산출하기 위해서는 확률분포의 분석이 필수적이다. 다음은 전자과 측정분야에서 많이 등장하는 확률분포이다.

(1) 정규분포(normal distribution)

측정과학에 있어서 가장 중요한 확률분포로서 정규분포 또는 가우스분포가 있다. 대개의 자연현상이나 측정과정에서 흔히 나타난다. 이 분포는 통계적 해석에 있어서 핵심적인 도구가 되며 통계이론의 기초를 이룬다.

수학적 형식은 다음 (II-1)식과 같고 그 분포의 그래프는 그림(II-1)에 나타냈다. 여기서 μ 와 σ 는 정규분포에 있어서 각각 평균과 표준편차이다

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (\text{II-1})$$

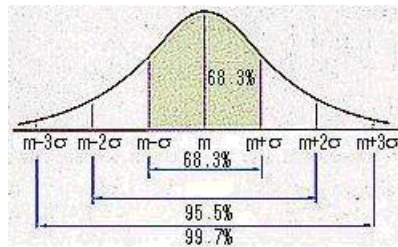


그림 II-1 정규분포

(2) t 분포

가우스분포를 모집단으로 하고 그 모집단에서 임의의 표본집합을 선택했을 때 그 표본집합은 가우스분포와 비슷한 분포를 갖게 되는데 이 분포를 t분포라고 한다. 실제 측정에 있어서 무한 번의 반복측정을 하면 그것은 가우스분포가 되지만 현실적으로 그것은 불가능함으로 거의 모든 측정과정은 t분포에 의존한다고 할 수 있다. 우리가 n번의 측정을 시도하였다면 t분포에서 n-1을 자유도라고 부른다. t분포의 수학적 형식은 식 (II-2)과 같고 분포는 그림(II-2)에 있다.

$$f(x_\nu) = \frac{\Gamma((\nu+1)/2)}{\sqrt{\nu\pi}\Gamma(\nu/2)} \left(1 + \frac{x_\nu^2}{\nu}\right)^{-(\nu+1)/2} \quad (\text{II-2})$$

여기서 $\Gamma(\nu)$ 은 감마함수라는 특수한 함수이고, ν 는 t분포에서 자유도이며 여기서는 n-1과 같다. 이 함수를 보면 t분포는 측정횟수에 의존하는 함수이다.

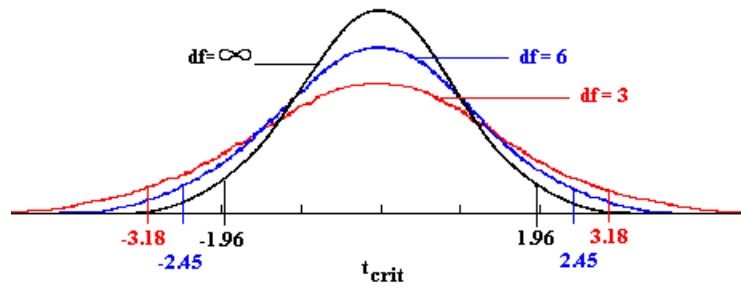


그림 II--2 student-t 분포

(3) 직각확률분포(균등분포)

균등분포라고도 하는데 연속형 분포에서 가장 단순한 분포형태로 연속형 확률 변수 x 가 구간 $[-a, a]$ 에서 나타날 가능성이 일정할 때의 분포를 말하며 측정학 분야에서 상당히 많이 등장한다. 대표적으로 측정기의 분해능이 직각확률분포를 갖는다. 그림7에서 보듯이 분포함수는 $f(x) = \frac{1}{2a}$ 이다.

$$\text{직각분포의 표준편차 : } \sigma = a/\sqrt{3} \quad (\text{II}-3)$$

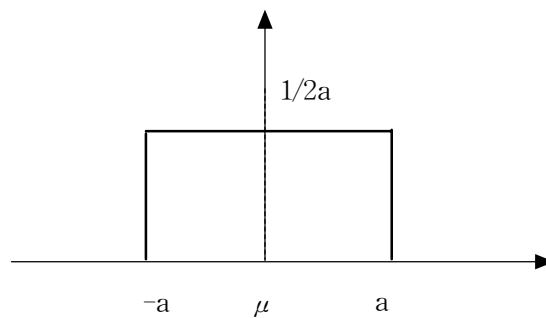


그림 II-1 직각확률분포

(4) U 자형분포

드물게 나타나는 유형이며 전기나 전자과분야에서 임피던스 정합과 같은데서 완벽한 정합을 이루지 못했을 때에 등장한다. 확률분포함수는 다음과 같고 그림 (II-4)에서 보듯이 U자를 뒤집어 놓은 형태에서 유래한다.

$$f(x) = \frac{3}{8a\sqrt{2a}} (\sqrt{a+x} + \sqrt{a-x}) \quad (\text{II-4})$$

$$\text{U형분포의 표준편차 : } \sigma = \sqrt{\frac{11}{35}} a \sim 0.56a \quad (\text{II-5})$$

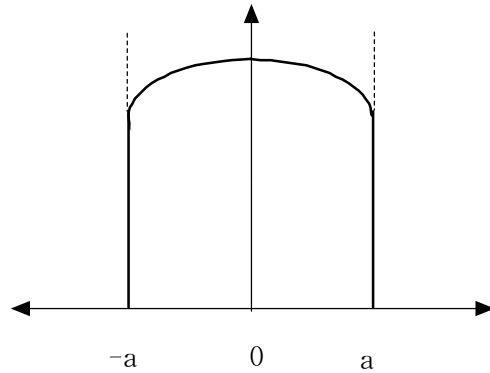


그림8 U형분포

(5) 삼각형분포

$$\text{분포함수 : } f(x) = \frac{1}{a^2} x + \frac{1}{a} \quad (x \leq 0) \quad (\text{II-6})$$

$$-\frac{1}{a^2} x + \frac{1}{a} \quad (x \geq 0)$$

$$\text{삼각형분포의 표준편차 : } \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (\text{II-7})$$

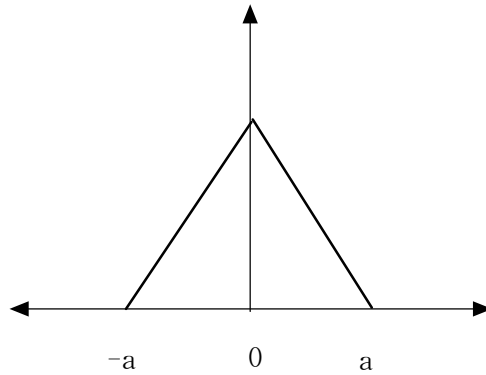


그림 II-5 삼각형분포

나. 주요 통계이론

(1) 중심극한정리(Central limit theorem)

모집단의 분포가 정규분포가 아니더라도 표본의 크기가 크면 표본평균의 분포는 정규분포에 가까워진다.” 이 정리를 좀더 엄밀하게 표현하면 「평균이 μ 이고 분산이 σ^2 인 확률분포로부터 크기가 n 인 표본집합 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 을 추출할 때 표본평균 $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ 는 n 이 클수록 평균이 μ 이고 분산이 $\frac{\sigma^2}{n}$ 인 정규분포와 근사한 분포를 갖는다.」

이 정리는 모집단의 분포가 어떠한 형태를 갖더라도 그 표본의 평균과 분산을 추정하고 그 표본의 성격을 분석하는데 정규분포를 이용할 수 있다는 것으로 측정과학에서도 대단히 중요한 정리이다.

(2) 체비셰프의 정리(Chebyshev's theorem)

「측정한 자료의 분포에 관계없이 평균으로부터 표준편차의 k 배의 범위 ($\bar{X} \pm ks$)에 적어도 측정한 자료의 $(1 - 1/k^2)$ 만큼 존재한다(단 $k \geq 1$)」

이 정리는 측정에 있어서 신뢰수준을 가늠할 수 있는 척도를 제공 한다. 측정 불확도 관련분야에서는 k 를 보상계수(coverage factor)로 정의한다. 만일 $k=2$ 라면 어떠한 분포인지를 불문하고 $\bar{X} - ks \leq x \leq \bar{X} + ks$ 의 범위내에 측정값의 $1 - 1/4 = 0.75$ 즉 75% 이상이 존재하고 이는 최소한 75%의 신뢰성을 갖음을 의미한다.

(3) 불확도전파의 법칙

앞선절 (1)의 가우스 분포에서 확률변수가 각각 x 와 y 라 한다면 각각의 대한 분포함수는

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} e^{-(x-\mu_x)^2/2\sigma_x^2} \quad (\text{II}-8)$$

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} e^{-(y-\mu_y)^2/2\sigma_y^2} \quad (\text{II}-9)$$

이 된다. 만일 새로운 확률변수 z 에 대하여 $z=ax+by$ 의 관계가 성립하면 확률변수 z 에 대한 가우스 분포함수는

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} e^{-(z-\mu_z)^2/2\sigma_z^2} \quad (\text{II}-10)$$

이 된다. 위의 식들을 이용하여 약간의 복잡한 유도과정을 거치면 표준편차 상호간의 관계가 다음과 같이 성립됨을 보일 수 있다.

$$\sigma_z^2 = a^2\sigma_x^2 + b^2\sigma_y^2 \quad (\text{II}-11)$$

또한 $z=ax+by$ 에서 x 와 y 에 대해서 편미분을 취함으로 해서

$$a = \frac{\partial z}{\partial x}, \quad b = \frac{\partial z}{\partial y} \quad (\text{II}-12)$$

을 얻는다. 이 관계식을 감도계수라고 부른다. 또한 식 (II-12)을 식 (II-11)에 대입함으로써 표준편차들의 상호관계식은

$$\sigma_z^2 = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 \quad (\text{II}-13)$$

이 되는데 이 관계를 측정과학분야에서는 불확도전파의 법칙이라 한다.

위의 식 (II-13)을 n 개의 독립적인 표준편차로 구성된 시스템으로 확장하고 표준편차 σ 대신 불확도를 나타내는 변수 u 로 z 대신 f 로 대치하여 다시 쓰면 다음

과 같은 일반적인 불확도전파의 법칙을 쓸 수 있으며, 이 관계식이 다음 장에서 설명 할 합성표준불확도 이다.

$$u_c^2 = \sum_{i=0}^n c_i^2 u^2(x_i) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (\text{II-14})$$

(4) 자유도(degree of freedom)

표본집합의 표본분산 s^2 을 구할 때 표본의 크기인 n 대신에 $n-1$ 로 나누어 구한다. 이는 표본으로부터 모집단의 분산을 추정할 때 $n-1$ 을 사용하는 것이 가장 적합하다는 것이 수리통계학적으로 증명되어있다.

이것이 자유도와 관련된 사항으로 편차제곱의 합을 계산하는데 사용된 수 가운데 실질적으로 독립적인 수의 개수를 의미한다.

후에 설명할 측정의 최종결과를 표시하는 확장불확도 U 는 모든 불확도요소를 합성한 합성표준불확도 u_c 와 보상계수 k 의 곱, 즉

$$U = k u_c \quad (\text{II-15})$$

로 구해진다. 여기서 k 를 결정하는 것이 그 시스템의 자유도이다. 보상계수 k 를 구하기 위해서는 u_c 의 유효자유도를 추정하여야 하는데 아래의 Welch Satterthwaite 공식을 이용한다.

$$\nu_{eff} = u_c^4 / \sum_{i=1}^n \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i} = u_c^4 / \sum_{i=1}^n \frac{[u_i(y)]^4}{\nu_i} \quad (\text{II-16})$$

여기서 ν_i 는 $u(x_i)$ 의 유효자유도라고 하는데 다음장에서 설명할 불확도의 A형평가와 B형평가에 따라 다음과 같이 주어진다.

- n 번의 실험을 통한 A형평가 : $n-1$
- 정규분포인 경우 : ∞
- 직각분포인 경우 : ∞
- 삼각형분포인 경우 : ∞

- U자형분포인 경우 : ∞

위의 공식을 통하여 구하여진 유효자유도 ν_i 의 값을 갖고 분포표의 테이블에서 원하는 신뢰도에 맞추어서 보상계수를 결정한다.

제 III 장 주파수카운터의 불확도

1. 개요

시간 및 주파수는 다른 기본 물리량인 길이, 질량, 온도, 전류, 광도 그리고 물질의 양을 측정하는 것 보다 더 가장 정밀하게 측정할 수 있는 양이기 때문에 이들 기본물리량을 측정하는데도 이용되고 있다. 또한 전기, 전자, 정보기기 등 대부분의 현대생활에 필수적인 기기들은 정확한 작동을 위해서 내부에 클럭이나 국부 발진기 등의 진동자를 포함하고 있는데 이들이 정확하게 동기화가 되어있지 않으면 혼신이나 오작동의 원인이 되기 때문에 주파수의 정확한 측정은 과학과 산업에 가장 기본적인 사항이라고 일컬을 수 가 있다. 이러한 이유로 발진기의 주파수를 측정하는 주파수카운터의 신뢰성 있는 성능을 유지 관리하기 위하여 고정밀도를 갖는 시간 및 주파수 장비 교정 시스템이 필요한데, 1990년 이후로 가장 많이 이용되는 시스템은 미국방부가 군사목적으로 쏘아올린 위성인 GPS에 의한 시간 및 주파수 표준의 이용이다. 본 보고서이 주파수카운터를 교정하는 시스템은 표준 클럭 및 고확도의 기준 주파수를 제공하는 GPS 수신에 의한 교정 시스템이다.

2. 주파수카운터 교정시스템의 구성

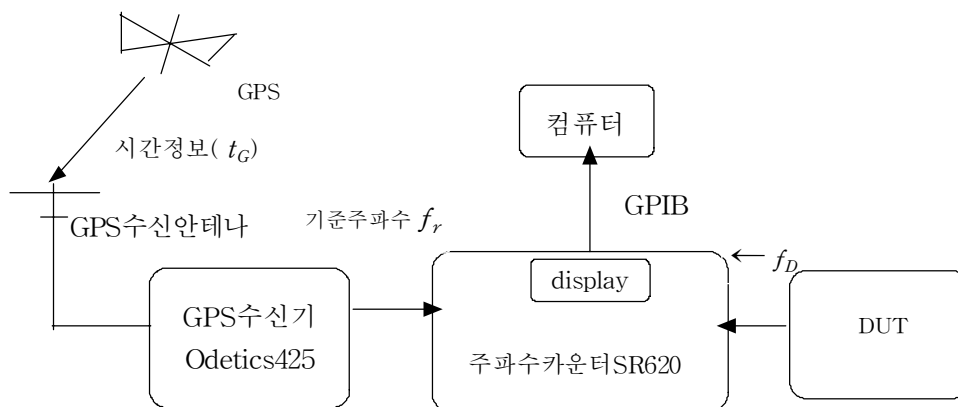


그림 III-1 측정시스템구성도

주파수카운터의 교정시스템은 그림(Ⅲ-1)과 같고 10MHz를 공급하여 1s간격으로 256회 측정하였으며 교정에 사용한 표준장비와 교정대상 DUT는 다음과 같다.

○ 표준장비 명세

- GPS 수신기 : Odetics425
- Universal Counter : SR620

○ 교정대상 DUT

- 품명 : Rubidium
- 제작자 : R/S
- 모델 : XSRM

3. 알렌분산과 주파수안정도

주파수 발생기가 특정시간동안 어느정도 같은 주파수를 발생하느냐를 결정하는 값이 주파수 안정도이며 주파수 카운터의 특성을 결정해주는 인자이다. 특히 단기 주파수 안정도는 주파수 발생기의 불규칙한 잡음에 의한 주파수 변동을 나타내는 것인데, ITU와 IEEE는 주파수 안정도를 알렌분산(Allan variance)으로 정의하도록 추천했다. 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}\sigma_y^2(\tau) &\equiv \langle \sigma_y^2(N=2, T=\tau, \tau) \rangle \\ &= \langle \frac{(\overline{y_{k+1}} - \overline{y_k})^2}{2} \rangle \\ &= \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\overline{y_{k+1}} - \overline{y_k})^2\end{aligned}\quad (\text{Ⅲ-1})$$

여기서 y_{k+1} 는 k와 k+1번째의 측정주파수 f_{k+1} , f_k 의 다음과 같이 정의되는 상대주파수로서 $y_{k+1} = \frac{f_{k+1} - f_k}{f_k}$ 이다. M은 측정 데이터의 개수이다.

4. 수학적 모델

그림(Ⅲ-1)에 나타난 교정시스템에 대한 교정시스템의 수학적 모델은 다음과 같이 정의한다.

$$f_D = f(y, f_r, \Delta f_c) = (1 + y)f_r + \Delta f_c \quad (\text{Ⅲ-2})$$

여기서 기호들은 다음과 같다.

- f_D : DUT의 공급주파수
- y : 측정의 상대주파수
- f_r : GPS 수신기가 Odetics가 카운터에 제공하는 기준주파수
- Δf_c : 주파수카운터 시스템에 의한 변동량

다음과 같은 과정으로 수학적 모델을 설정하였다.

- ① 상대주파수는 $y = \frac{F_c - F_{nc}}{F_{nc}}$ 으로 정의되는데 여기서 F_c 는 측정주파수이고

F_{nc} 는 명목주파수 이다. 실제 측정에 있어서 명목주파수는 Reference를 제공하는 GPS수신기 Odetics가 발진하는 주파수이다. 그 주파수를 f_r 이라 하고 측정주파수를 f_c 라고 하자. 그러면 상대주파수에 대한 관계식은

$$y = \frac{f_c - f_r}{f_r} \text{ 이다.}$$

- ② a 에서 상대주파수에 대한 관계식을 측정주파수 f_c 에 대해서 정리하면 $f_c = (1 + y)f_r$ 이 된다.

- ③ 실제로 DUT에서 발진하는 주파수 f_D 는 주파수 카운터에서 측정한 주파수 f_c 에 주파수카운터의 불확도요인에 의한 변동량 Δf_c 와의 합이 될 것이다. 즉 $f_D = f_c + \Delta f_c$ 이다.

- ④ b와 c에서 수학적 모형의 관계식을 $f_D = f(y, f_r, \Delta f_c) = (1+y)f_r + \Delta f_c$ 로 유도할 수 있다.

5. 측정불확도

가. 불확도 관계식

$$(u_{f_D})^2 = \left(\frac{\partial f_D}{\partial y} u_y\right)^2 + \left(\frac{\partial f_D}{\partial f_r} u_{f_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_D}{\partial \Delta f_c} u_{\Delta f_c}\right)^2 \quad (\text{III-3})$$

나. 불확도 관계식 분석

- u_{f_D} : 측정에 대한 합성표준 불확도
 - 형태 : 합성표준불확도
 - 산포 : t분포(결과의 분석에 의거)
- u_y : 단기안정도
 - 형태 : A형, 256회 측정값으로서 알랜분산
 - $u_y = 3.00 \times 10^{-10}$
 - 산포 : t분포
 - 감도계수 : $\frac{\partial f_D}{\partial y} = f_r = \text{명목주파수} = 10\text{MHz}$
- u_{f_r} : Reference 주파수의 불확도로서 Odetics 425 시스템의 불확도
 - 형태 : B형 , 인용값(KRISS의 교정성적서의 단기안정도)
 - $u_{f_r} = \text{KRISS 성적서 단기안정도} \times 10\text{MHz}$

$$= 1.00 \times 10^{-11} \times 10\text{MHz} = 1.00 \times 10^{-4}\text{Hz}$$
 - 산포 : t분포
 - 감도계수 : $\frac{\partial f_D}{\partial f_r} = 1 + y = 1 + 1.00 \times 10^{-10} \sim 1$

;여기서 y는 측정결과인 상대주파수의 평균값인 정확도를 대입하였다.

○ $u_{\Delta f_c}$: 주파수카운터 시스템의 불확도

$$- u_{\Delta f_c} = \sqrt{(error)^2 + (counter\ digit\ 의\ 분해능)^2}$$

$$= \sqrt{(1.60 \times 10^{-3} Hz)^2 + 8.94 \times 10^{-12} Hz^2} \sim 1.60 \times 10^{-3} Hz$$

$$\bullet error = 1.60 \times 10^{-3} Hz$$

$$\bullet error = resolution + (timebase\ error \times frequency)$$

$$+ \frac{100ps}{gate\ time} \times frequency$$

(주파수카운터 SR620의 매뉴얼 27쪽)

$$\bullet resolution \sim 6.00 \times 10^{-11} \times 10 MHz = 6.00 \times 10^{-4} Hz$$

(주파수카운터 SR620의 매뉴얼 27쪽 Graph5)

$$\bullet timebase\ error = long\ term\ stability$$

(주파수카운터 SR620의 매뉴얼 26쪽8행)

; 만일 SR620에 외부 타임베이스를 사용한다면 그 외부 타임베이스가 SR620의 타임베이스가 된다

; 본 교정 시스템은 타임베이스 Odetics 425의 타임베이스

$$; timebase\ error = long\ term\ stability = 7.18 \times 10^{-17}$$

-> GPS수신기 Odetics 425는 7일간의 주파수 drift를 측정하여 보정해 준다. 그러므로 GPS수신기 Odetics 425의 장기안정도는 그 값이다.

$$\bullet timebase\ error \times frequency$$

$$= 7.18 \times 10^{-17} \times 10 MHz = 7.18 \times 10^{-10} Hz$$

$$\bullet 100ps/(gate\ time) \times frequency$$

$$= \frac{100 \times 10^{-12} s}{1s} \times 10 MHz = 10^{-3} Hz$$

$$\bullet SR620의\ digit\ 는\ 10^{-5} Hz\ 까지\ 표시되어\ 있으므로\ 그\ 불확도는$$

$$\frac{10^{-5} Hz}{2\sqrt{3}} = 2.99 \times 10^{-6} Hz\ 이다.$$

- 형태 : B형, 인용값

- 산포 : 직각분포
- 감도계수 : $\frac{\partial f_D}{\partial \Delta f_c} = 1$

다. 합성표준 불확도의 산출 : 「나. 불확도 관계식 분석」의 데이터를 이용

$$\begin{aligned}
 u_c = u_{f_D} &= \sqrt{\left(\frac{\partial f_D}{\partial y} u_y\right)^2 + \left(\frac{\partial f_D}{\partial f_r} u_{f_r}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_D}{\partial \Delta f_c} u_{\Delta f_c}\right)^2} \\
 &= \sqrt{(10 \text{ MHz} \times 3.00 \times 10^{-10})^2 + (1 \times (1.00 \times 10^{-4} \text{ Hz}))^2 + (1 \times (1.60 \times 10^{-3} \text{ Hz}))^2} \\
 &= 3.40 \times 10^{-3} \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

라. 확장불확도

(1) 유효자유도

보상계수를 구하기 위하여 유효자유도를 구하여야 하는데 유효자유도는 방정식 (II-16) Welch Satterthwaite 공식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \nu_{eff} &= \frac{(u_{f_D})^4}{\frac{\left(\frac{\partial f_D}{\partial y}\right)^4 (u_y)^4}{\nu_y} + \frac{\left(\frac{\partial f_D}{\partial f_r}\right)^4 (u_{f_r})^4}{\nu_{f_r}} + \frac{(1)^4 (u_{\Delta f_c})^4}{\nu_{\Delta f_c}}} \\
 &= \frac{(3.40 \times 10^{-3} \text{ Hz})^4}{\frac{(10 \text{ MHz} \times 3.00 \times 10^{-10})^4}{256} + \frac{(1 \times (1.00 \times 10^{-4} \text{ Hz}))^4}{256} + \frac{(1 \times (1.60 \times 10^{-3} \text{ Hz}))^4}{\infty}} \\
 &\sim 417 \sim \infty
 \end{aligned}$$

(2) 확장불확도 산출

합성표준불확도 u_c 즉 u_{f_D} 와 위의 (1)에서 구한 유효자유도를 이용하면 그것에 해당하는 t분포표에서 보상계 값은 1.96임으로 확장불확도는

$$U = 1.96 \times 3.40 \times 10^{-3} Hz = 6.66 \times 10^{-3} Hz \text{ 이다.}$$

6. 소결

공급값 : 10 MHz

추정대표값 : 10 MHz

단기안정도(알렌분산) : $u_y = 3.00 \times 10^{-10}$ (256회 측정)

확장불확도 : $U = 1.96 \times 3.40 \times 10^{-3} Hz = 6.66 \times 10^{-3} Hz$
(t분포, 95% 신뢰도 k=1.96)

공급값 10MHz를 측정하는데 있어서 측정값은 $(10.000\,000 \pm 6.66 \times 10^{-9}) \text{ MHz}$ 이다.

상대 확장불확도는 $U/\text{공급주파수} = 6.66 \times 10^{-9} / 10.000\,000 = 6.66 \times 10^{-10}$ 이다.

제 IV 장 고주파전압계의 불확도

1. 서론

전압측정이 의미를 가질 수 있는 주파수 한계는 전달표준(transfer standard)의 주파수 특성에 의해 제한된다. RF 전압의 1차표준은 NIST 등에서 제작한 Bolovac 이고 이러한 1차표준으로부터 소급되어 하위의 RF전압 측정기기의 성능평가를 하는데 이러한 상위의 표준으로부터 하위의 표준으로 전달해주는 표준을 전달표준이라 한다. 전달표준으로서 열전압변환기(TVC : Thermal Voltage Converter)나 RF 미소전압표준기(micropotentiometer)가 있는데 본 논문에서는 열전압변환기를 이용하여 주파수범위 100MHz-1GHz의 고주파전압계를 교정할 때 교정과정에서 관계되는 불확도 요인을 분석하고 수학적 모델을 세워서 고주파전압계의 교정에 대한 측정불확도를 산출하였다.

2. RF-DC차

열전압변환기의 특성은 다음과 같이 정의되는 RF-DC차에 의해서 결정된다.

$$\delta(\%) = \frac{V_{RF} - V_{DC}}{V_{DC}} \times 100 \quad (IV-1)$$

이 물리량은 RF전압 전달표준이 동일한 열적효과를 얻는데 요구되는 직류전압의 \pm 두 방향에 대한 평균값과 RF 전압과의 차이의 비로서 정의되는데 여기서 V_{RF} 는 인가된 RF전압이며, V_{DC} 는 \pm 의 두 방향에 대한 평균이다.

열전압변환기의 특성인 RF-DC차를 알고 대체 직류전압을 측정하게 되면 RF전압을 결정할 수 있으며, 그 RF전압과 교정대상이 되는 고주파전압계로서 DUT의 측정값 V_{RF}^{DUT} 와의 비로서 다음과 같이 정의되는 교정인자

$$F = \frac{V_{RF}^{DUT}}{V_{RF}} = \frac{V_{RF}^{DUT}}{V_{DC}^{avg}(0.01\delta + 1)} \quad (IV-2)$$

를 구함으로써 고주파전압계를 정확히 교정할 수 있다.

3. 측정시스템의 구성

측정시스템 전체의 구조는 그림 (IV-1)과 같다.

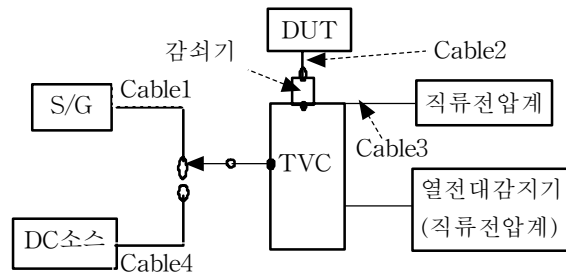


그림 IV-1. 시스템의 구성도

구성요소는 열전압변환기, 신호발생기, DC소스, 직류전압계, 열전대감지기(직류전압계)와 감쇠기 등과 각종 케이블로 구성되었으며, 측정시 고주파 전압계인 DUT가 연결되어 전체 측정시스템을 이루고 있다. TVC는 Ballantine 1396A 이고 내부 구조는 그림 (IV-2)와 같다. Ballantine 1396A 시리즈의 측정범위는 주파수 100-1000MHz 영역이며 전압은 7V까지이다. 정밀 교정을 위해 정합을 위한 감쇠기를 출력단에 연결하여야 한다. TVC는 내부에 T연결기가 내장되어 입력신호를 열전대와 출력으로 분기한다.

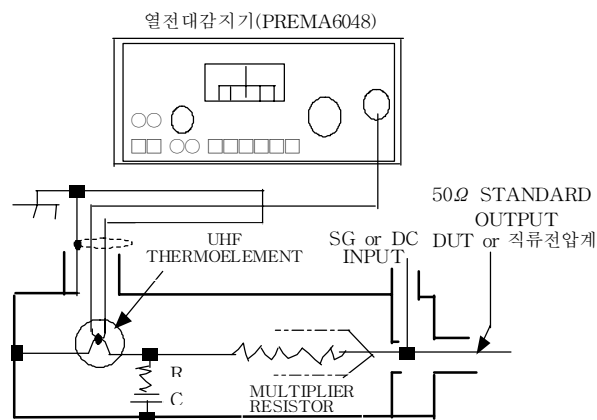


그림 IV-2 TVC의 내부구조

그 밖의 다른 측정 장비는 다음과 같다.

- 신호발생기(S/G) : R/S SMGL
- DC 소스 : Meter Calibrator ; Fluke 5700A
- 직류전압계 : PREMA 6048 (S/N 1159)
- 열전대감지기 : PREMA 6048 (S/N 1167)
- 감쇠기 : AGILENT 8491B

교정대상 DUT인 고주파전압계는 R/S에서 제작한 RF Millivoltmeter URV5, NRV-Z5 이다.

4. 수학적 모델

식 (IV-2)에의 분자항은 실제 측정과정에서 DUT가 읽은 값과 정합을 위하여 사용한 감쇠기에 의한 감쇠값의 보정항 ΔV_{att} 그리고 S/G에서 보낸 신호가 케이블을 통해 TVC의 입력단에 도달했을때 신호세기의 변동에 의한 보정값 ΔV_{SG} 을 고려하여야 한다. 즉 $V_{RF}^{DUT} \rightarrow V_{Read}^{DUT} + \Delta V_{att} + \Delta V_{SG}$ 로 대체되어야 한다. 한편 식 (IV-2)의 분모항에 있어서 V_{DC}^{avg} 는 직류전압계가 읽은 \pm 양방향 전압의 평균값과 DC소스의 보정값 ΔV_{DC}^{sou} 을 더해주어야 한다. 즉 $V_{DC}^{avg} \rightarrow V_{Read}^{avg} + \Delta V_{DC}^{sou}$ 이 되어야 한다. 그러므로 식 (IV-2)의 교정인자는 다음과 같이 변형된다.

$$F = \frac{V_{Read}^{DUT} + \Delta V_{att} + \Delta V_{SG}}{(V_{Read}^{avg} + \Delta V_{DC}^{sou})(0.01\delta + 1)} \quad (IV-3)$$

위에서 보는 방정식이 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정 과정에서 교정인자에 대한 우리가 원하는 식이다.

5. 불확도 분석

불확도 전파법칙에 따르면 합성 표준불확도는

$$u_c^2 = \sum_{i=0}^n c_i^2 u^2(x_i) = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \text{로 주어진다.}$$

이 식을 변형된 교정인자에 대한 방정식 (IV-3)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_F^2 &= \left(\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{DUT}} \right)^2 u_{V_{Read}^{DUT}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{att}} \right)^2 u_{\Delta V_{att}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{SG}} \right)^2 u_{\Delta V_{SG}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{avg}} \right)^2 u_{V_{Read}^{avg}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{DC}^{sau}} \right)^2 u_{\Delta V_{DC}^{sau}}^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial \delta} \right)^2 u_{\delta}^2 \quad (IV-4) \end{aligned}$$

여기서 각기 성분에 대하여 분석하면 다음과 같다.

- u_F : 교정인자 F에 대한 합성표준 불확도
- $u_{V_{Read}^{DUT}}$: DUT 자체에 의한 불확도와 DUT와 연결된 감쇠기의 반사계수의 영향에 의한 부정합 불확도의 합성 성분
 - ① DUT불확도: DUT 매뉴얼의 분해능, 에리한계, digit 등
 - ② 부정합 불확도 : $\frac{|\Gamma||V_0|}{\sqrt{2}}$
 - Γ : 감쇠기의 반사계수
 - V_0 : S/G의 출력전압
- $u_{\Delta V_{att}}$: 감쇠기의 감쇠에 의한 전압 불확도
 - 감쇠기 감쇠량 교정성적서 상의 불확도
- $u_{\Delta V_{SG}}$: 신호발생기의 교정성적서 상의 불확도
- $u_{V_{Read}^{avg}}$: ① 직류전압계의 불확도로서 교정성적서의 불확도와 매뉴얼의 1년간의 accuracy에 의한 불확도(교정 이후 거의 1년이 경과하였기 때문에 고려한 항)의 합성

②그림 IV-1에서 열전대감지기(직류전압계)의 마지막 digit에 의한 불확도 성분으로서 마지막 digit가 한자리씩 올라감에 따라 그와 연동된 직류전압계의 측정값의 변동을 반복 측정함으로써 결정함. 이는 교정의 첫 번째 단계에서 S/G에서 보낸 신호가 TVC의 열전대를 통과하면서 열전 전압이 발생하는데 그때 열전대 감지기가 읽은 값과 교정의 두 번째 단계에서 S/G대신 직류전압을 인가하여 똑같은 열전대 전압을 얻기위하여 첫 번째 단계에서 읽은 측정값을 두 번째 단계에서 같은 값으로 맞추므로써 원하는 결과를 얻을 수 있으나 이 과정에서 마지막 자리의 digit가 같은 값을 지정 하더라도 digit의 분해능의 한계 때문에 두 비교값의 완전한 동일성을 보장할 수 없으므로 이에 대한 불확도 성분을 고려한 것임.

- $u_{\Delta V_{DC}^{sau}}$: DC 소스의 교정성적서상의 불확도
- u_{δ} : 열전압변환기의 교정성적서상의 불확도

6. 케이블특성

그림 IV-1의 측정시스템은 전체 5방향의 케이블로 구성되어 있다. 여기서 TVC 내의 열전대로부터 열전대 감지기인 직류전압계로 향하는 케이블은 측정과정에서 불확도 성분으로 작용하지 않는다. 그러므로 본 측정에서는 4가지 방향의 케이블만을 고려하는데 직류 lead 케이블 2개와 RF케이블 2종이 있다.

케이블의 영향을 조사하기 위하여 각각의 케이블에 대하여 소스와 측정기를 직접 연결하여 소스에서 1V의 신호를 입력하고 측정기에서 직접측정함으로써 그 값의 차이와 소스와 측정기의 불확도를 고려하였다. 그 결과는 표 IV-1에서 보는바와 같다. cable2의 길이는 130cm 이고 나머지 케이블은 115cm 이다. 표IV-1에서 보듯이 cable1과 2는 1V의 입력소스에 대해 불확도를 고려하면 95%의 신뢰수준으로 그 입력전압은 $(1 \pm 0.0036)V$ 의 범위에 있으므로 케이블의 영향에 의한 보정값을 표에서 처럼 보정해주어야 하지만 cable3과 4는 $(1 \pm 0.0000045)V$ 의 범위임으로 측정값이 그 범위를 만족하기 때문에 보정해 줄 필요가 없는 것이다. 실제 측정과정에서는 SG에서 입력신호는 케이블1을 거쳐서 케이블2를 경유하여 DUT에서 읽혀짐으로 최종적인 보정값은 100MHz, 500MHz와 1000MHz 각각에 대해서 +0.0015, +0.0304 그리고 +0.0483이 된다.

케이블	입력값(V)	주파수(MHz)	측정값(V)	SG불확도(V)
cable1	1	100	0.9890	0.0034
		500	0.9608	0.0034
		1000	0.9413	0.0034
cable2	1	100	1.0097	0.0034
		500	1.0088	0.0034
		1000	1.0104	0.0034
cable3	1	DC	0.9999987	0.0000020
cable4	1	DC	0.9999963	0.0000020

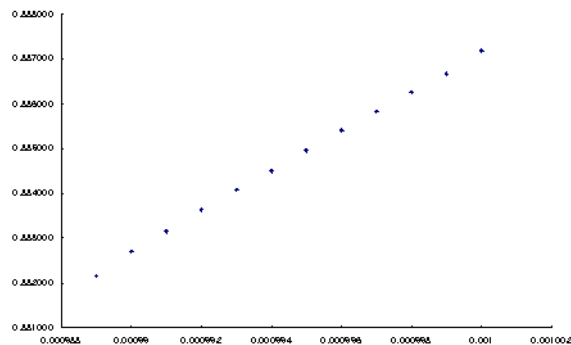
케이블	주파수	측정기불확도	합성불확도	보정값
cable1	100	0.000647	0.0036	+0.0076
	500	0.000647	0.0036	+0.0358
	1000	0.000647	0.0036	+0.0553
cable2	100	0.000647	0.0036	-0.0063
	500	0.000647	0.0036	-0.0054
	1000	0.000647	0.0036	-0.0070
cable3	DC	0.0000040	0.0000045	0
cable4	DC	0.0000040	0.0000045	0

표Ⅳ-1 케이블에 의한 불확도 영향

7. 열전대감지기와 직류전압계의 상관관계

교정과정에서 RF소스에서 보낸 RF전압이 TVC내의 열전대에서 열로 바뀌고 그 열을 직류전압으로 변형함으로써 그 전압을 열전대감지기로 측정한다. 그 다음 DC소스를 인가해줌으로써 같은 열전대 효과를 나타내는 것을 보장하기 위하여 RF소스에 의하여 열전대감지기의 측정값과 같은값을 열전대감지기에 나타내도록

DC소스를 조정한다. 이때 그 직류전압을 측정하는 것이 직류전압계이다. 그러나 열전대감지기와 직류전압계와의 직접적인 상관관계를 알수 없기 때문에 열전대감지기의 맨 마지막 digit의 숫자가 한 단계씩 올라가도록 DC소스를 조정하면서 직류전압계가 읽은값을 측정하였다. 열전대감지기의 값이 0.000989V에서 0.0001000V까지 0.000001V의 간격으로 DC소스를 조정하면서 직류전압계의 변화값을 측정하였는데 그래프 IV-1에서 보는바와 같다.



그래프 IV-1 열전대감지기(X축)과 직류전압계(Y축)의 관계

그래프에서 보듯이 직류전압계는 0.882160 V에서 0.887182 V까지 선형적인 상관관계인 $y=456.5x+0.430682$ 가 있음을 알 수 있다. 열전대감지기의 0.000001 V의 간격에 대해 직류전압계는 평균 0.0004565 V 간격으로 변하고 그것의 표준편차는 0.0000406V가 된다. 이 전압 간격을 직각분포로 가정하면 직각분포에 대한 불확도는 그 간격을 $2\sqrt{3}$ 으로 나눈 값이 그것의 불확도 성분이 됨으로 열전대 감지기의 digit에 의한 불확도 성분은 $\frac{0.0004565}{2\sqrt{3}} V = 1.318 \times 10^{-4} V$ 이다.

8. 측정불확도 산출

측정불확도는 A형 및 B형으로 분류되는데 A형은 반복측정에 의하여 산출하고 B형은 그외의 모든 정보를 통하여 구한다. S/G와 DC소스 각각에서 1V를 인가하여 100MHz, 500MHz와 1000MHz에 대하여 교정측정을 하는데 있어서 필요한 데이터 목록은 표 IV-2와 같다.

	100MHz	500MHz	1000MHz
DUT측정값(V_{Read}^{DUT})	0.4712V	0.4499V	0.3989V
감쇠기감쇠값(ΔV_{att})	0.4960V	0.4814V	0.4709V
SG보정값(ΔV_{SG})	0.0015V	0.0304V	0.0483V
직류전압계측정값(V_{Read}^{sig})	0.88648V	0.875955V	0.800952V
DC소스보정값(ΔV_{DC}^{sav})	0V	0V	0V
RF-DC차(δ)	3.720	3.510	8.951
감쇠기의반사계수($ r $)	0.0104	0.0040	0.0035

표 IV-2 데이터

감도계수	100MHz	500MHz	1000MHz
$\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{DUT}}$	$1.087598V^{-1}$	$1.102899V^{-1}$	$1.145941V^{-1}$
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{att}}$	$1.087598V^{-1}$	$1.102899V^{-1}$	$1.145941V^{-1}$
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{SG}}$	$1.087598V^{-1}$	$1.102899V^{-1}$	$1.145941V^{-1}$
$\frac{\partial F}{\partial V_{Read}^{avg}}$	$-1.188472V^{-1}$	$-1.210859V^{-1}$	$-1.313548V^{-1}$
$\frac{\partial F}{\partial \Delta V_{DC}^{sav}}$	$-1.188472V^{-1}$	$-1.210859V^{-1}$	$-1.313548V^{-1}$
$\frac{\partial F}{\partial \delta}$	-0.010158	-0.010247	-0.009657

표IV-3 감도계수표

	분포		100MHz	500MHz	1000MHz
$U_{V_{Read}^{DAT}}$	직각분포, U분포	메뉴얼 부정합성분	$7.33 \times 10^{-3}V$	$2.88 \times 10^{-3}V$	$2.53 \times 10^{-3}V$
$U_{\Delta V_{at}}$	T분포	성적서	$1.94 \times 10^{-3}V$	$1.88 \times 10^{-3}V$	$1.84 \times 10^{-3}V$
$U_{\Delta V_{SG}}$	T분포	성적서	$3.35 \times 10^{-3}V$	$3.35 \times 10^{-3}V$	$3.35 \times 10^{-3}V$
$U_{V_{Read}^{mg}}$	직각분포 T분포	측정 성적서	$1.32 \times 10^{-4}V$	$1.32 \times 10^{-4}V$	$1.32 \times 10^{-4}V$
$U_{\Delta V_{DC}^{Sen}}$	T분포	성적서	$1 \times 10^{-6}V$	$1 \times 10^{-6}V$	$1 \times 10^{-6}V$
U_{δ}	T분포	성적서	$5 \times 10^{-3}V$	$5 \times 10^{-3}V$	$5 \times 10^{-3}V$

표IV-4 불확도 인자표

식 (IV-4)에서 필요한 감도계수의 계산값은 표IV-3에 있다. 성분별 불확도는 표IV-4에 나타내었으며 표IV-3과 IV-4의 데이터와 식 (IV-4)를 이용하여 교정인자의 B형불확도를 구할 수 있고 반복측정 데이터로부터 A형불확도를 구한다. 전체불확도는 표IV-5와 같다.

그러므로 측정결과는 교정인자 F의 평균측정값은 100MHz, 500MHz와 1000MHz에 대하여 각각 1.053627, 1.042716와 1.079029이다.

	A형불확도	B형불확도	합성불확도	확장불확도 (k=1.96)
100MHz	6.32×10^{-5}	9.02×10^{-3}	9.020×10^{-3}	1.768×10^{-2}
500MHz	1.49×10^{-4}	5.30×10^{-3}	5.302×10^{-3}	1.039×10^{-2}
1000MHz	1.29×10^{-4}	4.16×10^{-3}	4.162×10^{-3}	8.158×10^{-3}

표IV-4 불확도결과

9. 소결

측정결과에 대한 측정불확도의 표시는 측정과학에 있어서 오랫동안 논의되어온 과제이다. 근자에 세계적인 추세는 소급성과 측정의 신뢰도를 담보하기 위하여 측정불확도의 표시를 권고하고 있다. 본 논문에서는 열전압변환기를 이용한 고주파전압계의 교정측정시, 가능한한 모든 불확도요인을 분석하여 불확도를 분석 산출하였다. 그 결과는 95%의 신뢰수준으로 다음과 같은 범위에 교정인자의 값이 놓여 있음을 보였다.

$$1.053627 \pm 1.768 \times 10^{-2} \text{ (100MHz)}$$

$$1.042716 \pm 1.039 \times 10^{-2} \text{ (500MHz)}$$

$$1.079029 \pm 8.158 \times 10^{-3} \text{ (1000MHz)}$$

제 IV 장 맺음말

국제적으로 측정불확도는 교정분야에서 뿐 아니라 여타 다른 측정분야에서도 측정의 신뢰성과 소급성을 유지하는 척도로서 인식하기 때문에 측정결과의 표현에 반드시 측정불확도를 언급할 것을 권고하고 있다. 소급성 체계에서 하위의 측정분야의 정확성의 전제가 상위의 교정측정의 정확성이기 때문에 교정시 측정불확도를 산출하는 것은 전체 소급체계의 근간이 된다고 할 것이다. 전자파장해에 대한 측정을 관장하는 국제무선장해특별위원회(CISPR)에서도 측정기기들을 평가하는 데에 있어서 통계적인 접근방법으로서 2000년에 CISPR16-3을 출판하여 전자파장해 측정에 있어서 측정불확도에 대한 언급을 하고 있다.

본 보고서에서는 측정불확도의 기본개념으로부터 EMI측정기기 교정시스템의 일부인 주파수카운터와 고주파전압계를 교정할 때 나타나는 측정불확도를 산출하여 측정에 있어서 결과의 신뢰성과 소급성을 확보하였다.

[참고문헌]

- [1] Barry N. Taylor and Chris E. Kuyatt, 'Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty for NIST Measurement Results', Supersedes NIST Technical Note 1297, Jan. 1993.
- [2] EA 'Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration', European co-operation for Accreditation, EA-4/02, December 1999
- [3] Hewlett Packard, 'The Science of Time Keeping', Hewlett Packard Application Note 1289.
- [4] C. F. Dietrich. 'Uncertainty, Calibration and Probability', Second Edition, Adam Hilger, 1991.
- [5] David M. Pozar 'Microwave Engineering', Second Edition, John Wiley & Sons, Inc. 1998.
- [6] KRISS, 'KRISS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement' KRISS-98-096-SP, 1998.
- [7] David W. Allan, 'Statistics of Atomic Frequency Standards', Pro. of IEEE, Vol. 54, No.2, pp221-pp230, Feb. 1966.
- [8] F.L HERMACH etc. 'Thermal Converters for Audio Frequency Voltage Measurements of High Accuracy' IEEE Tran. on Inst. and Meas., Vol Im-15, No.4 p260-268, December, 1966
- [9] Park Jungkuy etc. 'Uncertainty in the course of Calibration of RF Multimeter using TVC', The Journal of Korea Electromagnetic Engineering Society, Jan. 2002
- [10] P. S. Filipski, etc., 'Comparison High Frequency AC-DC Voltage Transfer Standards at NRC, VSL, PTB and NIST', TUP3-1
- [11] E. S. Williams, 'Thermal Voltage Converters and Comparator for Very Accurate AC Voltage Measurements', Journal of Research of the National Bureau Standards-C. Engineering and Instrumentation, Vol. 75C, Nos. 3and 4, pp145-pp154, July-December 1971.