

(서브)밀리미터파대역 안테나 측정 및 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안 연구



(서브)밀리미터파대역 안테나 측정 및 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안 연구



국립전파연구원
National Radio Research Agency

제 출 문

본 보고서를 「(서브)밀리미터파대역 안테나 측정 및 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020. 12. 31.

연구책임자 : 박정규(전파시험인증센터 적합성인증과)
임종혁(전파시험인증센터 적합성인증과)
이태형(전파시험인증센터 적합성인증과)
최 솔(전파시험인증센터 적합성인증과)

요 약 문

본 보고서는 2018년 국립전파연구원에서 구축한 밀리미터파대역 안테나 성능검사 시스템을 소개하고 약 60 GHz대역부터 325 GHz대역까지 안테나 측정에 대한 분석결과와 400 MHz이하 대역의 대형 안테나 측정시설 구축에 대한 타당성 검토 내용을 기술하였다.

먼저 밀리미터파대역 안테나 측정은 원거리장(far-field) 조건에서 3-안테나법을 사용하여 도파관 주파수 대역인 WR-12(60 GHz ~ 90 GHz), WR-10(75 GHz ~ 110 GHz), WR-8(110 GHz ~ 170 GHz), WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz), WR-3.4(220 GHz ~ 325GHz) 5개 대역에서 동작하는 안테나 이득 특성을 측정·분석하였다. 또한, 단 한번의 측정으로 표준 안테나 이득을 결정할 수 있는 동등한(물리적 크기와 모양이 비슷하여 특성이 동일한) 안테나 개념을 적용하는 절대이득 측정법으로 안테나의 특성을 측정·분석하였다. 이 방법은 2016년 CISPR 총회(중국 항저우)에서 기고한 방법으로 측정불확도에 두 안테나의 오차 범위(통상 0.2 dB이내)를 포함하면 표준 안테나로 정의할 수 있다. 마지막으로, 표준 안테나법(SAM) 법과 연구원에서 개발하여 현재 CISPR16-1-6 '안테나 교정방법' 국제표준 문서 개정을 위해 DC문서 단계에서 대응하고 있는 Compact-SAM 교정법으로 안테나 이득을 측정·분석하고 앞서 산출된 각각의 방법으로 산출된 안테나 이득 특성을 상호비교·분석하였다. 측정(분석)된 네 개의 결과로부터 대부분 0.2 dB 이내의 측정오차로 결과가 잘 일치함을 보임을 검증함으로써, 밀리미터파 대역까지 연구원에서 개발한 C-SAM 측정법이 유효하다는 것을 확인하였다. 따라서 향후 관련 교정방법에 대한 표준을 밀리미터파 대역까지 확대하여 추진할 계획이다.

마지막 장에서는 국내 산학연에서 개발하는 400 MHz이하 대역의 대형 안테나 측정 서비스 제공을 위한 시설구축 타당성 검토를 위해 연간 측정수요 등 조사한 결과를 소개하고, 대형 안테나 측정에 필요한 부대시설 및 관련 측정방법을 소개하고자 한다.

Contents

제1장 서론	15
제2장 밀리미터파대역 적합성평가 시험시설	19
제1절 밀리미터파대역 안테나 성능검사 시험시설	19
제3장 안테나 측정이론 및 교정이론	25
제1절 서론	25
제2절 안테나 측정 기본이론	25
제3절 안테나 교정이론	29
제4장 측정 및 결과분석	39
제1절 밀리미터파대역 안테나 측정시스템 구성 및 절차	39
제2절 밀리미터파대역 안테나 측정결과	50
제5장 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안	89
제1절 서론	89
제2절 안테나 이득 표준 측정법	89
제3절 대형 안테나 국내 측정 수요조사	91
제6장 맺음말	95
* 참고문헌	97

표 목차

[표 2.1.1]	밀리미터파대역 안테나 성능검사 시험시설	19
[표 4.1.1]	RF 측정시스템	40
[표 4.1.2]	공구 등 측정 부대물품	40
[표 4.2.1]	측정결과 상호비교(WR-12 대역)	51
[표 4.2.2]	측정결과 상호비교(WR-10 대역)	53
[표 4.2.3]	측정결과 상호비교(WR-8 대역)	55
[표 4.2.4]	측정결과 상호비교(WR-4.3 대역)	57
[표 4.2.5]	측정결과 상호비교(WR-3.4 대역)	59
[표 4.2.6]	WR-12 대역 동등성 평가 결과	62
[표 4.2.7]	WR-10 대역 동등성 평가 결과	66
[표 4.2.8]	WR-8 대역 동등성 평가 결과	67
[표 4.2.9]	WR-4.3 대역 동등성 평가 결과	68
[표 4.2.10]	WR-3.4 대역 동등성 평가 결과	69
[표 4.2.11]	WR-12 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득	71
[표 4.2.12]	WR-10 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득	72
[표 4.2.13]	WR-8 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득	73

표 목차

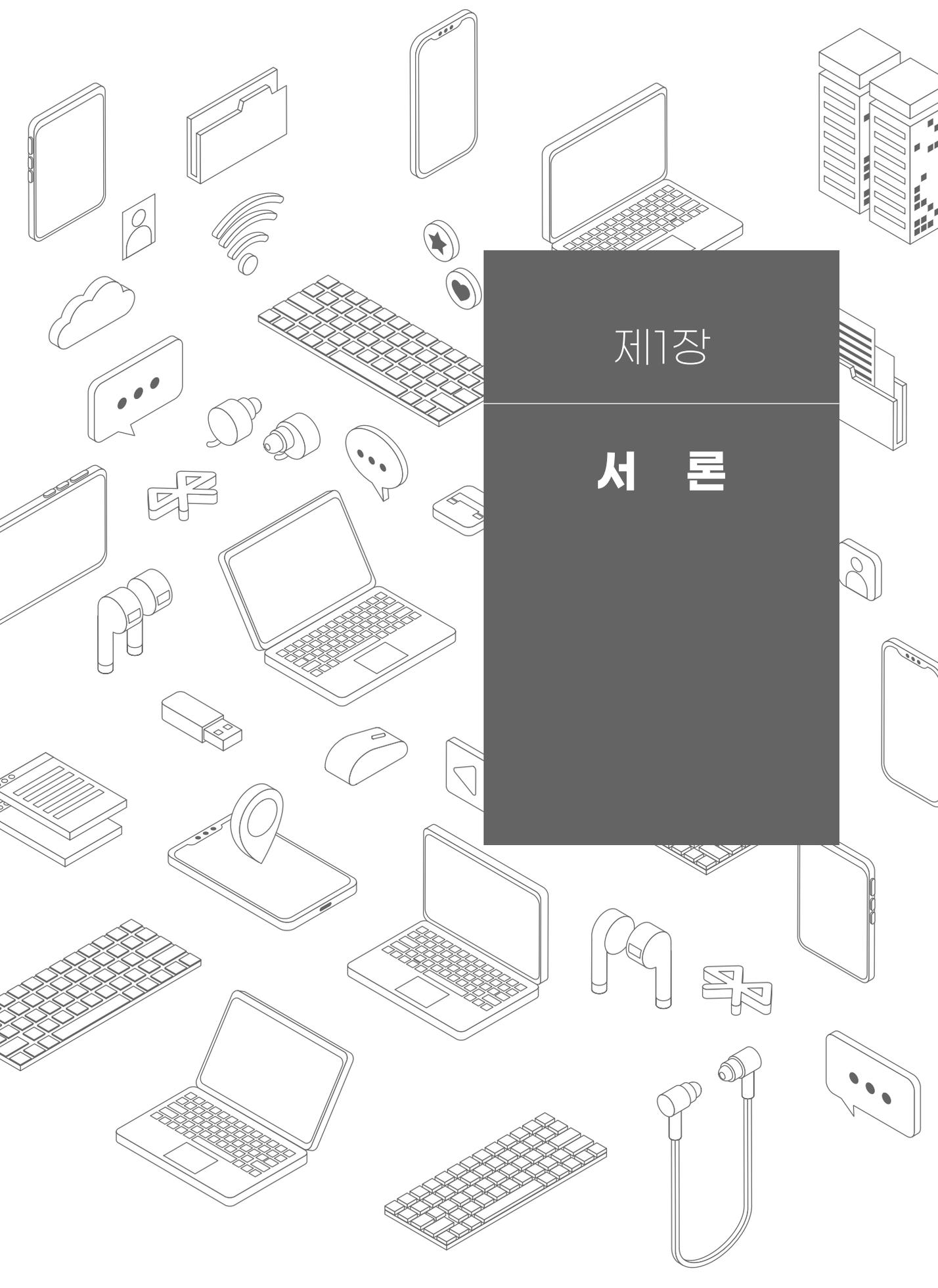
[표 4.2.14]	WR-4.3 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득	74
[표 4.2.15]	WR-3.4 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득	75
[표 4.2.16]	측정결과 상호비교(WR-12 대역)	77
[표 4.2.17]	측정결과 상호비교(WR-10 대역)	79
[표 4.2.18]	측정결과 상호비교(WR-8 대역)	80
[표 4.2.19]	측정결과 상호비교(WR-4.3 대역)	82
[표 4.2.20]	측정결과 상호비교(WR-3.4 대역)	84

그림 목차

[그림 3.2.1]	면적 A를 통과하는 전자기파의 전력	26
[그림 3.2.2]	등방성 안테나의 단위 체적당 방사 전력	26
[그림 3.2.3]	실제 안테나의 단위 체적당 방사 전력	27
[그림 3.3.1]	3-안테나법(TAM)에대한 안테나 측정 구성	30
[그림 3.3.2]	절대이득법 측정구성	31
[그림 3.3.3]	안테나 이득비교법을 이용한 측정구성	33
[그림 3.3.4]	국립전파연구원형 표준 안테나법(C-SAM)의 측정 구성	34
[그림 4.1.1]	안테나 측정구성	39
[그림 4.2.1]	3-안테나 측정결과(WR-12 대역)	52
[그림 4.2.2]	3-안테나 측정결과(WR-10 대역)	53
[그림 4.2.3]	3-안테나 측정결과(WR-8 대역)	55
[그림 4.2.4]	3-안테나 측정결과(WR-4.3 대역)	57
[그림 4.2.5]	3-안테나 측정결과(WR-8 대역)	59
[그림 4.2.6]	치환법에 의한 안테나 사이의 감쇠량 측정 비교	61
[그림 4.2.7]	WR-12 대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과	63
[그림 4.2.8]	안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-12 대역)	65

그림 목차

[그림 4.2.9]	안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-10 대역)	66
[그림 4.2.10]	안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-8 대역)	67
[그림 4.2.11]	안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-4.3 대역)	68
[그림 4.2.12]	안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(WR-3.4 대역)	69
[그림 4.2.13]	안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-12 대역)	71
[그림 4.2.14]	안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-10 대역)	72
[그림 4.2.15]	안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-8 대역)	73
[그림 4.2.16]	안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-4.3 대역)	74
[그림 4.2.17]	안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-3.4 대역)	75
[그림 4.2.18]	안테나 이득 상호비교 결과(WR-12 대역)	77
[그림 4.2.19]	안테나 이득 상호비교 결과(WR-10 대역)	79
[그림 4.2.20]	안테나 이득 상호비교 결과(WR-8 대역)	81
[그림 4.2.21]	안테나 이득 상호비교 결과(WR-4.3 대역)	83
[그림 4.2.22]	안테나 이득 상호비교 결과(WR-3.4 대역)	85
[그림 5.3.1]	야외시험장에서의 대형 안테나 측정	91
[그림 5.3.2]	당진 전파관리소 야외 시험장에서의 대형 안테나 측정	92



제1장
서론



제1장 서론

현대사회에서는 주파수 자원 부족과 날로 증가하는 대용량의 정보를 빠르게 주고받으려는 사용자의 욕구를 충족시키기 위해 밀리미터파대역의 새로운 서비스 개발이 가속화되고 있다. 이는, 산업과 과학이 빠르게 발전하면서 이동통신뿐만 아니라 자율주행 자동차, IoT 사물인터넷, 스마트 공장 등 4차 산업혁명에 따른 사회 전반에 걸친 모든 분야에서 전자파를 사용하기 때문이다. 이에, 우리 원에서도 2015년 11월 새로운 주파수 발굴 및 ICT 신산업 창출을 위한 규제 완화 정책의 하나로 용도 미지정 대역(122 GHz ~ 123 GHz, 244 GHz ~ 246 GHz)을 확대하는 무선설비 기술기준(전파법 제45조(기술기준)에 ‘따른 「무선설비규칙」)을 개정하였다.

본 보고서에서는 우리원에서 2018년도 구축한 밀리미터파대역 안테나 측정 시스템의 구성장비 및 부대시설 등에 관한 구축 내역을 소개하고, 세계적으로 사용되고 있는 3-안테나 법(TAM), 절대이득 측정법(2-안테나법), 표준 안테나 이득 치환법(비교법, SAM)과 연구원에서 개발하여 CISPR16-1-6 ‘안테나 교정 방법’ 개정을 위해 DC문서로 대응하고 있는 C-SAM 교정법에 대한 이론을 소개하고 각각의 교정방법으로 산출된 안테나 이득에 대한 상호비교 결과를 기술하였다.

기존의 3-안테나 법은 3개의 안테나를 사용하고 3번의 측정을 통하여 안테나 이득을 결정할 수 있다. 이득 비교법은 비록 측정구성이 2번으로 간소화되지만, 안테나 이득을 결정하기 위해서는 3개의 안테나를 사용해야 한다. 또한, 모양과 특성이 똑같은 2개의 안테나가 존재한다는 조건에서 두 안테나 사이의 삽입 손실을 단 한 번 측정함으로써 표준 안테나(이득)를 정의 내릴 수 있는 절대 이득 측정법이 있다. 국립전파연구원에서 개발한 표준 안테나 법(C-SAM)은 송신측에 피측정(AUC) 안테나를 설치하고 수신측에 값을 알고 있는 표준 안테나(ANT_{std})를 설치하여 안테나 사이의 감쇠량을 단 한 번 측정함으로써 안테나 이득을 측정할 수 있다. 특히 반사파로부터 자유로운 환경에서 그 장점이 두드러진다. 이는 측정방법의 간소화뿐만 아니라 측정불확도를 낮추는 장점이 예상된다.

본 보고서는 안테나 측정 기본이론, 3-안테나법, 절대이득 측정법으로 정의되는 표준 안테나, 마지막으로 이득 비교법(치환법)과 연구원이 개발한 C-SAM 안테나 교정이론을 기술하고, 도파관 규격 5개 대역(60 GHz ~ 325 GHz)에서 사용되는 혼 안테나의 이득을 각각의 교정법으로 측정하고 상호비교·분석하였다.

또한, 방송/위성 등 대형 안테나 측정서비스 제공을 통한 국가의 전파관리 능력 향상 및 제도 발전에 이바지하고자 야외시험장 측정시설을 요구하는 400 MHz 이하 대역의 대형 안테나 측정시설 구축 타당성 검토를 위한 국내 대형 안테나 측정수요 조사 내용과 측정에 필요한 부대시설 및 관련 측정방법을 소개하고자 한다.



제2장

밀리미터파대역 적합성평가 시험시설

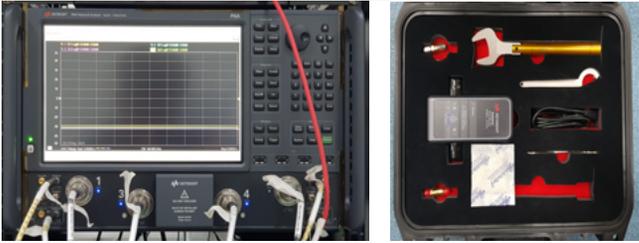
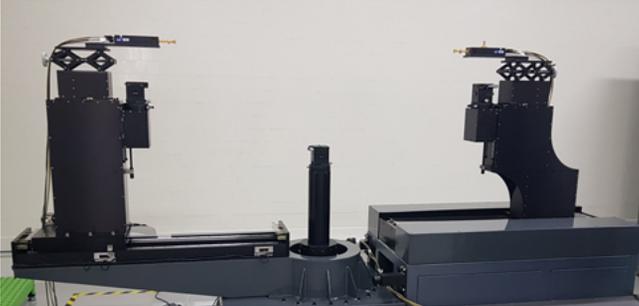


제 2 장 밀리미터파대역 적합성평가 시험시설

제1절 밀리미터파대역 안테나 성능검사 시험시설

이번 절에서는 2015년 11월 전파법 제45조(기술기준) ‘무선설비 규칙’ 개정에 따라 새롭게 적용되는 밀리미터파 및 THz 시험에 대응하고자 ~500 GHz까지 측정이 가능한 시험시설 구축현황을 소개하고자 한다. 밀리미터파 적합성평가 시험용 안테나 성능검사 시험시설은 지정시험기관에서 운용중인 밀리미터파 안테나의 성능검사, ICT중소/벤처기업의 밀리미터파 핵심부품 개발 측정지원을 위해 구축되었다. 구축한 밀리미터파 적합성평가 안테나 시험시설은 다음 [표 2.1.1]에서 보여주는 바와 같이 67 GHz 대역까지 측정할 수 있는 키사이트사의 N5227B 네트워크분석기를 비롯하여 500 GHz 대역까지 측정하기 위한 VDI사의 주파수 체배기(5개 대역, Tx단 체배기는 30 dB 감쇠기 포함)와 안테나(13개 대역) 등 부대 약세사리가 있으며, 도입된 표준 혼 안테나 이득을 정밀하게 측정하기 위해 무진동 측정장치를 도입하였다.

[표 2.1.1] 밀리미터파대역 안테나 성능검사 시험시설

구분	사진	비고
네트워크 분석기 (67GHz) / Cal-kit		N5227B / 67GHz 2-port 1.85mm ECal
안테나 측정 무진동 장치		(주)MTG

<p>WR-12 주파수 체배기 (55 GHz - 90 GHz)</p>			<p>VDI TxRx Mini VNAX module / TxRx module with adjustable 0-30dB Source Attenuator</p>
<p>WR-8 주파수 체배기 (90 GHz - 140 GHz)</p>			<p>VDI TxRx Mini VNAX module / TxRx module with adjustable 0-30dB Source Attenuator</p>
<p>WR-5.1 주파수 체배기 (140 GHz - 220 GHz)</p>			<p>VDI TxRx Mini VNAX module / TxRx module with adjustable 0-30dB Source Attenuator</p>
<p>WR-3.4 주파수 체배기 (220 GHz - 325 GHz)</p>			<p>VDI TxRx Mini VNAX module / TxRx module with adjustable 0-30dB Source Attenuator</p>
<p>WR-2.2 주파수 체배기 (325 GHz - 500 GHz)</p>			<p>VDI TxRx Mini VNAX module / TxRx module with adjustable 0-30dB Source Attenuator</p>



<p>WR-12 Cal-kit</p>		<p>VDI 55-90 GHz</p>
<p>WR-8 Cal-kit</p>		<p>VDI 90-140 GHz</p>
<p>WR-5.1 Cal-kit</p>		<p>VDI 140-220 GHz</p>
<p>WR-3.4 Cal-kit</p>		<p>VDI 220-325 GHz</p>
<p>WR-2.2 Cal-kit</p>		<p>VDI 325-500 GHz</p>

18-26.5GHz 안테나		(주)티에이 TAWR42-20A
26.5~40 GHz 안테나		(주)티에이 TAWR28-20A
33~50GHz 안테나		(주)티에이 TAWR22-20A
WR-19 40~60 GHz 안테나		VDI N9029AH19
WR-15 50~75 GHz 안테나		VDI N9029AH15
WR-12 60~90 GHz 안테나		VDI N9029AH12
WR-10 75~110 GHz 안테나		VDI N9029AH10
WR-8 90~140 GHz 안테나		VDI N9029AH08
WR-6 110~170 GHz 안테나		VDI WR6.5CH
WR-5.1 140~220 GHz 안테나		VDI N9029AH05
WR-4.3 170~260 GHz 안테나		VDI WR4.3CH
WR-3 220~325GHz 안테나		VDI N9029AH03
WR-2.2 325 ~ 500 GHz안테나		VDI WM-570(WR.2.2)



제3장

**안테나
측정이론 및
교정이론**



제3장 안테나 측정이론 및 교정방법

제1절 서론

일반적으로 안테나 교정시험소에서는 세계적으로 사용되고 있는 3-안테나 방법으로 안테나 이득(인자)을 산출하고 있다. 이 3-안테나법은 3개의 안테나를 사용하여 안테나 간 삽입손실(SIL: Site Insertion Loss)을 3번 측정하여 안테나 이득을 산출할 수 있으며, 사전에 교정된 안테나 특성을 몰라도 되는 특징이 있다. 반면 일반 산학연에서 주로 사용되고 있는 방법은 이득비교법이다. 이는 사전에 교정된 안테나 이득값을 알고 있는 기준 안테나(Standard antenna)와 피측정 안테나(AUC)의 특성을 단순 상호비교함으로써 피측정 안테나의 이득을 손쉽게 구할 수 있는 장점이 있다. 다음으로는, 만약 모양과 특성이 똑같은 두 안테나가 있다고 가정하면 안테나 사이의 감쇠량을 단 한 번만 측정하여 동등한 표준안테나의 안테나 이득을 정의할 수 있는 안테나 절대 이득 측정법이 있다. 실제로는 모양과 특성이 모두 똑같은 안테나는 존재할 가능성은 없기 때문에 약간의 오차범위(0.2 dB)의 불확도를 포함시키면 표준 안테나로 정의내릴 수 있다. 마지막으로, 연구원에서 개발한 C-SAM 안테나 교정법이 있다. 이 방법은 안테나 인자를 알고 있는 표준안테나를 수신측에 위치시키고 피측정 안테나(AUC)를 송신측에 위치시키는 측정 구성으로 단 한 번의 측정을 통해 안테나 이득 측정이 가능하다. 다음 절에서는 안테나 이득 측정 기본이론과 각각의 안테나 교정이론을 구체적으로 기술하였다.

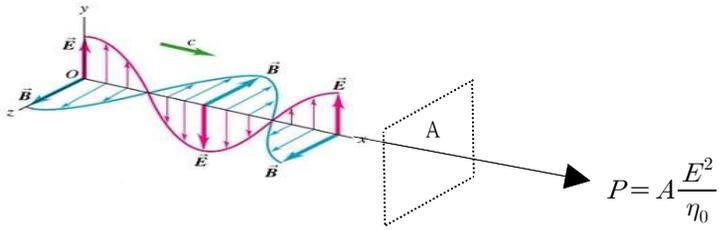
제2절 안테나 측정 기본이론

1. 포인팅 벡터

[그림 3.2.1]에서 보여주는 바와 같이 전자기파는 포인팅(Poynying) 벡터로서 식 (3.2.1)과 같은 전기장 E 또는 자기장 H에 의하여 단위면적당 전력 (W/m^2)의 에너지를 전달한다.

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} = \eta_0 H^2 = \frac{E^2}{\eta_0} = \frac{E^2}{120\pi^2} \quad (3.2.1)$$

여기서, η_0 는 자유공간 임피던스(377Ω)이다.



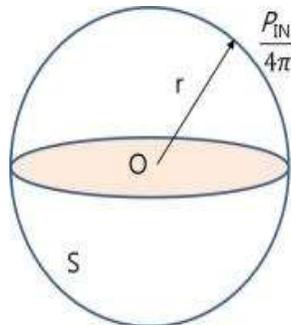
[그림 3.2.1] 면적 A를 통과하는 전자기파의 전력

2. 안테나 이득

가. 등방성 안테나의 방사 전력

등방성(isotropic) 안테나는 [그림 3.2.2]와 같이 전방향으로 동일 크기의 전력을 방사한다. 안테나에 인가된 입력 전력을 P_{IN} 이라 하면 특정 방향으로 단위 체적($\Delta\Omega$) 당 방사하는 전력 ΔP_r 은 360° 구면 어느 방향에서나 단위 체적당 $P_{IN}/4\pi$ 의 전력을 방사한다. 즉, 모든 방향에서 식 (3.2.2)와 같다.

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta\Omega} = \frac{P_{IN}}{4\pi} \quad (3.2.2)$$



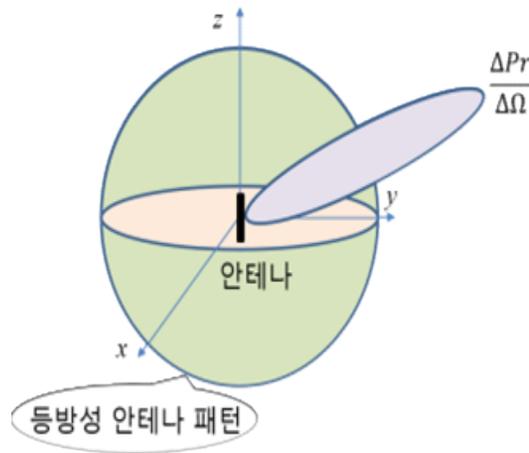
[그림 3.2.2] 등방성 안테나의 단위 체적당 방사 전력



나. 실제 안테나의 방사 전력

실제 안테나는 이상적인 등방성(isotropic) 안테나와 달리 모든 방향으로 동일한 크기의 전력을 방사하지 않는다. [그림 3.2.3]과 같이 방향의 함수로서 특정한 방향 (θ, ϕ) 에서 단위 체적 $\Delta\Omega$ 당 $\Delta P_r(\theta, \phi)$ 의 전력을 방사한다. 단위 체적당 방사 전력은 다음 식 (3.2.3)과 같다.

$$\frac{\Delta P_r(\theta, \phi)}{\Delta\Omega} \quad (3.2.3)$$



[그림 3.2.3] 실제 안테나의 단위 체적당 방사 전력

다. 안테나 이득의 정의

안테나 이득 $G(\theta, \phi)$ 은 등방성 안테나의 단위 체적당 방사 전력과 실제 안테나의 최대방사 전력 방향에서 단위 체적당 방사 전력의 비로 정의된다. 관계식 (3.2.2)와 (3.2.3)에서 $G(\theta, \phi)$ 는 식 (3.2.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$G(\theta, \phi) = \frac{\Delta P_r(\theta, \phi) / \Delta\Omega}{P_{IN} / 4\pi} \quad (2.2.4)$$

3. 안테나 이득과 전기장 관계

안테나 이득의 정의식 (3.2.4)에서 좌변과 우변을 식 (3.2.5)와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\frac{\Delta P_r(\theta, \phi)}{\Delta \Omega} = \frac{G(\theta, \phi) P_{IN}}{4\pi} \quad (3.2.5)$$

송신 안테나를 원점으로 먼 거리 r 에 위치한 단위체적 $\Delta \mathcal{V}$ 를 바라보는 면적 ΔS 는 다음 식 (3.2.6)과 같이 주어진다.

$$\Delta S = r^2 \Delta \Omega \quad (3.2.6)$$

관계식 (3.2.5)의 양변 분모에 각각 r^2 을 곱하면

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta S} = \frac{\Delta P_r(\theta, \phi)}{r^2 \Delta \Omega} = \frac{G(\theta, \phi) P_{IN}}{4\pi r^2} \quad (3.2.7)$$

이 된다.

(3.2.7)의 좌변은 단위면적당 방사 전력을 의미하며 이는 (2.2.1)의 전자기파의 포인팅 벡터의 크기와 같다.

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta S} = |\vec{E} \times \vec{H}| = \frac{E^2}{\eta_0} = \frac{E^2}{120\pi} \quad (3.2.8)$$

그러므로 관계식 (3.2.7)과 (3.2.8)의 마지막 우변의 항을 비교하면 안테나에서 방사하는 전력 및 이득, 거리 r 에서의 전기장 E 와의 관계는 식 (2.2.9)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{E^2}{120\pi} &= \frac{G(\theta, \phi) P_{IN}}{4\pi r^2} \\ E &= \frac{\sqrt{30 G(\theta, \phi) P_{IN}}}{r} \end{aligned} \quad (3.2.9)$$



송신출력이 P_T 이고 안테나 이득이 G_T 인 송신 안테나(T_X)로부터 거리(r_m)인 지점에 방사되는 전기장의 세기 E_R 은 다음식(3.2.10)과 같다.

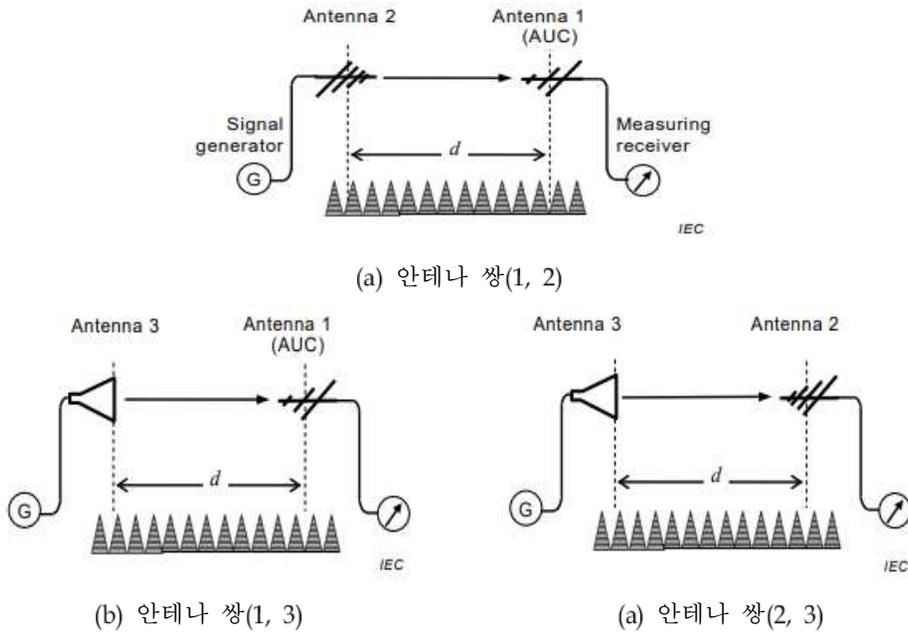
$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{r_m} \quad (3.2.10)$$

제3절 안테나 교정이론

1. 3-안테나법(TAM: Three Antenna Method)

3-안테나법은 3개의 안테나 중 안테나 이득에 대한 사전 지식이 필요하지 않은 안테나 측정방법이다. 3-안테나법은 일반적으로 사용되는 3개 안테나 (1, 2 및 3으로 번호가 매겨짐)의 동작 주파수 범위를 포괄하는 유사한 종류의 안테나가 필요하다. 특히, 최대방사 조준 방향의 안테나 이득을 결정하기 위해 쌍을 이루는 안테나는 [그림 3.3.1]과 같이 조준 방향이 서로를 정확하게 가리킬 수 있도록 정렬해야 한다. 여기서, 3개의 안테나로부터 3개의 고유한 안테나 쌍을 형성할 수 있으며 식 (3.3.1)과 같이 각 쌍의 조합으로 3번의 SIL(P_R/P_T , dB 단위)을 측정하여 안테나 이득을 결정할 수 있다. 단, 여기서 안테나 간 이격거리 d 는 모든 안테나 쌍에 대해 일정해야 한다.

$$\begin{aligned} G_a[dB] + G_b[dB] &= \frac{1}{2} [10 \log_{10} \left(\frac{P_{rb}}{P_{ta}} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)] \\ G_a[dB] + G_c[dB] &= \frac{1}{2} [10 \log_{10} \left(\frac{P_{rc}}{P_{ta}} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)] \\ G_b[dB] + G_c[dB] &= \frac{1}{2} [10 \log_{10} \left(\frac{P_{rb}}{P_{tb}} \right) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)] \end{aligned} \quad (3.3.1)$$



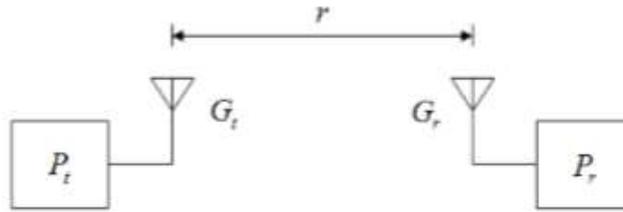
[그림 3.3.1] 3-안테나법(TAM)에 대한 안테나 측정 구성

2. 절대이득 교정법

가. 절대이득 교정법(2-안테나 법)

안테나 절대이득 측정법은 [그림 3.3.2]의 측정구성에서 송신단과 수신단의 안테나 ($G_T = G_R$)의 모양(크기)과 특성이 똑같다는 가정으로부터 설명할 수 있다. 만약 물리적으로 똑같은 두 안테나가 있다고 가정하면 안테나 사이의 감쇠량을 단 한 번만 측정하여 동등한 표준 안테나의 이득 측정이 가능하다. 다만, 실제로는 모양(크기)과 특성이 모두 똑같은 안테나는 존재할 가능성이 작으므로 약간의 오차범위(0.2 dB) 이내의 측정불확도를 포함함으로써 표준 안테나로 정의내릴 수 있다. 단, 이 측정방법에서는 아래와 같은 측정조건에 대한 주의사항을 따라야 한다.

- 1) 측정시스템의 정확한 주파수 안정도를 유지해야 한다.
- 2) 안테나 간 이격거리는 항상 원역장(far-field) 조건을 유지해야 한다.
- 3) 시스템의 임피던스와 편파는 정확하게 일치해야 한다.
- 4) 다중경로와 같은 간섭 효과는 최소화되어야 한다.



P_t : 송신전력
 P_r : 수신전력
 G_t : 송신이득 = G_r : 수신이득
 r : 두 안테나 사이의 이격 거리

[그림 3.3.2] 절대이득법 측정구성

나. 표준 안테나에 대한 고찰

안테나 교정 및 측정 분야에서 가장 많이 언급되는 개념 중 하나가 표준 안테나이다. 국제적으로 합의된 표준의 정의는 「어떤 양을 재는 기준으로 쓰기 위하여 어떤 단위나 어떤 양의 한 값 이상을 정의하거나 현시, 보존 또는 재현하기 위한 물적 척도, 측정기기, 기준물질이나 측정시스템」으로 되어 있다. 이러한 정의에 따라 측정용 안테나의 경우, ‘어떤 양’에 해당하는 물리량으로서 전기장을 측정한다. 그런데 공간상의 전기장을 측정하기 위해 기준으로 쓰는 ‘정의된 어떤 단위나 어떤 양의 한 값’에 해당하는 것은 안테나의 변환 계수인 안테나 인자(Antenna factor) 또는 이득으로 설명될 수 있다. ‘이러한 안테나 인자(이득)를 정의하는 측정기기’가 바로 “표준 안테나”이다.

다. 동등 안테나 개념을 사용한 표준 안테나 정의

30 MHz ~ 1 GHz 대역에서 사용되는 다이폴 형 표준 안테나는 발룬(Balun)의 특성에 의하여 안테나의 인자(이득)를 산출할 수 있다. 현재까지 표준 안테나라고 일컬어지는 것은 다이폴 형태이며 발룬에 특수한 장치를 고안하여 만들어졌으며 세계적으로 NIST형과 NPL형 안테나가 개발되어 사용되고 있다. 그러므로 현재까지 알려진 표준 안테나로 정의된 안테나는 30 MHz ~ 1 GHz 대역 다이폴 안테나뿐이다.

1 GHz 이상 대역 측정에서는 대부분 혼 안테나가 주로 사용된다. 하지만 혼 안테나는 발룬이라는 장치가 없다. 따라서, 앞서 설명된 절대이득법을 사용하면 모양(크기)와 특성이 동등한(불확도 포함) 안테나를 이용하여 표준 안테나의 이득을 정의할 수 있다. 다이폴 안테나의 경우 표준안테나는 발룬의 RF-DC 관계를 측정하거나, 하이브리드의 S-파라미터를 측정함으로써 안테나 이득을 산출할 수 있는 것처럼 동등한 두 안테나는 단 한 번의 감쇠량 측정으로 안테나 이득을 측정할 수가 있다. 따라서 동등한 두 안테나는 일종의 표준 안테나의 역할을 하고 표준 안테나라 정의할 수 있는 것이다. 더구나, 1 GHz 이상 대역의 혼 안테나는 강한 지향성 때문에 야외시험장 위에서 어떤 특정한 높이(2m 이상)에서는 반사파를 거의 무시할 수가 있어서 자유공간 조건을 만족한다 할 수 있다. 만약, 안테나의 동등성이 인정(측정 불확도 포함)된다면 식 (3.3.2)에서 두 안테나 이득이 같게 됨으로써 동등 안테나의 안테나 이득 산출식은 식 (3.3.3)과 식(3.3.4)와 같이 간단하게 표현될 수 있다.

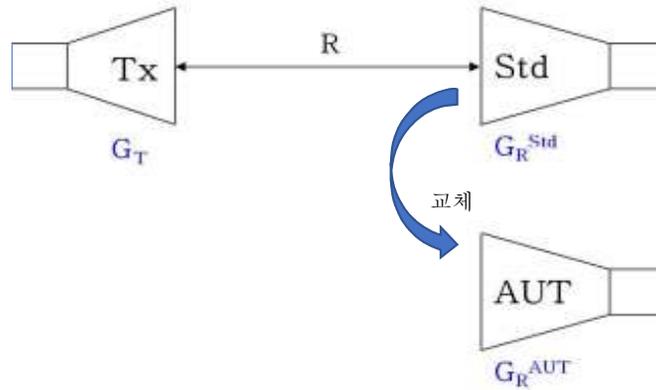
$$10\log_{10}G_t + 10\log_{10}G_r = 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) \quad (3.3.2)$$

$$20\log_{10}G = 10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) \quad (3.3.3)$$

$$G[dB] = \frac{1}{2} \left[10\log_{10}\left(\frac{P_r}{P_t}\right) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right) \right] \quad (3.3.4)$$

3. 안테나 이득 비교법(치환법: SAM)

다음은, 일반 산학연에서 주로 사용되고 있는 안테나 이득 비교법(치환법)에 대해 기술하고자 한다. [그림 3.3.3]에서 보여주는 바와 같이, 이 방법은 사전에 정교하게 교정되어 안테나 이득값을 알고 있는 기준 안테나(STA: Standard antenna)가 필요하며, 기준안테나와 피측정 안테나(AUC)의 특성을 단순 상호 비교함으로써 피측정 안테나의 이득을 쉽게 구할 수 있다. 단, 여기서 고려해야 할 사항은 STA와 AUC가 동일유형의(유사한 기계적 수치와 그에 따른 유사한 방사패턴을 갖는다고 가정) 안테나일수록 정확하다. SAM은 TAM보다 시험장 환경조건으로 인한 필드 비 균일성에 덜 민감하여 측정 시험장의 품질이 TAM에 필요한 것보다는 다소 완화될 수 있는 특징이 있다. 단일 안테나의 이득 산출을 위해 TAM은 SIL을 세 번 측정해야 하지만, 안테나 이득 비교법은 SIL을 두 번만 측정함으로써 절차를 간소화 할 수 있는 장점이 있다.



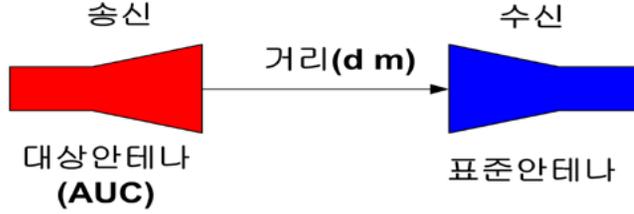
[그림 3.3.3] 안테나 이득비교법을 이용한 측정구성

안테나 이득비교법은 식(3.3.5)를 사용하여 쉽게 안테나 이득을 산출할 수 있다.

$$G_R[dBi] = G_{T_STD} + (P_{R_AUT} - P_{R_STD}) \quad (3.3.5)$$

4. C-SAM(Compact-SAM)

국립전파연구원형 표준안테나 법(C-SAM)은 [그림 3.3.4]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득을 알고 있는 표준 안테나를 수신측에 위치시키고 피 측정 대상안테나(AUC)를 송신측에 위치시키는 측정구성으로 단 한 번의 측정을 통해 안테나 이득을 측정하는 획기적인 기술이다. 원칙적으로 주파수에 구애 받지 않으나 사용하는 주파수에 의존한다. 만약 반사파가 존재한다면 한쪽 안테나를 특정 범위의 높이로 스캔하여 최대전계의 지점에서 측정하게 되며 보통 스캔범은 30 MHz ~ 1 GHz 대역의 안테나를 야외시험장에서 측정할 때 유용하다. 특히, 1 GHz 이상 대역 지향성이 강한 혼 안테나의 경우 반사파가 거의 존재하지 않기 때문에 자유공간 조건과 동일한 조건으로 두 안테나를 고정된 채로 안테나 이득을 산출한다. 만약 양질의 전자파 무반사실(chamber)에서는 반사파를 무시하고 C-SAM법을 바로 적용할 수 있다.



[그림 3.3.4] 국립전파연구원형 표준 안테나법(C-SAM)의 측정 구성

C-SAM은 [그림 3-3-4]에서 보는 바와 같이, 안테나 이득이 G_T 이고 송신출력이 P_T 인 송신(대상) 안테나로부터 거리(d m)인 지점에 방사되는 전기장의 세기 E_R 이 다음과 같이 주어지는 것에 근거를 둔다.

$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{d_m} \quad (3.3.6)$$

위 식(3.3.6)을 G_T 에 대하여 정리하면

$$G_T = \frac{E_R^2 d_1^2}{30 P_T}$$
$$G_T(dB) = 20 \log E_R + 20 \log d_1 - 10 \log P_T - 14.77 \quad (3.3.7)$$

과 같이 나타낼 수 있다.

또한, 안테나 인자는 안테나 고유성능을 결정하기 위한 고유 파라미터로서 다음과 같이 정의 내릴 수 있다.

$$AF(dB/m) = 20 \log \left(\frac{E}{V} \right)$$
$$AF(dB/m) = E(dBV/m) - V(dBV) \quad (3.3.8)$$

식 (3.2.3)을 이용하여 C-SAM 방법에 의한 안테나 인자 산출 방정식을 얻을 수 있다. 이 과정에서 안테나 인자(AF)와 안테나 이득(G)과의 관계를 이용한다.



$$AF^2 = \frac{4\pi\eta}{G\lambda^2 Z_L} = \frac{480\pi^2}{G\lambda^2 Z_L}$$

$$AF(dB/m) = 20\log(AF) = 10\log\left(\frac{480\pi^2}{Z_L}\right) - 20\log(\lambda) - G(dB) \quad (3.3.9)$$

여기서, Z_L 은 수신 안테나의 입력 임피던스이다.

50 Ω 시스템에서 MHz 단위 주파수에서 C-SAM의 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$AF_T = -AF_R + 10\log(P_T) + 20\log(f_{MHz}) - 20\log(V_R) - 20\log(d_1) - 15.01 \quad (3.3.10)$$

여기서 P_T , V_R , d_1 은 송신전력, 측정되는 수신전압, 안테나 사이의 거리(d m), f_{MHz} 는 MHz 단위의 주파수이다. 경우에 따라서는(주로 네트워크 분석기를 사용할 때) 안테나 사이의 삽입손실 또는 감쇠량 $A_{RT} = 10\log(P_T/P_R)$ 을 측정하기 때문에, 실무적으로 식(3.3.11)과 같은 방정식을 주로 사용한다.

$$AF_T(dB/m) = -AF_R + A_{RT} + 20\log f_{MHz} - 20\log d_1 - 32 \quad (3.3.11)$$

위 식 (3.3.11)은 아래 식 (3.3.12)를 통해 안테나 이득으로 변환할 수 있다.

$$G(dBi) = 20\log f_{MHz} - AF - 29.78 \quad (3.3.12)$$



제4장

측정 및 결과분석

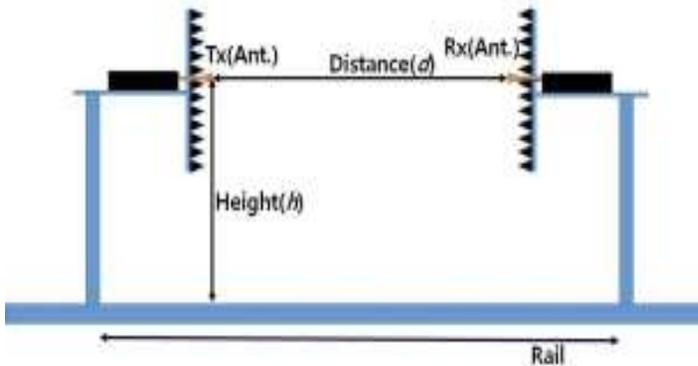


제4장 측정 및 결과분석

제 1절 밀리미터파대역 안테나 측정시스템 구성 및 절차

이번 장에서는 제 3장에서 설명한 3-안테나법, 절대이득 안테나 법, 안테나 이득 비교법(치환법), 마지막으로 C-SAM법의 안테나 교정이론을 적용하여 도파관 규격에 따른 5개 대역(60 GHz ~ 90GHz, 75 GHz ~ 110 GHz, 110 GHz ~ 170 GHz, 170 ~ 260 GHz, 220 GHz ~ 325 GHz) 혼 안테나의 이득을 각각 측정하고 그 결과를 상호비교한 결과를 기술하고자한다. 다음은. 각각의 교정방법 별 측정 및 측정결과 분석에 앞서 측정에 사용하는 안테나 측정시스템 구성과 안테나 교정을 위한 준비 절차에 대해 소개하고자 한다.

1. 안테나 측정시스템 구성



[그림 4.1.1] 안테나 측정구성

[그림 4.1.1]에서 보여주는 바와같이, 밀리미터파대역 안테나 측정을 위한 무진동 측정장치는 크게 송신부와 수신부로 구성되어 있다. 네트워크분석기 송신부(Tx)로부터 연결된 송신부 케이블, 송신부 주파수확장기(체배기), 송신부 안테나, 수신부 안테나, 수신부 주파수확장기(체배기), 네트워크분석기 수신부(Rx)와 연결된 수신부 케이블로 구성된다. 무진동 장치는 송신부 쪽으로 최대 800 mm, 수신부 쪽으로 800 mm이동 가능하며 밀리미터파대역의 미세한 안테나 거리조절을 위해 선형(linear)모터를 이용하여 수평 방향으로 최소 30 μ m까지 이동이 가능하다. 측정구성에 필요한 RF 측정시스템 및 공구 등 측정 부대물품은 [표 4.1.1]과 [표4.1.2]와 같다.

[표 4.1.1] RF 측정시스템

품 명	규 격	수량	제 작 사
Network Analyzer	N5227B	1	KEYSIGHT
무진동 측정정치	~ 500 GHz	1	MTG
체배기	WR 5.1	1	VDI
안테나	5개대역 60 GHz ~325 GHz	각 3개	VDI
교정용 Cal-kit	5개 대역	각 1	VDI
RF Cable	5m	4	센서뷰
RF Cable	7M	4	센서뷰

[표 4.1.2] 공구 등 측정 부대물품

품 명	규 격	수량	제 작 사
육각 렌치 세트	-	1	Eklind
레이저 거리 측정기	DISTO D2	1	Leica



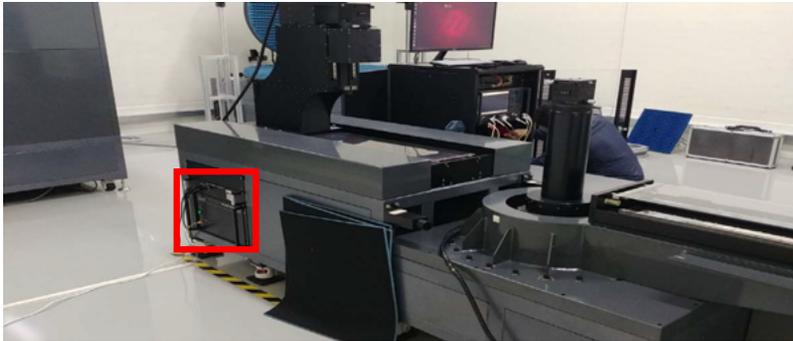
2. 안테나 교정을 위한 준비 절차

다음은 안테나 교정을 위한 준비 절차에 대해 소개하고자 한다. 측정에 앞서 온/습도 등 측정환경에 대해 먼저 점검하고 측정시작 시간과 측정자를 기록한 후 다음 소개하는 절차에 따라 측정을 수행한다.

가. 장비 Set up

1) 무진동 측정장치

- ① 무진동 측정장치 전원부 전원 On (번호 순서대로)

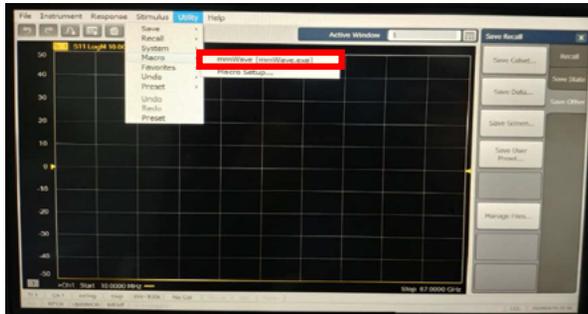


2) 네트워크 분석기(PNA)

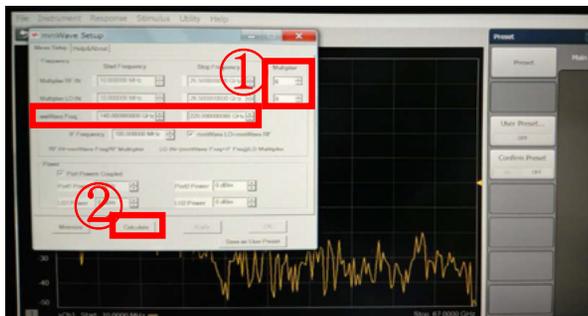
- ① 네트워크 분석기 전원 On



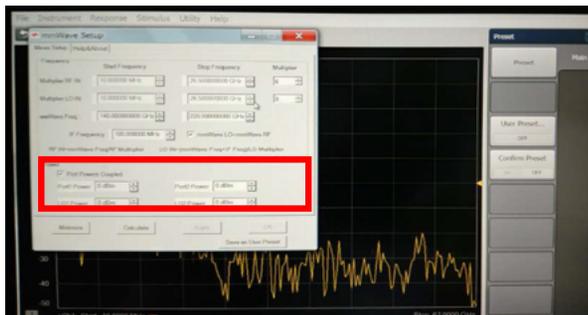
② UTILITY → Macro → mmWave 선택



③ mmWave Freq. & Multiplier 입력 (체배기 적힌 정보 참고) → Calculate



④ Power 입력

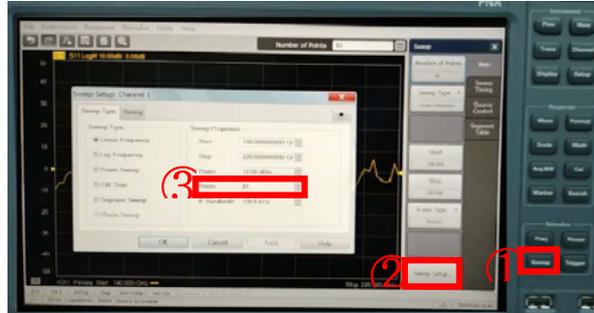


※ 체배기에 port1/ LOL power 2 dBm로 적혀있을 때 Power는 최소 10dBm 이상입력

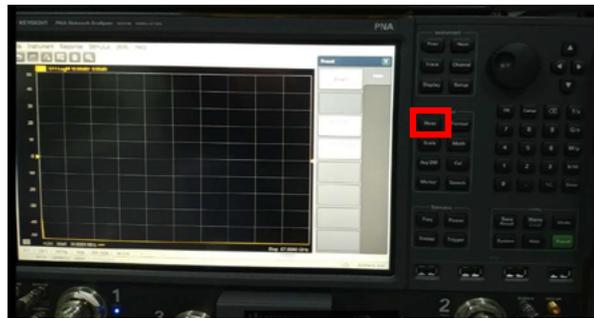
※ 300 GHz는 최대 15 dBm까지 입력



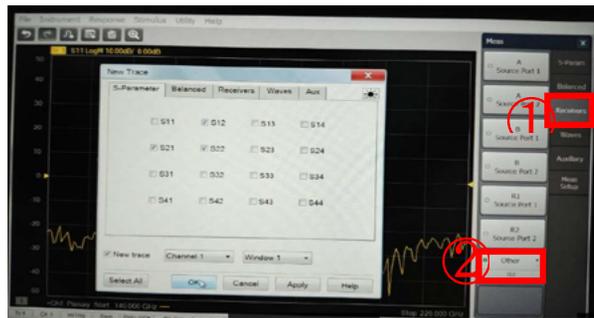
⑤ Sweep → Sweep Setup → Points 설정



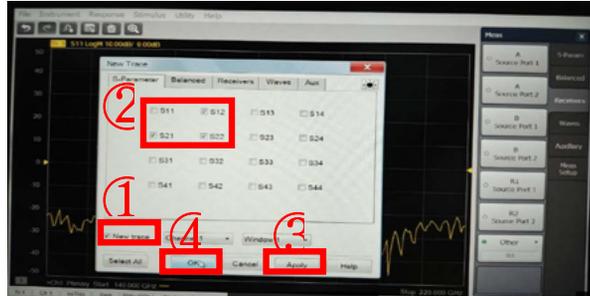
⑥ Meas. 선택



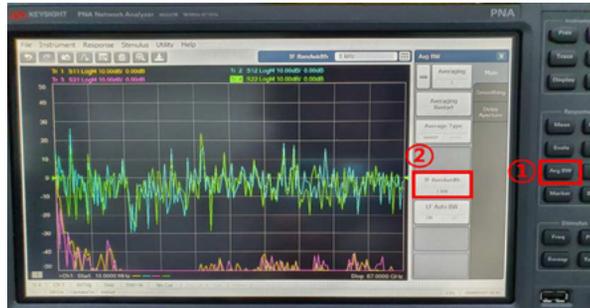
⑦ Receivers → others 선택



- ⑧ new trace 체크 → 원하는 S-parameter 선택 (S11, S12, S21, S22)
→ Apply → OK



- ⑨ IF Bandwidth 1 kHz 정도로 설정

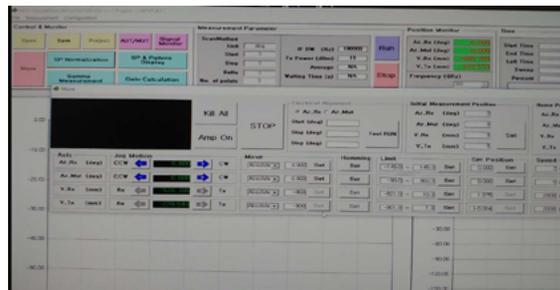


※ IF Band width : 신호가 통과하는 IF 필터의 Bandwidth로 좁힐수록 노이즈가 감소하여 더 정확한 측정이 가능함. 측정 속도가 느려지기 때문에 IF BW를 줄여서 측정할 경우, data 결과값이 충분히 안정화 될 때까지 대기 후 data 저장해야 함.

나. PC Set up

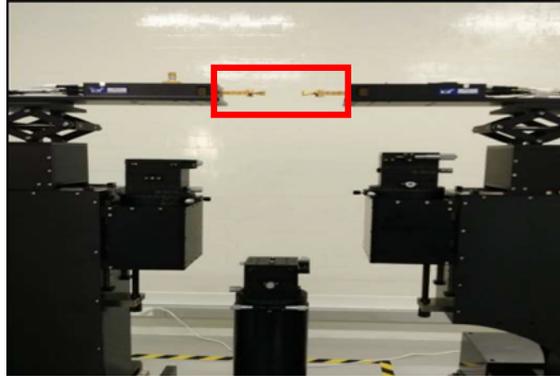
1) PC설치 소프트웨어로 무진동 장치 제어

- ① PC 바탕화면에서 VW-AMS 프로그램 실행

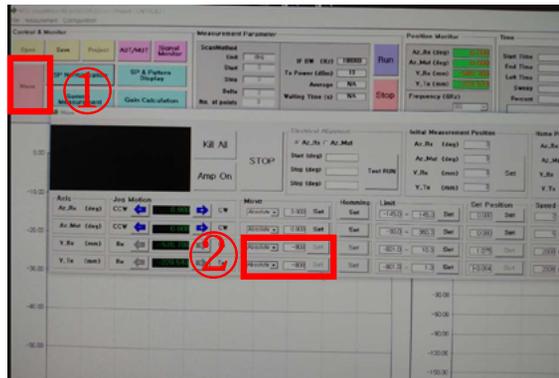




② 기구물에 안테나 등 연결되어 있는 것 없는지 확인 후 부분 해체



③ Move → Rx, Tx 0으로 Setting



- ※ 0 일 경우 : Rx, Tx 최대한 이격, -800 일 경우 : Rx, Tx 밀착
- ※ 위치가 변경되지 않을 경우
 - Limit 값을 (-800 ~ 10)에서 (-900 ~ 900)으로 변경 설정
 - Y_RX, Y_TX 축을 각각 Homing set 진행
 - Y_RX, Y_TX 축이 Home Sensor까지 이동 후 멈춤
 - Jog Motion값이 자동으로 0으로 설정
 - Limit 값을 (-900 ~ 900)에서 (-800 ~ 10)으로 원복 설정
 - Move명령어를 -800, 0으로 설정하여 장비의 동작 상태를 확인

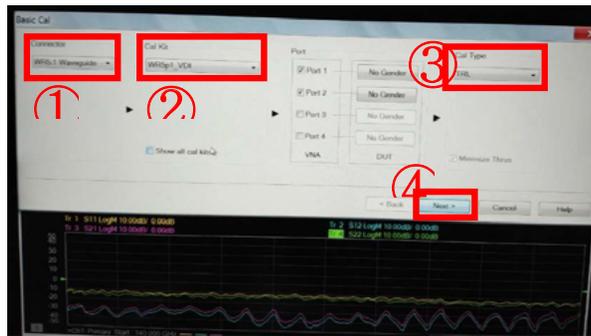
다. 네트워크분석기 Calibration

1) Calibration 셋팅

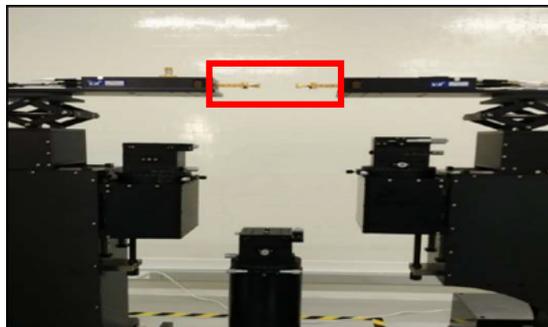
① Response → Cal → Basic Cal. 선택



② ① Connector 선택 : WROO_Waveguide → ② Cal Kit 선택 : WROO_VDI → ③ Cal type 선택 : TRL → ④ Next 선택

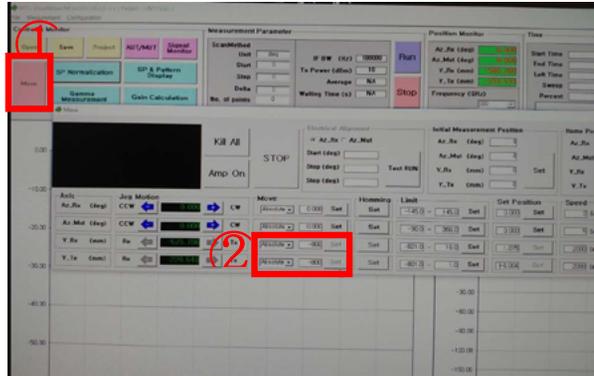


③ 안테나 등 연결된 것이 없는지 확인 후 해체



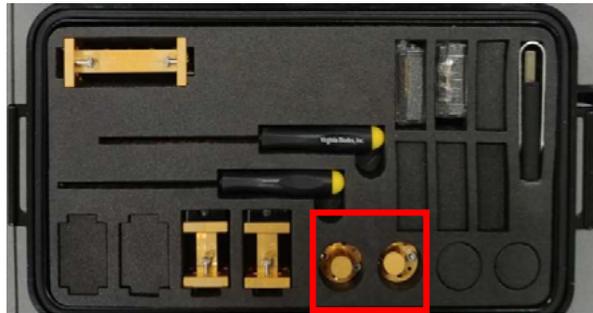


- ④ 수동 Move로 최대한 Rx, Tx 이격시킨 후 PC에서 Move-800 Setting (가장 가깝게)



2) Calibration(Short)

- ① Cal kit에서 Short Cal 꺼내서 연결 (홈에 맞춰 연결)



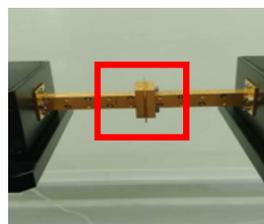
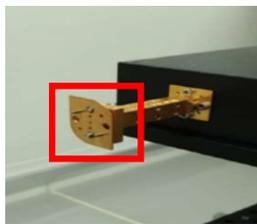
※ 너자 육각렌치 이용하여 확실히 Locking

② PNA 장비에서 Short Cal 선택 → Finish



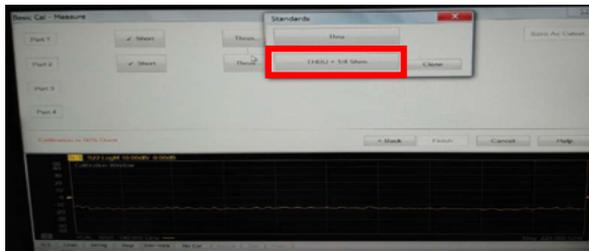
3) Calibration($\frac{1}{4}\lambda$ SHIM)

① Cal kit에서 $\frac{1}{4}\lambda$ SHIM 꺼내서 연결 (홈에 맞춰 연결)



※ ㄱ자 육각렌치 이용하여 확실히 Locking

② PNA 장비에서 Thru.+1/4 Shim 선택

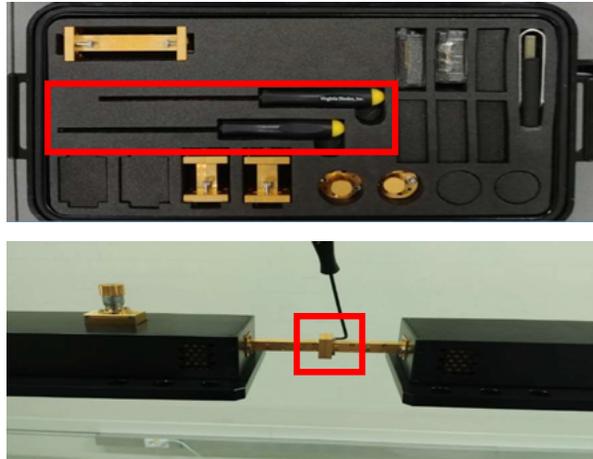


③ 연결된 SHIM 해체



4) Calibration(Thru)

- ① Cal Kit에서 육각렌치 이용하여 수동 Move로 Rx, Tx Thru 연결



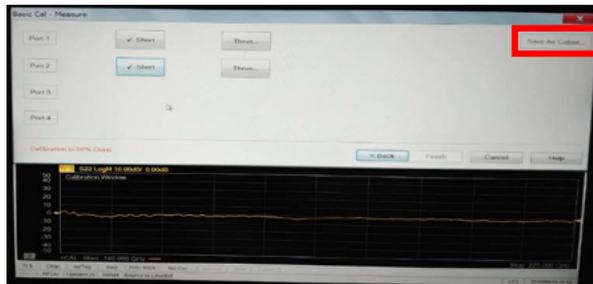
※ ㄱ자 육각렌치 이용하여 확실히 Locking

- ② PNA 장비에서 Thru. → Thru 선택



5) Cal. data 저장

- ① Save as Calset... 선택, 저장



제 2절 밀리미터파대역 안테나 측정 결과

앞 절에서는 밀리미터파대역 안테나 측정을 위한 측정시스템 구성과 안테나 교정을 위한 준비 절차에 대해 소개하였다. 이번 절에서는 앞 절에서 준비한 측정시스템을 가지고 제 3장에서 설명한 3-안테나법, 절대이득 안테나 법, 안테나 이득 비교법(치환법), 마지막으로 C-SAM법의 안테나 교정이론을 적용하여 도파관 규격에 따른 5개 대역(60 GHz ~ 90GHz, 75 GHz ~ 110 GHz, 110 GHz ~ 170 GHz, 170 ~ 260 GHz, 220 GHz ~ 325 GHz) 혼 안테나의 이득을 측정하고 교정 방법별 결과를 상호비교하여 관련 교정방법의 유효성을 검증하고자 한다.

1. 3-안테나법(TAM) 측정 결과

다음은 도파관 규격에 따른 5개 대역(60 GHz ~ 90GHz, 75 GHz ~ 110 GHz, 110 GHz ~ 170 GHz, 170 ~ 260 GHz, 220 GHz ~ 325 GHz) 혼 안테나를 세계적으로 사용되고 있는 3-안테나 법으로 측정 분석한 결과를 기술하였다. 안테나 간 상호반사효과 등 안테나 특성에 주변 환경 영향을 최소화하기 위하여 [그림 3.2.1]과 같이 송수신 안테나 뒷면에 전파 흡수체를 부착하여 약 3 dB ~ 4 dB 변화폭을 갖는 안테나 간 삽입손실 특성을 0.5 dB 이내로 감소시켰다. 하지만 거리에 따른 안테나 이득 변화 특성이 존재하는 문제가 여전히 존재함에 따라, 특정 거리를 고정시켜 측정하면 측정 불확도가 높아질 수 있는 문제가 있다. 따라서, 주파수별 거리에 따른 안테나 이득을 구하고 그 평균을 취하여 안테나 이득을 산출하였다. 그리고 이득평균을 취한 값과 거리를 1 m로 고정한 안테나 C에 대한 측정결과를 5개대역에서 모두 상호비교하였다.

가. WR-12(60 GHz ~ 90 GHz) 대역

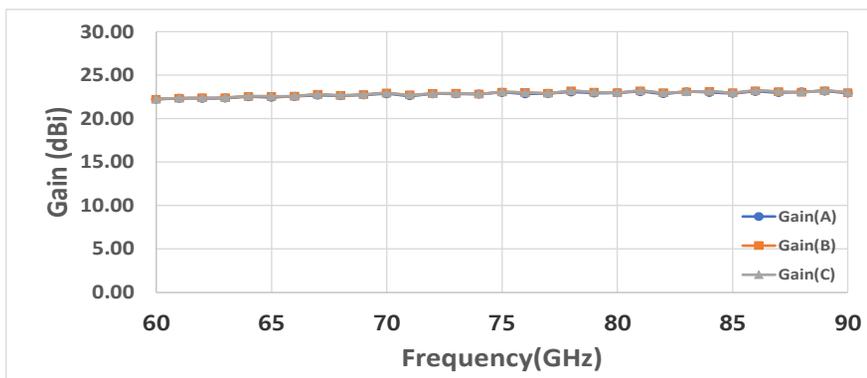
60 GHz ~ 90 GHz 대역에서 측정한 결과는 [표 4.2.1]과 [그림 4.2.1]에 나타내었다. 3-안테나법으로 거리를 1.000 m ~ 1.01 m까지 1 mm단위로 10회 측정하여 산출한 이득 평균값과 안테나 간 거리를 1 m로 고정시켜 측정한 결과를 상호비교했으며, 측정결과로부터 편차가 최대 0.023 dB이내로 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 그림 4.2.1 (b)를 보면 안테나 이득 특성이 주파수에 따라 선형적이지 못하고 리플 특성(안테나 간 상호간섭)이 포함되었다는 것을 볼 수 있다. 따라서 향후에는, CW모드로 놓고 단일 주파수 별로 $1/8\lambda$ 씩 최소 10회



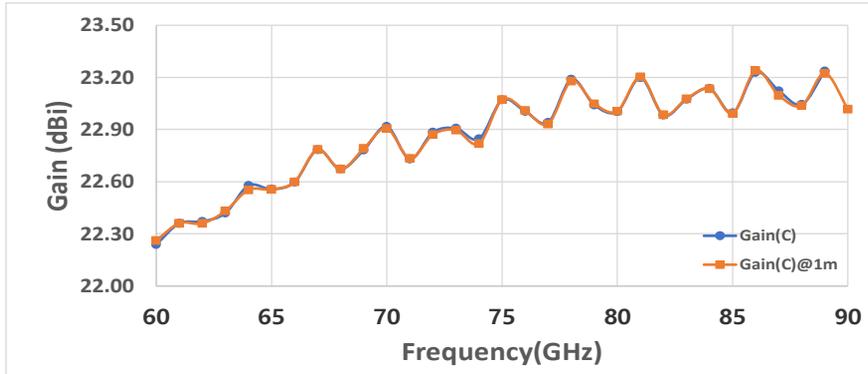
이상 측정하고 평균하여 본 결과와 비교해 볼 계획이다. 본 보고서에서 제시한 방법으로 산출된 혼 안테나 이득은 22.26 dBi ~ 23.02 dBi의 범위를 갖는다.

[표 4.2.1] 측정결과 상호비교(WR-12 대역)

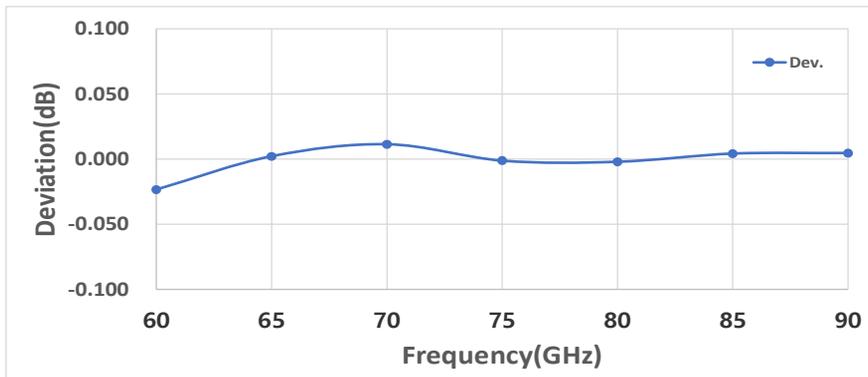
주파수 (GHz)	3-안테나법(평균법) Antenna Gain (dBi)			거리고정@ 1m (dBi)	평균법 이득 C와 거리 1 m 고정 이득 상호비교 (dB)
	A	B	C		
60	22.21	22.22	22.24	22.26	-0.023
65	22.44	22.55	22.56	22.56	0.002
70	22.83	22.93	22.92	22.91	0.011
75	23.00	23.05	23.07	23.07	-0.001
80	22.96	22.99	23.00	23.01	-0.002
85	22.90	22.96	23.00	22.99	0.004
90	22.91	22.99	23.02	23.02	0.005



(a) 안테나(A, B, C) 이득



(b) 안테나 C 이득 상호비교(이득평균법 VS 거리 1m 고정)



(C) 안테나 C 이득 편차(이득평균법 VS 거리 1m 고정)

[그림 4.2.1] 3-안테나 측정결과(WR-12 대역)

나. WR-10(75 GHz ~ 110 GHz) 대역

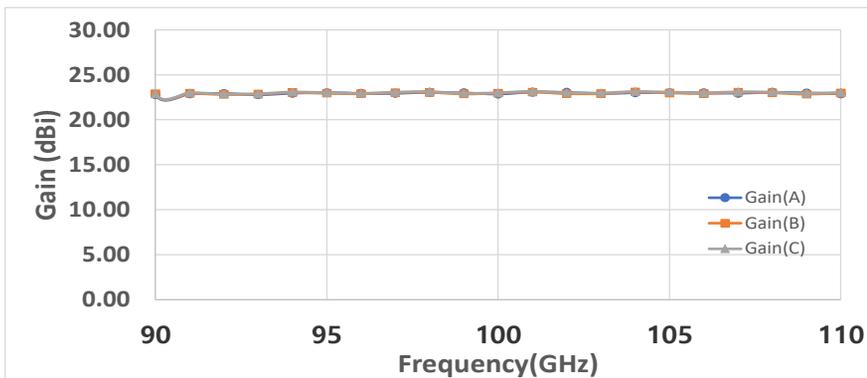
75 GHz ~ 110 GHz 대역에서 측정한 결과는 [표 4.2.2]와 [그림 4.2.2]에 나타내었다. 3-안테나법으로 거리를 1.000 m ~ 1.0034 m까지 0.34 mm단위로 10회 측정하여 산출한 이득 평균값과 안테나 간 거리를 1 m로 고정시켜 측정한 결과를 상호비교했으며, 측정결과로부터 편차가 최대 0.036 dB이내로 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 그림 4.2.2 (b)를 보면 안테나 이득 특성이 주파수에 따라 선형적이지 못하고 리플 특성(안테나 간 상호간섭)이 포함되었다는 것을



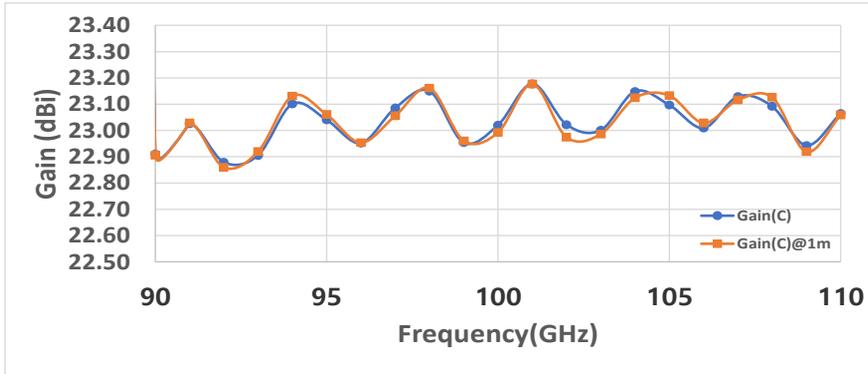
볼 수 있다. 따라서 향후에는, CW모드로 놓고 단일 주파수 별로 $1/8\lambda$ 씩 최소 10회 이상 측정하고 평균하여 본 결과와 비교해 볼 계획이다. 본 보고서에서 제시한 방법으로 산출된 혼 안테나 이득은 22.91 dBi ~ 23.1 dBi의 범위를 갖는다.

[표 4.2.2] 측정결과 상호비교(WR-10 대역)

주파수 (GHz)	3-안테나법(평균법) Antenna Gain (dBi)			거리고정@ 1m (dBi)	평균법 이득 C와 거리 1 m 고정 이득 상호비교 (dB)
	A	B	C		
90	22.91	22.80	22.87	22.91	-0.004
95	23.06	23.02	22.96	23.04	0.020
100	22.99	22.86	22.97	23.02	-0.028
105	23.13	23.03	22.99	23.10	0.036
110	23.06	22.88	22.97	23.06	-0.005



(a) 안테나(A, B, C) 이득



(b) 안테나 C 이득 상호비교(이득평균법 VS 거리 1m 고정)



(c) 안테나 C 이득 편차(이득평균법 VS 거리 1m 고정)

[그림 4.2.2] 3-안테나 측정결과(WR-10 대역)

다. WR-8(110 GHz ~ 170 GHz) 대역(안테나 실사진 추가)

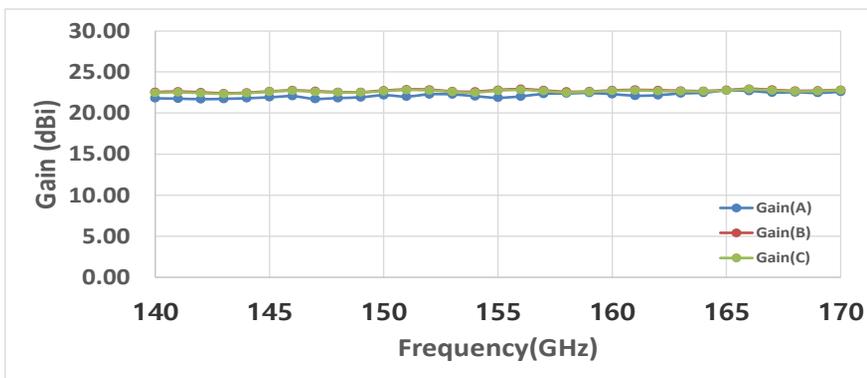
140 GHz ~ 170 GHz 대역에서 측정한 결과는 [표 4.2.3]와 [그림 4.2.3]에 나타내었다. 3-안테나법으로 거리를 1.000 m ~ 1.0022 m까지 0.22 mm단위로 10회 측정하여 산출한 이득 평균값과 안테나 간 거리를 1 m로 고정시켜 측정한 결과를 상호비교했으며, 측정결과로부터 편차가 최대 0.05 dB이내로 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 그림 4.2.2 (b)를 보면 안테나 이득 특성이 주파수에 따라 선형적이지 못하고 리플 특성(안테나 간 상호간섭)이 포함되었



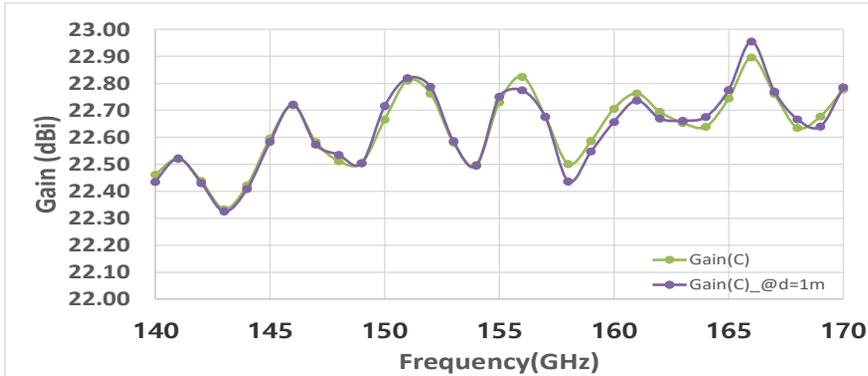
다는 것을 볼 수 있다. 따라서 향후에는, CW모드로 놓고 단일 주파수 별로 1/8λ 씩 최소 10회 이상 측정하고 평균하여 본 결과와 비교해 볼 계획이다. 본 보고서에서 제시한 방법으로 산출된 혼 안테나 이득은 22.46 dBi ~ 22.78 3dBi 의 범위를 갖는다.

[표 4.2.3] 측정결과 상호비교(WR-8 대역)

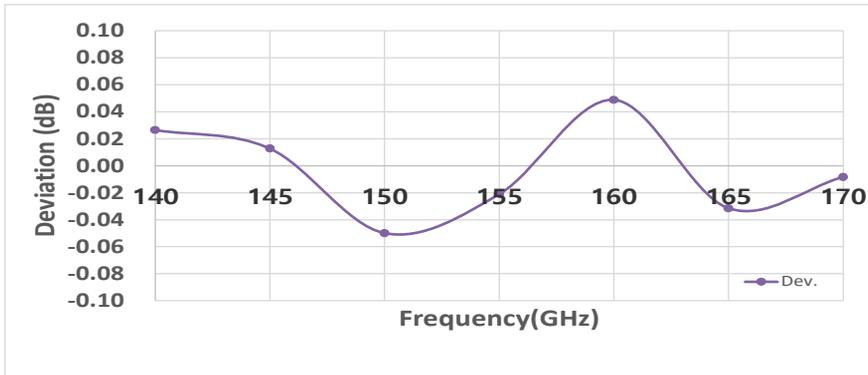
주파수 (GHz)	3-안테나법(평균법) Antenna Gain (dBi)			거리고정@ 1m (dBi)	평균법 이득 C와 거리 1 m 고정 이득 상호비교 (dB)
	A	B	C		
140	22.43	21.80	22.55	22.46	0.03
145	22.58	21.92	22.64	22.60	0.01
150	22.72	22.16	22.74	22.67	-0.05
155	22.75	21.86	22.82	22.73	-0.02
160	22.66	22.29	22.77	22.71	0.05
165	22.78	22.75	22.81	22.74	-0.03
170	22.79	22.58	22.82	22.78	-0.01



(a) 안테나(A, B, C) 이득



(b) 안테나 C 이득 상호비교(이득평균법 VS 거리 1m 고정)



(c) 안테나 C 이득 편차(이득평균법 VS 거리 1m 고정)

[그림 4.2.3] 3-안테나 측정결과(WR-8 대역)

라. WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz) 대역

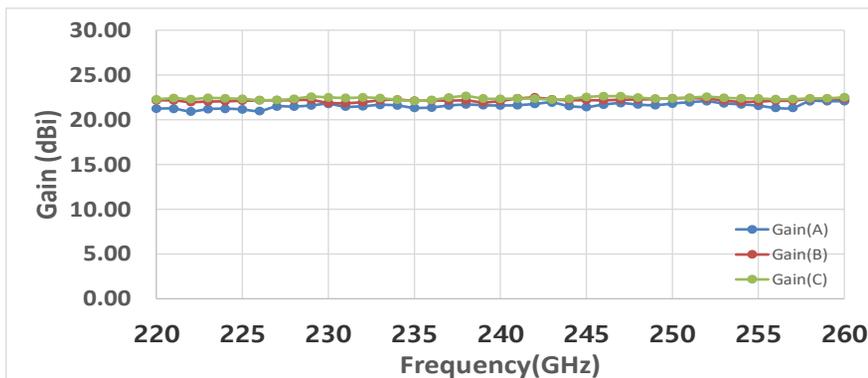
170 GHz ~ 160 GHz 대역에서 측정한 결과는 [표 4.2.4]와 [그림 4.2.4]에 나타내었다. 3-안테나법으로 거리를 1.000 m ~ 1.0014 m까지 0.14 mm단위로 10회 측정하여 산출한 이득 평균값과 안테나 간 거리를 1 m로 고정시켜 측정한 결과를 상호비교했으며, 측정결과로부터 편차가 최대 0.15 dB이내로 동일한 것을 알 수 있다. 하지만, 그림 4.2.2 (b)를 보면 안테나 이득 특성이 주파수에 따라 선형적이지 못하고 리플 특성(안테나 간 상호간섭)이 포함되어있



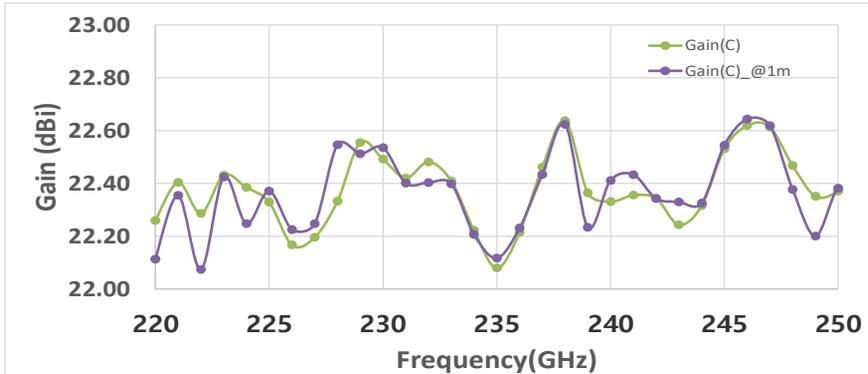
다는 것을 볼 수 있다. 따라서 향후에는, CW모드로 놓고 단일 주파수 별로 1/8λ씩 최소 10회 이상 측정하고 평균하여 본 결과와 비교해 볼 계획이다. 본 보고서에서 제시한 방법으로 산출된 혼 안테나 이득은 22.08 dBi ~ 22.53 dBi의 범위를 갖는다.

[표 4.2.4] 측정결과 상호비교(WR-4.3대역)

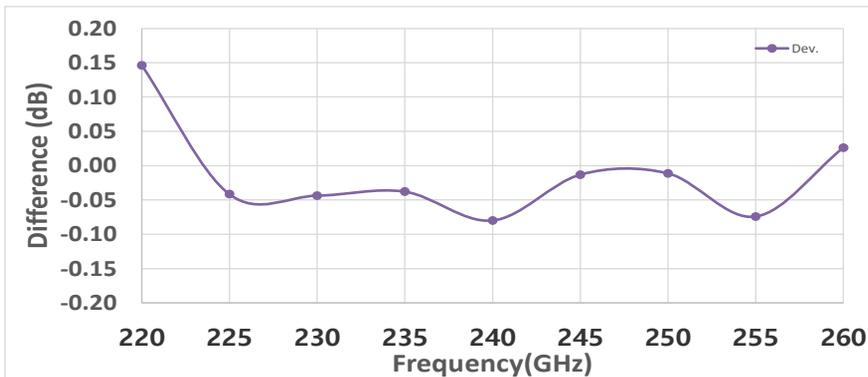
주파수 (GHz)	3-안테나법(평균법) Antenna Gain (dBi)			거리고정@ 1m (dBi)	평균법 이득 C와 거리 1 m 고정 이득 상호비교 (dB)
	A	B	C		
220	22.11	21.24	22.16	22.26	0.15
225	22.37	21.14	22.12	22.33	-0.04
230	22.54	21.75	21.89	22.49	-0.04
235	22.12	21.31	22.12	22.08	-0.04
240	22.41	21.58	22.09	22.33	-0.08
245	22.54	21.41	22.18	22.53	-0.01
250	22.38	21.80	22.39	22.37	-0.01
255	22.44	21.55	22.03	22.37	-0.07
260	22.47	22.06	22.35	22.50	0.03



(a) 안테나(A, B, C) 이득



(b) 안테나 C 이득 상호비교(이득평균법 VS 거리 1m 고정)



(c) 안테나 C 이득 편차(이득평균법 VS 거리 1m 고정)

[그림 4.2.4] 3-안테나 측정결과(WR-4.3대역)

마. WR-3.4(220 GHz ~ 325 GHz) 대역

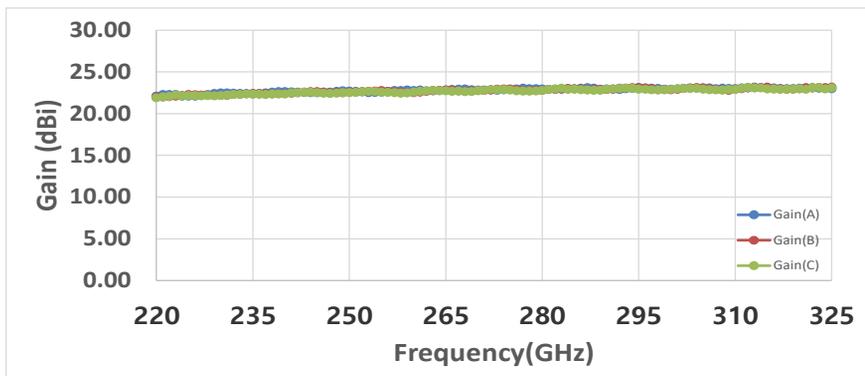
220 GHz ~ 325 GHz 대역에서 측정한 결과는 [표 4.2.5]와 [그림 4.2.6]에 나타내었다. 3-안테나법으로 거리를 1.000 m ~ 1.0009 m까지 0.09 mm단위로 10회 측정하여 산출한 이득 평균값과 안테나 간 거리를 1 m로 고정시켜 측정한 결과를 상호비교했으며, 측정결과로부터 편차가 최대 0.437 dB 것을 알 수 있다. 이 대역에서도, 그림 4.2.2 (b)를 보면 안테나 이득 특성이 주파수에 따라 선형적이지 못하고 리플 특성(안테나 간 상호간섭)이



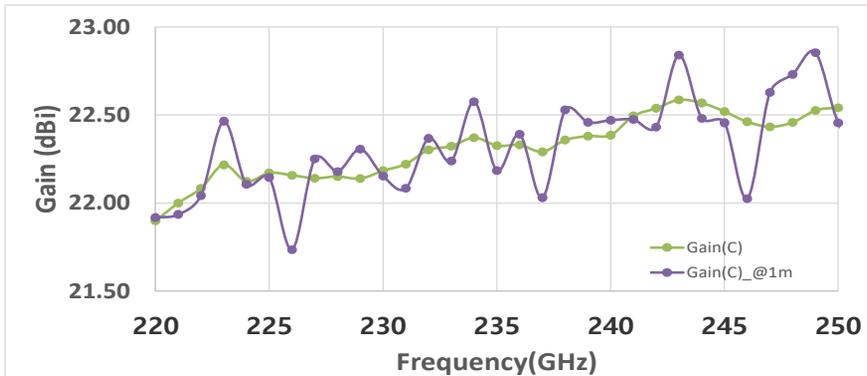
포함되었다는 것을 볼 수 있다. 따라서 향후에는, CW모드로 놓고 단일 주파수 별로 $1/8\lambda$ 씩 최소 10회 이상 측정하고 평균하여 본 결과와 비교해 볼 계획이다. 본 보고서에서 제시한 방법으로 산출된 혼 안테나 이득은 21.9 dBi ~ 23.00 dBi의 범위를 갖는다.

[표 4.2.5] 측정결과 상호비교(WR-3.4 대역)

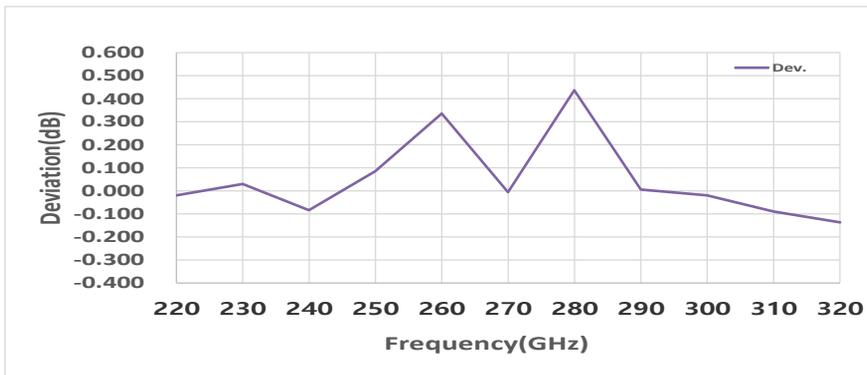
주파수 (GHz)	3-안테나법(평균법) Antenna Gain (dBi)			거리고정@ 1m (dBi)	평균법 이득 C와 거리 1 m 고정 이득 상호비교 (dB)
	A	B	C		
220	21.92	22.12	21.98	21.90	-0.019
230	22.15	22.51	22.17	22.18	0.030
240	22.47	22.66	22.39	22.39	-0.084
250	22.45	22.72	22.57	22.54	0.085
260	22.24	22.80	22.52	22.57	0.336
270	22.77	22.83	22.77	22.77	-0.006
280	22.36	22.98	22.80	22.80	0.437
290	22.94	22.98	22.90	22.95	0.006
300	22.93	22.95	22.87	22.91	-0.019
310	22.99	23.01	22.97	22.90	-0.090
320	23.14	23.06	22.99	23.00	-0.137



(a) 안테나(A, B, C) 이득



(b) 안테나 C 이득 상호비교(이득평균법 VS 거리 1m 고정)



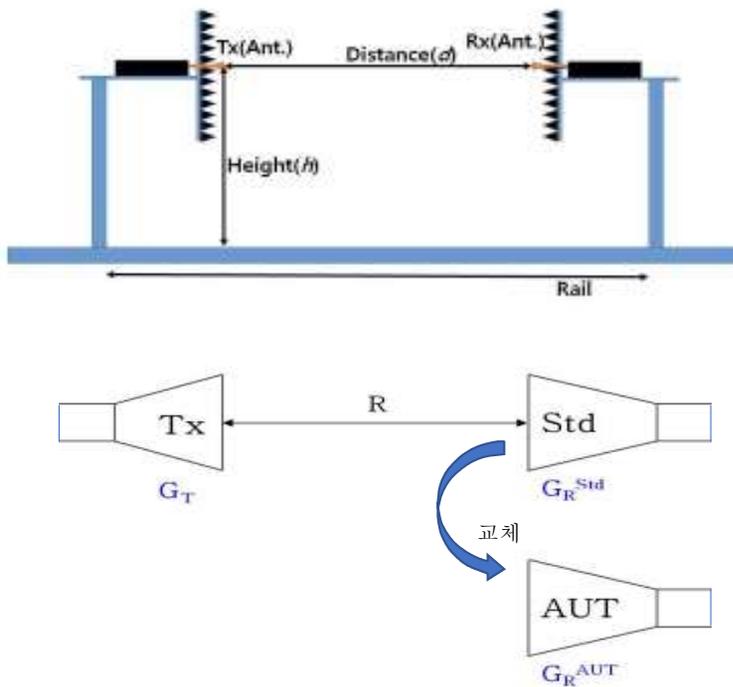
(c) 안테나 C 이득 편차(이득평균법 VS 거리 1m 고정)

[그림 4.2.5] 3-안테나 측정결과(WR-3.4 대역)



2. 절대이득법(2-안테나) 측정 결과

2016년 중국 항저우에서 개최된 IEC/CISPR 국제표준화 회의에서 1 GHz - 18 GHz 주파수 범위에서 동등한 피라미드 혼 안테나를 사용한 새로운 개념의 표준 안테나를 소개하였다. 만약 동등한 2개의 안테나가 존재한다면 안테나 사이의 감쇠량(SIL)을 단 한 번 측정함으로써 표준 안테나(안테나 이득)를 정의 내릴 수 있다. 따라서 동등성을 평가하기 위하여 [그림 4.2.6]과 같이 두 안테나 간 치환법을 사용하여 SIL 값을 상호비교함으로써 동등성을 검증하였다. 여기서 우리는 측정 불확도의 오차범위를 고려하여 0.2 dB 이내의 차이를 보이면 동등하다고 간주하였다.



[그림 4.2.6] 치환법에 의한 안테나 사이의 감쇠량 측정 비교

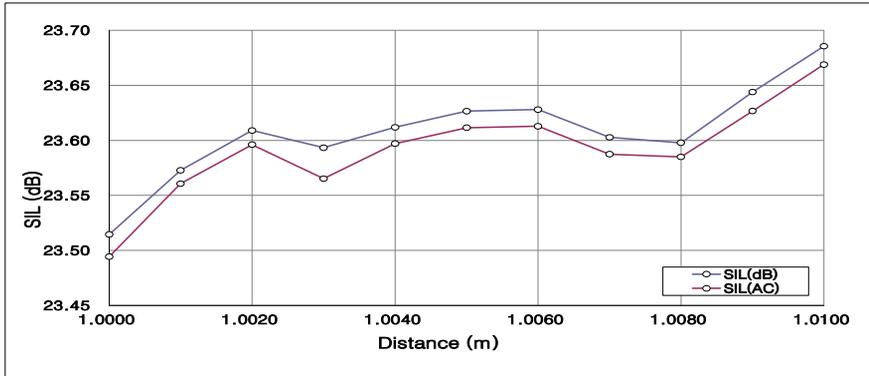
가. 60 GHz ~ 325 GHz 대역에 대한 동등성 검증 결과

측정불확도를 고려하여 두 안테나 간 삽입손실(SIL) 측정결과를 상호비교함으로써 60 GHz ~ 325 GHz(5개 대역) 혼 안테나에 대한 동등성을 분석하였다. WR4.3 대역에서 최대 0.6 dB을 편차를 보인 것을 제외한 모든 대역에서 0.2 dB 이내의 편차로 안테나의 특성이 동등하다는 것을 확인하였다. 60 GHz ~ 325 GHz 대역에 대한 동등성 검증 결과는 [표 4.2.6]에서 [표 4.2.10], [그림 4.2.7]에서 [그림 4.2.11]에 나타내었다. WR4.3대역에서 보인 큰 편차는 캘리브레이션에 사용된 트랜지션 오차에 기인한 것으로 판단되며, 향후 정밀한 캘리브레이션과 흡수체 재설치 등을 통해 측정하고 분석할 예정이다.

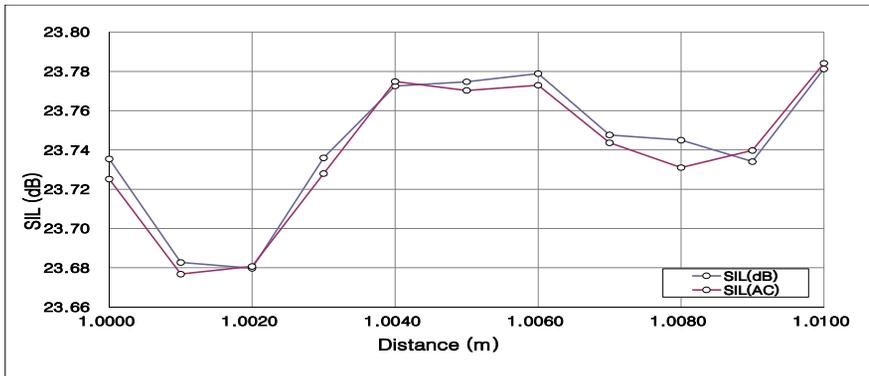
1) WR-12(60 GHz ~ 90 GHz) 대역에 대한 동등성 검증 결과

[표 4.2.6] WR-12 대역 동등성 평가 결과

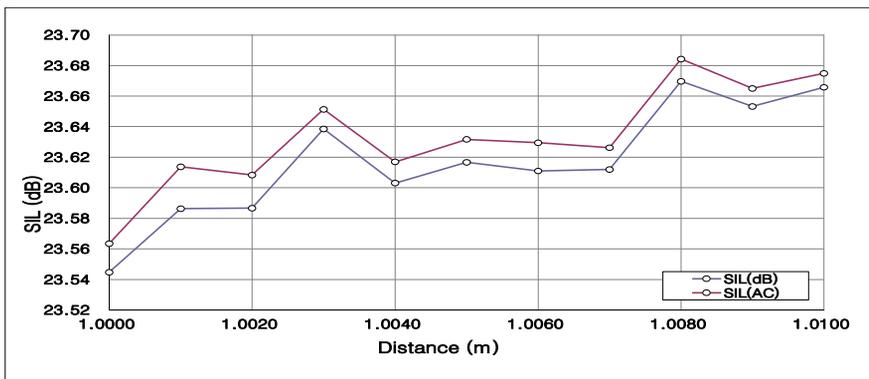
주파수(GHz)	안테나 A-B	안테나 A-C	편차
60.00	23.61	23.59	0.02
65.00	23.74	23.74	0.00
70.00	23.62	23.63	-0.02
75.00	23.93	23.92	0.02
80.00	24.60	24.58	0.02
85.00	25.21	25.17	0.03
90.00	25.66	25.63	0.03



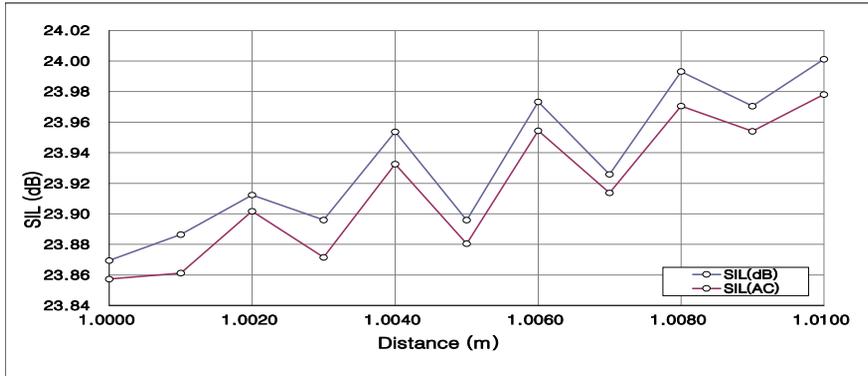
(a) 60 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



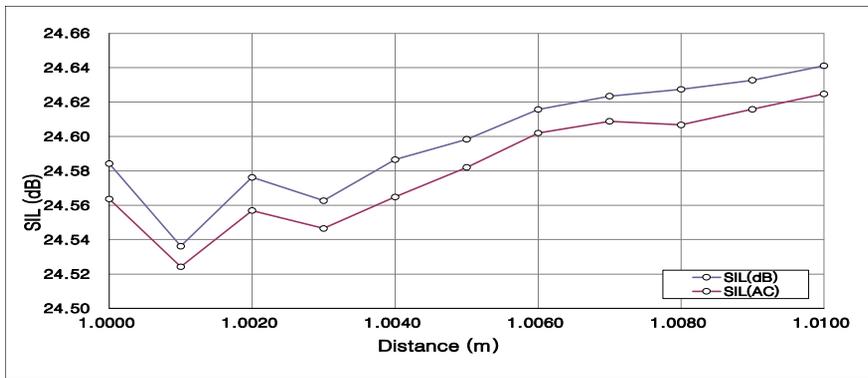
(b) 65 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



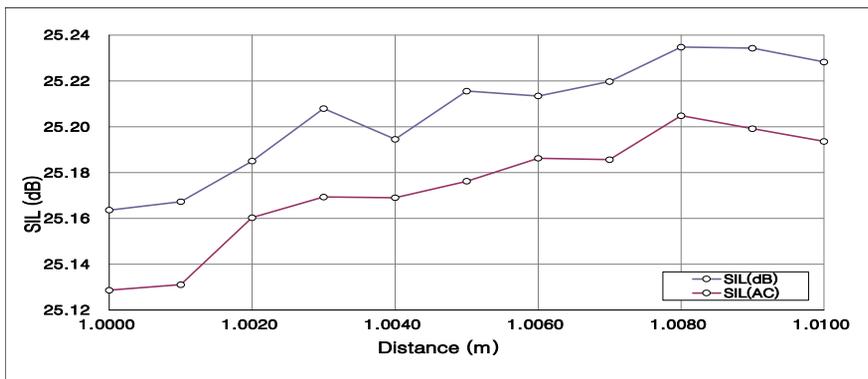
(c) 70 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



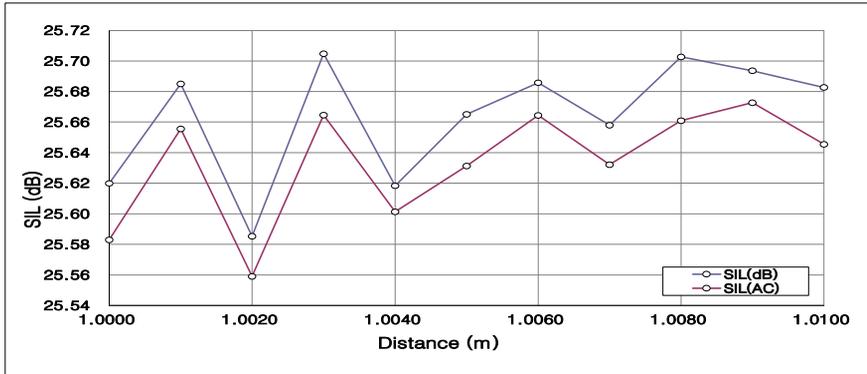
(d) 75 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



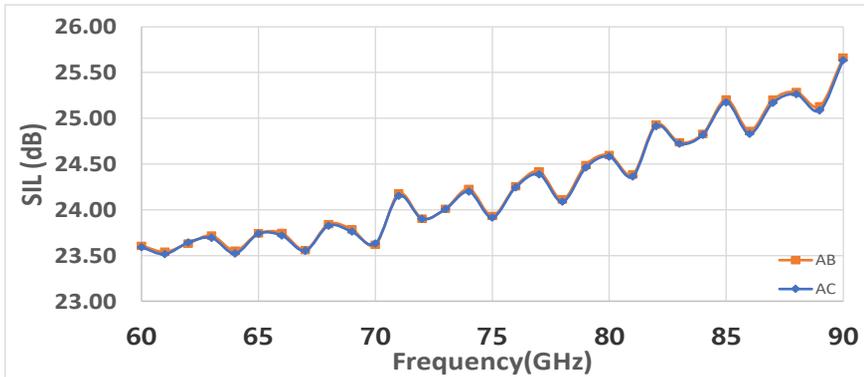
(e) 80 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



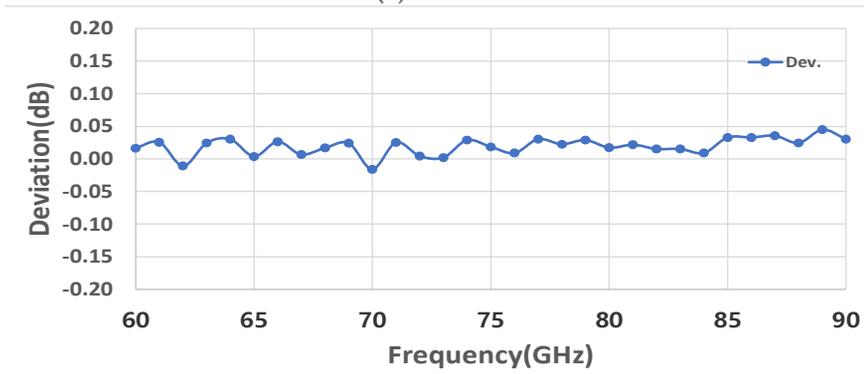
(f) 85 GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



(g) GHz대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과
[그림 4.2.7] WR-12 대역 거리에 따른 SIL 상호비교 결과



(a) 감쇠량



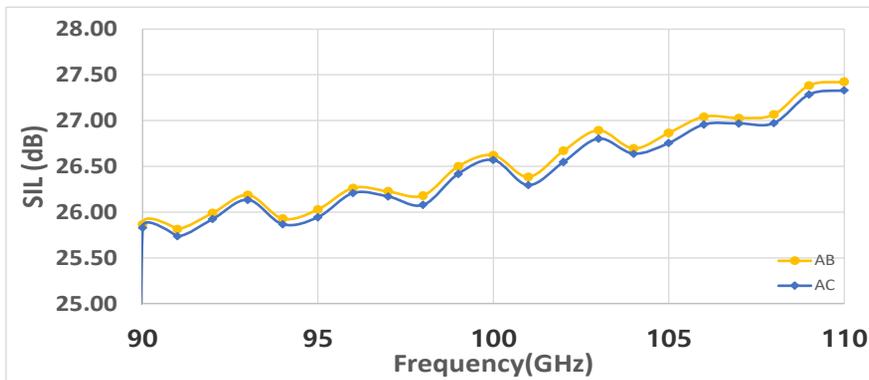
(b) 편차

[그림 4.2.8] 안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-12 대역)

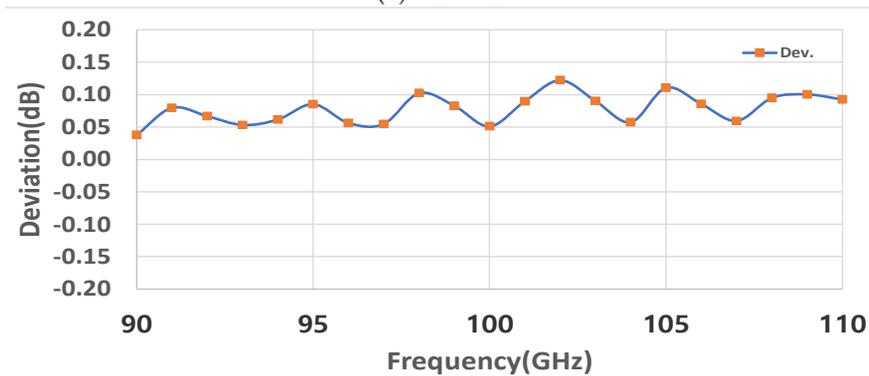
2) WR-10(75 GHz ~ 110 GHz) 대역에 대한 동등성 검증 결과

[표 4.2.7] WR-10 대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-B	안테나 A-C	편차
90	25.87	25.83	0.04
95	26.03	25.94	0.09
100	26.62	26.57	0.05
105	26.86	26.75	0.11
110	27.42	27.33	0.09



(a) 감쇠량



(b) 편차

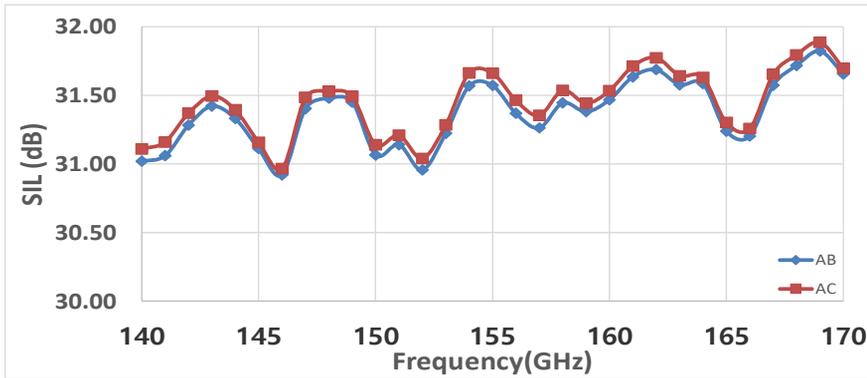
[그림 4.2.9] 안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-10 대역)



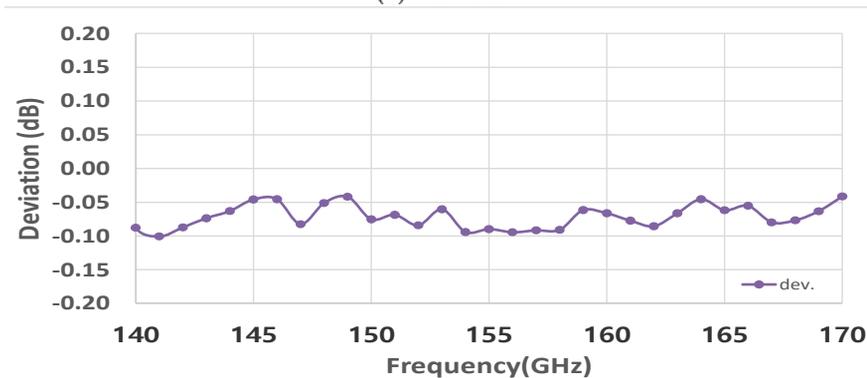
3) WR-8(110 GHz ~ 170 GHz) 대역에 대한 동등성 검증 결과

[표 4.2.8] WR-8 대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-B	안테나 A-C	편차
140	31.02	31.11	-0.09
145	31.11	31.16	-0.05
150	31.07	31.14	-0.08
155	31.57	31.66	-0.09
160	31.47	31.53	-0.07
165	31.24	31.30	-0.06
170	31.66	31.70	-0.04



(a) 감쇠량



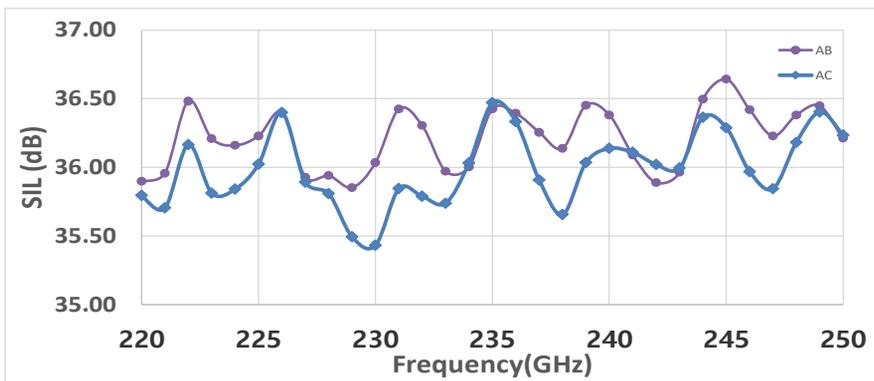
(b) 편차

[그림 4.2.10] 안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-8 대역)

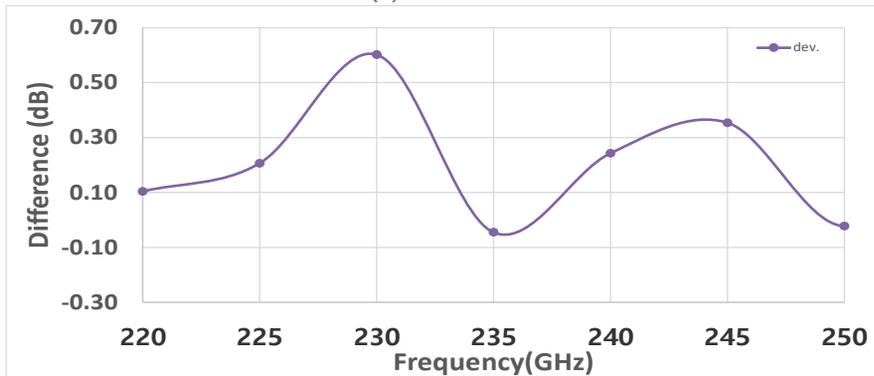
4) WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz) 대역에 대한 동등성 검증 결과

[표 4.2.9] WR-4.3 대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-B	안테나 A-C	편차
220	35.90	35.80	0.10
225	36.23	36.02	0.21
230	36.03	35.43	0.60
235	36.43	36.47	-0.05
240	36.38	36.14	0.24
245	36.64	36.29	0.35
250	36.21	36.24	-0.02
255	37.00	36.66	0.34
260	36.03	36.19	-0.15



(a) 감쇠량



(b) 편차

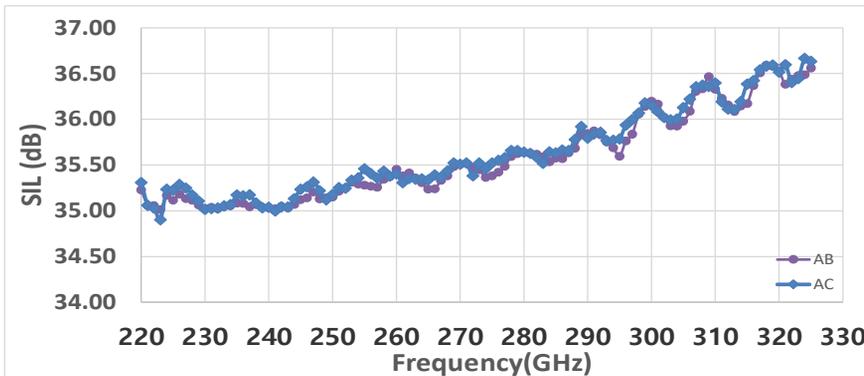
[그림 4.2.11] 안테나(B, C) 감쇠량 측정 결과(WR-4.3 대역)



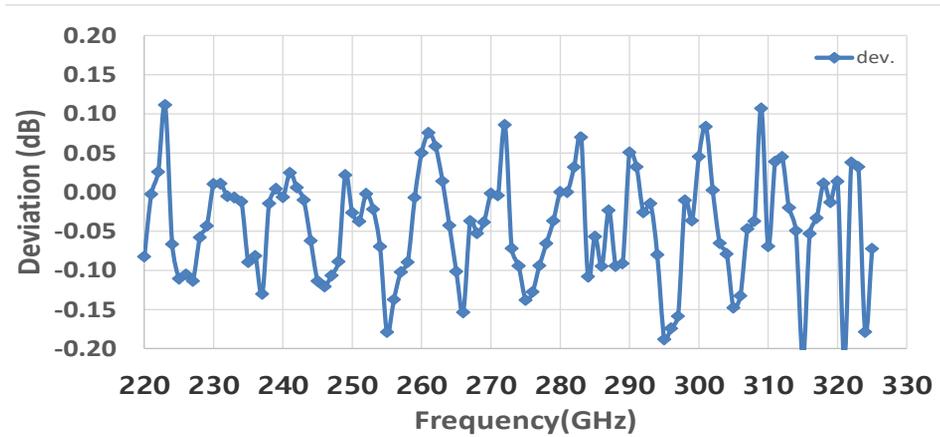
5) WR-3.4(220 GHz ~ 325 GHz)대역에 대한 검증 결과

[표 4.2.10] WR-3.4 대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
220	35.23	35.31	-0.08
230	35.03	35.01	0.01
240	35.03	35.04	-0.01
250	35.15	35.18	-0.03
260	35.45	35.40	0.05
270	35.51	35.51	0.00
280	35.64	35.64	0.00
290	35.85	35.79	0.05
300	36.20	36.15	0.05
310	36.33	36.40	-0.07
320	36.53	36.52	0.01



(a) 감쇠량



(b) 편차

[그림 4.2.12] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(WR-3.4 대역)

나. 동등개념(절대이득법)을 사용한 표준 안테나 이득 측정결과

위에서는 측정불확도를 고려하여 두 측정결과를 상호비교 함으로써 60 GHz ~ 325 GHz(5개 대역) 동등 혼 안테나의 동등성을 분석하였다. WR4.3 대역 일부를 제외한 모든 대역에서 0.2 dB 이내의 편차로 안테나의 특성이 동등하다는 것을 확인하였다. 따라서 동등안테나의 이득 산출식 (2.3.4)으로부터 쉽게 안테나 이득을 결정할 수 있다. 이 식에 따르면 두 개의 동등 혼 안테나 사이의 감쇠량을 단 한 번 측정함으로써 동등한 표준 안테나 이득($G_B = G_C$)를 결정할 수가 있다. 이는 마치 표준 다이폴 안테나의 발룬 특성을 측정하여 표준 다이폴 안테나의 안테나 이득을 결정하는 것과 같다.

여기서 동등 혼 안테나는 감쇠량 측정결과를 상호 비교함으로써 동등성을 확인했으며 측정불확도를 고려하여 0.2 dB이내의 값으로 두 안테나가 같다고 정의 내렸다. 이와 같이 동등하다고 하는 것, 즉 안테나 특성이 똑같다고 하는 것은 제작된 상태 그 자체로 확인한다는 것은 불가능하며 동등성이라는 정의에 따라 측정을 수행하고 측정불확도 내에서 동등하다고 선언해야 할 것이다.

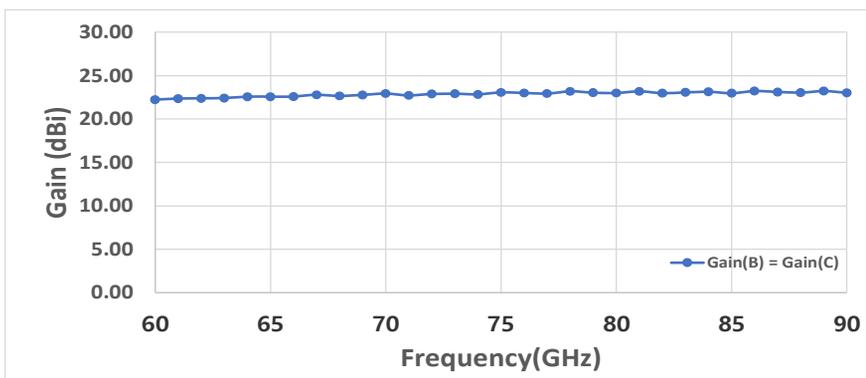


다음은 60 GHz ~ 325 GHz(5개 대역) 혼 안테나 이득 측정결과를 [표4.2.11]부터 [표 4.2.15]와 [그림 4.2.13]부터 [그림 4.2.17]에 나타내었다.

1) WR-12(60 GHz ~ 90GHz)대역 동등 표준 안테나 이득

[표 4.2.11] WR-12 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득

주파수 (GHz)	안테나 B, C 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 이득 (dBi)
		A = B
60	23.58	22.23
65	23.74	22.56
70	23.62	22.93
75	23.93	23.06
80	24.60	23.00
85	25.21	22.98
90	25.66	23.01

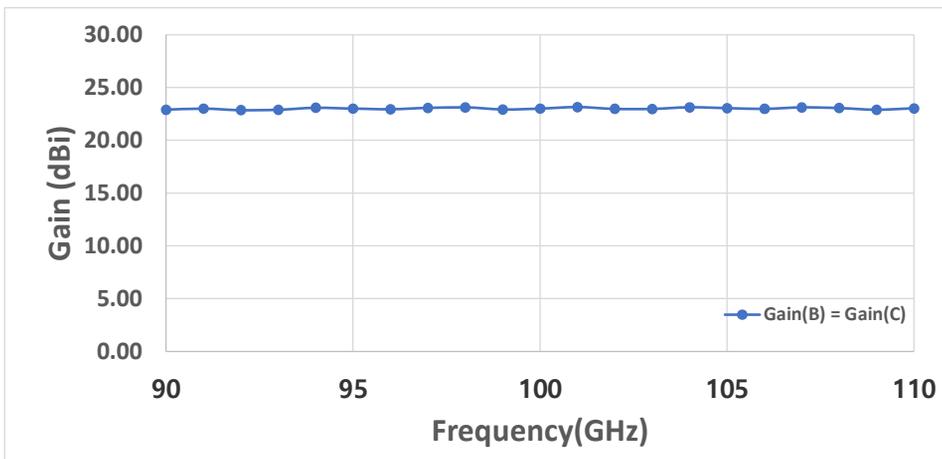


[그림 4.2.13] 안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-12 대역)

2). WR-10(75 GHz ~110 GHz)대역 동등 표준 안테나 이득

[표 4.2.12] WR-10 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득

주파수 (GHz)	안테나 B, C 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 이득) (dBi)
		B = C
90	25.75	22.89
95	26.01	23.00
100	26.46	23.00
105	26.79	23.04
110	27.24	23.02



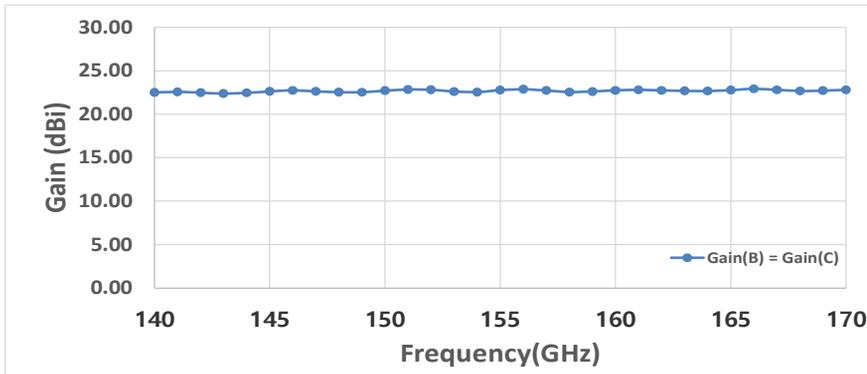
[그림 4.2.14] 안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-10 대역)



3) WR-8(110 GHz ~ 170 GHz)대역 동등 표준 안테나 이득

[표 4.2.13] WR-8 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득

주파수 (GHz)	안테나 B, C 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 이득) (dBi)
		B = C
140	30.36	22.51
145	30.44	22.62
150	30.56	22.70
155	30.70	22.78
160	31.05	22.74
165	31.25	22.78
170	31.46	22.80

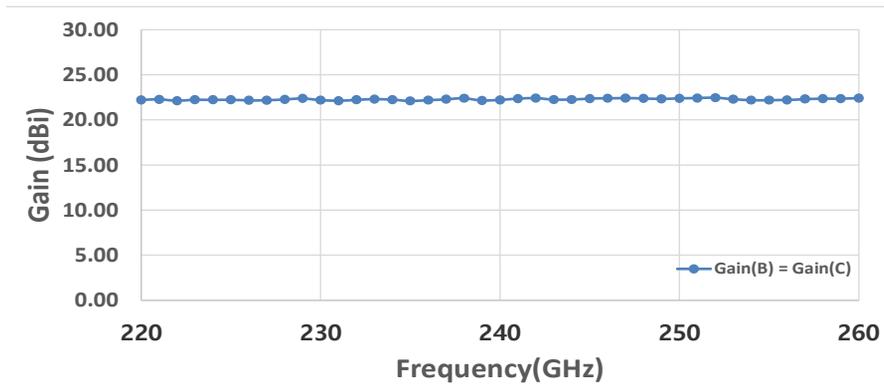


[그림 4.2.15] 안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-8 대역)

4) WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz)대역 동등 표준 안테나 이득

[표 4.2.14] WR-4.3 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득

주파수 (GHz)	안테나 B, C 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 이득) (dBi)
		B = C
220	34.88	22.21
225	35.03	22.23
230	35.30	22.19
235	35.66	22.10
240	35.63	22.21
245	35.52	22.36
250	35.64	22.38
255	36.18	22.20
260	35.90	22.43



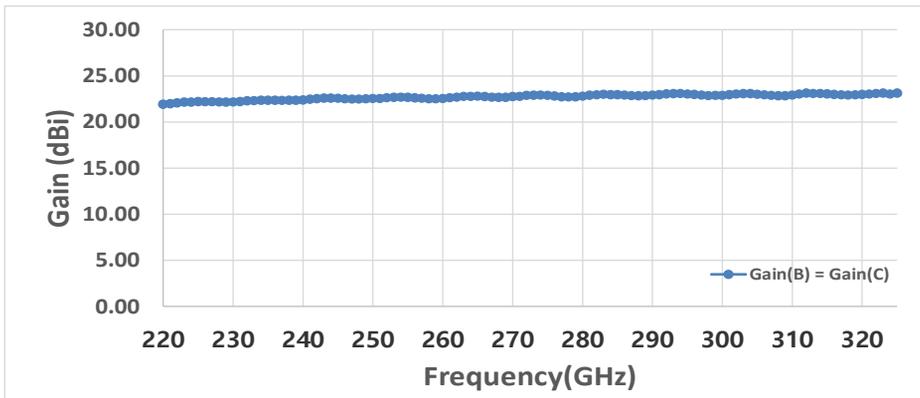
[그림 4.2.16] 안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-4.3 대역)



5) WR-3.4(220 GHz ~ 325 GHz)대역 동등 표준 안테나 이득

[표 4.2.15] WR-3.4 대역 감쇠량 값과 표준 안테나 이득

주파수 (GHz)	안테나 B, C 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 이득 (dBi)
		B = C
220	35.45	21.94
230	35.35	22.18
240	35.30	22.39
250	35.33	22.55
260	35.68	22.55
270	35.57	22.77
280	35.82	22.80
290	35.88	22.92
300	36.24	22.89
310	36.43	22.94
320	36.59	22.99
325	36.44	23.14



[그림 4.2.17] 안테나(B, C) 절대이득 측정 결과(WR-3.4 대역)

3. C-SAM 및 치환법(SAM) 측정결과

앞에서는 5개 대역의 동등 표준 안테나 이득을 산출하였다. 이렇게 산출된 동등 표준 안테나 이득을 사용하여 C-SAM법에 의해 5개 주파수대역 (60 GHz ~ 325 GHz)의 안테나 이득을 산출하였다. 또한 기존의 대표적인 3-안테나 법 (TAM), 절대이득법, 안테나 이득 비교법 결과와 상호비교 함으로써 C-SAM 측정방법의 유효성을 검증하였다. WR-3.4 일부 대역(0.44 dB)을 제외하면 3개의 측정법으로 얻은 안테나 이득의 오차는 대체적으로 0.2 dB 이내임을 확인하였다. WR-3.4대역에서 발생하는 오차는 안테나의 플랜지 부분이 안테나의 개구면보다 큰 이유로 안테나간 상호 반사 특성이 반영된 것으로 판단된다. 이에 향후, 안테나 플랜지 부분을 평편형 흡수체로 처리하여 안테나 상호간의 반사 효과를 정밀 측정 분석해 볼 계획이다. 하지만, 대체적으로 C-SAM 측정방법 밀리미터파대역까지 유효하다는 것이 검증되었으며, 이번 연구보고서에서 분석하지 못한 안테나 간 상호반사 효과를 검토하여 유효성 검증을 마무리 하겠다. 다음은 안테나 교정방법 간 안테나 이득 측정 상호비교 분석결과를 기술하고자 한다.

가. 교정방법 간 상호비교 분석 결과

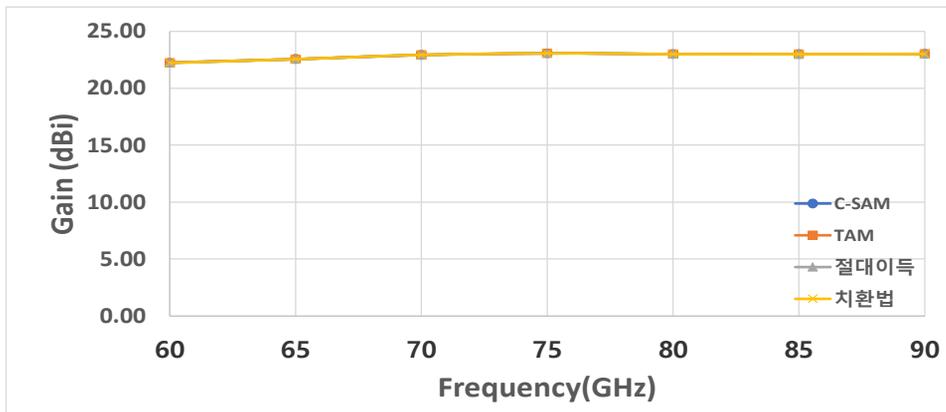
1) WR-12(60 GHz ~ 90 GHz) 대역

앞에서 설명된 4가지 방법으로 측정한 WR-12(60 GHz ~ 90 GHz) 대역 측정 결과는 [표 4.2.16]과 [그림 4.2.18]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득은 약 22.2 dBi ~ 23.1 dBi 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 4가지 교정 방법에 의한 측정결과는 0.12 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 이는 동등성 평가시 고려했던 0.2 dB이내 측정불확도 값을 적용했을 때 모든 안테나 교정방법이 유효한 값을 산출했다고 평가할 수 있다. 다만, 앞서 보았듯이 주파수에 따른 안테나 이득의 리플 특성은 향후 평편형 흡수체를 사용하여 분석하거나 외삽법 이득 산출법을 적용하여 안테나 간 상호 반사 효과를 최대한 배제할 수 있는 측정방법을 도출할 예정이다.

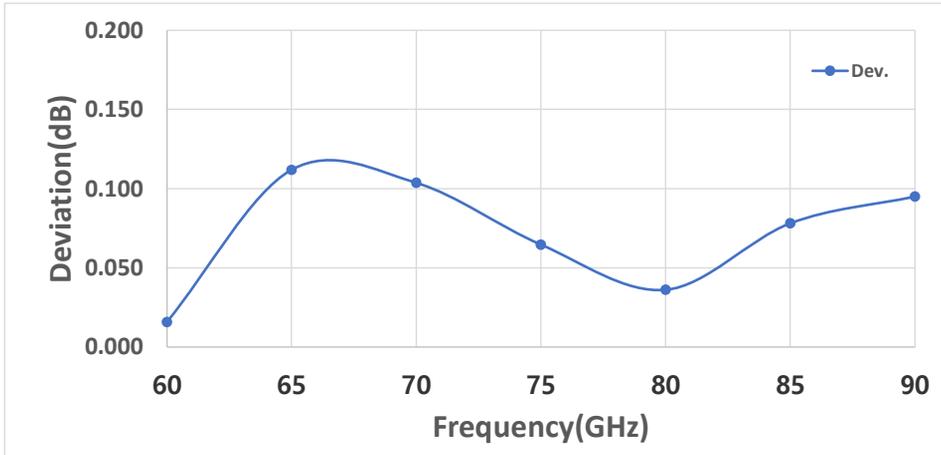


[표 4.2.16] 측정결과 상호비교(WR-12 대역)

주파수 (GHz)	C-SAM Gain (dBi)	3-안테나법 Gain (dBi)	2안테나법 Gain (dBi)	치환법 Gain (dBi)	최대 편차 (dB)
	C	C	C	C	최대값-최소값
60	22.24	22.24	22.23	22.23	0.016
65	22.56	22.56	22.56	22.56	0.112
70	22.92	22.92	22.93	22.93	0.104
75	23.07	23.07	23.06	23.06	0.065
80	23.01	23.00	23.00	23.00	0.036
85	23.00	23.00	22.98	22.98	0.078
90	23.02	23.02	23.01	23.01	0.095



(a) 안테나 이득



(b) 최대 편차

[그림 4.2.18] 안테나 이득 상호비교 결과(WR-12 대역)

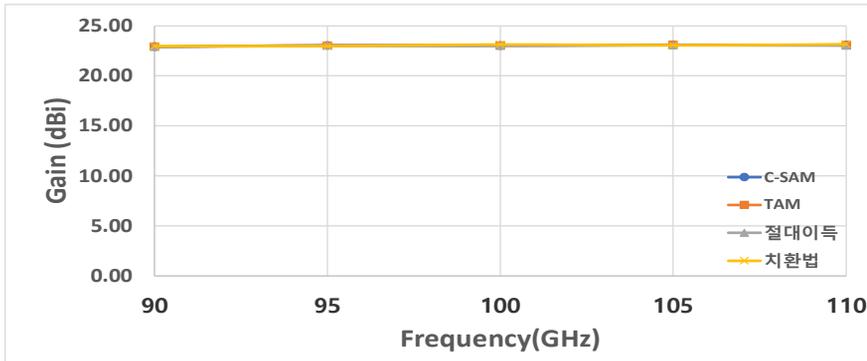
2) WR-10(75 GHz ~ 110 GHz) 대역

앞에서 설명된 4가지 방법으로 측정한 WR-10대역 측정결과는 [표 4.2.17]과 [그림 4.2.19]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득은 약 22.91 dBi ~ 23.1 dBi 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 4가지 교정방법에 의한 측정 결과는 0.14 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 이는 동등성 평가시 고려했던 0.2 dB이내 측정불확도 값을 적용했을 때 모든 안테나 교정방법이 유효한 값을 산출했다고 평가할 수 있다. 다만, 앞서 보았듯이 주파수에 따른 안테나 이득의 리플 특성은 향후 평편형 흡수체를 사용하여 분석하거나 외삽법 이득 산출법을 적용하여 안테나 간 상호 반사효과를 최대한 배제할 수 있는 측정방법을 도출할 예정이다.

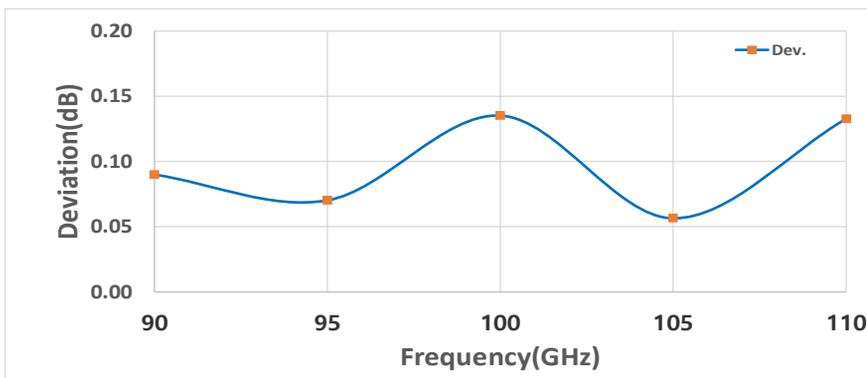


[표 4.2.17] 측정결과 상호비교(WR-10 대역)

주파수 (GHz)	C-SAM Gain (dBi)	3-안테나법 Gain (dBi)	2안테나법 Gain (dBi)	치환법 Gain (dBi)	최대 편차 (dB)
	C	C	C	C	최대값-최소값
90	22.91	22.91	22.89	22.98	0.09
95	23.04	23.04	23.00	22.97	0.07
100	23.02	23.02	23.00	23.13	0.14
105	23.10	23.10	23.04	23.06	0.06
110	23.07	23.06	23.02	23.15	0.13



(a) 안테나 이득



(b) 최대 편차

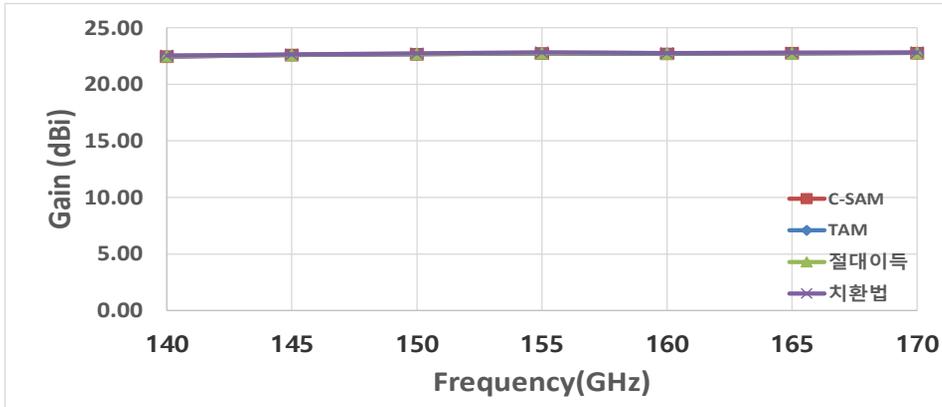
[그림 4.2.19] 안테나 이득 상호비교 결과(WR-10 대역)

3) WR-8(110 GHz ~ 170 GHz) 대역

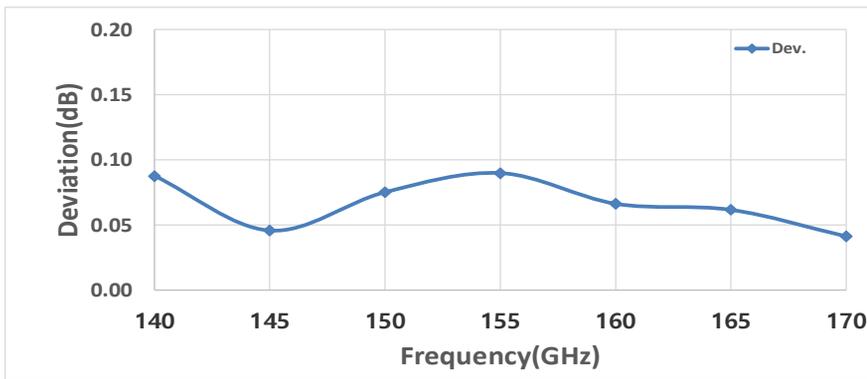
앞에서 설명된 4가지 방법으로 측정한 WR-8대역 측정결과는 [표 4.2.18]과 [그림 4.2.20]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득은 약 22.46 dBi ~ 22.78 dBi 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 4가지 교정방법에 의한 측정 결과는 0.09 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 이는 동등성 평가시 고려했던 0.2 dB이내 측정불확도 값을 적용했을 때 모든 안테나 교정방법이 유효한 값을 산출했다고 평가할 수 있다. 다만, 앞서 보았듯이 주파수에 따른 안테나 이득의 리플 특성은 향후 평편형 흡수체를 사용하여 분석하거나 외삽법 이득 산출법을 적용하여 안테나 간 상호 반사효과를 최대한 배제할 수 있는 측정방법을 도출할 예정이다.

[표 4.2.18] 측정결과 상호비교(WR-8 대역)

주파수 (GHz)	C-SAM Gain (dBi)	3-안테나법 Gain (dBi)	2안테나법 Gain (dBi)	치환법 Gain (dBi)	최대 편차 (dB)
	C	C	C	C	최대값-최소값
140	22.46	22.46	22.51	22.55	0.09
145	22.60	22.60	22.62	22.64	0.05
150	22.67	22.67	22.70	22.74	0.08
155	22.73	22.73	22.78	22.82	0.09
160	22.71	22.71	22.74	22.77	0.07
165	22.75	22.74	22.78	22.81	0.06
170	22.78	22.78	22.80	22.82	0.04



(a) 안테나 이득



(b) 최대 편차

[그림 4.2.20] 안테나 이득 상호비교 결과(WR-8 대역)

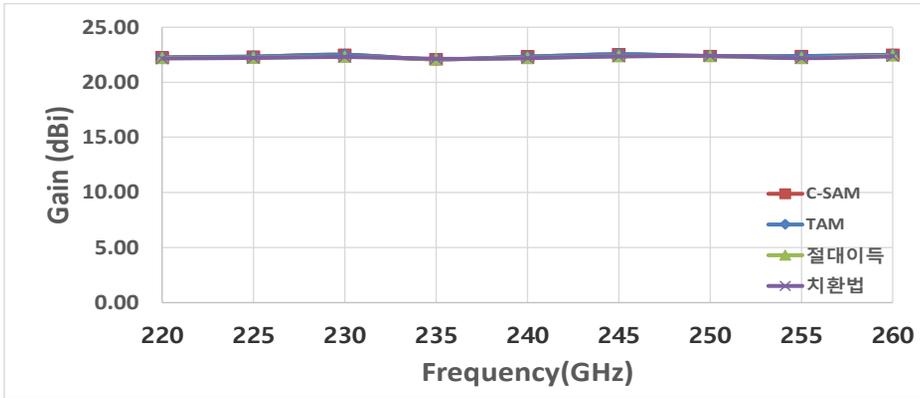
4) WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz) 대역

앞에서 설명된 4가지 방법으로 측정한 WR-4.3대역 측정결과는 [표 4.2.19]과 [그림 4.2.21]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득은 약 22.26 dBi ~ 22.53 dBi 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 4가지 교정방법에 의한 측정 결과는 0.18 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 이는 동등성 평가시 고려했던 0.2 dB이내 측정불확도 값을 적용했을 때 모든 안테나 교정방법이

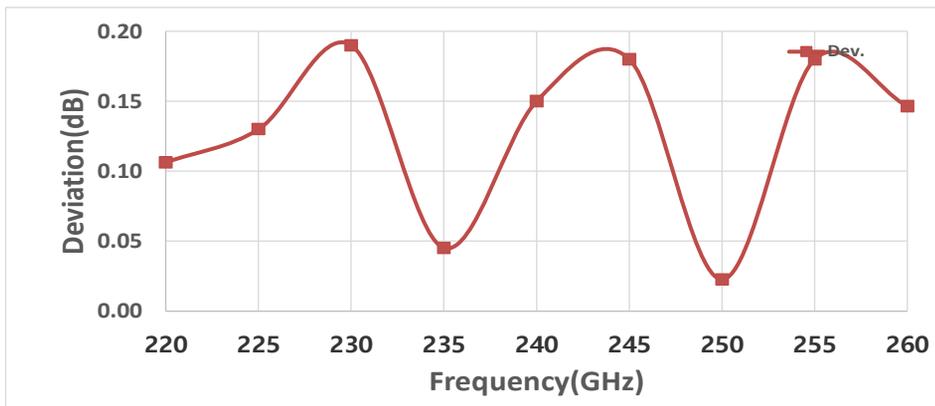
유효한 값을 산출했다고 평가할 수 있다. 다만, 앞서 보았듯이 주파수에 따른 안테나 이득의 리플 특성은 향후 평편형 흡수체를 사용하여 분석하거나 외삽법 이득 산출법을 적용하여 안테나 간 상호 반사효과를 최대한 배제할 수 있는 측정방법을 도출할 예정이다.

[표 4.2.19] 측정결과 상호비교(WR-4.3 대역)

주파수 (GHz)	C-SAM Gain (dBi)	3-안테나법 Gain (dBi)	2안테나법 Gain (dBi)	치환법 Gain (dBi)	최대 편차 (dB)
	C	C	C	C	최대값-최소값
220	22.26	22.26	22.21	22.16	0.11
225	22.33	22.33	22.23	22.20	0.13
230	22.49	22.49	22.31	22.30	0.19
235	22.08	22.08	22.10	22.12	0.05
240	22.33	22.33	22.21	22.18	0.15
245	22.53	22.53	22.36	22.35	0.18
250	22.37	22.37	22.38	22.39	0.02
255	22.37	22.37	22.20	22.19	0.18
260	22.50	22.50	22.43	22.35	0.15



(a) 안테나 이득



(b) 최대 편차

[그림 4.2.21] 안테나 이득 상호비교 결과(WR-4.3 대역)

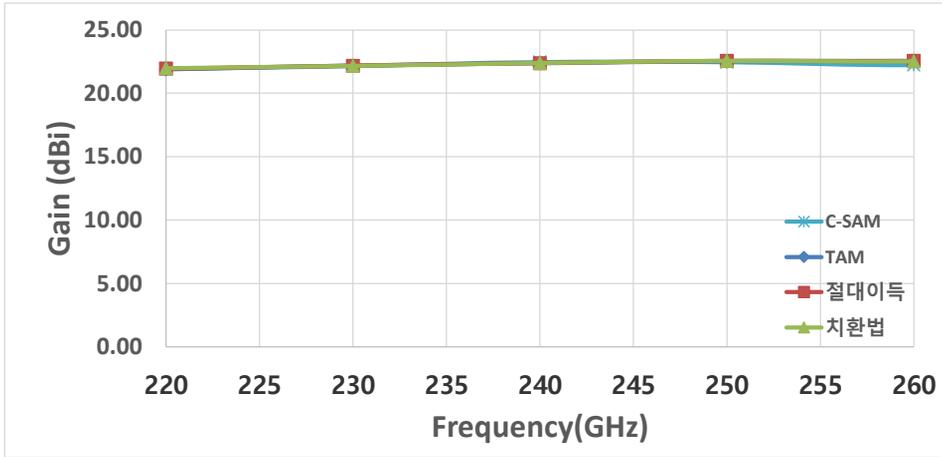
마. WR-3.4(220 GHz ~ 325 GHz) 대역

앞에서 설명된 4가지 방법으로 측정한 WR-3.4대역 측정결과는 [표 4.2.20]과 [그림 4.2.22]에서 보여주는 바와 같이 안테나 이득은 약 21.92 dBi ~ 23.14 dBi 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 4가지 교정방법에 의한 측정

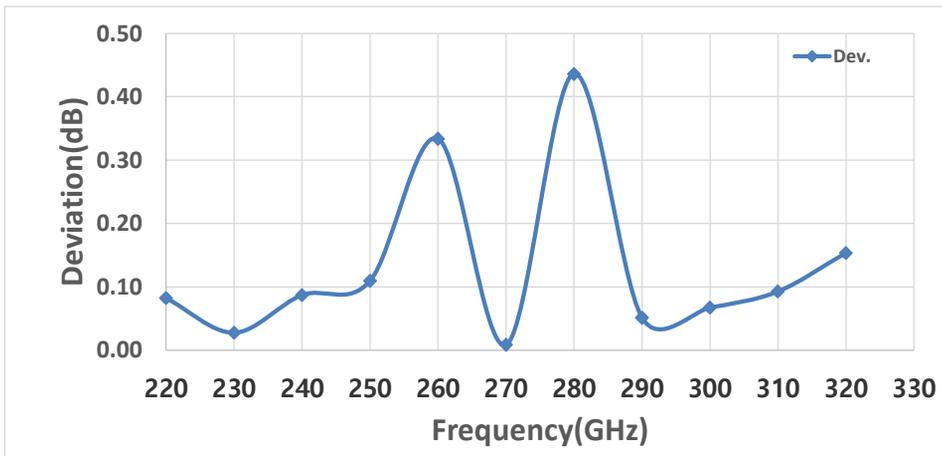
결과는 최대 0.44 dB 값을 갖는것을 확인하였다. 이 편차는 안테나의 플랜지 부분이 안테나의 개구면보다 큰 이유로 안테나간 상호 반사 특성이 반영된 것으로 판단된다. 이에 향후, 안테나 플랜지 부분을 평편형 흡수체로 처리하여 안테나 상호 간의 반사효과를 정밀 측정 분석해 볼 계획이다. 또한, 외삽법 이득 산출법 등 관련 측정기술을 적용하여 안테나 간 상호 반사효과를 최대한 배제할 수 있는 측정방법을 도출할 예정이다.

[표 4.2.20] 측정결과 상호비교(WR-3.4 대역)

주파수 (GHz)	C-SAM Gain (dBi)	3-안테나법 Gain (dBi)	2안테나법 Gain (dBi)	치환법 Gain (dBi)	최대 편차 (dB)
	C	C	C	C	최대값-최소값
220	21.92	21.90	21.94	21.98	0.08
230	22.16	22.18	22.18	22.17	0.03
240	22.47	22.39	22.39	22.39	0.09
250	22.46	22.54	22.55	22.57	0.11
260	22.24	22.57	22.55	22.52	0.33
270	22.77	22.77	22.77	22.77	0.01
280	22.37	22.80	22.80	22.80	0.44
290	22.95	22.95	22.92	22.90	0.05
300	22.93	22.91	22.89	22.87	0.07
310	22.99	22.90	22.94	22.97	0.09
320	23.14	23.00	22.99	22.99	0.15



(a) 안테나 이득



(b) 최대 편차

[그림 4.2.22] 안테나 이득 상호비교 결과(90 GHz ~ 110 GHz대역)

The background is a white space filled with various line-art icons representing technology and communication. These include multiple laptops, smartphones, keyboards, mice, USB drives, speech bubbles, Wi-Fi symbols, cloud icons, and server racks. The icons are scattered across the page, creating a dense, tech-oriented atmosphere.

제5장

대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안



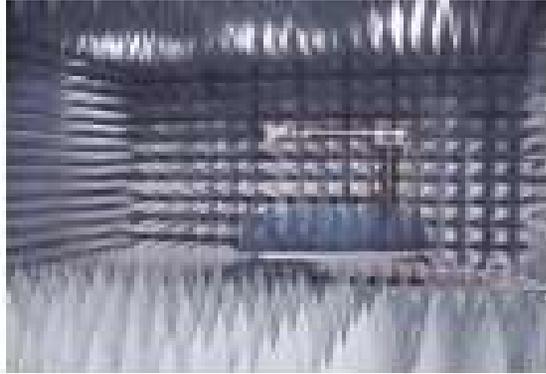
제5장 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안

제 1절 서론

전자파 강도 측정의 목적은 전파법 제47조의2제3항에 따라 일정기준에 해당하는 무선국이 전자파인체보호 기준을 준수하도록하여 전자파에 대한 국민의 불안감 해소 및 안전한 전파이용환경 조성에 기여함을 목적으로 하고 있다. 전자파 강도 측정대상은 전파법 시행령 제65조에 의하여 「안테나 공급 전력 기준과 설치장소 기준」에 따른 모든 무선국을 의미한다. 여기서, 방송국 및 방송보조국의 경우 송신장치의 경우 안테나 공급전력의 합이 60와트(W)를 초과하지 않아야 한다고 명시되어 있다. 하지만 국내 시험소에서 방송용 안테나를 측정할 수 있는 시설이 마땅히 마련되어 있지 않아 해외에서 안테나 성능검증을 받는 등 관련업계 종사자들이 어려움이 있는 것으로 파악되었다. 이에, 국내 현실을 감안하여 방송출력 등 국내의 규제에 대한 올바른 제도개선이 이루어지기 위해서는 측정시설 구축 및 관련 측정방법을 마련하고자 방송 등 대형 안테나 국내의 연간 측정 수요조사 및 관련 측정방법과 추가적으로 구축해야 할 시설에 대해 조사한 내용을 기술하고자 한다.

제 2절 안테나 이득 표준 측정법

안테나 이득에 대한 측정은 [그림 5.1.1]과 [그림 5.2.2]에서 보여주는 것과 같이 전자파 무반사실 측정시설과 야외시험장에서 이루어질 수 있다. 대부분의 측정 시험소에서는 표준 안테나를 이용하는 이득비교법과 표준 시험장을 이용하는 3-안테나법을 이용하여 안테나 이득 또는 인자를 산출한다. 대형 안테나의 경우 정확한 측정법에 대한 표준은 제시된 바는 없으나, IEEE, CISPR16-1-6, Ansi63.5 등에서 제공하는 측정법에 따라 측정을 실시하고 있는 것이 실정이다. 대형 안테나의 경우 대부분 크기와 무게가 상당하기 때문에 측정 높이, 안테나 간 거리, 안테나 편파, 지향 등 정확하게 정렬하기가 쉽지 않아 상당한 측정불확도가 발생할 수 있는 문제가 내포되어 있다. 이에, 국가의 전파관리 규제 기준을 명확하게 평가하기 위해서는 크기가 큰 대형 안테나의 경우라도 반드시 정확하게 측정할 수 있는 측정시설과 대표적인 측정방법을 국가가 마련하는 것이 바람직할 것이다.



[그림 5.2.1] 전자파 무반사실



[그림 5.2.2] 대형 안테나 측정용 야외시험장

대형 안테나의 경우 시스템이 크고 복잡하여 규격에서 제시하는 안테나 측정을 위해서는 대부분 치환법으로 측정하는 것이 바람직 할 수 있다. 왜냐하면 대형 안테나의 경우 현실적으로 3번의 측정구성을 통한 3-안테나 법으로 측정하기에는 상당한 어려움이 발생할 수 있기 때문이다. 관련 안테나 이득비교(치환법)은 제 2장에서 소개한 식(3.3.5)를 이용하면 간편하게 안테나 이득 산출이 가능하다.

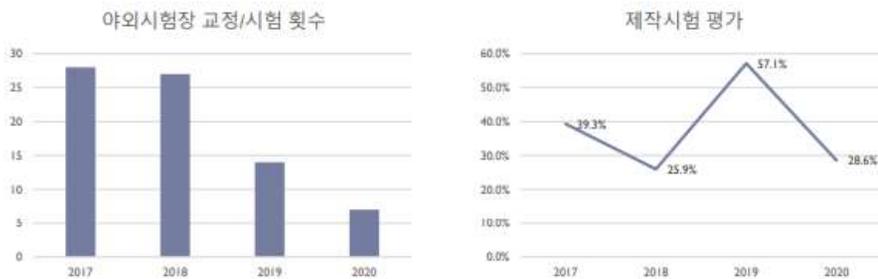


제 3절 대형 안테나 국내 측정 수요조사

방송·위성용 대형 안테나 측정은 사실 전자파 무반사실에서 측정이 가능하지만, 대형 안테나 무반사 챔버 시설이 필요하고 특히, 중량이 상당히 무겁고 크기가 큰 대형 안테나를 실내 챔버에서 제어하기가 쉽지 않기 때문에 현실적으로는 야외 안테나 시험시설에서 측정이 이루어지는 실정이다. 이에 본 절에서는 야외시험장에서 방송·위성용 대형 안테나 측정서비스 제공을 위한 시험시설 구축의 필요성 및 타당성 조사를 위해, 국내 중소기업에서 개발하는 방송용 및 국방부 등에 납품하는 군용 대형 안테나 측정 산업체 기술지원이 이루어진 최근 몇 년간의 측정 수요조사 결과를 기술하였다.

1. 야외시험장 시험 현황

최근 4년('17~'21) 시험/교정 현황 분석



제작시험은 연평균 8~10건(KRISS제공)

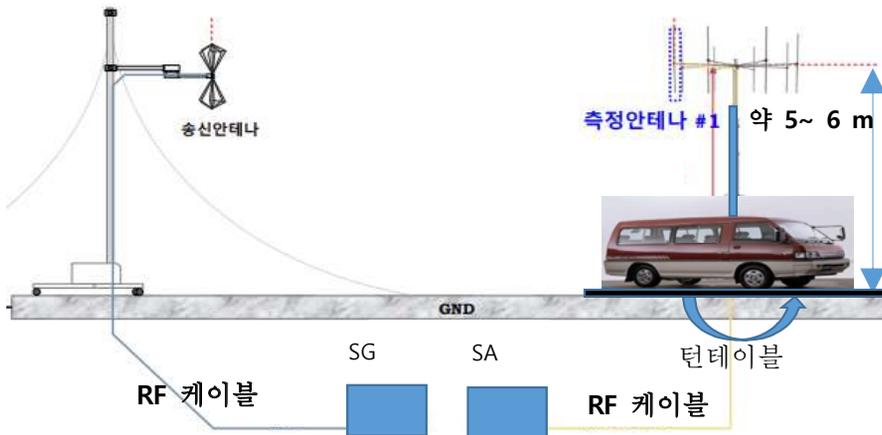
[그림 5.3.1] 야외시험장에서의 대형 안테나 측정

[그림 5.3.1]은 야외시험장에서의 안테나의 교정 및 제작(개발) 안테나 시험 건수를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 국내 산학연에서 개발하여 제작 시험 의뢰한 건수는 연평균 8 ~ 10건(KRISS 제공)으로 파악되었다. 그 외 안테나 야외시험장에서 시험 의뢰하는 대부분 안테나는 전자파 적합성평가 시험에

사용하는 바이코니컬, 바이로그, LP 안테나로 이는 국내 안테나 교정 시험소(KTL, HCT 등)에서 서비스가 이루어지고 있다. 다만 KC인증 시험기관 일부 기관은 안테나 성능검사를 위해 전파시험인증센터 야외시험장에서 서비스를 제공받고 있는 실정이다.

2. 야외시험장 안테나 방사패턴 측정시설

다음 [그림 5.3.2]는 중앙전파관리소에서 불법전파 감시를 위해 운용되고 있는 안테나의 이득, 인자, 360도 방사패턴을 측정하기 위해 구축한 야외 시험시설이다. 해당 시설은 충남 당진 전파관리소에서 운용하고 있으며, 국내 모든 전파관리소에서 운용중인 전파감시 차량의 성능검증을 위해 연평균 30건 이상 수행하고 있는 것으로 파악되었다. 해당 시설을 이용하면 국내 산학연에서 개발중인 대형 안테나, 특히, 군용 안테나 제품의 성능평가를 위한 최적의 시스템으로 판단된다. 따라서, 전파연구원 전파시험인증센터에서 다년간 축적된 표준 안테나의 인자, 이득 등을 활용한 공동 연구(두 기관간 성능평가 상호비교)를 통해 국내에서 운용하거나 운용 예정인 대형 안테나 측정 결과의 신뢰도 제고에 힘쓸 예정이다.



[그림 5.3.2] 당진 전파관리소 야외 시험장에서의 대형 안테나 측정



제6장

맺음말



제6장 맺음말

본 보고서에서 국립전파연구원에서 구축한 밀리미터파대역 안테나 성능 검사 측정시스템 및 관련 부대물품에 대해 소개하였다. 밀리미터파대역 안테나 이득 측정·분석을 위해 안테나 측정이론과 세계적으로 사용되는 있는 안테나 교정이론에 대해서 자세하게 소개하고 약 60 GHz ~ 325 GHz (도파관대역 별 5개 대역)에서 동작하는 혼 안테나를 각각의 측정법으로 측정하고 그 결과를 상호 비교분석 하였다. 또한 국내 산학연에서 개발하고 있는 400 MHz이하 대역 대형 안테나 측정서비스 제공을 위한 대형 안테나 측정시설을 구축에 대한 타당성 검토 내용을 기술하였다.

먼저 원거리장(far-field) 조건에서 3-안테나법을 사용하여 WR-12(60 GHz ~ 90 GHz) 부터 WR-10(75 GHz ~ 110 GHz), WR-8(110 GHz ~ 170 GHz), WR-4.3(170 GHz ~ 260 GHz), WR-3.4(220 GHz ~ 325GHz)까지 5개 대역에 대한 혼 안테나의 이득을 측정·분석하였다. 또한, 동등한(물리적 크기와 모양이 비슷하여 특성이 동일한) 안테나 개념을 적용하여 단 한 번의 측정으로 표준 안테나 이득을 결정할 수 있는 절대이득 측정법으로 각각의 안테나의 특성을 측정·분석하였다. 이 방법은 통상 0.2 dB이내의 측정불확도를 포함하면 쉽게 동등 표준 안테나를 정의내릴 수 있다.

마지막으로, 표준 안테나 이득 비교법(치환법, SAM)과 연구원에서 개발 하여 현재 CISPR16-1-6 '안테나 교정방법' 국제표준문서 개정을 위해 DC문서 단계에서 대응하고 있는 가장 간편한 표준안테나법(C_{compact}-SAM) 으로 안테나 이득을 측정·분석하고 앞서 산출된 각각의 방법으로 산출된 안테나 이득 특성을 상호비교·분석하였다. 측정(분석)된 네가지 교정방법으로 산출된 결과는 일부 몇몇 주파수(WR-4.3대역 일부와 WR-3.4대역 일부)를 제외한 대부분 0.2 dB 이내의 측정편차를 보임으로써 결과가 잘 일치함을 보임을 검증하였다.

여기서 일부 벗어난 편차(최대 0.44)는 WR-4.3과 WR-3.4에서 나타났다. 이는 혼 안테나를 연결하는 플랜지가 혼 안테나의 개구면보다 큰 영향으로

플랜지에 의해 반사된 안테나 간 상호간섭 효과로 보여진다. 이러한 결과를 정밀 분석하기 위해서 안테나에 평편형 흡수체를 부착하여 반사특성을 정밀측정 분석하거나, 외삽법 등 다른방법을 적용하여 안테나간 상호반사 효과를 제거할 수 있는 방안을 마련할 계획이다.

다만, 대부분의 주파수대역에서 4가지 교정방법으로 도출된 안테나 이득 특성이 모두 일치함을 검증함으로써, 밀리미터파 대역까지 연구원에서 개발한 C-SAM 측정법이 유효하다는 것을 검증·확인하였다. 따라서 향후 관련 교정방법에 대한 표준을 밀리미터파 대역까지 확대하여 추진할 계획이다.

마지막 장에서는 국내 산학연에서 개발하는 400 MHz이하 대역의 대형 안테나 측정 서비스 제공을 위한 시설구축 타당성 검토를 위해 연간 측정수요 등 조사한 결과를 소개하고, 대형 안테나 측정에 필요한 부대시설 및 관련 측정방법을 소개하였다. 관련 시설 고도화를 통해 방송출력 등 국내의 규제에 대한 올바른 제도개선과 ICT중소/벤처기업의 측정 애로사항이 해소 되길 기대한다.

[참고 문헌]

- [1] J Park, G Mun, D Yu, B Lee, W Kim "Proposal of Simple Reference Antenna Method for EMI Antenna Calibration," *IEEE EMC Symp.*, Aug. 2012, pp. 90–95
- [2] Alexander M.J, Salter M.J, "Low measurement uncertainties in the frequency range 30 MHz to 1 GHz using a calculable dipole antenna and national reference ground plane," *IEE Proc.-Sci Meas. Sci Tech.*, Jul. 1996, 143, no. 4, pp. 221–228
- [3] Salter M.J, Alexander M.J, "EMC antenna calibration and the design of an open field site," *J. Phys. E. Meas. Sci Tech.*, 1991, 2, pp. 510–519
- [4] Smith, A.A., "Standard site method for determining antenna factors," *IEEE Trans. on* 1982, EMC-24, pp. 311–322
- [5] Martin Alexander, Martin Salter, Benjamin Loader, and David Knight, "Broadband calculable dipole Reference antennas," *IEEE Trans. on EMC*, vol. 44, no. 1, Feb. 2002, pp. 45–58
- [6] Jungkuy Park, Dongchan Jeong, Hun Youn, Myoungwon Seo, Daehoon Yu, Jaeman Ryoo. "3-Antenna Height Scanning Average method of EMI Antenna Calibration," *2009 IEEE EMC Symp.*, Aug. 2009.
- [7] Alexander M.J, Loader B.G, Salter M.J, "Reduced measurement uncertainty in the frequency range 500 MHz to 1 GHz using a calculable standard dipole," NPL management Ltd-Internal
- [8] CISPR/A/990/CD "CISPR 16-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus- EMC-antenna calibration," 2012.
- [9] David Cheadle "Introduction to Calculable Antenna Processor (CAP2010)," Jun, 2012.
- [10] "ISO/IEC 기술작업지침서 제1부 통합 ISO 증보판-기술작업을 위한 절차", 국가기술표준원 KSA한국표준협회, 2016. 4. 30.
- [11] Stanley L. Baker, "Calculable Antenna Processor User Manual," *NPL*, Mar. 2011 pp, 1–18.

- [12] H. T. Friis, "A note a simple transmission formula," *Proc IRE.*, May 1946, pp. 254~256
- [13] D. G. Camel, E. B. Larsen and W. J. Anson, "NBS calibration procedure for horizontal dipole antenna(25 to 1000 MHz)," National Bureau of Standards Electromagnetic Fields Division
- [14] Brian Kidney, "Horn Antennas," *Engineering* 9816-Antennas, Nov. 26, 2001.
- [15] IEC CISPR/A/644/CD Project number CISPR 16-1-5 Amd.1 Ed1., "Antenna Calibration"
- [16] 박정규, 정동찬, 차기남, 고흥남, "30 MHz에서 1 GHz 대역 EMI용 안테나의 준자유공간 안테나팩터 산출에 관한 연구," 2004년도 한국전자파학회 종합학술발표회, vol. 14, no.1, 2004. 11. 5.
- [17] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design," John Wiley & Sons, 1982
- [18] Microwave Antenna Theory and Design by Silver, vol. 12, Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill, 1949, pp. 582–585
- [19] Antenna by Kraus, McGraw-Hill, 1950, pp. 455–457
- [20] Standard Site Method For Determining Antenna Factors, *IEEE EMC Trans. on* vol. EMC-24, No. 3, Aug. 1983, pp. 316–322
- [21] ANSI C63.5 American National Standard for Electromagnetic Compatibility -- Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference(EMI) Control -- Calibration of Antennas
- [22] IEEE Std 149 IEEE Standard Test Procedures For Antennas
- [23] NBS Circular 517, Calibration of Commercial Radio Field-Strength Meters
- [24] Albert A Smith, "Standard Site Method for Determining Antenna Factors," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 3, pp. 316–322 Aug. 1982.
- [25] D. G. Gamel et. al, "NBS Calibration Procedures for Horizontal Dipole Antenna(25 to 1000MHz)," National Bureau of Standards Technical Note 1309, Apr. 1997.
- [26] Martin Alexander, Martin Salter, Benjamin Loader, and David knight.,

- "Broadband Calculable Dipole Reference Antennas," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, pp. 45–58, 2002.
- [27] Albert A Smith, Robert F. German, and James B Pate, "Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 3, pp. 315, Aug. 1982.
- [28] ANSI C63.5 , "American National Standard for Electromagnetic Compatibility-Radiated Emission Measurement in Electromagnetic interference(EMI) Control-Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)", pp. 10, Apr. 2006.
- [29] NPL, A National Measurement Good Practice Guide no. 73 "Calibration and use of antennas, focusing on EMC application,"
- [30] CISPR/A/990/CD "CISPR 16-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods- Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-EMC antenna calibration"
- [31] 박정규 외, "교정용 혼 안테나 제작 및 교정방법 연구," 2010년도 전파연구 보고서
- [32] 박정규 외, "시간영역에서 안테나 교정방법 연구," 2011년도 전파연구보고서
- [33] 박정규 김우년, "시간영역에서 안테나 이득 측정 연구," 한국전자과학회 논문지 2012, Nov 23(11) pp. 1217~1227
- [34] 박정규 외, "자체개발 안테나 교정방법 유효성 확인 연구," 2012년도 전파연구보고서
- [35] 조인귀 외, "무선기 ERP/EIRP 기술 및 측정기술 동향", 전자통신분석 , no. 23, vol. 3, 2008.6.
- [36] Sakasai M., et.al., "Evaluation of Uncertainty in Free-space Antenna Factor Calibration in CRL," *Proc. of EMC symp.*, in Sendai, pp. 657-660, Jun. 2004.
- [37] 강진섭, "테라헤르츠파 대역 정반사율 및 안테나특성 측정 기술개발", 2017. 11.

(서브)밀리미터파대역 안테나 측정 및 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안 연구



국립전파연구원
National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

발행일 : 2020. 12.

발행인 : 김정렬

발행처 : 과학기술정보통신부 국립전파연구원

전화 : 062) 338-4414

인쇄 : (사)중증장애인복지협회 도동

Tel. 062) 363-4454

ISBN : 979-11-5820-179-1 < 비매품 >

- 주 의 -

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.



국립전파연구원

National Radio Research Agency

58323 전남 나주시 빛가람로 767(빛가람동)
<http://www.rra.go.kr>



9 791158 201791

ISBN 979-11-5820-179-1

비매품

93560

