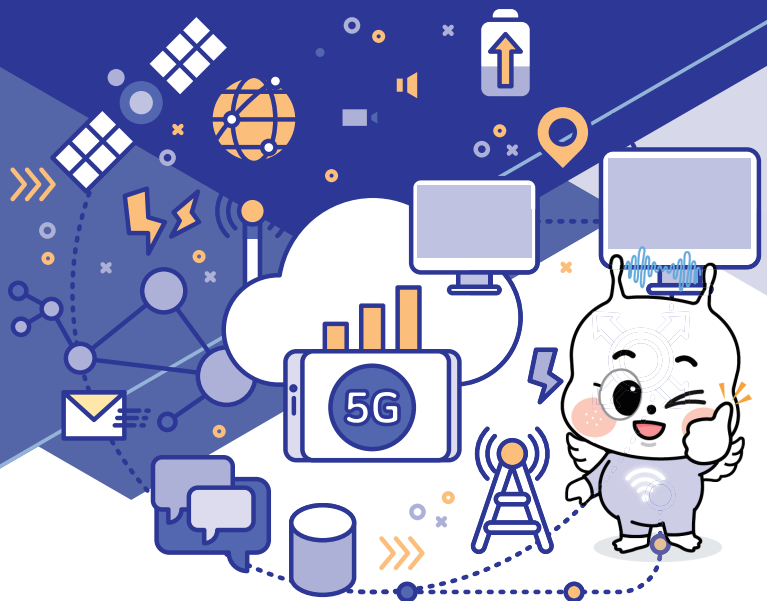


# 밀리미터파 대역 (100 GHz이하) 근거리장 전송특성 및 안테나 비교측정 연구



국립전파연구원  
National Radio Research Agency



## 제 출 문

본 보고서를 「밀리미터파대역(100GHz이하) 근거리장 전송특성 및 안테나 비교측정 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2023. 12. 31.

연구책임자 : 박 정 규(국립전파연구원 전파시험인증센터 적합성인증과)  
연 구 원 : 임 종 혁(국립전파연구원 전파시험인증센터 적합성인증과)  
이 정 안(국립전파연구원 전파시험인증센터 적합성인증과)  
최 술(국립전파연구원 전파시험인증센터 적합성인증과)

## 요 약 문

밀리미터파란 30~300GHz 주파수 대역의 전파이며, 이에 따른 파장이 1mm~10mm 이기 때문에 밀리미터파라고 불린다. 밀리미터파는 고주파수로 파장이 매우 짧아, 직진성이 강하고, 송수신 거리가 짧으며 빔폭이 좁은 특성을 가지고 있다. 그리고 전파특성에 따라 안테나의 크기를 소형화 할 수 있다. 넓은 대역폭을 필요로 하는 대용량 고속 데이터 전송용으로 사용이 가능하다. 이러한 특성에 따라서 방송·통신 중계망(36~40GHz), 차량 충돌 방지용 레이더(76~77GHz) 등에 사용하기 위해 연구가 진행되었으나, 특히 최근에는 5G 이동통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해서 밀리미터파 기술을 도입하고 더 나아가 6G에서 활용방안을 연구하고 있다. 국립전파연구원은 전파시험인증센터에 밀리미터파 측정시스템을 갖추고 국내 밀리미터파 통신 및 안테나측정 관련을 지원하여 산업 발전에 기여 하고 있으며, 더불어 다양한 형태의 안테나와 빔 방향을 측정할 수 있는 원거리장 측정시스템 구축에 한계를 돌파하고자 근거리장 전파 전달 특성 데이터 확보 및 이득 산출 기술을 마련하였다.

국립전파연구원에서는 전파인증용 안테나 성능의 동일성 검증을 위한 국내 안테나 교정기관을 대상으로 안테나 비교속련도 프로그램을 운영하여 기관 간 시험결과의 차이를 줄이고 시험능력의 상향 평준화를 도모하고 있다. 2020년 처음 비교시험을 제안한 이후로 매년 전파시험인증센터와 교정기관 간 1~2종의 안테나를 속련도 시료로 사용하여 동일성을 검증해왔다. 2021년부터 2023년까지 표준안테를 대상으로 비교속련도 프로그램 진행 결과를 기술하였다.



# 목 차

제1장 서론 .....	11
제2장 밀리미터파 근거리장 측정 및 불확도 분석 .....	15
제1절 추진배경 .....	15
제2절 역제곱 공식과 근거리 측정결과 .....	15
제3절 측정결과의 불확도 분석 .....	21
제4절 결론 .....	28
제3장 국내·외 안테나 비교 측정 연구 .....	31
제1절 국내 교정기관 간 안테나 비교 시험31 .....	31
제2절 결론 및 향후계76 .....	76
제4장 맺음말 .....	79
[참고] 안테나 및 교정 기본이론 .....	80
참고문헌 .....	91

# 표 목 차

[표 1] 실험시 사용한 혼안테나 주파수별 이격거리 .....	17
[표 2] 주파수별 보정값 .....	17
[표 3] 안테나 상하 1mm 가변 측정값 차 .....	22
[표 4] 안테나 좌우 1mm 가변 측정값 차 .....	23
[표 5] 송수신 안테나 좌우 각도 1도 가변 측정값 차 .....	23
[표 6] 시험장 벽으로부터 반사파 측정 데이터 .....	25
[표 7] 데이터 피팅에 의한 불확도 추정값 .....	26
[표 8] 반복 측정 데이터 및 A형 불확도 .....	26
[표 9] 불확도 총괄표 .....	27
[표 10] 수행연도별 시험 대상 안테나 .....	31
[표 11] 바이로그 안테나 기관별 안테나 인자 측정값 .....	33
[표 12] 혼 안테나 기관별 안테나 인자 측정값 .....	34
[표 13] 바이코니컬 기관별 안테나 인자 측정값 .....	35
[표 14] 루프 안테나 기관별 안테나 인자 측정값 .....	37
[표 15] LPDA 기관별 안테나 인자 측정값 .....	38
[표 16] 다이폴(VHAP) 안테나 기관별 안테나 인자 측정값 .....	42
[표 17] 다이폴(UHAP) 안테나 기관별 안테나 인자 측정값 .....	46
[표 18] 각 기관의 측정불확도 .....	55
[표 19] 바이로그 안테나 비교시험 수행도 .....	55
[표 20] 혼 안테나 비교시험 수행도 .....	56
[표 21] 바이코니컬 안테나 비교시험 수행도 .....	57
[표 22] 루프 안테나 비교시험 수행도 .....	59
[표 23] LPDA 비교시험 수행도 .....	60
[표 24] 다이폴 안테나(VHAP) 비교시험 수행도 .....	64
[표 25] 다이폴 안테나(UHAP) 비교시험 수행도 .....	68

# 그림 목 차

[그림 1] 각 주파수별 보정항( $A_1$ , $A_2$ ) 그래프 .....	18
[그림 2] 보정항을 추가한 이론과 실험값 피팅 그래프(20-100GHz) .....	19
[그림 3] 거리에 따른 안테나 이득 (20-90GHz) .....	20
[그림 4] 안테나 상하의 위치오차 수정 .....	22
[그림 5] 안테나 좌우 위치 오차 수정 .....	22
[그림 6] 송수신 안테나 좌우 각 정렬 오차 측정 .....	23
[그림 7] 안테나 방사 위치 오차 추정 .....	24
[그림 8] 시험장 환경 영향 반사파 오차 추정 .....	24
[그림 9] 리액티드, 프레넬 및 원거리 영역에서 최소자승법 직선 추정 .....	26
[그림 10] 바이로그 안테나와 혼안테나(21년 대상 안테나) .....	32
[그림 11] 바이코니컬 안테나와 루프 안테나(22년 대상 안테나) .....	32
[그림 12] LP 안테나와 다이폴 안테나(23년 대상 안테나) .....	33
[그림 13] 바이로드 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	34
[그림 14] 혼 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	35
[그림 15] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	37
[그림 16] 루프 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	38
[그림 17] LPDA 인자 비교 측정 결과 .....	42
[그림 18] 다이폴(VHAP) 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	46
[그림 19] 다이폴(UHAP) 안테나 인자 비교 측정 결과 .....	54
[그림 20] 바이로그 안테나 수행도 비교 .....	56
[그림 21] 혼 안테나 수행도 비교 .....	57
[그림 22] 바이코니컬 안테나 수행도 비교 .....	59
[그림 23] 루프 안테나 수행도 비교 .....	60
[그림 24] LPDA 수행도 비교 .....	64
[그림 25] 다이폴 안테나(VHAP) 수행도 비교 .....	68
[그림 26] 다이폴 안테나(UHAP) 수행도 비교 .....	76



국립전파연구원  
National Radio Research Agency



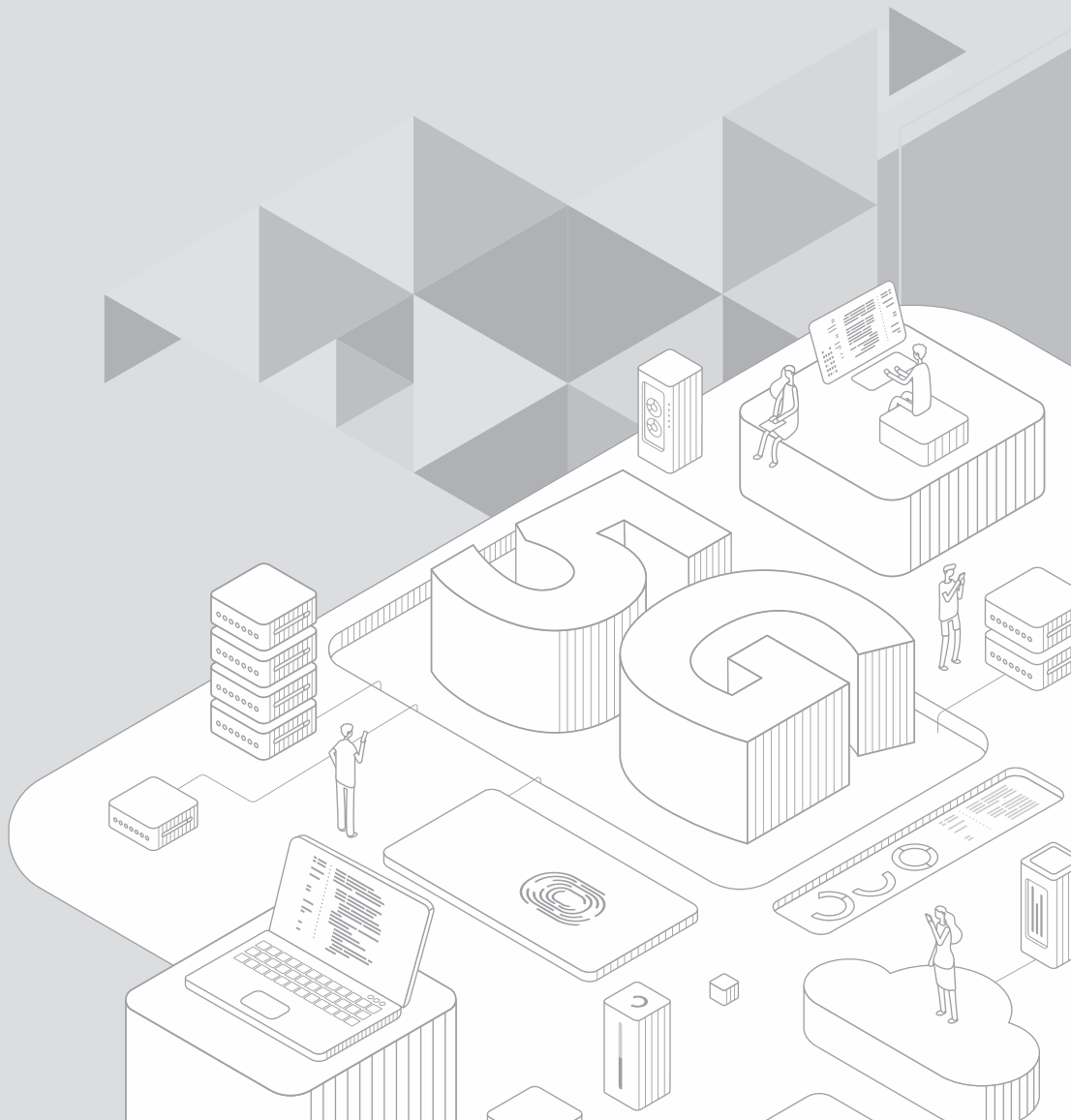


국립전파연구원  
National Radio Research Agency

제1장

서론

National Radio Research Agency





## 제1장 서론

정보통신기술이 발전할수록 주파수 사용 대역이 높아지고, 전파의 근거리장이용이 증대할 것으로 예상된다. 전파의 정량적인 측정에 있어서 근거리 측정 결과를 직접 이용하지 못하고 원거리로 변환하는 기술을 이용하고 있다. 전파의 전송에 있어서 Friis 방정식은 원거리에 성립한다. 전파의 측정과 이용은 안테나가 필연적인 도구인데 이 방정식에는 안테나 이득의 항이 반드시 포함되어 자유공간 전파손실을 정의한다. 그리고 Friis 방정식에 포함된 안테나 이득은 원거리에서 정의된 값이고 해당 안테나 고유의 성질로 여겨져 거리에 따라 변화하지 않는다는 가정이 깔려있다.

본 보고서에서는 밀리미터파 대역 중 20GHz 및 30GHz에서 리액티브 영역, 프레넬 영역 및 원거리 영역에서 전파의 손실을 측정하고 그 결과를 도시하여 거리에 따른 역제곱 법칙이 성립하는 원거리의 자유공간 전파전달 공식에 추가 항을 삽입하여 근거리 및 원거리에서도 만족하는 새로운 공식을 경험적으로 찾아내어 제안하였다. 또한 그러한 측정과 작업을 계속 진행하여 20GHz ~ 90GHz에서 측정한 결과가 새로 도출된 공식에 잘 맞으며 거리에 의존하는 안테나 이득을 도출하였다.

그 결과에 따르면 전파전달의 성질이 원거리 및 근거리에 따라 다른 것인지 아니면 안테나의 고유 성질로서 안테나 이득이 거리에 의존하는 함수 여부는 심사 숙고해야 할 과제라고 생각한다.

5G, 6G 등 통신기술의 발전이 본격화됨에 따라 다양한 방송통신기자재들의 개발이 가속화되고 있다. 이러한 상황에서 정부는 여러 통신기자재들이 서로 전기적인 영향을 주고받아 오동작 등의 문제가 발생하지 않도록 적합성평가 제도를 통해 기술기준에 적합한 제품이 생산·유통되도록 관리하고 있다. 뿐만 아니라 적합성평가 시험을 수행하는 지정시험기관이 지정요건에 맞게 시험업무를 수행하고 있는지 정기·수시적으로 검사하고 있다.

이에 따라 지정시험기관에서 방송통신기자재의 적합성평가에 사용하는 시험용 안테나는 전파법령에 따라 주기적으로 “성능에 관한 검사”를 받아야 한다. “성능에 관한 검사”란 적합성평가지험에 필요한 시험설비가 전자파장해



방지기준, 전자파보호기준 시험 규격 요건에 부합한 지 여부와 규정된 조건 하에서 기준이 되는 시험설비의 값과 피 시험설비의 측정값을 비교하여 정밀도의 변이를 확인하는 것을 말한다. 기존에는 국립전파연구원 전파시험인증센터에서 수행한 성능검사 결과만을 인정하였으나, 중복시험 해소를 위한 규제 완화로 2019년 고시가 개정됨에 따라 상호인정협정(ILAC MRA)에 포함된 인정기구(KOLAS)에서 인정한 안테나 교정기관에서 발행한 교정성적서를 제출하는 경우에는 성능검사를 받은 것으로 인정하고 있다.

국립전파연구원에서는 국내 교정기관에서 올바르게 전파인증용 안테나의 성능검사를 수행하는지 확인하기 위해 전파시험인증센터와 교정기관 간 안테나 비교 측정을 제안하였고, 매년 다른 표준안테나를 대상으로 비교 연구를 진행하였다.





국립전파연구원  
National Radio Research Agency

## 제2장

# 밀리미터파 근거리장 측정 및 불확도 분석

National Radio Research Agency





## 제2장 밀리미터파 근거리장 측정 및 불확도 분석

### 제1절 추진배경

본 절에서는 밀리미터파 대역에서의 리액티브 영역, 프레넬 영역 및 원거리 영역에서 전파의 전송 손실을 측정하고 그 결과를 피팅하여 거리에 따른 역제곱 법칙이 성립하는 원거리의 자유공간 전파 전달 공식에 추가 항을 삽입하여 근거리 및 원거리에서도 만족하는 새로운 공식을 경험적으로 찾아내어 제안하였다. 또한 그러한 측정과 작업을 계속 진행하여 20GHz ~ 90GHz에서 측정한 결과가 새로 도입한 공식과 잘 피팅이 되며 거리에 의존하는 안테나 이득을 도출하였다.

그 결과에 따르면 전파전달의 성질이 원거리 및 근거리 따라 다른 것인지 아니면 안테나의 고유 성질로서 안테나 이득이 거리에 의존하는 함수 여부는 심사숙고 해야 할 과제라 생각한다.

### 제2절 역제곱 공식과 근거리 측정 결과

전자기파가 원거리 장에서 자유공간으로 전달될 때 Friis 공식에 따라 송신원으로부터 거리의 역제곱에 비례한다는 사실은 잘 알려져 있다.

$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_R G_T \quad (1)$$

여기서  $P_R$ 과  $P_T$ 는 안테나의 수신전력 및 송신전력이고  $\lambda$ 는 주파수,  $r$ 은 송신 안테나와 수신안테나 사이의 거리고  $G_R$ 과  $G_T$ 는 각각 수신 및 송신안테나의 이득이다.  $\left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2$ 은 자유공간 감쇠량으로서 거리의 역제곱에 비례하는 항이다.

전자기장의 거리  $r$  및 안테나의 크기  $D$ 에 따른 영역의 정의는 다음과 같다.

- 1) 원거리장 영역 :  $\frac{2D^2}{\lambda} < r$
- 2) 근거리장

- 프레넬 영역 :  $0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} < r < \frac{2D^2}{\lambda}$
- 리액티브 영역 :  $r < 0.62\sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$

안테나의 대각선의 길이가  $D=0.071m$ 인 두 개의 동일한 혼안테나를 사용하여 20GHz에서 안테나 사이의 거리를 1mm부터 1m까지 1mm 간격으로 측정을 하였다. 이 경우 장영역의 정의에 따르면 원거리  $672mm < r$  이고, 프레넬 영역은  $95mm < r < 672mm$ 이며 리액티브 영역은  $r < 95mm$ 에 해당된다. 역제곱법칙을 만족하는 자유공간 감쇠량 이론값은 중간부터 측정값으로부터 벗어나고 있는데 리액티브 영역으로 접근하면서 점점 그 차이가 벌어지고 있다.

이러한 차이를 분석하기 위해 Friis 방정식을 살펴보면, 좌측 항  $\frac{P_R}{P_T}$ 는 감쇠량 측정값이므로 실측값과 이론값의 차이는 안테나 이득  $G_R$ 과  $G_T$ 에서 유래한다고 볼 수 있다. 이론 계산에서 안테나 이득은 20GHz의 원거리 장에서 일정한 값인  $G_R = G_T = 19.15dB$ 으로 적용했다. 차이를 보정하기 위해서 안테나 이득  $G_R$ 과  $G_T$ 는 일정한 상수가 아니라 거리  $r$ 에 의존하는  $G(r)$ 인 것으로 가정한다.  $G(r)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$G(r) = G^0 \left( 1 + \frac{a_1}{r} + \frac{a_2}{r^2} + \dots + \frac{a_n}{r^n} \right) \quad (2)$$

그러면 Friis 방정식 (식 (1))은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_R(r) G_T(r) = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right) G_R^0 G_T^0 \quad (3)$$

여기서  $G_R^0$  및  $G_T^0$ 는 일정한 상수로서 원거리장에서 안테나 이득이며  $\left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right)$ 은 새롭게 제안하는 자유공간 감쇠량이다.  $A_k$ 는 실험값과 이론값을 일치시키는 계수이며 경험적으로 얻는다. 식 (1)좌변의 추가되는 항  $\left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} + \dots + \frac{A_k}{r^k} \right)$ 에서  $r$ 의 역수에 2차까지만 취하면 근사적으로 다음식을 얻는다.

$$\frac{P_R}{P_T} \sim \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2} \right) G_R^0 G_T^0 \quad (4)$$

20GHz 주파수에 대해서 각각의 계수  $A_1 = -0.083$ ,  $A_2 = 0.00185$ 를 얻었고, 그에 따른 피팅 결과는 [그림 3]에서 볼 수 있다. 이 안테나들의 대각선 길이가 0.071m 그에 따라 리액티브 영역  $r < -0.95m$ , 프레넬 영역  $0.95 < r < 0.672m$  이다. 식 (4)에 의하여 계산한 이론값과 측정값이 리액티브 영역 중간 약 0.04m 까지 잘 일치함을 볼 수 있다. 30GHz ~ 90 GHz까지 각각 주파수에 대한 계수  $A_1$  과  $A_2$ 를 경험적으로 산출하고 보정값과 측정값이 유사한 결과를 얻었다. [표 1]은 각 측정된 주파수 대역에서의 원역장 및 프레넬 거리를 보여준다.

[그림 1]은 주파수별 보정값을 경험적인 방법으로 산출한 결과이며, [그림 2]는 주파수별로 보정항을 추가한 이론과 실험값 피팅 결과이다.

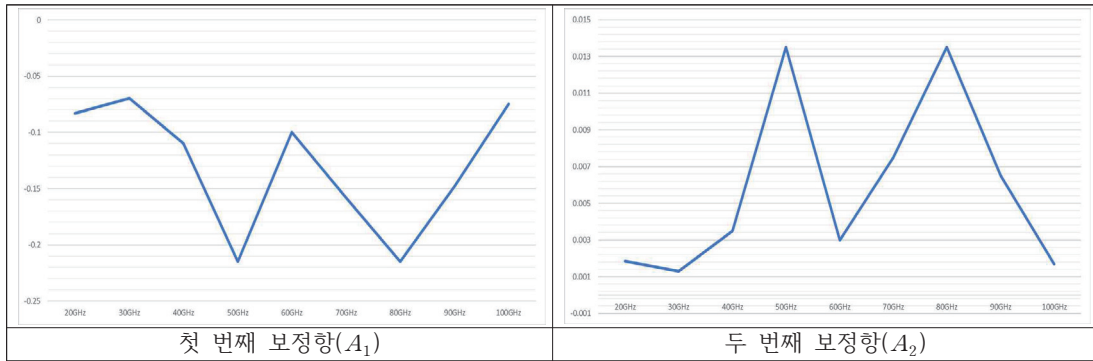
[표 1] 실험 시 사용한 혼안테나의 주파수별 근역장/원역장 이격거리

주파수 (GHz)	Reactive (mm)	Fresnel (mm)	Far-Field (mm)	비고
20	0 ~ 96	96 ~ 672	672~	
30	0 ~ 82	82 ~ 627	627~	
40	0 ~ 95	95 ~ 836	836~	
50	0 ~ 133	133 ~ 1408	1408~	
60	0 ~ 70	70 ~ 640	640~	
70	0 ~ 76	76 ~ 746	746~	
80	0 ~ 81	81 ~ 853	853~	
90	0 ~ 86	86 ~ 960	960~	
100	0 ~ 90	90 ~ 1066	1066~	

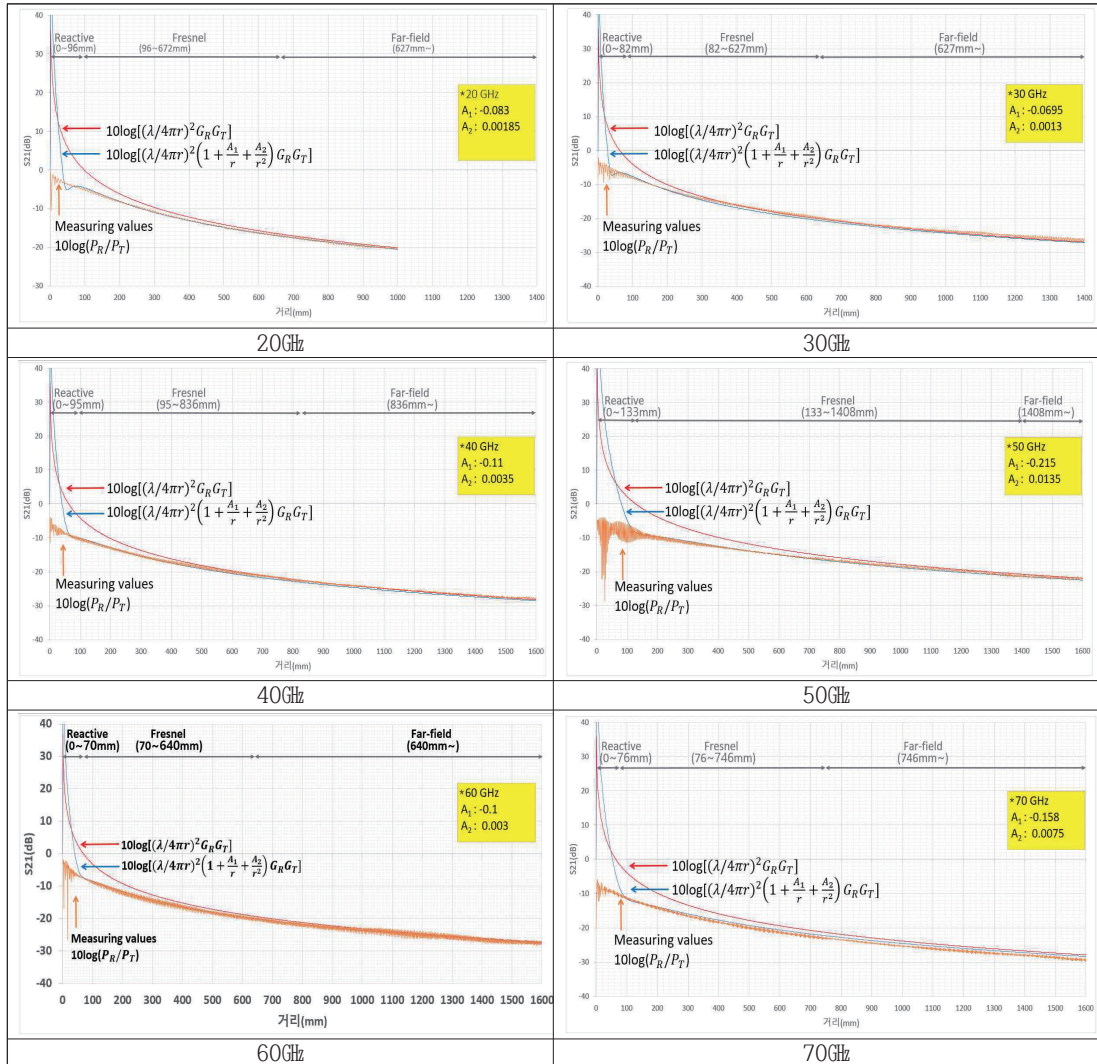
※ 센터 보유 표준 혼안테나 사용

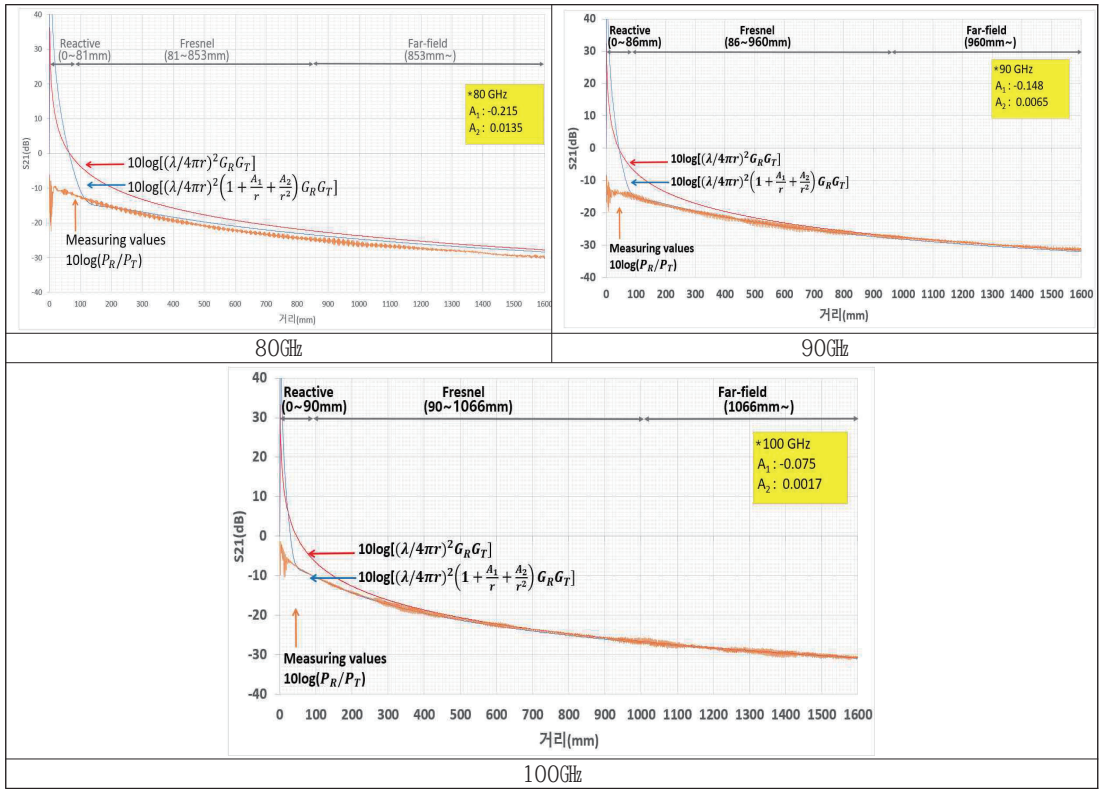
[표 2] 주파수별 보정값( $A_1$ ,  $A_2$ )

주파수 (GHz)	첫 번째 보정항( $A_1$ )	두 번째 보정항( $A_2$ )	비고
20	-0.083	0.00185	
30	-0.0695	0.0013	
40	-0.11	0.0035	
50	-0.215	0.00135	
60	-0.1	0.003	
70	-0.158	0.0075	
80	-0.215	0.0135	
90	-0.148	0.0065	
100	-0.075	0.0017	



[그림 1] 각 주파수별 보정항( $A_1$ ,  $A_2$ ) 그래프





[그림 2] 주파수별 보정항을 추가한 이론과 실험값 피팅 그래프(30GHz~100GHz))

자유 공간 경로 손실 공식의 확장에 관해서 설명한다. RF 전송은 식 (3)의 자유공간 감쇠  $(\lambda/4\pi r)^2$ 로 설명되며, 이는 원역장 범위에서 설정된다. 원역장 안테나 이득을 사용하는 경우 아래와 같이 적절한  $A_1$ 과  $A_2$ 로 보정 계수를 추가하여 반응 범위의 일부를 제외한 원역장과 근역장 모두를 만족하는 보정된 자유공간 감쇠 공식 아래와 같이 만들 수 있다.

$$\left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \left(1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2}\right) \quad (5)$$

거리에 따라 달라지는 안테나 이득을 정의한다. 식 (6)에서 보정한 새로운 안테나 전송 방정식은  $\left(1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2}\right)$ 항을 추가한 자유 공간 경로 손실로 제안할 수 있다. 반면 식 (6)의 오른쪽 항은 다음과 같이 거리  $r$ 에 따라 달라지는 이득으로 가정할 수 있다.

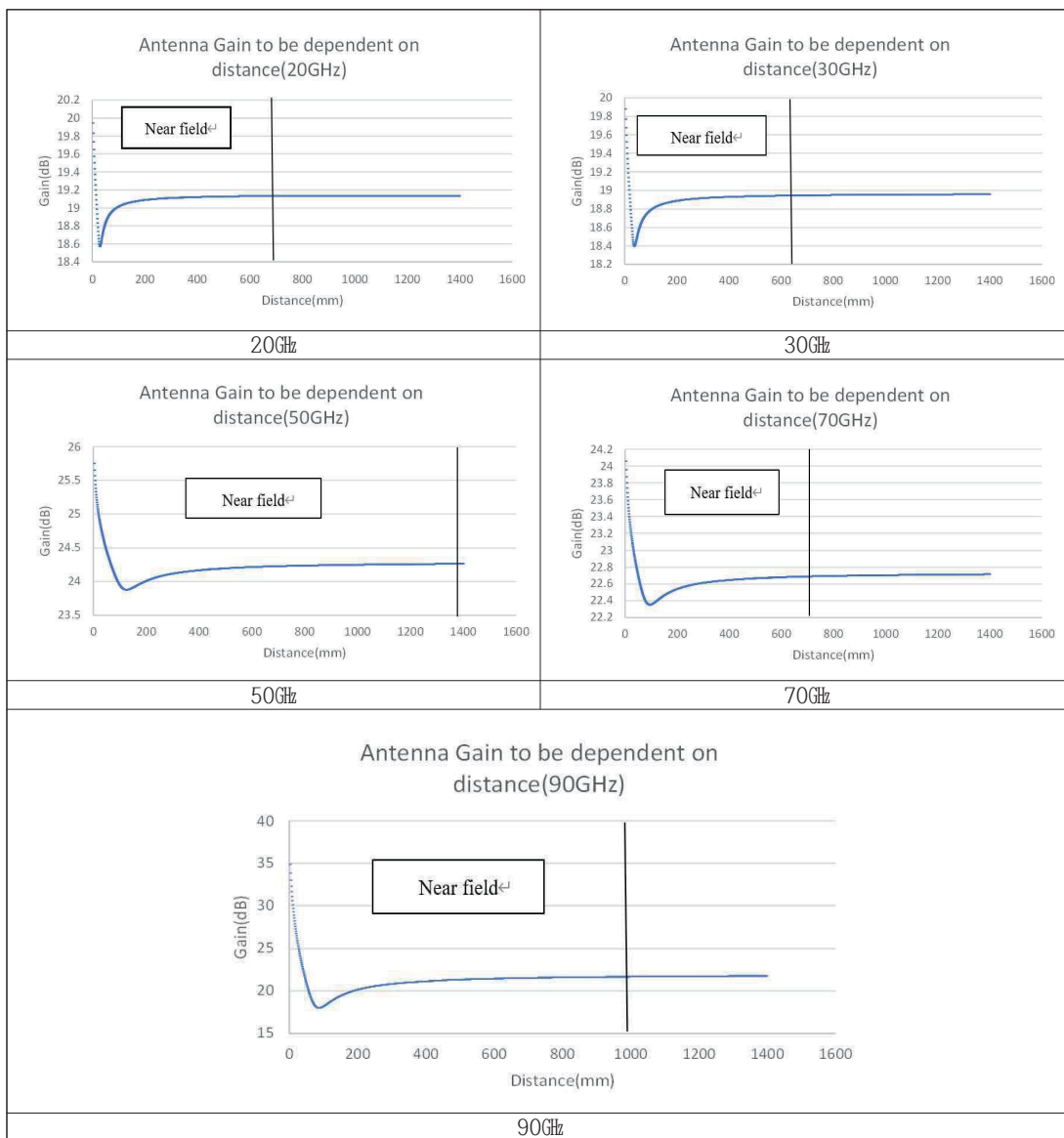


$$\frac{P_R}{P_T} = \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 G_R(r) G_T(r) \quad (6)$$

$$G_R(r) = \sqrt{1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2}} G_R^0 \quad (7)$$

$$G_T(r) = \sqrt{1 + \frac{A_1}{r} + \frac{A_2}{r^2}} G_T^0 \quad (8)$$

식 (7), 식 (8)은 근역장과 원역장 모두에서 적용이 가능하다



[그림 3] 거리에 따른 안테나 이득 (20~90GHz)



### 제3절 측정 결과의 불확도 분석

안테나 사이의 삽입손실을 측정하는 계측기로 Keysight 사의 네트워크 분석기 N5227B를 사용하였다. 전송계수  $S_{21}$  측정에 고려되어야 할 불확도를 다음과 같이 분석하였다.

#### 1. 계측기 불확도

- (1) 네트워크 분석기 S21 Magnitude Accuracy
  - 제조사 제공 : 0.089dB
- (2) 네트워크 분석기 S21 Dynamic Accuracy
  - 제조사 제공 : 0.09dB
- (3) 네트워크 분석기 Power Level Linearity
  - 제조사 제공 : 0.1dB
- (4) 주파수 범위 및 정확도 (Frequency Range and Accuracy)
  - 주파수 오차에 따른 전력의 오차 : 12kHz@20GHz

$$\Delta P = 20 \times \log \frac{f}{f + \Delta f} = 0.00000052dB \text{ (교정성적서 및 제조사)}$$

#### 2. 케이블 안정도

케이블 안정도는 안테나 제조사의 데이터시트를 토대로 0.15dB로 결정하였다.

#### 3. 부정합불확도

부정합불확도는 계측기, 케이블 및 안테나 등 측정을 위한 연결 요소들 사이에 임피던스 불일치에 의해 야기되는 반사파에 의한 부정합에 의한 에러로 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{|\Gamma_i| + |\Gamma_j| + |S_{21}| + |S_{12}| \times 100\% \text{ Voltage}}{11.5}$$

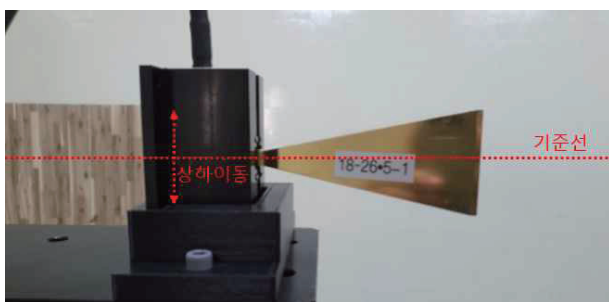
$\Gamma_i$  : 선형값의 i 장비의 반사계수

$\Gamma_j$  : 선형값의 j 장비의 반사계수

$S_{12}, S_{21}$  : 선형값의 i 장비와 j 장비 사이의 전송계수

#### 4. 안테나 거치 오차에 의한 불확도 분석

- (1) 안테나 상하 위치 오차 추정 : 안테나 상하 최대 범위를 0.5mm으로 추정하고, 1mm 단위로 삽입손실을 측정한 후 그 차이에 해당되는 0.1dB로 추정하였다.

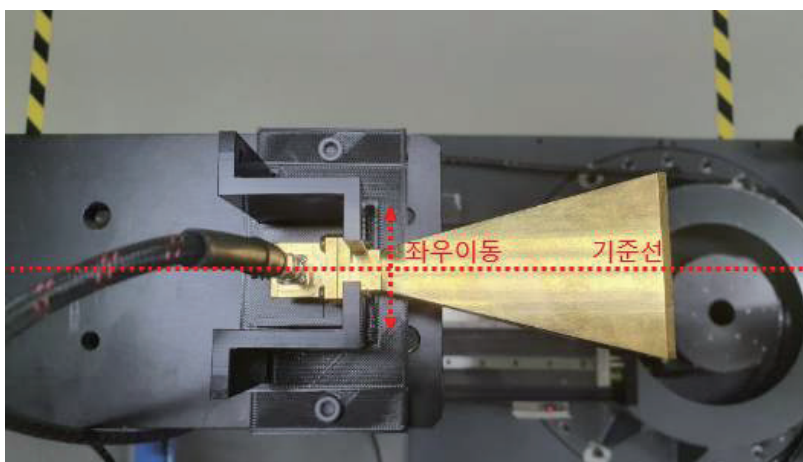


[그림 4] 안테나 상하의 위치오차 추정

[표 3] 안테나 상하 1mm 가변 측정값 차

상하 들어짐 정도(mm)	측정값(dB)	차이(dB)
3	-24.25	0.04
2	-24.22	0.07
1	-24.03	0.27
0	-24.30	0
-1	-24.37	0.07
-2	-24.28	0.02
-3	-24.36	0.07

(2) 안테나 좌우 위치 오차 추정 : 안테나 좌우 최대 범위를 0.5mm로 추정하고, 1mm 단위로 삽입손실을 측정 후 그 차에 해당하는 0.135dB로 추정하였다.

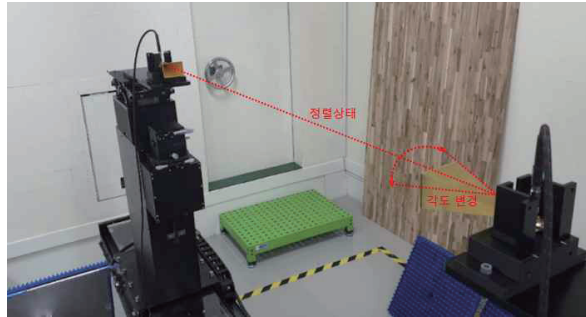


[그림 5] 안테나 좌우 위치 오차 수정

[표 4] 안테나 좌우 좌우 1mm 가변 측정값 차

좌우 틀어짐 정도(mm)	측정값(dB)	차이(dB)
3	-23.86	0.44
2	-24.00	0.30
1	-23.85	0.44
0	-24.30	0
-1	-23.62	0.67
-2	-23.59	0.70
-3	-23.52	0.78

- (3) 안테나 송수신 안테나 정렬 : 송수신 안테나의 최대 틀어진 각도를 0.5도에 해당하는 0.065dB로 추정하였다.



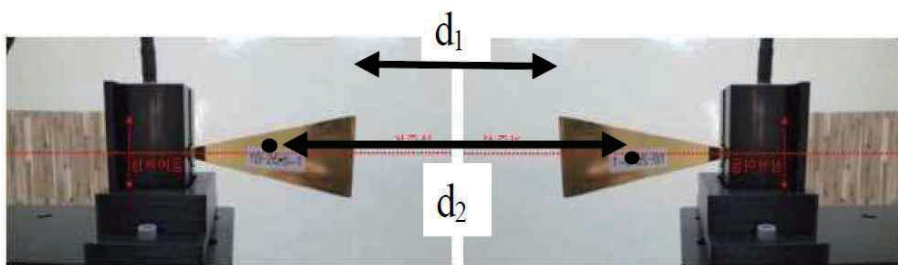
[그림 6] 송수신 안테나 좌우 각 정렬 오차 측정

[표 5] 송수신 안테나 좌우 각도 1도 가변 측정값 차

좌우 각도 틀어짐(도)	측정값(dB)	차이(dB)
3	-23.98	0.37
2	-24.09	0.27
1	-24.23	0.13
0	-24.36	0
-1	-24.27	0.09
-2	-24.31	0.05
-3	-24.41	0.05

- (4) 혼안테나 전파 방사 지점의 오차에 의한 불확도 추정 : 특정 주파수 성분이 혼안테나 전체 길이의 1/2 지점에서 방사된다고 추정하고(20GHz 기준) 다음 식 (9)에 따라 불확도를 계산하였으며 20GHz 안테나 2개의 전체 길이는 약 9cm로 약 0.382dB로 산출되었다.

$$\Delta P = 20 \times \log \frac{d_1}{d_2} \quad (9)$$

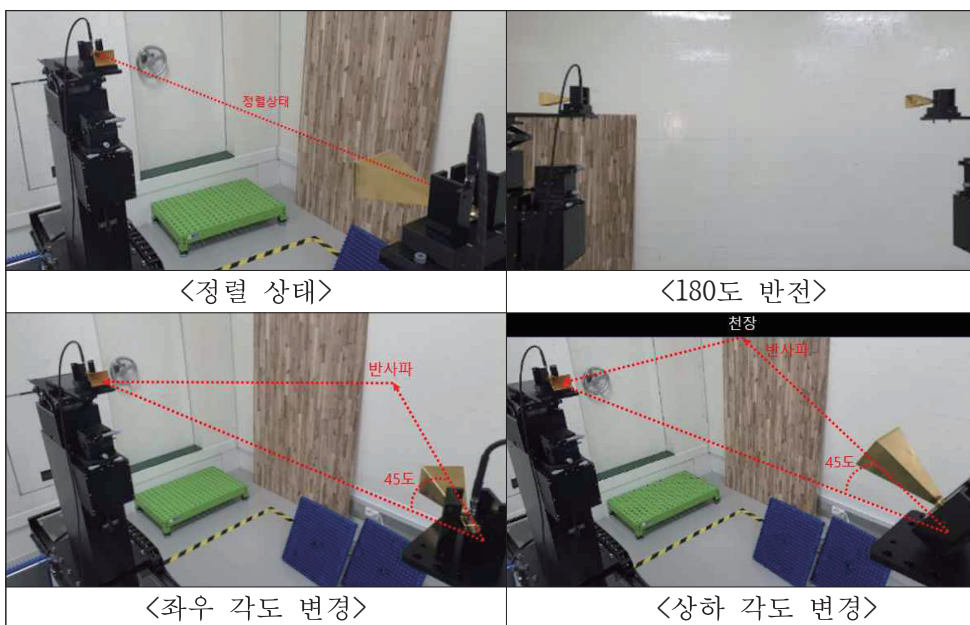


[그림 7] 안테나 방사 위치 오차 추정

## 5. 안테나 측정 시험장 환경 영향 불확도 분석

시험장 환경 영향 불확도 분석을 위해 시험장 내의 반사파를 직접 측정하였다. 반사파의 영향이 최대가 될 수 있도록 수신안테나를 180도 반전하여 벽으로부터 반사되는 반사파와 안테나를 벽 쪽으로 45도(상하좌우)로 기울였을 때 각각의 반사파의 세기를 측정하고 식 (10)에 따라 불확도를 산출하였다. 여기서  $P$ 는 송수신 안테나가 서로를 정면으로 향할 때(0도)의 측정 전력이고  $P$ 은 송수신안테나가 시험장 벽을 향할 때 수신한 선형값의 측정 전력이다.

$$10 \times \log\left(\frac{P-P}{P}\right) \quad (10)$$



[그림 8] 시험장 환경 영향 반사파 오차 추정

[표 6] 시험장 벽으로부터 반사파 측정 데이터

송수신 안테나 각도 변화	측정값(dB)	선형값
좌우	+45	-53.26
	0	-24.23
	-45	-51.89
상하	+45	-44.33
	0	-24.23
	-45	-43.93
반전	180	-43.98

## 6. 보정된 이론의 실험값 피팅에 따른 불확도 성분 추정

[그림 2]의 측정 데이터를 토대로 최소자승법에 따라 불확도를 추정하였다. 100GHz에서 측정한 데이터를 [그림 9]에서 리액티브, 프레넬 및 원거리 영역으로 각각 나누어 다음과 같은 직선의 방정식에 맞추어 기울기  $a$ 와  $y$ 절편  $b$ 를 계산하였다. 데이터  $(x_i, y_i)$ 는  $x$ 축을 안테나 사이의 거리  $y$ 축을 dB로 표현된 안테나 삽입손실이다.

$$f(x) = ax + b \quad (11)$$

최소자승법에 따르면  $a$ 와  $b$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

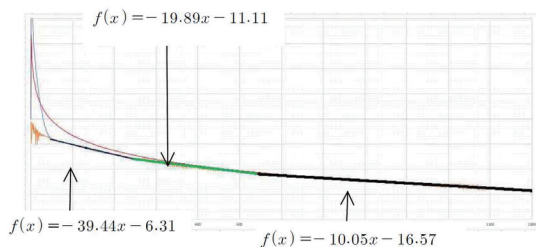
$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (12)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (13)$$

이러한 피팅에 따른 오차는 다음과 같이 계산한다.

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2 - b \sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n - 2}} \quad (14)$$

계산된 결과는 [표 7]과 같다.



[그림 9] 리액티브, 프레넬 및 원거리 영역에서 최소자승법 직선 추정

[표 7] 데이터 피팅에 의한 불확도 추정값

장영역	a	b	오차(dB)
리액티브 영역	-39.44	-6.31	0.25
프레넬 영역	-19.89	-11.11	0.48
원거리장 영역	-10.05	-16.57	0.42

## 7. A형 불확도

A형 불확도는 반복측정(11회) 결과를 다음 식 (15)에 대입하여 0.007dB로 산출하였다.

$$u_A = \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_k - x)^2 / N(N-1)} \quad (15)$$

( $x_k$ : 측정값,  $x$ : 측정 평균값,  $N$ : 측정횟수)

[표 8] 반복측정 데이터 및 A형 불확도

측정 횟수	안테나 삽입 손실 (dB)
1	-21.51
2	-21.48
3	-21.51
4	-21.49
5	-21.51
6	-21.50
7	-21.49
8	-21.45
9	-21.46
10	-21.46
11	-21.48
측정값 평균	-21.49

## 8. 불확도 총괄표

측정과 산출을 통해 도출한 불확도 총괄표는 다음 [표 9]와 같다.

[표 9] 불확도 총괄표

불확도 요인		값	확률분포	나	$u_i$
		dB		눔	dB
A형 불확도		0.007	정규	1	0.007
계측기 불확도	네트워크분석기 S21 Accuracy	0.089	직각	$\sqrt{3}$	0.051
	네트워크분석기 Power Level Linearity	0.090	정규	2	0.045
	네트워크분석기 Frequency Accuracy	0.000	직각	$\sqrt{3}$	0.000
	Dynamic Accuracy	0.100	직각	$\sqrt{3}$	0.058
케이블	Tx cable Amplitude Stability	0.150	직각	$\sqrt{3}$	0.087
	Rx cable Amplitude Stability	0.150	직각	$\sqrt{3}$	0.087
부정합 불확도	Network Analyzer - Tx cable	0.023	U형	$\sqrt{2}$	0.016
	Tx cable - Tx Ant	0.076	U형	$\sqrt{2}$	0.054
	Network Analyzer - Tx Ant	0.002	U형	$\sqrt{2}$	0.001
	Rx Ant - Rx Cable	0.045	U형	$\sqrt{2}$	0.032
	Rx cable - Network Analyzer	0.087	U형	$\sqrt{2}$	0.062
	Rx Ant - Network Analyzer	0.003	U형	$\sqrt{2}$	0.002
안테나 거치	Antenna Position(상하)	0.135	직각	$\sqrt{3}$	0.078
	Antenna Position(좌우)	0.335	직각	$\sqrt{3}$	0.193
	Antenna Position(정렬)	0.065	직각	$\sqrt{3}$	0.038
	Effects of site Phase position	0.382	직각	$\sqrt{3}$	0.221
환경	Effects of site(반사파 영향)	0.080	직각	$\sqrt{3}$	0.046
실험 - 이론 피팅 오차	리액티브 영역	0.25	직각	$\sqrt{3}$	0.144
	프레넬 영역	0.48	직각	$\sqrt{3}$	0.277
	원거리장 영역	0.42	직각	$\sqrt{3}$	0.242
합성표준불확도(리액티브), $U_c$					0.384
합성표준불확도(프레넬), $U_c$					0.451
합성표준불확도(원거리장), $U_c$					0.430
확장불확도(최대값), $U(k=2)$					0.902



## 제4절 결론

본 장에서는 밀리미터파 대역 (20GHz ~ 100GHz)에서 두 개의 동일한 혼안테나를 사용하여 근거리 영역 및 원거리 영역을 망라한 장 영역에서 송신 및 수신 안테나 사이의 자유공간 삽입 손실을 측정하였다. 거리의 역제곱 법칙으로서 Friis 방정식의 자유공간 전송 손실은 리액티브 및 프레넬 영역에서 측정값과 이론값이 일치하지 않은 사실을 확인하고 안테나 이득이 근거리에서 거리에 의존하는 함수임을 가정하고 리액티브를 형성하는 영역의 반 이상의 위치에서도 실험값과 이론값이 잘 일치하는 추가 항을 도입함으로써 근거리에서도 성립하는 자유공간 삽입손실 공식을 제안하였다. 추가되는 공식은 거리의 역수 및 거리의 역제곱에 비례하는 항을 더한 수식으로 해당하는 항의 계수를 경험적으로 찾아내었다. 이 계수들은 여기서 사용한 혼안테나에서 성립하지만 일반적으로 모든 안테나에 적용될지는 추가적 연구가 필요하다.

본 장에서 또한 측정의 신뢰성을 확보하기 위해 측정불확도 분석을 시도하였다. 안테나 측정 구성에 있어서 계측기 불확도, 케이블 및 각 연결 요소들의 부정합에 의한 불확도 요인, 반사파 등을 야기할 수 있는 시험장 환경 그리고 실측값과 제안한 보정 이론값의 피팅으로 생성될 수 있는 불확도 요인을 최소자승법에 의하여 분석을 시도하였다.

역제곱 법칙을 만족하는 기존의 자유공간 경로 손실에 근거리에서도 만족하는 계수를 찾아내기 위해서 안테나와 주파수를 달리하는 추가적인 연구가 필요하다. 이 연구의 결과를 통해서 근거리에서 안테나의 고유 성능으로서 안테나 이득이 거리의 의존하는 함수인지 아니면 근거리에서 전파의 자유공간 경로 손실이 추가되는 보정항이 필요한 것인지는 논란의 여지를 남긴다.



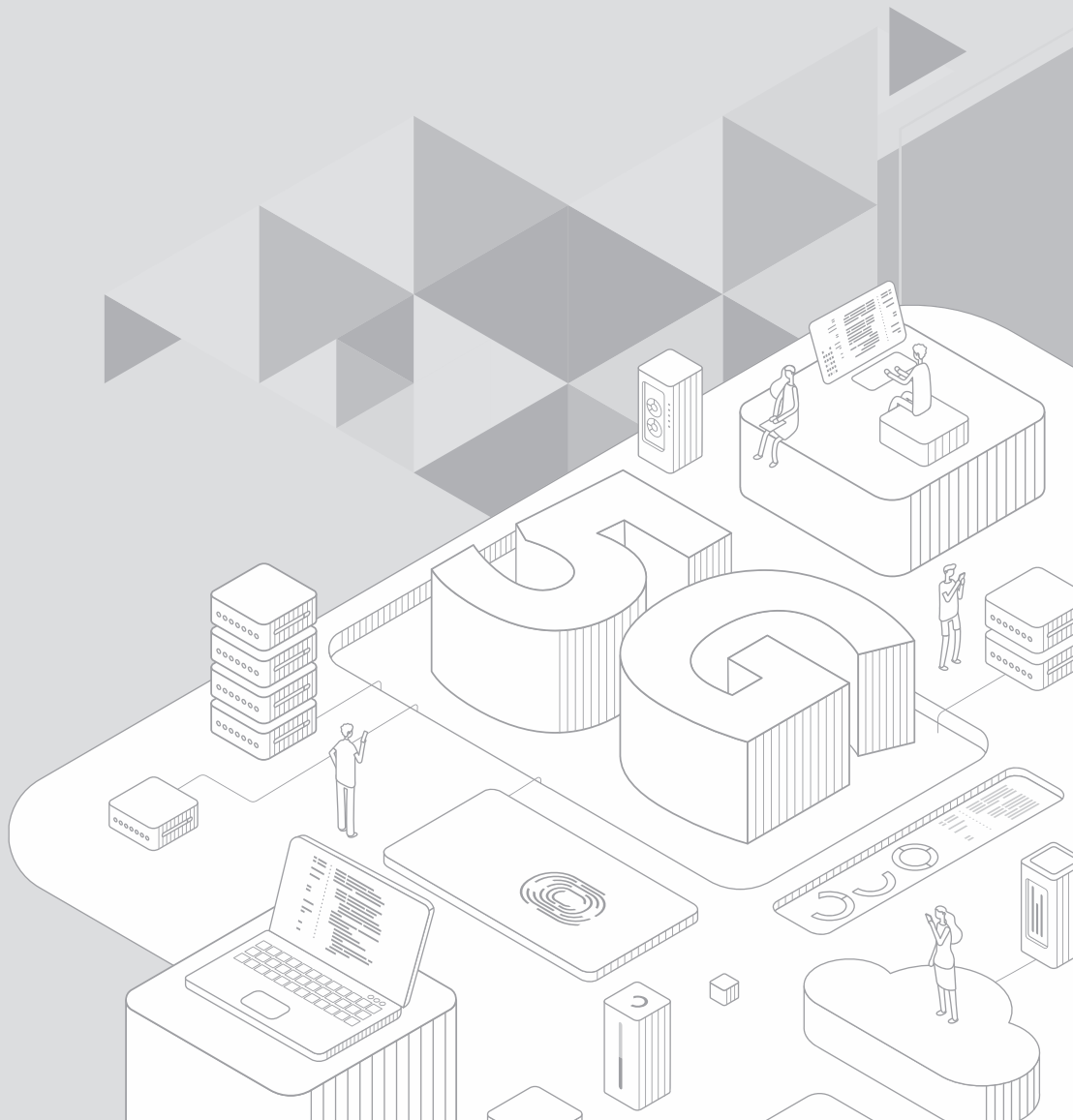


국립전파연구원  
National Radio Research Agency

### 제3장

# 국내·외 안테나 비교 측정 연구

National Radio Research Agency





## 제3장 국내·외 안테나 비교 측정연구

### 제1절 국내 교정기관 간 안테나 비교 시험

#### 1. 배경

지정시험기관에서 적합성평가 시험업무에 사용하는 측정용 안테나는 전파법령에 따라 주기적으로 성능에 관한 검사를 받아야 한다. 2019년 12월 규제 완화를 위해 고시가 개정됨에 따라 지정시험기관이 안테나 교정기관에서 발행한 교정성적서를 제출하는 경우에는 성능검사를 받은 것으로 인정하고 있다. 이에 따라 국립전파연구원에서 국내 교정기관에서 올바르게 전파인증용 안테나의 성능검사를 수행하는지 확인하기 위해 2020년 키포 회의록을 시작으로 안테나 교정검사 기술위원회를 구성하고, 교정기관 간 안테나 비교 순회 시험을 제안하였다. 안테나 비교 순회 시험은, 국내 안테나 교정기관(HCT), 한국산업기술시험원(KTL), 교정기술원(SICT))과 국립전파연구원 전파시험인증센터(RRA)가 안테나를 선정하고, 동일한 안테나로 각 기관이 돌아가며 안테나 인자를 산출·비교하는 것이다.

키포 회의 때 각 기관이 모두 비교 순회 시험에 동의하였으며, 2021년도에 Bi-Log안테나와 혼안테나로 처음 비교 시험을 수행하였고 이후 2022년에는 바이코니컬 안테나와 Loop 안테나, 2023년도에는 LPDA 안테나 및 다이폴 안테나로 비교시험을 수행하였다. 안테나 교정검사 기술위원회를 구성 후 3개년을 통해서 모든 표준안테나에 대한 순회시험을 완료하였다.

[표 10] 수행연도별 시험 대상 안테나

수행년도	비교시험 대상 안테나
2020	안테나 교정검사 기술위원회 조직
2021	바이로그 안테나, 혼 안테나
2022	바이코니컬 안테나, 루프 안테나
2023	LPDA, 다이폴 안테나

#### 2. 비교 시험 시료 및 측정 방법

안테나 교정검사 기술위원회를 매년 소집하여 안테나별 측정 항목 및 방법(주파수 범위 등)을 결정하고 기관별 순회시험을 실시하였다. 2022년 비교시험

을 위한 시료로는 바이코니컬과 루프 안테나가 선정되었다. 측정 방법은, 바이코니컬 안테나는 표준시험장법을 적용하고, 루프 안테나는 G-TEM셀에서 안테나 인자 값을 미리 알고 있는 기준 안테나를 이용하여 안테나 인자를 산출하였다. 바이코니컬 안테나는 안테나 인자 외에 반사계수(VSWR), 대칭측정( $180^\circ$  회전) 시험을 추가적으로 수행하였다.

2023년 비교시험을 위한 시료로는 LP와 다이폴 안테나가 선정되었다. 측정 방법은 두 안테나 모두 표준안테나법을 적용하고 안테나 인자 및 반사계수 측정을 진행하였고, 특히 국립전파연구원에서는 Balance 및 대칭특성을 추가로 측정하여 각 기관과 결과를 공유하였다.



(a) 바이로그 안테나



(b) 혼 안테나

[그림 10] 바이로그 안테나와 혼 안테나(2021년도 대상 안테나)

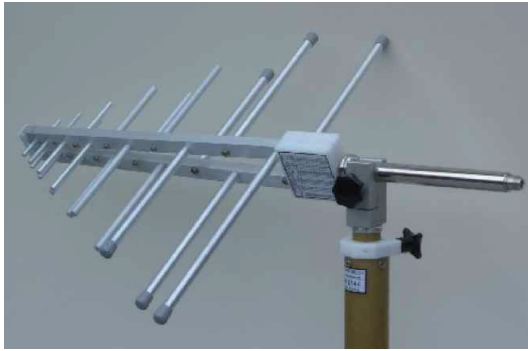


(a) 바이코니컬 안테나

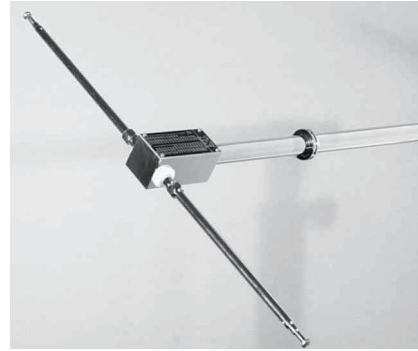


(b) 루프 안테나

[그림 11] 바이코니컬 안테나와 루프 안테나(2022년도 대상 안테나)



(a) LP 안테나



(b) 다이폴 안테나

[그림 12] LP 안테나와 다이폴 안테나(2023년도 대상 안테나)

### 3. 안테나 인자 비교시험 측정 결과

#### 가. 바이로그 비교시험 결과 (2021년 수행)

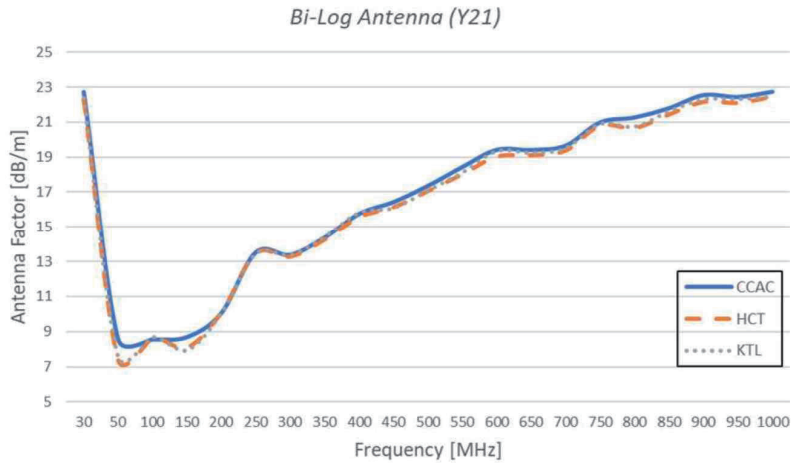
2021년에는 교정기술원(SICT)를 제외하고 한국산업기술시험원(KTL), HCT와 순회 비교시험을 수행하였으며, 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL 간 1dB, RRA-HCT 간 1.17dB로 3개 기관이 유사한 값을 측정한 것으로 확인하였다.

[표 11] 바이로그 안테나 기관별 안테나인자 측정값

주파수 (MHz)	안테나인자 측정값(dB/m)		
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티
30	22.72	22.38	22.29
50	8.54	7.54	7.37
100	8.54	8.67	8.61
150	8.67	7.93	8.08
200	10.05	10.03	10.08
250	13.51	13.43	13.45
300	13.37	13.36	13.26
350	14.36	14.42	14.24
400	15.74	15.81	15.55
450	16.42	16.08	16.12
500	17.35	17.09	17.05
550	18.43	18.12	18.01
600	19.41	19.34	19.02
650	19.4	19.24	19.1
700	19.65	19.51	19.37
750	20.98	20.9	20.79
800	21.26	20.74	20.66



850	21.79	21.62	21.43
900	22.54	22.3	22.15
950	22.43	22.31	22.09
1000	22.73	22.45	22.44



[그림 13] 바이로그 안테나 인자 비교 측정 결과

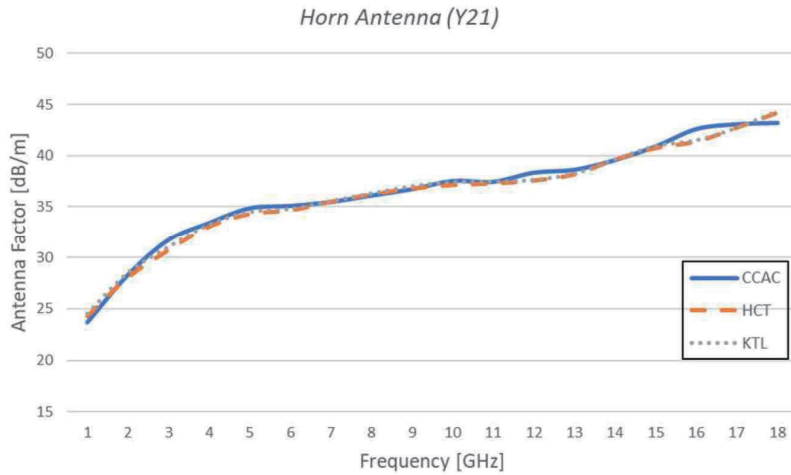
#### 나. 혼 안테나 비교시험 결과 (2021년 수행)

2021년에는 교정기술원(SICT)를 제외한, 한국산업기술시험원(KTL), HCT와 순회 비교시험을 수행한 결과, 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL은 1.21dB, RRA-HCT는 1.18dB로 3개 기관이 유사한 값을 측정한 것으로 확인하였다.

[표 12] 혼 안테나 기관별 안테나인자 측정값

주파수 (GHz)	안테나인자 측정값 (dB/m)		
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티
1	23.68	24.56	24.24
2	28.28	28.55	28.02
3	31.7	31.05	30.69
4	33.38	33.27	33.03
5	34.83	34.51	34.28
6	35.06	34.82	34.64
7	35.45	35.58	35.49
8	36.08	36.32	36.21
9	36.7	37.03	36.78
10	37.5	37.44	37.13
11	37.42	37.47	37.28

12	38.31	37.66	37.57
13	38.59	38.26	38.18
14	39.54	39.65	39.61
15	40.87	40.96	40.75
16	42.56	41.51	41.38
17	43.03	42.73	42.74
18	43.16	44.37	44.21



[그림 14] 혼 안테나 인자 비교 측정 결과

#### 다. 바이코니컬 비교시험 결과(2022년 수행)

전파시험인증센터(RRA)와 한국산업기술시험원(KTL), HCT, 교정기술원(SICT)과 순회 비교시험을 수행한 결과, 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL은 1.15 dB, RRA-HCT는 1.11 dB, RRA-SICT는 1.16 dB로 4개 기관이 모두 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[표 13] 바이코니컬 기관별 안테나인자 측정값

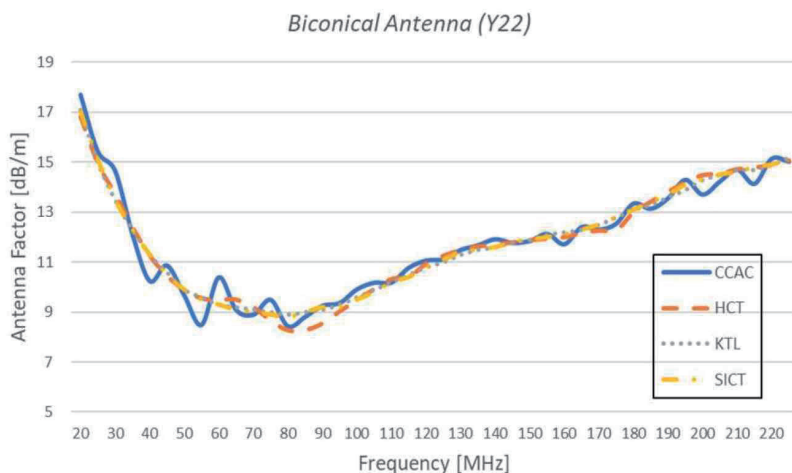
주파수 (MHz)	안테나인자 측정값(dB/m)			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
20	17.71	17.1	16.8	17.0
25	15.43	15.0	14.9	15.1
30	14.66	13.5	13.7	13.5
35	12.12	12.3	12.4	12.3
40	10.23	11.3	11.3	11.3
45	10.86	10.6	10.4	10.5



50	9.66	9.9	9.9	9.9
55	8.47	9.6	9.5	9.5
60	10.38	9.3	9.5	9.3
65	9.08	9.2	9.5	9.1
70	8.88	9.1	9.2	9.0
75	9.48	9.0	8.6	8.9
80	8.42	8.9	8.3	8.8
85	8.80	9.0	8.3	9.0
90	9.24	9.1	8.5	9.2
95	9.35	9.3	9.0	9.2
100	9.90	9.6	9.5	9.5
105	10.16	9.9	9.9	9.8
110	10.17	10.2	10.3	10.2
115	10.77	10.5	10.4	10.4
120	11.05	10.8	10.9	10.8
125	11.10	11.0	11.2	11.1
130	11.48	11.3	11.5	11.4
135	11.67	11.5	11.6	11.5
140	11.91	11.6	11.7	11.6
145	11.76	11.8	11.8	11.8
150	11.84	11.9	11.9	11.9
155	12.12	12.1	11.9	12.0
160	11.71	12.2	12.0	12.1
165	12.40	12.3	12.2	12.3
170	12.29	12.5	12.3	12.5
175	12.54	12.8	12.3	12.8
180	13.34	13.1	13.0	13.1
185	13.13	13.3	13.4	13.4
190	13.55	13.6	13.8	13.7
195	14.29	13.9	14.2	14.1
200	13.70	14.3	14.5	14.3
205	14.23	14.5	14.5	14.5
210	14.71	14.7	14.7	14.6
215	14.14	14.7	14.8	14.8
220	15.14	14.9	14.9	14.9
225	15.02	15.2	15.1	15.1
230	14.78	15.2	15.0	15.2
235	14.86	15.2	14.9	15.2
240	14.95	15.4	14.9	15.5
245	15.23	15.5	15.1	15.5
250	15.80	15.8	15.3	15.7
255	15.55	16.0	15.7	16.0
260	16.22	16.3	16.1	16.2
265	16.53	16.5	16.6	16.7



270	16.20	16.8	17.1	17.0
275	16.98	17.1	17.5	17.3
280	16.99	17.6	17.9	17.6
285	17.07	17.9	18.2	17.9
290	18.48	18.3	18.4	18.2
295	17.87	18.6	18.5	18.4
300	19.11	18.8	18.7	18.8



[그림 15] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과

라. 루프안테나 측정 결과(2022년 수행)

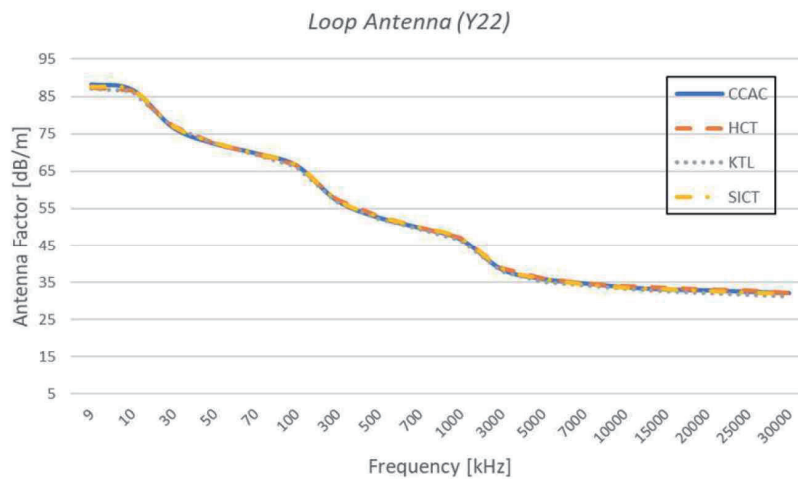
루프 안테나는 G-TEM셀에서 안테나 인자 값을 미리 알고 있는 기준안테나를 이용하여 표준안테나법으로 안테나 인자를 산출하였다. 측정 결과, 아래 [표 14]와 같이 4개 기관 모두 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[표 14] 루프 안테나 기관별 안테나인자 측정값

주파수 (kHz)	안테나인자 측정값(dB/m)			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
9	88.2	87.2	87.4	87.6
10	86.8	86.3	86.6	86.7
30	76.6	76.8	77.1	77.0
50	72.3	72.4	72.6	72.6
70	69.8	69.5	69.7	69.7
100	66.5	66.3	66.7	66.6
300	57.0	56.7	57.3	57.2
500	52.5	52.3	52.9	52.8



700	49.8	49.5	50.1	50.0
1000	46.7	46.5	47.1	47.0
3000	38.4	38.0	38.9	38.7
5000	35.8	35.2	36.1	35.9
7000	34.7	34.1	34.7	34.4
10000	33.6	33.3	33.9	33.5
15000	33.0	32.6	33.4	33.1
20000	32.8	32.1	33.0	32.6
25000	32.4	31.7	32.9	32.2
30000	32.0	31.2	32.1	31.8



[그림 16] 루프 안테나 인자 비교 측정 결과

#### 마. LPDA 비교시험 결과(2023년 수행)

전파시험인증센터(RRA)와 한국산업기술시험원(KTL), HCT, 교정기술원(SICT)과 순회 비교시험을 수행한 결과, 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL 간 0.38dB, RRA-HCT 간 0.37 dB, RRA-SICT 간 0.53 dB로 4개 기관이 모두 매우 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[표 15] LPDA 기관별 안테나 인자 측정값

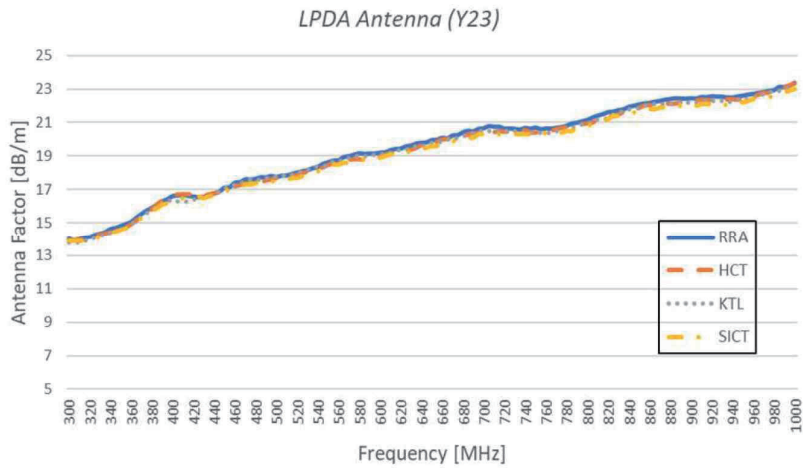
주파수 (M)	안테나인자 측정값 (dB/m)			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
300	14.0	13.8	13.9	13.9
305	13.9	13.8	13.9	13.9
310	14.0	13.8	14.0	13.9
315	14.1	13.9	14.0	13.9
320	14.1	14.0	14.1	14.0

325	14.3	14.1	14.2	14.0
330	14.3	14.2	14.3	14.2
335	14.4	14.3	14.3	14.3
340	14.6	14.4	14.4	14.4
345	14.7	14.5	14.5	14.5
350	14.8	14.6	14.6	14.6
355	14.9	14.7	14.7	14.7
360	15.1	14.9	14.9	14.9
365	15.3	15.2	15.1	15.1
370	15.5	15.4	15.4	15.3
375	15.7	15.6	15.6	15.5
380	15.9	15.8	15.8	15.7
385	16.1	16.0	16.1	15.9
390	16.3	16.2	16.3	16.1
395	16.4	16.3	16.5	16.2
400	16.6	16.4	16.7	16.3
405	16.6	16.3	16.7	16.4
410	16.7	16.3	16.7	16.5
415	16.6	16.3	16.7	16.5
420	16.6	16.4	16.7	16.6
425	16.5	16.5	16.6	16.6
430	16.5	16.5	16.6	16.5
435	16.6	16.6	16.7	16.6
440	16.8	16.7	16.8	16.7
445	16.9	16.9	16.8	16.8
450	17.1	17.1	17.0	16.9
455	17.1	17.2	17.1	17.0
460	17.4	17.3	17.2	17.1
465	17.4	17.4	17.3	17.2
470	17.6	17.5	17.3	17.3
475	17.6	17.6	17.4	17.3
480	17.6	17.6	17.5	17.4
485	17.7	17.6	17.4	17.4
490	17.7	17.7	17.5	17.5
495	17.8	17.7	17.6	17.5
500	17.7	17.8	17.7	17.5
505	17.8	17.8	17.7	17.6
510	17.8	17.9	17.7	17.6
515	17.9	17.9	17.8	17.7
520	18.0	18.0	17.9	17.7
525	18.1	18.1	18.0	17.8
530	18.1	18.2	18.0	17.9
535	18.3	18.3	18.1	18.0
540	18.3	18.4	18.2	18.1
545	18.5	18.4	18.3	18.2
550	18.6	18.5	18.5	18.3
555	18.7	18.7	18.6	18.5
560	18.7	18.7	18.6	18.5
565	18.9	18.8	18.7	18.6
570	19.0	18.9	18.7	18.6



575	19.1	19.0	18.8	18.7
580	19.1	19.0	18.8	18.8
585	19.1	19.0	18.8	18.8
590	19.1	19.0	18.9	18.8
595	19.1	19.1	18.9	18.8
600	19.2	19.1	18.9	18.9
605	19.2	19.2	19.1	19.0
610	19.3	19.2	19.1	19.1
615	19.4	19.3	19.2	19.1
620	19.4	19.4	19.3	19.2
625	19.6	19.4	19.4	19.2
630	19.6	19.5	19.4	19.3
635	19.7	19.6	19.5	19.3
640	19.8	19.6	19.6	19.4
645	19.8	19.7	19.6	19.5
650	19.9	19.8	19.6	19.6
655	20.0	19.8	19.8	19.6
660	20.1	19.9	20.0	19.7
665	20.0	20.0	20.0	19.8
670	20.2	20.0	20.1	19.9
675	20.2	20.1	20.2	19.9
680	20.4	20.2	20.2	20.0
685	20.5	20.3	20.3	20.1
690	20.5	20.4	20.4	20.1
695	20.6	20.5	20.3	20.3
700	20.7	20.5	20.4	20.3
705	20.8	20.5	20.4	20.3
710	20.7	20.5	20.4	20.3
715	20.7	20.5	20.5	20.3
720	20.6	20.5	20.4	20.3
725	20.6	20.5	20.5	20.3
730	20.6	20.5	20.4	20.3
735	20.6	20.4	20.5	20.3
740	20.7	20.4	20.5	20.3
745	20.6	20.4	20.4	20.3
750	20.7	20.4	20.4	20.3
755	20.6	20.4	20.4	20.2
760	20.6	20.4	20.5	20.4
765	20.6	20.4	20.5	20.4
770	20.7	20.5	20.6	20.4
775	20.7	20.5	20.7	20.4
780	20.8	20.6	20.7	20.5
785	20.9	20.7	20.9	20.5
790	21.0	20.8	20.9	20.7
795	21.1	20.9	20.9	20.7
800	21.1	21.0	20.9	20.8
805	21.3	21.0	21.0	20.9
810	21.4	21.2	21.1	21.0
815	21.5	21.2	21.2	21.1
820	21.6	21.3	21.3	21.2

825	21.6	21.5	21.4	21.4
830	21.7	21.6	21.5	21.4
835	21.8	21.7	21.6	21.5
840	21.9	21.8	21.7	21.5
845	22.0	21.8	21.7	21.6
850	22.1	21.9	21.9	21.7
855	22.1	22.0	22.0	21.8
860	22.2	22.1	22.0	21.8
865	22.2	22.1	22.0	21.8
870	22.3	22.1	22.1	21.9
875	22.4	22.1	22.1	21.9
880	22.4	22.1	22.1	22.0
885	22.4	22.2	22.1	22.0
890	22.4	22.2	22.2	22.0
895	22.4	22.2	22.2	22.0
900	22.4	22.2	22.3	22.1
905	22.4	22.2	22.3	22.0
910	22.5	22.3	22.3	22.1
915	22.5	22.3	22.3	22.1
920	22.6	22.3	22.3	22.1
925	22.5	22.3	22.3	22.0
930	22.5	22.3	22.3	22.0
935	22.5	22.2	22.4	22.1
940	22.5	22.3	22.4	22.2
945	22.5	22.4	22.3	22.3
950	22.6	22.4	22.4	22.2
955	22.7	22.4	22.5	22.3
960	22.7	22.5	22.5	22.4
965	22.8	22.6	22.7	22.5
970	22.8	22.7	22.8	22.5
975	22.9	22.8	22.8	22.5
980	22.9	22.9	22.9	22.6
985	23.1	22.9	23.0	22.7
990	23.1	23.0	23.1	22.8
995	23.2	23.1	23.2	22.9
1000	23.4	23.1	23.3	23.0



[그림 17] LPDA 인자 비교 측정 결과

바. 다이폴안테나 비교시험 결과(2023년 수행)

다이폴의 경우에 VHF대역의 VHAP안테나와 UHF대역의 UHAP안테나 2종을 실시하였다. 전파시험인증센터(RRA)와 한국산업기술시험원(KTL), HCT, 교정기술원(SICT)과 순회 비교시험을 수행한 결과, VHAP 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL은 0.81dB, RRA-HCT는 1.46 dB, RRA-SICT는 0.91 dB로 4개 기관이 모두 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[표 16] 다이폴(VHAP) 안테나 기관별 안테나 인자 측정값

주파수 (MHz)	안테나인자 측정값(dB/m)			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
25	11.6	11.6	11.9	11.4
25.5	11.1	10.9	11.3	10.8
26	10.3	10.2	10.7	10.1
26.5	9.7	9.6	10.2	9.4
27	9.2	9.1	9.9	8.9
27.5	8.6	8.6	9.4	8.5
28	8.3	8.3	9.0	8.2
28.5	8.2	8.1	8.8	8.1
29	8.0	8.1	8.7	8.1
29.5	8.3	8.3	8.6	8.1
30	8.5	8.5	8.5	8.3
30.5	8.7	8.8	8.6	8.6
31	9.2	9.2	8.8	9.1
31.5	9.6	9.6	8.9	9.5
32	9.9	10.0	9.1	9.9
32.5	10.4	10.4	9.4	10.2
33	10.8	10.9	9.8	10.7

33.5	11.2	11.3	10.0	11.2
34	11.8	11.7	10.3	11.7
34.5	12.2	12.1	10.8	12.1
35	12.4	12.5	11.2	12.4
90	18.2	17.5	17.1	17.4
90.5	18.2	17.4	17.0	17.4
91	18.1	17.3	16.9	17.3
91.5	18.0	17.2	16.9	17.2
92	17.9	17.2	16.8	17.0
92.5	17.8	17.1	16.7	16.9
93	17.7	17.1	16.7	16.9
93.5	17.6	17.1	16.7	16.9
94	17.5	17.0	16.8	16.8
94.5	17.4	17.0	16.7	16.8
95	17.3	17.0	16.8	16.8
95.5	17.3	17.1	16.9	16.9
96	17.3	17.1	17.0	16.9
96.5	17.3	17.2	17.1	17.0
97	17.3	17.2	17.1	17.1
97.5	17.3	17.2	17.3	17.1
98	17.4	17.4	17.4	17.2
98.5	17.4	17.5	17.5	17.3
99	17.4	17.5	17.6	17.5
99.5	17.6	17.6	17.8	17.6
100	17.7	17.7	18.0	17.7
100.5	17.7	17.9	18.1	17.8
101	17.8	18.0	18.1	18.0
101.5	17.9	18.1	18.3	18.0
102	18.1	18.3	18.5	18.2
102.5	18.2	18.4	18.7	18.3
103	18.3	18.5	18.8	18.5
103.5	18.4	18.7	18.9	18.6
104	18.5	18.8	19.1	18.7
104.5	18.6	19.0	19.2	18.8
105	18.8	19.1	19.3	18.9
105.5	18.9	19.2	19.4	19.2
106	19.0	19.3	19.6	19.3
106.5	19.1	19.5	19.8	19.4
107	19.3	19.6	19.9	19.5
107.5	19.4	19.7	19.9	19.6
108	19.4	19.9	20.1	19.8
108.5	19.5	20.0	20.3	19.9
109	19.7	20.1	20.4	20.1
109.5	19.9	20.3	20.5	20.2
110	20.0	20.4	20.6	20.3
280	27.2	27.2	27.1	27.2
280.5	27.2	27.2	27.1	27.2
281	27.2	27.2	27.1	27.2
281.5	27.2	27.2	27.1	27.2
282	27.2	27.1	27.1	27.3



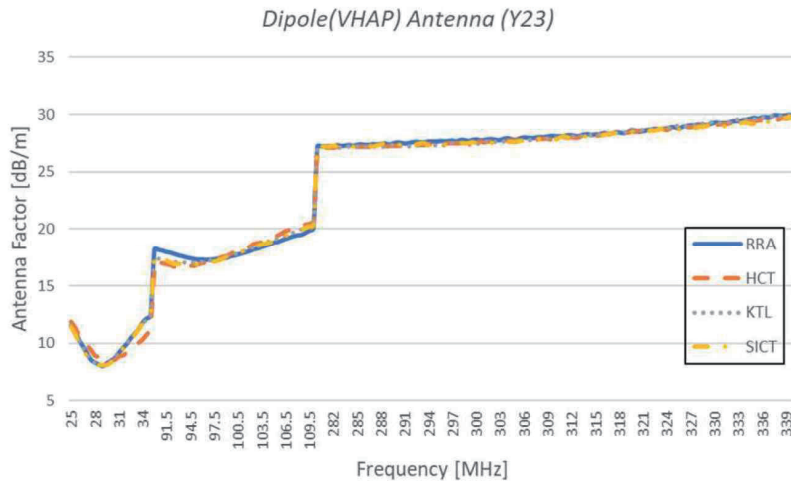
282.5	27.3	27.1	27.2	27.2
283	27.2	27.1	27.1	27.3
283.5	27.3	27.2	27.2	27.3
284	27.3	27.2	27.1	27.2
284.5	27.3	27.2	27.2	27.2
285	27.3	27.2	27.2	27.3
285.5	27.4	27.2	27.2	27.3
286	27.3	27.2	27.2	27.3
286.5	27.3	27.2	27.2	27.3
287	27.4	27.2	27.2	27.2
287.5	27.4	27.2	27.2	27.3
288	27.4	27.2	27.2	27.4
288.5	27.5	27.2	27.2	27.5
289	27.4	27.3	27.3	27.4
289.5	27.5	27.4	27.2	27.2
290	27.6	27.3	27.2	27.3
290.5	27.5	27.3	27.2	27.4
291	27.5	27.3	27.3	27.5
291.5	27.5	27.2	27.3	27.4
292	27.6	27.2	27.3	27.3
292.5	27.6	27.3	27.3	27.4
293	27.6	27.4	27.3	27.5
293.5	27.6	27.4	27.4	27.5
294	27.6	27.4	27.4	27.3
294.5	27.6	27.4	27.4	27.4
295	27.6	27.3	27.4	27.6
295.5	27.7	27.3	27.4	27.5
296	27.7	27.3	27.5	27.4
296.5	27.7	27.4	27.5	27.4
297	27.7	27.5	27.5	27.5
297.5	27.6	27.5	27.5	27.5
298	27.8	27.6	27.5	27.5
298.5	27.8	27.5	27.6	27.5
299	27.7	27.4	27.6	27.5
299.5	27.8	27.4	27.6	27.6
300	27.8	27.4	27.6	27.5
300.5	27.7	27.5	27.6	27.5
301	27.8	27.6	27.6	27.6
301.5	27.8	27.7	27.7	27.6
302	27.8	27.7	27.6	27.5
302.5	27.8	27.6	27.7	27.6
303	27.8	27.6	27.7	27.6
303.5	27.9	27.6	27.7	27.6
304	27.9	27.6	27.7	27.6
304.5	27.8	27.7	27.8	27.6
305	27.8	27.7	27.8	27.6
305.5	27.9	27.7	27.7	27.7
306	28.0	27.7	27.8	27.7
306.5	28.0	27.8	27.7	27.7
307	27.9	27.8	27.9	27.7



307.5	28.0	27.8	27.8	27.7
308	28.0	27.9	27.9	27.9
308.5	28.0	27.9	27.9	27.9
309	28.1	27.9	27.9	27.8
309.5	28.1	27.9	27.8	27.8
310	28.1	27.9	28.0	27.8
310.5	28.1	28.0	27.9	28.0
311	28.1	28.0	28.0	28.1
311.5	28.2	28.0	28.0	28.0
312	28.2	28.1	28.0	27.9
312.5	28.1	28.1	28.0	28.0
313	28.1	28.1	28.0	28.1
313.5	28.2	28.1	28.1	28.1
314	28.3	28.2	28.1	28.1
314.5	28.2	28.2	28.2	28.2
315	28.2	28.2	28.2	28.1
315.5	28.3	28.3	28.2	28.1
316	28.4	28.3	28.3	28.2
316.5	28.3	28.4	28.3	28.3
317	28.3	28.3	28.3	28.3
317.5	28.4	28.4	28.3	28.4
318	28.4	28.4	28.4	28.3
318.5	28.4	28.4	28.4	28.3
319	28.4	28.5	28.4	28.4
319.5	28.6	28.5	28.5	28.5
320	28.6	28.6	28.5	28.6
320.5	28.5	28.6	28.5	28.5
321	28.6	28.7	28.6	28.5
321.5	28.6	28.7	28.6	28.5
322	28.6	28.7	28.6	28.6
322.5	28.7	28.7	28.7	28.6
323	28.7	28.7	28.7	28.7
323.5	28.7	28.8	28.7	28.7
324	28.8	28.8	28.7	28.7
324.5	28.9	28.9	28.8	28.7
325	28.9	29.0	28.8	28.6
325.5	28.8	29.0	28.8	28.7
326	28.9	29.0	28.9	28.9
326.5	29.0	29.0	28.9	29.0
327	29.0	29.0	28.9	28.9
327.5	29.1	29.0	28.9	28.8
328	29.1	29.1	29.0	28.9
328.5	29.1	29.2	29.0	28.9
329	29.1	29.2	29.0	29.0
329.5	29.2	29.3	29.1	29.2
330	29.3	29.3	29.1	29.1
330.5	29.3	29.3	29.1	29.0
331	29.3	29.3	29.2	28.9
331.5	29.3	29.3	29.2	29.1
332	29.4	29.4	29.3	29.2



332.5	29.4	29.5	29.3	29.3
333	29.4	29.5	29.3	29.2
333.5	29.5	29.5	29.3	29.3
334	29.5	29.5	29.4	29.3
334.5	29.6	29.5	29.4	29.2
335	29.7	29.6	29.4	29.2
335.5	29.6	29.6	29.5	29.6
336	29.7	29.7	29.5	29.6
336.5	29.7	29.8	29.6	29.4
337	29.7	29.8	29.6	29.4
337.5	29.9	29.8	29.6	29.5
338	29.9	29.8	29.6	29.6
338.5	29.9	29.8	29.7	29.7
339	29.9	29.9	29.6	29.7
339.5	29.9	29.9	29.7	29.8
340	29.9	30.0	29.7	29.7



[그림 18] 다이폴(VHAP) 안테나 인자 비교 측정 결과

UHAP 안테나 인자 측정값의 최대 차이는 RRA-KTL은 1.13dB, RRA-HCT는 1.07 dB, RRA-SICT는 1.13 dB로 4개 기관이 모두 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

[표 17] 다이폴(UHAP) 안테나 기관별 안테나 인자 측정값

주파수 (MHz)	안테나인자 측정값(dB/m)			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
280	26.90	27.00	27.68	27.00
281	26.94	27.00	27.67	26.90
282	26.91	26.90	27.67	27.00
283	26.97	26.90	27.65	26.90

284	26.98	26.90	27.66	26.90
285	27.01	26.90	27.62	26.90
286	27.00	26.90	27.64	26.90
287	27.05	26.90	27.59	26.90
288	27.12	26.90	27.59	26.90
289	27.02	27.00	27.56	27.00
290	27.17	27.00	27.56	26.80
291	27.12	26.90	27.54	27.00
292	27.19	26.90	27.52	26.80
293	27.21	27.00	27.53	27.00
294	27.29	27.00	27.53	26.90
295	27.21	27.00	27.52	27.00
296	27.30	27.00	27.50	26.90
297	27.30	27.10	27.52	27.00
298	27.41	27.20	27.50	27.00
299	27.34	27.00	27.50	27.00
300	27.40	27.00	27.54	27.00
301	27.44	27.20	27.51	27.10
302	27.51	27.30	27.50	27.00
303	27.44	27.20	27.53	27.10
304	27.61	27.30	27.55	27.10
305	27.53	27.30	27.53	27.20
306	27.64	27.40	27.56	27.30
307	27.64	27.40	27.58	27.20
308	27.70	27.60	27.59	27.40
309	27.79	27.50	27.61	27.40
310	27.85	27.60	27.68	27.30
311	27.88	27.70	27.73	27.70
312	28.01	27.80	27.78	27.50
313	27.94	27.80	27.81	27.70
314	28.03	27.90	27.86	27.90
315	28.08	28.00	27.92	27.70
316	28.14	28.10	27.99	27.90
317	28.19	28.10	28.08	28.00
318	28.26	28.20	28.11	28.00
319	28.29	28.30	28.19	28.00
320	28.46	28.30	28.29	28.20
321	28.49	28.50	28.34	28.20
322	28.59	28.50	28.41	28.20
323	28.62	28.60	28.51	28.40
324	28.72	28.60	28.56	28.40
325	28.84	28.80	28.66	28.40
326	28.86	28.80	28.77	28.70
327	29.02	28.90	28.81	28.70
328	29.13	29.00	28.95	28.70
329	29.08	29.10	29.02	28.90
330	29.28	29.10	29.11	29.00
331	29.28	29.20	29.14	28.90
332	29.40	29.40	29.25	29.10
333	29.48	29.40	29.23	29.30



334	29.57	29.40	29.35	29.10
335	29.68	29.50	29.39	29.30
336	29.78	29.60	29.40	29.50
337	29.80	29.70	29.50	29.40
338	29.96	29.80	29.52	29.60
339	30.01	29.90	29.61	29.70
340	30.07	29.90	29.71	29.70
550	33.24	33.70	34.11	33.50
551	33.12	33.70	34.10	33.70
552	33.10	33.70	33.97	33.60
553	33.15	33.60	33.89	33.60
554	33.16	33.60	33.79	33.70
555	33.07	33.70	33.78	33.50
556	33.10	33.80	33.67	33.60
557	33.14	33.80	33.69	33.70
558	33.13	33.80	33.71	33.50
559	33.09	33.50	33.69	33.70
560	33.07	33.60	33.70	33.70
561	33.06	33.80	33.71	33.50
562	33.17	33.90	33.82	33.50
563	33.02	33.70	33.88	33.60
564	33.13	33.70	33.89	33.60
565	33.13	33.70	33.97	33.50
566	33.16	33.90	33.84	33.60
567	33.19	33.80	33.90	33.50
568	33.15	33.80	33.85	33.40
569	33.29	33.80	33.77	33.50
570	33.24	34.00	33.74	33.40
571	33.25	33.90	33.74	33.30
572	33.40	33.80	33.67	33.50
573	33.40	33.80	33.65	33.20
574	33.51	33.80	33.62	33.40
575	33.44	33.90	33.58	33.30
576	33.47	34.00	33.57	33.30
577	33.48	33.90	33.65	33.30
578	33.59	33.80	33.58	33.40
579	33.54	33.90	33.59	33.30
580	33.64	33.90	33.54	33.30
581	33.66	33.80	33.48	33.30
582	33.65	33.80	33.51	33.40
583	33.73	33.80	33.49	33.30
584	33.68	33.90	33.44	33.40
585	33.78	33.80	33.46	33.40
586	33.74	33.90	33.41	33.40
587	33.69	33.80	33.40	33.40
588	33.87	33.60	33.37	33.40
589	33.69	33.70	33.37	33.40
590	33.81	33.80	33.38	33.20
591	33.70	33.90	33.43	33.30
592	33.70	33.70	33.45	33.20

593	33.77	33.70	33.42	33.30
594	33.80	33.50	33.50	33.10
595	33.90	33.70	33.42	33.20
596	33.85	33.80	33.50	33.10
597	33.85	33.70	33.49	33.00
598	33.94	33.50	33.46	33.20
599	34.00	33.50	33.52	33.10
600	34.00	33.60	33.59	33.10
601	33.90	33.60	33.57	33.10
602	34.03	33.50	33.55	33.20
603	33.90	33.60	33.60	33.20
604	33.98	33.50	33.59	33.20
605	33.93	33.50	33.69	33.30
606	33.91	33.50	33.67	33.30
607	33.97	33.60	33.66	33.30
608	33.83	33.60	33.73	33.30
609	33.99	33.60	33.77	33.50
610	33.88	33.70	33.81	33.40
611	33.97	33.70	33.80	33.60
612	33.90	33.60	33.88	33.60
613	33.94	33.60	33.87	33.80
614	33.90	33.70	33.95	33.80
615	33.97	33.70	33.87	33.80
616	34.02	33.70	33.90	34.00
617	33.93	33.90	33.92	34.20
618	33.92	33.70	33.90	34.00
619	33.91	33.60	33.90	34.00
620	33.84	33.80	33.87	34.00
621	33.87	33.90	33.84	33.90
622	33.84	33.90	33.90	33.70
623	33.84	33.70	33.84	33.90
624	33.89	33.90	33.89	33.70
625	33.84	34.00	33.95	33.60
626	33.91	34.00	33.94	33.80
627	33.95	33.90	34.09	33.50
628	33.96	34.10	33.97	33.60
629	34.01	34.10	33.98	33.70
630	34.04	34.10	33.99	33.50
631	33.96	34.20	33.99	33.50
632	34.12	34.20	34.01	33.70
633	34.01	34.20	34.06	33.60
634	34.12	34.20	34.17	33.60
635	34.06	34.10	34.02	33.80
636	34.18	34.30	34.01	33.70
637	34.06	34.40	34.00	33.70
638	34.22	34.50	33.97	33.90
639	34.06	34.40	34.00	33.90
640	34.17	34.30	34.07	33.80
641	34.20	34.30	34.06	34.10
642	34.19	34.40	34.19	33.90



643	34.17	34.50	34.35	33.90
644	34.18	34.50	34.40	34.00
645	34.08	34.50	34.56	33.90
646	34.18	34.50	34.57	33.90
647	34.07	34.50	34.63	34.00
648	34.15	34.50	34.73	34.00
649	34.21	34.60	34.76	33.90
650	34.22	34.50	34.81	34.00
651	34.30	34.60	34.87	34.00
652	34.26	34.60	34.79	33.90
653	34.19	34.60	34.67	34.10
654	34.34	34.60	34.61	34.20
655	34.37	34.60	34.57	34.10
656	34.35	34.70	34.49	34.20
657	34.45	34.70	34.50	34.30
658	34.40	34.80	34.54	34.30
659	34.43	34.70	34.59	34.50
660	34.47	34.70	34.62	34.40
900	38.57	38.50	38.35	37.60
901	38.58	38.30	38.22	37.80
902	38.67	38.10	38.21	37.90
903	38.66	38.20	38.00	37.90
904	38.61	38.40	37.87	38.00
905	38.66	38.40	38.12	38.10
906	38.62	38.50	38.05	38.20
907	38.68	38.40	38.16	38.10
908	38.69	38.30	38.11	38.10
909	38.60	38.50	38.25	38.20
910	38.55	38.60	38.27	38.00
911	38.57	38.30	38.09	38.10
912	38.43	38.40	38.17	38.10
913	38.52	38.50	37.97	37.90
914	38.40	38.50	38.04	38.00
915	38.44	38.60	38.01	38.00
916	38.51	38.60	37.91	37.90
917	38.43	38.60	37.81	38.00
918	38.50	38.30	37.86	38.00
919	38.46	38.70	37.96	37.90
920	38.47	38.70	37.98	38.00
921	38.42	38.70	37.94	38.00
922	38.32	38.60	38.17	38.00
923	38.34	38.70	38.10	38.10
924	38.39	38.60	38.10	38.20
925	38.35	38.80	37.98	37.90
926	38.33	38.80	38.08	38.30
927	38.35	38.80	38.07	38.30
928	38.37	38.70	37.70	38.20
929	38.36	38.80	37.63	38.30
930	38.35	38.90	37.73	38.30
931	38.34	38.80	37.62	38.00

932	38.32	38.70	37.88	38.10
933	38.25	38.70	38.02	37.90
934	38.34	38.70	38.13	37.80
935	38.17	38.80	38.03	37.80
936	38.26	39.00	38.00	37.60
937	38.21	38.80	38.21	37.60
938	38.15	38.50	38.10	37.50
939	38.12	38.60	38.48	37.50
940	38.15	38.80	38.29	37.50
941	38.05	38.70	38.50	37.50
942	37.96	38.70	38.35	37.60
943	37.91	38.80	38.54	37.60
944	37.89	38.90	38.39	37.60
945	37.86	38.70	38.62	37.60
946	37.87	38.50	38.66	37.60
947	37.86	38.50	38.70	37.50
948	37.94	38.70	38.59	37.60
949	37.84	38.70	38.36	37.50
950	37.84	38.80	38.55	37.50
951	37.74	39.00	38.39	37.50
952	37.62	38.80	38.22	37.50
953	37.66	38.70	38.36	37.50
954	37.54	38.70	38.25	37.40
955	37.57	38.50	38.07	37.60
956	37.60	38.80	37.97	37.50
957	37.56	38.70	38.08	37.60
958	37.57	38.70	37.90	37.70
959	37.53	38.70	38.11	37.70
960	37.44	38.70	38.05	37.80
961	37.50	38.60	37.98	37.90
962	37.37	38.70	37.96	37.90
963	37.35	38.80	38.13	38.10
964	37.30	38.50	38.17	38.10
965	37.26	38.40	37.91	38.20
966	37.25	38.50	37.86	38.30
967	37.22	38.60	38.02	38.20
968	37.28	38.60	38.04	38.20
969	37.22	38.50	37.75	38.20
970	37.27	38.40	37.79	38.10
971	37.32	38.30	37.62	38.20
972	37.21	38.20	37.73	38.20
973	37.31	38.40	37.70	38.00
974	37.28	38.50	37.70	38.20
975	37.35	38.60	37.76	38.10
976	37.44	38.30	37.49	38.00
977	37.56	38.40	37.55	38.10
978	37.47	38.50	37.70	38.00
979	37.56	38.40	37.71	38.00
980	37.52	38.50	37.70	38.00
981	37.54	38.40	37.80	38.00



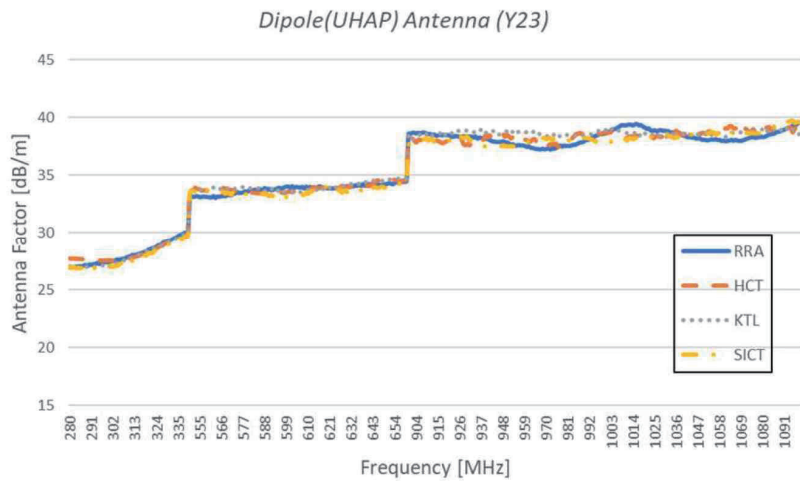
982	37.52	38.40	37.90	38.00
983	37.59	38.40	38.20	38.00
984	37.62	38.40	38.40	38.00
985	37.64	38.40	38.60	38.00
986	37.75	38.40	38.60	38.10
987	37.81	38.50	38.70	38.00
988	37.83	38.40	38.60	38.20
989	37.90	38.40	38.70	38.20
990	38.06	38.40	38.60	38.20
991	38.03	38.50	38.60	38.20
992	38.11	38.60	38.60	38.10
993	38.19	38.50	38.60	38.10
994	38.29	38.60	38.60	38.00
995	38.40	38.70	38.60	37.90
996	38.47	38.80	38.70	38.00
997	38.53	38.80	38.60	37.80
998	38.53	38.80	38.63	37.90
999	38.58	38.70	38.73	37.90
1000	38.62	38.90	38.71	37.90
1001	38.66	38.70	38.72	37.80
1002	38.78	38.90	38.73	37.80
1003	38.83	39.00	38.74	37.90
1004	38.98	38.80	38.67	37.70
1005	38.99	38.90	38.58	37.90
1006	39.10	38.90	38.41	37.90
1007	39.20	38.80	38.33	37.90
1008	39.31	38.70	38.27	38.00
1009	39.33	38.70	38.35	38.00
1010	39.30	38.70	38.26	38.10
1011	39.33	38.60	38.26	38.00
1012	39.38	38.50	38.40	38.20
1013	39.36	38.50	38.41	38.20
1014	39.30	38.60	38.32	38.10
1015	39.41	38.60	38.47	38.20
1016	39.43	38.30	38.46	38.20
1017	39.31	38.30	38.47	38.20
1018	39.33	38.60	38.52	38.20
1019	39.20	38.40	38.38	38.10
1020	39.13	38.60	38.39	38.20
1021	39.00	38.40	38.29	38.20
1022	39.04	38.40	38.14	38.10
1023	38.85	38.40	38.41	38.30
1024	38.84	38.50	38.25	38.30
1025	38.89	38.60	38.29	38.30
1026	38.79	38.60	38.45	38.40
1027	38.86	38.40	38.39	38.40
1028	38.90	38.40	38.32	38.50
1029	38.84	38.40	38.41	38.50
1030	38.84	38.50	38.55	38.50
1031	38.81	38.30	38.62	38.60



1032	38.80	38.50	38.65	38.40
1033	38.66	38.70	38.39	38.30
1034	38.72	38.40	38.49	38.30
1035	38.59	38.20	38.74	38.20
1036	38.72	38.60	38.87	38.30
1037	38.69	38.60	38.60	38.30
1038	38.59	38.50	38.60	38.20
1039	38.44	38.50	38.50	38.40
1040	38.40	38.70	38.60	38.50
1041	38.33	38.50	38.70	38.40
1042	38.27	38.50	38.60	38.60
1043	38.30	38.50	38.60	38.60
1044	38.23	38.60	38.80	38.50
1045	38.25	38.60	38.83	38.60
1046	38.15	38.60	38.82	38.50
1047	38.17	38.50	38.70	38.50
1048	38.17	38.40	38.60	38.60
1049	38.05	38.50	38.70	38.60
1050	38.06	38.50	38.70	38.60
1051	38.03	38.70	38.60	38.70
1052	38.01	38.50	38.80	38.60
1053	38.06	38.40	38.83	38.70
1054	38.08	38.50	38.77	38.70
1055	38.06	38.50	38.92	38.70
1056	38.11	38.40	38.87	38.50
1057	38.02	38.60	38.89	38.60
1058	38.04	38.60	39.10	38.70
1059	37.95	38.50	39.08	38.50
1060	37.99	38.50	39.02	38.60
1061	37.92	38.30	39.10	38.70
1062	37.97	38.50	39.10	38.50
1063	37.99	38.60	39.30	38.60
1064	38.05	38.60	39.28	38.70
1065	37.97	38.70	39.10	38.60
1066	38.05	38.80	39.10	38.70
1067	37.98	38.80	38.97	38.60
1068	37.96	38.70	38.85	38.70
1069	37.96	38.70	39.26	38.60
1070	38.02	38.70	38.91	38.60
1071	38.09	38.80	39.06	38.70
1072	38.16	38.70	38.95	38.60
1073	38.22	39.00	38.81	38.60
1074	38.26	38.90	38.81	38.70
1075	38.31	38.80	39.03	38.60
1076	38.21	38.90	38.79	38.60
1077	38.29	38.90	38.82	38.60
1078	38.28	39.00	39.03	38.60
1079	38.33	39.00	39.27	38.60
1080	38.29	38.90	39.19	38.70
1081	38.33	39.10	39.39	38.70



1082	38.42	38.80	39.09	38.70
1083	38.51	39.00	39.22	38.90
1084	38.52	39.00	38.91	39.00
1085	38.57	38.90	39.05	39.10
1086	38.61	39.10	39.36	39.20
1087	38.75	39.10	39.30	39.40
1088	38.75	38.90	39.20	39.40
1089	38.83	38.90	39.40	39.50
1090	38.89	38.70	39.30	39.50
1091	38.95	38.90	39.20	39.70
1092	39.03	39.00	39.20	39.60
1093	39.13	38.80	39.15	39.60
1094	39.13	38.70	39.15	39.70
1095	39.31	38.90	38.75	39.70
1096	39.35	38.90	39.03	39.50
1097	39.39	38.70	39.21	39.60
1098	39.55	38.50	38.99	39.60
1099	39.54	38.70	39.34	39.50
1100	39.59	38.90	39.36	39.50



[그림 19] 다이폴(UHAP) 안테나 인자 비교 측정 결과

#### 4. 수행도 평가

안테나인자 측정 결과에 대한 동일점 검증은 교정분야 숙련도시험에서 주로 사용하는 ISO13528의 En스코어 통계기법을 적용하였다. En스코어는 교정분야 숙련도 시험의 결과를 해석할 때 사용하는 통계적 방법으로, 측정값 뿐만 아니라 시험장의 측정불확도까지 포함하여 측정 동일성의 만족 여부를 판단한다.  $|E_n|$  값이 1보다 작으면 동일성을 만족한다고 본다.

측정불확도 값을 포함하여 동일성을 검증하는  $|E_n|$  값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (58)$$

위 식 (58)에서  $x$ 는 참가 시험소의 측정값,  $X$ 는 기준시험소의 측정값을 의미하며,  $U_{lab}$ 는 참가시험소의 측정불확도를,  $U_{ref}$ 는 기준시험소의 측정불확도를 의미한다. 기준시험소는 전파시험인증센터로 하고, 참가시험소는 HCT와 한국산업기술시험원, 교정기술원으로 적용한다.

En 스코어 산출을 위해 각 기관에서 제출한 측정불확도는 다음과 같다.

[표 18] 각 기관의 측정불확도

측정불확도 (dB)			
전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
0.69	1.50	1.30	1.20

가. 바이로그 안테나 비교시험 수행도 평가

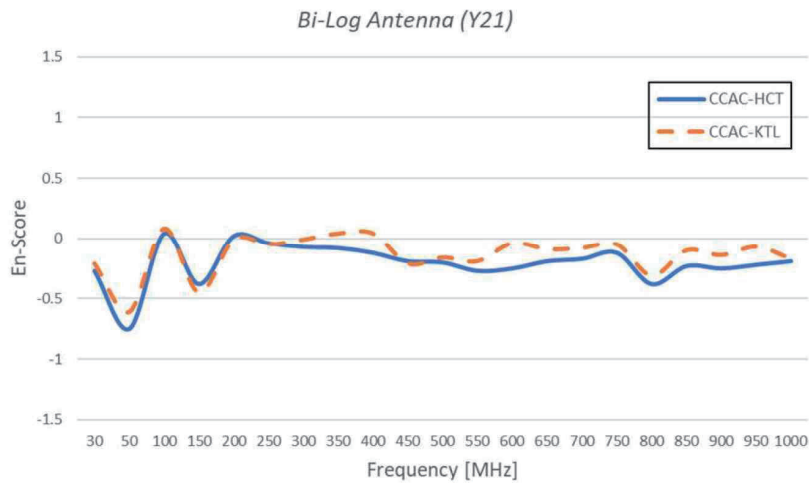
바이로그 안테나 수행도 평가결과를 통해  $|E_n|$  값이 모두 1 이내로 동일성을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

[표 19] 바이로그 안테나 비교시험 수행도

주파수 (MHz)	$E_n$	
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교
30	-0.21	-0.27
50	-0.61	-0.75
100	0.08	0.04
150	-0.45	-0.38
200	-0.01	0.02
250	-0.05	-0.04
300	-0.01	-0.07
350	0.04	-0.08
400	0.04	-0.12
450	-0.21	-0.19
500	-0.16	-0.2
550	-0.19	-0.27



600	-0.04	-0.25
650	-0.09	-0.19
700	-0.08	-0.17
750	-0.05	-0.12
800	-0.31	-0.38
850	-0.1	-0.23
900	-0.14	-0.25
950	-0.07	-0.22
1000	-0.17	-0.19



[그림 20] 바이로그 안테나 수행도 비교

나. 혼 안테나 비교시험 수행도 평가

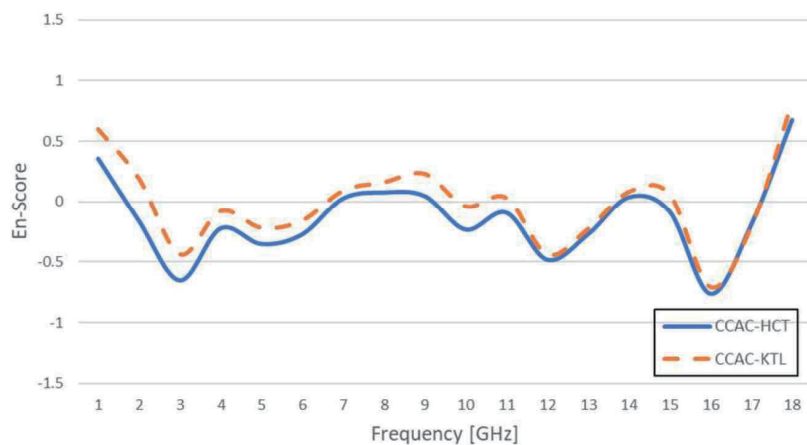
혼 안테나 수행도 평가결과를 통해  $|E_n|$  값이 모두 1 이내로 동일성을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

[표 20] 혼 안테나 비교시험 수행도

주파수 (GHz)	$E_n$	
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교
1	0.6	0.36
2	0.19	-0.16
3	-0.44	-0.65
4	-0.08	-0.22
5	-0.22	-0.35
6	-0.16	-0.27

7	0.09	0.03
8	0.16	0.08
9	0.23	0.05
10	-0.04	-0.23
11	0.03	-0.09
12	-0.44	-0.48
13	-0.23	-0.27
14	0.08	0.04
15	0.06	-0.08
16	-0.71	-0.76
17	-0.21	-0.19
18	0.82	0.68

Horn Antenna (Y21)



[그림 21] 혼 안테나 수행도 비교

다. 바이코니컬 안테나 인자 비교시험 수행도 평가

바이코니컬 안테나 인자 비교시험 수행도 평가결과  $|E_n|$  값의 최댓값은 0.84이다. 이를 통해  $|E_n|$  값이 모두 1 이내로 동일성을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

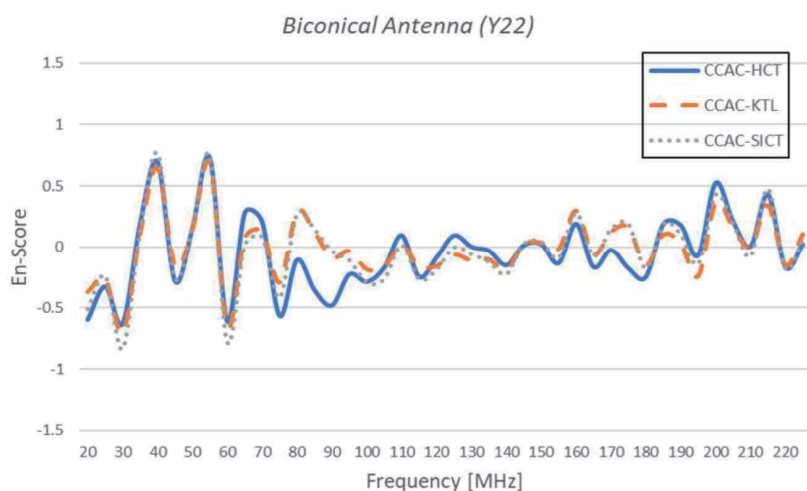
[표 21] 바이코니컬 안테나 비교시험 수행도

주파수 (MHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
20	-0.37	-0.60	-0.51
25	-0.26	-0.33	-0.24
30	-0.70	-0.63	-0.84
35	0.11	0.19	0.13



40	0.65	0.69	0.77
45	-0.16	-0.28	-0.26
50	0.15	0.16	0.17
55	0.68	0.73	0.74
60	-0.66	-0.61	-0.78
65	0.07	0.28	0.02
70	0.13	0.21	0.09
75	-0.29	-0.57	-0.42
80	0.29	-0.11	0.28
85	0.12	-0.36	0.15
90	-0.09	-0.48	-0.03
95	-0.03	-0.23	-0.11
100	-0.18	-0.29	-0.29
105	-0.16	-0.17	-0.26
110	0.02	0.09	0.02
115	-0.16	-0.25	-0.27
120	-0.15	-0.09	-0.18
125	-0.06	0.09	0.00
130	-0.11	0.00	-0.06
135	-0.10	-0.03	-0.12
140	-0.19	-0.15	-0.22
145	0.02	0.01	0.03
150	0.04	0.02	0.04
155	-0.01	-0.13	-0.09
160	0.30	0.19	0.28
165	-0.06	-0.17	-0.07
170	0.12	-0.03	0.15
175	0.16	-0.18	0.19
180	-0.15	-0.25	-0.18
185	0.10	0.19	0.19
190	0.03	0.18	0.11
195	-0.24	-0.07	-0.14
200	0.36	0.52	0.43
205	0.16	0.21	0.20
210	0.00	0.00	-0.08
215	0.34	0.43	0.48
220	-0.15	-0.17	-0.18
225	0.11	0.02	0.06
230	0.25	0.11	0.30
235	0.21	0.06	0.25
240	0.27	0.00	0.40
245	0.17	-0.09	0.20
250	0.00	-0.34	-0.07
255	0.27	0.09	0.32

260	0.05	-0.06	-0.02
265	-0.02	0.06	0.12
270	0.36	0.62	0.58
275	0.07	0.33	0.23
280	0.37	0.61	0.44
285	0.50	0.75	0.60
290	-0.11	-0.07	-0.20
295	0.44	0.45	0.38
300	-0.19	-0.28	-0.22



[그림 22] 바이코니컬 안테나 수행도 비교

라. 루프 안테나 인자 비교 측정 수행도 평가

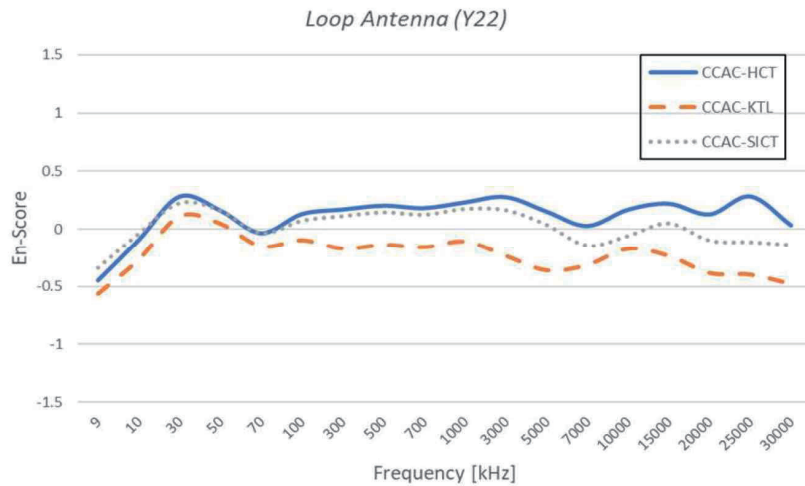
루프 안테나의 비교 측정 수행도 평가 결과,  $|E_n|$  값의 최댓값은 0.74로 나타났다. 이로써 루프 안테나 역시  $|E_n|$  값이 모두 1 이내로, 동일성을 만족한다고 볼 수 있다.

[표 22] 루프 안테나 비교시험 수행도

주파수 (kHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
9	-0.56	-0.45	-0.34
10	-0.26	-0.09	-0.04
30	0.11	0.28	0.23
50	0.05	0.16	0.16
70	-0.15	-0.03	-0.03
100	-0.09	0.13	0.08



300	-0.17	0.17	0.11
500	-0.14	0.20	0.15
700	-0.16	0.18	0.13
1000	-0.11	0.23	0.18
3000	-0.23	0.28	0.17
5000	-0.36	0.15	0.04
7000	-0.31	0.03	-0.14
10000	-0.17	0.17	-0.06
15000	-0.23	0.22	0.05
20000	-0.38	0.13	-0.10
25000	-0.39	0.28	-0.11
30000	-0.48	0.03	-0.14



[그림 23] 루프 안테나 수행도 비교

마. LPDA 비교시험 수행도 평가

혼 안테나 수행도 평가결과를 통해  $|E_n|$  값이 모두 1 이내로 동일성을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

[표 23] LPDA 비교시험 수행도

주파수 (MHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
300	-0.14	-0.08	-0.09
305	-0.07	0.01	-0.01
310	-0.12	-0.03	-0.07
315	-0.11	-0.06	-0.14

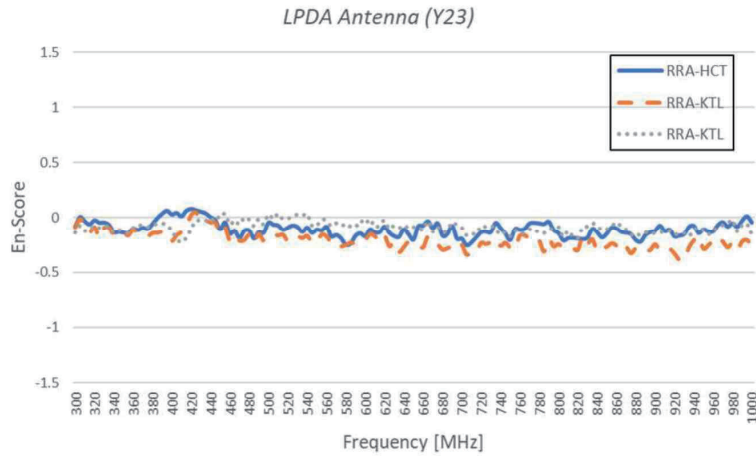


320	-0.07	-0.02	-0.09
325	-0.09	-0.04	-0.18
330	-0.08	-0.04	-0.09
335	-0.08	-0.06	-0.09
340	-0.13	-0.13	-0.16
345	-0.11	-0.12	-0.14
350	-0.12	-0.13	-0.15
355	-0.14	-0.13	-0.16
360	-0.09	-0.10	-0.11
365	-0.06	-0.11	-0.15
370	-0.08	-0.09	-0.16
375	-0.08	-0.10	-0.17
380	-0.06	-0.05	-0.14
385	-0.06	0.00	-0.14
390	-0.05	0.04	-0.13
395	-0.07	0.07	-0.15
400	-0.12	0.03	-0.22
405	-0.20	0.05	-0.16
410	-0.23	0.02	-0.13
415	-0.19	0.07	-0.08
420	-0.10	0.08	0.02
425	-0.02	0.07	0.05
430	-0.03	0.06	-0.04
435	-0.02	0.04	-0.03
440	-0.04	0.01	-0.04
445	0.02	-0.02	-0.05
450	0.00	-0.10	-0.15
455	0.04	-0.04	-0.09
460	-0.06	-0.14	-0.21
465	-0.02	-0.12	-0.17
470	-0.06	-0.18	-0.21
475	0.01	-0.12	-0.21
480	-0.01	-0.11	-0.16
485	-0.07	-0.19	-0.23
490	-0.01	-0.13	-0.15
495	-0.06	-0.13	-0.21
500	0.04	-0.04	-0.17
505	-0.01	-0.06	-0.15
510	0.04	-0.07	-0.17
515	-0.01	-0.11	-0.16
520	0.00	-0.09	-0.22
525	0.01	-0.07	-0.20
530	0.03	-0.08	-0.18
535	0.02	-0.13	-0.19
540	0.04	-0.09	-0.17
545	-0.07	-0.14	-0.23
550	-0.07	-0.10	-0.23
555	-0.01	-0.11	-0.16
560	-0.03	-0.08	-0.17
565	-0.08	-0.17	-0.24



570	-0.05	-0.16	-0.27
575	-0.04	-0.18	-0.27
580	-0.09	-0.25	-0.25
585	-0.07	-0.23	-0.23
590	-0.08	-0.16	-0.24
595	-0.02	-0.14	-0.24
600	-0.06	-0.17	-0.21
605	-0.01	-0.10	-0.15
610	-0.08	-0.13	-0.17
615	-0.07	-0.13	-0.22
620	-0.02	-0.08	-0.17
625	-0.10	-0.14	-0.27
630	-0.07	-0.17	-0.23
635	-0.08	-0.17	-0.32
640	-0.11	-0.10	-0.27
645	-0.07	-0.15	-0.22
650	-0.08	-0.20	-0.24
655	-0.10	-0.07	-0.26
660	-0.11	-0.07	-0.27
665	-0.03	-0.03	-0.18
670	-0.13	-0.09	-0.22
675	-0.09	-0.04	-0.25
680	-0.13	-0.16	-0.30
685	-0.12	-0.15	-0.28
690	-0.04	-0.07	-0.26
695	-0.07	-0.19	-0.22
700	-0.09	-0.19	-0.25
705	-0.16	-0.25	-0.34
710	-0.15	-0.22	-0.32
715	-0.15	-0.18	-0.32
720	-0.07	-0.13	-0.23
725	-0.08	-0.12	-0.24
730	-0.07	-0.13	-0.23
735	-0.10	-0.04	-0.20
740	-0.16	-0.09	-0.26
745	-0.13	-0.14	-0.23
750	-0.17	-0.20	-0.28
755	-0.12	-0.10	-0.28
760	-0.14	-0.11	-0.17
765	-0.14	-0.10	-0.16
770	-0.11	-0.05	-0.20
775	-0.13	-0.04	-0.23
780	-0.12	-0.05	-0.21
785	-0.14	-0.05	-0.31
790	-0.11	-0.03	-0.20
795	-0.10	-0.11	-0.27
800	-0.09	-0.14	-0.25
805	-0.18	-0.21	-0.28
810	-0.12	-0.19	-0.29
815	-0.18	-0.18	-0.28

820	-0.19	-0.19	-0.30
825	-0.09	-0.19	-0.18
830	-0.08	-0.18	-0.24
835	-0.05	-0.10	-0.20
840	-0.08	-0.13	-0.31
845	-0.11	-0.18	-0.28
850	-0.11	-0.14	-0.27
855	-0.08	-0.09	-0.24
860	-0.04	-0.10	-0.26
865	-0.08	-0.13	-0.31
870	-0.11	-0.13	-0.27
875	-0.15	-0.15	-0.33
880	-0.18	-0.20	-0.29
885	-0.15	-0.22	-0.32
890	-0.14	-0.16	-0.31
895	-0.13	-0.13	-0.30
900	-0.15	-0.12	-0.25
905	-0.13	-0.07	-0.30
910	-0.13	-0.12	-0.30
915	-0.12	-0.11	-0.29
920	-0.16	-0.17	-0.33
925	-0.14	-0.16	-0.39
930	-0.14	-0.15	-0.39
935	-0.17	-0.08	-0.28
940	-0.12	-0.07	-0.21
945	-0.09	-0.14	-0.18
950	-0.12	-0.10	-0.29
955	-0.15	-0.12	-0.26
960	-0.12	-0.12	-0.22
965	-0.09	-0.06	-0.18
970	-0.07	-0.04	-0.22
975	-0.05	-0.08	-0.27
980	-0.02	-0.05	-0.24
985	-0.13	-0.08	-0.30
990	-0.06	-0.02	-0.22
995	-0.05	0.02	-0.21
1000	-0.16	-0.04	-0.26



[그림 24] LPDA 수행도 비교

바. 다이폴 비교시험 수행도 평가

다이폴 안테나 수행도 평가결과를 통해 VHF대역 VHAP와 UHF대역 UHAP 모두  $|E_n|$  값이 1 이내로 동일성을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

[표 24] 다이폴 안테나(VHAP) 비교시험 수행도

주파수 (MHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
25	-0.02	0.16	-0.14
25.5	-0.09	0.16	-0.18
26	-0.03	0.23	-0.15
26.5	-0.06	0.31	-0.24
27	-0.06	0.42	-0.19
27.5	0.01	0.50	-0.06
28	-0.03	0.38	-0.10
28.5	-0.03	0.36	-0.05
29	0.04	0.41	0.04
29.5	-0.01	0.19	-0.13
30	0.00	-0.02	-0.15
30.5	0.05	-0.09	-0.08
31	0.00	-0.21	-0.06
31.5	0.00	-0.39	-0.06
32	0.03	-0.49	-0.03
32.5	-0.02	-0.61	-0.18
33	0.00	-0.62	-0.10
33.5	0.02	-0.73	-0.03
34	-0.06	-0.88	-0.08
34.5	-0.04	-0.84	-0.05
35	0.01	-0.75	-0.03

90	-0.39	-0.66	-0.58
90.5	-0.41	-0.69	-0.55
91	-0.42	-0.69	-0.56
91.5	-0.40	-0.63	-0.55
92	-0.39	-0.66	-0.66
92.5	-0.37	-0.66	-0.64
93	-0.31	-0.59	-0.56
93.5	-0.28	-0.52	-0.50
94	-0.24	-0.43	-0.50
94.5	-0.21	-0.43	-0.45
95	-0.16	-0.36	-0.40
95.5	-0.13	-0.25	-0.29
96	-0.11	-0.18	-0.29
96.5	-0.07	-0.12	-0.20
97	-0.04	-0.11	-0.13
97.5	-0.03	-0.02	-0.15
98	-0.02	0.02	-0.14
98.5	0.03	0.08	-0.07
99	0.05	0.08	0.05
99.5	0.03	0.11	0.02
100	0.05	0.18	0.04
100.5	0.06	0.21	0.04
101	0.07	0.18	0.11
101.5	0.09	0.21	0.04
102	0.10	0.24	0.10
102.5	0.11	0.30	0.08
103	0.13	0.31	0.16
103.5	0.15	0.27	0.14
104	0.16	0.33	0.13
104.5	0.16	0.35	0.11
105	0.14	0.32	0.07
105.5	0.16	0.34	0.24
106	0.15	0.35	0.21
106.5	0.17	0.43	0.19
107	0.15	0.41	0.18
107.5	0.17	0.35	0.16
108	0.21	0.37	0.25
108.5	0.25	0.46	0.30
109	0.25	0.45	0.31
109.5	0.20	0.36	0.23
110	0.18	0.33	0.18
280	-0.02	-0.06	-0.01
280.5	0.00	-0.04	-0.01
281	0.01	-0.07	-0.01
281.5	-0.02	-0.09	-0.03
282	-0.04	-0.06	0.07
282.5	-0.09	-0.09	-0.09
283	-0.06	-0.07	0.04
283.5	-0.07	-0.07	0.01
284	-0.06	-0.13	-0.09

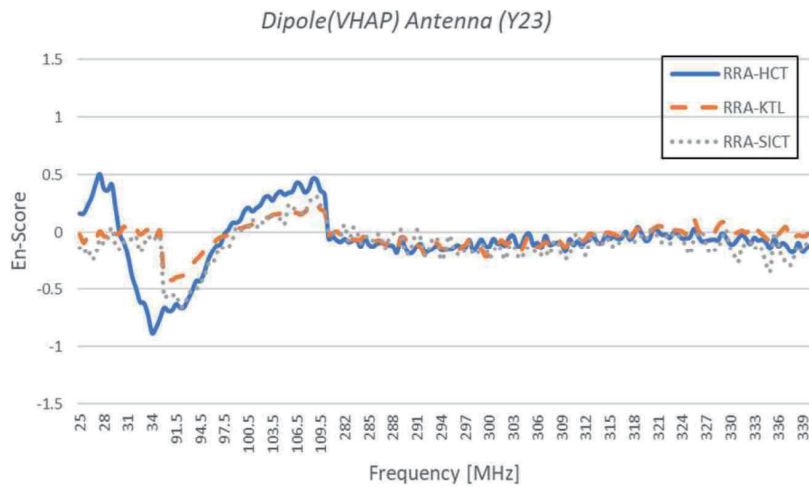


284.5	-0.03	-0.05	-0.05
285	-0.07	-0.11	-0.03
285.5	-0.09	-0.13	-0.07
286	-0.07	-0.10	-0.02
286.5	-0.07	-0.09	-0.03
287	-0.11	-0.10	-0.15
287.5	-0.09	-0.12	-0.06
288	-0.13	-0.12	-0.02
288.5	-0.15	-0.18	0.02
289	-0.05	-0.05	0.02
289.5	-0.05	-0.13	-0.18
290	-0.13	-0.19	-0.18
290.5	-0.12	-0.18	-0.09
291	-0.11	-0.12	0.02
291.5	-0.14	-0.10	-0.07
292	-0.20	-0.18	-0.21
292.5	-0.17	-0.16	-0.14
293	-0.12	-0.15	-0.05
293.5	-0.09	-0.12	-0.05
294	-0.14	-0.16	-0.25
294.5	-0.15	-0.16	-0.17
295	-0.17	-0.15	-0.02
295.5	-0.20	-0.15	-0.13
296	-0.18	-0.11	-0.19
296.5	-0.14	-0.13	-0.20
297	-0.11	-0.15	-0.15
297.5	-0.07	-0.07	-0.10
298	-0.11	-0.16	-0.19
298.5	-0.16	-0.12	-0.19
299	-0.15	-0.06	-0.12
299.5	-0.21	-0.12	-0.12
300	-0.20	-0.13	-0.23
300.5	-0.14	-0.06	-0.18
301	-0.11	-0.10	-0.12
301.5	-0.07	-0.10	-0.17
302	-0.10	-0.12	-0.25
302.5	-0.09	-0.05	-0.12
303	-0.08	-0.03	-0.12
303.5	-0.13	-0.12	-0.20
304	-0.16	-0.11	-0.24
304.5	-0.08	-0.03	-0.15
305	-0.03	-0.01	-0.14
305.5	-0.10	-0.11	-0.15
306	-0.13	-0.09	-0.20
306.5	-0.11	-0.14	-0.20
307	-0.08	-0.03	-0.17
307.5	-0.10	-0.11	-0.21
308	-0.06	-0.10	-0.09
308.5	-0.05	-0.09	-0.08
309	-0.10	-0.10	-0.21

309.5	-0.13	-0.17	-0.23
310	-0.08	-0.06	-0.21
310.5	-0.06	-0.11	-0.07
311	-0.07	-0.08	-0.01
311.5	-0.08	-0.12	-0.13
312	-0.06	-0.08	-0.20
312.5	-0.01	-0.07	-0.08
313	-0.02	-0.04	-0.01
313.5	-0.05	-0.09	-0.10
314	-0.05	-0.09	-0.12
314.5	-0.01	-0.03	-0.01
315	0.00	-0.06	-0.11
315.5	-0.01	-0.04	-0.13
316	-0.03	-0.06	-0.12
316.5	0.01	-0.05	-0.04
317	0.01	0.00	0.00
317.5	-0.04	-0.06	-0.03
318	0.00	-0.02	-0.09
318.5	0.03	0.05	-0.05
319	0.01	-0.01	-0.03
319.5	-0.04	-0.07	-0.07
320	0.00	-0.05	0.02
320.5	0.03	0.03	0.01
321	0.05	0.01	-0.04
321.5	0.05	-0.02	-0.09
322	0.03	-0.02	-0.03
322.5	-0.02	-0.05	-0.10
323	0.02	0.00	-0.01
323.5	0.02	-0.02	-0.03
324	0.01	-0.05	-0.06
324.5	-0.01	-0.05	-0.12
325	0.06	-0.04	-0.20
325.5	0.11	0.03	-0.06
326	0.02	-0.03	-0.02
326.5	-0.02	-0.08	0.00
327	-0.02	-0.08	-0.11
327.5	-0.01	-0.07	-0.19
328	-0.01	-0.06	-0.16
328.5	0.05	-0.07	-0.14
329	0.09	-0.01	-0.05
329.5	0.07	-0.05	0.02
330	0.02	-0.10	-0.14
330.5	-0.01	-0.10	-0.20
331	0.00	-0.05	-0.27
331.5	0.02	-0.02	-0.12
332	0.00	-0.06	-0.12
332.5	0.03	-0.10	-0.09
333	0.07	-0.05	-0.15
333.5	0.02	-0.07	-0.12
334	-0.02	-0.07	-0.16



334.5	-0.05	-0.09	-0.29
335	-0.07	-0.15	-0.35
335.5	0.00	-0.06	-0.01
336	-0.02	-0.12	-0.10
336.5	0.02	-0.09	-0.24
337	0.04	-0.12	-0.25
337.5	-0.06	-0.17	-0.29
338	-0.04	-0.17	-0.21
338.5	-0.02	-0.09	-0.12
339	-0.03	-0.17	-0.16
339.5	-0.03	-0.14	-0.10
340	0.02	-0.11	-0.16



[그림 25] 다이폴 안테나(VHAP) 수행도 비교

[표 25] 다이폴 안테나(UHAP) 비교시험 수행도

주파수 (MHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
280	0.05	0.48	0.07
281	0.03	0.44	-0.03
282	0.00	0.46	0.07
283	-0.04	0.41	-0.05
284	-0.04	0.41	-0.06
285	-0.06	0.37	-0.08
286	-0.05	0.39	-0.07
287	-0.08	0.32	-0.11
288	-0.12	0.28	-0.16
289	-0.01	0.33	-0.02
290	-0.09	0.24	-0.27
291	-0.12	0.25	-0.09



292	-0.15	0.20	-0.28
293	-0.11	0.19	-0.15
294	-0.15	0.14	-0.28
295	-0.11	0.19	-0.15
296	-0.16	0.12	-0.29
297	-0.11	0.13	-0.22
298	-0.11	0.06	-0.29
299	-0.17	0.10	-0.24
300	-0.21	0.08	-0.29
301	-0.12	0.04	-0.24
302	-0.11	0.00	-0.36
303	-0.12	0.05	-0.25
304	-0.16	-0.04	-0.37
305	-0.12	0.00	-0.24
306	-0.12	-0.04	-0.24
307	-0.12	-0.03	-0.32
308	-0.05	-0.07	-0.21
309	-0.15	-0.11	-0.28
310	-0.13	-0.11	-0.40
311	-0.09	-0.09	-0.13
312	-0.11	-0.14	-0.37
313	-0.07	-0.08	-0.17
314	-0.07	-0.11	-0.10
315	-0.04	-0.10	-0.28
316	-0.02	-0.09	-0.17
317	-0.04	-0.06	-0.13
318	-0.03	-0.09	-0.19
319	0.00	-0.06	-0.21
320	-0.08	-0.10	-0.19
321	0.01	-0.09	-0.21
322	-0.05	-0.11	-0.28
323	-0.01	-0.07	-0.16
324	-0.06	-0.10	-0.23
325	-0.02	-0.11	-0.32
326	-0.03	-0.05	-0.11
327	-0.06	-0.13	-0.23
328	-0.07	-0.11	-0.31
329	0.01	-0.03	-0.13
330	-0.09	-0.10	-0.20
331	-0.04	-0.09	-0.28
332	0.00	-0.09	-0.21
333	-0.04	-0.16	-0.13
334	-0.09	-0.13	-0.34
335	-0.09	-0.18	-0.27
336	-0.09	-0.23	-0.20
337	-0.05	-0.18	-0.29
338	-0.08	-0.27	-0.26
339	-0.06	-0.24	-0.22
340	-0.09	-0.22	-0.27
550	0.24	0.53	0.19



551	0.30	0.60	0.42
552	0.31	0.53	0.36
553	0.23	0.45	0.32
554	0.23	0.38	0.39
555	0.33	0.43	0.31
556	0.36	0.35	0.36
557	0.34	0.33	0.41
558	0.35	0.35	0.27
559	0.21	0.37	0.44
560	0.28	0.38	0.46
561	0.38	0.39	0.31
562	0.38	0.39	0.24
563	0.36	0.52	0.42
564	0.29	0.46	0.34
565	0.30	0.51	0.27
566	0.38	0.41	0.32
567	0.32	0.43	0.23
568	0.34	0.42	0.18
569	0.26	0.29	0.15
570	0.39	0.30	0.11
571	0.34	0.30	0.04
572	0.21	0.17	0.07
573	0.21	0.15	-0.15
574	0.15	0.06	-0.08
575	0.24	0.08	-0.10
576	0.27	0.06	-0.13
577	0.22	0.10	-0.13
578	0.11	-0.01	-0.14
579	0.19	0.03	-0.17
580	0.13	-0.06	-0.25
581	0.07	-0.11	-0.26
582	0.08	-0.09	-0.18
583	0.04	-0.15	-0.31
584	0.11	-0.14	-0.20
585	0.01	-0.20	-0.28
586	0.08	-0.21	-0.25
587	0.06	-0.17	-0.21
588	-0.14	-0.30	-0.34
589	0.01	-0.19	-0.21
590	-0.01	-0.26	-0.44
591	0.10	-0.16	-0.29
592	0.00	-0.16	-0.36
593	-0.04	-0.21	-0.34
594	-0.15	-0.18	-0.50
595	-0.10	-0.29	-0.50
596	-0.02	-0.21	-0.54
597	-0.08	-0.22	-0.62
598	-0.23	-0.29	-0.54
599	-0.26	-0.29	-0.65
600	-0.21	-0.25	-0.65

601	-0.16	-0.20	-0.58
602	-0.27	-0.29	-0.60
603	-0.16	-0.19	-0.51
604	-0.25	-0.23	-0.56
605	-0.22	-0.15	-0.46
606	-0.22	-0.15	-0.44
607	-0.19	-0.19	-0.49
608	-0.12	-0.06	-0.39
609	-0.20	-0.13	-0.35
610	-0.10	-0.04	-0.35
611	-0.14	-0.10	-0.27
612	-0.16	-0.01	-0.22
613	-0.18	-0.04	-0.10
614	-0.10	0.03	-0.07
615	-0.14	-0.06	-0.12
616	-0.17	-0.08	-0.02
617	-0.02	-0.01	0.19
618	-0.11	-0.02	0.06
619	-0.16	-0.01	0.07
620	-0.02	0.02	0.12
621	0.02	-0.02	0.02
622	0.03	0.04	-0.10
623	-0.07	0.00	0.04
624	0.00	0.00	-0.14
625	0.08	0.06	-0.18
626	0.05	0.02	-0.08
627	-0.02	0.09	-0.32
628	0.07	0.01	-0.26
629	0.05	-0.02	-0.22
630	0.03	-0.03	-0.39
631	0.12	0.02	-0.33
632	0.04	-0.06	-0.30
633	0.10	0.03	-0.30
634	0.04	0.03	-0.37
635	0.02	-0.02	-0.19
636	0.06	-0.10	-0.35
637	0.18	-0.04	-0.26
638	0.15	-0.15	-0.23
639	0.18	-0.04	-0.12
640	0.07	-0.06	-0.27
641	0.05	-0.09	-0.07
642	0.11	0.00	-0.21
643	0.17	0.11	-0.19
644	0.17	0.14	-0.13
645	0.22	0.29	-0.13
646	0.16	0.23	-0.20
647	0.22	0.34	-0.05
648	0.18	0.35	-0.11
649	0.20	0.33	-0.22
650	0.15	0.36	-0.16



651	0.16	0.35	-0.21
652	0.18	0.32	-0.26
653	0.21	0.29	-0.07
654	0.14	0.16	-0.10
655	0.12	0.12	-0.19
656	0.18	0.09	-0.11
657	0.13	0.04	-0.11
658	0.21	0.09	-0.07
659	0.14	0.10	0.05
660	0.12	0.09	-0.05
900	-0.04	-0.14	-0.70
901	-0.14	-0.22	-0.56
902	-0.30	-0.28	-0.56
903	-0.24	-0.40	-0.55
904	-0.11	-0.45	-0.44
905	-0.14	-0.33	-0.41
906	-0.06	-0.34	-0.30
907	-0.15	-0.32	-0.42
908	-0.20	-0.35	-0.42
909	-0.05	-0.21	-0.29
910	0.03	-0.17	-0.40
911	-0.14	-0.29	-0.34
912	-0.02	-0.16	-0.24
913	-0.01	-0.34	-0.45
914	0.05	-0.22	-0.29
915	0.08	-0.26	-0.32
916	0.04	-0.36	-0.44
917	0.09	-0.38	-0.31
918	-0.10	-0.38	-0.36
919	0.13	-0.30	-0.40
920	0.12	-0.29	-0.34
921	0.14	-0.29	-0.31
922	0.15	-0.09	-0.23
923	0.19	-0.14	-0.17
924	0.11	-0.17	-0.13
925	0.24	-0.22	-0.32
926	0.24	-0.16	-0.02
927	0.24	-0.17	-0.03
928	0.17	-0.41	-0.12
929	0.23	-0.44	-0.04
930	0.28	-0.38	-0.04
931	0.24	-0.44	-0.25
932	0.20	-0.27	-0.16
933	0.23	-0.14	-0.26
934	0.19	-0.13	-0.39
935	0.33	-0.08	-0.27
936	0.39	-0.16	-0.48
937	0.31	0.00	-0.44
938	0.18	-0.03	-0.47
939	0.25	0.22	-0.45

940	0.34	0.08	-0.47
941	0.34	0.27	-0.40
942	0.38	0.23	-0.26
943	0.46	0.38	-0.22
944	0.52	0.30	-0.21
945	0.44	0.46	-0.19
946	0.32	0.48	-0.20
947	0.33	0.51	-0.26
948	0.40	0.40	-0.24
949	0.45	0.32	-0.24
950	0.50	0.43	-0.24
951	0.66	0.39	-0.17
952	0.61	0.36	-0.09
953	0.54	0.42	-0.12
954	0.60	0.43	-0.10
955	0.49	0.31	0.03
956	0.62	0.22	-0.08
957	0.59	0.31	0.03
958	0.59	0.20	0.09
959	0.61	0.35	0.12
960	0.65	0.37	0.26
961	0.57	0.29	0.29
962	0.69	0.36	0.39
963	0.75	0.47	0.54
964	0.62	0.53	0.58
965	0.59	0.40	0.68
966	0.65	0.37	0.76
967	0.72	0.48	0.71
968	0.68	0.46	0.66
969	0.66	0.32	0.71
970	0.59	0.32	0.60
971	0.51	0.18	0.64
972	0.51	0.32	0.71
973	0.56	0.23	0.50
974	0.63	0.25	0.66
975	0.65	0.25	0.54
976	0.44	0.02	0.40
977	0.43	-0.01	0.39
978	0.54	0.14	0.38
979	0.44	0.09	0.32
980	0.51	0.11	0.35
981	0.45	0.16	0.33
982	0.46	0.23	0.35
983	0.42	0.37	0.30
984	0.40	0.47	0.27
985	0.39	0.58	0.26
986	0.34	0.52	0.25
987	0.36	0.54	0.13
988	0.29	0.46	0.27
989	0.26	0.48	0.22

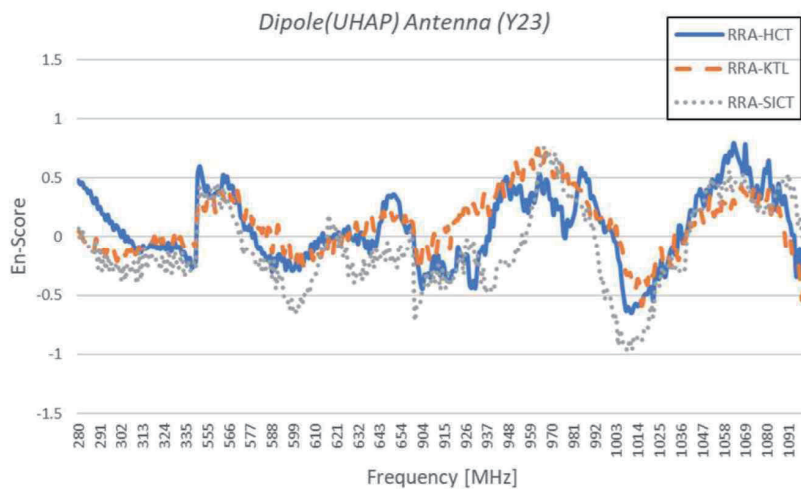


990	0.18	0.33	0.10
991	0.24	0.34	0.12
992	0.26	0.30	0.00
993	0.16	0.25	-0.07
994	0.16	0.19	-0.21
995	0.16	0.12	-0.36
996	0.17	0.14	-0.34
997	0.14	0.04	-0.53
998	0.14	0.06	-0.46
999	0.06	0.09	-0.49
1000	0.15	0.06	-0.52
1001	0.02	0.03	-0.62
1002	0.06	-0.04	-0.71
1003	0.09	-0.06	-0.67
1004	-0.09	-0.19	-0.92
1005	-0.05	-0.25	-0.79
1006	-0.10	-0.41	-0.86
1007	-0.21	-0.53	-0.94
1008	-0.32	-0.63	-0.95
1009	-0.33	-0.60	-0.96
1010	-0.31	-0.63	-0.87
1011	-0.38	-0.65	-0.96
1012	-0.46	-0.60	-0.85
1013	-0.44	-0.57	-0.84
1014	-0.36	-0.60	-0.87
1015	-0.42	-0.57	-0.87
1016	-0.59	-0.59	-0.89
1017	-0.53	-0.51	-0.80
1018	-0.38	-0.49	-0.82
1019	-0.41	-0.49	-0.79
1020	-0.27	-0.44	-0.67
1021	-0.31	-0.43	-0.58
1022	-0.33	-0.55	-0.68
1023	-0.24	-0.27	-0.40
1024	-0.18	-0.35	-0.39
1025	-0.15	-0.36	-0.42
1026	-0.10	-0.20	-0.28
1027	-0.24	-0.28	-0.33
1028	-0.26	-0.35	-0.29
1029	-0.23	-0.26	-0.25
1030	-0.18	-0.18	-0.25
1031	-0.26	-0.11	-0.15
1032	-0.15	-0.09	-0.29
1033	0.02	-0.16	-0.26
1034	-0.16	-0.14	-0.30
1035	-0.20	0.09	-0.28
1036	-0.06	0.09	-0.31
1037	-0.05	-0.05	-0.28
1038	-0.05	0.00	-0.28
1039	0.03	0.04	-0.03

1040	0.16	0.12	0.07
1041	0.09	0.22	0.05
1042	0.12	0.20	0.24
1043	0.10	0.18	0.22
1044	0.19	0.34	0.19
1045	0.18	0.35	0.25
1046	0.23	0.40	0.25
1047	0.17	0.32	0.24
1048	0.12	0.26	0.31
1049	0.23	0.40	0.40
1050	0.23	0.39	0.39
1051	0.35	0.35	0.49
1052	0.26	0.48	0.43
1053	0.18	0.47	0.46
1054	0.22	0.42	0.45
1055	0.23	0.52	0.46
1056	0.15	0.46	0.28
1057	0.30	0.53	0.42
1058	0.29	0.64	0.47
1059	0.29	0.69	0.40
1060	0.27	0.63	0.44
1061	0.20	0.72	0.57
1062	0.27	0.68	0.38
1063	0.32	0.79	0.44
1064	0.28	0.74	0.47
1065	0.38	0.68	0.46
1066	0.39	0.64	0.47
1067	0.43	0.60	0.45
1068	0.39	0.54	0.54
1069	0.38	0.78	0.46
1070	0.35	0.54	0.42
1071	0.37	0.58	0.44
1072	0.28	0.48	0.32
1073	0.40	0.36	0.27
1074	0.33	0.33	0.32
1075	0.25	0.43	0.21
1076	0.36	0.35	0.28
1077	0.32	0.33	0.23
1078	0.37	0.45	0.23
1079	0.35	0.57	0.20
1080	0.31	0.54	0.29
1081	0.40	0.64	0.27
1082	0.20	0.41	0.20
1083	0.25	0.43	0.28
1084	0.25	0.23	0.35
1085	0.17	0.29	0.38
1086	0.25	0.45	0.42
1087	0.18	0.33	0.47
1088	0.08	0.27	0.47
1089	0.04	0.35	0.48



1090	-0.10	0.25	0.44
1091	-0.03	0.15	0.54
1092	-0.01	0.10	0.41
1093	-0.17	0.01	0.34
1094	-0.22	0.01	0.41
1095	-0.21	-0.34	0.28
1096	-0.24	-0.19	0.11
1097	-0.36	-0.11	0.15
1098	-0.54	-0.33	0.04
1099	-0.44	-0.12	-0.03
1100	-0.36	-0.14	-0.07



[그림 26] 다이폴 안테나(UHAP) 수행도 비교

## 제2절 결론 및 향후 계획

안테나 비교속련도 검증은 안테나별로 측정할 안테나를 선정하여 동일성을 검증하는 것이다. 각 교정기관에서 순차적으로 측정하여 검증한다. 2020년부터 4년간 안테나 비교속련도 활동을 통해서 교정기관 간 시험능력 등을 관리할 수 있었으며 결과에 차이가 없음을 확인하였다. 교정 검사위원회는 앞으로도 안테나 측정 기술 및 방법의 보완을 통해 기관별 편차를 줄이기 위한 활동을 지속할 계획이다.





국립전파연구원  
National Radio Research Agency

## 제4장

# 맺음말

National Radio Research Agency





## 제4장 맺음말

본 보고서에서 국립전파연구원 전파시험인증센터에 구축된 밀리미터파대역 적합성 평가시설을 이용하여 100GHz 이하 대역 원역장, 근역장(리액티브, 프레넬 영역) 측정과 관련한 연구 내용을 소개하였다. 20GHz부터 10GHz 단위로 거리에 따른 안테나 이득과  $S_{21}$ 을 측정하여 Friis 전송 방정식을 보정할 수 있는 계수를 찾아서 프레넬 영역까지 확장할 수 있는 보정 수식을 유도하였다. 유도된 보정 수식은 실험치에 가까우나 추후에 주파수 확장 및 시험용 안테나를 다양화하여 일반화할 수 있는 기회가 필요하다. 또한, 측정 시에 고려해야 할 불확도에 대해서도 시험 진행 시에 같이 측정되어 밀리미터파 적합성 평가시설에 대한 불확도를 확인할 수 있었다. 이러한 측정 방법 및 노력들이 국내에서는 시작 단계인 밀리미터파 대역 측정 분야에서 관련 업체 및 학계 등을 지원, 측정과 관련된 실수나 잘못된 접근을 미리 알려주게 되어 측정 애로 사항이 해소되길 기대한다.

또한, 국내 안테나 교정기관 간 표준안테나 비교속련도 활동을 통해서 센터와 교정기관 간 측정기술을 전파할 수 있었고 안테나 성능에 대한 동일성 확보를 확인할 수 있었다. 4년에 걸친 활동으로 교정기관에서 사용하고 있는 전체 표준안테나의 성능을 확인하였고, 교정기관 구성원 간 의사소통을 통하여 새로운 측정 방법 및 교정기관의 애로사항도 확인할 수 있었다. 이러한 노력들이 국내 안테나 산업에 도움이 되길 기대한다.

## <참고> 안테나 및 교정 기본이론

### 제1절 안테나 측정 기본이론

#### 1. 안테나 지향성

안테나의 특성을 나타내는 요소 중 하나는 그 안테나가 어느 특정 방향으로 에너지를 얼마나 많이 집중해 방사할 수 있는가 하는 점이다. 안테나의 이러한 특성을 지향성(directivity)이라 한다. 모든 방향으로 균일하게 방사하는 등방성 안테나가 있다고 가정해보자. 등방성 전원의 방사세기는 모든 공간에서 일정하며, 이를  $U_{ave}$ 라 한다. 전공간은  $4\pi sr$ 이므로 전체 방사전력(P)는 다음과 같다.

$$P = 4\pi U_{ave} \quad (1)$$

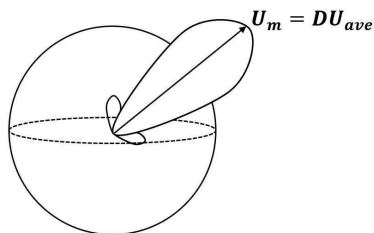
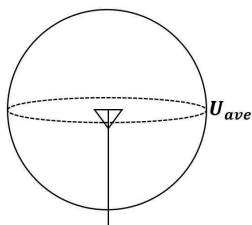
지향성은 어떤 특정 방향으로 진행하는 방사세기( $U(\theta, \phi)$ ) 대 평균 방사세기( $U_{ave}$ )의 비로 정의되며, 다음과 같다.

$$D(\theta, \phi) = \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ave}} = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P} \quad (2)$$

식 (17)에서  $U(\theta, \phi)$ 는 안테나에서의 손실을 고려한  $(\theta, \phi)$  방향으로의 안테나 방사 세기이다. 만약 지향성이 기준 방향없이 숫자로만 표현된다면 그것은 최대지향성을 의미하며 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{4\pi U_m}{P} \quad (3)$$

식 (18)에서  $U_m$ 은 최대방사세기를 의미한다.



- (a) 등방향으로 균일한 방사세기      (b) 실제 방향성을 가진 방사세기  
[그림] 지향성

## 2. 안테나 이득

안테나는 그 지향특성과 더불어 얼마나 효과적으로 가용전력을 입력단자에서 방사 전력으로 변환시킬 수 있느냐가 중요하다. 전력이득(power gain) 혹은 간단히 이득(gain)이라고 하는 것이 이를 정량화하는 것이며, 어떤 주어진 방향의 방사세기와 안테나로 전달된 전력비에  $4\pi$  곱한 것으로 정의할 수 있다.

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (4)$$

위 식 (19)에서  $P_{in}$ 은 안테나에 전달된 입력전력이다. 보통 안테나 이득 ( $G(\theta, \phi)$ )은 등방성 안테나 또는 반파장 다이폴 안테나를 기준으로 했을 때의 상대적인 양을 의미하며, 만약 방향에 대한 언급이 없다면 이득의 최대값을 의미한다.

$$G = \frac{4\pi U_m}{P_{in}} \quad (5)$$

## 3. 방사효율

방사효율( $e_r$ )이란 방사전력( $P$ )과 입력전력( $P_{in}$ )의 비를 의미한다. 방사전력과 입력전력이 같지 않은 이유는 입력전력의 일부가 안테나나 근처의 구조물 등에서 흡수되어 방사전력으로 변환되지 않고 손실되기 때문이다. 이러한 사실을 반영한 방사효율( $e_r$ )은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$e_r = \frac{P}{P_{in}} \quad (6)$$

$$0 \leq e_r \leq 1 \quad (7)$$

식 (20)와 식 (21)를 이용하면 안테나 이득과 최대이득을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$G(\theta, \phi) = e_r \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P} = e_r \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ave}} = e_r D(\theta, \phi) \quad (8)$$

$$G = e_r D \quad (9)$$

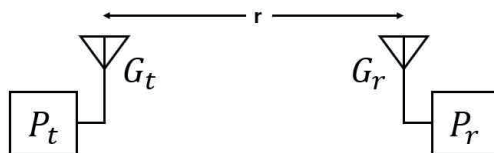
#### 4. 안테나 실효 개구면적

안테나의 실효개구면적( $A_e$ )은 실제로 안테나가 에너지를 흡수할 수 있는 면적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} \times G \quad (10)$$

#### 5. 안테나 전송방정식(Friis)

안테나 전송방정식인 Friis 방정식은 무선 전송에 있어서 송신전력( $P_t$ )과 수신 전력( $P_r$ )의 관계를 나타내는 공식이다.  $G_t$ 의 이득을 가진 송신안테나와 송신안테나로부터 거리( $r$ )만큼 떨어진 곳에서의  $G_r$ 의 이득을 가진 수신안테나의 수신 전력은 다음과 같다.



[그림] 안테나의 송신전력과 수신전력

$$P_r = \frac{P_t \times G_t}{4\pi r^2} \times A_e \quad (11)$$

식 (11)에 식 (10)을 대입하여 정리하면 다음과 같다

$$P_r = P_t \times G_t \times G_r \times \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (12)$$

$$10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = 10\log G_t + 10\log G_r + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (13)$$

#### 6. 안테나 인자

안테나 인자(AF)는 안테나가 놓인 곳의 전기장(E)의 세기와 안테나에 연결된 부하 양단에 걸리는 출력 전압(V)의 비로 정의된다. 일반적인 계측기는 전기장이 아닌 전압차를 감지하기 때문에 안테나 인자는 전기장을 계측하기 위한 변

환인자로써, 전기장의 값을 전압값으로 얼마나 환산해 주느냐를 의미한다. 이러한 안테나 인자는 다음과 같이 정의된다.

$$AF = \frac{E}{V} \quad (14)$$

$$AF(dB/m) = E(dBV/m) - V(dBV) \quad (15)$$

## 7. 안테나 인자와 이득과의 상관관계

안테나 인자와 이득과의 상관관계는 다음과 같은 수식 유도를 통해 파악할 수 있다. 먼저 전력밀도( $P_D$ )는 전기장( $E$ )의 제곱을  $120\pi$ 로 나눔으로써 구할 수 있으며,

$$P_D = \frac{E^2}{120\pi} \quad (16)$$

전체수신전력( $P_R$ )은 전력밀도에 안테나 실효개구면적( $A_e$ )를 곱함으로써 산출할 수 있다.

$$P_R = P_D \cdot A_e = P_D \cdot \frac{\lambda^2 G}{4\pi} = \frac{V^2}{Z_0} \quad (17)$$

\*  $Z_0$  : 안테나 임피던스

식 (17)을 안테나 인자에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{V^2}{Z_0} = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{\lambda^2 G}{4\pi} \quad (18)$$

$$\frac{V^2}{E^2} = \frac{Z_0 \lambda^2 G}{480\pi^2} \rightarrow \frac{E^2}{V^2} = \frac{480\pi^2}{Z_0 \lambda^2 G} \quad (19)$$

$$AF = \frac{E}{V} = \sqrt{\frac{480\pi^2}{Z_0 \lambda^2 G}} \quad (20)$$

$Z_0 = 50\Omega$ 인 시스템에서 위 식 (20)의 상수를 정리하면 다음과 같다.

$$AF = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}} \quad (21)$$

$$AF(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{9.73}{\lambda\sqrt{G}}\right) \quad (22)$$

$$AF(dB) = 20\log\left(\frac{f}{c} \times \frac{9.73}{\sqrt{G}}\right) = 20\log f - 10\log G + 20\log \frac{9.73}{c} \quad (23)$$

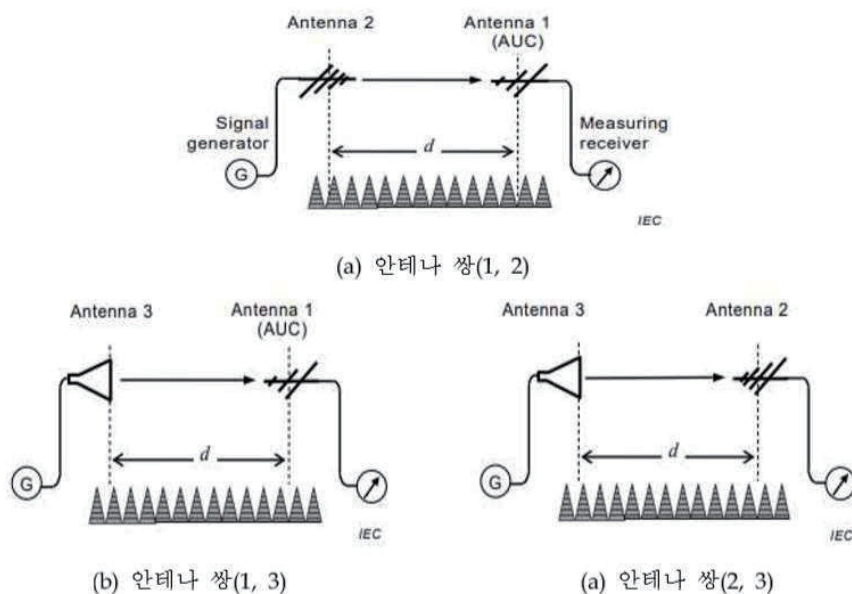
$$AF(dB) = 20\log f_{[MHz]} - 10\log G - 29.78 \quad (24)$$

\*  $c$  : 광속,  $3 \times 10^8 m/s$

## 제2절 안테나 교정 방법

### 1. 3-안테나법(TAM, Three Antenna Method)

감쇠량을 측정하여 안테나 인자를 산출하는 방법은 기본적으로 3-안테나법을 이용하며, 식 (26)과 같은 Friis 방정식을 근간으로 한다. 안테나 이득에 대한 사전지식이 없는 3개의 안테나를 이용하여 3번의 감쇠량 측정을 통해 안테나 인자를 산출하는 것이다. Friis 방정식에서  $G_t$ 와  $G_r$ 은 각각 송신 및 수신 안테나의 이득을 의미하며,  $P_t$ 와  $P_r$ 은 송신 및 수신 전력을 의미한다.  $10\log(\frac{P_r}{P_t})$ 이 송수신 안테나 사이의 삽입손실, 즉, 감쇠량이다. 3-안테나법의 기본 구성은 다음과 같다.



[그림] 3-안테나법 구성

위 [그림]과 같은 구성에서 안테나 이득을 산출하기 위한 방정식은 다음과 같다.



$$\begin{aligned}
G_1[dB] + G_2[dB] &= 10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \\
G_1[dB] + G_3[dB] &= 10\log\left(\frac{P_1}{P_3}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \\
G_2[dB] + G_3[dB] &= 10\log\left(\frac{P_2}{P_3}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)
\end{aligned} \tag{25}$$

위 식 (25)에서  $10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ 을 감쇠량  $L_{12}$ 로 표현하여 정리하면 다음과 같다.

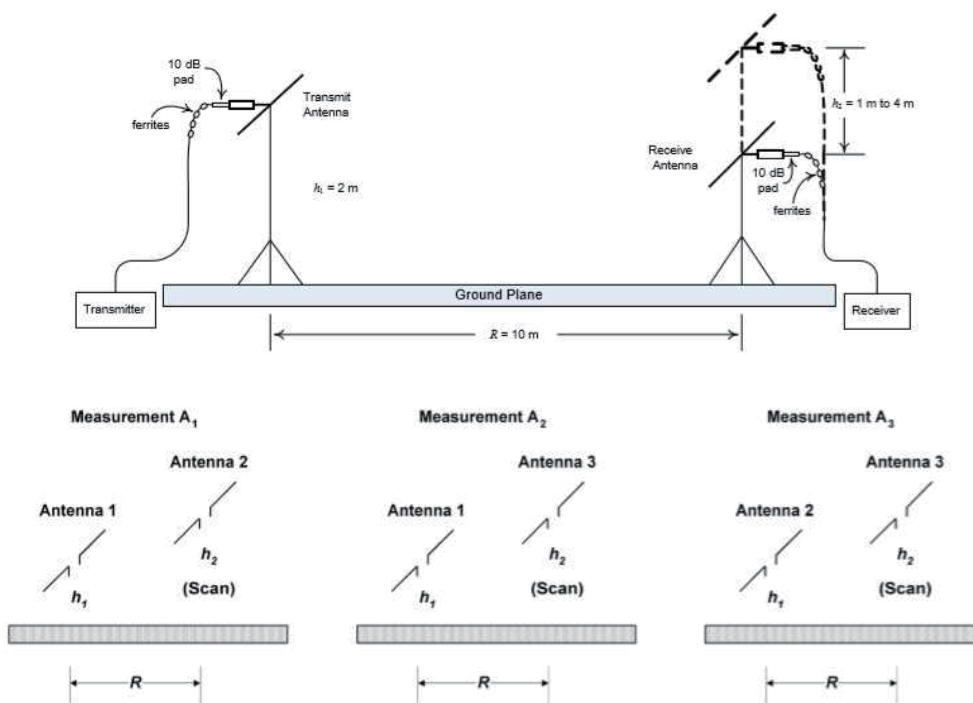
$$\begin{aligned}
G_1(dB) &= \frac{1}{2} \left[ L_{12} - L_{23} + L_{13} + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right] \\
G_2(dB) &= \frac{1}{2} \left[ L_{23} - L_{13} + L_{12} + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right] \\
G_3(dB) &= \frac{1}{2} \left[ L_{13} - L_{12} + L_{23} + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right]
\end{aligned} \tag{26}$$

위 과정을 통해 감쇠량을 세 번 측정하여 세 개의 안테나 이득을 구했다면, 안테나 이득과 안테나 인자 사이의 관계식 (24)를 통해 안테나 인자를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
AF_1(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_1 - 29.78 \\
AF_2(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_2 - 29.78 \\
AF_3(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_3 - 29.78
\end{aligned} \tag{27}$$

## 2. 표준시험장법(SSM, Standard Site Method)

표준시험장법은 3개의 안테나를 이용해 3번 측정하여 안테나 인자를 구한다. 기본적으로 3-안테나법과 동일할 수 있지만, 3-안테나법이 반사가 전혀 없는 자유공간에서의 안테나 측정을 의미한다면 표준시험장법은 단 한번의 반사를 허용한 조건에서의 측정을 의미한다. 이 때문에 각각의 주파수에서 최대전계강도를 찾아내기 위해 수신안테나를 수직으로 이동시키며 전계강도를 스캔한다. 표준시험장법의 구성은 아래 [그림]과 같다.



[그림] 표준시험장법 구성

위와 같은 구성에서 표준 시험장에서의 이론적인 시험장 감쇠값( $L$ )은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \frac{279.1 AF_T AF_R}{f_{MHz} E_D^{\max}} \quad (28)$$

- \*  $AF_T$  : 송신 안테나의 안테나 인자
- \*  $AF_R$  : 수신 안테나의 안테나 인자
- \*  $f_{MHz}$  : 주파수(MHz)
- \*  $E_D^{\max}$  : 송신 안테나에서 거리 R만큼 떨어진 곳에서의 최대 수신 전계값( $\mu V/m$ )

위 식 (28)을 안테나 인자로 정리하면 다음과 같다.

$$AF_T AF_R = \frac{f_M E_D^{\max}}{279.1} L \quad (29)$$

3개의 안테나를 사용하여 3번 측정 시, 안테나 1, 2, 3의 각 안테나 인자는

다음과 같은 방정식을 통해 구할 수 있다.

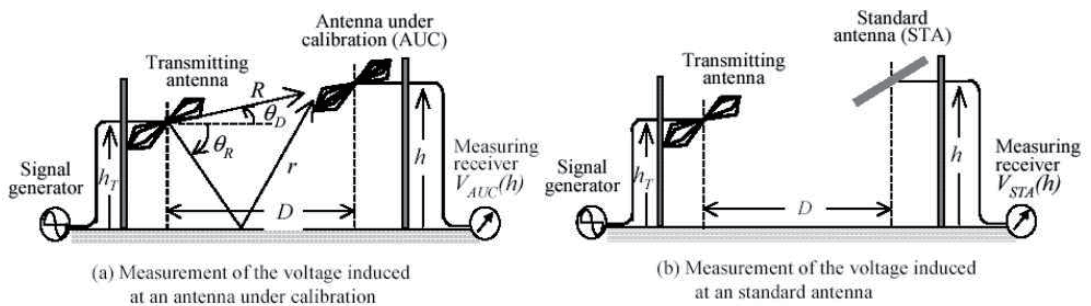
$$\begin{aligned}
 AF_1 &= \frac{1}{2} \left[ L_{12} + L_{13} - L_{23} + E_D^{\max} - 20 \log \left( \frac{279.1}{f_{MHz}} \right) \right] \\
 AF_2 &= \frac{1}{2} \left[ L_{12} + L_{23} - L_{13} + E_D^{\max} - 20 \log \left( \frac{279.1}{f_{MHz}} \right) \right] \\
 AF_3 &= \frac{1}{2} \left[ L_{13} + L_{23} - L_{12} + E_D^{\max} - 20 \log \left( \frac{279.1}{f_{MHz}} \right) \right]
 \end{aligned} \quad (30)$$

### 3. 표준안테나법(SAM, Standard Antenna Method)

표준안테나법은 3개의 안테나를 사용하여 2번의 측정으로 안테나 인자를 구하는 방법이다. 송신 측에 임의의 안테나를 사용하고 이미 안테나 인자 값을 알고 있는 표준안테나(STA)와 교정 대상 안테나(AUC)의 수신 값을 상호 비교하여 안테나 인자를 산출한다.

우선 미리 알고 있는 한 개의 표준안테나를 수신 측에 놓고 임의의 안테나를 송신 측 일정 높이와 거리에 놓은 상태에서 삽입손실(L)을 측정한다. 그 다음, 수신 안테나를 표준안테나 대신 교정 대상 안테나로 교체하여 동일한 높이와 거리에서 삽입손실을 측정한다. 측정된 표준안테나와 교정 대상 안테나의 삽입손실 값의 차이를 구함으로써 3-안테나법과는 다르게 2번의 측정만으로 안테나 인자를 산출할 수 있는 것이다. 표준안테나법에서 안테나인자를 구하는 식은 다음과 같다.

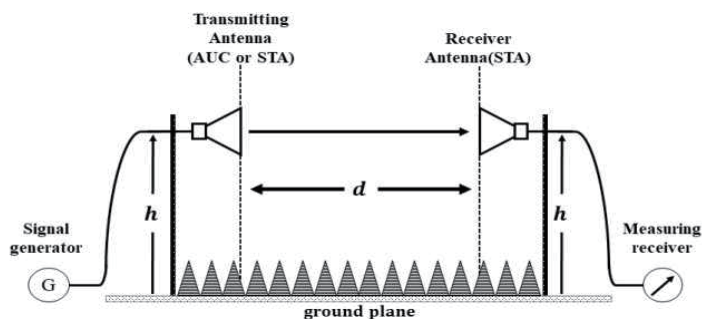
$$AF_{AUC} = AF_{STA} + [L_{STA} - L_{AUC}] \quad (31)$$



[그림] 표준안테나법 구성

#### 4. 국립전파연구원 자체 개발 C-RTM(Compact-Reference Transmitter Method)

기존의 안테나 교정방법들은 반드시 3개의 안테나를 사용하여 2번 내지 3번의 측정을 통해 안테나 인자를 산출하는 방식이다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 국립전파연구원에서는 2011년도에 R-SAM(Radio Research Agency-Standard Antenna Method)이라는 교정방법을 개발하여 단 한번의 측정 구성으로 안테나 사이의 감쇠량을 측정하여 안테나를 교정할 수 있는 획기적인 기술을 개발하였다. 이후 2017년에 명칭을 C-SAM(Compact-Standard Antenna Method)으로 변경하였고 최근에는 IEC CISPR A 위원회 의견에 따라 기존의 SAM 측정 방법과 혼동을 피하도록 C-RTM(Compact-Reference Transmitter Method)으로 변경하였다. C-RTM의 구성은 아래 [그림]과 같다.



[그림] C-RTM 구성

C-RTM은 [그림 28]과 같이 바닥면에 흡수체를 설치하여 자유공간과 동일하게 만든 환경에서 안테나 이득이  $G_T$ 이고 송신출력이  $P_T$ 인 송신 안테나로부터 거리  $d$ 인 지점에서 전기장의 세기  $E_R$ 이 다음과 같이 주어지는 Friis 방정식에 근간을 둔다.

$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{d} \quad (32)$$

위 식 (32)를  $G_T$ 에 대해 정리하고,

$$G_T = \frac{E_R^2 d^2}{30 P_T} \quad (33)$$

$$G_T(dB) = 20 \log E_R + 20 \log d - 10 \log P_T - 14.77 \quad (34)$$

$E_R$ 에 대해 다시 정리하면, 다음과 같다.

$$20\log E_R = G_T(dB) - 20\log d + 10\log P_T + 14.77 \quad (35)$$

안테나 인자에 관련된 식 (15)에 식 (35)를 대입하면 다음과 같다.

$$AF_T(dB) = G_T(dB) - 20\log d + 10\log P_T + 14.77 - 20\log(V_R) \quad (36)$$

식 (24)에 의해 안테나 이득은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$G_T(dB) = -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 29.78 \quad (37)$$

식 (37)을 식 (36)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 29.78 - 20\log d + 10\log P_T + 14.77 - 20\log(V_R) \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log P_T - 20\log(V_R) - 15.01 \end{aligned} \quad (38)$$

경우에 따라서는(주로 네트워크 분석기를 사용 할 때) 전압을 측정하지 않고 안테나 사이의 삽입손실 또는 감쇠량  $L = 10\log(\frac{P_T}{P_R})$ 을 측정하므로, 수신 전력을 임피던스와 수신전압으로 정리하면 다음과 같다.

$$P_R = \frac{V_R^2}{Z} = \frac{V_R^2}{50(\Omega)} \quad (39)$$

$$10\log P_R = 20\log V_R - 10\log 50 \quad (40)$$

위 식(40)을 식(38)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log P_T - 10\log P_R - 10\log 50 - 15.01 \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log \frac{P_T}{P_R} - 16.99 - 15.01 \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + L - 32 \\ AF_T(dB) + AF_R(dB) &= L + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d - 32 \end{aligned} \quad (41)$$



표준안테나(STA)를 수신 측에 위치시키고, 교정대상 안테나(AUC)를 송신 측에 위치시킨다면 교정대상 안테나의 안테나 인자는 다음과 같이 단 한 번의 삽입손실 측정으로 구할 수 있다.

$$AF_{AUC}(dB) = -AF_{STA}(dB) + L + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d - 32 \quad (42)$$

## [참고문헌]

- [1] 국립전파연구원고시, 「방송통신기자재등 시험기관의 지정 및 관리에 관한 고시」
- [2] 국립전파연구원공고, 「방송통신분야 적합성평가기관 비교숙련도시험 운영규정」
- [3] 국립전파연구원, 2021년도 비교숙련도 프로그램 설명자료
- [4] 방송통신표준, KS X 3123 무선설비 적합성평가 시험방법
- [5] H. T. Friis, "A note a simple transmission formula," *Proc IRE.*, May 1946, pp. 254~256
- [6] IEEE Std 149 IEEE Standard Test Procedures For Antennas
- [7] R. Baktur, "CubeSat link budget: elements, calculations, and examples," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 64, no. 6, pp. 16-28, Dec. 2022.
- [8] I. Kim, S. Xu, and Y. Rahmat-Samii, "Generalised correction to the Friis formula: quick determination of the coupling in the Fresnel region," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 7, no. 13, pp. 1092-1101, Oct. 2013.
- [9] K. T. Selvan and R. Janaswamy, "Fraunhofer and Fresnel distances: unified derivation for aperture antennas," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 4, pp. 12-15, Aug. 2017.
- [10] A. Yaghjian, "An overview of near-field antenna measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 34, no. 1, pp. 30-45, Jan. 1986.
- [11] C. Polk, "Optical Fresnel-zone gain of a rectangular aperture," *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 4, no. 1, pp. 65-69, Jan. 1956.
- [12] S.-S. Oh, J.-M. Kim, and J. Yun, "Antenna measurement on cylindrical surface in Fresnel region using direct far-field measurement system," *ETRI J.*, vol. 29, no. 2, pp. 135-142, Apr. 2007.
- [13] B. Levin, "About antenna gain measurement in a Fresnel zone," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 64-70, Apr. 2010.
- [14] D. Kremer, A. Morris, R. Blake, T. Park, and J. Proctor, "Outdoor far-field antenna measurements system for testing of large vehicles," 2012 Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), pp. 2256-2260, 2012.
- [15] M. W. Shields and A. J. Fenn, "A new compact range facility for antenna



- and radar target measurements," Linc. Lab. J., vol. 16, no. 2, pp. 381-391, Jun. 2007. (방문일 2022-09-18)
- [16] X. Liu and J. Yu, "Effect of quiet zone ripples on antenna pattern measurement," Prog. Electromagn. Res. M, Vol. 75, pp. 49-60, 2018.
- [17] Jungkuy Park, Sol Choi. "Near-Field Measurement and Analysis of 20 GHz and 30 GHz Millimeter Waves" , 2022 GSMM, Seoul Korea. 2024
- [18] Jungkuy Park, Sol Choi. "Near-Field Measurement and Analysis in Frequency Ranges of 20GHz to 90GHz" , 2024 AMTA, Seattle Washington USA
- [19] Constantine A. Balanis. Antenna Theory : Analysis and Design
- [20] Jeonga-An Lee, Young-Ho Kim, Sol Choi, Jong-Hyuk Lim, Cheol-Min Choi, Jae-Suk Lee, Kwang-Chul Kim, Sang-Ho Ahn, Byung-Du Kim, Hye-Sung Jeon, Jeong-Hwan Kim, Jung-Kuy Park. "Proficiency test for verification of measurement identity of antenna calibration between Korea accreditation agencies" . 2024 AMTA, Seattle Washington USA





---

## 밀리미터파대역 근거리장 특성 및 안테나 비교측정 연구

---



**국립전파연구원**

National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

**발행일** 2023. 12.

**발행인** 서성일

**발행처** 과학기술정보통신부 국립전파연구원

**전화** 061) 338-4414

**인쇄** 다우프린팅 Tel. 062) 952-2033

---

ISBN : 979-11-5820-257-6

〈 비 매 품 〉

### 주 의

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