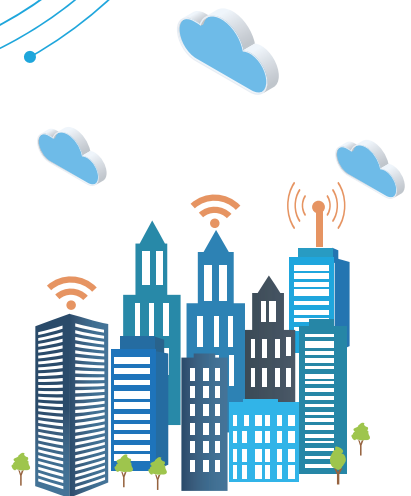


안테나 측정 국내 · 외 공동 연구



국립전파연구원
National Radio Research Agency

제 출 문

본 보고서를 「안테나 측정 국내·외 공동 연구에 관한 연구」 과제의
최종 보고서로 제출합니다.

2022. 12. 31.

연구책임자 : 박 정 규(전파시험인증센터 적합성인증과)

연구 원 : 임 중 혁(전파시험인증센터 적합성인증과)

최 술(전파시험인증센터 적합성인증과)

요 약 문

국립전파연구원에서는 성능검사 결과의 신뢰성을 확보하고 시험 능력의 상향 평준화를 도모하기 위해 교정방법에 관한 연구를 꾸준히 수행해왔다. 뿐만 아니라 국내 교정기관에서 올바르게 전파인증용 안테나의 성능검사를 수행하는지 확인하기 위해 2020년 처음 비교시험을 제안한 이후로 매년 전파시험인증센터와 교정기관 간 비교 순회 시험을 수행하고 그 결과를 통해 동일성을 검증해왔다.

본 연구보고서에서는 안테나의 기본이론과 교정방법에 대해 소개하고, 2022년 수행한 교정기관 간 순회 비교 시험 결과와 그 결과를 ISO13528의 EN스코어를 이용하여 평가한 내용을 기술하였다. 또한 기술 협약을 체결한 일본 정보통신 연구기구(NICT)와의 국제 공동 연구 추진 사항에 대해 소개하고자 한다.

목 차

제1장 서론	1
제2장 안테나 및 교정 이론	5
제1절 안테나 측정 기본이론	5
제2절 안테나 교정방법	9
제3장 국내 및 일본 NICT 간 안테나 비교 연구	19
제1절 국내 교정기관 간 비교 시험	19
제2절 일본 정보통신연구기구(NICT)와 공동연구	29
제4장 결론	33
참고문헌	34
[부록 1] 밀리미터파대역(26.5GHz이하) 안테나 측정불확도 산출 결과	35

표 목 차

[표 1] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과	21
[표 2] 바이코니컬 안테나 VSWR 비교 측정 결과	23
[표 3] 루프안테나 인자 비교 측정 결과	24
[표 4] 각 기관의 측정불확도	25
[표 5] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과 En스코어	27
[표 6] 루프안테나 인자 측정 결과 En스코어	28



National Radio
Research Agency

그림 목 차

[그림 1] 지향성	6
[그림 2] 안테나의 송신전력과 수신전력	7
[그림 3] 3-안테나법 구성	10
[그림 4] 표준시험장법 구성	11
[그림 5] 표준안테나법 구성	13
[그림 6] C-RTM 구성	14
[그림 7] 바이코니컬 안테나와 루프안테나	20
[그림 8] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과	22
[그림 9] 바이코니컬 안테나 VSWR 비교 측정 결과	24
[그림 10] 루프안테나 비교 측정 결과	25
[그림 11] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과 En스코어	27
[그림 12] 루프안테나 인자 비교 측정 결과 En스코어	28





국립전파연구원
National Radio Research Agency

제1장 서론

National
Radio
Research
Agency



제1장 서론

제1절 연구의 배경

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 정기적·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 전자파장해방지 기준, 전자파보호기준 시험 규격 요건에 부합한 지 여부와 규정된 조건하에서 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 성능 검사를 수행하는지 확인하기 위해 전파시험인증센터와 교정기관 간 안테나 비교 측정을 제안하였고, 2020년 킥오프 회의를 시작으로 순회 시험을 수행해왔다. 뿐만 아니라, 2021년 8월 일본 정보통신연구기구(NICT)와의 기술협약을 연장·확대함으로써 안테나 교정에 관한 공동연구를 수행하게 되었다.

본 보고서에서는 안테나의 기본적인 이론과, 3-안테나법 및 표준시험장법 등 교정 방법에 대해 소개하고, 2022년 수행한 국내 교정기관 간 안테나 비교시험 결과를 기술하였다. 또한, 일본 NICT와의 공동 연구를 수행하며 추진한 사항에 대해 소개하고자 한다.





국립전파연구원
National Radio Research Agency

제2장 안테나 및 교정 이론

National
Radio
Research
Agency



제2장 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.

$$P = 4\pi U_{ave} \quad (2-1)$$

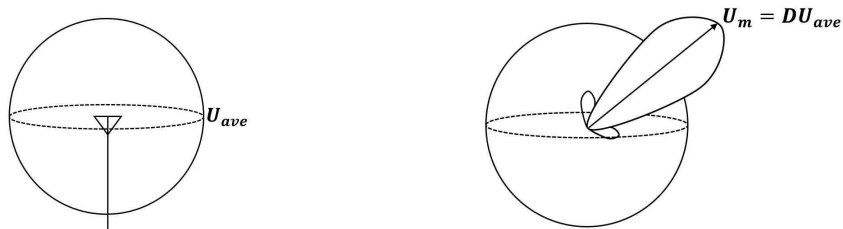
지향성은 어떤 특정 방향으로 진행되는 방사세기($U(\theta, \phi)$) 대 평균 방사세기(U_{ave})의 비로 정의되며, 다음과 같다.

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

식(2-2)에서 $U(\theta, \phi)$ 는 안테나에서의 손실을 고려한 (θ, ϕ) 방향으로의 안테나 방사 세기이다. 만약 지향성이 기준 방향없이 숫자로만 표현된다면 그것은 최대 지향성을 의미하며 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{4\pi U_m}{P} \quad (2-3)$$

식(2-3)에서 U_m 은 최대방사세기를 의미한다.



(a) 등방성으로 균일한 방사세기 (b) 실제 방향성을 가진 방사세기

[그림 1] 지향성

2. 안테나 이득

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

$$G(\theta, \phi) = \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (2-4)$$

위 식(2-4)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 최댓값을 의미한다.

$$G = \frac{4\pi U_m}{P_{in}} \quad (2-5)$$

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.

$$e_r = \frac{P}{P_{in}} \quad (2-6)$$

$$0 \leq e_r \leq 1 \quad (2-7)$$

식(2-4)와 식(2-5)를 이용하면 안테나 이득과 최대이득을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$G(\theta, \phi) = e_r \frac{4\pi U(\theta, \phi)}{P} = e_r \frac{U(\theta, \phi)}{U_{ave}} = e_r D(\theta, \phi) \quad (2-8)$$

$$G = e_r D \quad (2-9)$$

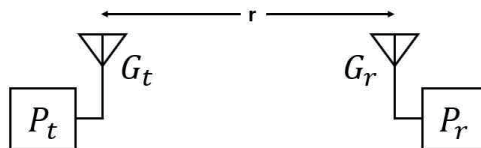
4. 안테나 실효 개구면적

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

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

5. 안테나 전송방정식(Friis)

안테나 전송방정식인 푸리스방정식은 무선 전송에 있어서 송신전력(P_t)과 수신전력(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 2] 안테나의 송신전력과 수신전력

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

식(2-10)와 식(2-11)을 정리하면 다음과 같다

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

$$10\log\left(\frac{P_r}{P_t}\right) = 10\log G_t + 10\log G_r + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right) \quad (2-13)$$

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

$$AF = \frac{E}{V} \quad (2-14)$$

$$AF(dB/m) = E(dBV/m) - V(dBV) \quad (2-15)$$

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 120π 로 나눔으로써 구할 수 있으며,

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

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

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

* Z_0 : 안테나 임피던스

식(2-17)를 안테나 인자에 대해 정리하면 다음과 같다.

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

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

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

$Z_0 = 50\Omega$ 인 시스템에서 위 식(2-20)의 상수를 정리하면 다음과 같다.

$$AF = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}} \quad (2-21)$$

$$AF(dB) = 20\log_{10}\left(\frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}}\right) \quad (2-22)$$

$$AF(dB) = 20\log\left(\frac{f}{c} \times \frac{9.73}{\sqrt{G}}\right) = 20\log f - 10\log G + 20\log \frac{9.73}{c} \quad (2-23)$$

$$AF(dB) = 20\log f_{[MHz]} - 10\log G - 29.78 \quad (2-24)$$

* c : 광속, $3 \times 10^8 m/s$

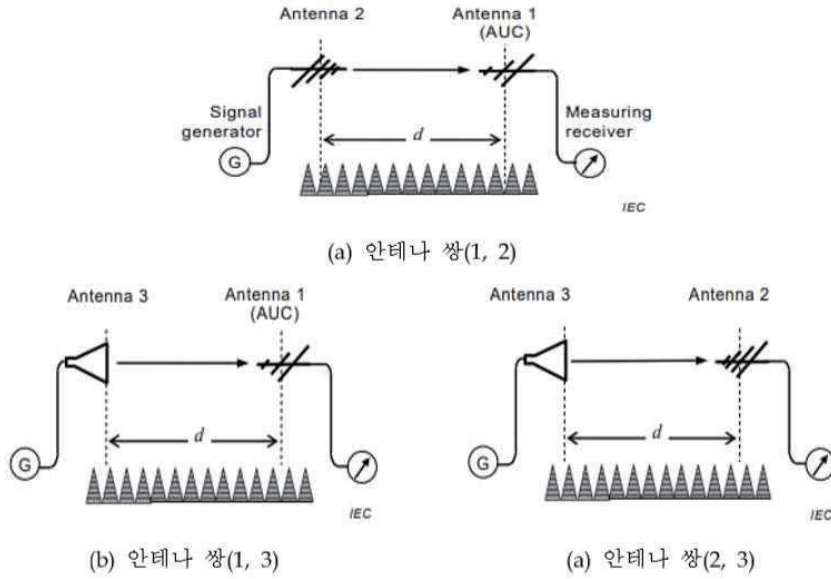
제2절 안테나 교정방법

1. 3-안테나법(TAM, Three Antenna Method)

감쇠량을 측정하여 안테나 인자를 산출하는 방법은 기본적으로 3-안테나법을 이용하며, 식(2-13)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] 3-안테나법 구성

[그림 3]과 같은 구성에서 안테나 이득을 산출하기 위한 방정식은 다음과 같다

$$\begin{aligned}
 G_1[dB] + G_2[dB] &= 10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \\
 G_1[dB] + G_3[dB] &= 10\log\left(\frac{P_1}{P_3}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \\
 G_2[dB] + G_3[dB] &= 10\log\left(\frac{P_2}{P_3}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)
 \end{aligned} \tag{2-25}$$

위 식(2-25)에서 $10\log\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$ 을 감쇠량 L_{12} 로 표현하여 정리하면 다음과 같다.

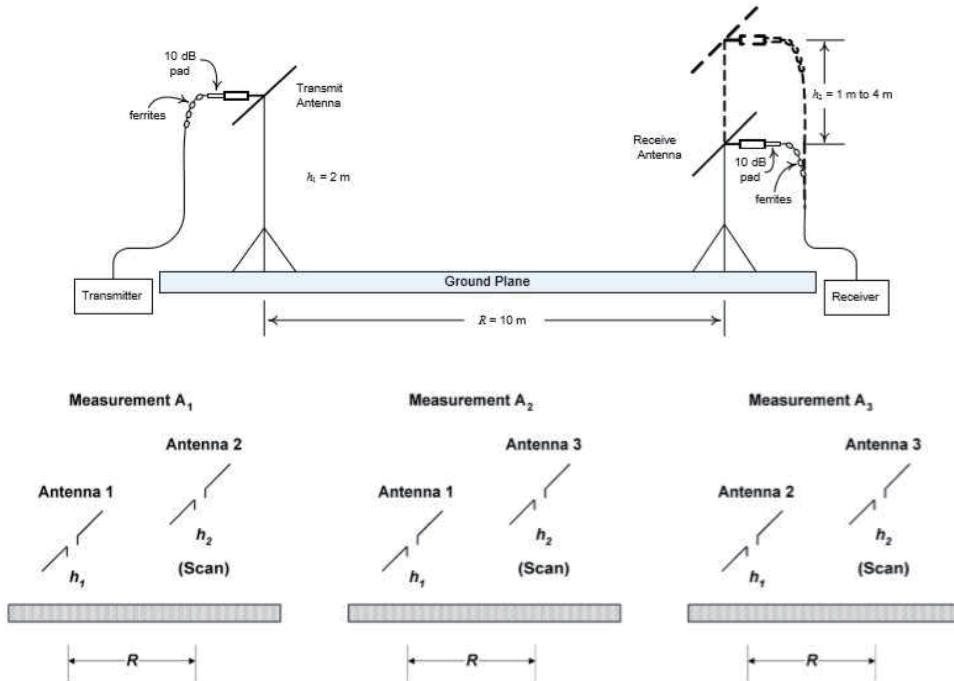
$$\begin{aligned}
 G_1(dB) &= \frac{1}{2} \left[L_{12} - L_{23} + L_{13} + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right] \\
 G_2(dB) &= \frac{1}{2} \left[L_{23} - L_{13} + L_{12} + 20\log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) \right] \\
 G_3(dB) &= \frac{1}{2} \left[L_{13} - L_{12} + L_{23} + 20\log\left(\frac{4\pi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

위 과정을 통해 감쇠량을 세 번 측정하여 세 개의 안테나 이득을 구했다면, 안테나 이득과 안테나 인자 사이의 관계식(2-24)을 통해 안테나 인자를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\begin{aligned} AF_1(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_1 - 29.78 \\ AF_2(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_2 - 29.78 \\ AF_3(dB) &= 20\log f_{[MHz]} - 10\log G_3 - 29.78 \end{aligned} \quad (2-27)$$

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 최대전계 강도를 찾아내기 위해 수신안테나를 수직으로 이동시키며 전계강도를 스캔한다. 표준시험장법의 구성은 [그림 4]와 같다.



[그림 4] 표준시험장법 구성

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

$$L = \frac{279.1 AF_T AF_R}{f_{MHz} E_D^{\max}} \quad (2-28)$$

- * 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(2-28)을 안테나 인자로 정리하면 다음과 같다.

$$AF_T AF_R = \frac{f_{MHz} E_D^{\max}}{279.1} L \quad (2-29)$$

3개의 안테나를 사용하여 3번 측정 시, 안테나 1, 2, 3의 각 안테나 인자는 다음과 같은 방정식을 통해 구할 수 있다.

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

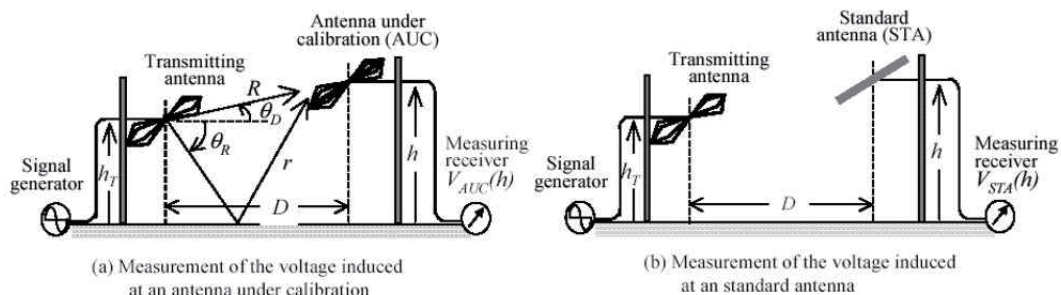
3. 표준안테나법(SAM, Standard Antenna Method)

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 삽입 손실 값의 차이를 구함으로써 3-안테나법과는 다르게 2번의 측정만으로 안테나 인자를 산출할 수 있는 것이다. 표준안테나법에서 안테나인자를 구하는 식은 다음과 같다.

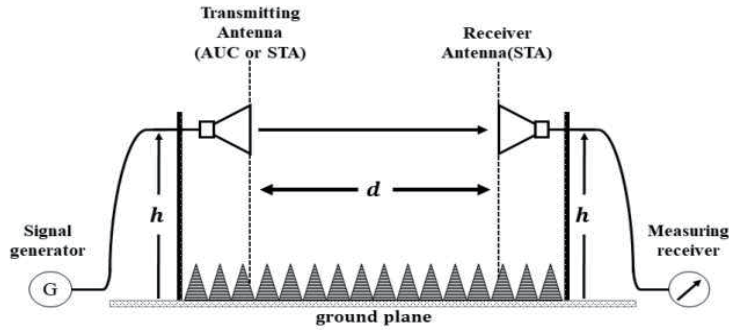
$$AF_{AUC} = AF_{STA} + [L_{STA} - L_{AUC}] \quad (2-31)$$



[그림 5] 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 [그림 6]과 같다.



[그림 6] C-RTM 구성

C-RTM은 [그림2-6]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.

$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{d} \quad (2-32)$$

위 식(2-32)을 G_T 에 대해 정리하고,

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

$$G_T(dB) = 20 \log E_R + 20 \log d - 10 \log P_T - 14.77 \quad (2-34)$$

E_R 에 대해 다시 정리하면, 다음과 같다.

$$20 \log E_R = G_T(dB) - 20 \log d + 10 \log P_T + 14.77 \quad (2-35)$$

안테나 인자에 관련된 식(2-15)에 식(2-35)를 대입하면 다음과 같다.

$$AF_T(dB) = G_T(dB) - 20 \log d + 10 \log P_T + 14.77 - 20 \log(V_R) \quad (2-36)$$

식(2-24)에 의해 안테나 이득은 다음과 같이 나타낼 수 있고,

$$G_T(dB) = -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 29.78 \quad (2-37)$$

식(2-37)을 식(2-36)에 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 29.78 - 20\log d + 10\log P_T + 14.77 - 20\log(V_R) \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log P_T - 20\log(V_R) - 15.01 \end{aligned} \quad (2-38)$$

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.

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

$$10\log P_R = 20\log V_R - 10\log 50 \quad (2-40)$$

위 식(2-40)을 식(2-38)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log P_T - 10\log P_R - 10\log 50 - 15.01 \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + 10\log \frac{P_T}{P_R} - 16.99 - 15.01 \\ AF_T(dB) &= -AF_R(dB) + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d + L - 32 \\ AF_T(dB) + AF_R(dB) &= L + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d - 32 \end{aligned} \quad (2-41)$$

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

$$AF_{AUC}(dB) = -AF_{STA}(dB) + L + 20\log f_{[MHz]} - 20\log d - 32 \quad (2-42)$$





국립전파연구원
National Radio Research Agency

제3장
국내 및 일본
NICT 간
안테나 비교
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 전파 법령에 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 키포프 회의를 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.

키포프 회의 때 각 기관이 모두 비교 순회 시험에 동의하였으며, 2020년도에 LP안테나로 처음 비교 시험을 수행하였고 이후 2021년에는 Bi-log와 Horn 안테나, 2022년도에는 바이코니컬 및 루프안테나로 비교시험을 수행하였다.

2. 비교 시험 시료 및 측정 방법

2022년 비교시험을 위한 시료로는 바이코니컬과 루프안테나가 선정되었다. 측정 방법은, 바이코니컬 안테나는 표준시험장법을 적용하고, 루프안테나는 G-TEM셀에서 안테나 인자 값을 미리 알고 있는 기준 안테나를 이용하여 안테나 인자를 산출하였다. 바이코니컬 안테나는 안테나 인자 외에 반사계수(VSWR), 대칭 측정(180° 회전) 시험을 추가적으로 수행하였다.



(a) 바이코니컬 안테나



(b) 루프안테나

[그림 7] 바이코니컬 안테나와 루프안테나

3. 측정 결과

가. 바이코니컬 비교시험 결과

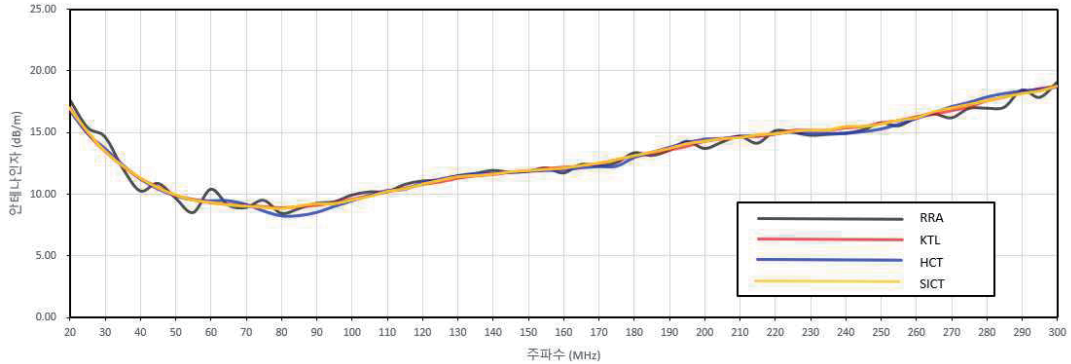
1) 안테나 인자 비교시험

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.

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

[표 1] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과



[그림 8] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과

2) 전압정재파비(VSWR) 비교시험 결과

전압정재파비는 반사에 의해 생성되는 정재파의 최대값과 최소값의 비로 1에 가까울수록 정합 상태가 좋다는 것을 의미한다. 이번 비교시험 결과, 40 MHz 이하 대역에서는 VSWR값이 차이가 있지만 이후 대역부터는 유사한 경향을 나타내는 것을 확인하였다. 40 MHz 이하 대역에서 VSWR값이 차이가 나는 것은, 측정 시 측정 높이가 동일하지 않았던 관계로 이로 인한 영향이 있었을 것으로 추측한다.

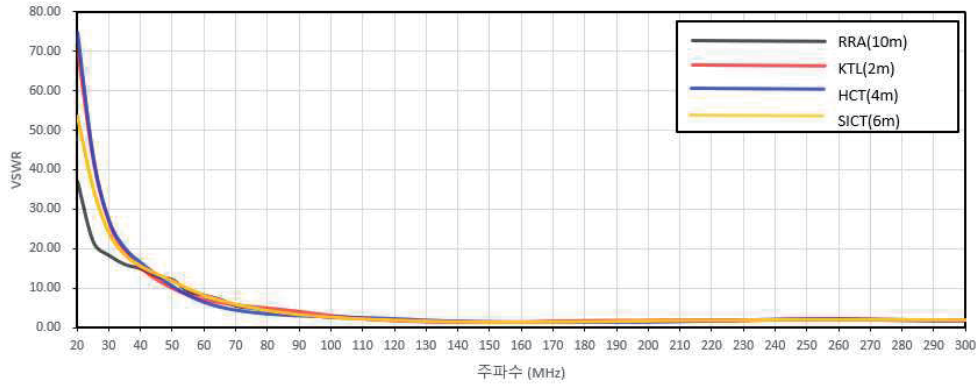
* 측정 높이 : RRA(10m), KTL(2m), HCT(4m), SICT(6m)

주파수 (MHz)	VSWR			
	전파시험인증센터	한국산업기술시험원	에이치시티	교정기술원
20	37.18	70.61	74.70	53.64
25	21.76	42.27	43.19	35.17
30	18.33	26.51	27.10	23.94
35	16.04	19.20	20.15	18.40
40	14.96	15.11	16.45	15.54
45	12.94	12.12	13.39	13.59
50	12.15	9.89	10.55	11.76
55	9.11	8.26	8.19	9.85
60	8.25	7.07	6.48	8.20
65	7.12	6.26	5.30	6.89
70	5.50	5.71	4.50	5.85
75	4.93	5.29	3.94	5.07
80	4.39	4.90	3.55	4.34
85	3.57	4.48	3.28	3.74
90	3.32	4.01	3.10	3.30
95	2.92	3.50	2.96	2.96
100	2.58	3.01	2.84	2.68

105	2.42	2.59	2.73	2.41
110	2.24	2.23	2.60	2.21
115	2.00	1.96	2.46	2.03
120	1.89	1.75	2.31	1.89
125	1.78	1.59	2.14	1.76
130	1.61	1.48	1.96	1.65
135	1.56	1.40	1.81	1.56
140	1.51	1.36	1.69	1.48
145	1.40	1.33	1.61	1.42
150	1.38	1.34	1.55	1.39
155	1.39	1.36	1.49	1.38
160	1.36	1.40	1.45	1.38
165	1.37	1.47	1.45	1.40
170	1.44	1.55	1.45	1.42
175	1.45	1.62	1.45	1.46
180	1.47	1.69	1.46	1.51
185	1.57	1.73	1.46	1.55
190	1.61	1.75	1.46	1.61
195	1.63	1.76	1.47	1.66
200	1.73	1.76	1.50	1.70
205	1.78	1.78	1.55	1.75
210	1.78	1.78	1.64	1.79
215	1.86	1.77	1.73	1.84
220	1.91	1.75	1.81	1.86
225	1.87	1.73	1.87	1.85
230	1.98	1.79	1.97	1.92
235	1.96	1.86	2.07	1.96
240	1.98	1.96	2.15	1.99
245	2.02	2.06	2.21	2.03
250	2.02	2.15	2.25	2.04
255	2.03	2.20	2.26	2.04
260	2.05	2.20	2.24	2.03
265	2.02	2.15	2.19	2.02
270	2.03	2.08	2.10	2.01
275	2.01	2.00	2.01	2.00
280	1.98	1.95	1.92	1.99
285	1.96	1.91	1.85	1.97
290	1.93	1.87	1.81	1.96
295	1.92	1.85	1.80	1.93
300	1.91	1.85	1.82	1.91

[표 2] 바이코니컬 안테나 VSWR 비교 측정 결과

기관별 VSWR 측정결과



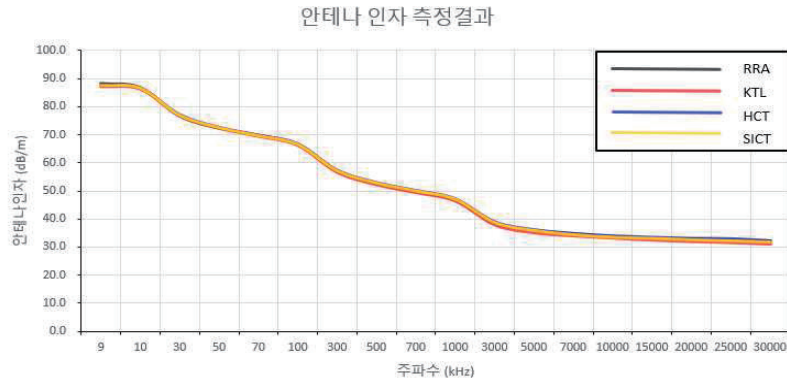
[그림 9] 바이코니컬 안테나 VSWR 비교 측정 결과

나. 루프안테나 측정 결과

루프안테나는 G-TEM셀에서 안테나 인자 값을 미리 알고 있는 기준안테나를 이용하여 표준안테나법으로 안테나 인자를 산출하였다. 측정 결과, 아래 [표 3]과 같이 4개 기관 모두 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

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

[표 3] 루프안테나 인자 비교 측정 결과



[그림 10] 루프안테나 인자 비교 측정 결과

4. 수행도 평가

안테나 인자 측정 결과에 대한 동일점 검증은 교정분야 숙련도시험에서 주로 사용하는 ISO13528의 En스코어 통계기법을 적용하였다. En스코어는 교정분야 숙련도 시험의 결과를 해석할 때 사용하는 통계적 방법으로, 측정값뿐만 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.

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (3-1)$$

위 식(3-1)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.

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

[표 4] 각 기관의 측정불확도

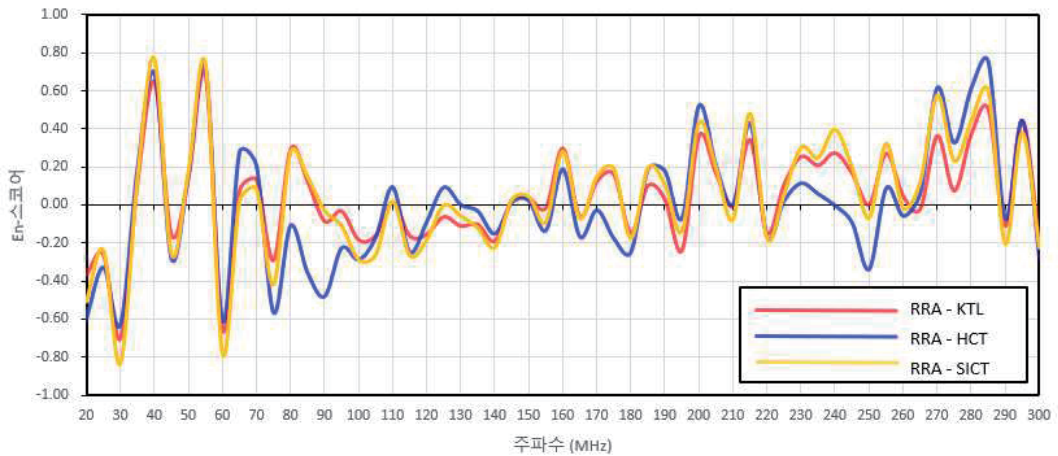
가. 바이코니컬 안테나 인자 비교시험 수행도 평가

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.

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

[표 5] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과 En스코어



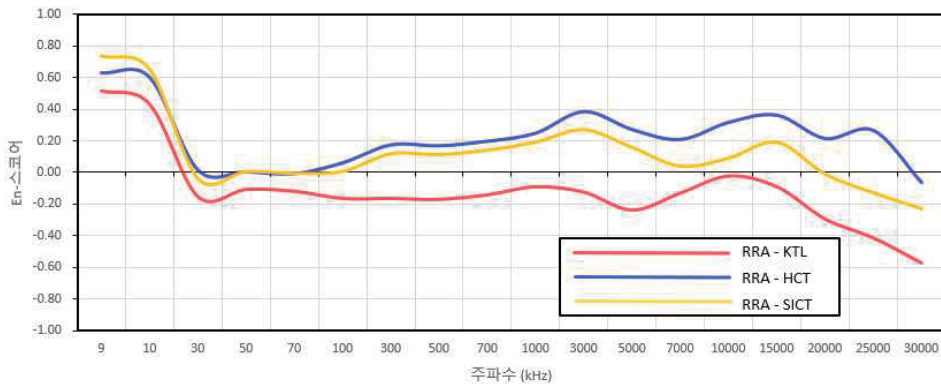
[그림 11] 바이코니컬 안테나 인자 비교 측정 결과 En스코어

나. 루프안테나 인자 비교 측정 수행도 평가

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

주파수 (kHz)	$ E_n $		
	전파시험인증센터 - 한국산업기술시험원 간 비교	전파시험인증센터 - 에이치시티 간 비교	전파시험인증센터 - 교정기술원 간 비교
9	0.51	0.63	0.74
10	0.43	0.60	0.66
30	-0.15	0.02	-0.04
50	-0.11	0.01	0.01
70	-0.12	-0.01	-0.01
100	-0.16	0.06	0.01
300	-0.16	0.18	0.12
500	-0.17	0.17	0.11
700	-0.14	0.20	0.14
1000	-0.09	0.25	0.19
3000	-0.12	0.38	0.27
5000	-0.24	0.27	0.16
7000	-0.13	0.21	0.04
10000	-0.02	0.32	0.09
15000	-0.09	0.36	0.19
20000	-0.29	0.21	-0.01
25000	-0.41	0.27	-0.13
30000	-0.57	-0.06	-0.23

[표 6] 루프안테나 인자 비교 측정 결과 E_n 스코어



[그림 12] 루프안테나 인자 비교 측정 결과 E_n 스코어

제2절 일본 정보통신연구기구(NICT)와 안테나 공동 연구

1. 배경

국립전파연구원은 1972년 일본 정보통신연구소(NICT)와 전파 분야에서 협력을 시작하여 2014년 전자파 인체 노출평가 및 전리층 관측 연구 분야에서 협약을 체결하고 그동안 전자파 분야에서 공동 연구와 워크숍 등을 통해 이루어진 연구결과를 공동 국제 발표하는 등 꾸준히 협력해왔다. 이후 2019년 기술협약을 종료하였으나 일본 정보통신연구소에서 재협력을 요청해 오며 따라 협력 기간을 연장하고 분야를 확대하기로 하였다. 이에 따라 추가적으로 40 GHz 이하 대역에서 안테나 교정방법에 관한 공동 연구를 수행하기로 합의하였다.

2. 공동 연구 수행

국립전파연구원과 NICT는 2021년 정보통신기술분야 양해각서를 체결하고 안테나 교정에 관한 연구 분야에서 협력하기로 합의하였다. 이에 따라 2021년 키포 회의를 개최하고 앞으로의 공동 연구 과제와 수행 방향에 대해 논의하였다.

가. 키포 회의

기술협약 체결 이후 처음 개최한 키포 회의는 코로나로 인하여 온라인으로 진행되었으며 전파시험인증센터와 NICT의 각 기관별 수행 업무와 담당자를 소개하는 시간으로 회의를 시작하였다. 이후 NICT는 18 GHz ~ 40 GHz 혼 안테나의 교정방법 및 측정불확도 개선 방안 연구, 다양한 종류의 안테나 교정에 대한 공동 연구를 제안하였으며 특히 국제표준 (CISPR 16-1-6) 등재와 관련한 18 GHz ~ 40 GHz 혼 안테나의 교정 관련 연구가 관심 사항을 밝혔다. 전파시험인증센터는 500 GHz 대역까지 밀리미터파 안테나의 교정방법, 측정불확도 산출에 대한 공동 연구를 제안하였으며 NICT의 교정 관련 연구 현황 자료를 요청하였다. 이에 NICT는 500 GHz 대역의 경우 아직 시스템 도입 초기로 해당 대역 공동 연구 수행은 어려울 수 있음을 답변하였다. 추가로, 전파시험인증센터에서 새롭게 개발한 안테나 교정 방법(C-RTM)과 국제 표준(CISPR 16-1-6) 등재 추진 사항 등 관련 내용을 간략히 소개하였고 NICT 전문가들의 의견을 청취하였다.

이후 전파시험인증센터와 일본 NICT 간 공동 연구 과제로 18 ~ 40 GHz 대역의 안테나 교정방법 연구를 선정하고 수행하기로 양 기관이 합의하였다.

나. 2022년 두 번째 회의

2021년 킥오프 회의 이후 2022년 두 번째 회의를 개최하였다. 두 번째 회의 역시 온라인으로 진행되었으며, 킥오프 회의에서 18 ~ 40 GHz 교정 방법 연구가 과제로 선정된 만큼 양 기관에서 보유한 18 ~ 40 GHz 안테나 종류를 먼저 소개하는 시간을 가졌다. 그 결과, 양 기관 모두 18 ~ 26.5 GHz, 26.5 ~ 40 GHz, 18 ~ 40 GHz 대역으로 나뉘어진 혼 안테나를 보유하고 있어 해당 대역 공동 연구에 무리가 없음을 확인하였다. 주파수가 3개 대역으로 나누어져 있기 때문에 연간 1종의 안테나를 선정하여 공동 연구를 수행하기로 하였고, 양 기관이 측정 방법과 결과를 공유하고 비교함으로써 측정 기술을 교류하기로 하였다. 이렇게 수행한 공동 연구결과는 향후 논문 및 CISPR 등 국제표준에 공동으로 기고하여 성과를 내기로 합의하였다. 다만, 양 기관의 측정 시스템이 동일하지 않기 때문에 비교시험을 진행한다면 각 시스템에 안테나를 거치할 수 있도록 측정 시스템의 도면을 공유하고, 해당 도면과 치수를 바탕으로 안테나를 거치할 수 있도록 하는 거치 지그를 제작해야 할 필요가 있을 것이다. 또한, 양 기관의 측정 시스템의 신뢰성을 높이기 위한 측정불확도 산출 연구도 필요해 보인다.

회의를 끝내기에 앞서, 양해각서 체결 후 온라인 회의만 개최해 오며 따라 2023년부터는 온라인 회의가 아닌 직접 상대 기관을 방문하여 측정 방법을 시연해보고 견학하는 자리가 필요함에 모두 동의하였으며, 자리 마련에 적극 노력하기로 서로 합의하였다.



국립전파연구원
National Radio Research Agency

제4장 결론

National
Radio
Research
Agency



제4장 결론

본 보고서에서는 먼저 안테나 기본이론과 교정방법에 대해 소개하였다. 특히 연구원에서 자체 개발한 C-RTM 교정방법에 대해 자세히 설명하고, 이후 안테나 측정의 신뢰성 제고를 위한 국내·외 공동 연구 결과에 대해 기술하였다.

국내 공동 연구에서는 국내 KOLAS 인정 안테나 교정기관인 HCT와 한국 산업기술시험원, 교정기술원과 전파시험인증센터가 동일한 바이코니컬과 루프안테나를 사용하여 순회 시험을 통해 안테나 인자를 산출하고, 그 결과를 ISO 13528 EN스코어법으로 검증하였다. 그 결과 바이코니컬 안테나와 루프안테나 모두 $|E_n|$ 값이 1 이내로, 교정기관과 전파시험인증센터의 측정 결과의 동일성이 검증되었다고 볼 수 있다. 다만, 이번 안테나 비교시험은 수평 편파만을 측정한 결과로, 내년 순회 시험에서는 수평편파와 수직편파를 모두 측정해 볼 필요가 있겠다. 또한 VSWR 측정 시, 측정 조건에서 높이가 동일하지 않았던 관계로 추후 측정 높이를 모두 동일하게 맞추어 측정을 진행하면 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

교정기관 간 비교 순회 시험을 통해 동일성은 검증되었지만, 이에 그치지 않고 $|E_n|$ 값이 더 작은 값으로 수렴할 수 있도록 교정 능력 향상을 위한 노력이 필요해 보인다.

국외 공동 연구에서는 일본 NICT와 MoU를 체결하고 공동 연구를 수행하기 위한 정보를 교류하였다. 한-일 양 기관의 측정 시스템의 정보 교류 및 공동 연구 과제 선정을 위한 시료 논의 등을 위해 온라인 회의를 개최하였고, 이를 통해 2023년부터 동일한 안테나로 공동 연구를 위한 비교 시험을 수행하는데 큰 무리가 없음을 확인하였다. 이후에는 양 기관이 합의함에 따라 서로의 기관을 방문하고 측정 방법을 시연하는 등 시설 견학을 위한 자리를 마련할 계획이다. 이로써 한-일 공동 연구를 통해 국제적인 측정 방법의 교류로 발전해 나가는 계기가 될 것으로 기대한다.

[참고문헌]

- [1] 과학기술정보통신부고시, 「방송통신기자재등 시험기관의 지정 및 관리에 관한 고시」
- [2] 국립전파연구원공고, 「적합성평가시험에 필요한 설비의 성능에 관한 검사 기준 및 방법」
- [3] 박정규 외, “안테나 교정 방법 및 절차 비교연구”, 국립전파연구원 연구보고서, pp. 606-636, 2007년 12월
- [4] 박정규 외, “안테나 교정 국제 공동 연구”, 국립전파연구원 연구보고서, pp. 9-23, 2008년 12월
- [5] 박정규 외, “자체개발 안테나 교정방법 유효성 확인 연구”, 국립전파연구원 연구보고서, pp. 10-20, 2012년 12월
- [6] 박정규 외, “(서브)밀리미터파대역 안테나 측정 및 대형 안테나 측정용 시설 고도화 방안 연구”, 국립전파연구원 연구보고서, pp. 25-35, 2020년 12월
- [7] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, “안테나 이론과 설계”, (주)교보문고, pp. 60-67, 2012년 1월
- [8] CISPR 16-1-6, “SPECIFICATION FOR RADIO DISTURBANCE AND IMMUNITY MEASURING APPARATUR AND METHODS - Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - EMC antenna calibration”, IEC, 2022년 3월

[부록1]

밀리미터파대역(26.5 GHz 이하) 안테나 이득 측정 불확도 산출 결과

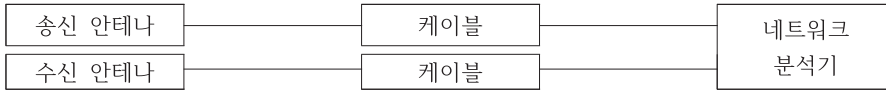
국립전파연구원 전파시험인증센터

산출 및 보고자 : 최 솔 주무관

검토자 : 적합성인증과장 박정규 연구관

1. 안테나 이득 측정불확도 산출 지침

1.1 측정 구성도



[그림 1] 안테나 측정 구성

1.2 측정의 수학적 모델

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] + G_t[dB] + G_r[dB] - L[dB] \quad (1)$$

P_r : 수신전력

P_t : 송신전력

G_r : 수신 안테나 이득

G_t : 송신 안테나 이득

L : 자유공간 전파손실 $\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2$

1.3 측정불확도 요인 및 산출 지침

1.3.1 반복도(Repeatability)

반복 측정으로 인한 측정불확도는 “밀리미터파 안테나 삽입손실 측정불확도 산출” 내용에서 A형 불확도 값을 인용한다.

1.3.2 네트워크 분석기 불확도

1.3.2.1 진폭 레벨 정확도 (S21 Magnitude Accuracy)

제조사 데이터 시트나 교정성적서에서 얻을 수 있다. 확률분포가 주어지지 않으면 직각분포로 추정한다. 직각분포의 경우에는 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.2.2 출력 레벨 선형도(Output Power Level Linearity)

제조사 데이터 시트나 교정성적서에서 얻을 수 있다. 확률분포가 주어지지 않으면 직각분포로 추정한다. 직각분포의 경우에는 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.2.3 주파수 범위 및 정확도(Frequency Range and Accuracy)

제조사 데이터 시트나 교정성적서에서 불확도를 얻을 수 있으며 다음과 같은 식을

통해 구할 수 있다.

$$20 \times \log \frac{f_1}{f_2} \quad (2)$$

f_1 : 측정 주파수

f_2 : 측정주파수 + 불확도

최종 표준불확도는 직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.2.4 동적 정확도(Dynamic Accuracy)

제조사 데이터 시트나 교정성적서에서 얻을 수 있다. 확률분포가 주어지지 않으면 직각분포로 추정한다. 직각분포의 경우에는 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.3 부정합 불확도(Mismatching)

1.3.3.1 부정합 에러 산출 공식

$$U_{mismatch}(i,j) = \frac{|\Gamma_i| + |\Gamma_j| + |S_{21}| + |S_{12}| \times 100\% \text{ Voltage}}{11.5} \quad (3)$$

Γ_i : 선형값으로 주어지는 i 장비의 반사계수

Γ_j : 선형값으로 주어지는 j 장비의 반사계수

S_{21} : 선형값으로 주어지는 i 장비와 j 장비 사이의 감쇠계수

S_{12} : 선형값으로 주어지는 i 장비와 j 장비 사이의 감쇠계수

분모의 11.5은 %로 표시된 Voltage를 dB로 단위를 전환하는 인자

1.3.3.2 반사계수 Γ_i

측정시스템의 각 구성 장비의 반사계수는 제조사의 데이터나 측정 또는 교정성적서에서 얻을 수 있다. dB로 주어진 단위는 위의 공식을 적용하려면 반드시 선형값으로 변환한다.

1.3.3.3 감쇠계수 $S(i,j)$

i 장비와 j 장비 사이의 감쇠계수는 직접 측정을 하거나 교정 또는 측정 데이터를 이용할 수 있다. i 와 j가 바로 인접한 경우는 감쇠계수는 1(0 dB)로 본다.

1.3.3.4 부정합불확도

i 장비와 j 장비 사이의 부정합불확도는 위의 공식 (3)에 의하여 산출된다. U형 분포로 추정하여 (3)에서 계산된 값을 $\sqrt{2}$ 로 나눈다.

1.3.4 케이블 불확도

1.3.4.1 진폭 안정도(Amplitude Stability)

제조사의 데이터 쉬트에서 얻을 수 있다. 확률분포가 주어지지 않으면 직각분포로 추정한다. 직각분포의 경우에는 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.5 안테나 거치에 따른 불확도

1.3.5.1 안테나 거치(상하, 좌우)

안테나의 거치(상하, 좌우)에 따른 불확도는 안테나의 거치 상태를 상하, 좌우로 변화시켜가며 실제 측정값의 변화를 분석하여 얻을 수 있다. 직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.5.1 안테나 거치(정렬)

안테나의 거치(정렬)에 따른 불확도는 안테나의 거치 상태를 중심에 맞춘 정렬 상태에서 1도 단위로 변화시켜가며 실제 측정값의 변화를 분석하여 얻을 수 있다. 직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.6 환경적 요인(반사파)에 의한 불확도

1.3.6.1 반사파에 의한 불확도

반사파에 의한 불확도는 송신안테나를 반사파의 영향을 최대화 할 수 있는 방향으로 거치하여 실제 측정값의 변화를 분석하여 얻을 수 있다. 반사파의 영향으로 인한 불확도 에러는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$10 \times \log\left(\frac{P - P'}{P}\right) \quad (4)$$

P : 정렬 상태(0도)에서의 측정값을 선형 변환한 값

P' : 안테나의 각도를 기울여 임의로 반사파를 형성했을 때의 측정값을 선형 변환한 값

최종 표준불확도는 직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.7 안테나의 위상 거리에 의한 이득 불확도

안테나의 위상 거리에 의한 이득 불확도는, 실제 안테나의 길이 중 전파가 방사되는 시점의 불확도를 의미하며, 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$20 \times \log \frac{d_1}{d_2} \quad (5)$$

d1 : 송수신 안테나 사이의 거리

d2 : 송수신 안테나 사이의 거리 + (안테나 전체 길이 ÷ 2)

최종 표준불확도는 직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나눈다.

1.3.8 합성표준불확도 산출

n개의 표준불확도를 통한 합성표준불확도는 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$U_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 \cdots u_{n-1}^2 + u_n^2} \quad (6)$$

3-안테나법으로 안테나 이득을 산출할 경우에는 측정을 총 3번 반복하므로 최종합성표준불확도는 주어진 합성표준불확도에 $\sqrt{3}$ 을 곱해서 구할 수 있다.

$$U_c = \sqrt{3} \times U \quad (7)$$

1.3.9 확장불확도

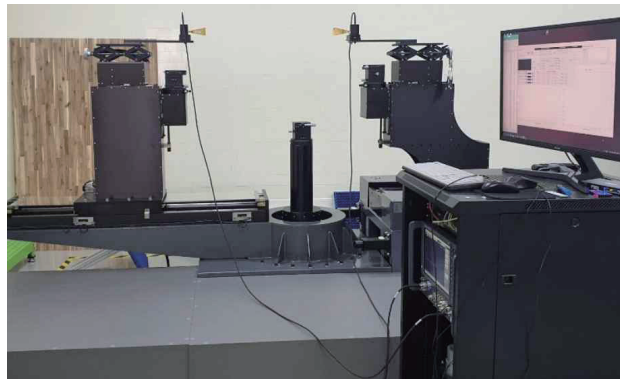
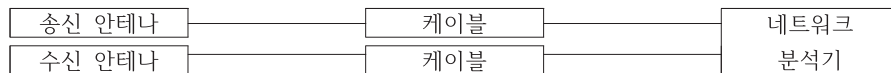
확장불확도는 아래와 같은 식으로 구할 수 있다.

$$U = k \times U_c \quad (8)$$

k = 2 (95.45 % 신뢰수준)

2. 안테나 이득 측정불확도 산출

2.1 측정 구성



< 측정 시스템 구성 >

2.2 제조사 및 모델

- 네트워크분석기 : Keysight Network Analyzer N5227B
- 케이블 : Rosenberger LU5-C300-3000
- 안테나 2기
 - 1) 제조사 : TAEngineering
 - 2) 모델명 : TAE WR42-20A_1, TAE WR42-20A_2

3) 주파수 대역 : 18 ~ 26.5 GHz (측정주파수 : 20 GHz)

2.3 교정일자 : 2021년 4월 22일 (네트워크 분석기)

2.4 반복도(Repeatability)

“밀리미터파 안테나 삽입손실 측정불확도 산출”에서 A형 불확도는 다음과 같다.

A형불확도(dB)	0.007
-----------	-------

이를 직각분포로 추정하고, $\sqrt{3}$ 로 나누면, 반복도의 표준불확도는 0.004 dB이다.

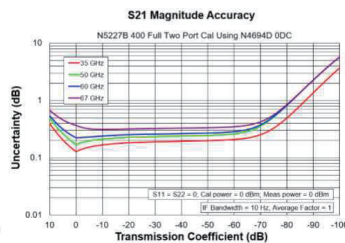
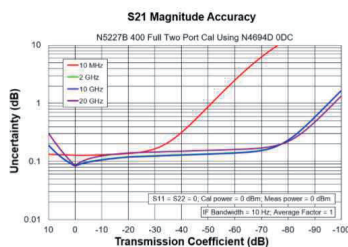
2.5 네트워크 분석기 불확도

2.5.1 네트워크 분석기 S21 Magnitude Accuracy

Keysight에서 제공한 데이터시트에서 아래와 같은 불확도 에러를 얻었다. 주파수 20 GHz에서 불확도 에러의 최대값은 약 0.089 dB이다. 이를 직각분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, 표준불확도는 0.051 dB이다.

Table 4c. N5227B with N4694D 2-Port Electronic Calibration Module

Description	Specification (dB)							
	10 MHz to 50 MHz ¹	50 MHz to 2 GHz ¹	2 GHz to 20 GHz	20 GHz to 30 GHz	30 GHz to 40 GHz	40 GHz to 50 GHz	50 GHz to 60 GHz	60 GHz to 67 GHz
Directivity	41	41	42	41	40	38	35	33
Source Match	38	38	39	35	34	33	30	26
Load Match	35	36	37	33	32	31	28	24
Reflection Tracking Mag	±0.081	±0.041	±0.041	±0.051	±0.061	±0.081	±0.081	±0.13
Phase (°)	±0.54	±0.27	±0.27	±0.34	±0.40	±0.54	±0.54	±0.80
Transmission Tracking Mag	±0.12	±0.075	±0.075	±0.089	±0.11	±0.14	±0.15	±0.22
Phase (°)	±0.79	±0.50	±0.50	±0.59	±0.69	±0.90	±0.99	±1.5



2.5.2 네트워크 분석기 Power Level Linearity

교정성적서에 출력 레벨 선형도의 불확도 값은 0.09 dB이다. 이를 정규분포로 추정하여 2로 나누면, 표준불확도는 0.045 dB이다.

Power Level Linearity			
데이터출처	주파수(GHz)	측정값(dB)	불확도(dB); k=2
교정성적서	10	-0.38	0.09

	20	-0.22	0.09
	30	0.4	0.09
	40	0.03	0.09
	50	0.06	0.09

2.5.3 주파수 범위 및 정확도(Frequency Range and Accuracy)

주파수 범위 및 정확도는 교정성적서에 다음과 같이 주어졌다.

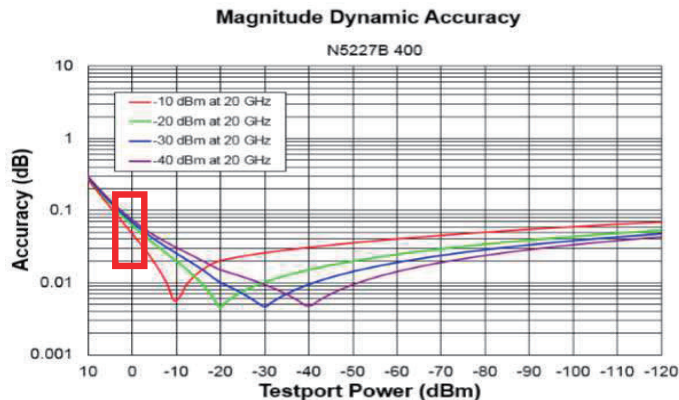
Power Level Linearity		
데이터출처	주파수(GHz)	불확도(kHz)
교정성적서	10	0.58
	20	1.20
	30	1.70
	40	2.30

20 GHz에서 불확도는 1.2 kHz로 식(2)을 통해 0.00000052 dB의 불확도 에러를 구했다.

직각분포로 추정하고 주어진 값에서 $\sqrt{3}$ 로 나누면, **표준불확도는 0.0000003 dB로, 0에 가깝다.**

2.5.4 네트워크 분석기 S21 Dynamic Accuracy

동적정확도는 네트워크 분석기 Keysight에서 제공한 데이터시트에서 아래와 같은 결과를 얻었다. 20 GHz에서 Testport Power가 0 dBm일 때, 약 0.1dB로 주어졌다. 이를 직각 확률분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, **표준불확도는 0.058 dB이다.**



2.6 부정합불확도(Mismatching)

2.6.1 부정합 에러 산출 공식

$$U_{mismatch}(i,j) = \frac{|\Gamma_i| + |\Gamma_j| + |S_{21}| + |S_{12}| \times 100\% \text{ Voltage}}{11.5}$$

Γ_i : 선형값으로 주어지는 i 장비의 반사계수

Γ_j : 선형값으로 주어지는 j 장비의 반사계수

S_{12}, S_{21} : 선형값으로 주어지는 i 장비와 j 장비 사이의 감쇠량

분모의 11.5은 %로 표시된 voltage를 dB로 단위를 전환하는 인자

2.6.2 부정합 불확도 계산을 위한 기본 데이터

2.6.2.1 반사계수

감쇠측정에 사용되는 장비의 반사계수		
계측기 성분	S11 측정값(dB)	선형 변환 값
송신 케이블	-27.06	0.044
수신 케이블	-24.66	0.058
송신 안테나	-14.08	0.198
수신 안테나	-15.36	0.171
네트워크분석기 포트1(송신)	-24.56	0.059
네트워크분석기 포트2(수신)	-21.01	0.089

2.6.2.2 감쇠량 S_{12}

감쇠량 S_{12}		
장비 - 장비	S_{12} 측정값(dB)	선형 변환 값
네트워크분석기 포트1(송신) - 송신 케이블	0	1
송신 케이블 - 송신 안테나	0	1
네트워크분석기 포트1(송신) - 송신 안테나	-8.51	0.141
네트워크분석기 포트2(수신) - 수신 케이블	0	1
수신 케이블 - 수신 안테나	0	1
네트워크분석기 포트2(수신) - 수신 안테나	-8.46	0.143

2.6.3 성분별 부정합불확도

반사계수와 감쇠량을 불확도 산출 공식을 활용하여 계산하면 아래와 같은 부정합 에러가 나왔다. 이 결과를 U형 확률분포로 추정하여 $\sqrt{2}$ 로 나누어 부정합 표준불확도를 구했다.

부정합성분	부정합에러(dB)	부정합표준불확도(dB)
네트워크분석기 포트1(송신) - 송신 케이블	0.023	0.016
송신 케이블 - 송신 안테나	0.076	0.054
네트워크분석기 포트1(송신) - 송신 안테나	0.002	0.001
네트워크분석기 포트2(수신) - 수신 케이블	0.045	0.032
수신 케이블 - 수신 안테나	0.087	0.061
네트워크분석기 포트2(수신) - 수신 안테나	0.003	0.002

2.7 케이블 불확도

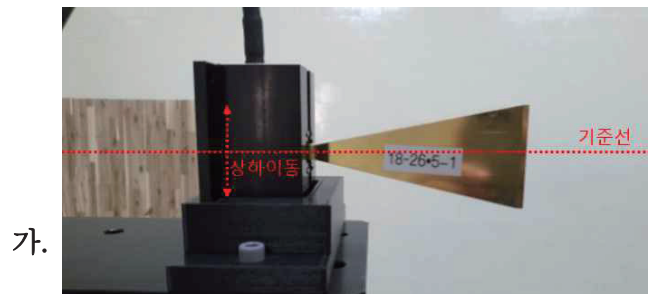
2.7.1 진폭 안정도(Amplitude Stability)

케이블 제조사의 데이터 시트에서 아래와 같은 불확도를 얻을 수 있었다. 최대 0.15dB일 때 직각분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, **표준불확도는 0.087dB**이다.

Amplitude Stability		
데이터 출처	진폭안정도(dB)	표준불확도(dB)
데이터 시트	± 0.15	0.087

2.8 안테나 거치에 따른 불확도

2.8.1 안테나 거치(상하)

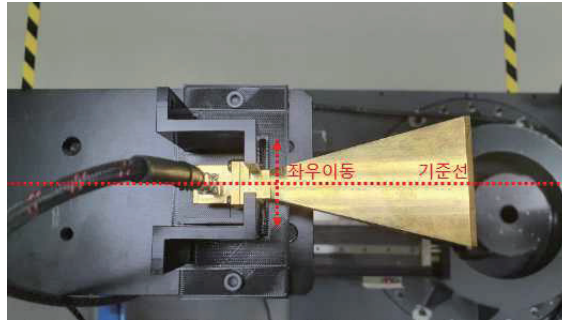


가.

안테나 거치 상태를 기준선에서 상하로 약 1mm단위로 변화시켜가며 삽입 손실 값의 변화를 측정하였고, 실제 안테나를 측정할 때 최대 틀어진 상태는 약 0.5mm를 넘지 않는다고 가정하였다. 1mm 틀어졌을 때의 불확도 에러(정확히 정렬된 상태와 틀어진 상태에서의 측정값의 차이)를 2로 나누어 0.5mm에서의 불확도 에러를 구했다. 이 때 최종 불확도에러는 0.135 dB이고, 이를 직각분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, **표준불확도는 0.078 dB**이다.

송수신 안테나 위치(상하) 틀어짐 정도(mm)	측정값(dB)	정렬된 상태와 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

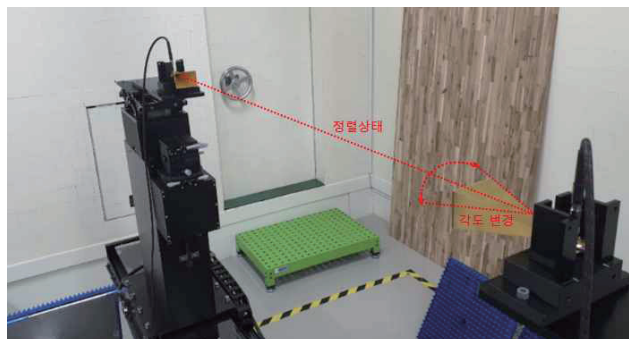
2.8.2 안테나 거치(좌우)



안테나 거치 상태를 기준선에서 좌우로 약 1 mm단위로 변화시켜가며 삽입 손실 값의 변화를 측정하였고, 실제 안테나를 측정할 때 최대 틀어진 상태는 약 0.5 mm를 넘지 않는다고 가정하였다. 1 mm 틀어졌을 때의 불확도 에러(정확히 정렬된 상태와 틀어진 상태에서의 측정값의 차이)를 2로 나누어 0.5 mm 에서의 불확도 에러를 구했다. 이 때 최종 불확도 에러는 0.335 dB이고, 이를 직각분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, **표준불확도는 0.193 dB**이다.

송수신 안테나 위치(좌우) 틀어짐 정도(mm)	측정값(dB)	정렬된 상태와 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

2.8.3 안테나 거치(정렬)



안테나 거치를 정렬 상태에서 좌우로 1도 단위로 변화시켜가며 삽입손실 값의 변화를 측정하였다. 실제 안테나를 측정할 때 최대 틀어진 상태는 약 0.5도를 넘지 않는다고 가정하였고, 1도 틀어졌을 때 정확히 정렬된 상태와 측정값의 차이를 2로 나누어 0.5도 틀어졌을 때의 오차 범위를 구했다. 오차

범위는 0.065 dB였고 이를 직각분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면, 표준불확도는 0.038 dB이다.

송수신 안테나 위치(좌우) 틀어짐 정도(도)	측정값(dB)	정렬된 상태와 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

2.9 환경적 요인(반사파)에 의한 불확도

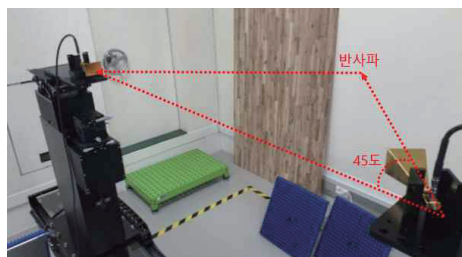
2.9.1 반사파에 의한 불확도



<정렬 상태>



<180도 반전>



<좌우 각도 변경>



<상하 각도 변경>

반사파의 의한 불확도를 구하기 위해 반사파의 영향이 최대가 될 수 있도록 수신안테나를 180도 반전하여 벽으로부터 반사되는 반사파를 측정하고 안테나를 45도(상하좌우)로 기울여 삽입 손실값을 측정하였다.

송수신 안테나 각도 변화		측정값(dB)	선형 변환 값
좌우	+45	-53.26	0.000005
	0	-24.23	0.003779
	-45	-51.89	0.000006
상하	+45	-44.33	0.000037
	0	-24.23	0.003779
	-45	-43.93	0.000040
반전	180	-43.98	0.000040

측정값을 선형 변환하여 반사파의 영향으로 인한 불확도에러는 다음의 식을 이용하여 구했다.

$$10 \times \log\left(\frac{P-P'}{P}\right) \quad (9)$$

P : 정렬 상태(0도)에서의 측정값을 선형 변환한 값

P' : 안테나의 각도를 기울여 임의로 반사파를 형성했을 때의 측정값을 선형 변환한 값

위 식을 통해 반사파로 인한 최대 불확도에러를 계산하고 표준불확도를 산출하면 아래와 같다.

송수신 안테나 각도		불확도에러(dB)	표준불확도(dB)
좌우	+45도	0.005	0.003
	-45도	0.007	0.004
상하	+45도	0.043	0.025
	-45도	0.047	0.027
반전	180도	0.046	0.027
합성 표준 불확도			0.046

2.10 안테나의 위상 거리에 의한 이득 불확도

안테나의 위상 거리에 의한 이득 불확도는, 실제 안테나의 길이 중 전파가 방사되는 시점의 불확도를 의미하며, 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$20 \times \log \frac{d_1}{d_2} \quad (10)$$

d1 : 송수신 안테나 사이의 거리

d2 : 송수신 안테나 사이의 거리 + (안테나 전체 길이 ÷ 2)

20 GHz 안테나의 전체 길이는 약 9cm로 위 식을 통해 계산하면 불확도 에러는 약 0.382 dB이다. 직각 분포로 추정하여 $\sqrt{3}$ 로 나누면 표준불확도는 0.221 dB가 된다.

2.11 불확도 총괄표

Source of uncertainty or quantity Xi		Value dB	Probability distribution	Divi sor	u _i dB
반복도(Repeatability)		0.007	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.004
계측기 불확도 (네트워크 분석기)	Network Analyzer S21 Magnitude Accuracy	0.089	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.051
	Network Analyzer Output Power Level Linearity	0.090	Normal	2	0.045
	Network Analyzer Output Frequency Rance and Accuracy	0.000	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.000
	Dynamic Accuracy	0.100	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.058
케이블 불확도	Tx cable Amplitude Stability	0.150	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.087
	Rx cable Amplitude Stability	0.150	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.087
부정합 불확도	Network Analyzer - Tx cable mismatch	0.023	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.016
	Tx cable - Tx Antenna mismatch	0.076	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.054
	Network Analyzer - Tx Antenna mismatch	0.002	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.001
	Rx Antenna - Rx cable mismatch	0.045	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.032
	Rx cable - Network Analyzer mismatch	0.087	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.062
	Rx Antenna - Network Analyzer mismatch	0.003	U-shaped	$\sqrt{2}$	0.002
거치, 환경에 의한 불확도	Effects of Antenna position(상하)	0.135	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.078
	Effects of Antenna position(좌우)	0.335	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.193
	Effects of Antenna position(정렬)	0.065	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.038
	Effects of Phase position	0.382	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.221
	Effects of site(반사파 영향)	0.080	Rectangular	$\sqrt{3}$	0.046
Combined standard uncertainty, U					0.356
Final Comined standard uncertainty, Uc*					0.617
Expanded uncertainty, U(k=2)					1.234

3-안테나법으로 안테나 이득을 산출할 경우, 최종합성표준불확도는 합성표준불확도에 $\sqrt{3}$ 을 곱해서 구할 수 있다.

2.12. 최종 불확도 보고

안테나 이득 측정의 참값은 95% 신뢰도로 다음의 범위에 놓여있다.

$$(\text{Gain} \pm 1.234) \text{ dB } (k=2)$$

안테나 측정 국내 · 외 공동 연구



국립전파연구원

National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

발행일 2023. 3.

발행인 서 성 일

발행처 과학기술정보통신부 국립전파연구원

전 화 061) 338-4414

인 쇄 다우프린팅 Tel. 062) 952-2033

ISBN : 11-1721137-000144-01

〈 비 매 품 〉

주 의

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