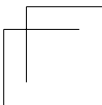
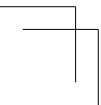


R-SAM 검증 연구를 통한 국제표준화 추진

2015. 12. 31.



제 출 문

본 보고서를 「R-SAM 검증 연구를 통한 국제표준화 추진」 과제의
최종보고서로 제출합니다.

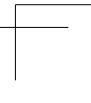
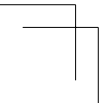
2015. 12. 31.

연구책임자1 : 박성두(전파시험인증센터 적합성인증과)
연구책임자2 : 이보원(전파시험인증센터 적합성인증과)
박성환(전파시험인증센터 적합성인증과)
서명원(전파시험인증센터 적합성인증과)
임종혁(전파시험인증센터 적합성인증과)
최윤조(전파시험인증센터 적합성인증과)



요 약 문

본 보고서는 2011년 국립전파연구원에서 새롭게 개발한 표준안테나 법 R-SAM(Radio Research Agency - Standard Antenna Method)을 검증하고 안테나 인자를 결정하기 위해 특성이 동등한 안테나를 사용하는 새로운 개념의 표준안테나를 제안하였다. 새로운 개념의 표준안테나에 대한 검증을 위해 각각의 주파수 대역별(1.12 GHz ~ 1.8 GHz, 1.8 GHz ~ 2.6 GHz, 2.6 GHz ~ 3.95 GHz, 3.95 GHz ~ 5.85 GHz, 5.85 GHz ~ 8.2 GHz, 8.2 GHz ~ 12.5 GHz, 12.5 GHz ~ 18 GHz) 7쌍의 특성이 동등한 안테나를 설계하고 제작하였다. 제작된 혼 안테나의 동등 특성을 검증하기 위하여 임의의 소스 안테나와 제작된 안테나 사이의 시험장 감쇠량을 측정하고 상호비교 하였다. 모든 대역에서 측정한 제작된 안테나의 시험장 감쇠량 특성은 최대 0.19 dB 차이의 동등 특성을 보이며 동등성이 검증 되었다. 또한 동등성이 확보된 제작된 안테나(최대오차 : 0.19 dB)를 R-SAM으로 측정하여 동등한 표준안테나의 안테나 인자(AF)를 결정하였다. R-SAM의 유효성을 검증하기 위하여 추출된 안테나 인자를 이용하여 제 3의 광대역 혼 안테나 C를 R-SAM에 의해 교정하고 3-안테나 법 (TAM)으로 교정한 결과와 상호 비교하였다. 측정된 결과는 0.06 dB 이내로 잘 일치함을 보이며 R-SAM 측정법의 유효성이 검증되었다. 또한 현장에서 상용으로 사용하고 있는 안테나에도 R-SAM 측정법을 적용(R-SAM은 수신측에 기준안테나를 놓고 송신 안테나를 교정하는 획기적인 방법이기 때문)하고 그 측정방법의 유효성을 검증하기 위하여 약 18 GHz 대역의 강우감쇠 측정용 안테나에 제작된 표준 안테나를 사용하여 R-SAM을 적용하였다. 측정된 안테나 인자의 결과는 0.23 dB의 차이를 보이며 상용 안테나 측정에도 R-SAM 측정법이 유효하다는 것을 증명 하였다.



목 차

제1장 서 론	1
제2장 R-SAM과 표준안테나	2
제1절 R-SAM 리뷰	3
제2절 1 GHz 이상 대역 표준 안테나 제안	4
제3장 동등 표준안테나 설계 및 제작	6
제1절 혼 안테나 복사 및 설계 이론	6
제2절 피라미드형 혼 안테나 설계	17
제3절 동등 혼 안테나 제작 및 측정결과	29
제4장 동등 표준안테나에 의한 R-SAM 검증	47
제1절 동등 혼 안테나의 표준 안테나 인자 결정	47
제2절 R-SAM과 3-안테나 법 측정결과 상호비교	56
제3절 상용안테나를 사용한 R-SAM 유효성 검증	71
제5장 맺음말	75
* 참고문헌	76

표 목 차

[표 3.2.1] 주파수 대역별 혼 안테나 세부적인 크기 및 규격	28
[표 3.3.1] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 동등성 평가 결과	36
[표 3.3.2] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 동등성 평가 결과	37
[표 3.3.3] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 동등성 평가 결과	39
[표 3.3.4] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 동등성 평가 결과	40
[표 3.3.5] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 동등성 평가 결과	42
[표 3.3.6] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 동등성 평가 결과	43
[표 3.3.7] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 동등성 평가 결과	45
[표 4.1.1] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	49
[표 4.1.2] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	50
[표 4.1.3] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	51
[표 4.1.4] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	52
[표 4.1.5] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	53
[표 4.1.6] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	54
[표 4.1.7] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자	55
[표 4.2.1] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역)	57
[표 4.2.2] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역)	59
[표 4.2.3] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역)	61
[표 4.2.4] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역)	63
[표 4.2.5] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역)	65
[표 4.2.6] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역)	67
[표 4.2.7] R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과(12.5 GHz ~ 18 GHz대역)	69

그 립 목 차

[그림 2.1.1] 국립전파연구원형 표준안테나법(R-SAM)의 측정 구성	2
[그림 3.1.1] 피라미드 혼 안테나	6
[그림 3.1.2] E -plane 혼 안테나	7
[그림 3.1.3] E -plane 혼 안테나를 해석하기 위한 기하 구조	8
[그림 3.1.4] H -plane 혼 안테나	13
[그림 3.1.5] H -plane 혼 안테나를 해석하기 위한 기하 구조	14
[그림 3.2.1] 혼 안테나 급전도파관 및 개구면 구조	17
[그림 3.2.2] 피라미드형 혼 안테나 세부 구조	21
[그림 3.2.3] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(1.12 GHz ~ 1.8 GHz)	23
[그림 3.2.4] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz)	24
[그림 3.2.5] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz)	25
[그림 3.2.6] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz)	26
[그림 3.2.7] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz)	27
[그림 3.3.1] 제작된 1 GHz ~ 8 GHz 대역 혼 안테나(5쌍)	29
[그림 3.3.2] 제작된 안테나의 동등성 평가	34
[그림 3.3.3] 치환법에 의한 안테나 사이의 감쇠량 측정 비교	35
[그림 3.3.4] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(1.12 GHz ~ 1.8 GHz)	37
[그림 3.3.5] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz)	38
[그림 3.3.6] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz)	40
[그림 3.3.7] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz)	41
[그림 3.3.8] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz)	43
[그림 3.3.9] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz)	44
[그림 3.3.10] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(12.5 GHz ~ 18 GHz)	46
[그림 4.1.1] 제작 안테나 동등성 평가를 위한 감쇠량 측정	48
[그림 4.1.2] 측정된 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 표준 안테나 인자	49

[그림 4.1.3] 측정된 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 표준 안테나 인자	50
[그림 4.1.4] 측정된 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 표준 안테나 인자	51
[그림 4.1.5] 측정된 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 표준 안테나 인자	52
[그림 4.1.6] 측정된 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 표준 안테나 인자	53
[그림 4.1.7] 측정된 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 표준 안테나 인자	54
[그림 4.1.8] 측정된 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 표준 안테나 인자	55
[그림 4.2.1] 안테나 인자 상호비교 결과(1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역)	58
[그림 4.2.2] 안테나 인자 상호비교 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역)	60
[그림 4.2.3] 안테나 인자 상호비교 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역)	62
[그림 4.2.4] 안테나 인자 상호비교 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역)	64
[그림 4.2.5] 안테나 인자 상호비교 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역)	66
[그림 4.2.6] 안테나 인자 상호비교 결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역)	68
[그림 4.2.7] 안테나 인자 상호비교 결과(12.5 GHz ~ 18 GHz대역)	70
[그림 4.3.1] 17.94 GHz에서 운용하는 강우감쇠 측정용 안테나 시스템 ...	72
[그림 4.3.2] 강우감쇠 측정시스템의 측정결과	73
[그림 4.3.3] 수신지점에서 측정된 수신 전력 : $f_c = 17.94$ GHz	74

제 1 장 서 론

최근 주파수 자원의 한계로 사용주파수 대역이 점차 밀리미터파 대역으로 확장되고 있으며 안테나의 특성을 정확하게 측정하기 위한 측정기술 또한 그 중요성이 날로 증가되고 있다. 특히 안테나 교정은 전파의 세기를 측정하는 EMI용 안테나의 전압-전계강도 변환 인자인 안테나 인자 측정을 목적으로 하고 있으며 국제 무선장해 위원회(CISPR 16-1-6)에서는 자유공간 안테나 인자 측정을 권고하고 있다. 안테나 인자 측정방법으로는 세계적으로 3-안테나 법(TAM), 미국국립표준(ANSI)에서 제시하는 표준 시험장 법, 표준 안테나법이 주로 사용되고 있다.

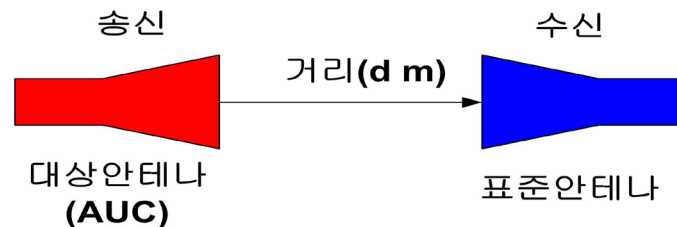
기존의 3-안테나 법, 표준 시험장 법, 표준 안테나 법은 반드시 3개의 안테나를 사용하고 2번 내지 3번의 측정을 통하여 안테나 인자를 결정할 수 있다. 하지만 국립전파연구원에서 개발한 표준 안테나 법(R-SAM)은 송신측에 피측정(AUC) 안테나를 설치하고 수신측에 값을 알고 있는 표준 안테나($ANT_{std.}$)를 설치하여 단 한 번의 측정구성으로 안테나 사이의 감쇠량을 측정하여 안테나를 교정할 수 있는 획기적인 기술이다. 특히 반사파로부터 자유로운 GHz이상 대역에서 특성이 똑같은 2 개의 안테나가 존재한다면 두 안테나 사이의 삽입손실을 단 한번 측정함으로써 표준 안테나의 인자를 이론적으로 계산하고 표준안테나의 인자를 정의내릴 수 있다. 따라서 R-SAM은 측정방법의 간소화뿐만 아니라 측정 불확도를 낮추는 장점을 갖는다.

따라서 본 보고서에서는 새로운 개념의 표준 안테나를 설명하기 위하여 약 1 GHz ~ 18 GHz대역에서 동작하는 동등한 혼 안테나 7 쌍을 설계하고 제작하였다. 제안된 혼 안테나는 동등 특성 0.2 dB이내의 편차를 갖도록 제작되었다. 그리고 R-SAM을 사용하여 동등한 혼안테나의 인자를 측정하고 분석하였다. R-SAM 측정법의 유효성을 검증하기 위하여 R-SAM으로 얻은 표준안테나 인자를 사용하여 제 3의 광대역 혼 안테나 C를 교정하고, 기존의 대표적인 3-안테나 법으로 측정한 결과를 상호 비교하였다. 두 측정방법에 의해 측정된 결과는 최대 0.06 dB의 차이를 보였으며 그 결과로부터 R-SAM 측정방법의 유효성이 검증되었다. 또한 R-SAM 측정방법을 상용안테나에 적용시키고 그 유효성을 검증하기 위하여 국립전파연구원에서 강우감쇠 측정용으로 사용되고 있는 약 18 GHz대역의 송신 안테나를 R-SAM에 의해 측정하였다. 측정 결과로부터 약 0.23 dB의 차이를 보이며 R-SAM 측정법이 상용 안테나에도 유효하다는 것이 검증되었다.

제 2 장 R-SAM과 표준안테나

제1절 R-SAM 리뷰

국립전파연구원형 표준 안테나법(R-SAM)은 [그림 2.1.1]에서 보여주는 바와 같이 안테나 인자를 알고 있는 표준안테나를 수신측에 위치시키고 피 측정 대상안테나(AUC)를 송신측에 위치시키는 측정구성으로 단 한 번의 측정을 통해 안테나 인자를 측정하는 획기적인 기술이다. 원칙적으로 주파수에 구애 받지 않으나 표준 안테나의 주파수에 의존한다. 만약 반사파가 존재 한다면 한쪽 안테나를 특정 범위의 높이로 스캔하여 최대전계의 지점에서 측정하게 되며 보통 30 MHz ~ 1 GHz 대역의 안테나를 야외시험장에서 측정할 때 유용하다. 특히 1 GHz이상 대역 지향성이 강한 혼 안테나의 경우에는 반사파가 거의 존재하지 않기 때문에 자유공간 조건과 동일한 조건으로 두 안테나를 고정한 채로 2 m 높이 이상의 야외 시험장에서 안테나 인자를 산출한다. 만약 양질의 전자파무반사실(챔버)에서는 반사파를 무시하고 R-SAM을 바로 적용할 수 있다.



[그림 2.1.1] 국립전파연구원형 표준안테나법(R-SAM)의 측정 구성

R-SAM은 [그림 2.1.1]의 안테나 이득이 G_T 이고 송신출력이 P_T 인 송신(대상) 안테나로부터 거리(d m)인 지점에 방사되는 전기장의 세기 E_R 이 다음과 같이 주어지는 것에 근거를 둔다.

$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{d_m} \quad (2.1.1)$$

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

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

$$AF(dB/m) = E(dBV/m) - V(dBV) \quad (2.1.2)$$

식 (2.1.1)을 이용하여 R-SAM 방법에 의한 안테나 인자 산출 방정식을 얻을 수 있다. 이 과정에서 안테나 인자(AF)와 안테나 이득(G)과의 관계를 이용한다.

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

$$AF(dB/m) = 20\log(AF) = 10\log\left(\frac{480\pi^2}{Z_L}\right) - 20\log(\lambda) - G(dB) \quad (2.1.3)$$

여기서, Z_L 은 수신 안테나의 입력 임피던스 이다.

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

$$AF_T = -AF_R + 10\log(P_T) + 20\log(f_{MHz}) - 20\log(V_R) - 20\log(d_1) - 15.01 \quad (2.1.4)$$

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

$$AF_T(dB/m) = -AF_R + A_{RT} + 20\log f_{MHz} - 20\log d_1 - 32 \quad (2.1.5)$$

제2절 1 GHz 이상 대역 표준안테나 제안

1. 표준안테나에 대한 고찰

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

2. 동등안테나 개념을 사용한 표준안테나 제안

30 MHz ~ 1 GHz 대역 다이폴 형 표준안테나는 안테나 교정을 거치지 않고 발룬(Balun)의 특성에 의하여 안테나의 인자를 산출할 수 있다. 현재까지 표준 안테나라고 일컬어지는 것은 다이폴 형태이며 발룬에 특수한 장치를 고안하여 만들어 졌으며 세계적으로 NIST형과 NPL형 안테나가 개발되어 사용되고 있다. 그러므로 아직까지 표준안테나로 정의된 안테나는 30 MHz ~ 1 GHz 대역 다이폴 안테나 뿐이다.

1 GHz 이상 대역 측정용 안테나는 혼 안테나가 주로 사용된다. 하지만 혼 안테나는 발룬 이라는 장치가 없다. 따라서 R-SAM 측정법에 따라 한쪽에 안테나 인자를 아는 표준안테나를 설치하면 대상 안테나는 한 번의 측정으로 안테나 인자(AF_T)를 식 (2.1.5)와 같이 정의할 수가 있다.

$$AF_T(dB/m) = -AF_R + A_{RT} + 20\log f_{MHz} - 20\log d_1 - 32 \quad (2.1.5)$$

만약 특성이 똑같은 두 안테나가 있다면 안테나 사이의 감쇠량을 단 한 번 측정하여 동등한 표준안테나의 안테나 인자를 정의할 수가 있다. 다이폴 안테나의 경우 표준안테나는 발룬의 RF-DC 관계를 측정하거나, 하이브리드의 S파라미터를

측정함으로써 안테나 인자를 산출할 수 있는 것처럼 동등한 두 안테나는 단 한 번의 감쇠량 측정으로 안테나 인자를 측정할 수가 다. 따라서 동등한 두 안테나는 일종의 표준안테나의 역할을 하고 표준 안테나라 정의 할 수 있는 것이다. 더군다나 1 GHz 이상 대역의 혼 안테나는 강한 지향성 때문에 야외시험장에서 어떤 특정한 높이 이상에서는 반사파를 거의 무시할 수가 있어서 자유공간 조건을 만족한다 할 수 있다. 안테나의 동등성이 인정된다면 R-SAM의 식 (2.1.5)에서 $AF_R = AF_T$ 가됨으로 동등 안테나의 안테나 인자는 식 (2.1.6)과 같이 표현될 수 있다.

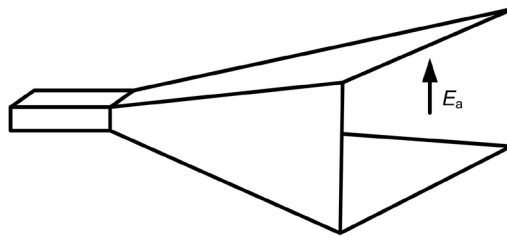
$$AF_R(dB/m) = \frac{1}{2} A_{RT} + 10 \log f_{MHz} - 10 \log d_1 - 16 \quad (2.1.6)$$

제 3 장 동등 표준안테나 설계 및 제작

제1절 혼 안테나 복사 및 설계 이론

1. 피라미드 혼 안테나

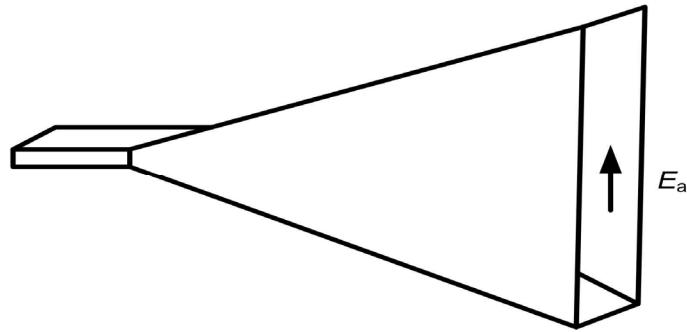
도파관은 속이 비어있는 파이프로 된 전송선으로서 마이크로파대역에서 일반적으로 많이 사용된다. 도파관의 한쪽 길이가 반파장 보다 긴 경우 전자파는 아주 적은 손실로 도파관을 따라 전달 될 수 있으며 만일 도파관의 한쪽 면이 열려진 상태로 있다면 전자파는 개구면 끝부분으로부터 공간으로 복사된다. 실제의 도파관은 파의 전달 특성 때문에 크기가 반파장보다 크지만 한 파장보다 더 작으면 고차 모드의 억누름(suppress)이 있게 되어 낮은 손실로 전송하는데 방해가 된다. 그리하여 도파관의 열린 끝부분이 한 파장보다 작을 때에는 높은 이득을 얻기가 곤란하다. 더 높은 이득을 구현하기 위하여 도파관 구멍을 더 늘려야 하지만 그 크기를 더 늘리기가 곤란하다. 이에 대한 대안으로 도파관이 서서히 커지면서 열려있는 개구 면까지 도달하게 설계함으로서 원하지 않는 모드가 도파관에 도달하지 못하게 하여 더 큰 안테나 이득을 얻게 할 수 있는데 이러한 구조가 혼 안테나이다. 오늘날 가장 일반적으로 사용하는 혼 안테나는 [그림 3.1.1]과 같은 피라미드형 혼 안테나로 이론적으로 완전한 해석이 가능하여 안테나 교정용으로 사용하기 편리하다. 피라미드형 혼 안테나를 해석하기 위하여 먼저 E -plane 혼 안테나와 H -plane 혼 안테나를 고려한다.



[그림 3.1.1] 피라미드 혼 안테나

2. *E*-plane 혼 안테나의 해석

E-plane 혼 안테나는 개구면이 전기장과 평행한 방향으로 도파관의 폭과 같은 길이로 높이 방향으로 길게 늘어진 형태로 전형적인 모습은 [그림 3.1.2]에서 보여주며 이를 해석하기 위한 기하구조는 [그림 3.1.3]과 같다.



[그림 3.1.2] *E*-plane 혼 안테나

E-plane 혼 안테나 개구의 전계 및 자계의 세기는 안테나 학자 Balanis에 의해 다음과 같이 설명된다.

$$E_{z'} = E_{x'} = H_{y'} = 0 \quad (3.1.1)$$

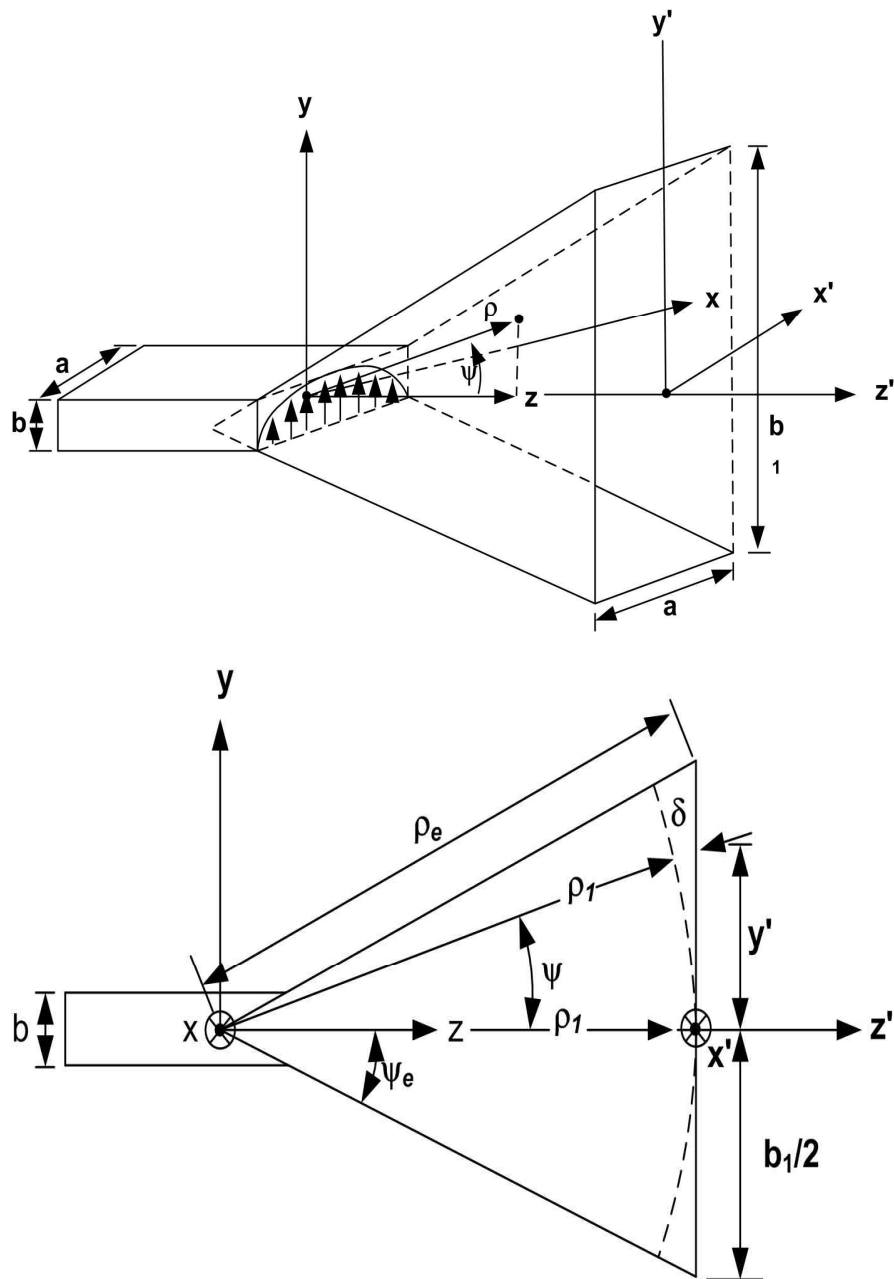
$$E_{y'}(x', y') \cong E_1 \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(\frac{-jky'^2}{2\rho_1}\right)$$

$$H_{z'}(x', y') \cong jE_1 \left(\frac{\pi}{Ka\eta}\right) \sin\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(-\frac{jky'^2}{2\rho_1}\right)$$

$$H_{x'}(x', y') \cong -\frac{E_1}{\eta} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(\frac{-jky'^2}{2\rho_1}\right)$$

여기서 $\rho_1 = \rho_e \cos(\Psi_e)$, $\eta = 1/(120\pi)$ 이다.

또한 개구의 표면 전류 밀도는 $-a/2 \leq x' \leq a/2$ 및 $-b/2 \leq y' \leq b/2$ 범위에서



[그림 3.1.3] E-plane 혼 안테나를 해석하기 위한 기하 구조

$$J_{s'}(x, y') \cong -\frac{E_1}{\eta} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(-\frac{jky'^2}{2\rho_1}\right) \quad (3.1.2)$$

$$M_{s'}(x, y') \cong -E_1 \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(-\frac{jky'^2}{2\rho_1}\right) \quad (3.1.3)$$

로 주어지며, 그 밖의 범위에서 전류밀도는 0이다. 벡터량 J_s 는 y 성분, M_s 는 x 성분만을 가지고 있으며 그 밖의 모든 성분은 0이다. 따라서 개구면 안테나가 방사하는 전기장 성분은 다음과 같다.

$$E_\theta = \frac{(-jke^{-jkr})}{(4\pi)} (L_\theta + \eta N_\theta) \quad (3.1.4)$$

$$E_\phi = \frac{(jke^{-jkr})}{(4\pi)} (L_\phi + \eta N_\phi) \quad (3.1.5)$$

여기서,

$$N_\theta = \iint_S (J_x \cos\theta \cos\phi + J_y \cos\theta \sin\phi - J_z \sin\theta) \exp(jkr' \cos\psi) ds' \quad (3.1.6)$$

$$N_\phi = \iint_S (-J_x \sin\phi + J_y \cos\phi) \exp(jkr' \cos\psi) ds' \quad (3.1.7)$$

$$L_\theta = \iint_S (M_x \cos\theta \cos\phi + M_y \cos\theta \sin\phi - M_z \sin\theta) \exp(jkr' \cos\psi) ds' \quad (3.1.8)$$

$$L_\phi = \iint_S (-M_x \sin\phi + M_y \cos\phi) \exp(jkr' \cos\psi) ds' \quad (3.1.9)$$

방정식 (3.1.2)에 따라 (3.1.6)의 N_θ 는

$$N_\theta = \iint_S \left[-\frac{E_1}{\eta} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(-\frac{jky'^2}{2\rho_1}\right) \cos\theta \sin\phi \right] \exp(jkr' \cos\psi) ds' \text{ 로 주어지며,}$$

그림의 좌표에서

$r' \cos\psi = x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi$ 이므로 다음 식이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 N_{\theta} &= \iint_S \left[-\frac{E_1}{\eta} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp\left(\frac{-jky'^2}{2\rho_1}\right) \cos\Theta \sin\Phi \right] \exp[(jk(x' \sin\Theta \cos\Phi + y' \sin\Theta \sin\Phi)) dy' \\
 &= -\frac{E_1}{\eta} \cos\Theta \sin\Phi \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp(jkx' \sin\Theta \cos\Phi) dx' \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp\left(\frac{-jky'^2}{2\rho_1}\right) \exp(jky' \sin\Theta \sin\Phi) dy'
 \end{aligned}$$

적분 테이블에 의하면

$$\int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \cos\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \exp(jkx' \sin\Theta \cos\Phi) dx' = -\left(\frac{\pi a}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{kasin\Theta \cos\Phi}{2}\right) / \left\{ \left(\frac{kasin\Theta \cos\Phi}{2}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \right\} \right]$$

이며

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \exp\left(\frac{-jky'^2}{2\rho_1}\right) \exp(jky' \sin\Theta \sin\Phi) dy' \\
 &= \sqrt{\left(\frac{\pi\rho_1}{k}\right) \exp\left(\frac{jky^2}{2\rho_1}\right) [C(t_2) - C(t_1) - jS(t_2) - S(t_1)]} \quad \text{이다.}
 \end{aligned}$$

여기서,

$$C(t) = \gamma + \ln(t) + \int_0^t \frac{(\cos u - 1)}{u} du$$

$$S(t) = \int_0^t \frac{\sin u}{u} du$$

$$t_1 = \frac{-b_1}{\sqrt{(2\lambda\rho_1)}}$$

$$t_2 = \frac{b_1}{\sqrt{(2\lambda\rho_1)}}$$

이다. 따라서

$$N_{\theta} = -E_1 \left(\frac{\pi a}{2}\right) \sqrt{\left(\frac{\pi\rho_1}{k}\right) \exp\left(\frac{jky^2}{2\rho_1}\right)} \cos\Theta \sin\Phi / \eta \left[\cos\left(\frac{kasin\Theta \cos\Phi}{2}\right) / \right]$$

$$\left\{ \left(\frac{k a \sin \Theta \cos \Phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \right\}] [\{ C(t_2) - C(t_1) \} - j S(t_2) - S(t_1)] \quad (3.1.10)$$

이며 유사한 유도과정을 통하면

$$N_\Phi = E_1 \left(\frac{\pi a}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{\pi \rho_1}{k} \right) \exp \left(\frac{j k y^2}{2 \rho_1} \right) \sin \Phi \left[\cos_\Phi \left(\frac{k a \sin \Theta \cos \Phi}{2} \right) / \left\{ \left(\frac{k a \sin \Theta \cos \Phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \right\} \right]} F(t_1, t_2)$$

$$L_\Phi = E_1 \left(\frac{\pi a}{2} \right) \sqrt{\left(\frac{\pi \rho_1}{k} \right) \exp \left(\frac{j k y^2}{2 \rho_1} \right) \sin \Phi \left[\cos \left(\frac{k a \sin \Theta \cos \Phi}{2} \right) / \left\{ \left(\frac{k a \sin \Theta \cos \Phi}{2} \right)^2 - \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \right\} \right]} F(t_1, t_2) \quad (3.1.11)$$

$$F(t_1, t_2) \equiv \{ C(t_2) - C(t_1) \} - j S(t_2) - S(t_1)$$

식 (3.1.4), (3.1.5), (3.1.10) 및 (3.1.11)에 의하면 E -plane 혼 안테나에서 방사되는 전기장의 세기는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$E_\Theta = -j(a \sqrt{(k \pi \rho_1)} E_1 e^{-j k r}) / (8r) \exp(j k y^2 / 2 \rho_1) \sin \Phi (1 + \cos \Theta) \cos(k a \sin \Theta \cos \Phi / 2) / (k a \sin \Theta \cos \Phi / 2)^2 - (\pi / 2)^2] F(t_1, t_2) \quad (3.1.12)$$

$$E_\Phi = -j(a \sqrt{(k \pi \rho_1)} E_1 e^{-j k r}) / (8r) \exp(j k y^2 / 2 \rho_1) \cos \Phi (1 + \cos \Theta) \cos(k a \sin \Theta \cos \Phi / 2) / (k a \sin \Theta \cos \Phi / 2)^2 - (\pi / 2)^2] F(t_1, t_2) \quad (3.1.13)$$

그러므로 E -plane 혼 안테나가 방사하는 최대 전력 밀도는 다음과 같다.

$$U_{\max} = \frac{r^2}{2\eta} |E|_{\max}^2 \quad (3.1.14)$$

여기서,

$$|E|_{\max}^2 = |E_\Theta|_{\max}^2 + |E_\Phi|_{\max}^2$$

이며 대부분의 혼 안테나의 경우 최대방사는 $\Theta = 0$ 인 z 축으로 방사한다.

$$\begin{aligned} |E_{\Theta}|_{\max} &= a \sqrt{(k\pi\rho_1)/(\pi^2 r) |E_1 \sin \Phi F(t_1, t_2)|} \\ |E_{\Phi}|_{\max} &= a \sqrt{(k\pi\rho_1)/(\pi^2 r) |E_1 \cos \Phi F(t_1, t_2)|} \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

$t_2 = -t_1 \equiv t$ 이면

$$|F(t_1, t_2)| = |F(t, -t)| = 2 |C(t_1) - jS(t)| = 2 |F(t)| \quad \text{이다.}$$

그러므로 식 (3.1.14)는 다음과 같다.

$$U_{\max} = \frac{2a^2 k \rho_1}{(\eta \pi^3)} |E_1|^2 |F(t)|^2 \quad (3.1.16)$$

한편 E -plane 혼 안테나가 방사하는 총 전력은 포인팅 벡터에 의해

$$P_{rad} = \iint_s \text{Re}[E \times H] ds$$

로 주어지고 식 (3.1.1)을 사용하면

$$\text{Re}[E \times H] = \frac{|E_1|^2}{\eta} \cos^2\left(\frac{\pi x'}{a}\right) \quad \text{이므로 방사 총 전력은}$$

$$P_{rad} = \frac{b_1}{2\eta} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} |E_1|^2 \cos^2\left(\frac{\pi x'}{a}\right) dx' = \frac{ab_1}{4\eta} |E_1|^2 \quad (3.1.17)$$

한편 안테나의 이득은 다음과 같은 식으로 정의된다.

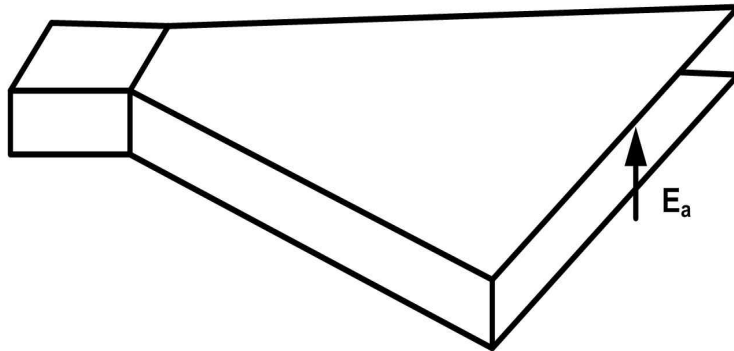
$$G = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} \quad (3.1.18)$$

식 (3.1.16), (3.1.17) 및 (3.1.18)을 이용하면 E-plane 혼 안테나의 이득은 다음과 같다.

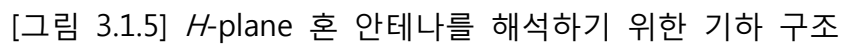
$$G_E = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{\text{rad}}} = \frac{64a\rho_1}{\pi\lambda b_1} |F(t)|^2 \quad (3.1.19)$$

3. H-plane 혼 안테나의 해석

[그림 3.1.4]에서 보는 바와 같이 H-plane 혼 안테나는 E-plane 혼 안테나와 반대로 개구 면이 자기장과 평행한 방향으로 도파관의 폭과 같은 길이로 가로 방향으로 길게 늘여진 형태로 방사된다. 이를 해석하기 위한 기하구조는 [그림 3.1.5]와 같다.



[그림 3.1.4] H-plane 혼 안테나



(3-20)

앞에서 설명된 E -plane 혼 안테나의 과정과 유사한 과정으로 전력밀도 U_{\max} 는 다음과 같은 관계식이 유도된다.

$$U_{\max} = \frac{b^2 \rho_2}{(4\eta\lambda)} |E_2|^2 \{ [C(u) - C(v)]^2 + [S(u) - S(v)]^2 \} \quad (3.1.21)$$

여기서,

$$u = (\sqrt{\lambda\rho_2}/a_1 - a_1/\sqrt{\lambda\rho_2})/\sqrt{2}$$

$$u = (\sqrt{\lambda\rho_2}/a_1 + a_1/\sqrt{\lambda\rho_2})/\sqrt{2} \quad \text{이다.}$$

H -plane 혼 안테나의 총 방사 전력과 안테나 이득은 식 (3.1.22)와 식 (3.1.23)과 같다.

$$P_{rad} = \frac{ba_1}{4\eta} |E_2|^2 \quad (3.1.22)$$

$$G_H = \frac{4\pi U_{\max}}{P_{rad}} = \frac{4\pi b \rho_2}{\lambda a_1} \{ [C(u) - C(v)]^2 + [S(u) - S(v)]^2 \} \quad (3.1.23)$$

4. 피라미드형 혼 안테나의 이득

피라미드형 혼 안테나는 위에서 설명된 E -plane와 H -plane 혼 안테나의 전력밀도 U_{\max} 와 방사전력 P_{rad} 의 유도결과를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{\max} = \frac{|E_0|^2 \rho_1 \rho_2}{(2\eta\lambda)} [C(u) - C(v)]^2 + [S(u) - S(v)]^2 |F(t)|^2$$

$$P_{rad} = \frac{a_1 b_1}{4\eta} |E_0|^2 \quad (3.1.24)$$

그러므로 피라미드형 혼 안테나의 이득은 식 (3.1.25)와 같다.

$$G = \frac{8\pi\rho_1\rho_2}{(a_1b_1)} [(a_1b_1)[C(u) - C(v)]^2 + [S(u) - S(v)]^2 |F(t)|^2$$

$$= \frac{\pi\lambda}{(32ab)G_E G_H} \quad (3.1.25)$$

이러한 형태의 피라미드 혼 안테나의 구조에서 다음의 계수들은 E -plane에 대하여

$$P_e = (b_1 - b) \sqrt{\left(\frac{\rho_e}{b_1}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (3.1.26)$$

H -plane에 대하여

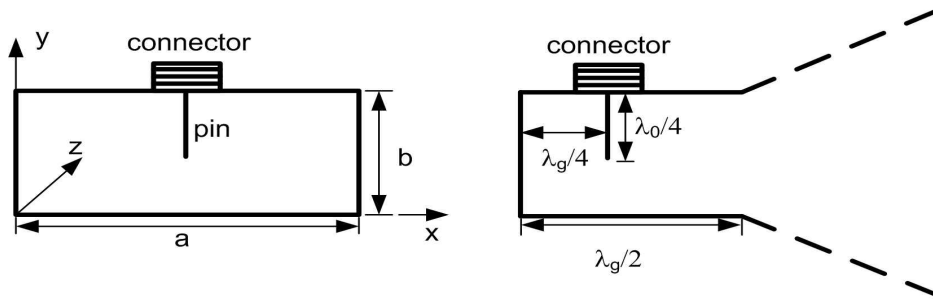
$$P_h = (a_1 - a) \sqrt{\left(\frac{\rho_h}{a_1}\right)^2 - \frac{1}{4}} \quad (3.1.27)$$

식 (3.1.27)과 같이 정의하면 $P_e = P_h$ 가 성립하지 않으면 피라미드형 혼 안테나는 물리적으로 구현하기가 불가능하다.

제2절 피라미드형 혼 안테나 설계

1. 혼 안테나 설계를 위한 직사각형 도파관

혼 안테나는 급전 점으로부터 입력된 전파를 전달하는 도파관과 공간으로 방사하기 위한 개구면으로 구성된다. [그림 3.2.1]에서 보는바와 같이 도파관의 크기, 특히 폭(a)은 전달되는 전자파의 차단 주파수(f_c)를 결정하게 되며 일반적으로 도파관의 높이(b)의 약 2배의 길이를 갖는다.



[그림 3.2.1] 혼 안테나 급전도파관 및 개구면 구조

직사각형 도파관은 TM , TE 모드(mode)가 존재하지만 TEM 모드는 존재하지 않는다. 따라서 전송선 또는 도파관에서 z 방향으로 진행하는 전자파의 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\nabla \times \ddot{\vec{E}} &= -j\omega\mu\ddot{\vec{H}} \\ \nabla \times \ddot{\vec{H}} &= -j\omega\epsilon\ddot{\vec{E}}\end{aligned}\quad (3.2.1)$$

여기서

$$\begin{aligned}\ddot{\vec{E}} &\equiv [E_x(x,y)e^{-j\beta z}, E_y(x,y)e^{-j\beta z}, E_z(x,y)e^{-j\beta z}], \\ \ddot{\vec{H}} &\equiv [H_x(x,y)e^{-j\beta z}, H_y(x,y)e^{-j\beta z}, H_z(x,y)e^{-j\beta z}]\end{aligned}\quad (3.2.2)$$

이다.

TE 모드는 $E_z = 0$ 이고 $H_z \neq 0$ 이므로 식 (3.2.1)과 식 (3.2.2)로부터 다음과

같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned}
 H_x &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \partial \frac{H_z}{\partial x} \\
 H_y &= -\frac{j\beta}{k_c^2} \partial \frac{H_z}{\partial y} \\
 E_x &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \partial \frac{H_z}{\partial y} \\
 E_y &= -\frac{j\omega\mu}{k_c^2} \partial \frac{H_z}{\partial x}
 \end{aligned} \tag{3.2.3}$$

여기서, $k_c^2 = k^2 - \beta^2$ 이며 $k = \omega \sqrt{(\mu\epsilon)}$ 로 도파관 내의 파수벡터이고 k_c 는 차단 파수벡터(cutoff wavenumber)로 정의되고 도파관에서 전자파가 전달될 수 있는 주파수 특성이며 다음과 같이 유도된다. [그림 3.2.1]과 같은 도파관 구조의 자기장 성분 H_z 에 대한 파동방정식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k_c^2 \right) H_z(x, y) = 0 \tag{3.2.4}$$

변수 분리에 따라 $H_z(x, y) = X(x)Y(y)$ 라 하면 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 X}{dx^2} + k_x^2 X &= 0 \\
 \frac{d^2 Y}{dy^2} + k_y^2 Y &= 0 \\
 k_x^2 + k_y^2 &= k_c^2
 \end{aligned} \tag{3.2.5}$$

H_z 에 대한 일반해는

$$= (A \cos k_x x + B \sin k_x x)(C \cos k_y y + D \sin k_y y) \tag{3.2.6}$$

과 같이 해석된다. 따라서 도파관 도체 벽의 접선성분에 대한 전기장은

$$\begin{aligned} E_x(x, y) &= 0, & 0 \leq y \leq b \\ E_y(x, y) &= 0, & 0 \leq x \leq a \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

이므로 (3.2.5)와 (3.2.7)에 따라

$$\begin{aligned} H_z(x, y, z) &= A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \text{ 이고,} \\ E_x(x, y, z) &= \left(-\frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ E_y(x, y, z) &= \left(-\frac{j\omega\mu n\pi}{k_c^2 a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ H_x(x, y, z) &= \left(\frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a}\right) A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ H_y(x, y, z) &= \left(\frac{j\beta m\pi}{k_c^2 b}\right) A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

이다.

TM 모드에서는 $H_z = 0$ 이고 $E_z \neq 0$ 이므로 TE 모드에서와 같은 과정을 거치면

$$\begin{aligned} E_z(x, y, z) &= B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ E_x(x, y, z) &= \left(-\frac{j\beta m\pi}{k_c^2 a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ E_y(x, y, z) &= \left(-\frac{j\beta n\pi}{k_c^2 b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ H_x(x, y, z) &= \left(-\frac{j\omega\epsilon n\pi}{k_c^2 b}\right) B_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \\ H_y(x, y, z) &= \left(-\frac{j\omega\epsilon m\pi}{k_c^2 a}\right) B_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) e^{-j\beta z} \end{aligned} \quad (3.2.9)$$

를 얻게 된다.

위에서 유도된 식으로부터 TE 및 TM 모드에서 전파상수 β 는

$$\beta = \sqrt{(k^2 - k_c^2)} = \omega \sqrt{[\epsilon - (m\pi/a)^2 - (n\pi/b)^2]} \quad (3.2.10)$$

식 (3.2.10)과 같이 주어지는데,

$$k > k_c = \sqrt{[(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2]} \quad (3.2.11)$$

일 때, β 가 실수가 되어 도파관내에서 전파가 가능하게 된다. $a > b$ 인 경우 식 (3.2.8)과 식 (3.2.11)에 따라 TE 모드에서 가장 낮은 주파수는 $m = 1, n = 0$ 으로 TE_{10} 모드로

$$f_c = \frac{ck_c}{2\pi} = \frac{\left[\sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \right]}{2\pi} = \frac{c}{2a} \quad (3.2.12)$$

이다. 여기서 c 는 전자파의 자유공간 속도 약 3×10^8 m이다. 한편, TM 모드에서는 식 (3.2.9)와 식 (3.2.11)에 의해서 $TM_{00}, TM_{01}, TM_{10}$ 모드는 존재하지 않는다. 따라서 도파관을 통과할 수 있는 모드는 TM_{11} 로 최저 주파수는 다음과 같다.

$$f_c = \frac{ck_c}{2\pi} = \frac{\left\{ c \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \right\}}{2\pi} \quad (3.2.13)$$

따라서 도파관을 통과하는 최저 주파수인 차단주파수(f_c)는 TE_{10} 모드인 식 (3.2.12)이다. 파수 벡터들의 관계식 (3.2.10)을 파장으로 표시하면 $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_g}, k = \frac{2\pi}{\lambda_0}, k_c = \frac{2\pi}{\lambda_c}$ 이므로 식 (3.2.10)은 다음과 같이 된다.

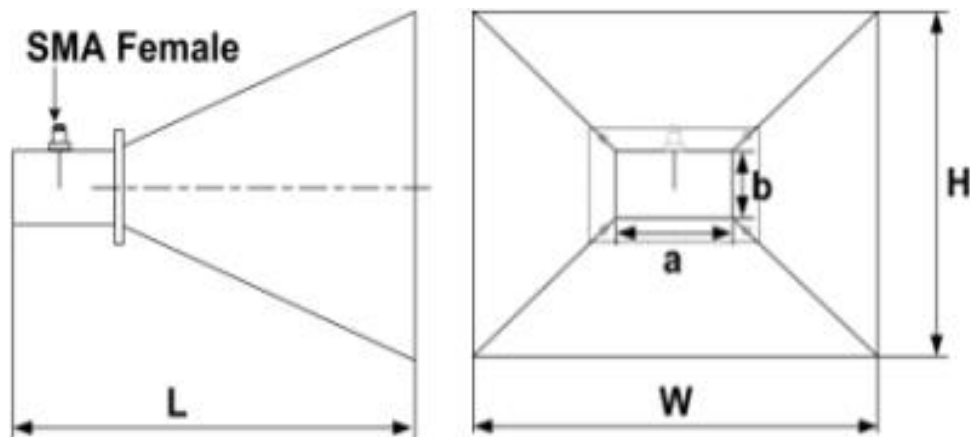
$$\frac{1}{\lambda_g} = \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2} - \frac{1}{\lambda_c^2}\right)} \quad (3.2.14)$$

[그림 3.2.1]의 직사각형 도파관 구조에서 길이는 $L = \frac{\lambda_g}{2}$, 급전 핀의 높이

$L_0 = \frac{\lambda_0}{4}$ 가 성립한다.

2. 피라미드형 혼 안테나 세부 설계(모의실험)

‘15년 R-SAM 유효성 검증연구로 계획한 1 GHz ~ 18 GHz 대역 중 약 1 GHz ~ 8 GHz 대역(5개 대역 : 1.12 GHz ~ 1.8 GHz, 1.8 GHz ~ 2.6 GHz, 2.6 GHz ~ 3.95 GHz, 3.95 GHz ~ 5.85 GHz, 5.85 GHz ~ 8.2 GHz)에서 동작하는 혼 안테나를 설계하기 위하여 앞에서 분석한 직사각형 도파관 구조에 따른 차단주파수(f_c) 특성과 식 (3.1.26) 및 식 (3.1.27)의 요건에 적합한 모의실험을 수행하였다. 8.2 GHz ~ 18 GHz의 2개 대역(8.2 GHz ~ 12.5 GHz, 12.5 GHz ~ 18 GHz) 안테나는 ‘14년 말에 외주 제작으로 수행되었기 때문에 본 보고서에서는 8 GHz ~ 18 GHz 대역 안테나의 설계내용은 포함되지 않았다. 설계된 혼 안테나의 구조는 모든 대역에서 [그림 3.2.2]와 유사하며 재질은 알루미늄, 급전 핀은 황동으로 구성하였다.

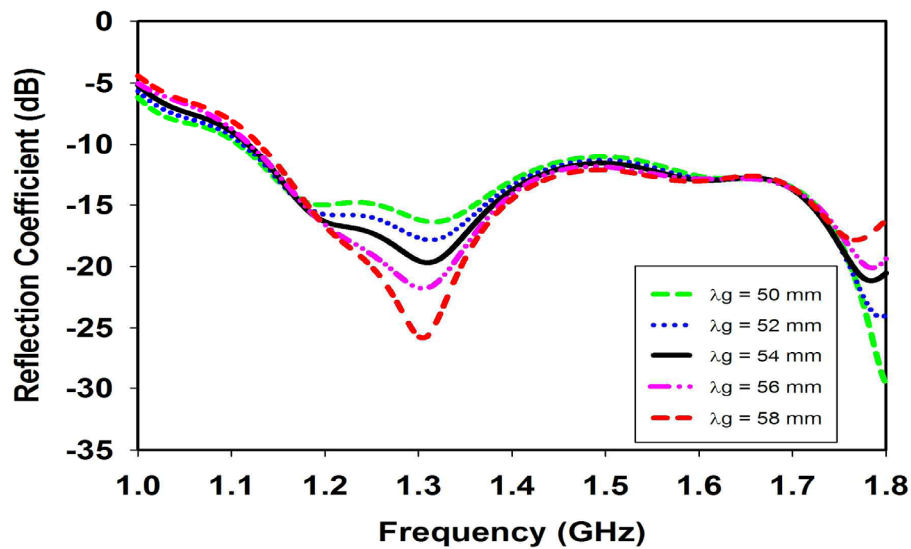


[그림 3.2.2] 피라미드형 혼 안테나 세부 구조

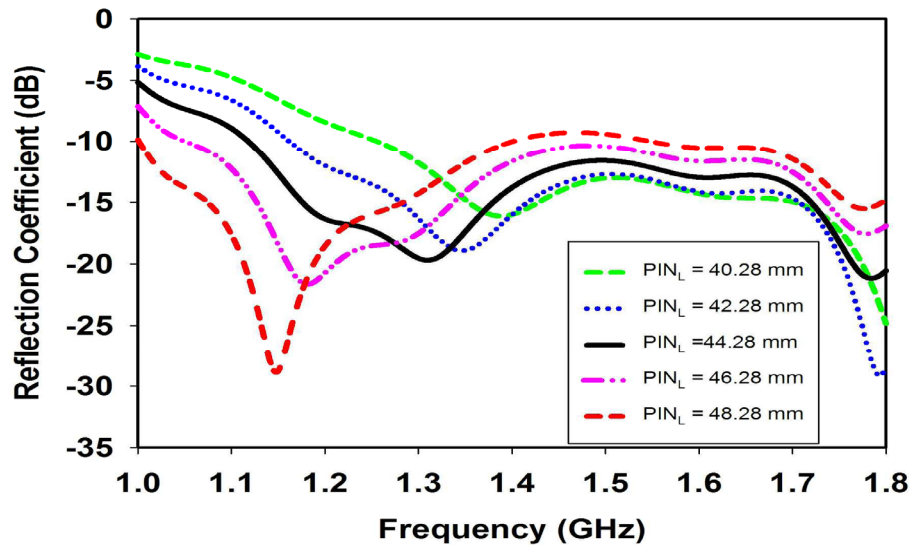
또한 각각의 주파수 대역별 최적의 특성을 얻기 위한 도파관의 급전 점 위치 및 급전 핀 길이에 파라미터 분석을 수행하였으며 각각의 결과는 아래에서 설명하였다.

가. 1.12 GHz ~ 1.8 GHz 대역의 모의실험 결과

[그림 3.2.3] (a), (b)는 최적의 반사계수 특성을 얻기 위해 앞에서 보여준 [그림 3.2.1]의 급전 점 위치($\lambda_g/4$) 및 급전 핀 길이($\lambda_0/4$)에 대한 설계 변수를 결정하기 위한 1.12 GHz ~ 1.8 GHz 대역의 모의실험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 바와 같이 안테나의 -10 dB 주파수 대역폭(bandwidth)은 급전 점의 위치보다 급전 핀의 길이에 민감한 특성을 보였다. 최적화된 설계 파라미터는 검정색 실선으로 표시된 것처럼 급전 점은 도파관 종단부로부터 $\lambda_g/4$, 약 54 mm 떨어진 지점이며, 급전 핀의 길이는 44.28 mm로 결정되었다.



(a) 급전 점 위치



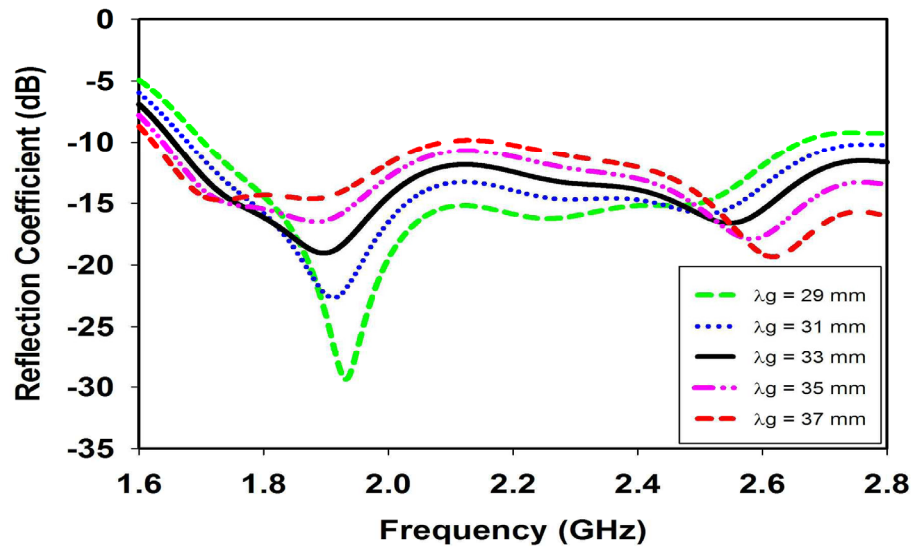
(b) 급전 핀 길이

[그림 3.2.3] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(1.1 GHz ~ 1.8 GHz) :

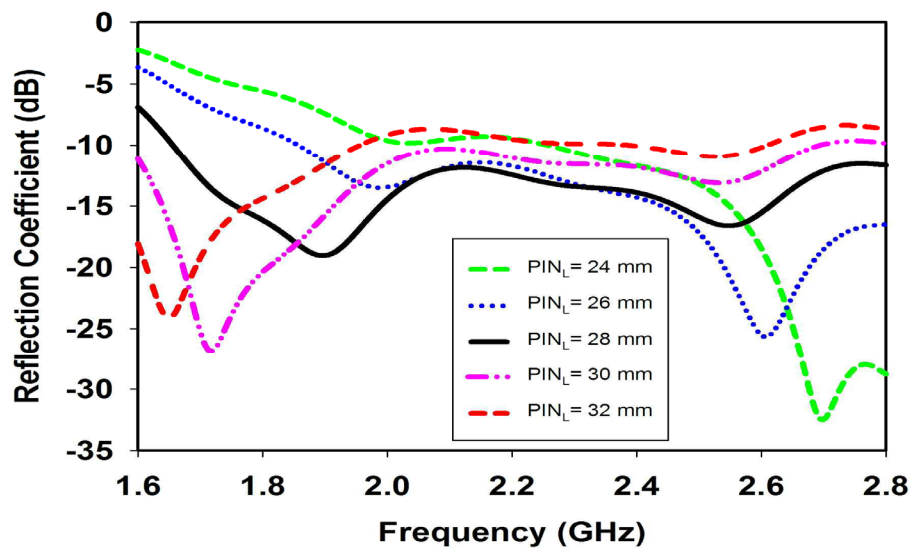
(a) 급전 점 위치, (b) 급전 핀 길이

나. 1.8 GHz ~ 2.6 GHz 대역의 모의실험 결과

[그림 3.2.4] (a), (b)는 1.8 GHz ~ 2.6 GHz 대역에 대한 설계 변수를 결정하기 위한 모의실험 결과를 보여주고 있다. 이 주파수 대역에서도 앞에서 설명된 [그림 3.2.3]과 같이 -10 dB 주파수 대역폭(bandwidth)은 급전 점의 위치보다 급전 핀의 길이에 더 민감한 특성을 보였다. 최적화된 설계 파라미터는 검정색 실선으로 표시된 것처럼 급전 점은 도파관 종단부로부터 $\lambda_g/4$, 약 33 mm 떨어진 지점이며, 급전 핀의 길이는 28 mm로 결정되었다.



(a) 급전 점 위치



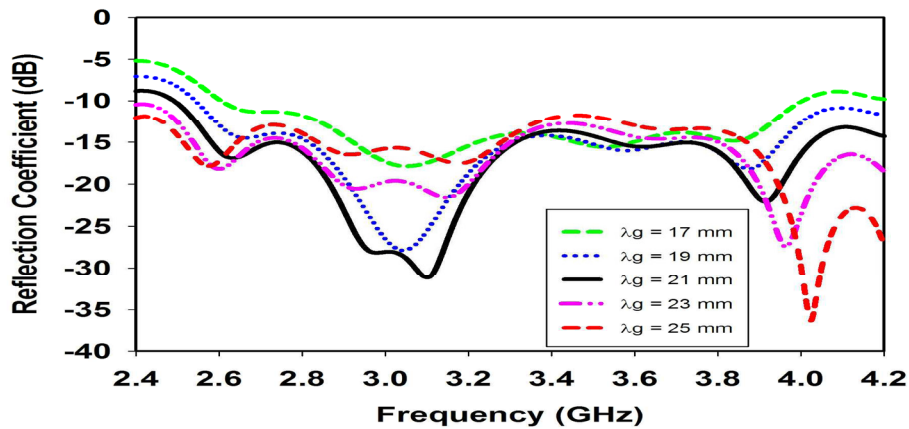
(b) 급전 핀 길이

[그림 3.2.4] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz) :

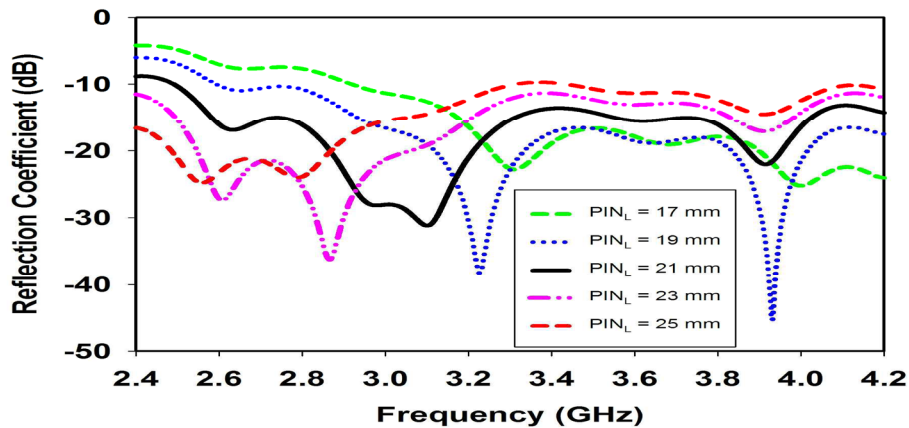
(a)급전 점 위치, (b)급전 핀 길이

다. 2.6 GHz ~ 3.95 GHz 대역의 모의실험 결과

[그림 3.2.5] (a), (b)는 2.6 GHz ~ 3.95 GHz 대역에 대한 설계 변수를 결정하기 위한 모의실험 결과를 보여주고 있다. 이 주파수 대역에서도 앞에서 설명된 것과 같이 -10 dB 주파수 대역폭(bandwidth)은 급전 점의 위치보다 급전 핀의 길이에 민감한 특성을 보였다. 최적화된 설계 파라미터는 검정색 실선으로 표시된 것처럼 급전 점은 도파관 종단부로부터 $\lambda_g/4$, 약 33 mm 떨어진 지점이며, 급전 핀의 길이는 28 mm로 결정되었다.



(a) 급전 점 위치



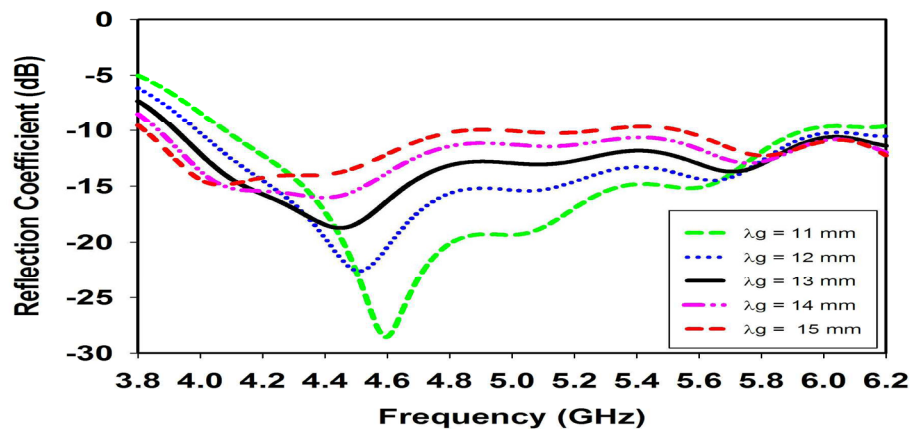
(b) 급전 핀 길이

[그림 3.2.5] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz) :

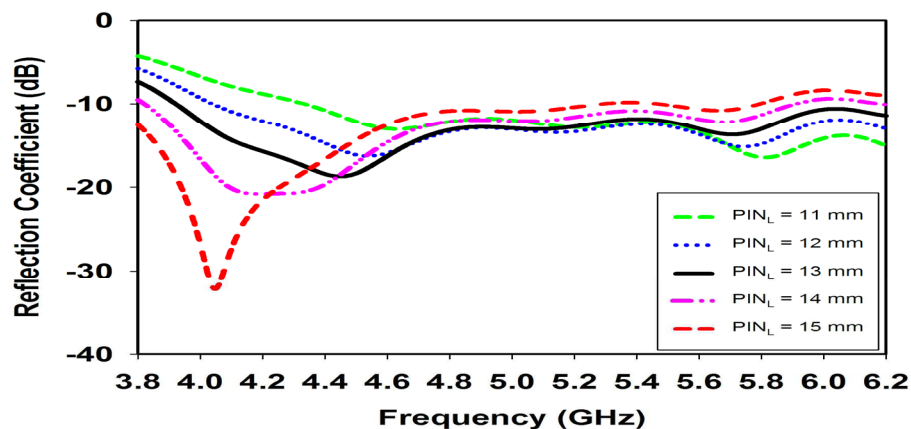
(a)급전 점 위치, (b)급전 핀 길이

라. 3.95 GHz ~ 5.85 GHz 대역의 모의실험 결과

[그림 3.2.6] (a), (b)는 3.95 GHz ~ 5.85 GHz 대역에 대한 설계 변수를 결정하기 위한 모의실험 결과를 보여주고 있다. 이 주파수 대역에서도 앞에서 설명된 것과 같이 -10 dB 주파수 대역폭(bandwidth)은 급전 점의 위치보다 급전 핀의 길이에 민감한 특성을 보였다. 최적화된 설계 파라미터는 검정색 실선으로 표시된 것처럼 급전 점은 도파관 종단부로부터 $\lambda_g/4$, 약 13 mm 떨어진 지점이며, 급전 핀의 길이는 13 mm로 결정되었다.



(a) 급전 점 위치

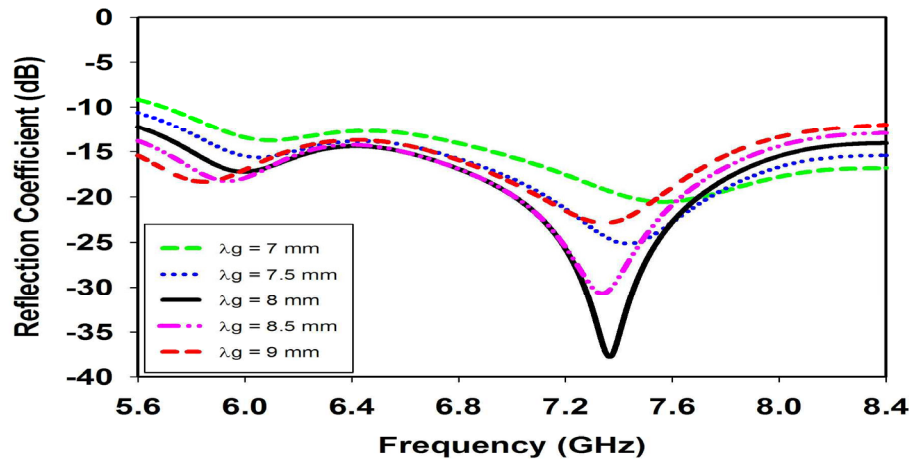


(b) 급전 핀 길이

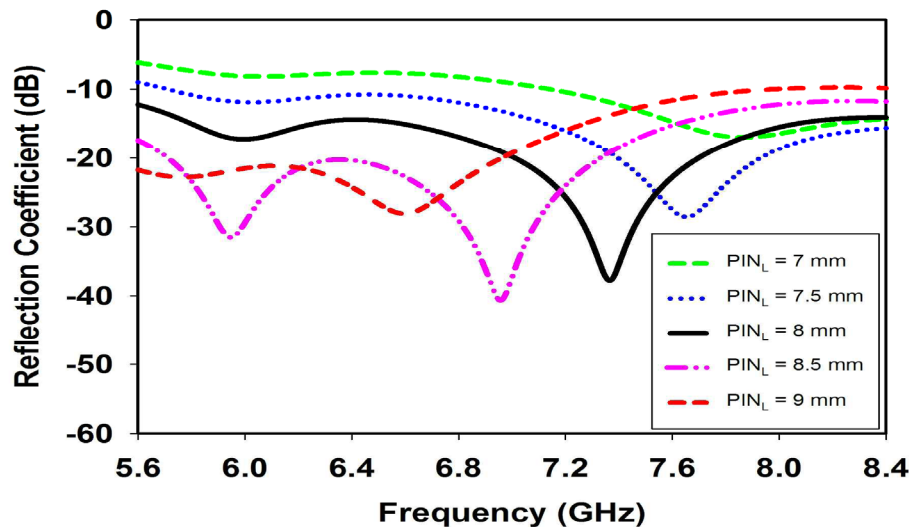
[그림 3.2.6] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz) :

(a)급전 점 위치, (b)급전 핀 길이

마. 5.85 GHz ~ 8.2 GHz 대역의 모의실험 결과



(a) 급전 점 위치



(b) 급전 핀 길이

[그림 3.2.7] 안테나 설계 파라미터 분석 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz) :

(a)급전 점 위치, (b)급전 핀 길이

마지막으로 [그림 3.2.7] (a), (b)는 5.85 GHz ~ 8.2 GHz 대역에 대한 안테나 설계 변수를 결정하기 위한 모의실험 결과를 보여주고 있다. 이 주파수 대역에서도 앞에서 설명된 것과 같이 -10 dB 주파수 대역폭(bandwidth)은 급전 점의 위치보다

급전 핀의 길이에 민감한 특성을 보였다. 최적화된 설계 파라미터는 검정색 실선으로 표시된 것처럼 급전 점은 도파관 중단부로부터 $\lambda_g/4$, 약 8 mm 떨어진 지점이며, 급전 핀의 길이는 8 mm로 결정되었다.

또한, 각각의 주파수 대역별 세부적인 크기 및 도파관 규격에 대한 사항은 [표 3.2.1]에 정리하였다.

[표 3.2.1] 주파수 대역별 혼 안테나 세부적인 크기 및 규격

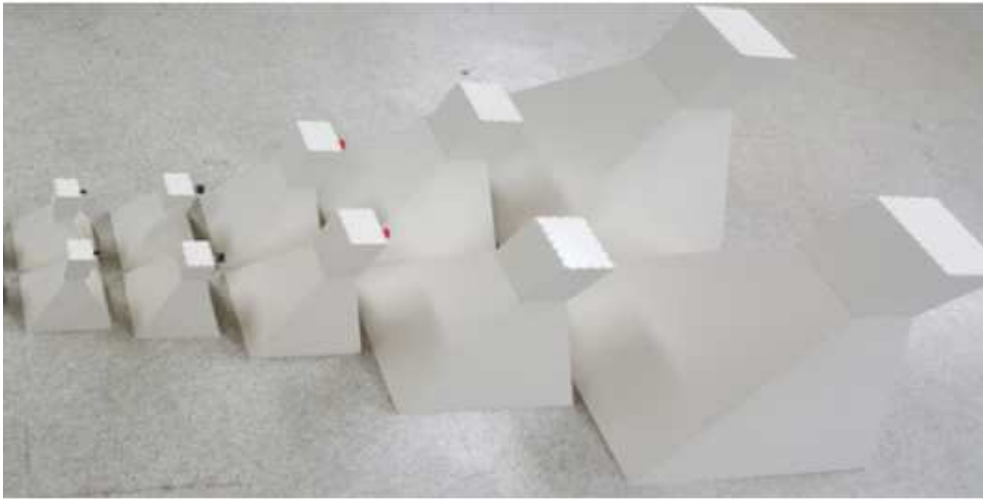
주파수 [GHz]	W x H x L [mm]	a x b [mm]	도파관 규격
1.12 ~ 1.7	565 x 425 x 566	165.1 x 82.55	WR650
1.7 ~ 2.6	370 x 278 x 405	90.78 x 54.61	WR430
2.6 ~ 3.95	225 x 170 x 354	72.14 x 34.04	WR284
3.95 ~ 5.85	166 x 120 x 268	47.55 x 22.15	WR187
5.85 ~ 8.2	146 x 116 x 222	15.8 x 34.65	WR137

제 3절 동등 혼 안테나 제작 및 측정결과

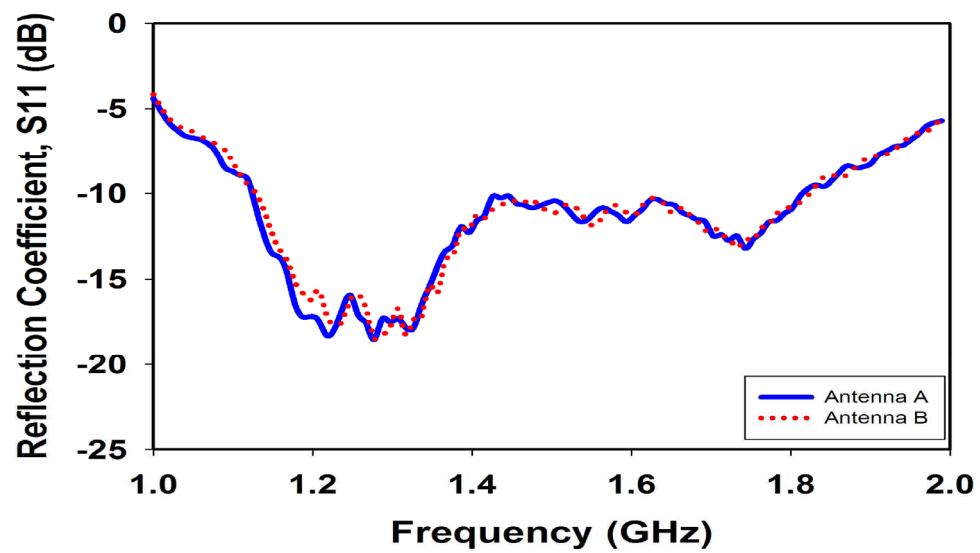
1. 제작된 동등 혼 안테나의 측정 결과

가. 반사계수(S_{11}) 측정결과

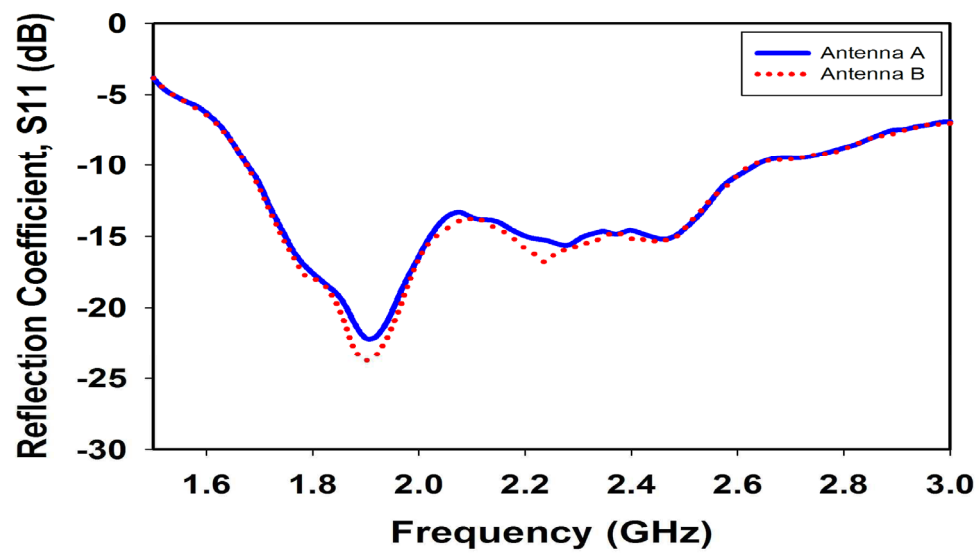
[그림 3.3.1]은 약 1 GHz ~ 8 GHz 대역에서 동작하는 5쌍의 제작된 혼 안테나의 사진을 보여주고 있다. 오른쪽부터 순서대로 동작하는 주파수 대역은 1.12 GHz ~ 1.8 GHz, 1.8 GHz ~ 2.6 GHz, 2.6 GHz ~ 3.95 GHz, 3.95 GHz ~ 5.85 GHz, 5.85 GHz ~ 8.2 GHz이다. 먼저 각각의 대역에서 안테나의 동등 특성을 확인하기 위하여 1차적으로 안테나의 반사계수(S_{11}) 측정결과를 비교하였다. 측정된 결과는 [그림 3.3.2] (a) ~ (e)에서 보여주는 바와 같이 5개 대역에서 각각의 안테나는 모두 동등한 특성을 가지는 것을 확인하였다.



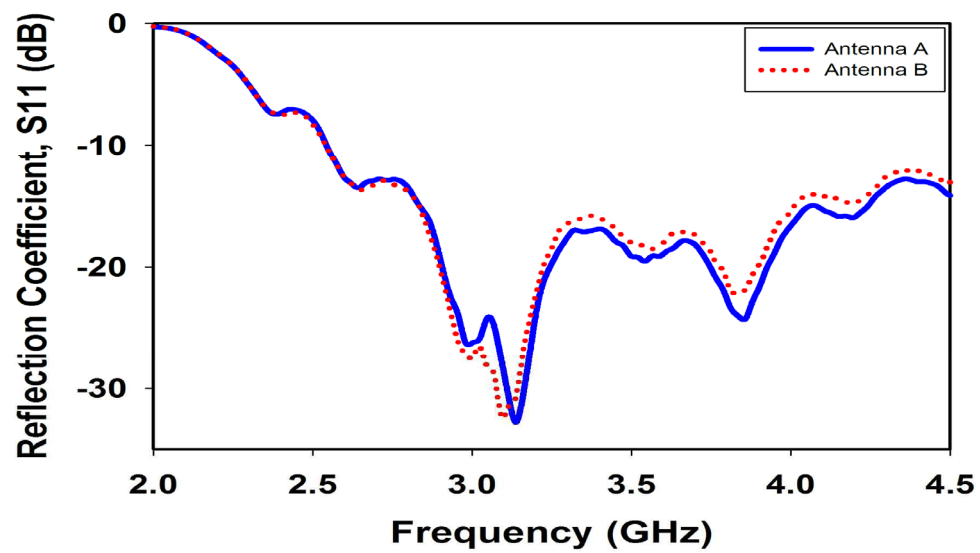
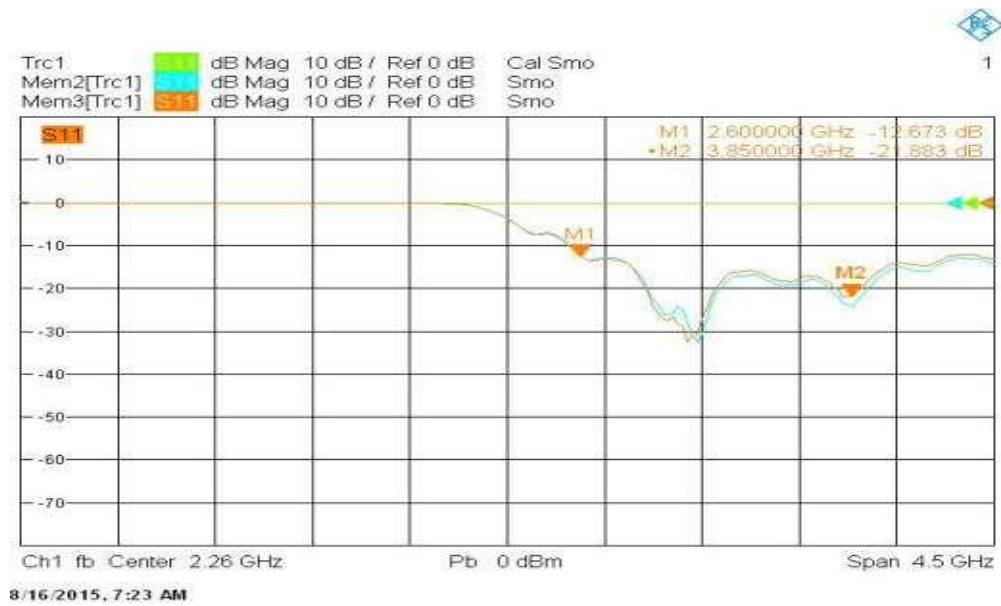
[그림 3.3.1] 제작된 1 GHz ~ 8 GHz 대역 혼 안테나(5쌍)



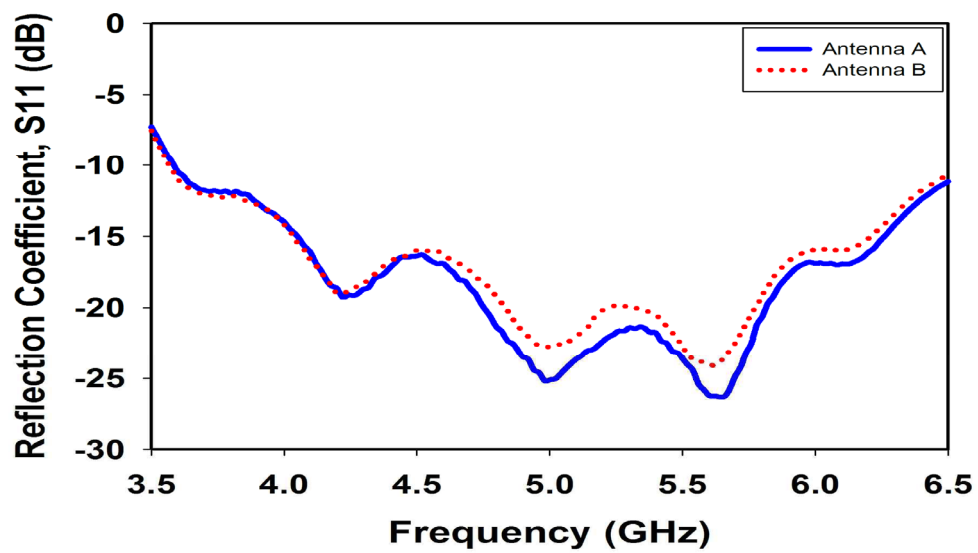
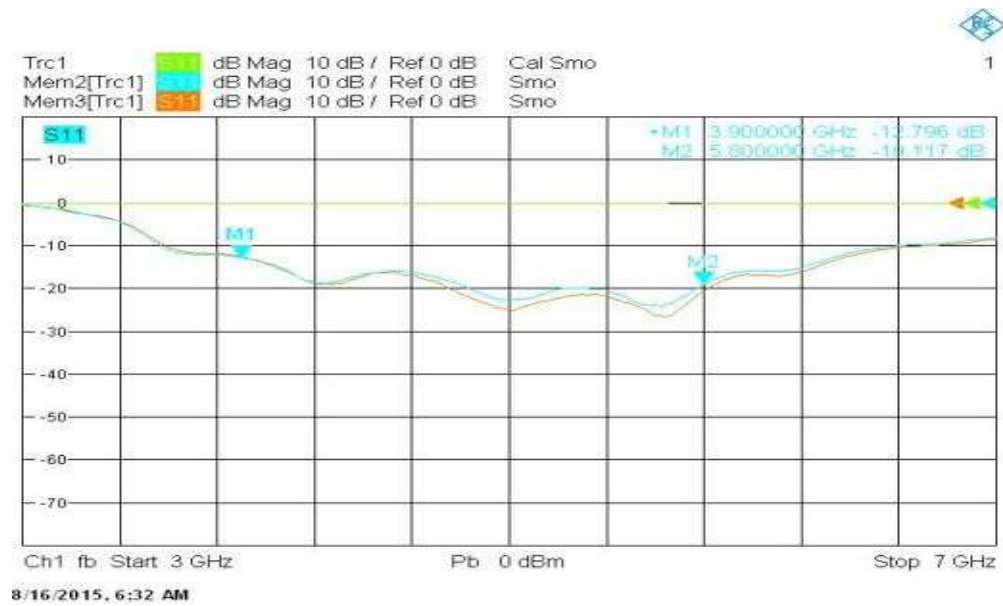
(a) 1.1 GHz ~ 1.8 GHz



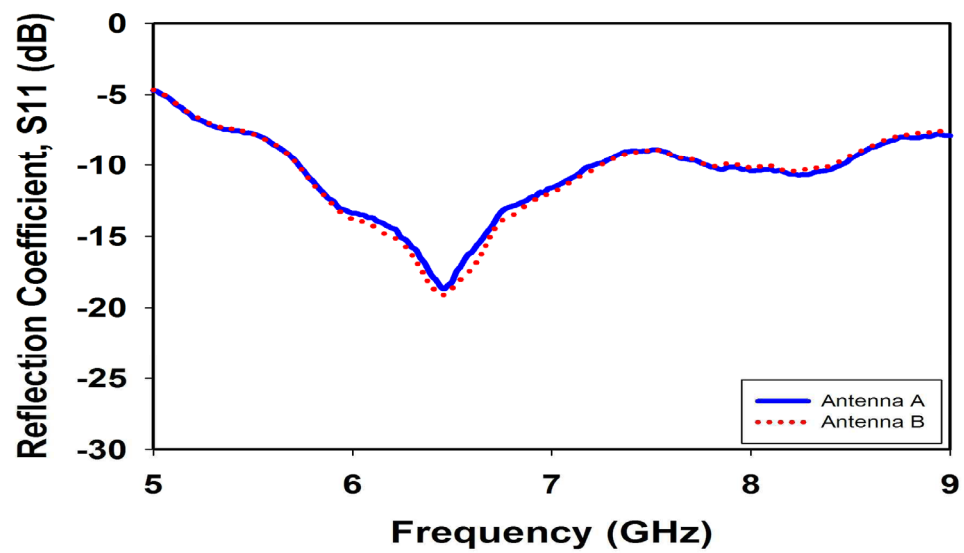
(b) 1.8 GHz ~ 2.6 GHz



(c) 2.6 GHz ~ 3.95 GHz



(d) 3.95 GHz ~ 5.85 GHz

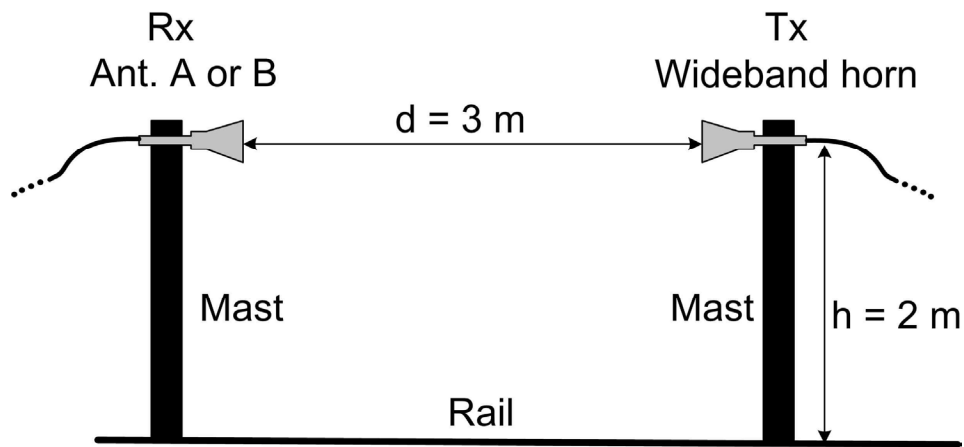


(e) 5.85 GHz ~ 8.2 GHz

[그림 3.3.2] 제작된 안테나의 동등성 평가 :
 1 GHz ~ 8.2 GHz대역의 입력반사계수(S11) 상호비교

나. 혼 안테나의 동등성 측정결과

새로운 개념의 표준 혼 안테나는 식 (2.1.6)을 이용하여 안테나 인자를 산출하기 때문에 안테나 교정에 있어서 동일성을 판단하는 가장 중요한 요소는 안테나 사이의 감쇠량 값이 된다. 따라서 동일성을 평가하기 위하여 이천 전파시험 인증센터의 안테나 교정 야외 시험장에서 [그림 3.3.3]에서 보는바와 같이 치환법을 사용하여 높이(h) = 2 m, 거리(d) = 3 m 이격시키고 제작된 안테나(A, B)와 연구원에서 보유하고 있는 광대역 혼 안테나를 송신 안테나로 놓고 두 안테나 사이의 감쇠량을 측정하였다. 측정된 두 안테나(A, B)의 감쇠량 값을 상호 비교함으로써 7개 대역의 제작된 혼 안테나의 동일성을 검증하였다. 야외시험장에서 감쇠량 측정에 사용된 계측기는 키사이트(社)의 26.5 GHz까지 측정할 수 있는 네트워크 분석기(모델명 : E8362B)를 사용하였다. 7개 대역에 대한 동등성 평가 결과는 [표 3.3.1] ~ [표 3.3.7]에 [그림 3.3.4] ~ [그림 3.3.10]에 각각 나타내었다.

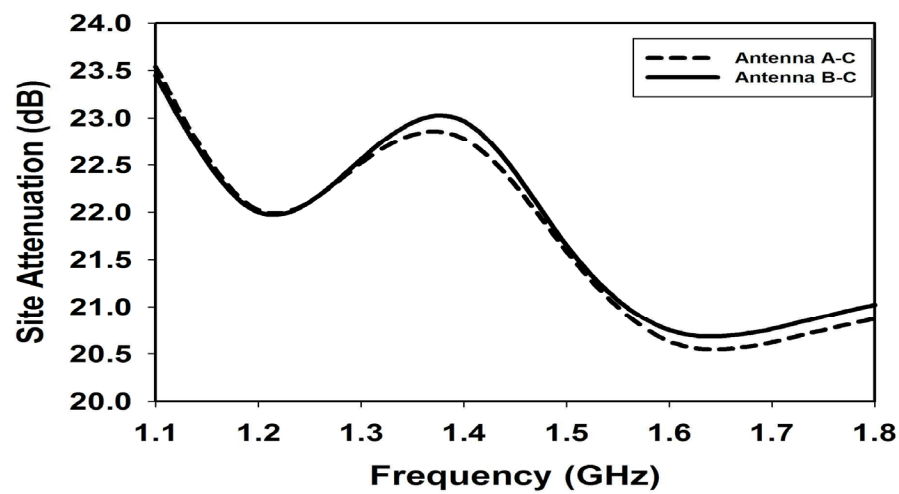


[그림 3.3.3] 치환법에 의한 안테나 사이의 감쇠량 측정 비교

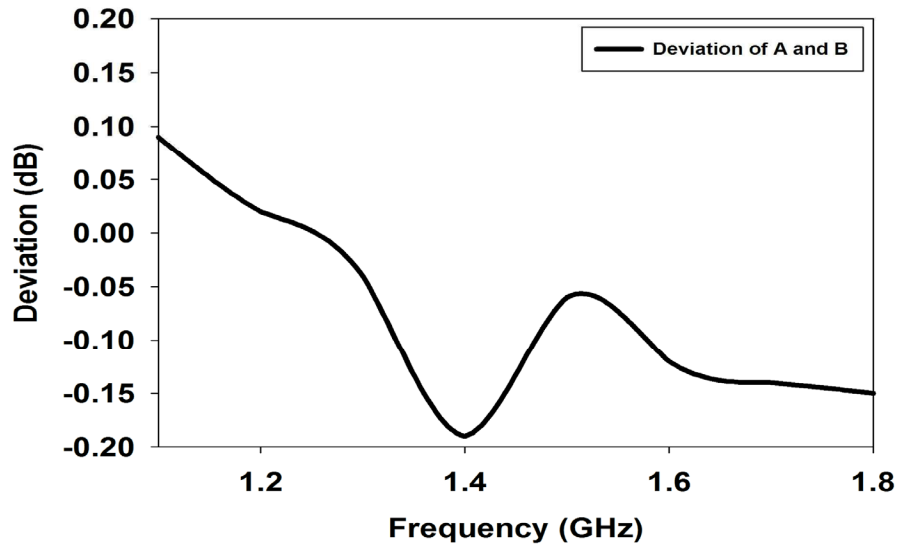
1) 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.1] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
1.1	23.54	23.45	0.09
1.2	22.02	22.00	0.02
1.3	22.52	22.56	-0.04
1.4	22.78	22.97	-0.19
1.5	21.59	21.65	-0.06
1.6	20.63	20.75	-0.12
1.7	20.62	20.76	-0.14
1.8	20.87	21.02	-0.15



(a) 감쇠량



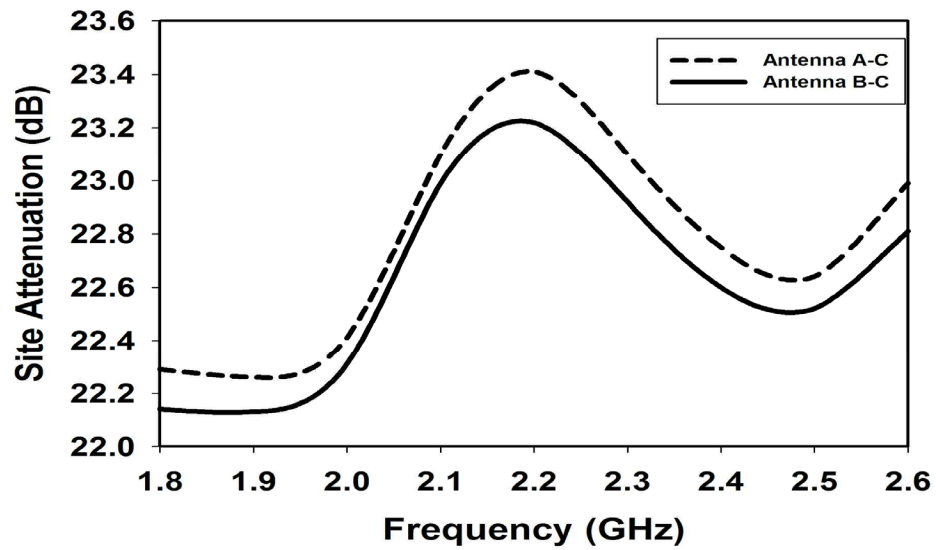
(b) 편차

[그림 3.3.4] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(1.1 GHz ~ 1.8 GHz)

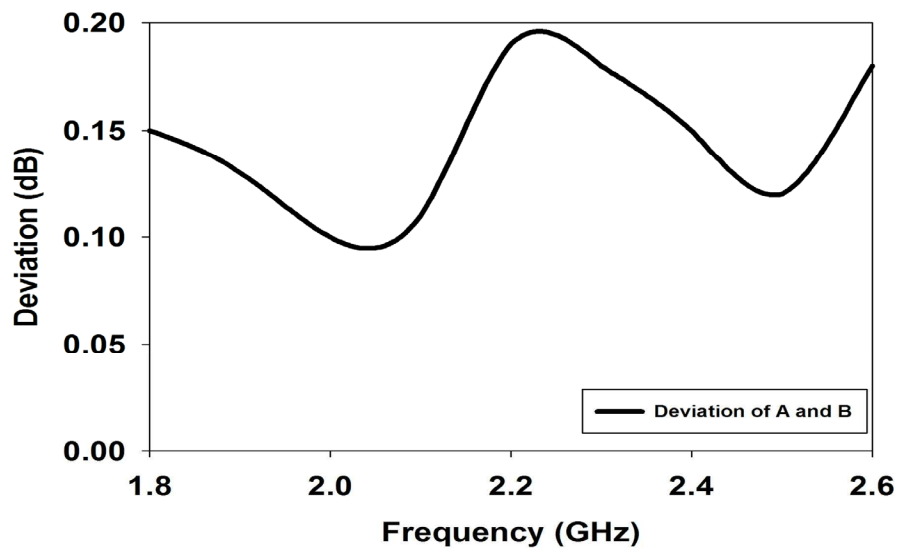
2) 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.2] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
1.8	22.29	22.14	0.15
1.9	22.26	22.13	0.13
2.0	22.41	22.31	0.10
2.1	23.10	22.99	0.11
2.2	23.41	23.22	0.19
2.3	23.10	22.92	0.18
2.4	22.75	22.60	0.15
2.5	22.64	22.52	0.12
2.6	22.99	22.81	0.18



(a) 감쇠량



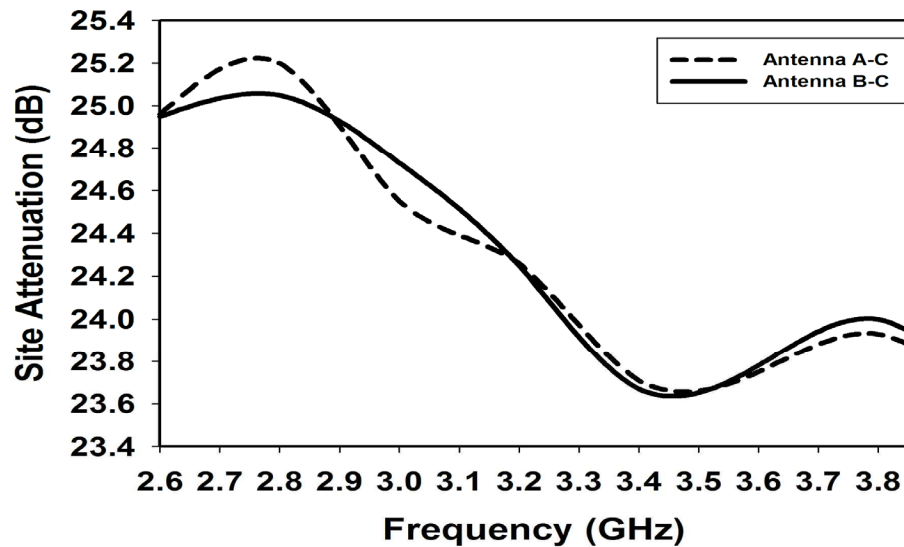
(b) 편차

[그림 3.3.5] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz)

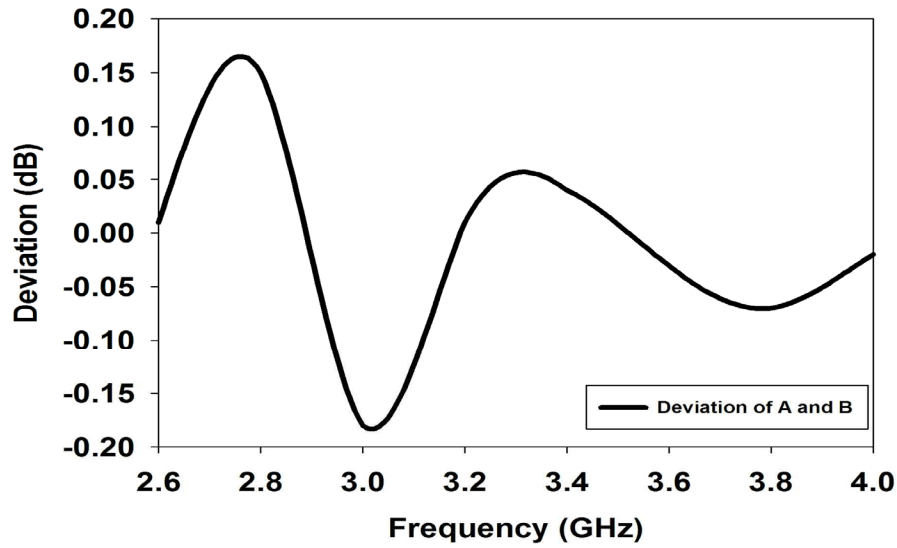
3) 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.3] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
2.6	24.96	24.95	0.01
2.8	25.20	25.05	0.15
3.0	24.55	24.73	-0.18
3.2	24.26	24.25	0.01
3.4	23.71	23.67	0.04
3.6	23.75	23.78	-0.03
3.8	23.93	24.00	-0.07
4.0	23.58	23.60	-0.02



(a) 감쇠량



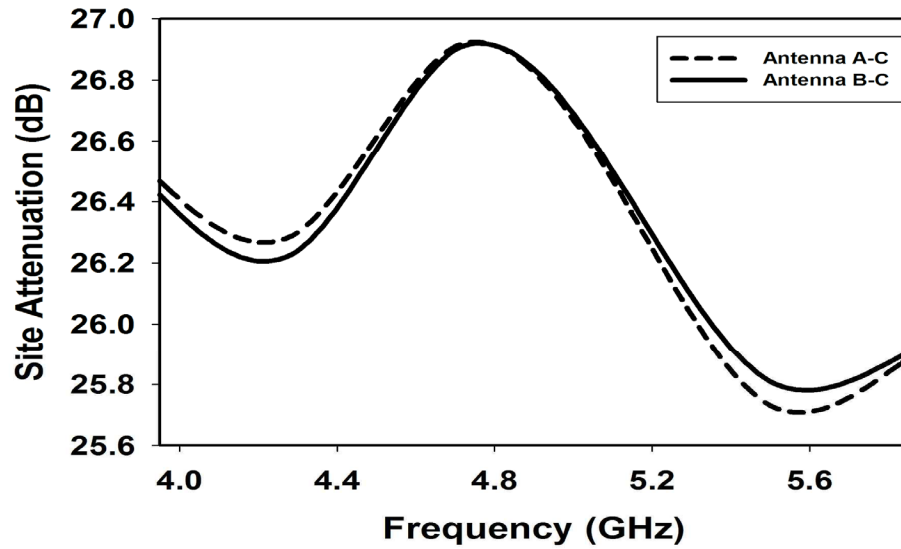
(b) 편차

[그림 3.3.6] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz)

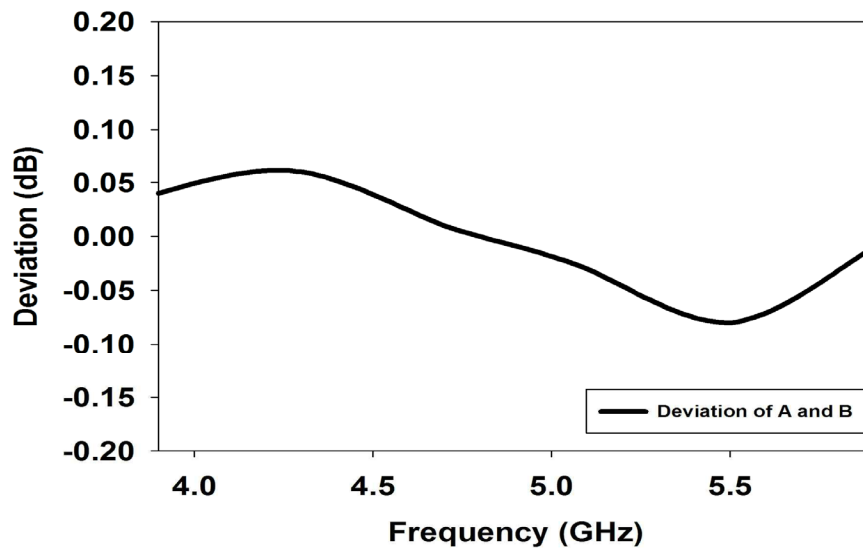
4) 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.4] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
3.9	26.53	26.49	0.03
4.3	26.30	26.24	0.06
4.7	26.91	26.90	0.01
5.1	26.47	26.50	0.03
5.5	25.73	25.81	0.08
5.9	25.93	25.94	0.01



(a) 감쇠량



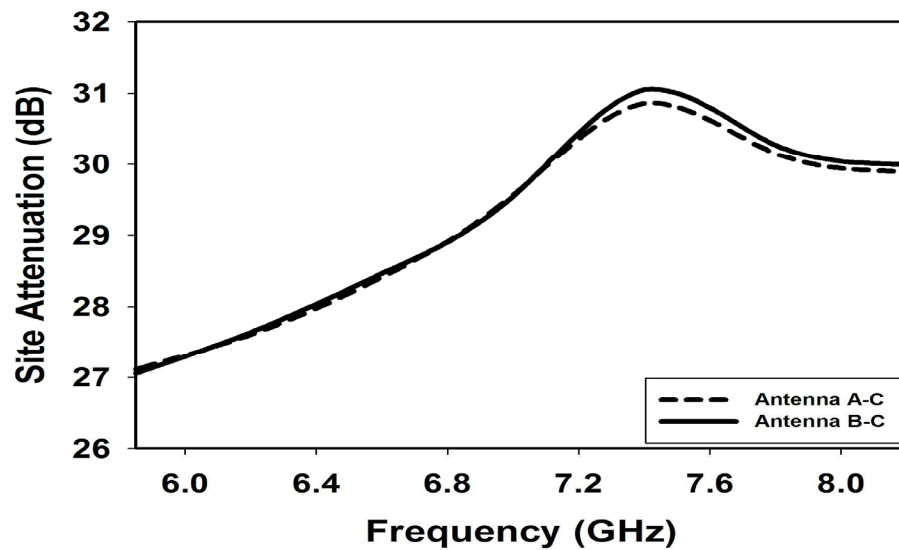
(b) 편차

[그림 3.3.7] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz)

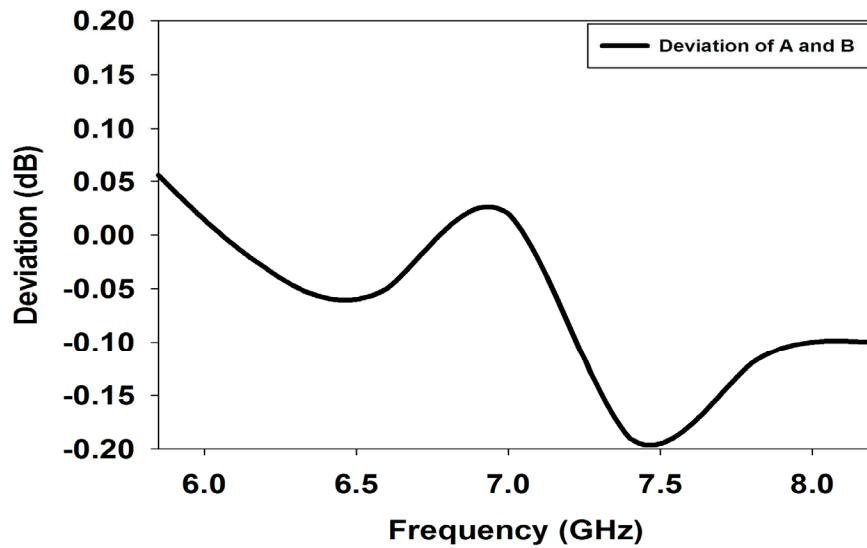
5) 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.5] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
5.8	27.05	26.98	0.07
6.2	27.61	27.64	0.03
6.6	28.42	28.47	0.05
7.0	29.56	29.54	0.02
7.4	30.86	31.05	0.19
7.8	30.15	30.27	0.12
8.2	29.89	29.99	0.11



(a) 감쇠량



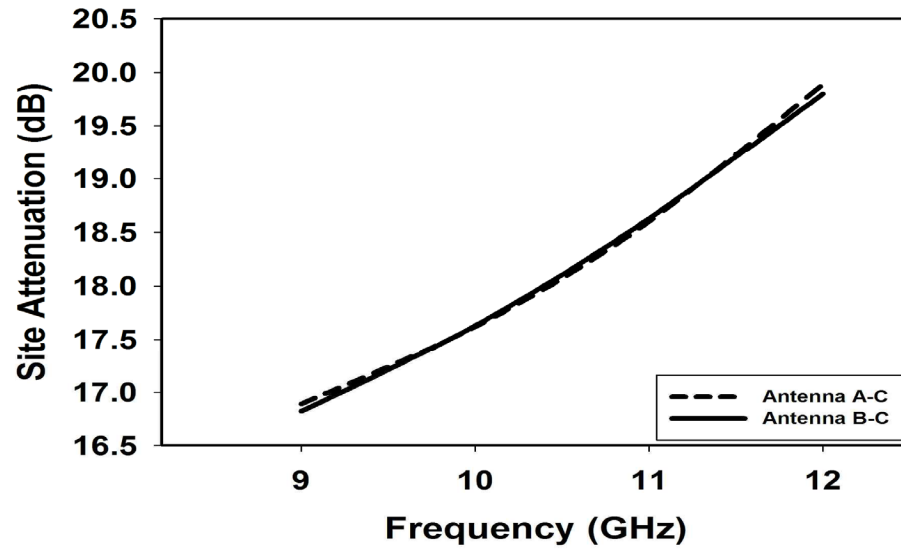
(b) 편차

[그림 3.3.8] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz)

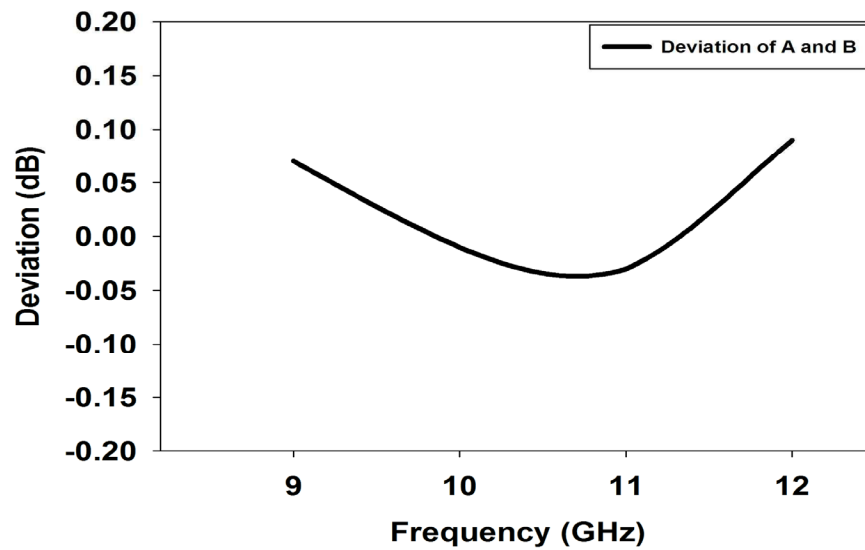
6) 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.6] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
9	16.89	16.82	0.07
10	17.62	17.63	0.01
11	18.6	18.63	0.03
12	19.89	19.8	0.09



(a) 감쇠량



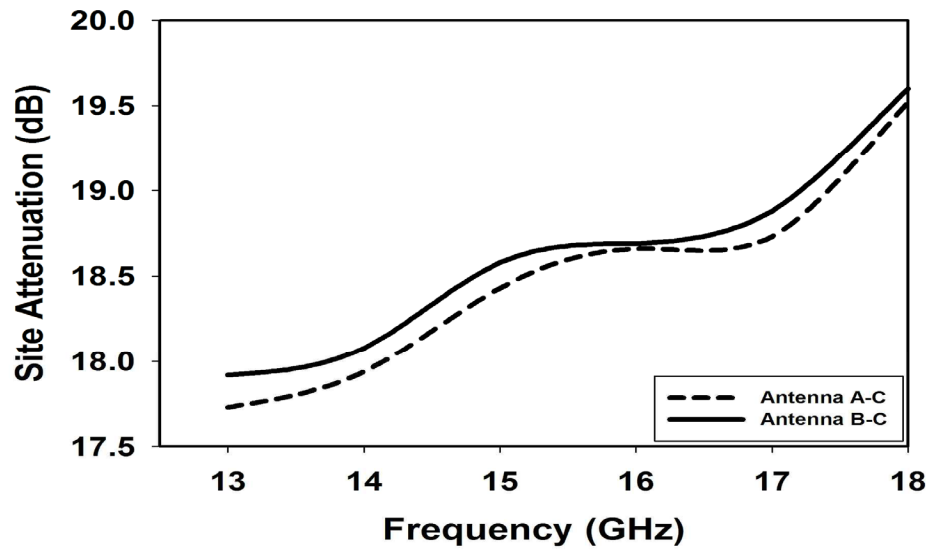
(b) 편차

[그림 3.3.9] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz)

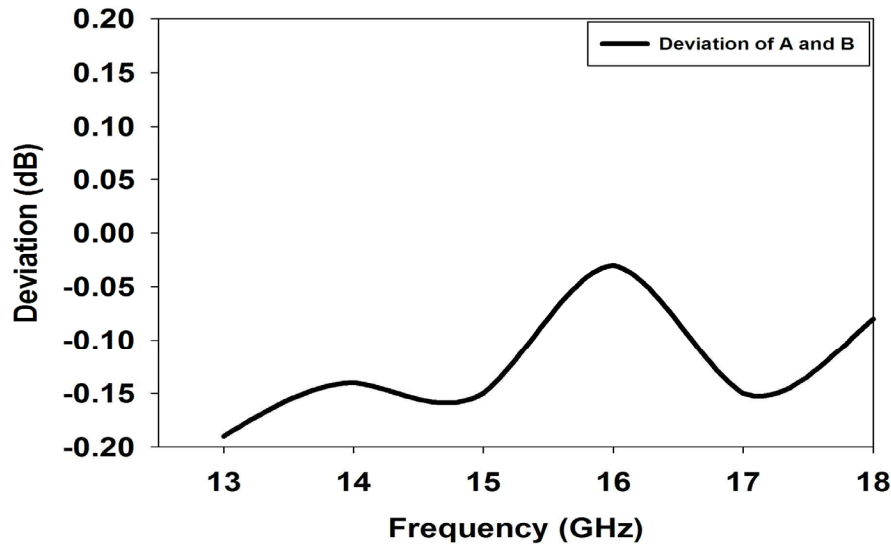
7) 12.5 GHz ~ 18 GHz대역에 대한 검증 결과

[표 3.3.7] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 동등성 평가 결과

주파수(GHz)	안테나 A-C	안테나 B-C	편차
13	17.73	17.92	0.19
14	17.94	18.08	0.14
15	18.43	18.58	0.15
16	18.66	18.69	0.03
17	18.73	18.88	0.15
18	19.52	19.6	0.08



(a) 감쇠량



(b) 편차

[그림 3.3.10] 안테나(A, B) 감쇠량 측정 결과(12.5 GHz ~ 18 GHz)

[표 3.3.1] ~ [표 3.3.7]와 [그림 3.3.4] ~ [그림 3.3.10]의 결과로부터 1.12 GHz ~ 1.8 GHz 대역에서는 1.4 GHz대역에서 최대 편차가 0.19 dB, 1.8 GHz ~ 2.6 GHz 대역에서는 2.3 GHz대역에서 0.19 dB, 2.6 GHz ~ 3.95 GHz 대역에서는 3 GHz 대역에서 0.18 dB, 3.95 GHz ~ 5.85 GHz 대역에서는 5.5 GHz 대역에서 0.08 dB, 5.85 GHz ~ 8.2 GHz 대역에서는 7.4 GHz 대역에서 0.19 dB, 8.2 GHz ~ 12.5 GHz 대역에서는 12 GHz 대역에서 0.09 dB, 마지막으로 12.5 GHz ~ 18 GHz 대역에서는 13 GHz 대역에서 0.19 dB를 보였다. 따라서 제작된 혼 안테나는 최대 편차가 모두 0.2 dB이내로 동등성이 검증되었다. 측정에 사용된 측정 장비인 네트워크 분석기의 측정 불확도가 0.1 dB이며 기타 고주파 케이블의 커넥터 연결 및 안정도 등의 불확도가 약 0.2 dB, 기타 시험장 불확도, 주변잡음, 안테나 높이 및 거리 오차, 혼 안테나 주 빔 방향 오차 등을 고려했을 때 두 안테나의 편차 0.2 dB 이내는 불확도 범위 내에 있기 때문에 7개 대역 모두 0.2 dB 오차 범위에서 동등하다고 정의내릴 수 있다.

제 4 장 동등 표준안테나에 의한 R-SAM 검증

제1절 동등 혼 안테나의 표준 안테나 인자 결정

1. R-SAM에 의한 안테나 인자

제 3장에서 1 GHz 이상 대역의 표준 안테나로서 동등 혼안테나를 제안하였고 1 GHz ~ 18 GHz의 동등 혼 안테나를 7쌍을 제작하여 야외시험장에서 두 안테나의 감쇠량 등을 측정하였다. 측정 불확도를 고려하고 두 측정결과를 상호 비교함으로써 모든 대역에서 0.2 dB 이내의 편차로 안테나의 특성이 동등하다는 것을 확인하였다. 따라서 동등안테나의 안테나 인자는 R-SAM의 동등안테나 인자 식 (2.1.6)으로부터 산출할 수 있다.

$$AF_R(dB/m) = \frac{1}{2} A_{RT} + 10 \log f_{MHz} - 10 \log d_1 - 16 \quad (2.1.6)$$

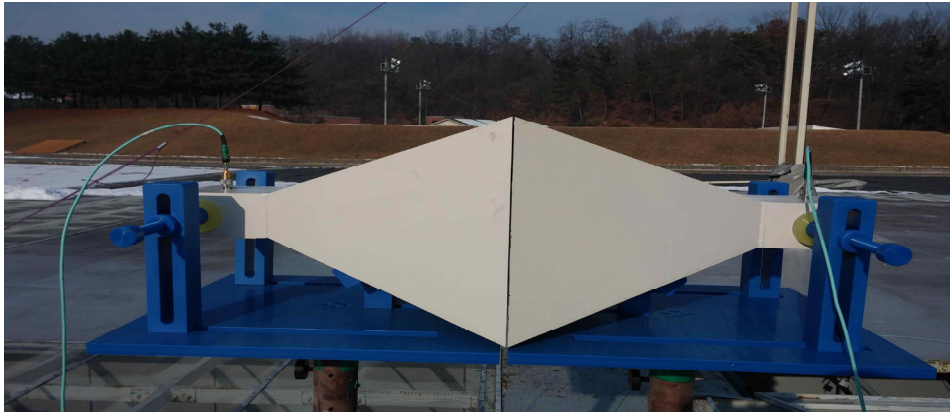
위 식 (2.1.6)에 따르면 두 개의 동등 혼 안테나 사이의 감쇠량(A_{RT})를 단 한번 측정함으로써 동등한 표준 안테나 인자를 결정할 수가 있다. 이는 마치 표준 다이폴 안테나의 발룬 특성을 측정하여 표준 다이폴안테나의 안테나 인자를 결정하는 것과 같다. 임의의 소스 안테나로부터 동등 혼 안테나 A와 B 사이의 감쇠량을 측정하게 되면 식 (2.1.6)에 의해 동등 혼 안테나의 표준 안테나 인자를 산출할 수 있다.

여기서 제작한 동등 혼 안테나는 감쇠량 측정 결과를 상호 비교함으로써 동등성을 확인했으며 측정 불확도를 고려하여 0.2 dB이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의 내렸다. 이와 같이 동등하다고 하는 것, 즉 안테나 특성이 똑같다고 하는 것은 제작된 상태 그 자체로 확인한다는 것은 불가능하며 동등성이라는 정의에 따라 측정을 수행하고 그 측정의 불확도 내에서 동등하다고 선언해야 할 것이다.

다음은 1 GHz ~ 18 GHz대역의 7쌍의 동등 혼 안테나의 동등 표준 안테나 인자 산출에 대한 결과를 나타내었다.

2. 동등 표준 안테나 인자 산출

크기가 서로 다른 7개의 안테나를 거치하고 측정하기 위한 안테나 지그는 [그림 4.1.1]에서 보여주는 바와 같으며 제작된 7쌍의 동등한 혼 안테나는 높이 2 m에서 수평을 조절하고 금속 접지평면 위의 평행이 보장되는 레일(연구원 특허등록 : 전자파 측정용 보조장치) 위에서 거리를 3 m 이격시키고 각각의 감쇠량을 측정하였다. 측정된 감쇠량 값과 R-SAM 식에 의해 산출된 안테나 인자는 [표 4.1.1] ~ [표 4.4.7]과 같으며, 이는 동등 혼 안테나의 표준 안테나 인자로서 [그림 4.1.2] ~ [그림 4.1.8]에 나타내었다.



(a) 높이 및 수평 조절



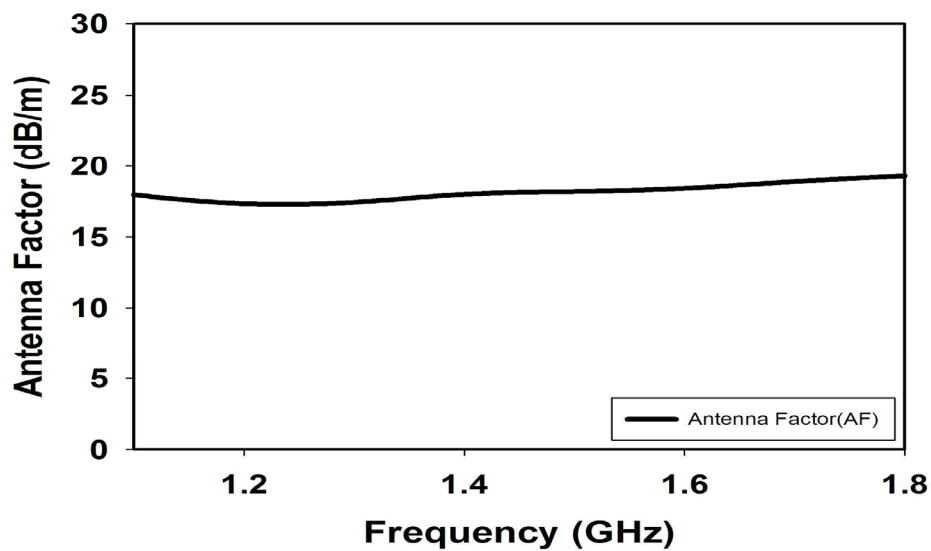
(b) 거리 이격(3 m)

[그림 4.1.1] 제작 안테나 동등성 평가를 위한 감쇠량 측정

가. 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.1] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
1.1	16.63	17.96
1.2	14.62	17.33
1.3	14.12	17.43
1.4	14.60	17.99
1.5	14.38	18.18
1.6	14.27	18.41
1.7	14.72	18.89
1.8	15.01	19.29

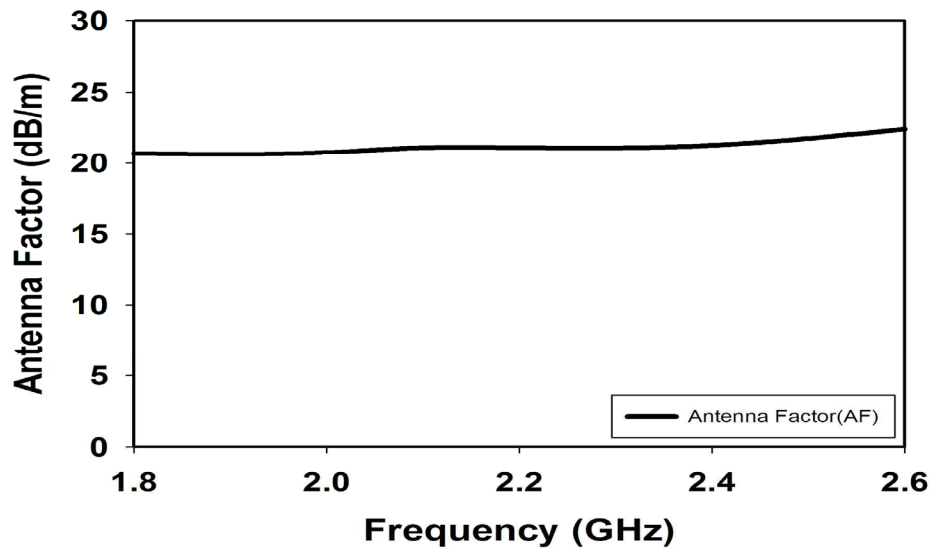


[그림 4.1.2] 측정된 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 표준 안테나 인자

나. 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.2] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
1.8	17.82	20.69
1.9	17.21	20.62
2	17.04	20.76
2.1	17.29	21.10
2.2	16.90	21.10
2.3	16.46	21.08
2.4	16.49	21.27
2.5	17.10	21.76
2.6	18.07	22.42

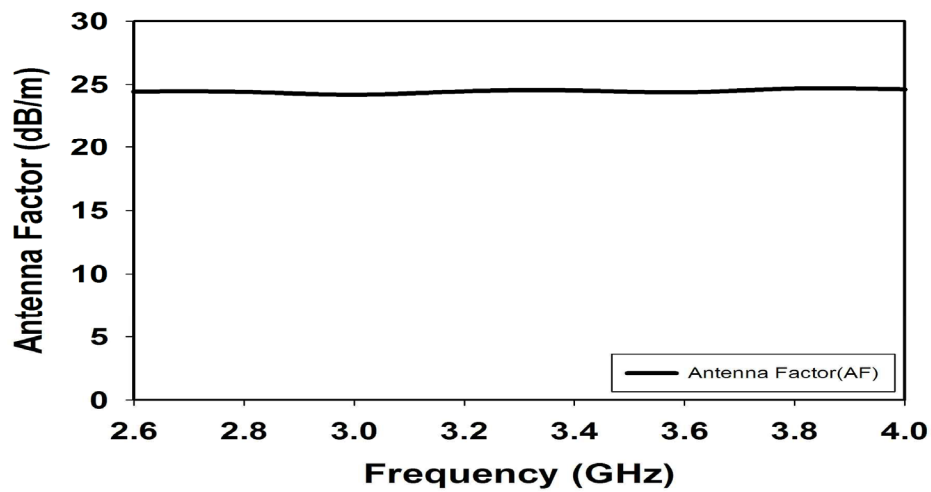


[그림 4.1.3] 측정된 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 표준 안테나 인자

다. 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.3] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
2.6	22.11	24.43
2.8	21.42	24.41
3	20.36	24.18
3.2	20.35	24.45
3.4	19.96	24.52
3.6	19.16	24.37
3.8	19.31	24.68
4	18.72	24.61

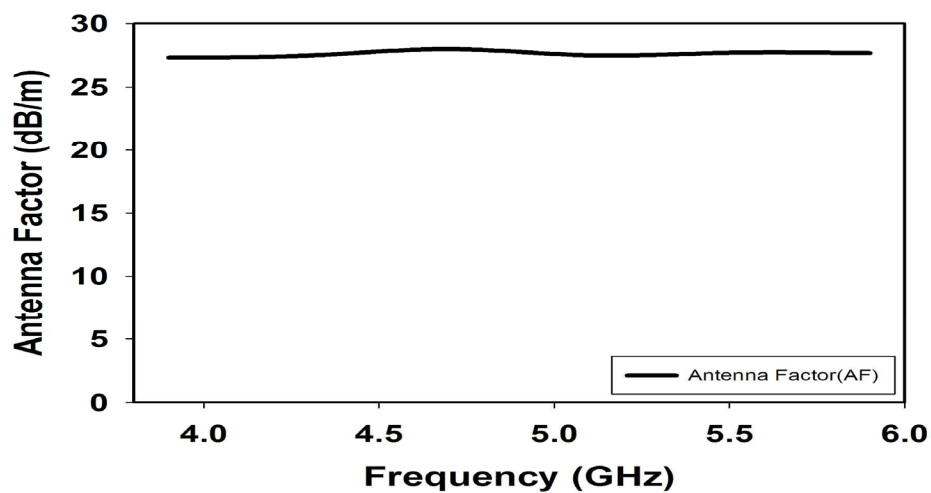


[그림 4.1.4] 측정된 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 표준 안테나 인자

라. 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.4] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
3.9	24.32	27.30
4.3	23.82	27.48
4.7	24.10	28.00
5.1	22.36	27.49
5.5	22.13	27.70
5.9	21.46	27.67

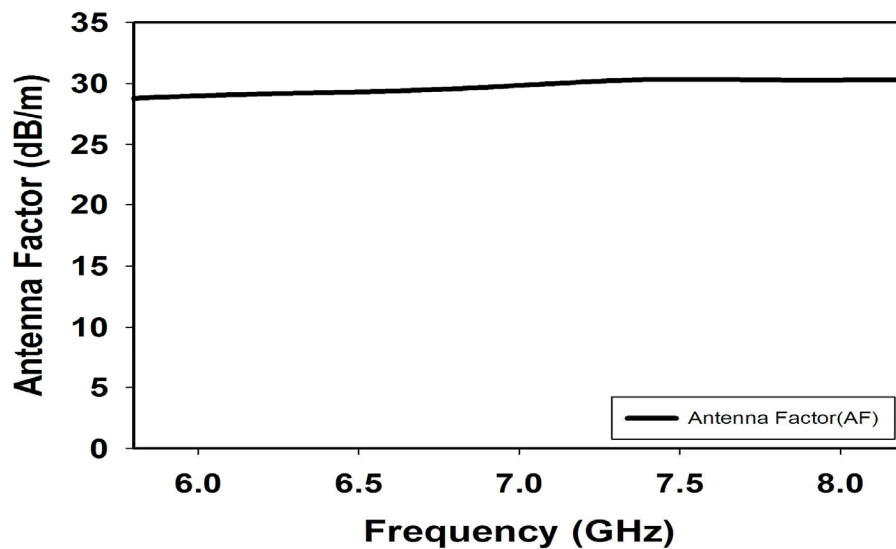


[그림 4.1.5] 측정된 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 표준 안테나 인자

마. 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.5] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
5.8	23.84	28.79
6.2	23.95	29.13
6.6	23.87	29.36
7.0	24.30	29.83
7.4	24.78	30.31
7.8	24.25	30.27
8.2	23.86	30.30

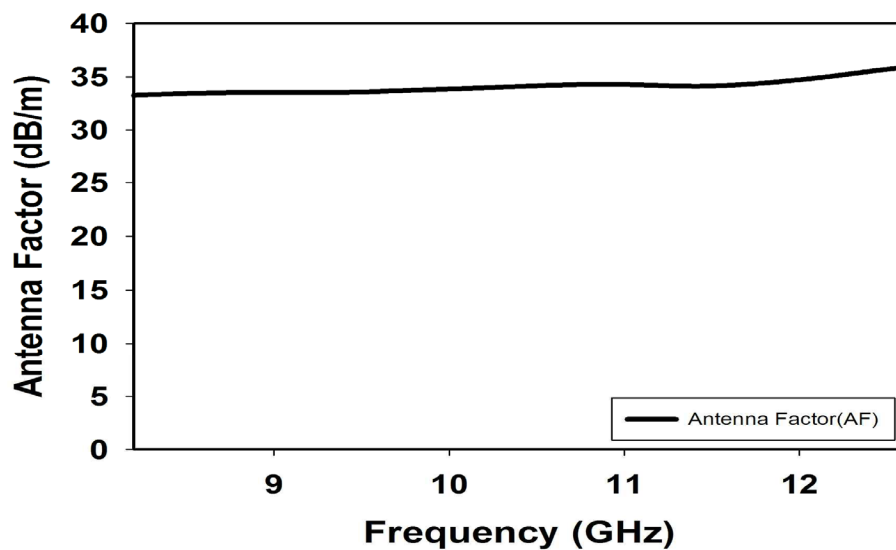


[그림 4.1.6] 측정된 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 표준 안테나 인자

바. 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.6] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
8.2	29.79	33.26
8.6	29.78	33.46
9.0	29.51	33.52
9.4	29.13	33.52
9.8	29.19	33.73
10.2	29.29	33.96
10.6	29.44	34.20
11.0	29.25	34.27
11.4	28.62	34.11
11.8	28.93	34.41
12.2	29.97	35.08
12.6	30.54	35.50

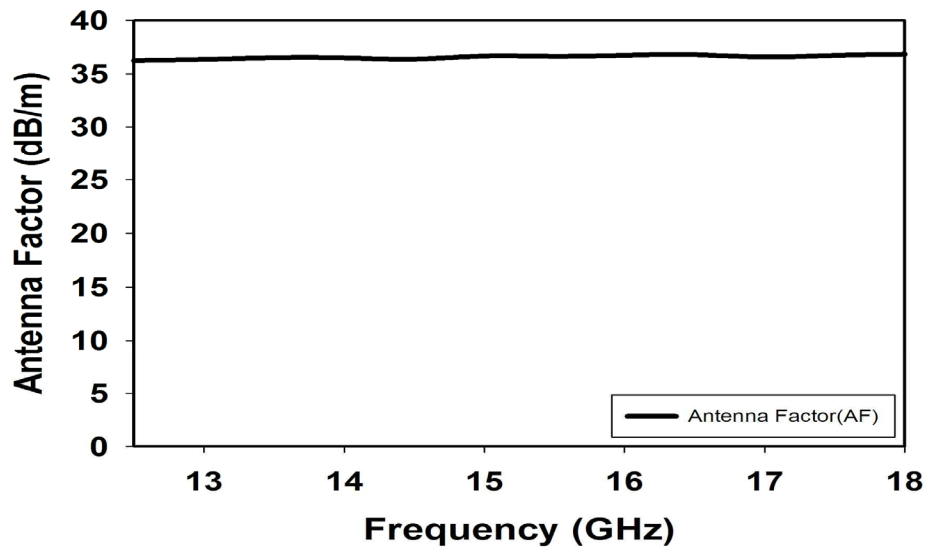


[그림 4.1.7] 측정된 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 표준 안테나 인자

사. 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 동등 표준 안테나 인자

[표 4.1.7] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 감쇠량 값과 표준 안테나 인자

주파수 (GHz)	소스안테나와 안테나 A, B 사이의 감쇠량 (dB)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
		A = B
12.5	32.09	36.24
13.0	31.93	36.34
13.5	31.92	36.49
14.0	31.58	36.48
14.5	31.03	36.36
15.0	31.32	36.65
15.5	30.98	36.62
16.0	30.90	36.72
16.5	30.76	36.78
17.0	30.05	36.56
17.5	30.11	36.71
18.0	30.08	36.82



[그림 4.1.8] 측정된 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 표준 안테나 인자

제2절 R-SAM과 3-안테나 법 측정결과 상호비교

제 3장에서 1 GHz ~ 18 GHz대역의 표준안테나로서 동등 혼안테나를 제안하였다. 약 1 GHz ~ 18 GHz 대역을 7개(1.12 GHz ~ 1.8 GHz, 1.8 GHz ~ 2.6 GHz, 2.6 GHz ~ 3.95 GHz, 3.95 GHz ~ 5.85 GHz, 5.85 GHz ~ 8.2 GHz, 8.2 GHz ~ 12.5 GHz, 12.5 GHz ~ 18 GHz) 대역으로 나누어 각각의 대역에서 약 0.2 dB이내로 일치하는 동등 안테나를 제작하였으며, 동등한 특성은 두 안테나 사이의 감쇠량을 측정함으로서 검증하였다. 또한 각각의 대역에서 동작하는 두 개의 동등 안테나는 R-SAM 식 (2.1.6)에 의하여 동등한 표준 안테나 인자를 산출하였다. 이렇게 산출된 동등 표준 안테나 인자를 사용하여 R-SAM법(즉, 값을 알고 있는 기준 안테나와 교정 대상안테나 사이의 단 한 번의 감쇠량 측정)에 의해 임의의 교정대상 슈바르츠벡(Schwarzbeck) 안테나 C(광대역 안테나 : 1 GHz ~ 18 GHz)를 교정하여 안테나 인자를 산출하였다. 또한 기존의 대표적인 3-안테나 법(TAM)을 사용하여 광대역 안테나 C의 안테나 인자를 산출하고 R-SAM 측정방법의 유효성을 검증하기 위하여 측정된 두 결과를 상호비교 하였다. 두 측정법으로 얻은 안테나 인자는 1 GHz ~ 18 GHz 대역 범위에서 최대 오차는 0.19 dB를 보임으로써 우리원에서 개발한 R-SAM 측정방법의 유효성이 검증되었다. 두 측정방법의 측정환경은 높이(h) = 2 m, 거리(d) = 3 m로 동일하게 적용하였다.

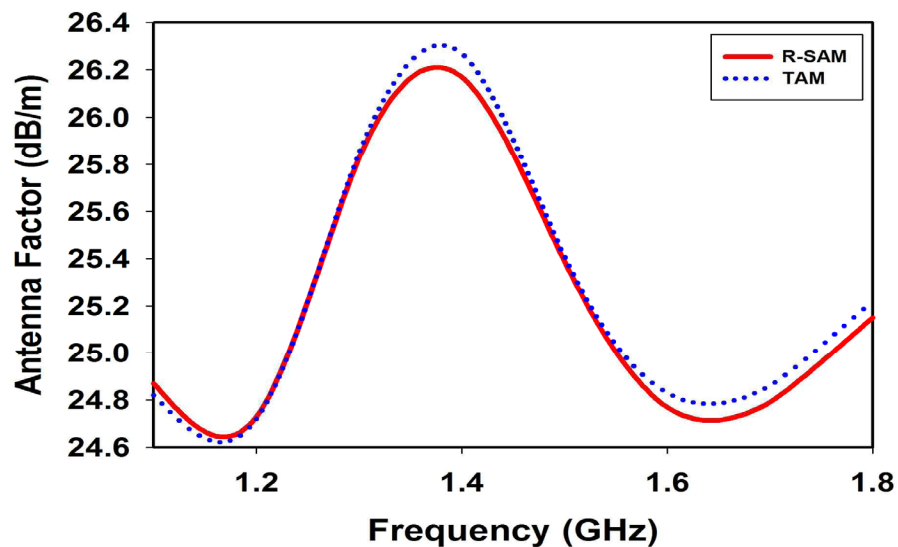
1. 상호비교 측정 결과(1 GHz ~ 18 GHz 대역)

가. 1 GHz ~ 1.8 GHz 대역

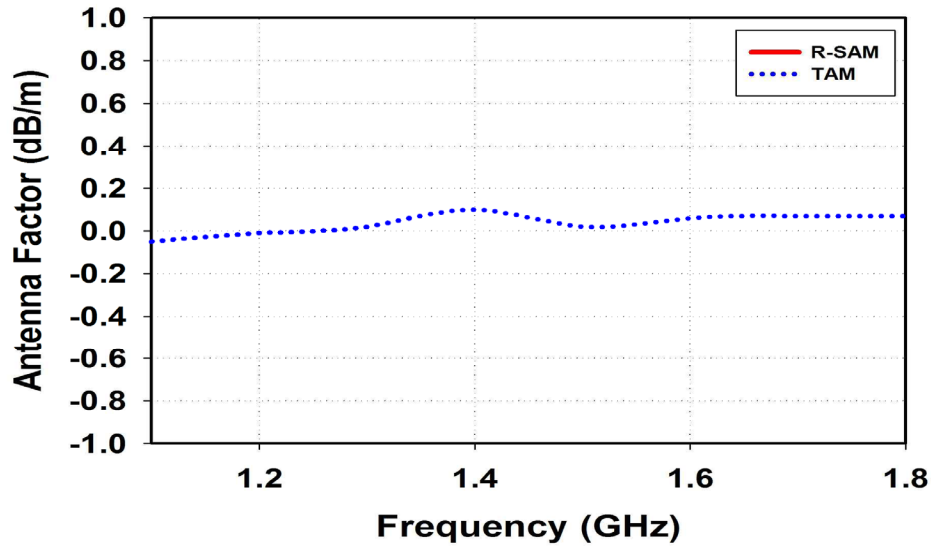
R-SAM과 TAM 측정결과는 [표 4.2.1]과 [그림 4.2.1]에서 보여주는 바와 같이 측정된 1 GHz ~ 1.8 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 24 dB/m ~ 26.5 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM결과와 TAM 결과는 0.07 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 또한 TAM으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나의 동등성이 0.2 dB이내임을 보이며 다시 한 번 동등성이 검증되었다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.1] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(1 GHz ~ 1.8 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
1.1	17.96	18	17.91	24.82	24.87	-0.05	0.09
1.2	17.33	17.34	17.32	24.72	24.73	-0.01	0.02
1.3	17.43	17.41	17.45	25.85	25.83	0.02	-0.04
1.4	17.99	17.89	18.09	26.27	26.17	0.10	-0.20
1.5	18.18	18.15	18.21	25.41	25.39	0.02	-0.06
1.6	18.41	18.35	18.46	24.83	24.77	0.06	-0.11
1.7	18.89	18.82	18.96	24.86	24.79	0.07	-0.14
1.8	19.29	19.21	19.36	25.22	25.15	0.07	-0.15



(a) 안테나 인자



(b) 편차

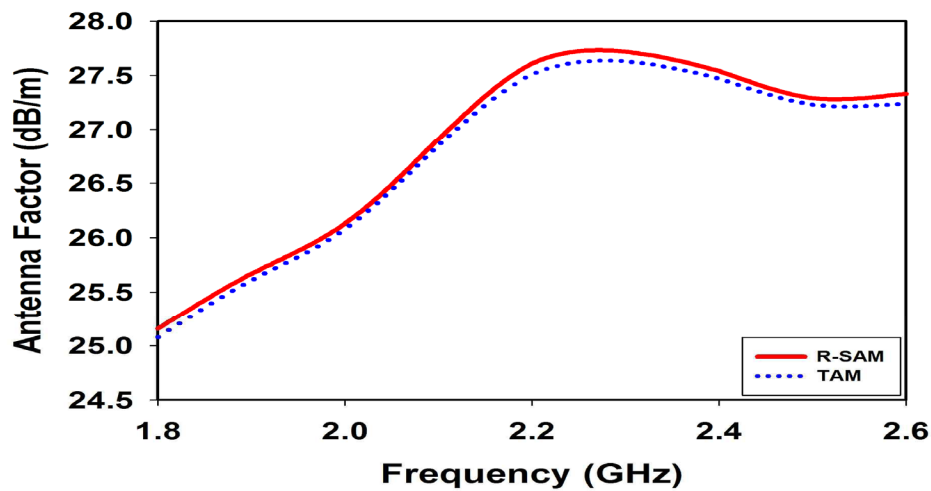
[그림 4.2.1] 안테나 인자 상호비교 결과(1.1 GHz ~ 1.8 GHz대역)

나. 1.8 GHz ~ 2.6 GHz 대역

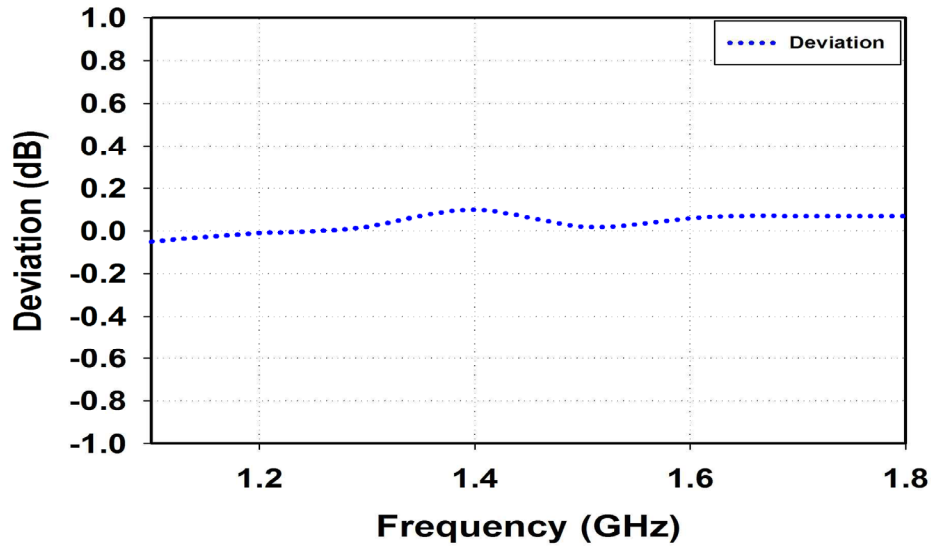
1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.2]와 [그림 4.2.2]에 나타내었다. [표 4.2.2]와 [그림 4.2.2]에서 보여주는 바와 같이 측정된 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 25 dB/m ~ 28 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM결과와 TAM 결과는 0.09 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 또한 3-안테나 법으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 다시 한 번 두 안테나의 동등성이 0.2 dB 이내임을 보임을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.2] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
1.8	20.69	20.77	20.62	25.08	25.16	0.08	0.15
1.9	20.62	20.69	20.56	25.61	25.67	0.06	0.13
2.0	20.76	20.81	20.71	26.08	26.13	0.05	0.10
2.1	21.10	21.15	21.04	26.85	26.91	0.05	0.11
2.2	21.10	21.20	21.01	27.51	27.61	0.09	0.19
2.3	21.08	21.16	20.99	27.63	27.72	0.09	0.17
2.4	21.27	21.35	21.20	27.47	27.54	0.08	0.15
2.5	21.76	21.82	21.70	27.23	27.29	0.06	0.12
2.6	22.42	22.51	22.32	27.24	27.33	0.09	0.19



(a) 안테나 인자



(b) 편차

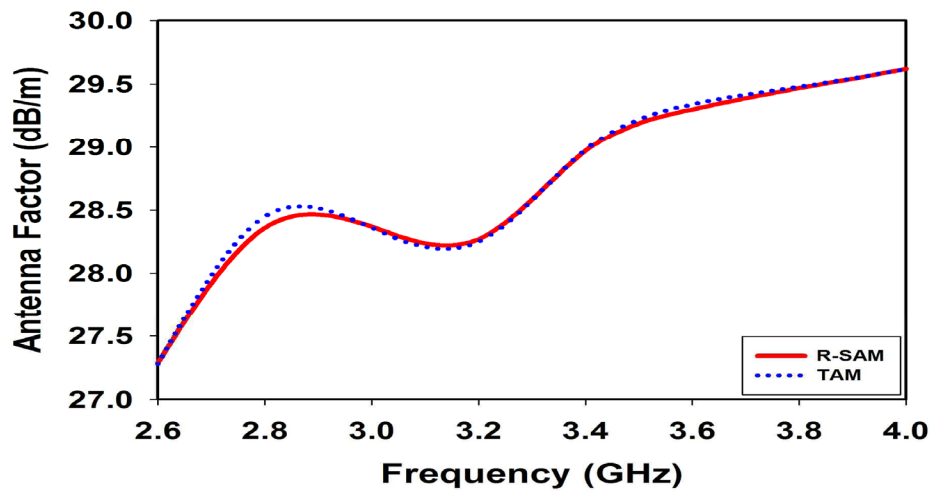
[그림 4.2.2] 안테나 인자 상호비교 결과(1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역)

다. 2.6 GHz ~ 3.95 GHz 대역

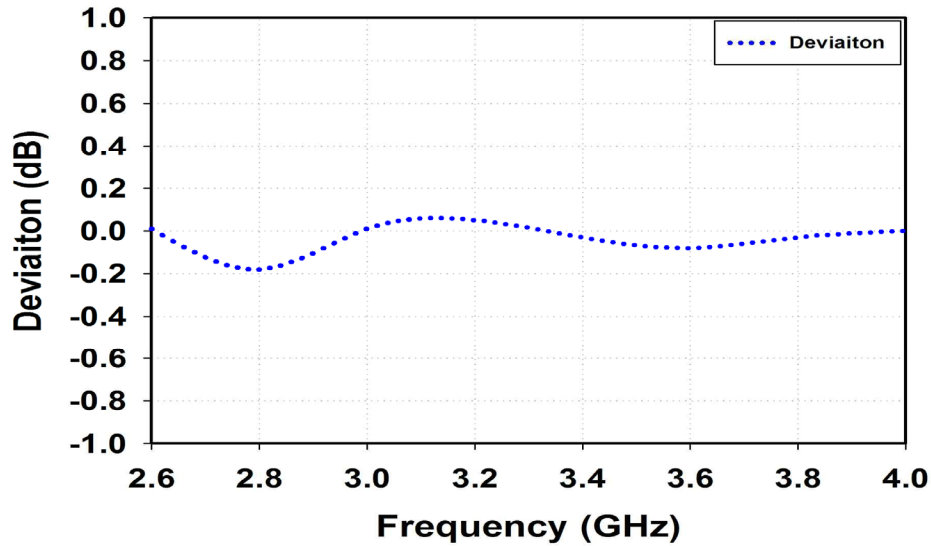
2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.3]과 [그림 4.2.3]에 나타내었다. [표 4.2.3]과 [그림 4.2.3]에서 보여주는 바와 같이 측정된 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 27.2 dB/m ~ 29.8 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM 결과와 TAM 결과는 0.09 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였다. 또한 2.6 GHz ~ 3.95 GHz 대역에서도 TAM 법으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나가 0.2 dB이내의 동등성을 갖는 것을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 이 대역에서도 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.3] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
2.6	24.43	24.44	24.43	27.28	27.29	0.01	0.01
2.8	24.41	24.09	24.27	28.45	28.36	-0.18	-0.18
3.0	24.18	24.46	24.45	28.36	28.37	0.01	0.01
3.2	24.45	24.55	24.5	28.25	28.27	0.05	0.05
3.4	24.52	24.36	24.39	28.98	28.97	-0.03	-0.03
3.6	24.37	24.64	24.72	29.34	29.3	-0.08	-0.08
3.8	24.68	24.59	24.62	29.48	29.47	-0.03	-0.03
4.0	24.61	24.85	24.85	29.62	29.62	0.00	0.00



(a) 안테나 인자



(b) 편차

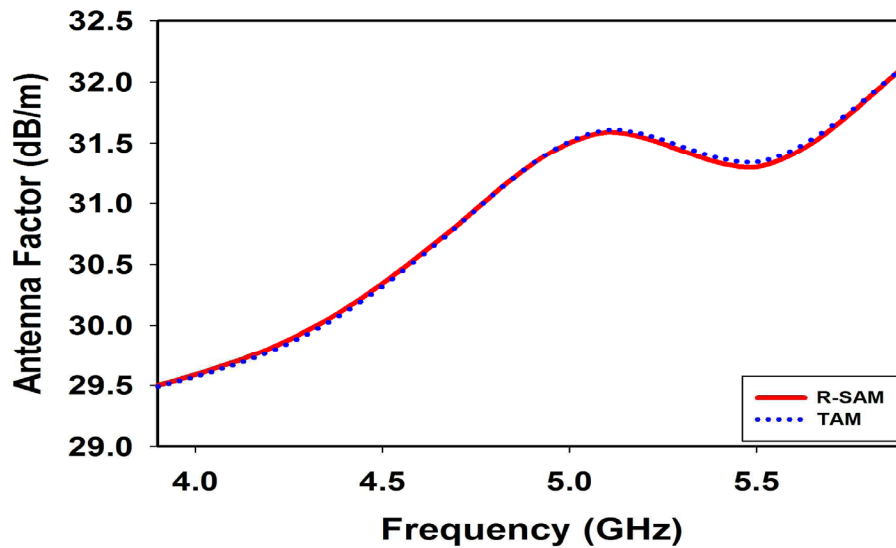
[그림 4.2.3] 안테나 인자 상호비교 결과(2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역)

라. 3.95 GHz ~ 5.85 GHz 대역

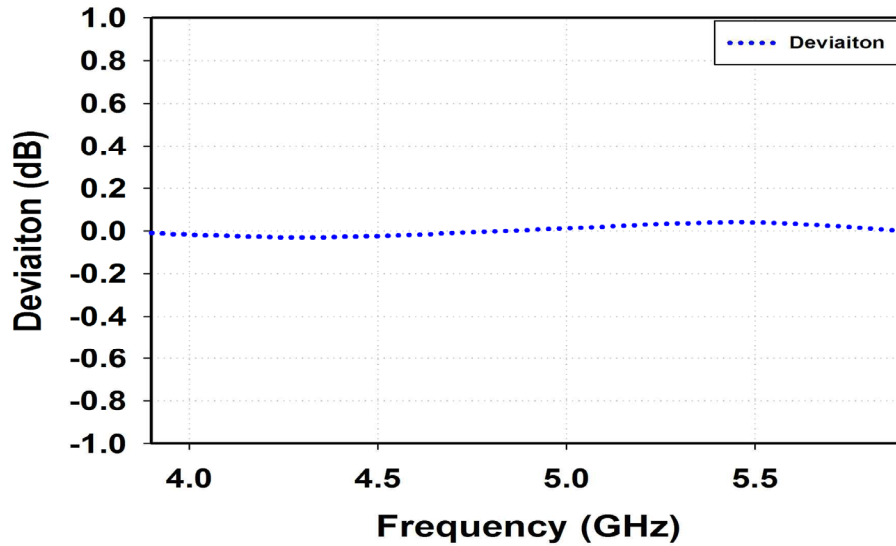
3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.4]와 [그림 4.2.4]에 나타내었다. [표 4.2.4]와 [그림 4.2.4]에서 보여주는 바와 같이 측정된 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 29 dB/m ~ 32.5 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM 결과와 TAM 결과는 0.04 dB 이내로 아주 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 3.95 GHz ~ 5.85 GHz 대역에서도 TAM으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나의 동등성이 0.2 dB이내임을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.4] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
3.9	27.3	27.32	27.23	29.49	29.50	-0.01	0.09
4.3	27.48	27.51	27.44	29.93	29.96	-0.03	0.07
4.7	28.00	28.00	28.00	30.81	30.82	-0.01	0.00
5.1	27.49	27.47	27.50	31.61	31.59	0.02	-0.03
5.5	27.70	27.66	27.74	31.34	31.30	0.04	-0.08
5.9	27.67	27.66	27.67	32.14	32.14	0.00	-0.01



(a) 안테나 인자



(b) 편차

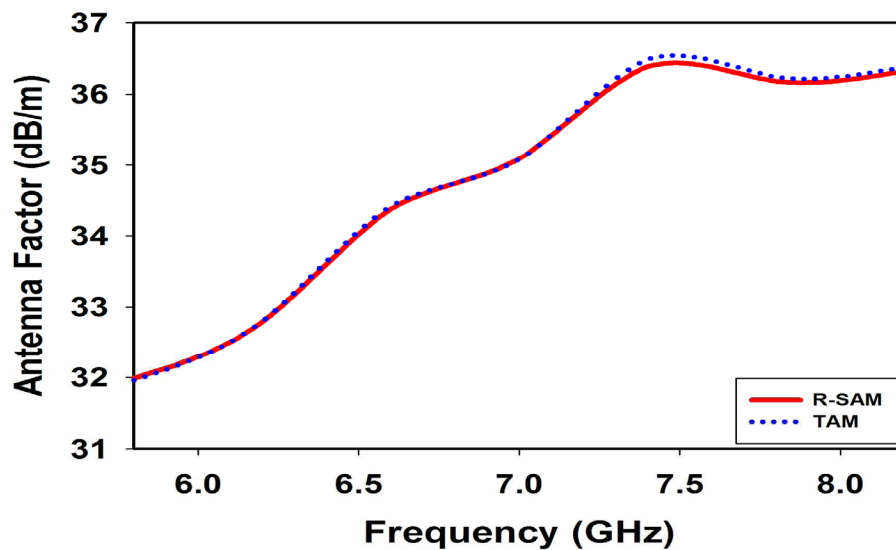
[그림 4.2.4] 안테나 인자 상호비교 결과(3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역)

마. 5.85 GHz ~ 8.2 GHz 대역

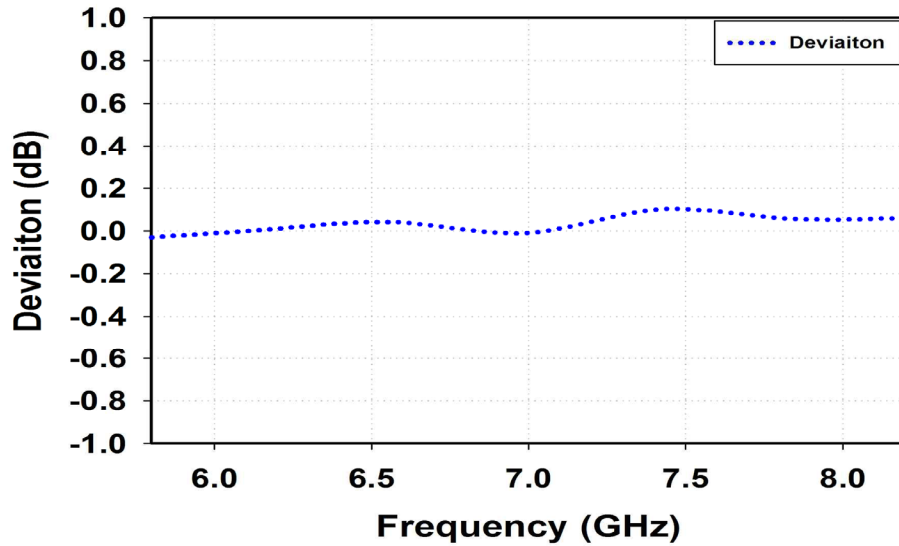
5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.5]와 [그림 4.2.5]에 나타내었다. [표 4.2.5]와 [그림 4.2.5]에서 보여주는 바와 같이 측정된 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 32 dB/m ~ 36.5 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM 결과와 TAM 결과는 0.10 dB 이내로 아주 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 5.85 GHz ~ 8.2 GHz 대역에서도 3-안테나 법으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나의 동등성이 0.2 dB이내임을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.5] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
5.8	16.70	28.82	28.75	31.96	31.99	-0.03	0.07
6.2	16.94	29.11	29.18	32.80	32.79	0.01	-0.07
6.6	17.25	29.66	29.73	34.42	34.38	0.04	-0.07
7.0	17.29	29.83	29.82	65.08	35.09	-0.01	0.01
7.4	17.29	30.22	30.13	36.49	36.39	0.10	0.09
7.8	17.79	30.21	30.33	36.24	36.18	0.06	-0.12
8.2	18.20	30.25	30.35	36.38	36.32	0.06	-0.10



(a) 안테나 인자



(b) 편차

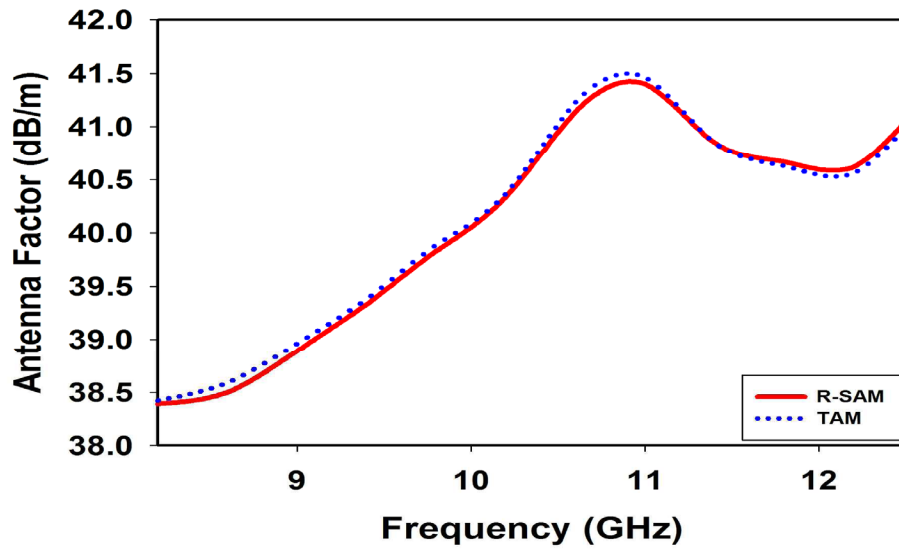
[그림 4.2.5] 안테나 인자 상호비교 결과(5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역)

바. 8.2 GHz ~ 12.5 GHz 대역

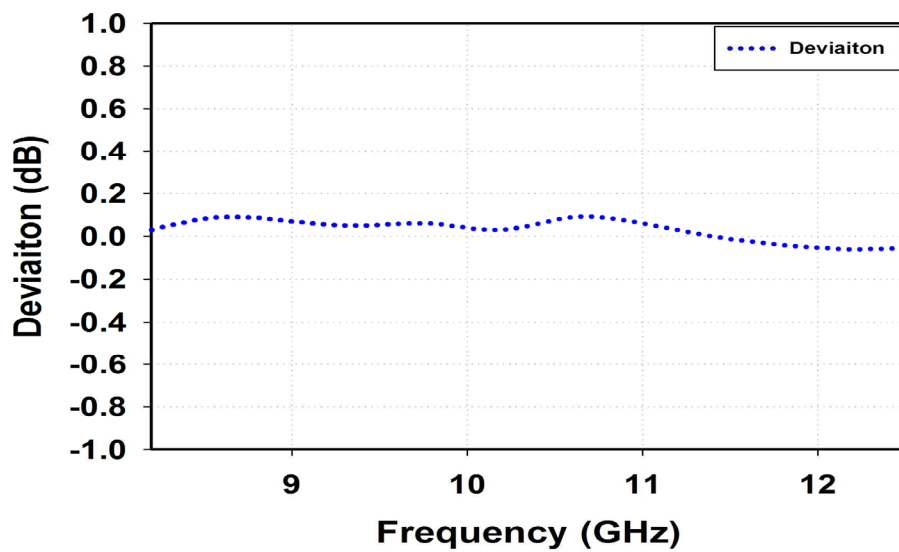
8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.6]과 [그림 4.2.6]에 나타내었다. [표 4.2.6]과 [그림 4.2.6]에서 보여주는 바와 같이 측정된 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 38 dB/m ~ 41.5 dB/m 범위의 값을 갖으며 거의 모든 주파수에서 R-SAM결과와 TAM 결과는 0.09 dB 이내로 아주 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 8.2 GHz ~ 12.5 GHz 대역에서도 3-안테나 법으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나의 동등성이 0.2 dB이내임을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 두 안테나는 0.2 dB 이내의 값으로 동등한 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

[표 4.2.6] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테나법 <i>AF</i> (dB/m)			R-SAM <i>AF</i> (dB/m)	3-안테 나법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
8.2	33.26	33.23	33.30	38.42	38.39	0.03	-0.07
8.6	33.46	33.37	33.55	38.59	38.50	0.09	-0.19
9.0	33.52	33.45	33.60	38.96	38.89	0.07	-0.14
9.4	33.52	33.48	33.57	39.38	39.33	0.05	-0.10
9.8	33.73	33.68	33.79	39.89	39.83	0.06	-0.12
10.2	33.96	33.93	33.98	40.37	40.34	0.03	-0.05
10.6	34.20	34.12	34.28	41.23	41.14	0.08	-0.17
11.0	34.27	34.21	34.32	41.46	41.40	0.06	-0.11
11.4	34.11	34.11	34.10	40.85	40.85	0.00	0.00
11.8	34.41	34.45	34.37	40.63	40.67	-0.04	0.07
12.2	35.08	35.14	35.02	40.56	40.62	-0.06	0.12
12.6	35.50	35.55	35.45	41.18	41.23	-0.05	0.10



(a) 안테나 인자



(b) 편차

[그림 4.2.6] 안테나 인자 상호비교 결과(8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역)

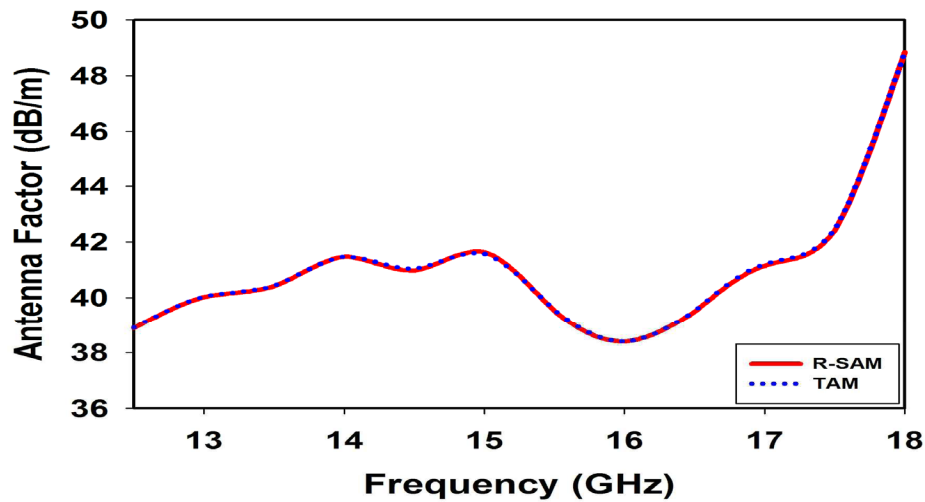
사. 12.5 GHz ~ 18 GHz 대역

12.5 GHz ~ 18 GHz대역의 R-SAM과 TAM 상호비교 측정결과는 [표 4.2.7]과 [그림 4.2.7]에 나타내었다. [표 4.2.7]과 [그림 4.2.7]에서 보여주는 바와 같이 측정된 12.5 GHz ~ 18 GHz대역의 안테나 C의 인자는 약 38.5 dB/m ~ 49 dB/m 범위의 값을 갖으며 모든 주파수에서 R-SAM 결과와 TAM 결과는 0.07 dB 이내로 아주 일치하는 것을 확인하였다. 약 17 GHz이상 대역에서 갑자기 안테나 인자 값이 커지는 것은 광대역 안테나 C의 주파수 범위가 1 GHz ~ 18 GHz로 안테나의 VSWR 특성이 높은 대역에서 점점 나빠져 안테나의 이득도 점점 낮아지는 원인으로 추정된다. 이득 특성이 낮아지긴 하지만 12.5 GHz ~ 18 GHz 대역에서도 TAM으로 측정된 안테나 A, B의 특성에서도 두 안테나의 동등성이 0.2 dB이내임을 확인하였다. 따라서 전체 측정 불확도를 고려했을 때 0.2 dB 이내의 값으로 두 안테나가 같은 값을 갖는다고 정의할 수 있다.

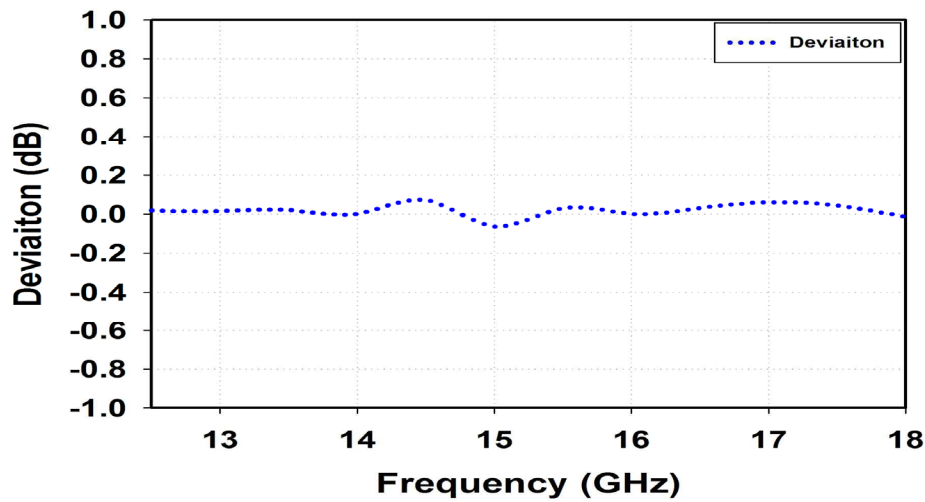
[표 4.2.7] R-SAM과 TAM 상호비교 측정 결과(12.5 GHz ~ 18 GHz대역)

주파수 (GHz)	R-SAM AF (dB/m)	3-안테나법 AF (dB/m)			R-SAM AF (dB/m)	3-안테나 법과 R-SAM 편차 (dB)	3-안테나 법 AB 동등성평가 (dB)
	A=B	A	B	C	C	C(비교)	A, B 차이
12.5	36.24	36.22	36.26	38.91	38.89	0.02	-0.04
13.0	36.34	36.32	36.35	40.04	40.02	0.01	-0.03
13.5	36.49	36.47	36.51	40.44	40.42	0.02	-0.04
14.0	36.48	36.48	36.48	41.48	41.48	0.00	0.00
14.5	36.36	36.29	36.43	41.05	40.98	0.07	-0.15
15.0	36.65	36.72	36.59	41.58	41.64	-0.06	0.13
15.5	36.62	36.59	36.65	39.56	39.53	0.03	-0.06
16.0	36.72	36.72	36.72	38.41	38.41	0.00	0.00
16.5	36.78	36.75	36.82	39.51	39.48	0.03	-0.06

17.0	36.56	36.50	36.62	41.21	41.15	0.06	-0.12
17.5	36.71	36.67	36.76	42.45	42.41	0.04	-0.09
18.0	36.82	36.83	36.81	48.82	48.84	-0.01	0.03



(a) 안테나 인자

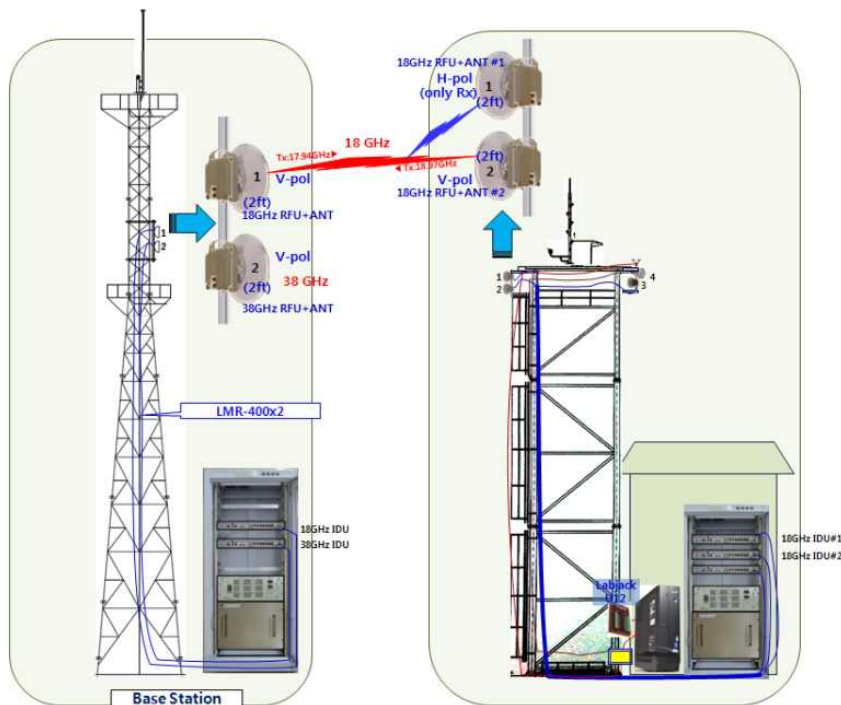


(b) 편차

[그림 4.2.7] 안테나 인자 상호비교 결과(12.5 GHz ~ 18 GHz대역)

제3절 상용안테나를 사용한 R-SAM 유효성 검증

앞 절에서는 동등한 혼 안테나 두 개를 사용하여 R-SAM 식 (2.1.6)에 의해 안테나 인자를 산출하고 임의의 광대역 안테나 C의 안테나 인자를 R-SAM 법에 의해 교정하였다. 그리고 대표적인 안테나 교정방법인 3-안테나 법 (TAM)으로 광대역 안테나 C의 인자를 산출하고 두 측정 결과를 상호비교함으로써 R-SAM 측정법의 유효성을 검증하였다. R-SAM은 토지나 건물에 고착되어 사용되고 있는 안테나의 특성을 측정할 수 있는 장점을 갖는다. 따라서 본 절에서는 [그림 4.3.1]에서 보여주는 바와 같이 현장에서 상용으로 사용되고 있는 안테나의 특성을 측정하기 위하여 R-SAM 식에 의해 산출된 동등 표준 안테나를 사용하고 상용안테나에도 R-SAM 측정법이 유효성하다는 것을 증명하였다. [그림 4.3.1]은 약 18 GHz, 38 GHz대역에서 전파의 강우감쇠 특성을 연구하기 위해 전파위성기반 팀에서 운용중인 강우감쇠 측정시스템을 보여주고 있으며 본 보고서에서는 약 18 GHz대역의 안테나 특성 측정에 관한 연구결과만을 다루었다.



(a) 강우감쇠 측정시스템

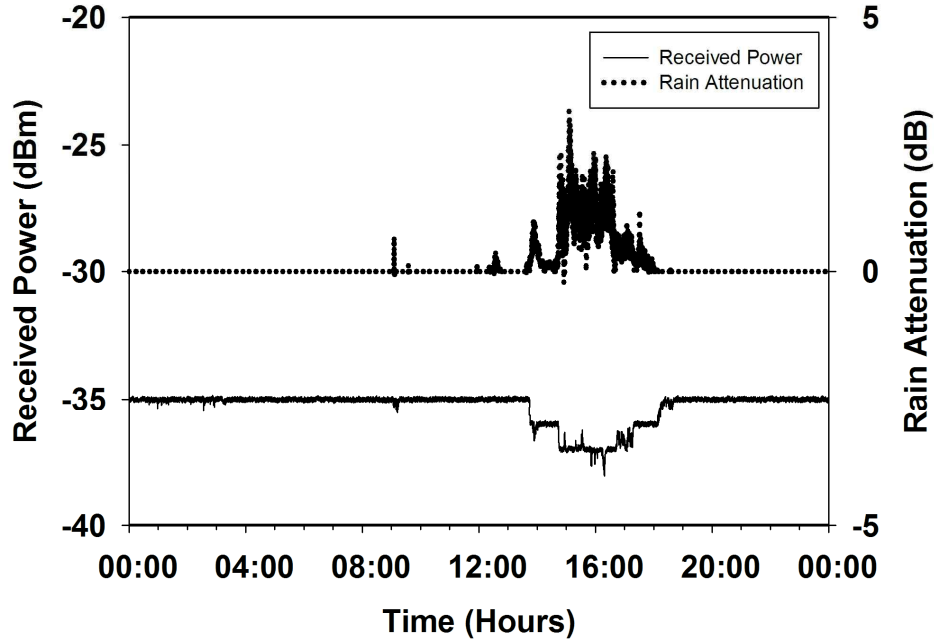


(b) 항공 사진

[그림 4.3.1] 17.94 GHz에서 운용하는 강우감쇠 측정용 안테나 시스템

[그림 4.3.1]에서 보는바와 같이 송신 안테나는 기지국(이천시 설성면 금당리 KT 무선기지국) 철탑에, 수신 안테나는 이천 전파시험인증센터 낙하수밀 시험장 철탑에 설치되어 있으며 이격거리는 약 3.17 km이다. 강우감쇠 측정용 시스템은 상용으로 판매되고 있는 직진성이 강한 2개의 동등한 안테나를 사용하고 높이 약 25 m이상에서 운용하고 있다. 따라서 [그림 4.3.2]와 같이 실시간(10초 단위)으로 측정되고 있는 결과(수신 전력 : 비가 오지 않을 때 평균 - 34.95 dBm)를 바탕으로 R-SAM 식 (2.1.6)에 의해 안테나의 인자 특성을 산출하였다. 산출된 안테나 인자는 약 18.00 dB/m이다.

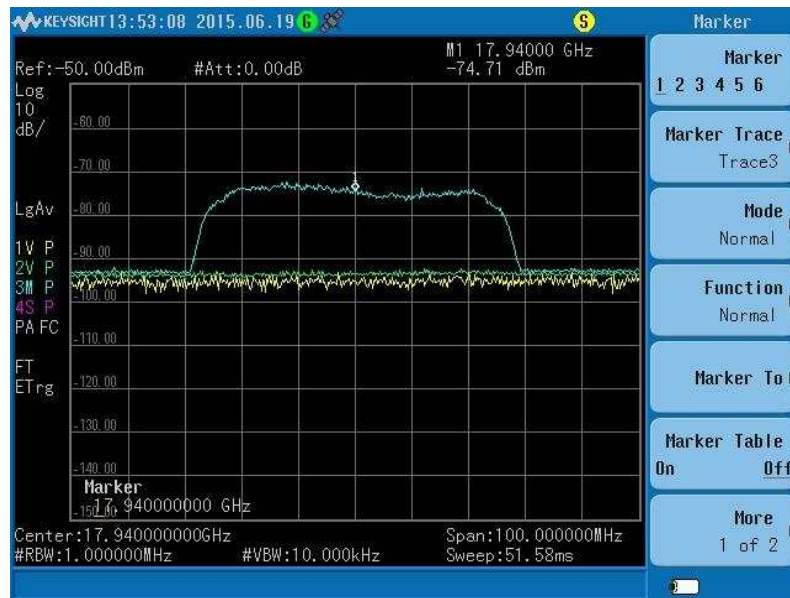
$$AF_R(dB/m) = \frac{1}{2}A_{RT} + 10\log f_{MHz} - 10\log d_1 - 16 \quad (2.1.6)$$



[그림 4.3.2] 강우감쇠 측정시스템의 측정결과

다음으로 강우감쇠 측정용 송신 안테나의 안테나 인자를 앞에서 이미 교정된 동등 표준 안테나를 사용하여 측정하였다. 측정에 사용된 계측기는 keysight사의 휴대용 스펙트럼(측정범위 : 9 kHz ~ 20 GHz)을 사용하였으며, 휴대용 스펙트럼과 표준 혼 안테나를 연결하기 위해 측정 중심 주파수(f_c) = 17.94 GHz에서 약 3.7 dB의 삽입손실을 갖는 케이블을 사용하였다. [그림 4.3.3]에서 보는 바와 같이 중심 주파수 17.94 GHz에서 분해능 대역폭(RBW : 1 MHz)으로 측정된 수신 전력은 약 -74.71 dBm를 얻었다. 강우감쇠 측정시스템은 18 dBm의 송신 출력과 56 MHz 채널대역폭을 사용하기 때문에 1 MHz 분해능 대역폭으로 측정된 수신 전력은 56 MHz 채널 폭에 해당하는 채널의 총 전력으로 변환해 주어야한다. 따라서 표준 안테나로 측정된 수신 전력은 -57.23 dBm에 케이블 삽입손실3.7 dB를 보상해주면 -53.53 dBm이 된다. 따라서 강우감쇠 측정용 송신 안테나의 안테나 인자는 아래 식 (2.1.5)를 이용하여 산출할 수 있다.

$$AF_T(dB/m) = -AF_R + A_{RT} + 20\log f_{MHz} - 20\log d_1 - 32 \quad (2.1.5)$$



[그림 4.3.3] 수신지점에서 측정된 수신 전력 : $f_c = 17.94 \text{ GHz}$

산출된 송신 안테나의 안테나 인자는 18.23 dB/m 이다. 따라서 강우감쇠 측정용 동등 안테나를 사용한 송신 안테나 인자 결과와 동등 표준 안테나를 사용하여 R-SAM 식을 적용한 송신 안테나의 인자는 약 0.23 dB 의 차이를 보였다. 두 결과로부터 상용안테나의 특성 측정에도 R-SAM 측정법이 유효하다는 것을 증명하였으며, 특히 R-SAM은 토지나 건물에 고착되어 있는 안테나의 특성 측정에 유용하게 사용될 수 있음을 보였다.

하지만, '15년에 R-SAM으로 측정한 상용 안테나는 주변의 반사파가 고려되지 않는 직진성이 강한 안테나를 사용하는 경우에 국한되었다. 따라서 주변의 반사파를 고려해야 하는 환경이나 그러한 안테나를 사용할 경우 R-SAM 측정법을 어떻게 적용해야 하는지에 대한 과제를 남겼다. '16년에는 이러한 과제에 대한 해결책을 제시하기 위해 토지나 건물에 고착되어 사용되고 있는 여러 종류의 상용 안테나의 특성 측정에 R-SAM 측정 연구를 계속해서 수행할 계획이다.

제 5 장 맺음말

본 보고서에서는 1 GHz ~ 18 GHz 동등 혼 안테나를 사용하여 국립전파연구원 표준안테나 법(R-SAM)을 검증하는 것에 주력하였다. R-SAM을 이용하려면 표준안테나가 필요하기 때문에 표준안테나에 대해 고찰하였다. 1 GHz 이상 대역에서 특성이 똑같은 동등 안테나가 존재하면 측정용으로 혼 안테나를 표준화하기 위하여 R-SAM으로 동등 안테나의 표준 안테나 인자를 결정할 수 있다. 따라서 1 GHz ~ 18 GHz 대역을 7 개의 대역으로 나누어 7쌍의 동등 혼 안테나를 제작하고 안테나 사이의 감쇠량 측정으로 그 동등성을 검증하였다.

제작된 안테나는 감쇠량 측정의 기준으로 계측기의 불확도 및 측정 시 영향을 미치는 오차 요인을 감안하더라도 0.2 dB 이내로 동등하다고 정의 내릴 수 있다. 제작된 동등 혼 안테나의 표준 안테나 인자를 R-SAM을 이용하여 결정하였고 그 안테나 인자를 기준 값으로 사용하여 교정 대상 혼 안테나 C의 안테나 인자를 R-SAM에 의하여 측정 산출하였다. 이에 대한 유효성을 검증하기 위하여 안테나 교정 및 측정의 가장 근간이 되는 3-안테나 법(TAM)으로 측정하여 상호 비교하여 그 값이 0.1 dB 이내(2.8 GHz제외 : 1.8 dB)로 일치함을 보임으로써 R-SAM 유효성을 검증하였다. 따라서 특성이 동일한 2개의 안테나가 존재한다면 R-SAM을 이용하여 단 한 번의 감쇠량 측정으로 표준 안테나의 인자를 정의 내릴 수 있다. 또한 약 18 GHz대역에서 상용으로 사용되고 있는 강우 감쇠 측정용 안테나의 특성 측정에도 R-SAM을 적용하였다. 강우감쇠 측정 시스템은 특성이 동등한 두 개의 밀리미터파 안테나로 구성되어 있어 실시간(10초 단위)으로 측정되고 있는 결과를 바탕으로 R-SAM을 적용하여 안테나 인자를 산출하였다. 또한 제작된 표준 안테나(주파수 범위 : 12.5 GHz ~ 18 GHz)의 안테나 인자를 기준 값으로 사용하여 상용안테나의 송신 안테나 인자를 산출하여 두 측정결과를 상호 비교하였다. 두 측정결과는 약 0.23 dB의 차이를 보임으로써 R-SAM 측정방법의 유효성이 검증되었다. 따라서 R-SAM 측정법은 토지나 건물에 고착되어 있는 안테나의 특성 측정에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 보고서의 연구결과를 토대로 2016년에는 30 MHz ~ 40 GHz대역에서 사용되고 있는 여러 종류의 상용 안테나의 특성을 R-SAM으로 측정하고 R-SAM 측정방법의 유효성 검증에 대한 측정연구를 계속해서 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] J Park, G Mun, D Yu, B Lee, W Kim "Proposal of Simple Reference Antenna Method for EMI Antenna Calibration," *IEEE EMC Symp.*, Aug. 2012, pp. 90–95
- [2] Alexander M.J, Salter M.J, "Low measurement uncertainties in the frequency range 30 MHz to 1 GHz using a calculable dipole antenna and national reference ground plane," *IEE Proc.-Sci Meas. Sci Tech.*, Jul. 1996, 143, no. 4, pp. 221–228
- [3] Salter M.J, Alexander M.J, "EMC antenna calibration and the design of an open field site," *J. Phys. E. Meas. Sci Tech.*, 1991, 2, pp. 510–519
- [4] Smith, A.A., "Standard site method for determining antenna factors," *IEEE Trans. on* 1982, EMC-24, pp. 311–322
- [5] Martin Alexander, Martin Salter, Benjamin Loader, and David Knight, "Broadband calculable dipole Reference antennas," *IEEE Trans. on EMC*, vol. 44, no. 1, Feb. 2002, pp. 45–58
- [6] Jungkuy Park, Dongchan Jeong, Hun Youn, Myoungwon Seo, Daehoon Yu, Jaeman Ryoo. "3-Antenna Height Scanning Average method of EMI Antenna Calibration," *2009 IEEE EMC Symp.*, Aug. 2009.
- [7] Alexander M.J, Loader B.G, Salter M.J, "Reduced measurement uncertainty in the frequency range 500 MHz to 1 GHz using a calculable standard dipole," NPL management Ltd-Internal
- [8] CISPR/A/990/CD "CISPR 16-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus- EMC-antenna calibration," 2012.
- [9] David Cheadle "Introduction to Calculable Antenna Processor (CAP2010)," Jun, 2012.
- [10] Stanley L. Baker, "Calculable Antenna Processor User Manual," *NPL*, Mar. 2011 pp, 1–18.
- [11] H. T. Friis, "A note a simple transmission formula," *Proc IRE.*, May 1946, pp. 254~256

- [12] D. G. Camel, E. B. Larsen and W. J. Anson, "NBS calibration procedure for horizontal dipole antenna(25 to 1000 MHz)," National Bureau of Standards Electromagnetic Fields Division
- [13] Brian Kidney, "Horn Antennas," Engineering 9816-Antennas, Nov. 26, 2001.
- [14] IEC CISPR/A/644/CD Project number CISPR 16-1-5 Amd.1 Ed1., "Antenna Calibration"
- [15] 박정규, 정동찬, 차기남, 고흥남, "30 MHz에서 1 GHz 대역 EMI용 안테나의 준자유공간 안테나팩터 산출에 관한 연구," 2004년도 한국전자과학기술 종합학술발표회, vol. 14, no.1, 2004. 11. 5.
- [16] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory : Analysis and Design," John Wiley & Sons, 1982
- [17] Microwave Antenna Theory and Design by Silver, vol. 12, Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill, 1949, pp. 582–585
- [18] Antenna by Kraus, McGraw-Hill, 1950, pp. 455–457
- [19] Standard Site Method For Determining Antenna Factors, *IEEE EMC Trans. on* vol. EMC-24, No. 3, Aug. 1983, pp. 316–322
- [20] ANSI C63.5 American National Standard for Electromagnetic Compatibility -- Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference(EMI) Control -- Calibration of Antennas
- [21] IEEE Std 149 IEEE Standard Test Procedures For Antennas
- [22] NBS Circular 517, Calibration of Commercial Radio Field-Strength Meters
- [23] Albert A Smith, "Standard Site Method for Determining Antenna Factors," *IEEE Trans. on* Electromagnetic Compatibility, vol. EMC-24, no. 3, pp. 316–322 Aug. 1982.
- [24] D. G. Gamel et. al, "NBS Calibration Procedures for Horizontal Dipole Antenna(25 to 1000MHz)," National Bureau of Standards Technical Note 1309, Apr. 1997.
- [25] Martin Alexander, Martin Salter, Benjamin Loader, and David knight., "Broadband Calculable Dipole Reference Antennas," *IEEE Trans. on* Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, pp. 45–58, 2002.

- [26] Albert A Smith, Robert F. German, and James B Pate, "Calculation of Site Attenuation from Antenna Factors," *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-24, no. 3, pp. 315, Aug. 1982.
- [27] ANSI C63.5 , "American National Standard for Electromagnetic Compatibility-Radiated Emission Measurement in Electromagnetic interference(EMI) Control-Calibration of Antennas (9 kHz to 40 GHz)", pp. 10, Apr. 2006.
- [28] NPL, A National Measurement Good Practice Guide no. 73 "Calibration and use of antennas, focusing on EMC application,"
- [29] CISPR/A/990/CD "CISPR 16-1-6: Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods- Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-EMC antenna calibration"
- [30] 박정규 외, "교정용 혼 안테나 제작 및 교정방법 연구," 2010년도 전파연구보고서
- [31] 박정규 외, "시간영역에서 안테나 교정방법 연구," 2011년도 전파연구보고서
- [32] 박정규 김우년, "시간영역에서 안테나 이득 측정 연구," 한국전자과학회 논문지 2012, Nov 23(11) pp. 1217~1227
- [33] 박정규 외, "자체개발 안테나 교정방법 유효성 확인 연구," 2012년도 전파연구보고서
- [34] Jungkuy Park et. al, "Height Average Analysis of Antenna Factors for EMI Antenna", *2009 IEEE EMC Symp.*, Aug .2009.
- [35] Sakasai M., et.al., "Evaluation of Uncertainty in Free-space Antenna Factor Calibration in CRL," *Proc. of EMC symp.*, in Sendai, pp. 657-660, Jun. 2004.
- [36] Agilent, "Agilent Time Domain Analysis using a network analyzer," Application Note 1287-12
- [37] 박정규 외, "안테나_교정의 R-SAM과 시간영역 기술융합 연구(2차년도)," 2015년도 전파연구보고서

R-SAM 검증 연구를 통한 국제표준화 추진



58217 전남 나주시 빛가람로 767 (빛가람동)

발 행 일 : 2015. 12.

발 행 인 : 유 대 선

발 행 처 : 미래창조과학부 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4416

인 쇄 : (사)한국척수장애인협회 광주·전남인쇄사업소

Tel. 062) 222-2788

ISBN : 979-11-5820-037-4 < 비 매 품 >

주 의

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

