

# 안테나 측정방법 국제표준화 추진 및 유효성 검증 연구

2017. 12.



국립전파연구원

National Radio Research Agency



# 제 출 문

본 보고서를 「안테나 측정방법 국제표준화 추진 및 유효성 검증에 관한 연구」 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2017. 12. 31.

연구책임자 : 박성원(전파자원기획과 연구기획담당)  
연구원 : 임종혁(전파자원기획과 연구기획담당)  
이일용(전파자원기획과 연구기획담당)  
김수진(전파자원기획과 연구기획담당)  
윤대환(전파자원기획과 연구기획담당)





## 요 약 문

본 연구보고서는 국립전파연구원에서 개발한 가단한 표준안테나 법인 C-SAM (Compact-Standard Antenna Method)의 후속 검증연구와 G-TEM셀을 사용한 루프 안테나 측정불확도 개선에 관한 연구 결과를 '17년 러시아 블라디보스톡에서 개최한 CISPR 총회에 기고한 내용을 기술하였다.

C-SAM은 단 한 번의 측정으로 안테나 인자를 결정할 수 있는 즉, 측정절차를 간소화 할 수 있는 획기적인 안테나 측정방법이다. '17년 CISPR 표준회의에서는 C-SAM 측정방법의 국제표준 추진을 위해 기존의 안테나 측정방법 표준문서 「CISPR16-1-6」에서 사용되는 기존 안테나 측정법과 C-SAM의 이론적 배경을 설명하고, 기존측정방법과 C-SAM으로 측정한 결과를 상호 비교하여 유효성을 검증한 결과를 발표하였다. 그 결과, 한 번의 측정으로 안테나를 측정할 수 있어 시간을 간소화할 수 있는 방법임을 인정받았으며, 본문에서 자세히 설명하였다.

4장에서는 '16년 중국 항저우에서 개최한 CISPR 표준회의에서 발표한 G-TEM셀을 사용한 30 MHz 이하대역 루프 안테나 측정방법에 대한 측정 불확도를 개선하기 위한 연구결과를 '17년 러시아 블라디보스톡에서 개최한 CISPR 표준회의에서 기고한 내용을 기술하였다. 회의결과 연구원에서 제안한 G-TEM셀을 이용한 안테나 측정 불확도 개선에 대한 내용을 위원회 초안(CD)에 반영하여 회람하기로 하였다.

마지막으로, 5장과 6장에서는 연구원에서 수행한 연구결과의 국제표준화 대응결과와 결론에 대해 설명하였다.



# 목 차

제1장 서 론 .....	1
제2장 안테나 교정방법 .....	2
제1절 안테나 교정방법 표준 규격 .....	2
제2절 기존 안테나 교정법 표준 동향 .....	2
제3장 C-SAM 유효성 검증 결과 .....	22
제1절 1 GHz ~ 18 GHz 대역의 자유공간(FAR) 조건의 시험장 평가 .....	22
제2절 C-SAM의 측정결과 및 유효성 검증 .....	25
제4장 G-TEM셀에서의 루프 안테나 교정 .....	40
제1절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정절차 .....	40
제2절 기준 루프 안테나 교정 .....	43
제3절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정 수행 .....	48
제4절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 측정 불확도 .....	56
제5장 IEC/CISPR 국제표준회의 표준화 대응 .....	58
제1절 C-SAM 측정방법의 국제 표준화 추진 .....	58
제2절 G-TEM cell을 이용한 루프 안테나 교정법 표준화 추진 대응연구 .....	59
제6장 결론 .....	60
* 참고문헌 .....	61

## 표 목 차

[표 1] TAM을 이용한 루프 안테나의 AF에 대한 측정 불확도 .....	9
[표 2] AF를 산출하기 위한 30 MHz 이상의 안테나 교정법 .....	11
[표 3] 기존 30 MHz 이상의 안테나 교정법 비교 .....	17
[표 4] C-SAM과 기존 1 GHz 이상의 안테나 교정법 비교 .....	21
[표 5] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 안테나 인자 .....	26
[표 6] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 안테나 인자 .....	27
[표 7] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 안테나 인자 .....	28
[표 8] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 안테나 인자 .....	29
[표 9] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 안테나 인자 .....	30
[표 10] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 안테나 인자 .....	31
[표 11] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 안테나 인자 .....	32
[표 12] 18 GHz ~ 26.5 GHz대역 안테나 인자 .....	33
[표 13] 26.5 GHz ~ 40 GHz대역 안테나 인자 .....	34
[표 14] 3-안테나법에 의한 30 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 .....	45
[표 15] 3-안테나법에 의한 60 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 .....	47
[표 16] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교 .....	50
[표 17] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교 .....	53
[표 18] GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정방법에 대한 측정 불확도 .....	56

## 그 립 목 차

[그림 1] TEM 셀을 사용한 표준 자기장 법의 교정시스템 구성도 .....	5
[그림 2] 수신 안테나의 등가회로 모델 .....	6
[그림 3] 3-안테나법을 위한 안테나 조합 구성도 .....	7
[그림 4] TAM을 이용한 루프 안테나 교정 .....	9
[그림 5] 접지면(30 MHz ~ 1 GHz)상의 TAM의 구성 .....	13
[그림 6] 자유공간(1 GHz ~ 18 GHz)상의 TAM의 구성 .....	13
[그림 7] TAM의 SIL(삼입손실) 측정 .....	14
[그림 8] SAM의 측정 구성 .....	16
[그림 9] 국립전파연구원형 표준안테나법(C-SAM)의 측정 구성 .....	18
[그림 10] 자유공간(FAR) 조건의 시험장 평가 측정구성 .....	21
[그림 11] 흡수체 PFP-30 사진 및 특성 .....	23
[그림 12] FAR 조건의 시험장 평가 측정결과 .....	24
[그림 13] 측정된 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 안테나 인자 .....	26
[그림 14] 측정된 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 안테나 인자 .....	27
[그림 15] 측정된 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 안테나 인자 .....	28
[그림 16] 측정된 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 안테나 인자 .....	29
[그림 17] 측정된 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 안테나 인자 .....	30
[그림 18] 측정된 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 안테나 인자 .....	31
[그림 19] 측정된 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 안테나 인자 .....	32
[그림 20] 측정된 18 GHz ~ 26.5 GHz대역 안테나 인자 .....	33
[그림 21] 측정된 26.5 GHz ~ 40 GHz대역 안테나 인자 .....	34
[그림 22] C-SAM과 기존 안테나 교정법 편차 비교 결과 .....	39
[그림 23] GTEM셀 내에 기준 루프 안테나의 설치 .....	41
[그림 24] 네트워크분석기를 이용한 루프 안테나의 설치 .....	42
[그림 25] TAM을 이용한 루프 안테나 교정 .....	43
[그림 26] 3-안테나법에 의한 30 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 그래프 .....	44

[그림 27] 3-안테나법에 의한 60 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 그래프 .....	46
[그림 28] G-TEM 내에서 기준 루프 안테나(A1)의 S21 Ref 측정 .....	48
[그림 29] G-TEM 내에서 피 교정 루프 안테나(A2)의 S21 AUC 측정 .....	49
[그림 30] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교 .....	50
[그림 31] G-TEM 내에서 기준 루프 안테나(A1)의 S21 Ref 측정 .....	51
[그림 32] G-TEM 내에서 피 교정 루프 안테나(A2)의 S21 AUC 측정 .....	52
[그림 33] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교 .....	53
[그림 34] G-TEM cell에서의 루프 안테나 교정 .....	54
[그림 35] G-TEM cell에서의 루프안테나 교정(직경: 30 cm) .....	55
[그림 36] G-TEM cell에서의 루프안테나 교정(직경: 60 cm) .....	56
[그림 37] 표준회의에 발표된 기고문 .....	58
[그림 38] 표준회의에 발표된 기고문 .....	60

# 제1장 서론

## 제1절 연구의 배경

최근 정보통신기술의 발전으로 모바일 기기뿐만 아니라 모든 전자/전기 기기의 초연결(Hyper connection) 사회로의 진입과 빅데이터의 출현으로 주파수 자원의 한계에 다다르고 있다. 따라서 세계적으로도 모바일 트래픽 폭증에 따른 채널용량 증대를 위해 밀리미터파와 대역과 같은 새로운 주파수 대역을 개척하고 있다. 이에 따라 최근 CISPR(국제무선장해특별위원회)에서도 전자기 간섭(EMI) 문제 또한 주파수 대역이 밀리미터파 대역까지 고려해야 된다고 논의 되고 있다. 또한, 정보통신기기의 사용량이 지속적으로 증가하고 있어 30 MHz이하 대역 전기용품에 대한 전자파 인증 또한 중요해지고 있다. 이에 따라 최근 CISPR에서는 30MHz 이하대역 시험장평가방법 및 루프 안테나, 모노폴 안테나의 안테나 교정방법, 측정 불확도 평가방법에 대해 활발히 논의 중이다.

따라서, 본 연구 보고서에서는 우리원에서 독자적으로 개발한 안테나 측정방법(C-SAM)을 40 GHz까지 확장한 후속 검증연구와 G-TEM셀을 사용한 루프 안테나의 크기, 높이, 위치, 각도 변화에 따른 측정오차를 분석하고 측정 불확도 개선에 관한 연구를 수행하였으며 ‘17년 10월 러시아 블라디보스톡 에서 개최한 CISPR 표준회의에 기고서를 제출하고 국제표준화를 추진한 내용을 기술하였다.

## 제2장 안테나 교정방법

### 제1절 안테나 교정방법 표준 규격

CISPR 16-1-6(안테나 교정방법)은 크게 주파수 범위에 따라 30 MHz이하대역과 30 MHz이상에 대한 교정법으로 나뉜다. 여기서 30 MHz 이상대역은 30 MHz ~1 GHz, 1 GHz ~ 18 GHz로 2가지로 구분된다. 표준문서 4장에서는 안테나 교정방법의 일반적인 사항을 규정하고 있으며, 안테나 인자와 30 MHz 이상에 대한 안테나 교정방법의 일반적인 고려사항 등이 요약되어 있다. 5장은 9 kHz ~ 30 MHz 대역의 안테나 교정법이 규정되어 있으며 모노폴 안테나 교정을 위한 등가정전용량 대체법(ECSM), 루프 안테나 교정을 위한 TEM cell을 사용한 방법이 상세히 기술되어 있다.

그 외 나머지 장에서는 30 MHz 이상대역의 대표적인 안테나 교정방법 (3-안테나법(TAM), 표준시험장법(SSM), 시험소에서 대부분 사용하고 있는 표준 안테나를 사용하는 대체법(SAM))에 대해 자세하게 기술되어 있다.

### 제2절 기존 안테나 교정법 표준 동향

#### 1. 30 MHz 이하대역

EMC 측정에 주로 사용되는 원형 루프안테나는 파장에 비해 전기적으로 작은(electrically-small) 직경 30 cm 또는 60 cm 이하의 크기를 갖는 안테나로써 일반적으로 9 kHz - 30 MHz 대역에서 사용된다.

30 MHz 이하의 루프 안테나의 교정방법은 국제 표준문서 CISPR 16-1-6의 5.2.2절에 규정되어 있다. CISPR 16-1-6에 제시된 방법은 TEM셀을 사용한 표준자기장법에 속한다. 다만 TEM셀의 전기장에 대한 수식으로부터 TEM 모드의 특성을 고려한 표준 자기장의 세기는 전기장의 세기를 파동 임피던스( $377\Omega$ )로 나누어주는 방식으로 자기장에 대한 안테나 인자를 도출한다.



### 가. TEM 셀을 사용한 루프 안테나 인자 교정

CISPR 16-1-6(2014-12)에 규정된 TEM 셀을 사용한 표준 자기장 법은 9 kHz ~ 30 MHz 대역에서 표준 전자기장 발생 장치로써 성능이 검증된 TEM 셀의 물리적인 사이즈와 입력 전력의 세기를 각각 측정하여 간단한 수학적 계산을 통해 교정 대상 안테나가 위치한 곳의 표준 자기장을 정확히 조정할 수 있는 방법이다.

안테나 인자는 평면파 전기장의 세기  $E_{TEM}$  과 안테나 출력 단에서의 출력 전압  $V_{out}$  의 비율로써 식 (2.1.1)과 같이 정의된다.

$$AF = \frac{E_{TEM}}{V_{out}} \quad (2.1.1)$$

TEM 셀의 경우 평면파 전기장  $E_{TEM}$  은 TEM 셀에 인가되는 전압  $V_{TEM}$  과 TEM 셀의 내부 도체와 외부도체 사이의 높이  $b$ 를 사용하여 식 (2.1.2)와 같이 표현된다.

$$E_{TEM} = \frac{V_{TEM}}{b} \quad (2.1.2)$$

TEM 셀 입력 전압  $V_{TEM}$  은 TEM 셀의 입력 임피던스  $Z_{cell}$  과 TEM 셀로 입력되는 순 전력  $P_{net}$ 로부터 식 (2.1.3)과 같이 계산될 수 있다.

$$V_{TEM} = \sqrt{Z_{cell} \cdot P_{net}} \quad (2.1.3)$$

위의 두 식을 연계하면 식 (2.1.4)가 유도된다.

$$E_{TEM} = \frac{1}{b} \sqrt{Z_{cell} \cdot P_{net}} \quad (2.1.4)$$

TEM 셀로 입력되는 순 전력  $P_{net}$  은 TEM 셀을 관통하는 전력을 측정하여 알 수 있고 이때의 TEM 셀 자체 손실은 무시할 수 있을 정도로 작다.

TEM 셀의 출력을  $50\ \Omega$ 으로 종단시킨 뒤 루프 안테나의 출력 단에 입력 임피던스  $Z_R(\cong 50\ \Omega)$ 을 갖는 측정 수신기를 연결하여 출력 전력  $P_{out}$ 을 측정하여 식 (2.1.5)를 이용하면 출력전압으로 변환이 가능하다.

$$V_{out} = \sqrt{Z_R \cdot P_{out}} \quad (2.1.5)$$

식 (2.2.4)와 식 (2.2.5)를 이용하면 식 (2.2.6)와 같이 정리된다.

$$AF_e = \frac{1}{b} \sqrt{\frac{Z_{cell}}{Z_R}} \sqrt{\frac{P_{in}}{P_{out}}}, \quad (1/m) \quad (2.1.6)$$

사용의 편의를 위해 데시벨(dB) 단위로 변환하면 식 (2.1.7)이 된다.

$$AF_e = P_{net} - P_{out} - 20\log_{10}(b) + 10\log_{10}\left(\frac{Z_{cell}}{Z_R}\right), [dB(S/m)] \quad (2.1.7)$$

TEM 셀 내부의 필드는 TEM 모드이고 전기장과 자기장의 비는 식 (2.1.8)과 같이 파동 임피던스  $Z_w(\cong 377\ \Omega)$ 로 표현이 된다.

$$Z_w = \frac{E}{H}, \quad H = \frac{E}{Z_w} \quad (2.1.8)$$

따라서 자기장 안테나의 인자는 식 (2.1.9)와 같이 결정된다.

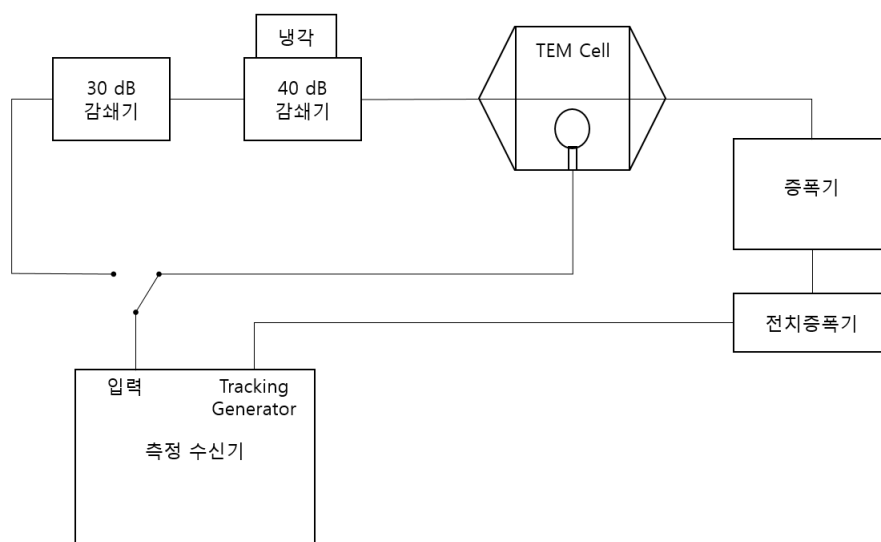
$$AF_m = AF_e - 20\log_{10}(Z_w), [dB(S/m)] \quad (2.1.9)$$

TEM 셀을 이용하여 루프 안테나를 교정하기 위한 시스템 구성은 안테나의 유형에 따라 그림 2.1.1과 같이 두 가지 방식으로 구성될 수 있다. 그림 2.1.1의 (a)는 수동형 루프 안테나의 교정을 위한 구성도를, [그림 2.1.1]의 (b)는 능동형 루프 안테나의 교정을 위한 구성도를 각각 나타낸다.

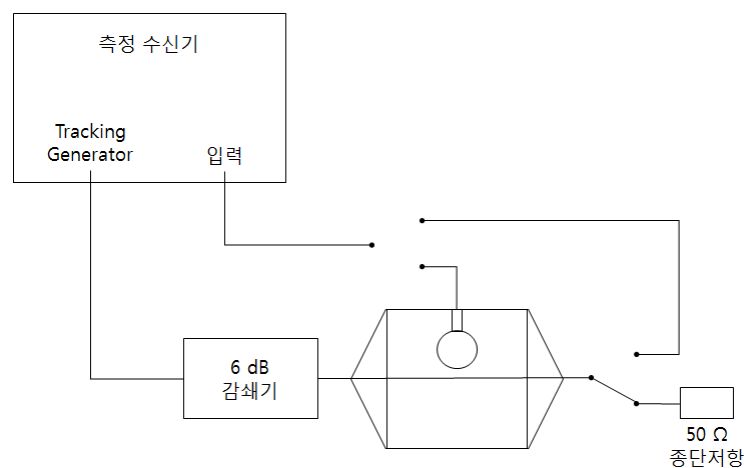
[그림 2.1.1]의 (b)에서 수동 루프 안테나를 교정할 경우 낮은 주파수에서 안테나 이득이 크게 떨어지기 때문에 루프 안테나의 출력 전압이 매우 낮다.

따라서 수신기로 입력되는 출력 신호의 S/N비를 높여주기 위해서 TEM 셀로 입력되는 전력을 증폭시켜 주어야 한다. 이 경우에 TEM 셀의 종단에 고전력용 감쇄기를 부착하여  $P_{net}$  측정 시 반사로 인한 수신기의 손상을 방지해야 한다. 따라서 감쇄기를 부착하고 측정된 전력을  $P_{ref}$ 라고 하였을 때 감쇄기의 감쇄량  $A$ 를 더해서  $P_{net}$ 을 구할 수 있다.

$$P_{net} = P_{ref} + A, \text{ [dBm]} \quad (2.1.10)$$



(a) 수동형(Passive) 루프 안테나 교정 시스템 구성도



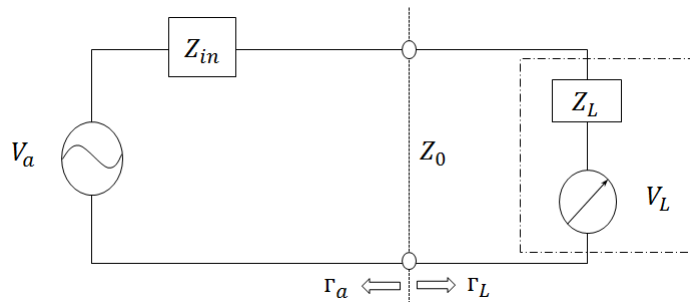
(b) 능동형(Active) 루프 안테나 교정 시스템 구성도

[그림 1] TEM 셀을 사용한 표준 자기장 법의 교정시스템 구성도

### 나. 3-안테나 방법

3-안테나 교정 방법은 안테나 인자를 알지 못하는 세 개의 안테나 조합에 대해서 세 번의 2-포트 S 파라미터, S21을 측정하고 이를 정해진 식에 대입하면 세 개의 안테나 인자를 동시에 구할 수 있는 방식이다.

일반적인 수신 안테나의 등가회로 모델은 [그림 2]와 같이 표현된다.



[그림 2] 수신 안테나의 등가회로 모델

여기서,

$V_a$  : 루프 안테나의 개방 출력 전압

$Z_{in}$  : 안테나의 입력 임피던스

$Z_0$  : 전송선의 특성임피던스(일반적으로 50 Ω)

$Z_L$  : 수신기의 입력 임피던스

$V_L$  : 수신기에서 측정되는 루프 안테나의 출력 전압

$\Gamma_L, \Gamma_a$  : 각각의 반사계수

$Z_0$ 와  $Z_L$ 이 동일하다고 가정을 하면 안테나의 개방출력전압  $V_a$ 는 패러데이의 법칙에 의해 식 (2.1.11)과 같이 표현이 될 수 있다.

$$V_a = -jw\pi r_a^2 \mu_0 H \quad (2.1.11)$$

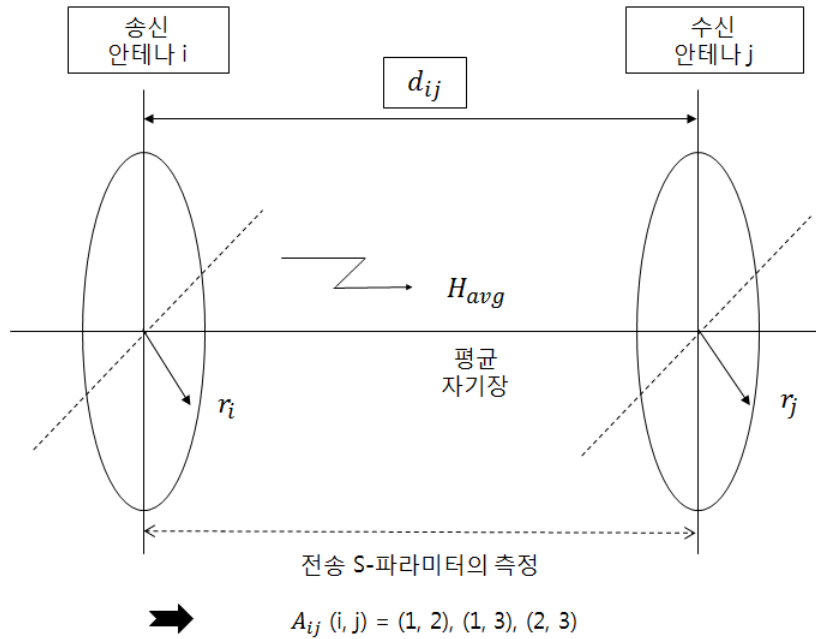
여기서  $w$ 는 각속도를 나타내고  $r_a$ 는 수신 루프 안테나의 반지름을 그리고  $H$ 는 입사 자기장을 나타낸다. 다음으로  $\Gamma_L$ 이 0인 경우에는 개방전압  $V_a$ 와 수신전압  $V_L$ 의 관계는 식 (2.1.12)로 표현될 수 있다.

$$V_L = \frac{Z_L}{Z_L + Z_{in}} \cdot V_a \quad (2.1.12)$$

위의 식 (2.1.11)과 (2.1.12)로부터 자기장 안테나 인자  $AF_m$ 은 식 (2.1.13)로 정리될 수 있다.

$$AF_m = \frac{H}{V_L} = -\frac{1}{j\omega\mu_0\pi r_a^2} \frac{Z_{in} + Z_L}{Z_L} \quad (4.13)$$

3-안테나법의 송수신 안테나 측정 구성은 [그림 3]과 같이 표현될 수 있다.



[그림 3] 3-안테나법을 위한 안테나 조합 구성도

세 개의 안테나로 만들어지는 각 안테나 조합에 대해 측정된 전송 S 파라미터를 표현하는 세 개의 식을 각 루프 안테나의 자기장 안테나 인자에 대해 정리하면 식 (2.1.14)가 생성된다.

$$AF_{m_i}(w) = \sqrt{\frac{-S_{21_k} \alpha_{ij} \alpha_{ik}}{S_{21_{ij}} S_{21_{jk}} \alpha_{jk}}} \quad [\text{S/m}] \quad (2.1.14)$$

$$(i, j, k) = (1, 2, 3), (2, 1, 3), (3, 1, 2)$$

여기서,

$$\alpha_{lm} = \frac{\sqrt{1+k^2 R_{lm}^2}}{j\omega\mu_0\pi Z_L R_{lm}^3} \left\{ 1 + \frac{15(r_1 r_m)^2}{8R_{lm}^4} + \frac{315}{64} \frac{(r_1 r_m)^4}{R_{lm}^8} \right\}$$

$$R_{lm} = \sqrt{d_{lm}^2 + r_1^2 + r_m^2}$$

$$(l, m) = (1, 2), (1, 3), (2, 3)$$

$r_1, r_2$  : 송, 수신 안테나의 반경

$d$ 는 송, 수신 안테나 사이의 거리

$k$  : 파수 ( $2\pi/\lambda$ )

#### 다. CISPR/A/1157/CD(CISPR 16-1-6 Ed. 1.0 AMD2)

일본에서는 2015년도 CISPR 회의에서 안테나 교정에 대한 새로운 방법인 TAM(3-안테나법), 전류 프로브를 이용한 SFM(Standard Field Method : 표준장법), 송신루프 안테나의 자기 안테나인자를 사용하는 SFM을 제안하였으며 이를 바탕으로 현재 2016년에 CD문서를 발행하였으며 각 교정방법은 다음과 같다.

##### 1) TAM(Three Antenna Method: 3-안테나법)

이 방법은 AIST (NMI of Japan)가 개발했으며 오타와 특별 회의에서 Fujii 박사가 제안하였으며, 교정대상 안테나를 포함한 3개의 루프 안테나에 대한 사전지식이 필요하지 않은 안테나 교정법으로써 네트워크 분석기를 사용하여 측정할 수 있는 방법이다.

측정방법은 [그림 2-14]에 도시 된 바와 같이 동축으로 정렬 된 3 개의 안테나 쌍에 대하여, 안테나 i와 안테나 j 사이의 사이트 삽입 손실  $A_i(i, j)$ 는 자유 공간 환경에서 측정된다. 3 개의 안테나 쌍에 대한  $A_i(i, j)$ 로부터, 각 안테나의 자기 안테나인자  $F_{aH}$ 는 식 (2.1.15)에 의해 결정될 수 있다.

$$F_{aH}(1) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} + A_i(2,1) + A_i(3,1) - A_i(3,2) + K(2,1) + K(3,1) - K(3,2)] \quad (2.1.15)$$

$$F_{aH}(2) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} + A_i(2,1) - A_i(3,1) + A_i(3,2) + K(2,1) - K(3,1) + K(3,2)]$$

$$F_{aH}(3) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} - A_i(2,1) + A_i(3,1) + A_i(3,2) - K(2,1) + K(3,1) - K(3,2)]$$

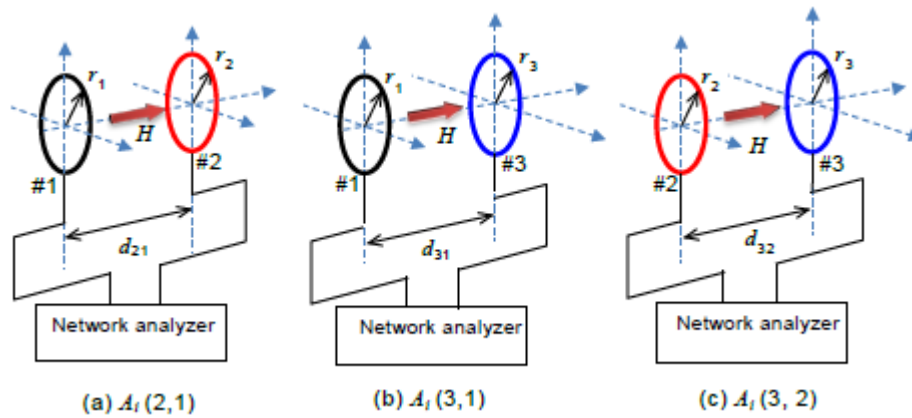
단위는 [S/m]

여기서,

$f_{MHz}$  는 주파수 단위는 MHz

$A_i(i,j)$ 는 두 안테나 i와 j 사이의 SIL(삽입손실)

$K(i,j)$ 는 두안테나 쌍 (i, j)의 보정계수[dB(m-3)]



[그림 4] TAM을 이용한 루프 안테나 교정

이러한 측정방법을 통해 TAM(3-안테나법)을 이용한 루프 안테나 교정법에 대한 측정 불확도는 [표 1]과 같다.

[표 1] TAM을 이용한 루프 안테나의 AF에 대한 측정 불확도

Source of uncertainty or quantity $X_i$	Value dB	Probability distribution	Divisor	Sensitivity	$u_i$ dB	Note
$A_i(i,j)$	0,16	-	1	$\sqrt{3}/2$	0,14	See Table16
$K(i,j)$	0,50	-	1	$\sqrt{3}/2$	0,44	See Table17
Repeatability	0,20	Rectangular	$\sqrt{3}$	1	0,12	
Combined standard uncertainty, $u_c$					0,47	
Expanded uncertainty, $U$ ( $k=2$ )					0,94	

## 2. 30 MHz 이상대역

30 MHz 이상의 대표적인 안테나 교정방법으로는 TAM(3-안테나법), SSM(표준시험장법), SAM(표준안테나법)이 있다. 이 또한 30 MHz 이하의 안테나 교정법과 마찬가지로 교정대상안테나의 AF(안테나인자)를 산출하기 위한 교정방법이다. 이를 통해 안테나 이득과 AF(안테나인자)와의 상호관계는 식(2.2.1)로 주어진다.

$$AF(dB/m) = 20\log_{10} 9.73/\lambda - 10\log_{10} G \quad (2.2.1)$$

또한, AF를 산출하기 위한 30 MHz 이상의 안테나 교정법은 [표 2.2.1]과 같다.



[표 2] AF를 산출하기 위한 30 MHz 이상의 안테나 교정법

Calibration site	Antenna under calibration	Calibration method	Frequency range MHz	Antenna set-up <sup>a</sup>	Pol. <sup>b</sup>	Subclause
CALTS or SAC, utilizing the ground plane	Tuned dipole	TAM	30 to 1 000	$d = 10 \text{ m}$ , <sup>c</sup> $h_1, h_2$ depend on $f$	HP	B.5.3
		SAM	30 to 1 000	$d = 10 \text{ m}$ , $h_1, h_2$ depend on $f$	HP	B.5.2
		SAM with averaging	30 to 300	$d = 10 \text{ m}$ , $h_1, h_2$ depend on $f$	HP	B.4.2
		SSM	30 to 1 000	$d = 10 \text{ m}$ , $h_2 = 2 \text{ m}$ , $h_1 = 1 \text{ m to } 4 \text{ m}$ (scan)	HP	8.4
	Biconical, (also biconical part of hybrid by 9.3)	SSM	30 to 300	$d = 10 \text{ m}$ , $h_1 = 2 \text{ m}$ , $h_2 = 1 \text{ m to } 4 \text{ m}$ (scan)	HP	8.4
		SAM	30 to 300	$d = 15 \text{ m}$ , $h_1 = 1,75 \text{ m}$ , $h_2 = 0 \text{ m}$ <sup>d</sup>	VP	9.3
		SAM or TAM with averaging	30 to 300	$d = 10 \text{ m}$ , $h_1, h_2$ depend on $f$	HP	B.4.2 SAM B.4.3 TAM
	LPDA	SSM	200 to 1 000	$d = 10 \text{ m}$ , $h_2 = 2 \text{ m}$ , $h_1 = 1 \text{ m to } 4 \text{ m}$ (scan)	HP	8.4
	Hybrid <sup>e</sup>	SSM	30 to 1 000	$d = 10 \text{ m}$ , $h_2 = 2 \text{ m}$ , $h_1 = 1 \text{ m to } 4 \text{ m}$ (scan)	HP	8.4
Free-space environment  FAR or minimizing ground reflections by height or absorber  $h_1, h_2, h_3$ apply above ground	Tuned dipole	SAM	60 to 1 000	$d_{\min}$ dependent on frequency, use FAR	HP VP	9.2.2
	Biconical, (also biconical part of hybrid)	SAM	30 to 300	$d = 4 \text{ m}$ minimum	HP VP	9.2.2 B.4.2 with averaging
	LPDA (LPDA part of hybrid) Horn	TAM SAM	200 to 18 000; $\geq 1 000$ for horn	$d = 2,5 \text{ m}$ , $h_1 = h_2 = h_3 \sim 4 \text{ m}$ <sup>f</sup>	VP	9.4.2 9.4.3
	LPDA (LPDA part of hybrid) using absorber	TAM SAM	200 to 18 000	$d = 2,5 \text{ m}$ , $h_1 = h_2 \sim 2,5 \text{ m}$ <sup>f</sup>	VP HP	9.4.4
	Horn	TAM	1 000 to 18 000	$d = 1 \text{ m or } 3 \text{ m}$ , use FAR	VP HP	9.5.1.3
	LPDA	SAM	1 000 to 18 000	$d = 1 \text{ m or } 3 \text{ m}$ , use FAR	VP HP	9.5.2
NOTE 1 The AUC is at height $h_1$ .						
NOTE 2 See A.4.2 regarding the optimum crossover frequency between biconical and LPDA antennas.						
NOTE 3 If a set of standard antennas is available, the SAM may be preferable to SSM or TAM.						
NOTE 4 In a FAR, the result is expected to be the same whether antennas are oriented HP or VP; see also A.2.5.						

### 가. TAM(3-안테나법)

TAM(3-안테나법)은 가장 대표적인 안테나 교정방법으로서 AUC(Antenna Under Calibration : 교정대상안테나)를 포함한 3개의 AF(안테나 인자)에 대한 사전지식이 필요하지 않는 교정방법이다. 30 MHz - 1 GHz에서 TAM은 접지면이

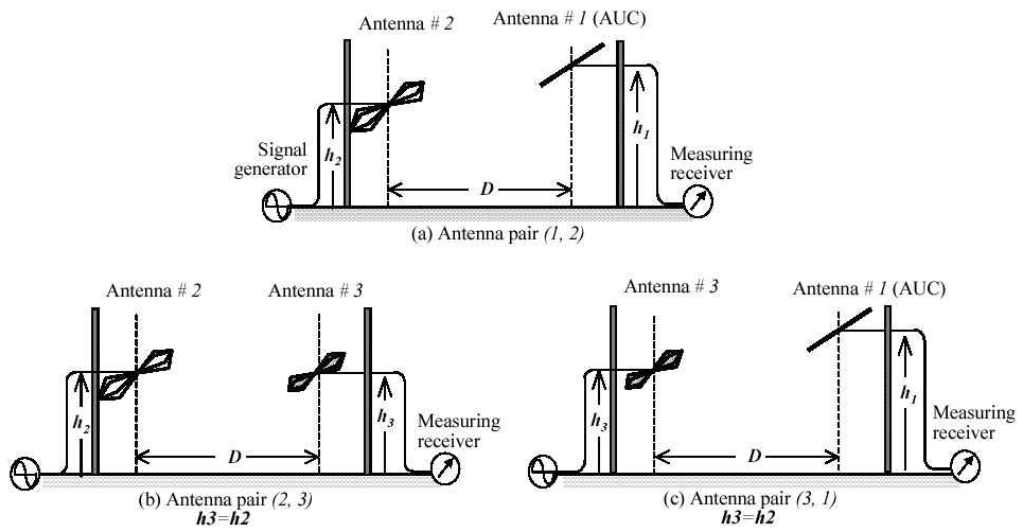
있는 야외시험장에서 측정을 진행하고 1 GHz 이상에서 TAM(3-안테나법)은 반사파가 존재하지 않는 자유공간 조건에서 측정한다. 이러한 자유공간 설정을 위해 전자파 영향이 거의 없는 흡수체가 있는 전자파무반사실(챔버)에서 측정 하거나 높은 지향성을 고려하여 고정된 높이(약 2미터 이상)에서 측정하여 설정할 수 있다.

TAM은 안테나 교정 야외시험장 접지 평면으로부터 최대 전계값을 갖는 어떤 높이에 위치한 세 개의 안테나 쌍에 대한 안테나간 삽입손실(S21)을 측정함으로써 행해진다. AUC외에 2개의 안테나가 더 필요하다. TAM의 구성 조건은 다음과 같고 접지면과 자유공간상의 TAM의 구성은 [그림 5]와 [그림 6]과 같다.

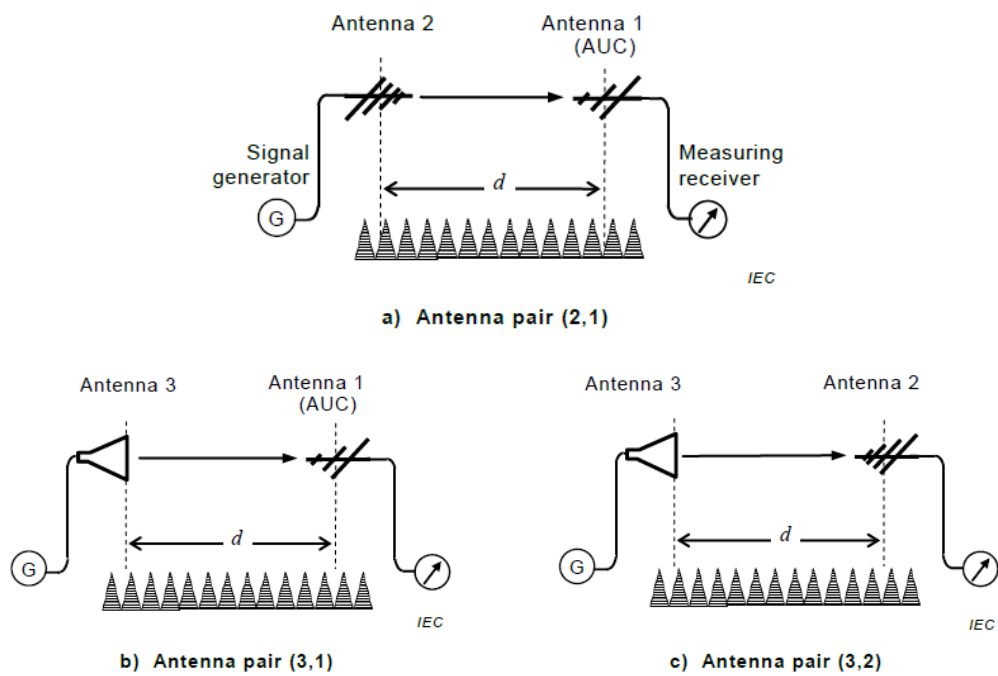
- (1) 안테나들은 상호결합이 줄어들도록 충분히 멀리 떨어져야 하고 AUC는 안테나 및 접지평면의 이미지 안테나 사이의 결합을 줄이도록 충분히 높게 설치되어야 한다.
- (2) 추가로  $D$ 와  $h_2$ 는 수신안테나가 null의 위치에 놓이지 않도록 해야 하는데, null은 바로 인근의 최대 전계보다 10 dB이상 낮은 지점으로 정의된다. null의 조건은 다음과 같은 방정식 식(2.2.2)와 같이 계산된다.

$$E(D, h_1, h_2) \propto \left| \sqrt{G_i(\theta_D)} \frac{e^{-jkR}}{R} - \sqrt{G_i(\theta_D)} \frac{e^{-jkr}}{r} \right| \quad (2.2.2)$$

여기서  $R$ 과  $r$ 은 직접파 및 반사파의 진행 거리이다.

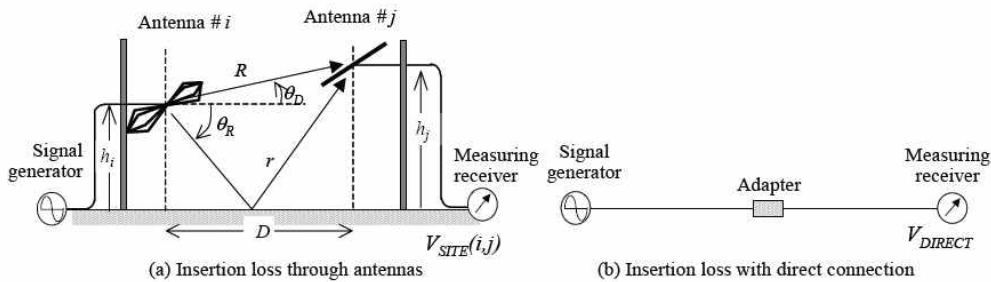


[그림 5] 접지면(30 MHz ~ 1 GHz)상의 TAM의 구성



[그림 6] 자유공간(1 GHz ~ 18 GHz)상의 TAM의 구성

주파수 벡터  $k$ 는 파장  $\lambda$ 에 대해  $k=2\pi/\lambda$ 로 정의된다.  $G_i(\theta)$ 는  $\theta$ 방향에서 안테나  $i$ 의 지향성 이득이다.  $\theta$ 는 수평면에 대한 각이다.  $\theta_D$ 와  $\theta_R$ 는 각각 직접파와 반사파의 각이다. 안테나 쌍 ( $i, j$ )의 시험장 SIL(삽입손실)은 [그림 7]과 같은 구성에 따라 측정되어야 한다.



(a) 안테나사이 SIL(삽입손실)      (b) 직접연결 SIL(삽입손실)

[그림 7] TAM의 SIL(삽입손실) 측정

호발생기와 수신기는 리턴로스가 가능한 한 큰 것을 이용해야한다. 안테나와 케이블 연결부에 감쇠기를 연결하여 측정함으로써 에러를 최소화 할 수 있다. 부정합 에러는 안테나 교정의 측정불확도 분석에 반드시 포함되어야 한다. 안테나  $j$ 로부터 유도된 출력전압  $V_{site}(i, j)$  dB $\mu$ V 단위로 측정한다. 신호발생기나 측정용 수신기 대신에 네트워크분석기를 사용할 수도 있다.

(2) 케이블을 연결될 안테나와 분리시키고 서로서로 직접 연결하여 dB $\mu$ V 단위로 출력전압  $V_{direct}$ 를 측정한다. V

(1) 안테나  $i$ 에 연결된 신호발생기를 안테나  $j$ 의 위치에서 충분한 세기의 전기장이 발생하도록 조정한다. RF신호를 측정하는 수신기는 신호발생기의 주파수에 동조되어 안테나  $j$ 에 연결되어야 한다. 신호발생기는 수신기의 등가 잡음 입력(Equivalent noise input) 보다 적어도 15 dB 이상의 신호가 수신기 입력단에 발생할 수 있도록 충분히 높아야 한다. 신호발생기의 출력 및 수신기 그리고 안테나 포트에서 입력 임피던스의 부정합(mismatching)은 반사파를 유발하여 안테나 교정의 에러를 발생시킬 수 있다. 그러므로  $V_{site}(i, j)$ 와  $V_{direct}$ 를 측정하는 동안 신호발생기의 주파수 및 출력 레벨을 일정하게 유지시켜야 한다.

(3) 두 안테나 사이의 삽입손실은 dB 단위로 다음과 같은 식 (2.2.3)에 의해서 계산한다.

$$L_{ij} = V_{direct} - V_{site}(i, j) \quad (2.2.3)$$

수신기나 네트워크 분석기가 전력을 dBm으로 측정한다면 위 다음과 같은 식(2-4)으로 등가가 된다.

$$L_{ij} = P_{direct} - P_{site}(i, j) \quad (2.2.4)$$

(4) 위의 측정으로부터 세 개의 안테나에 대한 안테나인자를 산출하기 다음과 같은 식(2-5)으로 계산 된다.

$$\begin{aligned} F_1(h_1) &= \frac{1}{2} [L_{12} - L_{23} + L_{31} + 20\log f_{MHz} + C_{12} - C_{23} + C_{31} - 32] \\ F_2(h_2) &= \frac{1}{2} [L_{23} - L_{31} + L_{12} + 20\log f_{MHz} + C_{23} - C_{31} + C_{12} - 32] \\ F_3(h_3) &= \frac{1}{2} [L_{31} - L_{12} + L_{23} + 20\log f_{MHz} + C_{31} - C_{12} + C_{23} - 32] \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

여기서

$$C_{lm} = 20\log \left| \frac{e^{-jkR_{lm}}}{R_{lm}} - \frac{e^{-jkr_{lm}}}{r_{lm}} \right|$$

$$R_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l - h_m)^2}$$

$$r_{lm} = \sqrt{D^2 + (h_l - h_m)^2}$$

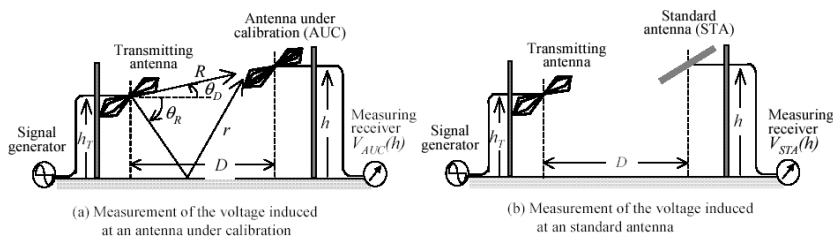
밑 첨자 l 및 m은 세 개의 안테나 1, 2, 3을 의미하고, L<sub>lm</sub>은 안테나 l과 m사이의 시험장 삽입손실이다. 각 안테나 이득은 식 (2.25)의 안테나인자 방정식과 식(2.2.2)의 이득과의 관계로부터 산출할 수 있다.

## 나. SAM(표준안테나법)

SAM(표준안테나 법)은 TAM과 마찬가지로 30 MHz - 18 GHz의 대역에서 안테나 교정이 가능하다. 이미 사전에 정교하게 교정된 하나의 표준안테나를 수신안테나에 놓고 임의의 안테나를 송신안테나(Tx)로 두고 일정 높이와 거리에 놓은 상태에서 SIL(시험장 삽입손실)을 측정한다. 그 다음 수신안테나를 STA(Standard Antenna : 표준안테나) 대신 AUC를 동일 높이, 동일 거리에 놓은 상태에서 SIL을 측정한다. 측정된 STA와 AUC와의 SIL차이를 비교함으로써 AUC의 AF를 산출할 수 있다. 위 설명에서와 같이, SAM(표준안테나법)은 TAM과 다르게 2번의 측정만으로 AF를 산출할 수 있으며, SAM의 AF를 구하는 식은 식(2.2.6)와 같다.

$$F_{AUC}(h) = F_{STA}(h) + \{ V_{STA}(h) - V_{AUC}(h) \} \quad (2.2.6)$$

여기서  $F_{AUC}(h)$ ,  $F_{STA}(h)$ 는 자유공간의 STA(표준안테나)와 AUC의 AF를 의미하며,  $V_{AUC}(h)$ ,  $V_{STA}(h)$ 는 측정지점에서 STA와 AUC의 측정전압을 의미하며, 측정구성은 [그림 8]과 같다.

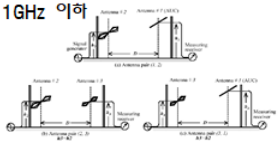

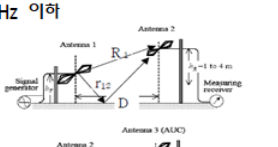
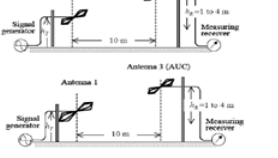
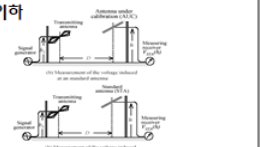
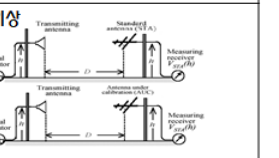


[그림 8] SAM의 측정 구성

### 다. 기존 30 MHz 이상의 안테나 교정법 비교

위에서 설명한 기존 30 MHz 이상의 안테나 교정법을 비교한 것은 [표 3]과 같다.

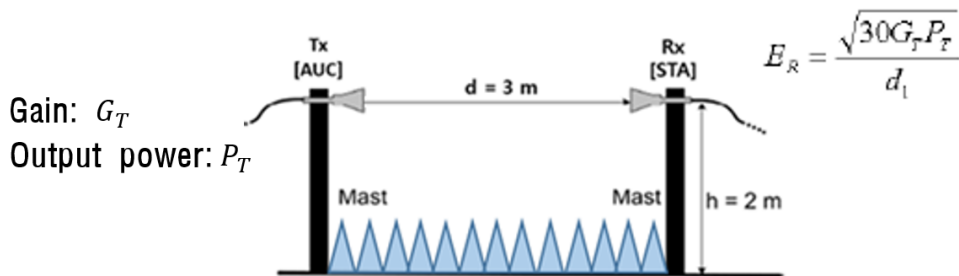
[표 3] 기존 30 MHz 이상의 안테나 교정법 비교

	TAM [Three Antenna Method]	SSM [Standard Site Method]	SAM [Standard Antenna Method]
주파수범위 [MHz]	30 to 1 000 [Ground plan, Tuned dipole] 1 000 to 18 000 [Free-space, Horn, LPDA]	30 to 1 000 [Ground plan, Tuned dipole]	30 to 1 000 [Ground plan, Tuned dipole] 1 000 to 18 000 [Free-space, Horn, LPDA]
기본 방정식	<p>Ground plan</p> $F_1(h_1) = \frac{1}{2} [L_{11} - L_{21} + L_{31} + 20 \log f_{MHz} + C_{10} - C_{11} + C_{12} - 32]$ $F_2(h_2) = \frac{1}{2} [L_{21} - L_{11} + L_{31} + 20 \log f_{MHz} + C_{10} - C_{12} + C_{11} - 32]$ $F_3(h_3) = \frac{1}{2} [L_{31} - L_{11} + L_{21} + 20 \log f_{MHz} + C_{10} - C_{12} + C_{11} - 32]$ <p>Free Space</p> $F_1(f) = \frac{1}{2} [4(2.9 - A(2.9) - A(3.2) - K(2.9) - K(3.9) - K(5.2))]$ $F_2(f) = \frac{1}{2} [4(2.9 - A(3.9) - A(3.2) - K(2.9) - K(3.9) - K(5.2)) \quad \text{in dB(m}^{-1}\text{)}]$ $F_3(f) = \frac{1}{2} [4(2.9 - A(3.9) - A(3.2) - K(2.9) - K(3.9) - K(5.2))]$	$R_1 = \frac{1}{2} [L_{11} - L_{21} + L_{31} + 20 \log(279.1/f_{MHz}) + B_F^{21}] - C_0$ $R_2 = \frac{1}{2} [L_{21} - L_{11} + L_{31} + 20 \log(279.1/f_{MHz}) + B_F^{21}] - C_0$ $R_3 = \frac{1}{2} [L_{31} - L_{11} + L_{21} + 20 \log(279.1/f_{MHz}) + B_F^{21}] - C_0$	$F_{AUC} = F_{STA}(h) + \{V_{STA}(h) - V_{AUC}(h)\}$
측정구성	<p>• 1GHz 이하</p>  <p>• 1GHz 이상</p> 	<p>• 1GHz 이하</p>  <p>• 1GHz 이상</p> 	<p>• 1GHz 이하</p>  <p>• 1GHz 이상</p> 

기존 30 MHz 이상의 안테나 교정법의 공통적인 부분은 AUC(교정대상안테나)를 포함한 3개의 안테나를 사용한다. TAM은 AUC를 포함한 3개의 AF의 사전 지식이 필요하지 않는 교정법으로써 AF를 전혀 모르는 상태에서 안테나를 교정할 수 있는 대표적인 방법이다. 하지만 3번의 측정 구성이 필요하다는 번거로움이 있다. 또한 SAM은 사전에 미리 교정된 하나의 AF를 알고 있는 상태에서 TAM과 다르게 2번의 측정만으로 AUC의 AF를 산출할 수 있는 방법이다. 30 MHz ~ 1GHz대역에 대한 STA(표준 안테나)는 미국 NIST의 수신전용 표준 다이폴 안테나와 영국 NPL의 계산형 다이폴 안테나가 있다. 그러나 현재 1 GHz 이상에 대한 표준안테나는 존재하지 않으며, TAM의 보정치를 이용한 안테나를 이용해 교정을 하고 있다. 이로 인하여 1 GHz의 표준안테나를 만들기 위해서는 TAM으로 보정한 안테나를 사용해야하는 단점을 가지고 있다.

## 라. C-SAM 안테나 교정방법

국립전파연구원형 표준안테나 법(C-SAM)은 [그림 9]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 사용하는 표준 안테나의 주파수에 의존한다. 1 GHz이상 대역 지향성이 강한 혼 안테나의 경우 반사파가 거의 존재하지 않기 때문에 자유공간 조건과 동일한 조건으로 두 안테나를 고정된 채로 2 m 높이 이상의 야외 시험장에서 안테나 인자를 산출한다. 만약 양질의 전자파무반사실(챔버)에서는 반사파를 무시하고 C-SAM을 바로 적용할 수 있다.



[그림 9] 국립전파연구원형 표준안테나법(C-SAM)의 측정 구성

C-SAM은 [그림 9]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.

$$E_R = \frac{\sqrt{30 G_T P_T}}{d_m} \quad (2.2.7)$$

위 식을  $G_T$ 에 대하여 정리하면

$$G_T = \frac{E_R^2 d_1^2}{30 P_T}$$

$$G_T(dB) = 20 \log E_R + 20 \log d_1 - 10 \log P_T - 14.77 \quad (2.2.8)$$



과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

$$AF(dB/m) = E(dBV/m) - V(dBV) \quad (2.2.9)$$

식 (2.2.9)를 이용하여 C-SAM 방법에 의한 안테나 인자 산출 방정식을 얻을 수 있다. 이 과정에서 안테나 인자(AF)와 안테나 이득(G)과의 관계를 이용한다.

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

$$AF(dB/m) = 20\log(AF) = 10\log\left(\frac{480\pi^2}{Z_L}\right) - 20\log(\lambda) - G(dB) \quad (2.2.10)$$

여기서,  $Z_L$ 은 수신 안테나의 입력 임피던스 이다.

50  $\Omega$  시스템에서 MHz 단위 주파수에서 C-SAM의 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$AF_T = -AF_R + 10\log(P_T) + 20\log(f_{MHz}) - 20\log(V_R) - 20\log(d_1) - 15.01 \quad (2.2.11)$$

여기서  $P_T$ ,  $V_R$ ,  $d_1$ 은 송신전력, 측정되는 수신전압, 안테나 사이의 거리(d m), fMHz는 MHz 단위의 주파수이다. 경우에 따라서는(주로 네트워크 분석기를 사용할 때) 안테나 사이의 삽입손실 또는 감쇠량  $A_{RT} = 10\log(P_T/P_R)$ 을 측정하기 때문에, 실무적으로 식(2.2.12)와 같은 방정식을 주로 사용한다.

$$AF_T(dB/m) = -AF_R + A_{RT} + 20\log f_{MHz} - 20\log d_1 - 32 \quad (2.2.12)$$

(2.2.12)에서  $A_{RT}$ 를 SIL로 표현하고 수신안테나의 AF와 송신안테나의

AF에 관하여 식을 풀어주면 식(2.2.13)과 같다.

$$AF_{TX} + AF_{RX} = SIL + 20\log(f_{MHz}) - 20\log(d_1) - 32 [dB/m] \quad (2.2.13)$$

식(2.2.13)을 STA(표준안테나)의 AF로 표현하면 식(2.2.14)와 같이 R-SAM의 방정식을 도출할 수 있다.

$$AF_{STA} = AF_{TX} + AF_{RX} = SIL + 20\log(f_{MHz}) - 20\log(d_1) - 32 [dB/m] \quad (2.2.14)$$

이때, STA(표준안테나)의 AF를 구한 같은 높이, 같은 거리에 AUC를 [그림 2.2.5]와 같이 위치시키고 AUC의 AF는 식(2.2.15)와 같이 간단하게 계산된다.

$$AF_{AUC}(dB/m) = AF_{STA} + (SIL_{STA} - SIL_{AUC}) \quad (2.2.15)$$

여기서

$AF_{AUC}$  는 AUC의 AF,  $AF_{STA}$ 는 STA의 AF

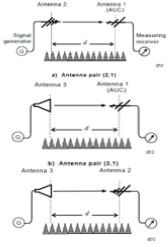
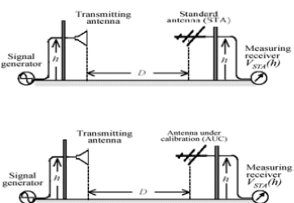
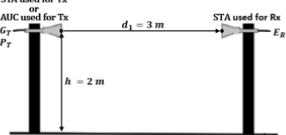
$SIL_{AUC}$ 는 AUC의 SIL,  $SIL_{STA}$ 는 STA의 SIL

다시 말해 사전에 알고 있는 AF를 있다면 한번의 SIL(안테나 간 공간 삽입손실)의 측정으로 AUC(교정대상안테나)의 AF(안테나인자)를 계산할 수 있는 간편한 표준 안테나 방법이다.

#### 마. C-SAM과 기존 안테나 교정법 비교

C-SAM과 기존 안테나 교정법을 비교하면 [표 2.2.3]과 같다. TAM은 교정대상 안테나를 포함한 3개의 AF를 산출하기 위해 3번의 측정을 해야 하는 번거로움이 있다. SAM 또한 사전에 교정된 표준안테나를 사용하여 2번에 걸쳐서 측정해야한다. 하지만 C-SAM은 사전에 교정되어 값을 알고 있는 표준 안테나가 있다면 단 한 번의 측정만으로 AF를 산출할 수 있는 장점을 가지고 있다. 여기서 주의할 점은 사전에 정교하게 측정된 표준안테나의 AF 사용과 측정구성을 정교하게 해야 한다.

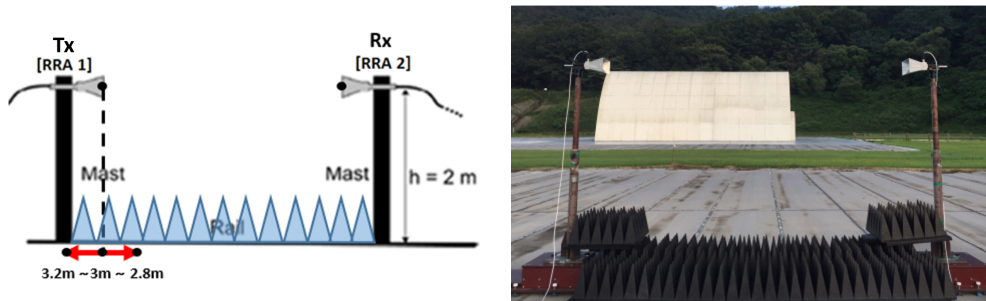
[표 4] C-SAM과 기존 1 GHz 이상의 안테나 교정법 비교

	TAM [Three Antenna Method]	SAM [Standard Antenna Method]	R-SAM [Radio Research Agency – Standard Antenna Method]
주파수 범위 [GHz]	1 to 18 [Free-space, Horn, LPDA]	1 to 18 [Free-space, Horn, LPDA]	1 to 18 [Free-space, Horn]
표준안테나 개수		• One(Rx)	• Two(Tx, Rx)
장점	• AUC를 포함한 3개의 안테나에 대한 사전지식(AF)이 필요 없음	• TAM과 다르게 표준안테나를 이용하면 두 번의 SIL측정을 통해 AF를 산출할 수 있음	• 사전에 AF를 알고 있는 표준안테나가 존재한다면 한번의 SIL측정으로 AF를 산출할 수 있음
단점	• AUC를 포함한 3개의 AF 산출하기 위해 3 번 SIL 측정필요	• 1 GHz 표준안테나가 존재하지 않음	• 측정구성이 잘못되면 정확한 AF를 산출할 수 없음
측정구성	 <p>a) Antenna pair (2,1) Antenna 3 (AUC) Antenna 1 (AUC) Antenna 2 (AUC)</p> <p>b) Antenna pair (3,1) Antenna 3 (AUC) Antenna 1 (AUC) Antenna 2 (AUC)</p> <p>c) Antenna pair (3,2) Antenna 3 (AUC) Antenna 1 (AUC) Antenna 2 (AUC)</p>	 <p>Transmitting antenna Standard antenna (STA) Antenna under calibration (AUC) Signal generator Measuring receiver <math>V_{ST}(h)</math></p>	 <p>STA used for Tx or AUC used for Tx <math>G_T</math> <math>P_T</math> <math>d_1 = 3 \text{ m}</math> <math>h = 2 \text{ m}</math> STA used for Rx <math>E_R</math></p>

## 제3장 C-SAM 유효성 검증 결과

### 제1절 1 GHz ~ 18 GHz 대역의 자유공간(FAR) 조건의 시험장 평가

C-SAM은 프리스방정식(Friss)을 근간으로 한다. 따라서 C-SAM 측정방법의 유효성을 검증하기에 앞서 시험장 자유공간 조건을 검증하기 위한 CISPR16-1-5[Ed 2.0] 5장(Validation methods for a FAR 30 MHz to 18 GHz)에서 규정하고 있는 허용기준(peak to peak < 0.5dB)을 만족하여야 한다. 시험장 평가를 위해 [그림 10]과 같이 국립전파연구원 전파시험인증센터 야외시험장 바닥에 흡수체(PFP-30)를 설치하고 1 GHz ~ 18 GHz 대역을 평가하였다.

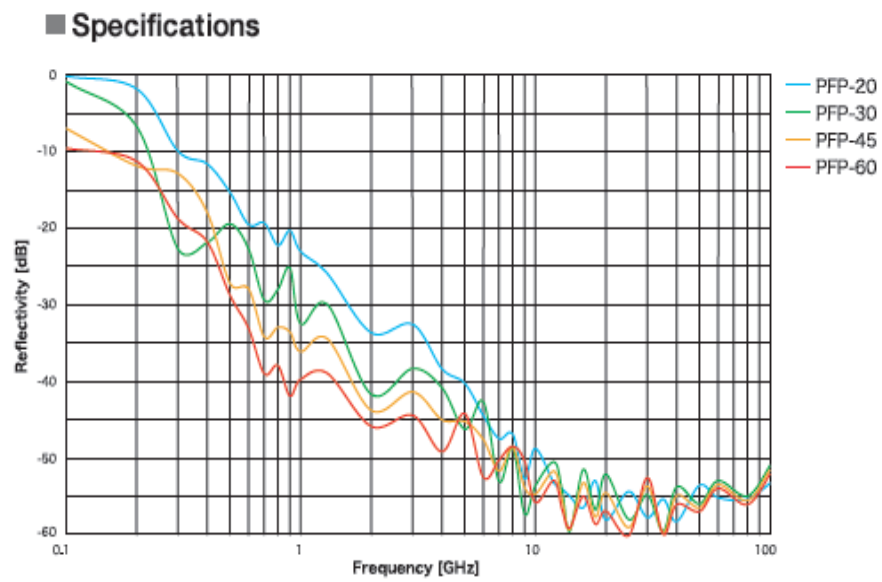


[그림 10] 자유공간(FAR) 조건의 시험장 평가 측정구성

[그림 11]과 같이 1 GHz ~ 18 GHz 대역에서 동작하는 슈바르츠벡(SCHWARZBECK BBHA9120) 광대역 혼 안테나를 3m 이격시켜 거치시키고 바닥에는 흡수체를 설치하였다. 흡수체 PFP-30의 세부규격은 [그림 3.1.2]와 같으며 100 GHz이상 사용가능하다.

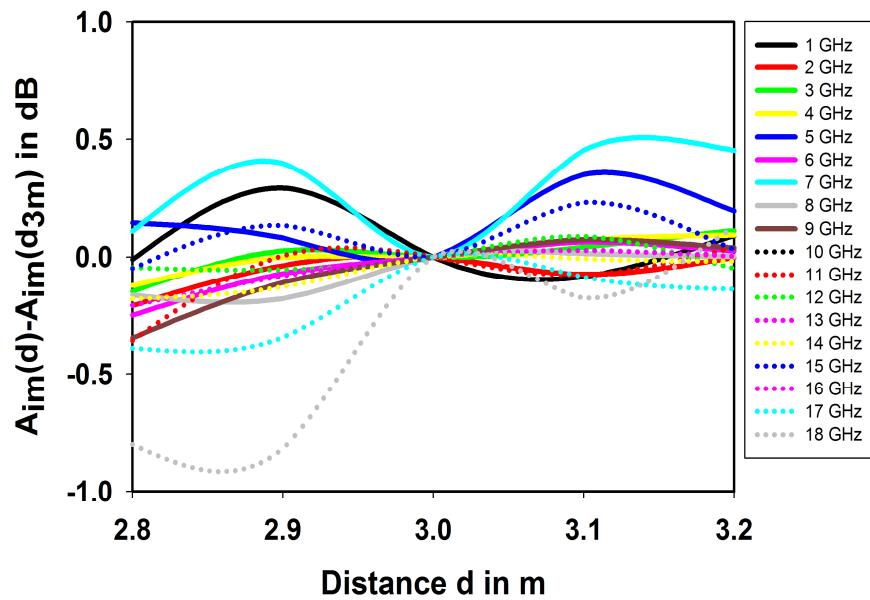


(a) 사진

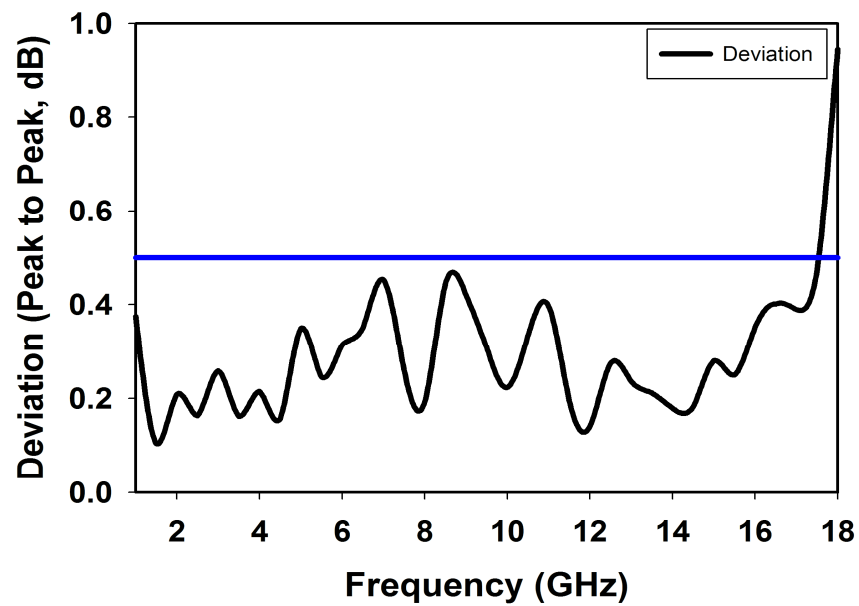


(b) 특성

[그림 11] 흡수체 PFP-30 사진 및 특성



(a) 주파수별  $\pm 0.5$  dB 편차



(b) 허용편차

[그림 12] FAR 조건의 시험장 평가 측정결과

측정 주파수 간격(Step)은 500 MHz로 설정하여 [그림 10]에서 보는바와 같이 수신안테나를 기준으로 송신 안테나의 거리를 2.8 m에서 3.2 m까지 10 cm 간격으로 이동하면서 측정하였다. CISPR 16-1-5의 자유공간 시험장 허용기준은 측정값 중 최대값과 최소값의 차이가  $\pm 0.5$  dB 이내이면 자유공간(FAR) 시험장 조건을 만족한다고 정의 할 수 있다. [그림 12]에서 보여주는 바와 같이 1 GHz ~ 17.5 GHz 대역은 자유공간 시험장조건을 만족함을 알 수 있다. 다만 18 GHz대역에서 편차가 0.5 dB를 초과한 것은 검증에 사용한 광대역 안테나의 이득이 18 GHz대역에서 급격히 나빠지기 때문에 다이내믹 레인지(동적영역)가 작은 결과로 판단된다. 만약 파워앰프를 사용하여 충분한 다이내믹 레인지를 확보하여 측정하였다면 경향상으로 판단해 볼 때 모든 대역이 자유공간 시험장 조건을 만족할 것으로 예상된다.

## 제2절 C-SAM의 측정결과 및 유효성 검증

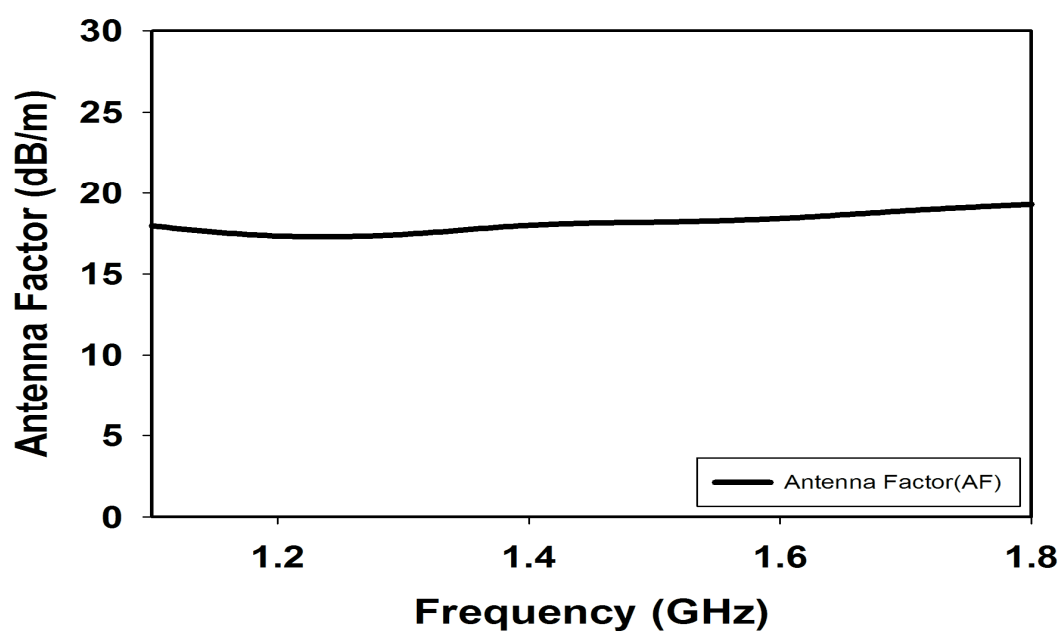
자유공간 시험장 조건을 만족하는 환경(전파시험인증센터 야외시험장)에서 C-SAM 측정방법의 유효성을 검증하기 위한 측정을 수행하였다. 자체 제작된 대역별 1쌍의 혼 안테나를 사용하여 C-SAM으로 안테나 인자를 산출하였다. 1.12 GHz - 40 GHz대역 검증에 사용한 안테나는 9쌍이며 주파수 대역 다음과 같으며 측정 결과는 [표 5] - [표 13]과 [그림 13] - [그림 21]에 나타내었다.

주파수 대역은 다음과 같다. : (1.12 GHz - 1.7 GHz), (1.7 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 - 12.4 GHz), (12.4 GHz - 18 GHz), (18 GHz - 26.5 GHz), (26.5 GHz - 40 GHz)

가. 1.12 GHz - 1.8 GHz 대역

[표 5] 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
1.1	17.96
1.2	17.33
1.3	17.43
1.4	17.99
1.5	18.18
1.6	18.41
1.7	18.89
1.8	19.29



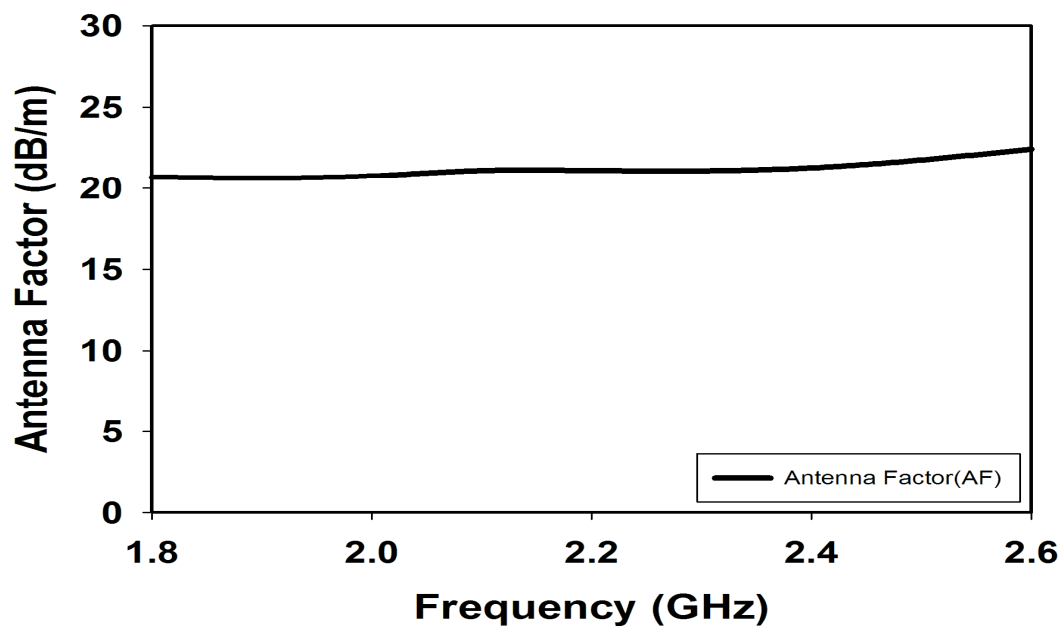
[그림 13] 측정된 1.12 GHz ~ 1.8 GHz대역 안테나 인자



나. 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역

[표 6] 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
1.8	20.69
1.9	20.62
2	20.76
2.1	21.10
2.2	21.10
2.3	21.08
2.4	21.27
2.5	21.76
2.6	22.42

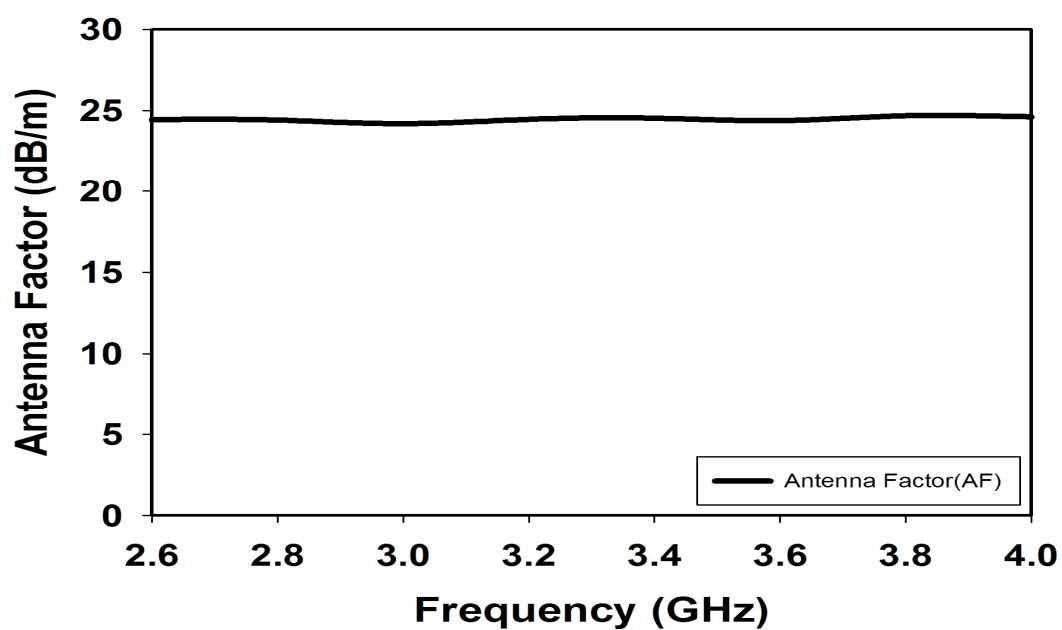


[그림 14] 측정된 1.8 GHz ~ 2.6 GHz대역 안테나 인자

다. 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역

[표 7] 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
2.6	24.43
2.8	24.41
3	24.18
3.2	24.45
3.4	24.52
3.6	24.37
3.8	24.68
4	24.61

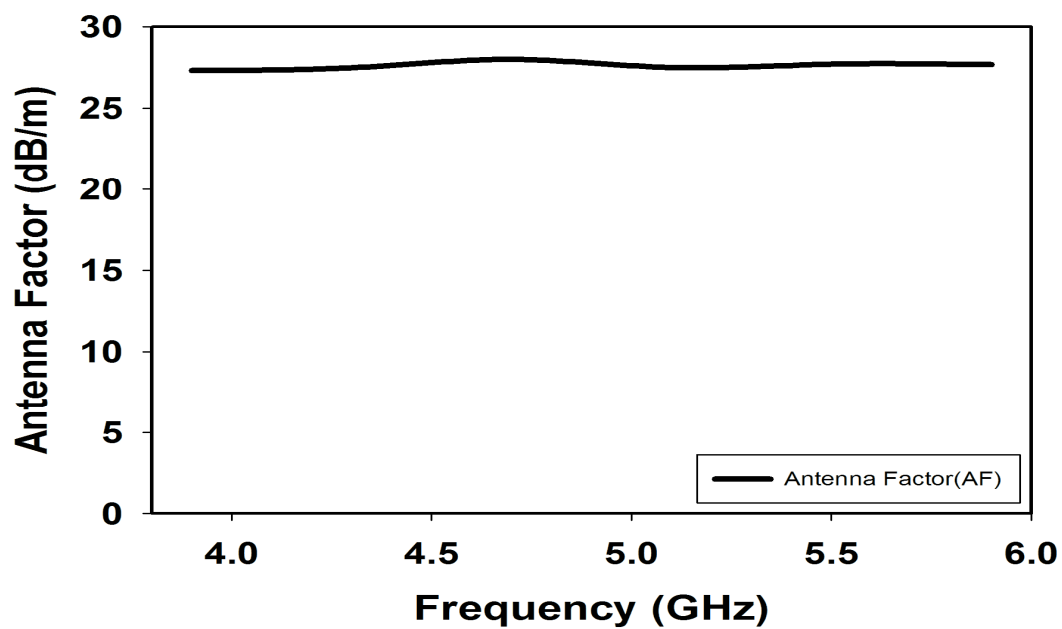


[그림 15] 측정된 2.6 GHz ~ 3.95 GHz대역 안테나 인자

라. 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역

[표 8] 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
3.9	27.30
4.3	27.48
4.7	28.00
5.1	27.49
5.5	27.70
5.9	27.67

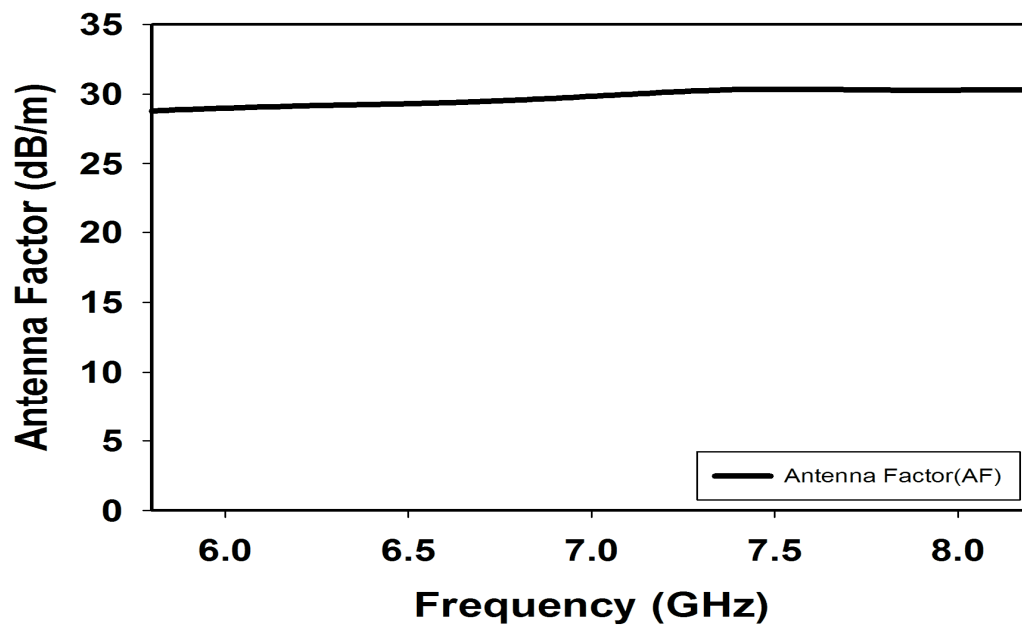


[그림 16] 측정된 3.95 GHz ~ 5.85 GHz대역 안테나 인자

마. 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역

[표 9] 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
5.8	28.79
6.2	29.13
6.6	29.36
7.0	29.83
7.4	30.31
7.8	30.27
8.2	30.30

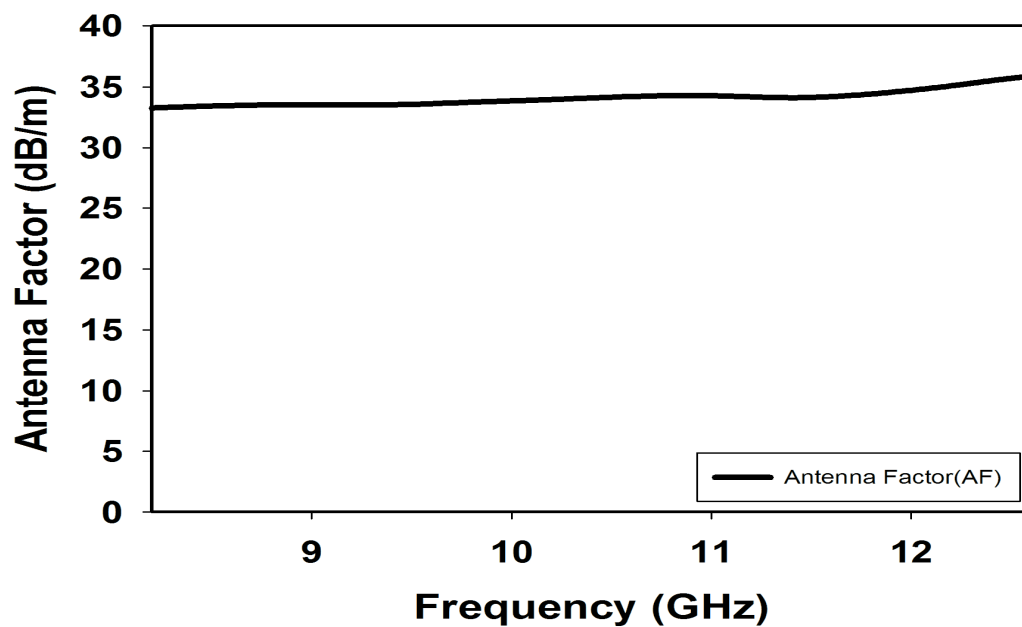


[그림 17] 측정된 5.85 GHz ~ 8.2 GHz대역 안테나 인자

바. 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역

[표 10] 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
8.2	33.26
8.6	33.46
9.0	33.52
9.4	33.52
9.8	33.73
10.2	33.96
10.6	34.20
11.0	34.27
11.4	34.11
11.8	34.41
12.2	35.08
12.6	35.50

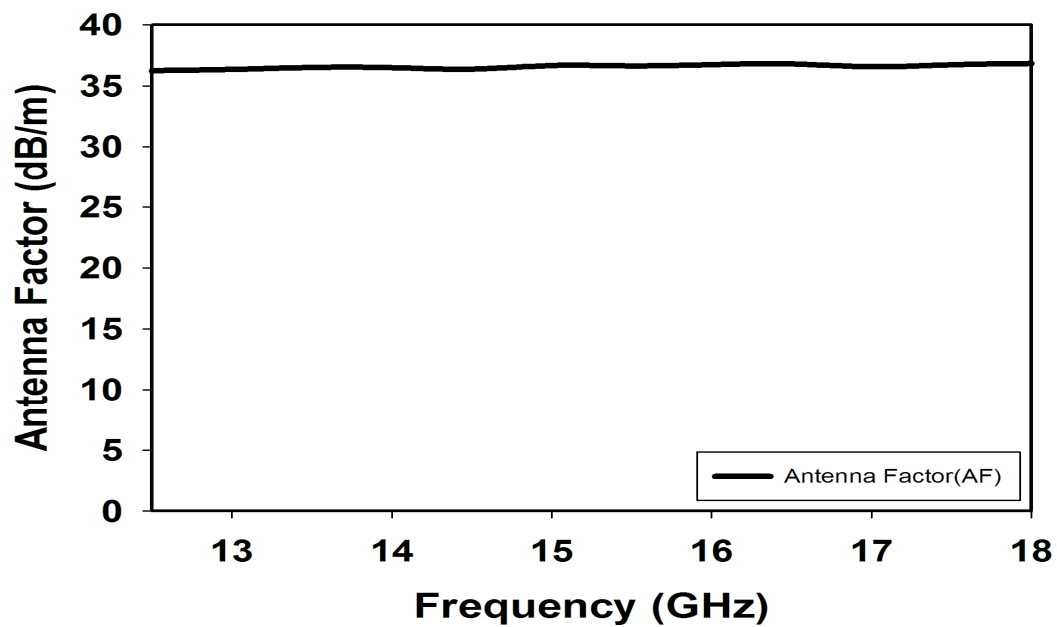


[그림 18] 측정된 8.2 GHz ~ 12.5 GHz대역 안테나 인자

사. 12.5 GHz ~ 18 GHz대역

[표 11] 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	동등 혼 안테나 안테나 인자(AF) (dB/m)
12.5	36.24
13.0	36.34
13.5	36.49
14.0	36.48
14.5	36.36
15.0	36.65
15.5	36.62
16.0	36.72
16.5	36.78
17.0	36.56
17.5	36.71
18.0	36.82

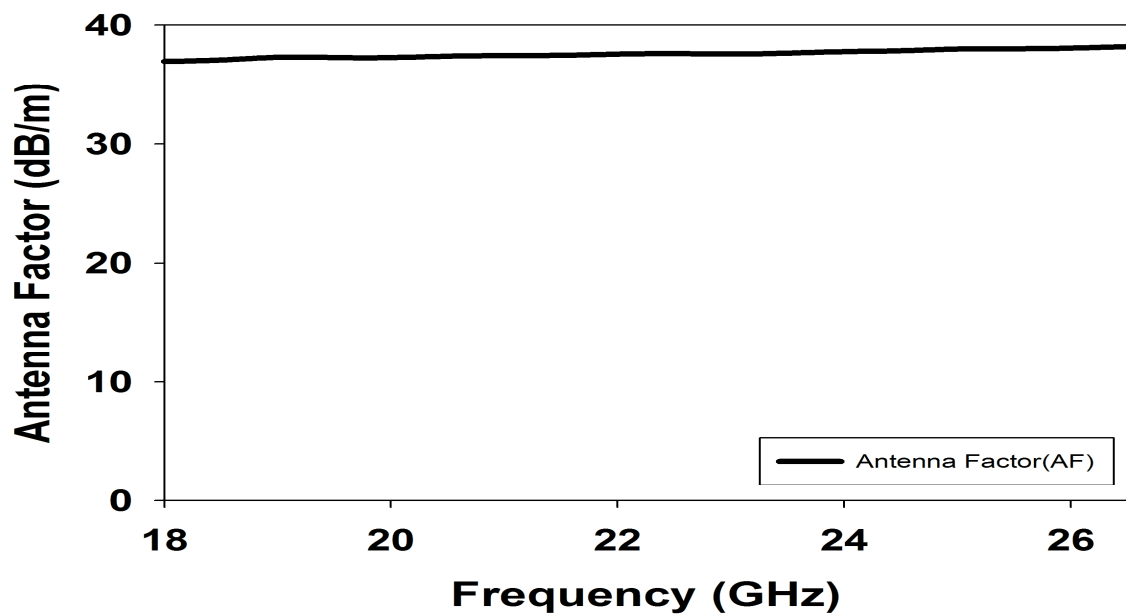


[그림 19] 측정된 12.5 GHz ~ 18 GHz대역 안테나 인자

아. 18 GHz ~ 26.5 GHz대역

[표 12] 18 GHz ~ 26.5 GHz대역 안테나 인자

주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
18	36.94
19	37.28
20	37.26
21	37.42
22	37.55
23	37.56
24	37.76
25	37.98
26	38.06
26.5	37.18

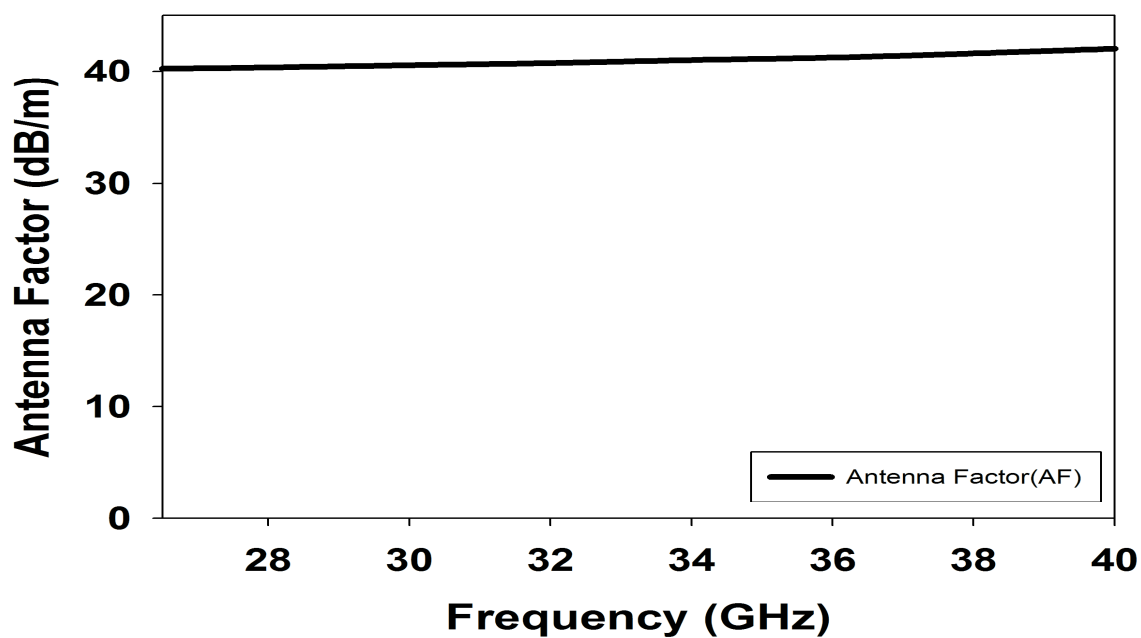


[그림 20] 측정된 18 GHz ~ 26.5 GHz대역 안테나 인자

자. 26.5 GHz ~ 40 GHz대역

[표 13] 26.5 GHz ~ 40 GHz대역 안테나 인자

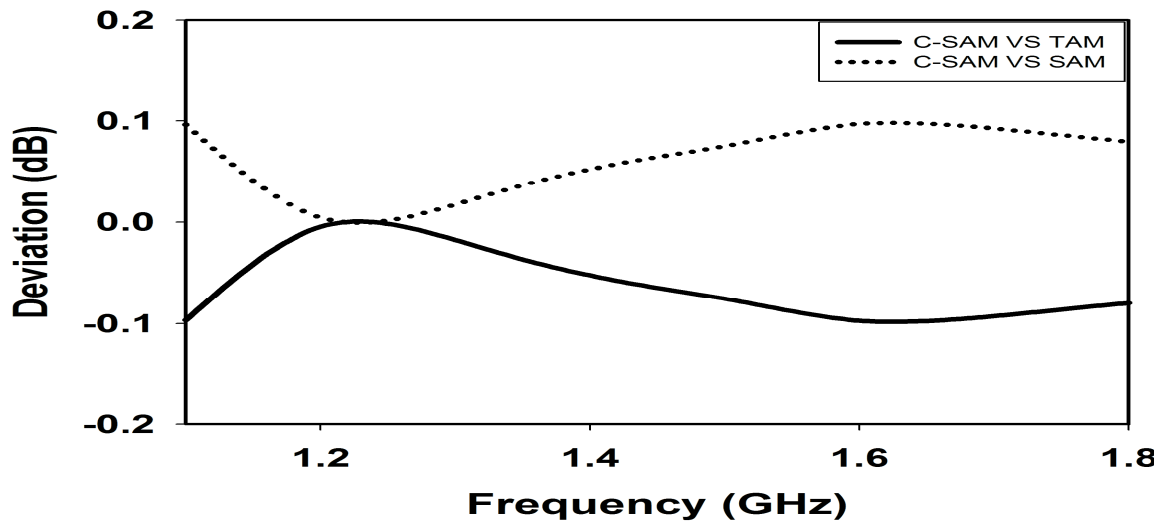
주파수 (GHz)	안테나 인자(AF) (dB/m)
26.5	40.25
28	40.36
30	40.56
32	40.75
34	41.02
36	41.24
38	41.61
40	42.03



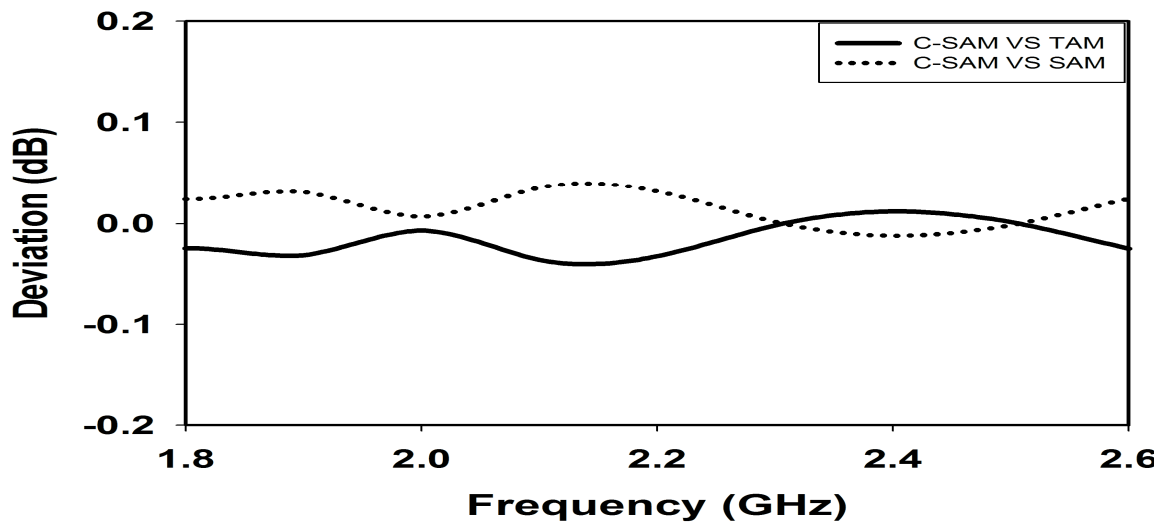
[그림 21] 측정된 26.5 GHz ~ 40 GHz대역 안테나 인자



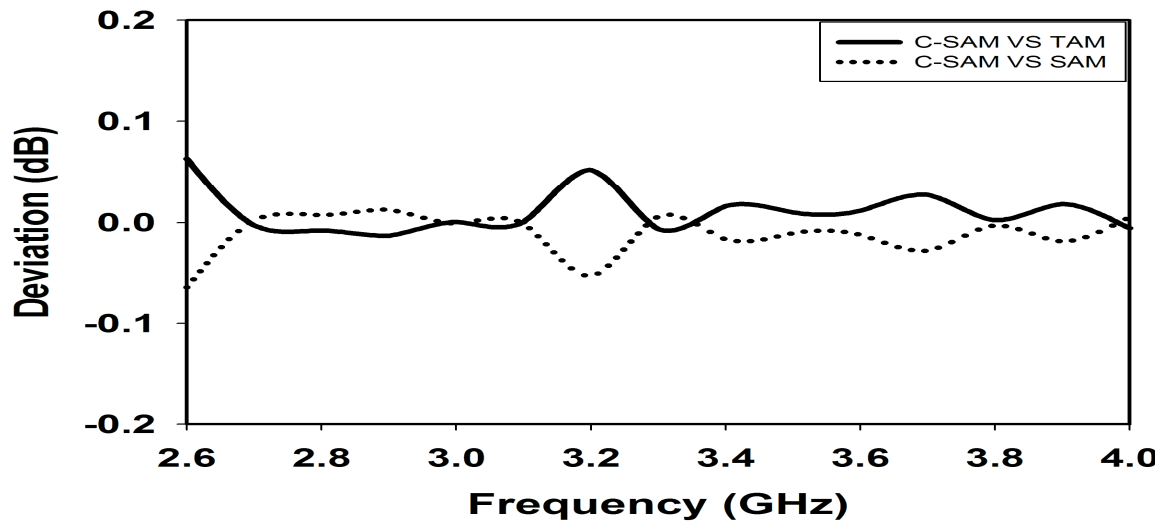
C-SAM으로 산출된 안테나 인자의 유효성 검증을 위해 [표 2]의 TAM과 SAM 식으로 산출한 안테나 인자를 상호비교 하였으며 1.12 GHz - 40 GHz 모든 대역에서 0.2dB 이내의 편차를 보이며 측정방법의 유효성이 검증되었다. 상호비교 결과는 [그림 22]에 나타내었다.



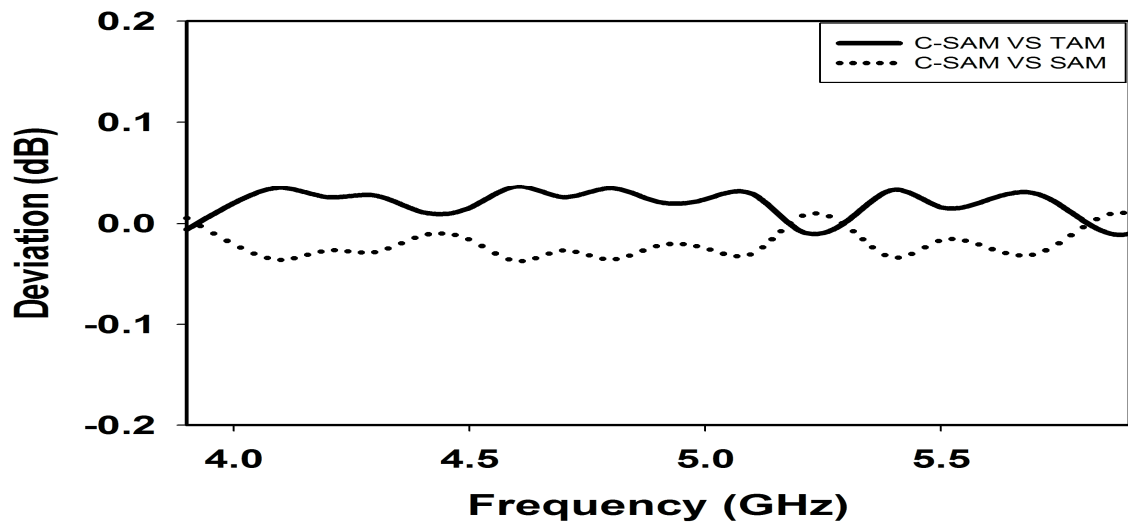
(a) 1.12 GHz to 1.8 GHz



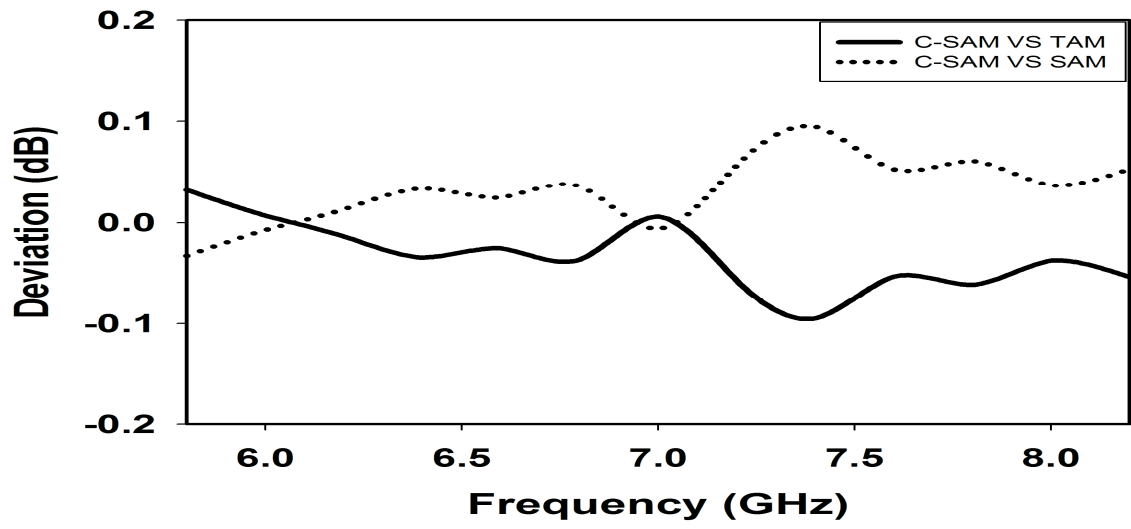
(b) 1.8 GHz to 2.6 GHz



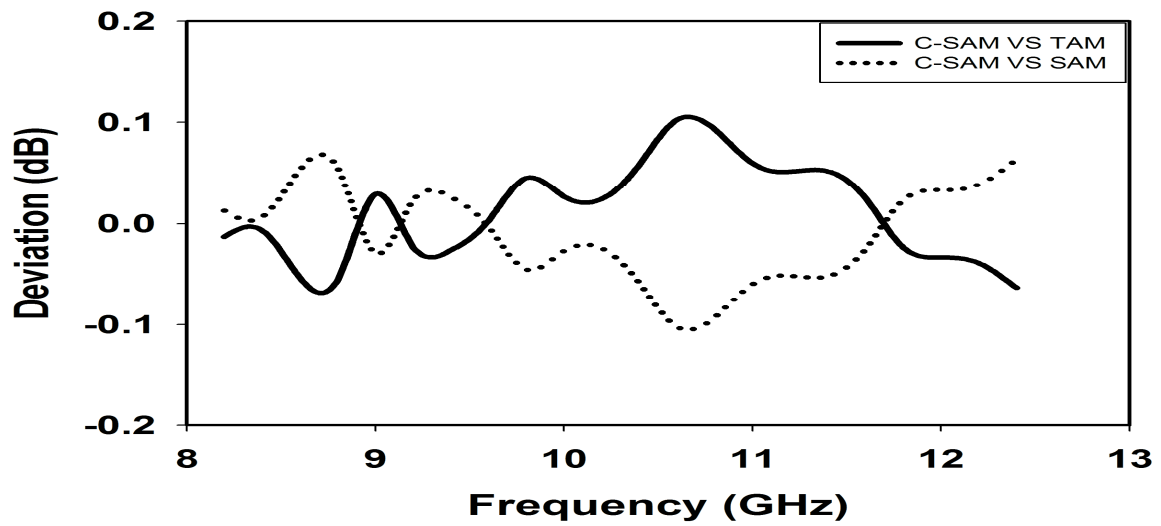
(c) 2.6 GHz to 3.95 GHz



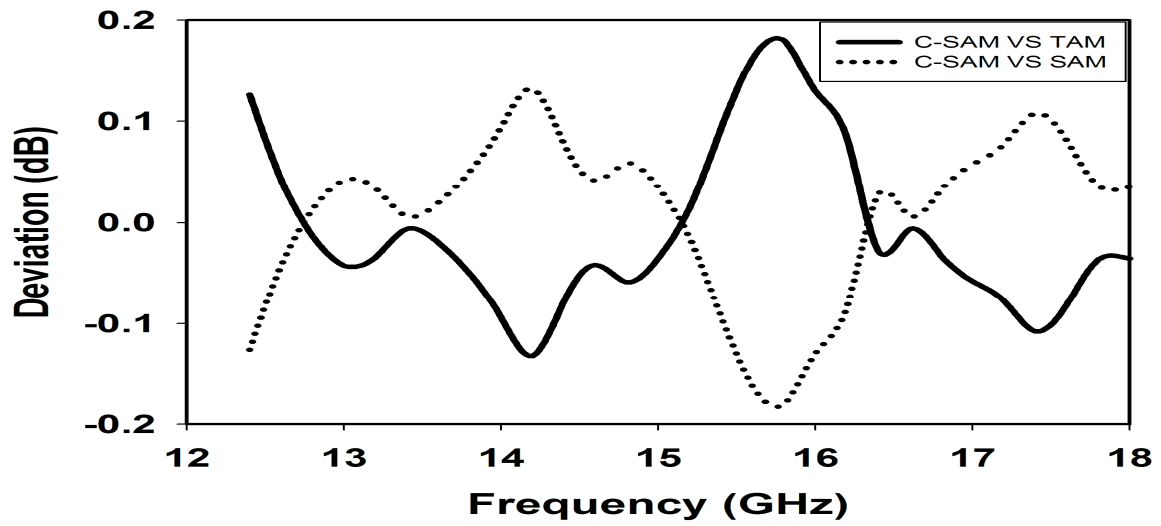
(d) 3.95 GHz to 5.85 GHz



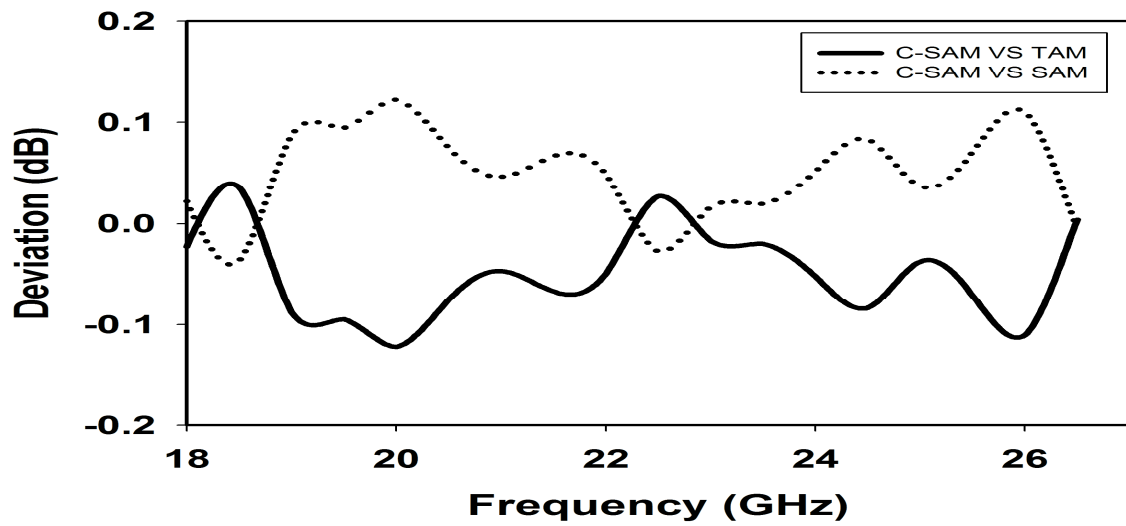
(e) 5.85 GHz to 8.2 GHz



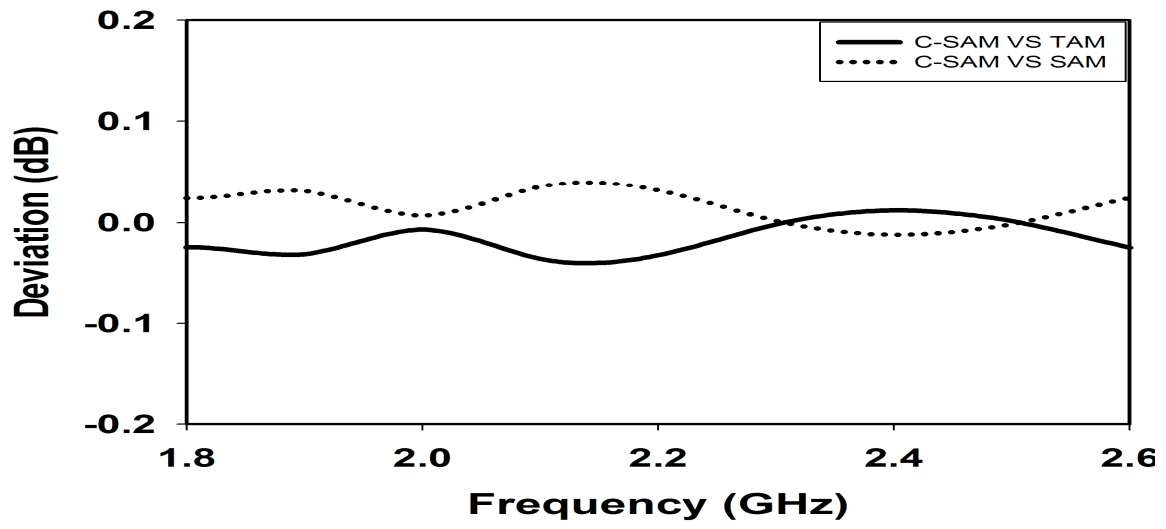
(f) 8.2 GHz to 12.4 GHz



(g) 12.4 GHz to 18 GHz



(h) 18 GHz to 26.5 GHz



(i) 26.5 GHz to 40 GHz

[그림 22] C-SAM과 기존 안테나 교정법 편차 비교 결과

## 제4장 G-TEM셀에서의 루프 안테나 교정

### 제1절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정절차

#### 1. 기준 루프 안테나 인자( $AF_{Ref}$ ) 교정방법

GTEM셀에서 모노폴 안테나 교정을 위해 사용되는 기준 루프 안테나는 지름이 30 cm 또는 60 cm이며, 기준 루프 안테나의 인자( $AF_{Ref}$ )는 미리 알고 있어야 한다. CISPR 16-1-6 (2014-12)에 따라 TEM 셀법, 3-안테나 법 또는 기준 안테나법으로 교정할 수 있다.

#### 2. 신호발생기 및 측정수신기/스펙트럼분석기를 사용하는 교정방법

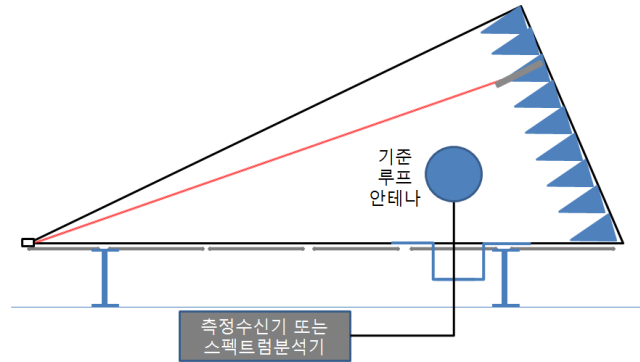
피 교정 루프 안테나가 수동형인 경우에 이 방법을 사용한다.

##### ① GTEM셀 내부 전기장의 측정 (권고사항)

- 측정시스템을 [그림 23]과 같이 구성하고, 신호발생기, 증폭기, 전력계, 필드 측정기 등의 측정용 기기를 약 30분 이상 충분히 예열한다.
- 루프안테나가 놓이는 GTEM(1250) 내부 단면의 중심 높이(약 57 cm)에서 프로브에 측정되는 전기장의 세기를 임의의 값(예를 들면, 3 V/m 또는 10 V/m)이 되도록 신호발생기의 조정하고, 이 때, 순방향전력  $P_{fwd}$ , 역방향 전력  $P_{rev}$ , 순전력  $P_{net}$ 를 기록한다.

##### ② 기준 루프 안테나 측정 및 전기장 세기 산출

- 기준 루프 안테나와 측정수신기/스펙트럼분석기를 [그림 23]과 같이 설치한다.
- ①에서 측정한 순방향전력 또는 임의의 순방향 전력( $P_{fwd}$ )을 공급하고, 측정수신기/스펙트럼분석기를 이용하여 기준 루프 안테나의 출력전압( $V_{Ref}$ )을 기록한다.



[그림 23] GTEM셀 내에 기준 루프 안테나의 설치

- 기준 루프 안테나로 측정한 GTEM셀 내부의 전기장의 세기는 식( 4.1.1)과 같이 산출된다.

$$E_{Ref} = V_{Ref} + AF_{Ref} \quad (4.1.1)$$

③ 피교정 루프 안테나(AUC)의 측정 및 안테나 인자 산출

- 기준 루프 안테나를 제거하고, 같은 위치에 피교정(AUC) 루프 안테나를 설치한다.
- ①에서 측정한 순방향전력 또는 ②에서 인가한 동일한 순방향 전력( $P_{fwd}$ )을 공급하고, 측정수신기/스펙트럼분석기를 이용하여 피 교정 루프 안테나의 출력전압( $V_{AUC}$ )을 기록한다.
- $E_{AUC} = E_{Ref}$ 이므로 피 교정 루프 안테나의 전기장에 대한 안테나 인자는 식 (4.1.1)로부터 식 (4.1.2)와 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} E_{AUC} &= V_{AUC} + AF_{AUC} \\ AF_{AUC} &= V_{Ref} - V_{AUC} + AF_{Ref} \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

- 피 교정 루프 안테나의 자기장에 대한 안테나 인자는 식 (4.1.3)과 같다.

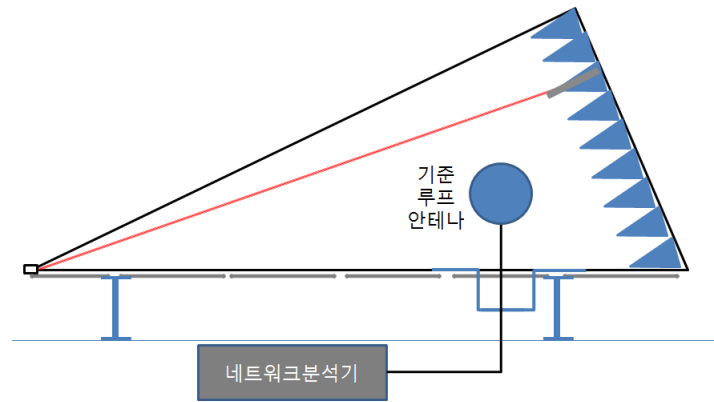
$$AF_{AUC-H} = V_{Ref} - V_{AUC} + AF_{Ref} - 20 \cdot \log(377) \quad (4.1.3)$$

### 3. 네트워크 분석기를 사용하는 교정방법

피 교정 루프 안테나가 능동형인 경우에 이 방법을 사용한다.

#### ① 기준 루프 안테나의 측정

- 기준 루프 안테나와 네트워크분석기를 [그림 24]와 같이 설치한다.
- 먼저, 연결된 RF 케이블을 포함하여 네트워크분석기를 교정(Cal)한다.
- 교정된 네트워크분석기를 이용하여 GTEM셀 입력과 기준 루프 안테나의 출력에서  $S_{21Ref}$  을 측정한다.



[그림 24] 네트워크분석기를 이용한 루프 안테나의 설치

#### ② 피 교정 루프 안테나(AUC)의 측정 및 안테나 인자 산출

- 기준 루프 안테나를 제거하고, 같은 위치에 피교정 루프 안테나를 설치한다.
- ①과 동일한 방법으로 GTEM셀 입력과 피교정 루프 안테나의 출력에서  $S_{21AUC}$  을 측정한다.
- 피 교정 루프 안테나의 전기장 안테나 인자는 식 (4.1.4)와 같이 산출된다.

$$AF_{AUC} = S_{21Ref} - S_{21AUC} + AF_{Ref} \text{ (dB)} \quad (4.1.4)$$

- 피 교정 루프 안테나의 자기장에 대한 안테나 인자는 식 (4.1.3)과 같다.

$$AF_{AUC-H} = S_{21Ref} - S_{21AUC} + AF_{Ref} - 20\log(377) \quad (4.1.5)$$



## 제2절 기준 루프 안테나 교정

G-TEM 셀에서 기준 안테나 교정법(RAM)을 적용하기 전에 기준 루프 안테나의 안테나 인자를 산출하기 위해 국립전파연구원 야외시험장(OATS : Open Area Test Site)에서 [그림 25]의 대표적인 3-안테나법을 사용하여 지름이 30 cm인 A.R.A PLA-130/A 수동 루프 안테나 3개와 지름이 56 cm인 ETS-LINDGREN 6512 수동 루프 안테나 3개를 교정하였다. 사용된 식은 (식 4.2.1)과 같으며 이격거리는 20 cm를 두었다.

$$F_{aH}(1) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} + A_i(2,1) + A_i(3,1) - A_i(3,2) + K(2,1) + K(3,1) - K(3,2)] \quad (4.2.1)$$

$$F_{aH}(2) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} + A_i(2,1) - A_i(3,1) + A_i(3,2) + K(2,1) - K(3,1) + K(3,2)]$$

$$F_{aH}(3) = \frac{1}{2} [-45.9 - 20 \lg f_{MHz} - A_i(2,1) + A_i(3,1) + A_i(3,2) - K(2,1) + K(3,1) - K(3,2)]$$

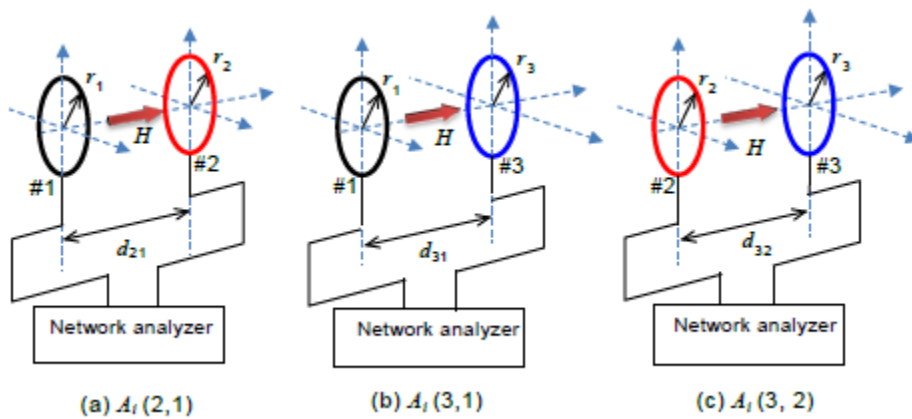
단위는 [S/m] 이다.

여기서,

$f_{MHz}$  는 주파수 단위는 MHz

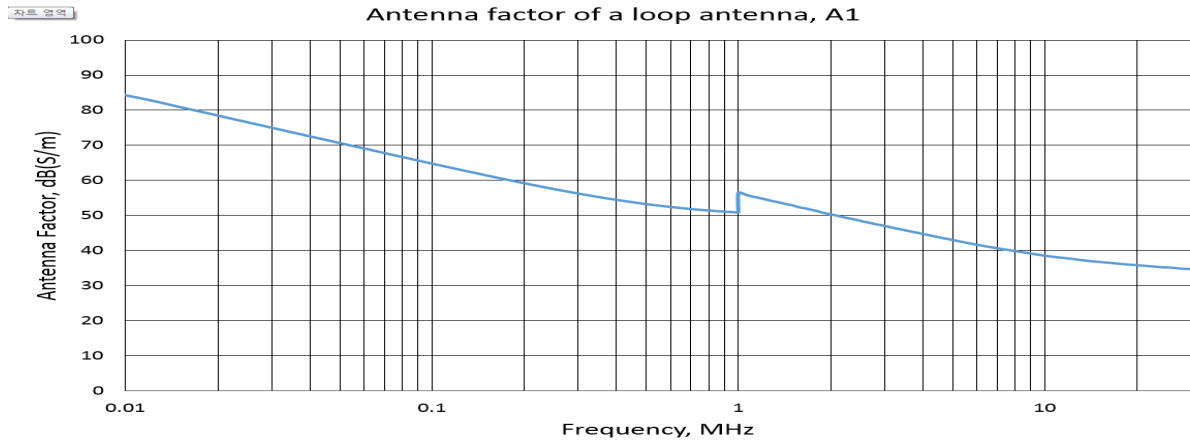
$A_i(i,j)$ 는 두 안테나  $i$ 와  $j$  사이의 SIL(공간삽입손실)

$K(i,j)$ 는 두안테나 쌍 ( $i, j$ )의 보정계수[dB(m-3)]

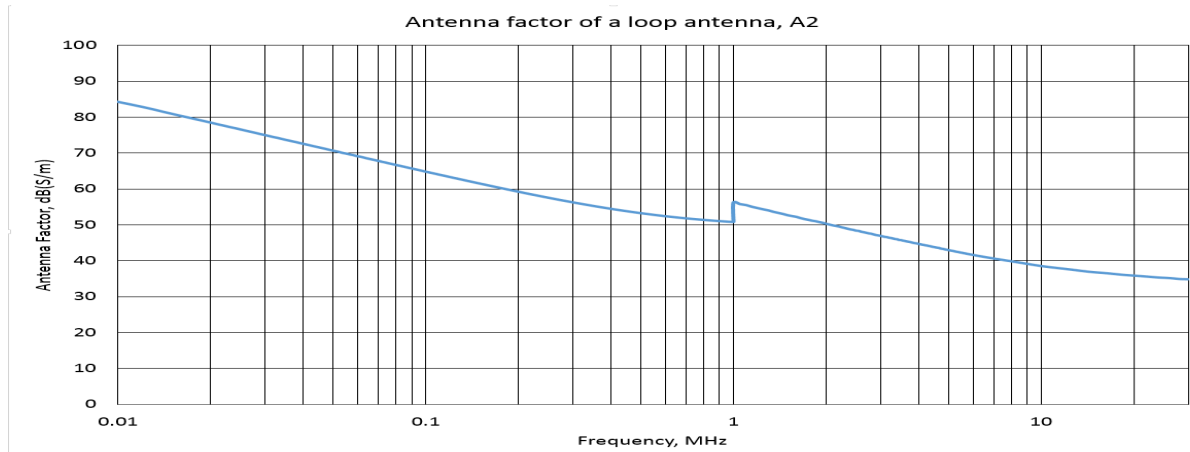


[그림 25] TAM을 이용한 루프 안테나 교정

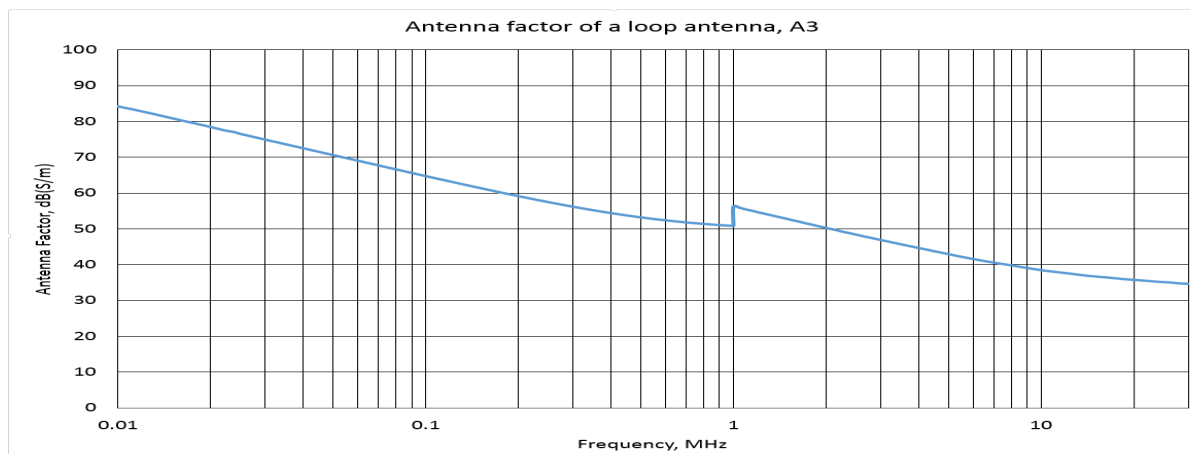
야외 시험장에서 3-안테나법으로 측정된 지름 30 cm 수동 루프 안테나(A1, A2, A3)와 지름 56 cm 수동 루프안테나(A1, A2, A3)의 측정결과는 [그림 26]과 [그림 27]과 같다.



(a)



(b)

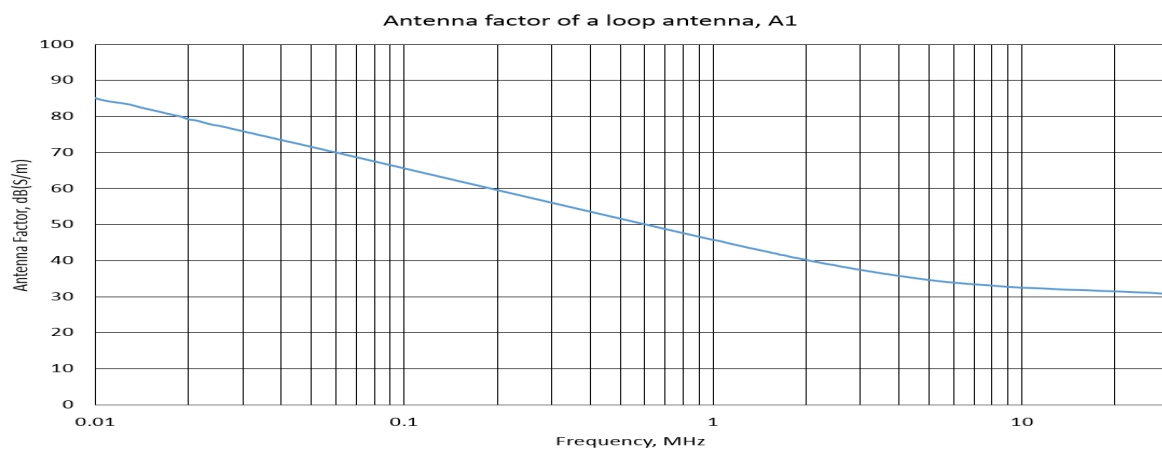


(c)

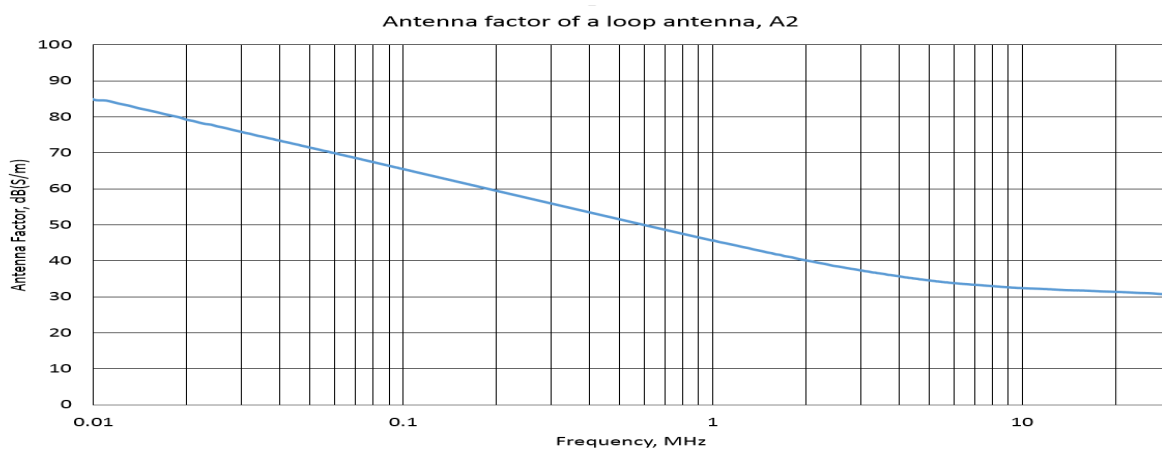
[그림 26] 3-안테나법에 의한 30 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 그래프

[표 14] 3-안테나법에 의한 30 cm 수동 루프 안테나 교정 결과

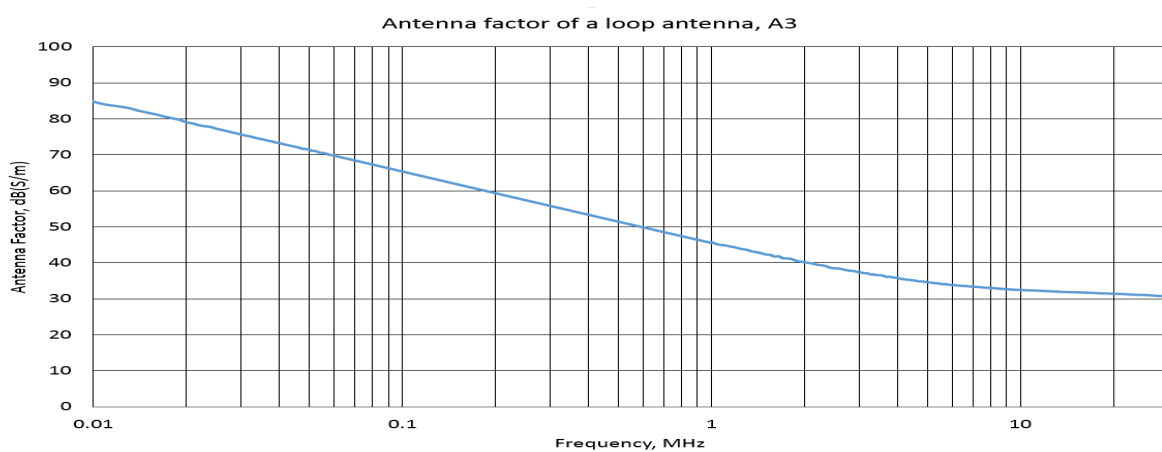
Freq(MHz)	A1	A2	A3
0.01	84.28	84.30	84.29
0.02	78.50	78.52	78.55
0.03	75.02	75.05	75.06
0.04	72.57	72.61	72.61
0.05	70.64	70.69	70.68
0.06	69.09	69.13	69.13
0.07	67.81	67.85	67.84
0.08	66.70	66.74	66.73
0.09	65.69	65.73	65.72
0.10	64.80	64.84	64.83
0.20	59.22	59.25	59.24
0.30	56.29	56.30	56.30
0.40	54.48	54.48	54.50
0.50	53.29	53.27	53.31
0.60	52.47	52.43	52.48
0.70	51.88	51.82	51.90
0.80	51.45	51.39	51.48
0.90	51.13	51.05	51.16
1.00	50.89	50.80	50.91
2.00	50.37	50.31	50.36
3.00	47.04	46.96	47.01
4.00	44.79	44.68	44.73
5.00	43.05	42.97	43.01
6.00	41.72	41.63	41.68
7.00	40.69	40.64	40.67
8.00	39.91	39.84	39.87
9.00	39.19	39.14	39.16
10.00	38.59	38.52	38.55
20.00	35.87	35.86	35.85
30.00	34.77	34.83	34.75



(a)



(b)



(c)

[그림 27] 3-안테나법에 의한 60 cm 수동 루프 안테나 교정 결과 그래프

[표 15] 3-안테나법에 의한 60 cm 수동 루프 안테나 교정 결과

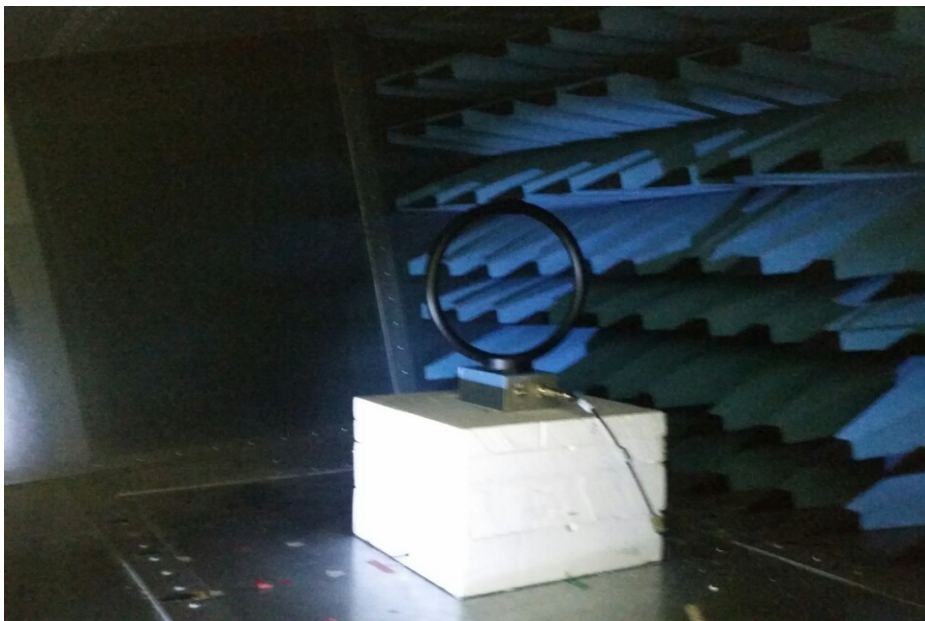
Freq(MHz)	A1	A2	A3
0.01	85.04	84.80	84.88
0.02	79.17	79.21	79.12
0.03	75.89	75.86	75.77
0.04	73.46	73.43	73.35
0.05	71.50	71.47	71.52
0.06	69.98	69.99	69.89
0.07	68.65	68.62	68.52
0.08	67.51	67.48	67.39
0.09	66.48	66.44	66.35
0.1	65.58	65.52	65.45
0.2	59.55	59.52	59.43
0.3	56.04	56.00	55.91
0.4	53.55	53.52	53.43
0.5	51.63	51.60	51.50
0.6	50.06	50.03	49.94
0.7	48.74	48.71	48.62
0.8	47.61	47.57	47.48
0.9	46.61	46.57	46.49
1	45.72	45.68	45.60
2	40.17	40.20	40.23
3	37.42	37.42	37.43
4	35.72	35.80	35.87
5	34.60	34.65	34.69
6	33.89	33.88	33.87
7	33.43	33.43	33.43
8	33.06	33.06	33.06
9	32.71	32.73	32.75
10	32.48	32.51	32.53
20	31.47	31.48	31.48
30	30.81	30.78	30.75

### 제3절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정 수행

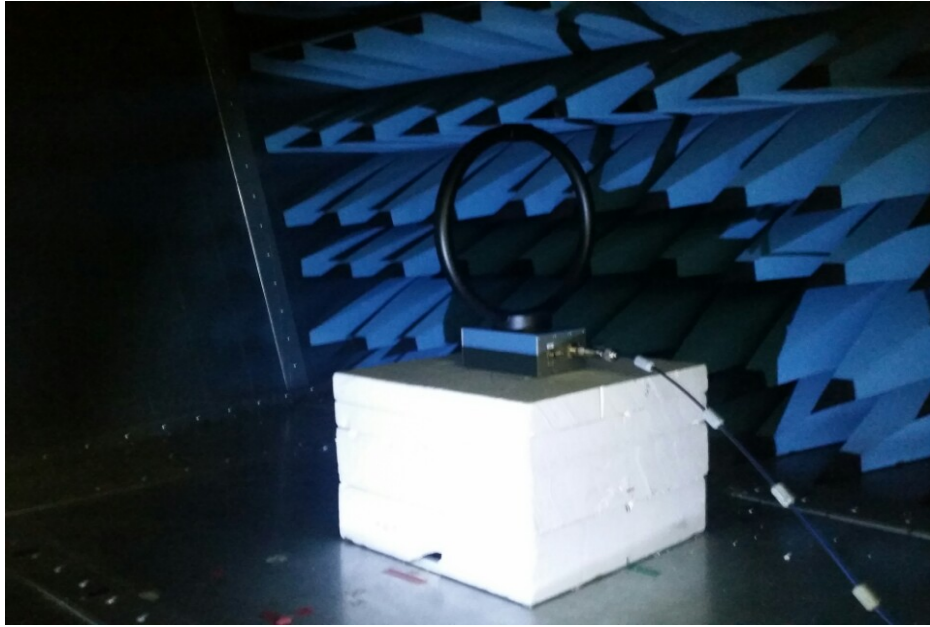
제1절에서 정립된 GTEM 셀을 사용한 루프 안테나 교정절차(정확히는 네트워크 분석기 사용)를 사용하여 A.R.A PLA-130/A의 지름 30 cm인 루프 안테나 A2와 ETS-LINDGREN 6512의 지름 56 cm인 루프 안테나 A2에 대하여 교정을 수행하였다. G-TEM을 사용하여 교정한 값과 야외시험장에서 3-안테나법으로 교정한 결과를 상호비교하여 최대편차가 0.2 dB 이내임을 보이며 측정방법의 유효성을 검증하였다.

#### 1. 지름 30 cm(A.R.A PLA-130/A) 루프 안테나 교정

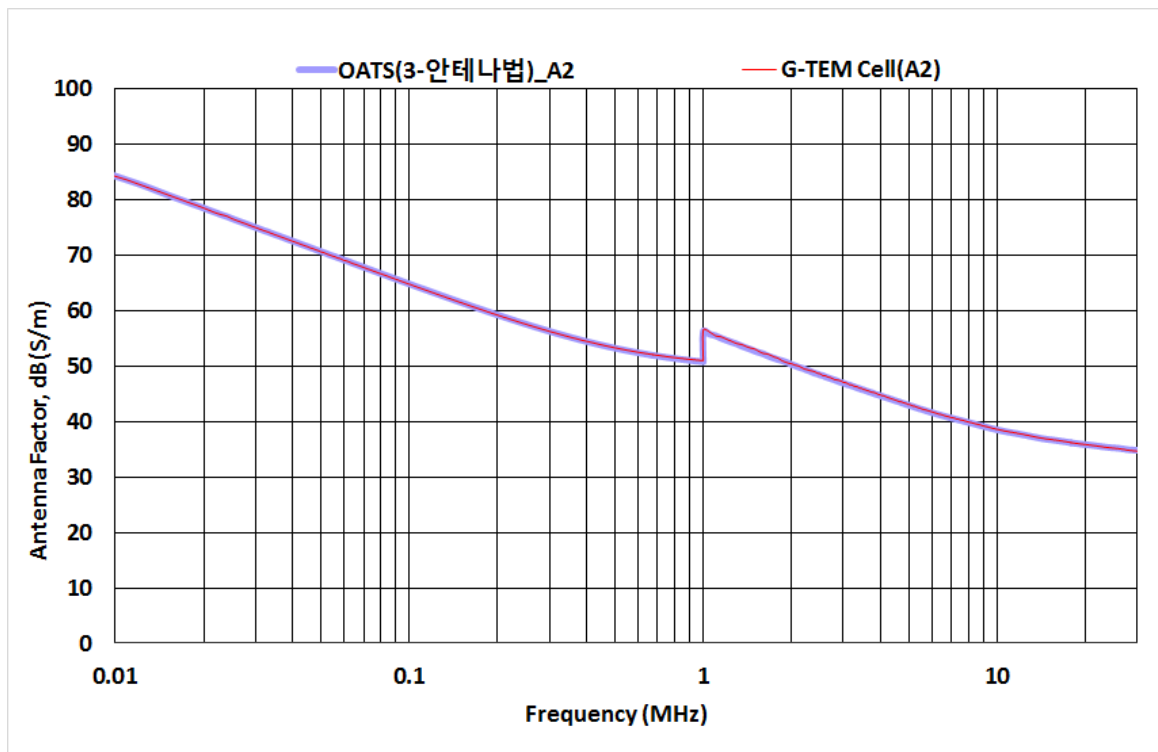
먼저 [그림 28]과 같이 기준 루프 안테나(A1)의  $S_{21}$  Ref을 측정하였으며, 그 다음 [그림 29]와 같이 피 교정 루프 안테나(A2)를 동일 위치에 놓고  $S_{21}$  AUC를 측정하였다. GTEM 셀 내에서의 교정결과는 [그림 30]과 [그림 31], [표 16]에서 보는바와 같이 최대편차가  $\pm 0.1$  dB 이하임을 보였다.



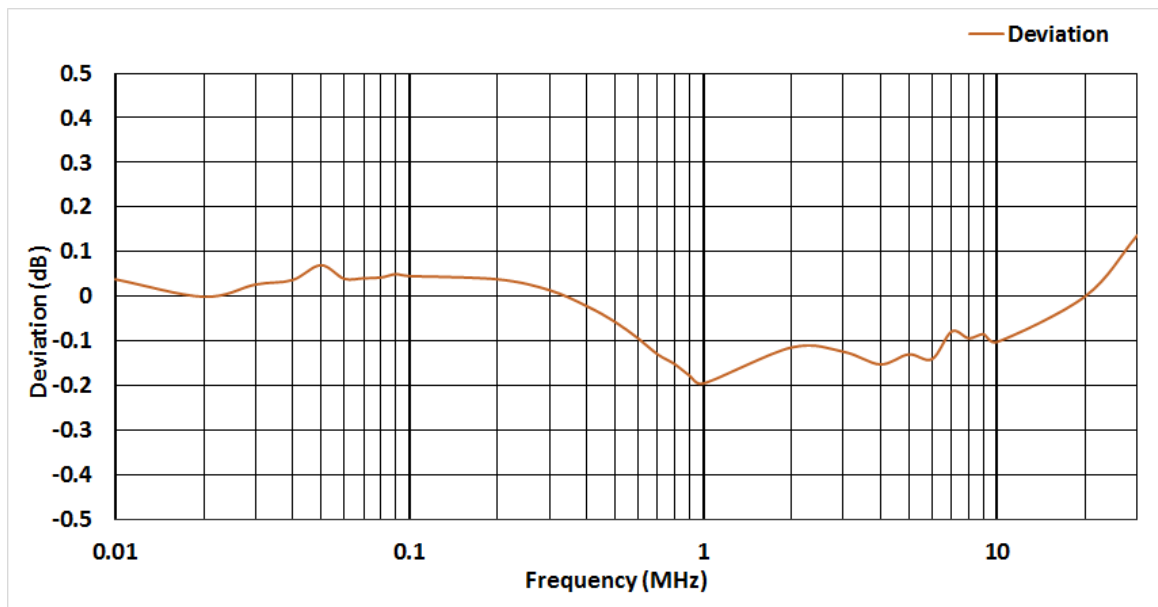
[그림 28] G-TEM 내에서 기준 루프 안테나(A1)의  $S_{21}$  Ref 측정



[그림 29] G-TEM 내에서 피 교정 루프 안테나(A2)의  $S_{21}$  AUC 측정



(a) 측정된 3-안테나법과 G-TEM셀의 안테나 인자 상호비교



(b) 3-안테나법과 G-TEM셀 교정 편차(dB)

[그림 30]루프 안테나 A2의 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교

[표 16] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교

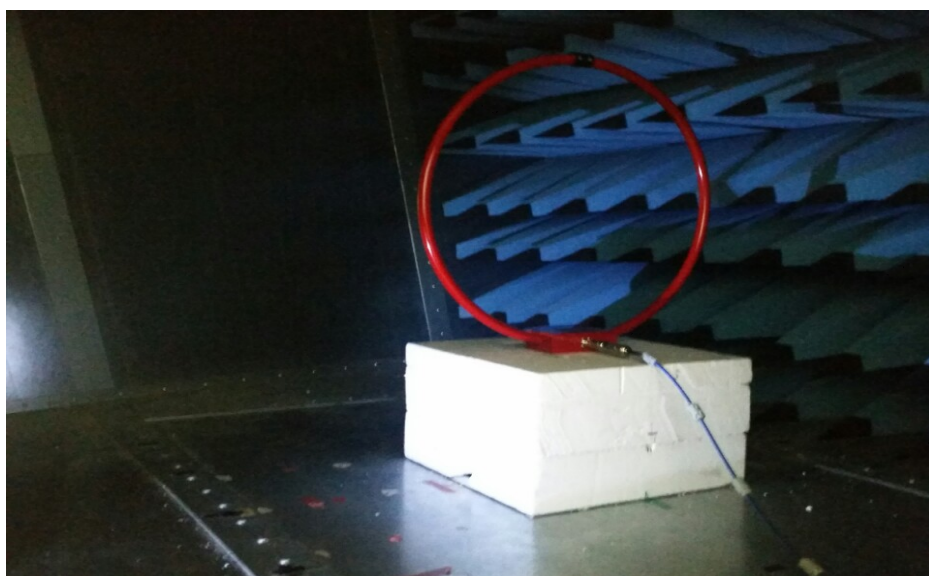
주파수 MHz	3-안테나법에 의한 안테나 인자 교정	GTEM 셀에서의 안테나 인자 교정	두 방법의 차이 (dB)
0.01	84.30	84.26	0.038
0.02	78.52	78.53	-0.001
0.03	75.05	75.02	0.027
0.04	72.61	72.57	0.037
0.05	70.69	70.62	0.070
0.06	69.13	69.09	0.040
0.07	67.85	67.81	0.041
0.08	66.74	66.70	0.042
0.09	65.73	65.68	0.050
0.1	64.84	64.80	0.046
0.2	59.25	59.21	0.038
0.3	56.30	56.29	0.014
0.4	54.48	54.50	-0.021
0.5	53.27	53.33	-0.057
0.6	52.43	52.52	-0.094
0.7	51.82	51.95	-0.130



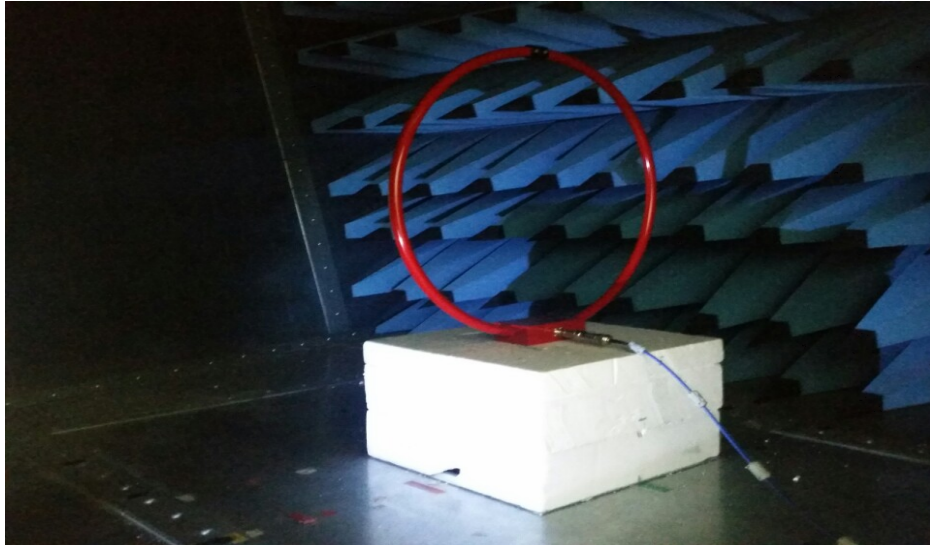
0.8	51.39	51.54	-0.152
0.9	51.05	51.23	-0.178
1	50.80	50.99	<b>-0.195</b>
2	50.31	50.42	-0.114
3	46.96	47.09	-0.124
4	44.68	44.84	-0.152
5	42.97	43.10	-0.130
6	41.63	41.77	-0.141
7	40.64	40.72	-0.078
8	39.84	39.94	-0.094
9	39.14	39.22	-0.085
10	38.52	38.62	-0.102
20	35.86	35.86	0.001
30	34.83	34.69	0.137

## 2. 지름 56 cm(ETS-LINDGREN 6512) 루프 안테나 교정

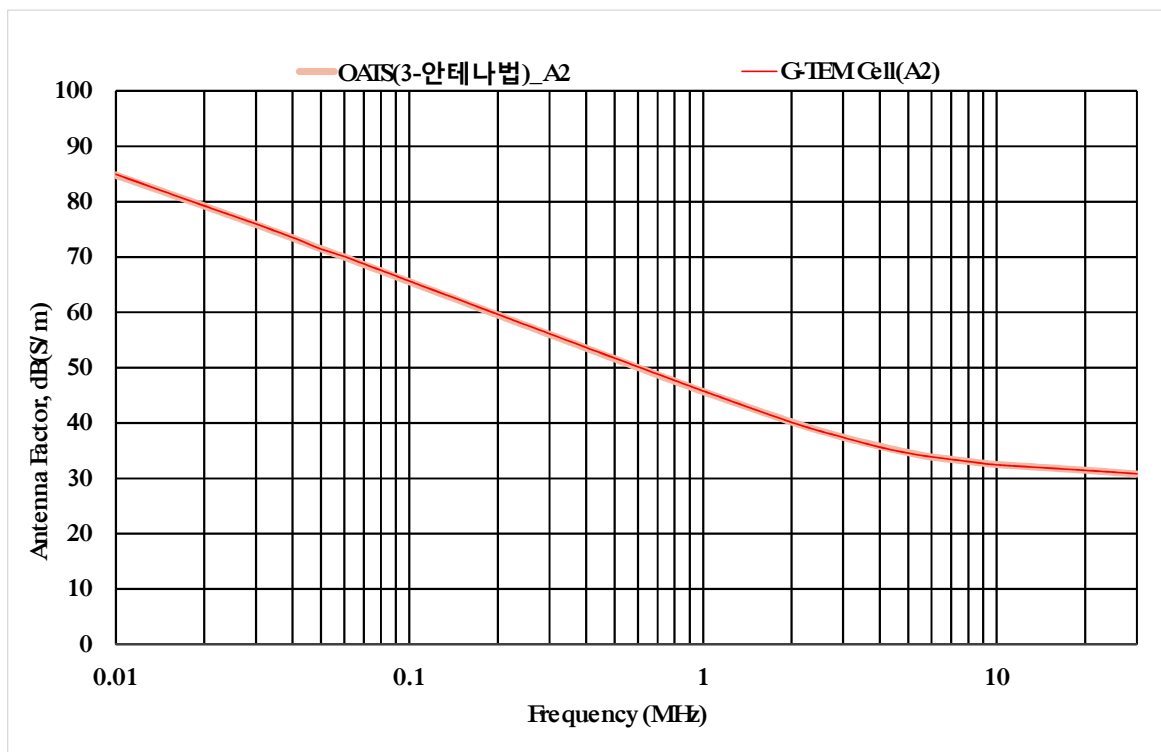
먼저 [그림 31]와 같이 기준 루프 안테나(A1)의  $S_{21 \text{ Ref}}$ 을 측정하였으며, 그 다음 [그림 32]와 같이 피 교정 루프 안테나(A2)의  $S_{21 \text{ AUC}}$ 를 측정하였다. GTEM 셀 내에서의 교정결과는 [그림 33]과 [그림 34], [표 17]에 나타내었으며 최대편차는  $\pm 0.15 \text{ dB}$ 이하임을 보였다.



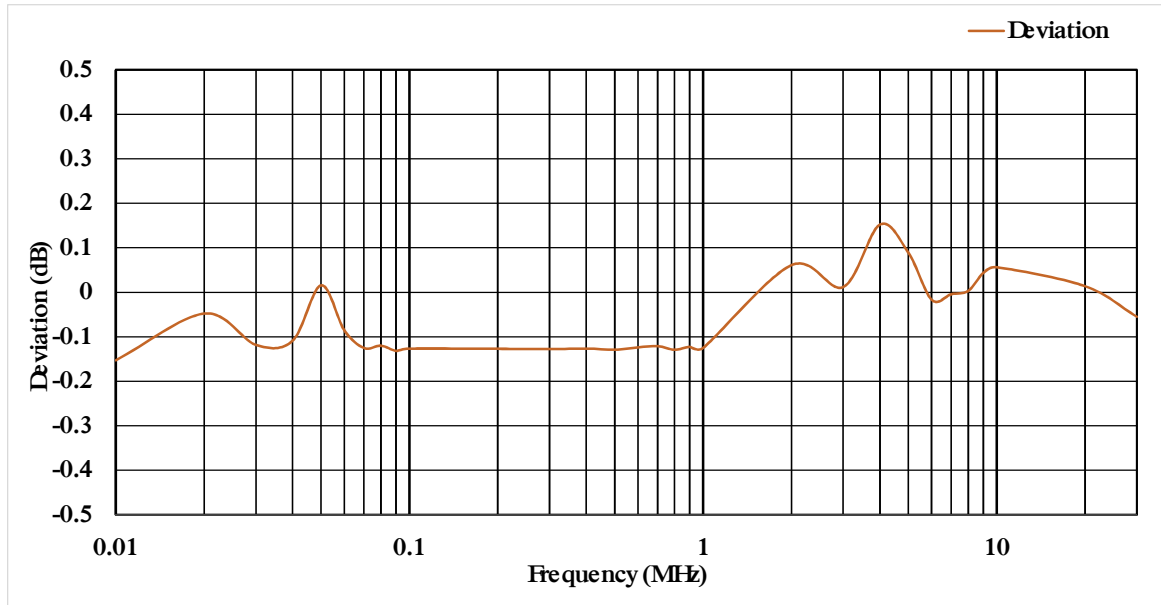
[그림 31] G-TEM 내에서 기준 루프 안테나(A1)의  $S_{21 \text{ Ref}}$  측정



[그림 32] G-TEM 내에서 피 교정 루프 안테나(A2)의  $S_{21}$  AUC 측정



(a) 측정된 3-안테나법과 G-TEM셀의 안테나 인자 상호비교



(b) 3-안테나법과 G-TEM셀 교정 편차(dB)

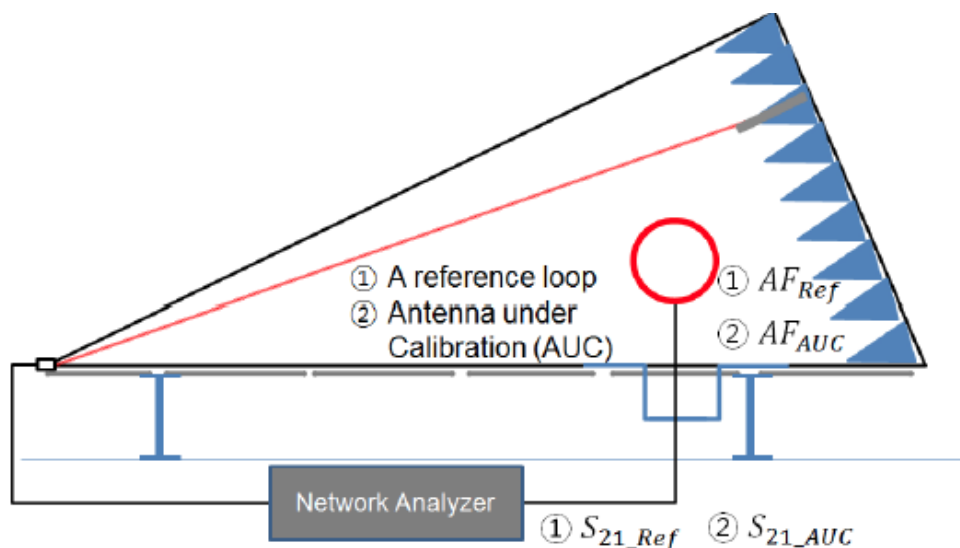
[그림 33]루프 안테나 A2의 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교

[표 17] 3-안테나법과 G-TEM셀 법 교정결과 비교

주파수 MHz	3-안테나법에 의한 안테나 인자 교정	GTEM 셀에서의 안테나 인자 교정	두 방법의 차이 (dB)
0.01	84.80	84.95	-0.15
0.02	79.21	79.26	-0.05
0.03	75.86	75.97	-0.12
0.04	73.43	73.54	-0.11
0.05	71.47	71.46	0.02
0.06	69.99	70.07	-0.09
0.07	68.62	68.75	-0.13
0.08	67.48	67.60	-0.12
0.09	66.44	66.57	-0.13
0.1	65.52	65.65	-0.13
0.2	59.52	59.64	-0.13
0.3	56.00	56.13	-0.13
0.4	53.52	53.65	-0.13
0.5	51.60	51.73	-0.13
0.6	50.03	50.15	-0.12
0.7	48.71	48.83	-0.12
0.8	47.57	47.70	-0.13

0.9	46.57	46.69	-0.12
1	45.68	45.81	-0.13
2	40.20	40.14	0.06
3	37.42	37.41	0.01
4	35.80	35.65	<b>0.15</b>
5	34.65	34.56	0.09
6	33.88	33.89	-0.02
7	33.43	33.43	0.00
8	33.06	33.05	0.00
9	32.73	32.69	0.04
10	32.51	32.45	0.06
20	31.48	31.46	0.01
30	30.78	30.84	-0.05

### 3. 지름이 다른 기준안테나를 사용한 안테나 교정



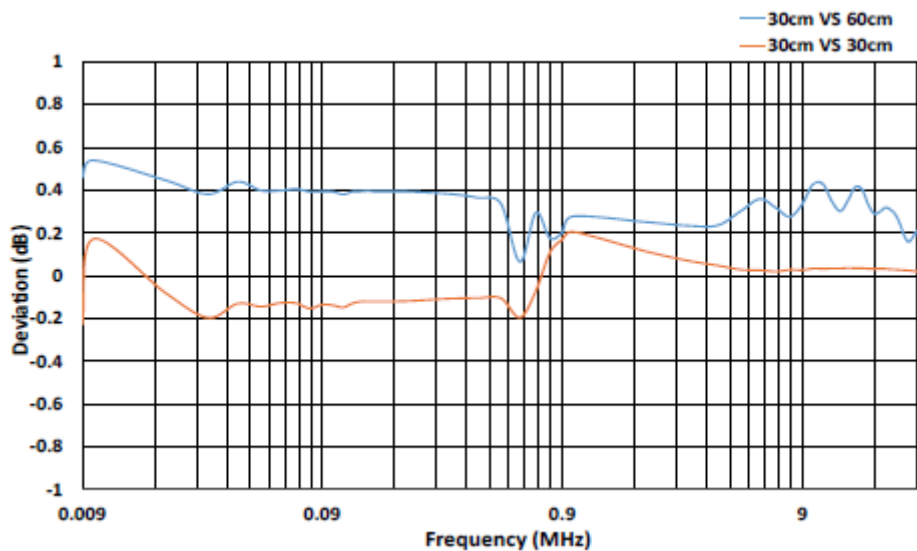
[그림 34] G-TEM cell에서의 루프 안테나 교정

다음은 G-TEM cell에서 직경이 다른 기준 루프 안테나(직경 30 cm 및 60 cm)를 가지고 피교정(AUC) 안테나를 교정할 경우 발생하는 안테나 인자 측정오차에 대하여 조사하였다. 먼저 G-TEM셀에서 사용할 기준 안테나는 야외시험장에서 TAM으로 교정된 안테나 중 A1(30 cm(A1), 60 cm(A1))을 선정하였다. 선정된 기준 안테나(A1)를 사용하여 G-TEM셀 내에서 직경이 같은 피교정 안테나(AUC)와 직경이 다른 피교정 안테나(AUC)를 교정하여 각각의 결과를

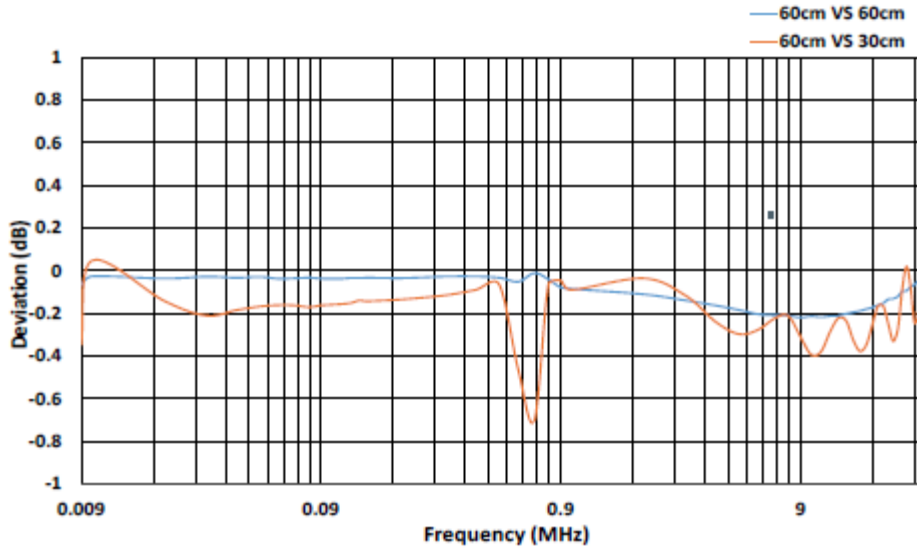
상호비교 하였다.

각 직경별로 선정된 기준 루프안테나를 사용하여 G-TEM cell에서 RAM(기준 안테나 교정법)으로 기준 안테나와 직경이 같은 AUC와 직경이 다른 AUC를 교정하고 결과를 상호 비교하였다(기준 루프안테나(30 cm VS AUC(30 cm/60 cm), 기준루프안테나(60 cm)와 AUC(30 cm/60 cm). G-TEM cell에서 RAM(기준 안테나 교정법)의 측정구성은 [그림 34]과 같다.

[그림 35]과 [그림 36]에서 보는바와 같이 G-TEM cell을 이용한 루프안테나 교정 시 동일한 직경의 안테나를 사용할 때보다 측정편차를 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 비대칭 Septum(금속 칸막이)을 갖는 G-TEM셀의 구조적 특징으로 볼 수 있으며 지름이 서로 다른 루프 안테나는 Septum과 전자기 커플링 양이 다르게 발생하기 때문이다. 하지만 앞에서 설명된 것처럼 동일 크기의 안테나를 기준안테나로 사용한다면 측정편차를 0.2 dB 이내로 줄일 수 있다.



[그림 35] G-TEM cell에서의 루프안테나 교정(직경: 30 cm)



[그림 36] G-TEM cell에서의 루프안테나 교정(직경: 60 cm)

#### 제4절 GTEM 셀에서의 루프 안테나 측정 불확도

제1절에서 설명된 GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정방법에 대한 측정 불확도는 CISPR 16-1-6의 TEM 셀법에 의한 루프 안테나 교정방법에 대한 측정 불확도 산출표를 참조하여 표 4.4.1와 같으며 산출된 측정 불확도는 신뢰수준 약 95 %,  $k=2$ 에서 0.78임을 보였다. GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정방법이 기준 안테나법(RAM)에 의한 비교방법이므로 측정 불확도에 가장 큰 기여를 하는 부분은 기준 안테나의 안테나 인자에 대한 불확도가 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 동일 지름을 갖는 기준 안테나로 안테나 인자를 교정할 때 0.2 dB이내의 측정 편차가 발생함을 알 수 있다.

[표 18] GTEM 셀에서의 루프 안테나 교정방법에 대한 측정 불확도

Input Quantity, $X_i$	Uncertainty of $X_i$			Divisor	dB $u(x_i)$	감도 계수 $c_i$	$c_{iu}(x_i)$ dB	자유도 $n$	참고자료
	Type	dB	확률분포						
Symmetry of Field uniformity	A	$\pm 0.25$	직사각형	$\sqrt{3}$	0.14	1	0.14	9	측정결과
Receiver sensitivity	B	$\pm 0.10$	직사각형	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	$\infty$	장비 매뉴얼
Receiver linearity	B	$\pm 0.30$	직사각형	$\sqrt{3}$	0.17	1	0.17	$\infty$	장비 매뉴얼

Receiver resolution 0.1 dB	B	±0.05	직사각형	$\sqrt{3}$	0.03	1	0.03	$\infty$	CISPR 인용
System stability	B	±0.10	직사각형	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	$\infty$	CISPR 인용
Electric field rejection	B	±0.10	직사각형	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	$\infty$	CISPR 인용
Reference Antenna factor	B	±0.20	직사각형	$\sqrt{3}$	0.29	1	0.12	$\infty$	측정결과
Load reflection	B	±0.34	U자형	$\sqrt{3}$	0.24	1	0.24	$\infty$	장비 매뉴얼
Mismatch	B	±0.18	U자형	$\sqrt{2}$	0.13	1	0.13	$\infty$	장비 매뉴얼
Loop positioning	B	±0.10	직사각형	$\sqrt{3}$	0.06	1	0.06	$\infty$	CISPR 인용
합성불확도 $u_c(E)$							0.39	$\infty$	
확장불확도 (신뢰수준 약 95 %, $k=2$ ), $U$							0.78	$\infty$	

## 제5장 IEC/CISPR 국제표준회의의 표준화 대응

### 제1절 C-SAM의 유효성 검증연구 표준화 추진

C-SAM의 유효성 검증 연구 및 CISPR 16-1-6의 표준문서 개정안을 작성하여 2017년도 10월 러시아 블라디보스토크에서 열린 IEC/CISPR/A/WG1에 기고문 발표를 진행하였으며, CISPR16-1-6 「안테나 교정방법」 표준문서에 C-SAM 측정방법에 대한 내용을 신규로 제안하였다.

Not for reproduction CISPR/A/WG1 (J.H.Lim, M.J.Jeona, B.N.Kang, B.W.Lee, Nam-Kim) 17-01  
Original: English October 2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE (CISPR)

Subcommittee A: Radio Interference Measurements and Statistical Methods

Working Group 1: EMC Measurement Instrumentation

Subject: Proposal of Compact-Standard Antenna Method(C-SAM)

References :

- [1] K.T. Selvan, "A modified three-antenna gain measurement method to simplify uncertainty estimation" Progress In Electromagnetics Research, PIER 57, page 197-208, 2006.
- [2] 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, April 2006.
- [3] IEEE Standard Test Procedures for Antennas, ANSI/IEEE Std. 149-1979, Dec. 1979.
- [4] CISPR 16-1-6[ED1.0], "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-6: EMC Measurement Instrumentation - EMC antenna calibration" IEC, December 2014.
- [5] J. K. Park, W. N. Kim, B. G. Kang, and H. K. Yeon, "A Novel Reference Antenna Method for EM Antenna Calibration," URSIGASS Symp., pp. 1-4, Aug. 2014
- [6] Jong-Hyuk Lim, Bo-Weon Lee, "A Study of Standard Antenna Using Two Identical Horn antennas in the frequency range of 1 GHz - 18 GHz", CISPR/AWG1, 2016

Authors: Jong-Hyuk Lim, Min-Joo Jeong, Byeong-Nam Kang, Bo-Weon Lee, Nam-Kim  
Corresponding Authors: Nam-Kim (namkim@chungbuk.ac.kr)

#### 1. Introduction

EMI (Electro Magnetic Interference) antenna calibration is to measure the AF (Antenna Factor). Typical conventional AF measurement methods include TAM (Three Antenna Method), SSM (Standard Site Method), and SAM (Standard Antenna Method) [1]-[6].

#### 4. Experimental verification of the C-SAM

C-SAM for validation, we compared the C-SAM and the conventional antenna calibration method using a horn antenna pairs at 1 GHz to 18 GHz band. Also due to the increase in millimeter-wave band equipment, we have confirmed the applicability of C-SAM in the 18 GHz to 40 GHz band. Distance between two antennas ( $d$ ) = 3 m, antenna height ( $h$ ) = 2 m, absorbers are installed on the bottom surface. The measurement configuration is shown in Fig. 3.

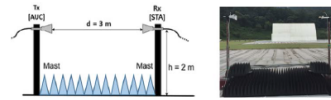


Fig. 3. Measurement configuration of C-SAM

To validate C-SAM, calibrate an arbitrary broadband horn antenna (C) by three methods, C-SAM, TAM and SAM. By placing two horn antennas at Rx and Tx and calculating the AF by pre-measuring the SIL, AF can be calculated with only one SIL measurement with AUC placed at Tx. AF of the wideband antenna (C) obtained by three methods are compared each other and the maximum deviation of three methods shows within  $\pm 0.2$  dB, as shown in Fig. 4 to Fig. 12.

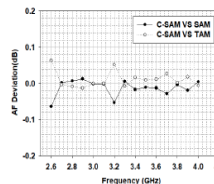


Fig. 4. Results of the measured deviation <1.12 GHz to 1.7 GHz>

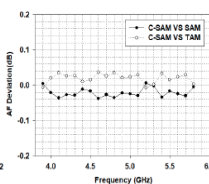


Fig. 5. Results of the measured deviation <1.7 GHz to 2.6 GHz>

[그림 37] 표준회의에 발표된 기고문

기고문 발표결과 제안한 내용에 몇 가지 내용을 보완하여 다음 2018년도 차기 IEC/CISPR/A/WG1 회의에서 발표를 요청받았으며, 보완사항은 다음과 같다.

1. WG1에서 동등 안테나 개념을 이용한 안테나 교정방법에 대한 데이터 요청(1 GHz -18 GHz)
2. 국립전파연구원의 1 GHz 이상 대역의 혼 안테나(표준안테나) 설계 데이터 제출( '17년12월)



### 3. 2018년 IEC/CISPR/A/WG1 C-SAM 보완하여 기고문 제출

- 가. 도파관 대역을 나눈 표준 혼 안테나가 아닌 1 GHz - 18 GHz대역을 한 번에 측정 가능한 광대역 혼 안테나에 대한 C-SAM의 유효성 검증 데이터
- 나. 다른 사이트(시험소 : KTL 등)에서 C-SAM 측정결과의 유효성 검증
- 다. C-SAM의 측정불확도 및 Amendments 추가 보완한 기고문 제출( '18년 6월)

## 제2절 G-TEM cell을 이용한 루프 안테나 교정법 표준화 대응 연구

제4장에서 설명된 G-TEM cell을 이용한 루프 안테나 교정법의 측정 불확도 개선 연구결과를 2017년 러시아에서 열린 IEC/CISPR/A/WG1 국제표준회의에서 기고문을 발표하였으며 기고문 발표결과 제안한 내용을 위원회 초안(CD)에 반영하여 회람하기로 결정하였다.

Not for reproduction CISPR/AWG1 J.J.H. Lim, B.W. Lee, M.J. Jeong, T.H. Jang, Nam-Kim 17-01  
Original: English October 2017

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION  
INTERNATIONAL SPECIAL COMMITTEE ON RADIO INTERFERENCE (CISPR)

Subcommittee A: Radio Interference Measurements and Statistical Methods

Working Group 1: EMC Measurement Instrumentation

Subject: A study of Calibration of loop antenna in GTEM Cell

References:

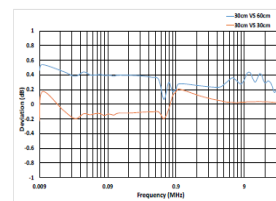
- [1] IEC 61000-4-20:2010 Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part4: Testing and measurement techniques, Section 20: Emission and Immunity Testing in Transverse Electromagnetic (TEM) Waveguides, 2010.
- [2] CISPR 16-1-6:2014, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-Part 1-6: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - EMC antenna calibration, Dec. 2014.
- [3] Bahattin Turekci, "An alternative method for determining the antenna factor of a monopole", ACES Journal, vol. 20, No. 3, November 2005, pp. 231-234.
- [4] CISPR/AWG1/AHG1 (Tae-Heon Jang, Jong-Hyuk Lim, Bo-Weon Lee) 16-01

Contribution by Jong-Hyuk Lim, Bo-Weon Lee, Min-Joo Jeong, Tae-Heon Jang, and Nam-Kim

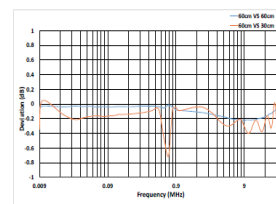
Corresponding Authors: Nam-Kim (namkim@chungbuk.ac.kr)

#### 1. Introduction

Recently, one of the issues in IEC CISPR is the standardization of measurement method for radiated emission below 30 MHz. So we had proposed an alternative method for calibration of monopole and loop antenna in GTEM cell at the Hangzhou ad hoc meeting [4]. In ref. [4], we made a passive loop antenna with a diameter of 0.3 m and then proposed a Reference Antenna Method (RAM) to calibrate a loop antenna in GTEM cell. Because electric field distribution in GTEM cell was not uniform in the frequency range below 30 MHz [4]. Thus, this paper presents a comparison results of measurement deviation when the AUC is calibrated using the reference antenna of different diameters (0.3 m and 0.6 m) in GTEM.



(a) Reference loop antenna with a diameter of 30 cm



(b) Reference loop antenna with a diameter of 60 cm

Fig. 4. The comparison results of measurement deviation

#### 3. Conclusions

A Reference Antenna Method (RAM) for calibration of loop antenna in GTEM cell has been proposed as an alternative method in this paper and we compared the measurement deviations when the AUC is calibrated using

[그림 38] 표준회의에 발표된 기고문

## 제6장 결 론

본 연구보고서는 국립전파연구원에서 개발한 표준안테나 법인 C-SAM (Compact-Standard Antenna Method)의 유효성 검증결과 및 주파수 대역을 40GHz까지 확장한 후속 검증연구, G-TEM셀을 사용한 루프 안테나 측정불확도 개선에 관한 연구 결과를 ‘17년 러시아 블라디보스톡에서 개최한 CISPR 국제표준회의 기고하고 표준화 대응에 대해 설명하였다.

‘17년 CISPR 표준회의에서는 「C-SAM 측정방법」의 국제표준 추진을 위해 기존의 안테나 측정방법 표준문서 「CISPR16-1-6」에서 사용되는 기존 안테나 측정법과 C-SAM의 이론적 배경을 설명하고, 기존측정방법과 C-SAM으로 측정한 결과를 상호 비교하여 유효성을 검증한 결과를 기고하고 발표하였다. 또한 밀리미터파 장비 증가에 따른 18 GHz - 40 GHz에서 C-SAM의 적용가능성을 확인하기 위해 1 GHz 이상의 기존 안테나 교정법인 TAM, SAM과 상호비교결과  $\pm 0.2$  dB 이내의 편차로 유효성을 검증하였다. 그 결과, 한 번의 측정으로 안테나 인자를 측정할 수 있어 시간을 간소화할 수 있는 방법임을 인정받았다. 또한 ‘16년 중국 항저우에서 개최한 CISPR 표준회의에서 발표한 G-TEM셀을 사용한 30 MHz 이하대역 루프 안테나 측정방법의 지적사항으로 측정 불확도를 개선하기 위한 연구결과를 ‘17년 CISPR 표준회의에 기고하고 발표하였다. 표준회의 발표결과 연구원에서 제안한 G-TEM셀을 이용한 안테나 측정 불확도 개선에 대한 내용을 위원회 초안(CD)에 반영하여 회람하기로 하였다.

표준회의에서 요청한 몇 가지 보완사항에 대해서는 국내 EMCA 기준전문 위원들과 협의하여 기고문을 준비하여 2018년 부산에서 개최되는 CISPR 국제회의에서 연구원 개발 측정방법을 표준문서에 반영하도록 하겠다.

## [참고문헌]

- [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 한국전자과학회 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

## 안테나 측정방법 국제표준화 추진 및 유효성 검증 연구



국립전파연구원

National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

발 행 일 : 2018. 3.

발 행 인 : 유 대 선

발 행 처 : 과학기술정보통신부 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4414

인 쇄 : (사)한국척수장애인협회 광주·전남인쇄사업소  
062) 222-2788

ISBN : 979-11-5820-102-9 < 비 매 품 >

### 주 의

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