

30 MHz에서 1 GHz 대역 EMI 측정용 다이폴안테나 교정의 측정 불확도

Measurement Uncertainty for Calibration of EMI Dipole Antenna from 30 MHz to 1 GHz

박정규 · 정동찬 · 조진영

Jung-Kuy Park · Dong-Chan Jeong · Jin-Young Cho

요 약

측정 분야나 교정 분야에서 측정 불확도를 보고하는 것은 매우 중요하다. 정보통신부 전파연구소에서는 EMI 측정 시험소를 위하여 안테나 교정 서비스를 제공하고 있는데, 안테나 교정의 정확성은 측정 불확도 평가로 집약 되어, EMI 시험의 신뢰성을 판가름하는 시금석이 된다. EMI에 관한 국제기구인 CISPR에서는 2005년 말에 안테나 교정에 대한 최초의 표준 초안인 CISPR/A/644/C를 내놓았다. 이 초안은 안테나 교정 및 관련된 측정 불확도를 포함하고 있다. 본 논문에서는 이 문서를 근간으로 전파연구소 이천의 안테나 교정시험장에서 EMI용 다이폴 안테나를 교정할 때의 측정 불확도를 산출하였다. 전파연구소의 안테나 교정 방법은 자유 공간 안테나 인자를 측정하는 3-안테나의 height scanning averaging 법으로서, 본 방법에 의하여 안테나가 교정될 때 측정 결과에 영향을 미칠 수 있는 모든 불확도 요인을 고려하였다.

Abstract

Measurement uncertainty assessment is very important in measurement and calibration. RRL provides antenna calibration services for EMI test. Reliability of EMI test depends on accurate antenna calibration. Antenna calibration results have to be accompanied with measurement uncertainty for its better reliability. In the late of 2005, CISPR issued the CISPR/A/644/C which describes the antenna calibration and measurement uncertainty.

In this paper, on the basis of CISPR/A/644/C, we provide the measurement uncertainty values for dipole antenna calibration at the Calibration Test Site(CALTS) of Icheon. The antenna calibration method is 3-antenna height-scanning-averaging method, which measures the free-space antenna factor. We also considered all uncertainty sources that can affect measurement results during calibration.

Key words : Uncertainty, Antenna Calibration, Antenna Factor, Height Scanning Averaging

I. 서 론

EMI 시험에 필수적인 사항으로서 안테나 교정은 측정 불확도의 평가로 집약된다. 국제적으로 EMI용 안테나의 교정에 대한 논의가 CISPR를 중심으로 진행되었고, 2005년 말에 안테나 교정에 대한 최초의

표준 초안인 CISPR/A/644/C가 2006년 1월에 각 회원국에 회람되었다. 이 초안은 안테나 교정 및 그와 관련된 측정 불확도 산출에 관한 내용을 포함하고 있다. 본 논문에서는 이러한 논의를 중심으로 3-안테나법을 이용하는 Height Scanning Averaging(HSA)^{[1],[2]} 법에 따라 다이폴 안테나를 교정하고 그와 관련된

정보통신부 전파연구소(Radio Research Laboratory, MIC)

· 논문 번호 : 20061103-09S

· 수정완료일자 : 2007년 1월 26일

측정 불확도를 평가하였다.

II. HSA와 측정 불확도 모델

HSA 방법은 그림 1과 같이 지면으로부터 동일 높이의 송수신 안테나에 대해 높이에 따라 감쇠량을 측정하여 평균을 취함으로써 자유 공간 안테나 인자^[1]를 산출한다. 특정 높이 h_n 에서 안테나 i 의 안테나 인자 F_i 는 식 (1)^[3]에 의하여 측정 계산하고, 자유 공간 안테나 인자는 그것의 높이 평균 식 (2)^[1]에 의하여 구한다.

$$F_1(h_n) = \frac{1}{2} [L_{12} - L_{23} + L_{31} + F_{MHz} + C(h_n) - 32]$$

$$F_2(h_n) = \frac{1}{2} [L_{23} - L_{31} + L_{12} + F_{MHz} + C(h_n) - 32]$$

$$F_3(h_n) = \frac{1}{2} [L_{31} - L_{12} + L_{23} + F_{MHz} + C(h_n) - 32] \quad (1)$$

$$F_i(\text{freespace}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_i(h_n) \quad (2)$$

여기서, 아래첨자 i 와 j 로 표시되는 1, 2, 3은 세 개의 다른 안테나, L_{ij} 는 송신 안테나 i 와 수신 안테나 j 사이의 높이 h_n 에 의존하는 전송계수, F_{MHz} 는 MHz 단위로 표시된 주파수에 의존하는 항으로서 $F_{MHz} = 20 \log f$ (MHz), $C(h_n)$ 는 다음과 같은 식 (3)으로 나타내지는 수신 안테나 쪽의 전체 강도이다.

$$C(h_n) = 20 \log \left| \frac{e^{-jkD}}{D} - \frac{e^{-jkr}}{r} \right|$$

$$r = \sqrt{D^2 + 4h_n^2} \quad (3)$$

불확도 방정식은 안테나 인자의 측정 식 (1)로부터 불확도 전파법칙^[4]에 따라 다음^[3]과 같이 계산한다.

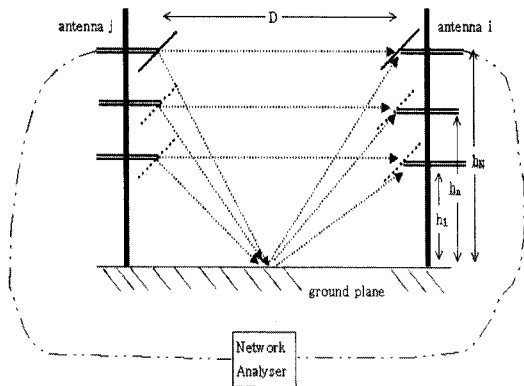


그림 1. HSA 측정 개념
Fig. 1. Concept of HSA.

$$\Delta F_i^2 = \frac{1}{4} [\Delta L_{ij}^2 - \Delta L_{jk}^2 + \Delta L_{ki}^2 + \Delta F_{MHz}^2 + \Delta C^2]$$

$$= \frac{3}{4} \Delta L^2 + \frac{1}{4} (\Delta F_{MHz}^2 + \Delta C^2) \quad (4)$$

여기서, ΔL 은 안테나 사이의 전송계수를 측정할 때 관련되어 있는 오차로서 측정기기(S/G 및 수신기 또는 네트워크 분석기)의 불확도, 부정합 불확도, 케이블의 온도 영향, 반복도 등이 포함된다.

ΔC 는 수신 안테나에 유기되는 전압의 오차에 의해 기인하는데, 그것은 H-면에서 안테나 패턴의 균일성 오차, 안테나 위치 오차, 안테나 간의 상호 임피던스 영향, 시험장 근처의 구조물에 의한 반사 등에 의한 시험장 불완정성 및 시험장의 주위 잡음 등에 의한 오차가 포함된다.

ΔF 는 안테나 사이의 시험장 감쇠량을 측정하는 동안 주파수의 편이에 의한 오차 성분으로 여기서는 무시된다.

III. 불확도 성분의 평가

3-1 삽입 손실 측정관련 불확도

3-1-1 네트워크 분석기의 불확도

네트워크 분석기를 교정한 후에도 교정 키트 등의 불완전성 때문에 네트워크 분석기에는 그림 2와 같이 이상적인 DUT의 전송계수 S_{21} 및 S_{12} 를 측정하더라도 잔여의 오차(residual error)^[5]가 남게 된다. 네트워크 분석기의 잔여 오차는 계통 오차, 랜덤 오차 및 편이 오차로 분류하며 오차 모델^[5]은 이상적인 DUT ($S_{21}=1, S_{11}=S_{22}=0$)를 가정하여 식 (5)와 같이 표시된다. 이 식에서 표현된 모든 성분은 선형값이며 선형 -dB의 변환 관계에 의해 계산할 필요가 있다.

$$\Delta S_{21}(\text{lin}) = \sqrt{(\text{Systematic} + \text{Stability})^2 + \text{Noise}^2}$$

$$\text{Systematic} = E_{XF} + E_{TF} + E_{SF}E_{LF} + A_M$$

$$\text{Stability} = \sqrt{C_{TM1}^2 + C_{TM2}^2 + R_{T1}^2 + R_{T2}^2}$$

$$\text{Noise} = \sqrt{N_T^2 + N_F^2} \quad (5)$$

여기서, E_{XF} 는 forward crosstalk, E_{TF} 는 forward transmission tracking, E_{SF} 는 forward residual source match, E_{LF} 는 forward load match, A_M 은 magnitude dynamic

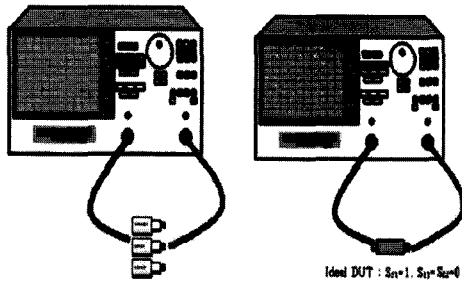


그림 2. 교정후 남은 잔여 오차
Fig. 2. Residual error after cal.

accuracy, C_{TM1} 및 C_{TM2} 은 포트 1 및 포트 2의 cable magnitude transmission stability, R_{T1} 및 R_{T2} 는 포트 1 및 포트 2 connector transmission repeatability, N_T 및 N_F 는 trace noise 및 noise floor이다.

식 (5)에서 사용되어질 기본 데이터는 표 1과 같이 Agilent PNA Microwave Network Analyzer E8362B의 매뉴얼^[6]에서 주어지며, 각 성분의 dB에서 선형값으로 변환^[7]은 $10^{-dB/20}$ 또는 $10^{dB/20} - 1$ 로 계산한다.

케이블 안정도는 참고문헌 [6]에 따라 측정하여 그 결과는 그림 3에서 보여주며, 선형값으로의 변환^[7]은 $10^{dB(peak)/20} - 1$ 로 계산한다.

식 (5)에 따라 계산한 네트워크 분석기의 표준 불확도는 선형값으로서 다음과 같은 식 (6)^[7]에 따라 dB로 환산한다.

$$\Delta S_{21}^{\pm}(dB) = 20 \times \log(1 \pm \Delta S_{21}(lin) / S_{21}) \quad (6)$$

이렇게 계산된 불확도는 나눴자 $\sqrt{3}$ 인 정규

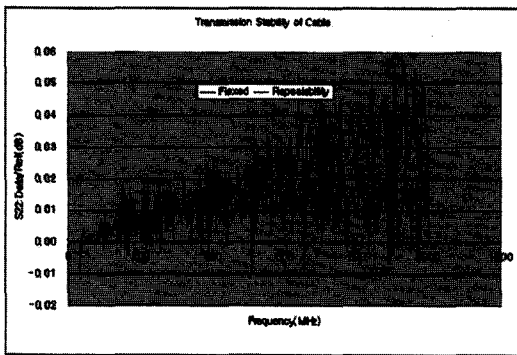


그림 3. 케이블의 전송 안정도 측정
Fig. 3. Measurement of transmission stability for cable.

표 1. 네트워크 분석기 불확도 계산의 기본 데이터 및 측정값과 평가된 표준 불확도

Table 1. Basic data and standard uncertainty for network analyzer.

	E_{XF}	E_{TF}	E_{SF}	E_{LF}	A_M	
dB	65	0.013	39	40	0.01	
Linear	0.00056	0.00149	0.01123	0.01	0.00116	
Systematic Error(linear)					0.0137427	
	C_{TM1}	C_{TM2}	R_{T1}	R_{T2}	N_T	N_F
dB	0.055	0.055	0.0006	0.0006	0.05	77
Linear	0.00317	0.00317	0.00007	0.00007	0.00577	0.00014
Stability(linear)					0.0044775	
Noise(linear)					0.0057747	
불확도(ΔS) (dB)	확률분포		나눔 인자	표준불확도 (dB)		
0.166037	직각분포		$\sqrt{3}$	0.0958617		

분포로 가정한다. 네트워크 분석기의 교정 후에도 남아 있는 잔여 오차에 의한 불확도를 계산하기 위한 기본 데이터, 측정값, 모든 불확도 성분 및 평가된 표준 불확도는 표 1에서 주어진다.

3-1-2 부정합 불확도 평가

RF 시스템에서 구성 장비의 두 부분이 연결되었을 때, 이상적인 정합(matching)이 이루어지지 않은 경우, 필연적으로 부정합에 의한 불확도 성분이 존재하게 된다. 부정합 불확도는 U-형 분포이고, 그 값은 다음과 같은 공식 (6)^[8]에 따라 계산한다.

$$u_{mismatch} = \frac{|\Gamma_i| \times |\Gamma_j| \times |S_{21}| \times |S_{12}| \times 100\%}{11.5 \times \sqrt{2}} \quad (7)$$

여기서 $|\Gamma_i|$ 는 각 구성 장비의 반사계수이고 $|S_{ij}|$ 는 그 사이의 전송계수이다. HSA 법에 의한 안테나 교정은 식 (1)과 (2)를 이용하며, 이때 측정해야 할 물리량은 안테나 사이의 삽입 손실인 전송계수이다. 1개의 AUT[Anritsu MP 652B(30-200MHz), S/B UHAP(300~1,000 MHz) 793] 및 2개의 측정용 안테나 [S/B757-740, S/B 756-739]가 쌍을 이루어 그림 4의 상단부에서 보듯이 케이블로 연결되고 안테나 마스트에 장착되어 네트워크 분석기(Agilent E8362B)를 이용하여 3-안테나 법으로 안테나의 삽입 손실이 측

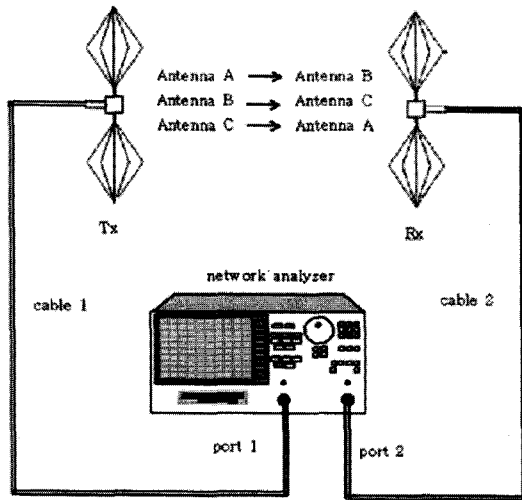
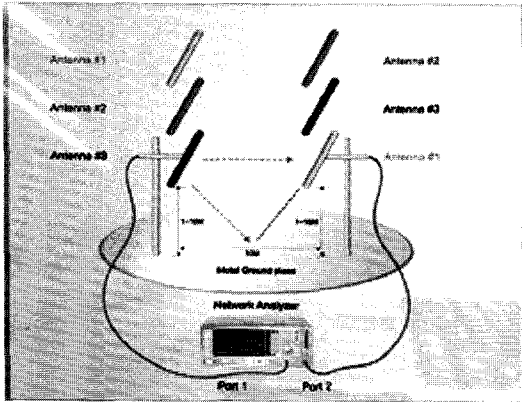


그림 4. HSA 측정 구성도(상) 및 부정합 불확도 분석을 위한 개략도(하)
 Fig. 4. Measurement setup of HSA(above) and conceptual diagram for mismatching uncertainty analysis(below).

정된다. 이러한 측정 구성에서 부정합 성분을 분석하고 계산하기 위한 시스템 구성은 그림 4의 하단부와 같다.

이때, 부정합을 이루는 장비의 쌍은 (네트워크 분석기 포트 1, 케이블 1), (네트워크 분석기 포트 1, 안테나 1), (케이블 1, 안테나 1), (네트워크 분석기 포트 2, 케이블 2), (네트워크 분석기 포트 2, 안테나 2), (케이블 2, 안테나 2) 등으로 측정 구성 장비 각각의 조합의 수와 같으며, 모두 3개의 안테나 쌍에 대해 14개의 부정합 성분들이 존재하며 이는 표 2에서 제시했다.

표 2. 부정합 불확도의 모든 성분

Table 2. All components of mismatching uncertainty.

전송부(Tx)			
	네트워크 포트 1	케이블 1	안테나 (A, B, C)
네트워크 포트 1	-	$U_{net1:cab1}$	$U_{net1:antA}$ $U_{net1:antB}$ $U_{net1:antC}$
케이블 1	-	-	$U_{cab1:antA}$ $U_{cab1:antB}$ $U_{cab1:antC}$
안테나 (A, B, C)	-	-	-
수신부(Rx)			
	네트워크 포트 2	케이블 2	안테나 (A, B, C)
네트워크 포트 2	-	$U_{net2:cab2}$	$U_{net2:antA}$ $U_{net2:antB}$ $U_{net2:antC}$
케이블 2	-	-	$U_{cab2:antA}$ $U_{cab2:antB}$ $U_{cab2:antC}$
안테나 (A, B, C)	-	-	-

각 구성 장비의 반사계수(S_{ii}) 및 전송계수(S_{ij})의 측정 결과는 그림 5 및 6에서 보여준다. 식 (7)과 그림 5 및 그림 6의 데이터로부터 표 2의 각 장비간의 부정합 불확도를 안테나 순서쌍(A → B, B → C, C → A) 각각에 대해 부정합 불확도 성분 $u_{m,n}$ 을 계산하고 RSS(Root Sum Square)로 합성한 부정합의 합성 불확도 $u_f(\text{mismatch:combined})$ 는 그림 7에서 보여준다. 개별적인 부정합 불확도의 확률 분포는 U-형 분포이지만 그것들의 합성은 정규 분포로 추정한다. 이에 의

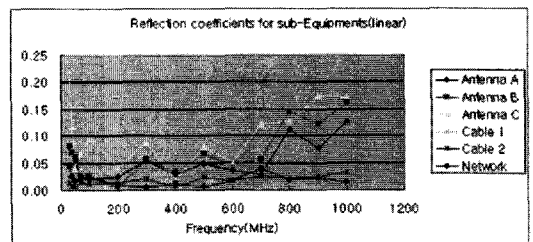


그림 5. 각 구성 장비의 반사 계수

Fig. 5. Reflection coefficients of the equipments.

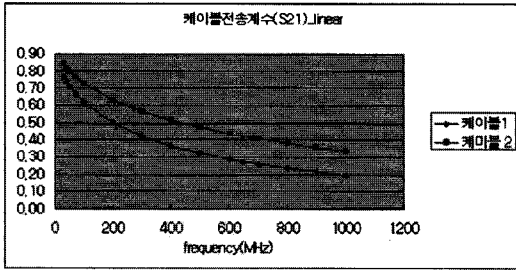


그림 6. 케이블의 전송계수(S_{21})
Fig. 6. Transmission coefficients of cables.

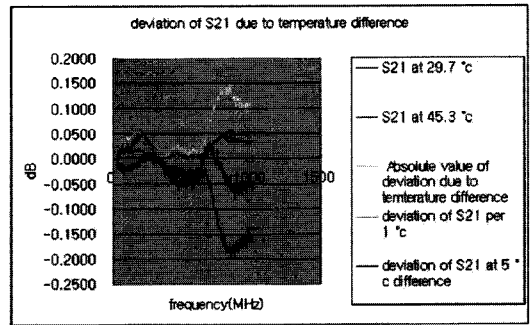


그림 8. 케이블의 온도차에 의한 불확도
Fig. 8. Uncertainty due to difference of temperature.

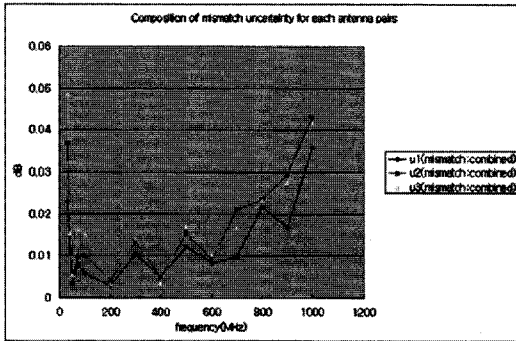


그림 7. 부정합 불확도
Fig. 7. Mismatching uncertainty.

하면 본 시스템에서 부정합에 의한 표준 불확도는 0.049 dB($k=1$)이다.

3-1-3 케이블의 온도 변화에 의한 불확도

온도의 편차가 케이블의 전송계수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 교정 야의 시험장의 금속 접지면 위에서 온도가 29.7 °C 및 45.3 °C일 때 전송계수를 측정하였다.

그림 8은 그 온도차에서 전송계수의 차이 및 1 °C 및 5 °C일 때 전송계수의 절대값의 편차를 보여준다. 안테나를 교정하는 동안 온도 변화가 ± 5 °C로 가정하면 편차값은 0.0974 dB이고 확률 분포를 직각 분포로 추정하여 온도 편차에 의한 전송계수의 표준 불확도는 $u_{Tem}=0.0974/\sqrt{3}=0.056$ dB이다.

3-1-4 반복도의 불확도 평가

반복도에 의한 측정 불확도는 안테나 사이의 전송계수 S_{21} 의 반복 측정에 의하여 추정한다. 표준 불확

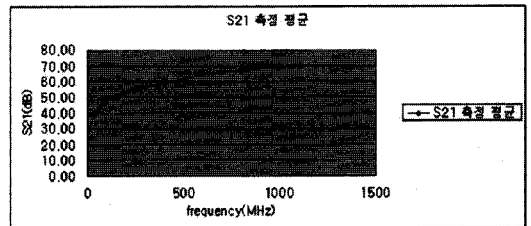
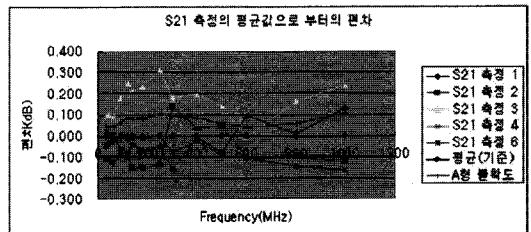


그림 9. 반복 측정에 의한 불확도
Fig. 9. Uncertainty due to repeatability.

도는 S_{21} 을 반복 측정하여 A-형 불확도로서 평가하였다.

주파수에 따라 S_{21} 을 5번 측정하였고 그 측정 결과에 대해 평균값과 실험표준편차 등을 구하여 $u_A = \text{standard deviation}/\sqrt{N}$ 으로 정의되는 A-형 불확도를 계산하였다. 여기서 N 은 반복 측정 횟수로서 $N=5$ 이다. 주파수에 따른 A-형 불확도의 계산 결과는 그림 9에서 제시하였다.

이에 따르면 반복도에 의한 표준 불확도는 확률 분포가 정규 분포로 추정되고 그 값은 0.180 dB가 된다.

3-2 수신 안테나 유도 전압 관련 불확도

3-2-1 안테나 위치 오차에 의한 불확도

안테나 교정시 안테나 사이의 거리의 오차 때문에 발생하는 불확도로서 HSA 측정시 거리가 D 이고 거리 오차가 $\pm \epsilon$ 일 때, 식 (3)은 식 (8)로 변환된다.

$$C_{+\epsilon}(h_n) = 20 \log \left| \frac{e^{-jk(D+\epsilon)}}{D+\epsilon} - \frac{e^{-jk\sqrt{(D+\epsilon)^2 + 4h_n^2}}}{\sqrt{(D+\epsilon)^2 + 4h_n^2}} \right|$$

$$C_{-\epsilon}(h_n) = 20 \log \left| \frac{e^{-jk(D-\epsilon)}}{D-\epsilon} - \frac{e^{-jk\sqrt{(D-\epsilon)^2 + 4h_n^2}}}{\sqrt{(D-\epsilon)^2 + 4h_n^2}} \right| \quad (8)$$

식 (8)을 안테나 높이 h_n 에 따라 평균을 취하면 안테나 사이의 거리가 $D + \epsilon$ 일 때의 자유 공간에서의 수신 전계의 세기와 거리가 $D - \epsilon$ 일 때의 자유 공간에서의 수신 전계의 세기를 계산할 수 있고, 그들의 차가 안테나 위치 오차에 의한 자유 공간 안테나 인자에 대한 오차가 된다. 이들은 식 (9)처럼 표시할 수 있다.

$$C_{+\epsilon}(free) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_{+\epsilon}(h_n)$$

$$C_{-\epsilon}(free) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N C_{-\epsilon}(h_n)$$

$$Position Error = |C_{+\epsilon}(free) - C_{-\epsilon}(free)| \quad (9)$$

이들은 직각 분포로 추정되고, 측정 거리가 $D=10$ m 이고 $\epsilon=5$ cm일 때, 100 MHz에서 $C_{+\epsilon}-C_{-\epsilon}$ 의 높이 패턴과 30 MHz에서 1 GHz 범위의 주파수에서 표준불확도 값은 그림 10에서 제시한다. 여기에 따르면 안테나 위치 오차에 의한 표준 불확도는 0.062 dB이다.

3-2-2 안테나의 상호 임피던스 영향에 의한 불확도 평가

수평 편파된 안테나는 안테나-안테나, 안테나-영상 안테나의 상호 임피던스에 의한 불확도 성분이 존재한다. 그림 11과 같은 기하 구조에서 안테나 상호 임피던스 $Z_{mi}=R_{mi}+jX_{mi}$ 는 2-포트-ray 모델^[9]의 식 (10)에서 계산 가능하다.

$$V_1 = (Z_{11} - Z_{13})I_1 + (Z_{12} - Z_{14})I_2$$

$$V_2 = -Z_{L2}I_2 = (Z_{12} - Z_{14})I_1 + (Z_{22} - Z_{24})I_2$$

$$R_{mi} = \frac{\eta}{4\pi} [2C_i(u_0) - C_i(u_m) - C_i(u_i)]$$

$$X_{mi} = \frac{\eta}{4\pi} [2S_i(u_0) - S_i(u_m) - S_i(u_i)]$$

$$C_i(x) = - \int_x^\infty \frac{\cos y}{y} dy$$

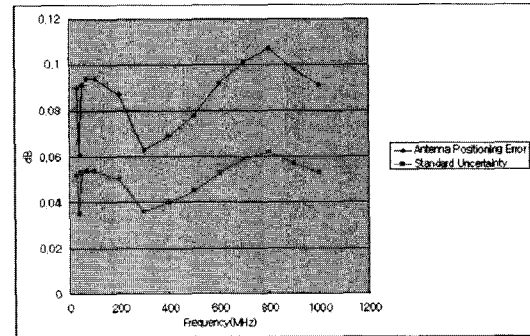
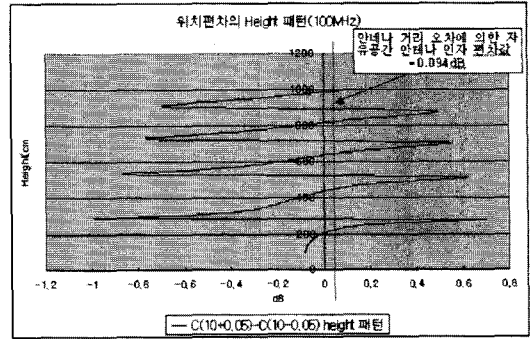


그림 10. $C_{+\epsilon} \sim C_{-\epsilon}$ 의 높이 패턴(100 MHz)(위) 및 안테나 위치 오차에 의한 표준 불확도(30 MHz~1 GHz)(아래)
Fig. 10. Height pattern of $C_{+\epsilon} \sim C_{-\epsilon}$ at 100 MHz (above) and standard uncertainty from 30 MHz to 1 GHz(below).

$$S_i(x) = \int_0^x \frac{\sin y}{y} dy$$

$$u_0 = ka, u_1 = k\sqrt{a^2 + b^2} + b, u_2 = k\sqrt{a^2 + b^2} - b \quad (10)$$

여기서 a 는 마주보는 안테나 사이의 거리이고, b 는 안테나의 길이이다.

다이폴 안테나의 경우, 송신 안테나의 전류가 I_1 일 때, 거리 D 에서의 전기장은 참고문헌 [10]에서와 같이 $60I_1 e^{-jkD}/D$ 이고 그림 11에서 상호 임피던스에 영향에 의하여 높이가 h_n 인 수신 안테나에 전류 I_2 가 유도되면 수신 안테나의 영상 안테나는 전류가 $-I_2$ 가 되어 수신 안테나 자신에게 $60I_2 e^{-2jkh}/2h_n$ 의 전기장 영향을 미친다. 그러므로 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$C_{imp}(h_n) = 20 \log \left| \frac{e^{-jkD}}{D} - \frac{e^{-jkr}}{r} - \beta \frac{e^{-2jkh}}{2h_n} \right| \quad (11)$$

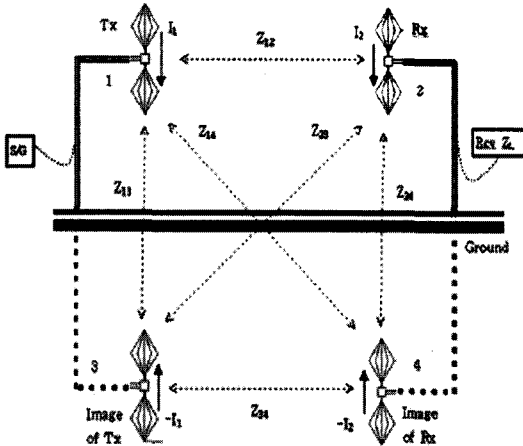


그림 11. 안테나 상호임피던스
Fig. 11. Mutual impedance of antennas.

여기서 식 (10)의 2-포트-ray 모델로부터

$$|\beta| = \left| \frac{I_2}{2I_1} \right| = \left| \frac{Z_{23} - Z_{21}}{2(Z_{22} - Z_{24} + Z_L)} \right| \quad (11-1)$$

이다.

여기서 Z_L 은 수신기(네트워크 분석기)의 입력 임피던스로 $Z_L=50 \Omega$ 이다. 식 (11-1)에서 $|\beta|$ 의 안테나 높이에 따른 분포는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그림 12와 같이 얻는다.

식 (11)의 값에 가장 큰 영향을 미치는 항으로서 불확도를 평가한다. 시뮬레이션 결과에 따르면 $|\beta| = 0.0006$ 일 때 불확도가 최대가 되며, 식 (11)은 $|\beta| = 0.0006$ 으로 하여 계산하고 그 결과는 모든 주파수에 대해서도 최대값이다. 상호 임피던스에 의한 자유 공간 안테나 인자의 오차 계산은 식 (3)의 $C(h_n)$ 과

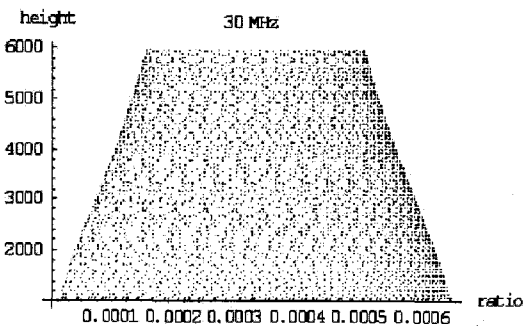


그림 12. 30 MHz에서 β 의 높이 패턴
Fig. 12. Height pattern of β at 30 MHz.

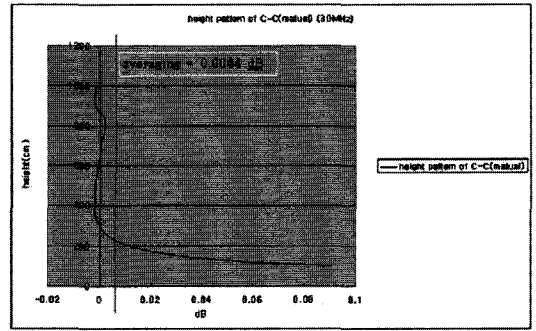


그림 13. 상호 임피던스 영향에 따른 불확도의 높이 패턴
Fig. 13. Height pattern of uncertainty due to mutual impedance.

$C_{imp}(h_n)$ 의 차를 높이 평균에 의하여 식 (12)와 같이 계산한다.

$$MutualImpErr = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [C(h_n) - C_{imp}(h_n)] \quad (12)$$

식 (12)의 높이 패턴과 평균은 그림 13에서 보여 준다. 상호 임피던스에 의한 불확도 영향은 직각 분포로 가정하며, 표준 불확도는 0.0025 dB로 평가한다.

3-2-3 시험장 불완전성에 의한 불확도

안테나 교정 시험장의 불완전은 또한 불확도를 유발한다. 그것은 시험장 근처의 구조물 등에서의 반사에 의한 영향이다.

전파연구소의 안테나시험장은 안테나 마스트와 평행하게 약 40 m 거리에 테니스 코트가 있다. 이 테니스 코트에 의하여 안테나 교정용으로 방사하는 파의 반사가 얼마나 일어나는지를 분석하기 위하여 그림 14와 같이 구성하여 측정하였다.

먼저 그림 14의 아래 그림에서처럼 안테나간의 직접적인 신호의 크기를 측정한 후 그림 14의 아래 그림처럼 테니스장을 향하여 반사파의 크기를 측정한다.

ETSI의 불확도 문서^[8]에서 주위 잡음 효과를 평가할 때, 신호대 주위 잡음의 차이에 의하여 표 3과 같이 평가하는데 테니스장에 의한 반사파를 주위 잡음으로 간주하여 여기서도 이를 똑같이 적용한다.

그림 14와 같이 측정하고 반사파에 의한 영향의 안테나 패턴을 고려하여(주 빔에서 약 30°) 보정을 한 결과는 그림 15와 같다. 30 MHz에서 직접파와 반사

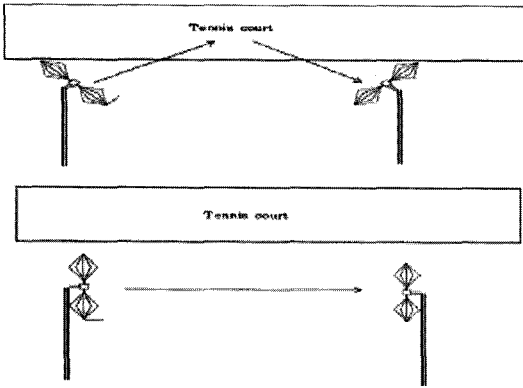


그림 14. 시험장 근처의 구조물 반사 영향 측정
Fig. 14. Measurements of reflection due to structure near by OATS.

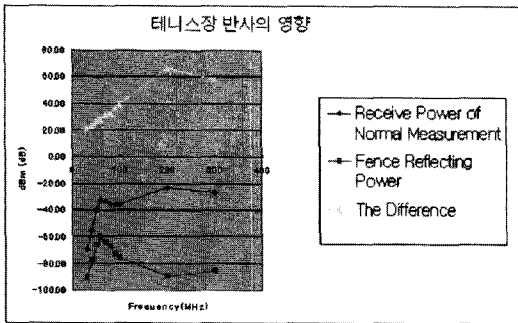


그림 15. 직접파와 구조물에 의한 반사파의 세기 차이
Fig. 15. Difference of direct wave and reflected wave due to structure.

표 3. 주신호와 반사파의 비율에 따른 불확도 기여 기준

Table 3. Ratio of main signal and reflection signal and uncertainty.

Receiving device noise floor (generator OFF) is within;	Standard uncertainly of the contribution
3 dB of measurement	1.57 dB
3 dB to 6 dB of measurement	0.80 dB
6 dB to 10 dB of measurement	0.30 dB
10 dB to 20 dB of measurement	0.10 dB
20 dB or more of the measurement	0.00 dB

파의 차이가 최소가 되며 약 20 dB 덜 된다. 표 3의 판정기준에 따라 안테나 교정 시험장 근처 테니스장의 반사에 의한 영향은 0.1 dB로 평가하고 이것의 확

률 분포는 직각 분포로 추정하여 표준 불확도는 0.058 dB로 산정한다.

3-2-4 H-면 안테나 패턴의 비균일에 의한 불확도

HSA 방법은 식 (1)에 근거한다. 이는 H-면의 안테나 패턴이 균일한 것을 전제로 한다. 실제의 안테나에 있어서 H-면의 패턴이 완전히 균일하지 않기 때문에 이에 대한 불확도 기여가 존재한다.

H-면의 패턴을 시험장의 일정한 높이에서 안테나를 수직으로 하여 360° 돌리면서 측정하여 그림 16을 얻었다. 이에 의한 오차는 0.2 dB로 추정하여 표준불확도는 0.115 dB로 평가한다.

3-2-5 안테나 마스트 반사에 의한 불확도

안테나 마스트의 반사에 의한 불확도 기여량은 식 (3)과 같은 ray 모델에 의하여 산출하였다. 그림 17을 참조하여 간단히 계산하면 안테나 마스트 위의 반사 지점 높이는 $y = \frac{hd}{2a+d}$ 가 된다. 그러므로 마스트 반사의 경로 길이 l 은 다음과 같이 주어지고,

$$l = \sqrt{(a+d)^2 + \left(\frac{hd}{2a+d}\right)^2} + \sqrt{a^2 + \left(\frac{2ah}{2a+d}\right)^2} \quad (13)$$

마스트 반사의 효과는 식 (3)에 마스트 반사항을 다음 식 (14)와 같이 추가한다.

$$C_{mast}(h_n) = 20 \log \left| \frac{e^{-jkd}}{D} - \frac{e^{-jkr}}{r} - |\Gamma| \frac{e^{-2jkh_n}}{2h_n} \right| \quad (14)$$

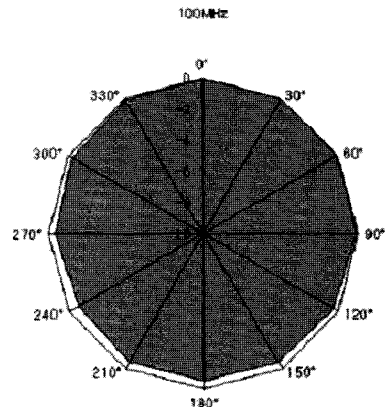


그림 16. H-면의 안테나 패턴(100 MHz)
Fig. 16. Antenna pattern of H-plane at 100 MHz.

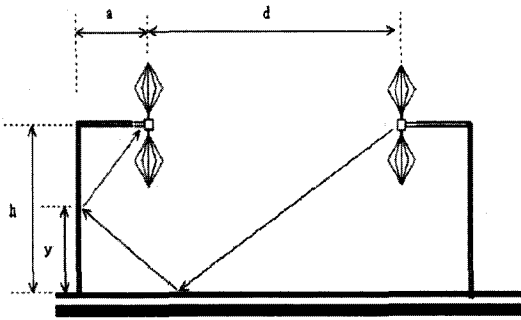


그림 17. 마스트 반사의 기하 구조
Fig. 17. Geometry of mast reflection.

여기서 Γ 는 마스트의 반사계수로서 마스트의 상대 유전율을 ϵ_r 과 $\Gamma = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}}$ 인 관계가 있다. 마스트의 상대 유전율은 약 $\epsilon_r = 1.5$ 이기 때문에 $|\Gamma| = 0.1$ 이다. 마스트의 반사에 의한 불확도는 식 (14)와 (3)의 차를 높이에 대한 평균을 취하여 식 (15)에 의하여 평가한다.

$$Mast\ ref\ Err = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [C(h_n) - C_{mast}(h_n)] \quad (15)$$

안테나 마스트에 의한 반사 영향의 높이 패턴은 그림 18에서 보여주며, 오차로 간주되는 평균값은 0.07 dB이다. 직각 분포로 가정하여 표준 불확도는 0.04 dB이다. 전파연구소의 마스트는 쌍으로 된 twin 마스트이므로 불확도 기여는 2배가 되어 $2 \times 0.04 = 0.08$ dB가 된다. 표준 불확도는 0.08 dB이다.

3-2-6 시험장 주위잡음의 불확도 평가

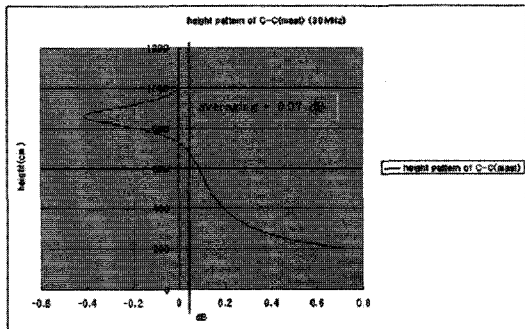


그림 18. 마스트 반사 영향의 불확도 높이 패턴
Fig. 18. Height pattern of uncertainty due to mast reflection.

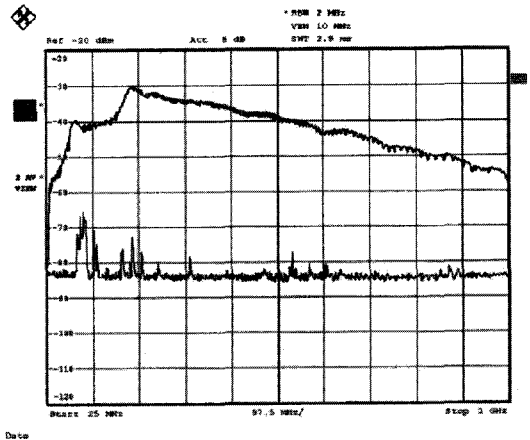


그림 19. 시험장 주변의 신호대 잡음비
Fig. 19. Ratio of main signal and ambient around OATS.

안테나 교정시 시험장 주변의 주위 잡음이 측정에 영향을 미친다. 그의 불확도 기여는 안테나 교정의 주신호와 주위 잡음의 비에 따라 ETSI에서 제시한 표 3에 의하여 평가한다. 전파연구소 교정시험장의 주위 잡음과 신호와의 비의 측정 결과는 그림 19에서 보여준다. 이에 따르면 80 MHz에서 100 MHz 대역의 FM 신호의 잡음 영향으로 그 차는 20 dB에 가깝기 때문에 ETSI의 판정기준에 따라 불확도 기여는 0.1 dB 추정하고, 표준불확도는 0.058 dB로 평가한다.

3-2-7 지향성 및 위상 중심 불확도

지향성 및 위상 중심은 다이폴안테나에 대해서는 불확도를 무시할 수 있다.

3-3 주파수 편이에 의한 불확도

안테나 교정 과정에서 주파수의 편이는 거의 무시할 정도이기 때문에 주파수 편이에 의한 불확도 기여는 없는 것으로 추정한다.

3-4 불확도 보고

EMI 측정용 다이폴 안테나의 자유공간 안테나 인자를 HSA 법에 의하여 측정할 때, 측정 불확도 요인은 크게 『송수신 안테나 사이의 삽입 손실을 측정할 때』의 불확도와 『수신 안테나에 유도되는 전압의 오차』에 의한 불확도로 나누어진다. 삽입 손실 불확

표 4. 측정 불확도 총괄표
Table 4. Uncertainty budget.

불확도 요인 및 영향량	불확도값 ±dB	확률 분포	나눔 인자	표준불확도 ±dB
삽입 손실 측정 불확도 요인 및 불확도값				
네트워크 분석기 오차	0.166	직각	$\sqrt{3}$	0.096
부정합	0.049		1	0.049
온도영향	0.0974	직각	$\sqrt{3}$	0.056
반복도	0.180		1	0.180
합성 불확도				0.22
안테나 유도 전압의 불확도 요인 및 불확도값				
위치 불확도	0.107	직각	$\sqrt{3}$	0.062
지향성	0	직각	$\sqrt{3}$	0
위상 중심	0	직각	$\sqrt{3}$	0
상호 임피던스	0.0044	직각	$\sqrt{3}$	0.0025
시험장 불완전	0.1	직각	$\sqrt{3}$	0.058
비균일 H면	0.2	직각	$\sqrt{3}$	0.0115
마스트 반사	0.14	직각	$\sqrt{3}$	0.081
RF 잡음	0.1	직각	$\sqrt{3}$	0.058
합성 불확도				0.17
주파수 편이 불확도 요인 및 불확도값				
주파수	0	직각	$\sqrt{3}$	0
전체 합성 표준 불확도				0.28
확장 불확도(k=2)				0.56

도 합성값 ΔL 은 0.22 dB이고, 수신 안테나 유도 전압 오차 불확도 합성값 ΔC 은 0.17 dB이다. 합성 표준 불확도는 $u_c = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta C^2}$ 로서 0.28 dB가 된다. 이 합성표준불확도는 95%의 신뢰도로 보상계수가 $k=2$ 로 주어지는 정규분포로 추정하고 확장 불확도 $U = ku_c = 2 \times 0.28 \text{ dB} = 0.56 \text{ dB}$ 이다.

측정 불확도의 모든 요인과 값은 표 4의 측정 불확도 총괄표에 제시하였다.

IV. 결 어

정보통신지정시험기관이나 기타의 EMI 시험소가 보유한 EMI용 안테나의 교정 서비스를 제공하는 전파연구소에서는 자유공간 안테나 인자를 산출하기 위하여 3-안테나의 height scanning averaging 법을 이

용한다. 이 방법과 일본의 정보통신연구기구(NICT)의 안테나 측정법과의 비교 측정 연구를 수행하는 과정에서 CISPR의 안테나 교정 CD 문서를 근간으로 측정 불확도를 산출하였다.

본문에서 보는 바와 같이 산출된 확장 불확도는 정규분포($k=2$)로 추정하여 0.56 dB이다.

3-안테나의 HSA 법은 측정값의 평균 과정에서 안테나의 위치 편차 불확도, 안테나 상호작용에 따른 상호 임피던스에 의한 불확도, 마스트 반사에 의한 불확도 성분은 상당 부분 상쇄시켜 불확도 기여량이 작은 반면에 반복도 및 H-면의 안테나 패턴의 비균일성 오차에 의한 불확도 기여량은 상대적으로 큼을 알 수 있다.

향후 지속적인 연구와 일본의 NICT와의 안테나 측정 국제 비교를 통하여 불확도를 낮추는 방안을 강구함으로써 국내 시험 기관에 대한 안테나 교정 서비스의 질을 향상시킬 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Jungkuy Park, et al., "Height scanning averaging method for free-space antenna factors of EMI antenna", *ISAP*, pp. 605-608, Aug. 2005.
- [2] 박정규, 정동찬, 차기남, 고흥남, "30 MHz에서 1 GHz 대역 EMI용 안테나의 준자유공간 안테나패터 산출에 관한 연구", 한국전자과학회 종합학술 발표회 논문집, pp. 205-210, 2004년 11월.
- [3] IEC CISPR/A/644/CD Project number CISPR 16-1-5 Amd.1 Ed1., "Antenna calibration", Nov. 2005.
- [4] EA, "Expression of the uncertainty of measurement in calibration", Dec. 1999.
- [5] Agilent Technologies, *Agilent PNA microwave network analyzer*, 5988-7988(EN).
- [6] Agilent Technologies, *Reference Guide 8719ET/20ET/22ET, 8719ES/20ES/22ES, Network Analyzer*, 08720-9039.
- [7] Hewlett Packard, *HP 8753C Network Analyzer, operating Manual*.
- [8] ETSI TR 100 028-1 v1.4.1, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum matter; uncertainty in the measurement of mobile radio equipment charac-

teristics", p. 94, Dec. 2001.

[9] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, pp. 296-303, 1982.

[10] 이기학 등, 전자파 및 안테나공학, p. 87, 광문각, 1994년 1월.

박 정 규



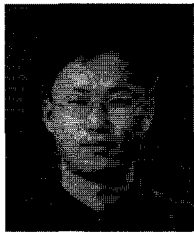
1990년 2월: 고려대학교 물리학과
(이학사)
1996년 2월: 고려대학교 물리학과
(이학석사)
1996년 9월~현재: 전파연구소 이천
분소 책임연구원
[주 관심분야] 안테나 측정 및 설계,
측정 불확도

조 진 영



2000년 2월: 정보통신부 전파연구소
이천분소
2005년 2월: 충주대학교 전자통신공
학 (공학석사)
2000년 2월~현재: 정보통신부 전파
연구소 이천분소
[주 관심분야] EMI, EMS 측정 및
안테나교정

정 동 찬



1996년 2월: 부경대학교 물리학과
(이학사)
1997년 12월: 정보통신부 중앙전파
관리소
2000년 8월~현재: 정보통신부 전파
연구소
[주 관심분야] 안테나 및 전자파측
정장비 교정