

30~1,000 MHz 대역의 안테나 교정 시험장 평가용 시험 안테나의 특성

조원서 · 박창열 · 박정규* · 최영오*
한국산업기술시험원 정보통신팀 · *정보통신부 전파연구소

I. 서 론

방사성 EMI(Electromagnetic Interference)를 측정하는데 있어서 시험품으로부터 방사된 전자장 세기(field strength)는 측정 수신기의 전압과 사용된 안테나의 안테나 인자(AF: Antenna Factor)로 결정되며, 결정된 측정 결과는 또한 측정된 시험장의 성능과 매우 밀접한 관계가 있다.

현재의 측정용 안테나는 측정 자동화를 주축으로 하여 시험 시간을 단축시키는데 초점을 맞추고 있어 바이코니컬(biconical)이나 대수주기(log-periodic), 바이로그(bilog) 등과 같은 광대역 안테나를 주로 사용하고 있다. 그러나 이들 광대역 안테나는 정확한 해석이 어렵기 때문에 측정의 정밀도를 높이기 위해서 안테나 인자를 교정하는 방법을 향상시킬 필요가 있으며, 이는 안테나 교정 시험장의 성능과 밀접한 관계를 가지고 있어 안테나와 시험장은 분리되어 독립적으로 평가될 수 없고 동시에 고려되어야 한다. 따라서 정확한 해석이 용이한 안테나를 이용한 정밀한 시험장 평가 방법의 개발이 필요하다.

안테나 교정을 위한 시험장을 평가하기 위해서는 정밀한 이론 시험장 감쇠량의 계산이 필요하고, 이를 위해서는 정확하게 모델링이 된 시험 안테나가 필요하다. 따라서 넓은 주파수 대역에 걸쳐 안정된 임피던스를 제공하는 180° 하이브리드 발룬을 이용하여 30~1,000 MHz 대역의 다이폴 안테나를 이론적으로 분석하고 제작하였다. 제작된 안테나의 발룬

특성을 측정하여 이론 시험장 감쇠량의 계산에 적용하였고, 국내 안테나 교정 야외 시험장 및 방사성 방해파 측정용 야외 시험장에서 측정된 결과와 비교하여 적합성을 평가하였다.

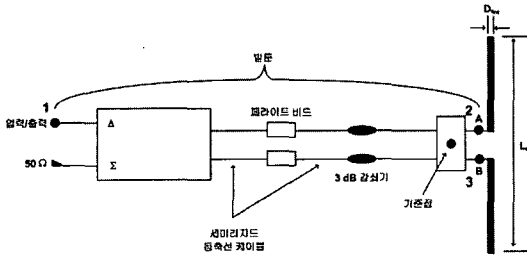
II. 시험 안테나 설계 및 제작

2-1 안테나의 특성 및 구조

기존 안테나에 사용되는 발룬은 마그네틱 코어를 이용한 4:1 트랜스포머 발룬^[1] 또는 동축 케이블을 이용한 발룬^[2]을 사용했으나, 발룬을 포함한 안테나의 해석이 어렵고 사용 주파수 대역이 좁아서 사용성에 제한이 있는 문제가 있다. 정밀 측정용 안테나로 사용하기 위해서는 사용 주파수 대역에서의 입력 임피던스의 예측이 가능한 발룬이 사용되어야 하는데, 180° 하이브리드 커플러를 이용한 발룬은 이러한 측면에서 좋은 적응성을 보여주고 있다^{[3],[4]}.

안테나의 교정에 사용되는 안테나는 이론 시험장 감쇠량의 정확한 계산을 수행하기 위해서 이론 해석이 용이해야 하고 제작이 쉬우며 발룬의 영향이 적고 발룬의 정의가 명확해야 하며 전 지향성 복사 패턴을 가져야 한다. 따라서 180° 하이브리드 커플러를 적용한 발룬에 연결된 자유 공간 공진 다이폴 안테나를 시험 안테나로서 선택하였으며, [그림 1]에 그 구조를 나타내었다.

주파수 f 에서 시험 안테나의 총 길이 L_a 는 다음 식



[그림 1] 시험 안테나의 구조

(1)로부터 구할 수 있다.

$$X_a(f, R_{we}) = 0 \quad (1)$$

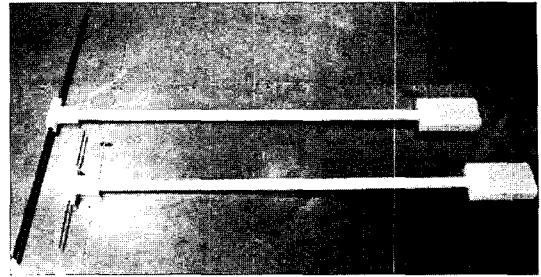
여기서, X_a 는 다이폴 안테나 임피던스의 허수부를 나타내고, R_{we} 는 안테나 소자의 반경을 나타낸다. X_a 는 다음 식 (2)에 의해 주어진다^[5].

$$X_a = \frac{\eta}{4\pi} \times [2Si(kL_a) + \cos(kL_a) \times (2Si(kL_a) - Si(2kL_a)) - \sin(kL_a)(2Ci(kL_a) - Ci(kL_a)) - Ci(2kR_{we}^2/L_a)] \times \sin^{-2}(kL_a/2) \quad (2)$$

여기서, $\eta=377 \Omega$, $k=2\pi/\lambda_0$, λ_0 : 진공 중의 파장, $Si(x) = \int_0^x \frac{\sin t}{t} dt$, $Ci(x) = \int_{-\infty}^x \frac{\cos t}{t} dt$ 이다.

안테나의 발룬은 합 포트 Σ 가 항상 특성 부하 임피던스(50 Ω)로 종단되고 차 포트 Δ 는 시험 안테나의 입력/출력 단자로 된 180° 3 dB 하이브리드 커플러를 이용하였으며, SMA 커넥터를 통하여 하이브리드 커플러와 평형 단자 A와 B에 세미리지드 동축 케이블을 이용하여 연결하였다. 발룬 및 연결 케이블의 공통 모드 전류의 유도를 제한하기 위하여 케이블 주위에 페라이트 비드를 사용하였으며 AB 단자에서 100 Ω 의 임피던스를 보다 일정하게 확립하기 위하여 3 dB 감쇠기를 사용하였다.

안테나 소자와 발룬의 연결은 SMB의 소켓 타입으로 제작하여 탈부착이 용이하게 함으로써 Back-to-



[그림 2] 제작된 시험 안테나

Back 방식의 발룬 특성 측정과 시험장 감쇠량 측정 시 발룬과 발룬을 직접 연결하여 기준 레벨을 설정할 때 탈부착이 쉽도록 제작하였다. 안테나 소자의 반경은 160 MHz까지는 5 mm, 180 MHz부터 1,000 MHz까지는 1.5 mm로 하였다.

제작된 안테나를 [그림 2]에 나타내었다.

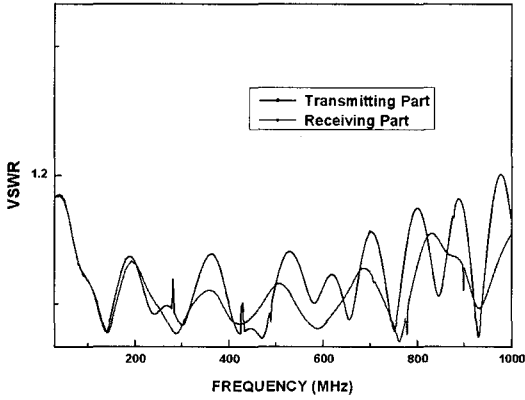
2-2 안테나의 특성 평가

이상적인 무손실 발룬은 [그림 1]의 입력/출력(1번 단자) 및 A(2번 단자)와 B(3번 단자) 세 개의 모든 단자가 특성 임피던스로 종단된 경우, 진폭은 정확히 같고 위상은 180° 차이가 나는 A와 B 단자에서 S-파라미터를 측정하여 그 특성을 알 수 있다. 측정된 S-파라미터를 이용하면 A와 B 단자 사이의 임피던스 Z_{AB} 를 식 (3)을 이용하여 구할 수 있으며, 이 값은 안테나의 특성을 반영한 이론 시험장 감쇠량의 계산에 필요하다.

$$Z_{AB} = \frac{1 - S_{22}S_{33} + S_{23}S_{32} - S_{23} - S_{32}}{(1 - S_{22})(1 - S_{33}) - S_{23}S_{32}} \cdot 100 = R_{AB} + jX_{AB} \quad (3)$$

시험 안테나 발룬의 VSWR은 1.1 이내의 값을 나타내야 하며 측정 결과는 [그림 3]에서 나타난 대로 거의 전 영역에 걸쳐서 위의 값을 만족하고 있다.

시험 안테나 발룬의 평형 및 위상 변화는 다음 식



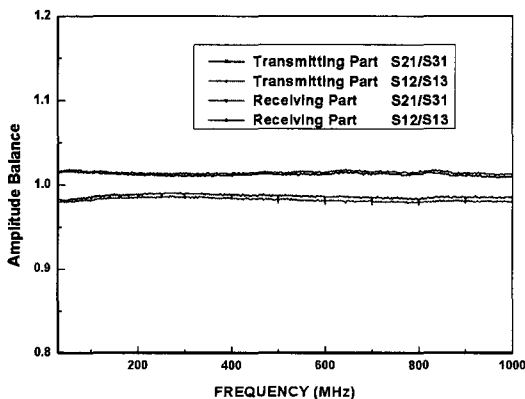
[그림 3] VSWR

(4)를 고려하여 검증할 수 있다.

$$\frac{S_{12}}{S_{13}} = \frac{S_{21}}{S_{31}} = r_b e^{j\phi_b} \quad (4)$$

다음 식 (5)가 성립할 경우, A, B 단자에서의 진폭 평형은 ± 0.4 dB 이내의 값을 만족하게 되며, 측정 결과는 [그림 4]에서 나타난 대로 송신과 수신에 사용된 발룬의 특성이 조금 차이가 나기는 하지만 전 영역에 걸쳐서 식 (5)를 만족하고 있다.

$$0.95 < r_b < 1.05 \quad (5)$$

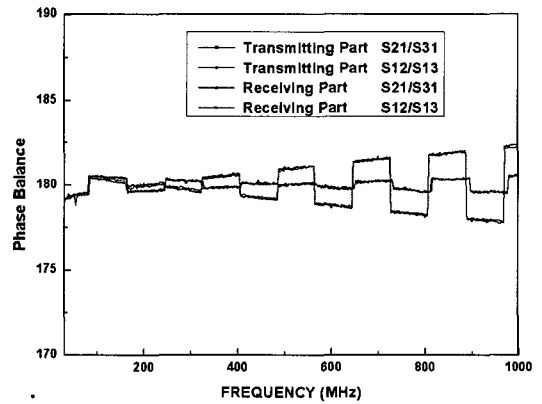


[그림 4] 진폭 평형

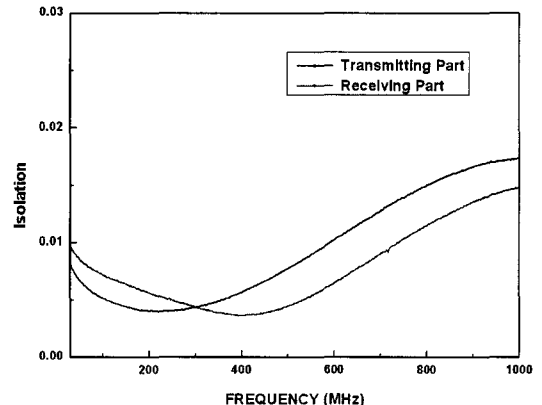
다음 식 (6)이 성립할 경우, A, B 단자에서의 위상 평형은 $\pm 2^\circ$ 이내의 값을 만족하게 되며, 측정 결과는 [그림 5]에 나타난 대로 송신과 수신에 사용된 발룬의 특성이 조금 차이가 나기는 하지만 전 영역에 걸쳐서 식 (6)을 만족하고 있다.

$$178^\circ < \left| \frac{180\phi_b}{\pi} \right| < 182^\circ \quad (6)$$

A와 B 단자 사이의 격리도는 두 단자 사이의 S 파라미터 값 $|S_{23}|$ 및 $|S_{32}|$ 의 값이 0.05보다 작을 때 26 dB 이상의 값을 보장하며 [그림 6]에서 나타난



[그림 5] 위상 평형



[그림 6] 격리도

대로 전 영역에 걸쳐서 조건을 만족하고 있다.

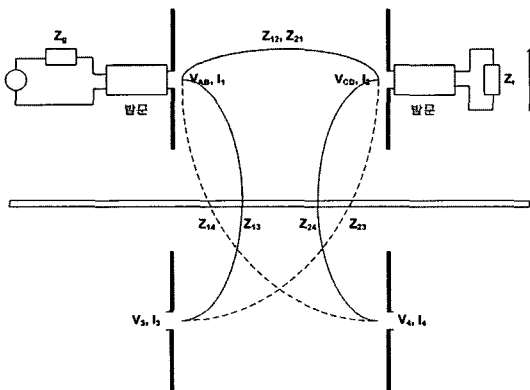
이상의 제작된 시험 안테나의 발룬의 4가지 특성이 모두 전 영역에 걸쳐 기준을 잘 만족하고 있으므로 식 (3)에서 임피던스 Z_{AB} 를 구한 결과도 실제 제작된 안테나의 특성을 잘 반영하고 있다고 할 수 있다.

III. 안테나 시험장 평가

3-1 시험장 감쇠량의 이론적 해석

방사성 방해파의 측정에 사용하는 야의 시험장은 신뢰성 있는 측정을 위해서 시험장 감쇠량의 이론값과 측정 결과의 편차가 ± 4 dB^[6] 이내에 있어야 하고, 안테나 교정용 야의 시험장의 경우 ± 1 dB 이내에 있어야 한다. 즉, 이론적인 시험장 감쇠량을 기준으로 실제로 사용될 시험장에서 측정된 시험장 감쇠량을 비교함으로써 시험장 인근에 반사물체의 존재, 측정 시스템의 이상 유무, 부적절한 접지면 반사 등을 알 수 있으며, 시험장의 적합성 여부를 판단할 수 있다.

[그림 7]은 시험장 감쇠량을 계산하기 위하여 반사면 상에서 안테나의 상호 결합, 급전 단자의 전압 등을 표시한 그림이고, 시험장 감쇠량 SA_c 는 다음 식



[그림 7] 반사면 상의 안테나의 상호 결합, 급전 단자의 전압의 정의

(7)로 나타난다^[7].

$SA_c =$

$$\frac{(Z_{AB} + Z_{11} + \rho Z_{13})(Z_{CD} + Z_{22} + \rho Z_{24}) - (Z_{12} + \rho Z_{14})^2}{(Z_{12} + \rho Z_{14})(Z_{AB} + Z_{CD})} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 도체면의 복소반사계수이고 이상적인 경우 -1 이 된다. Z_{11} 과 Z_{22} 는 자유공간으로 방사하는 안테나의 입력 임피던스이며, 이들 임피던스의 허수 부분은 식 (2)에서 $X_{11}=X_{22}=X_a$ 로부터 계산될 수 있으며 실수부분 $R_{11}=R_{22}=R_a$ 는 다음 식 (8)에 의해 계산된다.

$$R_a = \frac{\eta}{2\pi} [\gamma + \ln(kL_a) - Ci(kL_a) + \frac{1}{2} \sin(kL_a) \times (Si(2kL_a) - 2Si(kL_a)) + \frac{1}{2} \cos(kL_a) \times (\gamma + \ln(kL_a/2) + Ci(2kL_a) - 2Ci(kL_a))] \times \sin^{-2}(kL_a/2) \quad (8)$$

상호 임피던스 $Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{24}$ 는 로렌츠 가역 정리를 이용하여 계산할 수 있다^[8].

$Z_{nm} = R_{nm} + jx_{nm}$ ($n, m : 1 \sim 4$)인 경우, 실수부는 다음 식 (9)에 의해 주어진다.

$$R_{nm} = \frac{\eta}{4\pi} \times [2(2Ci(kr_{nm}) - Ci(ks_3) - Ci(ks_4)) + \cos(kL_a) \times (2Ci(kr_{nm}) + Ci(ks_1) + Ci(ks_2) - Ci(ks_3) - 2Ci(ks_4)) + \sin(kL_a) + \sin(kL_a) \times (Si(ks_1) - Si(ks_2) - 2Si(ks_3) + 2Si(ks_4))] \times \sin^{-2}(kL_a/2) \quad (9)$$

허수부는 다음 식 (10)과 같다.

$$x_{nm} = \frac{-\eta}{4\pi} \times [2(2Si(kr_{nm}) - Si(ks_3) - Si(ks_4)) + \cos(kL_a) \times (2Si(kr_{nm}) + Si(ks_1) + Si(ks_2) - 2Si(ks_3) - 2Si(ks_4)) - \sin(kL_a) \times (Si(ks_1) - Ci(ks_2) - 2Ci(ks_3) + 2Ci(ks_4))] \times \sin^{-2}(kL_a/2) \quad (10)$$

여기서 r_{nm} 은 안테나 n 과 m 사이의 중심거리이며, s_1, s_2, s_3, s_4 의 값은 다음 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 s_1 &= \sqrt{r_{nm}^2 + L_a^2} + L_a \\
 s_2 &= \sqrt{r_{nm}^2 + L_a^2} - L_a \\
 s_3 &= \sqrt{r_{nm}^2 + (L_a/2)^2} + L_a/2 \\
 s_4 &= \sqrt{r_{nm}^2 + (L_a/2)^2} - L_a/2
 \end{aligned} \tag{11}$$

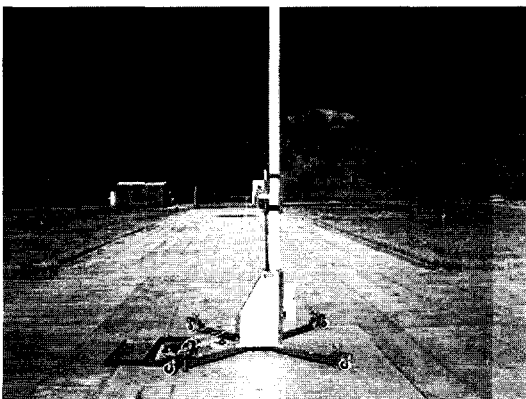
식 (7)의 이론 시험장 감쇠량에 식 (3)에서 구한 Z_{AB} 의 값을 대입하면 제작한 실제 안테나의 특성을 반영한 시험장 감쇠량의 값을 구할 수 있다.

3-2 실험 및 결과

시험장 감쇠량은 측정에 사용되는 안테나를 제외하고 각 안테나에 연결되는 케이블 및 감쇠기를 직접 연결하였을 때 수신기의 측정값과 각 케이블 및 감쇠기를 송·수신 안테나에 연결하여 동일한 신호 발생기의 출력을 인가하였을 때 수신기의 측정값의 차이를 통하여 실험값을 얻을 수 있다.

[그림 8]은 위와 같은 방법으로 시험장 감쇠량을 측정하는 모습을 보여준다.

[그림 9]에는 안테나 교정용 야외 시험장에서의

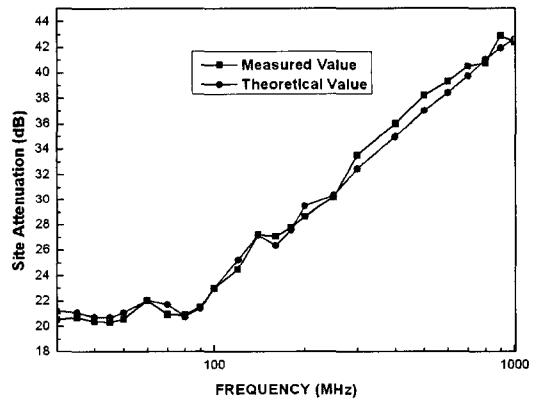


[그림 8] 시험장 감쇠량 측정 장면

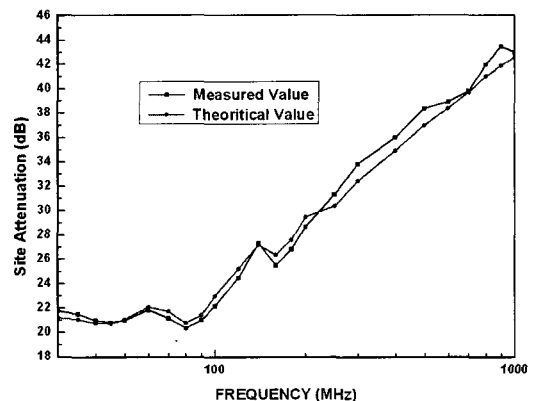
감쇠량 계산값과 실제 측정값의 비교 결과를 나타내었다.

측정치와 계산값 사이의 차이는 300 MHz를 제외하고는 ± 1 dB 이내로 일치하고 있다.

[그림 10]에는 방사성 방해파 측정용 야외 시험장에서의 감쇠량 계산값과 실제 측정값의 비교 결과를 나타내었고, 측정치와 계산값의 차이는 500 MHz 및 900 MHz 대역을 제외하고는 ± 1 dB 이내로 일치하고 있다.



[그림 9] 안테나 교정용 야외 시험장에서 측정값과 이론값의 시험장 감쇠량 비교



[그림 10] 방사성 방해파 측정용 야외 시험장에서의 측정값과 이론값의 시험장 감쇠량 비교

또한 다음의 높이 특성 및 주파수 특성 중의 한 가지를 만족하여야 한다. 높이 특성이란 300, 600, 900 MHz의 세 주파수 지점에서 첫 번째 시험장 감쇠량의 최대값이 나타나는 높이를 말하며, 이론값과 측정값의 차이가 ± 0.05 m 이내여야 한다. 안테나 교정용 야외 시험장에서의 측정 결과를 다음 <표 1>에, 방사성 방해파 측정 야외 시험장에서의 측정 결과를 <표 2>에 나타내었다.

주파수 특성은 300 MHz/2.65 m, 600 MHz/1.3 m, 900 MHz/1.7 m 지점을 기준으로해서 주파수를 변동시켜서 시험장 감쇠량의 최대값이 나오는 주파수를 말하며, 이론값과 측정값의 차이가 ± 0.03 f 이내여야 한다. 안테나 교정용 야외 시험장에서의 측정 결과를 다음 <표 3>에, 방사성 방해파 측정 야외 시험장에서의 측정 결과를 <표 4>에 나타내었다.

IV. 결 론

30~1,000 MHz 대역의 안테나의 교정을 위한 시험장의 적합성을 평가하기 위한 시험 안테나의 특성

<표 1> 안테나 교정용 야외 시험장 감쇠량의 높이 특성

주파수 (MHz)	이론 높이 (m)	측정 높이 (m)	차이 (m)
300	2.68	2.67	0.01
600	1.19	1.24	-0.05
900	1.69	1.73	-0.04

<표 2> 방사성 방해파 측정용 야외 시험장 감쇠량의 높이 특성

주파수 (MHz)	이론 높이 (m)	측정 높이 (m)	차이 (m)
300	2.68	2.63	0.05
600	1.19	1.24	-0.05
900	1.69	1.72	-0.03

<표 3> 안테나 교정용 야외 시험장 감쇠량의 주파수 특성

주파수(MHz) / 높이(m)	이론 주파수 (MHz)	측정 주파수 (MHz)	차이
300/2.65	295.3	298	-0.009f
600/1.30	594	594.7	0.001f
900/1.70	910.5	907.5	-0.003f

<표 4> 방사성 방해파 측정용 야외 시험장 감쇠량의 주파수 특성

주파수(MHz) / 높이(m)	이론 주파수 (MHz)	측정 주파수 (MHz)	차이
300/2.65	295.3	297.4	-0.007f
600/1.30	594	592.6	0.002f
900/1.70	910.5	912.1	-0.002f

을 검토하였다. 이를 위해서 30~1,000 MHz 대역의 다이폴 안테나를 이론적으로 분석하고 제작하였으며, 제작된 안테나의 특성을 평가하여 기준 조건을 모두 만족시키는 것을 확인하였다. 또한 측정된 데이터를 시험장 감쇠량 계산에 반영하고 국내 안테나 교정 야외 시험장 및 방사성 방해파 측정용 야외 시험장에서 실험하여 이론치와 측정값을 비교하였다. 그 결과, 이론치와 측정값의 차이가 안테나 교정용 야외 시험장의 경우는 300 MHz, 방사성 방해파 측정용 야외 시험장은 500 MHz 및 900 MHz 대역을 제외하고는 ± 1 dB 이내로 일치하는 것을 확인하였고, 높이 특성 및 주파수 특성을 모두 만족하는 것을 확인하였다. 위의 측정 결과는 안테나의 특성과 시험장의 특성이 모두 포함된 결과 값이므로 ± 1 dB를 벗어나는 부분에 대해서는 시험장의 반사 접지면의 크기 또는 flatness 등을 다시 고려하고, 안테나 제작 측면에서의 보정 등을 포함한 보다 정밀한 분석이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] J. Van Nierop, "Evolution of a 4:1 impedance transforming balun", *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, vol. 30, Issue 4, pp. 750-751, Jul. 1982.
- [2] ANSI C63.5, "Radiated Emission Measurements in Electromagnetic Interference Control - Calibration of Antennas(9 kHz to 40 GHz), 1998.
- [3] R. G. Fitzgerrell, "Standard linear antennas, 30 to 1000 MHz", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-32, no. 4, pp. 307-308, 1990.
- [4] Won-Seo Cho, Motohisa Kanda, Ho-Jung Hwang, and Michael W. Howard, "Validation of an EMC test site from 30 to 300 MHz using a disk-loaded thick cylindrical dipole antenna", *IEEE Trans. Elec-tromag. Compat.*, vol. 42, no. 2, pp. 1-10, May 2000.
- [5] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory : Analysis and Design*.
- [6] ANSI C63.4, "Measurement of Radionoise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz", 2003.
- [7] Sigiura A., "Formulation of normalized site attenuation in terms of antenna impedances", *Trans. IEEE on EMC*, vol. EMC-32, no. 4, pp 257-263, 1990.
- [8] Brown & King, "High-frequency models in antenna investigations", *Proc. IRE*, vol. 22, no. 4, pp. 457-480, Apr. 1934.

≡ 필자소개 ≡

조 원 서



1991년 8월~현재: 한국산업기술시험원
수석연구원
1999년 11월: 미국표준연구원(NIST) 방
문연구원
2000년 8월: 중앙대학교 전자공학과 (공
학박사)
2004년 9월~현재: CISPR/F, CISPR/H

Project Leader/Expert

[주 관심분야] EMC국제 표준화, 안테나 설계 및 측정 기술

박 정 규



1990년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학
사)
1996년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학
석사)
1996년 9월~현재: 전파연구소 이천분
소 책임연구원
[주 관심분야] 안테나 측정 및 설계, 측

정 불확도

박 장 열



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공
학사)
2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공
학석사)
2003년 3월~2005년 10월: LG전자 MC
사업본부
2005년 11월~현재: 한국산업기술시험

원 정보통신팀

[주 관심분야] 전자과 측정 기술, 안테나 설계 및 측정 기술

최 영 오



1994년 12월~2003년 4월: 정보통신부
전파연구소
1998년 9월~1994년 11월: 정보통신부
지식정보센터
2002년 2월: 서울산업대학교 전자공학
과 (공학사)
2005년 8월: 경희대학교 테크노경영대

학원 정보통신공학과 (공학석사)

2003년 4월~현재: 전파연구소 이천분소

[주 관심분야] EMC 측정 분야, 안테나 측정 및 설계