

야외시험장의 시험장감쇠량

(Site Attenuations of an Open Area Test Site)

金基采*, 鄭然春*, 金丁煥*, 鄭樂三*

(Ki Chai Kim, Yeon Choon Chung, Jeong Hwan Kim, and Nak Sam Chung)

要 約

본 논문에서는 야외시험장의 시험장감쇠량을 송·수신 안테나 간의 상호임피던스를 고려하여 계산하였고, 80 MHz 이하에서의 FCC 규격치와 실험치 사이의 차이 발생 원인에 대해서도 검토하고 있다. FCC의 규격치와 실험치 사이의 차이 발생원인은 FCC의 측정규정에 기인한 것임을 알았고, FCC의 측정규정을 적용하는 한 FCC의 규격치는 본 논문에서 제안하는 이론곡선으로 수정되어야 함을 알았다.

Abstract

In this paper the theoretical analysis of the site attenuation was made on the concept of mutual impedance of antennas and the cause of characteristic hump in the site attenuation curve below 80 MHz is explained. The deviation between the FCC site attenuations and the experimental results of an ideal open area test site at low frequencies (below 80 MHz) was found to be the mutual coupling effects of the antennas under the FCC's measurement conditions. It seems desirable that the site attenuations curve of FCC document be revised to the theoretical curves presented in this paper as long as the FCC's measurement conditions are to be applied.

I. 서 론

전자파의 이용분야가 증가함과 동시에 최근의 전기전자기술 응용분야의 급속한 발전은 그 부산물로써 잠재적인 전자파 방해원의 증가를 초래하고 있으며, 악화 되어가는 전자파 환경에 질서를 부여하고 조화를 이루도록 하는 전자파 환경기술(EMC, EMI/EMC)에 대한 관심이 높아지고 있다.¹⁻³⁾

전자파 환경기술 연구의 기본과제는 일반적으로 방해전자파의 발생을 억제하는 연구와 주어진 방해전자파에 대하여 참아내는 능력(내성)을 부여하는

연구로 대별할 수 있는데, 이와같은 EMI/EMC 연구에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 방해전자파의 정밀정확한 측정이다. 즉, 방해원의 잡음을 정확히 측정하여야만 전자파환경을 정확히 평가할 수 있으며, 대책도 세울 수 있기 때문이다. 이러한 EMI/EMC 측정에 있어서의 측정 기본 시설로서는 ① 전자파 반무향실(semianechoic chamber), ② 야외시험장(open area test site, OATS), ③ 전자파 차폐실(shielded enclosure)과 이들 측정시설에서 사용할 각종 EMI/EMC 측정장비들로 크게 분류할 수 있다.

본 논문에서는 국가 측정기준 시설의 확립을 목적으로 방사성 방출 잡음을 측정하는 측정시설의 하나인 야외시험장의 특성에 대하여 이론적으로 검토하고 있다. 야외시험장의 적합성은 두 지점간의 전달

*正會員, 韓國標準研究所

(Korea Standards Research Institute)

接受日字: 1990年 3月 8日

전력의 손실로서 정의되는 시험장감쇠량(site attenuation)을 평가함으로써 시험장으로서의 적합성을 평가하는 것이 일반적이며, 지금까지 여러 연구자들에 의해 많은 연구결과가 보고되고 있다.^[4-7] 그리고, 여기에 관한 관련 규격은 국제적으로는 CISPR (comite international special des perturbations radioelectriques, 국제 무선장해 특별위원회)가 있으며, 나라에 따라서는 미국의 FCC (federal communications commission, 연방통신위원회), 독일의 VDE (verband deutscher elektrotechnicker, 서독 전기기술협회)가 대표적이다.

본 논문에서 검토한 시험장감쇠량은 미국의 FCC OET-55 규격을 참고로 하였으며,^[8] 수평편파에 대해서만 검토하고 있다. 실제적으로는 수평, 수직 양편파에 대하여 시험장감쇠량을 평가하여야만 정확한 시험장 특성을 알 수 있으나, FCC OET-55 규격에서는 수평편파에 대해서만 언급하고 있으므로 본 논문에서도 수평편파에 한해서만 검토하기로 한다. 시험장감쇠량의 계산에는 송·수신안테나의 상호 임피던스를 고려하였다. 상호 임피던스의 계산에는 잘 알려져 있는 기전력법(electromotive force method, EMF 법)을 사용하였으며, 시험장감쇠량의 계산결과는 미국립표준기술원(NIST)의 측정 결과와도 비교하였다. 또한, 낮은 주파수영역(약 80 MHz 이하)에서 FCC 규격치와 실험치와는 잘 맞지 않는다고 알려져 있는 지금까지의 일반적인 견해에 대해서도 검토하고 있다.

그 결과, 본 논문에서 계산한 시험장감쇠량은 미국립표준기술원의 측정결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제시하고 있는 야외시험장의 시험장감쇠량 이론곡선은 국내의 기준 이론곡선으로서의 역할을 담당할 수 있게 되었다. 또한, 낮은 주파수영역(80 MHz 이하)에서 FCC 규격치와 실험치와 차이가 발생하는 문제는 검토 결과 FCC의 측정 규정으로 인한 것임이 명백해졌다. 따라서, FCC의 측정규정을 적용하는 한 낮은 주파수영역에서의 시험장감쇠량 이론곡선은 본 논문에서 제안하는 이론곡선으로 수정되어야 한다고 생각한다.

II. 이론해석

1. 구조와 좌표계

그림 1은 야외시험장의 구조와 좌표계를 나타낸다. 무한히 넓은 완전도체의 평면(ground plane) 위에 반경 a, 길이 2ℓ₁인 송신안테나(#1) 및 2ℓ₂인 수신안테나(#2)가 각각 높이 h₁ 및 h₂의 위치에 간격 d로 배치되어 있다.

송신안테나에는 임피던스 Z_s, 내부 기전력이 V_s인 신

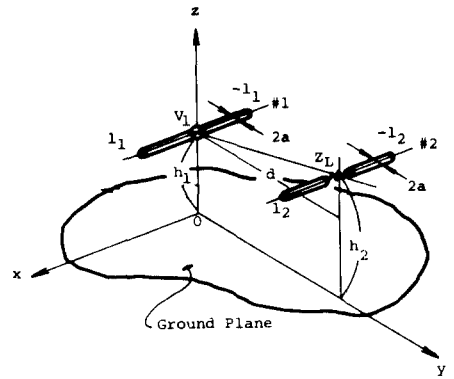


그림 1. 야외시험장의 구조와 좌표계
Fig. 1. General geometry of an open area test site.

호발생기가 접속되어 있고, 수신안테나는 내부 임피던스 Z_r인 수신기가 연결되어 있다.

2. 시험장감쇠량의 정의

그림 1과 같은 야외시험장의 시험장감쇠량은 무한 집지평면 위에 놓여있는 송·수신안테나 사이의 전달전력의 손실로서 정의한다. 즉, 전력감쇠로서 정의한 시험장감쇠량에 대응하는 IEC document^[9]의 시험장감쇠량 S_p는 다음과 같다(그림 2 참조).

$$S_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{Re\{Z_{11}\} |I_1|^2}{Re\{Z_L\} |I_2|^2} \quad (1)$$

- 단, P_t : 송신안테나 #1에 공급되는 입력전력
- P_r : 수신안테나 #2에 Z_L이 연결 되었을때 수신안테나에 유기되는 유기전력
- Z₁₁ : 수신안테나 #2에 Z_L이 연결 되었을 때 송신안테나 #1의 입력 임피던스
- Z_L : 수신안테나 #2에 연결될 부하 임피던스
- I₁ : 송신안테나 단자에서의 전류
- I₂ : 수신안테나 단자에서의 전류
- Re(x) : 복소변수 X의 실수부

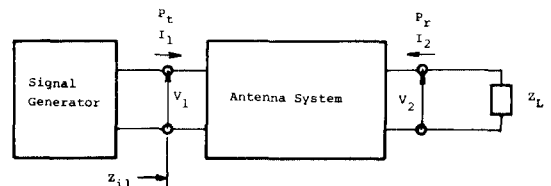


그림 2. IEC Document에 대응하는 시험장감쇠량 평가용 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit for the method described in the IEC document.

실제적으로는 전력보다 전압을 측정하는 것이 편리하므로, 전압으로 대체한 시험장감쇠량을 정의할 수 있다. 즉, 전압으로 대체한 시험장감쇠량에 대응하는 FCC document⁽⁶⁾의 시험장감쇠량 S_v 는 다음과 같다(그림 3 참조).

$$S_v = \frac{|V_c|}{|V_a|} \quad (2)$$

단, V_a : 신호발생기로부터 송·수신안테나를 거쳐서 수신기에 나타나는 전압(그림3. (b)).

V_c : 신호발생기와 수신기를 직접 연결했을 때 수신기에 나타나는 전압(그림3. (a)).

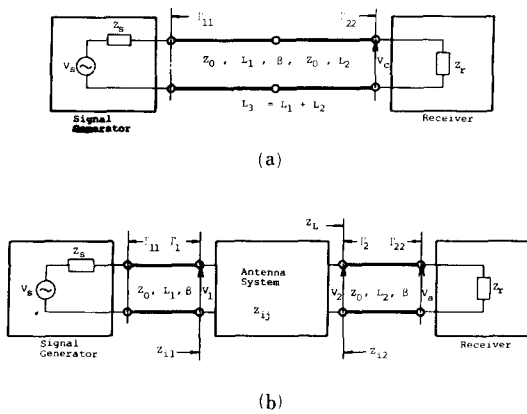


그림 3. FCC document에 대응하는 시험장감쇠량 평가용 등가회로

- (a) 케이블이 직접연결된 상태
- (b) 케이블이 송·수신안테나에 연결된 상태

Fig. 3. Equivalent circuit for the method described in the FCC document.

- (a) Cables are directly connected excluding the antennas.
- (b) Cables are connected to the transmitting and receiving antennas.

식(2)의 V_c 및 V_a 는 그림 3의 등가회로를 참고로 하면 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_c = \frac{V_s (1 - \Gamma_{11}) (1 + \Gamma_{22}) e^{-j\beta L_3}}{2 (1 - \Gamma_{11} \Gamma_{22} e^{-j2\beta L_3})} \quad (3)$$

$$V_a = \frac{Z_m V_s (1 + \Gamma_1) (1 - \Gamma_{11}) (1 - \Gamma_2) (1 + \Gamma_{22}) e^{-j\beta L_1 + L_2}}{4 Z_{11} (1 - \Gamma_1 \Gamma_{11} e^{-j2\beta L_1}) (1 - \Gamma_2 \Gamma_{22} e^{-j2\beta L_2})} \quad (4)$$

여기서, β 및 $L_1, L_2 (L_3 = L_1 + L_2)$ 는 각각 전송선로의 전파정수 및 전송선로의 길이이다. 또한 Γ_{11}, Γ_{22} 및 Γ_1, Γ_2 는 각각 신호발생기의 반사계수, 수신기의

반사계수 및 송신안테나의 반사계수, 수신 안테나의 반사계수이다.

식(3), 식(4)를 식(2)에 대입하면, S_v 는 다음과 같이 표현된다.

$$S_v = \frac{(Z_{11} + Z_0) (Z_{12} + Z_0)}{2 Z_0 Z_m} \quad (5)$$

단, 신호발생기와 수신기는 전송선로에 정합이 취해져 있다고 가정한다.

식(1), 식(5)에서 Z_{11}, Z_{12} 및 Z_m 은 안테나 계로부터 결정되며 다음 절에서 상세히 고찰하도록 한다.

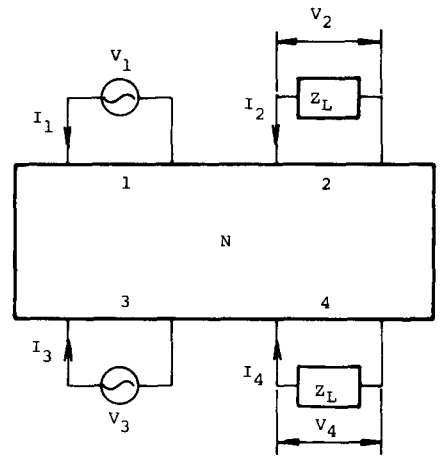


그림 4. 4단자 회로망 표현

Fig. 4. Equivalent 4-port network for fig. 1.

3. 안테나 계의 해석

앞 절의 식(1), 식(5)에서 Z_{11}, Z_{12} 및 Z_m 은 안테나 계의 특성으로 부터 결정되며, 이들을 구체적으로 평가 해야할 필요가 있다.

먼저, 그림 1의 야외시험장에서 영상법을 적용하면 완전 자유공간 속에 놓여진 4개의 안테나로 구성되는 안테나 계를 생각할 수 있다. 이 안테나 계의 급전점과 수신점에 착목하면, 그림 1의 안테나계는 그림 4와 같은 4단자 회로망으로 표현할 수 있다. 여기서 V_1, V_2, V_3, V_4 및 I_1, I_2, I_3, I_4 를 각각 단자1, 단자2, 단자3, 단자4의 전압 및 전류라고 하면, 각 단자의 전압과 전류의 관계는 임피던스 파라미터를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

안테나 계의 대칭성(symmetry) 및 상반성(reciprocity)으로 부터 식(6)은 다음과 같은 회로 방정식으로 간략화 된다.

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= (Z_{11} - Z_{13})I_1 + (Z_{12} - Z_{14})I_2 \\ V_2 &= (Z_{12} - Z_{14})I_1 + (Z_{22} - Z_{24})I_2 = -I_2 Z_L \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서 Z_{11}, Z_{22} 는 각각 안테나 #1, #2의 자기 임피던스이며, $Z_{ij}(i \neq j, i, j = 1, 2, 3 \text{ or } 4)$ 는 안테나 #i와 #j와의 상호 임피던스이다.

식(7)로 부터 안테나 #1, #2의 입력 임피던스 Z_{11}, Z_{12} 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{11} = (Z_{11} - Z_{13}) + (Z_{12} - Z_{14}) \frac{I_2}{I_1} \quad (8a)$$

$$Z_{12} = (Z_{22} - Z_{24}) + (Z_{21} - Z_{23}) \frac{I_1}{I_2} \quad (8b)$$

여기서, 전류비는 각각 다음과 같다.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{Z_{14} - Z_{12}}{Z_{22} - Z_{24} + Z_L} \quad (9a)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_{14} - Z_{12}}{Z_{11} - Z_{13} + Z_L} \quad (9b)$$

또한, 수신안테나 #2의 단자전압 V_2 는 식 (7)로 부터

$$\begin{aligned} V_2 &= [(Z_{12} - Z_{14}) - Z_{24} \frac{I_2}{I_1}] I_1 \\ &= Z_m I_1 \end{aligned} \quad (10)$$

이다.

여기서, Z_m 은 안테나 계의 총임피던스(total impedance)이며,

$$Z_m = (Z_{12} - Z_{14}) \left(1 - \frac{Z_{24}}{Z_{22} - Z_{24} + Z_L}\right) \quad (11)$$

이다.

이상에서 살펴본 안테나 #1, #2의 입력임피던스 Z_{11}, Z_{12} 및 총임피던스 Z_m 은 시험장감쇠량의 식(1), 식(2)의 계산에서 사용된다.

식(7)에서 나타나는 안테나의 자기 및 상호 임피던스는 기전력법(electromotive force method)을 이용하면 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$Z_{ij} = \frac{-1}{I_i(0)I_j(0)} \int_s E_{i,j} \cdot J_i^* ds \quad (12)$$

단, $i, j : 1, 2, 3 \text{ or } 4$

$E_{i,j}$: #j의 전류에 의하여 #i에 생성되는 전계

J_i : #i에 흐르는 전류밀도 ($= I_i/2\pi a$)

S : #i, #j의 표면

$I_i(0), I_j(0)$: 급전점 또는 수전점 전류

*: 복소공액

식 (12)에서 전류분포는 잘 알려져 있는 다음과 같은 정현파 함수를 사용한다.

$$\begin{aligned} I_i(x) &= I_m \text{sinc}(l_i - |x|), \quad |x| \leq l_i \\ &(i=1, 2, 3 \text{ or } 4) \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 전류분포로 부터 생성되는 전계를 구하여 이를 임피던스의 계산식 식(12)에 대입하면 Z_{ij} 를 구할 수 있는데 구체적인 결과식은 부록을 참조하기 바란다.

III. 수치계산 결과 및 검토

그림 1의 야외시험장에 관한 전자기적 특성을 앞장의 이론식을 사용하여 계산한 결과를 다음에 나타낸다. 여기서는, FCC의 야외시험장에 관한 OET-55 규격¹⁾에 따라서 검토한 결과를 제시한다. 수치계산에 사용한 안테나는 반경이 0.003 m, 길이가 0.5λ (λ : 사용주파수에 대한 파장)이며, FCC 규격에서 규정하고 있는 시험장감쇠량의 측정조건은 다음과 같다.

송신안테나의 높이: $h_1 = 2 \text{ m}$

수신안테나의 높이: $h_2 = 1 \sim 4 \text{ m}$

($d = 30 \text{ m}$ 이하일 때, 즉 $d = 3 \text{ m}, 10 \text{ m}$)

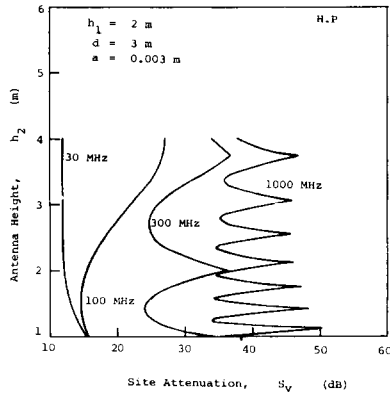
$h_2 = 2 \sim 6 \text{ m}$

($d = 30 \text{ m}$ 이상일 때, 즉 $d = 30 \text{ m}$)

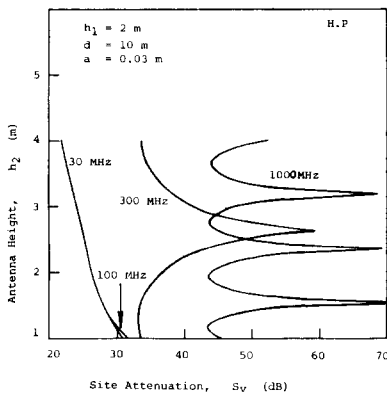
1. 하이트 패턴(height pattern)

그림 1과 같이 무한접지 평면위에 위치하고 있는 송·수신 안테나 계에서 수신안테나에는 직접파 이외에 접지평면에서 반사되는 반사파도 함께 수신된다. 따라서, 시험장감쇠량의 계산에서도 반사파의 영향을 고려해야 하는데, 이것은 수신안테나의 높이에 따라서 변화한다. 즉, FCC 규격에서 규정하고 있는 수신안테나의 높이를 1~4m 또는 2~6m 사이에서 변화시키면서 최대 전계감도가 수신되는 위치에서 시험장감쇠량을 구하는 이유가 바로 여기에 있다. 반사파의 영향을 고려한 직접파와 반사파의 합성파는 수신 안테나의 높이 h_2 의 함수이며 이 관계를 나타내는 것이 하이트 패턴이다.

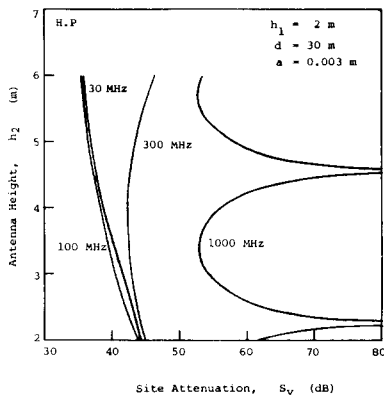
그림 5는 그림 1의 야외시험장에 대한 하이트패턴의 계산결과를 나타낸다. 그림 5로 부터 알 수 있는



(a) $d = 3\text{m}$



(b) $d = 10\text{m}$



(c) $d = 30\text{m}$

그림 5. 하이트 패턴

Fig. 5. Height pattern at a receiving point.

것과 같이 하이트 패턴은 감쇠진동의 형태로 나타나고 수신안테나의 높이 h_2 를 높여가면 어느 위치에서는 일정치에 수렴하게 된다. 실제적으로 이러한 하이트 패턴을 알고 있으면 제2, 제3 등의 최대전계강

도 수신점에서 측정을 하게 되는 측정상의 실수를 사전에 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 야외시험장의 결함관정에도 유용하게 사용할 수 있다.

2. 시험장감쇠량

그림 6은 앞장의 식(2)로 부터 계산한 시험장감쇠량의 계산치와 실험결과를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 것과 같이 한국표준연구소(KSRI)에서 기전력법으로 계산된 시험장 감쇠량의 이론계산 결과는 미 국립표준기술원(NIST)의 측정결과와 잘 일치하고 있다.¹⁾ 계산에 있어서는, FCC 규격에서 규정하고 있는 것과 같이 송신안테나의 높이를 $h_1 = 2\text{m}$ 로 고정하여 $d = 3\text{m}$ 및 $d = 10\text{m}$ 에서는 수신안테나의 높이 h_2 를 $1\text{m} \sim 4\text{m}$ 로 주사하고, $d = 30\text{m}$ 에서는 수신안테나의 높이 h_2 를 $2\text{m} \sim 6\text{m}$ 로 주사하여 최대 전계강도가 수신되는 높이에서의 시험장감쇠량을 구하였다.

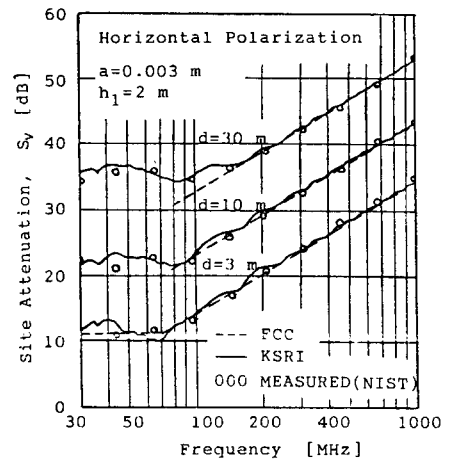


그림 6. 시험장감쇠량의 주파수 특성

Fig. 6. Frequency characteristics of site attenuations.

3. 수정된 시험장감쇠량 이론곡선

그림 6에서 알 수 있는 것과 같이, 낮은 주파수영역(약 80 MHz 이하)에서는 FCC OET-55의 규격치¹⁾와 계산치와는 많은 차이가 발생하고 있다. 특히 30m 법에서는 더욱 현저한 차이가 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이러한 차이의 발생 원인은 다음과 같다.

즉, FCC OET-55에서 규정하고 있는 시험장감쇠량의 측정조건에 따르면, 최대 전계강도를 수신하는 수신안테나의 높이 h_2 는 $d = 3\text{m}, 10\text{m}$ 에서는 $h_2 = 1 \sim 4\text{m}$ 사이에서, $d = 30\text{m}$ 에서는 $h_2 = 2 \sim 6\text{m}$ 사이에서 찾아

야 하는데, 대표적으로 우선 30 m법에 대하여 생각해 보도록 한다.

30 m법에서는 그림 7(c)에서 보는 것과 같이 약 200 MHz 이하의 주파수 영역에서는 최대전계강도를 수신하는 수신안테나의 높이가 2~6 m 사이에서는 존재하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 이 경우에는 최대 전계강도를 수신하는 수신 안테나의 높이는 $h_2 = 6$ m로 고정되게 되며, 시험장감쇠량은 이 높이에서의 전계강도 값을 사용하여 계산하게 된다. 이렇게 하여 계산된 시험장감쇠량의 계산결과가 앞절에서 나타낸 그림 6 이다.

따라서, FCC의 규정과 같이 수신안테나의 높이를 2~6m로 제한하는 한 200 MHz 이하에서의 시험장 감쇠량 이론곡선은 그림 6 과 같이 되지 않을 수 없다. 그러나, 관점을 바꾸어, 수신안테나의 높이를 2~6m로 제한하지 않으면 실제적으로 이 범위를 벗어나서 나타나는 최대전계강도의 값을 적용하여 시험장감쇠량을 계산할 수 있는데, 이 경우의 시험장 감쇠량의 계산결과는 그림 8의 점선과 같고 그림 8의 점선은 곧 FCC에서 규정하고 있는 이론치(파선)와 일치하고 있음을 알 수 있다.

그러므로, 200 MHz 이하에서 발생하는 FCC의

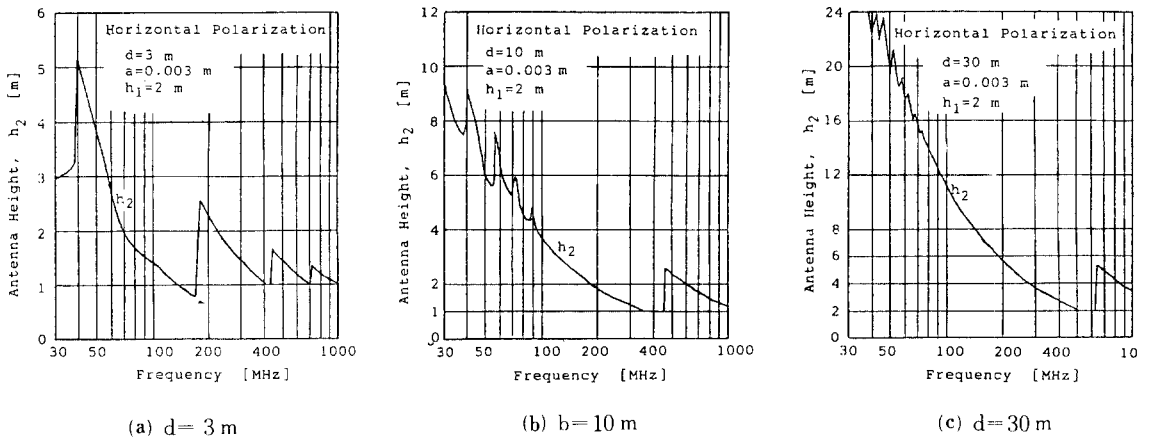


그림 7. 최대전계강도를 수신하는 수신안테나의 높이
Fig. 7. Height for maximum receiving point versus frequency.

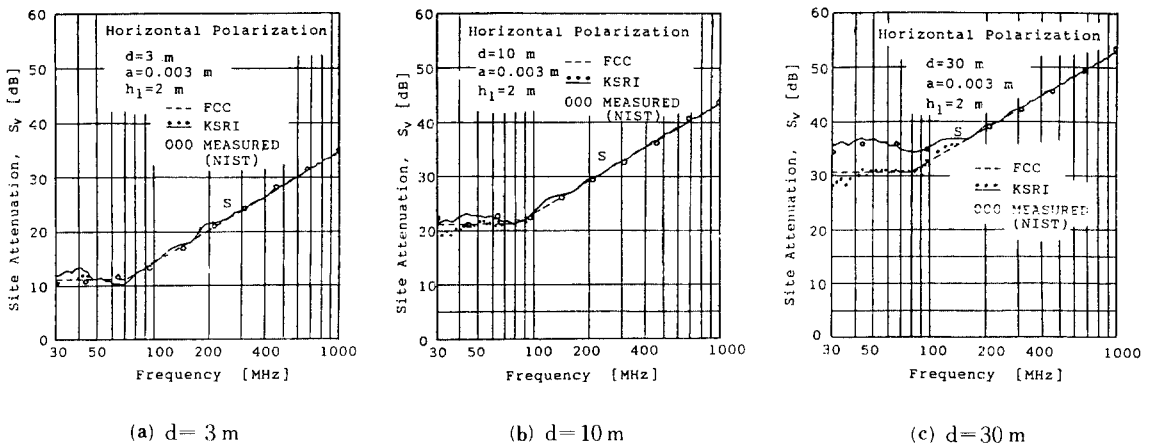


그림 8. 수정된 시험장감쇠량
Fig. 8. Corrected site attenuations.

규격치와 이론치(실험치도 동일)와의 차이는 FCC의 측정규정에 의하여 발생하는 것임을 알 수 있다. 따라서, FCC의 측정 규정을 적용하는 한 FCC OET-55의 규격치는 본 논문에서 제안하는 그림 8의 실선(그림 6과 동일)으로 수정되어야 한다고 생각한다. 3m 및 10m 법에 대해서도 30m 법과 같은 방법으로 생각할 수 있다.

IV. 결 론

방사성 방출잡음을 측정하는 측정시설의 하나인 야외시험장에 대하여 야외시험장의 적합성을 평가하는 파라미터인 시험장감쇠량을 검토하였다. 검토결과, 지금까지 상설로 되어온 낮은 주파수영역(80 MHz 이하)에서의 FCC 규격치와 실험치와의 차이는 FCC의 측정규정에 기인한 것임을 알았다. 따라서, FCC의 측정규정을 적용하는 한 야외시험장의 시험장감쇠량에 관한 FCC의 규격치는 본 논문에서 제안하는 이론 곡선으로 수정되어야 한다고 생각한다.

그리고, 본 논문에서 계산한 시험장감쇠량의 이론 곡선은 미 국립표준기술원(NIST)의 실험치와 잘 일치하고 있으므로, 야외시험장에 관한 우리나라의 국가기준 이론곡선으로 사용할 수 있다고 생각한다. 국가 측정표준의 정점기관인 한국표준연구소의 야외시험장을 기준으로 하여 국내의 관련 연구기관 및 산업체에서 보유하는 야외시험장의 상호 연관성을 확립하는 것과 수적편파에 대한 시험장감쇠량을 평가하는 것이 남겨진 과제이다.

(부 록)

본문중 식 (12)의 구체적인 결과식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 Z_U = & \frac{-Q}{2j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(U_2) - C_1(U_1) - j\{S_1(U_2) - S_1(U_1)\}] \\
 & - \frac{Q}{2j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(U_4) - C_1(U_3) - j\{S_1(U_4) - S_1(U_3)\}] \\
 & - \frac{Q}{2j} e^{\kappa_1 l_1} [C_1(U_6) - C_1(U_5) - j\{S_1(U_6) - S_1(U_5)\}] \\
 & - \frac{Q}{2j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(U_8) - C_1(U_7) - j\{S_1(U_8) - S_1(U_7)\}] \\
 & + \frac{Q \cos k l_1}{j} e^{\kappa_1 l_1} [C_1(V_2) - C_1(V_1) - j\{S_1(V_2) - S_1(V_1)\}] \\
 & + \frac{Q \cos k l_1}{j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(V_4) - C_1(V_3) - j\{S_1(V_4) - S_1(V_3)\}] \\
 & + \frac{Q}{2j} e^{\kappa_1 l_1} [C_1(V_6) - C_1(V_5) - j\{S_1(V_6) - S_1(V_5)\}] \\
 & + \frac{Q}{2j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(V_8) - C_1(V_7) - j\{S_1(V_8) - S_1(V_7)\}] \\
 & + \frac{Q}{2j} e^{\kappa_1 l_1} [C_1(W_2) - C_1(W_1) - j\{S_1(W_2) - S_1(W_1)\}]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{Q}{2j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(W_4) - C_1(W_3) - j\{S_1(W_4) - S_1(W_3)\}] \\
 & - \frac{Q \cos k l_1}{j} e^{\kappa_1 l_1} [C_1(W_6) - C_1(W_5) - j\{S_1(W_6) - S_1(W_5)\}] \\
 & - \frac{Q \cos k l_1}{j} e^{-\kappa_1 l_1} [C_1(W_8) - C_1(W_7) - j\{S_1(W_8) - S_1(W_7)\}]
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 U_1 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l_1 + l)^2} + (l_1 - l)] \\
 U_2 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} - l] \\
 U_3 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l_1 + l)^2} - (l_1 - l)] \\
 U_4 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} + l] \\
 U_5 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l_1 - l)^2} + (l_1 + l)] \\
 U_6 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} + l] \\
 U_7 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l_1 - l)^2} - (l_1 + l)] \\
 U_8 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} - l] \\
 V_1 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l)^2} + l_1] \\
 V_2 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2} \\
 V_3 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l)^2} - l_1] \\
 V_4 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2} \\
 V_5 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} + l] \\
 V_6 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (l_1 + l)^2} + (l_1 + l)] \\
 V_7 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} - l] \\
 V_8 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (l_1 + l)^2} - (l_1 + l)] \\
 W_1 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l)^2} - l] \\
 W_2 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (l_1 - l)^2} + (l_1 - l)] \\
 W_3 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (-l)^2} + l] \\
 W_4 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + (l_1 - l)^2} - (l_1 - l)] \\
 W_5 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2} \\
 W_6 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} + l] \\
 W_7 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2} \\
 W_8 &= k[\sqrt{d^2 + (Z_1 - Z'_1)^2 + l^2} - l]
 \end{aligned}$$

$$Q = \frac{j 30}{\sin k l_1 \sin k l}$$

단, $S_1(x)$, $C_1(x)$ 는 각각 정현적분, 여현적분이다.

參 考 文 獻

- [1] 정낙삼, 김기채, 정연춘, "EMI/EMC 현황과 전망," 전자공학회지, 제 16권, 제 5호, pp. 419-427, 1989.
- [2] 정낙삼, "전자파환경 기술의 현황과 전망," 한국통신학회, 위성통신 및 전파전파기술 세미나, pp. 104-122, 1989년 9월.
- [3] 대한전기학회, "EMI/EMC 특집," 제 38권, 제 9호, 1989년 9월.

[4] T.Kawana and S. Miyajima, "Theoretical investigations of site attenuation by means of mutual impedance between antennas," in *3rd symp. Technical Exhibit, EMC*, pp. 83-88, May 1979.

[5] A. Smith, Jr., R. German, and J. Pate, "Calculation of site attenuation from antenna factors," *IEEE Trans. Electromagnetic Compat.*, vol. EMC-24, pp. 301-316, Aug. 1982.

[6] W.S. Bennett, "An error analysis of the FCC site-attenuation approximation," *IEEE Trans. Electromagnetic Compat.*, vol. EMC-27, pp. 107-114, Aug. 1985.

[7] R.G. Fitzgerrell, "Site attenuation," *IEEE Trans. Electromagnetic Compat.*, vol. EMC-28, pp. 38-40, Feb. 1986.

[8] FCC Bulletin OET-55, "Characteristics of open area test sites," Aug. 1982. (Formerly OST-55).

[9] IEC Document 12A (Secretariat) W, Apr. 1978.

著 者 紹 介



金 基 采 (正會員)
 1959年 10月 19日生. 1984年 2月 영남대학교 전자공학과 졸업. 1986年 3月 일본 Keio대학 대학원 전기공학과 공학석사. 1989年 3月 일본 Keio대학 대학원 전기공학과 공학박사. 1989年 4月~ 현재 한국표준연구소 전자파연구실 선임연구원. 주관심분야는 안테나 및 전자파이론 등임.



鄭 然 春 (正會員)
 1960年 12月 8日生. 1984年 경북대학교 자연대 물리학과 졸업. 1986年 경북대학교 대학원 물리학과 졸업. (비평형 통계물리학 전공) 1985年 11月~현재 한국표준연구소 전자파연구실 선임연구원. 주관심분야는 EMI/EMC 측정 및 극복기술, 전자파 물성 등임.

金 丁 煥 (正會員) 第27卷 第2號 參照
 현재 한국표준연구소 선임연구원 및 전자파 연구실 그룹리더

鄭 樂 三 (正會員) 第27卷 第2號 參照
 현재 한국표준연구소 책임연구원, 전기연구부장