

시험장감쇠량의 이론과 실제 Site Attenuation Theory and Practice



金 基 采

한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원

디지털 기기를 포함한 일반적인 전기전자기기로 부터 발생하는 방해전자파는, 낮은 주파수 대역 (MF, HF 대역)에서는 전원성 등의 도선을 따라서 전달(전도성 방해파)되고, 높은 주파수 대역(VHF, UHF대역)에서는 직접 공간에 방사(방사성 방해 파)된다.

이러한 전도성 및 방사성 방해파의 측정은 IEC, CISPR, FCC, VDE 등의 규격이 정하고 있는 규정에 따라서 실시된다. 이들 규격은 방해파 측정법을 규정하고 있을 뿐만 아니라, 재현성이 좋은 측정을 실현시키기 위해 측정용 시설에 대해서도 자세하게 규정하고 있다.

방사성 방해파의 측정에 사용하는 측정시설로서는, 기본적으로 야외시험장(Open Area Test Site, OATS)을 사용하도록 규정하고 있는데, 측정치의 상호연관성을 위해서는 규약에 정해진 적합성이 평가되고 확인되어 있어야만 한다.

여기서는 방사성 방해파 측정용 시설중에서 가장 기본적이고도 중요한 야외시험장의 적합성 평가 파라미터-두 지점간의 전송손실, 이를 시험장감쇠량이라함-에 대하여 기술하기로 한다.

II. 야외시험장과 시험장 감쇠량

1. 시험장감쇠량

야외시험장은 방사성 방해파를 측정하는 측정시설 중의 하나이다. 그 구성은 그림 1과 같이 완전도체(또는 금속망)의 접지면 위에 피측정기기(EUT)를 놓고, 그 반대편에 수신 안테나를 두어 EUT로부터 방사되는 불요전자파의 크기를 측정하도록 되어 있다.

EUT와 수신 안테나 사이의 거리는 3m, 10m, 30m 및 100m 등이 규정되어 있는데, 일반적인 소형전기전자제품 및 개인용 컴퓨터 등은 3m, 자동차의 경우에는 10m 등등, 측정거리는 EUT의 크기와 깊은 관계가 있다. 30-m법 이상은 외부(혼입)전파의 영향과 수신기 감도상의 문제 때문에 현실적으로 사용이 곤란하다.

이러한 야외시험장은 시험장의 전자기적 특성의 좋고 나쁨에 따라 방해파의 측정결과에 큰 영향을 미치게 된다. 그러므로, 측정시설로서 적합한지 어

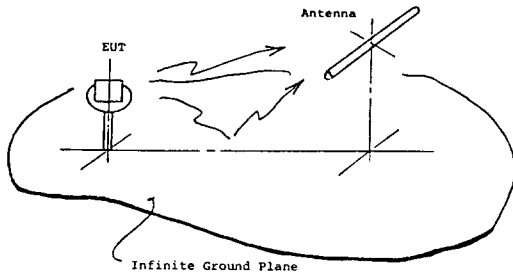


그림 1. 야외 시험장
Fig. 1 An open area test site.

면지를 반드시 평가해 두어야 할 뿐만 아니라, 정기적(1~2년당)으로 적합성 평가를 실시해야 할 필요가 있다. 특히 주위환경이 크게 변했을 경우에는 그때마다 적합성 확인을 해야한다.

일반적인 관련규격에서는 피측정기기 및 측정용 안테나 사이의 전자파 전송손실을 측정하여 야외시험장을 평가하도록 되어 있는데, 실제로는 측정의 용이함 때문에 피측정기기를 대신하여 송신 안테나를 사용한다. 즉, 송,수신 안테나 사이의 전송손실(傳搬損失, site attenuation, 시험장감쇠량)을 야외시험장의 전자파적 특성을 평가하는 평가파라미터로 사용한다.

관련규격에서는 실제로 설치된 야외시험장의 시험장감쇠량을 측정하고, 이 값을 기준이 되는 시험장감쇠량의 이론치와 비교하여 ±3 dB*이내에 들어 가면 방사성 방해파의 측정용 시험장으로 사용할 수 있다고 규정하고 있다.

2. 시험장감쇠량의 이론해석 수법

설치된 야외시험장은 시험장감쇠량의 측정치가 CISPR, FCC, VDE 등의 관련규격에서 규정하고 있는 시험장 감쇠량 이론치와 비교하여, 규정의 범위에 들지 않으면 방사성 방해파 등의 측정시설로서 사용할 수 없다는 것을 앞절에서 설명했다.

그러면, 이들 관련규격에서 규정하고 있는 시험장 감쇠량의 이론치는 어떻게 정하는 것일까? 이 이론치는 시험장감쇠량의 이론해석 수법에 따라서 이론치의 근사도가 달라지게 되는데 지금까지 알려진 이론해석의 수법은

- (1) Friss의 전달공식과 기하광학 근사를 적용한 방법, (1~2)
- (2) 송, 수신 안테나 및 접지판과의 상호결합효과를 고려한 해석수법 (3~13)

으로 대별할 수 있다.

(1)은 동일편파인 두 안테나가 자유공간, 원거리에서의 전력전달 관계를 나타내는 Friss의 전달공식에 기초를 두고, 접지판의 반사에 의한 기여를 보정계수로 취급하는 방법이다. FCC의 OET-55⁽¹⁾에서는 3-m법 수평편파에 대한 시험장감쇠량을

$$S=20\log D+20\log F-G_s-G_r-27.6-R \quad (1)$$

단, D : 송, 수신 안테나 사이의 거리[m]

F : 주파수[MHz]

G_s 및 G_r : 송신 및 수신 안테나의 절대이득 [dB]

R** : 접지판의 반사에 따른 기여분, 4.3 [dB]

로 나타내고 있는데, Bennett는 문헌[2]에서 FCC의 식(1)이 자유공간, 원거리에서 성립하는 Friss의 전달공식에 기초를 두고 있다는 것을 자세히 설명하고 있다. 또한, FCC의 식(1)을 적용할 때 발생하는 오차(5가지의 오차)에 관해서도 상세히 논하고 있는데, (i)거리 오차, (ii)접지판의 반사기여량 오차, (iii, iv) 송, 수신 안테나의 이득오차, (v) 정합오차가 바로 그것이다. Bennet는 이 중에서 (ii) 접지판의 반사기여량 오차가 가장 크다고 지적하고 있다.

(2)의 방법은 (1)의 방법보다 엄밀한 해석법이며, 송,수신 안테나의 자기 및 상호임피던스의 계산수법에 따라서 다음과 같이 구분할 수 있다.

(2-a) 기전력(EMF)법을 이용하는 방법, (3~6)

(2-b) 모멘트법(Method of Muments)을 적용하는 방법. (7~13)

기전력법(2-a)은 (1)의 방법(상호결합 효과는 무시되어 있음)보다 근사도가 좋은 방법이지만, 안테나의 임피던스 계산이 가능해야 하므로, 기본적으로는 다이폴 안테나를 사용한 시험장감쇠량의 계산에만 적용하고 있는 것이 실정이다.

이 뿐만 아니라, 기전력법은 안테나에 흐르는 전류분포를 미리 가정해야 하기 때문에 자기임피던스와 고립임피던스(isolated impedance)가 동일해진다는 문제점을 갖고 있다. 실제로는 자기임피던스와

* 광대역 안테나를 사용할 경우는 ±4dB이내.

** D=10 m인 경우는 R=5.7 dB, D=30 m인 경우는 R=5.9 dB.

고립임피던스는 서로 다른 값이 되기 때문에, 기전력법을 적용하면 상호결합효과를 완전히 평가할 수 없다.

이러한 결함을 해결하기 위해서는 송, 수신 안테나상에 흐르는 전류분포를 알아야 하는데, 전류분포를 해석적으로 엄밀하게 구하는 방법이 아직 발견되어 있지 않다. 그러나, 수치해석법의 하나인 모멘트법을 이용하면, 실험치와 양호하게 일치하는 전류분포를 구할 수 있다는 것이 알려져 있다. 이러한 모멘트법을 사용하여 전류분포를 구하면, 이로부터 송, 수신 안테나의 자기임피던스 및 상호임피던스를 계산할 수 있으므로, 상호결합효과가 고려된 시험장감쇠량의 이론곡선을 구할 수 있다.

모멘트법을 이용하면 구조가 복잡한 광대역 안테나를 사용한 경우의 시험장감쇠량도 계산할 수 있다.⁽¹²⁾

본문의 3장에서는 모멘트법을 이용한 시험장감쇠량의 계산에 대하여 상세히 설명하도록 한다.⁽¹³⁾

(1), (2)의 방법 이외에 안테나 인자(antenna factor)를 도입한 시험장감쇠량의 표현식이 Smith⁽¹⁴⁾에 의해 제안되었다. Smith는 전장의 세기 합성치를 송, 수신 안테나의 안테나 인자를 도입하여 표시하고, 근거리에서의 영향은 안테나 인자의 변화로서 취급한 시험장감쇠량의 식을 유도하였다. 이 방법은 광대역 안테나의 사용을 유도하는데 유용하며, 특히 다음에 설명하는 규격화 시험장감쇠량의 기초로서 매우 중요한 역할을 한다.

최근에는 방해파 측정의 자동화에 편승하여 광대역 안테나(바이코니칼, 대수주기 배열 안테나 등)가 많이 사용되어지게 됨에 따라서 광대역 안테나에도 적용할 수 있는 시험장감쇠량의 이론이 필요하게 되었다. 이러한 요구에 대하여 Smith⁽¹⁴⁾는 규격화 시험장감쇠량(Normalized Site Attenuation, 이하 NSA로 표기함)의 개념을 제안하였다.*

NSA는 기존의 일반적인 시험장감쇠량(Classical or Conventional Site Attenuation, 이하 CSA로 표기함)을 사용안테나의 안테나 인자로 규격화 한 것을 의미한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$NSA = \frac{CSA}{K_{1m}K_{2m}} \quad (2)$$

식(2)에서 CSA는 송신 및 수신안테나의 안테나 인자 K_{1m} 및 K_{2m} 의 함수임에 주의할 필요가 있다.

식(2)를 dB로 표현하면 NSA는 CSA에서 안테나 인자가 제거되는 형태로 되는데(IV장 식(21) 참조), 이것은 곧 사용안테나의 종류에 무관하게 동일한 시험장감쇠량의 규격을 적용할 수 있다는 것의 의미한다.

따라서, CISPR에서는 ANSI C63·4를 참고로 하여 NSA의 개념을 도입하고 있는데, NSA의 사용에 대해서는 현재 논란이 많은 것으로 알고 있다. 왜냐하면, NSA의 측정에는 사용안테나의 안테나 인자가 항상 따라 다니기 때문이다.

사용안테나의 안테나 인자를 정확히 알지 못하면 NSA의 개념은 소용 없게되며, 실제로 광대역 안테나의 안테나 인자를 정확히 평가(계산)하기란 쉬운 작업이 아니다. BALUN의 손실까지 고려한 안테나 인자의 계산은 거의 불가능에 가깝다고 해도 과언이 아니다.

3. 시험장감쇠량의 주파수 특성

시험장감쇠량의 이론치(규격치)는 특정 주파수에 대해서만 규격으로 규정하고 있다. 즉, ANSI에서는 측정 주파수를 다음과 같이

30~50 MHz에서는	5 MHz 간격
50~100 MHz "	10 MHz "
100~200 MHz "	25 MHz "
200~300 MHz "	50 MHz "
300~1000 MHz "	100 MHz "

으로 모두 23주파수를 규정하고 있다.

CISPR에서는 100 MHz~200 MHz에서 20 MHz 간격이며 모두 24주파수로 되어 있다(FCC에 대해서는 문헌 [1]을 참조하기 바란다).

따라서, 위의 각 주파수에 대하여 시험장 감쇠량의 규격을 만족한다고 해서 모든 주파수에 대해 야외시험장의 적합성을 보증하는 것은 아니다. 이 때문에 광대역 안테나를 사용하여 주파수를 주사(sweep)하면서 시험장감쇠량의 주파수 특성에 특이한 부분이 없는지를 확인해 두는 것이 좋다.

* 실제로는 NSA의 도입과 광대역안테나의 사용과는 직접적인 관련이 없다(본문 IV장 참조).

Ⅲ. CSA 이론곡선의 실제⁽¹³⁾

제 Ⅲ 장, Ⅳ 장에서는 모멘트법을 적용하여 계산한 CSA 및 NSA의 이론곡선에 관하여 기술한다.

1. CSA 측정계

그림 2는 야외시험장에서 시험장감쇠량(CSA)을 측정하기 위한 측정계를 나타낸다. 무한히 넓은 원전도체의 접지판 위에 반경 a, 길이 2ℓ₁인 송신 안테나(#1) 및 2ℓ₂인 수신 안테나(#2)가 각각 높이 h₁ 및 h₂의 위치에 간격 d로 배치되어 있다.

송신 안테나에는 전압 V₁인 신호발생기가 접속되어 있고, 수신 안테나에는 내부 임피던스가 Z_R인 수신기가 부하 Z_L로서 연결되어 있다.

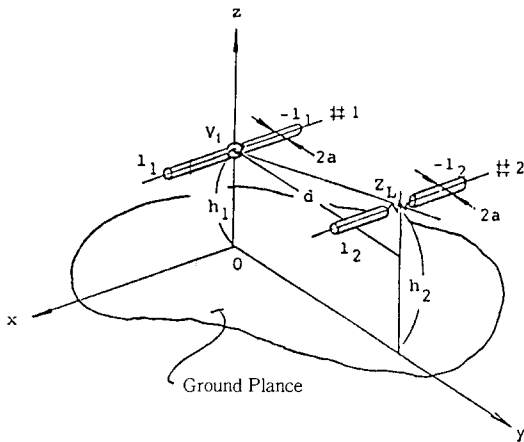


그림 2. 시험장감쇠량(CSA)의 측정계

Fig. 2 The measuring system for classical site attenuation.

2. 이론해석

그림2와 같은 CSA의 측정계에서, CSA는 무한 접지판위에 놓여있는 송, 수신 안테나 사이의 전송 손실로서 정의하며 다음식으로 주어진다.

$$S = \frac{P_t}{P_r} = \frac{\text{Re}\{Z_{11}\} |I_1|^2}{\text{Re}\{Z_{22}\} |I_2|^2} \quad (3)$$

단, P_t : 송신 안테나 #1에 공급되는 입력전력

P_r : 수신 안테나 #2에 부하 임피던스 Z_L이 연결되었을 때 수신 안테나에 수신되는 수신 전력

Z₁₁ : 수신 안테나 #2에 부하 임피던스 Z_L이 연결되었을 때 송신 안테나 #1의 입력 임피던스

Z_L : 수신 안테나 #2에 연결된 부하 임피던스

I₁ : 송신 안테나 단자에서의 전류값

I₂ : 수신 안테나 단자에서의 전류값

Re{X} : 복소변수 X의 실수부

CSA의 식(3)에서 Z₁₁ 및 I₁, I₂는 송, 수신 안테나의 전류분포에 관한 적분방정식을 모멘트법으로 해석하여 구할 수 있다.

그림 2의 안테나계에 영상정리를 적용하면, 자유공간 중에 놓여진 4개의 안테나계와 등가가 된다. 이때 영상 안테나의 전류는 원래 안테나의 전류와 크기가 같고 부호가 반대이다.

따라서, 송, 수신 안테나의 전류분포 \bar{J}_1, \bar{J}_2 에 관한 적분방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \bar{W}_{11}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_1(\bar{r}') dS_1 \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \bar{W}_{12}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_2(\bar{r}') dS_2 \\ & = -\hat{x} V_1 \delta(x) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \bar{W}_{21}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_1(\bar{r}') dS_1 \\ & + \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \bar{W}_{22}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_2(\bar{r}') dS_2 \\ & = -\hat{x} Z_L I_2 \delta(x) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ω는 각주파수, ε₀는 진공의 유전율이며, \hat{x} 는 x방향의 단위벡터, δ(x)는 Dirac의 Delta함수이다.

식(4), (5)에서 적분핵 $\bar{W}_{ij}(i, j=1 \text{ or } 2)$ 는 다음과 같다.

$$\bar{W}_{11}(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{K}_{11}(\bar{r}, \bar{r}') - \bar{K}_{13}(\bar{r}, \bar{r}') \quad (6)$$

$$\bar{W}_{12}(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{K}_{12}(\bar{r}, \bar{r}') - \bar{K}_{14}(\bar{r}, \bar{r}') \quad (7)$$

$$\bar{W}_{21}(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{K}_{21}(\bar{r}, \bar{r}') - \bar{K}_{23}(\bar{r}, \bar{r}') \quad (8)$$

$$\bar{W}_{22}(\bar{r}, \bar{r}') = \bar{K}_{22}(\bar{r}, \bar{r}') - \bar{K}_{24}(\bar{r}, \bar{r}') \quad (9)$$

위의 식에서 $\bar{K}_{ij}(i, j=1, 2, 3, 4)$ 는 자유공간 중의 전

류원이 전계를 생성하는 Dyadic Green 함수이며 다음식과 같다.

$$\overline{\overline{K}}_0(\vec{r}, \vec{r}') = (\overline{\overline{\Pi}} k_0^2 + \nabla \nabla) \cdot \overline{\overline{G}}_{ij}(\vec{r}, \vec{r}') \quad (10)$$

$$\overline{\overline{G}}_0(\vec{r}, \vec{r}') = \overline{\overline{\Pi}} \frac{e^{-j R_0 R_0}(\vec{r}, \vec{r}')}{4\pi R_0(\vec{r}, \vec{r}')} \quad (11)$$

단, $\overline{\overline{\Pi}}$ 는 Unit Dyadic, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 이며 μ_0 는 진공의 투자율이다. 또한 R_0 는 안테나 # i 와 안테나 # j 와의 거리이며, \vec{r} 및 \vec{r}' 는 각각 관측점 및 파원점의 위치벡터를 나타낸다. 그리고, 첨자 $i, j = 1, 2, 3, 4$ 는 각각 안테나 #1, #2, #3, #4를 나타내고, #3 및 #4는 안테나 #1 및 #2의 영상 안테나를 나타낸다.

전류분포에 관한 연립 적분방정식(4), (5)를 모멘트법으로 해석한다. 먼저, 전류분포 \vec{J}_1, \vec{J}_2 를 기지의 함수로 다음과 같이 전개한다.

$$\vec{J}_1(\vec{r}) = \sum_{m=1}^M a_m \vec{f}_m(\vec{r}) \quad (12)$$

$$\vec{J}_2(\vec{r}) = \sum_{n=1}^N b_n \vec{f}_n(\vec{r}) \quad (13)$$

여기서, a_m, b_n 는 미지의 전개계수이며 전개함수는 잘 알려져 있는 구분적정현과함수(peicewise sinusoidal function)을 사용한다.

식(12), (13)을 연립 적분방정식(4), (5)에 대입하고 Galerkin법을 적용하면 연립 적분방정식은 다음과 같은 연립 일차방정식으로 변환된다.

$$\sum_{m=1}^M a_m Z_{m'm} + \sum_{n=1}^N b_n Z_{m'n} = V_{m'} \quad (14)$$

$$\sum_{m=1}^M a_m Z_{n'm} + \sum_{n=1}^N b_n Z_{n'n} = V_{n'}$$

단,

$$Z_{m'm} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \vec{f}_m'(\vec{r}) \cdot \overline{\overline{W}}_{11}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{f}_m(\vec{r}') dS_1 dS_1 \quad (15)$$

$$Z_{m'n} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \vec{f}_m'(\vec{r}) \cdot \overline{\overline{W}}_{12}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{f}_n(\vec{r}') dS_2 dS_1 \quad (16)$$

$$Z_{n'm} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \vec{f}_n'(\vec{r}) \cdot \overline{\overline{W}}_{21}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{f}_m(\vec{r}') dS_1 dS_2 \quad (17)$$

$$Z_{n'n} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint \vec{f}_n'(\vec{r}) \cdot \overline{\overline{W}}_{22}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \vec{f}_n(\vec{r}') dS_2 dS_2 \quad (18)$$

$$V_{m'} = - \iint V_1 \delta(x) \hat{x} \cdot \vec{f}_m'(\vec{r}) dS_1 \quad (19)$$

$$V_{n'} = \iint Z_2 I_2 \delta(x) \hat{x} \cdot \vec{f}_n'(\vec{r}) dS_2 \quad (20)$$

이다. 식 (15)~(20)의 계산은 조금 복잡하므로 구체적인 결과식은 생략하도록 한다.

식 (14)로부터 계수 a_m 및 b_n 를 구하면 전류분포를 계산할 수 있고, 이로부터 입력 임피던스도 구해지므로 식 (3)의 CSA를 계산할 수 있다.

3. 계산결과 및 검토

그림 2의 CSA 측정계에서 사용할 송, 수신 안테나 #1, #2는 분헌 [21]에서 설계한 반파장 공진다이폴 안테나를 사용한다. 설계한 송, 수신 안테나의 제원을 다시 적어보면 다음과 같다.

- 안테나의 길이 : 반파장 공진길이
- 안테나의 반경 : $30 \leq f \leq 300 \text{ MHz}$ 에서는 $a = 3.175 \text{ mm}$,
 $300 < f \leq 1000 \text{ MHz}$ 에서는
 $a = 0.794 \text{ mm}$.

송, 수신 안테나의 높이는 일반적인 관련규격에서 정하고 있는 다음과 같은 규정을 적용했다.

- 송신 안테나의 높이(h_1) : 2
- 수신 안테나의 높이(h_2) :
1~4 m ($d = 3 \text{ m}$, 10 m일때)
2~6 m ($d = 30 \text{ m}$ 일때)

그림 2와 같이 무한 접지판 위에 놓여있는 안테나계에서, 수신 안테나 #2에는 직접파 이외에 접지판에서 반사되는 반사파도 함께 수신된다. 반사파의 영향을 고려한 직접파와 반사파의 합성파는 수신 안테나의 높이 h_2 에 따라서 변화하는데, 이 관계를 나타내는 것이 그림 3과 같은 하이트 패턴(height pattern)이다.

그림 3의 하이트 패턴에서 전송손실이 최소가 되

표 1. 시험장 감쇠량의 계산결과(수평편파)

Table 1. Classical site attenuation(Horizontal Polarization)

Pol.	Horiz.		Horiz.		Horiz.	
d [m]	3		10		30	
h ₁ [m]	2		2		2	
h ₂ [m]	1-4		1-4		2-6	
f [MHz]	CSA [dB]	h ₂ ^{max}	CSA [dB]	h ₂ ^{max}	CSA [dB]	h ₂ ^{max}
30	9.588	4.00	20.982	4.00	32.355	6.00
40	10.588	4.00	20.293	4.00	35.355	6.00
50	10.349	3.68	20.878	3.89	35.432	6.00
60	10.040	2.99	21.830	3.24	34.220	5.94
70	9.869	2.46	21.763	4.00	34.820	6.00
80	10.578	2.09	20.460	4.00	33.881	6.00
90	11.861	1.89	20.874	3.75	33.330	6.00
100	12.808	1.73	21.884	3.37	34.791	6.00
125	15.450	1.34	24.887	2.71	35.055	6.00
150	16.513	1.12	25.760	2.25	35.894	6.00
175	17.675	1.00	26.639	1.93	36.995	6.00
200	20.188	2.38	28.548	1.69	38.548	5.44
250	21.390	1.85	29.774	1.35	39.231	4.35
300	23.311	1.51	31.619	1.13	41.458	3.62
350	24.840	2.21	33.224	1.00	42.288	3.11
400	25.625	1.89	34.565	1.17	43.830	2.72
500	27.869	2.14	36.792	2.43	45.579	2.18
600	29.307	1.16	38.224	2.02	47.833	2.05
700	30.524	1.42	39.445	1.59	48.364	4.97
800	31.736	1.22	40.763	2.47	50.738	4.35
900	32.585	1.08	41.664	1.23	50.986	3.72
1000	33.411	1.26	42.487	1.11	51.814	3.35

표 2. 시험장 감쇠량의 계산결과(수직편파)

Table 2. Classical site attenuation(Vertical Polarization)

Pol.	Verti.		Verti.		Verti.	
d [m]	3		10		30	
h ₁ [m]	2.75		2.75		2.75	
h ₂ [m]	1-4		1-4		2-6	
f [MHz]	CSA [dB]	h ₂ ^{max}	CSA [dB]	h ₂ ^{max}	CSA [dB]	h ₂ ^{max}
30	19.924	3.26	16.648	3.55	22.972	4.53
40	12.401	2.83	17.940	2.69	24.459	3.43
50	13.519	2.63	19.065	2.15	25.809	2.80
60	14.967	2.68	20.804	1.82	27.371	2.34
70	16.011	3.15	22.424	1.55	28.993	2.00
80	16.459	3.03	23.566	1.37	30.371	2.00
90	17.058	3.00	24.593	1.22	31.638	2.00
100	17.564	2.86	25.462	1.08	32.753	2.00
125	19.432	2.29	27.561	1.00	35.075	2.00
150	21.898	1.86	28.484	3.95	37.002	2.00
175	22.283	2.92	29.377	3.36	39.030	2.00
200	23.379	2.57	30.296	2.95	40.921	2.00
250	25.642	3.06	32.017	2.39	41.055	6.00
300	26.830	2.51	34.548	4.00	42.043	5.47
350	28.190	2.95	35.351	3.42	43.162	4.77
400	29.330	2.51	36.335	2.94	44.314	4.11
500	31.263	2.49	38.172	2.39	46.132	3.29
600	32.884	2.48	39.922	2.96	47.704	2.74
700	34.177	2.48	40.982	2.49	48.978	2.35
800	35.302	2.48	42.327	2.93	50.071	2.06
900	36.271	2.83	43.184	2.58	51.197	3.64
1000	37.239	2.79	44.314	2.93	52.179	3.30

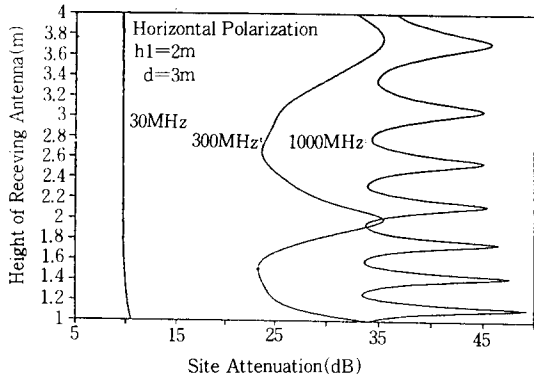
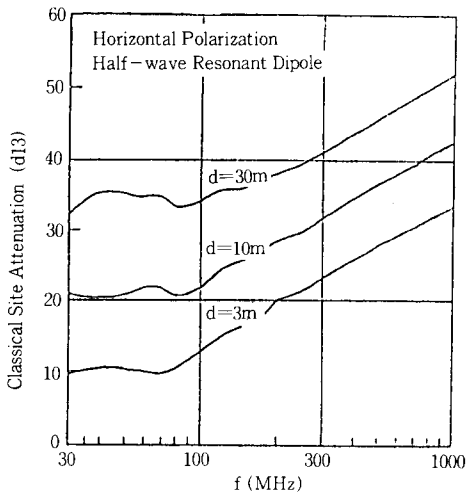


그림 3. 하이트 패턴
Fig. 3 Height pattern

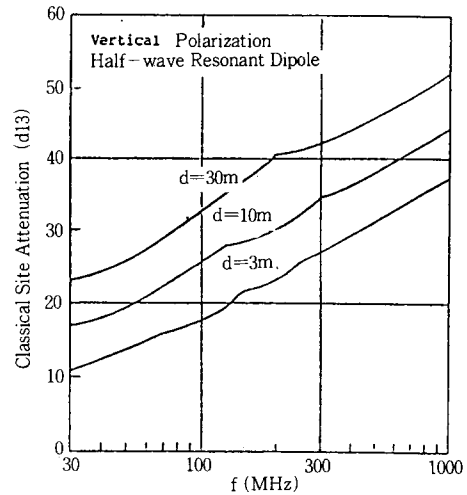
는 제1최소점($f=300$ MHz인 경우 p점)을 각각의 주파수마다 플로트한 것이 일반적으로 말하는 시험장감쇠량의 이론곡선이다.

그림 4 및 표1, 표2는 수평 및 수직편파에 대하여, 모멘트법으로 계산한 시험장감쇠량의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 4의 결과는 영상파라미터를 이용하여 계산한 결과⁽¹¹⁾와는 잘 일치하고 있다. 그러나, Sugiura⁽⁹⁾의 결과와는 60 MHz 이하에서 0.37~0.93dB 정도의 차이가 있다.

현재의 전자파장해 검정규칙에는 Sugiura의 결과를 그대로 채용하고 있으나, 문헌 [13]에서 지적한 바와 같이 60 MHz 이하에서는 그림 4 및 표1, 표2 (문헌 [13]과 동일)에 제시한 값으로 수정되어야 한다고 생각한다.



(a) 수평편파



(b) 수직편파

그림 4. 시험장감쇠량의 주파수 특성

Fig. 4 Frequency characteristics of classical site attenuations

IV. NSA 이론곡선의 실제⁽¹³⁾

1. NSA의 정의

제 II 장에서 설명한 것과 같이, 측정의 자동화에 편승하여 광대역 안테나가 널리 사용되기에 이르렀다. 따라서, 이에 적합한 시험장감쇠량의 이론이 필요하게 되었고, Smith는 안테나 인자의 개념을 도입한 규격화 시험장감쇠량(NSA)을 제안하였다.

NSA는 앞 장 III에서 계산한 CSA를 송, 수신 안테나의 안테나 인자로 규격화한 것으로서 다음식과 같다.

$$NSA = \frac{CSA}{K_{1m}K_{2m}} \quad (2)$$

단, K_{1m} 및 K_{2m} 은 각각, 상호결합 효과를 고려했을 때의 송신 및 수신 안테나의 안테나 인자이다.

식 (21)를 dB로 표현하면,

$$NSA = CSA - K_{1m} - K_{2m} \text{ (dB)} \quad (21)$$

$$\left(= 20 \log \left(\frac{279.1}{F} E_D^{\max} \right) \right) \text{ (dB)} \quad (22)$$

와 같고, 여기서, F는 주파수(MHz), E_D^{\max} 는 최대전장의 세기이다.

식 (21)은 II 장 2절에서 설명한 것과 같이 송, 수

신 안테나의 안테나 인자가 제거되는 형태로 표시되어 있음을 알 수 있다. 이러한 NSA는 광대역 안테나를 사용한 야외시험장의 적합성 평가에 적절한 것으로 알려져 있지만, NSA의 도입과 광대역 안테나의 사용과는 직접적인 관계가 없음을 강조해둔다.*

NSA에 관한 연구로서는, Sugiura⁽¹⁵⁾가 송, 수신 안테나 사이의 상호결합을 고려하여 ANSI C63.4에 제출된 NSA의 유효성과 문제점을 검토하고 있으며, 또한, Berry⁽¹⁶⁾ 등은 NEC⁽¹⁷⁾ 및 MININEC⁽¹⁸⁾를 이용하여 NSA 및 안테나의 상호결합 보정계수를 검토하고 있다.

본 장에서는 위에서 언급한 NEC, MININEC와는 달리 전개함수를 구분적정현과함수를 사용한 Galerkin의 모멘트법으로 NSA 및 상호결합 보정계수를 구했다. 구분적정현과함수는 모멘트법에서 가장 강력한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾

NSA의 식 (2), (21)은 상호결합 효과가 고려된 송신 및 수신 안테나의 안테나 인자로 표현되어 있다. 그러나, 자유공간에서의 안테나 인자를 도입하면, 식 (2), (21)은 안테나 사이의 상호결합에 따른 안테나 인자 보정계수를 고려하여

$$NSA = CSA - K_{1f} - K_{2f} - \Delta K_T \quad (\text{dB}) \quad (23)$$

로 표현할 수 있다.

단, 여기서 K_{1f} 및 K_{2f} 는 각각, 안테나가 자유공간에 놓여진 경우의 송신 및 수신 안테나의 안테나 인자이다. ΔK_T 는 상호결합의 정도를 나타내는 안테나 인자 보정계수이다.

식 (23)에서 알 수 있는 것처럼, 송, 수신 안테나의 자유공간 안테나 인자를 알고 있으면, 상호결합 보정계수 ΔK_T 를 고려하는 것만으로 CSA를 측정하여 NSA를 구할 수 있다.

송, 수신 안테나의 상호결합을 고려한 안테나 인자 K_{1m} , K_{2m} 은 실제적으로 적용하기가 까다로운 결점이 있기 때문에 ΔK_T 를 사용한다.

ΔK_T 는 식 (21)과 식 (23)으로부터 쉽게 구할 수 있다. 즉, 두 식으로부터 ΔK_T 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta K_T &= (K_{1m} - K_{1f}) + (K_{2m} - K_{2f}) \\ &= \Delta K_{T1} + \Delta K_{T2} \end{aligned} \quad (24)$$

단, ΔK_T 는 송, 수신 안테나의 높이 h_1 , h_2 의 함수임을 주의해야 할 필요가 있다.

식 (24)를 송신 안테나 #1 및 수신 안테나 #2

(그림 2 참조)의 입력 임피던스 Z_{i1} 및 Z_{i2} 와 유효길이 h 를 사용하여 표현하면,

$$\begin{aligned} \Delta K_{T1} &= \frac{1}{h} \left[1 + \frac{Z_{i1}}{Z_L} \right] - \frac{1}{h_f} \left[1 + \frac{Z_{i1}}{Z_L} \right] \\ &= \frac{1}{h} \left[1 + \frac{Z_{i1} + Z_{m1}}{Z_L} \right] - \frac{1}{h_f} \left[1 + \frac{Z_{i1}}{Z_L} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{T2} &= \frac{1}{h} \left[1 + \frac{Z_{i2}}{Z_L} \right] - \frac{1}{h_f} \left[1 + \frac{Z_{i2}}{Z_L} \right] \\ &= \frac{1}{h} \left[1 + \frac{Z_{i2} + Z_{m2}}{Z_L} \right] - \frac{1}{h_f} \left[1 + \frac{Z_{i2}}{Z_L} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

로 쓸 수 있다.

여기서,

h : 상호결합을 고려했을 때의 유효길이

h_f : 안테나가 자유공간에 놓여 있을때의 유효길이

Z_{i1} : 안테나 #1의 고립임피던스

Z_{i2} : 안테나 #2의 고립임피던스

Z_{m1}, Z_{m2} : Total 상호임피던스

Z_1 : 안테나 #1이 자유공간에 놓여 있을때의 입력임피던스

Z_2 : 안테나 #2가 자유공간에 놓여 있을때의 입력임피던스

Z_{i1} 및 Z_{i2} : 상호결합을 고려했을 때의 안테나 #1 및 안테나 #2의 입력임피던스

이다.

다음절에서는 위의 식 (23) 및 식 (24)를 사용하여 계산한 NSA 및 ΔK_T 의 계산결과를 음미해 보기로 한다.

2. 계산결과 및 검토

앞 절의 식 (23)으로부터 계산한 NSA의 주파수 특성을 그림 5 및 표3, 표4에 나타낸다. 그림 5와 ANSI C63.4에서 제시한 규격치를 비교하면 100 MHz 이상에서는 거의 동일하지만, 100 MHz 이하에서는 평편파 3-m법의 경우 최대 1.7 dB, 10-m법, 30-m법에서 최대 0.7 dB 정도의 차이가 있다. 수직편파인 경우는 3-m법에서 최대 2.1 dB, 10-m법에서 최대 1.2 dB, 30-m법에서 최대 0.7 dB 정도의 차이가 있음을 알 수 있다⁽¹³⁾. 이 차이의 원인은,

* 직접적인 관계가 있는 것으로 잘못 인식하고 있는 연구자들이 많다.

표 3. 규격화 시험장감쇠량의 계산결과(수평편파)

Table 3. Normalized site attenuation(Horizontal Polarization)

Pol.	Horiz.		Horiz.		Horiz.	
d [m]	3		10		30	
h ₁ [m]	2		2		2	
h ₂ [m]	1-4		1-4		2-6	
f [MHz]	NSA [dB]	h ₂ ^{max}	NSA [dB]	h ₂ ^{max}	NSA [dB]	h ₂ ^{max}
30	11.945	4.00	23.807	4.00	37.689	6.00
40	6.888	4.00	19.270	4.00	32.954	6.00
50	5.264	3.68	15.726	3.89	29.254	6.00
60	3.586	2.99	13.835	3.24	26.324	5.94
70	2.290	2.46	10.786	4.00	23.803	6.00
80	0.245	2.09	9.145	4.00	21.814	6.00
90	-1.872	1.89	7.815	3.75	20.046	6.00
100	-2.570	1.73	6.768	3.37	18.302	6.00
125	-4.383	1.34	4.464	2.71	14.850	6.00
150	-6.074	1.12	2.841	2.25	12.539	6.00
175	-7.163	1.00	1.528	1.93	10.816	6.00
200	-8.586	2.38	0.192	1.69	9.452	5.44
250	-10.584	1.85	-1.686	1.35	7.569	4.35
300	-12.214	1.51	-3.353	1.13	5.927	3.62
350	-13.497	2.21	-4.801	1.00	4.528	3.11
400	-14.697	1.89	-5.459	1.17	3.426	2.72
500	-16.624	2.14	-7.699	2.43	1.416	2.18
600	-18.486	1.16	-9.282	2.02	-0.067	2.05
700	-19.780	1.42	-10.633	1.59	-1.361	4.97
800	-20.984	1.22	-11.854	2.47	-2.573	4.35
900	-22.054	1.08	-12.863	1.23	-3.600	3.72
1000	-22.888	1.26	-13.812	1.11	-4.528	3.35

표 4. 규격화 시험장감쇠량의 계산결과(수직편파)

Table 4. Normalized Site attenuation(Vertical Polarization)

Pol.	Verti.		Verti.		Verti.	
d [m]	3		10		30	
h ₁ [m]	2.75		2.75		2.75	
h ₂ [m]	1-4		1-4		2-6	
f [MHz]	NSA [dB]	h ₂ ^{max}	NSA [dB]	h ₂ ^{max}	NSA [dB]	h ₂ ^{max}
30	13.765	3.26	19.776	3.55	25.790	4.53
40	10.111	2.83	17.361	2.69	23.356	3.43
50	8.448	2.63	15.428	2.15	21.357	2.80
60	7.744	2.68	13.593	1.82	19.740	2.34
70	6.489	3.15	12.297	1.55	18.394	2.00
80	4.021	3.03	11.110	1.37	17.409	2.00
90	1.988	3.00	10.029	1.22	16.848	2.00
100	0.676	2.86	9.213	1.08	16.379	2.00
125	-0.792	2.29	7.064	1.00	14.770	2.00
150	-1.726	1.86	4.895	3.95	13.404	2.00
175	-3.771	2.92	3.141	3.36	12.868	2.00
200	-5.231	2.57	1.736	2.95	12.420	2.00
250	-6.842	3.06	-0.407	2.39	8.644	6.00
300	-8.805	2.51	-1.052	4.00	6.438	5.47
350	-10.050	2.95	-2.908	3.42	4.912	4.77
400	-11.253	2.51	-4.242	2.94	3.736	4.11
500	-13.191	2.49	-6.257	2.39	1.681	3.29
600	-14.803	2.48	-7.782	2.96	0.021	2.74
700	-16.104	2.48	-9.290	2.49	-1.298	2.35
800	-17.276	2.48	-10.243	2.93	-2.512	2.06
900	-18.403	2.83	-11.451	2.58	-3.576	3.64
1000	-19.265	2.79	-12.170	2.93	-4.311	3.30

표 5. 상호결합 보정계수(수평편파)

Table 5. Mutual coupling correction factor(Horizontal polarization)

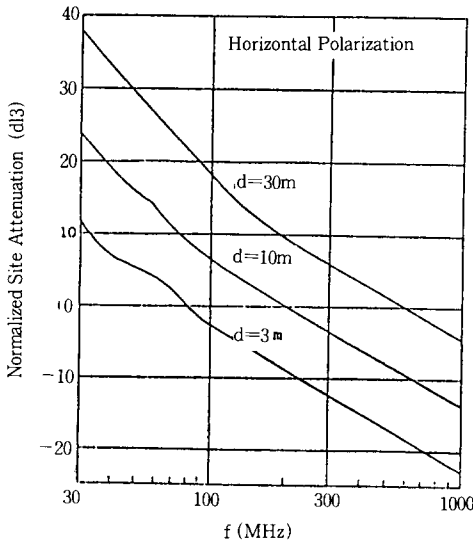
Pol.	Horiz.		Horiz.		Horiz.	
d [m]	3		10		30	
h _r [m]	2		2		2	
ΔKr [dB]	KSRI*	ANSI	KSRI*	ANSI	KSRI*	ANSI
f [MHz]						
30	2.10	1.3	0.33	-	-0.88	-
40	3.16	2.7	1.24	-	1.94	-
50	0.68	0	0.75	-	1.56	-
60	-1.10	-0.8	0.44	-	0.94	-
70	-2.72	-1.9	0.68	-	0.78	-
80	-2.26	-1.6	-1.28	-	-1.08	-
90	-1.90	-0.9	-1.57	-	-0.89	-
100	-1.10	-0.9	-1.36	-	-0.72	-
125	-0.51	0.7	0.08	-	0.71	-
150	-0.93	-0.7	-0.59	-	-0.06	-
175	-1.35	-1.4	-1.07	-	-0.45	-
200	0.26	0.1	-0.16	-	0.27	-
250	-0.42	-	-0.93	-	-0.50	-
300	-0.02	-	-0.57	-	-0.18	-
350	-0.09	-	-0.23	-	0.05	-
400	-0.22	-	-0.51	-	-0.39	-
500	0.08	-	0.07	-	-0.00	-
600	0.20	-	-0.09	-	-0.16	-
700	0.03	-	-0.20	-	-0.18	-
800	0.11	-	0.02	-	0.06	-
900	-0.00	-	-0.12	-	-0.06	-
1000	-0.18	-	-0.18	-	-0.14	-

* KSRI : Korea Standards Research Institute

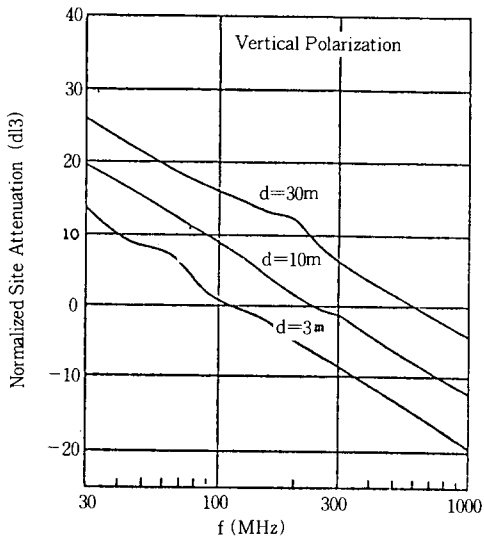
표 6. 상호결합 보정계수(수직편파)

Table 6. Mutual coupling correction factor(Vertical polarization)

Pol.	Verti.		Verti.		Verti.	
d [m]	3		10		30	
h ₁ [m]	2.75		2.75		2.75	
ΔK_r [dB]	KSRI	ANSI	KSRI	ANSI	KSRI	ANSI
f [MHz]						
30	1.61	-	1.33	-	1.63	-
40	1.75	-	0.04	-	0.57	-
50	0.67	-	-0.77	-	0.05	-
60	-0.33	-	-0.34	-	0.08	-
70	-0.78	-	-0.17	-	0.30	-
80	-0.16	-	-0.14	-	0.37	-
90	0.44	-	-0.07	-	0.16	-
100	0.41	-	-0.23	-	-0.10	-
125	-0.11	-	0.16	-	-0.03	-
150	0.11	-	0.08	-	0.09	-
175	-0.13	-	0.05	-	-0.02	-
200	0.10	-	0.05	-	-0.01	-
250	0.09	-	0.03	-	0.02	-
300	0.09	-	0.06	-	0.06	-
350	-0.01	-	0.01	-	0.00	-
400	0.05	-	0.04	-	0.04	-
500	0.04	-	0.01	-	0.03	-
600	0.09	-	0.11	-	0.09	-
700	0.01	-	-0.00	-	-0.00	-
800	-0.02	-	-0.02	-	-0.01	-
900	0.03	-	-0.01	-	0.13	-
1000	0.03	-	-0.01	-	0.01	-



(a) 수평편파



(b) 수직편파

그림 5. 규격화 시험장감쇠량의 주파수 특성

Fig. 5 Frequency characteristics of normalized site attenuations.

ANSI가 기하광학 근사를 사용한 이론 값을 채용했기 때문이다.

표5, 표6은 식 (24)로부터 계산한 상호결합 보정 계수 ΔK_T 의 주파수 특성이다. 이로부터 알 수 있는 것처럼, 표5, 표6의 값과 ANSI 규격치와는 최대 1 dB 정도의 차이가 있다. ANSI에서는 3-m법 수평 편파에 대해서만 상호결합 보정계수를 규정하고 있지만, 표5, 표6에는 30-m법까지 수평, 수직 양편파

에 대하여 계산한 결과를 나타내었다⁽¹³⁾. 주파수가 높아지면 상호결합 보정계수는 무시할 수 있을 정도이다.

V. 유한 접지판과 시험장감쇠량

야외 시험장의 설치장소로서 적합한 곳은 주위에 반사물도 없고 외부잡음의 영향이 적은 곳이 좋다. 그러나 이러한 장소를 선정하기란 좀처럼 어렵다.

이 때문에 최근에는 반사물체 보다 높은 위치에 있는 건물의 옥상 등에 야외 시험장을 설치하고자 하는 움직임도 있다. 이 경우에는 접지판의 크기가 유한이기 때문에 여러가지 문제가 발생할 것이 예상된다.

접지판을 대지위에 설치할 경우에는 제1프레넬 영역을 만족시키는 접지판의 크기를 선정하면, 접지판의 반사기여량이 충분히 고려된 시험장을 건설할 수 있다. 왜냐하면 대지가 접지판의 역할을 대신해 주기 때문이다.

그러나, 접지판이 건물의 옥상위에 설치될 경우에는 접지판의 끝 부분에서 전파의 산란이 있고, 임피던스의 불연속이 생긴다. 이 때문에 접지판에 흐르는 전류가 반사되어 정재파가 형성되고 접지판에서 2차방사가 일어나게 된다. 2차방사는 곧 시험장감쇠량에 영향을 미치게 되며 야외 시험장의 전자기적 특성을 보다 복잡하게 한다.

이 때문에 유한 접지판을 사용할 경우의 시험장감쇠량에 대한 검토가 일부 이루어지고 있으나⁽²⁰⁾, 보다 정확한 특성을 알기 위해서는 모멘트법과 GTD를 이용한 시험장 감쇠량의 이론해석이 절실히 요청된다. 유한 접지판의 크기가 시험장 감쇠량에 미치는 영향에 대해서는 앞으로 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

VI. 맺음말

야외 시험장의 시험장감쇠량 이론곡선에 대하여 해석수법을 간단히 언급하였으며, 모멘트법을 적용한 실제 계산예를 보였다. 이 방법은 최근까지 알려져 있는 해석수법 중에서 가장 근사도가 높은 방법으로 알려져 있다.

본문에서 제시한 CSA 및 NSA의 이론곡선은 한

국표준연구소의 국가표준 야외 시험장을 평가하기 위한 기준 이론곡선으로서 뿐만 아니라, 전자파장해 검정규칙에도 적용하여 야외시험장의 적합성 평가용 이론곡선으로도 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

1. FCC Bulletin OET-55, "Characteristics of open area test site", Aug. 1982. (Formerly OST-55).
2. W. S. Bennet, "An error analysis of the FCC site attenuation approximation", IEEE Trans., EMC-27, 3, pp. 107~114, 1985.
3. T. Kawana, S. Miyajima, "Theoretical investigations of site attenuation by means of mutual impedance between antennas", in 3rd. Symp. Tech. Exhibition EMC(Rotterdam) 17D3, 1979.
4. R. G. Fitzgerrell, "Site attenuation", IEEE Trans., EMC-28, 1, pp. 38-40, 1986.
5. 前團, 竹谷, 上, "オープンサイトのサイト減衰量の精密測定と高近似解について(その4)", 電子情報通信學會, 技術研究報告, EMCJ 86-23, 1986.
6. 김기채, 정연춘, 김정환, 정낙삼, "야외 시험장의 시험장감쇠량", 제9호, pp. 1336~1343, 1990.
7. K. Fukuzawa, et al., "A new method of calculating 3-meter site attenuation", IEEE Trans., EMC-24, 4, pp. 389~397, 1982.
8. T. Kawana, S. Horiguti, and Y. Yamanaka., "Evaluation of 3-meter site attenuation by the moment method", IEEE Trans., EMC-28, 3, pp. 117~124, 1986.
9. A. Sugiura, Y. Shimizu, and Y. Yamanaka., "Site attenuation for various ground conditions", Trans. of IEICE, Vol. E73, No. 9, pp. 1517~1524, 1990.
10. 杉浦, 山中, 清水, "サイト・アッテネーションの理論曲線について", 電子情報通信學會, 技術研究報告, EMCJ 86-75, pp. 67-74, 1986.
11. 若林, 島國, 川上, 佐藤, "4端子回路 理論によるサイト減衰量測定系の解析", 電子情報通信學會, 論文誌(B-II), J74-B-II, No. 2, pp. 83-87, 1991.
12. 若林, 島國, 川上, 佐藤, "受信アンテナに LPD-Aを用いる場合のサイト減衰量測定系の解析法", 電子情報通信學會, 論文誌(B-II), J74-B-II, No. 3, pp. 113~117, 1991.
13. 金基采, 鄭樂三, "規格化イト減衰量と相互結合補正係數について", 電子情報通信學會, 技術研究報告, EMCJ 91-26, pp. 21~28, 1991.
14. A. A. Smith, "Calculation of site attenuation from antenna factor", IEEE Trans., EMC-24, 3, pp. 301~316, 1982.
15. A. Sugiura, "Formulation of normalized site attenuation in terms of antenna impedances", IEEE Trans., EMC-32, 10, pp. 257~263, 1990.
16. J. Berry, B. Pate, and A. Knight, "Variations in mutual coupling correction factors for resonant dipoles used in site attenuation measurements," IEEE Symposium on EMC, pp. 444~450, 1990.
17. G. J. Burke and A. J. Poggio, "Numerical Electromagnetic Code-Method of Moments", Jan. 1981.
18. J. W. Rockway, et. al., "The MININEC System: Microcomputer analysis of wire antennas, Artech House, Boston, 1988.
19. W. L. Stutzman and G. A. Thiele, "Antenna Theory and Design", John Wiley & Sons New York, pp. 306~323, 1981.
20. 柏木, 淺井, 長澤, "オープン・サイトにおける有限大地板に関する研究", 電子情報通信學會, 技術研究報告, EMCJ 89-23, pp. 47~53, 1989.
21. 김기채, 정낙삼, "반파장 공진다이폴 안테나의 설계와 안테나 치수가 안테나 인자에 미치는 영향", 한국통신학회 논문지, 제16권, 제8호, pp. 785~792, 1990.