

접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나의 안테나 인자 (Antenna Factors of Half-wave Resonance Dipole Antennas above the Ground Plane)

金 基 采 *

(Ki Chai Kim)

要 約

본 논문에서는 안테나에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식을 Galerkin의 모멘트 법으로 해석하여, 접지판 위에 놓여진 수평 및 수직 반파장 공진 다이폴 안테나의 안테나 인자에 대하여 검토하였다. 그 결과, 방사성 방해파의 측정에 있어서는 접지판 위의 수평 및 수직 안테나에 대한 안테나 인자를 정확히 알고 있어야 한다는 것을 알았다.

Abstract

This paper presents the characteristics of antenna factors of half-wave resonance dipole antennas above a ground plane. The current distributions on a horizontal and vertical dipole antennas were analyzed by the Galerkin's method of moments, and these solutions are used for calculating the horizontal and vertical antenna factors above the ground plane. It is shown that accurate antenna factors of the horizontal and vertical dipole above the ground plane are required of the radiated emission test.

I. 서 론

정보 처리장치 등의 전기 전자기기에서 발생하는 불요 전자파의 계측기술은 EMC / EMI 연구분야에서 중요한 위치를 차지한다. 30-1000 MHz 주파수 대역에서의 EMI측정용 안테나는 반파장 다이폴 또는 반파장 공진다이폴 안테나가 기본이지만, 측정의 고효율화를 목적으로 광대역 안테나를 많이 사용하기도 한다. EMI측정에 관한 관련 규격에서는 기본적으로 다이폴 안테나를 사용하

도록 명기하고 있으나, 다이폴 안테나와 상관이 취해져 있으면 광대역 안테나의 사용도 인정 하고있다. 따라서, 가장 기본이 되는 반파장(공진)다이폴 안테나의 기본적인 특성-안테나 인자-을 명확하게 파악해 두어야할 필요가 있다.

다이폴 안테나의 안테나 인자에 대한 연구는, 자유공간 중에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나의 안테나 인자(이하, 자유공간 안테나 인자라 함)에 대한 NIST의 연구결과가 있다^[1]. 이 결과는 안테나의 전류분포를 정현함수, 그리고 입력 임피던스를 73Ω 로 가정했을 때의 안테나 인자이므로, 이 방법보다 더욱 정확한 계산법이 알려져 있다면 새로운 방법으로 보다 정확한 안테나

*正會員, 韓國標準科學研究院 電磁波研究室

인자를 계산해야할 필요성이 있다. 이 뿐만 아니라, 방사성 방해파의 측정과 같이 안테나를 접지판 위에서 사용할 경우에는 안테나의 높이에 대한 안테나 인자(이하, 접지판위 안테나 인자라 함)를 정확히 알아야 한다. 그러나, 이에 대한 연구는 아직 이루어져 있지 않다.

본 논문에서는, 안테나 상에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식을 모멘트 법으로 해석하고 접지판 위에 수평 및 수직으로 놓여진 경우에 대한 안테나 인자를 검토 하였다.

그 결과, 접지판 위에 수평으로 놓여진 경우가 수직으로 놓여진 경우보다 접지판과의 결합이 크다는 것을 알 수 있었다. 또한, 수평인 경우의 낮은 주파수 대역에서는 안테나 높이에 따라서 안테나 인자가 현저히 변화하므로, 방사성 방해파의 측정에 있어서는 안테나 높이에 대한 안테나 인자를 정확히 알고 있어야 한다는 것도 알았다. 본 연구결과는 방사성 방해파의 측정에 있어서 안테나 인자의 정확한 적용을 위한 기초자료로 유용하게 이용할 수 있을 것이다.

II. 이론해석

1. 구조와 좌표계

그림 1은 접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나의 구조와 좌표계이다. 무한히 넓은 완전도체의 접지판 위에 반경 a , 길이 $2l$ 인 반파장 공진다이폴 안테나가 높이 h 의 위치에 수평(그림 1(a)) 및 수직(그림 1(b))으로 놓여있고, 안테나의 중앙에서 전압 V 로 급전한다.

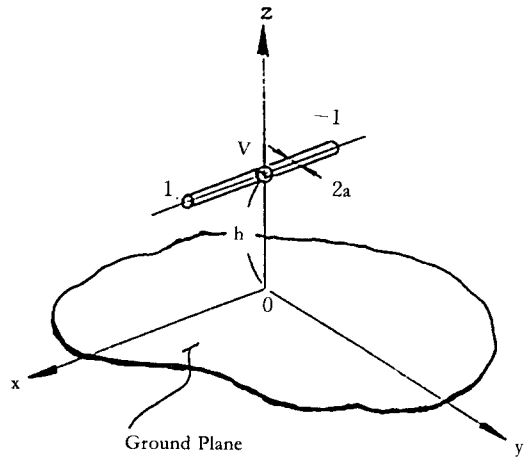
단, 이들 안테나의 공진길이는 자유공간에 놓여진 경우의 반파장 부근 공진길이 이다. 30-1000 MHz의 주파수 대역에 대한 공진길이 등의 안테나 제원에 대해서는 문헌[1]을 참조하기 바란다.

2. 안테나 인자

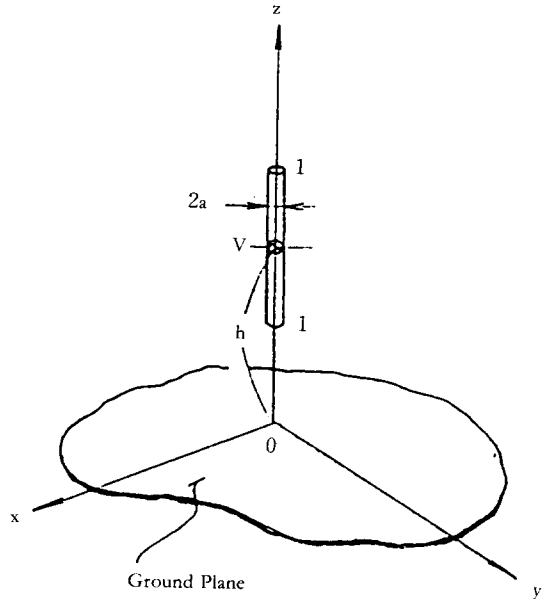
안테나의 전압-전계 변환특성을 나타내는 안테나 인자는, 전계의 세기 E 와 안테나 단자에 부하 Z_L 이 연결되었을 때 부하에 나타나는 전압 V_L 로서 다음과 같이 정의 된다.

$$K = \frac{E}{V_L} \quad (1)$$

이러한 안테나 인자는 BALUN을 포함한 안테나 소자 등의 손실을 포함시켜 생각하는 것이 일반적이지만, 본 논문에서는 BALUN 등의 손실은 고려하지 않기로 한다.



(a) Horizontal case



(b) Vertical case.

그림 1 접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나
Fig. 1 Half-wavelength resonance dipole antennas above the ground plane.

그림 1과 같이 접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나의 안테나 인자는, 접지판의 영향으로 인하여 자유공간 안테나 인자와는 차이가 발생하게 된다. 따라서, 그림 1과 같은 경우의 안테나 인자를 계산하기 위해서는 접지판의 영향을 고려한 해석이 필요하다.

안테나 인자의 식(1)을 안테나의 높이를 고려한 입력 임피던스 및 유효길이로 표현하면 다음과 같이 나타낼

수 있다.

$$K = \frac{1}{|h_e(h)|} \left[1 + \frac{|Z_{in}(h)|}{Z_L} \right] \quad (2)$$

여기서, 유효길이 h_e 및 입력 임피던스 Z_{in} 은 접지판으로부터의 높이 h 의 함수임에 특히 주의할 필요가 있다.

3. 적분방정식

안테나 인자의 식(2)에서 유효길이 및 입력 임피던스를 구하기 위해서는 접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나 상에 흐르는 전류분포를 구해야 한다.

그림 1과 같이 수평 및 수직으로 놓여진 안테나 계에 영상정리를 적용하면 자유공간 중에 놓여진 2개의 안테나 계와 등가가 되며, 안테나 상에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_1'} [\bar{\mathbf{K}}_{11}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') \pm \bar{\mathbf{K}}_{12}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')] \cdot \mathbf{J}_1 dS_1' \\ & = \begin{cases} -V \hat{\mathbf{X}} \delta(X), & \text{수평인 경우} \\ -V \hat{\mathbf{Z}} \delta(Z), & \text{수직인 경우} \end{cases} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, 핵(kernel)에 나타나는 복호는 수평인 경우 (+), 수직인 경우 (-)이며, ω 는 각주파수, ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 또한, $\hat{\mathbf{X}}$ 및 $\hat{\mathbf{Z}}$ 는 각각 X방향 및 Z방향의 단위 벡터이며, $\delta(\ast)$ 는 Dirac의 delta함수이다.

식(3)에서 핵은 자유공간 중에 놓여있는 전류원이 전계를 생성하는 dyadic Green함수이며 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{\mathbf{K}}_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') = (\bar{\mathbf{I}}_{ko}^2 + \nabla \nabla) \cdot \bar{\mathbf{G}}_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{G}}_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') = \bar{\mathbf{I}} \frac{\exp(-j ko R_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}'))}{4 \pi R_{ij}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')} \quad (5)$$

단, $\bar{\mathbf{I}}$ 는 unit dyadic, $ko = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2\pi / \lambda$, $\bar{\mathbf{r}}$ 및 $\bar{\mathbf{r}}'$ 는 각각 관측점 및 파원점의 위치 벡터이다. R_{ij} 는 i 안테나와 j 안테나 사이의 거리를 나타낸다.

전류분포에 관한 적분방정식(3)의 해를 구하면 안테나의 입력 임피던스뿐만 아니라 유효길이도 계산할 수 있으므로, 앞 절의 식(2)로부터 접지판의 영향이 고려된 안테나 인자를 구할 수 있다.

4. 적분방정식의 해법

수평 및 수직 안테나의 전류분포에 관한 적분방정식

(3)은 형식적으로는 같은 형태이므로, 본 논문에서는 특별한 이유가 없는한 수평 및 수직 안테나에 대한 전류분포, 유효길이, 안테나 인자 등을 수평, 수직 구분없이 동일한 표현식을 사용하였다.

전류분포에 관한 적분방정식(3)은 잘 알려져있는 모멘트 법을 적용하여 해석하기로 한다. 접지판 위에 수평 및 수직으로 놓여진 안테나 상에 흐르는 전류분포를 다음과 같은 기지의 함수로 근사전개 한다.

$$\mathbf{J}_1 = \sum_{m=1}^M I_m \mathbf{F}_m(\mathbf{r}) \quad (6)$$

여기서, I_m 은 미지의 전개계수이며, 전개함수 \mathbf{F}_m 은 다음과 같은 구분적 정현파 함수를 사용한다.

$$\mathbf{F}_m(\mathbf{r}) = \begin{cases} \hat{\mathbf{r}} \frac{\sin ko (\mathbf{r} - S_{m-1})}{\sin ko \Delta S_{m-1}}, & S_{m-1} \leq r \leq S_m \\ \hat{\mathbf{r}} \frac{\sin ko (S_{m+1} - \mathbf{r})}{\sin ko \Delta S_m}, & S_m \leq r \leq S_{m+1} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

단, ΔS_{m-1} 및 ΔS_m 은 각각 $S_{m-1} - S_m$ 및 $S_m - S_{m+1}$ 사이의 구간 길이이다. $\hat{\mathbf{r}}$ 은 \mathbf{r} 방향의 단위벡터이다.

식(6)을 적분방정식(3)에 대입하면 다음과 같은 일차방정식을 얻는다.

$$\sum_{m=1}^M I_m Z_{m'm} = V_{m'} \quad (8)$$

여기서, 일반화 임피던스비 및 일반화 전압비는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{m'm} &= \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{S_1} \iint_{S_1'} \mathbf{F}_m(\bar{\mathbf{r}}) \cdot [\bar{\mathbf{K}}_{11}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}') \pm \bar{\mathbf{K}}_{12}(\bar{\mathbf{r}}, \bar{\mathbf{r}}')] \\ & \cdot \mathbf{F}_m(\bar{\mathbf{r}}') dS_1' dS_1 \quad (9) \end{aligned}$$

$$V_{m'} = \begin{cases} -V \iint_{S_1} \delta(X) \hat{\mathbf{X}} \cdot \mathbf{F}_m(\bar{\mathbf{r}}) dS_1, & \text{수평인 경우} \\ -V \iint_{S_1} \delta(Z) \hat{\mathbf{Z}} \cdot \mathbf{F}_m(\bar{\mathbf{r}}) dS_1, & \text{수직인 경우} \end{cases} \quad (10)$$

식(9),(10)을 계산하여 식(8)에 대입하면 미지의 전개계수 I_m 을 구할 수 있으므로 접지판 위에 놓여진 수평 및 수직 반파장 공진다이폴 안테나의 전류분포를 계산할 수 있다.

5. 유효길이

앞 절에서 모멘트 법으로 정식화하여 구한 전류분포로부터 유효길이는 다음과 같은 유효길이의 정의식

$$h_e = \begin{cases} \frac{1}{I(0)} \int_{-1}^1 I(X) dX, & \text{수평인 경우} \\ \frac{1}{I(0)} \int_{-1}^1 I(Z) dZ, & \text{수직인 경우} \end{cases} \quad (11)$$

으로부터 구할 수 있으며 식(6)을 식(11)에 대입하면 결과식은 다음과 같다.

수평인 경우,

$$|h_e|^2 = \left[\frac{2}{I(0)} \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{k_0 \sin k_0 \Delta X_m} (1 - \cos k_0 \Delta X_m) \right] \cdot \left[\frac{2}{I^*(0)} \sum_{m=1}^M \frac{I_m^*}{k_0 \sin k_0 \Delta X_m} (1 - \cos k_0 \Delta X_m) \right] \quad (12)$$

수직인 경우,

$$|h_e|^2 = \left[\frac{2}{I(0)} \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{k_0 \sin k_0 \Delta Z_m} (1 - \cos k_0 \Delta Z_m) \right] \cdot \left[\frac{2}{I^*(0)} \sum_{m=1}^M \frac{I_m^*}{k_0 \sin k_0 \Delta Z_m} (1 - \cos k_0 \Delta Z_m) \right] \quad (13)$$

여기서, *표시는 복소공액을 나타낸다.

이상과 같이 모멘트 법으로 정식화한 결과식을 사용하여 접지판 위에 놓여진 수평 및 수직 반파장 공진다이폴 안테나의 안테나 인자를 계산하도록 한다.

III. 수치계산결과 및 검토

수치계산에 사용하는 반파장 공진다이폴 안테나의 제원은 문헌[1]에서 설계한 것을 사용한다. 참고로 이를 간략히 적어보면 다음과 같다.

안테나의 반경 : $a = 3.175\text{mm}$ for $30\text{MHz} \leq f \leq 300\text{MHz}$
 $a = 0.794\text{mm}$ for $300\text{MHz} < f \leq 1000\text{MHz}$

안테나의 길이 : 안테나가 자유공간 중에 놓여졌을 때 반파장 부근에서 공진하는 공진길이, 상세한 공진길이는 문헌[1] 참조.

본 논문에서는 위의 안테나를 접지판 위에 수평 및 수직으로 놓았을 때 안테나의 높이변화에 대한 안테나 인

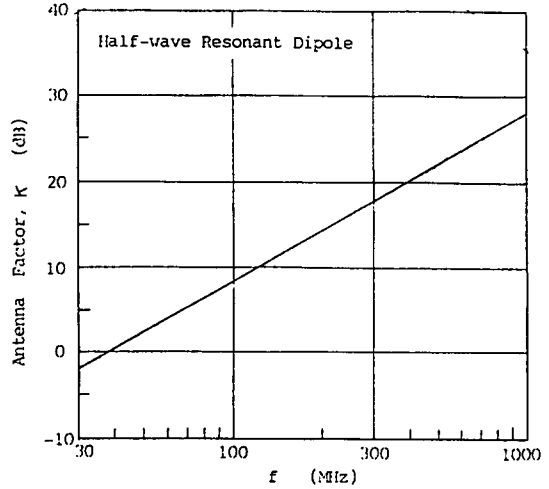


그림 2 자유공간 안테나 인자의 주파수 특성
 Fig. 2 Frequency characteristics of the free space antenna factor.

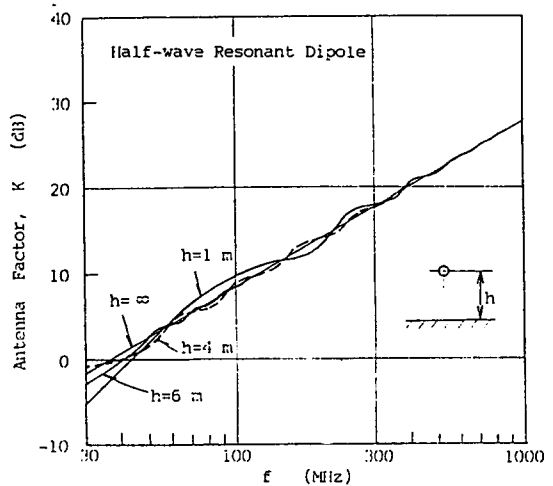


그림 3 접지판위 안테나 인자의 주파수 특성(수평인 경우)
 Fig. 3 Frequency characteristics of the ground plane antenna factor(horizontal case).

자를 계산한다. 그리고, 전류분포의 식(6)에서 전개항수 M은 45를 선택하였다.

1. 자유공간 안테나 인자

그림 2는 자유공간 중에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나에 대한 안테나 인자의 주파수 특성 계산결과를 나타낸다. 참고를 위하여 구체적인 안테나 인자의 계산치를 표 1에 나타내었다. 그림 2로부터 알 수 있는 것처럼, 모멘트 법으로 계산한 자유공간 안테나 인자는, 전류분포를

표 1 자유공간 안테나 인자

Table. 1 Free space antenna factors.

주파수 [MHz]	안테나 인자 [dB]
30	-2.226
35	-0.882
40	0.268
45	1.299
50	2.203
60	3.776
70	5.150
80	6.298
90	7.316
100	8.239
125	10.17
150	11.76
175	13.09
200	14.26
250	16.20
300	17.77
350	19.13
400	20.27
500	22.21
600	23.80
700	25.14
800	26.30
900	27.32
1000	28.24

정현함수로 가정하고 안테나의 입력 임피던스를 73Ω 로 상정했을 때의 안테나 인자(NIST의 결과, 문헌[2] 참조)와 우연하게도 서로 일치한다.

2. 접지판위 안테나 인자(수평인 경우)

그림 3은 반파장 공진다이폴 안테나를 접지판 위에 수평으로 놓았을 때, 안테나의 높이를 파라미터로한 안테나 인자의 주파수 특성 계산결과를 나타낸다. 안테나의 높이는 방사성 방해파의 측정에 관한 관련규격을 참고로하여 1-6m 범위를 선택했다. 안테나 높이를 고정했을 때 안테나 인자의 주파수 특성은 자유공간 안테나 인자를 중심으로 진동하고 있음을 그림 3으로부터 알 수 있다.

그림 4는 주파수를 파라미터로 했을 때 안테나의 높이에 대한 안테나 인자를 나타낸다. 그림 4로부터 알 수 있는 것과 같이 안테나 높이가 높아질수록 안테나 인자는 자유공간 안테나 인자값으로 수렴하게 된다.

자유공간 안테나 인자와 비교하기 위하여 안테나 인자 보정계수 $\Delta K = K_m - K$ 를 정의하고, ΔK 의 주파수 특성을 계산하면 그림 5와 같다. 단, K_m 은 접지판위 안테나

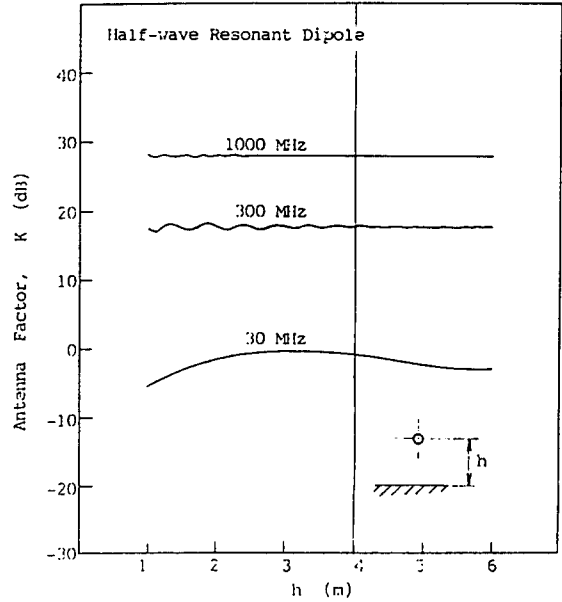


그림 4 안테나 높이에 대한 접지판위 안테나 인자(수평인 경우)
Fig. 4 Ground plane antenna factors vs. antenna heights (Horizontal case).

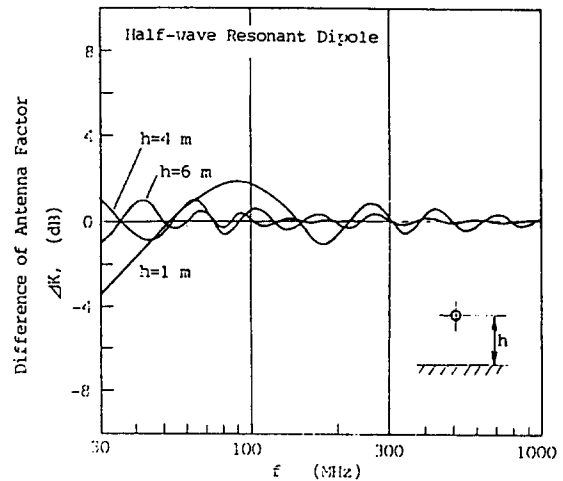


그림 5 안테나 인자 보정계수의 주파수 특성
Fig. 5 Frequency Characteristics of the antenna factor correction factor.

인자이며 K 는 자유공간 안테나 인자이다. 그림 5로부터 알 수 있는 것과 같이 안테나의 높이를 1-6m 범위에서 변화시키면, 안테나 인자의 보정계수는 저주파수 대역에서 최대 -3.7 dB 정도이지만, 주파수가 200 MHz 이상이면 1 dB이내이다.

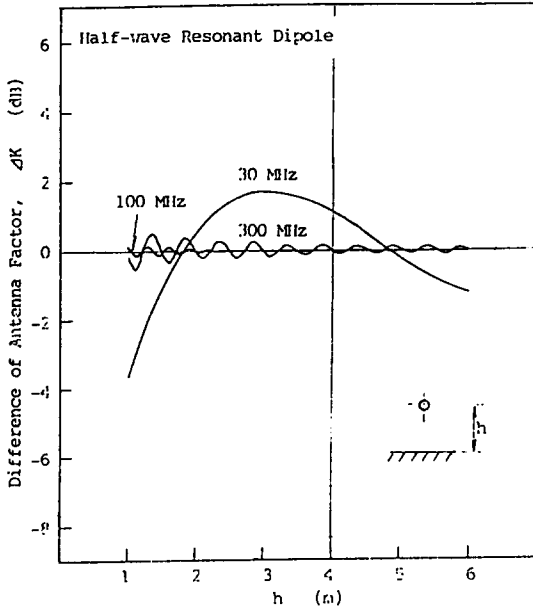


그림 6 안테나 높이에 대한 안테나 인자 보정계수
Fig. 6 Antenna factor correction factors vs. antenna heights.

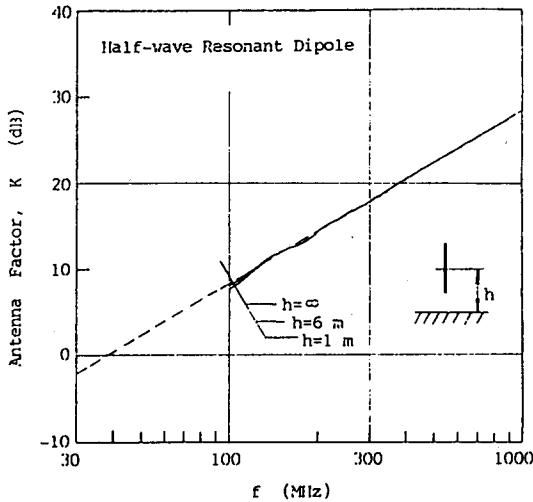


그림 7 접지판 위 안테나 인자의 주파수 특성(수직인 경우)
Fig. 7 Frequency characteristics of the ground plane antenna factor(vertical case).

그림 6은 주파수를 파라미터로 했을 때, 안테나 높이에 대한 안테나 인자 보정계수를 나타낸다. 그림 6에서 알 수 있는 것처럼 낮은 주파수에서는 안테나 높이 변화에 따라 안테나 인자 보정계수가 -4 dB에서 2 dB 정도까지 크게 변화 하지만, 주파수가 높아질수록, 또한 안테나의 높이가 높아질수록 안테나 인자 보정계수의 변화폭은

작아진다.

3. 접지판 위 안테나 인자(수직인 경우)

그림 7은 반파장 공진다이폴 안테나를 접지판 위에 수직으로 놓았을 때, 안테나의 높이를 파라미터로 한 안테나 인자의 주파수 특성 계산결과를 나타낸다. 안테나 높이를 고정했을 때 안테나 인자의 주파수 특성은 자유공간 안테나 인자를 중심으로 진동하고 있음을 그림 7로부터 알 수 있는데, 수평인 경우(그림 3)와 비교하면 진동의 폭은 아주 작다.

그림 8은 주파수를 파라미터로 했을 때, 안테나의 높이에 대한 안테나 인자의 변화를 나타낸다. 그림 8로부터 알 수 있는 것과 같이 안테나 높이가 높아질수록 안테나 인자는 자유공간 안테나 인자값으로 수렴하게 되는데, 수평인 경우(그림 4)보다 수렴속도가 빠르다. 이 사실은 곧 수평인 경우보다 수직인 경우가 접지판과의 결합이 작다는 것을 의미한다.

자유공간 안테나 인자와 비교하기 위하여 안테나 인자 보정계수 $\Delta K = K_m - K$ 를 정의하고, ΔK 의 주파수 특성을 계산하면 그림 9와 같다. 단, K_m 은 접지판 위 안테나 인자이며 K 는 자유공간 안테나 인자이다. 그림 9로부터 알 수 있는 것과 같이 안테나의 높이를 1-6m 범위에서 변화시키면, 안테나 인자의 보정계수는 100 MHz에서 최

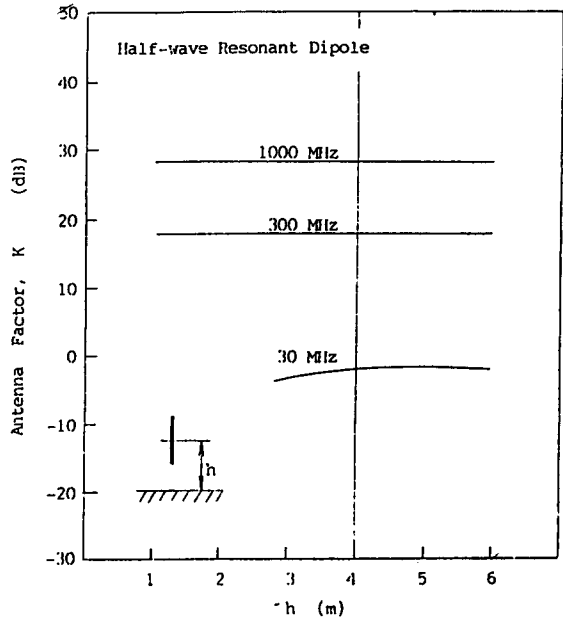


그림 8 안테나 높이에 대한 접지판 위 안테나 인자(수직인 경우)
Fig. 8 Ground plane antenna factors vs. antenna heights(vertical case).

접지판 위에 놓여진 반파장 공진다이폴 안테나의 안테나 인자

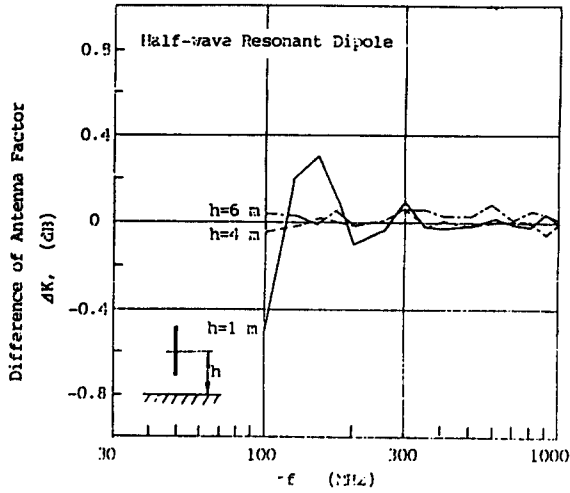


그림 9 안테나 인자 보정 계수의 주파수 특성

Fig. 9 Frequency characteristics of the antenna factor correction factor.

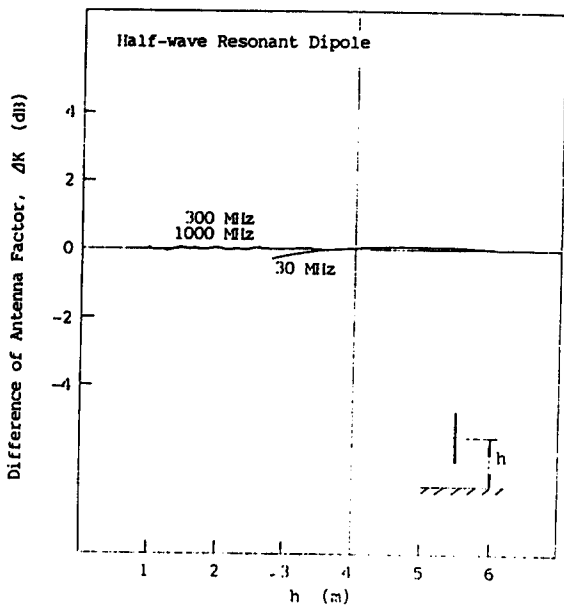


그림 10 안테나 높이에 대한 안테나 인자 보정계수

Fig. 10 Antenna factor correction factors vs. antenna heights.

대 -0.5 dB 정도이지만, 주파수가 200 MHz 이상이면 0.1 dB 이내이다.

그림 10은 주파수를 파라미터로 했을 때, 안테나 높이에 대한 안테나 인자 보정계수를 나타낸다. 그림 10에서 알 수 있는 것처럼 안테나 높이 변화에 대한 안테나 인자

보정계수는 수평인 경우(그림 6)와는 달리 약 0.2 dB 이내로써 변화폭이 아주 작다. 즉, 접지판과의 결합이 수평인 경우보다 현저하게 작다는 것을 쉽게 이해할 수 있다.

이상의 결과로부터 방사성 방해과의 측정에 있어서는 안테나 높이에 대한 안테나 인자를 정확히 알고 사용해야 한다는 것을 알 수 있는데, 수직인 경우보다 수평인 경우에 더욱 주의가 필요하다.

IV. 결 론

반파장 공진다이폴 안테나를 방사성 방해과 측정용 안테나로 사용할 경우에 대하여 접지판이 안테나 인자에 미치는 영향을 모멘트 법으로 검토하였다.

그 결과, 접지판 위에 수평으로 놓여진 경우보다 수직으로 놓여진 경우가 접지판과의 결합이 작다는 것을 알 수 있었다. 또한, 수평인 경우의 낮은 주파수 대역에서는 접지판으로부터의 안테나 높이에 따라서 안테나 인자가 현저히 변화하므로, 방사성 방해과의 측정에 있어서는 안테나 높이에 대한 안테나 인자를 정확히 알고 있어야 한다는 것이 명백해졌다.

본 논문의 결과는 방사성 방해과의 측정에 있어서 안테나 인자를 정확하게 적용하기 위한 기초자료로 유용하게 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

参 考 文 献

1. 김기채, 정낙삼, "반파장 공진다이폴 안테나의 설계와 안테나 치수가 안테나 인자에 미치는 영향에 관하여," 한국통신학회논문지, 제16권, 제8호, pp.785-792, 1991.
2. M.T. Ma and M. Kanda, "Electromagnetic Compatibility and Interference Metrology," NBS Tech. Note 1099, 1986.

본 연구는 과학기술처 특정연구 91-0500-402의 지원으로 수행되었습니다. 연구의 기회를 제공해주신 본 연구원의 정낙삼 박사님 및 관계자 여러분께 감사 드립니다.