

모멘트 법을 적용한 다이폴 안테나의 안테나 인자

(Theoretical Antenna Factors for a Cylindrical Dipole Antenna Using Moment Methods)

金基采* · 鄭然春* · 鄭樂三**

(Ki-Chai Kim · Yeon-Choon Chung · Nak-Sam Chung)

要 約

본 논문에서는 다이폴 안테나의 안테나 인자를 이론적으로 검토하였다. 안테나에 흐르는 전류분포를 모멘트 법으로 구하여 자유공간 속에 놓여진 반파장 다이폴 안테나의 유효길이와 안테나 인자를 계산하였다.

Abstracts

In this paper we discussed the theoretical antenna factor of a cylindrical dipole antenna. The Current distribution on a dipole antenna was analyzed by the method of moment, and this solution is used for calculating the effective length and antenna factor of the half-wave dipole in free space.

1. 서 론

전자파 이용분야의 급증과 함께 전자파 환경과 전기전자 장치·시스템의 영향을 연구대상으로 하는 전자파 환경기술(EMC, EMI/EMC, EMC/EMI)에 대한 관심이 높아지고 있다.⁽¹⁻³⁾우리들 인간을 포함한 모든 전기전자 장치와 시스템들은 전자파 환경속에 놓여져 있는데, 전자파 환경을 생성시키는 파원(Source)은 낙뢰나 정전기와 같은 자연현상에 따른 것 이외에, 고압 송전선이나 대전력 전자파를 방사하는 방송국 등과 같이 인위적인 것도 있다. 이러한 모든 파원은 무선통신 시스템이나 고감도 센서 등에

큰 영향을 미친다.

또한, 전기전자 장치나 시스템이 동작 중에 불필요한 전자파 에너지를 방출하는 경우도 있는데, 특히 디지털기는 고조파를 포함한 많은 잡음을 방출하고 있다. 이러한 전기전자 장치나 시스템은 불필요한 전자파 환경을 생성시키기도 하고, 또 주어진 전자파 환경에 의해 영향을 받기도 한다. 따라서, 전기전자 장치나 시스템이 설계된 기능을 충분히 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 불요 전자파를 발생하지 않도록 하고, 또 역으로 전자파 환경의 영향을 받지 않게 해야 하는 2가지의 사항을 양립시켜 생각해야 한다.

전자파 환경기술 연구의 기본과제는 이러한 2가지의 내용이 근간을 이루고 있는데, 이의 연구를 수행하기 위해서 무엇보다도 선행되어야 하는 것은 불요 전자파의 정밀 정확한 측정이다. EMI/EMC의 측정에는 전자파 반무향실, 야외시험장, 전자파 차폐실 등과 같은 측정시설에서 사용할 측정용 장비를 비롯

* 正會員, 韓國標準研究所 電磁波研究室
先任研究員.

** 正會員, 韓國標準研究所 電氣研究部長.

하여 불요 전자파를 포착할 수 있는 측정용 안테나가 필요하다. EMI / EMC 측정에 사용하는 안테나(이하, EMC 안테나라고 함)의 평가 파라미터는 정보전달을 목적으로 하는 통신용 안테나와는 달리 안테나에 유기되는 전압을 전계강도로 변환하는 파라미터인 안테나 인자를 평가하는 것이 일반적이다.

지금까지의 안테나 인자에 관한 연구는 안테나의 전류분포를 정현함수로 표현한 근사식을 사용한 근사해법(이하, 정현함수 근사라고 함)으로 검토되어 있으나,²⁾ 본 논문에서는 EMC 안테나의 기본 안테나인 반파장 다이폴 안테나의 안테나 인자를 모멘트법을 적용하여 계산하였으며, 문헌 [2]에서는 검토되어 있지 않는 안테나 소자의 길이변화에 따른 안테나 인자의 변화도 검토하였다.

그 결과, 모멘트법으로 구한 안테나 인자는 정현함수 근사로 구한 것과²⁾ 거의 동일함을 알 수 있었다. 그리고, 1,000 MHz에서 0.01λ에 해당하는 3 mm의 소자길이 변화에 따른 안테나 인자의 변화는 0.09 dB 정도이므로 안테나 제작시의 오차를 ±1 mm로 상정하면 안테나 인자변화는 <0.09 dB이므로 안테나 소자의 미소길이 변화에 따른 안테나 인자의 변화는 거의 무시할 수 있을 정도라는 것도 명백해졌다.

2. 이론해석

2-1. 구조와 좌표계

그림 1은 자유공간 속에 놓여진 다이폴 안테나의 구조와 좌표계를 나타내고 있다. 완전도체로 구성된

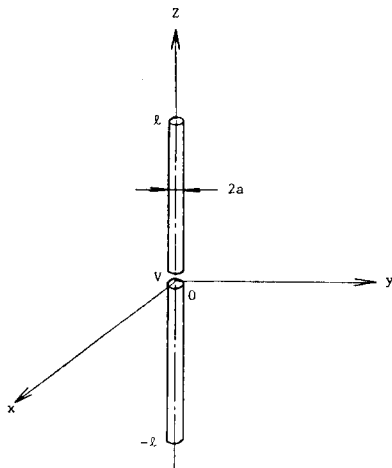


그림 1. 안테나의 구조와 좌표계
Fig. 1 Geometry of a dipole antenna.

반경 a, 길이 2 l 의 다이폴 안테나가 Z축상에 위치해 있고, 안테나의 중앙에서 전압 V로 급전한다.

2-2. 적분 방정식

그림 1의 안테나에 형성되는 전류분포 **J**에 관한 적분 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \oint_S \bar{\mathbf{K}}\mathbf{e}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{J}(\mathbf{r}') ds' = -\hat{V}Z\delta(Z) \quad (1)$$

여기서, \hat{Z} 는 Z 방향의 단위 벡터이고, ω 는 각 주파수, ϵ_0 는 진공의 유전율이다. 또, $\delta(Z)$ 는 Dirac의 Delta 함수, S는 안테나의 표면이며 시간인자 $e^{j\omega t}$ 는 생략되어 있다.

식(1)에서 적분핵은 다음 식으로 주어진다.

$$\bar{\mathbf{K}}\mathbf{e}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = (\bar{\mathbf{I}}k_0^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \quad (2)$$

여기서, $\bar{\mathbf{I}}$ 는 Unit dyadic, $k_0 = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 이고, \mathbf{r} 및 \mathbf{r}' 는 각각 관측점 및 파원점의 위치 벡터이다.

식(2)에서 $\bar{\mathbf{G}}$ 는 자유공간의 전기형 Dyadic Green 함수이고 다음 식과 같다.

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \bar{\mathbf{I}} \frac{e^{-jk_0 R}}{4\pi R} \dots\dots\dots (3)$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \dots\dots\dots (4)$$

단, (x', y', z') 는 파원점의 좌표를 (x, y, z) 는 관측점의 좌표를 나타낸다. 또, 안테나의 반경이 사용과장에 비교하여 충분히 작다고 가정하고, 전류는 안테나의 중심축상에 집중하여 흐른다고 가정한다.

2-3. 적분 방정식의 해법

전류분포에 관한 적분 방정식(1)을 잘 알려져 있는 모멘트 법(Method of Moment)⁴⁾으로 해석한다. 먼저, 전류분포 **J**를 다음과 같은 기지의 함수로 근사 전개한다.

$$\mathbf{J}(Z) = \sum_{m=1}^M a_m \mathbf{F}_m(Z) \dots\dots\dots (5)$$

여기서, a_m 은 미지의 전개계수이고, 전개함수는 다음 식과 같은 구분적 정현파 함수(Piecewise Sinusoidal function)을 선택한다.⁵⁾

$$\mathbf{F}_m(Z) = \begin{cases} \hat{Z}_{m-1} \frac{\text{sinc}_0(\Delta Z_{m-1} + Z - Z_m)}{\text{sinc}_0 \Delta Z_{m-1}} & Z_{m-1} \leq Z \leq Z_m \\ \hat{Z}_m \frac{\text{sinc}_0(\Delta Z_m - Z + Z_m)}{\text{sinc}_0 \Delta Z_m} & Z_m \leq Z \leq Z_{m+1} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

단, ΔZ_{m-1} , ΔZ_m 은 각각 $Z_{m-1} \sim Z_m$, $Z_m \sim Z_{m+1}$ 까지의 구간 길이이고, \hat{Z}_{m-1} , \hat{Z}_m 는 이들의 구간 방향을 나타내는 단위 벡터이다.

식(5)를 식(1)에 대입하고 Galerkin의 방법을 적용하면, 식(7)의 적분 방정식은 다음과 같은 연립 1차 방정식으로 변환된다.

$$\sum_{m'=1}^M a_m Z_{m'} = V_{m'} \quad (7)$$

$m' = 1, 2, \dots, M$

단,

$$Z_{m'} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_{s'} \mathbf{F}_{m'}(\mathbf{r}') \cdot \bar{\mathbf{K}} \mathbf{e}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot \mathbf{F}_m(\mathbf{r}) ds' ds \quad (8)$$

$$V_{m'} = -V \iint_s \delta(Z) \hat{Z} \cdot \mathbf{F}_{m'}(\mathbf{r}) ds \quad (9)$$

식(7)의 연립 방정식을 수치적으로 풀기 위해서는 전류분포에 관한 전개식(5)의 M을 적당한 유한함수로 선택해야 할 필요가 있다. 다음 절의 수치계산 예의 경우는 M=39로 하면 안정한 값으로 이 안테나의 입력 임피던스가 구해진다.

2-4. 안테나 인자

급전점을 개방한 안테나를 도래전파 속에 놓으면, 안테나의 특성 및 도래전파의 크기에 따라서 전압 V_0 가 안테나 단자에 유기된다. 그리고, 이 안테나의 단자에 임의의 부하 Z_L 을 연결하면 단자전압 V_L 이 발생하며, 단자전압 V_L 과 도래 전파의 전계강도 E와의 관계는 다음과 같은 비례관계가 있다.

$$E = KV_L \quad (10)$$

여기서, 전압 V_L 을 전계강도 E로 변환하는 변환계수에 해당하는 K는 안테나 인자(Antenna Factor)라고 하며, 식(10)으로부터 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{E}{V_L} \quad (11)$$

여기서, 안테나의 유효길이 h를 도입하고, 안테나의 개방단자 전압 V_0 및 안테나의 입력 임피던스 $Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$ 를 고려하면 안테나 인자는 다음과 같다.

$$K = \frac{1}{h} \left(\frac{Z_{in} + Z_L}{Z_L} \right) \quad (12)$$

단, R_{in} 은 안테나의 입력저항, X_{in} 은 입력 리액턴스이며, 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{1}{2\pi a J(0)} \quad (13)$$

2-5. 안테나의 유효길이

식(12)에서 알 수 있는 것과 같이 안테나의 안테나 인자는 유효길이 h에 관계되며 유효길이는 다음과 같이 정의된다.⁶⁾

$$h = \frac{1}{I(0)} \int_{-l}^l I(Z) dz \quad (14)$$

여기서, $I(0)$ 은 급전점 전류(전류의 최대값)이며 $I(Z)$ 는 전류 분포이다.

2-3에서 정식화한 모멘트 법으로 $I(Z)$ 및 $I(0)$ 를 구하여 유효길이를 간단히 계산할 수 있으며, 이를 식(12)에 대입하면 안테나 인자를 구할 수 있다.

2-6. 안테나 인자의 근사계산

유효길이의 근사값은 전류분포의 근사표현인 다음과 같은 정현함수

$$I(Z) = I_m \sin k_0(1 - |Z|) \quad (15)$$

을 사용하여 구할 수도 있는데, 식(15)를 식(14)에 대입하면 유효길이 h는 다음과 같다.

$$h = \frac{\lambda}{\pi} \tan\left(\frac{l\pi}{\lambda}\right) \quad (16)$$

식(16)으로부터, 반파장 안테나인 경우 $h = \lambda / \pi$ 가 되고 안테나 인자의 표현식(12)는 간단히 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \frac{Z_{in}}{Z_L} \right) \quad (17)$$

단, λ 는 사용주파수에 대한 파장이다.

미국 국립표준기술원(NIST)에서는 식(17)을 기본으로 하여 안테나가 $a \ll \lambda$, $a \ll 2l$ 라고 가정된 상태에서 $Z_{in} = 70\Omega$, $Z_L = 50\Omega$ 을 상정하여 다음의 식

$$K = \frac{\pi}{\lambda} \left(1 + \frac{70}{50}\right) \quad (18)$$

로부터 안테나 인자의 이론값을 구하고 있다.²⁾

본 논문에서는 모멘트 법으로 구한 값과 식(18)을 사용하여 구한 값을 비교 검토하고 있다.

3. 수치계산 결과 및 검토

그림 1의 안테나에 대한 안테나 인자 등의 제특성을 계산하기 위하여, 안테나의 반경을 사용주파수 영역에 따라 다음과 같이 2종류를 선택한다.

안테나의 반경

$$a = 3.175 \text{ mm}, 30 \text{ MHz} \leq f \leq 300 \text{ MHz}$$

$$0.794 \text{ mm}, 300 \text{ MHz} < f \leq 1,000 \text{ MHz}$$

위의 2 종류는 시판되고 있는 스테인레스 봉의 치수를 참고로 하여 선택한 것이며, 실제 안테나의 제작에 문제가 없도록 하였다.

그림 2는 안테나 직경과 주파수의 관계를 표시한 것이며, 이로부터 안테나의 직경은 $2a = 0.003\lambda$ 이하로 선택되어 있음을 알 수 있다.

3-1. 입력 임피던스와 공진길이

표 1은 모멘트 법으로 구한 입력 임피던스의 계산치와 실험치를 나타낸다. 표 1에서 알 수 있는 것처럼 계산치는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 공진길이의 주파수 특성을 나타내며, 또한 공진시의 입력 임피던스도 함께 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있는 것과 같이 안테나의 직경이 일정하면 주파수가 높아질수록 공진길이는 짧아진다. 즉 안테나의 직경이 클수록 공진하는 길이가 단축되며, 공진시의 입력 임피던스는 순 저항으로서 72Ω 전후임을 알 수 있다.

표 1. 입력임피던스의 실험치와 이론치와의 비교

a/λ	실험치 [Ω]	이론치 [Ω]
2.98×10^{-3}	$91.21 + j43.26$	$93.438 + j44.858$
3.97×10^{-3}	$96.42 + j43.54$	$97.180 + j43.584$

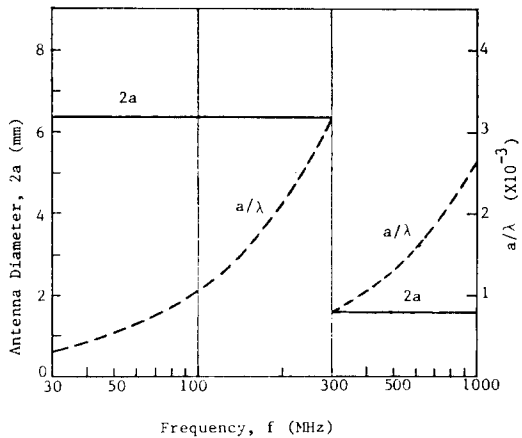


그림 2. 안테나의 직경과 주파수와의 관계

Fig. 2 Frequency characteristics of the wire diameter.

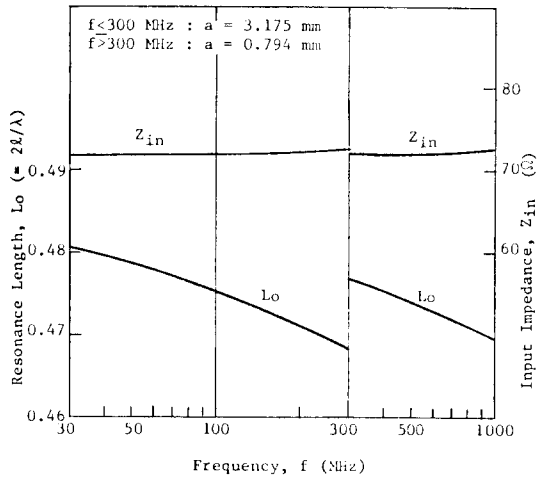


그림 3. 공진길이의 주파수 특성

Fig. 3 Frequency characteristics of the resonance length.

3-2. 유효길이

그림 4는 반파장 다이폴 안테나 및 공진 반파장 다이폴 안테나의 유효길이의 주파수와의 관계를 나타낸다. 그림 4에서 알 수 있는 것과 같이 모멘트 법으로 구한 공진 반파장 안테나의 유효길이는 정현함수 근사인 경우와 거의 동일하며 그림 4에서는 양자가 포개어져 표시되어 있다. 또한, 공진시의 유효길이는 반파장 안테나인 경우의 유효길이 보다 $0.018\lambda \sim 0.014\lambda$ 정도 단축됨을 알 수 있다.

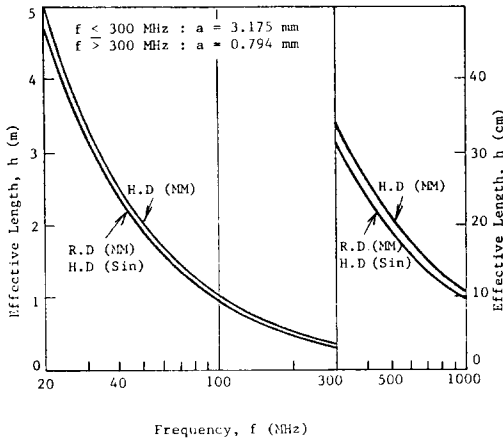


그림 4. 유효길이의 주파수 특성(H.D(MM) : 반파장 다이폴 안테나, 모멘트법, H.D(Sin) : 반파장 다이폴 안테나, 정현함수근사, R.D(MM) : 공진 반파장 다이폴 안테나, 모멘트법)

Fig. 4 Frequency characteristics of the effective length.

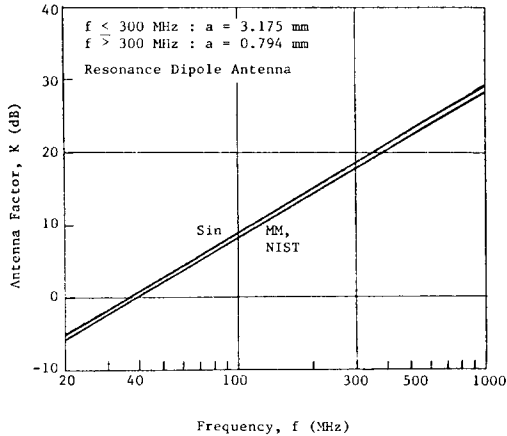
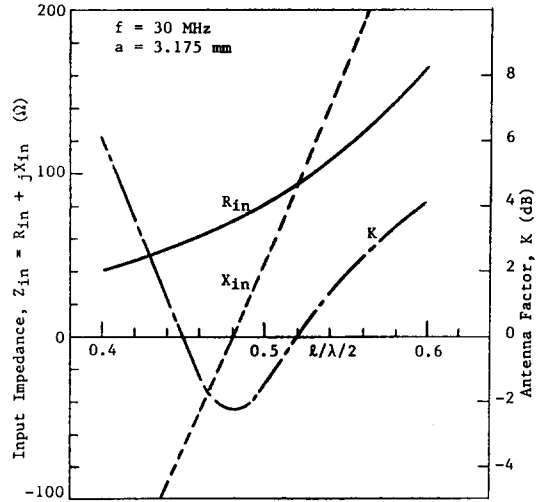


그림 5. 안테나 인자의 주파수 특성
Fig. 5 Frequency characteristics of the antenna factor.

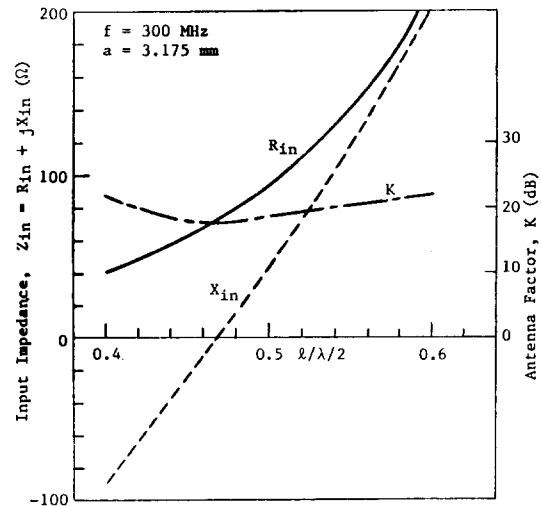
3-3. 안테나 인자

그림 5는 공진 반파장 다이폴 안테나의 안테나 인자에 대한 주파수 특성을 나타낸다. 그림 5에는 유효길이를 모멘트 법으로 구한 값과 유효길이를 정현함수 근사법으로 구한 값을 사용했을 때의 안테나 인자 및 미국 국립표준기술원(NIST)의 안테나

인자 이론값을 동시에 나타내었다. 그림 5에서 알 수 있는 것처럼 모멘트 법으로 구한 안테나 인자는 NIST의 근사치와 우연하게도 거의 동일하며 그림 5에서는 서로 겹쳐져 표시되어 있다. 정현함수 근사를 적용했을 때의 안테나 인자는 모멘트 법으로 구한 값과 비교하여 최대 0.8 dB 정도 크다.



(a) f=30 MHz



(b) f=300 MHz

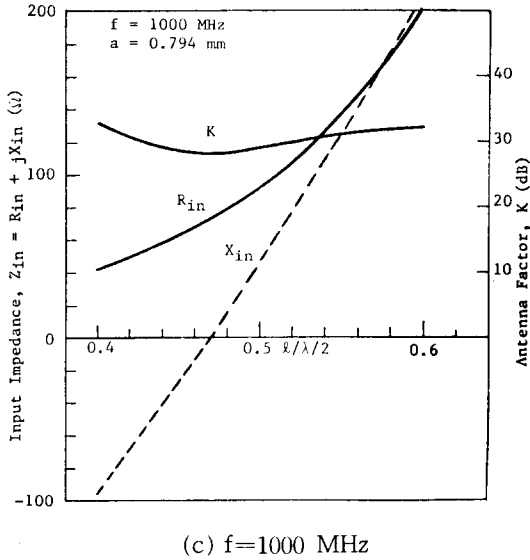


그림 6. 안테나 소자길이의 변화에 대한 입력 임피던스 및 안테나 인자의 변화

Fig. 6 Input impedance and antenna factor variations vs. dipole-length variations.

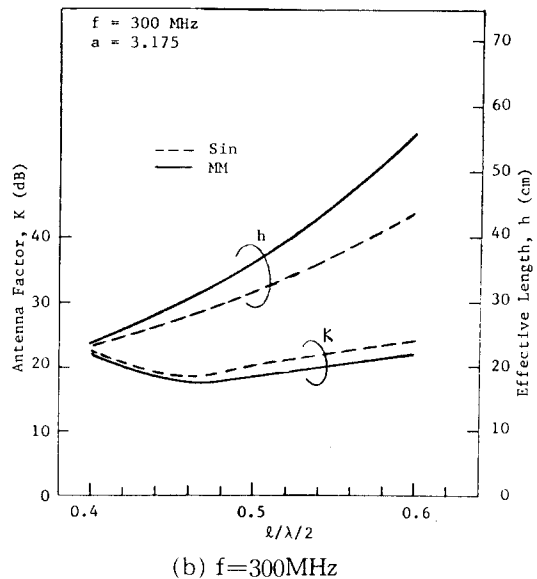
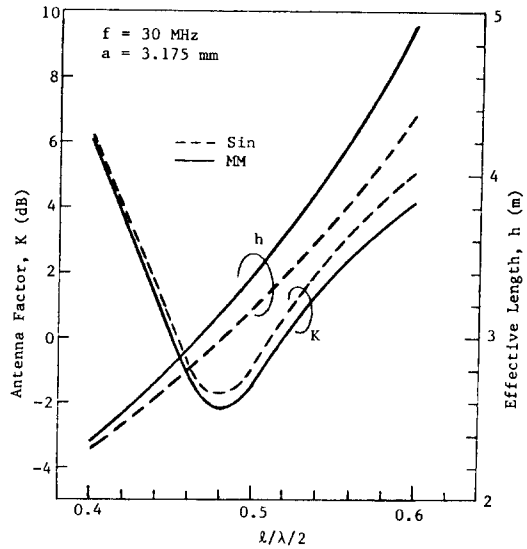
3-4. 안테나 소자의 길이 변화에 따른 입력 임피던스와 안테나 인자

그림 6은 공진 부근에서의 안테나 소자의 길이 변화에 따른 안테나의 입력 임피던스 및 안테나 인자의 변화를 나타낸다. 그림 6에서 보는 것과 같이 공진 길이 부근에서는 입력 임피던스의 실수부는 완만하게 변화하지만 허수부는 급격히 변화하고 있음을 알 수 있다. 안테나 인자는 공진길이에서 극소값을 가지며 따라서 감도가 최대이고 공진길이에서 벗어날수록 감도가 떨어짐을 알 수 있다.

그리고, 안테나 길이가 0.01λ 변화하면(그림 6에서 한 눈금에 해당), 30 MHz인 경우(그림 6(a))는 안테나 길이가 10 cm 변화하는데 이때의 안테나 인자 변화는 공진길이를 중심으로 했을 때 0.19 dB 정도이고, 그림 6(c)의 1,000MHz인 경우는 3mm의 길이 변화에 해당하며 이때의 안테나 인자 변화는 0.09 dB 정도이다. 따라서 실제 안테나 제작상의 안테나 길이 오차를 $< \pm 1\text{mm}$ 로 상정하면 안테나 인자의 변화는 거의 무시해도 된다는 것을 알 수 있다.

3-5. 안테나의 소자 길이 변화에 따른 유효길이

그림 7은 공진 부근에서의 안테나 소자길이 변화에 따른 유효길이와 안테나 인자의 변화를 나타낸다. 정현함수 근사로 구한 유효길이는 모멘트 법으로 구한 값보다 30 MHz인 경우(그림 7(a))는 0.15m 정도 작아지고, 그림 7(c)의 1,000 MHz인 경우는 0.01m 정도 작아진다. 이것은 곧 안테나 인자에 영향을 미치게 되며, 30 MHz인 경우는 0.4 dB 정도, 1,000 MHz인 경우는 0.8 dB 정도의 차이를 생성시킨다는 것을 알 수 있다.



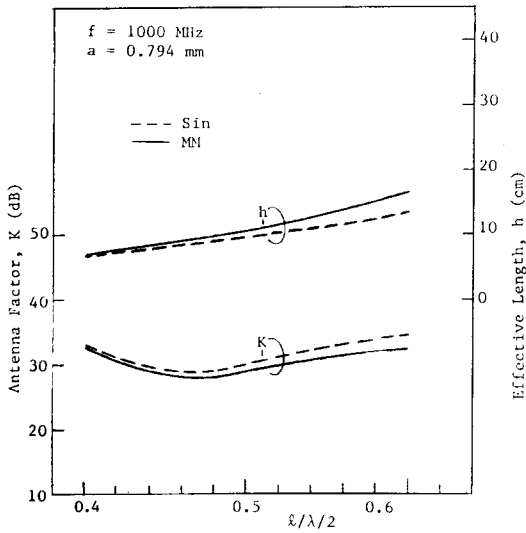
(c) $f=1,000$ MHz

그림 7. 안테나 소자길이의 변화에 대한 유효길이 및 안테나인자의 변화

Fig. 7 Effective length and antenna factor variations vs. dipole-length variations.

4. 결 론

불요 전자파의 전계강도를 계측하는데 사용하는 안테나는 안테나의 전압-전계 변환계수에 해당하는 안테나 인자를 정확히 알고 있어야만 정밀 정확한 전계강도를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 불요전자파의 전계강도 측정에 사용하는 기준 안테나인 반파장 다이폴 안테나의 안테나 인자를 모멘트 법을 적용하여 구하였고, 지금까지 알려져 있는 안테나 인자 이론값과 비교 검토하였다.

그 결과, 모멘트 법으로 구한 안테나 인자는 기존의 정현함수 근사로 구한 안테나 인자와 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다. 또한, 안테나 소자의 길이 변화에 따른 안테나 인자의 변화도 ± 1 mm 정도의 소자 길이 변화에 대해서는 거의 무시해도 된다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 정낙삼, 김기채, 정연춘, "EMI/EMC 현황과 전망", 전자공학회지, 제16권, 제5호, pp.419~427, 1989.
- [2] M.T. Ma and M. Kanda, "Electromagnetic Compatibility and Interference Metrology", NBS Tech. Note 1099, Jul. 1986.
- [3] 高木 相, "EMC/EMIとその 将来", 計測と制御, Vol. 29, No. 5, pp.400~40, May, 1990.
- [4] R.F. Harrington, "Field Computation by Moment Methods", Macmillan, New York, 1968.
- [5] K. Fujimoto et. al., "Small Antennas", Res. Study Press, 1987.
- [6] 예를들면, 虫明康人, "アンテナ・電波傳搬", 第3章, コロナ社, 東京, 1973.