

모멘트법과 기전력법을 적용한 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자 특성 비교

A Comparison of Antenna Factor Characteristics for a Calculable Dipole Antenna by MoM and EMF Method

김기채 · 김상명 · 김기출* · 권재용** · 강태원** · 김정환**

Ki-Chai Kim · Sang-Myeong Kim · Ki-Chul Kim* · Jae-Yong Kwon** · Tae-Weon Kang** · Jeong-Hwan Kim**

요 약

본 논문에서는 하이브리드 balun을 갖는 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자 특성을 모멘트법과 기전력법으로 계산하여 비교하고 있다. 안테나 인자의 표현식은 전력부정합손실의 개념을 적용하여 도출한 식을 사용하였으며, 안테나 인자의 계산에서 나타나는 안테나의 입력 임피던스 및 유효길이는 모멘트법과 기전력법을 적용하여 계산하고 있다. 그 결과, 모멘트법과 기전력법에 의한 입력 임피던스 특성은 최대 17 Ω 정도의 차이가 발생하지만, 안테나 인자 특성은 0.24 dB 이내에서 일치하고 있음을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents a comparison of antenna factor characteristics computed by the Method of Moments(MoM) and the electromotive force(EMF) method for a calculable dipole antenna with a hybrid balun. An expression for the antenna factor is formulated using the concept of power mismatch loss. The input impedance and effective length of the antenna, which are in the formula of the antenna factor, are calculated using the two methods. The results show that the antenna factors are agreed within 0.24 dB, although the maximum difference between the input impedances obtained from the two methods is about 17 Ω.

Key words : Calculable Dipole Antenna, Antenna Factor, Hybrid Balun, MoM, EMF method

I. 서 론

계산가능 다이폴안테나(calculable dipole antenna)는 안테나 인자의 교정과 안테나시험장 또는 EMC 시험 야외시험장의 적합성 평가에 사용된다. 이러한 계산가능 다이폴안테나에 대한 연구는 30~1,000

MHz의 주파수 대역에 걸쳐 안테나 인자의 교정 및 안테나시험장 평가용으로 사용되고 있으며^{[1]-[10]}, 최근에는 1~2.2 GHz의 주파수 대역용^[6] 뿐만 아니라, 1~6 GHz의 주파수 대역에서 사용하기 위한 계산가능 다이폴안테나가 보고되고 있다^[7].

계산가능한 다이폴안테나의 기본 개념은 안테나

「본 연구는 2011년도 한국표준과학연구원의 연합공동연구사업으로 수행한 결과의 일부임.」

영남대학교 전기공학부(Department of Electrical Engineering, Yeungnam University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

**한국표준과학연구원 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Korea Research Institute of Standards and Science(KRIS))

· Manuscript September 22, 2011 ; Revised January 2, 2012 ; Accepted January 9, 2012. (ID No. 20110922-02S)

· Corresponding Author : Ki-Chai Kim (e-mail : kckim@ynu.ac.kr)

소자에 대한 이론계산 결과(입력 임피던스, 유효길이)와 안테나 소자를 제외한 balun 부분의 S-파라미터 측정 결과를 결합하여 안테나의 특성(안테나 인자)을 결정하는 것이다.

다이폴안테나의 이론해석은 전류분포에 관한 적분방정식을 모멘트법으로 해석하여 안테나 특성에 관한 수치해를 비교적 정밀하게 구할 수 있다. 이와 같은 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자에 대한 이론해석과 실험적 연구는 영국의 측정 표준 기관인 NPL(National Physical Laboratory)을 중심으로 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다^{[3]-[6]}.

본 논문에서는 1~3 GHz 주파수 대역에서 사용하기 위한 계산가능 표준 다이폴안테나의 설계에 있어서, 안테나의 이론해석법이 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 모멘트법(MoM: Method of Moments)^[11]과 기전력(EMF: Induced ElectroMotive Force)법^[12]을 적용한 계산한 결과를 비교 검토하였다.

안테나 인자의 계산에는 일반적으로 S-파라미터로 유도한 안테나 인자의 표현식을 사용하고 있으나, 본 논문에서는 안테나를 구성하는 각 접속부에서의 전력부정합손실을 적용한 안테나 인자의 표현식^[14]를 사용하여 안테나 인자 특성을 평가하였다.

그 결과, 모멘트법으로 계산한 안테나의 공진길이는 기전력법에 의한 계산결과와 거의 동일하지만, 입력 임피던스는 최대 17 Ω 정도의 차이가 발생하고 있으며, 안테나 인자는 최대 0.24 dB 정도 차이가 발생하고 있음을 확인할 수 있었다. 기전력법은 직선형상에만 적용할 수 있는 단점을 가지고 있지만, 간편하게 closed-form의 해를 얻을 수 있는 장점이 있어서 안테나의 임피던스 계산에는 많이 사용되어 왔다. 그러나, 표준 다이폴안테나의 설계에서는 보다 정확한 전류분포의 계산이 가능한 모멘트법을 적용하는 것이 바람직하다. 이론해석의 타당성을 검증하기 위해 실험결과와도 비교하였다.

II. 이론해석

2-1 계산가능 다이폴안테나의 구조

그림 1은 하이브리드 balun으로 구성된 계산가능 다이폴안테나의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 보는

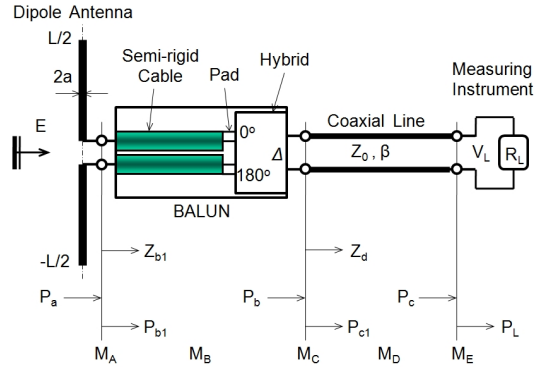


그림 1. 하이브리드 balun으로 구성된 다이폴안테나
Fig. 1. The dipole antenna with a hybrid balun.

것처럼, 3 dB 180° 하이브리드 커플러는 동축 케이블(semi-rigid coaxial cable)을 통하여 다이폴 소자와 연결되어 있으며, 커플러의 출력단은 동축 케이블(coaxial line)을 통하여 측정 장치와 접속되어 있다.

다이폴 소자의 급전단에서 동축 케이블을 포함한 하이브리드 커플러까지가 balun에 해당하며, balun은 다음과 같이 구성되어 있다. 하이브리드 커플러는 입력단(0° 단자와 180° 단자)과 출력단(Δ 단자, ∇ 단자는 50 Ω으로 종단함)으로 구성되며, 안테나 소자에서 하이브리드의 입력단까지는 50 Ω 동축 케이블을 이용하여 연결한다. 동축 케이블과 하이브리드 커플러의 입력단 사이에는 3 dB pad가 삽입되어 있다. 하이브리드 커플러 출력단의 Δ 단자는 동축 케이블을 통하여 측정기와 연결되어 있다. 그림 1에서 보는 것처럼, balun은 다이폴 소자의 급전부에서 하이브리드 커플러의 Δ 단자까지이며, 위상 정합된 2개의 동축 케이블과 2개의 50 Ω 3 dB pad, 3 dB 180° 하이브리드 커플러로 구성된다.

2-2 안테나 인자 표현식

그림 1에서 안테나 소자에 입사하는 전기장의 세기 E와 측정기에서 측정되는 전압 VL로부터 안테나 인자를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 전력부정합손실의 개념을 도입하여 유도한 안테나 인자 표현식을 사용한다^{[14]-[16]}.

안테나로부터의 유능전력을 P_{av} , 수신기에 전달되는 전달전력을 P_L 이라 하면 각각 다음과 같이 주어진다.

$$P_a = \frac{|V_{ac}|^2}{4R_a} = \frac{|E|^2|h_c|^2}{4R_a} \quad (1)$$

$$P_L = \frac{|V_L|^2}{R_L} \quad (2)$$

안테나와 수신기 사이의 전체 전력손실 M_t 는 P_a/P_L 로 주어지므로, 여기에 식 (1)과 식 (2)를 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$M_t = \frac{|E|^2|h_c|^2R_L}{4R_a|V_L|^2} \quad (3)$$

위의 식으로부터 안테나 인자는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AF = \frac{2}{|h_c|} \sqrt{\frac{R_a}{R_L}} \sqrt{M_t} = AF_0 \sqrt{M_t} \quad (4)$$

여기서, R_a 는 안테나의 입력저항을 나타내며, R_L 은 수신기의 임피던스, h_c 는 안테나의 유효길이이다. 또한, $AF_0 = (2/|h_c|) \sqrt{R_a/R_L}$ 는 수신기가 다이폴안테나에 직접 연결되었을 때의 안테나 인자를 나타낸다. 안테나와 수신기 사이의 전체 전력손실 M_t 는 다음 식으로 주어진다.

$$M_t = \sqrt{\frac{|Z_t + R_L|}{8R_aR_L} \left| \frac{Z_{11} + Z_a}{Z_{12}} \left| \left(\frac{Z_0 + Z_T}{Z_0} \right) \frac{1 - \Gamma_S e^{-2\gamma L}}{2e^{-\gamma L}} \right|^2 \right|} \quad (5)$$

여기서,

$$Z_t = Z_0 \frac{1 + \Gamma_S e^{-2\gamma L}}{1 - \Gamma_S e^{-2\gamma L}} (\equiv R_t + jX_t) \quad (6)$$

$$Z_T = Z_{22} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11} + Z_a} (\equiv R_T + jX_T) \quad (7)$$

$$\Gamma_S = \frac{Z_T - Z_0}{Z_T + Z_0} \quad (8)$$

또한, $Z_0 = 50 \Omega$, $\gamma = \alpha + j\beta$ 이며, α 는 케이블의 감쇠정수, β 는 케이블의 위상정수를 나타낸다. Z_{ij} ($i, j=1,2$)는 balun의 임피던스 파라미터를 나타낸다.

전력부정합손실의 개념을 도입하여 도출한 안테나 인자의 표현식인 식 (4)로 계산한 안테나 인자는

NPL에서 도출한 안테나 인자 표현식으로 계산한 안테나 인자와 같은 값을 갖는다는 것을 확인하였다.

안테나 인자를 계산하기 위해서는 위의 식에서 나타나는 Z_{ij} 와 Z_a 를 구해야 하는데, balun의 임피던스 Z_{ij} 는 3-포트 balun의 산란 행렬을 측정하여 2-포트 balun의 산란 행렬로 변환하여 구할 수 있다^{[15],[16]}. 안테나의 입력 임피던스 Z_a 는 이론해석을 통한 수치해를 사용한다. 본 논문에서는 다이폴안테나의 입력 임피던스를 모멘트법으로 계산하여 안테나 인자를 구하였다. 모멘트법에 의한 해석 결과와 비교하기 위하여 기전력법을 사용한 안테나 인자의 계산결과도 함께 검토하였다.

2-3 모멘트법 해석

소자의 길이가 L 이고, 반경이 a 인 다이폴안테나가 z 축 상에 놓여 있고, 다이폴의 중앙에서 전압 V 로 급전하면 다이폴안테나에 흐르는 전류분포에 관한 적분방정식은 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{1}{j\omega\epsilon_0} \oint_s (\bar{I} k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}(\bar{r}') ds' = -V \hat{z} \delta(z) \quad (9)$$

여기서, \bar{I} 는 단위 다이아덱, $k = \sqrt{\epsilon_0\mu_0}$, $\delta(0)$ 는 Dirac의 델타함수, \hat{z} 는 z 방향의 단위벡터, ϵ_0 및 μ_0 는 각각 자유공간의 유전율 및 투자율을 나타내며, ω 는 각주파수이다. \bar{G} 는 자유공간의 다이아덱 그린함수이다.

전류분포에 관한 적분방정식 식 (9)를 모멘트법으로 해석하기 위해 전류분포 \bar{J} 를 다음과 같이 기지함수로 전개한다.

$$\bar{J}(\bar{r}) = \sum_{m=1}^M a_m \bar{F}_m(\bar{r}) \quad (10)$$

여기서, a_m 은 구해야 할 미지의 전개계수이며, \bar{F}_m 은 잘 알려져 있는 구분적정현함수이다.

식 (10)을 적분방정식 (9)에 대입하고 Galerkin의 모멘트법을 적용하면 적분방정식은 다음과 같은 일차방정식으로 변환된다.

$$\sum_{m=1}^M a_m Z_{m'm} = V_{m'} \quad (11)$$

여기서, $Z_{m'm}$ 은 일반화 임피던스비, $V_{m'}$ 은 일반화 전압비이며, 이들은 각각 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{m'm} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_s \iint_{s'} \overline{F_{m'}}(\vec{r}) \cdot (\overline{I}k^2 + \nabla\nabla) \cdot \overline{G}(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \overline{F_{m'}}(\vec{r}') ds' ds \quad (12)$$

$$V_{m'} = - \iint_s V\delta(z) \hat{z} \cdot \overline{F_{m'}}(\vec{r}) ds \quad (13)$$

안테나 인자를 계산하기 위해서는 다이폴안테나의 입력 임피던스뿐만 아니라, 유효길어도 계산하여야 하며, 유효길이는 다음의 정의식으로부터 계산할 수 있다.

$$h_e = \frac{1}{I(0)} \int_{-L/2}^{L/2} I(z) dz \quad (14)$$

모멘트법으로 정식화하면 식 (14)의 유효길이는 다음과 같이 주어진다.

$$h_e = \frac{2}{I(0)} \sum_{m=1}^M a_m \frac{1 - \cos(k\Delta z_m)}{k \sin(k\Delta z_m)} \quad (15)$$

여기서, $I(0)$ 는 급전점의 전류치를 나타내고, $\Delta z_m = z_{m+1} - z_m = z_m - z_{m-1}$ 이다.

2.4 기전력법 해석

기전력법은 전류분포를 미리 가정하여 안테나의 임피던스를 구하는 방법이다. 기전력법에 의한 안테나의 임피던스는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_s = \frac{-1}{I(0)I^*(0)} \iint_S E(s)I^*(s)ds \quad (16)$$

여기서, $I(0)$ 는 급전점의 전류치이며, $E(s)$ 는 전류 I 에 의하여 안테나 표면에 생성되는 전기장이다. (*)는 공액 복소수를 나타내며, S 는 안테나의 표면을 나타낸다.

식 (16)에서 전류분포는 Hallen에 의해서 주어질 식의 제 1근사로서 다음과 같은 함수를 사용한다.

$$I(z) = I_m \sin k(L/2 - |z|), \quad |z| \leq L/2 \quad (17)$$

위의 전류로부터 생성되는 전기장은 다음과 같다.

$$E_z(z) = \frac{I_m}{j4\pi\omega\epsilon_0} \left(\frac{d^2}{dz^2} + k^2 \right)$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} \sin k\left(\frac{L}{2} - |z'|\right) \frac{e^{-jkR}}{R} dz \quad (18)$$

식 (17)과 식 (18)을 식 (16)에 대입하면 안테나의 입력 임피던스를 계산할 수 있으며, 구체적인 표현식은 생략하였다.

기전력법으로 계산한 안테나의 유효길이는 전류 분포의 식 (17)을 식 (14)에 대입하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_e = \frac{\lambda}{\pi} \tan\left(\frac{\pi L}{2\lambda}\right) \quad (19)$$

여기서, λ 는 사용파장을 나타낸다.

III. 수치계산 결과 및 검토

표 1은 이론해석의 타당성을 검토하기 위해 입력 임피던스의 실험치와 계산치를 비교한 것이다. 표 1에서 보는 것처럼, 모멘트법으로 계산한 입력 임피던스의 이론치는 실험치^[13]와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 표 1에서 MoM은 모멘트법을 나타내고, EMF는 기전력법을 나타낸다.

그림 2는 모멘트법과 기전력법을 이용하여 다이폴 안테나의 자유공간 공진길이를 계산한 결과이다. 모멘트법과 기전력법으로 계산한 자유공간 공진길

표 1. 입력 임피던스의 이론치와 측정치
Table 1. Calculated and measured input impedances.

Radius a/λ	Calculated $Z_{in}(\Omega)$		Measured $Z_{in}(\Omega)$
	MoM	EMF	
2.98×10^{-3}	93.44+j 44.86	73.13+j 41.42	91.21+j 43.26
3.97×10^{-3}	97.18+j 43.58	73.12+j 41.05	96.42+j 43.54

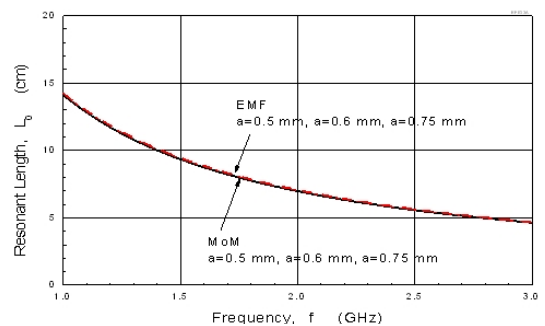


그림 2. 공진길이의 주파수 특성
Fig. 2. Frequency characteristics of the resonant length.

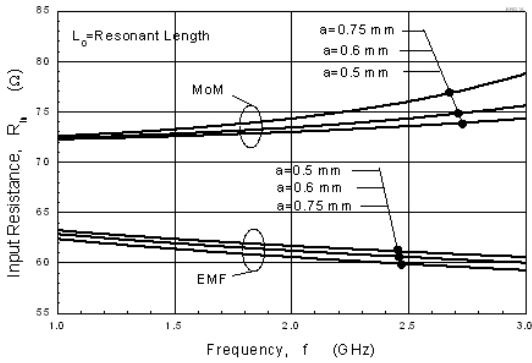


그림 3. 주파수에 대한 입력 저항 특성
Fig. 3. Input resistance as a function of the frequency.

이는 3가지의 다이폴의 반경(0.5 mm, 0.6 mm, 0.75 mm)에 대하여 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

그림 3은 주파수에 대한 공진시의 입력저항 특성을 나타낸다. 그림 3으로부터 공진시의 입력저항은 다이폴의 반경 및 해석법의 종류에 크게 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있다. 모멘트법으로 계산한 공진시의 입력저항은 기전력법으로 계산한 입력저항보다 낮은 주파수에서 10 Ω 정도, 높은 주파수에서 17 Ω 정도 크게 나타났다.

그림 4는 모멘트법과 기전력법을 이용하여 자유공간 안테나 인자를 계산한 결과이다. 그림으로부터 알 수 있는 것처럼, 모멘트법과 기전력법으로 계산한 자유공간 안테나 인자는 최대 0.24 dB의 차이가 있으며, 모멘트법으로 계산한 안테나 인자가 더 작은 값을 나타내고 있다.

그림 5는 안테나 balun의 산란행렬 측정치를 사

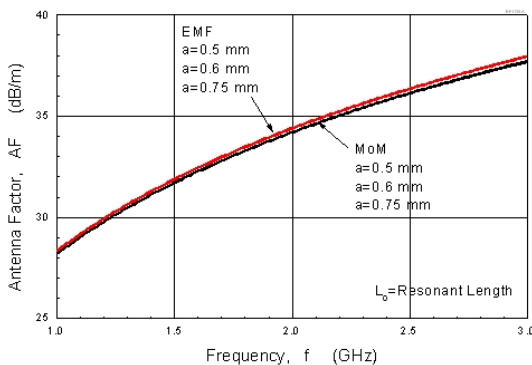


그림 4. 안테나 인자의 주파수 특성 비교
Fig. 4. Comparison of frequency characteristics of the antenna factor.

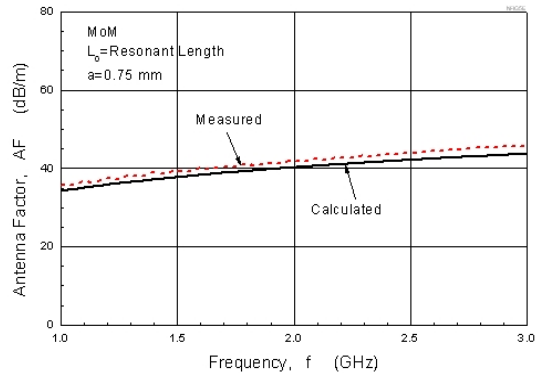


그림 5. 안테나 인자의 이론치와 측정치
Fig. 5. Calculated and measured antenna factors.

용하여 구한 안테나 인자의 주파수 특성을 나타낸다. 안테나 인자의 이론치와 측정치를 비교해보면 그 경향은 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 제작된 balun에는 굴곡이 있는 동축 케이블이 내장되어 있고, 또한 balun을 구성하는 동축 케이블 등의 도체 손실이 이론계산에는 포함되어 있지 않는 점 등을 고려하면 안테나 인자의 측정치와 이론치는 비교적 잘 일치하고 있다.

IV. 결 론

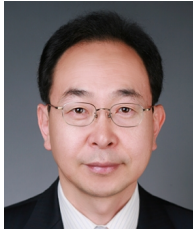
본 논문에서는 1~3 GHz 주파수 대역에서 사용하기 위한 계산가능 표준 다이폴안테나의 설계에 있어서, 안테나의 이론해석법이 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 모멘트법과 기전력법을 적용한 계산한 결과를 비교 검토하였다.

그 결과, 모멘트법으로 계산한 공진길이는 기전력법으로 계산한 공진길이와 거의 동일하지만, 안테나의 입력저항은 기전력법으로 계산한 입력저항보다 10~17 Ω 정도 크게 나타났다. 또한, 모멘트법으로 계산한 안테나 인자는 기전력법으로 계산한 안테나 인자와 비교하여 최대 0.24 dB 정도 작은 값을 가지며 큰 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었다. 기전력법은 간편하게 closed-form의 해를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 표준 다이폴안테나의 설계에서는 보다 정확한 전류분포의 계산이 가능한 모멘트법을 적용하는 것이 바람직하다.

참 고 문 헌

- [1] CISPR 16-4(2002-05), "Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 4: Uncertainty in EMC measurements", IEC, Geneva.
- [2] ANSI C63.5: 1998, "American national standard for electromagnetic compatibility-radiated emission measurements in electromagnetic interference(EMI) Control-calibration of antennas(9 kHz to 40 GHz)", (The methods of antenna calibration are unchanged from C63.5:1988), ANSI, Washington, DC.
- [3] M. J. Salter, M. J. Alexander, "EMC antenna calibration and the design of an open-field site", *Jnl. of Phys. E, Meas. Sci. Technol.*, pp. 510-519, Feb. 1991.
- [4] M. J. Alexander, M. J. Salter, "Low measurement uncertainties in the frequency range 30 MHz to 1 GHz using a calculable standard dipole antenna and national reference ground plane", *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, vol. 143, no. 4, pp. 221-228, Jul. 1996.
- [5] M. J. Alexander, M. Salter, M. Loader, and B. D. Knight, "Broadband calculable dipole reference antennas", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 44, no. 1, pp. 45-58, Feb. 2002.
- [6] B. G. Loader, M. J. Alexander, "A calculable dipole antenna to cover the frequency range 850 MHz to 2.2 GHz", *2004 Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, pp. 194-195, Jun. 2004.
- [7] M. Sakasai, A. Suzuki, T. Sugiyama, K. Koike, H. Masuzawa, and K. Fujii, "Trial model of calculable dipole antenna for the frequency range from 1 to 6 GHz", *National Convention Records of the IEICE, Communications(1)*, B-4-12, Mar. 2006.
- [8] 조원서, 안테나 고정 야외시험장 평가 기술에 관한 연구, 산업기술평가원, Nov. 2006.
- [9] A. Kazemipour, X. Begaud, "Calculable dipole antenna for EMC measurements with low-loss wide-band balun from 30 MHz to 2 GHz", *Electromagnetics*, vol. 25, issue 3, 2005.
- [10] T. Morioka, "Uncertainty of free-space dipole antenna factor from 1 GHz to 2 GHz", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-58, no. 4, pp. 1135-1140, Apr. 2009.
- [11] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, IEEE Press, New York, 1993.
- [12] P. S. Carter, "Circuit relations in radiation systems and applications to antenna problems", *Proc. IRE*, vol. 20, pp. 1004-1041, Jun. 1932.
- [13] R. W. P. King, *Tables of Antenna Characteristics*, Plenum Press, 1971.
- [14] K. -C. Kim, S. -M. Kim, J. -Y. Kwon, T. -W. Kang, and J. -H. Kim, "The design of calculable standard dipole antennas in the frequency range of 1~3 GHz", *Proceedings of ISAP 2011, SE10-1006*, Oct. 2011.
- [15] W. S. Bennett, "Properly applied antenna factors", *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-28, no. 1, pp. 2-6, Feb. 1986.
- [16] 김기채, 김상명, 조병호, 서재분, 1~3 GHz 주파수 범위의 표준 다이폴안테나 설계 및 제작 기술, 한국표준과학연구원 연합협동연구보고서, 2011년 10월.

김 기 채



1984년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 3월: Keio University 전기공학과 (공학석사)
 1989년 3월: Keio University 전기공학과 (공학박사)
 1989년 4월~1993년 3월: 한국표준과학연구원 전자파연구실 선임연구원
 1993년 4월~1995년 8월: 일본 후쿠오카 공업대학 정보공학과 조교수
 1995년 9월~현재: 영남대학교 전기공학과 교수
 2012년 1월~현재: 한국전자과학회 회장
 1988년 IEICE Japan, Young Scientist Awards
 1994년 IEE Japan, Paper Presentation Awards
 [주 관심분야] EMC/EMI 관련 안테나 및 전자파 차폐, 전자파 이론 및 응용

김 기 출



1999년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2009년 8월: University of Colorado at Boulder 전기전산 및 에너지공학과 (공학석사)
 2011년 5월: University of Colorado at Boulder 전기전산 및 에너지공학과 (공학박사)
 1999년 10월~2001년 7월: 노키아티엠씨 근무
 2001년 8월~2003년 4월: 에이스테크놀로지 주임연구원
 2003년 12월~2005년 6월: 스카이크로스 코리아 선임연구원
 2006년 6월~2010년 12월: University of Colorado at Boulder 연구조교
 2008년 3월~2011년 1월: National Institute of Standards and Technology 객원연구원
 2011년 5월~2011년 10월: 영남대학교 공업기술연구소 연구원
 2011년 11월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나, 응용전자기학, 나노 물질의 모델링 및 측정

김 상 명



2011년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
 2011년 3월~현재: 영남대학교 전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMC/EMI, 전자파 차폐

권 재 용



1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2002년 2월~2005년 3월: LG전자기술원 소재재료연구소 선임연구원
 2005년 4월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임연구원
 [주 관심분야] 전자파 측정표준(전자파 전력, EMC 안테나 등)

강 태 원



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

1990년 2월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원, 센터장

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음, 전력, SAR 측정프로브 교정), EMC 측정표준

김 정 환



1978년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1980년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2000년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(RF 전압, 전력, 안테나, 물질상수 등)