

1~3 GHz 대역용 계산가능 다이폴안테나의 접지판 위 안테나 인자 특성

임성민¹ · 김상명¹ · 정성우² · 김기채^{3*}

Characteristics of Antenna Factor for a Calculable Dipole Antenna above Ground Plane in 1~3 GHz Frequency Band

Sung-Min Lim¹ · Sang-Myung Kim¹ · Sung-Woo Jung² · Ki-Chai Kim^{3*}

¹SL Co., Kyeongsan, Korea

²Gyeongbuk Research Institute of Vehicle Embedded Technology, Yeongcheon 770-200, Korea

^{3*}Department of Electrical Engineering, Yeungnam University, Kyeongsan 712-749, Korea

요 약

본 논문은 하이브리드 발룬을 갖는 계산가능 다이폴안테나가 접지판 위에 수평 및 수직으로 놓여 있을 경우의 안테나 인자 특성을 모멘트법으로 검토하고 있다. 안테나 인자의 표현식은 전력부정합손실의 개념을 적용하여 도출한 식을 사용하였으며, 안테나 인자의 계산에서 나타나는 안테나의 입력 임피던스 및 유효길이는 모멘트법을 적용하여 계산하고 있다. 그 결과, 접지판 위에서의 안테나 인자 특성은 안테나의 편파상태에 따라 달라지며 자유공간 안테나 인자와는 최대 ± 0.14 dB 의 차이가 발생함을 알 수 있었다. 또한, 수평편파인 경우의 안테나 인자 변동폭이 수직편파인 경우보다 0.2 dB 정도 더 크다는 것도 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper presents the antenna factor characteristics of a calculable dipole antenna with a hybrid balun, installed above ground plane vertically and horizontally, using Method of Moments (MoM). 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 MoM. The results show that the antenna factors above a ground plane are agreed with the free space antenna factors within ± 0.14 dB. The horizontal antenna factors are varied more by 0.2 dB than the vertical antenna factors.

키워드 : 계산가능 다이폴안테나, 안테나 인자, 하이브리드 발룬, 모멘트법, 접지판

Key word : Calculable dipole antenna, antenna factor, hybrid balun, method of moments, ground plane

Received 30 June 2015, Revised 24 July 2015, Accepted 04 August 2015

* Corresponding Author Ki-Chai Kim (E-mail: kckim@ynu.ac.kr, Tel: +82-53-810-2583)

Department of Electrical Engineering, Yeungnam University, Kyeongsan 712-749 Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.9.1991>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

30~1000 MHz의 주파수 대역에서 사용하는 Roberts 발룬을 내장한 다이폴안테나는 ANSI 규격에 제시되어 있으나[1], 최근에는 계산가능 다이폴안테나 (calculable dipole antenna)가 제안되어 안테나 인자의 교정과 안테나시험장 또는 EMC 시험 야외시험장의 적합성 평가에 사용된다[2]. 이러한 계산가능 다이폴안테나에 대한 연구는 30~1000 MHz의 주파수 대역에 걸쳐 안테나 인자의 교정 및 안테나시험장 평가용으로 보고되고 있다[2-10]. 하이브리드 발룬을 내장한 계산가능 표준 다이폴안테나는 4개의 다이폴안테나를 사용한 30~1000 MHz 주파수 대역용 표준 안테나가 보고되어 있으며[4, 5], 850 MHz~2.2 GHz 주파수 대역용[6] 및 1~3 GHz 주파수 대역용[7, 8]뿐만 아니라, 3개의 안테나 A (1~2 GHz), B (2~4 GHz), C (4~6 GHz)를 사용하여 1~6 GHz의 주파수 대역을 커버하기 위한 계산가능 다이폴안테나도 보고되어 있다[9]. 30 MHz~2 GHz대역을 커버하기 위해 광대역 발룬을 사용한 계산가능 다이폴안테나[11] 및 다이폴 안테나의 안테나 인자에 대한 불확도 산출에 관한 연구도 보고되어 있다 [12].

계산가능한 다이폴안테나의 기본 개념은 문헌[8]에서 언급한 바와 같이, 안테나 소자를 제외한 balun 부분의 S-파라미터 측정결과를 안테나 소자에 대한 이론계산 결과 (입력 임피던스, 유효길이)와 결합하여 안테나의 특성 (안테나 인자)을 결정하는 것이다.

이와 같은 계산가능 다이폴안테나의 안테나 인자에 대한 이론해석과 실험적 연구는 영국의 측정표준기관인 NPL (National Physical Laboratory)을 중심으로[3-6] 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다. 자유공간에서 공진하도록 설계된 다이폴안테나를 무한히 넓은 접지판 위에서 사용하게 되면 안테나 높이에 따라서 안테나의 급전점 임피던스가 변하게 되어 안테나 인자도 변한다. 즉, 접지판 위의 안테나 인자는 자유공간 안테나 인자와는 다른 값을 가지게 된다. 실제로 야외시험장에서 EMC 시험을 실시할 때에는 접지판 위에서 시험하도록 규정하고 있으므로 측정용 EMC 안테나는 접지판 위에서 사용하게 된다.

이 경우에는 EMC 안테나가 접지판과의 결합에 의한 영향뿐만 아니라 EUT와의 결합에 의한 영향도 동시에

받게 된다. 또한, 야외시험장의 적합성을 평가할 때에는 자유공간에서 설계된 다이폴안테나가 접지판 위의 송수신 위치에 각각 놓이므로 접지판 및 안테나 간의 상호결합에 의해 송·수신 안테나의 안테나 인자는 변하게 된다.

본 논문에서는 자유공간에서 설계된 계산가능 다이폴안테나가 접지판 위에 놓여질 때 접지판 위에서 안테나 인자가 어떻게 변하는지를 수평면파 및 수직면파에 대하여 모멘트법 (MoM, Method of Moments)을 적용하여 계산한 결과를 비교 검토하였다. 그 결과, 접지판 위에서의 안테나 인자 특성은 안테나의 편파상태 (수평면파 및 수직면파)에 따라 달라지며 자유공간 안테나 인자와는 최대 ± 0.14 dB의 차이가 발생할 수 있었다. 이론해석의 타당성을 검증하기 위해 실험결과와도 비교하였다.

II. 이론해석

2.1. 계산가능 다이폴안테나의 구조

그림 1은 접지판 위에 놓여진 하이브리드 balun을 사용한 계산가능 다이폴 안테나의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 보는 것처럼, 3 dB 180° 하이브리드 커플러는 입력단 (0° 단자와 180° 단자)과 출력단 (Δ 단자, Σ 단자는 50 Ω 으로 종단함)으로 구성되며, 안테나 소자에서 하이브리드의 입력단까지는 50 Ω 동축 케이블 (semi-rigid coaxial cable)을 이용하여 연결한다. 동축 케이블과 하이브리드 커플러의 입력단 사이에는 3 dB pad가 삽입되어 있으며, 하이브리드 커플러 출력단의 Δ 단자는 동축 케이블 (coaxial line)을 통하여 측정기와 연결되어 있다.

그림 1에서 보는 것처럼, balun은 다이폴 소자의 급전부에서 하이브리드 커플러의 Δ 단자까지이며, 위상정합된 2개의 동축 케이블과 2개의 50 Ω 3 dB pad, 3 dB 180° 하이브리드 커플러 (50 Ω 이 연결된 Σ 단자는 내장되어 있음)로 구성된다.

본 논문에서 사용한 하이브리드 커플러는 3개의 외부 단자로 구성 (50 Ω 이 연결된 Σ 단자는 내장되어 있음)된 Picosecond Pulse Labs, Inc.사의 Model 5310A-104 Phase-Matched Balun (4 MHz~6.5 GHz)을 사용하였다[15].

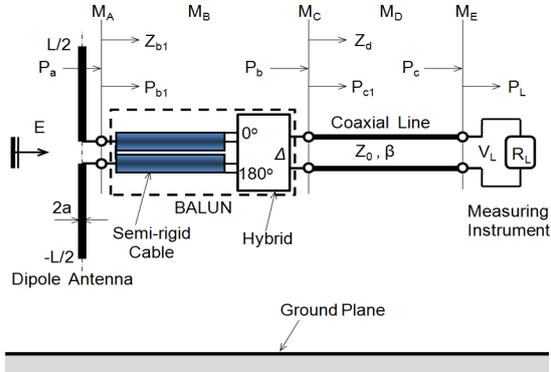


그림 1. 접지판 위에 놓여진 하이브리드 balun을 갖는 다이폴 안테나

Fig. 1 The dipole antenna with a hybrid balun above a ground plane

2.2. 안테나 인자 표현식

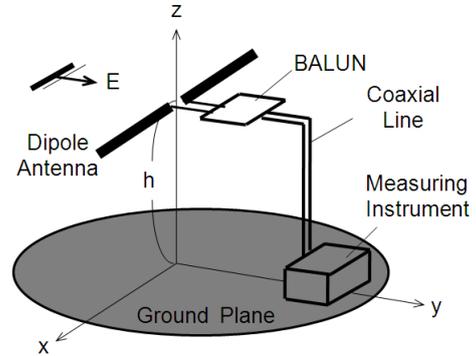
그림 1에서 안테나 소자에 입사하는 전기장의 세기 E 와 측정기에서 측정되는 전압 V_L 로부터 안테나 인자를 계산할 수 있으며, 본 논문에서는 전력부정합손실의 개념을 도입하여 유도한 안테나 인자 표현식을 사용하며[7,8,13], 최종적인 표현식은 다음과 같다.

$$AF = \frac{2}{|h_e|} \sqrt{\frac{R_a}{R_L}} \sqrt{M_t} = AF_0 \sqrt{M_t} \quad (1)$$

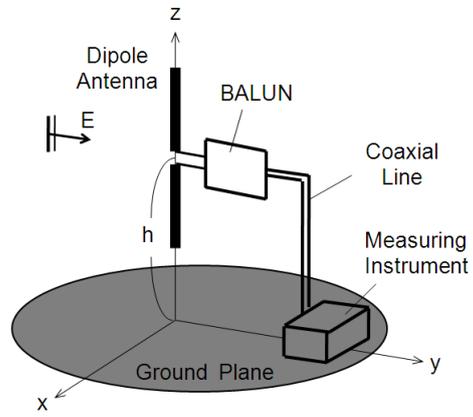
여기서, R_a 는 안테나의 입력저항을 나타내며, R_L 은 수신기의 임피던스, h_e 는 안테나의 유효길이이다. 또한, $AF_0 = (2/|h_e|) \sqrt{R_a/R_L}$ 는 수신기가 다이폴안테나에 직접 연결되었을 때의 안테나 인자를 나타낸다. 안테나와 수신기 사이의 전체 전력손실 M_t 는 전력부정합손실을 나타내며, 각 접속부의 부정합손실로부터 $M_t = M_A M_B M_C M_D M_E$ 로 나타낼 수 있다.

III. 모멘트법 해석

그림 2와 같은 접지판 위의 수평 및 수직 다이폴안테나의 중앙에서 전압 V 로 급전하면 전류분포에 관한 적분 방정식은 각각 다음과 같이 주어진다.



(a) Horizontal polarization



(b) Vertical polarization

그림 2. 접지판 위의 다이폴안테나

Fig. 2 Dipole antennas above an infinite ground plane

$$\begin{aligned} & \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_s (\bar{I} k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_1(\bar{r}') ds' \\ & \mp \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \iint_s (\bar{I} k^2 + \nabla\nabla) \cdot \bar{G}(\bar{r}, \bar{r}') \cdot \bar{J}_2(\bar{r}') ds' \\ & = -V \hat{p} \delta(p) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, \bar{I} 는 단위 다이애딕, $k = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \omega$ 는 Dirac의 델타함수, ϵ_0 및 μ_0 는 각각 자유공간의 유전율 및 투자율을 나타내며 ω 는 각주파수이다. \bar{G} 는 자유공간의 다이애딕 그린 함수이며, \hat{p} 는 안테나가 놓여지는 p 방향의 단위 벡터(수평편파는 x 방향, 수직편파는 z

방향). 또한, \bar{J}_1 는 접지판 위의 다이폴안테나에 흐르는 전류분포를 나타내며, \bar{J}_2 는 영상전류 분포를 나타낸다. 식 (2)의 복호에서 - 부호는 수평편파인 경우, + 부호는 수직편파인 경우에 해당한다.

전류분포에 관한 적분방정식 (2)의 해는 구분적정현 함수를 사용한 Galerkin의 모멘트법으로 해석하였으며 [14], 구체적인 정식화 과정의 기술은 생략하기로 한다. 안테나인자를 계산하기 위해서는 다이폴안테나의 입력 임피던스뿐만 아니라, 유효길어도 계산하여야 한다[8]. 또한, 본 논문의 계산에 사용한 안테나는 자유공간에서 공진하는 반파장 공진 다이폴 안테나를 사용하였다[7].

그림 3 및 그림 4는 접지판 위에 놓인 수평 다이폴안테나의 안테나 인자를 모멘트법으로 계산한 결과를 나타낸다. 그림 3으로부터 알 수 있는 것처럼, 안테나 높이가 $h=1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}, 4\text{ m}$ 에서 계산한 안테나 인자의 주파수 특성은 거의 같은 값을 가진다. 또한, 그림 4에서 보는 것처럼, 접지판 위의 안테나 높이에 따라서 안테나 인자는 주기적으로 변동하는 특성을 가지는데 변동의 폭은 최대 0.28 dB (주파수 1 GHz의 1 m에서 최대 변동폭을 가짐)이내로서 매우 작다는 것을 알 수 있다.

그림 5 및 그림 6은 접지판 위에 놓인 수직 다이폴안테나의 안테나 인자를 모멘트법으로 계산한 결과를 나타낸다. 그림 5로부터 알 수 있는 것처럼, 안테나 높이가 $h=1\text{ m}, 2\text{ m}, 3\text{ m}, 4\text{ m}$ 에서 계산한 안테나 인자의 주파수 특성은 수평편파의 경우와 마찬가지로 거의 같은 값을 가진다.

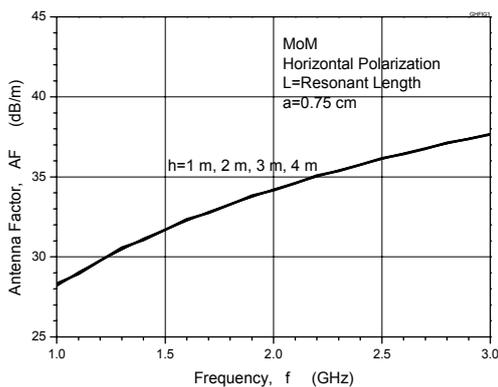


그림 3. 접지판 위 안테나 인자의 주파수 특성 (수평편파)
Fig. 3 Frequency characteristics of the antenna factor above a ground plane (horizontal polarization)

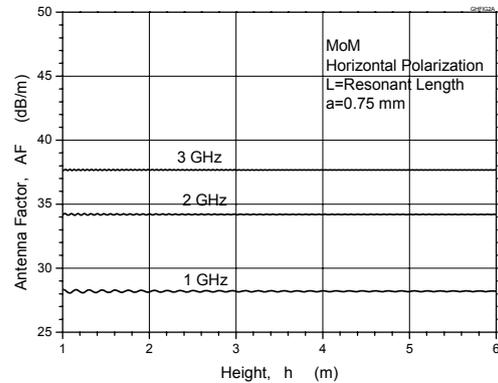


그림 4. 접지판 위 안테나 인자의 높이 특성 (수평편파).
Fig. 4 Height characteristics of the antenna factor above a ground plane (horizontal polarization)

또한, 그림 6에서 보는 것처럼, 접지판 위의 안테나 높이에 따라서 안테나 인자는 주기적으로 변동하는 특성을 가지는데 변동의 폭은 최대 0.11 dB (주파수 1 GHz의 1 m에서 최대 변동폭을 가짐)이내로서 무시할 수 있을 정도로 작다는 것을 알 수 있다.

그림 4 및 그림 6에 나타난 안테나 인자의 높이 특성은 안테나 높이에 따라서 주기적으로 변하는 특성을 가지는데 그림 4 및 그림 6에서는 구체적인 변화 양상이 잘 나타나 있지 않다. 안테나 높이에 따른 안테나 인자의 변화를 구체적으로 파악하기 위하여 수평편파에 대해서는 그림 7에, 수직편파에 대해서는 그림 8에 자세한 변화 특성을 나타내었다.

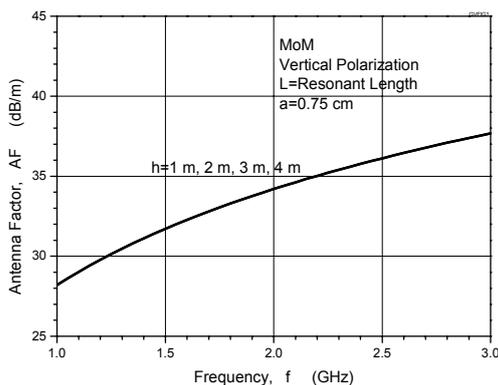


그림 5. 접지판 위 안테나 인자의 주파수 특성 (수직편파)
Fig. 5 Frequency characteristics of the antenna factor above a ground plane (vertical polarization)

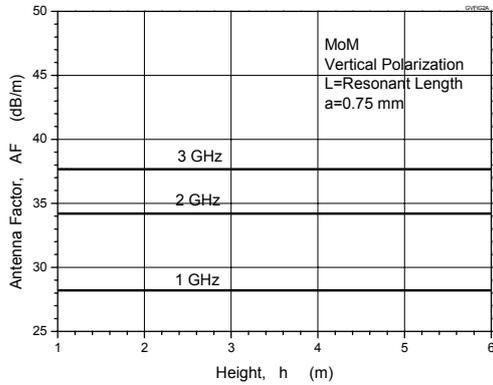
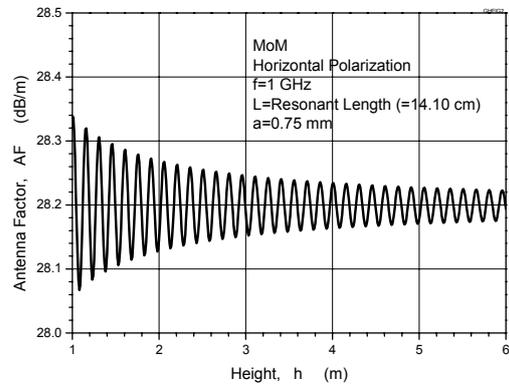


그림 6. 접지판 위 안테나 인자의 높이 특성 (수직편파)
Fig. 6 Height characteristics of the antenna factor above a ground plane (vertical polarization)

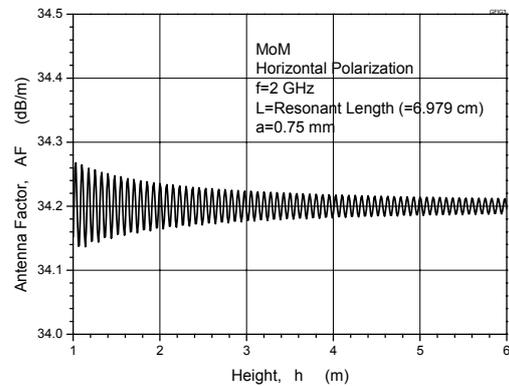
그림 7 및 그림 8에서 알 수 있는 것처럼, 접지판 위에서는 안테나 인자가 주기적으로 변하며 접지판에서 멀어질수록 (높이가 높아질수록) 자유공간 안테나 인자에 수렴하게 된다. 접지판 위에서 안테나 인자가 주기적으로 변하는 것은 안테나의 입력 임피던스가 주기적으로 변화하기 때문이다.

그림 7 및 그림 8에서 알 수 있는 것처럼, 접지판 위에 수평으로 놓여진 다이폴안테나 (수평편파)는 수직으로 놓여진 안테나 (수직편파)보다 접지판과의 결합이 강하므로 수평편파인 경우의 안테나 인자 변동폭이 수직편파인 경우보다 0.2 dB 정도 더 크다.

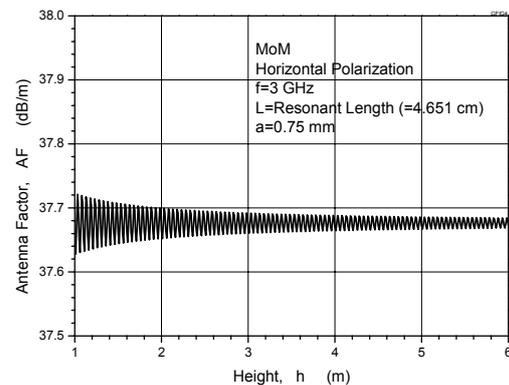
그림 9는 안테나 발룬의 산란행렬 측정값을 사용하여 구한 안테나 인자의 높이 특성을 나타낸다. 그림 9의 이론 계산값은 이상적인 발룬을 사용한 경우의 접지판 위에서의 안테나 인자이며, 산란행렬 측정값을 사용한 안테나 인자와도 그 경향이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 9에는 1 GHz, 2 GHz, 3 GHz의 3가지 주파수에 대하여 나타내었으며, 안테나 높이에 대한 주기적 감쇠진동의 모양(그림 7 참조)은 안테나 인자의 다이내믹 레인지를 작게 하면 확인할 수 있다. 본 논문에서는 3가지의 주파수 전체를 비교하기 위하여 다이내믹 레인지를 크게 하였기 때문에 주기적 진동의 모양은 직선의 형태를 보이고 있다.



(a) 1 GHz

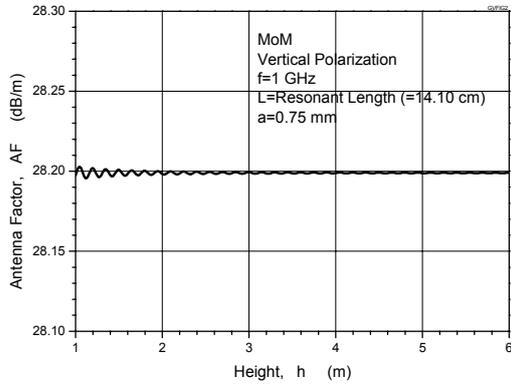


(b) 2 GHz

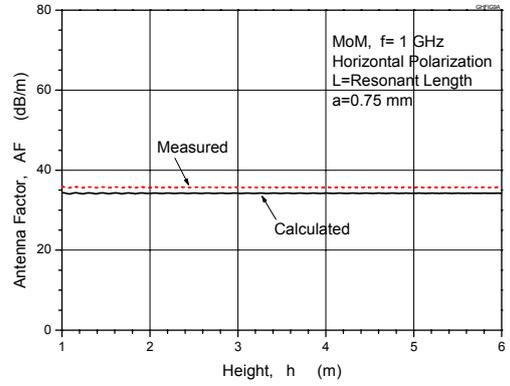


(c) 3 GHz

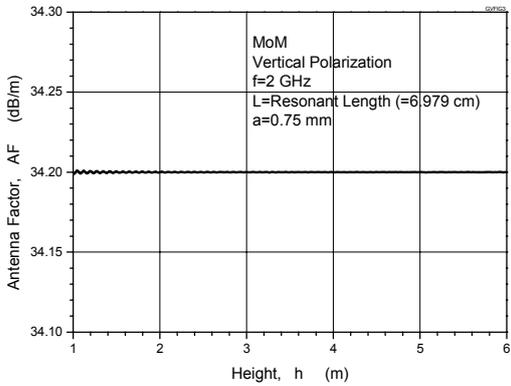
그림 7. 접지판 위 안테나 인자의 높이 특성 (수평편파)
Fig. 7 Height characteristics of the antenna factor above a ground plane (horizontal polarization)



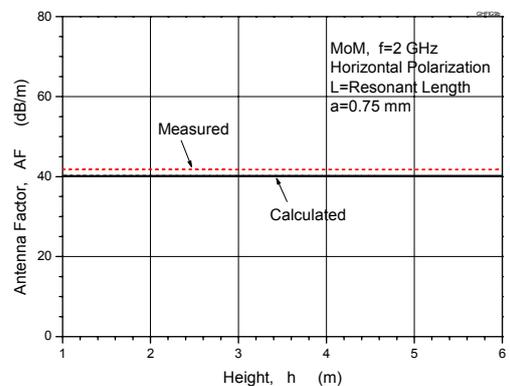
(a) 1 GHz



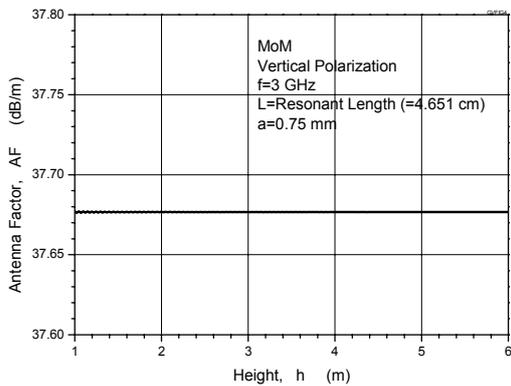
(a) 1 GHz



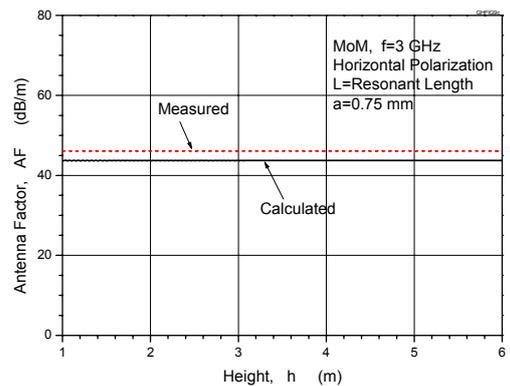
(b) 2 GHz



(b) 2 GHz



(c) 3 GHz



(c) 3 GHz

그림 8. 접지판 위 안테나 인자의 높이 특성 (수직편파)
 Fig. 8 Height characteristics of the antenna factor above a ground plane (vertical polarization)

그림 9. 안테나 인자의 이론값과 측정값
 Fig. 9 Calculated and measured antenna factors

IV. 결론

자유공간에서 설계된 다이폴안테나가 접지판 위에 수평 또는 수직으로 놓여 지면 안테나 인자의 특성이 변하게 되는데, 본 논문에서는 접지판 위의 안테나 높이에 따른 안테나 인자의 변화 특성을 모멘트법으로 검토하였다. 그 결과, 안테나 높이에 따라 안테나 인자는 주기적인 변동을 하며 수평편파인 경우의 변동폭은 0.28 dB 이내이며, 수직편파인 경우의 변동폭은 0.11 dB 이내임을 알 수 있었다. 안테나 높이가 접지판에서 멀어질수록 안테나 인자는 자유공간 안테나 인자로 수렴함을 확인할 수 있었다. 또한, 수평편파는 수직편파보다 접지판과의 결합이 강하므로 수평편파인 경우의 안테나 인자 변동폭이 수직편파인 경우보다 0.2 dB 정도 더 크다는 것도 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the KRISS/University cooperative research program in 2011.

REFERENCES

- [1] 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.
- [2] CISPR 16-4 (2002-05), "Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods, Part 4: Uncertainty in EMC Measurements," IEC, Geneva.
- [3] M.J. Salter and 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 and 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, July. 1996.
- [5] M.J. Alexander, M. Salter, M. Loader, B. Knight, D., "Broadband calculable dipole reference antennas", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, pp. 45-58, Feb. 2002.
- [6] B.G. Loader and 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, June 2004.
- [7] K.-C. Kim, S.-M. Kim, J.-Y. Kwon, T.-W. Kang, 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.
- [8] K.-C. Kim, S.-M. Kim, K.-C. Kim, J.-Y. Kwon, T.-W. Kang, J.-H. Kim, "A Comparison of Antenna Characteristics for a Calculable Dipole Antenna by MoM and EMF Method", KJKIEES, vol.23, no. 3, pp. 275-282, Mar. 2012.
- [9] M. Sakasai, A. Suzuki, T. Sugiyama, K. Koike, H. Hasuzawa, 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.
- [10] W.-S. Jo, "Study on the evaluation techniques of Antenna calibration open area test site", KEIT, Nov. 2006.
- [11] A. Kazemipour and 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.
- [12] 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, April 2009.
- [13] W.S. Bennett, "Properly applied antenna factors," IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. EMC-28, no.1, pp.2-6, Feb. 1986.
- [14] R.F. Harrington, "Field computation by Moment Methods, IEEE Press, New York, 1993.
- [15] Picosecond Pulse Labs, Inc., www.picosecond.com.



임성민(Sung-Min Lim)

2002년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
2004년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
2004년 3월 ~ 현재: SL주식회사 연구개발본부 전자시험팀
2010년 3월 ~ 현재: 영남대학교 전기공학과 박사과정
※관심분야: EMC/EMI, 전자파 차폐



김상명(Sang-Myeong Kim)

2011년 2월: 영남대학교 전기공학과 졸업 (공학사)
2013년 2월: 영남대학교 전기공학과 석사과정 졸업 (공학석사)
2013년 3월 ~ 현재: SL주식회사 연구개발본부 전자시험팀
※관심분야: EMC/EMI, 전자파 차폐



정성우(Sung-Woo Jung)

2002년 2월: 영남대학교 전기공학과 졸업(공학사)
2008년 8월: 영남대학교 전기공학과 석사과정 졸업(공학석사)
2010년 8월: 영남대학교 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사)
2009년 9월 ~ 2011년 2월: (주)한국전자파연구소 선임연구원
2011년 3월 ~ 현재: 경북차량용임베디드기술연구원 장비응용연구부 선임연구원
※관심분야: EMC/EMI 및 EMP



김기채(Ki-Chai Kim)

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 : 한국전자파학회 회장
1988년 IEICE Japan, Young Scientist Awards,
1994년 IEE Japan, Paper Presentation Awards,
※관심분야: EMC/EMI 관련 안테나 및 전자파 차폐, 전자파 이론 및 응용