

## 시간영역에서 수직 다이폴의 전파경로손실 특성 해석

홍익표\*

### Characteristic Analysis on Radio Propagation Path Loss Characteristics of Vertical Electric Dipole in Time Domain

Ic-pyo Hong\*

Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 시간영역에서 완전도체 접지평면 위 수직 전기 다이폴에서 방사되는 전자기해석을 통해 전파의 거리에 따른 전파경로손실을 해석하였다. 자유공간에서 수직 전기 다이폴의 해석은 시간영역과 주파수영역에서 많은 연구가 이루어졌으나 본 논문에서는 특히 접지면 위 수직 다이폴을 기지국으로 가정한 전파경로손실특성을 시간영역에서 해석하였으며 접지면의 영향으로 나타나는 근접장의 위치변화와 모바일에서 수신되는 과도응답을 관찰하였다. 본 논문의 결과는 지표면 레이더 및 신호처리 분야에 응용될 수 있을 것이다.

#### ABSTRACT

In this paper, we analyze the radio propagation path loss characteristics for the vertical electric dipole radiation over the perfect electric conductor(PEC) ground plane. Most research have been performed about the electromagnetic analysis of vertical electric dipole in free space for time domain or frequency domain. But this paper present the radio propagation path loss over PEC ground plane in time domain under the assumption of the vertical electric dipole as a base station. From the simulated results, the ground plane effect can change the location of near field from transmitting antenna and the transient responses at mobile are calculated. The results of this paper can be applied to surface radar or signal processing applications.

**키워드** : 시간영역, 완전도체, 수직 전기 다이폴, 전파경로손실

**Key word** : Time domain, Perfect electric conductor, Vertical electric dipole, Radio propagation path loss

접수일자 : 2013. 01. 27 심사완료일자 : 2013. 02. 18 게재확정일자 : 2013. 02. 27

\* Corresponding Author Ic-Pyo Hong(E-mail:iphong@kongju.ac.kr, Tel:+82-41-521-9199)

Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.7.1558>

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

송수신 오류를 줄이고, 성능이 우수한 무선통신시스템을 설계하기 위해 전파환경의 정확한 전파특성을 이해하는 것은 매우 중요하다[1]. 전파특성은 크게 대신호 특성인 전파경로손실과 소신호 특성인 페이딩 특성으로 나타낼 수 있으며, 전파경로손실의 정보는 기지국의 커버영역과 위치를 최적화하는데 매우 필수적이다. 전파경로손실정보는 일반적으로 전계강도 측정기 등을 사용하여 측정해서 얻을 수 있는데, 통계적으로 의미를 갖기 위해서는 수많은 실험을 통해 데이터가 추출되어야 하는 시간과 경제적으로 상당히 비효율적인 작업이다. 따라서 전파경로손실을 이론적으로 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 전파경로손실 모델은 크게 경험적, 이론적 모델로 나눌 수 있다[2]. 경험적 모델은 Okumura 모델 또는 Hata 모델과 같은 광범위한 전계강도측정을 통해 통계적인 실험결과로부터 전파경로손실 방정식을 얻을 수 있으며, 동일한 환경에 대해서는 매우 신뢰도가 높지만, 주파수, 거리, 자연환경 등 다른 환경에 대한 전파경로손실 예측을 위해서는 파라미터 수정이 필요하게 된다. 전파경로손실에 대한 이론적인 모델은 이상적인 조건을 가정한다는 단점이 있지만 다양한 전파환경에 대한 전파경로손실을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 대부분의 전파경로손실은 주파수영역에서 다루어지고 있으며, 따라서 모바일의 이동속도에 따른 전파경로손실의 변화나 모바일에서 수신되는 과도응답특성을 알 수가 없다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 시간영역에서 전파경로손실을 예측하고, 기지국의 높이에 따른 모바일에서의 과도응답특성을 관찰하고자 기존 자유공간에서 다루어진 수직 반파장 다이폴 안테나의 방사특성 해석이론을 적용하였다. 수직 반파장 다이폴 안테나의 방사특성으로부터 완전도체를 가정한 접지구조위의 수직 반파장 다이폴 안테나로부터 방사되는 시간영역의 방사특성을 계산하여, 수직 반파장 다이폴 안테나를 기지국으로 가정하고, 방사특성을 관찰하는 관찰점을 모바일로 가정하였다. 따라서 기지국과 모바일간의 시간영역해석을 통해 기지국 안테나 높이에 따른 시간영역의 과도응답특성, 기지국과 모바일간 거리변화에 따른 전파경로손실 특성의 변화 등을 계산하였다. 본 논문의 결과로부터 기지국의 높이변화가 시간영역

에서의 과도응답특성의 변화의 중요한 원인이 되고, 수신전계의 크기변화에도 영향을 준다는 사실을 확인하였으며, 기지국의 높이 변화에 따른 전파경로손실특성 변화의 관찰을 통해 지표면에 따른 기지국 안테나의 근접장(Near field) 위치변화가 야기되어 이동통신 망설계시 고려해야 할 중요한 변수가 됨을 보였다.

## II. 수직 반파장 다이폴의 시간영역 전기장

본 논문에서 해석한 구조를 그림 1에 나타내었다. 완전도체를 접지로 가정하고 기지국 안테나로는 수직 전기 반파장 다이폴을 가정하였다. 완전도체 접지를 가정하였기 때문에 그림 1 과 같은 영상이론을 적용하여 두 개의 반파장 다이폴에 의한 전기장이 각각 수신위치(Observation)에서 수신되어 전체 전기장을  $\vec{E}_{tot\theta}$  라고 할 때 접지 위 다이폴에 의해 방사되는 전기장  $\vec{E}_{dir\theta}$  와 영상다이폴에 의해 방사되는 전기장  $\vec{E}_{ref\theta}$  의 합으로 식 (1)과 같이 주어지는 것을 알 수 있다.

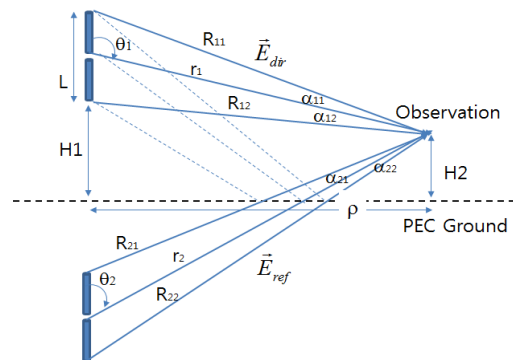


그림 1. 완전도체 접지 위 수직 전기 다이폴  
Fig. 1 Vertical Electric Dipole over PEC Ground

$$\vec{E}_{tot\theta} = \vec{E}_{dir\theta} + \vec{E}_{ref\theta} \quad (1)$$

접지가 없는 자유공간에서 수직 전기 다이폴에 의해 방사되는 전기장은 수직 전기 다이폴안테나가 진행파 안테나(Traveling-wave Antenna)일 때 식 (2)와 같이 주어진다[3][4][5].

$$\vec{E}_{dir\theta} = \frac{\eta_0}{4\pi} \left[ \frac{2I(t - \frac{r_1}{c})}{r_1 \sin \theta_1} - \frac{I(t - \frac{L}{c} - \frac{R_{11}}{c})}{R_{11}} \cos \alpha_{11} \cot(\frac{\theta_1}{2}) \right. \\ \left. - \frac{I(t - \frac{L}{c} - \frac{R_{12}}{c})}{R_{12}} \cos \alpha_{12} \tan(\frac{\theta_1}{2}) \right] \\ + \frac{\eta_0 c}{4\pi} \left[ \frac{Q(t - \frac{L}{c} - \frac{R_{11}}{c})}{R_{11}^2} \sin \alpha_{11} + \frac{Q(t - \frac{L}{c} - \frac{R_{12}}{c})}{R_{12}^2} \sin \alpha_{12} \right] \quad (2)$$

식 (2)에서  $Q(\cdot)$  는 다이폴 안테나에서의 전하분포 함수로 입력전류의 적분함수로 주어진다. 지금까지 연구결과에서는 입력전류파형으로 대부분 진폭이 반파장 다이폴의 길이보다 작기 때문에 진행파 안테나 가정이 성립하지만 본 논문에서와 같이 전파경로손실모델을 구하기 위해서는 다이폴의 종단에서 반사를 고려한 정재파 안테나(Standing-wave Antenna)를 가정해야 한다. 따라서 반파장 다이폴의 경우 자유공간에서 주어지는 전기장은 다음 식 (3)과 같이 주어진다[6][7][8].

$$\vec{E}_{dir\theta} = \frac{\eta_0}{2\pi\rho} \left[ I(t - \frac{r_1}{c}) + I(t - \frac{L}{c} - \frac{r_1}{c}) \right. \\ \left. - I(t - \frac{L}{2c} (1 + \cos \theta_1)) - \frac{R_{11}}{c} \right) \\ \left. - I(t - \frac{L}{2c} (1 - \cos \theta_1)) - \frac{R_{12}}{c} \right] \quad (3)$$

식 (3) 은 접지면까지 고려하면 그림 1에 주어진 파라미터를 이용하여 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다 [3][4][6][7].

$$\vec{E}_{tot\theta} = \frac{\eta_0}{2\pi\rho} \left[ I(t - \frac{r_1}{c}) + I(t - \frac{L}{c} - \frac{r_1}{c}) \right. \\ \left. - I(t - \frac{L}{2c} - \frac{R_{11}}{c}) \cos \alpha_{11} - I(t - \frac{L}{2c} - \frac{R_{12}}{c}) \cos \alpha_{12} \right] \\ + \frac{\eta_0}{2\pi\rho} \left[ I(t - \frac{r_2}{c}) + I(t - \frac{L}{c} - \frac{r_2}{c}) \right. \\ \left. - I(t - \frac{L}{2c} - \frac{R_{21}}{c}) \cos \alpha_{21} - I(t - \frac{L}{2c} - \frac{R_{22}}{c}) \cos \alpha_{22} \right] \quad (4)$$

앞서 설명한 바와 같이 식 (4)로 주어지는 정재파특성을 갖는 반파장 다이폴에 의해 방사되는 전기장은 신호 입력단에서 발생하는 반사까지 고려하게 되면 다음 식 (5)와 같이 주어질 수 있다[8].

$$\vec{E}_{tot\theta} = \frac{\eta_0}{2\pi\rho} \sum_{n=0}^{\infty} (R)^n \left[ I(t - \frac{r_1}{c} - \frac{nL}{c}) + I(t - \frac{L}{c} - \frac{r_1}{c} - \frac{nL}{c}) \right. \\ \left. - I(t - \frac{r_1}{c} - \frac{L}{2c} (1 - \cos \theta_1)) - \frac{nL}{c} \right) \\ \left. - I(t - \frac{r_1}{c} - \frac{L}{2c} (1 + \cos \theta_1)) - \frac{nL}{c} \right) \\ + \frac{\eta_0}{2\pi\rho} \sum_{n=0}^{\infty} (R)^n \left[ I(t - \frac{r_2}{c} - \frac{nL}{c}) + I(t - \frac{L}{c} - \frac{r_2}{c} - \frac{nL}{c}) \right. \\ \left. - I(t - \frac{r_2}{c} - \frac{L}{2c} (1 - \cos \theta_2)) - \frac{nL}{c} \right) \\ \left. - I(t - \frac{r_2}{c} - \frac{L}{2c} (1 + \cos \theta_2)) - \frac{nL}{c} \right) \quad (5)$$

여기서  $R$  은 입력단에서의 반사계수를 나타내며  $n$  은 반사가 되는 횟수를 의미한다. 본 논문에서는  $R = -0.5$  이고  $n = 2$  인 파라미터를 사용하였다.

### III. Simulation 결과

그림 2는 앞 장에서 유도한 식 (5)를 이용하여  $R = 0$ , 이고  $n = 0$  일 때, 즉 식 (4)를 이용하여 시간영역에서 과도응답을 나타내었다. 송신주파수  $f_0 = 900$  MHz 이고, 기지국으로 가정한 반파장 수직 다이폴의 지표면으로부터의 높이는 20 m, 모바일로 가정한 관측점의 높이는 2 m, 기지국과 모바일사이의 떨어진 거리는 100 m 를 가정하였다.

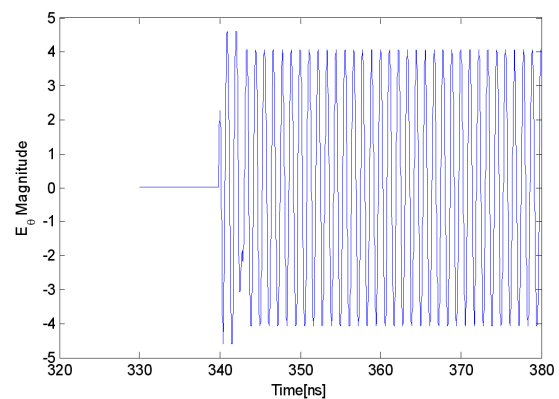
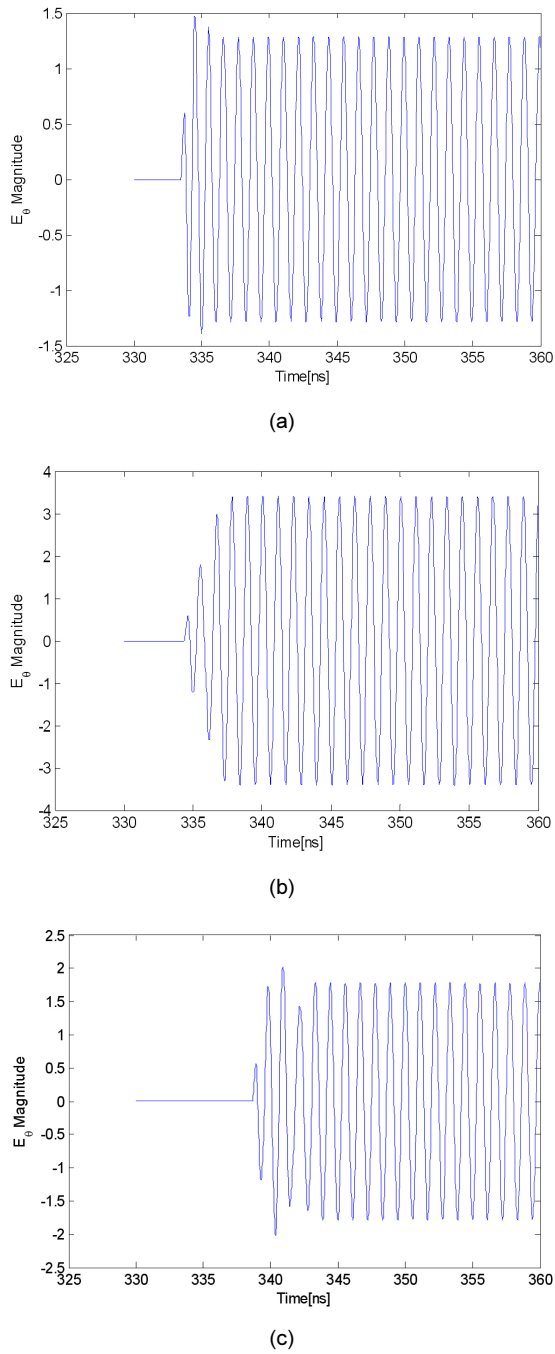
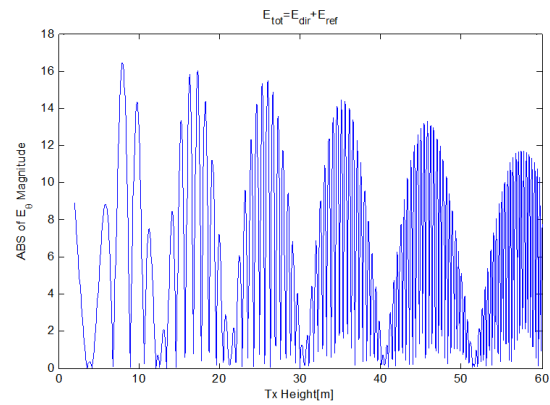


그림 2. 시간영역 과도응답( $n = 0$ )  
Fig. 2 Transient Response in Time Domain( $n = 0$ )



**그림 3.** 기지국 높이에 따른 시간영역 과도응답 ( $n = 2, R = -0.5$ )  
 (a) H1=5m (b) H1=10m (c) H1=20m  
**Fig. 3** Transient Response in Time Domain vs. Base Station Height( $n = 2, R = -0.5$ ) (a) H1=5m (b) H1=10m (c) H1=20m

그림 3에는 기지국의 높이가 각각 5 m, 10 m, 20 m 일 때 모바일에서 수신되는 전기장  $E_\theta$  의 과도응답을 나타내었다. 이 경우는  $R = -0.5$  이고  $n = 2$  인 파라미터를 사용했으며, 모바일의 높이는 2 m, 기지국과 모바일사이의 간격은 100 m 로 동일한 설정값과 동일한 주파수를 사용하였다. 그림 3의 결과를 보면 기지국의 높이에 따라 과도응답이 서로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



**그림 4.** 기지국 높이 변화에 따른 수신크기변화 ( $n = 2, R = -0.5$ )  
**Fig. 4** Received Signal Strength Variation for different Base station Height( $n = 2, R = -0.5$ )

그림 4에는 그림 3의 설정값 중 기지국 안테나의 높이를 변화시키면서 정현파를 송신 후 과도응답상태가 지난  $t = 1 \mu s$  일 때 수신지점에서  $E_\theta$  의 크기변화를 나타낸 것이다. 기지국의 높이 변화에 따라서 수신 전계 신호의 크기가 바뀌는 것을 앞의 시간영역 과도응답 그림 3의 결과처럼 확인할 수 있으며, 기지국의 높이 변화가 수신전계 크기에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에는 그림 3과 동일한 설정값과 기지국의 높이를 20 m 로 고정한 상태에서 모바일이 시속 30 km 로 이동한다고 가정하고, 1.8초 동안 시간영역 파형을 거리에 대하여 나타내었다. 그림 5의 결과로부터 이동통신에서 나타나는 Fast fading 효과를 확인할 수 있다. 그림 6에는 기지국의 높이 H1=10 m, 모바일의 높이는 2 m 일 때 기지국과 모바일 사이의 거리 변화에 따른 수신 전계  $E_\theta$  와  $E_r$  의 크기변화, 즉 전파경로손실의 변화를 나타내었다.

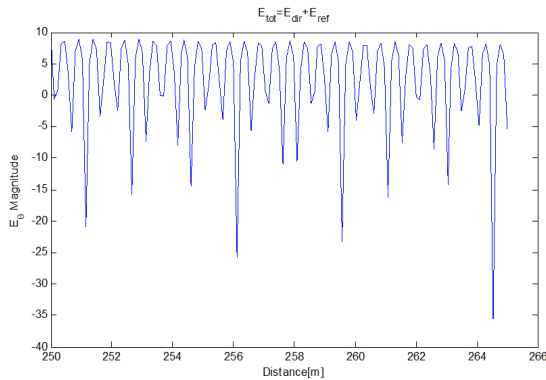


그림 5. 이동 중인 모바일의 전파수신 ( $n=2, R=-0.5$ )  
**Fig. 5** Received Signal Strength of moving Mobile ( $n=2, R=-0.5$ )

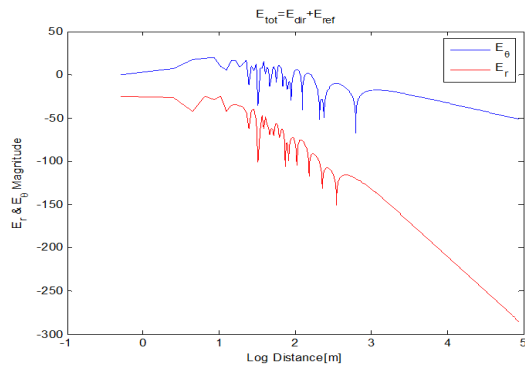


그림 6. 모바일의 전파경로손실  $E_r$  성분과  $E_0$  ( $n=2, R=-0.5$ )  
**Fig. 6** Radio propagation path loss at different Mobile distance ( $n=2, R=-0.5$ )

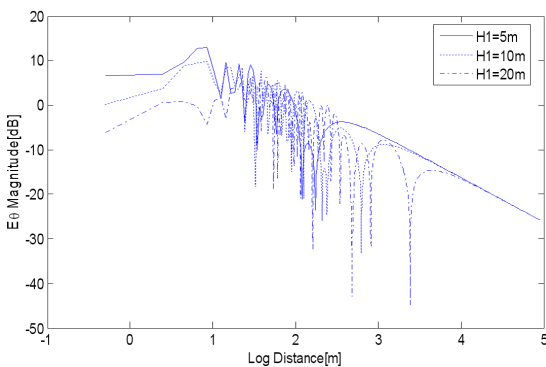


그림 7. 거리에 따른 전파경로손실 ( $n=2, R=-0.5$ )  
**Fig. 7** Radio Propagation Path Loss with the variation of Distance ( $n=2, R=-0.5$ )

그림 7에는 기지국의 높이  $H1=5\text{ m}, 10\text{ m}, 20\text{ m}$  일 때 거리에 따른 전파경로손실의 변화를 나타내었다. 그림 7의 전파경로손실을 보면 수신되는 전계가 안정되는 즉, 원거리장이 나타나는 위치가 기지국의 안테나 높이에 따라 결정된다는 사실을 확인할 수 있다. 기지국의 높이가  $5\text{ m}$ 인 경우는 약  $600\text{ m}$ , 기지국의 높이가  $10\text{ m}$ 인 경우는 약  $2.3\text{ km}$ , 기지국의 높이가  $20\text{ m}$ 인 경우는 약  $10\text{ km}$  정도부터 깊은 페이딩(Deep Fading) 효과가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 현상은 완전도체를 가정한 접지면으로 인하여 접지 위에 위치한 수직 다이폴 안테나의 영상안테나까지 포함하여 방사되는 안테나 개구면이 커지는 효과가 발생하여 근접장의 거리가 확장되는 효과가 생기기 때문이다. 안테나의 개구면을  $D$  라하고 파장이  $\lambda$  라고 할 때 근접장은 다음 식 (6)과 같이 주어지며[8], 본 논문과 같이 완전도체 접지면 위 다이폴의 경우에 대한 수정된 근접장  $d'_{nf}$  는 식 (7)과 같이 수정될 수 있다.

$$d_{nf} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (6)$$

$$d'_{nf} = \frac{8D^2}{\lambda} \quad (7)$$

식 (6)에 기지국의 높이  $H1=5\text{ m}, 10\text{ m}, 20\text{ m}$  에 대한  $d_{nf}$  는 각각  $606\text{ m}, 2.4\text{ km}, 9.6\text{ km}$  로 주어지는 것을 확인할 수 있으며, 이는 본 논문에서 시뮬레이션으로 얻은 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

표 1. 기지국의 높이에 따른 원거리장 시작 위치비교

**Table. 1** Far field starting location vs. Base station height

기지국의 높이[m]	5	10	20
이론값[km]	0.606	2.4	9.6
계산값[km]	0.6	2.3	10

#### IV. 결 론

본 논문에서는 시간영역에서 완전도체 접지위의 수직전기 다이폴에 의한 전파경로손실을 계산하였다. 수직전기 다이폴은 정재파특성을 갖는 반파장 안테나를 가정하였으며, 기지국안테나로 가정하고 관찰점에

모바일이 위치한다고 가정하여 시간영역에서 기지국 안테나 높이에 따른 시간영역의 과도응답과 기지국과 모바일간 거리에 따른 전파경로손실을 계산하였다. 계산된 결과로부터 기지국의 높이가 수신 전계신호의 크기뿐만 아니라, 지표면에 의한 영향으로 근접장이 나타나는 위치까지 변화를 시킬 수 있다는 것을 확인하였으며, 이는 이동통신 망설계뿐만 아니라 지표면 레이더와 같은 군통신에도 응용이 가능할 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임. (2010-0023742)

### REFERENCES

- [1] W. C. Y. Lee, *Mobile Communication Design Fundamentals*, 2nd ed. New York, John Wiley and Sons, 1993.
- [2] M. F. Iskander and Z. Yun, "Propagation Prediction Models for Wireless Communication Systems", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 50, no.3, pp. 662-673, Mar. 2002.
- [3] S. A. Podosenov, Y. G. Svekis and A. A. Sokolov, "Transient Radiation of Traveling Waves by Wire Antennas", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 37, no. 3, pp. 367-383, Aug. 1995.
- [4] S. W. Dong, W. Ma, W. Z. Cui, S. Shang, H. Zhang and H. Chen, "Analysis of Equivalence of Standing-wave Dipole Model and Traveling-wave Monopole Model", in *2008 PIERS Proceedings*, Hangzhou, pp. 162, Mar. 2008.
- [5] D. Wu and C. Ruan, "Transient Radiation of Traveling-Wave Wire Antennas", *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 41, no. 2, pp. 120-123, May. 1999.
- [6] D. L. Sengupta and C. T. Tai, "Radiation and Reception of Transients by Linear Antennas", in *Transient Electromagnetic Fields*, New York, Springer-Verlag, ch. 4, pp. 182-235, 1976.
- [7] T. K. Sarkar, M. C. Wicks, M. Salazar-Palma, and R. Bonneau, *Smart Antennas*, New York, John Wiley & Sons, 2003.
- [8] G. S. Smith, *An Introduction to Classical Electromagnetic Radiation*, New York, Cambridge University Press, 1997.



홍익표(Ic-Pyo Hong)

1996-2000 연세대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 공학박사  
 2000-2003 삼성전자 무선사업부 책임연구원  
 2003-현재 공주대학교 정보통신공학부 부교수  
 ※관심분야 : 전자파 수치해석, EMI/EMC