

유한 이층 영상평면 구조에 의한 EMI 차폐성능 분석

정희원 김진석*, 윤재훈**, 이애경***, 김남****

Analysis of EMI Shielding Performance of Two Finite Image Planes Configuration

Jin Suk Kim*, Jae Hoon Yun**, Ae Kyung Lee***, Nam Kim**** *Regular Members*

요약

영상평면을 사용하면 인쇄회로기판(PCB)의 전자파 복사를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 이 논문은 이층 유한 영상평면이 PCB로부터 방출하는 불요 전자파에 미치는 영향을 분석한 것이다. 유한 영상평면 구조의 해석은 삼각형 patch 모델을 모멘트 기법에 적용하여 이루어졌다. 기존에 보편적으로 사용하던 삼각형 분할방법을 개선하여 표면의 경계에 있는 삼각형에서 두 개의 기저함수를 취하도록 삼각형 분할방법을 제안하고 그 결과가 수치해석의 정확도에 미치는 영향을 비교분석하였다.

ABSTRACT

EMI problem is very important in a printed circuit board design. This paper deals with image plane as one of the most effective method to reduce EMI in PCB. The shielding performance of one and two layers of image planes of finite width and length is analyzed by the method of moments based on the triangular surface patch model. The current distributions were modeled as two simple line sources. It is demonstrated that proper triangulation should be made so as to take two basis functions in the boundary triangles of the surface.

I. 서론

높은 주파수의 클럭 신호와 디지털 데이터 전송으로 인한 전류선간 누화는 PCB 설계에 있어서 고려해야 할 가장 중요한 EMI 문제중의 하나이다. PCB에서의 불요전자파 복사를 효과적으로 감소시키는 한 가지 방법으로 수년전부터 영상평면에 관한 연구가 진행되었다^[1].

전류라인 소스 아래에 하나의 영상평면이 있는 경우를 고려하면, 복사되는 전자파는 두 개의 성분으로 구성된다. 하나는 라인 소스에 의해 바로 복사되는 것이고 다른 하나는 영상평면에 유도된 전류에 의해 복사되는 것이다. 두 전류의 방향이 서로

반대이기 때문에 복사된 두 전자기장 성분은 서로 상쇄하게 되며 결과적으로 전류라인 소스에 의해 복사된 전자기장을 감소시키게 된다.

Thomas 등이 전류 소스 아래에 놓인 유한 폭 및 무한 길이의 단일 영상평면 구조를 2 차원적으로 해석하였으며^[2], 유한 폭 및 유한 길이의 단일 영상평면 구조가 Fessler 등에 의해 3 차원적으로 해석되었다^[3]. 또한, 유한 폭 및 무한 길이를 가진 다층 영상평면 구조에 대한 해석도 수행되었다^[4]. 이 논문에서는 유한 폭 및 유한 길이를 가진 이층 영상평면 구조의 EMI 차폐성능을 triangular surface patch 모델을 이용하여 해석하였다.

triangular surface patch 모델을 이용한 모멘트 기법을 적용함에 있어서, patch 모델의 내부 edge

* 송호대학 정보산업계열(jskim@songho.ac.kr),
*** 한국전자통신연구원 전자파환경팀(aklee@etri.re.kr),
논문번호 : 99280-0715, 접수일자 : 1999년 7월 15일

** 한국전자통신연구원 안테나기반기술팀(jhyun@etri.re.kr),
**** 충북대학교 정보통신공학과(namkim@cbucc.chungbuk.ac.kr)

와 관련된 벡터 기저함수가 정의된다⁵⁾. 그러나, 표면의 삼각형 분할방법에 특별한 주의를 기울이지 않으면 표면의 경계에 있는 삼각형에서는 단 한 개의 기저함수를 가지게 된다. 이 논문에서는 경계(boundary)에 있는 삼각형에서 두 개의 기저함수를 취할 수 있도록 표면을 분할할 필요가 있음을 제안하고 시뮬레이션 결과를 통해 계산의 정확도에 미치는 영향을 분석한다.

II. 복사전계 계산

1. Triangular Patch Model

도전성 산란체에 입사 전계 E^i 가 조사되는 경우를 고려하면, 산란체의 표면 S 에 적용되는 경계조건은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-E_{\text{tan}}^i = (-j\omega A - \nabla\Phi)_{\text{tan}} \quad (1)$$

여기서 vector potential A 와 scalar potential Φ 는 다음과 같이 주어진다.

$$A(r) = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \mathbf{J} \frac{e^{-jkr}}{R} dS' \quad (2)$$

$$\Phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_S \sigma \frac{e^{-jkr}}{R} dS' \quad (3)$$

식 (3) 에서 표면 전하밀도는 전류의 표면발산에 관련된 항으로 다음과 같이 연속방정식으로 주어진다.

$$\nabla_s \cdot \mathbf{J} = -j\omega\sigma \quad (4)$$

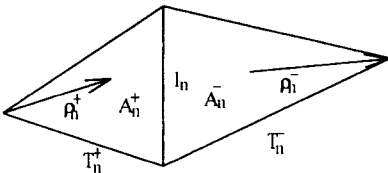


그림 1. 삼각형의 쌍과 기하변수

그림 1 은 triangular patch model 에서 내부 edge l_n 에 대한 삼각형 쌍 T_n^+ , T_n^- 를 나타낸 것으로, 벡터 ρ_n^+ 는 삼각형의 정점에서 내부 edge 로 나가는 방향, ρ_n^- 는 내부 edge 에서 삼각형의 정점

으로 들어오는 방향의 위치 벡터이고, A_n^\pm 는 삼각형 T_n^\pm 의 면적이다. 표면 S 를 여러 개의 삼각형으로 적절히 분할한 뒤 두 인접 삼각형의 내부 edge 에 관한 벡터 기저함수 $f_n(r)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$f_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+, & r \text{ in } T_n^+ \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^-, & r \text{ in } T_n^- \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (5)$$

전류밀도 \mathbf{J} 는 기저함수 f_n 의 항으로 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\mathbf{J} \cong \sum_{n=1}^N I_n f_n(r) \quad (6)$$

여기서 N 은 삼각형의 내부(비경계) edge 의 수이다. 내적의 정의를 사용하면 식 (1) 은 f_m 으로 다음과 같이 테스트되며,

$$\langle E^i, f_m \rangle = j\omega \langle A, f_m \rangle + \langle \nabla\Phi, f_m \rangle \quad (7)$$

이 식을 삼각형의 중심에서의 값으로 근사화하여 계산하면,

$$\begin{aligned} \frac{j\omega l_m}{2} [A(r_m^{c+}) \cdot \rho_m^{c+} + A(r_m^{c-}) \cdot \rho_m^{c-}] + l_m [\Phi(r_m^{c-}) - \Phi(r_m^{c+})] \\ = l_m \left[E^i(r_m^{c+}) \cdot \frac{\rho_m^{c+}}{2} + E^i(r_m^{c-}) \cdot \frac{\rho_m^{c-}}{2} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

전류밀도의 전개식 (6) 을 식 (8) 에 대입하면 다음과 같은 매트릭스 형태의 선형방정식이 유도된다.

$$Z I = V \quad (9)$$

여기서, $Z = [Z_{mn}]$ 는 $N \times N$ 매트릭스, $I = [I_n]$ 와 $V = [V_m]$ 는 길이 N 의 칼럼 벡터이다. Z 와 V 의 요소는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_{mn} = l_m \left[j\omega \left(A_{nm}^+ \cdot \frac{\rho_n^{c+}}{2} + A_{nm}^- \cdot \frac{\rho_n^{c-}}{2} \right) + \Phi_{nm}^- - \Phi_{nm}^+ \right] \quad (10)$$

$$V_m = I_m \left(E_m^+ \cdot \frac{\rho_m^{c+}}{2} + E_m^- \cdot \frac{\rho_m^{c-}}{2} \right) \quad (11)$$

식 (10) 과 (11) 에서 A_{mn}^\pm , Φ_{mn}^\pm 및 E_m^\pm 은 다음과 같이 주어진다.

$$A_{mn}^\pm = \frac{\mu}{4\pi S} \int_S f_n(r') \frac{e^{-jkR_{mn}^\pm}}{R_{mn}^\pm} dS' \quad (12)$$

$$\Phi_{mn}^\pm = -\frac{1}{4\pi j\omega\epsilon} \int_S \nabla'_S \cdot f_n(r') \frac{e^{-jkR_{mn}^\pm}}{R_{mn}^\pm} dS' \quad (13)$$

$$R_m^\pm = |r_m^{c\pm} - r'| \quad (14)$$

$$E_m^\pm = E^i(r_m^{c\pm}) \quad (15)$$

식 (9) 에서 컬럼 매트릭스 I 가 구해지면 식 (6) 에서 표면 S 에서의 전류밀도가 구해지고, 따라서 표면 S 에서 재복사되는 전계 E 를 구할 수 있다. 여기서는 논문인용의 예를 살펴본다^[1]. 다음의 보기

2. 경계 삼각형에서의 기저함수

일반적으로 triangular patch model 을 적용함에 있어 산란체의 표면은 그림 2a 에서와 같이 특별한 주의없이 편리에 따라 분할된다. 그러나, 이러한 방식으로 표면을 분할하면 표면의 경계에 있는 삼각형에서 하나의 기저함수만 가지게 될 수 있다. 이는 전류밀도 J 가 경계에 있는 삼각형에서 곡부 위치 벡터 ρ_n 에 비례해야 함을 의미하며, 두 수직성분 J_x , J_y 는 서로 독립적일 수 없음을 의미한다^[6].

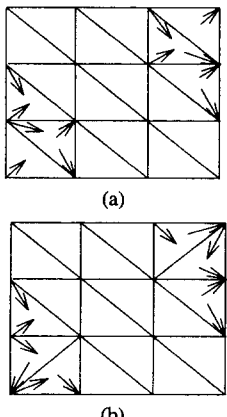


그림 2. 평면의 삼각형 분할: (a) 모서리의 한 기저함수 (b) 모서리의 두 기저함수

이러한 문제를 피하기 위하여 그림 2b 에서와 같이 모서리에 있는 삼각형에서 하나의 기저함수를 취하지 않도록 평면을 삼각형 분할하도록 하였다. 그림 2 에서 주어진 것과 같은 사각형 형태가 아닌 임의의 형태를 가진 표면에 대해서는 모든 경계에 있는 삼각형에서 두 개의 기저함수를 가지도록 표면을 분할해야 한다.

x 축에 평행하게 분극된 평면파가 정사각형 평판에 수직으로 입사하는 경우를 고려하자. 90 개의 (10x9, 임피던스 매트릭스 크기 161x161) 직사각형 patch^[7] 와 그림 2a^[5] 및 b 에 나타난 삼각형 분할에 따른 60 개의 (12x5, 임피던스 매트릭스 크기 79x79) 삼각형 patch 를 이용하여 수치해석한 결과는 x (dominant) 성분 전류 분포가 거의 일치함에 비해, y 성분 전류 분포는 서로 다름을 보였다. 그림 3 은 평판의 바닥에 있는 삼각형의 중심이 위치한 $y = w/15$ 에서 (BB' 선상), 그림 2a 및 b 의 삼각형 분할 방식에 따른 y 성분 전류 분포의 계산 결과를 입사 자계강도 H^{inc} 에 대한 값으로 나타낸 것이다(곡선 a 와 곡선 b). 또한, 직사각형 patch 를 이용한 계산결과를 $y = w/9$ 에서^[7] 나타내었다(곡선 c). 직사각형 patch 모델에서 이것은 $y = w/18$ 에서 $y = 3w/18$ 사이의 대표적인 값이다. 이 그림으로부터 J_y 는 그림 2a 의 삼각형 분할 방식에 따른 계산 결과 왼쪽 모서리에서 명백히 잘못 계산되었음을 알 수 있다.

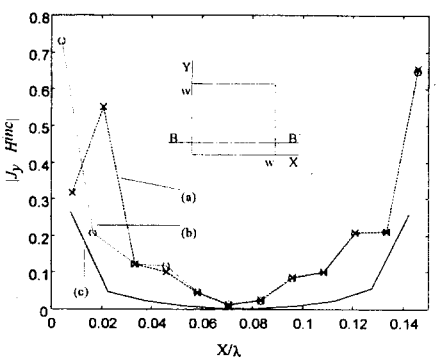


그림 3. 정사각형 평판에서의 y 성분 전류분포, $w = 0.15 \lambda$. (a) 와 (b) 그림 2a 및 b 방식에 따른 60 개의 삼각형 patch 모델, $y = w/15$, (c) 90 개의 직사각형 patch 모델, $y = w/9$

III. 영상평면의 차폐 성능

그림 4 는 유한한 길이의 전류 소스를 감싸고 있

는 유한한 크기의 이층 영상평면 구조를 나타내고 있다. 두 영상평면 사이의 거리는 $2h$ 이고, 전류 소스는 두 영상평면의 중간 높이에 위치해 있으며, x 축의 가운데에서 y 축을 따라 놓여 있다. 그림 5 는 0.03λ 길이의 단위 전류 소스에 대해 하나의 영상평면을 놓을 때 $y = w/2$ 축 상에 유도되는 지배적인 전류분포(J_y) 분포를 나타낸 것이다. 그림 5 에서 영상평면에 유도되는 전류는 전류 소스 아래에 집중되어 있음을 볼 수 있다. 그림 6 은 한 영상평면 위의 전류 소스와(곡선 b) 두 영상평면 사이의 전류 소스에 의한(곡선 c) $x - z$ 평면 상에서의 원거리장 복사 패턴을 나타낸 것이다. 또한, 하나의 영상평면을 사용한 경우에 대해(곡선 d) 거리 $\rho = w$ 에서 계산된 복사 패턴을 크기를 임의로 조정하여 나타내었다. 그림으로부터 전류 소스에서 복사된 전기장은 작은 크기의 영상평면으로도 상당히 감소될 수 있음을 볼 수 있으며 (약 16 dB), 또한, 이층 영상평면 구조가 단일 영상평면 구조보다 더 큰 전기장 감쇠를 줌을 알 수 있다 (단일 영상평면 구조에 대해 약 17 dB 감쇠). 이러한 방법으로, PCB 전류 소스에 의해 복사되는 전자기장과 영상평면에 유도되는 전류분포에 의해 복사되는 전자기장을 구하여 PCB 복사에 대한 영상평면의 전자파 차폐효과를 계산할 수 있다. 영상평면의 차폐성능은 자유공간에서의 전류소스에 의한 침투 원거리 전기장과 영상평면 구조에서의 전류소스에 의한 침투 원거리 전기장의 차로 정의될 수 있다. 그림 7 은 단일 영상평면의 차폐성능을 영상평면과 전류 소스 사이의 거리 $h=0.005\lambda$ 와 $h=0.01\lambda$ 인 경우에 대해 영상평면 폭을 변수로 나타낸 것이다. 이들 두 곡선에서 영상평면의 폭이 넓을수록 차폐효과가 더 큼을 볼 수 있으며, $h=0.005\lambda$ 에서 차폐효과가 더 큼을 알 수 있다. 영상평면의 폭과 전류 소스의 구조 및 영상평면과 전류 소스의 거리 등을 변수로 한 다층 영상평면의 상세한 차폐성능은 계산 중에 있다.

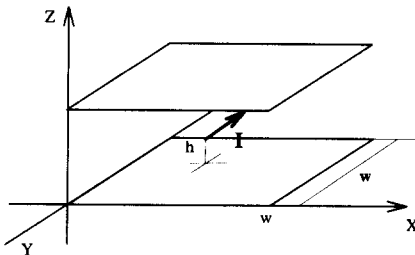


그림 4. 이층 영상평면 구조

이와 같은 방법으로 임의의 회로를 가진 실제 PCB 에 대해 영상평면을 사용할 경우, 먼저 복잡한 회로를 단순한 형태로 모델링하여 source 전류에 의해 영상평면에 유도되는 전류분포를 구하면 임의의 PCB 에 대해 영상평면을 사용했을 때의 EMI 감쇠효과를 계산할 수 있다. 그림 9 와 그림 10 은 PCB 상에 나타나는 지배적인 전류분포가 Γ 자 형태로 나타나는 경우 영상평면에 유도되는 전류분포와 복사 전자파패턴을 나타낸 것이다. 그림 9 의 전류분포는 $y = w/2$ 인 축을 따라 J_y 성분을 나타낸 것이며, 그림 10 은 $x - z$ 평면 상에서의 복사 패턴을 나타낸 것으로 곡선 (a) 와 (b) 는 원거리장 복사 패턴이고, 곡선 (c) 는 영상평면 가까이에서의 ($\rho = w$) 복사 패턴을 계산한 것으로 그 크기는 임의로 조정되었다.

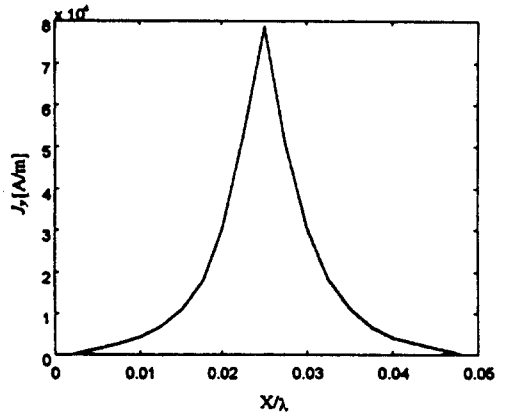


그림 5. y 성분 전류분포, $y = w/2$, $w = 0.05\lambda$, $h = 0.005\lambda$.

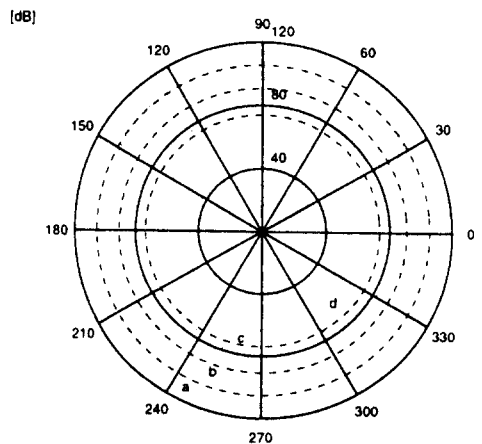


그림 6. 전자파 복사패턴, $w=0.05\lambda$, $h=0.005\lambda$.
 (a) 영상평면이 없을 때, (b) 단일 영상평면,
 (c) 이층 영상평면, (d) 단일 영상평면, $\rho = w$.

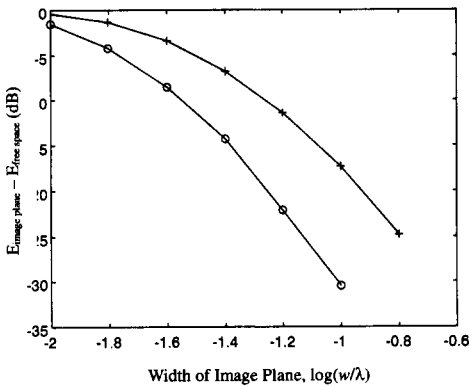


그림 7. 단일 영상평면에 의한 침투전계강도 감쇠, (o) $h=0.005\lambda$, (+) $h=0.01\lambda$.

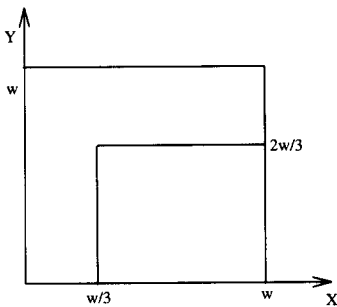


그림 8. Γ 자 형태의 전류분포와 영상평면

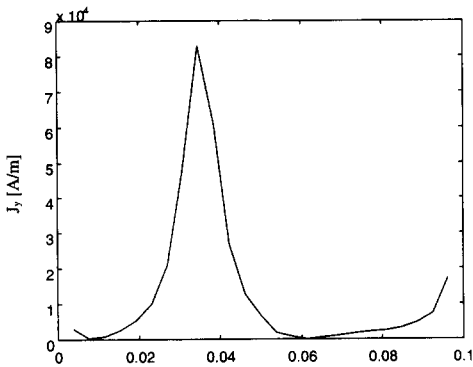


그림 9. y 성분 전류분포, $y = w/2$, $w = 0.1\lambda$, $h = 0.005\lambda$.

IV. 결론

이 논문에서는 폭과 길이가 유한한 영상평면의 차폐 성능을 triangular surface patch model 을 이용하여 moment method 의 방법으로 해석하였다. PCB 에서 발생하는 EMI 를 감소시킬 목적으로 영상평면의 사용은 매우 효과적인 것이며, 해석된 결

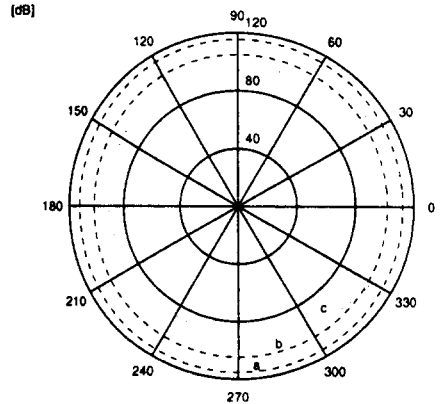


그림 10. 전자파 복사패턴, $w=0.1\lambda$, $h=0.005\lambda$. (a) 영상평면이 없을 때, (b) 단일 영상평면, (c) 단일 영상평면, $p = w$.

과로부터 작은 크기의 영상평면으로도 전류 소스에 의해 복사되는 전기장을 상당히 억제시킬 수 있을 을 볼 수 있었다. 임의의 회로를 가진 실제 PCB 에 대해서는 회로를 단순한 형태의 지배적인 전류 분포로 모델링하여 영상평면에 유도되는 전류분포를 구하면 영상평면에 의한 EMI 차폐성능을 같은 방법으로 계산할 수 있다. 또한, 이 논문에서는 triangular patch model 을 사용한 수치해석에 있어서 표면의 경계에 있는 삼각형에서 한 개의 기저함수를 취하는 데 대한 문제점을 지적하고, 두 개의 기저함수를 취하도록 표면을 삼각형 분할하는 방법을 제안하였으며, 이 방법이 수치계산의 정확도를 증진시킴을 보였다. 향후 영상평면의 폭과 전류 소스의 구조 및 영상평면과 전류 소스의 거리 등을 변수로 한 다층 영상평면에 대한 상세한 차폐성능을 계산할 예정이다.

참고문헌

- [1] R.F.German, H.W.Ott, C.R.Paul, "Effect of an Image Plane on Printed Circuit Board Radiation," *IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat.*, Washington D.C., USA, August 21-23, 1990, pp. 284-291.
- [2] T.A.Jerse, C.R.Paul, K.W.White, "The Effect of Finite Image Plane Width on the Radiation from an Electric Line Source," *10th Int. Symp. on Electromagn. Compat.*, Zurich, Switzerland, March 9-11, 1993, pp. 201-206.
- [3] J.T.Fessler, K.W.Whites, C.R.Paul, "The

Effectiveness of an Image Plane in Reducing Radiated Emissions," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. 38, no. 1, Feb. 1996, pp. 51-61.

- [4] J.S.Kim, N. Kim, "Analysis of EMI reduction by multilayers of image planes," *Electronic Lett.*, vol. 33, no. 13, June 1997, pp. 1125-1127.
- [5] S.M.Rao, D.R.Wilton, A.W.Glisson, "Electromagnetic Scattering by Surfaces of Arbitrary Shape," *IEEE Trans. Antennas. Propagat.*, vol. AP-30, no. 3, May 1982, pp. 409-418.
- [6] J.S.Kim, J.H.Yun, and N. Kim, "Numerical Analysis of Shielding Performance by Multi-Layers of Finite Size Image Planes," *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, June 1998, pp. 163.
- [7] A.W.Glisson, D.R.Wilton, "Simple and Efficient Numerical Methods for Problems of Electromagnetic Radiation and Scattering from Surfaces," *IEEE Trans. Antennas. Propagat.*, vol. AP-28, no. 5, Sept. 1980, pp. 593-603.
- [8] S.Celozzi, A.Orlandi, "Numerical Modeling of Finite Size PCB for Radiated EMI Prediction," *11th Int. Symp. on Electromagn. Compat.*, Zurich, Switzerland, March 7-9, 1995, pp. 333-338.
- [9] T.Takahashi, N.Schibuya, K.Ito, "Prediction and Reduction of Radiated Emission from PCB", 1994 Intern. Symp. on Electromag. Compat., Sendai, Japan, May 17-19, 1994, pp. 282-285.
- [10] N.O.Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, CRC Press, London, 1992.
- [11] H.W.Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems* (second edition), John Wiley & Sons, New York, 1988.
- [12] Mark I. Montrose, *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance*, IEEE Press, New York, 1996.

김진석(Jin Suk Kim)

정회원



1981년 2월 : 경북대학교
전자공학과 졸업

1983년 2월 : 경북대학교
물리학과 석사

2000년 2월 : 충북대학교
정보통신공학과 박사

1983년 3월~1998년 6월 : 한국전자통신연구원 선임
연구원

1998년 7월~2000년 3월 : 한국전자통신연구원 초
빙연구원

2000년 3월 ~ : 송호대학 정보산업계열 교수

<주관심 분야> 전자파 수치해석, EMI, 전자파 인체
유해

윤재훈(Jae Hoon Yun)

정회원

현재 : 한국전자통신연구원 안테나기반기술연구팀장
한국통신학회논문지 제24권 제10호 참조

이애경(Ae Kyung Lee)

정회원



1990년 2월 : 중앙대학교 전자
공학과 졸업

1992년 2월 : 중앙대학교 전자
공학과 석사

1992년 1월~현재 : 한국전자통신
연구원 전자파환경팀
선임연구원

<주관심 분야> 이동통신, EMI, 전자파 인체흡수 평가

김남(Nam Kim)

정회원

현재 : 충북대학교 정보통신공학과 교수
한국통신학회논문지 제23권 제1호 참조