

---

# 무한 도체평판 개구에 입사하는 HEMP 파형에 따른 침투 전자파의 차폐효과

임병진\* · 서헌욱\*\* · 임성민\*\*\* · 김기채\*\*\*\*

Shielding effectiveness of an Aperture in Infinite Conducting plane Due to HEMP Incidence

Byoung-Jin Lim\* · Hun-Wook Seo\*\* · Sung-Min Lim\*\*\* · Ki-Chai Kim\*\*\*\*

## 요 약

본 논문에서는 IEC 61000-2-9의 HEMP 파형이 무한 도체평판의 개구에 입사할 때, 개구로 침투하는 침투 전자파의 전계 차폐효과를 검토하기 위해 개구면 전계분포에 관한 적분 방정식을 유도하고, 그 해를 모멘트 법으로 구하여 전계 차폐효과를 계산하였다. 도체평판 개구의 길이와 폭의 변화에 따른 차폐효과를 검토한 결과, 개구의 폭이  $0.4 \sim 0.45\lambda$  부근에서 전계 차폐효과가 급격히 나빠짐을 확인할 수 있었다. 또한 IEC 61000-2-9와 Bell Labs의 HEMP 입사 파형에 대한 침투 전자파의 크기는 서로 다르지만 전계 차폐효과의 주파수 특성은 양자가 같아짐을 확인할 수 있었다.

## ABSTRACT

This paper presents the shielding effectiveness for the IEC 61000-2-9 standard when HEMP source penetrates through an aperture in a planar conducting plane of infinite extent. An integral equation is derived and solved by applying Galerkin's method of moments for calculating the electric shielding effectiveness. The electric shielding effectiveness is examined based on changing the aperture length and width. It is shown that the electric shielding effectiveness is suddenly decreases as the aperture width of  $0.4 \sim 0.45\lambda$ . It is also found that the penetrated electric field for the IEC 61000-2-9 incident field is different from the Bell Laboratory incident field, but the frequency characteristic of the electric shielding effectiveness becomes the same shape.

## 키워드

전자기파, 개구, 차폐효과, 침투 전자파

## Key word

HEMP, high altitude electromagnetic pulse, aperture, shielding effectiveness, penetrated electric field

---

\* 준회원 : 영남대학교

\*\* 정회원 : 대구기계부품연구원

\*\*\* 정회원 : 에스엘 주식회사

\*\*\*\* 정회원 : 영남대학교 (kckim@ynu.ac.kr)

접수일자 : 2011. 03. 31

심사완료일자 : 2011. 06. 14

## I. 서 론

EMP(Electromagnetic Pulse)는 1962년 미국의 핵 실험에서 알려지게 되었다. 당시 폭발장소에서 800 km 반경의 관측 장비는 모두 터져버렸고, 시험지역에서 1,400 km 떨어진 하와이의 가로등, 전력공급시설, 통신 두절 등의 피해가 발생되었다. 이후, 전기·전자기술이 아날로그에서 디지털로, 메가헤르츠에서 기가 헤르츠로 증가된 동작주파수, 낮은 전압레벨에서 작동하는 칩 등이 발달되면서 전기·전자장치의 외부 노이즈에 의한 고장 확률은 더욱 증가하였다. 고공(>30 km)에서 핵폭발에 의해 발생하는 펄스인 HEMP(High-altitude Electromagnetic Pulse)는 전자기파 에너지가 고강도로 짧은 시간에 방사하여 전기·전자장치의 작동을 마비시킬 수 있다. 특히 HEMP의 특징은 매우 넓은 지역에 영향을 미치고 다수의 시스템에 동시적인 위협을 주는 것이다. 최근에는 인위적인 방법으로도 EMP를 발생시킬 수 있으며, 인명 피해 없이 전자 장비를 무력화시킬 수 있다는 특성 때문에 군사적인 목적으로 주목을 받고 있다. 이러한 위협에 대비하기 위하여 미국의회는 EMP 위원회를 설립하여 중요 인프라에 대한 보고서[1~2]가 작성되었으며, 또한 IEC SC 77C의 표준화 작업서도 출판되었다.

무한 도체평판의 개구로 침투하는 전자파 침투 문제는 많은 연구자들에 의해 연구되었다[3~7]. 또한 HEMP 파원에 의해 발생된 전자파가 무한 도체평판 개구로 입사할 때 개구로 침투된 전자파의 특성에 관한 연구도 보고되었으나[8], EMC 관점에서 중요한 평가 파라미터인 무한 도체평판 개구로 침투된 HEMP의 차폐효과에 대해서는 검토되어 있지 않다. 일반적으로 슬롯을 통한 최대전력 전달의 관점에서는 침투 전계의 크기를 검토하는 것이 적절하지만, EMC의 관점에서는 차폐효과를 검토하는 것이 매우 중요하며 유용하다. 따라서, 본 논문에서는 HEMP가 슬롯에 입사할 때의 차폐효과 특성을 검토하고 있다. 본 논문에서는 IEC 61000-2-9 기준을 바탕으로 HEMP 파원이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구의 길이와 폭의 변화에 따른 전계 차폐효과를 검토하였다. Bell Labs과 IEC 61000-2-9의 HEMP 입사파형에 대한 개구의 침투 전자계의 특성은 문헌[9]에 보고되어 있다. 이론 해석 방법으로는 개구면 전계분포에 관한 적

분방정식을 유도하고, 그 해를 모멘트 법(MoM: Method of Moments)으로 구하여 HEMP 입사파형에 대한 차폐효과를 계산하였다.

## II. 이론해석

그림 1은 HEMP파원이 무한 도체평판에 존재하는 개구를 통해 침투할 때, 개구의 차폐효과를 해석하기 위한 구조와 좌표계를 나타낸다.  $z=0$  면에 놓여진 무한히 넓은 도체판 중심에 길이  $a$ , 폭이  $b$ 인 직사각형 개구가 있다. 무한 도체평판을 기준으로 HEMP 파원이 입사하는 영역 I ( $z < 0$ )과 침투되는 영역 II ( $z > 0$ )로 구분한다. 두 공간은 모두 자유공간으로 가정하였으며, 시간 의존성은  $\exp(j\omega t)$ 를 가정하였다.

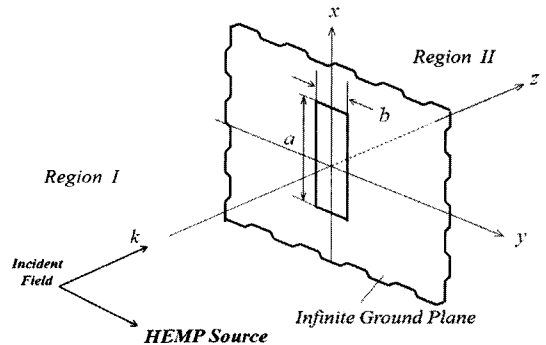


그림 1. HEMP 파원이 입사하는 무한 도체평판 개구의 구조와 좌표계

Fig. 1. Geometry of an aperture in an infinite conducting screen excited by HEMP source.

본 논문에서 사용한 HEMP 파형은 IEC 61000-2-9의 기준을 사용[9]하였으며, 구체적인 표현식은 다음과 같다.

$$E^i(t) = KE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

여기서, 시간  $t$ 는 양수이며 계수의 값들은 아래와 같다.

$$\left[ \begin{array}{l} K=1.30, \quad E_0=5.0 \times 10^4 \text{ (V/m)} \\ \alpha=4.0 \times 10^7 \text{ (1/s)}, \quad \beta=6.0 \times 10^8 \text{ (1/s)} \end{array} \right]$$

영역 I에서 HEMP가 입사한다고 가정하면 개구면 전계분포  $\mathbf{E}_a$ 에 관한 적분 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} & \hat{z} \times \left[ \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'_a} (\bar{\mathbf{I}}k_0^2 + \nabla\nabla) \cdot \overline{\mathbf{G}}_m^I \cdot (\hat{z} \times \mathbf{E}_a) dS'_a \right. \\ & \left. + \frac{1}{j\omega\mu_0} \iint_{S'_a} (\bar{\mathbf{I}}k_0^2 + \nabla\nabla) \cdot \overline{\mathbf{G}}_m^{II} \cdot (-\hat{z} \times \mathbf{E}_a) dS'_a \right] \\ & = \hat{z} \times (\mathbf{H}^I + \mathbf{H}^R) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\hat{z}$ 는 z방향의 단위 벡터이며,  $\bar{\mathbf{I}}$ 는 단위 다이애딕이다.  $k = \omega_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ 는 자유공간의 파수,  $\omega$ 는 각주파수를 나타낸다.  $\overline{\mathbf{G}}_m^I$ 과  $\overline{\mathbf{G}}_m^{II}$ 는 반무한 공간의 다이애딕 그린함수이며,  $dS'_a$ 는 개구면을 나타낸다.

식(2)에서  $\mathbf{H}^I$  및  $\mathbf{H}^R$ 은 각각 입사파 및 반사파이며, IEC 61000-2-9의 HEMP 파형에 관한 식을 주파수 영역으로 나타내기 위해 Fourier 변환하였다. 주파수 영역에서의 반사파는 Fourier 변환된 입사파의 식

$$\mathbf{E}^I(w) = \hat{y} KE_0 \left( \frac{1}{\alpha + jw} - \frac{1}{\beta + jw} \right) e^{-jkz} \quad (3-a)$$

$$\mathbf{E}^R(w) = -\hat{y} KE_0 \left( \frac{1}{\alpha + jw} - \frac{1}{\beta + jw} \right) e^{jkz} \quad (3-b)$$

로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{H}^I(w) = -\hat{x} \frac{1}{\eta} KE_0 \left( \frac{1}{\alpha + jw} - \frac{1}{\beta + jw} \right) e^{-jkz} \quad (4-a)$$

$$\mathbf{H}^R(w) = -\hat{x} \frac{1}{\eta} KE_0 \left( \frac{1}{\alpha + jw} - \frac{1}{\beta + jw} \right) e^{jkz} \quad (4-b)$$

적분 방정식 (1)을 모멘트 법으로 해석하기 위해, 개구면 전계분포  $\mathbf{E}_a$ 를 다음과 같이 기지의 함수로 전개한다.

$$\mathbf{E}_a = \hat{x} \sum_{p=0}^P \sum_{q=1}^Q E_{ypq} \cos \frac{p\pi(x + \frac{a}{2})}{a} \sin \frac{q\pi(y + \frac{b}{2})}{b}$$

$$+ \hat{y} \sum_{p=1}^P \sum_{q=0}^Q E_{ypq} \sin \frac{p\pi(x + \frac{a}{2})}{a} \cos \frac{q\pi(y + \frac{b}{2})}{b} \quad (5)$$

여기서,  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ 는 각각 x, y 방향의 단위 벡터이며,  $E_{ypq}$ ,  $E_{ypq}$ 는 미지의 전개계수이다.

식 (5)를 적분 방정식 (1)에 대입하고 Galerkin의 모멘트법을 적용하면 적분 방정식은 연립 일차방정식으로 변환된다. 연립 일차방정식으로부터 미지의 전개계수를 구하면 영역 II로 침투하는 침투 전자파를 계산할 수 있으며, 이로부터 개구의 차폐효과를 계산할 수 있다. 영역 II로 침투하는 침투 전계는 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\mathbf{E}^{II} = - \iint_{S'_a} \nabla \times \overline{\mathbf{G}}_m^{II} \cdot (-\hat{z} \times \mathbf{E}_a) dS'_a \quad (6)$$

영역 II로 침투되는 침투 전계가 계산되면 개구의 차폐효과를 구할 수 있으며 개구의 전계 차폐효과는 다음 식으로 주어진다.

$$SE = 20 \log_{10} \frac{E_1^{II}}{E_2^{II}} \quad (7)$$

여기서,  $E_1^{II}$ 은 도체판이 없을 경우 영역 II에 생성되는 전계의 크기이며,  $E_2^{II}$ 는 도체판이 있을 경우 영역 II에 침투되는 전계의 크기이다.

### III. 수치해석 결과 및 비교

수치계산에 사용한 관측점은  $z = 5 \text{ cm}$ 로 고정하고, 개구의 크기는  $a = 1 \text{ mm}, 1 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 15 \text{ cm}$ , 개구의 폭은  $b = 1 \text{ mm}, 1 \text{ cm}, 5 \text{ cm}, 10 \text{ cm}, 15 \text{ cm}$ 로 설정하였다.

그림 2는 개구의 길이를  $a = 15 \text{ cm}$ 로 고정하고, 개구의 폭  $b$ 를 파라미터로 하였을 때 전계 차폐효과의 주파수 특성을 나타낸다. 그림 2에서 알 수 있는 것처럼, 영역 II에서의 침투 전자파의 전계 차폐효과는 개구면의 폭  $b$

가 클수록 차폐효과는 나빠지며, 특히  $b=0.4 \sim 0.45\lambda$  부근에서 차폐효과가 급격히 나빠짐을 알 수 있다. 또한 침투 전자파의 차폐효과는 약  $1\lambda$ 의 주기적 패턴으로 변화함을 알 수 있다.

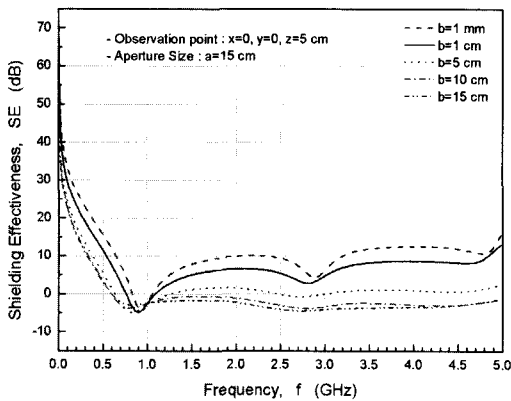


그림 2. 개구의 폭  $b$ 를 파라미터로 하였을 때, 침투 전자파 차폐효과의 주파수 특성  
 Fig. 2. Frequency characteristics of the electric shielding effectiveness as a parameter of the slot width  $b$ .

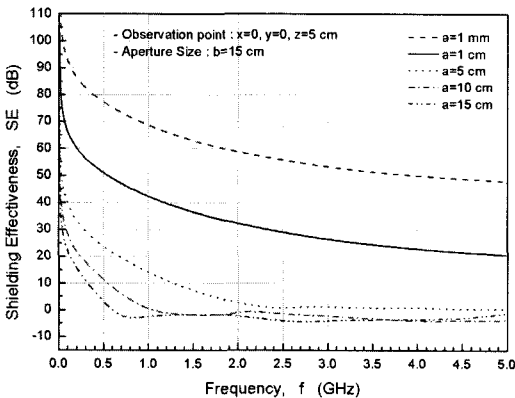


그림 3. 개구의 길이  $a$ 를 파라미터로 하였을 때, 침투 전자파 차폐효과의 주파수 특성  
 Fig. 3. Frequency characteristics of the electric shielding effectiveness as a parameter of the aperture length  $a$ .

그림 3은 개구의 폭을  $b = 15 \text{ cm}$ 로 고정하고, 개구의 길이  $a$ 를 파라미터로 하였을 때 전계 차폐효과의 주파수 특성을 나타낸다. 개구의 길이  $a$ 가 길어질수록 침투 전

자파의 전계 차폐효과는 나빠짐을 알 수 있다.  $1 \text{ GHz}$ 를 기준으로  $a = 10 \text{ cm}$  일 때  $a = 15 \text{ cm}$ 보다  $2.9 \text{ dB}$  증가하였고,  $a = 5 \text{ cm}$ 보다는  $13 \text{ dB}$  감소하였다.

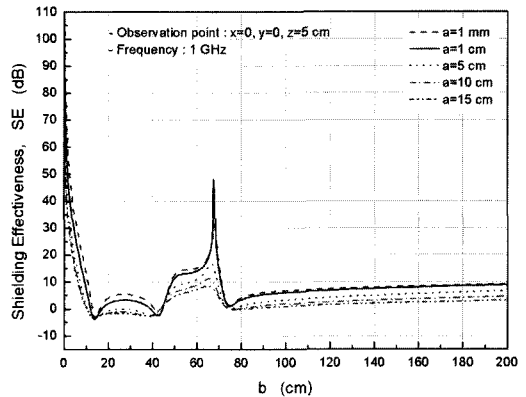


그림 4. 개구의 폭  $b$ 에 따른 침투 전자파의 전계 차폐효과

Fig. 4. Electric shielding effectiveness as a function of the aperture width  $b$ .

그림 4는 주파수  $1 \text{ GHz}$ 에서 개구면의 길이  $a$ 를 파라미터로 하였을 때 개구면의 폭  $b$ 에 대한 침투 전자파의 전계 차폐효과를 나타낸다. 그림 2에서 확인된 것과 같이,  $b=0.4 \sim 0.45\lambda$ 에서 차폐효과가 나빠지며 약  $1\lambda$ 의 주기적 패턴으로 변화함을 알 수 있다. 또한  $2.2\lambda$ 에서는 c폐효과가 급격히 좋아짐을 알 수 있다. 개구면의 폭  $a = 1 \text{ cm}$ ,  $b = 2.2\lambda$  (파장 =  $66 \text{ cm}$ )에서는 HEMP의 입사 전계방향과 평행한 방향으로 개구가 길어지므로 개구면에는 전계가 아주 약하게 생성되어 침투 전계는 아주 작아지고 차폐효과는 매우 커진 것임을 알 수 있었다.

그림 5와 6은 문헌[9]에서 검토한 Bell Labs의 HEMP 파형이 무한 도체평판 개구에 침투할 때 침투 전자파의 크기와 전계 차폐효과의 주파수 특성을 IEC 61000-2-9의 HEMP 파원 입사에 대한 결과와 비교하였다. 개구의 길이를  $a = 15 \text{ cm}$ 로 고정하고, 개구의 폭은  $b = 1 \text{ mm}$ ,  $b = 15 \text{ cm}$ , 관측점은  $x = 0, y = 0, z = 5 \text{ cm}$ 를 선택하였다.

그림 5에서 알 수 있는 것처럼, 침투 전자파의 크기는 IEC 61000-2-9의 침투 전자파가 Bell Labs보다 더 크다는 것을 알 수 있다.

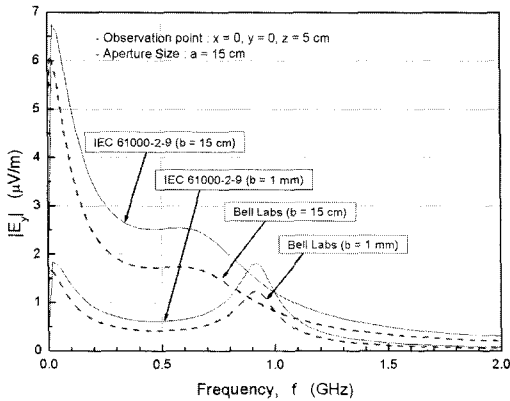


그림 5. 침투 전계의 주파수 특성 비교  
Fig. 5. Comparison of frequency characteristics of the penetrated electric field.

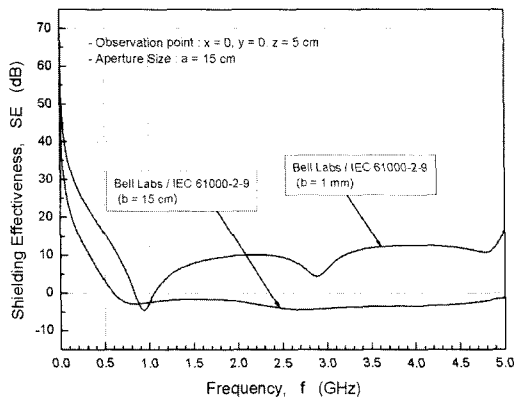


그림 6. 전계 차폐효과의 주파수 특성 비교  
Fig. 6. Comparison of frequency characteristics of the electric shielding effectiveness.

그림 5의 결과를 사용하여 식 (6)으로부터 계산한 침투 전자파의 전계 차폐효과에 대한 주파수 특성을 그림 6에 나타내었다. 그림 6으로부터 알 수 있는 것처럼, HEMP의 침투 전자파의 크기는 IEC 61000-2-9와 Bell Labs의 결과가 서로 다르지만 전계 차폐효과는 서로 같아짐을 알 수 있다. 일반적으로 차폐효과 특성은 파원의 종류, 관측점의 위치, 주파수 등에 따라서 달라진다. 본 논문에서 검토하고 있는 IEC 61000-2-9와 Bell Labs의 HEMP의 파형은 크기와 모양은 다르지만 주파수가 동일하므로 차폐효과 특성은 동일하다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과는 EMP의 방호문제에 관한 기초연구자료

로 전기·전자 장치들을 설계할 때 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 IEC 61000-2-9의 HEMP 파형이 무한 도체평판의 개구에 입사할 때, 개구로 침투하는 침투 전자파의 전계 차폐효과를 모멘트 법을 사용하여 검토하였다. 이론해석 결과, 개구의 폭이  $0.4 \sim 0.45\lambda$  부근에서 전계 차폐효과가 급격히 나빠지며 차폐효과는 약  $1\lambda$ 의 주기적 패턴으로 변화함을 알 수 있었다. 또한, IEC 61000-2-9와 Bell Labs의 입사 파형에 대한 침투 전자파의 크기는 서로 다르지만 전계 차폐효과의 주파수 특성은 일치함을 확인 할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Clay Wilson, "High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and High Power Microwave (HPM) Devices:Threat Assessments", *CRS Report for Congress*, March. 2008, [Online]. Available : [http://www.millennium-ark.net/NEWS/09\\_USA/090330.EMP.threat.Congress.08.pdf](http://www.millennium-ark.net/NEWS/09_USA/090330.EMP.threat.Congress.08.pdf)
- [2] W. Radasky, "High-altitude electromagnetic pulse (HEMP): A threat to our way of life," *IEEE-USA Today's Engineer*, Sept. 2007. [Online]. Available : <http://www.todaysengineer.org/2007/Sep/HEMP.asp>
- [3] C. M. Butler and K. R. Umashankar, "Electromagnetic excitation of a wire through an aperture-perforated conducting screen," *IEEE Tran. on Antenna and propag.*, vo1.AP-24, no.4, pp.456-462, July 1976.
- [4] C. D. Taylor, "Electromagnetic pulse penetration through small apertures." *IEEE Tran. on Electromagnetic Compa.*, vol. EMC-15, no.1, pp.17-26, February 1973.
- [5] Y. Rahmat-Samii and R. Mittra, "A new integral equation solution of electromagnetic aperture coupling and thin plate scattering problems," *AFWL Interaction h'ote* 224, Feb. 1975.

- [6] C. D. Taylor, "Electromagnetic pulse penetration through small apertures." *IEEE Tran. on Electromagnetic Compa.*, vol. EMC-15, no.1, pp.17-26, February 1973.
- [7] M. Butler, Y. Rahmat-Samii and R. Mittra, "Electromagnetic Penetration Through Apertures in Conducting Surfaces." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-26, no.1, pp.82-93, January. 1978
- [8] 임병진, 서현욱, 임성민, 김기채, "HEMP 파원에 의한 도체평판 개구의 침투 전계특성", *마이크로파 및 전파 학술대회 논문지*, Vol.33, No.1, pp.81, 2010
- [9] 임병진, 정성우, 조병두, 김기채, "HEMP 파원에 의한 무한 도체평판 개구의 침투전계 특성", *전자과학회 논문지*, Vol.21, No.12, Dec. 2010

저자소개



임병진(Byoung-Jin Lim)

2008년 2월 : 영남대학교  
전기공학과 (공학사)  
2009년 3월 ~ 현재 : 영남대학교  
대학원 전기공학과  
석사과정

※관심분야 : EMI/EMC, EMP



서현욱(Hun-Wook Seo)

2003년 4월 ~ 2005년 1월 : LG  
이노텍 구미연구소 연구원  
2005년 2월 ~ 2006년 6월 : LIG  
NEX1 신뢰성센터 연구원

2006년 6월 ~ 현재 : 대구기계부품연구원 EMC시험팀  
선임연구원  
2009년 9월 ~ 현재 : 영남대학교 대학원 전기공학과  
석사과정

※관심분야 : EMC, RECTENNA



임성민(Sung-Min Lim)

2003년 2월 : 영남대학교  
전기공학과 (공학사)  
2005년 3월 : 영남대학교 대학원  
전기공학과 (공학석사)

2004년 11월 ~ 현재 : 에스엘 주식회사 선행연구개발  
본부 시험팀

2010년 3월 ~ 현재 : 영남대학원 전기공학과  
(공학박사)

※관심분야 : EMC/EMI



김기채(Ki-Chai Kim)

1984년 2월: 영남대학교  
전자공학과 (공학사)  
1986년 3월: Keio University 대학원  
(공학석사)

1989년 3월: Keio University 대학원 (공학박사)

1989년 4월 ~ 1993년 3월: 한국표준과학연구원  
전자파연구실 선임연구원

1993년 4월 ~ 1995년 8월: 일본 후쿠오카 공업대학  
정보공학과 조교수

2004년 9월 ~ 현재: 영남대학교 전기공학과 교수,  
한국전자파 학회 부회장

※관심분야 : 소형 안테나, EMC/EMI 관련 안테나 및  
측정시설, 전자파 이론 및 응용.