HEMP 파원에 의한 무한 도체 평판 개구의 침투 전계 특성

The Characteristic of Electric Field Penetration into Infinite Conducting Plane with an Aperture Due to HEMP Incidence

임병진 · 정성우 · 조병두 · 김기채

Byoung-Jin Lim · Sung-Woo Jung · Byung-Doo Cho · Ki-Chai Kim

요 약

본 논문에서는 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에 제시된 HEMP 파형이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구로 침투하는 침투 전계 특성을 비교 검토하고 있다. 이론 해석으로는 HEMP의 전계 분포를 가정한 상태에서 도체 평판의 개구에 생성되는 전계 분포에 관한 적분 방정식을 유도하여 Galerkin의 모멘트 법으로 해석하였다. 이론 해석 결과, IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소의 기준보다 낮은 주파수 대역을 제외하고 침투 전계는 크지만, 침투 전계의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다.

Abstract

This paper presents the comparison of electric field penetration in Bell laboratories and IEC 61000-2-9 standard when HEMP source penetrates through an aperture in a planar conducting plane of infinite extent. HEMP electric field distributions assume in order to interpret this problem. Integral equation is derived and solved by Galerkin's method of moments for calculating the penetrating electric field. It is shown that penetrated electric field of IEC 61000-2-9 standard is greater than the Bell Laboratories waveform in resonance of lower frequency band, but those waveforms are similar in shape to frequency domain.

Key words : HEMP, High Altitude Electromagnetic Pulse, Aperture, Penetrated Electromagnetic Field, Penetrated Electric Field

Ⅰ. 서 론

HEMP(High-altitude Electro-Magnetic Pulse)는 고공(>100 km)에서 핵폭발에 의해 발생하는 펄스로 전자기파 에너지가 고강도로 짧은 시간에 방사한다. 이때, 전자장비와 기기들의 개구를 통해 침투하는 HEMP는 이들 장비와 시스템의 작동을 마비시킬 수 있다. 이러한 위협으로 인하여 국가 인프라 보호의 중요성을 검토하기 위해 최근 미국에서는 EMP 위원회를 결성하여 많은 보고서와 표준을 출판하고 있다[1],[2].

무한히 넓은 도체 평판의 개구로 침투하는 전자파의 침투 문제는 많은 연구자들에 의해 보고되어 있으며[3]~[5], 평행 평판 도파관으로 침투하는 EMP 결합 문제 해석을 위한 효율적인 수치 해석법도 보고되어 있다[6]. 이들 연구의 대부분은 외부 파원으로서 평면파 입사를 기초로 하고 있다. 또한, 최근에는 다이폴 파원이 슬릿 부근에 놓인 경우의 전자파 침투에 관한 연구도 보고되었다[7]. HEMP에 관한 연구로서는 HEMP 파형에 대한 특성 연구[8]가 발표되고 있지만, HEMP 파원에 의해 발생된 전자파가 도체 평판의 개구로 입사할 때 개구로 침투된 전자파의

영남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Yeungnam University)
· 논 문 번 호 : 20100917-135
· 교 신 저 자 : 김기채(e-mail : kckim@ynu.ac.kr)
· 수정완료일자 : 2010년 11월 8일

특성에 관한 연구는 검토되어 있지 않다.

본 논문에서는 여러 기관에서 정의하고 있는 HEMP 파형의 규격화된 식들 중 널리 사용되고 있는 BELL 연구소와 IEC 61000-2-9 기준을 바탕으로 각각의 HEMP 파형 기준이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구를 통해 침투하는 침투 전계의 특성을 비교 검토하였다.

이론 해석을 위해 HEMP의 전계 분포를 가정하고 HEMP 전계가 개구로 입사할 때, 도체 평판의 개구에 생성되는 전계 분포에 관한 적분 방정식을 유도하여 Galerkin의 모멘트 법으로 그 해를 구하였다. 개구면 전계 분포가 구해지면 HEMP 파원에 의해 개구로 침투한 침투 전자파의 크기를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 HEMP에 관한 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9의 각각의 파형을 입사파로 하였을 때, 무한 도체 평판의 개구에 침투하는 침투 전자파의 특성을 비교 검토하였다. 그 결과, IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 낮은 주파수 대역(~10 MHz)을 제외하고 침투 전계가 크지만, 침투 전계의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다.

또한, Bell 연구소 기준 파형과 IEC 61000-2-9 기준 파형 및 참고문헌 [5]의 파형이 각각 개구로 입사할 때, 3가지의 HEMP 입사 파형에 대한 침투 전계의 주파수 특성은 그 형태가 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었으며, IEC 61000-2-9 기준 파형과 Bell 연구소 기준 파형에 대한 침투 전계의 크기는 거의 동일하지만, 참고문헌 [5]의 파형에 대한 침투 전계의 크기는 IEC 61000-2-9 기준 파형 및 Bell 연구소 기준 파형의 결과보다 작게 나타나고 있음을 알 수 있었다.

Ⅱ. 이론 해석

2-1 HEMP 파형 기준

HEMP의 전계는 다른 지속 시간을 가지는 초기 HEMP, 중기 HEMP, 말기 HEMP 등 3개의 성분으로 복합적인 구조를 가진다. 광범위한 전자 장비에 가장 위험한 초기 HEMP를 기준으로 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에서는 아래와 같은 식으로 정의하고 있다.

표 1. 초기 HEMP 파형의 파라미터
Table 1. The parameters of the early-time HEMP waveform.

	E_0(kV/m)	K	$\alpha(s^{-1})$	$\beta(s^{-1})$
Bell 연구소	50	1.05	4×10^6	4.76×10^8
IEC 61000-2-9	50	1.30	4×10^7	6×10^8

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

식 (1)에서 t는 시간을 나타내고, 각각의 감쇠 정수 및 진폭에 관한 파라미터들은 표 1에 나타내었다.

그림 1은 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에서 제시하고 있는 HEMP 파형의 시간 영역 특성을 나타내고 있다. 두 기준 모두 최대 크기는 50 kV/m이며, 10~90 % 상승 시간 Tr은 각각 4.1 ns, 2.5 ns, 최대값 도달 시간 Tp는 각각 10.1 ns, 4.8 ns이다.

그림 2는 시간 영역 파형의 파라미터들을 나타내고 있다. 그림 2에서 Tr은 상승 시간을 나타내고, Tp는 최대값에 도달하는 시간을 나타낸다.

2-2 적분 방정식

그림 3은 무한히 넓은 도체 평판에 길이 a, 폭이 b인 직사각형 개구가 있으며, 평판의 두께는 0으로 가정하고 있다. 무한 도체 평판은 xy평면에 위치하고, 개구의 중심은 원점에 있다. 도체 평판을 기준으로 HEMP 파원이 입사하는 영역 Ⅰ(z<0)과 침투되는 영역 Ⅱ(z>0)로 구분하며, 두 공간은 모두 자유공간으로 가정한다. 영역 Ⅰ의 HEMP로 인한 방사 전자

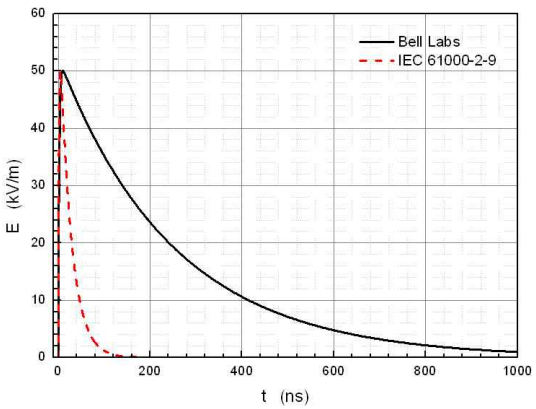


그림 1. HEMP의 파형 특성
Fig. 1. The characteristics of HEMP waveforms.

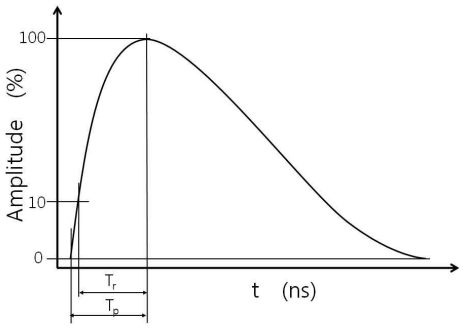


그림 2. 시간 영역 파라미터의 정의
Fig. 2. The definition of time domain parameters.

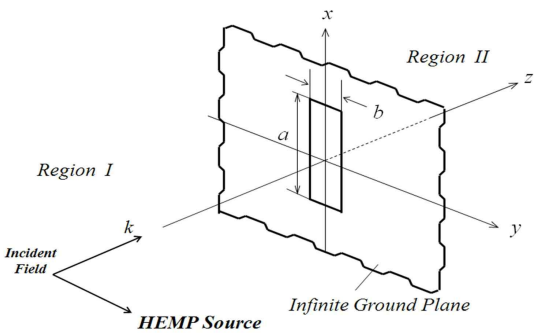


그림 3. HEMP 파원이 입사하는 무한 도체 평판 개구의 좌표계
Fig. 3. Geometry of an aperture in an infinite conducting screen excited by HEMP source.

파는 도체 평판의 개구를 통하여 영역 II로 침투된다.

HEMP 파원에 의한 방사 전계가 도체 평판의 개구에 입사할 때, 영역 I에서의 자계와 영역 II에서의 자계가 개구면에서 연속이라는 접속 조건을 적용하면 도체 평판의 개구에 생성되는 개구면 전계 분포 $\boldsymbol{E_a}$에 관한 적분 방정식을 유도할 수 있으며, 적분 방정식은 다음과 같이 주어진다[7].

$$\hat{z}\times\left[\frac{1}{j\omega\mu_0}\iint_{S_a'}\left(\overline{\boldsymbol{I}}k_0^2+\nabla\nabla\right)\cdot\overline{\boldsymbol{G_m^I}}\cdot\left(\hat{z}\times\boldsymbol{E_a}\right)dS_a'\right.$$
$$\left.+\frac{1}{j\omega\mu_0}\iint_{S_a'}\left(\overline{\boldsymbol{I}}k_0^2+\nabla\nabla\right)\cdot\overline{\boldsymbol{G_m^{II}}}\cdot\left(-\hat{z}\times\boldsymbol{E_a}\right)dS_a'\right]$$
$$=\hat{z}\times\left(\boldsymbol{H^i}+\boldsymbol{H^r}\right) \quad (2)$$

여기서, $\boldsymbol{H^i}$는 입사 자계이며, $\boldsymbol{H^r}$은 반사 자계이다. $\hat{z}$는 z방향의 단위 벡터이며, dS_a'는 개구면을 나타낸다. $k=\omega_0\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$는 자유공간의 파수, ω는 각 주파수를 나타낸다. 위첨자 I과 II는 각각 영역 I과 영역 II를 나타낸다. $\overline{\boldsymbol{I}}$는 단위 다이애딕, $\overline{\boldsymbol{G_m^I}}$과 $\overline{\boldsymbol{G_m^{II}}}$는 잘 알려져 있는 반무한 공간의 다이애딕 그린함수이다.

적분 방정식 (2)를 모멘트 법으로 해석하기 위해, 개구면 전계 분포를 다음과 같이 기지의 함수로 전개한다.

$$\boldsymbol{E_a}=\hat{x}\sum_{p=0}^{P}\sum_{q=1}^{Q}E_{xpq}\cos\frac{p\pi x}{a}\sin\frac{q\pi y}{b}$$
$$+\hat{y}\sum_{p=1}^{P}\sum_{q=0}^{Q}E_{ypq}\sin\frac{p\pi x}{a}\cos\frac{q\pi y}{b} \quad (3)$$

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

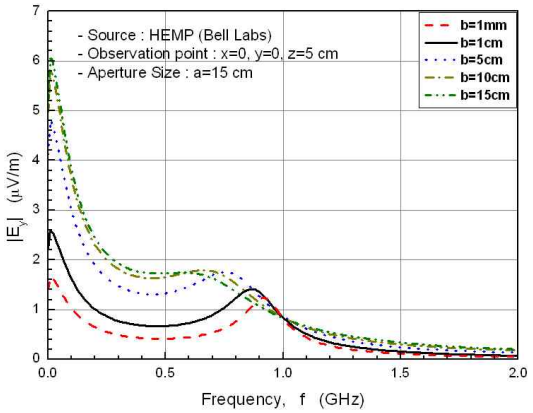
식 (3)을 적분 방정식 (2)에 대입하고 Galerkin의 모멘트 법을 적용하면 연립 일차 방정식으로 변환되며, 이로부터 미지의 전개 계수를 구하면 영역 II로 침투하는 침투 전계의 크기를 계산할 수 있다.

III. 수치 해석 결과 및 비교

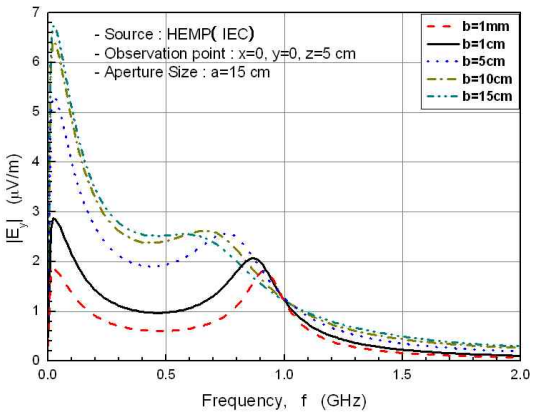
그림 4는 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9에서 제시하고 있는 HEMP 파원이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구를 통해 침투된 침투 전계의 주파수 특성을 나타내고 있다. 주파수 특성의 계산에는 시간 영역에서 표현되는 입사 파형의 식 (1)을 Fourier 변환하여 주파수 영역에서 표현된 입사 전계를 사용하였다.

계산에 사용한 개구의 길이는 a=15 cm로 고정하고, 개구의 폭은 b=1 mm, 1 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm로 변화시켰다. 관측점은 x=y=0, z=5 cm를 선택하였다.

그림 4에서 보는 것처럼, Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 입사 파형에 대한 침투 전계 특성은 비슷한 형태의 주파수 특성을 보인다. 개구의 폭 b가 커질수록 침투 전계가 커지며, 대략 0.4~0.45 λ에서 공진이 발생함을 알 수 있다. 또한 개구의 폭이 b=1 mm 및 1 cm일 때, 침투 전계의 크기를 비교하면 최대 침투 전계의 크기는 IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소의 기준보다 침투 전계가 46 % 정도 더 크다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 개구의 폭이 b=1 mm, 15 cm일 때, Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준에 대하여 낮은 주파수 대역(~200 MHz)에서 침투된 침투 전계의 주



(a) Bell laboratory



(b) IEC 61000-2-9

그림 4. 개구의 길이 b를 파라미터로 하였을 때, 침투 전계의 주파수 특성

Fig. 4. Frequency characteristics of penetrated electric fields as a parameter of slot length b.

파수 특성을 나타낸다. 그림 5에서 알 수 있는 것처럼, Bell 연구소 기준은 7 MHz에서, IEC 61000-2-9 기준은 25 MHz에서 가장 큰 침투 전계 특성을 나타낸다. 또한, 각각의 침투 전계가 가장 큰 주파수에서의 침투 전계의 크기를 비교하면 IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 약 10 % 정도 더 크다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 개구의 폭을 b=15 cm로 고정하고, 개구의 길이를 a=1 mm, 1 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm로 변화시켰을 때, 개구로 침투된 침투 전계의 주파수 특성을 나타낸다. 관측점은 앞에서 논의한 경우와 동일하게 x=y=0, z=5 cm를 선택하였다. 각각의 HEMP 파형의 최대 침투 전계를 기준으로 IEC 61000-2-9 기준

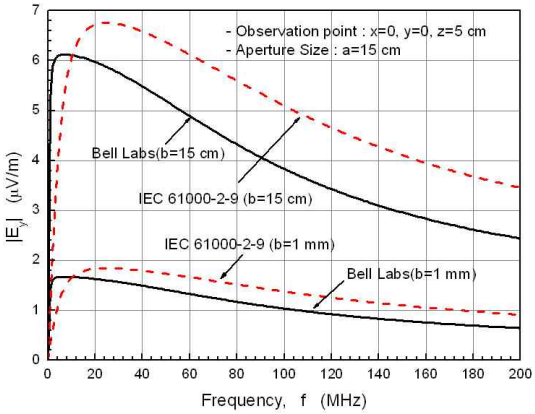


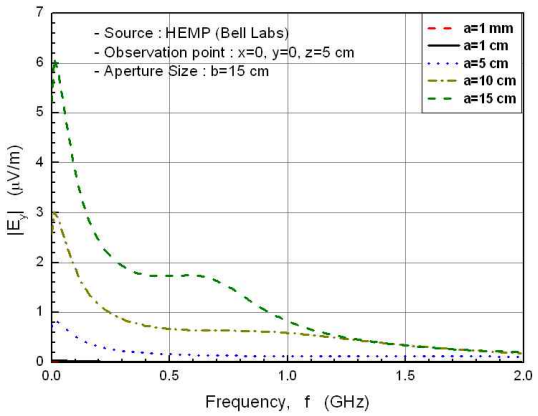
그림 5. 200 MHz 이하의 주파수 대역에서 침투전계의 주파수 특성

Fig. 5. Frequency characteristics of the penetrated electric fields frequencies bellow 200 MHz.

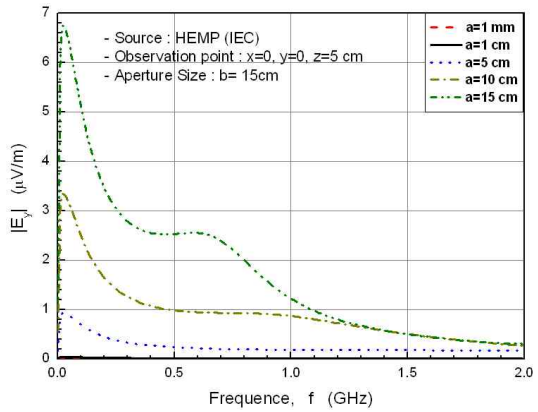
이 Bell 연구소의 기준보다 10 % 정도 침투 전계가 더 크다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 관측점 z=5 cm에서 주파수를 1 GHz, 개구면의 폭을 b=1 mm로 고정하였을 때, 개구면의 길이 a에 대한 침투 전계 특성을 나타낸다. 그림 7에서 보는 것처럼, Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준 모두 개구면 길이에 대한 침투 전계의 특성은 비슷하며, IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 전체적으로 46 % 정도 증가되어 나타남을 알 수 있다. 또한, a=68 cm(=2.2 λ)부근에서는 침투 전계가 가장 작다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 Bell 연구소 기준 파형과 IEC 61000-2-9 기준 파형 및 참고문헌 [5]의 파형이 각각 개구로 입사할 때, 개구를 침투하는 침투 전계의 주파수 특성을 비교한 것이다. 그림 8에서 알 수 있는 것처럼, 3가지의 HEMP 입사 파형에 대한 침투 전계의 주파수 특성은 그 형태가 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있으며, IEC 61000-2-9 기준 파형과 Bell 연구소 기준 파형에 대한 침투 전계의 크기는 거의 동일하지만, 참고문헌 [5]의 파형에 대한 침투 전계의 크기는 IEC 61000-2-9 기준 파형 및 Bell 연구소 기준 파형의 결과보다 작게 나타나고 있다. 참고문헌 [5]의 결과와 IEC 61000-2-9 및 Bell 연구소의 결과가 서로 다른 것은 입사 파형의 구체적인 파라미터의 차이로 인한 것이다. 입사 파형의 파라미터에 차이가 있음



(a) Bell laboratory



(b) IEC 61000-2-9

그림 6. 개구의 길이 a를 파라미터로 하였을 때, 침투 전계의 주파수 특성

Fig. 6. Frequency characteristics of penetrated electric fields as a parameter of the aperture length a.

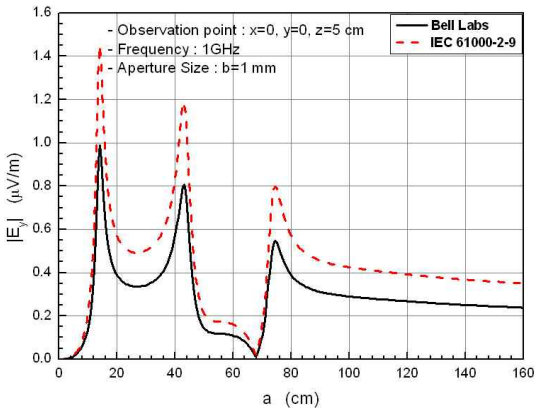


그림 7. 개구 길이 a에 따른 침투 전계

Fig. 7. Penetrated electric fields as a function of the aperture length a.

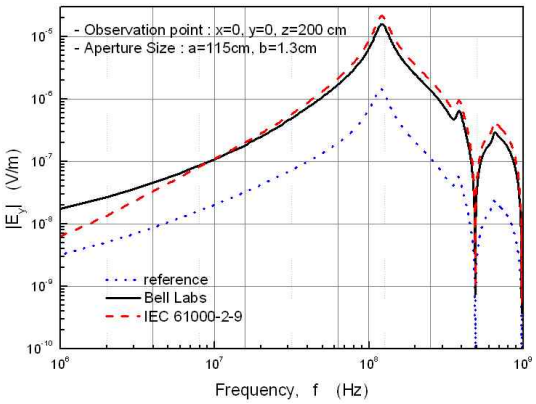


그림 8. 침투 전계의 주파수 특성 비교

Fig. 8. Comparison of frequency characteristics of the penetrated electric fields.

에도 불구하고 주파수 특성의 형태는 동일하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 계산에 사용한 개구의 크기는 참고문헌 [5]와 동일하게 a=113 cm, b=1.3 cm로 선택하고, 관측점은 x=0, y=0, z=200 cm로 하였다.

그림 8로부터 Bell 연구소의 기준이 IEC 61000-2-9 기준보다 낮은 주파수 대역을 제외하고, 침투 전계의 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 낮은 주파수 대역에서의 침투 전계의 차이는 시간 영역 파형에서의 초기치 차이에 의한 것으로 생각된다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 HEMP 파형에 관한 Bell 연구소와 IEC 61000-2-9 기준을 바탕으로 각각의 HEMP 파형이 무한 도체 평판의 개구에 입사할 때, 개구로 침투하는 침투 전계의 특성을 Galerkin의 모멘트 법으로 구하여 비교하였다. 이론 해석 결과, IEC 61000-2-9 기준이 Bell 연구소 기준보다 낮은 주파수 대역을 제외하고 침투 전계가 크지만, 침투 전계의 주파수 특성 경향은 거의 동일하다는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[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

[2] W. Radasky, "High-altitude electromagnetic pulse (HEMP): A threat to our way of life", *IEEE-USA Today's Engineer*, Sep. 2007. [Online]. Available: http://www.todaysengineer.org/2007/Sep/HEMP.asp

[3] Y. Rahmat-Samii, R. Mittra, "A new integral equation solution of electromagnetic aperture coupling and thin plate scattering problems", *AFWL Interaction hote 224*, Feb. 1975.

[4] C. D. Taylor, "Electromagnetic pulse penetration through small apertures", *IEEE Tran. on Electromagnetic Compa.*, vol. EMC-15, no. 1, pp. 17-26, Feb. 1973.

[5] 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, Jan. 1978.

[6] Young-Soon Lee, Jong-Kyu Lee, and Young-Ki Cho, "Efficient analysis of electromagnetic coupling problem via aperture into parallel plate waveguide and its application to Electromagnetic Pulse(EMP) coupling", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E85-C, no. 1, pp. 212-218, 2002.

[7] K. C. Kim, "Field penetration into a metallic wall with a narrow slot due to nearby dipole source", *IEICE Trans. Commun.*, vol. E92-B, no. 9, pp. 2987-2991, Sep. 2009.

[8] Xie Yan-zhao, Wang Zan-ji, Wang Qun-shu, and Zhou Hui, "Comparison of several HEMP waveform standards", *2004 Asia-Pacific*, pp. 516-518, Aug. 2004.

임 병 진

2008년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
2009년 3월～현재: 영남대학교 전기공학과 석사과정
[주 관심분야] EMC/EMC, EMP

조 병 두

2009년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
2009년 3월～현재: 영남대학교 전기공학과 석사과정
[주 관심분야] EMC/EMI

정 성 우

2002년 2월: 영남대학교 전기공학과 (공학사)
2006년 9월～2008년 8월: 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
2008년 9월～현재: 영남대학교 전기공학과 박사과정
[주 관심분야] EMC/EMI, EMP

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 후쿠오카공업대학 정보공학과 조교수
1995년 9월～현재: 영남대학교 전기공학과 교수
2009년 1월～현재: 한국전자파학회 부회장
1988년: IEICE Japan, Young Scientist Awards
1994년: IEE Japan, Paper Presentation Awards
[주 관심분야] 소형안테나, EMC/EMI 관련 안테나 및 측정시설, 전자파 이론 및 응용