THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 October; 37(10), 1024～1029.

https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2026.37.10.1024
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

# 합성곱 적분을 이용한 슬롯이 있는 도체판의 해석적인 시간영역 차폐효과

# Analytical Time-Domain Shielding Effectiveness of Conducting Plate with a Slot Using the Convolution Integral

박 현 호 · 권 종 화* · 형 창 희*

Hyun Ho Park · Jong Hwa Kwon* · Chang Hee Hyoung*

요 약

본 논문에서는 HEMP를 잘 모사하는 이중 지수 펄스가 슬롯이 있는 도체판에 입사될 때 합성곱 적분 기반 해석적인 방법으로 피크값 감소 시간영역 차폐효과($SE_{TD}$)를 계산하였다. 투과파와 시간영역 차폐효과를 검증하고자 CST Microwave Studio 수치해석 결과와 비교하였으며, 약 3 dB 내외의 오차 범위에서 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

In this study, the peak-reduction time-domain shielding effectiveness ($SE_{TD}$) was calculated using a convolution integral-based analytical method when a double-exponential pulse that closely simulates HEMP is incident on a conducting plate with a slot. To verify the analytically obtained transmitted wave and time-domain shielding effectiveness, the results were compared with those of numerical simulation results from CST Microwave Studio, showing good agreement within a margin of error of approximately 3 dB.

Key words: Convolution integral, shielding effectiveness, slot, time-domain

## Ⅰ. 서 론

최근 고고도 핵폭발로 발생하는 강력한 전자기 펄스(HEMP, high-altitude electromagnetic pulse)나 의도성 전자기 간섭(IEMI, intentional electromagnetic interference)에 대한 방호 연구가 중요해짐에 따라, 기존의 주파수영역 해석을 넘어선 시간영역 차폐효과($SE_{TD}$) 정의와 평가의 중요성이 커지고 있다. 특히 전자기기 함체에 존재하는 작은 개구면이나 슬롯(slot)은 외부 전자기파가 내부로 침투하는 주요 경로가 되므로, EMP와 같은 과도 응답 상황에서 이들의 차폐 성능을 정확히 분석하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 슬롯 구조에 이중 지수 함수(double exponential function) 형태의 EMP 파형이 입사될 때 시간영역 차폐효과를 분석하고자 한다.

「이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-02642985, 고출력 전자파 방호를 위한 식별·보호·감시 기술 개발).」

수원대학교 전기전자공학부(School of Electric & Electronic Engineering, The University of Suwon)

*한국전자통신연구원 전파연구본부(Radio Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received February 23, 2026 ; Revised March 3, 2026 ; Accepted March 31, 2026. (ID No. 20260223-008)

· Corresponding Author: Hyun Ho Park (e-mail: hhpark@suwon.ac.kr)

 ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

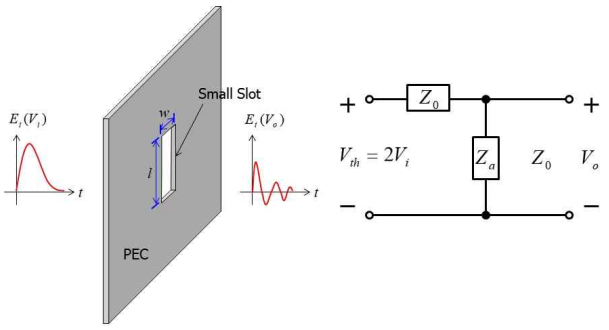
2014년 Celozzi 교수는 입사파의 피크(peak)값과 투과파의 피크값의 비를 피크값 감소(peak-value reduction) 시간영역 차폐효과로 정의하였는데[1], 이를 계산하기 위해서 유한적분법(finite integration technique) 기반의 상용 시뮬레이터인 MWS(CST Microwave Studio)와 같은 수치해석 방법을 이용하였다[2].

본 논문에서는 입사파와 슬롯 전달함수의 직접적인 합성곱 적분(convolution integral)을 수행하여 슬롯을 통과한 평균 투과파를 해석적인 방법으로 도출하였으며, 투과 위치에 상관없는 시간영역 차폐효과를 제시하고자 한다. 관련 문헌 조사에 따르면, 제안한 방식으로 슬롯을 통과한 투과파의 닫힌 해(closed-form solution)를 유도한 사례는 매우 드물다. 결과적으로 투과파와 시간영역 차폐효과($SE_{TD}$)를 명시적인 수식으로 표현함으로써 슬롯의 형상과 크기, 그리고 입사파 파라미터가 차폐 성능에 미치는 물리적 영향을 직관적으로 파악할 수 있다. 또한, 복잡한 수치해석 과정 없이 신속한 계산이 가능하므로 기존 방법에 비해 실질적인 설계 및 최적화 측면에서 높은 연산 효율성을 제공한다. 한편, 제안한 해석 모델(analytic model)의 타당성을 검증하기 위해 계산 결과를 CST MWS 수치해석 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 두 결과가 약 3 dB 내외의 오차 범위에서 잘 일치함을 확인하였다. 이는 본 연구가 실제 EMP 방호 설계 시 슬롯의 시간영역 차폐 성능을 신속하고 정확하게 예측하는 데 유용하게 활용될 수 있음을 보여준다.

## Ⅱ. 도체판 위 슬롯의 시간영역 차폐효과

그림 1(a)에서 보듯이 완전도체로 가정한 도체판에 좁은 폭과 긴 슬롯 형태의 개구면이 존재할 때 이중 지수 함수로 모델링된 외부 EMP가 입사할 경우 슬롯이 있는 평판의 주파수영역 전달함수($H(\omega)$)를 이용하여 시간영역 임펄스 응답($h(t)$)을 구하고 이중 지수 함수인 입사파와의 합성곱 적분을 통해 투과파를 계산하였다.

우선 주파수영역 전달함수를 계산하기 위해서 해석 구조를 등가회로로 모델링하였다. 슬롯이 있는 도체판은 유도성 임피던스로 등가할 수 있으므로 슬롯이 있는 도체판의 등가 임피던스를 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.




(a) (b)

그림 1. 슬롯이 있는 도체판에 입사 및 투과되는 펄스 (a)와 그 구조의 등가회로 모델 (b)

Fig. 1. Incident pulse on a conducting plate with a slot (a) and its equivalent circuit model (b).

$$Z_a = j\omega L_a, \tag{1}$$

여기서 $L_a$는 슬롯에 의해 증가된 인덕턴스를 나타낸다. 공기의 파동임피던스를 $Z_0$라 할 때, 평면파가 입사하는 슬롯이 있는 도체판은 그림 1(b)과 같이 등가회로로 모델링할 수 있다. 여기서 입사파가 도체판에 부딪히면 전반사가 일어나므로, 슬롯이 위치한 지점에서의 테브냉 등가전압($V_{th}$)은 입사 전압($V_i$)의 2배가 된다. 따라서 전압 분배 법칙을 이용하여 투과전압 $V_o$에 관한 식을 얻으면 식 (2)와 같다.

$$V_0 = \frac{Z_a \parallel Z_0}{Z_0 + Z_a \parallel Z_0} V_{th} = \frac{2Z_a}{Z_0 + 2Z_a} V_i. \tag{2}$$

이를 이용하여 주파수영역 전달함수를 구하면 식 (3)과 같다.

$$H(\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{2Z_a}{Z_0 + 2Z_a} = \frac{j\omega\tau_a}{1 + j\omega\tau_a}. \tag{3}$$

여기서 $\tau_a = 2L_a/Z_0$로 정의하고, 이는 슬롯의 시상수를 의미한다.

만약 $\omega\tau_a \ll 1$이면, 즉 입사파의 파장이 슬롯의 시상수보다 충분히 크면 저주파수 근사가 가능하며, 전달함수는 식 (4)와 같이 단순화된다.

$$H(\omega) \approx j\omega\tau_a. \tag{4}$$

슬롯이 입사파의 파장에 대해 충분히 작아 저주파수 근사가 가능해지면 $L_a$는 다음과 같이 슬롯의 폭 $w$와 자기 분극률(magnetic polarizability) $\alpha_m$으로 나타낼 수 있다.

$$L_a = \frac{\mu_0 \alpha_m}{l^2}. \tag{5}$$

직사각형 모양의 슬롯($w \times l$ [mm$^2$])인 경우, $\alpha_m$은 식 (6)과 같이 나타낸다[3].

$$\alpha_m = \frac{0.132 l^3}{\ln(1+0.66 l/w)}. \tag{6}$$

식 (4)로부터 시간영역 임펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \tau_a \frac{d\delta(t)}{dt}. \tag{7}$$

만약 입사 EMP를 이중 지수 함수 형태로 나타내면,

$$e_i(t) = E_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{8}$$

이다. 여기서 $E_0$는 진폭(최대 진폭 아님), $\alpha$는 하강 계수, 그리고 $\beta$는 상승 계수라 한다. 따라서 슬롯을 투과한 전기장을 시간영역에서 합성곱(convolution) 적분을 이용하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e_t(t) &= e_i(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e_i(t-\tau) h(\tau) d\tau \\ &= \tau_a \frac{de_i(t)}{dt} = E_0 \tau_a (\beta e^{-\beta t} - \alpha e^{-\alpha t}). \end{aligned} \tag{9}$$

결론적으로 제안한 시간영역 차폐효과는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SE_{TD} = 20\log_{10}\left(\frac{e_i^{\max}(t)}{e_t^{\max}(t)}\right). \tag{10}$$

여기서

$$e_t^{\max}(t=0) = E_0 \tau_a (\beta - \alpha), \tag{11}$$

$$e_i^{\max}(t=t_{\max}) = E_0 \left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{-\alpha/(\beta-\alpha)} \left(1 - \frac{\alpha}{\beta}\right), \tag{12}$$

$$t_{\max} = \ln\left(\frac{\beta}{\alpha}\right) / (\beta - \alpha) \tag{13}$$

이다.

결과적으로 식 (11) 및 식 (12)를 식 (10)에 대입하여 피크값 감소 시간영역 차폐효과를 해석적으로 나타내면,

$$SE_{TD} = 20\log_{10}\left[\frac{1}{\beta \tau_a}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)^{-\alpha/(\beta-\alpha)}\right] \tag{14}$$

이다.

식 (14)를 이용하면 EMP가 이중 지수 펄스로 입사할 때 시간영역 차폐효과를 해석적으로 계산할 수 있다. 더 나아가 다른 형태의 함수를 가지는 입사파의 경우에도 위와 동일한 방법으로 시간영역 차폐효과를 해석적으로 계산할 수 있다.

본 논문에서 정의한 시간영역 차폐효과인 식 (10)은 Celozzi 교수가 정의한 피크값 감소 시간영역 차폐효과[1]와 비슷한 형태이지만 차폐효과를 계산하는 위치(관측 지점)의 함수가 아니라는 점이 다르다. 다시 말해 Celozzi 교수가 정의한 피크값 감소 시간영역 차폐효과도 주파수 영역의 차폐효과와 동일하게 차폐효과를 계산하는 위치(관측 지점)에 의존하는 지역적인 값(local value)이다. 하지만 식 (10)에서 제안한 시간영역 차폐효과는 슬롯 표면 직후에 형성되는 슬롯 면적평균 투과 전기장과 입사 펄스의 최댓값의 비율로 정의한 광역적인 값(global value)이며, 투과 영역에서의 가장 낮은 차폐 성능(worst case) 지표로 생각할 수 있다.

## Ⅲ. 분석 결과 및 검증

식 (14)에서 나타낸 이중 지수 펄스 입사 시 슬롯에 의한 피크값 감소 시간영역 차폐효과는 $\tau_a$, $\alpha$, 그리고 $\beta$의 함수이다. 여기서 $\tau_a$는 슬롯의 크기 ($w \times l$)에 의해서 결정되는 값인 반면 $\alpha$와 $\beta$는 입사하는 EMP의 이중 지수 함수에 의해 결정된다. 주파수영역 차폐효과가 입사파에 상관없이 슬롯의 형상이나 크기에 의해 결정되었다면 시간영역 차폐효과는 슬롯의 형상과 크기뿐만 아니라 입사파의 형태에도 의존함을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 이 세 인자가 표 1과 같이 세 가지 level을 가질 때 시간영역 차폐효과에 미치는 영향을

분석하였다. 각 인자가 변화할 때 다른 두 인자는 level-2 값을 기준 값으로 가지며, 입사 펄스의 피크(최대)값은 level-2의 $\alpha$와 $\beta$값에서 50 kV를 가진다고 가정하였다.

### 3-1 $\tau_a$의 영향

표 1에서 보면 슬롯의 면적이 클수록 $\tau_a$도 커짐을 알 수 있다. 표 2에서는 표 1에서 나타낸 세 가지 크기의 슬롯에 대해 식 (14)를 이용한 시간영역 차폐효과를 계산하여 비교하였다. 앞서 설명했듯이 피크값 감소 시간영역 차폐효과는 시간에 관계없이 입사파의 피크(최대)값과 투과파의 피크(최대)값의 비를 dB 값으로 나타낸 것이다. 표 2에서 이들은 약 30 dB에서 50 dB의 값을 가지며, 슬롯의 면적이 클수록 시간영역 차폐효과도 감소한다. 이는 주파수영역의 차폐효과와 동일한 특성임을 알 수 있다. level-1에 비해 level-3는 슬롯의 면적이 100배 증가한 것이며(폭과 길이가 각 10배씩 증가), 이럴 경우 $\tau_a$는 10배 증가하게 되고, 식 (14)에 의해 $SE_{TD}$는 20 dB 감소한다.

식 (14)를 이용하여 계산한 해석적인 결과를 검증하기 위해, CST MWS를 이용하여 표 1에 제시된 각 level에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 시 입사파는 이중 지수 함수 형태의 평면파로 설정하였으며, 슬롯의 폭($w$) 방향으로 전기장이, 길이($l$) 방향으로 자기장이 입사되도록 waveguide port를 구성하였다. 또한 평면파 조건을 유지하기 위해, 슬롯이 포함된 유한 크기의 정사각형 도체판 경계면에서 입사 전기장에 수직인 두 면은 E-wall로, 자기장에 수직인 두 면은 H-wall로 설정하였다. 표 2를 보면 식 (14)를 통해 얻은 결과와 수치해석 결과를 비교하였으며, level-1과 같이 작은 슬롯인 경우 0.4 dB 의 오차를 보이지만 슬롯이 커지면 오차가 증가함을 알 수 있다. level-2를 기준으로 보면 약 3 dB 이내의 오차가 발생함을 알 수 있다.

표 1. 분석에 사용된 인자들의 값
Table 1. Values of the parameters used in the analysis.

| Parameters | $w\times l$ (mm$^2$) | $\tau_a$ ($s$) | $\alpha$ ($s^{-1}$) | $\beta$ ($s^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| Level-1 | $1\times10$ | $4.34\times10^{-12}$ | $1.3\times10^{7}$ | $2.0\times10^{8}$ |
| Level-2 | $1\times100$ | $2.09\times10^{-11}$ | $4.0\times10^{7}$ | $6.0\times10^{8}$ |
| Level-3 | $10\times100$ | $4.34\times10^{-11}$ | $1.2\times10^{8}$ | $1.8\times10^{9}$ |

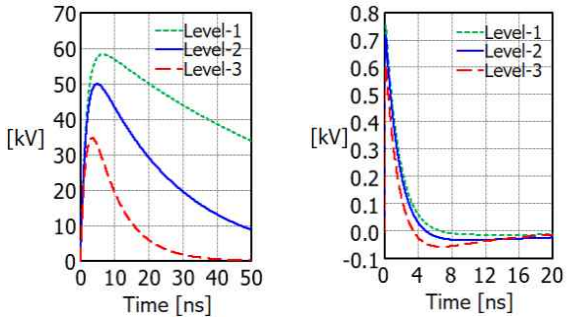
표 2. $\tau_a$에 따른 시간영역 차폐효과 ($\alpha$=$4.0\times10^{7}s^{-1}$, $\beta$=$6.0\times10^{8}s^{-1}$)
Table 2. Variation of time-domain shielding effectiveness with $\tau_a$($\alpha$=$4\times10^{7}s^{-1}$, $\beta$=$6\times10^{8}s^{-1}$).

| Levels | $w\times l$ (mm$^2$) | $\tau_a$ ($s$) | $SE_{TD}$ (dB) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Eq. (14) | CST |
| 1 | $1\times10$ | $4.34\times10^{-12}$ | 50.01 | 49.61 |
| 2 | $1\times100$ | $2.09\times10^{-11}$ | 36.34 | 33.51 |
| 3 | $10\times100$ | $4.34\times10^{-11}$ | 30.01 | 26.79 |

### 3-2 $\alpha$의 영향

그림 2에서는 $\alpha$가 표 1에서 나타낸 것과 같이 세 Level에 따른 입사 전기장과 슬롯($w\times l$=$1\times100$ mm$^2$)을 통과한 투과 전기장을 보여준다. 이중 지수 함수에서 $\alpha$는 펄스의 하강 시간을 결정한다. $\alpha$가 작으면 하강 시간은 증가하고, $\alpha$가 크면 하강 시간은 감소한다. level-1의 경우에는 $\alpha$가 작아서 입사 전기장의 피크값이 50 kV보다 크며, level-3에서는 $\alpha$가 커서 입사 전기장의 피크값이 35 kV 정도밖에 안 된다.

표 3은 $\alpha$에 따른 시간영역 차폐효과를 비교하였다. 세 경우에 대한 차폐효과의 변동은 $\tau_a$에 비해 크지 않지만 $\alpha$가 클수록 차폐효과가 감소함을 알 수 있다. 즉 EMP가 짧은 하강 시간을 가질수록 시간영역 차폐효과는 감소한다. CST를 이용한 수치해석 결과와 비교해 보면, 식 (14)를 통해 얻은 결과가 수치해석 결과와 비교하면 3 dB 이내의 오차를 가짐을 알 수 있다.




(a) $e_i(t)$ (b) $e_t(t)$

그림 2. $\alpha$에 따른 입사 (a) 및 투과 (b) 전기장 펄스
Fig. 2. Incident (a) and transmitted (b) electric pulses.

표 3. $\alpha$에 따른 시간영역 차폐효과 ($\tau_a$=2.09×10$^{-11}$ $s$, $\beta$=6.0×10$^8$ $s^{-1}$)
Table 3. Variation of time-domain shielding effectiveness with $\alpha$($\tau_a$=2.62×10$^{-11}$ $s$, $\beta$=6×10$^8$ $s^{-1}$).

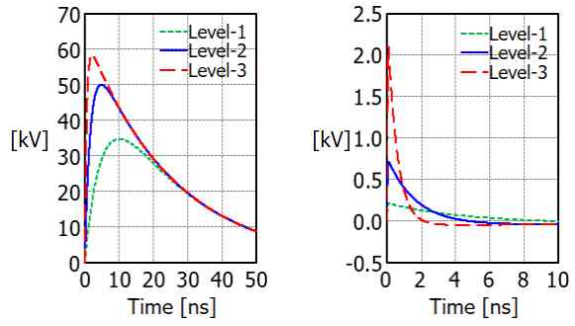
| Levels | $w\times l$ (mm$^2$) | $\alpha$ ($s^{-1}$) | $SE_{TD}$ (dB) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Eq. (14) | CST |
| 1 | 1×100 | 1.3×10$^7$ | 37.29 | 34.46 |
| 2 | 1×100 | 4.0×10$^7$ | 36.34 | 33.56 |
| 3 | 1×100 | 1.2×10$^8$ | 34.53 | 31.86 |

### 3-3 $\beta$의 영향

그림 3에서는 $\beta$가 표 1에서 나타낸 것과 같이 세 Level에 따른 입사 전기장과 슬롯($w\times l$=1×100 mm$^2$)을 통과한 투과 전기장을 보여준다. 이중 지수 함수에서 $\beta$는 펄스의 상승 시간을 결정한다. $\beta$가 작으면 상승 시간은 증가하고, $\beta$가 크면 상승 시간은 감소한다. Level-1의 경우에는 $\beta$가 작아서 상승 시간이 증가하여 입사 전기장의 피크값이 35 kV 정도 밖에 안 되는 반면, level-3에서는 $\beta$가 커서 입사 전기장의 피크값이 60 kV만큼 커진다.

표 4에서는 $\beta$에 따른 시간영역 차폐효과를 비교하였다. 세 경우에 대한 차폐효과의 변동은 $\tau_a$에 비해 크며, $\beta$가 클수록 상승 시간이 작아져 차폐효과가 감소함을 알 수 있다. 수치해석 결과와 비교하면, 식 (14)를 통해 얻은 결과가 3 dB 정도의 오차를 가졌다.

식 (14)는 $\omega\tau_a \ll 1$ 조건하에서 유도되었는데, 이중 지수 함수의 경우 상한 주파수(상승 속도)를 결정하는 인자




(a) $e_i(t)$ (b) $e_t(t)$

그림 3. $\beta$에 따른 입사 (a) 및 투과 (b) 전기장 펄스
Fig. 3. Incident (a) and transmitted (b) electric pulses.

표 4. $\beta$에 따른 시간영역 차폐효과 ($\tau_a$=2.09×10$^{-11}$ $s$, $\alpha$=4×10$^7$ $s^{-1}$)
Table 4. Variation of time-domain shielding effectiveness with $\beta$($\tau_a$=2.62×10$^{-11}$ $s$, $\alpha$=4×10$^7$ $s^{-1}$).

| Levels | $w\times l$ (mm$^2$) | $\beta$ ($s^{-1}$) | $SE_{TD}$ (dB) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Eq. (14) | CST |
| 1 | 1×100 | 2.0×10$^8$ | 44.07 | 40.75 |
| 2 | 1×100 | 6.0×10$^8$ | 36.34 | 33.58 |
| 3 | 1×100 | 1.8×10$^9$ | 27.73 | 25.17 |

가 $\beta$이므로, 이는 $\beta\tau_a \ll 1$임을 의미한다. 표 4의 결과를 보면, 입사파의 상승 속도가 변화하는 세 level 조건에서 수치해석 결과와의 오차가 약 2.5~3.3 dB 수준으로 나타난다. 이는 복잡한 수치해석 시뮬레이션 없이 슬롯의 물리적 치수와 입사파 파라미터만으로 시간영역 차폐 성능을 신속하게 도출할 수 있다는 점을 고려할 때, 실무적인 방호 설계나 경향성 평가와 같은 엔지니어링 관점에서 충분히 유효한 수준의 일치도를 제공함을 보여준다. 특히 본 논문에서 제시한 해석 모델은 $\beta\tau_a < 0.04$ 범위를 만족하는 일반적인 HEMP 입사 파형 환경에서 슬롯의 초기 차폐 성능을 신속히 예측하는 간이 평가 도구로 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

마지막으로 이중 지수 함수로 입사하는 전기장의 인자인 $\alpha$와 $\beta$가 시간영역 차폐효과에 영향을 주는 정도를 비교하면 $\alpha$보다 $\beta$가 더 큼을 알 수 있고, 이는 EMP의 하강 시간보다 상승 시간이 시간영역 차폐효과에 더 큰 영향을 주다는 것을 의미한다. 이러한 사실은 해석적으로 유도된 시간영역 차폐효과 식 (14)를 통해서도 알 수 있다.

## Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 합성곱 적분을 이용하여 이중 지수 함수 형태를 갖는 HEMP 입사파에 대한 슬롯이 있는 도체판의 시간영역 차폐효과를 해석적으로 도출하였다. 특히 슬롯의 시상수($\tau_a$)가 펄스의 상승 시간보다 매우 작은 실제적인 환경에서 저주파수 근사 모델이 유용함을 확인하였다. 또한 수치해석 결과와 비교하여 약 3 dB 정도의 오차를 보였다.

시간영역 차폐효과에 영향을 주는 인자들을 다시 정리하면 다음과 같다. $\tau_a$는 슬롯의 인덕턴스($L_a$)와 자유 공간

임피던스($Z_0$)의 비이다. 슬롯이 커질수록 인덕턴스 $L_a$가 커지고 따라서 $\tau_a$가 증가하게 된다. 식 (14)에서 $\tau_a$는 분모에 위치하므로 슬롯의 물리적 크기가 커질수록 차폐효과는 감소하게 됨을 알 수 있다. $\beta$는 펄스의 상승 속도를 결정한다. $\beta$가 클수록(상승 시간이 짧을수록) 분모가 커져 전체 로그 안의 값은 작아지며, 결과적으로 시간영역 차폐효과 값은 감소하게 된다. 다시 말해 차폐 구조는 천천히 변하는 신호보다 빠르게 변하는 과도 신호(fast transient)에 대해 훨씬 취약함을 알 수 있다. 마지막으로 $\alpha$의 영향을 살펴보면, $\alpha$가 커질수록 (펄스 폭이 좁아질수록) 시간영역 차폐효과는 감소하게 되는데 이는 시간영역 차폐효과가 단순히 입사파의 빠르기($\beta$)뿐만 아니라 입사파의 전체적인 형태($\alpha$와의 비율)에도 의존함을 의미한다. 또한 제안한 시간영역 차폐효과의 해석 해는 차폐성능이 슬롯의 시상수($\tau_a$)와 입사파의 상승 계수($\beta$)의 곱에 지배적으로 의존함을 명시적으로 보여준다. 특히 시간영역 차폐효과와 $\beta\tau_a$항의 반비례 관계는 고속과도 응답 제어에 있어 슬롯 설계의 임계 조건을 설정하는 정량적 척도로 활용될 수 있다.

결과적으로 본 연구 결과를 이용하면 고속과도 전자기 펄스에 대한 차폐 설계 및 성능 예측을 위해 간단하고 효과적인 가이드라인을 얻을 수 있다.

## References


[1] S. Celozzi, R. Araneo, "Alternative definitions for the time-domain shielding effectiveness of enclosures," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 2, pp. 482-485, Apr. 2014.

[2] CST Microwave Studio (MWS), "Dassault Systemes," 2026. Available: https://www.3ds.com

[3] N. A. McDonald, "Simple approximations for the longitudinal magnetic polarizabilities of some small apertures," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 36, no. 7, pp. 1141-1144, Jul. 1988.



박 현 호 [수원대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0001-8518-1151



1999년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)

1999년 8월: 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원

2006년 6월: 삼성전자 글로벌기술센터 수석연구원

2012년 9월～현재: 수원대학교 전기전자공학부 교수

[주 관심분야] EMI/EMC 대책 기술, 전자파 차폐 기술, 전자파 해석 기술, SI/PI 설계 기술

권 종 화 [한국전자통신연구원/책임연구원]

https://orcid.org/0000-0002-2132-7403



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학 (공학박사)

2017년～2018년: 한국전자파학회 EMC기술연구회 위원장

2021년 9월～2022년 8월: Missouri Univ. of Science & Technology 방문연구원

2023년～2024년: 한국전자파학회 전자파보안연구회 위원장

1999년 1월～현재: 한국전자통신연구원 전파연구본부 책임연구원

[주 관심분야] SI/PI 및 EMC 대책 기술 및 표준화, 고출력 전자파 펄스 방호대책 및 측정・평가 기술

형 창 희 [한국전자통신연구원/책임연구원]

https://orcid.org/0000-0002-9012-2217



1996년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

1998년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)

2013년 2월: 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)

1999년 3월～현재: 한국전자통신연구원 전파연구본부 책임연구원

[주 관심분야] 고출력 전자파 측정・평가 기술, 아날로그 및 RF 회로 설계, 에너지 하베스팅, 인체 영역 통신 시스템