

유전체로 막힌 사각 개구를 갖는 함체의 차폐 효과 해석

Analysis for Shielding Effectiveness of an Enclosure with a Dielectric-Backed Rectangular Aperture

김수한 · 이재현

Su-Han Kim · Jae-Hyun Lee

요약

본 논문은 유전체로 막힌 개구를 갖는 함체의 차폐 효과(SE)를 계산하는 해석적 방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존의 방법으로 해석할 수 없는 유전체로 막힌 개구를 갖는 함체의 SE 해석이 가능하다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 기존에 제시된 방법과 상용 프로그램의 SE 해석 결과를 비교 검증하였다. 제안된 방법을 이용하여 덮개 유전체의 유전율과 두께 변화, 함체 내 관측점 위치 변화, 개구의 폭과 높이 변화에 대한 SE 변화를 계산하였다.

Abstract

A new analytical method is presented for the shielding effectiveness(SE) of an enclosure with a dielectric-backed aperture. The previously proposed methods cannot consider the effect of the dielectric on the aperture. The comparisons among our method, previous method, and commercial programs give good correspondence. The method is used to calculate SE with varying permittivity and thickness of dielectric sheet, probe position, width and height of aperture.

Key words : Shielding Effectiveness, Dielectric-Backed Aperture, Enclosure, Enclosure Resonance, Slotline

I. 서론

함체(enclosure)를 이용한 전자기장 차폐(shielding)는 전자회로의 내성(immunity) 또는 방사(emission)를 감소시키기 위하여 사용되는 기법이다.

신호 전달과 공기 순환을 위한 의도적 개구와 이음부와 접합부에서 발생하는 비의도적 개구가 함체, 즉 전자장치의 케이스에 존재한다. 이러한 개구를 통하여 전자파가 침투하게 된다. 또한, 전자 부품과 장비의 고속 디지털화 기술 발전 추세에 따라 전자파 차폐용 함체 개구의 고주파 특성에 대한 이해가 중요해지고 있다. 침투된 전자파는 함체의 전자파 차폐 효과를 감소시키고, 전자파 간섭(EMI: Electro-Magnetic Interference)을 발생시킨다. 따라서, 차폐 효

과를 증대시켜 전자파 간섭을 최소화 시킬 수 있는 함체 구조에 대한 이해가 필요하다.

함체 차폐 성능을 나타내기 위하여 차폐 효과(SE: Shielding Effectiveness)를 이용하며, 이는 함체 내 임의의 지점에서의 전계 또는 자계의 세기를 함체가 있을 때와 없을 때의 비로 정의한 값이다.

단순 개구를 갖는 속이 빈 함체의 SE 해석 방법을 Robinson이 제안하였다^{[1],[2]}. 이때, 함체를 끝이 단락된 구형 도파관으로 사각 개구를 양 끝이 단락된 전송 선로로 가정하였다.

하지만, 최근 들어 함체의 개구 형태가 단순한 열 방출을 위한 형태로만 제작되지 않고, 전자 장비의 표시창이나 휴대전화의 전원 케이블 연결부와 같이 유전체로 막힌 개구로 모델링할 수 있는 구조들이

「이 연구는 지식경제부 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(ITA-2008-(C1090-0801-0034).」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

· 논문 번호 : 20081020-130

· 수정완료일자 : 2009년 1월 5일

많이 사용되고 있다. 이러한 구조를 Robinson이 제안한 방법으로는 합체 SE를 해석할 수 없다.

따라서, 본 논문에서는 유전체로 막혀 있는 개구를 슬롯 라인으로 고려하는 합체 SE 해석 방법을 제안한다.

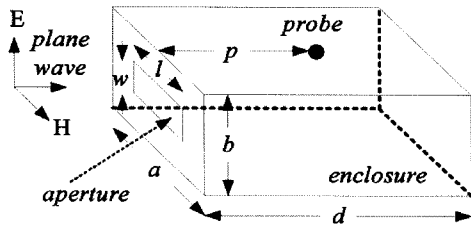
II. 이론

2-1 개구만을 갖는 합체에 대한 해석

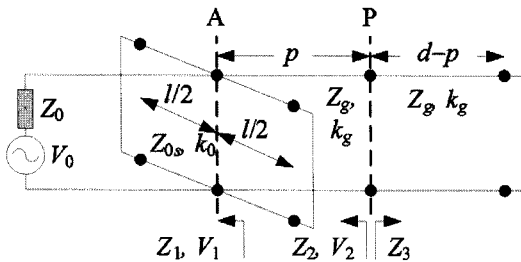
평면파가 입사되는 합체의 구조와 그 구조를 전송선로로 등가화한 회로는 그림 1과 같다. 개구 폭 w 와 길이 $l/2$ 을 갖는 양 끝이 단락된 두 개의 전송선로가 병렬로 연결된 것으로 가정할 수 있다^[1]. 개구의 유효 폭(effective width) w_e 는 다음과 같다.

$$w_e = w - \frac{5t}{4\pi} \left[1 + \ln \left(\frac{4\pi w}{t} \right) \right] \quad (1)$$

t 는 합체 벽 두께이며, $w_e < b/\sqrt{2}$ 이면 개구의 특성



(a) 합체 구조
(a) Enclosure structure



(b) 등가회로
(b) Equivalent circuit

그림 1. 개구가 있는 합체와 등가회로
Fig. 1. Enclosure with rectangular aperture and its equivalent circuit.

임피던스 Z_{0s} 는 다음과 같다^[3].

$$Z_{0s} = \frac{120\pi^2}{\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{1 - (w_e/b)^2}}{1 - \sqrt{1 - (w_e/b)^2}} \right)} \quad (2)$$

따라서, 개구에서의 임피던스 Z_{ap} 는 다음과 같다.

$$Z_{ap} = \frac{1}{2} \frac{l}{a} jZ_{0s} \tan \frac{k_0 l}{2} \quad (3)$$

k_0 는 개구에서의 전파상수로 $2\pi/\lambda$ 이다. 그림 1(b)에서 외부 소스 V_0 에 의하여 개구에 인가되는 전압 V_1 과 기준면 A에서의 임피던스 Z_1 은 다음과 같다.

$$V_1 = V_0 \frac{Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \quad (4)$$

$$Z_1 = \frac{Z_0 Z_{ap}}{Z_0 + Z_{ap}} \quad (5)$$

V_0 는 합체 외부로부터 입사되는 평면파를 등가화한 전압이고, Z_0 는 공기 중의 파동 임피던스로 377 Ω 이다.

한편, 장변 길이가 a 이고, 단변 길이가 b 인 구형도파관에서 기본 모드인 TE_{10} 만이 존재한다고 가정할 때, 특성 임피던스 Z_g 와 전파상수 k_g 는 다음과 같다^{[4],[5]}.

$$Z_g = \frac{Z_0}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}} \quad (6)$$

$$k_g = k_0 \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2} \quad (7)$$

관찰위치(P)에서의 전압 V_2 와 임피던스 Z_2 는

$$V_2 = \frac{V_1}{\cos k_g p + j(Z_1 + Z_g) \sin k_g p} \quad (8)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1 + jZ_g \tan k_g p}{1 + j(Z_1/Z_g) \tan k_g p} \quad (9)$$

이다.

관찰위치에서 단락된 합체를 들여다 본 임피던스 Z_3 와 전압 V_p 는 다음과 같다.

$$Z_3 = jZ_g \tan k_g (d - p) \quad (10)$$

$$V_p = V_2 \frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (11)$$

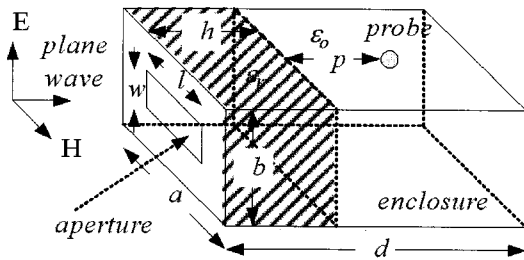
함체가 없다고 가정하면 관찰 위치에서의 임피던스도 Z_0 가 되어 관찰 위치의 전압은 $V_0/2$ 가 된다. 이를 이용하여 차폐 효과를 계산하면 식 (12)와 같다.

$$SE = 20 \log \left| \frac{V_0}{2V_p} \right| \quad (12)$$

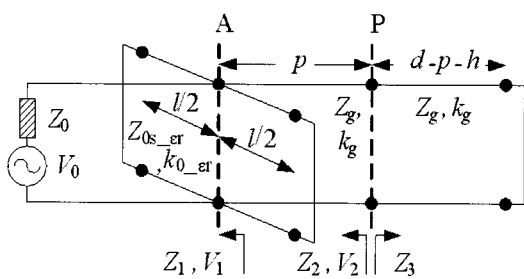
2.2 유전체로 막혀있는 개구를 갖는 함체에 대한 해석

평면파가 입사되는 경우, 유전체로 막혀 있는 개구를 갖는 함체 구조와 전송 선로 등가 회로는 그림 2와 같다.

개구 뒷면에 유전체가 위치한 경우를 양 끝이 단락된 개구 길이만큼의 슬롯 라인으로 볼 수 있다. 이때 슬롯 라인의 전체 폭은 함체 높이 b 와 동일하며, 슬롯 폭은 개구 폭인 w 와 동일하다고 가정한다.



(a) 함체 구조
(a) Enclosure structure



(b) 등가회로
(b) Equivalent circuit

그림 2. 유전체로 막힌 개구가 있는 함체와 등가회로
Fig. 2. Enclosure with a dielectric-backed aperture and its equivalent circuit.

유전체에 의한 슬롯 임피던스를 포함하는 개구 임피던스 Z_{ap} 를 등가회로 A면에서 나타내면, 슬롯 라인의 임피던스 Z_{0s_er} 는 다음과 같다^[6].

$$Z_{0s_er} = \eta \frac{v}{v_g} \frac{\pi}{D} \frac{\Delta D}{\Delta \eta B_r} \quad (13)$$

B_r 는 슬롯 면의 전체 서셉턴스(susceptance)를 나타내는 것으로 식 (14)와 같다.

$$B_r = \frac{a}{2b} \left[-q + u \tan \left\{ \frac{\pi hu}{aD} - \tan^{-1} \left(\frac{q}{u} \right) \right\} \right] + \frac{1}{D} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} - D^2 \right) \ln \frac{2}{\pi \delta} \quad (14)$$

$\eta + \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 377 \Omega$ 이며, $\delta = w/b$, $u = \sqrt{\epsilon_r - D^2}$, $q = \sqrt{D^2 - 1}$, v 는 위상속도, $v_g = d\omega/d\beta$ 는 군 속도이다. $\omega = 2\pi f$ 와 $D = \lambda/\lambda_s$ 이고, $\lambda_s = \lambda\sqrt{2/(\epsilon_r + 1)}$ 는 슬롯 면의 파장이다. 식 (14)는 $\delta = w/b \leq 0.15$, $w < \lambda/(4\sqrt{\epsilon_r})$, $w \leq d$ 인 조건에서 유효하다^[3].

식 (13)에서 위상 속도와 군 속도의 비 v/v_g 는 다음과 같다.

$$\frac{v}{v_g} = 1 - \frac{f}{\lambda_s/\lambda} \frac{\Delta(\lambda_s/\lambda)}{\Delta f} \quad (15)$$

$\alpha = \lambda_s/2$ 값의 미세한 변화를 통해 Δf 와 $\Delta(\lambda_s/\lambda)$ 를 찾아 식 (15)를 구할 수 있다^[6]. 이때 f 는 Δf 의 중심 값이다.

식 (13)에서 ηB_r 를 D 로 미분하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{\Delta \eta B_r}{\Delta D} = \frac{a}{2b} \left[-q' + u' \cdot \tan \left(\frac{\pi hu}{aD} - \tan^{-1} \frac{q}{u} \right) \right] + u \cdot \tan' \left(\frac{\pi hu}{aD} - \tan^{-1} \frac{q}{u} \right) + \left\{ \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2D} - D \right) \ln \frac{2}{\pi \delta} \right\}' \quad (16)$$

q 와 u 의 미분 결과는

$$q' = \frac{dq}{dD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2D}{\sqrt{D^2 - 1}} = \frac{D}{\sqrt{D^2 - 1}} \quad (17)$$

$$u' = \frac{du}{dD} = \frac{1}{2} \cdot \frac{-2D}{\sqrt{\epsilon_r - D^2}} = \frac{-D}{\sqrt{\epsilon_r - D^2}} \quad (18)$$

이다.

위 식 (15)~(18)을 이용하여 식 (13)을 정의하면 유전체로 막힌 개구의 특성 임피던스를 찾을 수 있다.

계산된 개구의 특성 임피던스를 이용하여 식 (3)~(12)의 방법으로 수식을 전개하면 유전체로 막힌 개구를 갖는 합체의 SE를 계산할 수 있다^{[7],[8]}.

III. 시뮬레이션 결과

유전체로 막힌 개구를 갖는 합체 SE 해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 단순 개구를 갖는 합체 SE 해석 결과와 유전체 판을 갖는 합체 SE 해석 결과를 비교한 것을 그림 3에 나타내었다. 이를 위하여 유전체의 비유전율을 1로 하여야 하나, 이 경우 식 (17)과 식 (18)이 정의될 수 없다. 따라서, 비유전율을 1에 가장 근접한 값으로 선택한다. 기준은 주어진 유전체 두께에서 $Z_{0s_εr}$ 이 Z_{0s} 와 가장 가깝게 되도록 비유전율을 결정한다. 표 1의 분석 결과를 통하여 비유전율을 1.03으로 하였다.

해석을 위하여 합체 크기를 $a=222$ mm, $b=55$ mm, $d=146$ mm로 하고, 합체벽 두께 t 를 1 mm, 개구 크기는 $l=100$ mm, $w=4$ mm로 하였다. 관측 위치가 73 mm인 곳에서의 SE 비교 결과가 Robinson이 제안한 방법^[2]에 의하여 계산된 값과 동일함을 알 수 있다. 그림 3에 $SE < 0$ 이 되는 두 개의 공진점이 나타난다. 입사된 에너지보다 큰 에너지가 합체 공진에 의하여 합체 내부에 발생되기 때문에, SE가 음수가 된다. 이들 공진주파수를 이론값과 비교하여 표 2에 나타내었다. 이론값은 개구가 없는 직육면체 합체의 공진주파수이다. 개구를 통하여 전자파가 누설되기 때문에 개구가 있는 합체의 공진 길이가 길게 되어 공진주파수가 약간 낮아짐을 알 수 있다.

그림 4는 본 논문의 방법과 상용 프로그램인 MWS

표 1. 변화에 따른 개구 임피던스

Table 1. Aperture impedance with varying $ε_r$.

Z_{0s}	$ε_r$ 변화	$Z_{0s_εr}$
126.57 [Ω]	1.001	17.73 [Ω]
	1.01	63.78 [Ω]
	1.02	98.13 [Ω]
	1.03	128.75 [Ω]

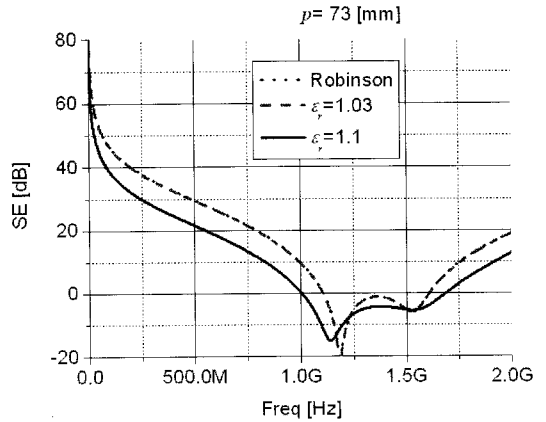


그림 3. $ε_r$ 변화에 따른 특성

Fig. 3. Characteristics with varying $ε_r$.

표 2. 합체 공진주파수

Table 2. Resonant frequency of the enclosure.

Mode	이론값	수치해석 값
TE ₁₀₁	1.23 [GHz]	1.16 [GHz]
TE ₂₀₁	1.70 [GHz]	1.55 [GHz]

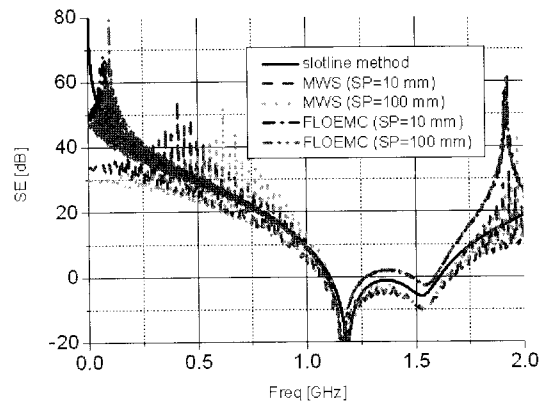


그림 4. 상용 프로그램과 제안방법의 SE 비교($ε_r=1.03$)

Fig. 4. Comparison results of SE between commercial programs and the proposed method($ε_r=1.03$).

(CST사)와 FLOEMC(Flomerics사)를 이용하여 계산한 결과를 비교하였다. 세 가지 경우의 결과가 매우 유사함을 알 수 있다. 특히, SE가 음수가 되는 주파수가 잘 일치함을 볼 수 있다. 하지만 상용 프로그램에 의한 해석 결과에서 리플이 많이 발생한 것을 볼 수 있

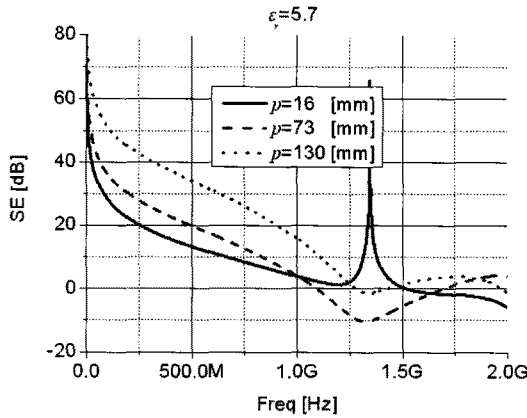


그림 5. 관측위치(P) 변화에 따른 SE($\epsilon_r=5.7$)
 Fig. 5. SE with varying the observation point(P)($\epsilon_r=5.7$).

다. 이는 상용 프로그램의 특성상 합체에 의한 다중 반사 때문에 발생된 결과이다. 상용 프로그램을 이용하여 SE를 계산하기 위하여, 본 논문에서는 합체 외부에 평면파 소스를 위치시키고, 개구로부터 73 mm 떨어진 합체 내부에서 SE를 계산하였다. 상용 프로그램에서 외부 소스의 위치 변화에 따른 SE 변화를 확인하기 위하여 소스와 개구 사이의 거리(SP)를 변화시켰다. 물리적으로 당연한 결과지만, 상용 프로그램의 결과가 SP 변화에 따라 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

유전체 덮개를 일반적인 LCD 패널로 가정하여 유전율을 5.7이라고 하면, 관측 위치(P) 변화에 따른 SE 변화는 그림 5와 같다. 관측 위치 16 mm인 경우 1.35 GHz에서 SE가 급격히 증가하는 현상이 나타난다. 이는 1.35 GHz가 관찰 위치에서 합체 종단면까지의 거리가 반파장이 되는 주파수이기 때문에 합체 내부 전계가 매우 작아져 SE가 증가하게 된 것이다. 또한, 관측 위치가 개구로부터 멀어질수록 SE가 증가하였다. 입사된 전계가 개구로부터 멀어질수록 감소되기 때문이다.

그림 3과 그림 5에서 관측 위치 73 mm 결과를 비교하면 유전체의 유전율이 증가함에 따라 공진의 선택도(Q: Quality Factor)가 낮아진다.

유전체 두께 h 를 변화시키며 SE를 계산한 결과를 그림 6에 나타내었다. h 가 커지면 합체 크기가 상대적으로 작아지기 때문에 공진 주파수도 높아진다.

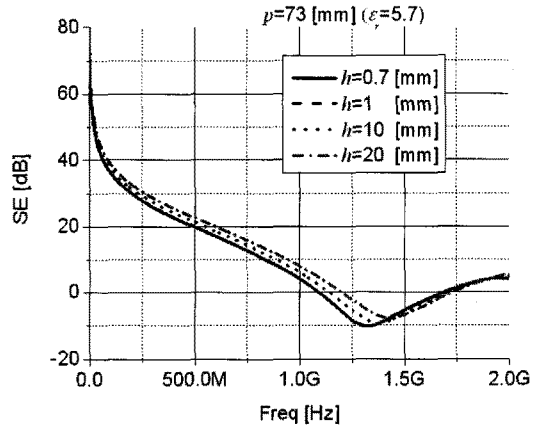


그림 6. 유전체 두께 h 변화에 따른 SE
 Fig. 6. SE with varying dielectric thickness(h).

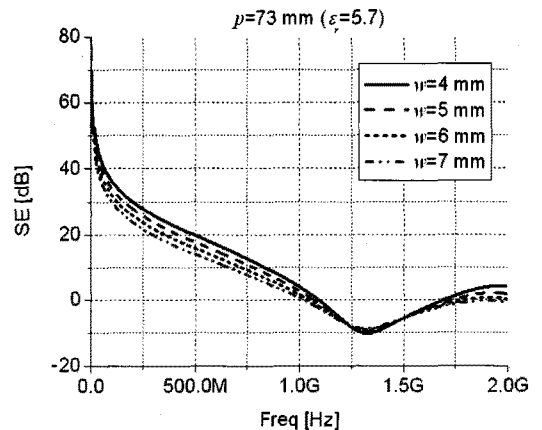


그림 7. w 변화에 따른 SE 비교
 Fig. 7. SE with varying the width of aperture (w).

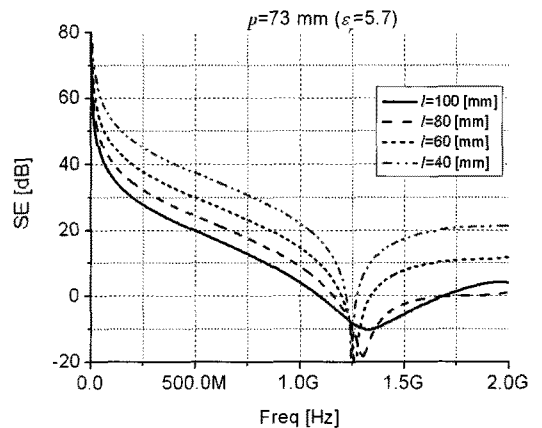


그림 8. l 변화에 따른 SE 비교
 Fig. 8. SE with varying the length of aperture(l).

함체 개구의 높이 w 변화에 따른 SE 변화를 그림 7에 나타내었다. 개구 길이 l 을 100 mm로 고정하고, w 를 4, 5, 6, 7 mm로 변화시켜 보았다. 전체적으로 w 가 커질수록 SE가 낮게 나타났다.

함체 개구 길이 l 의 변화에 따른 SE 변화는 그림 8과 같다. 개구 폭 w 는 4 mm로 고정하고, 길이 l 을 100, 80, 60, 40 mm로 변화시켰다. w 변화와 달리, 길이 l 변화에 따라 SE가 급격히 변화하였고, 길이 l 이 길어질수록 함체 SE가 낮아진다. 또한 길이 l 이 작아질수록 개구가 작아지면서 함체의 공진 특성이 표 2의 TE₁₀₁ 모드 이론값에 가까워지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문은 유전체로 막힌 개구를 해석하기 위하여 슬롯 라인 임피던스를 이용하는 새로운 방법을 제안하였다. 이는 Robinson이 제시한 단순 개구를 갖는 함체 SE 해석을 보다 일반적인 구조에 대한 해석으로 발전시킨 것이다. 제안된 방법을 이용하여 덮개 유전체의 유전율과 두께 변화, 함체 내 관측점 위치 변화, 개구의 폭과 높이 변화에 대한 SE 변화를 계산하였다. 제안된 방법을 통해 기존의 방법으로 해석할 수 없는 유전체로 막힌 개구(표시창(display window), 휴대전화의 전원 케이블 연결부)를 갖는 함체의 SE 해석이 가능하다.

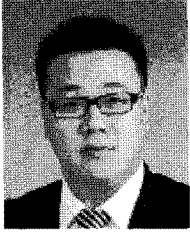
참 고 문 헌

[1] M. P. Robinson, J. D. Turner, D. W. P. Thomas, J. F. Dawson, M. D. Ganley, A. C. Marvin, S. J. Porter, T. M. Benson, and C. Christopoulos, "Shield-

ing effectiveness of a rectangular enclosure with a rectangular aperture", *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 17, pp. 1559-1560, 1996.

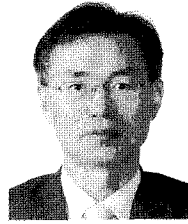
- [2] M. P. Robinson, T. M. Benson, J. F. Dawson, C. Christopoulos, M. D. Ganley, A. C. Marvin, S. J. Porter, and D. W. P. Thomas, "Analytic formulation for the shielding effectiveness of enclosure with apertures", *IEEE Trans. on EMC*, vol. 40, no. 3, pp. 240-248, 1998.
- [3] K. C. Gupta, *Microstrip Lines and Slotlines*, Artech House Inc., 1979.
- [4] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, Peter Peregrinus Ltd., 1986.
- [5] D. W. P. Thomas, A. Denton, T. Konefal, T. M. Benson, C. Christopoulos, J. F. Dawson, A. C. Marvin, and S. J. Porter, "Characterization of the shielding effectiveness of loaded equipment enclosure", *EMC York 99. Conference Publication*, Q IEE, no. 464, pp. 89-94, 1999.
- [6] S. B. Cohn, "Slotline on a dielectric substrate", *IEEE Trans.*, vol. MTT-17, pp. 768-778, 1969.
- [7] Su-han Kim, Dong-chul Park, and Jae-hyun Lee, "Shielding effectiveness of an enclosure with a dielectric-backed aperture using slotline method", *Chinese Institute of Electronics (CIE), 2007 4th International Symposium on EMC*, pp. 432-435, Oct. 2007.
- [8] Su-han Kim, Jae-hyun Lee, "Shielding effectiveness of an enclosure with a dielectric-backed aperture", *Asia-Pacific Microwave Conference*, pp. 749, Dec. 2007.

김 수 한



2007년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
2007년 3월~현재: 충남대학교 전과공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 시스템 및 부품, PCB에서의 MC/EMI

이 재 현



1978년~1982년: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
1983년~1985년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학석사)
1985년~1993년: 한국과학기술원 전기 및 전자과 (공학박사)
1991년 2월~2001년 2월: 한국전자통신연구원 책임연구원
2001년 2월~현재: 충남대학교 전과공학과 교수
[주 관심분야] PCB에서의 EMC/EMI, 위성통신 시스템 및 RF 부품, Magnetostatic Wave Devices