

슬롯 개구를 통한 평행평판 도파관 내부로의 전자파 펄스 결합문제 해석

Analysis of Electromagnetic Pulse Coupling Via a Slot Aperture into Parallel-Plate Waveguide

이영순* · 박의준*

Young-Soon Lee* · Eui-Joon Park*

요 약

슬롯 개구를 통해 평행평판 도파관 내부로 결합되어지는 전자파 펄스(EMP)의 과도 응답을 해석하기 위한 방법을 제안하였다. 개구의 미지 등가 면 자기전류밀도에 대한 혼합 포텐셜 적분 방정식(MPIE)을 세웠고 평행 평판 도파관 영역에서의 벡터 및 스칼라 포텐셜 그린함수를 개선된 복소영상법을 사용하여 유도된 closed form 그린함수를 사용하였다. 적분 방정식의 해를 구하기 위해 모멘트법을 사용하였을 때 closed form 그린함수를 사용한 결과로 계산시간을 현저히 줄일 수 있었고 본 논문이 제안한 방법의 타당성을 확인하기 위해 기존 방법의 해석결과와 비교해 보았을 때 본 논문의 해석 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

Abstract

An analysis method for obtaining transient response of electromagnetic pulse(EMP) coupled via a slot aperture into a parallel-plate waveguide, is considered. The mixed-potential integral equation(MPIE), in which the vector and scalar potential Green's functions for the unknown equivalent magnetic surface current of the aperture in parallel-plate region are expressed in closed forms derived by use of the improved complex image method, is formulated. When the method of moments(MoM) is used to solve the MPIE, the matrix-fill time is significantly reduced because of closed-form Green's functions. In order to check the validity of the present method, the numerical results obtained by the present method are compared with those obtained by the previous method. Fairly good agreements between them are observed.

I. 서 론

개구를 통하여 공동(cavity)안으로 침투되는 전자 기적 결합문제의 해석은, 전자기학적 경계치 문제로서 관심있는 연구분야 중의 하나이다^{[1]-[4]}.

Y. R. Samii^[4]는 개구를 통해 평행평판 영역 내로 침투된 EMP 문제를 해석하기 위해 개구에 유기되는 미지의 등가자기면전류 M_s 에 대한 적미분방정식

(integro-differential equation)을 구하였고, 영상에 의한 무한급수 전개식을 평행평판 영역에서의 그린함수로 사용하였다. 그리고 영상의 무한급수 전개식으로부터 그린함수의 값을 수치적인 계산이 가능하도록 그 합에 대한 수치적 근사화를 하여 무한급수식을 절단하였다. 그러나 모멘트법을 적용하여 개구의 어드미턴스 행렬 요소들을 계산하는데 사용되는 시간의 효율성 면에서 볼 때, 영상의 급수식에 의한

「본 연구는 학술진흥재단(과제번호 1998-001- E00865)지원으로 수행되었습니다.」

* 금오공과대학교 전자공학부(School of Electronic Eng., Kumoh National University of Technology)

· 논문 번호 : 20000529-062

· 수정완료일자 : 2000년 6월 26일

그린함수의 표현식은 그 값을 구하는데 있어 여전히 많은 계산시간이 소모된다. 뿐만 아니라 영상에 의한 급수 전개식은 관찰점이 원천점에서 멀어질 경우 그 값의 수렴도가 느리게 된다는 문제점도 지니고 있다. 그리고 기존의 적미분방정식에 포함되는 미분은 수치해석에서 부정확한 결과를 줄 수 있기 때문에 적미분방정식의 문제점으로 지적할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 기존의 적미분방정식 및 자계적분방정식보다 수치해석시 많은 이점을 가지는 혼합포텐셜 적분방정식(MPIE) 방법^[5]을 사용한다. 그리고 평행평판 내부의 벡터 및 스칼라포텐셜의 그린함수는 수치계산 시간의 효율성을 고려하여, 최근 참고문헌 [6]에서 spectral 그린함수를 2단계^[7]로 근사화하여 넓은 주파수 영역에서도 관찰점과 장점간의 거리에 관계없이 그린함수 값이 빠르게 수렴할 수 있도록 제안한, 개선된 복소영상법으로 구해진 closed form 그린함수를 사용한다. 본 논문의 해석방법의 타당성을 검토하기 위하여 평행평판 도파관 내로 침투된 EMP의 주파수 응답 및 과도 응답결과를 참고문헌 [4]의 결과와 비교해 보았다.

II. 본 론

2-1 평행평판 도파관 영역에서의 closed form 그린함수 유도

이 절에서는 참고문헌 [6]에서 제시된 개선된 복

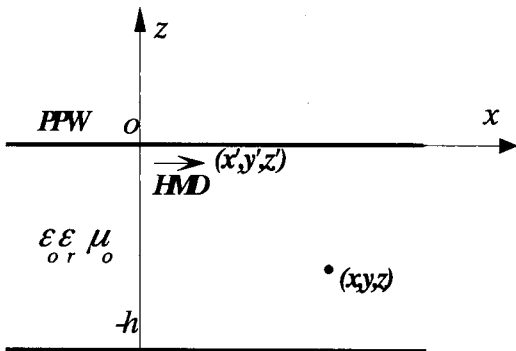


그림 1. 평행평판 도파관 내에 위치한 수평(x-방향) 자기 쌍극자

Fig. 1. x-directed magnetic dipole in a parallel-plate waveguide.

소 영상법에 의해 그림 1에서 보는 바와 같이 평행 평판 도파관 내에 위치한 수평자기 쌍극자(HMD)에 의한 벡터 및 스칼라 포텐셜 그린함수를 closed form으로 유도하는 과정을 제시하고자한다.

공간 영역에서의 벡터 및 스칼라 포텐셜 그린함수는 적분 변환법을 사용하여 식 (1)과 같은 적분식으로 구할 수 있다.

$$\frac{4\pi}{\epsilon_0 \epsilon_r} G_F^{xx} = 4\pi \mu_0 G_{om} = \int_{SIP} \frac{1}{j2k_z} \cdot F(k_z) e^{jk_z(z-z')} H_0^{(2)}(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho \quad (1)$$

여기에서

$$F(k_z) = \frac{(1 + e^{j2k_z z'}) (1 + e^{-j2k_z(z+h)})}{1 - e^{-j2k_z h}}, \quad z \leq z'$$

$$k_z^2 = k^2 - k_\rho^2, \quad k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon$$

이다.

Closed form 그린함수를 유도하는 과정을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

- 1) 먼저 파수 영역의 그린함수 $F(k_z)$ 로부터 k_z 가 $-j\infty$ 로 접근함에 따라 가지게 되는 극한값(본 논문에서는 2) 즉, 준정적(quasi-static) 기여항을 구해 그 값을 Sommerfeld 항등식을 사용하여 해석적으로 공간영역 그린함수로 변환한다. 그 이유는 파수 영역의 그린함수를 몇 개의 복소 지수함수의 합으로 근사화 하기 전에 준정적 기여항을 사전에 제거함으로써 $F(k_z)$ 를 파수 영역에서 빠르게 수렴하게 하기 위함이다.
- 2) $F(k_z)$ 로부터 실 극점(전파모드 극점)의 기여항들을 구하고 유수정리를 사용하여 그 항들을 공간영역 그린함수로 변환한다. 이는 $F(k_z)$ 로부터 극점들을 사전에 제거하여 파수 영역의 그린함수를 well-behaved함수로 만들기 위한 것이다.
- 3) $F(k_z)$ 로부터 준정적 기여항과 실 극점 기여항들이 제거된 파수 영역의 그린함수를 Prony 방법을 사용하여 2단계로 근사화한다. 그림 2에서 2단계 근사화에 따른 근사화 경로를 제시하였다. 1단계로 먼저 경로 C_{opt} 를 따라 샘플링된 파수 영역의 그린함수 값들로부터 몇 개

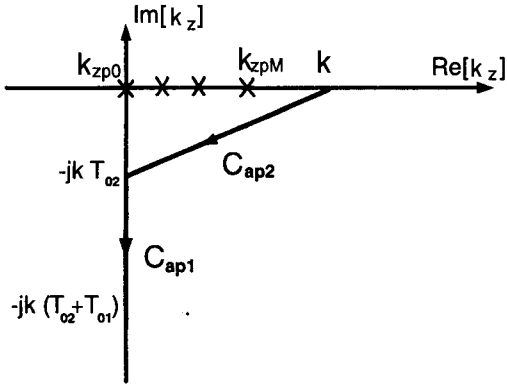


그림 2. 복소 k_z 평면상에서 2단계 근사화에 사용되어진 경로 C_{ap1} 및 C_{ap2}

Fig. 2. Paths C_{ap1} and C_{ap2} used in two-level approximation on the complex k_z -plane.

의 복소지수 함수의 합으로 근사화한 후, 다음 단계로 C_{ap2} 를 따라 근사화하게 된다. 이렇게 구해진 복소 지수함수 항들을 Sommerfeld 항등식을 사용하여 해석적으로 변환하게 되면 공간영역에서의 closed form 그린함수를 구할 수 있게 된다. 이렇게 2단계로 근사화를 하게 된 이유는 참고문헌 [6]에 상세히 제시되어 있다.

본 논문에서는 해석구조의 형태를 평행평판 도파관의 윗판에 개구가 위치한 경우로 선택하고자, 등가원리에 의해 등가 자기전류가 윗판에 위치한 (즉, $z' = 0$) 경우의 closed form 그린함수를 구해보면 식 (2)와 같다.

$$\frac{4\pi}{\epsilon_0 \epsilon_r} G_F^{zz} = 4\pi \mu_0 G_{qm} = G_{os} + G_{c1} + G_{c2} + G_{pm} \quad (2)$$

여기에서

$$G_{os} = 2 \frac{e^{-jkr_0}}{r_0}, \quad r_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2} \quad (3)$$

$$G_{c1} = \sum_{n=1}^{N_1} a_{1n} \frac{e^{-jkr_{1n}}}{r_{1n}}, \quad r_{1n} = \sqrt{\rho^2 + (z + jb_{1n})^2} \quad (4)$$

$$G_{c2} = \sum_{n=1}^{N_2} a_{2n} \frac{e^{-jkr_{2n}}}{r_{2n}}, \quad r_{2n} = \sqrt{\rho^2 + (z + jb_{2n})^2} \quad (5)$$

$$G_{pm} = \frac{\pi}{jh} \sum_{n=0}^M \epsilon_n H_0^{(2)}(k_{\rho n} \rho) \cos \frac{n\pi z}{h} \quad (6)$$

$$k_{\rho n}^2 = k^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2, \quad \rho = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2}$$

이다.

식 (3)으로 표현된 G_{os} 는 준정적 그린함수로 평행평판 도파관 윗판에 위치한 자기쌍극자 자신과 그 자신의 영상을 합해서 구해진 공간영역 그린함수 결과이다. 식 (4)과 식 (5)로 표현된 G_{c1} , G_{c2} 는 2단계 근사로 구해진 그린함수로 복소영상(Complex image)에 의한 그린함수 결과로 불리운다. (6) 식으로 표현된 G_{pm} 은 전파모드에 의한 그린함수 결과로 ϵ_n 은 Neumann상수이며, M 은 전파모드의 개수이다.

식 (2)로 유도된 그린함수의 타당성을 검토하기 위해 참고문헌 [4]의 해석구조($h = 3.48\text{m}$, $\epsilon_r = 1$, $z = z' = 0$)에 대해 closed form 그린함수 결과와 정확한 결과를 비교하여 그림 3에 제시하였다. 정확한 결과로 사용되어진 그린함수는 원천점과 관찰점이 가까운 경우($\rho \leq \lambda$)에는 영상에 의한 급수전개식을 사용하였으며, 관찰점이 먼 경우($\rho > \lambda$)에는 모드에 의한 급수전개식을 사용하였다. 그림 3에서 실선은 정확한 결과이며 다양한 심별로 표시된 점선은 closed form 그린함수의 결과이다

그림 3에서 보는 바와 같이 closed-form 그린함수 결과가 넓은 주파수 영역(1MHz~1GHz)에서 원천점과 관찰점의 거리에 관계없이 빠르게 수렴하고

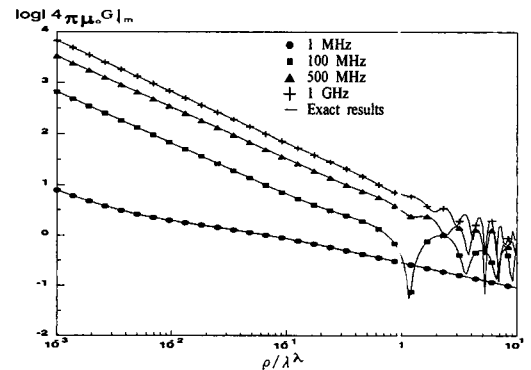


그림 3. 개선된 복소 영상법으로 구해진 closed form 그린함수 결과

Fig. 3. Amplitude of closed-form Green's function G_{qm} obtained by the improved complex image method.

있음을 알 수 있고, 그린함수 값이 영상에 의한 급수전개식과 모드에 의한 급수전개식으로 구한 값과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 closed-form 그린함수를 구하기 위해 단 한세트의 근사화 매개변수 ($T_{02} = M/k$, $T_{01} = 4T_{02}$, $N_1 = 3$, $N_2 = 10$)들을 사용하였으므로, 본 논문의 방법이 closed-form 그린함수를 구하는 현실한 접근방법임을 강조하고 싶다. 근사화 매개변수 T_{01} 과 T_{02} 를 이와 같이 선택하게된 배경을 설명하면, 주어진 해석구조^[4]에 대해 주파수가 낮은 경우는 전파모드의 극점개수가 적어지게 되므로 1단계 근사화로도 충분하다. 그러나 주파수가 높아지게 되면 전파모드의 극점 개수가 많아져, 파수영역 그린함수의 변곡이 심하므로 상대적인 샘플링 개수를 늘리기 위해 먼저 1단계 근사화에서의 종단점 T_0 에 해당되는 T_{02} 를 주파수가 높아짐에 따라 작아지게 $T_{02} = M/k$ 로 선택한다. 그림 (2)에서 보는 바와 같이 T_{02} 로만 종단된 경우 종단된 근사화 경로 이후에 무시되어질 수 있는 파수영역 그린함수를 고려해 넣을 수 있도록 종단점 T_{01} 을 $4T_{02}$ 로 선택하였다. $T_{01} = NT_{02}$ 에서 계수 N 은 반드시 4가 되어야 하는 임계치는 아니며, N 은 3~5사이의 임의 값을 선택하기만 하면 된다는 것을 알 수 있었다.

2-2 혼합 포텐셜 적분 방정식(MPIE)

본 논문의 해석구조는 그림 4에서 보는 바와 같

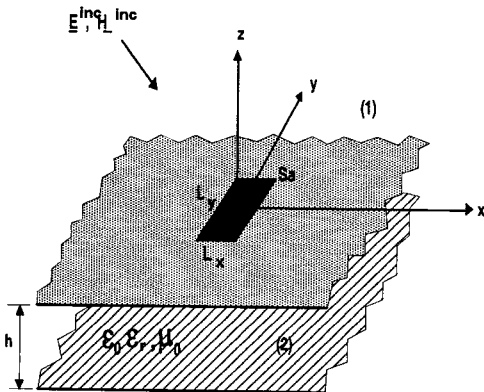


그림 4. 평행평판의 윗판에 위치한 직사각형 개구
Fig. 4. Rectangular aperture perforated on the upper wall of a parallel-plate waveguide.

이 윗판에 직사각형의 슬롯 개구가 있는 평행평판으로, (1)과 (2)는 각각 평행평판의 외부영역과 내부영역을 나타낸다. 각 영역은 균질한 등방성의 매질인 자유공간으로 이루어져 있고, 평행평판은 매우 얇은 완전도체라고 가정한다.

등가원리를 적용하여, 개구를 단락시키고 $z = 0^+$ 인 면에 개구의 전계분포를 등가자기면전류 $-\underline{M}_s$ 으로 대체하면 영역 (1)에서 자계의 접선성분은

$$\begin{aligned} H_t^{(1)}(\underline{x}) &= H_t^{SC}(\underline{x}) + j\omega \underline{F}_t^{(1)}(\underline{x}) + \\ &\quad \nabla_t V_m^{(1)}(\underline{x}), z > 0 \end{aligned} \quad (7)$$

로써 표현된다. 여기에서 윗첨자 (1)은 영역 (1)을 의미하며, H^{SC} 는 개구가 단락되었을 때 입사파와 반사파의 합($H^{SC} = H^i + H^r$)인 단락회로자계이며, 등가자기면전류밀도로부터 얻어지는 포텐셜에 의한 자계부분의 부호가 양으로 표현된 것은 $-\underline{M}_s$ 에 의한 영향을 고려했기 때문이다. 자기벡터포텐셜 및 스칼라포텐셜은 각각 미지의 자기면전류밀도 \underline{M}_s 와 자하밀도 q_{ms} 에 대하여 다음과 같이 주어진다.

$$\underline{F} = \int_{Sa} \overline{G}_F^{(1)}(\underline{x} | \underline{x}') \cdot \underline{M}_s(\underline{x}') ds' \quad (8)$$

$$V_m = \int_{Sa} G_{V_m}^{(1)}(\underline{x} | \underline{x}') q_{ms}(\underline{x}') ds' \quad (9)$$

여기서 Sa 는 개구의 면적을 나타내며, 영역 (1)에서의 벡터포텐셜 및 스칼라포텐셜의 Green 함수는 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{4\pi}{\epsilon_0} G_F^{yy(1)}(\underline{x} | \underline{x}') &= 4\pi\mu_0 G_{V_m}^{(1)}(\underline{x} | \underline{x}') \\ &= 2 \frac{e^{-jk_0|\underline{x}-\underline{x}'|}}{|\underline{x}-\underline{x}'|} \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 영역 (2)에서 자계의 접선성분은

$$\underline{H}_t^{(2)}(\underline{x}) = -j\omega \underline{F}_t^{(2)}(\underline{x}) - \nabla_t V_m^{(2)}(\underline{x}), z < 0 \quad (11)$$

로써 표현된다. 여기에서 $\underline{F}_t^{(2)}$ 와 $V_m^{(2)}(\underline{x})$ 은 각각 식 (8), (9)와 같은 형태로 주어지며, 평행평판 내부의 그린함수는 전 절에서 유도된 식 (2)의 closed

form 그린함수를 사용하여 구할 수 있다.

식 (7)과 식 (11)로부터 자계의 점성성분이 개구에서 연속이라는 경계조건을 부과하여 식 (12)와 같은 혼합포텐셜 적분방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 &[-j\omega \underline{F}_t^{(1)}(\underline{x}) - \nabla_t V_m^{(1)}(\underline{r})] \\
 &+ [-j\omega \underline{F}_t^{(2)}(\underline{x}) - \nabla_t V_m^{(2)}(\underline{r})] \\
 &= \underline{H}_t^{SC} \text{ on } S_a
 \end{aligned} \tag{12}$$

정상상태해석을 위하여 영역 (1)의 외부로부터 개구에 수직으로 입사하는 평면전자파의 자계를 다음과 같이 정의한다.

$$\underline{H}^i = \frac{E_0}{Z_0} e^{jk_0z} (-\hat{y}_0) \tag{13}$$

여기서 E_0 는 전계의 크기이며, $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ 이고 $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 이다.

III . 수치해석 결과

3-1 모멘트법(MoM)

식 (12)의 MPIE로부터 개구에 유기되는 미지의 등가자기면전류를 구하기 위하여 참고문헌 [8]에서와 같은 방법으로 모멘트법을 적용한다. 그 과정을 간략히 요약하면,

- 1) 미지의 자기면전류 \underline{M}_s 를 rooftop 기저함수로 전개하고, 이와 관련된 면자하밀도 q_{ms} 는 전류의 연속방정식을 사용하여 표현한 후,
- 2) razor 함수(일차원 구형 펄스 함수)를 테스트 함수로 선택하여 내적(testing)하게 되면 행렬방정식을 얻게 되고,
- 3) 이 선형 방정식의 해로 미지 전류 \underline{M}_s 를 구할 수 있고,
- 4) \underline{M}_s 로부터 개구에서의 전계분포와 침투된 전계의 크기를 구할 수 있다. 이렇게 하여 정상상태에서 개구를 통해 침투되는 전계를 수치해석적으로 구할 수 있다.

3-2 침투된 EMP의 시간영역에서의 응답

시간 영역에서의 컨벌루션은 주파수 영역에서는

곱으로 변환되므로, 먼저 개구에 대한 주파수 전달함수를 구해야 한다. 주파수 전달 함수는 입사되는 EMP의 주파수 스펙트럼을 고려하여 각각의 해당 주파수에서 단위 크기의 전계세기를 가지는 입사평면파에 대한 정상상태해석을 통하여 구할 수 있다. 이것을 식 (14)와 같이 주어지는 입사 EMP의 주파수 스펙트럼과 곱하여 침투된 EMP의 주파수 응답 특성을 얻을 수 있으며, FFT알고리즘을 사용한 푸리에 역변환을 취하여 시간 영역에서의 응답 특성을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \underline{E}^i(\omega, \underline{x}) = &\hat{x}E_0 \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \\
 &\cdot (1 - e^{-j\omega\tau})e^{-jkz}
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기에서 $\alpha = 6.0 \times 10^6 s^{-1}$, $\beta = 2.0 \times 10^8 s^{-1}$, $\tau = 2.04189 \times 10^{-9} s$, 그리고 $E_0 = 10^3 V/m$ 이다.

3-3 수치해석 결과.

본 논문에서 제시한 전자파 펄스 결합문제 해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 참고문헌 [4]에서 사용된 해석구조($L_x = 1.3 [cm]$, $L_y = 1.15 [m]$, $h = 3.48 [m]$)에 대하여 평행평판 내부에 침투된 EMP에 대한 수치해석을 하였다.

해석결과 슬롯 개구를 통해 평행평판 도파관 내부로 침투된 EMP의 주파수 응답 특성을 그림 5에 그림으로 표시하였다. 본 논문에서는 Samii의 결과 [4]와 비교하기 위하여 관찰점을 $x=0, y=0, z=-2 [m]$ 로 하였다.

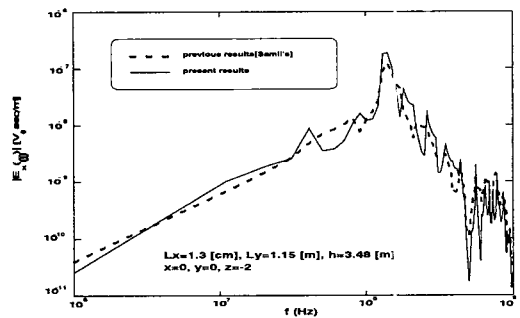


그림 5. 침투된 EMP의 주파수 응답 특성

Fig. 5. Frequency-domain behavior of the penetrated EMP.

IV. 결 론.

슬롯 개구를 통해 평행평판 도파관 내로 EMP 결합 문제의 효율적인 수치해석을 위해 closed form 그린함수를 사용한 모멘트법이 본 논문에서 고려되었다. 평행평판 내부의 그린함수를 구하는데 있어서 Sommerfeld 적분으로 주어지는 형태를 복소영상법을 이용하여 몇 개의 복소영상에 의한 그린함수로 표현할 때, 1단계로 근사화를 하는 기존의 복소영상법을 사용할 경우 모든 주파수 영역에 대하여 각각의 절단점과 복소지수함수의 개수와 같은 근사화에 필요한 매개변수를 선택해야 하는 문제가 쉬운 일이 아니다. 만약 적절하지 못한 선택을 하여 잘못된 그린함수를 구하게 되면 복소영상에 의한 그린함수가 수치적 특이성을 가질 수도 있으므로 주파수 응답 특성에서 매우 큰 값의 peak 치를 가지는 주파수들이 생기게 됨을 확인할 수 있었다. 그러한 경우 시간 응답 특성은 틀린 결과를 줄 뿐만 아니라 EMP에 대한 개구의 응답 특성에 관한 정보를 전혀 기대할 수 없게 된다. 그러나 본 논문에서와 같이 2단계 근사를 이용한 개선된 복소영상법으로 구해진 closed form 그린함수 표현식을 사용함으로써 관심 주파수의 전 영역에 걸쳐서 일정한 매개변수 선택으로도 정확한 그린함수 값을 구할 수 있으므로, 모멘트 행렬의 계산시간 단축은 물론 개구의 응답 특성 해석에 대한 타당한 결과를 주었을 것으로 사료된다. 그림 5에서 보는 바와 같이 주파수 응답 특성에서 기존의 결과^[4]에 비해 공진 주파수에서의 peak치를 가지는 현상이 본 논문의 결과가 더 두드러지게 나타남을 볼 수 있는데, 그 주된 이유가 개선된 복소 영상법에 의해 유도된 closed form 그린함수를 사용했기 때문인 것으로 사료된다.

본 연구의 해석방법을 바탕으로 실제적인 전자파 펄스의 침투문제에 적용하기 위해서는 손실이 있는 도체에 위치한 개구에 대한 해석, 공동(cavity)에 있는 개구에 의한 침투문제 등의 보다 다양한 구조에 대한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small

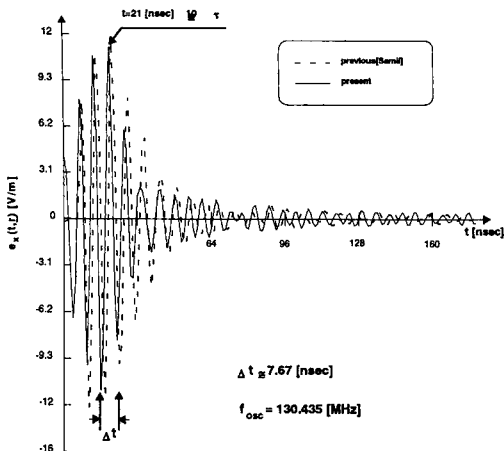


그림 6. 침투된 EMP의 시간 응답 특성
Fig. 6. Time-domain behavior of the penetrated EMP.

그림 5에서 약 130.4 MHz와 260.8 MHz에서의 전계크기는 개구의 축방향 길이에 대해 각각 첫 번째와 두 번째 공진에 의한 효과이며, 43.1 MHz와 86.2 MHz, 그리고 129.3 MHz 등의 응답은 평행평판의 공동(cavity)의 공진에 의한 것이다. 공동에 의한 공진은 $kh = m\pi, m=1,2,3,\dots$ 일 때 일어나며, 이때 윗판과 아랫판에 의한 다중반사에 의하여, 개구에 유기되는 전계에 간섭을 주게 되므로 그림 5에서와 같은 공진현상이 응답 특성으로 나타나게 된다.

앞에서 구한 주파수 응답 특성으로부터 참고문헌 [8]에서와 같은 방법으로 FFT알고리즘을 사용한 푸리에 역변환을 하여 시간 영역에서의 응답 특성을 구한 결과를 그림 6에 나타내었다. 기존의 결과와 비교하여 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 기존 결과^[4]와 다소의 차이점이 있음을 알 수 있는데, 그 이유는 기존 방법에서는 적미분방정식과 그린함수로 무한 영상전개식을 사용하였고, 반면에 본 논문에서는 혼합포텐셜 적분방정식과 closed-form 그린함수를 사용하였기 때문이며, 본 논문에서 사용된 closed-form 그린함수가 무한 영상 전개식의 그린함수보다 원천점과 장점간의 거리뿐만 아니라, 사용 주파수에 관계없이 빠르게 수렴하므로 본 논문의 결과가 좀더 정확한 해석결과일 것으로 사료된다.

- holes," *Phys. Rev.*, vol. 68, pp. 163-182, 1944.
- [2] C. D. Taylor, "Electromagnetic pulse penetration through small apertures," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-15, no. 1, 1973.
- [3] C. M. Butler, Y. Rahmat-Samii and R. Mittra, "Electromagnetic Penetration Through Apertures in Conducting Surfaces," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 26, no.1, pp. 82-93, 1978.
- [4] Y. Rahmat-Samii, "Electromagnetic Pulse Coupling through an Aperture into a Two-Parallel-Plate Region," *IEEE Trans. Electromagn.*, vol. EMC-20, no. 3, pp. 436-442, Aug., 1978
- [5] J. R. Mosig and F. E. Gardiol, "General integral equation formulation for microstrip antennas and scatterers," *IEEE Proceeding*, vol. 132., pp. 424-432, December, 1985.
- [6] Y. S. Lee, J. K. Kim, H. S. Kwon and Y. K. Cho. "Improved Complex Image Method for a Horizontal Magnetic dipole in ϵ Parallel-Plate Waveguide," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 16, no. 1, pp.30-34, Sep., 1997.
- [7] M. I. Aksun, "A robust approach for the derivation of closed-form Green's functions," *IEEE Trans. MTT*, vol. 44, no. 5, pp. 651-658, May, 1996.
- [8] 이영순, 김종규, 박진택, 조영기, 손 현, "슬롯 개구를 통해 도체스크린 내부로 침투된 전자파 필드의 과도응답 해석", 전자공학회 논문지 제 33권, A편 제 8 호, pp. 55-64, 1996.

이 영 순



1979년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)
 1996년 8월: 경북대학교 전자공학과(공학박사)
 1982년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 교수

[주 관심분야] 전자장 수치 해석, 도파관 불연속 문제, 전자파의 개구 결합문제, 안테나 해석 및 설계

박 의 준



1983년 2월: 동아대학교 전자공학과(공학사)
 1986년 9월: 고려대학교 전자공학과(공학석사)
 1990년 2월: 고려대학교 전자공학과(공학박사)
 1996년 1월~1996년 12월: 미

Caltech 객원교수
 1990년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 부교수
 [주 관심분야] 전자장 이론 및 안테나, 마이크로파 전송선로 및 회로설계 등