

논문 2004-41TC-6-8

일반적인 전원을 포함하는 평판구조에 대한 정확한 Closed-form 그린함수

(An Accurate Closed-form Green's Function for the Planar Structure
with General Sources)

강 연 덕*, 이 택 경**

(Yeon-Duk Kang and Taek-Kyung Lee)

요 약

정확한 closed-form 그린함수 계산방법은 공간영역 그린함수에 포함된 Sommerfeld 적분의 계산시간을 줄이기 위해 기존에 이용되어온 복소 영상법(Complex image method)과 2단계 근사화법(Two-level approach)에 비해 훨씬 적은 오차를 갖는다. 본 논문에서는 정확한 closed-form 그린함수 계산방법을 일반적인 전원을 포함하는 평판구조에 적용하는 방법을 제안하였다.

Abstract

In the integration of Sommerfeld type for space domain Green's function, a accurate closed-form Green's function method provides more exact solution than the typical complex image method and two-level method. The accurate closed-form Green's function method is applied to obtain the space domain Green's functions of planar structures with general sources. Please put the abstract of paper here.

Keywords : Space domain, Accurate closed-form Green's function, Planar structure

I. 서 론

전송선로에 대한 full-wave 해석방법은 크게 파수영역 해석법(Spectral Domain Analysis, SDA)과 공간영역 해석법(Spatial Domain Integral Equation, SDIE method)으로 나눌 수 있다. 이중 파수영역 해석법은 상당부분의 계산에 해석적 해를 이용하므로 계산량과 시간을 단축시킬 수 있어 효율적인 해석법이라 할 수 있으며, 공간영역 해석법은 보다 복잡한 기하구조에 대해서도 적용할 수 있고 물리적인 해석이 가능하다는 장점이 있지만 무한적분으로 표현되는 Sommerfeld 적분을

포함하고 있어 많은 계산시간이 요구된다^{[1],[2]}.

이러한 무한적분에서의 계산시간을 줄이기 위해 근사화를 통해 closed-form으로 바꾸는 방법에 대한 연구들이 진행되어 왔다^{[3]-[7]}. 기존에 제안된 복소 영상법(Complex Image Method)이나 2단계 근사화 방법(Two-level approximation approach)은 전원점과 관측점의 거리에 의해 오차의 편차가 매우 크다는 문제점을 갖고 있지만, 저자들에 의해 고안된 정확한 closed-form 그린함수 방법(accurate closed-form Green's function method)은 파수영역의 실수축 상에서 적분을 함으로써 거리에 관계없이 정확한 closed-form 그린함수를 얻을 수 있는 장점을 갖는다^[7].

논문 [7]에서는 코플래너 도파로(CPW, Coplanar Waveguide) 구조를 해석하기 위하여 기관 내부의 정중앙에 수평자기다이폴(HMD, Horizontal Magnetic Dipole)이 존재하는 경우에 대한 그린함수를 계산하였으며, 정

* 정회원, LG 이노텍 전문화그룹
(R&D Group, LG Innotek Co., Ltd.)

** 평생회원, 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부
(School of Electronics, Telecommunication & Computer Engineering, Hankuk Aviation University)
접수일자: 2003년12월9일, 수정완료일, 2004년5월27일

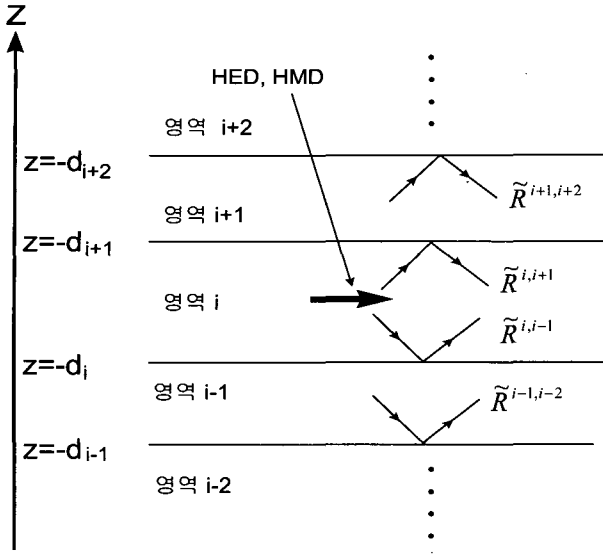


그림 1. 전원이 포함된 평면형 다층구조
Fig. 1. Multi-Layered medium with embedded source.

확한 closed-form 그린함수 계산방법을 제안하였다. 계산된 공간영역 그린함수는 다양한 구조의 CPW 불연속 구조의 해석에 이용될 수 있다^[8]. 이에 비해 본 논문에서는 일반적인 전원을 포함하는 평판 구조에 대한 정확한 closed-form 그린함수 계산방법을 제안하고자 하며, 이를 위해 일반적인 평판구조의 해석에 이용될 수 있는 정확한 closed-form 그린함수 계산방법을 제시하고, 일반적인 구조에 적용하여 방법의 타당성을 알아본다.

본 논문의 II장에서는 정확한 closed-form 그린함수 계산방법을 적용하여 HMD 및 HED가 존재하는 평면형 다층구조의 공간영역 그린함수를 구하는 방법을 제안하였으며, III장에서는 HMD가 기판 내부의 임의의 지점에 위치한 경우 및 기판 외부에 수평전기다이어폴(HED, Horizontal Electric Dipole)이 존재하는 경우에 제안된 방법을 적용시켜 공간영역 그린함수를 얻는 방법을 제안하였다.

II. 파수영역 및 공간영역의 그린함수

1. 평면형 다층구조의 그린함수

평면형 다층구조를 공간영역에서 full-wave 해석하기 위해 MPIE를 이용하는 경우 벡터 및 스칼라 포텐셜에 대한 공간영역 그린함수를 구하여야 한다. 그림 1은 z축 방향으로 여러 층이 존재하는 평면형 다층구조를 나타내며, 자유전원(HMD, Horizontal Magnetic Dipole) 또는 전류전원(HED, Horizontal Electric Dipole) 성분

이 i번째 층에 위치하고 있는 구조이다. 그림에서 $R^{i,i+1}$ 는 반사계수를 나타내며 i번째 층에서 i+1번째 층으로 진행하는 입사파에 대한 반사파의 비를 나타낸다^[2].

그림 1의 i번째 층에 HMD가 존재하는 경우에 대한 파수영역 그린함수는 다음식

$$\mathcal{G}_F^{xx} = \epsilon_i \tilde{g}_{TM} \quad (1)$$

$$\mathcal{G}_{qm} = \frac{1}{\mu_i} \left\{ -\frac{k_{zi}^2}{k_\rho^2} \tilde{g}_{TE} + \left(\frac{k_i}{k_\rho}\right)^2 \tilde{g}_{TM} \right\} \quad (2)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기서

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{TM}(k_\rho, z) = & \frac{1}{j2k_{zi}} [e^{-jk_{zi}|z-z'|} \\ & + A_i^{TM} e^{jk_{zi}z} + B_i^{TM} e^{-jk_{zi}z}] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}_{TE}(k_\rho, z) = & \frac{1}{j2k_{zi}} [e^{-jk_{zi}|z-z'|} \\ & + A_i^{TE} e^{jk_{zi}z} + B_i^{TE} e^{-jk_{zi}z}] \end{aligned} \quad (4)$$

으로 TM파 및 TE파에 의한 장(field)을 나타낸다. i번째 층의 매질 내에 전원이 있는 경우 i번째 층에서의 장은 전원으로부터 직접 나오는 파와 반사에 의해 위로 진행하는 파, 그리고 아래로 진행하는 파로 구성된다. 식 (3)과 식 (4)에서 두 번째 항은 전원점으로부터 위로 진행하는 파를, 세 번째 항은 전원점으로부터 아래로 진행하는 파를 각각 나타내며

$$\begin{aligned} A_i^{TM, TE} = & \pm e^{jk_{zi}d_{i+1}} R_{TM, TE}^{i,i+1} [e^{-jk_{zi}|d_{i+1}+z'|} \\ & \pm R_{TM, TE}^{i,i-1} e^{-jk_{zi}|d_i+z'|} e^{jk_{zi}(d_{i+1}-d_i)}] M_i^{TM, TE} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} B_i^{TM, TE} = & \pm e^{-jk_{zi}d_i} R_{TM, TE}^{i,i-1} [e^{-jk_{zi}|d_i+z'|} \\ & \pm R_{TM, TE}^{i,i+1} e^{-jk_{zi}|d_{i+1}+z'|} e^{jk_{zi}(d_{i+1}-d_i)}] M_i^{TM, TE} \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 여기서

$$M_i^{TM, TE} = [1 - R_{TM, TE}^{i,i+1} R_{TM, TE}^{i,i-1} e^{-jk_{zi}2(d_i-d_{i+1})}]^{-1}$$

이며 z' 은 전원점의 위치를 나타낸다. 또한 \pm 부호의 +는 TM 모드에, -는 TE 모드에 각각 해당되며, $R_{TM, TE}$ 는 TM파 및 TE파에 대한 Fresnel 반사계수

이다. i 번째 매질의 파수(wave number)를 나타내는 k_i 는 $k_{zi}^2 + k_{\rho}^2 = k_i^2$ 으로 표현할 수 있으며 기판 밖의 자유공간의 파수에 대해서는 $k_{z0}^2 + k_{\rho}^2 = k_0^2$ 으로 표현할 수 있다.

마찬가지로, 그림 1의 i 번째 층에 존재하는 HED에 대한 파수영역 그린함수는 다음식

$$\mathcal{G}_A^{xx} = \mu_i \tilde{g}_{TE} \tag{7}$$

$$\mathcal{G}_{qe} = \frac{1}{\epsilon_i} \left\{ \left(\frac{k_i}{k_{\rho}} \right)^2 \tilde{g}_{TE} - \frac{k_{zi}^2}{k_{\rho}^2} \tilde{g}_{TM} \right\} \tag{8}$$

과 같이 표현할 수 있다^[1]. 여기서 \tilde{g}_{TE} 와 \tilde{g}_{TM} 는 식 (3) 및 식 (4)와 같으며, 위로 진행하는 파와 아래로 진행하는 파에 대한 계수는 각각

$$A_i^{TE, TM} = \pm e^{jk_{zi}d_{i+1}} R_{TE, TM}^{i, i+1} \left[e^{-jk_{zi}|d_{i+1}+z'|} \pm R_{TE, TM}^{i, i-1} e^{-jk_{zi}|d_i+z'|} e^{jk_{zi}(d_{i+1}-d_i)} \right] M_i^{TE, TM} \tag{9}$$

$$B_i^{TE, TM} = \pm e^{-jk_{zi}d_i} R_{TE, TM}^{i, i-1} \left[e^{-jk_{zi}|d_i+z'|} \pm R_{TE, TM}^{i, i+1} e^{-jk_{zi}|d_{i+1}+z'|} e^{jk_{zi}(d_{i+1}-d_i)} \right] M_i^{TE, TM} \tag{10}$$

이다. 여기서 \pm 부호의 $+$ 는 TE 모드에, $-$ 는 TM 모드에 각각 해당된다. 식 (1), (2), (7), (8)의 HED 및 HMD에 의한 파수영역 그린함수 \mathcal{G}_A^{xx} , \mathcal{G}_{qe} , \mathcal{G}_F^{xx} , \mathcal{G}_{qm} 을 \mathcal{G} 로 표현하면, 공간영역 그린함수는 Sommerfeld identity에 의해

$$G = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \mathcal{G} J_0(k_{\rho}\rho) k_{\rho} dk_{\rho} \tag{11}$$

이 된다^[2]. 여기서 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 이고, J_0 는 0차 베셀 함수를 나타낸다. 정확한 closed-form 그린함수 방법은 본래의 적분경로인 SIP(Sommerfeld Integration Path)를 따라 적분하므로 적분경로는 복소 k_{ρ} 평면의 실수축이 된다. 식 (11)에 대해서도 마찬가지로 실수축을 따라서 근사화하고 적분을 수행한다.

2. 정확한 closed-form 그린함수

정확한 closed-form 그린함수 방법과 복소 영상법의 차이중의 하나는 실 영상(real image)을 따로 고려해 주지 않는다는 것이다. 즉, 정확한 closed-form 그린함수

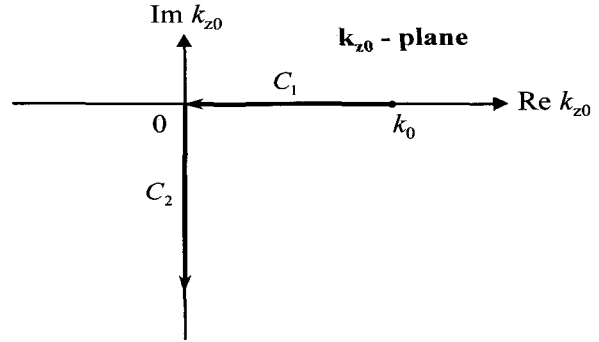


그림 2. 복소 k_{z0} 평면에서의 적분경로

Fig. 2. The integration path on the complex k_{z0} plane.

방법은 크게 복소 영상(complex image)을 구하는 과정과 표면과 pole의 추출로 이루어진다. 식 (11)에서 피적분 함수의 분모가 0이 되는 위치에서 발생하는 pole은 기판의 손실이 거의 없는 경우 실수축 상에 존재하게되며, 이러한 표면과 pole 성분은 복소영상법과 마찬가지로 유수(residue)정리를 이용하여 구할 수 있다^[3]. 파수영역의 그린함수 \mathcal{G} 로부터 추출된 표면과 pole을 이용하여 공간영역의 그린함수를 구하고, 표면과 pole을 추출해낸 나머지 함수를 \mathcal{G}' 으로 정의한다.

함수 \mathcal{G}' 는 표면과 pole이 제거된 함수이므로 발산하는 부분은 없어지지만, branch point에서는 1차 미분이 무한대이므로 함수가 급격히 변화하여 근사가 곤란하다. 따라서 이 지점에서의 근사가 정확하게 이루어지려면 피적분 함수가 해석적인 해를 가질 수 있도록 만들어 주어야 한다. 평면형 다층구조를 갖는 기판의 경우 기판의 최상위층과 최하위층은 공기층으로 가정할 수 있다. 기판의 아랫면이 도체인 경우에도 영상법을 적용시키면 최상위층과 최하위층은 공기층이 된다. 이러한 구조에서 branch point는 $k_{\rho} = k_0$ 지점에만 존재하므로 복소 k_{ρ} 평면의 함수 \mathcal{G}' 을 복소 k_{z0} 평면의 함수로 바꾸어 주면 해석적인 함수로의 변화가 가능해진다. 복소 k_{ρ} 평면의 실수축에 해당하는 적분경로는 복소 k_{z0} 평면에서는 그림 2에서와 같이 실수축 상의 지점인 $k_{z0} = k_0$ 에서 시작하여 원점을 지나 허수축의 $k_{z0} = -j\infty$ 로 향하는 적분경로를 갖게 된다. 그림 2의 적분경로 C_1 과 C_2 는 각각 실수축과 허수축에 해당하는 적분경로이며, 정확한 closed-form 그린함수 방법에서는 적분경로 C_2 에 대해서는 지수함수로 적분경로 C_1 에서는 코사인 함수로 각각 근사화한다.

복소 k_{z0} 평면에서의 적분을 수행하기 위해 $H = k_{z0} \mathcal{G}'$ 를 만족하는 함수 H 를 이용해 식 (11)의 우변에 대한 적분식은

$$\int_0^\infty \mathcal{G} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho = \int_0^\infty \frac{H(k_{z0})}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho \quad (12)$$

와 같이 표현할 수 있다. 식 (12)의 적분식에서 근사화하는 두 단계에 거쳐 수행된다.

첫 번째 단계로는 적분경로 C_2 에서 데이터를 샘플링하여 GPOF 방법(Generalized Pencil of Function Method)을 적용시켜 다음식

$$H' = b_0 + \sum_{i=1}^M b_i e^{-\beta_i k_{z0}} \quad (13)$$

과 같이 지수함수로 근사화한다. 여기서 H' 은 적분경로 C_2 에서 함수 H 를 근사화한 함수를 나타내며, $b_0 = \lim_{k_\rho \rightarrow \infty} H$ 이다. 식 (12)의 적분식을 식 (13)을 이용해 다시 표현하면

$$\int_0^\infty \frac{H}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho = \int_0^\infty \frac{H'}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho + \int_0^{k_0} \frac{H-H'}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho \quad (14)$$

이 된다. 여기서 두 번째항의 적분은 Sommerfeld identity에 의해

$$I_1 = \int_0^\infty \frac{H'}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho = j \left[b_0 \frac{e^{-jk_0 \rho}}{\rho} + \sum_{i=1}^M b_i \frac{e^{-jk_0 \sqrt{\rho^2 + (-j\beta_i)^2}}}{\sqrt{\rho^2 + (-j\beta_i)^2}} \right] \quad (15)$$

이 된다.

두 번째 단계는 식 (14)의 우변에서 두 번째 항의 적분식을 적분경로 C_1 에서 코사인 함수로 근사화하는 것이다. 우선 k_ρ 의 적분식을 k_{z0} 의 적분식으로 바꾸면

$$I_2 = \int_0^{k_0} \frac{H-H'}{k_{z0}} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho = \int_0^{k_0} [H-H'] J_0(\sqrt{k_0^2 - k_{z0}^2} \rho) dk_{z0} \quad (16)$$

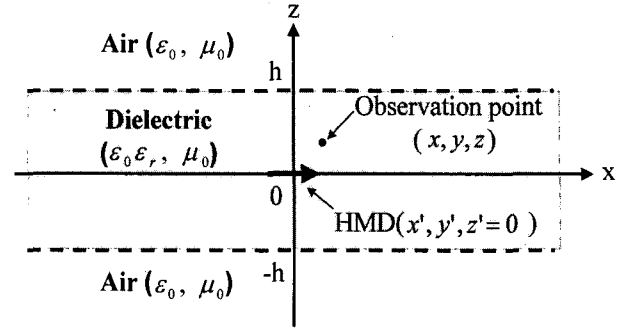


그림 3. 수평자기 다이폴이 포함된 평면형 다층구조

Fig. 3. Multi-Layered Medium with Horizontal Magnetic Dipole.

와 같이 표현할 수 있다. 적분경로 C_1 에서 함수 $H-H'$ 을 코사인 함수로 전개하면

$$H-H' = c_0 + \sum_{n=1}^N c_n \cos \left[\frac{(2n-1)\pi}{2k_0} k_{z0} \right], \quad 0 \leq k_{z0} \leq k_0 \quad (17)$$

이 되며, 여기서 $c_0 = \lim_{k_{z0} \rightarrow k_0} [H-H']$ 이다. 정적분으로 표현되는 I_2 는 식 (17)의 함수를 식 (16)에 대입하여 적분공식을 이용하면

$$I_2 = c_0 \frac{\sin(k_0 \rho)}{\rho} + \sum_{n=1}^N c_n \frac{\sin(k_0 r_n)}{r_n} \quad (18)$$

이 된다. 여기서 $r_n = \sqrt{\rho^2 + \left[\frac{(2n-1)\pi}{2k_0} \right]^2}$ 이다. 따라서 공간영역 그린함수의 최종형태는

$$G = \frac{1}{2\pi} [I_1 + I_2 + \text{surface waves}] \quad (19)$$

와 같이 표현할 수 있다.

III. 평면형 다층구조의 예

1. 수평 자기 다이폴

(HMD, Horizontal Magnetic Dipole)

평면형 다층구조의 해석을 위한 기본적인 평면구조의 모델은 구조의 내부에 전기전원이거나 자기전원이 존재하는 경우와 구조의 밖에 전기전원이거나 자기전원이 존재하는 경우 등으로 나누어진다. 이번 절에서는 평판구조의 내부에 자기전원이 존재하는 경우에 대해 정확한 closed form 그린함수 방법을 이용하여 공간영역 그

린함수를 구한다.

그림 3은 기판의 중앙에 수평 자기 다이폴이 존재하는 구조를 나타낸다. 이러한 구조에서 관측점이 기판 내부의 임의지점에 있는 경우에 대한 파수영역 그린함수는

$$G_F^{xx} = \frac{\epsilon_1}{j2k_{z1}} \left[e^{-jk_{z1}|z|} + 2\cos(k_{z1}z)R_{TM} \right] \quad (20)$$

$$G_{qm} = \frac{1}{j2k_{z1}\mu_1} \left\{ e^{-jk_{z1}|z|} + 2\cos(k_{z1}z)[R_{TM} + R_{qm}] \right\} \quad (21)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서

$$R_{TM} = \frac{r_{TM}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}}{1 - r_{TM}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}} \quad (22)$$

$$R_{qm} = \frac{k_{z1}^2}{k_\rho^2} \left[\frac{r_{TE}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}}{1 + r_{TE}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}} + \frac{r_{TM}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}}{1 - r_{TM}^{1,0} e^{-j2k_{z1}h}} \right] \quad (23)$$

이며, $r_{TM,TE}^{1,0}$ 는 기판으로부터 자유공간으로 향하는 TM파 및 TE파에 대한 Fresnel 반사계수를 나타내는 값으로

$$r_{TM}^{1,0} = \frac{k_{z1} - \epsilon_r k_{z0}}{k_{z1} + \epsilon_r k_{z0}}, \quad r_{TE}^{1,0} = \frac{k_{z1} - k_{z0}}{k_{z1} + k_{z0}} \quad (24)$$

이다. 여기서 $k_{z0}^2 + k_\rho^2 = k_0^2$, $k_{z1}^2 + k_\rho^2 = \epsilon_r k_0^2 = k_1^2$ 이다.

식 (20)과 (21)의 파수영역 그린함수를 식 (11)의 Sommerfeld identity를 이용하여 공간영역 그린함수로 표현하면

$$G_F^{xx} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty G_F^{xx} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho \quad (25)$$

$$G_{qm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty G_{qm} J_0(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho \quad (26)$$

이 된다. 식 (25)와 식 (26)의 적분식을 2.2절에 소개된 정확한 closed form 그린함수 방법을 이용하여 계산하면

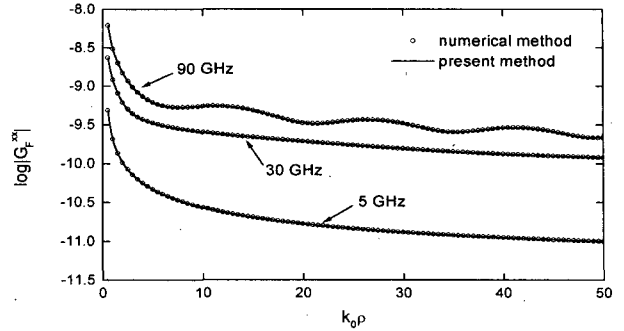


그림 4(a). 비유전율 2.33일때의 그린함수 G_F^{xx}
Fig. 4(a). Magnitude of G_F^{xx} for $\epsilon_r = 2.33$

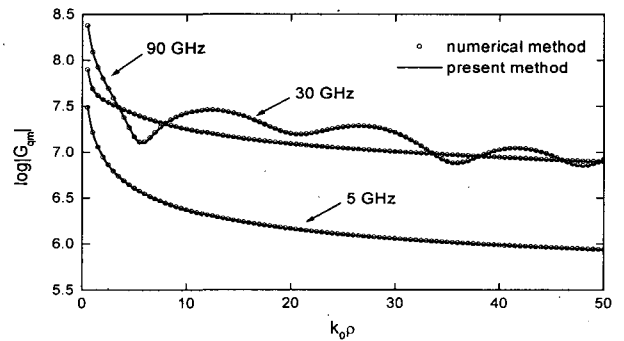


그림 4(b). 비유전율 2.33일때의 그린함수 G_{qm}
Fig. 4(b). Magnitude of G_{qm} for $\epsilon_r = 2.33$

정확한 공간영역 그린함수를 짧은 시간 내에 구할 수 있다.

그림 4는 그림 3의 구조에서 비유전율 $\epsilon_r = 2.33$, $h = 1.58\text{mm}$ 인 기판에서 관측점이 $z = 5 \times 10^{-4}$ 인 위치에 존재할 때, 10GHz, 30GHz, 90GHz의 주파수에서의 공간영역 그린함수 G_F^{xx} 와 G_{qm} 이다. 그림 5는 같은 조건에서 비유전율을 $\epsilon_r = 12.5$ 로 바꾼 경우에 대한 그린함수 G_F^{xx} 와 G_{qm} 이다. 그림에서와 같이 넓은 주파수영역과 넓은 거리영역에서 매우 정확한 결과를 얻을 수 있다. 수치해석 결과와의 오차한계는 0.4%이내이며 10,000개 지점의 계산시간은 6초이다.

2. 수평 전기 다이폴

(HED, Horizontal Electric Dipole)

이번에는 평판구조의 내부에 자기전원이 존재하는 경우에 대해 정확한 closed form 그린함수 방법을 이용하여 공간영역 그린함수를 구한다. 이러한 구조는 기본적인 마이크로 스트립 구조로서 계산된 그린함수는 마이크로스트립 선로의 해석이나 안테나의 해석에 유용하다.

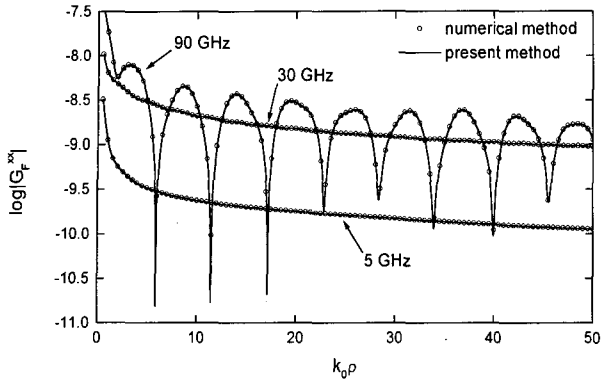


그림 5(a). 비유전율 12.5일때의 그린함수 G_F^{xx}
Fig. 5(a). Magnitude of G_F^{xx} for $\epsilon_r = 12.5$

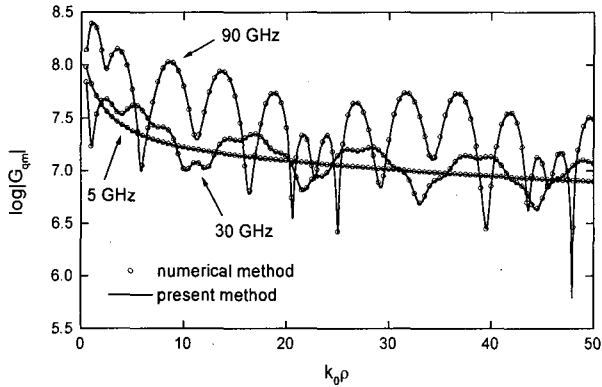


그림 5(b). 비유전율 12.5일때의 그린함수 G_{qm}
Fig. 5(b). Magnitude of G_{qm} for $\epsilon_r = 12.5$

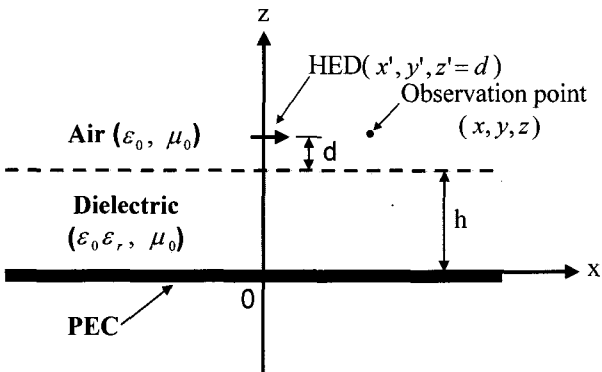


그림 6. 수평전기 다이폴이 포함된 평면형 다층구조
Fig. 6. Multi-Layered Medium with Horizontal Electric Dipole.

그림 6은 기판의 외부에 수평 전기 다이폴이 존재하는 구조이다. 전원점과 관측점이 기판 외부의 임의의 지점에 존재하는 경우에 대한 파수영역 그린함수는

$$G_A^{xx} = \frac{\mu_0}{j2k_{z0}} \left[e^{-jk_{z0}|z-d|} + R_{TE} e^{-jk_{z0}(z+2d)} \right] \quad (27)$$

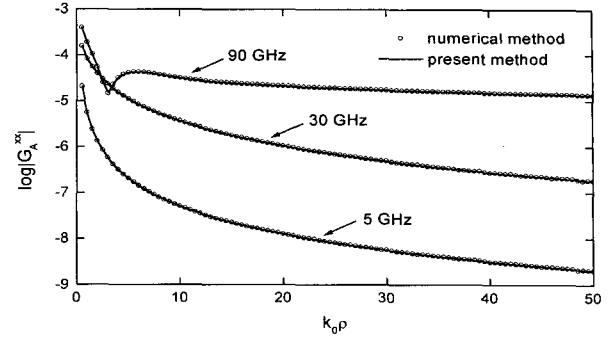


그림 7(a). 비유전율 2.33일때의 그린함수 G_A^{xx}
Fig. 7(a). Magnitude of G_A^{xx} for $\epsilon_r = 2.33$

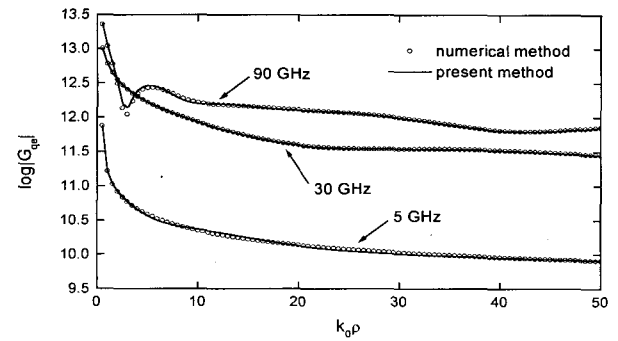


그림 7(b). 비유전율 2.33일때의 그린함수 G_{qe}
Fig. 7(b). Magnitude of G_{qe} for $\epsilon_r = 2.33$

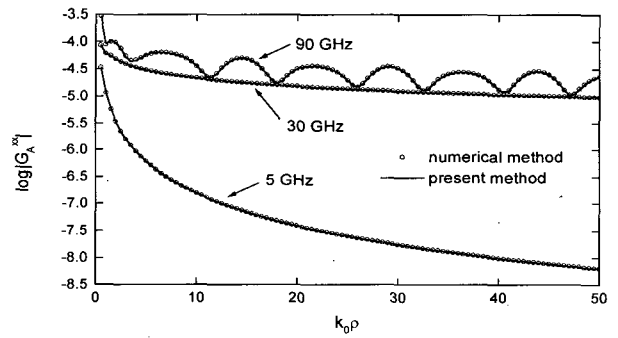


그림 8(a). 비유전율 12.5일때의 그린함수 G_A^{xx}
Fig. 8(a). Magnitude of G_A^{xx} for $\epsilon_r = 12.5$

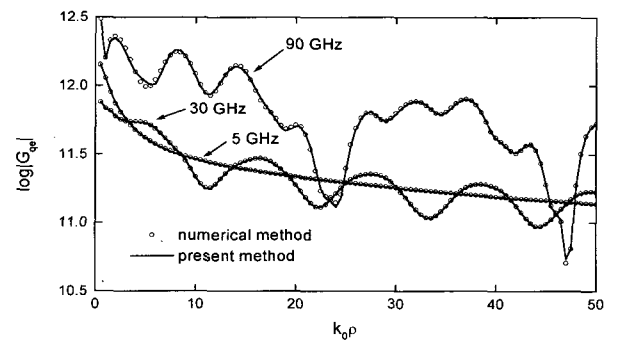


그림 8(b). 비유전율 12.5일때의 그린함수 G_{qe}
Fig. 8(b). Magnitude of G_{qe} for $\epsilon_r = 12.5$

$$G_{qe} = \frac{1}{j\beta k_{z0} \epsilon_0} \left\{ e^{-jk_{z0}|z-d|} + (R_{TE} + R_{qe}) e^{-jk_{z0}(z+2d)} \right\} \quad (28)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서

$$R_{TE} = - \frac{r_{TE}^{1,0} + e^{-\beta k_{z1} h}}{1 + r_{TE}^{1,0} e^{-\beta k_{z1} h}} \quad (29)$$

$$R_{qe} = \frac{k_{z0}^2}{k_p^2} \left[\frac{r_{TM}^{0,1} + e^{-\beta k_{z1} h}}{1 + r_{TM}^{0,1} e^{-\beta k_{z1} h}} + \frac{r_{TE}^{0,1} - e^{-\beta k_{z1} h}}{1 - r_{TE}^{0,1} e^{-\beta k_{z1} h}} \right] \quad (30)$$

이다.

식 (27)과 (28)은 식 (11)을 이용하여 무한적분을 포함하는 공간영역 그린함수로 표현할 수 있으며, 2.2절의 정확한 closed form 그린함수 방법을 이용하여 적분식을 계산할 수 있다. 그림 7은 그림 6의 구조에서 비유전율을 $\epsilon_r = 2.33$, $h = 1.58\text{mm}$ 인 기판에 대해 관측점과 전원점이 모두 원점에 위치할 때, 10GHz, 30GHz, 90GHz의 주파수에 대한 공간영역 그린함수 G_A^{xx} 와 G_{qe} 이다. 그림 8은 같은 조건에서 비유전율을 $\epsilon_r = 12.5$ 로 바꾼 경우에 대한 그린함수 G_A^{xx} 와 G_{qe} 이다. 그림에서와 같이 넓은 주파수영역과 넓은 거리영역에서 매우 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 수치해석 결과와의 오차 한계는 0.8%이내이다.

IV. 결론

일반적인 전원을 포함하는 평판구조에 대한 공간영역 그린함수의 계산을 위한 정확한 closed-form 그린함수 계산방법을 제안하였다. 제안된 방법을 기판 내부 임의의 지점에 HMD가 위치하는 경우 및 기판의 외부에 HED가 존재하는 경우에 적용시켜 공간영역 그린함수를 구하였다. 계산된 공간영역 그린함수는 수치해석 방법을 이용하여 계산된 그린함수와 비교하여 거의 정확하게 일치하였다.

Closed-form 그린함수에 의한 full-wave 해석은 무한적분에 의한 계산시간을 단축할 수 있으며, 전송선로의 물리적 특성을 파악하여 불연속에 대한 정확한 모델링 및 해석이 가능하도록 해준다. 또한 전자파의 복사 특성 연구 및 안테나 모델링 및 해석을 위한 시뮬레이터의 개발에도 응용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. R. Mosig, "integral equation technique", T. Itoh, Ed., in Numerical Techniques for Micro wave and Millimeter-wave Passive Structu res. New York: Wiley, pp. 133-207, 1989.
- [2] W. C. Chew, Waves and Fields in Inhomogeneo us Media, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [3] Y. L. Chow, J. J. Yang, D. H. Fang, and G. E. Howard, "Closed-form spatial Green's function for the thick substrate", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-39, pp. 588-592, 1991.
- [4] R. A. Kipp and C. H. Chan, "Complex Image Method for Sources in Bounded Regions of Mult ilayer Structures", IEEE Trans. Microwave Theo ry Tech., vol. MTT-42, pp. 860-865, May 1994.
- [5] G. Dural, M. I. Aksun, "Closed-form Green's functions for general sources and stratified me dia", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-43, pp. 1545-1551, 1995.
- [6] M. I. Aksun, "A Robust Approach for the Derivation of Closed-form Green's Functions", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-44, pp. 651-658, May 1996.
- [7] 강연덕, 이택경, "코플래너 도파로 해석을 위한 정 확한 closed-form 그린함수", 전자공학회는논문지, 제37권, TC편, 제11호, pp. 609-617, 2000년 11월.
- [8] Sung-Chan Song, Yeon-duk Kang, Taek-Kyung Lee, "Fast Analysis of CPW Structure by Using The Green's Function from Real-axis Integration Method", Asia-Pacific Microwave Conference, vol. 2, Seoul, Nov. 2003.

저 자 소 개



강 연 덕(정회원)

1993년 2월 한국항공대학교
항공전자공학과(공학사)
1996년 2월 한국항공대학교
항공전자공학과(공학석사)
2000년 8월 한국항공대학교
항공전자공학과(공학박사)

2000년 9월 ~ 현재 : LG 이노텍 전문화그룹
선임연구원

<주관심분야: 레이더 송수신기, 초고주파 소자,
안테나 등>



이 택 경(평생회원)

1983년 2월 고려대학교
전자공학과 졸업(공학사)
1985년 2월 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 졸업
(공학석사)
1990년 2월 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 졸업
(공학박사)

1990년 3월~1991년 2월 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 연구원

1990년 5월~1991년 4월 Univ. of Texas at
Austin, Post-Doctoral Fellow

1991년 9월~1992년 2월 한국과학기술원
정보전자 연구소 연구원

1992년 3월~현재 한국항공대학교 항공전자 및
정보통신공학부 교수

2001년 7월~2002년 7월 Univ. of Illinois,
Urbana-Champaign, Associate
Visiting Research Professor

<주관심분야: 마이크로파, 안테나, 전자파 해석,
레이더>