

Green 함수와 GPOF를 이용한 손실 매질에 매설된 금속체 표면 전류 분포 해석

Analysis of Surface Current on a Buried Metallic Object in a Lossy Medium Using Green's Function and GPOF Method

장 호 철

Ho-Chul Jang

요 약

본 논문에서는 자유공간과 손실 매질로 구성된 2층 구조에서 매설 금속체 표면의 유도 전류 분포를 효율적으로 해석하기 위한 방법을 제시한다. 손실 매질 Green 함수의 Sommerfeld 적분을 GPOF 기법을 이용하여 닫힌 형태로 근사화하고, 이를 MoM에 적용하여 매설 금속체의 유도 전류 분포를 해석하였다. 제안된 닫힌 형태 전개는 기존 수치적분 전개와 비교하여 정확성을 검증하였으며, 금속봉, 정사각형 금속판 및 직삼각형 금속판에 대한 해석을 통해 제안된 방법의 적용 가능성을 확인하였다.

Abstract

This paper presents an efficient method for analyzing the induced current distribution on the surface of buried metallic objects in a two-layer structure composed of free space and a lossy medium. The Sommerfeld integral of the Green's function in the lossy medium is approximated in a closed form using the generalized pencil of function (GPOF) technique, and the resulting formulation is applied to the method of moments (MoM) to analyze the induced current distribution on buried metallic objects. The accuracy of the proposed closed-form electric field is verified by comparison with the conventional numerical-integration-based electric field. Furthermore, the applicability of the proposed method is demonstrated through the analysis of induced current distributions on various buried metallic structures, including a metallic rod, a square metallic plate, and a triangular metallic plate.

Key words: GPOF, MoM, Sommerfeld Integral

I. 서 론

본 논문에서는 자유공간과 손실매질로 구성된 2층 구조에서 매설 금속체 표면의 유도 전류 분포를 효율적으

로 해석하기 위한 방법을 제시한다. 손실 매질 Green 함수는 Sommerfeld 적분 형태로 표현되며, 수치적분 과정에서 높은 계산 비용과 수치적 불안정성이 발생할 수 있다. 기존 연구들은 주로 Sommerfeld 적분의 수치 계산 및 전

수원특례시(Suwon Special City)

· Manuscript received April 13, 2026 ; Revised April 21, 2026 ; Accepted July 3, 2026. (ID No. 20260413-030)

· Corresponding Author: Ho-Chul Jang (e-mail: jhc2588@daum.net)

계 해석에 초점을 두고 있다. 이를 개선하기 위해 본 연구에서는 GPOF 기법을 이용하여 Sommerfeld 적분을 닫힌 형태로 근사화하였다. 또한 도출된 Green 함수를 MoM에 적용하여 매질 금속체의 유도 전류 분포를 해석하였으며, 수치적분 결과와의 비교를 통해 제안된 전개 표현식의 정확성을 검증하였다. 이를 바탕으로 다양한 형상의 매질 금속체에 대한 유도 전류 분포를 분석하여 제안된 방법의 적용 가능성을 확인하였다.

II. 본 론

2-1 TM 평면파와 손실 매질 Green 함수 전개

2-1-1 손실 매질 내 TM(Transverse Magnetic) 평면파

TM 평면파가 자유공간에서 손실 매질로 입사할 때, 입사 전계와 투과 전계는 다음과 같이 표현된다^[1].

$$E_{0x} = -E_0 \cos \theta_i e^{ik_0(x \sin \theta_i - z \cos \theta_i)} \quad (1)$$

$$E_{1x} = \frac{-2E_0 \cos \theta_i \sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta_i}}{\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta_i} + \epsilon_{r1} \cos \theta_i} e^{ik_0(x \sin \theta_i - z \sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2 \theta_i})} \quad (2)$$

2-1-2 x방향 HED 있는 영역 Green 함수 전개

x 방향 HED에 의해 생성되는 전계는 Green 함수를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다^{[2]-[4]}.

$$E_{1x} = i\omega Idl \left(G_1^{xx} + \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} G_1^q \right) \quad (3)$$

$$E_{1y} = \frac{iIdl}{\omega} \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} G_1^q \quad (4)$$

$$E_{1z} = i\omega Idl \left(G_1^{zx} + \frac{1}{\omega^2} \frac{\partial^2}{\partial z \partial x} G_1^q \right) \quad (5)$$

2-1-3 x방향 HED 있는 영역 Spectral Green 함수

자유공간과 손실 매질로 구성된 2층 구조에서 x 방향 HED가 있는 손실 매질 내 Spectral Green 함수는 경계 조건 및 전파상수를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\widetilde{G}_1^q = \frac{i}{2\epsilon_1 k_{1z}} e^{ik_{1z}|z+d_1|} + \frac{i}{2\epsilon_1 k_{1z}} (R_{TE} + D_{TMTE}) e^{-ik_{1z}z} \quad (6)$$

$$\widetilde{G}_1^{xx} = \frac{i\mu_1}{2k_{1z}} \left(e^{ik_{1z}|z+d_1|} + R_{TE} e^{-ik_{1z}z} \right) \quad (7)$$

$$\ast D_{TMTE} = \frac{2k_{1z}^2 (\mu_1 \epsilon_1 - \mu_0 \epsilon_0) e^{ik_{1z}d_1}}{(\mu_0 k_{1z} + \mu_1 k_{0z})(\epsilon_0 k_{1z} + \epsilon_1 k_{0z})}, \quad R_{TE} = \frac{\mu_0 k_{1z} - \mu_1 k_{0z}}{\mu_0 k_{1z} + \mu_1 k_{0z}} e^{ik_{1z}d_1}$$

2-2 GPOF 적용한 복소 영상 추출법

x방향 HED에 대한 손실 매질 Green 함수는 Sommerfeld 적분 형태로 표현되며, 적분에 포함된 특이점으로 인해 효율적인 수치해석이 어렵다. 본 논문에서는 GPOF 기법을 적용하여 Sommerfeld 적분을 닫힌 형태로 근사화함으로써 복잡한 수치적분 없이 전계를 계산할 수 있는 Green 함수를 도출하였다. 도출된 Green 함수는 준정적 영상, 표면파 및 복소 영상 성분으로 구성된다^{[5],[6]}.

2-2-1 준정적 영상(Quasi Static Images) 추출

준정적 영상은 근거리 영역에서 주요 기여 성분이며, Sommerfeld 적분에서 z방향 전파상수는 $k_{1z} \approx k_{0z}$ 근사화되며 Green 함수는 다음과 같이 유도된다($0 \geq z \geq -d_1$).

$$G_1^q = \frac{i}{8\pi^2 \epsilon_1} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{k_{1z}} e^{ik_x x + ik_y y} e^{ik_{1z}(z+d_1)} dk_x dk_y + \frac{i}{8\pi^2 \epsilon_1} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{(R_{TE} + D_{TMTE})}{k_{1z}} e^{ik_x x + ik_y y} e^{-ik_{1z}z} dk_x dk_y \quad (8)$$

$$G_1^{xx} = \frac{i\mu_1}{8\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{k_{1z}} e^{ik_x x + ik_y y} e^{ik_{1z}(z+d_1)} dk_x dk_y + \frac{i\mu_1}{8\pi^2} \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{R_{TE}}{k_{1z}} e^{ik_x x + ik_y y} e^{-ik_{1z}z} dk_x dk_y \quad (9)$$

식 (6) 및 식 (7)의 D_{TMTE} , R_{TE} 는 식 (10) 및 식 (11)과 같이 근사화된다.

$$R_{TE(0)} = 0 \quad (10)$$

$$D_{TMTE(0)} = \frac{\epsilon_{r1} - 1}{\epsilon_{r1} + 1} e^{ik_{1z}d_1} \quad (11)$$

2-2-2 표면파(Surface Wave) 추출

무손실 매질에서는 Sommerfeld 적분의 극점 기여를 유수(residue) 정리로 계산할 수 있으나, 손실 매질에서는 극점 처리가 복잡하므로 GPOF 기법을 이용하여 Sommerfeld 적분을 근사화하였다.

2-2-3 복소 영상(Complex Images) 추출

복소 영상은 중간 영역에서 주요 기여 성분으로, Green 함수에서 준정적 영상과 표면파 성분을 제외한 잔여 항을 지수함수 급수의 복소 영상 계수를 산출하는 것으로 Sommerfeld 적분에 포함된 극점의 영향을 회피하기 위하여 손실 매질의 z방향 전파상수를 식 (12)와 같이 변형하였으며, 이에 따른 k_ρ 적분 경로는 그림 1로 표현된다.

$$k_{1z} = k_0 \sqrt{\epsilon_{r1}} \left(1 - \frac{t}{T_0} \right) + ik_0 \left(\frac{\sqrt{T_0^2 - (\epsilon_{r1} - 1)}}{T_0} \right) t \quad (12)$$

$$\ast \quad 0 \leq t \leq T_0$$

$$\sum_{n=1}^N A_n e^{k_{1z} B_n} \quad (13)$$

$$A_n = a_n e^{-k_0 \sqrt{\epsilon_{r1}} B_n} \quad (14)$$

$$B_n = \frac{b_n T_0}{k_0 (i \sqrt{T_0^2 - (\epsilon_{r1} - 1)} - \sqrt{\epsilon_{r1}})} \quad (15)$$

식 (13)은 지수함수 급수이고, 식 (14) 및 식 (15)은 손실 매질에서 복소 영상법으로 추출된 지수함수 급수의 복소 영상 계수이다.

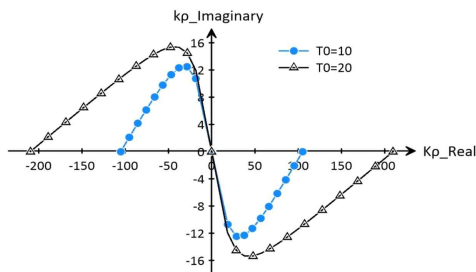


그림 1. 변형된 k_ρ 적분 경로

Fig. 1. Deformed k_ρ integration contour.

$$R_{TE} - R_{TE(0)} = \frac{\mu_0 k_{1z} - \mu_1 k_{0z}}{\mu_0 k_{1z} + \mu_1 k_{0z}} e^{ik_{1z} d_1} \quad (16)$$

$$D_{TMTE} - D_{TMTE(0)} = \frac{2k_{1z}^2 (\mu_1 \epsilon_1 - \mu_0 \epsilon_0) e^{ik_{1z} d_1}}{(\mu_0 k_{1z} + \mu_1 k_{0z})(\epsilon_0 k_{1z} + \epsilon_1 k_{0z})} - \frac{(\epsilon_{r1} - 1)}{(\epsilon_{r1} + 1)} e^{ik_{1z} d_1} \quad (17)$$

식 (16) 및 식 (17)은 손실 매질 Green 함수의 복소 영상 계수 추출식으로 D_{TMTE} 과 R_{TE} 항에 식 (10) 및 식 (11)은 준정적 영상 성분을 제외하였다.

식 (18) 및 식 (19)는 복소 영상으로 추출한 지수함수 급수를 포함한 손실 매질의 닫힌 Green 함수이다.

$$G_1^q = \frac{e^{ik_1 r_1'}}{4\pi \epsilon_1 r_1'} + \left(\frac{\epsilon_{r1} - 1}{\epsilon_{r1} + 1} \right) \frac{e^{ik_1 r_1''}}{4\pi \epsilon_1 r_1''} + \frac{1}{4\pi \epsilon_1} \sum_{n=1}^N A_n \frac{G_n^q e^{ik_1 r_n^{G_q}}}{r_n^{G_q}} \quad (18)$$

$$G_1^{xx} = \frac{\mu_1 e^{ik_1 r_1'}}{4\pi r_1'} + \frac{\mu_1}{4\pi} \sum_{n=1}^N A_n \frac{G_n^{xx} e^{ik_1 r_n^{G_{xx}}}}{r_n^{G_{xx}}} \quad (19)$$

$$\ast \quad r_1' = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + d_1)^2}, \quad r_1'' = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - d_1)^2}$$

$$r_n^{G_{xx}} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + iB_n^{G_{xx}})^2}, \quad r_n^{G_q} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + iB_n^{G_q})^2}$$

식 (20)~식 (22)는 식 (3)~식 (5), 식 (18) 및 식 (19)로부터 도출한 닫힌 형태 Green 함수를 이용하여 유도한 손실 매질의 직각좌표계 전개이다. Sommerfeld 적분 형태의 전계를 닫힌 형태로 표현한 것으로 수치적분 과정을 생략함으로써 전자파 해석의 효율성을 향상시킬 수 있다.

$$E_{1x} = \frac{iIdl\omega\mu_1}{4\pi} \frac{e^{ik_1 r_1'}}{r_1'} + \frac{iIdl\omega\mu_1}{4\pi} \sum_{n=1}^N A_n \frac{G_n^{xx} e^{ik_1 r_n^{G_{xx}}}}{r_n^{G_{xx}}} + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \frac{e^{ik_1 r_1'}}{(r_1')^2} \left[ik_1 - \frac{1 - (ik_1)^2 x^2}{r_1'} - \frac{3ik_1 x^2}{(r_1')^2} + \frac{3x^2}{(r_1')^3} \right] + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_{r1} - 1}{\epsilon_{r1} + 1} \right) \frac{e^{ik_1 r_1''}}{(r_1'')^2} \left[ik_1 - \frac{1 - (ik_1)^2 x^2}{r_1''} - \frac{3ik_1 x^2}{(r_1'')^2} + \frac{3x^2}{(r_1'')^3} \right] + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \sum_{n=1}^N A_n \frac{G_n^{xx} e^{ik_1 r_n^{G_{xx}}}}{(r_n^{G_{xx}})^2} \left[ik_1 - \frac{1 - (ik_1)^2 x^2}{r_n^{G_{xx}}} - \frac{3ik_1 x^2}{(r_n^{G_{xx}})^2} + \frac{3x^2}{(r_n^{G_{xx}})^3} \right] \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
 E_{1y} = & \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \frac{xy e^{ik_1 r_1}}{(r_1')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_1'} + \frac{3}{(r_1')^2} \right] \\
 & + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_{r1}-1}{\epsilon_{r1}+1} \right) \frac{xy e^{ik_1 r_1}}{(r_1')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_1'} + \frac{3}{(r_1')^2} \right] \\
 & + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \sum_{n=1}^N A_n \frac{G_n^q xy e^{ik_1 r_n}}{(r_n')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_n'} + \frac{3}{(r_n')^2} \right] \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{1z} = & \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \frac{x(z+d_1)e^{ik_1 r_1}}{(r_1')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_1'} + \frac{3}{(r_1')^2} \right] \\
 & + \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_{r1}-1}{\epsilon_{r1}+1} \right) \frac{x(z-d_1)e^{ik_1 r_1}}{(r_1')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_1'} + \frac{3}{(r_1')^2} \right] \\
 & - \frac{iIdl}{4\pi\omega\epsilon_1} \sum_{n=1}^N A_n \frac{x(z+iB_n)e^{ik_1 r_n}}{(r_n')^3} \left[(ik_1)^2 - \frac{3ik_1}{r_n'} + \frac{3}{(r_n')^2} \right] \quad (22)
 \end{aligned}$$

$\ast r_n = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+iB_n)^2}$

2-2-4 수치적분과 GPOF 적용한 닫힌 전계 비교

그림 2(a) 및 그림 2(b)는 상대 유전율 $4.5+i0.7$ 을 갖는 손실 매질 내 전류 모멘트 $1[\text{mA}\cdot\text{m}]$, 주파수 500 MHz x 방향 HED

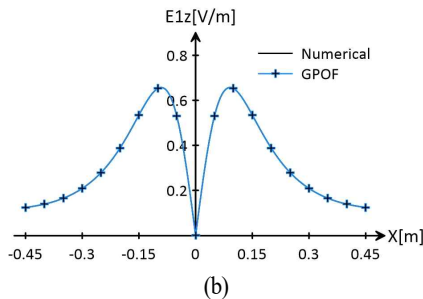
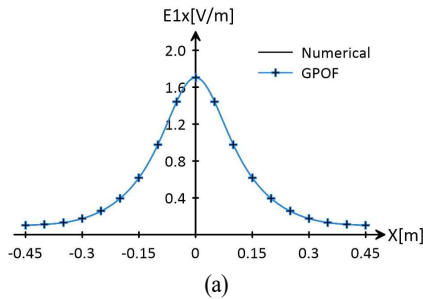


그림 2. (a) 수치적분과 GPOF 적용한 전계(E_{1x}) 비교, (b) 수치적분과 GPOF 적용한 전계(E_{1z}) 비교
 Fig. 2. (a) Comparison of E_{1x} : numerical integration vs GPOF, (b) comparison of E_{1z} : numerical integration vs GPOF.

가 깊이 30 cm 에 매설된 경우, HED 상부 15 cm 지점에서 수치적분 전계와 GPOF 기반 닫힌 전계 비교한 결과로 두 전계는 전반적으로 잘 일치하며, HED 매설 위치를 기준으로 반경 1λ 이내에선 오차는 1% 이하이다^{[3],[6]}.

2-3 손실 매질에 매설된 금속체의 유도 전류 분포 해석

매설된 금속체 표면에 유도 전류 분포 해석을 위해 MoM(moment of methods)을 적용하였다^{[7]~[9]}.

2-3-1 점 정합법(Point Matching Method)

$$[a_{mn}][I_n] = [b_m] \quad (23)$$

손실 매질의 임피던스 행렬($[a_{mn}]$)과 금속체 표면 투과파 전계 행렬($[b_m]$)로부터 금속체 표면 유도 전류 분포($[I_n]$)을 해석하였으며, 행렬의 a_{mn} 과 b_m 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_{mn} = & \Delta x_m i\omega \int_{x_{n-1/2}}^{x_{n+1/2}} G_{1x_m}^x dx' \\
 & - \frac{1}{i\omega} \left[\int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{G_{1x_{m+1/2}}^q}{\Delta x_{n-1/2}} dx' - \int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{G_{1x_{m+1/2}}^q}{\Delta x_{n+1/2}} dx' \right] \\
 & + \frac{1}{i\omega} \left[\int_{x_{n-1}}^{x_n} \frac{G_{1x_{m-1/2}}^q}{\Delta x_{n-1/2}} dx' - \int_{x_n}^{x_{n+1}} \frac{G_{1x_{m-1/2}}^q}{\Delta x_{n+1/2}} dx' \right] \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$b_m = \frac{-2E_0 \cos\theta_i \sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2\theta_i}}{\sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2\theta_i} + \epsilon_{r1} \cos\theta_i} e^{-ik_0(z-z_d) \sqrt{\epsilon_{r1} - \sin^2\theta_i}} \quad (25)$$

$$\ast z_d = \frac{d \sin\theta_i \sqrt{\epsilon_{r1}^2 - \sin^2\theta_i}}{\epsilon_{r1}}$$

2-3-2 금속체 표면 유도 전류 분포

금속체가 상대 유전율 $4.5+i0.7$ 을 갖는 손실 매질 내 깊이 30 cm 에 매설된 것으로 가정하였으며, 자유 공간으로부터 주파수 500 MHz , 전계 크기 $1[\text{V/m}]$ TM 평면파가 입사하는 조건에서 해석하였다.

그림 3(a)는 손실 매질 내 길이 10 cm 금속봉이 매설된 구조이다. 그림 3(b)는 TM 평면파의 입사각(ϕ_i) 0° , 30° ,

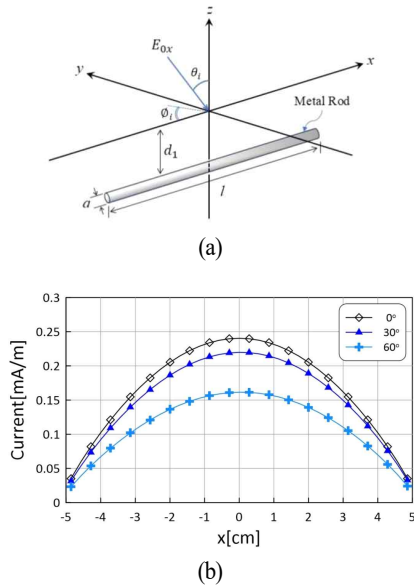


그림 3. (a) 매설된 금속봉 구조, (b) 금속봉 표면 전류 분포
Fig. 3. (a) Structure of a buried metal rod, (b) surface current on a buried metal rod

60°에 따른 금속봉 표면의 유도 전류 분포를 나타낸다. 입사각에 따라 전류 분포 특성 변화를 확인할 수 있다.

그림 4(a)는 손실 매질 내에 각 변의 길이 10 cm인 매설된 정사각형 금속판 구조를 나타낸다. 그림 4(b) 및 그림 4(c)는 TM 평면파의 입사각(ϕ_i) 0°, 45°에 따른 정사각형 금속판 표면의 유도 전류 분포를 나타낸다. 입사각 변화에 따라 금속체 표면의 유도 전류 분포가 달라짐을 확인할 수 있으며, 이는 입사파 전계의 방향 변화에 기인한다.

그림 5(a)는 손실 매질 내에 각 변의 길이 10 cm인 매설된 직삼각형 금속판 구조를 나타낸다. 그림 5(b) 및 그림 5(c)는 TM 평면파의 입사각(ϕ_i) 0°, 45°에 따른 직삼각형 금속판 표면의 유도 전류 분포를 나타낸다. 입사각 변화에 따라 금속체 표면의 유도 전류 분포가 달라짐을 확인할 수 있으며, 이는 입사파 전계의 방향 변화에 기인한다.

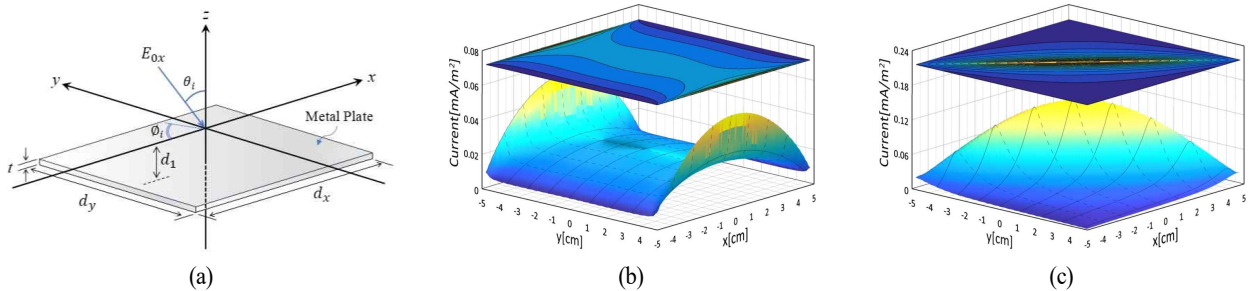


그림 4. (a) 매설된 정사각형 금속판 구조, (b) 정사각형 금속판 표면 전류 분포($\phi_i=0^\circ$), (c) 정사각형 금속판 표면 전류 분포($\phi_i=45^\circ$)
Fig. 4. (a) Structure of a buried square metal plate, (b) surface current on a square metal plate ($\phi_i=0^\circ$), (c) surface current on a square metal plate ($\phi_i=45^\circ$).

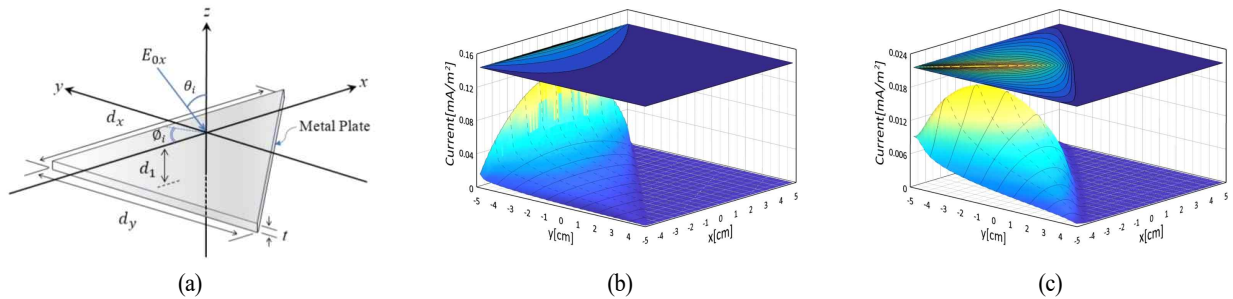


그림 5. (a) 매설된 직삼각형 금속판 구조, (b) 직삼각형 금속판 표면 전류 분포($\phi_i=0^\circ$), (c) 직삼각형 금속판 표면 전류 분포($\phi_i=45^\circ$)
Fig. 5. (a) Structure of a buried triangular metal plate, (b) surface current on a triangular metal plate ($\phi_i=0^\circ$), (c) surface current on a triangular metal plate ($\phi_i=45^\circ$).

III. 결 론

본 논문에서는 자유공간과 손실 매질로 구성된 2층 구조에서 매설된 금속체 표면의 유도 전류 분포 해석을 위해 GPOF 기반 닫힌 Green 함수를 적용하였다. Sommerfeld 적분 형태의 Green 함수를 닫힌 형태로 근사화함으로써 수치적분 과정에서 발생하는 계산 부담과 특이점에 의한 영향을 감소시키고 전계 계산의 효율성을 향상시켰다. 제안된 닫힌 형태 전계는 기존 수치적분 전계와 비교하여 높은 일치성을 나타내었으며, 이를 기반으로 MoM을 적용하여 금속봉, 정사각형 금속판 및 직삼각형 금속판에 대한 유도 전류 분포를 해석하였다. 해석 결과 다양한 형상의 매설 금속체에서 안정적인 전류 분포를 확인하였으며, 제안된 방법의 적용 가능성을 검증하였다.

향후, 본 연구 결과를 기반으로 다층 손실 매질 구조 및 복잡한 3차원 매설 금속체 문제로 확장하고자 한다.

References

[1] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, Boston, MA, Addison-Wesley, 1989.
[2] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, Piscataway, NJ, IEEE Press, 1995.

[3] G. Dural, M. I. Aksun, "Closed-form Green's functions for general sources and stratified media," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 43, no. 7, pp. 1545-1552, Jul. 1995.
[4] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, Hoboken, NJ, Wiley Interscience, 1990.
[5] J. J. Yang, Y. L. Chow, "Discrete complex images of a three-dimensional dipole above and within a lossy ground," *IEEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, vol. 138, no. 4, pp. 319-326, Aug. 1991.
[6] Y. L. Chow, J. J. Yang, D. G. Fang, and G. E. Howard, "A closed-form spatial Green's function for the thick microstrip substrate," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, no. 3, pp. 588-592, Mar. 1991.
[7] R. Bancroft, *Understanding Electromagnetic Scattering using the Moment Method: A Practical Approach*, Norwood, MA, Artech House, 1996.
[8] R. F. Harrington, *Field Computation by Moment Methods*, Oxford, Oxford University Press, 1992.
[9] T. J. Cui, W. C. Chew, Fast evaluation of sommerfeld integrals for EM scattering and radiation by three-dimensional buried objects, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 2, Mar. 1999.

장 호 철 [수원특례시/주무관]

<https://orcid.org/0009-0001-6093-5313>



1999년 2월: 대구대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2005년 10월~2019년 1월: 한국전기안전공사 전기안전연구원

2019년 1월~현재: 수원특례시 주무관

[주 관심분야] 전자파 수치해석, EMC