

Multi-Level Fast Multipole Method와 반복적 물리 광학법을 이용한 대규모 복합 임피던스 및 유전체 매질 전자기 산란 해석

Large Complex Impedance and Dielectric Inhomogeneous Structure Scattering Analysis Based on Multi-Level Fast Multipole Method and Iterative Physical Optics

남 정 훈 · 유 정 운 · 고 일 석

Jeong-Hun Nam · Jeong-Un You · Il-Suek Koh

요 약

임피던스 매질과 유전체로 구성된 대규모 복합 매질의 전자기 산란 해석을 위한 MoM 행렬 방정식 어셈블리방법을 제안한다. 이산화된 산란체 표면의 삼각형 메쉬(mesh)마다 매질 정보를 할당하며, 이를 기반으로 복합 매질 산란체 표면 간의 상호작용을 계산한다. 하나의 edge에 할당된 삼각형의 개수가 2개 이상인 경우 half-RWG 기저함수를 할당하여 Z행렬 요소를 계산한다. IPO는 매질에 따라 적절한 반사계수를 고려하여 산란체 표면 위에서 지역적 평면 근사화를 통해 해석한다. 제안한 MoM과 IPO를 상용 툴인 FEKO, CST와 비교함으로써 수치적인 정확도를 검증한다.

Abstract

We propose a method of moments (MoM) matrix assembly method for electromagnetic scattering analysis of large-scale complex materials composed of impedance and dielectric media. Material information is assigned to each triangular mesh of the discretized surface, and the interaction among the meshes is calculated. If several meshes are assigned to one edge, the half-Rao-Wilton-Glisson (RWG) basis function is used to calculate the Z matrix elements. Iterative physical optics (IPO) analysis is performed based on the local tangential approximation for the scatterer surface and the appropriate reflection coefficient of each mesh. The numerical accuracy is verified by comparing the proposed MoM and IPO results with those of the commercial tools FEKO and CST Studio Suite.

Key words: Multi-Level Fast Multipole Method, Iterative Physical Optics, Composed Media.

I. 서 론

임피던스 경계조건(impedance boundary condition, IBC)
이 적용된 물체와 유전체(dielectric) 같은 복합 매질 및 임

의의 3D 형상을 갖는 물체의 전자기 산란 해석은 안테나
설계^[1] 및 마이크로파 시스템 기술^[2]과 같은 많은 응용체
계에서 이용된다. 산란체의 산란 해석 방법에는 다양한
방법이 있으며, 다중반사파나 회절과 등을 고려하기 위해

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 스텔스 대형 플랫폼 전파해석 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD200047JD).」
인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

· Manuscript received August 31, 2021 ; Revised September 27, 2021 ; Accepted October 21, 2021. (ID No. 20210831-072)

· Corresponding Author: Il-Suek Koh (e-mail: ikoh@inha.ac.kr)

반복적 물리 광학법(iterative physical optics, IPO), SBR(shooting and bouncing rays)^{[3],[4]}와 PTD(physical theory of diffraction)^{[5],[6]} 같은 방법들이 사용된다. 하지만 위 방법들은 산란체를 해석하는 데 정확도에 한계가 있다. 정확한 산란 해석을 위해 FEM(finite element method)과 MoM(method of moments)과 같은 방법이 있지만, 연산량과 메모리의 사용량이 매우 높다. 따라서 대규모 산란체의 산란 해석을 위해 MLFMM(multi-level fast multipole method)과 같은 수치해석 기법이 주로 사용된다^{[2],[7]}. 하지만, 하나의 edge에 서로 다른 매질의 메쉬가 존재하는 경우인 junction edge에서 다중 복합 매질 구조의 산란 문제를 다루는 것은 여전히 많은 연구가 진행되고 있지만^[8], 서로 다른 매질 간의 내/외부 전류에 의한 경계 조건뿐만 아니라, junction edge에서 전류의 흐름과 관련된 키르히호프의 법칙(Kirchhoff's Law)도 고려되어야 하는 문제점이 있다^[9]. PEC(perfect electric conductor)와 유전체가 존재하는 물체의 전자기 산란 해석을 위해 EFIE(electric field integral equation)-CFIE(combined field integral equation)에 가상의 RWG(Rao-Wilton-Glisson) 기저 함수를 할당하거나^{[2],[10]} junction 영역에 가상의 메쉬 세트(mesh set)^[11]를 이용한 방법이 제안되었지만, 이 경우 기존의 표면 적분 방정식의 복잡도가 증가하며, 메쉬 세트로 인해 미지수의 개수가 증가하여 메모리와 시뮬레이션 시간이 증가한다. 또한, EFIE-CFIE로 PEC가 아닌 임피던스 물체인 경우 산란 해석에 어려움이 존재한다.

본 논문에서는 유전체와 임피던스 매질로 구성된 복합 물체의 전자기 산란 해석을 위해 junction edge에서의 RWG 기저함수를 고려한 표면 적분 방정식(surface integral equation, SIE) 기반 MoM의 어셈블리 방법을 II절에서 제시하고, 유전체 해석을 위한 IPO(Iterative physical optics)를 III에서 설명하며, IV에서는 앞서 제안된 방법을 통해 NASA 아몬드 및 비행체와 같은 대규모 복합 매질 시뮬레이션을 MLFMM 및 IPO와 상용 툴인 FEKO 및 CST와 비교/검증한다.

II. 다중 복합 매질의 MoM 적분 방정식

2-1 유전체 및 임피던스 매질의 적분 방정식

그림 1은 다중 복합 매질로 구성된 임의의 3차원 물체

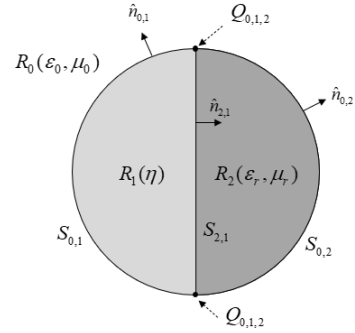


그림 1. 다중 복합 매질 물체

Fig. 1. Multiple complex material objects.

를 보여준다. R_i ($i=0,1,2$)는 각 균질(homogeneous) 물체의 영역이며, R_0 , R_1 , 그리고 R_2 는 각각 자유 공간, 임피던스 매질, 유전체이며, $S_{i,j}$ 는 R_i 와 R_j 영역 사이의 표면(surface)을 나타낸다. $\hat{n}_{i,j}$ 는 $S_{i,j}$ 에서 R_i 를 향하는 법선 벡터이며, $\hat{n}_{i,j} = -\hat{n}_{j,i}$ 이다. i 는 산란체 표면 외부 매질, j 는 내부 매질 색인(index)를 나타내며, Q_q 에서 q 는 R_i 매질들의 junction에서 색인들의 세트이다.

MoM의 경우, IBC 물체와 유전체로 구성된 복합 매질의 전자기 산란 해석을 위해 각각의 EFIE와 MFIE(magnetic field integral equation)가 선형 결합된 CFIE가 필요하다.

$$\begin{aligned}
 Y_0 \vec{E}^{inc} &= jk_0 L_0(\vec{J}_{e2}) + Y_0 K_0(\vec{J}_{m2}) + \frac{Y_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times \vec{J}_{m2} \cdots \\
 &\quad + jk_2 L_2(\vec{J}_{e2}) + Y_2 K_2(\vec{J}_{m2}) - \frac{Y_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times \vec{J}_{m2} \\
 Z_0 \vec{H}^{inc} &= jk_0 L_0(\vec{J}_{m2}) - Z_0 K_0(\vec{J}_{e2}) - \frac{Z_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times \vec{J}_{e2} \cdots \\
 &\quad + jk_2 L_2(\vec{J}_{m2}) - Z_2 K_2(\vec{J}_{e2}) + \frac{Z_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times \vec{J}_{e2} \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)은 유전체 표면($S_{0,2}$)에서의 tangential(T)-EFIE와 T-MFIE이며^[12], $e^{j\omega t}$ 를 가정한다. 또한, 기저함수와 동일한 테스트함수(testing function)를 사용하는 Galerkin 방법을 이용한다^{[12],[13]}. 유전체 적분방정식은 CTF(combined tangential formulation) 방법을 이용하여 식 (1)과 같은 적분 방정식을 생성한다^[12]. 각 변수의 하첨자 0과 2는 각각 유전체 표면 외부와 내부 매질의 색인을 나타내며, \vec{E}^{inc} 와 \vec{H}^{inc} 는 각각 입사파의 전기장과 자기장이고, k 는 파수(wave number), Z 는 각 매질에서의 특성 임피던스이며, $Y=1/Z$

이다. $L(\cdot)$ 과 $K(\cdot)$ 은 각각 L-, K-operator이며, \vec{J}_{e2} 와 \vec{J}_{m2} 은 유전체 표면 등가법칙(surface equivalent theorem)을 만족하는 전류와 자류이다^[12].

임피던스 매질은 산란체 내부로 전파가 투과하지 않아, 식 (1)에서 외부에 관한 적분 방정식에 임피던스 경계 조건($\vec{J}_{m1} = -\eta Z_{02} \hat{n} \times \vec{J}_{e1}$)을 적용하여^[14] 식 (2)와 같이 적분 방정식을 계산한다.^[15] η 는 매질의 정규화된 임피던스(normalized impedance), \vec{J}_{e1} 과 \vec{J}_{m1} 은 임피던스 매질의 표면 전류 및 자류이다.

$$\begin{aligned} Y_0 \vec{E}^{inc} &= jk_0 L_0(\vec{J}_{e1}) + \eta \vec{J}_{e1} + Y_0 K_0(\vec{J}_{m1}) - \frac{Y_0}{2} \hat{n}_{0,1} \times \vec{J}_{m1} \\ Z_0 \vec{H}^{inc} &= -Z_0 K_0(\vec{J}_{e1}) - \frac{Z_0}{2} \hat{n}_{0,1} \times \vec{J}_{e1} + \eta Z_0 \hat{n}_{0,1} \times \vec{J}_{e1} \dots \\ &\quad + jk_0 L_0(\vec{J}_{m1}) + \vec{J}_{m1} \end{aligned} \quad (2)$$

$S_{2,1}$ 이 임피던스 매질일 경우, 법선 벡터 방향의 매질은 유전체가 되어 식 (2)에서 각 변수의 하첨자 0은 유전체의 특성을 고려하여 2가 되며, 좌변의 입사파 전계와 자계는 $Y_0 \vec{E}^{inc} = Z_0 \vec{H}^{inc} = 0$ 이 된다.

적분 방정식에서 RWG 기저 함수 기반으로 Z 행렬의 요소를 계산하기 위해 산란체 표면을 이산화하여 메쉬를 구성한다^[12]. 그림 1과 같은 복합 매질의 산란체의 경우 junction(Q_q)에서 edge에 할당된 삼각형 메쉬의 개수가 2개를 초과하여 기존의 RWG 기저 함수^[16]가 정의되지 않는 문제가 발생한다. 이를 위해 참고문헌 [17]에서 제안한 RWG 기저 함수를 하나의 edge를 공유하는 각 삼각형마다 할당하며, 매질의 정보를 나타내는 색인을 기반으로 유전체와 임피던스 매질의 표면 전류를 계산한다^{[17],[18]}.

2-2 복합 매질의 행렬 방정식

복합 매질의 행렬 방정식을 계산하기 위해 각 표면 메쉬에 매질 정보를 부여한다. $S_{0,1}$, $S_{2,1}$ 은 임피던스 매질의 표면으로, $S_{0,2}$ 는 유전체 표면으로 가정한다. 식 (1)의 유전체와 식 (2)의 임피던스 매질의 행렬 방정식을 어셈블 함으로써 하나의 복합 매질 행렬 방정식을 생성하여 메쉬 간의 상호작용을 고려한다. $S_{0,1}$ 과 $S_{0,2}$ 의 메쉬간의 상호 작용을 계산하는 어셈블리된 행렬은 식 (3)와 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} Y_0 \vec{E}^{inc} \\ Z_0 \vec{H}^{inc} \\ Y_0 \vec{E}^{inc} \\ Z_0 \vec{H}^{inc} \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} \vec{J}_{e1} \\ \vec{J}_{m1} \\ \vec{J}_{e2} \\ \vec{J}_{m2} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (3b)$$

식 (3b)는 식 (3a)의 $[Z]$ 행렬이며, Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} , Z_{22} 는 각각 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} [Z_{11}] &= [Z_{21}] = \\ &\begin{bmatrix} jk_0 L_0 + \eta I & Y_0 K_0 - \frac{Y_0}{2} \hat{n}_{0,1} \times I \\ -Z_0 K_0 - \frac{Z_0}{2} \hat{n}_{0,1} \times I + \eta \hat{n}_{0,1} \times I & jk_0 L_0 + I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4a)$$

$$[Z_{12}] = \begin{bmatrix} jk_0 L_0 & Y_0 K_0 + \frac{Y_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times I \\ -Z_0 K_0 - \frac{Z_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times I & jk_0 L_0 \end{bmatrix} \quad (4b)$$

$$\begin{aligned} [Z_{22}] &= \\ &\begin{bmatrix} jk_0 L_0 + jk_2 L_2 & Y_0 K_0 + \frac{Y_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times I \dots \\ & + Y_2 K_2 - \frac{Y_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times I \\ -Z_0 K_0 - \frac{Z_0}{2} \hat{n}_{0,2} \times I \dots & jk_0 L_0 + jk_2 L_2 \\ -Z_2 K_2 + \frac{Z_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times I & \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4c)$$

Z_{11} 과 Z_{22} 는 동일한 매질 간의 상호작용을 계산하므로 각각 임피던스 매질과 유전체 표면에서의 Z 행렬이다. Z_{12} 와 Z_{21} 은 임피던스 매질($S_{0,1}$)과 유전체 표면의 외부($S_{0,2}$)간의 상호작용을 계산하기 때문에 Z_{12} 는 유전체 외부의 적분 방정식만을 적용한다. I 는 self-term으로 소스와 관측점의 메쉬가 동일할 경우에 계산한다^[12].

$$\begin{aligned} [Z_{11}] &= [-Z_{21}] = \\ &\begin{bmatrix} jk_2 L_2 + \eta I & Y_2 K_2 - \frac{Y_2}{2} \hat{n}_{2,1} \times I \\ -Z_2 K_2 - \frac{Z_2}{2} \hat{n}_{2,1} \times I + \eta \hat{n}_{2,1} \times I & jk_2 L_2 + I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5a)$$

$$[Z_{12}] = \begin{bmatrix} -jk_2 L_2 & -Y_2 K_2 + \frac{Y_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times I \\ Z_2 K_2 - \frac{Z_2}{2} \hat{n}_{0,2} \times I & -jk_2 L_2 \end{bmatrix} \quad (5b)$$

$S_{2,1}$ 과 $S_{0,2}$ 간의 상호작용을 고려할 경우, $S_{2,1}$ 의 법선 벡터 방향 매질은 유전체이며, 임피던스 매질의 입사파를 0으로 가정하여 식 (3a)의 좌측 항에 입사파의 전/자계는 $[0; 0; Y_0 \vec{E}^{inc}; Z_0 \vec{H}^{inc}]$ 이 된다. Z_{22} 는 유전체 매쉬 간의 상호작용을 나타내므로 식 (4c)와 동일하며, Z_{11} , Z_{12} , Z_{21} 은 식 (5)과 같다. Z_{11} 과 Z_{21} 은 식 (4a)에서 자유공간을 나타내는 하첨자는 유전체 매질을 고려하여 2가 되며, $S_{2,1}$ 의 경우 유전체 내부와 상호작용을 고려하기 때문에 Z_{12} 는 식 (1b)의 유전체 내부의 적분방정식을 통해 계산되며, 서로 다른 매질간의 상호 작용을 고려할 때 법선 벡터의 방향이 반대이므로 Z_{12} 와 Z_{21} 은 식 (4)와 반대 부호를 적용한다.

최종적으로 산란체 표면 매쉬에는 외/내부의 매질 정보가 부여되기 때문에, 매질 정보에 따라 적절한 적분 방정식으로 복합 매질의 전자기 산란 계산이 가능해진다. 그림 1의 $S_{i,j}$ 에서 각 표면 간의 i 가 동일할 경우($S_{0,1}$, $S_{0,2}$) 식 (4)를, 표면 간의 i 와 j 가 동일할 경우($S_{0,2}$, $S_{2,1}$) 식 (5)를 고려한다. 또한, i 가 0이 아닐 경우 입사파의 전/자계는 0이 되며, j 로 각 매질을 구분함으로써 복합 매질의 전자기 산란을 계산하게 된다. 유전체 단일 물체일 경우, 식 (4)의 Z_{22} 를, 임피던스 매질 단일 물체일 경우 Z_{11} 로 계산함으로써 하나의 행렬 방정식을 통해 유전체, 임피던스, 그리고 복합 매질의 산란 해석이 가능하다.

III. 유전체 해석을 위한 IPO

유전체 매질의 전자기 산란 해석을 위한 IPO 기법은 유전체 표면의 반사계수(reflection coefficients)를 고려하여 산란체 표면 위에서 지역적 평면 근사화(local tangential approximation)를 통해 전자기 산란 해석을 한다^[19]. 입사파를 매쉬에 따라 수평 편파(\hat{h})와 수직 편파(\hat{v})의 성분과 매질의 반사 계수(reflection coefficient)를 고려하며, 다음과 같다^[20].

$$R_h = \frac{Z_1 \cos \theta_i - Z_0 \cos \theta_t}{Z_1 \cos \theta_i + Z_0 \cos \theta_t}, R_v = \frac{Z_0 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_0 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \quad (6)$$

R_h 와 R_v 는 각각 수평 및 수직 편파의 반사계수이며, θ_i 와 θ_t 는 각각 매쉬의 법선벡터와 이루는 입사각(incident

angle)과 굴절각(refraction angle)이다. 이를 기반으로 PO 전류를 계산한다^[19].

$$\begin{aligned} \vec{J}_e &\approx Y_0(1+R_v)(\vec{E}^{inc} \cdot \hat{v})\hat{n} \times \hat{h} \dots \\ &\quad - Y_0(1-R_h)(\vec{E}^{inc} \cdot \hat{h})(\hat{k}^{inc} \cdot \hat{n})\hat{h} \\ \vec{J}_m &\approx -(1+R_h)(\vec{E}^{inc} \cdot \hat{h})\hat{n} \times \hat{h} \dots \\ &\quad - (1-R_v)(\vec{E}^{inc} \cdot \hat{v})(\hat{k}^{inc} \cdot \hat{n})\hat{h} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \hat{k}^{inc} 는 입사파의 파수 벡터(wave vector)이다. 각 매쉬에 수직 입사할 경우 $\hat{k}^{inc} \cdot \hat{n} = -1$ 이므로 식 (8)로 전류를 계산한다.

$$\begin{aligned} \vec{J}_e &= (1-R_h)\hat{n} \times \vec{H}^{inc} \\ \vec{J}_m &= -(1+R_h)\hat{n} \times \vec{E}^{inc} \end{aligned} \quad (8)$$

First-order PO 전류를 기반으로 IPO 전류를 계산하기 위해 초기 전류를 $\vec{J}_0 = 2\hat{n} \times \vec{H}^{inc}$ 로 정의하며, 관측점까지의 전계(\vec{E}) 및 자계(\vec{H})는 식 (9a)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -\frac{jZ_0}{4\pi k_0} \iint_S G_1 \vec{J}_e + G_2 \vec{R}(\vec{R} \cdot \vec{J}_e) dS \dots \\ &\quad - \frac{1}{4\pi} \iint_S G_3(\vec{J}_m \times \vec{R}) dS \\ \vec{H} &= -\frac{jY_0}{4\pi k_0} \iint_S G_1 \vec{J}_m + G_2 \vec{R}(\vec{R} \cdot \vec{J}_m) dS \dots \\ &\quad + \frac{1}{4\pi} \iint_S G_3(\vec{J}_e \times \vec{R}) dS \end{aligned} \quad (9a)$$

$$\begin{aligned} G_1 &= \frac{-1 - jk_0 R + k_0^2 R^2}{R^3}, G_2 = \frac{3 + 3jk_0 R + k_0^2 R^2}{R^5} e^{-jk_0 R} \\ G_3 &= \frac{1 + jk_0 R}{R^3} e^{-jk_0 R} \end{aligned} \quad (9b)$$

S 는 매질의 표면이며, 식 (9a)에서 G_1 , G_2 , 그리고 G_3 은 그린 함수(Green's function)로 식 (9b)와 같이 나타내며, R 은 소스에서 관측점까지의 거리 벡터를 나타낸다. 식 (9a)에서 계산된 전/자계는 식 (7), (8)의 입사파가 되며, 이를 통해 계산된 표면 전류를 2차 소스로 가정하여 각 매쉬 간 상호작용(interaction)을 고려한다^[19].

$$\begin{aligned} \vec{J} &= \vec{J}_0 + \Delta \vec{J}_1 + \dots + \Delta \vec{J}_{n-1} + \Delta \vec{J}_n \\ \Delta \vec{J}_n &= \vec{J}_n - \vec{J}_{n-1} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 $\Delta \vec{J}_n$ 는 n 번째 반복(iteration)에서 \vec{J}_{n-1} 에 의해 갱신되는 IPO 전류이다.

IV. 시뮬레이션 결과

대규모 복합 매질 전자기 산란 해석을 위해 MLFMM 방법을 사용하며^[13], BiCGstab(l) 반복법의 $l=2$ 를 적용한다^[21].

그림 2 주파수는 1 [GHz], 입사각은 $\theta^{inc}=90^\circ$ 와 $\phi^{inc}=0^\circ$, 관측각은 $\theta=90^\circ$ 와 $\phi=0^\circ \sim 360^\circ$, 편파는 $h-pol$. 일 경우 전류 분포와 RCS 결과를 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 3개의 계층 구조의 구이며, 각 구의 반지름은 3λ , 2λ , 1λ 이다. 유전체의 유전율은 각각 $\mu_{r1}=\mu_{r2}=1$, $\epsilon_{r1}=3.0-j0.3$, $\epsilon_{r2}=7.0-j0.7$ 이며, 임피던스 매질의 정규화된 임피던스는 $\eta=1/\sqrt{\epsilon_r}=0.3729+j0.1308$ 이다. 그림 2(a)에서 내부의 구 표면은 입사파의 전/자계가 고려되지 않기 때문에 전류는 0으로 나타나며, 그림 3(b)의 RCS 결

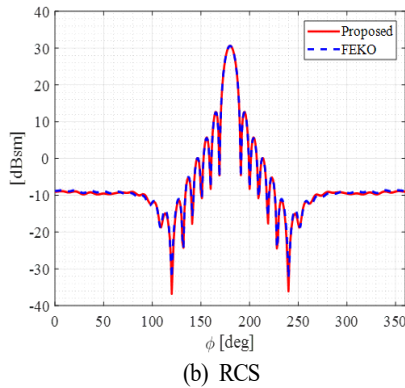
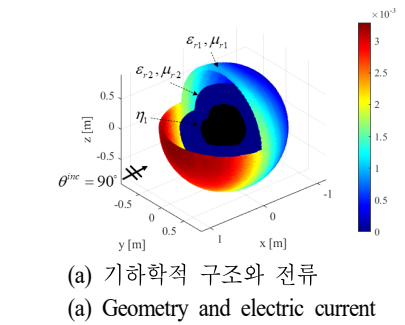


그림 2. 계층 구조 3개 구의 해석 결과
Fig. 2. Simulation of three spheres layers.

과에서 보듯이 계층 구조의 경우 FEKO와 잘 일치한다.

그림 3과 그림 4에서 각각 대규모 복합 매질로 구성된 NASA 아몬드와 비행체의 구조 및 산란 해석 결과를 나타낸다. 그림 3은 복합 매질로 구성된 NASA 아몬드를 보여주며, 입사각, 관측각, 편파는 그림 2와 동일하다. 주파수는 50 [GHz]이며 유전체의 유전율은 각각 $\mu_{r1}=\mu_{r2}=1$,

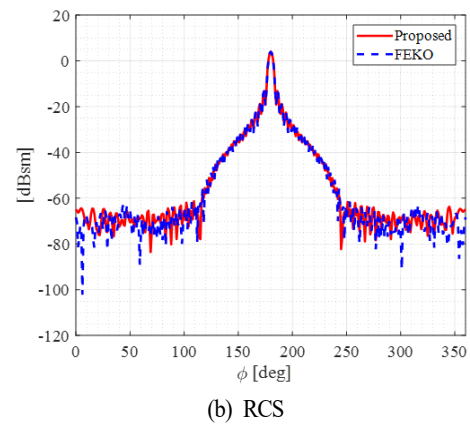
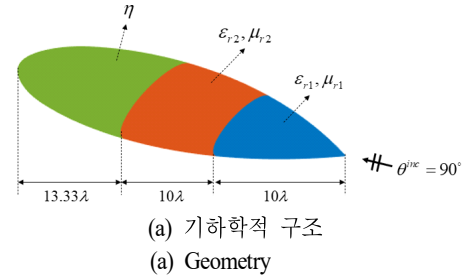


그림 3. 복합 매질 NASA 아몬드 구조 및 해석 결과
Fig. 3. Simulation and geometry of complex medium NASA almond.

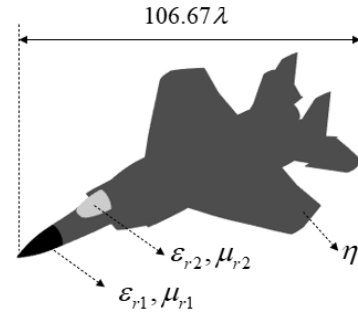


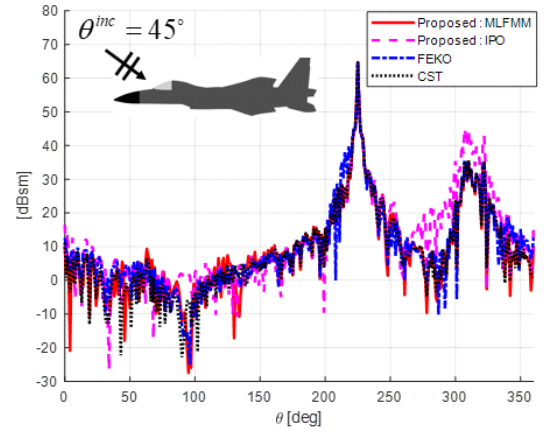
그림 4. 복합 매질의 비행체 구조
Fig. 4. Geometry of the complex medium aircraft.

$\epsilon_{r1} = 3.0 - j0.3$, $\epsilon_{r2} = 3.0 - j0.9$ 이며, 크기는 10λ 이다. 임피던스 매질의 크기는 13.33λ , 정규화된 임피던스는 $\eta = 0.2992 + j0.0576$ 이며, FEKO는 유전체로 가정하여 $\epsilon_r = 10 - j4$ 로 해석한다. 총 edge의 개수는 약 52만개이다. 그림 3(b)는 RCS 결과를 나타내며, FEKO와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

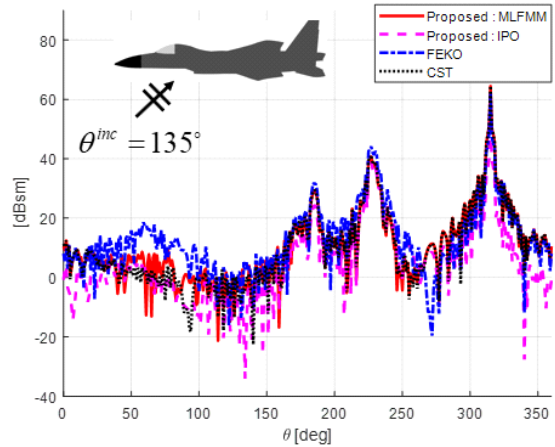
그림 4는 복합 매질로 구성된 약 106λ 크기 비행체를 보여주며, 그림 5(a)와 그림 5(b)의 입사각은 각각 $\theta^{inc} = 45^\circ$ 와 $\theta^{inc} = 135^\circ$ 이며 $\phi^{inc} = 0^\circ$ 이다. 관측각은 $\theta = 0^\circ \sim 360^\circ$ 와 $\phi = 0^\circ$, 편파는 $v-pol.$ 이다. 레이돔^[22]과 canopy window^[23]의 유전율은 각각 $\mu_{r1} = \mu_{r2} = 1$, $\epsilon_{r1} = 3.5$, $\epsilon_{r2} = 2.0 - j0.076$ 이며, 비행체 몸체^[22]의 임피던스는 $\eta = 0.3877 - j0.0598$ 이다. FEKO는 복잡한 구조의 임피던스 매질인 경우, 수치해가 부정확한 경우가 발생하므로^[15] 몸체를 유전체로 가정한다. CST는 FEKO와 동일한 메쉬를 사용할 경우, ohmic sheet model로 고려되므로 레이돔과 canopy window의 ϵ_{r1} 과 ϵ_{r2} 를 임피던스 매질인 $\eta_1 = 0.5345$, $\eta_2 = 0.7067 + j0.0134$ 로 해석한다. IPO의 메쉬 크기는 0.8λ 이며^[24], 식 (6)의 반사계수(R)를 사용하여 산란 해석을 하기 위해 비행체를 임피던스 매질로 고려한다. FEKO, CST, 그리고 제안한 MLFMM의 edge 개수는 약 109만 개, 메쉬 개수는 약 72만 개이며, IPO의 메쉬 개수는 약 6만 개이다. 그림 5는 상용 툴인 FEKO, CST와 제안한 MLFMM, IPO의 입사각에 따른 RCS 결과이며, 표 1은 MLFMM과 IPO의 시뮬레이션 해석 시간 및 반복 횟수를 보여준다. 그림 5와 표 1에서 보듯이, MLFMM은 상용 툴과 RCS 결과를 비교할 때 높은 정확도를 보이는 반면, 메쉬 개수와 반복 횟수가 많으며, 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. IPO는 반복 횟수가 적고 메쉬 개수와 반복 횟수가 적으며, 해석 시간이 MLFMM에 비해 약 8배 빠른 장점을 지니지만, 복잡한 구조에서 정확도가 비교적 저하되는 단점을 지니는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 임피던스 매질과 유전체로 구성된 복합 매질의 전자기 산란 해석을 위한 MoM 행렬 방정식 어셈블리 방법과 매질의 임피던스를 기반으로 반사계수를 고



(a) $\theta^{inc} = 45^\circ$



(b) $\theta^{inc} = 135^\circ$

그림 5. 복합 매질 비행체 RCS 해석 결과
Fig. 5. Simulation of complex medium aircraft.

표 1. 시뮬레이션 해석 시간 및 반복 횟수

Table 1. Simulation analysis time and number of iterations.

Simulator	θ^{inc} [deg]	Time [sec]	Iterations
MLFMM	45	80,460	61
	135	81,180	63
IPO	45	11,315	6
	135	11,316	7

려하여 산란체 표면 위에서 지역적 평면 근사화를 통한 IPO 방법을 제안하였다. MoM은 메쉬마다 내/외부 매질 정보를 할당함으로써 임피던스와 유전체를 구분하며, 이

를 기반으로 적절한 Z 행렬을 통해 메쉬 간의 상호작용을 계산한다. Junction edge가 존재하는 복합 매질에서도 적절한 RWG 기저함수를 부여함으로써 다양한 구조의 산란 해석이 가능하도록 하였다. 계층 구조 및 대규모 복합 매질로 구성된 NASA 아몬드를 제안한 MoM 행렬 기반 MLFMM으로 해석하며, 복합 매질 비행체를 MLFMM과 IPO 및 상용 소프트웨어 FEKO, CST를 비교함으로써 수치적인 정확도를 검증하였다.

사 사

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 스텔스 대형 플랫폼 전파해석 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD200047JD).

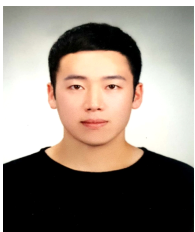
References

- [1] J. A. Martinez-Lorenzo, F. Quivira, and C. M. Rappaport, "SAR imaging of suicide bombers wearing concealed explosive threats," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 125, pp. 255-272, 2012.
- [2] P. Yla-Oijala, M. Taskinen, and J. Sarvas, "Surface integral equation method for general composite metallic and dielectric structures with junctions," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 52, pp. 81-108, 2005.
- [3] H. Ling, R. Chou, and S. Lee, "Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of and arbitrary shaped cavity," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 194-205, Feb. 1989.
- [4] F. Obelleiro, J. Rodriguez, and R. Burkholder, "An iterative physical optics approach for analyzing the electromagnetic scattering by large open-ended cavities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 4, pp. 356-361, Apr. 1995.
- [5] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for and edge in a perfectly conducting surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1462, Nov. 1974.
- [6] P. Ufimtsev, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007.
- [7] O. Ergul, L. Gurel, *The Multilevel Fast Multipole Algorithm(MLFMA) for Solving Large-Scale Computational Electromagnetics Problems*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014.
- [8] P. Wang, Y. Xie, "Scattering and radiation problem of surface/surface junction structure with multilevel fast multipole algorithm," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 20, no. 15, pp. 2189-2200, Jan. 2006.
- [9] S. Kimiki, "Computation of antenna parameters using electromagnetic surface integral equations," M.S. thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 2009.
- [10] J. Liu, J. Yuan, W. Luo, Z. Li, and J. Song, "On the use of hybrid CFIE-EFIE for objects containing closed-open surface junctions," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 7, pp. 1249-1253, Jul. 2021.
- [11] H. Gomez-Sousa, O. Rubinos-Lopez, and J. A. Martinez-Loreazo, "A computational method for modeling arbitrary junctions employing different surface integral equation formulations for three-dimensional scattering and radiation problems," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 30, pp. 689-713, Mar. 2014.
- [12] W. C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, 2nd ed. Boca Raton, FL, Chapman and Hall/CRC, 2014.
- [13] I. S. Koh, H. S. Lee, "Algorithm of the MLFMM," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 6, pp. 3-10, Nov. 2017.
- [14] T. B. A. Senior, J. L. Volakis, *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics*, London, IEE, 1995.
- [15] H. Lee, I. Koh, and J. Yoo, "Modified SDIE MLFMM method form inhomogeneous impedance material containing PEC or PMC region," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*,

- vol. 29, no. 10, pp. 805-810, 2018.
- [16] H. Gómez-Sousa, Ó. Rubiños-López, and J. Á. Martínez-Lorenzo, "Junction modeling for piecewise non-homogeneous geometries involving arbitrary materials," in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, Jul. 2014, pp. 2196-2197.
- [17] D. Martínez Solís, J. M. Taboada, and F. Obelleiro, "Surface integral equation-method of moments with multiregion basis functions applied to plasmonics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 5, pp. 2141-2152, May. 2015.
- [18] M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape," *IEEE Transaction on Antennas Propagation*, vol. AP-30, no. 3, pp. 409-418, May. 1982.
- [19] I. S. Koh, C. H. Park, and W. Sun, "Analysis of radiation characteristics of Ka-band Von Karman radome based on IPO scheme," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 12, pp. 1148-1154, Dec. 2011.
- [20] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York, NY, John Wiley & Sons, 1989.
- [21] H. Lee, J. Rim, I. Koh, and S. Seo, "Computational complexity of BICGstab(l) in multi-level fast multipole method(MLFMM) and efficient choice of l ," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, pp. 167-170, Mar. 2018.
- [22] Y. Shao, Z. Peng, K. H. Lim, and J. F. Lee, "Non-conformal domain decomposition methods for time-harmonic maxwell equations," *Proceedings Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 468, no. 2145, pp. 2433-2460, Sep. 2012.
- [23] L. Guo, Y. Chen, J. Hu, M. Jiang, J. Li, and Z. Nie, "A novel JMCIE-DDM for analysis of EM scattering and radiation by composite objects," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 389-392, 2017.
- [24] J. Rim, I. Koh, "Accuracy test of iterative physical optics for analyzing scattering by nonperfectly conducting bodies using impedance boundary conditions," in *12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018)*, London, Apr. 2018, pp. 1-4.

남 정 훈 [인하대학교/석박사 통합과정]

<http://orcid.org/0000-0002-9225-1338>



2017년 2월: 강릉원주대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 9월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석박사 통합과정

[주 관심분야] Radar System Modeling & Analysis, Electromagnetic Numerical Analysis

유 정 운 [인하대학교/석박사 통합과정]

<http://orcid.org/0000-0003-2363-296X>



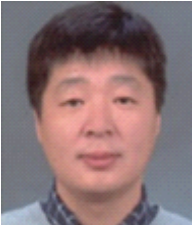
2017년 2월: 강릉원주대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 9월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 석박사 통합과정

[주 관심분야] Electromagnetic Numerical Analysis

고 일 석 [인하대학교/교수]

<http://orcid.org/0000-0003-0014-2466>



1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 4월: LG 전자연구원

2002년 8월: The University of Michigan at Ann Arbor 전기 및 전산과 (공학박사)

2004년 3월 ~ 2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학원 교수

2010년 9월 ~ 현재: 인하대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Theoretical Electromagnetics, Numerical Analysis,
Wave Propagation through Complex Media