

3차원 다층 유전체 코팅 구조의 전자파 산란 해석을 위한 유한요소법 적용

Electromagnetic Scattering Analysis of 3D Dielectric Multi-Coated Structures Using Finite Element Method

나 혜 선 · 이 은 정

Hyesun Na · Eunjung Lee

요 약

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 자유공간에서 완전 전기 도체에 유전체로 코팅된 다양한 형상의 3차원 구조물에 의한 전자파 산란 문제를 해석하였다. 대부분의 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식에 기반한 전자기학 경계값 문제에 적용할 수 있는 일반화된 리츠 원칙을 따라 전자파 산란 문제를 해석하는 코드를 자체적으로 구현하고, 수치 실험을 통해 알고리즘의 정확성과 유효성을 검증하였다. 이 과정에서 해석 영역의 물성에 따라 정의되는 파장에 비해 요소가 불충분할 시 발생하는 문제점을 파악하고 해결하였다.

Abstract

In this study, the finite element method was used to analyze the scattering issue caused by various types of 3D structures coated with dielectrics on perfect electric conductors. To analyze the electromagnetic wave scattering problem, we implemented an in-house finite element analysis code based on the generalized Riesz principle, which is applicable to a wide range of electromagnetic boundary value problems. Through various numerical experiments, the accuracy and validity of the algorithm was verified. During this process, we identified and resolved the problems that occur when the number of elements is insufficient.

Key words: Finite Element Method, Edge Elements, Electromagnetic Scattering Problem, 3D Dielectric Multi-Coated Structure

I. 서 론

스텔스 기술이란 적의 레이더망에 탐지되지 않도록 은신하는 기술로, 군사적 자주성과 밀접한 관련이 있다. 따라서 국내외적으로 스텔스 성능을 극대화하기 위한 다양한 분야에서의 연구가 수행되고 있다^{[1]~[9]}. 대표적으로

레이더 탐지기에 감지되는 신호 크기의 척도인 레이더 반사 면적(radar cross section, RCS)의 감소를 위한 효과적인 레이더 흡수 물질(radar absorbing material, RAM) 및 구조(radar absorbing structure, RAS)를 개발 및 설계하는 분야가 있다^{[10]~[17]}. 연구의 실제적 검증을 위한 실 기체 제작은 막대한 비용이 드는 등 제약이 발생하므로 단순 예

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

연세대학교 수학교산학부 계산과학공학(School of Mathematics and Computing, Computational Science and Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received November 14, 2022 ; Revised November 27, 2022 ; Accepted February 27, 2023. (ID No. 20221114-008S)

· Corresponding Author: Hyesun Na (e-mail: hyesunna@yonsei.ac.kr)

제나 소형 모델에 대한 수치적 실험이 선행되어야 한다. Full-wave 해석에 널리 사용되는 수치 해석 기법으로는 모멘트법(method of moments, MoM), 유한요소법(finite element method, FEM), 유한차분시간영역(finite-difference time-domain, FDTD)법, 유한체적시간영역(finite-volume time-domain, FVTD)법이 있다.

유한요소법은 이·공학 문제를 해결하기 위한 수치 기법으로, 해석 영역을 유한개의 요소(element)로 나누어 각 요소에서 정의한 기저 함수(basis function)들의 선형 결합(linear combination)으로 해를 근사하는 방법이다. 이는 3차원 복잡 구조의 수치 계산에 널리 사용되고 있으며, 스텔스 무기와 같이 복합재료로 이루어진 복잡 구조에서의 전자파 해석 시 다른 수치 기법에 비해 구조물 형상 및 재료 구성에 따른 제약이 적다. 따라서 국내 스텔스 기술 향상을 위해 순수 국내기술로 이루어진 FEM 기반 전자파 해석 알고리즘과 타 기법과 결합한 형태의 하이브리드(hybrid) 기법을 개발하는 연구가 이루어지고 있다^{[18]~[23]}.

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 자유공간에서의 완전 전기 도체(perfect electric conductor, PEC)에 유전체로 코팅된 3차원 구조물에 의한 산란 문제를 해석하였다. 대부분의 전자기 현상을 기술하는 Maxwell 방정식에 기반한 전자기학 경계값 문제(boundary value problem, BVP)에 적용할 수 있는 일반화된 리츠 원칙(Riesz principle)을 따르는 전자파 유한요소해석 코드를 자체적으로 구현하였다. 다양한 구조에서의 수치 실험을 통해 개발 알고리즘의 정확성 및 유효성을 검증하였으며, 이 과정에서 해석 영역의 물성에 따라 요소의 수가 불충분할 시 발생하는 문제점을 파악하고 해결하였다.

II. 문제정의 및 지배방정식

2-1 문제정의

본 논문은 3차원 자유공간(진공)에서 유전체로 코팅된 임의의 형상을 갖는 PEC에 의한 전자파 산란 문제를 해석하였으며, 해석구조의 단면은 그림 1과 같다.

여기서 $V_{F,\infty}$ 는 자유공간을, $V_{D_1}, V_{D_2}, \dots, V_{D_n}$ 는 각각 물

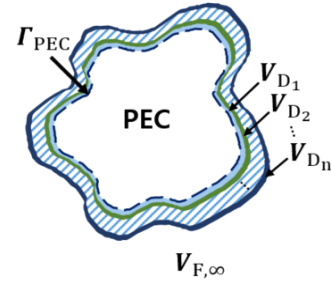


그림 1. 해석구조의 단면

Fig. 1. Cross section of analysis structure.

성이 다른 n 개의 유전층을, Γ_{PEC} 는 PEC 영역의 경계(boundary)를 의미한다. 물질 특성상 PEC 내부 영역에는 전기장이 존재하지 않으므로 해석 영역을 V 로 표기하고, 이를 수식화하면 식 (1)과 같다.

$$V = V_{F,\infty} \cup \sum_{i=1}^n V_{D_i} \quad (1)$$

전자파 유한요소해석을 위한 주파수 영역에서의 3차원 파동 방정식(벡터 파동 방정식)은 페이저(phasor) 표현의 frequency factor를 $e^{j\omega t}$ 로 가정한 Maxwell 방정식으로부터 식 (2)와 같이 유도된다.

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E}) - k_0^2 \epsilon_r \vec{E} = 0 \quad (2)$$

이중 회전 연산자(double-curl operator)를 포함한 2계 선형 미분 방정식으로, 매질 구성 변수인 μ_r 과 ϵ_r 는 매질의 상대 투자율(permeability)과 상대 유전율(permittivity)을 의미한다. 자유공간에서의 파수(wave number)를 나타내는 k_0 는 식 (3)과 같이 각 주파수(angular frequency)와 자유공간에서의 투자율 μ_0 및 유전율 ϵ_0 의 관계식으로 표현된다.

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \quad (3)$$

벡터 파동 방정식 (2)는 전자기장이 결합된 Maxwell 방정식과 달리 전기장과 자기장을 독립적으로 해석할 수 있지만, 이 둘의 상관관계가 완전히 배제되었음을 뜻하는 것이 아니다. 다시 말해, 전기장으로만 구성된 식 (2)로부터 식 (4)와 같이 Faraday 법칙을 이용하여 자기장 \vec{H} 를 계산할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \Leftrightarrow \vec{H} = j(\omega\mu)^{-1}(\nabla \times \vec{E}) \quad (4)$$

전자파 산란 해석은 전기장 \vec{E} 를 입사 전기장 \vec{E}^{inc} 와 산란 전기장 \vec{E}^{sc} 로 구성된 관계식 $\vec{E} = \vec{E}^{\text{sc}} + \vec{E}^{\text{inc}}$ 로 간주한다. 따라서 산란 전기장에 대한 벡터 파동 방정식은 식 (5)로 정의된다.

$$\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) - k_0^2 \epsilon_r \vec{E}^{\text{sc}} = \vec{f}^{\text{inc}} \quad (5)$$

우변 항 $\vec{f}^{\text{inc}} = -\nabla \times (\mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E}^{\text{inc}}) + k_0^2 \epsilon_r \vec{E}^{\text{inc}}$ 는 입사 전기장에 관한 주어진 정보를 나타낸다.

2.2 지배방정식 및 경계조건

산란 문제는 통상적으로 닫힌 공간에서 정의되는 내부 문제(internal problem)가 아닌 열린 공간에서의 외부 문제(external problem)이다. 반면 FEM은 계산 공간을 유한개의 요소로 이산화(discretization)하여 각 요소에서의 해를 근사하는 수치 해석 기법이다. 따라서 FEM을 이용하여 산란 문제를 해석할 경우, 우선 무한한 해석 영역을 닫힌 공간으로 제한해야 한다. 본 논문에서는 그림 2의 빨간 점선과 같이 물체로부터 충분한 거리에 구와 같은 곡면 구조로 자유공간 $V_{F,\infty}$ 를 V_F 로 제한하고, 그 경계를 Γ_{ABC} 로 표기한다.

경계 Γ_{ABC} 는 FEM의 방법론에 의한 가상(fictitious)의 표면이므로 해당 경계를 통과하는 전파에 방해가 되지 않도록 식 (6) 및 식 (7) 형태의 2차 흡수 경계조건(2nd-order absorbing boundary condition, ABC)을 설정한다^{[24]~[26]}.

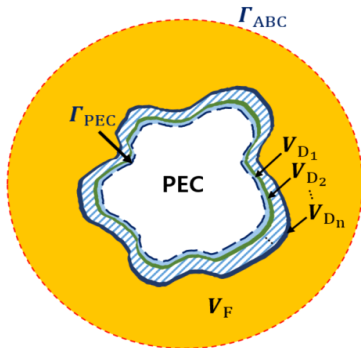


그림 2. 닫힌 해석구조의 단면

Fig. 2. Cross section of the closed analysis structure.

$$\hat{n} \times (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) + P(\vec{E}^{\text{sc}}) = 0 \quad (6)$$

$$P(\vec{E}^{\text{sc}}) = jk_0 \vec{E}_t^{\text{sc}} - \beta \nabla \times [\hat{n}(\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}})_n] - \beta \nabla_t(\nabla \times \vec{E}_t^{\text{sc}}) \quad (7)$$

따라서 본 논문에서 다루는 계산 영역은 내외부 경계면이 Γ_{PEC} 와 Γ_{ABC} 로 이루어진 닫힌 공간이며, 이에 따른 지배방정식과 경계조건은 식 (8)~식 (11)과 같다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E}^{\text{sc}} - k_0^2 \vec{E}^{\text{sc}} = 0 \quad \text{in } V_F \quad (8)$$

$$\nabla \times (\mu_{r_i}^{-1} \nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) - k_0^2 \epsilon_{r_i} \vec{E}^{\text{sc}} = \vec{f}_i^{\text{inc}} \quad \text{in } V_{D_i}, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$\hat{n} \times \vec{E}^{\text{sc}} = -\hat{n} \times \vec{E}^{\text{inc}} \quad \text{on } \Gamma_{\text{PEC}} \quad (10)$$

$$\hat{n} \times (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) + P(\vec{E}^{\text{sc}}) = 0 \quad \text{on } \Gamma_{\text{ABC}} \quad (11)$$

유전층 V_{D_i} 를 이루는 상대 투자율 μ_{r_i} 와 상대 유전율 ϵ_{r_i} 는 상수(constant)로 가정하며, \vec{f}_i^{inc} 는 각 유전층의 물성에 따른 입사파의 정보이다. 자유공간 V_F 에서는 입사 전기장이 식 (2)를 만족하므로 제차(homogeneous) 미분 방정식인 식 (8)로 정의된다.

III. 유한요소법의 적용

3.1 범함수 및 변 요소 정의

앞서 정의한 경계값 문제에 일반화된 리츠 원칙을 따르는 범함수(functional)는 식 (12)로 정의된다^{[24],[26]}.

$$\begin{aligned} F(\vec{E}^{\text{sc}}) &= \frac{1}{2} \iiint_{V_{D_i}} \mu_{r_i}^{-1} (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) \cdot (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) - k_0^2 \epsilon_{r_i} \vec{E}^{\text{sc}} \cdot \vec{E}^{\text{sc}} dV \\ &+ \frac{1}{2} \iiint_{V_F} (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) \cdot (\nabla \times \vec{E}^{\text{sc}}) - k_0^2 \vec{E}^{\text{sc}} \cdot \vec{E}^{\text{sc}} dV \\ &- \frac{1}{2} \oint_{\Gamma_{\text{ABC}}} \vec{E}^{\text{sc}} \cdot P(\vec{E}^{\text{sc}}) dS - \iiint_{V_{D_i}} \vec{E}^{\text{sc}} \cdot \vec{f}_i^{\text{inc}} dV \end{aligned} \quad (12)$$

식 (8)~식 (11)을 만족하는 정확한 해(exact solution)는 범함수의 정점(stationary point)과 상응하며, 식 (13)을 만족한다.

$$\begin{aligned}
 & \iiint_{V_D} \mu_{r_i}^{-1} (\nabla \times \vec{E}^{sc}) \cdot (\nabla \times \vec{E}^{sc}) - k_0^2 \epsilon_{r_i} \vec{E}^{sc} \cdot \vec{E}^{sc} dV \\
 & + \iiint_{V_F} (\nabla \times \vec{E}^{sc}) \cdot (\nabla \times \vec{E}^{sc}) - k_0^2 \vec{E}^{sc} \cdot \vec{E}^{sc} dV \\
 & - \oint_{\Gamma_{ABC}} \vec{E}^{sc} \cdot P(\vec{E}^{sc}) dS - \iiint_{V_D} \vec{E}^{sc} \cdot \vec{f}_i^{inc} dV \\
 & = 0
 \end{aligned} \quad (13)$$

연속 공간에서 정의된 식 (13)을 이산 공간에서 정의하기 위해 해석 영역을 해 공간(solution space)에 적합한 사면체 변 요소(tetrahedral edge element)로 분할하고, 각 요소를 이루는 6개의 변에서 정의되는 방향성을 갖는 기저 함수인 edge basis function을 식 (14)와 같이 정의한다^{[24]~[27]}.

$$\psi_i^e = l_i (\phi_{i_1}^e \nabla \phi_{i_2}^e - \phi_{i_2}^e \nabla \phi_{i_1}^e), \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (14)$$

여기서 $\phi_{i_1}^e$ 와 $\phi_{i_2}^e$ 는 모서리의 시작점 v_{i_1} 과 끝점 v_{i_2} 에서 정의되는 절점 기반 기저 함수(nodal basis function)를, l_i 는 변의 길이를 의미한다.

3-2 유한요소 해석 코드 검증

우리는 자체적으로 구현한 전자파 유한요소 해석 코드를 검증하기 위해 다양한 형상에 대한 예제를 고려하고자 한다. 모든 예제에 대해 정확한 해를 계산하여 결과를 비교하는 것이 바람직하지만, 자체적으로 설계한 구조물에서의 정확한 해를 계산하는 것은 불가능하다. 따라서 전자파 해석에 널리 사용되고 있어 그 결과를 신뢰할 수 있는 외산 상용 해석프로그램인 Ansys HFSS와 동일 실험 조건에서 해석하고, 그 결과를 비교 분석하였다.

3-2-1 구 형태의 단일 코팅 구조 해석

우선 단순 예제로 유전체로 단일 코팅된 PEC 구에 의한 산란 전기장을 해석하였으며, 구조의 단면은 그림 3과 같다. PEC 구의 반지름과 코팅 두께는 0.06 m로 같고, 가상 경계 Γ_{ABC} 는 산란체로부터 0.0921 m 떨어진 거리에 설정한다. 유전체는 물성이 $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 4$ 인 유전체로 실험하였다. 5 GHz의 주파수에서 z축의 양(+)의 방향으로 진행하며, x축 방향으로 선형 편광(polarization)되는 입사파

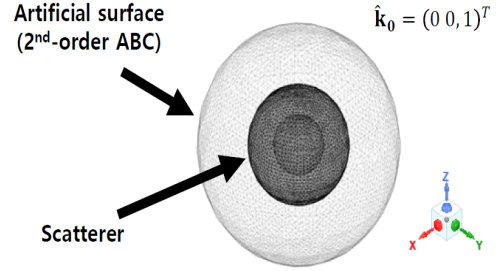


그림 3. 유전체 단일 코팅된 구 형태의 구조
Fig. 3. Dielectric single-coated spherical structure.

를 가정하여 전기장의 산란 분포를 XY 평면, XZ 평면, 그리고 YZ 평면에서 살펴보았다.

표 1은 해석에 사용된 요소 수와 자유도를 나타내며, 그림 4는 Ansys HFSS와 in-house 유한요소해석 프로그램으로 도출된 산란 전기장의 분포를 각 평면에서 바라본 결과이다. 그림 4(a)~그림 4(c)는 Ansys HFSS의 결과를, 그림 4(d)~그림 4(f)는 개발 해석프로그램의 결과이다.

표 1. 해석에 사용된 요소 수 및 자유도

Table 1. Number of elements and degrees of freedom used.

Number of elements	Degrees of freedom
642,455	764,356

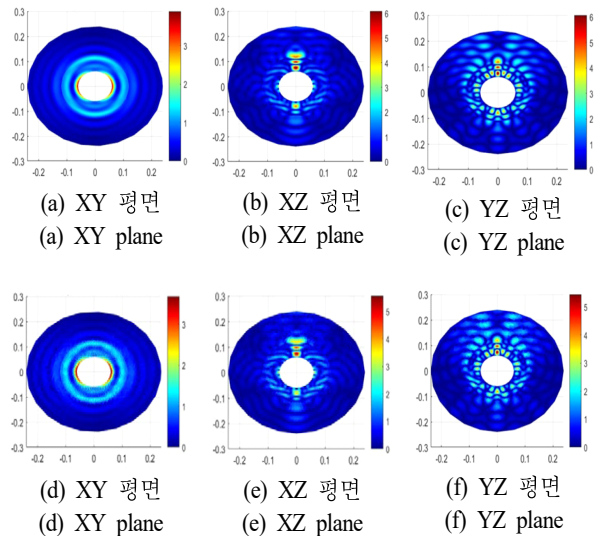


그림 4. Ansys HFSS와 자체 유한요소해석 코드 해석 결과
Fig. 4. Results of Ansys HFSS and in-house FEA code.

3-2-2 구 형상의 이중 코팅 구조 해석

본 예제는 앞서 소개한 단일 코팅된 산란체 구조의 유전층을 다른 물성으로 이루어진 두 층으로 나눈 적층 구조를 고려한다. 그림 5는 유전체 적층 구조의 단면을 나타내며, PEC 구에 각각 0.03 m의 두께로 물성이 $\mu_{r_1}=1$, $\varepsilon_{r_1}=4$ 인 유전체로 코팅한 후 $\mu_{r_2}=1$, $\varepsilon_{r_2}=2$ 인 유전체로 재차 코팅한 구조다. 3-2-1절과 동일한 주파수와 입사파를 가정하여 전기장 분포를 분석하였다.

표 2는 해석 시 두 해석프로그램에 사용된 요소 수와 자유도를 나타낸다. 상용 프로그램의 메쉬(mesh) 정보로 Matlab 기반의 in-house 코드를 실행할 경우, 메모리 오류가 발생하여 비교적 성긴 격자(coarse grid)를 이용하였다.

그림 6은 유전체 적층 구조에 대한 개발 해석프로그램의 결과의 부정확성을 지적한다. 이러한 문제는 두 유전층의 물성에 따라 해당 영역에서의 파장에 비해 사용된 요소의 수가 불충분하여 발생한다고 판단했다. 따라서 두 유전층 V_{D_1} 과 V_{D_2} 의 계면인 $\Gamma_{D_{12}}$ 에서의 면 적분인 식 (15)를 고려하였다.

$$\oint_{\Gamma_{D_2}} \hat{n} \times [\mu_{r_2}^{-1} (\nabla \times \vec{E}_{D_2})] \cdot \vec{E}_{D_2} - \hat{n} \times [\mu_{r_1}^{-1} (\nabla \times \vec{E}_{D_1})] \cdot \vec{E}_{D_1} dS \quad (15)$$

연속 공간에서 해당 항은 전기장의 접선 방향으로의 연속성에 의해 범함수 유도 과정에서 생략된다. 이산 체

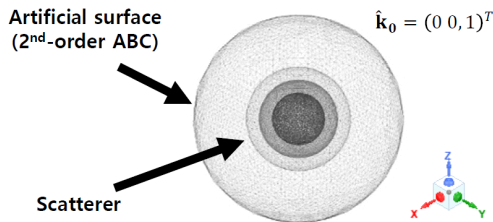


그림 5. 이중 코팅된 구 형상 구조
Fig. 5. Dielectric double-coated spherical structure.

표 2. 해석에 사용된 요소 수 및 자유도
Table 2. Number of elements and degrees of freedom used.

Analysis tool	Number of elements	Degrees of freedom
In-house FEA	495,242	590,116
Ansys HFSS	774,649	921,265

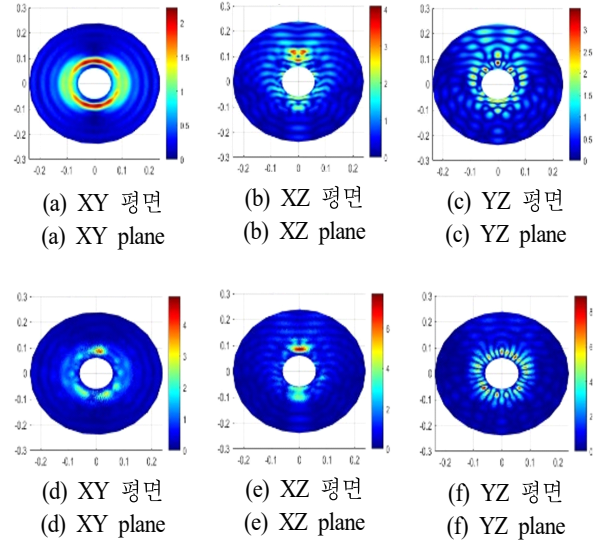


그림 6. Ansys HFSS와 자체 유한요소해석 코드 해석 결과
Fig. 6. Results of Ansys HFSS and in-house FEA code.

계에서도 계면에서 정의되는 2차원 변 요소 성질에 의해 식 (15)의 값이 0이라는 사실은 당연하다. 하지만 전기장을 계면을 한 면으로 갖는 3차원 변 요소로 근사하여 계면 위에서의 면 적분을 계산하면 그 값이 0이 아니라는 사실을 확인하였다. 따라서 $\Gamma_{D_{12}}$ 에서 전기장의 연속성이 보장되도록 식 (15)를 강조하는 범함수를 새롭게 정의하였다.

그림 7은 표 2에서의 in-house FEA와 동일 조건에서 새롭게 정의한 범함수를 이용하여 도출한 전기장의 산란 분포이다. 비교 대상에 비해 적은 수의 요소를 이용하였지만, 그림 7(a)~그림 7(c)와 그림 6(a)~그림 6(c)의 산란 분포 및 크기로부터 높은 수준의 일치성을 확인할 수 있다.

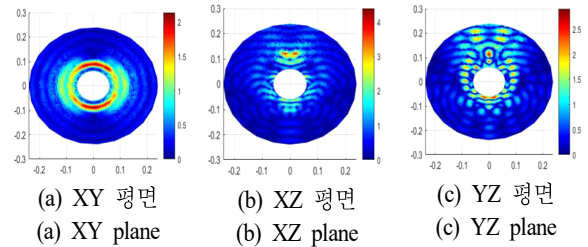


그림 7. 개선된 자체 유한요소해석 코드 결과
Fig. 7. Results of improved in-house FEA code.

IV. 실험 결과

본 장에서는 앞서 소개한 in-house 전자파 유한요소해석 프로그램의 정확도와 유효성을 검증하고자 한다. 다양한 구조물에 의한 산란 전기장 분포와 bistatic RCS 해석 결과를 보이고, Ansys HFSS의 결과와 비교 분석한다.

4.1 무손실 유전체 코팅 구조의 스텔스기 형상 해석

그림 8은 전장이 3 m인 스텔스기 형상에 0.1 m의 두께로 유전체로 코팅한 산란체와 이로부터 최소 2 m 떨어진 거리에 타원 형태로 가상 경계를 설정한 해석구조다. 코팅 재료는 $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 4$ 인 무손실(lossless) 유전체로 설계하고, 300 MHz의 주파수에서 X축의 음(-)의 방향으로 진행하고 Z축으로 선행 편광되는 입사파를 가정하였다. 표 3은 두 해석프로그램에 공통으로 사용된 메쉬 정보이다.

그림 9는 두 해석프로그램으로부터 도출된 전기장의 정보를 이용하여 XY, XZ, YZ 평면에서의 산란 분포를 계산한 결과이다. 그림 9(a)~그림 9(c)는 Ansys HFSS의 결과를, 그림 9(d)~그림 9(f)는 in-house 해석프로그램의 결과를 나타낸다.

그림 10은 해석구조의 bistatic RCS 해석 결과를 비교한 그래프로, 검정 실선과 빨간 점선은 각각 Ansys HFSS와 개발 해석프로그램의 결과이다. 그림 10(a) 및 그림 10(b)

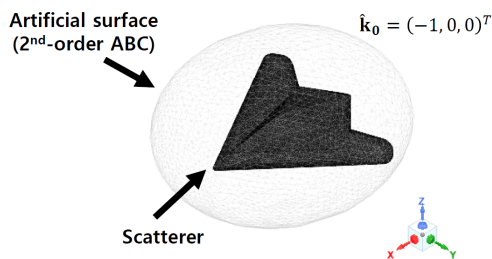


그림 8. 스텔스기 형상의 해석구조
Fig. 8. Analysis structure of stealth aircraft shape.

표 3. 해석에 사용된 요소 수 및 자유도
Table 3. Number of elements and degrees of freedom used.

Number of elements	Degrees of freedom
600,877	725,789

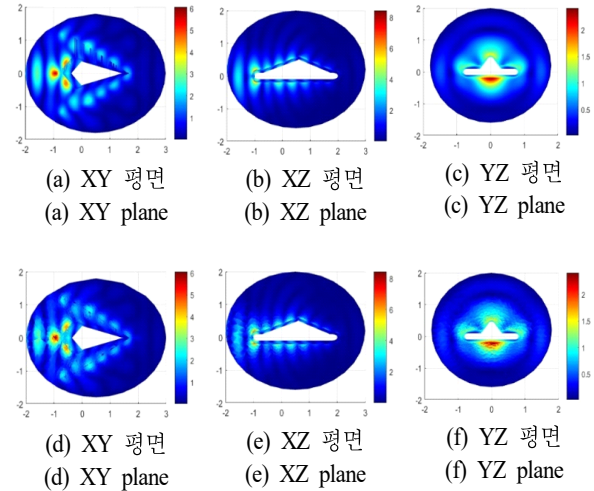


그림 9. Ansys HFSS와 자체 유한요소해석 코드 해석 결과

Fig.9. Results of Ansys HFSS and in-house FEA code.

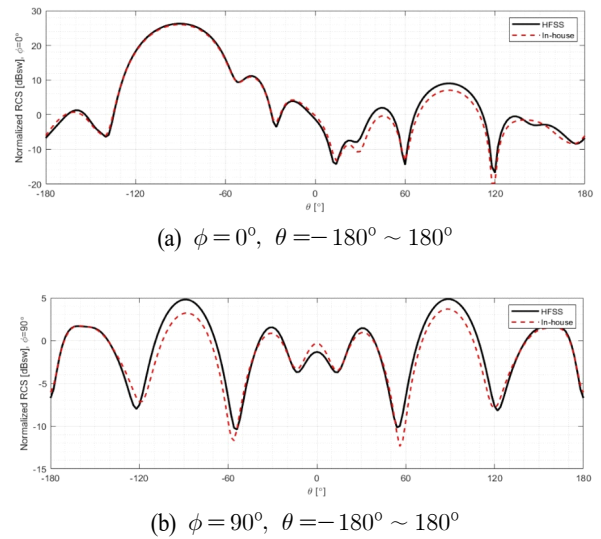


그림 10. Bistatic RCS 해석 결과
Fig. 10. Results of bistatic radar cross section.

는 각각 $\phi=0^\circ$, $\theta=-180^\circ \sim 180^\circ$ 와 $\phi=90^\circ$, $\theta=-180^\circ \sim 180^\circ$ 에서 관측한 결과를 보여준다.

4.2 손실 유전체 코팅 구조의 스텔스기 형상 해석

본 예제는 4.1장에서 소개한 스텔스기 형상에 0.01 m의 두께로 손실(lossy) 유전체를 코팅한 구조이다. 유전체 물성은 $\mu_r = 1$, $\epsilon_r = 2.5 - 0.5j$ 로, 정규화된 임피던스는

$\eta = 0.0157 + 23.7654j$ 이다. 관찰 주파수 및 입사파는 앞선 예제와 동일한 300 MHz의 주파수에서 X축의 음(-)의 방향으로 진행하고 Z축으로 선형 편광되는 입사파를 가정하였다. 표 4는 해석에 사용된 요소 수와 자유도를 나타내며, 그림 11 및 그림 12는 두 해석프로그램으로부터 계산된 XY, XZ, YZ 평면에서의 산란 전기장 분포와 bistatic RCS를 비교한 결과이다.

4.3 유전체 적층 구조의 화살 형상 해석

그림 13은 유전체로 이중으로 코팅된 화살 형상의 산란체에 의한 해석구조의 단면이다. 높이가 0.1 m이고, 반지름이 0.04 m인 원뿔에 반지름이 0.02 m인 원기둥을 붙인 구조다. 화살 형상에 $\mu_{r_1} = 1$, $\varepsilon_{r_1} = 4$ 인 무손실 유전체로 0.02 m의 두께로 1차 코팅한 뒤 같은 두께로 $\mu_{r_2} = 1$, $\varepsilon_{r_2} = 2$ 인 무손실 유전체로 2차 코팅하였으며, 산란체로부터 0.016 m 떨어진 거리에 가상 표면을 설정하였다.

표 4. 해석에 사용된 요소 수 및 자유도

Table 4. Number of elements and degrees of freedom used.

Number of elements	Degrees of freedom
81,170	107,339

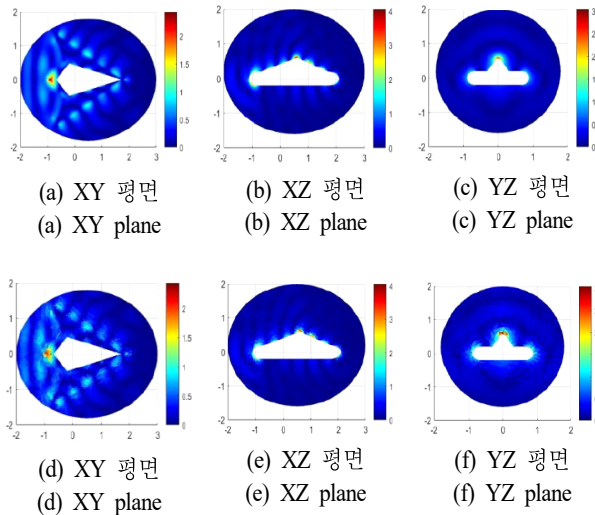


그림 11. Ansys HFSS와 자체 유한요소해석 코드 해석 결과
Fig. 11. Results of Ansys HFSS and in-house FEA code.

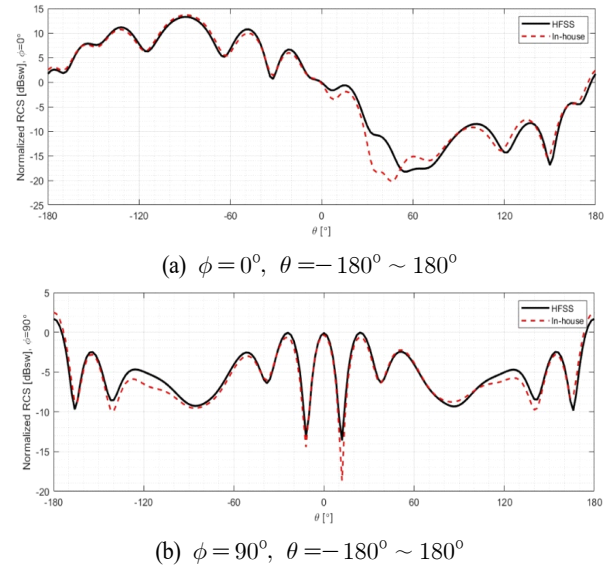


그림 12. Bistatic RCS 해석 결과

Fig. 12. Results of bistatic radar cross section.

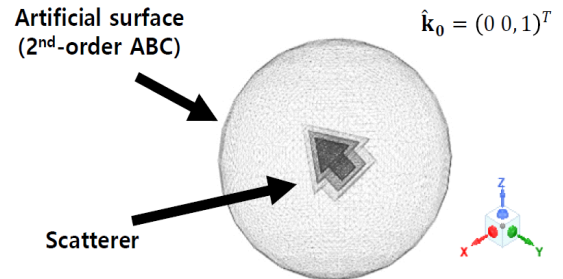


그림 13. 화살 형상의 해석구조

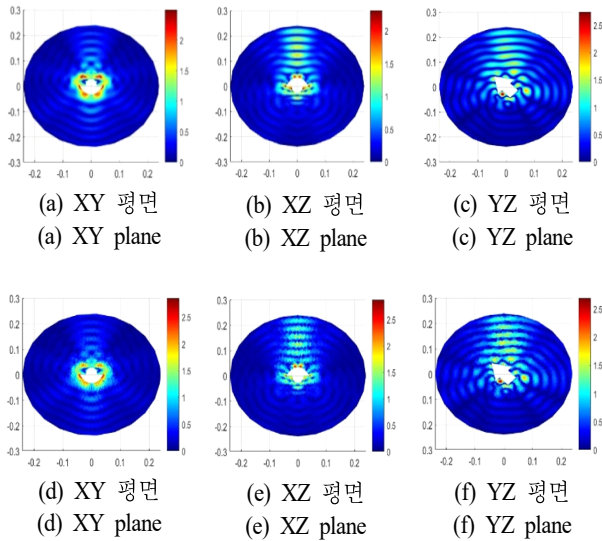
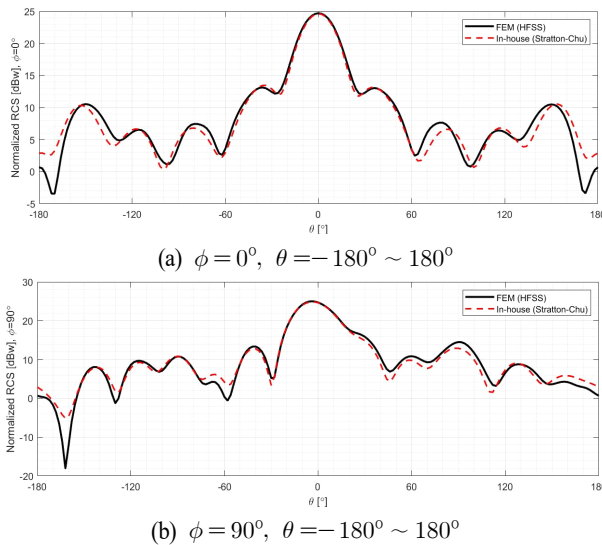
Fig. 13. Analysis structure of arrow shape.

5 GHz의 주파수에서 Z축의 양(+)의 방향으로 진행하며, X축으로 편광되는 입사파에 대한 산란 전기장 분포는 그림 14와 같다. 본 적층 구조의 예제는 Ansys HFSS에 사용된 메쉬와 동일 조건에서 해석하였으며, 사용된 요소 수와 자유도는 표 5와 같다. 본 예제는 적층 구조임에도 불구하고 3-2-2절의 결과와 달리 식 (16)의 유무와 무관하게 비교 대상과 높은 일치성을 보였다. 이로부터 본 해석 프로그램의 기본 알고리즘의 정확성과 개선된 알고리즘을 통해 불충분한 메쉬에 의해 발생하는 문제점을 해결할 수 있다는 사실을 확인하였다. 그림 14 및 그림 15는 산란 전기장 분포와 RCS 해석 결과를 보여준다.

표 5. 해석에 사용된 요소 수 및 자유도

Table 5. Number of elements and degrees of freedom used.

Number of elements	Degrees of freedom
355,589	427,073

그림 14. Ansys HFSS와 자체 유한요소해석 코드 해석 결과
Fig.14. Results of Ansys HFSS and in-house FEA code.그림 15. Bistatic RCS 해석 결과
Fig. 15. Results of bistatic radar cross section.

V. 결 론

본 논문에서 유한요소법을 이용하여 유전체로 코팅된 PEC 구조에 의한 산란 전기장 분포 및 RCS를 해석하였다. Matlab 기반의 전자파 유한요소해석 코드를 자체적으로 구현하였으며, 다양한 형상에 대한 실험을 통해 정확성과 유효성을 검증하였다. 개발된 알고리즘은 단일 코팅 구조에서 높은 정확도의 분석 결과를 보여줄 뿐만 아니라, 유전체 적층 구조의 물성에 따라 해석에 필요한 요소의 수가 부족한 경우에도 비교 대상인 외산 상용 해석프로그램인 Ansys HFSS와 대등한 결과를 보여준다. 본 연구는 소형의 단순 구조에서 검증한 유한요소법 기반의 전자파 산란 해석의 기초 연구로, 이를 토대로 해석 대상을 실 기체나 항공모함 등과 같이 대형 복잡 및 복합 구조물로의 확장 가능성과 전자파 산란 연구가 필요한 다양한 분야로의 응용을 기대한다.

References

- [1] M. H. Sohn, J. Jung, J. Lee, and H. H. Kwag, "Stealth aircraft technology and future air warfare," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 81-92, Feb. 2019.
- [2] Y. G. Park, K. Lee, G. B. Hur, and M. S. Lee, "Stealth unmanned aerial vehicle development trend and development direction," *Defense & Technology*, vol. 524, pp. 128-143, Oct. 2022.
- [3] J. J. Jeong, S. W. Jeon, B. C. Jung, C. Y. Kim, and J. W. Kim, "Tendencies and prospects on quantum radar system," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 43, no. 12, pp. 2155-2167, Dec. 2018.
- [4] S. Jung, H. Jo, "Recent studies in IR signature suppression using water spray," in *Proceedings of the Korean Society of Propulsion Engineers Conference*, Busan, Dec. 2018, pp. 411-415.
- [5] J. Choi, G. Ock, M. Son, H. Kim, G. Yang, and J. Kim, et al., "A trend for the contrail reduction technology,"

- Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 12, no. 2, pp. 23-29, Apr. 2018.
- [6] N. Aqilaff, H. T. Yudistira, and F. Qalbina, "Design of tripartite square ring metamaterial absorber using polyvinyl chloride as a flexible substrate at s-band and c-band spectrums," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 34, no. 3, p. 199, Jan. 2023.
- [7] M. Norouzi, S. Jarchi, M. Ghaffari-Miab, M. Esfandiari, A. Lalbakhsh, and S. Koziel, et al., "3D metamaterial ultra-wideband absorber for curved surface," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 1043, Jan. 2023.
- [8] Y. Zhao, G. Ji, "Multi-spectrum bands compatibility: New trends in stealth materials research," *Science China Materials*, vol. 65, no. 11, pp. 2936-2941, Jun. 2022.
- [9] T. Zhou, S. Zhou, S. Cai, B. Yang, and Y. Yue, "Exploring sub-strong scattering source of canopy of fighter with radar stealth technology," *Journal of Northwestern Polytechnical University*, vol. 40, no. 2, pp. 384-390, Apr. 2022.
- [10] G. Shin, Y. Kim, S. H. An, J. H. Joo, and I. J. Yoon, "Design of a parallel resonance based frequency-selective rasorber," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 6, pp. 415-423, Apr. 2022.
- [11] H. R. Im, Y. H. Noh, I. P. Hong, S. H. Kwon, Y. J. Yoon, and M. J. Hwang, et al., "Monostatic RCS measurement for transparent conducting oxide coated dielectric," *The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 9, pp. 762-769, Sep. 2019.
- [12] H. Lee, "Electromagnetic wave absorbers with meta-material structure for RCS reduction," *The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 1, Jan. 2015.
- [13] S. Lim, H. Jeong, E. Park, and K. H. Kim, "Meta-material absorber for Stealth technology applications," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 2, pp. 63-78, Mar. 2022.
- [14] J. W. Choi, Y. J. Kim, D. M. Lee, H. K. Lee, and Y. I. Jang, "A conceptual design study of low-observable wingman UAV," in *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju, Nov. 2022, pp. 1189-1190.
- [15] J. Kim, H. Jang, and J. Oh, "Study on design technology of radar absorbing structure with binary meta surface," in *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, Goseong, Apr. 2022, pp. 71-72.
- [16] J. M. Hyun, J. R. Lee, and J. M. Ahn, "A study on electromagnetic characteristics of uneven surface radar absorbing structures using 3D printer," in *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, Goseong, Apr. 2022, p. 73.
- [17] I. P. Hong, "Design of transparent electromagnetic absorbing structure for stealth aircraft canopy," *Journal of the Korean Institute of Military Science and Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 369-375, Aug. 2015.
- [18] E. Lee, "Fundamentals of finite element method and application of electromagnetic wave analysis," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 6, pp. 11-19, Nov. 2017.
- [19] D. H. Park, C. S. Kang, and J. S. Ahn, "A study on hybrid finite element method for solving electromagnetic wave scattering," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 4, no. 1, pp. 38-43, Mar. 1993.
- [20] W. Park, M. Kim, and W. Lee, "Absorbing boundary conditions and parallelization for waveguide electromagnetic analysis using finite element method," *Journal of Internet Computing and Services*, vol. 23, no. 3, pp. 67-76, Jun. 2022.
- [21] S. H. Kang, D. H. Song, J. W. Choi, and S. J. Shin, "Parallel computation on the three-dimensional electro-

magnetic field by the graph partitioning and multi-frontal method," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, vol. 50, no. 12, pp. 889-898, Dec. 2022.

- [22] S. R. Yi, B. Kim, and J. W. Kang, "A finite element based PML method for time-domain electromagnetic wave propagation analysis," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, vol. 28, no. 2, pp. 123-130, Apr. 2015.
- [23] J. H. Hwang, S. G. Kwon, and Y. Oh, "Improved method of moments using hybrid technique of Galerkin's and interpolation methods for numerical analysis of electromagnetic waves," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and*

Science, vol. 23, no. 4, pp. 541-550, Apr. 2012.

- [24] J. M. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*, 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014.
- [25] J. M. Jin, *Theory and Computation of Electromagnetic Fields*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2010.
- [26] A. Chatterjee, J. M. Jin, and J. L. Volakis, "Edge-based finite elements and vector ABCs applied to 3-D scattering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 2, pp. 221-226, Feb. 1993.
- [27] Ö. Özgün, M. Kuzuoğlu, *MATLAB®-Based Finite Element Programming in Electromagnetic Modeling*, London, CRC Press, 2018.

나 혜 선 [연세대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3201-7785>



2017년 8월: 숙명여자대학교 수학과 (이학사)
2017년 9월~현재: 연세대학교 수학교산학부(계산과학공학) 석·박사통합과정
[주 관심분야] 수치해석, 유한요소법, 맥스웰 방정식, 전자파 산란 해석 등

이 은 정 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9989-3555>



1997년 2월: 경북대학교 수학과 (이학사)
1999년 2월: 경북대학교 수학과 (이학석사)
2005년 8월: University of Colorado at Boulder (이학박사)
2009년 9월~현재: 연세대학교 수학교산학부(계산과학공학) 교수
[주 관심분야] 유한요소법, EIT 관련 역문제, 이미지분석, 의료 영상분석을 위한 기계학습과 딥러닝 등