

전기적 대형 물체 RCS 해석을 위한 근거리-원거리장 변환 알고리즘 연구

Near to Far Field Transformation Algorithm for RCS Analysis of Large Electrical Objects

김우빈 · 홍익표* · 오원석** · 김윤재** · 육종관

Woobin Kim · Ic-Pyo Hong* · Won-Seok Oh** · Yoon-Jae Kim** · Jong-Gwan Yook

요 약

군사무기체계 설계과정에서 레이더 반사 면적(radar cross section: RCS) 사전 분석은 매우 중요하다. 최근 레이더에서 사용되는 파장에 대비하여 미사일이나 전투기 등의 무기체계는 전기적으로 매우 큰 크기를 갖는다. 때문에 매우 높은 성능의 컴퓨팅 파워가 갖춰지지 않는다면 상용 시뮬레이션 프로그램을 통한 RCS 사전 분석이 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 본 논문에서는 영역 분할 해석으로 응용이 가능한 근거리-원거리장 변환 알고리즘을 제시한다. 먼저 알고리즘에 대한 이론적인 수식과 물리적 의미에 대해 분석하고, 적분방정식에 대해 상수부 및 산란특성부로 행렬화하여 무어-펜로즈 의사 역행렬 연산을 활용해 산란특성부분을 해로서 풀어낸다. 이를 통해 원거리장 RCS를 추출할 수 있는가에 관한 연구를 진행하였다.

Abstract

Preliminary analyses of radar cross section (RCS) in the design process of military weapon systems are very important. Recently, weapon systems such as missiles and fighter jets are adapted for large-size electrical objects in preparation for the wavelengths used in radar. Therefore, it is difficult to pre-analyze the RCS through commercial simulation programs unless a high-performance computing power is provided. To solve these problems, we propose a near to far field transformation algorithm that can be applied to domain decomposition analyses. First, we analyzed the theoretical equation and the physical meaning of the algorithm and matricized the integral equation to a constant part and a scattering part. Then, the Moore-Penrose pseudo-inverse matrix method was used to solve the scattering characteristics. We have also studied the possibility of extracting the far field RCS from near field data.

Key words: RCS, Near to Far Field Transformation, Scattering, Target Detection

I. 서 론

현대 국방 분야에서 미사일, 전투기 등과 같은 항공 무

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(UD170044JD)으로 수행되었음.」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

*공주대학교 정보통신공학부(Department of Information & Communication Engineering, Kongju National University)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received July 2, 2019 ; Revised October 2, 2019 ; Accepted October 23, 2019. (ID No. 20190702-001S)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

기 체계의 활용도가 증가하고 있다. 항공 무기 체계가 레이다 탐지로부터 회피하기 위한 저피탐 기술 중요도 및 레이다 의존도가 점차 높아짐에 따라 레이다 반사면적 (radar cross section: RCS) 사전 예측의 중요성이 증대되고 있다. 더불어 최근 레이다에서 주로 사용되는 주파수가 GHz 대역으로 매우 높아졌기 때문에 시뮬레이션을 통한 미사일이나 전투기 등 전기적 대형 물체의 RCS 분석이 어려워지는 추세이다. 그에 따라 미국을 포함한 선진국들에서는 이러한 RCS 특성 예측 및 평가 기술의 중요성을 인식하여 관련 기술 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. 설계 과정의 각 단계별 RCS를 정확히 예측하기 위한 자체 프로그램들을 개발하여 운용하고 있으며, 근거리에서 측정된 RCS 데이터를 바탕으로 적절한 후처리를 통해 원거리장 RCS로 변환하는 기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다^[1].

하지만 국내 국방 분야에서 활용 중인 대부분의 RCS 측정 장비 시스템 및 계산 시뮬레이션은 자체 기술이 아닌 해외 기술 및 장비 등에 의존하고 있는 실정이다. 때문에 근거리-원거리장 RCS 측정 기술 및 효율적인 RCS 계산 알고리즘 확보가 자주 국방 차원에서 매우 큰 기여를 할 것으로 예상된다. 해석시간을 단축하고자 PO(Physical Optics), GO(Geometrical Optics) 등의 고주파 근사 기법(High frequency approximation method)을 활용하지만 full wave 전자기 해석 기법에 비해 정확도 및 신뢰도가 상대적으로 떨어지는 것이 사실이다. 본 논문에서는 사전 RCS 분석과정에서 적용할 수 있는 full wave 해석 기반 영역 분할 근거리-원거리장 변환 알고리즘을 제안하고, 이론적 근거를 분석하여 임의의 산란체에 대한 근거리장 데이터로부터 원거리장 RCS를 계산하는 연구를 진행하였다.

II. 근거리-원거리장 변환 알고리즘

본 논문에서 제안하는 근거리-원거리장 변환 알고리즘은 그림 1과 같이 임의의 산란체(scatterer)에 대한 바이스테틱 근거리 산란과 측정 모델에 근거한다^[2]. 식 (1), 식 (2)처럼 Tx mode의 레이다 안테나는 자유공간 내 등가 전류 밀도 J_s 로 표현할 수 있으며, 자유공간에서 dyadic Green's function은 G_j^E 로 표현할 수 있다^[3].

$$J_s(\bar{r}) = U_i w_T(\bar{r}) \quad (1)$$

$$G_j^E(\bar{r}, \bar{r}') = -\frac{jkZ_F}{4\pi} \left(\bar{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla \right) \frac{e^{-jk|\bar{r}-\bar{r}'|}}{|\bar{r}-\bar{r}'|} \quad (2)$$

식 (1), 식 (2)에서 U_i 는 그림 1처럼 안테나의 피딩 포트에 인가되는 전압 값이며, w_T 는 측정에 사용하는 안테나의 거리에 따른 이득 값을 나타낸다. k 는 파수, Z_F 는 자유공간의 임피던스($\approx 377\Omega$), \bar{I} 는 unit dyadic을 뜻하며, \bar{r}, \bar{r}' 은 각각 source point, observation point를 나타낸다.

전류밀도 J_s 와 dyadic Green's function의 곱을 통해 산란체를 향하여 입사하는 전기장(incident E-field)과 해당 입사파에 의해 산란체로부터 방사되는 전기장(scattered E-field) 모두 적분형태로 표현할 수 있으며, 그 수식은 다음과 같다.

$$E_i(\bar{r}) = \iiint_{V_T} G_j^E(\bar{r}, \bar{r}_T + \bar{r}'_T) \cdot J_s(\bar{r}_T + \bar{r}'_T) d^3\bar{r}'_T \quad (3)$$

$$E_s(\bar{r}) = \iiint_V G_j^E(\bar{r}, \bar{r}') \cdot s(\bar{r}') \cdot E_i(\bar{r}') d^3\bar{r}' \quad (4)$$

산란 전기장 적분식 내 피적분 함수 중 $s(\bar{r}')$ 은 산란체의 모양, 물질 특성 등에 의해 결정된다. 이러한 선형 관계는 Born approximation^[4] 및 reciprocity에 근거하여 Rx mode 안테나에서 측정되는 U_m 값을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$U_m = \iiint_{V_R} w_R(\bar{r}_R + \bar{r}'_R) \cdot E_s(\bar{r}_R + \bar{r}'_R) d^3\bar{r}'_R \quad (5)$$

식 (1)~식 (5)를 모두 조합하여 전개하면 식 (6)과 같다.

$$U_m = U_i \iiint_V \gamma_R(\bar{r}) \cdot s(\bar{r}) \cdot \gamma_T(\bar{r}) d^3\bar{r} \quad (6)$$

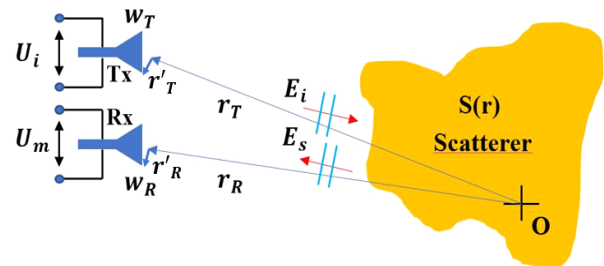


그림 1. 선형 바이스테틱 산란 모델
Fig. 1. Linear bistatic scattering model.

$$\gamma_{R,T}(\bar{r}) = \iiint_{V_{R,T}} w_{R,T}(\bar{r}_{R,T} + \bar{r}') \cdot G_J^E(\bar{r}_{R,T} + \bar{r}', \bar{r}) d^3\bar{r}' \quad (7)$$

이 때, dyadic Green's function의 phase term을 따로 분리하여 표현할 수 있으며 식 (8)과 같다^[5].

$$G_J^E(\bar{r}_{R,T} + \bar{r}', \bar{r}) \approx G_J^E(\bar{r}_{R,T}, \bar{r}) e^{-jk \frac{|\bar{r}_{R,T} - \bar{r}|}{|\bar{r}_{R,T} - \bar{r}'|} \cdot \bar{r}'} \quad (8)$$

해당 근사식을 식 (6)에 대입하면 각 항은 3D 푸리에 변환(Fourier transform)형태로 간주할 수 있으며, r 에 대한 적분에서 k 에 대한 적분으로 변환할 수 있다. 추가로 계산속도 향상 및 수식적 표현의 간략화를 위하여 fast multipole method(FMM)와 multilevel FMM(MLFMM)을 적용하면 U_m 에 대한 적분방정식은 식 (9), 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다^{[6][7]}.

$$U_m \approx -U_i \left(\frac{kZ_F}{4\pi} \right)^2 \lim_{L \rightarrow \infty} \oint \frac{T_L(2\bar{k}, \bar{r}_a)}{|r_a|} \eta_s(\bar{k}) d^2\bar{k} \quad (9)$$

$$\eta_s(\bar{k}) = W_R(\hat{k}) S(2\bar{k}) W_T(\hat{k}) \quad (10)$$

$$T_L(k, \hat{k}, \bar{R}) =$$

$$\frac{k}{(4\pi)^2} \sum_{l=0}^L (-j)^{l+1} (2l+1) \cdot h_l^{(2)}(k|R|) P_l(\hat{k} \cdot \hat{R}) \quad (11)$$

식 (10)에서 $W_{R,T}(\hat{k})$ 와 $S(\bar{k})$ 는 기준 r 에 대한 함수 $w_{R,T}(\bar{r})$ 및 $s(\bar{r})$ 의 푸리에 변환 형태를 뜻한다. 식 (11)의 $h_l^{(2)}$ 은 제 2종 한켈함수를, P_l 은 르장드르 다항식을 나타낸다. 식 (9)는 그림 2와 같이 반경이 1 m인 단위구(unit sphere)에 대한 적분이므로 구 좌표계의 θ 와 ϕ 에 대한 적분식으로 변환할 수 있으며, 변환된 적분방정식은 다음과 같다.

$$U_m = -U_i \left(\frac{kZ_F}{4\pi} \right)^2 \lim_{L \rightarrow \infty} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{T_L(2\bar{k}, \bar{r}_a)}{|r_a|} \cdot S(2\bar{k}) \sin\theta d\theta d\phi \quad (12)$$

변환된 적분방정식인 식 (12)에서 $S(2\bar{k})$ 는 임의의 형태 및 물질특성을 가진 산란체를 구 좌표계의 원점으로부터 반경 1 m인 단위구 산란체로 모델링했을 때 모든

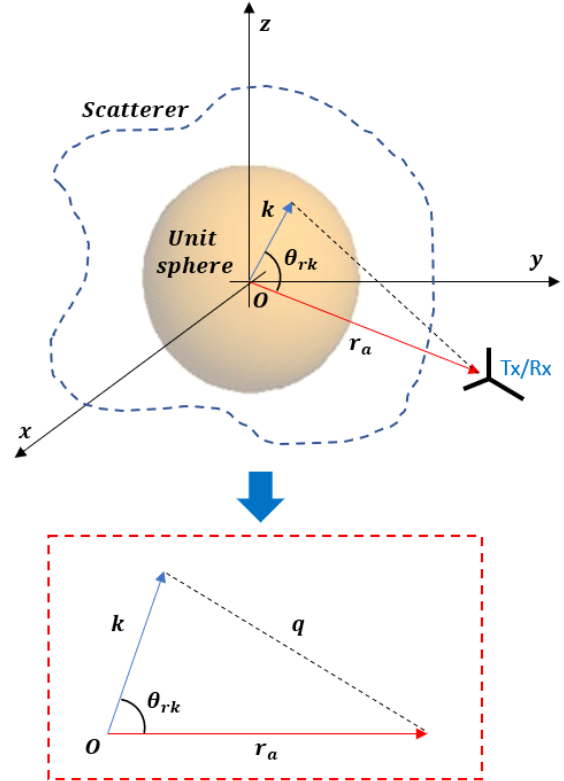


그림 2. 산란체에 대한 단위구 적분 모델
Fig. 2. Geometric model of unit sphere integral.

입체각 $0-4\pi$ 에 대한 산란특성을 뜻하는 함수이다. 따라서 Rx mode의 레이다 안테나에서 측정되는 근거리장 U_m 은 모든 k 벡터에 대한 산란특성이 반영된 적분 결과 값을 알 수 있다.

식 (12)의 적분방정식을 코드화 하기 위하여 먼저 극한 값 L 을 무한대 대신 유한한 숫자로 한정시켜야 한다. L 값은 일반적인 FMM에서 가장 효율적이면서도 정확도를 잃지 않는 다중극 한도(truncation number)^[8]에 따라 결정되는데 해당 수식은 다음과 같다.

$$L = kd + \beta(kd)^{1/3} \quad (13)$$

식 (13)에서 k 는 파수, d 는 블록의 크기를 의미하며, β 값은 일반적인 경우 6으로 설정한다.

식 (12)의 적분을 컴퓨팅 코드로 수행할 때에 구분구적법을 무한하게 차분하여 적용할 수 없기 때문에 식 (13)으로 결정한 L 값을 기반으로 수치적분법을 적용해야 한

다. θ 에 대한 적분은 $(L+1)$ -point Gauss quadrature, ϕ 에 대한 적분은 $(2L+1)$ -point Simpson's rule을 일반적으로 적용하므로^[9] 단위구 표면에서 k 벡터가 움직이는 샘플이 총 $(L+1) \cdot (2L+1)$ 개 요구된다.

더불어 그림 2에서처럼 단위구 표면 샘플에 대한 적분을 수행할 때 k 벡터의 움직임에 따라 θ, ϕ 가 변화하기 때문에 입체각 θ_{rk} 도 변화한다. 변화하는 각각의 θ_{rk} 값을 반영하기 위하여 제 2 코사인 법칙을 활용하였다. 시뮬레이션 조건 하에서 근거리장 측정 거리 벡터 r_a 와 벡터 k 의 크기는 알고 있는 값이다. 또한 모든 k 벡터 샘플에 대한 직각좌표계를 추출할 수 있으므로 그림 (2)의 q 벡터 크기 도 계산이 가능하다. 그러므로 변화하는 k 벡터의 모든 샘플에 대한 입체각 θ_{rk} 또한 동일하게 식 (13)으로부터 $(L+1) \cdot (2L+1)$ 개 만큼 계산할 수 있다.

$$\theta_{rk} = \cos^{-1} \frac{|\vec{k}|^2 + |\vec{r}_a|^2 - q^2}{2r_a} \quad (14)$$

식 (14)에 따라 모든 k 벡터 샘플에 대한 θ_{rk} 값들을 추출한 후 식 (12)를 수치적분 형태로 전개하면 그림 3과 같은 형태로 행렬화 할 수 있다. 이 때 w_i 와 θ_i 는 수치적분 샘플 개수에 따라 정해지는 Gauss quadrature의 weight 값과 quadrature point 값이며, U_m 은 시뮬레이션 혹은 측정을 통해 얻을 수 있는 근거리장 데이터 행렬이다. 따라서 U_m 행렬, T_L 행렬과 $w_i \sin \theta_i$ 행렬은 알고 있는 값들에 의해 사전 연산이 가능한 known matrix이며, 무어-펜로즈 의사역행렬 방법(Moore-Penrose pseudo inverse matrix method)을 활용하여 산란체의 산란 특성 정보를 담고 있는 scattering matrix S 를 계산할 수 있다.

그림 3에서 설명한 과정으로 계산한 S matrix 요소들을

$$\begin{aligned} U_m &= -\left(\frac{kZ_F}{4\pi}\right)^2 \frac{1}{|r_a|} \frac{k}{(4\pi)^2} \frac{\pi}{2} \frac{\pi}{3L} \begin{bmatrix} U_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_i \sin \theta_i \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{matrix} (L+1) \times 1 \\ \text{Near field data} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (L+1) \times (2L+1) \\ \text{Unknown} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (L+1) \times (2L+1) \\ \text{Unknown} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (L+1) \times 1 \end{matrix} \\ U_m &= \text{Constant} \begin{bmatrix} S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_L \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} w_i \sin \theta_i \end{bmatrix}^T \\ &\quad \begin{matrix} (L+1) \times 1 \\ \text{Near field data} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (L+1) \times (2L+1) \\ \text{Unknown} \end{matrix} \quad \begin{matrix} (2L+1) \times (L+1) \end{matrix} \quad \begin{matrix} (L+1) \times 1 \end{matrix} \end{aligned}$$

그림 3. 적분방정식의 행렬화 모식도

Fig. 3. Matirixmization diagram of integral equation.

활용하여 원거리장 RCS를 계산할 수 있으며, 식은 다음과 같다^[10]. \hat{h}_T 및 \hat{h}_R 은 Tx/Rx mode 안테나의 유효 길이(normalized effective length)를 나타낸다.

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \frac{k^2 Z_F^2}{4\pi} |\hat{h}_R \cdot S(\vec{k}) \cdot \hat{h}_T|^2 \quad (15)$$

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

본 장에서는 2장에서 서술한 근거리-원거리장 변환 알고리즘의 이론적인 배경을 근거로 한 자체 계산 코드를 활용하여 몇 가지 단순한 구조의 산란체에 대한 모노스태틱 원거리장 RCS 데이터를 계산하고, 그 결과값을 상용 전자기 시뮬레이션 툴인 Altair사의 FEKO에서 계산한 모노스태틱 원거리장 RCS 값과 비교 분석하였다.

먼저 RCS 계산 소요시간을 고려하여 입사파는 1 V/m의 세기를 갖는 θ 방향 편파 전기장으로 설정하였고, 주파수는 100 MHz로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 5는 그림 4와 같은 시뮬레이션 조건으로 비교적 단순한 구조의 산란체인 원기둥과 원뿔에 대한 원거리장 변환 결과를 나타낸다. 주파수와 산란체 크기에 따라 결정되는 L 값에 근거하여 근거리장 샘플 수는 13개로 설정했다. 근거리장 추출 거리(r_a)는 두 경우 모두 5 m로 설정하여 계산하였다. 두 결과 그래프에서 전체적인 경향성은 매우 유사하게 따라가는 반면, 입사각 별 오차가 발생하는 구간의 차이가 있다. 기준 원거리장 RCS에 대비하

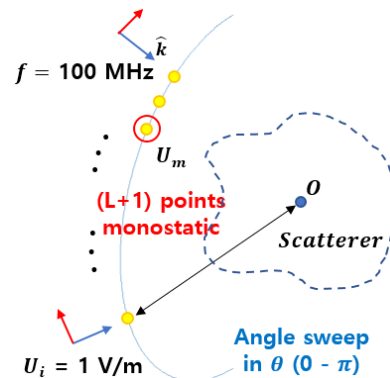


그림 4. 임의의 산란체에 대한 시뮬레이션 조건

Fig. 4. Simulation condition for arbitrary scatterer.

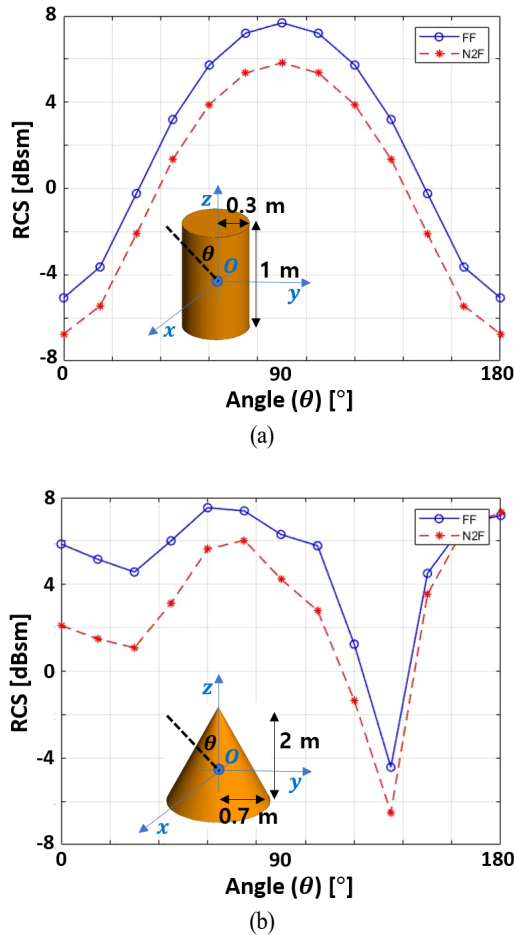


그림 5. (a) 원통형 산란체에 대한 원거리장 변환 결과, (b) 원뿔형 산란체에 대한 원거리장 변환 결과
Fig. 5. (a) Far field transform result about cylindrical scatterer, (b) Far field transform result about cone scatterer.

여 가장 오차가 큰 입사각은 각각 90도와 0도임을 확인할 수 있는데, 해당 입사각은 원형 평판구조에 대비하여 비교적 산란이 많이 발생하여 입사각 방향으로 돌아오는 산란파가 적다. 또한 이러한 모서리 형태 구조는 입사 전기장에 의해 유도되는 전류분포 측면에서 복잡한 구조이며, 산란체 다른 부위와의 상호작용이 충분히 반영되지 않은 근거리장 데이터로부터 계산한 원거리장 RCS이기 때문에 가까운 거리에서 추출할수록 상대적으로 오차가 크게 발생한다. 따라서 원거리장 RCS 변환 알고리즘 검증과정에 있어서 물리적 단순구조의 산란체가 아닌 전류

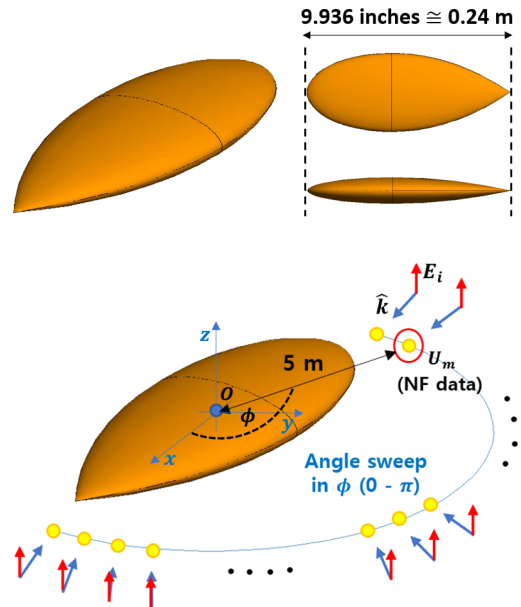


그림 6. NASA almond 모델
Fig. 6. Geometric model of NASA almond.

분포 측면의 단순구조 산란체를 통한 검증이 필요하였고, 조건에 타당한 NASA almond 구조에 대한 추가 검증을 진행하였다.

NASA almond 구조의 원거리장 RCS는 1.19 GHz, 7 GHz, 21 GHz 등 산란체의 전기적 크기가 $n\lambda$ ($n=1,2,3,\dots$)에 해당하는 몇 가지 주파수에 대하여 원거리장 VV 편파 RCS 값이 검증되어 있기 때문에 해당 검증 값을 기준으로 변환 결과를 비교 분석하였다. 그림 7은 입사 전기장의 주파수를 1.19 GHz, 7 GHz로 설정했을 때 결과이며, 앞선 그림 5의 결과와 마찬가지로 주파수의 변화에 따라 L 값이 변화하기 때문에 근거리장 샘플 개수는 41개, 161개로 설정하여 계산하였다.

NASA almond 구조는 원기둥 및 원뿔 구조에 비해 상대적으로 모서리 구조가 거의 없음에 따라 그림 7(b)는 그림 5의 결과 대비 경향성의 벌어짐이 특정 구간 없이 균일하게 나타남을 보여준다. 그러나 그림 7(a)처럼 입사 전기장의 주파수와 근거리장 추출 거리, 산란체 구조에 따라 RCS 값의 오차정도가 변화함을 확인할 수 있으며 다양한 변수에 따른 변화 경향성을 파악하고, 계산 코드를 수정하여 추후 연구에서 보완해야 할 부분이다.

IV. 결 론

현대 국방 분야의 항공 무기 체계 활용도가 증가함에 따라 레이더의 중요성이 증대되고, 최근 레이더에서 활용되는 주파수는 GHz 대역으로 매우 높아지고 있다. 때문에 시뮬레이션을 통한 미사일이나 전투기 등 전기적 대형 물체의 RCS 사전 분석이 어려워지는 추세이다. 하지만 국내 국방 분야의 RCS 측정 시스템 및 시뮬레이션은 자체 기술의 부재로 해외 의존도가 매우 높은 실정이기 때문에 효율적인 RCS 계산 알고리즘 및 측정 기술 확보가 시급하다.

이에 기여하기 위한 방안으로 본 논문에서는 full wave 해석 기반 영역 분할 근거리-원거리장 변환 알고리즘을 제안하였고, 이론적 수식에 근거한 자체 코드를 활용하여 몇 가지 산란체에 대해 원거리장 RCS 변환 결과를 계산 및 검증하였다. 현재까지 연구 결과로는 매우 유사한 경향성을 따라가는 반면, 측정 주파수와 거리, 산란체 구조에 따라 dB 값 오차가 다양하게 발생하기 때문에 변수에 따른 오차 경향 파악 및 코드 디버깅을 통해 오차를 최소화 하는 과정이 필요하다. 오차에 대한 보완이 완료되면 추후 영역 분할 해석을 적용하여 GHz 대역의 전기적 대형 물체에 대한 검증을 추가적으로 진행할 계획이다.

References

- [1] G. H. Kim, H. Y. Choi, and K. H. Kwon, "Overview on recent technologies for RCS characterization", *Korean Journal of Metals and Materials*, vol. 19, no. 6, pp. 34-41, Dec. 2006.
- [2] G. Schnattinger, R. A. M. Mauermayer, and T. F. Eibert, "Monostatic radar cross section near-field far-field transformations by multilevel plane-wave decomposition," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 8, pp. 4259-4268, Aug. 2014.
- [3] T. F. Eibert, E. Kaliyaperumal, and C. H. Schmidt, "Inverse equivalent surface current method with hierarchical higher order basis functions, full probe correction and multilevel fast multipole acceleration," *Progress In Electromag-*

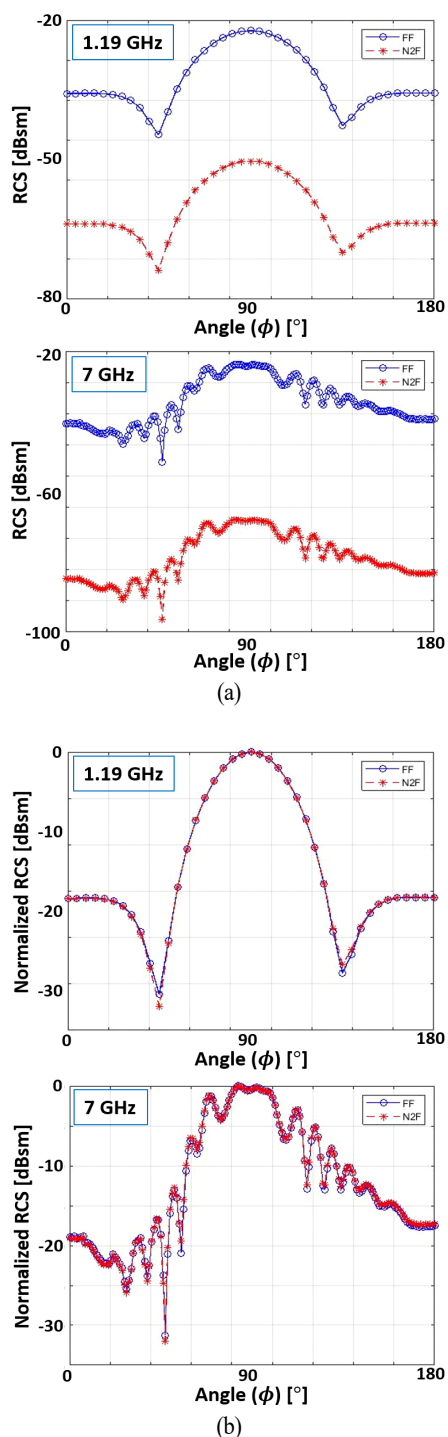


그림 7. (a) NASA almond에 대한 원거리장 변환 결과,
(b) Normalized RCS 간 비교
Fig. 7. (a) Far field transform result about NASA almond,
(b) Comparison of normalized RCS.

- netics Research*, vol. 106, pp. 377-394, 2010.
- [4] J. E. Gubernatis, E. Domany, J. A. Krumhansl, and M. Huberman, "The born approximation in the theory of the scattering of elastic waves by flaws," *Journal of Applied Physics*, vol. 48, no. 7, pp. 2812-2819, 1977.
- [5] S. Omi, T. Uno, T. Arima, T. Fujii, and Y. Kushiyama, "Near-field far-field transformation utilizing 2-D plane-wave expansion for monostatic RCS extrapolation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1971-1974, Mar. 2016.
- [6] I. J. LaHaie, E. I. LeBaron, and J. W. Burns, "Far field radar cross-section(RCS) predictions from planar near field measurements," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1992 Digest*, Chicago, IL, 1992, vol. 3, pp. 1542-1545.
- [7] C. H. Schmidt, T. F. Eibert, "Multilevel plane wave based near-field far-field transformation for electrically large antennas in free-space or above material halfspace," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 5, pp. 1382-1390, May 2009.
- [8] C. S. Park, I. P. Hong, O. Kwon, Y. J. Kim, and J. G. Yook, "A fast computation method of far field interactions in CBFM for electromagnetic analysis of large structures", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 9, pp. 701-706, Sep. 2018.
- [9] W. C. Gibson, *The Method of Moments in Electromagnetics*, Boca Raton, FL, Chapman and Hall/CRC, 2007.
- [10] I. J. LaHaie, "Overview of an image-based technique for predicting far-field radar cross section from near-field measurements," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 45, no. 6, pp. 159-169, Dec. 2003.

김 우 빈 [연세대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9109-2470>



2017년 2월: 한국항공대학교 전자및항공
전자공학과 (공학사)
2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자
공학과 석박사 통합과정
[주 관심분야] 전자기 수치해석, Near to
Far Field Transformation, EMP

홍 익 표 [국립 공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
사)
1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
석사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학
과 (공학박사)
2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 무선

사업부 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar
2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar
2003년 3월~현재: 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수
[주 관심분야] 전자기 수치해석, EMI/EMC, 안테나

오 원 석 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2198-1701>



2009년 8월: 연세대학교 기계공학과 (공학사)

2016년 8월: 연세대학교 기계공학과 (공학박사)

2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 스텔스, 주파수 선택 표면 (FSS), 전자기 수치해석 및 RCS 측정, 항공기 구조해석, 비선형 충격 해석

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF 바이오/가스센서 등

김 윤 재 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1048-5318>



2005년 8월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)

2011년 8월: 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)

2011년 9월~2012년 3월: 서울대학교 정밀기계공동연구소 선임연구원

2012년 4월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] 기체구조, 진동소음, 주기격자구조