

증분 회절이론을 이용한 완전도체 산란체의 레이다 단면적 해석

Analysis of Radar Cross-Section of Perfect Electric Conductor Scatterer Using the Incremental Theory of Diffraction

이소영* · 이해승* · 신호근** · 윤대영* · 박용배*,***

Soyeong Lee* · Haeseung Lee* · Hokeun Shin** · Daeyoung Yoon* · Yong Bae Park*,***

요 약

본 논문에서는 고주파 근사기법인 증분 회절이론을 이용하여 완전도체 재질을 갖는 임의의 산란체의 레이다 단면적을 계산한다. 산란체 표면에서의 반사파는 기존의 shooting and bouncing rays (SBR)로 계산하고, 모서리에서의 회절파는 증분 회절이론을 이용하여 계산한다. 서로 다른 크기를 가진 두개의 직육면체로 이루어진 산란체의 모노스태틱 및 바이스태틱 레이다 단면적을 계산하고, 상용 소프트웨어의 시뮬레이션 결과와 비교하여 계산 방법을 검증한다. 또한, 단순 선박에 대한 바이스태틱 레이다 단면적을 계산하여 기존의 physical theory of diffraction (PTD) 기법에서 갖는 발산 문제를 해결할 수 있음을 보인다.

Abstract

This paper presents the calculation of the radar cross-section (RCS) of an arbitrary scatterer with a perfect electric conductor by using the incremental theory of diffraction (ITD), a high-frequency technique. The reflected field at the surface of the scatterer is calculated using conventional shooting and bouncing rays (SBR), and the diffracted field at the edge is calculated using the ITD. The proposed method is verified by calculating the monostatic and bistatic RCS of a scatterer composed of two cubes of different sizes and comparing it with the simulation results from CST Microwave Studio. Furthermore, it is demonstrated by calculating the bistatic RCS for a simplified ship that the divergence problem in the physical theory of diffraction can be solved using the proposed method.

Key words: Radar Cross Section (RCS), High Frequency Technique, Incremental Theory of Diffraction (ITD), Physical Theory of Diffraction (PTD), Shooting and Bouncing Rays (SBR)

I. 서 론

레이다(radar)는 임의의 산란체에 전파를 가한 후, 되돌

아오는 신호를 탐지하여 산란체에 대한 정보를 얻는 시스템이다. 송신한 전자파가 산란체에 의한 반사 및 회절로 수신기에 도달하는 신호의 크기를 레이다 단면적

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

*아주대학교 AI 융합네트워크학과(Department of AI Convergence Network, Ajou University)

**한화시스템 해양연구소 판교파트(Naval R&D Center Pangyo Part, Hanwha Systems)

***아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received September 06, 2021 ; Revised September 15, 2021 ; Accepted October 21, 2021. (ID No. 20210906-074)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

(RCS, radar cross section)이라고 한다. 레이더 단면적은 입사파의 편파, 입사각, 관측각, 산란체 구조 등의 여러 요인을 고려하는 파라미터로 레이더 및 스텔스 설계에서 중요한 설계요소 중 하나이다.

대표적인 레이더 단면적 예측 기법은 full-wave 해석 방법 및 고주파 근사기법 등이 사용된다^{[1]~[8]}. 모멘트법(MoM, method of moment), 유한요소법(FEM, finite element method), 유한차분 시간영역법(FDTD, finite difference time domain) 등 full-wave 해석 방법을 이용하면 산란파에 대한 정확한 해를 구할 수 있다. 하지만 해석 대상이 파장보다 큰 경우, 계산량이 크게 증가하므로 full-wave 해석 방법을 이용하기에는 한계가 있다. 따라서 산란체의 크기가 파장보다 큰 경우, 효율적인 계산을 위해 고주파 근사기법을 이용한다.

대표적인 고주파 근사기법은 기하 광학법(GO, geometric optics), 물리 광학법(PO, physical optics), SBR(shooting and bouncing rays) 등이 있다^{[4]~[17]}. GO 기법은 ray-tracing 방법을 기반으로 산란체 표면에서 발생하는 다중 반사를 고려할 수 있으나, 회절의 효과를 고려하지 못하므로 정확도의 한계를 가진다. 산란파 계산의 정확도를 높이기 위해 GO 기법을 기반으로 산란파 회절까지 고려한 GTD(geometrical theory of diffraction)^[8], UTD(uniform theory of diffraction)^{[9],[10]} 등을 이용하여 산란파 계산의 정확도를 높였다. 하지만 GO 기법 기반의 고주파 근사기법은 레이더 단면적 해석에 적합하지 않으며, 레이더 단면적 계산에는 주로 PO 기법을 이용한다.

PO 기법은 전자파가 산란체에 직접 입사하는 경우, 표면 등가 전류를 정의하여 산란파를 예측할 수 있으나, 다중 반사를 고려하지 못하는 한계가 있다. 다중 반사를 고려하기 위해 SBR이 도입되었으나^[11], 산란체의 모서리에서 발생하는 회절은 고려하지 못한다. 산란파 계산의 정확도를 높이기 위해서는 반사뿐만 아니라, 회절까지 고려해야 한다. 기존에는 SBR을 통해 계산된 다중 반사와 PTD(physical theory of diffraction) 기법을 이용하여 계산한 회절파를 합성하여 계산의 정확도를 높였다^{[16], [17]}. 하지만 상기 방법들은 바이스태틱 조건에서 입사파 또는 산란파의 방향이 모서리와 일직선에 존재하는 경우, 산란파가 발산하는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해

결하기 위해 임의의 입사각과 관측각에 대한 회절파를 계산할 수 있는 증분 회절이론(ITD, incremental theory of diffraction)이 제안되었다^{[18]~[21]}. 기존의 증분 회절이론은 주로 산란체의 구조가 디스크, 썸brero 형상과 같이 기본적인 구조에 대해 산란파를 계산하였지만, 임의의 형상을 가진 산란체에 대해 적용된 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 증분 회절이론을 이용하여 완전도체 재질을 갖는 산란체의 회절파 예측 기법을 소개하고자 한다. 임의의 산란체의 레이더 단면적을 계산하기 위해 SBR을 통해 다중 반사를 계산하고, 모서리에서 발생하는 회절파는 증분 회절이론을 이용하여 계산한다. 제안된 회절파 예측 기법을 이용하여 서로 다른 크기를 갖는 두 직육면체 구조의 모노스테틱 레이더 단면적을 계산하고, 상용 소프트웨어 결과와 비교하여 검증한다. 그리고 같은 구조에서 바이스태틱 레이더 단면적을 계산하여 PTD 기법에서의 발산 문제를 해결할 수 있음을 보인다. 또한, 보다 복잡한 구조의 단순 선박에 대해 바이스태틱 레이더 단면적을 계산하여 PTD 기법에서의 발산 문제를 해결할 수 있음을 보인다.

II. 증분 회절이론을 이용한 회절파 계산

그림 1과 같이, 임의의 산란체에서 발생하는 산란파는 면에서의 반사파와 모서리에서 발생하는 회절파로 표현된다. SBR을 기반으로 다중 반사를 고려하여 면에서 발생하는 반사파를 계산한다. 임의의 산란체가 그림 2의 썸brero 구조와 같이 기하학적 불연속이 존재할 경우, 모서리에 의

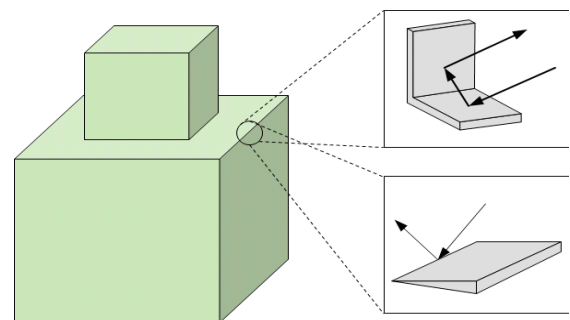


그림 1. 임의의 형상에 대한 산란파 예시
Fig. 1. An example of the scattered electromagnetic (EM) field for arbitrary structure.

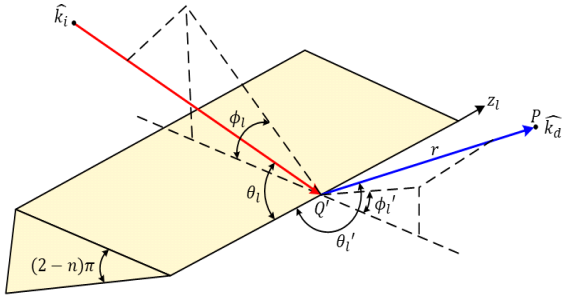


그림 2. 국부화된 접선 썰기 구조

Fig. 2. A locally tangent wedge for defining incremental diffracted field contributions.

해 회절파가 발생한다. 기존에 회절파는 PTD 기법을 이용하였으며, 식 (1)~식 (3)과 같이 계산할 수 있다^{[5],[16],[17]}.

$$E_d = jk \int \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \{Z_0 I_e \hat{k}_d \times (\hat{k}_d \times \hat{z}_l) + I_m (\hat{k}_d \times \hat{z}_l)\} dl \quad (1)$$

$$I_e = j2 \frac{\hat{z}_l \cdot \vec{E}_i}{k_0 Z_0 \sin \theta_l \sin \theta_l'} f \quad (2)$$

$$I_m = j2 \frac{\hat{z}_l \cdot \vec{H}_i}{k_0 Y_0 \sin \theta_l \sin \theta_l'} g \quad (3)$$

식 (1)에서 I_e , I_m 은 식 (2), (3)과 같이 모서리에서의 전류를 의미한다^[17]. Z_0 , Y_0 는 자유공간에서의 임피던스와 어드미턴스를 나타내며, f 와 g 는 회절계수를 의미한다^[17]. θ_l 과 θ_l' 는 각각 입사파와 산란파의 방향 벡터와 모서리가 이루는 각도를 의미한다. 그러나, 기존에 주로 사용되는 PTD 기법은 식 (2), 식 (3)에서와 같이 $\sin \theta_l$ 또는 $\sin \theta_l'$ 가 0이 되는 경우, 즉 바이스태틱 조건에서 입사각 또는 관측각이 모서리와 일직선일 때, 모서리에서의 전류가 발산하기 때문에 회절파를 계산할 수 없다.

증분 회절이론은 UTD 기법에서 기원하였으며, PTD 기법과는 다르게 입사파 및 산란파의 방향이 썰기 구조의 모서리와 일직선상에 존재하더라도 회절파를 계산할 수 있다^{[18]~[21]}. 완전도체 재질을 갖는 산란체의 모서리 위의 임의의 점 Q 에서의 국부 좌표계를 정의하고 Q 의 접선 방향으로 썰기 구조를 가정한다. 그림 2에서는 z_l 축을 따라 썰기 구조의 무한한 모서리를 가정한다. 이때, 관

측점 P 에서의 회절파는 식 (4)와 같이 Q 의 회절파 소스를 미소 길이만큼 적분하여 계산할 수 있다^{[18],[19]}.

$$E_e^d(P) = \int (F^d(Q) - F_e^{po}(Q)) e^{-jkz_l \cos \theta} dl \quad (4)$$

식 (4)에서 F_e^{po} 는 모서리와 같이 불연속 지점에서 계산되는 PO 계산을 보정하기 위한 식으로 식 (5)~(7)과 같이 표현할 수 있다^{[18],[19]}.

$$\vec{F}_e^{po}(Q) = \vec{S}_e^{po}(Q) \cdot \vec{E}^i(Q) \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \quad (5)$$

식 (5)에서 r 은 임의의 점 Q 에서 관측점 P 까지의 거리를 나타낸다. \vec{E}^i 는 입사 전기장을 의미하고, \vec{S}_e^{po} 는 식 (6), 식 (7)과 같다^{[18],[19]}.

$$\vec{S}_e^{po} = S_{\theta_l \theta_l'}^{po} \hat{\theta}_l \hat{\theta}_l' + S_{\theta_l \phi_l}^{po} \hat{\theta}_l \hat{\phi}_l + S_{\phi_l \theta_l}^{po} \hat{\phi}_l \hat{\theta}_l + S_{\phi_l \phi_l}^{po} \hat{\phi}_l \hat{\phi}_l' \quad (6)$$

$$S_{\theta_l \theta_l'}^{po} = u(\pi - \phi_l) \frac{1}{2} \times \left[-\cot\left(\frac{\pi - \Phi^+}{2}\right) U\left(2K \cos^2\left(\frac{\Phi^+}{2}\right)\right) + \cot\left(\frac{\pi - \Phi^-}{2}\right) U\left(2K \cos^2\left(\frac{\Phi^-}{2}\right)\right) \right]$$

$$S_{\theta_l \phi_l}^{po} = -u(\pi - \phi_l) \cos \theta_l'$$

$$S_{\phi_l \theta_l}^{po} = 0$$

$$S_{\phi_l \phi_l}^{po} = u(\pi - \phi_l) \frac{1}{2} \times \left[\cot\left(\frac{\pi - \Phi^+}{2}\right) U\left(2K \cos^2\left(\frac{\Phi^+}{2}\right)\right) + \cot\left(\frac{\pi - \Phi^-}{2}\right) U\left(2K \cos^2\left(\frac{\Phi^-}{2}\right)\right) \right] \quad (7)$$

여기서 $U(Ka)$ 는 UTD 전환 함수를 의미한다^[10]. 식 (7)에서 코탄젠트 항이 발산하는 경우, UTD 전환 함수가 0의 값을 가진다. 식 (4)에서 F^d 는 회절파 소스로 아래의 식 (8)~식 (10)과 같이 표현할 수 있다^{[18], [19]}.

$$\vec{F}^d(Q) = \vec{S}^d(Q) \cdot \vec{E}^i(Q) \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \quad (8)$$

식 (8)에서 \vec{S}^d 는 회절 계수로 아래의 식 (9), (10)과 같다^{[18],[19]}.

$$\vec{S}^d = D^s \hat{\theta}_l \hat{\theta}_l' + D^h \hat{\phi}_l \hat{\phi}_l' \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
D^s = & \frac{1}{2n} \left[\cot \left(\frac{\pi - \Phi^-}{2n} \right) U(Ka^-(\Phi^-)) \right. \\
& + \cot \left(\frac{\pi + \Phi^-}{2n} \right) U(Ka^+(\Phi^-)) \Big] \\
& \mp \frac{1}{2n} \left[\cot \left(\frac{\pi - \Phi^+}{2n} \right) U(Ka^-(\Phi^+)) \right. \\
& + \cot \left(\frac{\pi + \Phi^+}{2n} \right) U(Ka^+(\Phi^+)) \Big]
\end{aligned} \quad (10)$$

$n\pi$ 는 모서리를 이루는 두 평판 사이의 외부 각도를 의미하며, 식 (10)의 회절 계수에서 각각의 코탄젠트 항이 발산하는 경우는 표 1과 같이 총 4가지이다. 이때, $U(Ka)$ 는 UTD 기법과 같이 0의 값을 가진다. 또한, $U(Ka)$ 함수의 인자가 10보다 클 경우, $U(Ka)$ 는 1로 수렴한다^[10].

III. RCS 해석 결과 및 분석

임의의 산란체의 레이더 단면적을 계산하기 위해 서로 다른 크기를 갖는 두 직육면체 구조와 단순 선박 구조^[5]를 사용하였다. 증분 회절이론을 이용하여 서로 다른 크기를 갖는 두 직육면체 구조의 모노스테틱 레이더 단면적을 계산하고, CST사의 microwave studio (MWS) 결과와 비교하여 검증한다. 그리고 같은 구조에서 바이스테틱 레이더 단면적을 계산하여 PTD 기법에서의 발산 문제를 해결할 수 있음을 보인다. 또한, 보다 복잡한 구조의 단순 선박에 대해 바이스테틱 레이더 단면적을 계산하여 PTD 기법에서의 발산 문제를 해결할 수 있음을 보인다.

그림 3은 레이더 단면적 계산에 사용된 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$

표 1. 회절계수가 발산하는 조건^[10]

Table 1. Conditions where the diffraction coefficient is singularity^[10].

Singular term	Condition
$\cot \left(\frac{\pi - \psi_s + \psi_i}{2n} \right)$	$\psi_i \leq (n-1)\pi, \psi_s = \pi + \psi_i$
$\cot \left(\frac{\pi + \psi_s - \psi_i}{2n} \right)$	$\psi_i \geq (n-1)\pi, \psi_s = \psi_i - \pi$
$\cot \left(\frac{\pi - \psi_s - \psi_i}{2n} \right)$	$\psi_i \leq (n-1)\pi, \psi_s = \pi - \psi_i$
$\cot \left(\frac{\pi + \psi_s + \psi_i}{2n} \right)$	$\psi_i \geq (n-1)\pi, \psi_s = (2n-1)\pi - \psi_i$

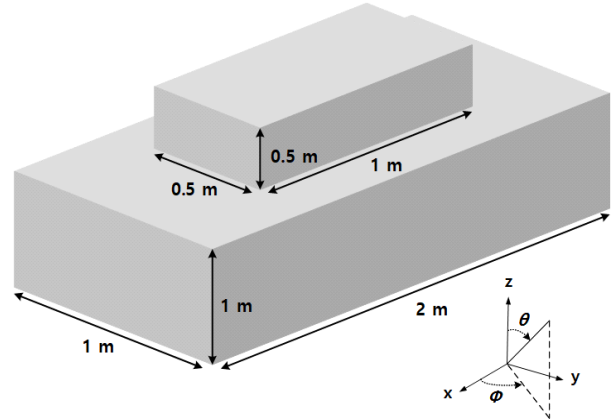


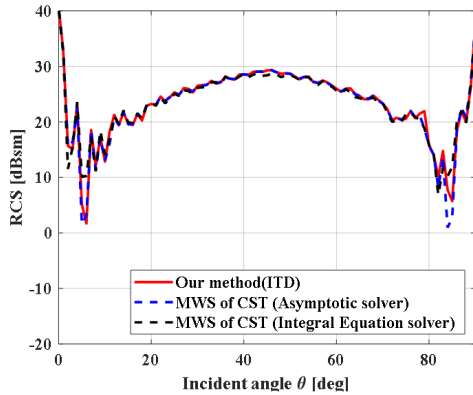
그림 3. 크기가 다른 두 직육면체가 겹쳐진 모델

Fig. 3. A stacked two cubes model with different sizes.

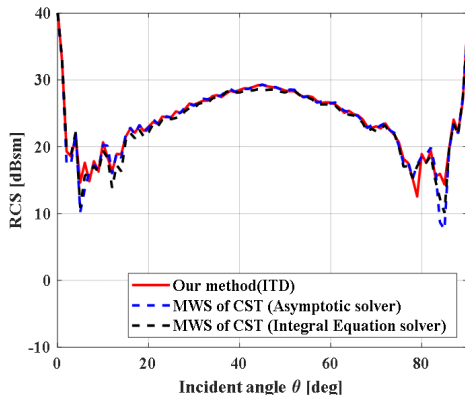
m (아래층), $1\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ (윗층)의 크기를 갖는 서로 다른 두 개의 완전도체 재질의 직육면체를 나타낸다.

그림 4는 제안된 증분 회절이론 공식의 정확성을 검증하기 위해, 그림 3의 모노스테틱 레이더 단면적을 7 GHz , $\theta = 0 \sim 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 에서 계산한 결과이다. 계산 결과는 CST사의 MWS^[22]의 고주파 근사기법인 Asymptotic solver와 full-wave 해석 기반의 Integral Equation solver와 비교하였다. 계산 결과를 살펴보면, 제안된 증분 회절이론을 이용하여 계산한 모노스테틱 레이더 단면적은 CST사의 MWS의 고주파 근사기법 시뮬레이션과 유사한 것을 확인할 수 있으며, full-wave 해석 기반의 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 그림 3의 바이스테틱 레이더 단면적 결과로, 7 GHz 에서 입사각이 $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$ 일 때, 관측각 $\theta_s = 0 \sim 180^\circ$, $\phi_s = 0^\circ$ 에서 계산하였다. 기존의 레이더 단면적 계산에 주로 사용되는 PTD 기법은 앞서 2장에서 언급한 바와 같이, 관측점과 모서리의 접선 벡터가 일직 선상에 놓일 경우, 회절파를 계산할 수 없다(식 (2), 식 (3) 참조). 반면, 증분 회절이론을 이용하면 해당 조건에서 발산 문제를 해결할 수 있으므로, 바이스테틱 레이더 단면적을 계산할 수 있다. 계산 결과를 살펴보면, 제안된 증분 회절이론을 이용하여 계산한 바이스테틱 레이더 단면적은 CST사의 MWS의 고주파 근사기법 시뮬레이션과 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 5(a)에서 볼 수 있듯이, HH 편파의 관측각 $\theta_s = 130 \sim 180^\circ$ 부분에서 큰 오차를 보이



(a) HH 편파
(a) HH polarization

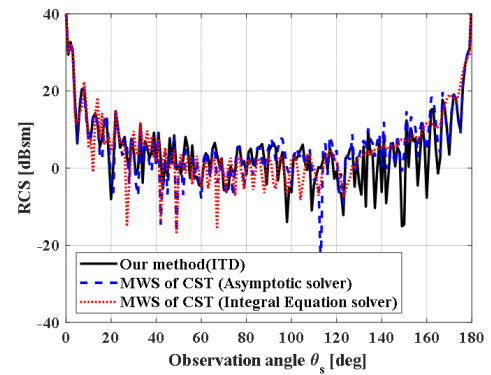


(b) VV 편파
(b) VV polarization

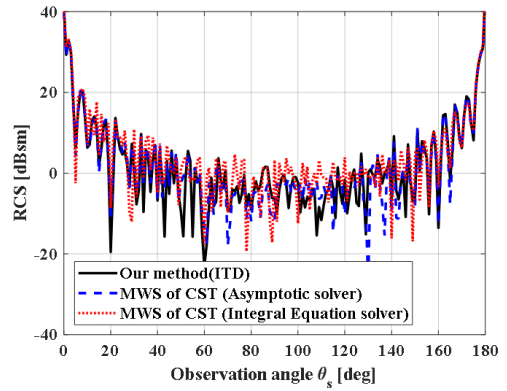
그림 4. 2층 직육면체의 모노스테틱 레이더 단면적
Fig. 4. Monostatic RCS of stacked two cubes.

는데, 이는 고주파 근사기법의 한계로 표면 전류를 근사적으로 정의하기 때문에 산란 특성에서 차이가 발생한다.

또한, 보다 현실적이고 복잡한 구조의 레이더 단면적을 계산하기 위해 그림 6과 같이 단순 선박을 고려하였다^[5]. 그림 7은 그림 6의 바이스테틱 레이더 단면적 결과로, 7 GHz에서 입사각이 $\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$ 일 때, 관측각 $\theta_s = 0 \sim 180^\circ$, $\phi_s = 0^\circ$ 에서 계산하였다. 계산 결과를 살펴보면, 제안된 증분 회절이론을 이용하여 계산한 바이스테틱 레이더 단면적은 CST사의 MWS의 고주파 근사기법 시뮬레이션과 유사한 것을 확인할 수 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이, 관측각 $\theta_s = 130 \sim 180^\circ$ 부분에서 큰 오차를 보이는데, 이는 앞서 언급한 바와 같이 고주파 근사기



(a) HH 편파
(a) HH polarization



(b) VV 편파
(b) VV polarization

그림 5. 2층 직육면체의 바이스테틱 레이더 단면적($\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$)
Fig. 5. Bistatic RCS of stacked two cubes($\theta_i = 0^\circ$, $\phi_i = 0^\circ$).

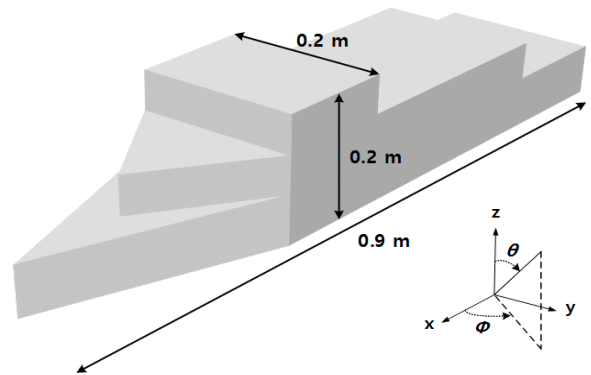


그림 6. 단순 선박 모델^[5]
Fig. 6. A simplified ship model^[5].

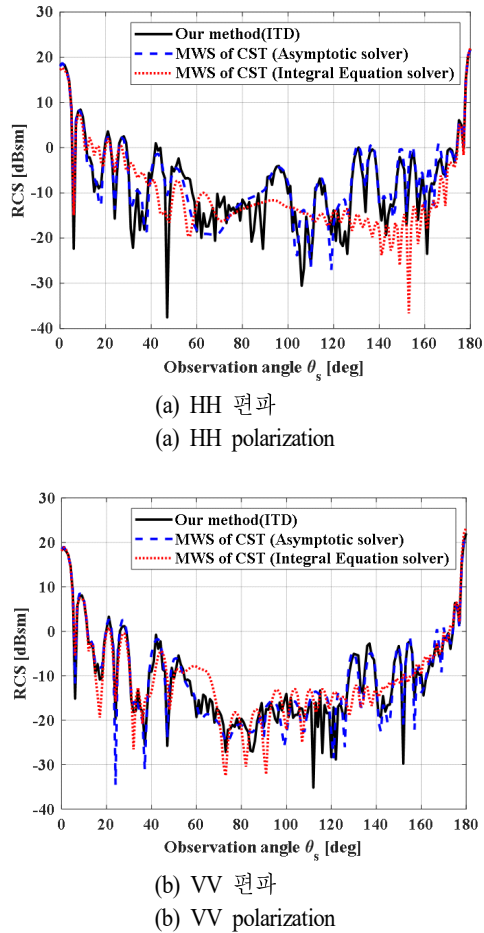


그림 7. 단순 선박의 바이스테틱 레이다 단면적($\theta_i=0^\circ$, $\Phi_i=0^\circ$)

Fig. 7. Bistatic RCS of a simplified ship($\theta_i=0^\circ$, $\Phi_i=0^\circ$).

법의 한계로 표면 전류를 근사적으로 정의하기 때문에 산란 특성에서 차이가 발생한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 SBR과 증분 회절이론을 이용하여 임의의 산란체에 대한 레이다 단면적을 계산하였다. 증분 회절이론은 산란체의 모서리 위의 임의의 점에서 국부 좌표계를 정의한 후, 임의의 점에서 회절파 소스를 미소 선분으로 적분하여 회절파를 계산할 수 있다. 이때, 기하학적으로 불연속인 모서리에서 계산되는 PO 값을 보정하여 얻은 회절 계수를 통해 회절파를 계산할 수 있다. 기존의

PTD 기법은 입사각 또는 관측각이 모서리와 일직선에 있는 경우, 회절파가 발산하여 정확한 산란파 계산에 한계를 보였다. 하지만 증분 회절이론을 이용하면 임의의 입사각 및 관측각에서도 산란파를 예측할 수 있으며, 서로 다른 크기를 갖는 두 직육면체 구조의 모노스테틱 레이다 단면적 계산 결과는 CST사의 MWS의 full-wave 해석 기반의 결과 및 고주파 근사기법의 해석 결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 서로 다른 크기를 갖는 두 직육면체 구조의 바이스테틱 레이다 단면적 계산 결과는 CST사의 MWS의 고주파 근사기법의 해석 결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 단순 선박의 바이스테틱 레이다 단면적 계산 결과는 CST사의 MWS의 고주파 근사기법의 해석 결과와 유사한 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 논문에서 소개한 증분 회절이론은 임의의 형상에 대한 레이다 단면적 계산에 유용하게 사용될 수 있다.

References

- [1] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 761-807, 2012.
- [2] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. T. Tuley, *Radar Cross Section*, Raleigh, NC, SciTech, pp. 183-216, 2004.
- [3] E. F. Knott, "A progression of high-frequency RCS prediction techniques," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 2, pp. 252-264, Feb. 1985.
- [4] H. Kim, "Analysis method and application of high-frequency electromagnetic wave," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 2, no. 4, pp. 47-54, Dec. 1991.
- [5] S. H. Suk, T. I. Seo, S. M. Jun, H. S. Park, and H. T. Kim, "RCS prediction of complex targets," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 11, no. 6, pp. 929-938, Sep. 2000.
- [6] H. Shin, S. Lee, D. Park, J. Shin, M. Chung, and S. Park, et al., "Analysis of radar cross section of the integrated mast module for battleship," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 7, pp. 584-587, Jul. 2017.

- [7] H. Shin, S. C. Song, J. Kim, and Y. B. Park, "Analysis of radar cross section of the tank and its application at millimeter wave W-band," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp. 756-759, Sep. 2017.
- [8] J. B. Keller, "Geometrical theory of diffraction," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, no. 2, pp. 116-130, Feb. 1962.
- [9] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak, "The dyadic diffraction coefficient for a perfectly conducting wedge," Ph.D. dissertation, The Ohio State University, Columbus, OH, 1970.
- [10] R. G. Kouyoumjian, P. H. Pathak, "A uniform geometrical theory of diffraction for an edge in a perfectly conducting surface," *Proceedings of the IEEE*, vol. 62, no. 11, pp. 1448-1461, Nov. 1974.
- [11] H. Ling, R. C. Chou, and S. W. Lee, "Shooting and bouncing rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 2, pp. 194-205, Feb. 1989.
- [12] P. Clemmow, "Edge currents in diffraction theory," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 4, no. 3, pp. 282-287, Jul. 1956.
- [13] A. Michaeli, "Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 32, no. 3, pp. 252-258, Mar. 1984.
- [14] H. Lee, "Diffraction estimation for complex body using equivalent current," M.S. Thesis, Inha University, Incheon, 2014.
- [15] P. Y. Ufimtsev, "Elementary edge waves and the physical theory of diffraction," *Electromagnetics*, vol. 11, no. 2, pp. 125-160, Oct. 2007.
- [16] H. Shin, S. Lee, D. M. Park, J. Shin, M. Chung, and S. Park, et al., "Analysis of radar cross section of a battleship equipped with an integrated mast module based on PO and PTD," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 4, pp. 238-240, Oct. 2017.
- [17] H. Shin, Y. B. Park, "Analysis of radar cross section based on PO and PTD," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 28, no. 6, pp. 34-39, Nov. 2017.
- [18] R. Tiberio, S. Maci, "An incremental theory of diffraction: Scalar formulation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 5, pp. 600-612, May. 1994.
- [19] R. Tiberio, S. Maci, and A. Toccafondi, "An incremental theory of diffraction: Electromagnetic formulation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 1, pp. 87-96, Jan. 1995.
- [20] R. Tiberio, A. Toccafondi, A. Polemi, and S. Maci, "Incremental theory of diffraction: A new-improved formulation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 9, pp. 2234-2243, Sep. 2004.
- [21] D. Erricolo, S. M. Canta, H. T. Hayvaci, and M. Albani, "Experimental and theoretical validation for the incremental theory of diffraction," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2563-2571, Aug. 2008.
- [22] Dassault Systemes, "CST STUDIO SUITE;ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE." 2021. Available: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst

이 소 영 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4850-6268>



2019년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2019년 3월~현재: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 메타물질 안테나, 레이돔 및 RCS 해석

윤 대 영 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4811-4969>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 레이돔 및 RCS 해석

이 해 승 [아주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9404-6602>



2021년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 석사 과정
[주 관심분야] 레이돔 및 RCS 해석

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학과 교수

[주 관심분야] 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC

신 호 근 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8085-6807>



2015년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 8월: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 (공학 석·박사)
2021년 9월: 한화시스템 선임연구원
[주 관심분야] 레이돔 및 RCS 해석, EMI/EMC