

바이스태틱 RCS 계산을 위한 증분회절이론의 적용

Application of Incremental Theory of Diffraction Formulation for Bistatic RCS Estimation

이재인 · 이현수* · 이상훈 · 서동욱

Jae-In Lee · Hyun-Soo Lee* · Sang-Hoon Lee · Dong-Wook Seo

요 약

증분회절이론(incremental theory of diffraction; ITD)은 정지위상조건이 잘 확립되지 않은 복잡한 구조물의 회절파를 계산할 수 있는 필드기반의 증분이론 기법 중 하나이다. 본 연구에서는 ITD를 이용하여 모서리의 쇄기 안쪽영역에 관측점이 존재하는 bistatic 레이다 반사단면적을 계산하는 경우, 증분회절 기여분을 무시하여야 하고 PO(physical optics) 끝점 기여분은 계산하여야 함을 밝히고, 삼각기둥과 원형디스크에 대해 SBR(shooting and bouncing rays)과 ITD를 적용하여 bistatic 레이다 반사단면적을 구하고 모멘트법과 IDS사의 Viraf에서 구현된 ITD 기법의 결과와 비교를 통하여 검증한다.

Abstract

Incremental Theory of Diffraction (ITD) is an incremental theory technique to calculate the diffracted field of a complex object in which the stationary phase condition is not well-established. In this study, the incremental diffraction contribution is ignored and the physical optics (PO) endpoint contribution is considered when calculating the bistatic radar cross-section (RCS) for the observation point corresponding to the inner region of the edge using the ITD. Accordingly, we applied shooting and bouncing rays and ITD to the trigonal prism and circular disk and verified the proposed ITD method by comparing with the results of the method of moment and the conventional ITD implemented in the IDS's Viraf.

Key words: Diffraction Field, Incremental Theory of Diffraction, ITD, Radar Cross Section, RCS, Bistatic RCS

I. 서 론

전기적으로 큰 물체에 의한 고주파 산란을 정확하고 효과적으로 예측하는 기술은 반사안테나와 같은 안테나 설계 및 해석, 레이다 반사단면적(RCS; radar cross section) 예측, 도심지와 같이 복잡한 환경에서의 전파 환

경 예측, 배, 차량, 항공기와 같은 대형 구조물에서 안테나 설치 및 안테나 간 결합과 같이 다양한 분야에서 요구되고 있다. 전자파 산란은 크게 직접파, 반사파, 회절파로 나눌 수 있으며, 이 중 모서리에 의한 회절파 계산에는 GTD(geometrical theory of diffraction)와 PTD(physical theory of diffraction)가 주로 사용되고 있다. GTD와 PTD

「이 연구는 국방과학연구소의 연구비의 지원으로 연구되었음(계약번호: UD210001FD).」

한국해양대학교 해양인공지능융합전공(Interdisciplinary Major of Maritime AI Convergence, Korea Maritime & Ocean University)

*국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· Manuscript received January 25, 2022 ; Revised February 11, 2022 ; Accepted February 22, 2022. (ID No. 20220125-011)

· Corresponding Author: Dong-Wook Seo (e-mail: dwseo@kmou.ac.kr)

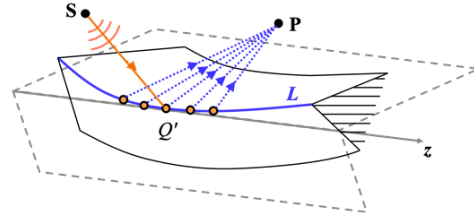
는 모두 광선-광학 이론(ray-optical theory)으로 고주파수에서 복잡한 물체로부터의 산란을 독립된 지점들로부터 나오는 광선들의 중첩으로 구하는 방식이 사용된다. 광선 추적을 통하여 stationary 면과 모서리 지점이 식별되면, 적절한 광선-필드는 각 광선과 연결되어 산란파를 계산한다. 따라서 이러한 전통적인 광선-광학이론들은 독립된 stationary 모서리 지점이 확인되지 않는 경우는 적용할 수가 없다. 또한, 무한한 광선이 존재하는 화선(caustic)에 관측점이 위치하는 경우 모서리 또는 유한한 부분위의 모든 점들이 stationary하다. 관측점이 회절 원뿔(diffraction cone) 밖에 위치하는 경우에는 어떠한 모서리 stationary 지점도 존재하지 않는다. 증분기법들은 이러한 광선-광학 이론 기반의 방법들의 한계점들을 극복하기 위해 개발되었다.

본 논문에서는 증분기법 중 하나인 ITD(incremental theory of diffraction; 증분회절이론) 기법을 적용하여 기존의 ITD 연구^{[1],[2]}에서 명확하게 제시되지 않은 켄지 내부 영역에 해당하는 음영지역을 포함하는 bistatic RCS를 계산한다. 기존의 ITD 기법이 사용된 VIRAF의 계산결과와의 비교를 통하여 bistatic 필드의 계산 시 문제점을 밝히고 개선된 계산방법을 검증하고자 한다.

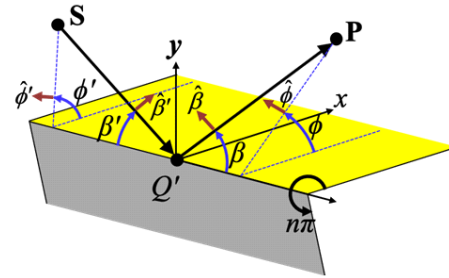
II. 증분회절이론 (ITD) 소개 및 적용

2-1 ITD기법 개요^[1]

PO(physical optics) 기반 산란파를 계산하는 경우, 산란체에 의한 산란파 (\vec{E}^s)는 PO 필드 (\vec{E}^{po})와 fringe 필드 (\vec{E}^f)의 합으로 표현된다. PO 필드는 완전도체 산란체에 접하는 무한평면위에 균일하게 분포하는 균일전류(uniform current)에 의해 생성되는 필드 성분으로 반사파와 회절파 성분의 일부를 포함하며, 완전도체 산란체에 접하는 무한평면과 실제 표면과의 편차에 의한 회절파의 나머지 성분을 fringe 필드라 부르고 이를 생성하는 소스를 비균일전류(non-uniform current)로 모델링한다. ITD 기법에서 fringe 필드는 그림 1(a)와 같이 모서리를 따른 지점에서의 국부화된 증분 fringe 필드들 (\vec{F}^f)의 합으로 다음과 같이 표현된다.



(a) 임의의 완전도체 모서리에 의한 증분필드 기여분 개념
 (a) Each incremental field contribution



(b) 국부 표준형 완전도체 켄지의 기하 및 좌표
 (b) Geometry and coordinate of perfectly conducting canonical wedge

그림 1. 증분필드 계산을 위한 임의의 완전도체 모서리
 Fig. 1. Geometry of arbitrary perfectly conducting edge for incremental field.

$$\vec{E}^f = \int_l \vec{F}^f(Q') dl \quad (1)$$

$$\vec{F}^f(Q') = \vec{F}^d(Q') - \vec{F}^{po}(Q') \quad (2)$$

여기서 국부화된 증분 fringe 필드 기여분은 증분회절 기여분 (\vec{F}^d)과 PO 끝점 기여분 (\vec{F}^{po})의 차로 표현된다. 증분회절 기여분은 다음의 수식으로부터 계산된다.

$$\begin{aligned} \vec{F}^d(Q') &= \begin{bmatrix} F_\beta^d \\ F_\phi^d \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} D_e(v, \phi, \phi') & 0 \\ 0 & D_h(v, \phi, \phi') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta'}(Q') \\ E_{\phi'}(Q') \end{bmatrix} \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \\ D_{(e,h)}(v, \phi, \phi') &= D_n[v, \Phi^-](-, +) D_n[v, \Phi^+] \\ D_n[v, \Phi^\pm] &= d_n[v, \Phi^\pm] + d_n[v, -\Phi^\pm] \\ d_n[v, \chi] &= \frac{1}{2n} \frac{\sin\left(\frac{\pi - \chi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{v}{n}\right) - \cos\left(\frac{\pi - \chi}{n}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\phi^\pm = (\phi \pm \phi')$, 아래첨자 e 와 h 는 썩기면 위의 soft와 hard 경계조건을 의미하고, ITD 정지위상 지점은 다음과 같다.

$$\cos v = \frac{1 - \cos \beta \cos \beta'}{\sin \beta \sin \beta'} \quad (4)$$

이는 기존의 근사기법의 정지위상 지점인 $\beta = \beta'$ 외의 정지위상 지점을 가짐을 의미하며, 식 (3)과 식 (4)는 소스 (S)와 근측점(P)이 교환되더라도 상호성(reciprocity)을 만족하고 $\beta' = 0$ 및/또는 $\beta = 0$ 을 포함한 모든 입사 및 관측측면에서 잘 작동하는 필드에 대한 설명을 제공한다.

또한, 증분 PO 끝점 기여분에 대한 closed-form의 dyadic 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{F}^{po}(Q') &= \begin{bmatrix} F_{\beta}^{po} \\ F_{\phi}^{po} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} D_{11}^{po}(v, \phi, \phi') & D_{12}^{po}(v, \phi, \phi') \\ 0 & D_{22}^{po}(v, \phi, \phi') \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{\beta'}(Q') \\ E_{\phi'}(Q') \end{bmatrix} \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \\ D_{11}^{po}(v; \phi, \phi') &= d_1[v, \phi^-] - d_1[v, \phi^+] \\ D_{22}^{po}(v; \phi, \phi') &= d_1[v, \phi^-] + d_1[v, \phi^+] \\ D_{12}^{po}(v; \phi, \phi') &= \cos \theta \\ \cos \theta &= \text{sgn}(z + z') \sqrt{1 - \sin \beta \sin \beta'} \end{aligned} \quad (5)$$

2-2 Bistatic을 위한 썩기내부 필드고려

식 (3)과 식 (5)로 구성되는 기존의 ITD 기법의 표현식에서는 국부적인 표준형 썩기 내부 영역에서도 계산이 가능하며, ITD가 구현된 VIRAF 툴에서도 역시 내부 필드 계산을 수행한다.

PO와 같이 Helmholtz 등가원리를 기본으로 하는 산란과 계산기법의 경우, 완벽도체 산란체를 자유공간상에서 산란체의 표면에 해당하는 곳에 분포하는 등가산란 소스로 대체한다. 자유공간상의 등가소스는 어느 곳으로든 필드를 생성하기 때문에 썩기 내부 영역에서도 필드가 존재할 수 있다. 하지만, 균일전류에 의해 생성되는 썩기 내부 필드는 비균일전류에 의해 생성되는 내부 필드에 의해 완전히 상쇄된다^[3].

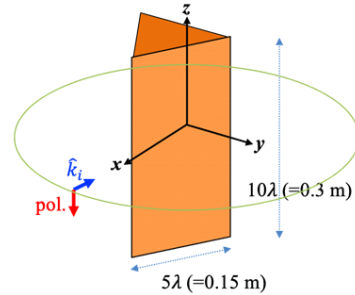
특히, ITD의 경우, 국부 썩기를 무한썩기로 등가화하고, 각 무한썩기에 의한 증분필드를 구하기 때문에, 무한

썩기 내부에는 산란파가 존재할 수 없다. 따라서, 식 (2)의 증분 회절기여분 (\vec{F}^d)은 썩기 내부에서는 0의 값을 가져야 한다. 식 (3)은 관측점의 각도에 따라 다음과 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\vec{F}^d(Q') = \begin{cases} \begin{bmatrix} F_{\beta}^d \\ F_{\phi}^d \end{bmatrix} & \text{for } 0 \leq \phi \leq n\pi \\ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{for } n\pi < \phi < 2\pi \end{cases} \quad (6)$$

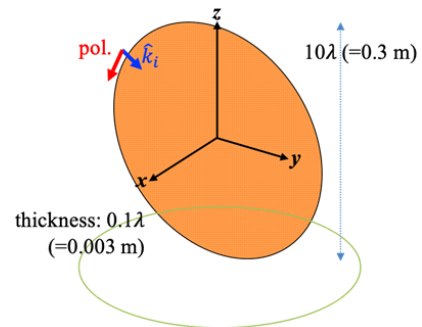
III. 해석결과 및 토의

썩기 내부영역에 해당하는 관측점에서의 제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 그림 2와 같이 비교적 간단한 구조의 완전도체 삼각기둥과 원형디스크에 대해서 C언어로 구현한 shooting and bouncing rays으로 PO 필드를 계산하고, 제안한 ITD 기법으로 모서리에서의 fringe 필드를



(a) 삼각기둥 모델

(a) Trigonal prism



(b) 원형 디스크 모델

(b) Circular disk

그림 2. 회절과 해석 모델

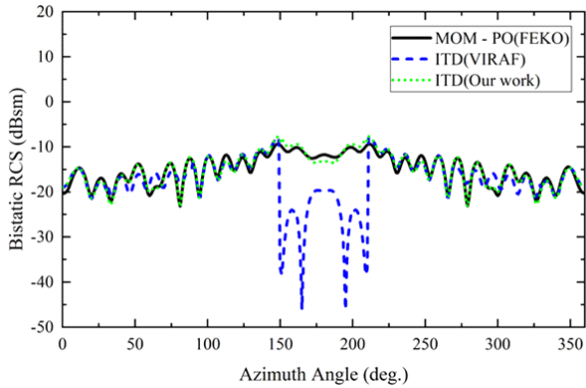
Fig. 2. Geometry of scattering objects.

계산 후 더하여 최종적으로 Bistatic RCS를 얻는다. 검증을 위하여 Altair FEKO의 (1차)PO와 MoM 기법을 적용하여 계산하였고, 추가적으로 기존의 ITD 기법이 적용된 IDS사의 Viraf를 이용하여 계산한 결과를 비교하였다.

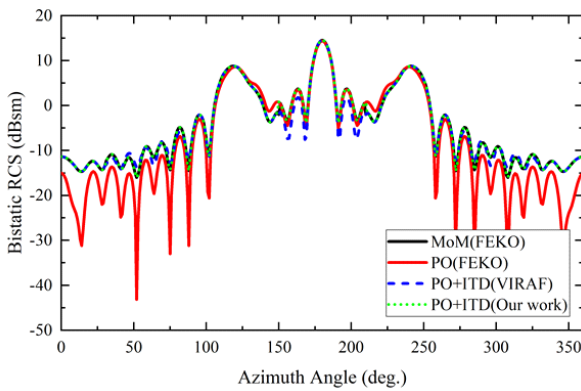
3-1 삼각기둥 모델

그림 2(a)와 같이 10 GHz의 주파수에 대해서 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 의 각도로 완전도체 삼각기둥에 입사하는 입사파에 의한 VV-편파 결과를 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ \sim 359^\circ$ 의 관측점에서 계산하였다.

그림 3(a)는 VV-편파 fringe 필드를 나타낸 그래프로 검



(a) Fringe 필드 성분
(a) Fringe field contribution



(b) 산란파 성분
(b) Scattered field contribution

그림 3. 삼각기둥의 VV-편파 RCS
Fig. 3. VV-pol. RCS of trigonal prism.

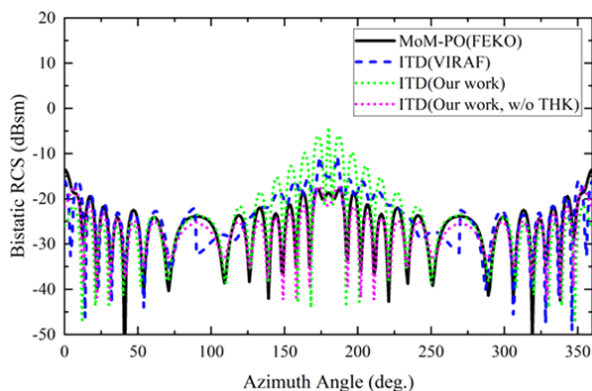
정색 실선의 정확한 fringe 필드는 MoM의 결과에 PO 결과를 빼서 얻었다. 제안한 ITD 기법은 정확한 fringe 필드와 비슷한 값을 가지지만, Viraf의 ITD 결과는 입사파 전면의 삼각기둥 모서리 켤레의 내부영역에서 불연속적이고, 패턴과 레벨에서 많은 차이를 보인다. 그림 3(b)와 같이 최종 산란파에 의한 bistatic RCS가 MoM의 계산결과와 거의 일치하는 결과를 보인다. fringe 필드가 전체 산란파의 크기에 비해 낮은 레벨로 전체 산란파 파형에는 크게 영향을 끼치지 못하지만, 전면 삼각기둥 모서리 켤레의 내부영역의 각도에서 산란파 패턴의 정확도가 향상되는 것을 확인할 수 있다.

3-2 원형 디스크 모델

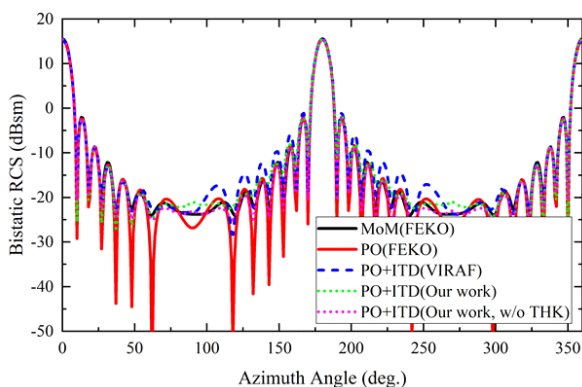
그림 2(b)의 $\theta = 45^\circ$, $\phi = 0^\circ$ 각도의 입사파를 가지는 완전도체 원형 디스크에 대하여, 관측점을 $\theta = 135^\circ$ 에서 $\phi = 0^\circ \sim 359^\circ$ 로 1° 씩 변경하여 VV-편파 계산결과를 그림 4에 나타냈다. FEKO MoM과 PO는 원형디스크의 두께 (0.1λ)가 고려된 반면, 제안한 ITD 기법은 두께를 가지는 사각모서리와 두께가 없는 디스크에 대해 적용하였다. 두께를 가지는 경우, $n = 3/2$ 의 국부 수직 켤레들에 의해 ITD 결과는 fringe 필드와는 큰 차이를 가지지만, 두께를 무시하여 국부 켤레를 반평면($n = 2$)으로 가정하면 fringe 필드와 거의 유사한 결과를 보인다. 그림 4(b)와 같이 전체 산란파에서도 두께를 무시한 ITD 기법의 결과가 MoM와 매우 잘 일치한다. 이는 모서리 두께 0.1λ 으로 파장에 비해 작아 반평면으로 계산 시 더 정확한 결과를 가짐을 의미한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 증분회절이론을 적용하여 Bistatic RCS를 계산함에 있어 켤레 안쪽 영역에서의 필드성분을 적용하는 방안에 대해서 제시하고, 이를 완전도체 삼각기둥과 원형 디스크에 대해 적용하여 검증하였다. 삼각기둥에 대해서는 MoM의 결과와 거의 유사하며, 원형 디스크 모델에 대해서는 디스크 두께를 무시하여 해석하면 신뢰할 만한 Bistatic RCS를 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Fringe 필드 성분
(a) Fringe field contribution



(b) 산란파 성분
(b) Scattered field contribution

그림 4. 원형디스크의 VV-편파 RCS
Fig. 4. VV-pol. RCS of circular disk.

References

- [1] 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.
- [2] S. Lee, H. Lee, H. Shin, D. Yoon, and Y. B. Park, "Analysis of radar cross-section of perfect electric conductor scatterer using the incremental theory of diffraction," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 10, pp. 925-932, Oct. 2021.

- [3] P. Y. Ufimtsev, *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, 2nd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2014.

이 재 인 [한국해양대학교/박사후연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0218-4718>



2012년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)

2019년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)

2019년 3월~현재: 한국해양대학교 박사후연구원

[주 관심분야] 초고주파 해석, 전자파수치 해석, ISAR, 레이더 신호처리

이 현 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0999-6126>



2012년 8월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2014년 8월: 인하대학교 전자공학과 (공학석사)

2019년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학박사)

2019년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] Electromagnetic Numerical Analysis, Diffraction by Discontinuous Wedge

이 상 훈 [한국해양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6986-9930>



2018년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)

2021년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)

2021년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사과정

[주 관심분야] RF, 차량용 레이더 시스템, 안테나

서 동 욱 [한국해양대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9449-7772>



2003년 2월: 경북대학교 전자전기공학부
(공학사)

2005년 8월: 한국과학기술원 전기및전자
공학 (공학석사)

2011년 2월: 한국과학기술원 전기및전자
공학 (공학박사)

2011년 1월~2012년 9월: 국방기술품질원

선임연구원

2012년 10월~2017년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원

2017년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 부교수

[주 관심분야] 전자파 수치해석, RCS 해석, 레이더 시스템, 레
이다 신호처리, 무선전력전송