

물리광학법과 물리광학 회절이론을 이용한  
레이다 단면적 해석 기법

신 호 근 · 박 용 배

아주대학교 전자공학과

I. 서 론

레이다(radar)는 송신한 전자파가 산란체에 의해 수신기 방향으로 되돌아오는 신호를 탐지하여 산란체에 대한 정보를 획득하는 시스템이다. 이 때, 레이다 관점에서 바라본 산란체의 크기를 레이다 단면적(Radar Cross Section)이라고 한다. 레이다 단면적은 레이다 및 스텔스 설계에서 매우 중요한 설계요소 중 하나이다. 레이다 단면적을 계산하는 방법으로는 변수분리법, 수치해석법, 고주파 해석기법 등이 있다<sup>[1]~[3]</sup>. 변수분리법은 정확한 해의 유도는 가능하지만, 구, 원기둥과 같은 특수한 경우에만 적용 가능하다. 수치해석법은 유한요소법(Finite Element Method), 모멘트법(Method of Moment) 등이 있다. 수치해석법을 이용한 full wave 해석 방법은 정확한 해를 계산할 수 있지만, 산란체가 파장보다 커지는 경우에는 계산량이 크게 증가한다. 산란체의 크기가 파장보다 커지는 경우에는 고주파 해석기법을 이용하면 수치해석법보다 효율적으로 산란체의 레이다 단면적을 계산할 수 있다. 대표적인 고주파 해석기법으로는 기하광학법(Geometric Optics), 기하광학 회절이론(Geometric/Uniform Theory of Diffraction), 물리광학법(Physical Optics), 물리광학 회절이론(Physical Theory of Diffraction), 반복적 물리광학법(Iterative Physical Optics) 등이 있다<sup>[1]~[7]</sup>. 기하광학법과 기하광학 회절이론은 광선을 기반으로 해석하는 방법으로 직접 반사/투과를 고려하고, 물리광학법과 물리광학 회절이론은 시점에서 산란체의 보이는 부분에만 등가전류를 정의하고, 정의한 전류로부터 산란파를 계산하는 방법이다. 그러므로 물리광학법과 물리광학 회절이론을 적용하기 위해서는 시점에서 산란체의 보이는 부분과 보이지 않는 부분을 구분하는 은면처리<sup>[8],[9]</sup>가 선행되어야 한다. 반복적 물리광학법은 물

리광학법을 반복적으로 적용하여 다중반사까지 고려하는 방법이다. 산란체가 파장보다 큰 대형 산란체이고, 입사파와 산란파를 모두 평면파로 근사시킬 수 있으면 물리광학법과 물리광학 회절이론을 적용하는 것이 효율적이다<sup>[2]~[6]</sup>.

본 논문에서는 물리광학법과 물리광학 회절이론을 이용하여 산란체의 레이다 단면적을 계산하는 방법을 소개하고자 한다. 산란체를 삼각평판의 합으로 모델링하고, 평판에 물리광학법을 적용하여 산란파를 계산한다. 산란체의 기하학적으로 불연속인 모서리에는 물리광학 회절이론을 적용하여 회절파를 계산한다. 이중반사가 발생하는 구조에 대해서는 광선 추적법을 이용하여 전자파의 경로를 추적하고, 전자파가 도달하는 면에서 물리광학법을 적용하여 산란파를 계산한다. 마지막으로, 2층 사각 피라미드, 단순선박에 대한 레이다 단면적 해석 결과를 소개한다.

II. 계산 이론

2-1 물리광학법

산란체를 완전도체로 가정하고, 입사파와 산란파가 모두 평면파이면, 물리광학법을 이용하여 산란파를 정확하게 계산할 수 있다. 물리광학법은 전자파가 직접 입사하는 부분에 표면 등가전류를 정의하고, 정의된 전류로부터 산란파를 계산하는 방법으로 다음과 같다<sup>[10]</sup>.

$$\vec{J}_{PO} = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H}_i & \text{for illuminated region} \\ 0 & \text{for shadow region} \end{cases} \quad (1)$$

위와 같이 정의된 표면 등가 전류로부터 다음 식을 이용하여 원거리에서의 산란파를 계산할 수 있다.

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016-0-00130, RF 설계 및 EM 해석을 위한 클라우드 기반 SW 플랫폼 개발).

$$E_{\theta} = -\frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} (L_{\phi} + \eta N_{\theta}) \quad (2)$$

$$E_{\phi} = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} (L_{\theta} - \eta N_{\phi}) \quad (3)$$

$$H_{\theta} = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} \left( N_{\phi} - \frac{L_{\theta}}{\eta} \right) \quad (4)$$

$$H_{\phi} = -\frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} \left( N_{\theta} + \frac{L_{\phi}}{\eta} \right) \quad (5)$$

$$N_{\theta} = \iint_S (J_x \cos\theta \cos\phi + J_y \cos\theta \sin\phi - J_z \sin\theta) e^{jkr' \cos\psi} ds' \quad (6)$$

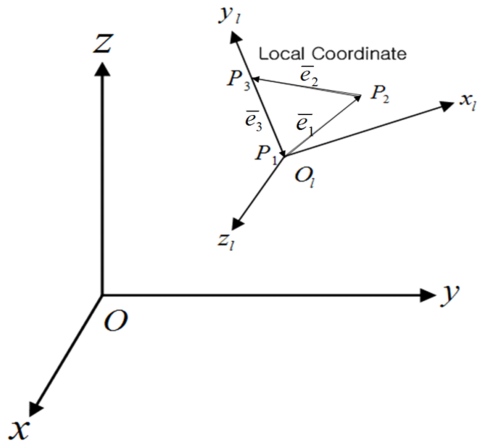
$$N_{\phi} = \iint_S (-J_x \sin\phi + J_y \cos\phi) e^{jkr' \cos\psi} ds' \quad (7)$$

$$L_{\theta} = L_{\phi} = 0 \quad (8)$$

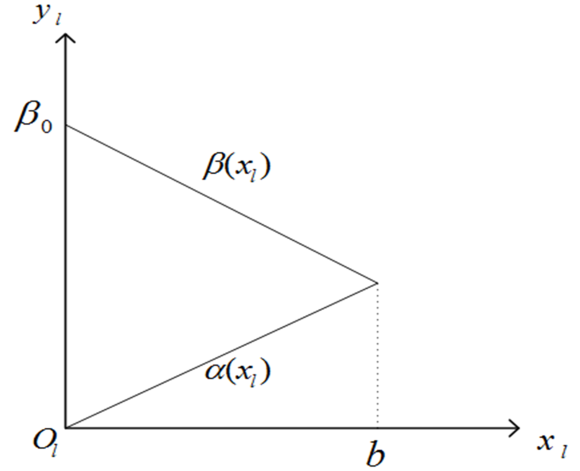
$$r' \cos\psi = x' \sin\theta \cos\phi + y' \sin\theta \sin\phi \quad (9)$$

$$ds' = dx' dy' \quad (10)$$

식 (6), (7)의 적분을 하기 위해서는 삼각 평판이 x-y평면 위에 놓여 있어야 하지만, 실제로는 그렇지 않다. 그러므로 [그림 1]과 같은 지역 좌표계를 도입하여 계산한다<sup>[11]</sup>.  $P_1, P_2, P_3$ 는 삼각형의 세 점을 의미하고,  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$ 은 삼각형



[그림 1] 지역 좌표계<sup>[11]</sup>



[그림 2] 지역 좌표계의 x-y 평면위에 놓인 삼각평판<sup>[11]</sup>

각 변의 접선벡터를 의미한다. 지역 좌표계를 도입하면 [그림 2]와 같이 지역 좌표계의 x-y 평면 위에 삼각 평판이 놓이게 된다. 이 때, 계산해야 하는 적분은 식 (11)과 같다<sup>[11]</sup>.

$$I_0 = \int_a^b \int_{\alpha(x_l')}^{\beta(x_l')} e^{j(ux_l' + vy_l')} dx_l' dy_l' \quad (11)$$

$$u = k(\sin\theta_l \cos\phi_l + \sin\theta_s \cos\phi_s) \quad (12)$$

$$v = k(\sin\theta_l \sin\phi_l + \sin\theta_s \sin\phi_s) \quad (13)$$

식 (11)에서 x축의 적분 범위는  $a \sim b$ 이고, y축의 적분 범위는  $\alpha(x_l') \sim \beta(x_l')$ 이다.  $\alpha(x_l')$ 와  $\beta(x_l')$ 은 직선의 방정식과 같은 모양으로 다음과 같다.

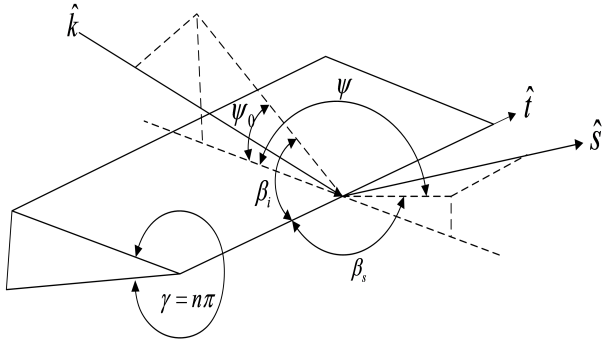
$$\alpha(x_l') = \alpha_0 + \alpha_1 x_l' \quad (14)$$

$$\beta(x_l') = \beta_0 + \beta_1 x_l' \quad (15)$$

이 때, a와 식 (14)에서  $\alpha_0$ 는 지역 좌표계의 원점을 의미한다.

## 2-2 물리광학 회절이론

산란체가 기하학적인 불연속이 없이 무한한 평면이라면 물리광학법만 이용해도 정확한 산란파를 계산할 수 있다.



[그림 3] 모서리 구조

하지만 [그림 3]과 같이 산란체에 기하학적인 불연속이 존재하면 회절파가 발생하기 때문에 물리광학법만 이용해서는 정확한 산란파를 계산할 수 없다. 따라서 물리광학 회절이론을 함께 이용해야 정확한 산란파를 계산할 수 있다<sup>[2]~[6]</sup>. 물리광학 회절이론은 모서리에서 전류를 정의하고, 정의된 전류로부터 산란파를 계산한다. 모서리에서의 회절파는 다음 식 (16)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$E_u = jk \int \frac{e^{-jk|\vec{r}-\vec{r}'|}}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}'|} \{Z_0 I_e \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) + I_m (\hat{s} \times \hat{t})\} dl \quad (16)$$

식 (16)에서  $I_e$ 와  $I_m$ 은 모서리에서의 전류를 의미하며, 식 (17), (18)과 같다<sup>[12]</sup>.  $\hat{t}$ 는 모서리의 접선벡터이고,  $Z_0$ 와  $Y_0$ 는 각각 자유공간에서의 임피던스와 어드미턴스를 의미한다.  $f$ 와  $g$ 는 회절 계수로 식 (21)~(26)으로 계산할 수 있다<sup>[12]</sup>.  $\gamma$ 는 모서리를 이루는 두 평판 사이의 각도이고,  $\psi$ 와  $\psi_0$ 는 각각 입사파와 산란파의 방향벡터와 평판 사이의 각도를 의미한다.  $\beta_i$ 와  $\beta_s$ 는 각각 입사파와 산란파의 방향벡터와 모서리 사이의 각도를 의미한다.

$$I_e = j2 \frac{\hat{t} \cdot \vec{E}_i}{k_0 Z_0 \sin \beta_i \sin \beta_s} f \quad (17)$$

$$I_m = j2 \frac{\hat{t} \cdot \vec{H}_i}{k_0 Y_0 \sin \beta_i \sin \beta_s} g \quad (18)$$

$$f = \begin{cases} (X - Y) - (X_1 - Y_1), & 0 \leq \psi_0 \leq \gamma - \pi \\ (X - Y) - (X_1 - Y_1) - (X_2 - Y_2), & \gamma - \pi \leq \psi_0 \leq \pi \\ (X - Y) - (X_2 - Y_2), & \pi \leq \psi_0 \leq \gamma \end{cases} \quad (19)$$

$$g = \begin{cases} (X + Y) - (X_1 + Y_1), & 0 \leq \psi_0 \leq \gamma - \pi \\ (X + Y) - (X_1 + Y_1) - (X_2 + Y_2), & \gamma - \pi \leq \psi_0 \leq \pi \\ (X + Y) - (X_2 + Y_2), & \pi \leq \psi_0 \leq \gamma \end{cases} \quad (20)$$

$$X = \frac{\frac{1}{n} \sin \frac{\pi}{n}}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\psi - \psi_0}{n}} \quad (21)$$

$$Y = \frac{\frac{1}{n} \sin \frac{\pi}{n}}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\psi + \psi_0}{n}} \quad (22)$$

$$X_1 = -\frac{1}{2} \tan \left( \frac{\psi - \psi_0}{2} \right) \quad (23)$$

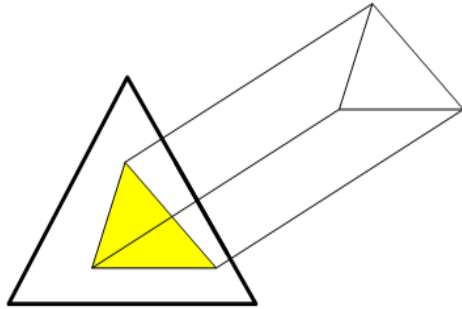
$$Y_1 = -\frac{1}{2} \tan \left( \frac{\psi + \psi_0}{2} \right) \quad (24)$$

$$X_2 = \frac{1}{2} \tan \left( \frac{\psi - \psi_0}{2} \right) \quad (25)$$

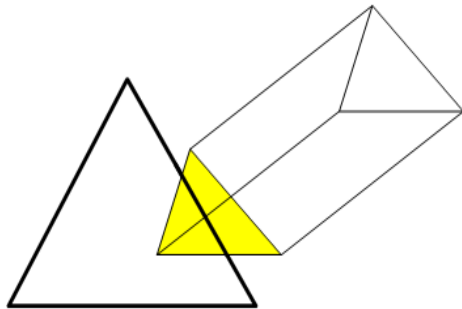
$$Y_2 = -\frac{1}{2} \tan \left( \gamma - \frac{\psi + \psi_0}{2} \right) \quad (26)$$

### 2-3 이중반사 계산

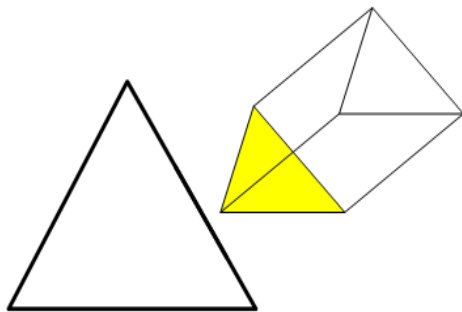
산란체에 입사한 전자파가 반사하여 산란체의 다른 부분으로 입사하게 되면 이중반사가 발생하게 된다. 이중반사는 레이더 단면적에 큰 영향을 미치기 때문에, 반드시 고려해야 한다. 전자파가 산란체에 입사하면 스넬의 법칙에 따라서 반사파의 방향이 결정된다. 이 때, 산란체를 완전도체로



(a) 이중반사가 완전히 발생하는 경우



(b) 이중반사가 일부만 발생하는 경우



(c) 이중반사가 발생하지 않는 경우

[그림 4] 반사파가 도달하는 3가지 경우

가정했기 때문에 투과는 일어나지 않고 반사계수는  $-1$ 로 정의한다. 반사파의 경로를 광선 추적법을 이용하여 추적하면 [그림 4]와 같이 3가지 경우로 구분할 수 있다. [그림 4]의 (a)는 반사한 삼각형이 다른 삼각형 안에 포함되는 경우이다. 이 경우에는 반사한 삼각형에 물리광학법을 적용하고, 산란파를 계산한다. [그림 4]의 (b)는 반사한 삼각형의 일부만 다른 삼각형 안에 포함되는 경우이다. 이 경우에는 포함된 일부 영역에 대해서만 물리광학법을 적용하여 산란파를 계산한다. 마지막으로 [그림 4]의 (c)는 반사한 삼각형

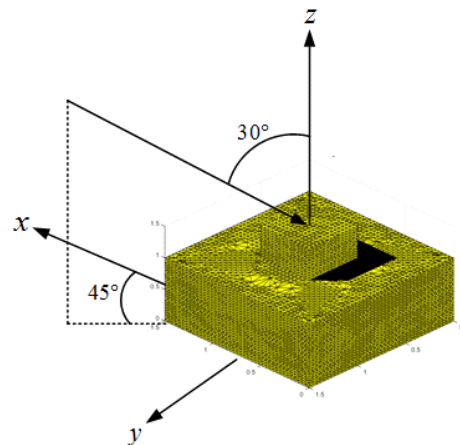
이 다른 삼각형에 전혀 포함되지 않는 경우이다. 이 경우에는 이중반사가 발생하지 않는 경우이다.

## 2.4 은면 처리

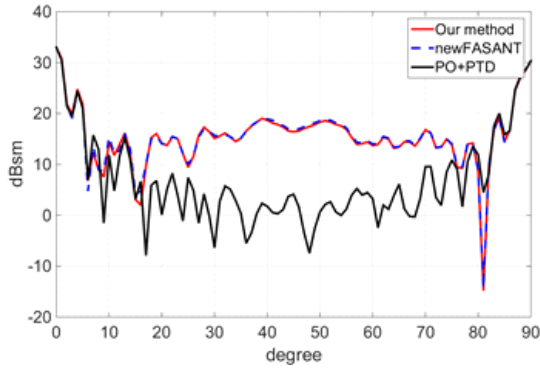
물리광학법과 물리광학 회절이론은 전자파가 산란체에 직접 입사하는 영역에서만 등가 전류를 정의하고, 산란파를 계산한다. 따라서 전자파가 도달하지 못하는 음영지역을 구분하는 은면처리 과정이 선행되어야 한다. 구, 육면체 등과 같이 간단한 구조물의 경우에는 산란체를 구성하는 삼각형의 법선벡터와 입사파의 방향벡터의 내적으로 쉽고 정확하게 구분할 수 있다. 두 벡터의 내적이 0보다 작으면 전자파가 도달하는 영역이고, 그렇지 않으면 은면으로 판별한다. 하지만 [그림 5]와 같이 산란체의 일부분에 의해서 다른 부분이 가려지는 경우에는 위와 같은 방법으로는 정확한 은면처리가 불가능하다. 따라서 최대·최소 검사, 지역세분법 등을 함께 적용하여야 한다<sup>[8],[9]</sup>. [그림 5]에  $\theta=30^\circ$ ,  $\phi=45^\circ$ 로 전자파가 입사할 때, 산란체의 일부분에 의해 가려지는 영역을 나타내었다. 삼각형의 법선벡터와 입사파의 방향벡터의 내적으로 구분한 은면과 [그림 5]의 검은색 부분을 함께 계산에서 제외해 주어야 정확한 산란파를 계산할 수 있다.

## III. 계산 결과

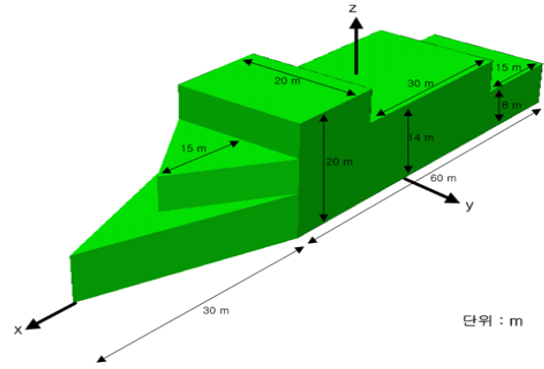
### 3-1 2층 사각 피라미드



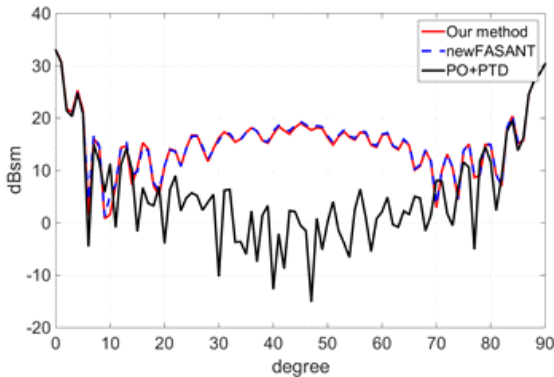
[그림 5] 2층 사각 피라미드의 은면처리<sup>[13]</sup>



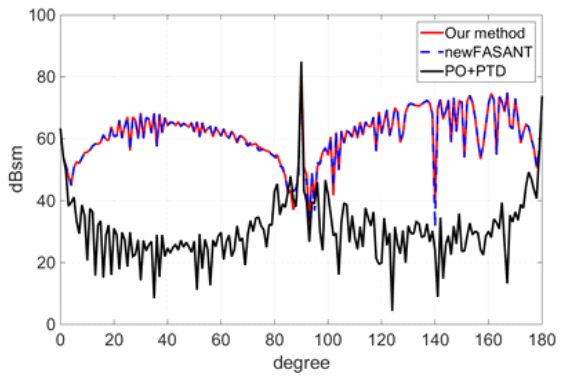
[그림 6] 2층 사각 피라미드의 RCS, VV 편파



[그림 8] 단순선박<sup>[3]</sup>



[그림 7] 2층 사각 피라미드의 RCS, HH 편파

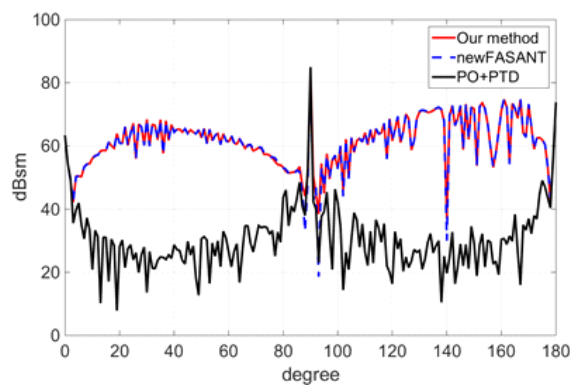


[그림 9] 단순선박의 RCS, VV 편파

[그림 5]와 같이 2층 사각 피라미드 구조의 레이더 단면적을 2 GHz,  $\Theta=0\sim 90^\circ$ ,  $\Phi=0^\circ$ 에서 계산하였다. 계산결과는 상용 EM 소프트웨어인 newFASANT<sup>[14]</sup>의 시뮬레이션 결과와 함께 [그림 6], [그림 7]에 도시하였다. 1층은 1.5×1.5×0.5 m, 2층은 0.5×0.5×0.5 m의 크기를 갖는다. VV 편파와 HH 편파 모두 newFASANT의 시뮬레이션 결과와 동일한 계산 결과를 얻은 것으로 보아, 정확하게 레이더 단면적을 계산한 것을 알 수 있다. 또한, 이중반사를 고려하지 않은 경우에는, 약  $\Theta=10\sim 80^\circ$ 에서 계산결과가 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다.

### 3-2 단순선박

단순선박을 [그림 8]<sup>[3]</sup>과 같이 모델링하였다. 단순 선박의 레이더 단면적을 2 GHz, 고각  $0\sim 180^\circ$ , 방위각  $0^\circ$ 에서 계산하였다. 계산결과는 상용 EM 해석 소프트웨어인 new-



[그림 10] 단순선박의 RCS, HH 편파

FASANT의 시뮬레이션 결과와 함께 [그림 9], [그림 10]에 도시하였다. 계산 결과는 newFASANT 시뮬레이션 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 2층 사각피라미드와 마찬가지로 이중반사를 고려하지 않은 경우에는 계산결과가

크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 물리광학법과 물리광학 회절이론을 이용하여 표적의 레이더 단면적을 계산하는 방법에 대해 살펴보았다. 산란체를 삼각평판의 합으로 모델링하고, 물리광학법을 이용하여 평판에서의 산란파를 계산하며, 물리광학 회절이론을 이용하여 모서리에서의 회절파를 계산하였다. 이중 반사가 발생하는 구조에서는 광선 추적법을 이용하여 전자파의 경로를 추적하고, 전자파가 도달하는 마지막 면에서 물리광학법을 적용하여 산란파를 계산하였다. 그리고 2층 사각피라미드, 단순선박에 대한 레이더 단면적 해석 결과를 제시하였다. 본 논문에서 소개한 계산 방법은 임의의 형상을 갖는 산란체의 레이더 단면적 계산에 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] 김효태, "고주파 전자파의 해석 기법 및 응용", 한국전자과학회 전자파기술, 2(4), pp. 47-54, 1991년. 12월  
 [2] 김효태, "군사 표적물의 RCS 예측과 측정 기술", 한국전자과학회 전자파기술, 11(4), pp. 16-25, 2000년. 10월.  
 [3] 석성하, 서태일, 전상미, 박해성, 김효태, "복합구조물의 RCS 예측", 한국전자과학회논문지, 11(6), pp. 929-938, 2000년 9월.  
 [4] 신호근, 이석곤, 박동민, 신진우, 정명수, 박상현, 박용배, "함정용 통합 마스트의 레이더 단면적 분석", 한국

전자과학회논문지, 28(9), pp. 584-587, 2017년 7월.  
 [5] 신호근, 송성찬, 김지형, 박용배, "밀리미터파 W-대역에서 전차의 레이더 단면적 해석 및 응용", 한국전자과학회논문지, 28(9), pp. 756-759, 2017년 9월.  
 [6] H. Shin, S. Lee, D. Park, J. Shin, M. Chung, S. Park, and Y. B. Park, "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.  
 [7] 이현수, 정기환, 채대영, 고일석, "RCS 계산을 위한 효율적인 IPO 계산 방법", 한국전자과학회논문지, 25(5), pp. 601-606, 2014년 5월.  
 [8] Vera B. Anand, *Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers*, John Wiley & Sons, 1993.  
 [9] Tomas Moller, *Real-Time Rendering*, AK Peters, 2002.  
 [10] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, 2012.  
 [11] N. A. Albayrak, "RCS computations with PO/PTD for conducting and impedance objects modeled as large flat plates," M.S. thesis, Dep. Elect. Electron. Eng., Inst. Eng. Sci. Bilkent Univ., Ankara, Turkey, 2005.  
 [12] E. F. Knott, J. F. Shaeffer, and M. Y. Tuley, *Radar Cross Section 2nd Edition*, Artech House, 1993.  
 [13] 신호근, 박용배, "복합 산란체의 레이더 단면적 해석을 위한 은면처리 알고리즘", 한국전자과학회 하계종합학술대회 논문집, pp. 99, 2017년 8월.  
 [14] newFASANT. [Online]. Available: [www.fasant.com](http://www.fasant.com)

≡ 필자소개 ≡

신 호 근



2015년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2015년 9월: 아주대학교 전자공학과 석·박사 통합과정  
 [주 관심분야] 레이더 및 RCS 해석

박 용 배



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: KT 인프라연구소 선임

연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수  
 [주 관심분야] 전자장 해석, 안테나, EMI/EMC