

복합구조물의 RCS 예측

RCS Prediction of Complex Targets

석성하 · 서태일 · 전상미 · 박해성 · 김효태

Sung-Ha Suk · Tae-Il Seo · Sang-Mi Jun · Hae-Sung Park · Hyo-Tae Kim

요 약

복합구조물의 레이더 단면적 예측을 위하여 포항공과대학교에서 개발중인 컴퓨터 코드에 관한 개발과정과 검증에 관한 내용을 기술하였다. 복합구조물은 평판과 모서리로 모델링 되었으며 예측을 위한 컴퓨터 코드는 물리광학, 물리광학적 회절이론과 SBR 기법을 이용한다. 축소 모형을 제작하여 포항공대 단축거리 측정장치로 RCS를 측정하였다. 예측/측정된 결과는 RCS 패턴 및 ISAR 영상을 통하여 비교 검토되었으며 그 결과는 상당히 일치하였고 복합구조물의 국부 산란현상을 잘 설명한다. 이러한 예측 방법은 스텔스 설계와 표적인식기법연구에 직접 적용될 수 있다.

Abstract

A summary of the development and verifications of a computer code being developed at Pohang University of Science and Technology (POSTECH) for calculating the radar cross section(RCS) of complex targets is presented. The complex targets are modeled in terms of patches and wedges. This code utilizes physical optics, physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays method to calculate the RCS of complex targets. For the verification of the RCS prediction code, a simple-shaped scale-model was manufactured and the RCS was measured at the POSTECH compact range. The obtained RCS was processed to give frequency-domain RCS patterns and ISAR images. The predicted RCS shows good agreement with measured one. The RCS prediction methods presented here are applicable to stealth design and target recognition.

I. 서 론

군사표적의 레이더 단면적(radar cross section, RCS) 예측은 최신 군장비의 레이더 의존도가 높아짐에 따라 그 중요성이 부각되고 있다. 또한 군사표적의 RCS 예측과 주요 산란원에 대한 이해는 그 장비의 설계나 개선에 있어서 필수적인 부분이다. 이러한 중요성에도 불구하고 항공기, 함정, 미사일 등과 같은 복합구조물의 RCS 해석연구는 아직 완성되지 못하고 계속 진행 중에 있다^[1].

RCS 예측문제는 크게 보아 전자파 산란문제로

분류할 수 있다. 전자파 산란문제를 풀 수 있는 가장 대표적인 방법으로는 변수분리를 이용하여 편미분 방정식인 파동방정식을 상미분 방정식으로 바꾸어서 해를 구한다. 이 때 변수분리로 구한 상미분 방정식의 해는 Bessel, Hankel, Legendre 함수 등으로 표현되는 무한 급수 형태로 표현되며 무한 급수의 계수는 경계조건으로부터 구할 수 있다. 그러나 변수분리가 가능한 3차원 산란체의 구조는 원기둥, 구와 같은 특수한 11가지 경우에만 제한된다^[2].

따라서 임의의 구조의 전자파 산란문제를 풀기 위해서는 파동방정식을 그대로 이용하기 보다는 해

포항공과대학교 전자전기공학과(Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· 논문 번호 : 20000728-10S

· 수정완료일자 : 2000년 8월 22일

석하고자 하는 산란문제에 적합한 가정하에 근사해 (approximated solution)를 구하게 된다. 일반적으로 파장에 비해 큰 구조의 산란문제를 해석하는 데에는 기하광학(geometric optics, GO), 기하광학적 회절이론(geometrical theory of diffraction, GTD), 물리광학(physical optics, PO), 물리광학적 회절이론(physical theory of diffraction, PTD) 등의 고주파 해석기법이 쓰이고, 파장에 비해 작은 구조의 산란문제를 해석하는 데에는 모멘트법(method of moment, MM) 등의 저주파 해석기법이 적합하다.

본 논문에서 다루고자 하는 산란문제는 군사표적의 RCS를 8~12 GHz 범위인 X-밴드에서 계산하는 것이다. 이러한 산란문제에는 문제구조상 다음과 같은 네 가지의 특징이 있다^[3]. 첫째로 표적의 구조는 변수분리가 되지 않는 임의의 복잡한 구조물이다. 둘째로 표적의 크기는 파장에 비하여 매우 커서 저주파 수치계산 기법을 적용하기는 불가능하다. 셋째로 레이더와 표적간의 거리는 사용파장에 비해 매우 멀어서 표적에 인가되는 입사파와 표적에서 레이다로 되돌아오는 산란파 모두 평면파로 근사화할 수 있다. 넷째로 송수신 안테나를 동일한 것으로 취하기 때문에 monostatic RCS의 경우만을 고려하면 된다.

위와 같은 산란문제 상황에서 적합한 해석기법으로 최근 널리 사용되는 것이 표적의 표면을 삼각형 또는 사각형 평판조각들의 합으로 모델링하고, 각각의 평판과 서로 잇댄 평판간의 모서리에 의한 전자파 산란을 계산하여 더함으로 전체 산란파를 구하는 방안이다^[4]. 평판에 의한 산란은 평판에 유기되는 등가전류를 PO 기법으로 구하여 산란파를 계산하며 모서리에 의한 산란은 PTD에 근거한 회절파를 계산함으로써 산란파를 구한다.

본 논문에서는 현재 개발중인 포항공대 RCS 예측 코드에 대하여 기술한다. 새로운 이론이나 수식 전개 보다는 RCS 예측을 위해서 현재 이용 가능한 PO, PTD, SBR(shooting and bouncing rays) 등의 기법을 통합하여 RCS 예측에 적절히 적용하는 과정을 서술한다. 또한 간단한 형태의 복합구조물을 제작하여 PO, PTD, SBR 기법을 적용하여 RCS를 예측하고 포항공대 단축거리 실험장치(compact range)를 이용하여 얻은 측정결과와 비교한다.



그림 1. 평판 모델링의 예
Fig. 1. An example of patch modeling.

II. 1차 산란파의 계산

군사표적의 RCS 계산은 표적의 구조가 변수분리가 되지 않는 복잡한 구조이고 표적의 크기는 파장에 비하여 매우 커서 저주파 수치적인 계산기법을 적용하기가 불가능한 형태이며 레이더와 표적간의 거리가 매우 멀어서 입사파와 산란파 모두를 평면파로 근사화할 수 있는 형태이다. 이러한 산란문제를 해석하기 위해서 적합한 방법은 그림 1과 같이 표적을 평판의 합으로 모델링하고 각각의 평판과 모서리에 의한 전자파 산란을 계산하여 더하여 전체 산란파를 구하는 것이다^[7]. 평판에 유기되는 등가전류를 PO 근사기법으로 구하여 산란파를 계산하며 모서리에 의한 산란은 PTD에 근거한 회절파를 계산함으로써 1차 산란파를 구한다. 즉 평판의 합으로 모델링된 표적의 산란파는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{전체 산란파} = (\text{평판 산란파}) + (\text{모서리 산란파}) + (\text{고차 산란파})$$

2-1 PO 기법을 이용한 반사파의 계산

그림 2와 같은 구조의 산란체 표면위의 전자계를 알 경우 산란되는 전자파는 다음과 같은 방사적분을 통해 구할 수 있다^[7].

$$\vec{E}^s(\vec{r}) = \nabla \times \int \int_S ds' \vec{g}(\vec{r}, \vec{r}') \{ \hat{n} \times \vec{E}(\vec{r}') \}$$

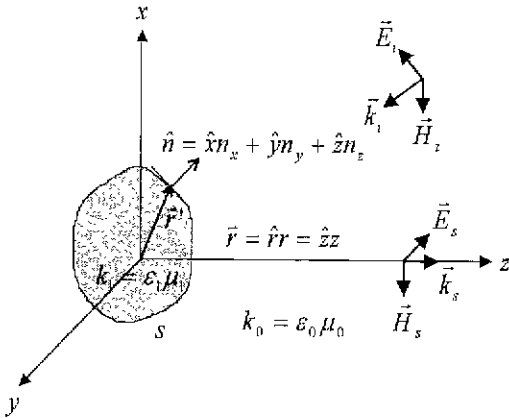


그림 2. 산란 구조
Fig. 2. Scattering problem.

$$+ \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \nabla \times \nabla \times \int \int_S ds' g(\vec{r}, \vec{r}') \cdot \{ \hat{n}(\vec{r}') \times \vec{E}(\vec{r}') \} \quad (1)$$

여기에서 $g(\vec{r}, \vec{r}')$ 는 3차원 Green 함수를 나타낸다. 그리고 전자계의 입사방향 벡터와 산란방향 벡터, \vec{k}^i, \vec{k}^s 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{k}^i \equiv -k_0(\hat{x} k_{ix} + \hat{y} k_{iy} + \hat{z} k_{iz}) \quad (2)$$

$$\vec{k}^s \equiv \hat{r} k_0 \equiv \hat{z} k_0$$

$$k_{ix}^2 + k_{iy}^2 + k_{iz}^2 = 1 \quad (3)$$

입사파의 진행방향은 입사의 방향이 될 수 있으나 본 논문에서는 계산의 편의를 위하여 입사파의 진행방향을 $-\hat{z}$ 로 고정하였다. 다른 입사방향에서의 RCS 계산을 위해서는 입사파의 진행방향은 고정시키고 표적을 회전시키면 된다.

식 (2)는 어떠한 가정 없이 맥스웰 방정식으로부터 유도한 것이므로 정확한 해이다. 우리가 다루고자 하는 산란 문제는 레이다와 표적간의 거리가 파장에 비해 매우 멀어서 표적에 입사하는 전자파와 레이다로 돌아오는 산란파를 모두 평면파로 근사화할 수 있다. 원계 산란 문제인 경우에는 그런 함수를 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$g(\vec{r}, \vec{r}') \approx \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} e^{jk_0 z'} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하면 입사의 벡터 \vec{A} 에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times g(\vec{r}, \vec{r}') \vec{A} = -jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} (\hat{r} \times \vec{A}) e^{jk_0 z'} \quad (5)$$

$$\nabla \times \nabla \times g(\vec{r}, \vec{r}') \vec{A} = (-jk_0)^2 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \cdot (\hat{r} \times \hat{r} \times \vec{A}) e^{jk_0 z'} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 이용하면 식 (1)은 다음과 같은 형태로 유도될 수 있다.

$$\vec{E}^s(\vec{r}) = j\omega\mu_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \hat{r} \times \int \int_S ds' \left[\hat{r} \times \{ \hat{n}(\vec{r}') \times \vec{H}(\vec{r}') \} - \frac{1}{Z_0} \{ \hat{n}(\vec{r}') \times \vec{E}(\vec{r}') \} \right] e^{jk_0 z'} \quad (7)$$

, where $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$

그러나 식 (7)은 미지항인 $\vec{E}^s(\vec{r})$ 이 식의 좌변과 우변의 적분항 속에 존재하여 풀리지 않는 형태이다. 그러나 표적이 무한 평면일 경우에는 다음과 같은 Fresnel 근사식을 적용할 수 있다^[3].

$$\vec{E}(\vec{r}) \Big|_{p,0} \approx \vec{E}_i(\vec{r}) + \vec{E}_{r\perp}(\vec{r}) + \vec{E}_{r\parallel}(\vec{r}) \quad (8)$$

$$\vec{E}_{r\perp}(\vec{r}) = \hat{e}_\perp R_E E_{i\perp} e^{jk_0 z} \quad (9)$$

$$\vec{E}_{r\parallel}(\vec{r}) = \hat{s}_\parallel R_H E_{i\parallel} e^{jk_0 z} \quad (10)$$

여기에서 $\vec{E}_i(\vec{r}), \vec{E}_{r\perp}(\vec{r}), \vec{E}_{r\parallel}(\vec{r})$ 는 그림 3에서와 같이 각각 표적의 표면에 입사하는 전계, 법선성분 반사 전계, 접선성분 반사 전계를 의미한다. 본 논문에서 다루는 산란 문제는 표적의 크기가 파장에 비해서 매우 크고, 표적의 표면을 평면으로 모델링하기 때문에 Fresnel 근사식을 사용하는데 적합하다. 식 (8)을 이용하여 식 (7)을 다시 쓰면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = -jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \sum_{m=1}^M \frac{F_m}{n_z^2 \sqrt{1-F_m^2}} \cdot \vec{W}_m \int \int_{S_m} ds' e^{jk_0 z'} \quad (11)$$

$$F_m = n_x k_{ix} + n_y k_{iy} + n_z k_{iz} = -n_z k_0 \quad (12)$$

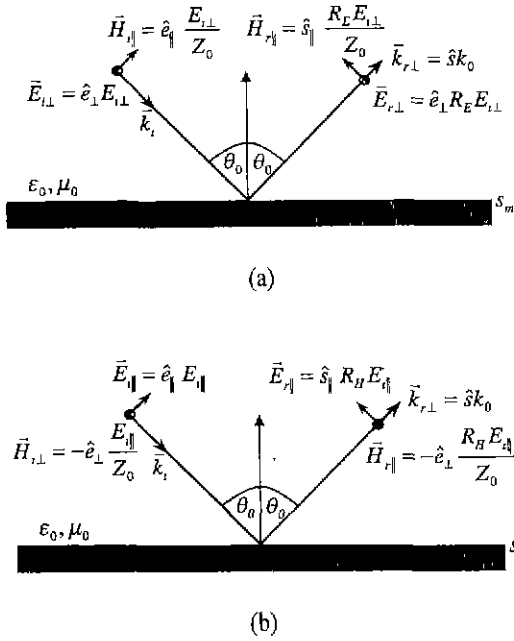


그림 3. 무한 평면에서의 전자파의 반사
 Fig. 3. Wave reflection from an infinitely flat patch.
 (a) E-polarized case
 (b) H-polarized case

여기에서 $m(=1, 2, \dots, M)$ 은 표적물을 모델링하는 평판의 번호를 의미하며, S_m 은 m 번째 평판의 표면을 의미한다.

편파벡터 \vec{W}_m 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{W}_m = & \left\{ \hat{x} \left(n_x - \frac{k_{yx}}{F_m} \right) + \hat{y} \left(n_y - \frac{k_{xy}}{F_m} \right) \right\} \\ & \cdot \frac{(1+R_H)}{2} E_{\parallel} + \left\{ \hat{x} (-n_x k_{iz} + n_z k_{ix}) \right. \\ & + \hat{y} (n_z k_{iy} - n_y k_{iz}) \left. \right\} \frac{(1-R_H)}{2} E_{\parallel} \\ & + \left\{ \hat{x} \left(n_y - \frac{k_{yx}}{F_m} \right) + \hat{y} \left(-n_x + \frac{k_{xy}}{F_m} \right) \right\} \\ & \cdot \frac{(1+R_E)}{2} E_{\perp} + \left\{ \hat{x} (n_z k_{iy} - n_y k_{iz}) \right. \\ & + \hat{y} (n_x k_{ix} - n_z k_{iy}) \left. \right\} \frac{(1-R_E)}{2} E_{\perp} \quad (13) \end{aligned}$$

입사파가 $-z$ 방향으로 진행하고 산란파가 $+z$ 방향으로 진행하는 monostatic인 경우 산란파는 식 (11)에서 다음과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_s(\vec{r}) = & -\frac{j\omega\mu_0}{Z_0} \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \\ & \sum_{m=1}^M \frac{1}{\sqrt{1-n_z^2}} \vec{W}_m I_m \quad (14) \end{aligned}$$

$$I_m = \int \int_{S_m} ds' n_z e^{jk_0 z'} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \vec{W}_m = & \hat{x} \{ n_x R_H E_{\parallel} + n_y R_E E_{\perp} \} \\ & + \hat{y} \{ n_y R_H E_{\perp} - n_x R_E E_{\parallel} \} \quad (16) \end{aligned}$$

식 (14)의 산란파의 성분을 분해하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_{sx}(r) \\ E_{sy}(r) \end{bmatrix} = & -jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{1-n_z^2} \\ & \begin{bmatrix} n_z^2 R_H - n_y^2 R_E & n_x n_y (R_H + R_E) \\ n_x n_y (R_H + R_E) & n_z^2 R_H - n_x^2 R_E \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} E_{sx} \\ E_{sy} \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

식 (17)를 이용하면 M 개의 평판의 합으로 모델링된 표적의 PO에 의한 RCS는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{sx} \\ E_{sy} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{4\pi r^2}} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} \quad (18)$$

where

$$a_{xx} = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 r}}{\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{1-n_z^2} (n_x^2 R_H - n_y^2 R_E)$$

$$a_{xy} = a_{yx} = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 r}}{\sqrt{\pi}} \cdot$$

$$\sum_{m=1}^M \frac{I_m}{1-n_z^2} n_x n_y (R_H + R_E)$$

$$a_{yy} = \frac{-jk_0 e^{-jk_0 r}}{\sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^M \frac{I_m}{1-n_z^2} \cdot$$

$$(n_y^2 R_H - n_x^2 R_E)$$

$$RCS \quad \sigma_{ij} = |a_{ij}|^2 \quad i, j = x \text{ and } y \quad (19)$$

2-2 PTD 기법을 이용한 회절파의 계산

PO 기법은 모서리에 의한 불연속 전류는 고려하지 않고 평판의 전류만을 계산하여 산란파를 계산하므로 평판에 의한 산란파의 크기가 회절파의 크기와 비슷하거나 상대적으로 작을 경우 오차가 발

생한다. 이러한 회절파를 고려하기 위하여 PTD 기법을 PO 기법과 함께 적용하여 보다 정확한 RCS를 예측할 수 있다.

그림 4와 같은 모서리 구조에 대한 회절파는 모서리상의 불연속 전류를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$\vec{E}_d = -\frac{jke^{-jkr}}{r} \int_C \{ Z_0 I_e \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{t}) + I_m (\hat{s} \times \hat{t}) e^{-jkr} \hat{r} \cdot \hat{s} \} dt \quad (20)$$

여기에서 \hat{t} 는 모서리의 접선 벡터, \hat{s} 는 산란파의 진행 방향을 나타내는 단위 벡터이다. 식 (20)에서의 불연속 전류 I_e , I_m 을 설명하는 방법에 관하여 많은 연구가 진행되었는데 그 중 Knott와 Senior가 제시한 등가 전류는 다음과 같다^[8].

$$I_e = \frac{2j(X-Y)(\hat{t} \cdot \hat{e}_i)}{\sin^2 \beta k Z_0} \quad (21)$$

$$I_m = \frac{2j(X+Y)(\hat{t} \cdot \hat{h}_i)}{\sin^2 \beta k Y_0} \quad (22)$$

여기에서 Z_0 , Y_0 는 자유공간에서의 임피던스와 어드미턴스를 의미하고 X , Y 는 Keller의 회절계수로 다음과 같이 주어진다.

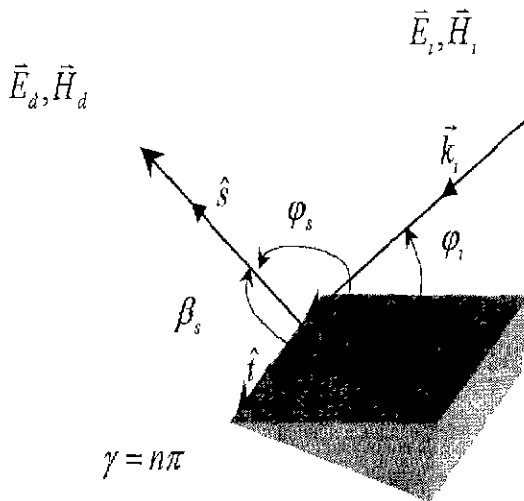


그림 4. 모서리 산란 구조

Fig. 4. Wedge scattering problem.

$$X = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos(\phi_s - \phi_i)} \quad (23)$$

$$Y = \frac{\left(\frac{1}{n}\right) \sin\left(\frac{\pi}{n}\right)}{\cos\left(\frac{\pi}{n}\right) - \cos(\phi_s + \phi_i)} \quad (24)$$

그러나 Keller의 회절계수는 PTD 회절파 뿐만 아니라 PO 반사파도 포함한 전체 산란파를 구하기 위한 계수이므로 PTD 회절파를 구하기 위해서는 Keller 회절계수에서 PO 반사파 성분을 제거하여야 한다. 이는 Keller 회절계수를 사용하는 대신 Uffimtsev 회절계수를 사용할 경우 PO 반사파 성분이 제거된다^[8]. Monostatic인 경우의 Uffimtsev 회절계수는 다음과 같다.

$$f = \begin{cases} X - Y - X_1 & , 0 \leq \phi_i \leq \gamma - \pi \\ X - Y - X_1 - Y_1 & , \gamma - \pi \leq \phi_i \leq \pi \\ X - Y - Y_1 & , \pi \leq \phi_i \leq \gamma \end{cases} \quad (25)$$

$$g = \begin{cases} X + Y + X_1 & , 0 \leq \phi_i \leq \gamma - \pi \\ X + Y + X_1 + Y_1 & , \gamma - \pi \leq \phi_i \leq \pi \\ X + Y + Y_1 & , \pi \leq \phi_i \leq \gamma \end{cases} \quad (26)$$

여기에서 X , Y 는 Keller의 회절계수를 의미하고 X_1 , Y_1 는 PO에 의한 반사파 성분에 해당하는 계수로서 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$Y_1 = \frac{1}{2} \tan(\gamma - \phi_i) \quad (27)$$

$$X_1 = \frac{1}{2} \tan \phi_i \quad (28)$$

PTD 기법 적용에 있어서 식 (21), (22)의 등가전류와 식 (25), (26)의 회절계수 계산식 보다 세밀한 검토가 필요하다. 식 (21), (22)는 β 가 0, π , 2π 인 경우에 값이 존재하지 않는다. 그리고 식 (25), (26)은 $\phi_i \pm \phi_s$ 가 π 인 경우에 값이 존재하지 않는다. 이러한 문제점은 식 (21), (22)의 경우에는 단순한 산술전개해결이 가능하다. 또한 식 (25), (26)의 경우에는 Taylor 급수전개를 통하여 근사시킬 수 있다^[8].

III. 고차 산란파의 계산

PO 기법과 PTD 기법을 이용하여 RCS를 예측할

경우 1차 산란파는 비교적 정확하게 계산할 수 있는 반면 표적의 특정한 부분에서 산란된 전자파가 표적의 또 다른 부분으로 입사하여 산란되는 고차 산란파를 계산할 수 없다. 이는 일반적인 고주파 근사 기법에서 공통적으로 발생하는 문제점으로 표적이 파장에 비해 크다는 가정에 의해 표적의 한 부분에서 일어나는 산란현상이 다른 부분에 영향을 미치지 않기 때문이다. 따라서 PO 기법과 PTD 기법을 이용하여 RCS를 예측할 때에는 고차 산란파를 고려할 수 있는 다른 기법을 함께 적용하여야 한다. 고차 산란파는 반사-회절, 회절-반사, 반사-반사, 반사-회절-반사 등 무한한 형태로 존재하게 된다. 그러나 복합구조물의 RCS 계산에서는 반사-반사 (반사-...-반사 포함), 즉 고차 반사파만을 고려하여도 비교적 정확한 RCS를 얻을 수 있다¹⁷⁾.

고차 반사파를 계산하는 방법에는 크게 GO-PO, PO-PO, SBR 기법 등이 있다. 본 논문에서는 복합구조물의 RCS 예측에 적합한 SBR 기법을 이용한다¹⁹⁾. SBR 기법에 대해 설명을 하면 다음과 같다. 원거리로부터 표적에 입사되는 평면파는 전공간에 걸쳐 진행하지만 표적의 RCS를 예측하기 위한 관점에서는 표적에 직접 투영되는 입사파가 관심거리이다. 따라서 표적의 상공에 가상의 평면을 두어 그 평면으로부터 평면파가 표적을 향하여 입사한다고 가정한다. 가

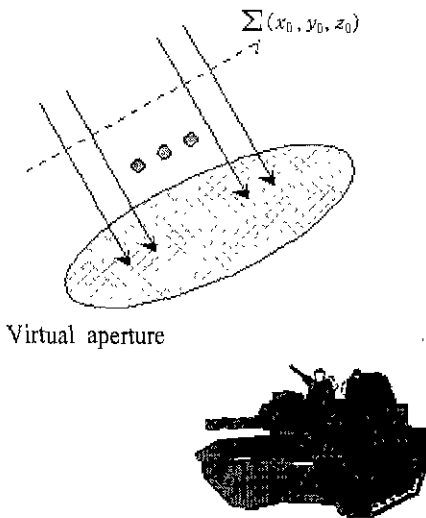


그림 5. SBR 입사 ray
Fig. 5. Incident ray in SBR method.

상의 평면에서 출발하는 평면파는 그림 5와 같은 많은 수의 ray의 합으로 이루어져 있다고 가정하여 각각의 ray의 반사, 투과, 굴절 경로를 GO 관점에서 추적하여 최종적으로 표적을 빠져 나오는 반사점에서 PO 등가전류를 형성하게 된다. 각각의 ray가 만드는 등가전류를 이용하여 산란파를 구하면 고차 반사에 의한 RCS를 계산할 수 있다. 이러한 방식으로 계산한 고차 반사파를 PO, PTD 기법으로 구한 일차 산란파에 더하여 전체 산란파를 구할 수 있으며 전체 산란파를 이용하여 표적의 RCS를 계산하게 된다.

IV. 수치결과 및 해석

PO, PTD, SBR 기법을 이용하여 그림 6과 같은 형태를 갖는 표적의 RCS를 예측하여 측정된 결과와 비교하였다. 측정은 포항공대에 설치된 compact range를 이용하여 수행하였다. 포항공대 compact range는 반사경 안테나, 피드 안테나, 측정 제어기, 시스템 제어기, 표적 회전기 등을 포함한 RCS 및 안테나 측정 장비로서 그 특성은 표 1과 같다.

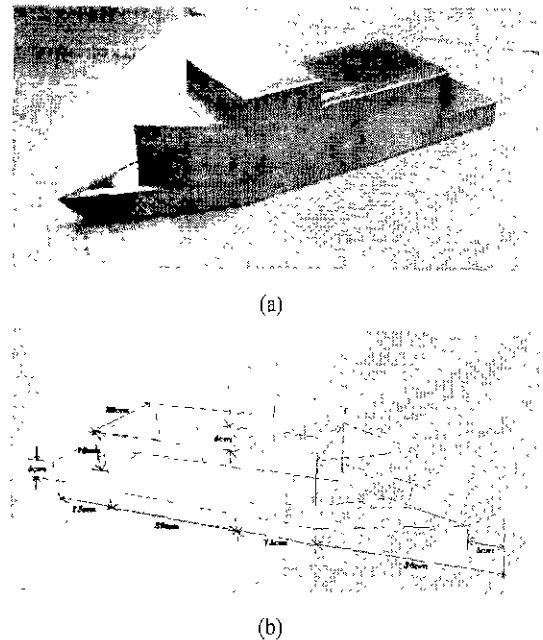
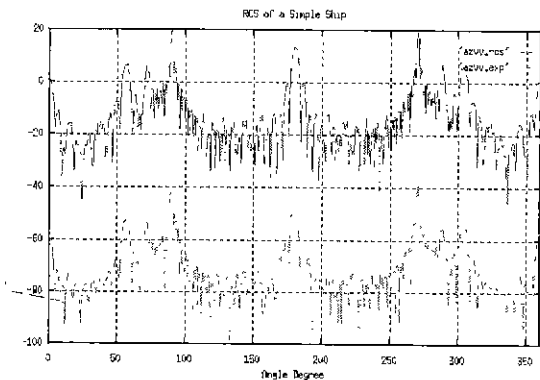


그림 6. 선박형태의 축소모형
Fig. 6. Scale-model of a ship-shaped target.
(a) Photograph
(b) Drawing

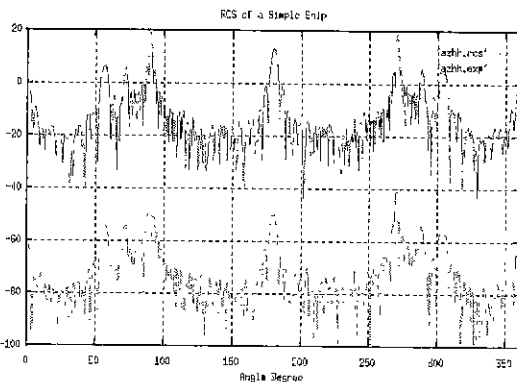
표 1. 포항공대 compact range의 특성

Table 1. Characteristics of POSTECH compact range

| 특성 | 범위 |
|------------------------------|-----------------------------|
| 측정 주파수 대역 | 2~20 GHz |
| 측정 편파 | HH, VV, HV, VH |
| 측정 민감도 (sensitivity) | -50 dBsm |
| 평면파 영역의 크기 (quiet zone size) | 1.2m(h) × 1.2m(w) × 1.8m(d) |
| 게이팅 방식 | 소프트웨어, 스위칭 |
| 보정 표적 | 구, 직각코너 반사경 |



(a)



(b)

그림 7. 방위각 평면에서의 예측/측정된 RCS

(a) 예측 결과, (b) 측정 결과-60dB

Fig. 7. Predicted/measured RCS in azimuth plane.

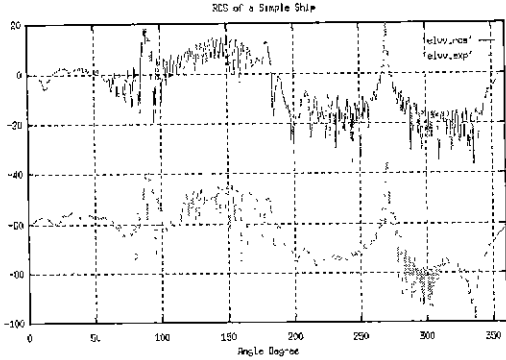
(predicted data, measured data-60dB)

(a) VV polarization

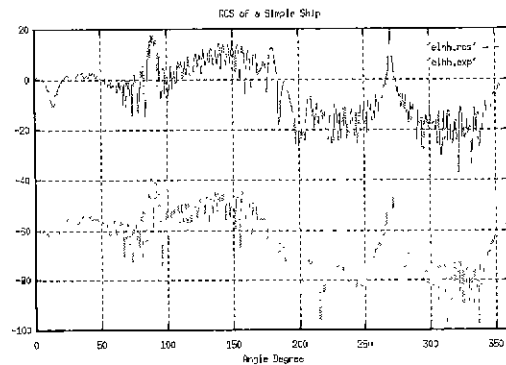
(b) HH polarization

그림 7에서는 방위각(azimuth) 평면에서의 VV 와 HH 편파에 대한 10 GHz에서의 측정결과와 예측결과를 나타내었다. 여기에서 명확한 도시를 위하여 측정 결과는 RCS 값을 60dBsm 낮추어 나타내었다. PO, PTD, SBR을 통합하여 예측한 결과는 측정치와 비교적 잘 일치하였으며, VV와 HH 편파에 관계없이 비슷한 결과를 보였다. 방위각 평면에서의 결과에서 알 수 있듯이 몇 개의 피크가 발생하였다. 주된 위치는 포적의 정면(0°), 측면, 후면 그리고 앞부분의 삼각기둥 부분이다. 이는 표적의 표면을 이루고 있는 평판이 입사파의 입사각과 직교하는 부분, 즉 레이더에서 표적의 평판을 정면으로 바라보게 되는 각도와 일치한다. 그림 8에서는 고각(elevation) 평면에서의 10 GHz 에서의 측정결과와 예측결과를 나타내었다. 방위각 평면에서의 마찬가지로 측정결과는 RCS 값을 60dBsm 낮추어 나타내었다. 여기에서도 RCS 값이 크게되는 부분은 주로 낮은 고각과 270°, 즉 배의 바닥부분이다. 이는 앞에서 언급한 바와 마찬가지로 표적의 평판이 입사파의 입사각과 직교하기 때문이다. 그리고 낮은 고각에서는 표적의 상부구조와 감판 부근이 두 개의 직각 코너 반사경(dihedral corner reflector) 구조를 이루어서 고차 반사파가 발생하기 때문에 넓은 각도 범위에서 큰 RCS 값을 갖게 되는 것이다. 그리고 고각 0°~50° 사이에 있는 작은 코너 반사경 구조에서는 예측치와 측정치의 오차가 다른 부분에서보다 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 SBR 기법을 적용할 경우 ray가 표적물에 입사할 때 하나의 ray tube와 표적물이 교차하는 지점이 모두 표적물에 존재하지 않고 일부는 표적물 내부에, 일부는 외부에 존재할 때의 산란현상을 고려하지 않았기 때문이다.

그림 9에서는 측정결과와 예측결과를 이용하여 생성한 ISAR 영상을 나타내었다. ISAR 영상은 RCS를 이용하여 각 산란원에서 산란되는 전자파의 크기를 2차원의 공간적인 분포로 나타낸 영상이다^[10]. ISAR 영상은 선박의 정면에서 방위각 ±14.8° 이내, 주파수 8.3~12.3 GHz 대역의 RCS를 이용하여 2차원 FFT(fast Fourier transform)를 적용하여 획득하였다. 측정결과를 이용하여 얻은 ISAR 영상과 예



(a)



(b)

그림 8. 고각 평면에서의 예측/측정된 RCS

(a) 예측 결과, (b) 측정 결과-60dB

Fig. 8. Predicted/measured RCS in elevation plane.

(predicted data, measured data-60dB)

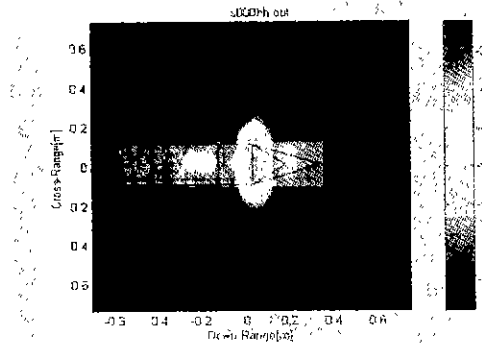
(a) VV polarization

(b) HH polarization

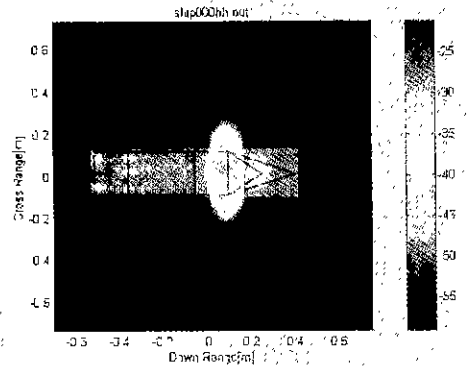
측정결과를 이용하여 얻은 영상 모두 주요한 산란현상을 잘 설명하며 또한 비교적 일치함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 임의의 표적을 삼각형 혹은 사각형 평판의 조합으로 모델링하여 평면파가 입사할 때 평판에 의해 산란된 원계 전계를 PO 기법을 이용하여 근사적인 해를 구하였고, 모서리에 의해 산란된 원계 전계를 PTD 기법을 이용하여 구하였다. 또한 PO 기법과 PTD 기법으로는 설명하기 힘든 고



(a)



(b)

그림 9. 정면에서의 HH 편파에 대한 ISAR 영상

(a) 예측 결과, (b) 측정 결과

Fig. 9. Front-view HH-polarized ISAR image.

(a) VV polarization

(b) HH polarization

차반사파를 SBR 기법을 이용하여 구하였다. 그리고 이러한 기법들을 검증하기 위하여 선박 형태의 구조물을 제작하여 RCS를 예측하고 포항공대 compact range에서 측정을 통해 획득된 RCS와 비교하였다. 예측된 결과는 측정 결과와 비교하여 전체적인 경향뿐만 아니라 국부적인 비교에서도 상당히 유사한 결과를 보였다.

1차 평판 산란파가 주요한 산란원이 되는 방위각 평면에서의 정면, 측면, 후면, 삼각기둥과 직교인 입사각과 고각 평면에서의 상부감판과 배의 바닥면과 직교인 입사각에서 측정 결과와 예측 결과가 일치함을 알 수 있다. 이는 본 논문에서 적용한 PO 기법

이 1차 평판 산란파를 해석하는 데 효과적임을 의미한다.

1차 모서리 산란파가 주요한 산란원이 되는 낮은 RCS를 나타내는 입사각에서의 측정결과와 예측 결과 또한 일치하여 PTD 기법이 1차 모서리 산란파 해석에 적합함을 확인할 수 있었다. 예측 결과는 어떠한 입사각에서도 발산하지 않고 수치적으로 안정적인 결과를 보였다. 이는 PTD 기법적용에 있어서 등가전류와 회절계수 계산에 적용된 방법이 정확함을 의미한다. 고차 반사파가 주된 산란원이 되는 영역인 고각 평면에서의 $0^\circ \sim 180^\circ$ 에 해당하는 입사각에서는 두 개의 직각 코너 반사경에 의한 고차 반사파 현상이 예측 결과 및 측정 결과에서 잘 나타났다. 이러한 사실로 미루어 표적을 평판의 합으로 모델링하여 PO, PTD, SBR을 적용한 RCS 예측기법은 복합구조물의 RCS 예측에 효과적이며 비교적 정확한 결과를 나타낼 수 있다.

본 논문에서 서술한 RCS 예측기법은 현재 본 연구실에서 수행하고 있는 복합구조물의 RCS 예측 관련 연구에 직접 이용되고 있다. 또한 측정 결과와 병행하여 ISAR 영상 획득에 이용되어 복합구조물의 산란원 분석을 통한 스텔스 설계 및 표적인식기법 연구에도 적용되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] P. A. Lees, et. al., "Computer prediction of RCS for military targets," *IEE Proceedings*, vol. 37, no. 4, Aug., 1990.
- [2] D. Gilberg, *Elliptic Partial Diffraction Equations of Second Order*, New York : Springer-Verlag, 1977.
- [3] 김세운, 석성하, 김상욱, "RCS 예측 CODE개발 연구," KIST, 1996. 12.
- [4] D. M. Elking, et. al., "A review of high-frequency RCS analysis capabilities at McDonnell Douglas Aerospace," *IEEE AP. Magazine*, vol. 37, no. 5, Oct., 1995.
- [5] Juan M. Rius, et. al., "GRECO : Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time," *IEEE AP. Magazine*, vol. 35, no. 2, Apr., 1993.
- [6] Nazih N. Youssef, "Radar cross section of complex Targets," *IEEE Proceedings*, vol. 77, no. 5, May, 1989.
- [7] Dieter Klement, et. al., "Special problems in applying the physical optic method for backscatter computations of complicated Object," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 36, no. 2, Feb., 1988.
- [8] E. F. Knott, et. al., "Equivalent currents for a ring discontinuity," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 21, Sep., 1973.
- [9] Hao Ling, et. al., "Shooting and bouncing rays," *IEEE Trans. on AP.*, vol. 37, no. 2, Feb., 1989.
- [10] Dale A. Ausherman, et. al., "Developments in radar imaging," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-20, no. 4, July, 1984.

석 성 하



1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1997년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1997년 3월 ~ 현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[관심분야] RCS 예측, RCS 측정 시스템, 전자파 산란

박 해 성



1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1999년 3월 ~ 현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정
[관심분야] RCS 예측, 복합구조물 모델링

서 태 일



1997년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월 ~ 현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
[관심분야] RCS 예측, RCS 측정 시스템, EMI/EMC

김 호 태



1978년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 : The Ohio State University 전자공학과 (공학박사)
1977년 ~ 1979년 : 금성통신연구소 연구원
1988년 ~ 1989년 : The Ohio State University 방문연구원
1986년 ~ 현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수, 부교수 교수
[관심분야] 전자파 산란, 안테나 설계 및 해석, RCS 예측, 표적인식, EMI/EMC

전 상 미



1999년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1999년 3월 ~ 현재 : 포항공과대학교 전자전기공학과 석·박사 통합과정
[관심분야] RCS 예측, 클러터 신호처리