

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 42(11), 958-967(2014)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.958

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

PO-GO 연계기법을 이용한 RCS 해석코드 개발

장민욱*, 명노신*, 장인모**, 이동호**

A Hybrid RCS Analysis Code Based on Physical Optics and Geometrical Optics

Min-Uk Jang*, Rho-Shin Myong*, In-Mo Jang** and Dong-Ho Lee**

Department of Aerospace and System Engineering and Research Center for Aircraft Parts Technology, Gyeongsang National University*, Korea Aerospace Industries, Ltd**

ABSTRACT

A hybrid method based on high-frequency asymptotic optics was developed in order to predict the RCS of flying vehicles for RCS reduction studies. In cavity return, the rays are assumed to bounce from the inlet cavity based on the laws of geometrical optics and to exit the cavity via the aperture. In other parts of a flying vehicle, the physical optics method is applied to compute the back-scattered field from the solid surface. The hybrid method was validated by considering simple models of sphere and sphere with cavity. In addition, RCS analysis of a flying vehicle was conducted using the new hybrid electromagnetic scattering method based on physical optics and geometrical optics theories.

초 록

효율적인 RCS 감소 연구를 위해 고주파수 근사 기법을 연계한 혼합기법 기반의 RCS 예측 코드를 개발하였다. 연계기법으로 전자기파 산란에 관한 고주파 기법인 물리광학법(Physical Optics)과 기하광학법(Geometrical Optics)을 이용하였다. RCS 산란 메커니즘의 하나인 Cavity Return 효과를 확인하기 위해 Inlet 영역은 기하광학법을 적용하였고, 그 외 영역은 물리광학법을 적용하였다. 예측코드의 정확성을 검증하기 위하여 구의 이론해와 예측결과를 비교하였고, Cavity가 존재하는 Sphere에 대한 Full Wave 해석해와 결과값을 비교하였다. 마지막으로 비행체 형상에 대한 RCS 해석문제에 적용하여 개발 코드의 유용성을 확인하였다.

Key Words : Radar Cross Section(레이더 포착면적), Physical Optics(물리광학법), Geometrical Optics(기하광학법)

1. 서 론

최근 항공기 설계에 있어서 생존성에 대한 관심이 증대되면서 적으로부터 아군의 위치를 은폐

하는 스텔스 성능의 중요성이 확대되고 있다. 비행체의 생존능력은 적의 각종 첨단 레이더를 사용한 추적으로부터의 회피능력과 깊은 관계가 있다. 이런 측면에서 적 레이더망에 대해 피탐지성

† Received : August 6, 2014 Revised : October 21, 2014 Accepted : October 23, 2014

** Corresponding author, E-mail : myong@gnu.ac.kr

(Susceptibility)[1]이 감소된 스텔스(Stealth) 항공기는 레이더(Radar)로 작동되는 적의 대공망을 피해 임무를 완수할 확률을 높이게 된다.

스텔스 기술이란 넓은 의미에서 상대의 레이더, 적외선 탐지기, 음향탐지기 및 육안에 의한 탐지까지를 포함한 모든 탐지 기능에 대항하는 은폐기능을 포괄적으로 의미하며, 좁은 의미에서는 상대의 레이더망에 포착되지 않는 항공기의 은폐기능을 의미하기도 한다. 레이더의 탐지에 대한 회피는 레이더 포착면적(Radar Cross Section; RCS)을 줄이기 위해 비행체의 외형에 변화를 주거나, 전자파를 흡수하는 재료(Radar Absorbing Material; RAM) 및 구조(Radar Absorbing Structure; RAS)를 적용하여 이루어지고 있으며, 반사 전자기와 간의 간섭·산란을 유도하는 국부적 변형 표면을 이용할 수도 있다 [2-7]. 레이더 포착면적 수준을 가능하고 주요 레이더 반사요소를 분석하기 위해서는 주로 실측 방법을 들 수 있겠지만, 항공기 RCS 측정은 풍동시험과 마찬가지로 많은 비용과 시간을 필요로 한다. 좀 더 효율적으로 RCS 값을 획득하기 위해 해석적 기법들이 도입되었는데, Maxwell 방정식을 직접 수치적으로 해석하는 CEM (Computational Electro-Magnetics; CEM) 기법[8]과 기하광학법(GO; Geometric Optics), 물리광학법(PO; Physical Optics) 등의 고주파 영역 근사적 해석기법들이 존재한다.

RCS 예측 기법은 크게 저주파와 고주파 해석으로 나눌 수 있는데, 고주파 해석은 산란 구조물의 크기가 입사 전자파의 파장에 비해 상대적으로 큰 경우 적용이 가능하며, 물리광학법 및 기하광학법 등이 주로 사용된다. 특히 물리광학법 및 기하광학법은 산란과 회절을 국소현상으로 처리할 수 있어 해석시간이 비교적 짧으므로 비행체와 같이 복잡한 물체의 초기 RCS 계산에 효율적인 계산으로 주로 설계초기 형상의 항공기 RCS 계산에 사용된다.

본 연구에서는 근사적 RCS 해석 기법으로 널리 사용되는 PO와 GO를 연계한 혼합기법을 개발하였다. 특히 GO 기법과의 연계를 통해 RCS에 큰 기여를 하는 항공기 Inlet 효과를 감안할 수 있는 코드를 개발하였다. 예측코드는 MATLAB을 이용하여 작성하였고, CAD Neutral File을 예측코드 입력에 용이한 포맷으로 변환하기 위하여 포트란을 이용한 코드도 개발하였다. 또한 코드의 정확성을 검증하기 위하여 먼저 구의 이론해와 비교하였고, 다음으로 Cavity가 존재하는 Sphere에 대한 Full Wave 해석해와 비교하였다.

II. 본 론

2.1 Hybrid RCS 해석코드 구성

2.1.1 형상 구현 및 좌표

입의의 물체에 대한 직교좌표계(Cartesian Coordinate)에서의 원거리 전파 반사(Scattering)는 Fig. 1과 같이 정의할 수 있다.

좌표축 원점으로부터 물체상의 점 P까지의 거리 벡터는 \vec{r}' 으로 표현된다. RCS 해석에 편리하도록 구형 좌표계를 도입할 경우, 물체의 중심을 향한 전자기와 진행 벡터는 Fig. 2와 같이 입사파 기준의 좌표계를 적용할 수 있다.

거리벡터 \vec{r}' 과 거리벡터 방향의 단위벡터 \hat{r} 및 방향코사인(Directional Cosine)은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{r}' = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z} \tag{1}$$

$$\hat{r} = \hat{x}u + \hat{y}v + \hat{z}w \tag{2}$$

$$\begin{aligned} u &= \sin\theta \cdot \cos\phi \\ v &= \sin\theta \cdot \sin\phi \\ w &= \cos\theta \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 는 각 좌표축 방향의 단위벡터이며, θ 와 ϕ 는 각 관측점의 구형 좌표계 상의 각도를

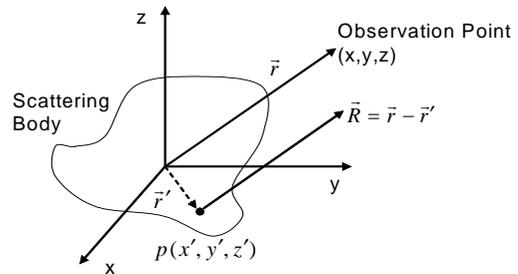


Fig. 1. Far field scattering from an arbitrary body

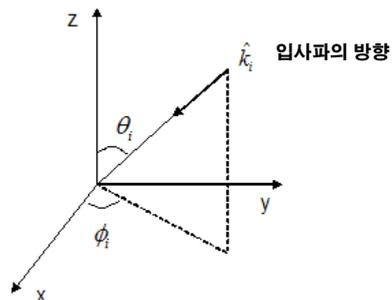


Fig. 2. Incident wave

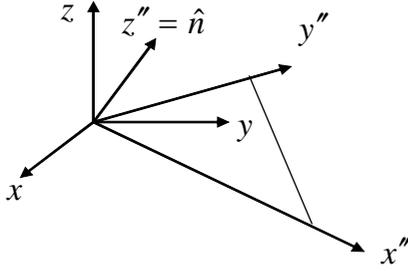


Fig. 3. Local coordinate systems

의미한다. Monostatic 안테나의 경우 전자기파의 구형 좌표계 각도 θ_i 와 ϕ_i 는 관측점으로 향한 각도 θ , ϕ 와 일치한다.

물리광학법 해석을 위해 물체표면을 삼각형 격자계로 구성하였다. 해석의 편의를 위해 Fig. 3과 같이 격자 셀의 법선벡터를 새로운 z축으로 하는 지역 좌표계 x'', y'', z'' 를 도입하고 이 좌표계로의 좌표 변환을 수행하여 Electric Field 계산을 수행하게 된다.

2.1.2 Physical Optics Approximation

물체의 Magnetic Volume Current가 없다고 가정하면 외부로부터의 입사전계(Incident Electric Field) \vec{E}_i 및 물체로부터의 산란전계(Scattered Electric Field) \vec{E}_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{E}_i = (E_{i,\theta}\hat{\theta} + E_{i,\phi}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \tag{4}$$

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = \frac{-j\vec{k}Z_0}{4\pi r} e^{-jkr} \iint_A \vec{J}e^{j\vec{k} \cdot \vec{s}} ds \tag{5}$$

여기서,

$$g = \vec{r}' \cdot \hat{r} = x'u + y'v + z'w$$

\vec{J} 는 표면전류(Electric Surface Current), k 는 파수(Wave Number)를 나타내며 $2\pi/\lambda$ (λ 는 파장)로 정의된다. $Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 는 물체를 둘러싼 공간의 고유 임피던스를 뜻한다. μ_0, ϵ_0 는 각각 자유공간에서의 투자율과 유전율을 나타낸다.

식 (5)의 \vec{E}_s 를 계산하는 과정에서 면적분을 수행하기 위해서는 Electric Volume Current \vec{J} 를 결정해야 한다. 이를 계산하기 위해 반사표면에서는 전류가 존재하고 ($\vec{J}_s \approx 2\hat{n} \times \vec{H}_i$; \vec{H}_i 는 입사자계), 가려진 표면에서는 Current가 존재하지 않는다고 가정하였다. 표면위의 점 $P(x_p, y_p, z_p)$ 에 대하여 자계는 아래와 같이 표현된다.

$$\vec{H}_i = \frac{\vec{k}_i \times \vec{E}_i}{Z_0} = \frac{-\hat{r} \times \vec{E}_i}{Z_0} \tag{6}$$

$$\vec{J}_s = 2\hat{n} \times \vec{H}_i = \frac{2}{Z_0} \hat{n} \times (E_{i,\theta}\hat{\theta} - E_{i,\phi}\hat{\phi})e^{j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \tag{7}$$

$$\vec{E}_s = \frac{j\vec{k}}{2\pi r} e^{jkr} [\hat{n} \times (E_{i,\theta}\hat{\theta} - E_{i,\phi}\hat{\phi})] \iint_A e^{j\vec{k} \cdot (\vec{h} + \vec{g})} ds \tag{8}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \vec{k}_i &= k\hat{k} = -k\hat{r}_i = -\hat{r} = -(\hat{x}u_i + \hat{y}v_i + \hat{z}w_i) \\ \hat{r}_p &= \hat{r} \\ \vec{h} &= \vec{r}_p \cdot \hat{r}_i = x_p u_i + y_p v_i + z_p w_i \end{aligned}$$

그리고 u_i, v_i, w_i 는 방향코사인이다. 또한 이 경우는 완전도체(Perfectly Electric Conductor; PEC)에 해당되며, 실제 항공기 표면의 경우 복잡한 등의 다른 재질로 인해 완전도체라고 가정할 수 없다.

유한한 전도율을 가진 물질에 대해 Resistive, Conductive, Impedance Surface의 개념을 도입하면 Electric Surface Current는 표면의 경계조건으로부터

$$\vec{J}_s = -\frac{1}{R_s} \hat{n} \times (\hat{n} \times \vec{E}) \tag{9}$$

$$\vec{J}_s = \hat{n} \times (\vec{H}_1 - \vec{H}_2) \tag{10}$$

와 같이 정의된다. 여기서, R_s 는 표면저항으로 $R_s = 0$ 이면 완전도체가 된다. 그리고 입사전계(Incident Electric Field) 대비 산란전계(Reflected Field)와 투과전계(Transmitted Field)의 비를 각각 반사계수(Reflection Coefficient)와 투과 계수(Transmission Coefficient)로 정의하고, 이를 Plane of Incidence에 수직인 성분과 평행한 성분으로 구분하면 다음과 같이 전계를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= (\hat{\theta}E_{i,\theta} + \hat{\phi}E_{i,\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \\ \vec{E}_t &= (\hat{\theta}T_{\parallel}E_{i,\theta} + \hat{\phi}T_{\perp}E_{i,\phi})e^{-j\vec{k}_t \cdot \vec{r}} \end{aligned} \tag{11}$$

$$T_{\parallel} = 1 + \Gamma_{\parallel} \tag{12}$$

여기서, T_{\parallel} 는 평행 투과계수, Γ_{\parallel} 는 평행 반사계수를 의미한다. 또한 삼각형 격자로 국소적 좌표변환을 수행하여 국소적 z방향을 Normal 방향으로 설정하면 Surface Current를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{J}_s = 2(J_x''\hat{x}'' + J_y''\hat{y}'')e^{jkz} \quad (13)$$

여기서 \hat{x}'' , \hat{y}'' 는 각각 국소 좌표계에서의 x , y 방향 단위벡터를 의미한다.

식 (11), (12)의 조건들을 (9), (10)의 경계조건들과 결합하여 풀면 Surface Current의 각 방향 성분은 아래 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} J_x'' &= \left[-\frac{E_{i,\theta}'' \cos \phi''}{Z_0} \Gamma_{\parallel} + \frac{E_{i,\phi}'' \sin \phi''}{Z_0} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta'' \\ J_y'' &= \left[-\frac{E_{i,\theta}'' \sin \phi''}{Z_0} \Gamma_{\parallel} - \frac{E_{i,\phi}'' \cos \phi''}{Z_0} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta'' \\ \Gamma_{\parallel} &= \frac{-Z_0 \cos \theta''}{2R_s + Z_0 \cos \theta''} \\ \Gamma_{\perp} &= \frac{-Z_0}{2R_s \cos \theta'' + Z_0} \end{aligned} \quad (14)$$

이 경우 \vec{E}_s 계산식은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{E}_s = \frac{jk}{2\pi r} e^{jkr} (J_x''\hat{x}'' + J_y''\hat{y}'') \iint_A e^{jk(h+g)} ds \quad (15)$$

2.1.3 Geometrical Optics Approximation

Shooting and Bouncing Rays (SBR) 기법은 Ray Tracing에 기초로 하며, Cavity와 같이 열린 공간에 대한 Scattered Field 값을 계산할 수 있다. 기본적으로 Rays는 해당 Target에 대해 Incident Plane을 기준으로 입사하게 되고 Aperture를 기준으로 추적된 Rays들을 취합하여 Physical Optics Approximation과 같은 방법으로 계산하게 된다[9-11].

입사파는 Rays의 밀집된 격자로 표현 가능하고, 초기상태에서 $P=(x_p, y_p, z_p)$ 와 방향벡터 $D=(s_x, s_y, s_z)$ 로 정의된다.

$$I(t) = P + tD, t \geq 0 \quad (16)$$

여기서,

$$\begin{aligned} s_x &= -\sin \theta_i \cos \phi_i \\ s_y &= -\sin \theta_i \sin \phi_i \\ s_z &= -\cos \theta_i \end{aligned} \quad (17)$$

Geometrical optics 기법은 크게 Ray Tracing과 Amplitude Tracking으로 나눌 수 있으며, Amplitude Tracking을 위해 Reflection Coefficient와 Divergence Factor를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{E}_{i+1} = (DF)_i \cdot (\bar{\Gamma})_i \cdot e^{-j(\text{phase})} \cdot \vec{E}_i \quad (18)$$

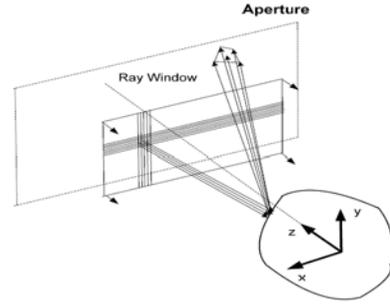


Fig. 4. SBR incident rays and exit aperture

2.1.4 Scattered Field Calculation

산란전계를 구하기 위해서는 아래 적분식을 계산해야 한다.

$$I_c = \iint_A e^{jk(h+g)} ds \quad (19)$$

이 적분에 대해서 일반적으로 Exact Solution을 구할 수 없기 때문에 테일러 전개(Taylor Series Expansion)을 시도하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_c = \int_0^1 \int_0^{1-p} e^{jD_s(p,q)} dpdq \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned} D_c(p,q) &= D_p p + D_q q + D_0 \\ D_p &= k[(x_1 - x_3)u + (y_1 - y_3)v + (z_1 - z_3)w] \\ D_q &= k[(x_2 - x_3)u + (y_2 - y_3)v + (z_2 - z_3)w] \\ D_0 &= k[x_3 u + y_3 v + z_3 w] \end{aligned} \quad (21)$$

격자 구성은 Fig. 5과 같이 삼각형으로 꼭지점 번호 $n(n=1,2,3,\dots)$ 에 대하여 직교좌표 (x_n, y_n, z_n) 로 구성되며 꼭지점 번호의 배열은 오른손(반시계방향) 법칙에 의해 오른손 엄지로 법선벡터의 방향이 결정된다.

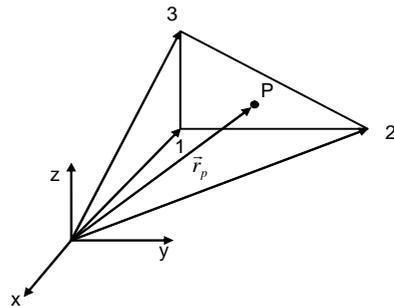


Fig. 5. Coordinate systems

식 (19)의 적분은 다음과 같이 간단해진다.

$$I_c = 2Ae^{jD_0} \times \left\{ \frac{e^{jD_p}}{D_p(D_q - D_p)} - \frac{e^{jD_q}}{D_q(D_q - D_p)} - \frac{1}{D_p D_q} \right\} \quad (22)$$

여기서 A는 격자의 면적을 나타낸다.

식 (22)을 계산하는 과정에서 $|D_p|, |D_q|$ 혹은 $|D_q - D_p|$ 가 매우 작을 경우(즉, 분모가 0에 가까워 질 경우) 계산은 특이점(Singularity)에 빠져 발산하거나 수치적 오류가 발생할 확률이 높아진다. 이런 경우를 방지하기 위해 다음과 같은 네 가지 경우에 대해 각각 다른 계산을 적용한다.

Case 1) $|D_p| < L_t$ 이고 $|D_q| \geq L_t$ 일 경우

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_0}}{jD_q} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p)^n}{n!} \left\{ -\frac{1}{n+1} + e^{jD_q} G(n, -D_q) \right\} \quad (23)$$

Case 2) $|D_p| < L_t$ 이고 $|D_q| < L_t$ 일 경우

$$I_c = 2Ae^{jD_0} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(jD_p)^n (jD_q)^m}{(m+n+2)!} \quad (24)$$

Case 3) $|D_p| \geq L_t$ 이고 $|D_q| < L_t$ 일 경우

$$I_c = 2Ae^{jD_0} e^{jD_p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_q)^n}{n!} \frac{G(n+1, -D_p)}{n+1} \quad (25)$$

Case 4) $|D_p| \geq L_t, |D_q| \geq L_t$ 이고 $|D_q - D_p| < L_t$ 일 경우

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_0}}{jD_q} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p - jD_q)^n}{n!} \left\{ -G(n, -D_q) + \frac{e^{jD_p}}{n+1} \right\} \quad (26)$$

여기서 L_t 는 Taylor Series Region의 길이이며, 수치적 오류를 방지하도록 충분히 작은 값을 설정해야 한다. 본 연구에서는 0.05의 값을 이용하였다. 함수 G는 다음과 같이 정의되고

$$G(n, w) = \int_0^1 s^n e^{jws} ds \quad (27)$$

다음과 같은 Recursive 계산을 통해 얻을 수 있다.

$$G(n, w) = \frac{e^{jw} - nG(n-1, w)}{jw}, n \geq 1$$

$$G(0, w) = \frac{e^{jw} - 1}{jw} \quad (28)$$

2.1.5 해석코드 GUI 구성

임의의 형상을 가진 물체의 RCS 해석을 위해 MATLAB을 이용하여 RCS 해석 코드 GNUPOGO를 개발하였다[12,13]. 임의의 형상에 대해 RCS를 해석하고자 할 경우 CAD 상에 구현된 형상에 격자를 생성하고, 각 격자의 꼭지점 좌표 정보, 격자의 정보 및 격자의 법선벡터 방향 정보를 포함한 형태로 가공하는 작업이 RCS 계산 전에 선행되어야 한다. 본 연구에서는 항공기 설계에 널리 사용되는 CATIA 모델을 활용할 수 있는 격자를 생성하기 위해 CATIA 내의 격자생성 기능인 “Analysis & Simulation” Module of “Advanced Meshing Tools” 을 이용하였다.

Figure 6과 같이 RCS 해석을 위한 전처리(Pre-Processor)는 GNUPOGO가 RCS를 계산할 수 있도록 격자의 좌표와 격자를 구성하는 꼭지점 정보를 형식에 맞게 구성하는 과정이다. 비행체를 포함한 항공기의 설계 프로그램으로 CATIA가 주로 사용되기 때문에 CATIA 모델을 이용하여 격자를 생성하고 Neutral Format으로 변환하는 절차로 구성하였다. 또한 생성된 Neutral Format의 격자 정보를 GNUPOGO가 받아들일 수 있는 형식으로 변환해주는 포트란(Fortran) 프로그램을 별도로 구성하였다.

Figure 7는 RCS를 실제 계산하는 Solver로서 앞서 설명한 전처리로 얻어진 격자(Grid) 정보를 읽어 계산을 수행하게 되며, 임의의 고도각

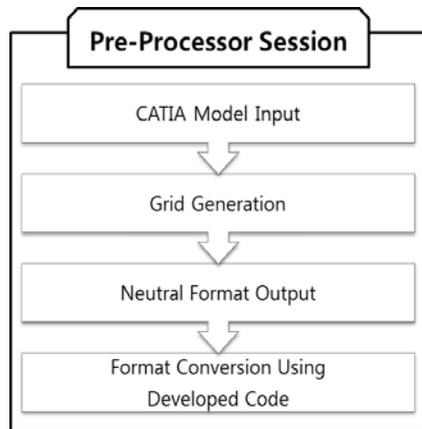


Fig. 6. Pre-processing for the RCS calculation

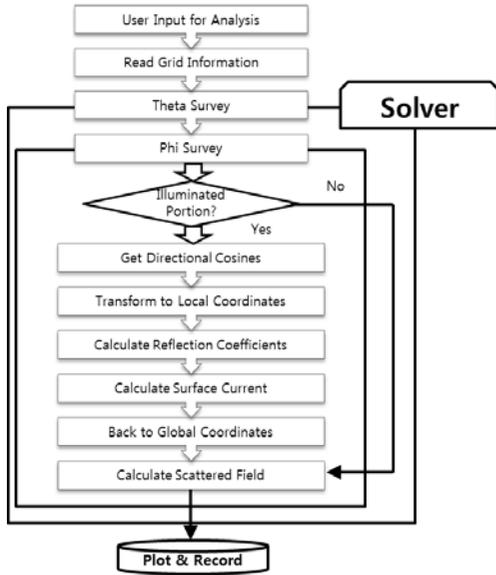


Fig. 7. Flow chart for the RCS calculation



Fig. 8. GUI main screen

(Elevation, Theta)에 대하여 방위각(Azimuth, Phi)을 변화시키면서 계산을 수행한다. CATIA Bulk Data로 저장된 Neutral Format Data를 GNUPOGO가 받아들이는 형태로 변경해주는 변환 프로그램을 구성하였다. 변환프로그램은 GNUPOGO가 이용하게 될 두 개의 파일을 생성하게 되는데 이는 Points.m과 Nodes.m이다. Points.m은 Mesh의 각 꼭지점들에 대한 3축 좌표 정보를 담고 있으며, Nodes.m은 각 격자(Cell)의 번호와 그 격자를 구성하는 세 개의 꼭지점 번호 정보를 담고 있다. 법선벡터의 방향은 오른손 법칙의 엄지 방향과 일치시키는 방식으로 꼭지점의 순서를 정의하여 결정한다.

Figure 8은 MATLAB으로 구성된 GNUPOGO의 Graphic User Interface의 메인화면을 나타낸 것이다. Pofacet.m 프로그램[14]의 GUI 프로그램을 기반으로 구성하였으며, 기본적인 PO 및 GO

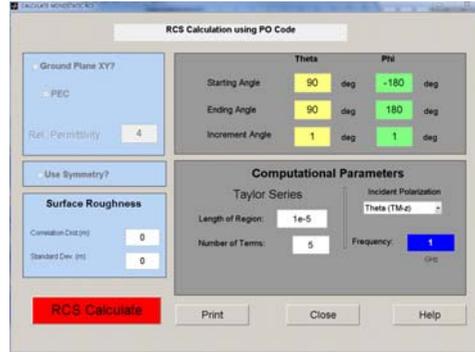


Fig. 9. Physical optics calculation GUI

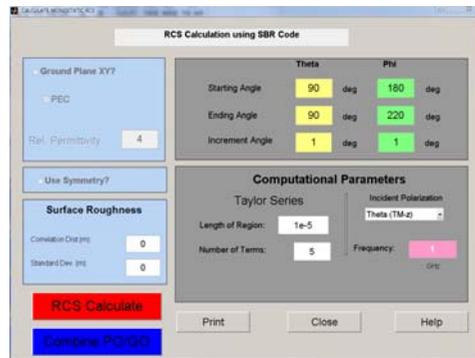


Fig. 10. Hybrid PO-GO calculation GUI

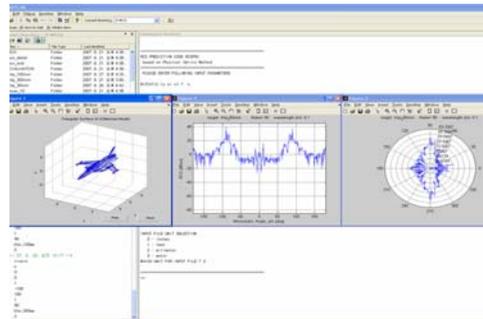


Fig. 11. RCS example

코드 해석 및 Hybrid PO-GO 기법의 RCS 해석 수행이 가능하다.

Figures 9, 10은 RCS 해석을 위한 Input 메뉴 구성을 나타낸 것이다. 초기 주파수와 방위각, 고도각 등이 지정된다.

GNUPOGO가 RCS 해석을 종료하면 Fig. 11과 같이 격자 정보, 해석결과에 대한 X-Y Plot 및 Polar Plot을 제공한다. 동시에 모든 결과값은 dBsm 단위로 저장되기 때문에 별도의 상세 검토 및 자료구성이 가능하다.

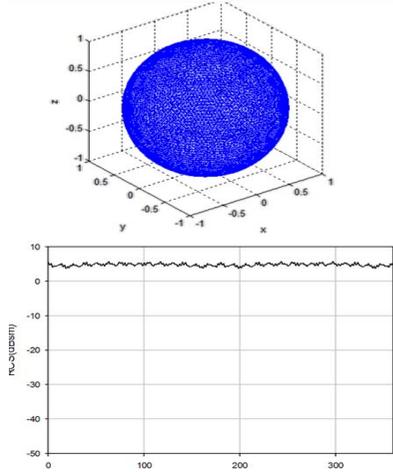


Fig. 12. Grids and RCS for the sphere

2.2 예측코드 검증 및 RCS 해석

2.2.1 PO 기법 검증

2.2.1.1 구형상(Sphere) 해석

구의 경우 파장의 길이에 비해 반지름이 클 경우에 아래 식과 같이 구의 물리적 단면적과 같아진다는 것은 잘 알려져 있다.

$$RCS(m^2) = \pi a^2 \tag{29}$$

격자 수에 따른 RCS 정확도 변화를 확인하기 위하여 구의 격자 수를 변화 시키면서 RCS 추이를 확인하였다. 우선 고주파영역인 10 GHz의 주파수일 경우 해석해를 통한 RCS 계산이 가능한데, 반경 1m 구의 경우 해석해 결과는 4.97 dBsm 이다. Fig. 12는 PO 코드 결과를 보여주는데, 격자 수에 상관없이 고주파수 해석해에 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

2.2.1.2 날개 단면(Wing Section) 해석

코드길이 1m, NACA0012 에어포일 날개형상 단면 형상을 통해 PO 코드 검증을 수행하였다. 검증을 위해 레이더 및 RCS 해석에 사용되는 상용 PO 프로그램인 RadBase[15]를 이용하였다. Fig. 13과 같이 GNUPOGO의 결과값과 RadBase의 결과값이 거의 일치함을 알 수 있다.

2.2.1.3 단순 비행체 해석

동체 후방을 단순화시킨 비행체 형상을 통한 검증을 수행하였다. 10GHz 고주파 영역대에서 방위각 90°, 고도각 360° 영역에서 1° 간격으로 수행하였다. Fig. 14와 같이 전방 150° 부근과 210° 부근에서 5dBsm 정도의 근소한 차이가 나

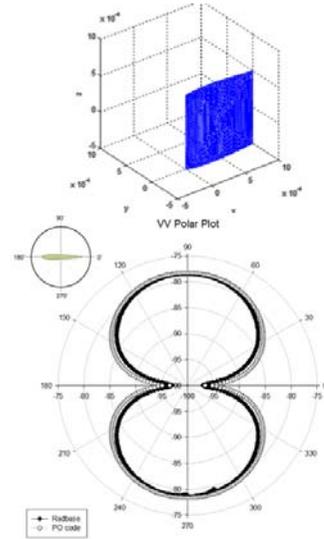


Fig. 13. Grids and RCS for the wing section

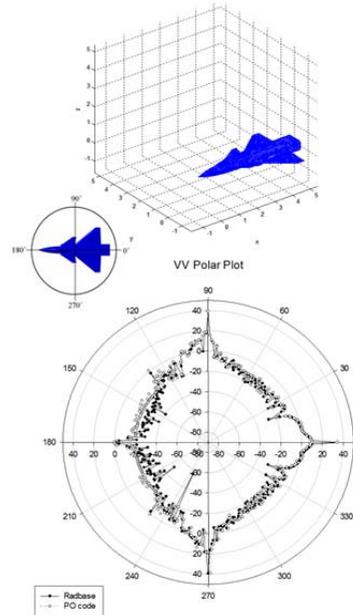


Fig. 14. Grids and RCS for an aircraft

타났으나, 대부분 영역에서 동일한 RCS 결과를 예측하였다.

2.2.2 GO 기법 검증

2.2.2.1 평판(Plate) 해석

GO 기법 검증을 위해 PEC 평판의 Monostatic RCS 문제(Vertical Polarization, 6 GHz, Maximum Dimension 0.25)를 고려하였다[10]. Cavity의 깊이가 매우 얇을 경우, GO 기법에 의

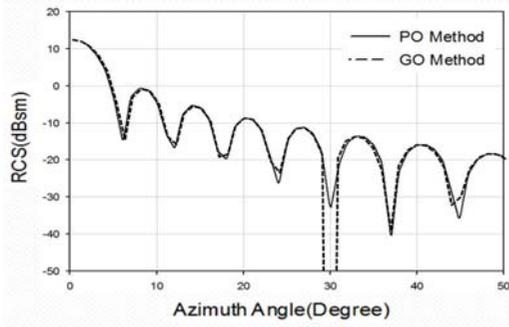


Fig. 15. RCS of the plate

한 결과는 PO 기법의 결과와 일치할 것으로 가정하였다. 평판에 대한 RCS 해석하는 아래의 식 (30)으로 표현된다. ($k=2\pi/\lambda$)

$$\sigma(\text{plate}, m^2) = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \times \left(\frac{\sin(ak \sin\theta \cos\phi)}{ak \sin\theta \cos\phi} \frac{\sin(bk \sin\theta \sin\phi)}{bk \sin\theta \sin\phi} \right)^2 \times (\cos\theta)^2 \quad (30)$$

PO 결과는 해석해와 거의 동일한 것으로 나타났으며, 비교를 위해 GO 결과값을 함께 제시하였다. Fig. 15는 주파수 특성상 30°의 차이를 제외하면 모든 영역에서 결과가 일치하고 있음을 보여 준다.

2.2.2.2 Cavity 해석

과장길이에 따른 Rectangular Cavity의 길이, 가로, 세로 길이를 달리하여 GO 기법에 대한 RCS 해석을 수행하였다[11]. 가로, 세로의 길이는 과장길이의 각 10배, 3배인 경우의 해석을 수행하였고, Cavity의 깊이는 과장길이의 30배, 9배의 해석을 수행하였다.

Figures 16, 17 결과에서 보듯이 Rectangular Cavity 형상의 경우 현 결과가 해석해와 거의 일

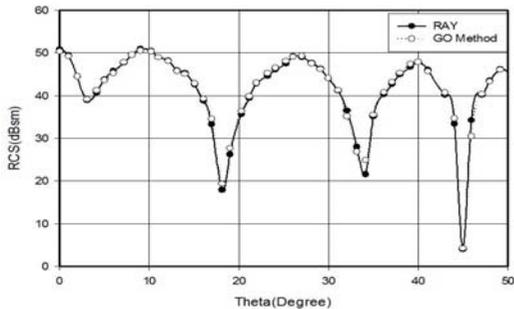


Fig. 16. RCS at 10λ by 10λ at 30λ depth (Theta=0°)

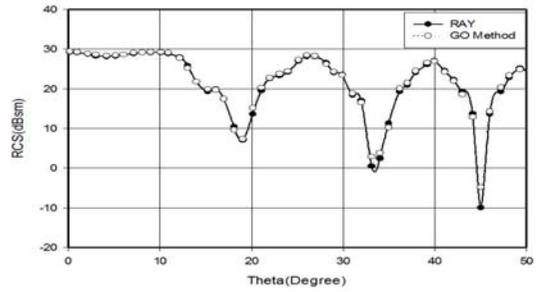


Fig. 17. RCS at 3λ by 3λ at 9λ depth (Phi=0°)

치함을 확인할 수 있다. 특히 초기 Polarization을 Theta와 Phi값으로 변경했을 시에도 모두 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다.

2.2.3 PO-GO 기법 검증

PO-GO 혼합기법을 적용한 RCS 해석을 검증하기 위해 임의의 구형상을 선정하였다. Fig. 18과 같이 PO 영역과 GO 영역의 중첩된 영향성을 확인하기 위해 반경 1m의 구정면에 가로, 세로 길이 0.6m, 깊이 1m인 Rectangular Cavity를 생성하였다. 해석 검증을 위해 Method of Moment (MOM) 기법 상용프로그램인 FEKO와 결과를 비교하였다.

Figure 19는 MOM 기법의 수치해와 PO-GO 혼합기법의 결과값을 비교한 그래프이다. 0°에서 80°까지의 PO-GO 결과값이 MOM 해와 거의 유사함을 확인할 수 있다. 또한 80° 이상의 PO 기

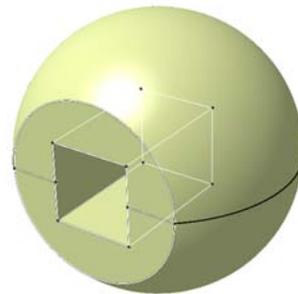


Fig. 18. Sphere with cavity

Table 1. Initial conditions

Radar Type		Monostatic Radar
Frequency		10GHz
Polarization		HH-Polarization
Azimuth Angle	PO	0° ~ 180° (Step 1°)
	GO	0° ~ 80° (Step 1°)
Elevation Angle		0°

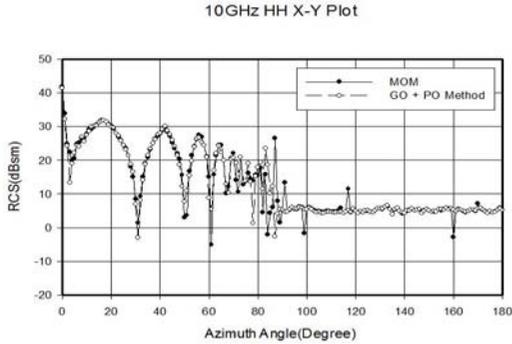


Fig. 19. 10GHz RCS X-Y plot

법 영역대의 결과도 구의 이론해인 4.97 dBsm 결과와 같은 값이 계산됨을 확인할 수 있다.

2.2.4 비행체 RCS 해석

Figure 20과 같이 동체 후방이 단순화된 비행체 모델을 고려하여 PO-GO 혼합기법 코드가 비행체와 같은 복잡 형상에 적용할 수 있음을 확인하고자 하였다. Inlet 영역은 3GHz의 주파수영역에 해당하는 가로 0.10m, 세로 0.24m, 깊이 0.65m로 가정하였다.

CATIA에서 생성된 형상을 바탕으로 Advanced Surface Mesher 기능을 이용하여 Fig. 21과 같이 약 8000여개의 표면격자를 생성하였으며 모든 표면은 완전 전도체로 가정하였다. Monostatic 방식 레이더, VV-Polarization, 주파수 3GHz, 비행체 정면인 고도각 0° 경우를 고려하였다. Figure 22는 1° 간격으로 계산한 RCS 결과값(단순 PO 및 PO-GO 혼합기법)을 보여준다.

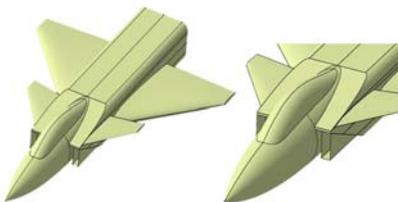


Fig. 20. Geometry of an aircraft

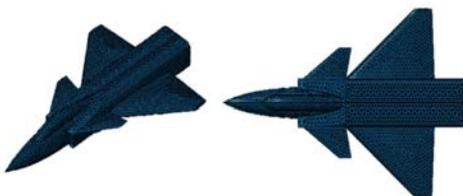


Fig. 21. Grids for RCS calculation

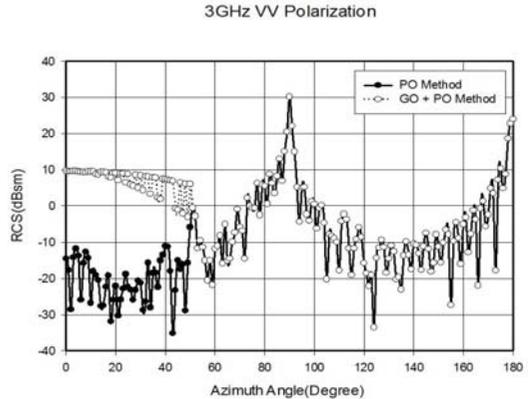


Fig. 22. 3GHz RCS X-Y plot

전체적으로 최대 RCS 값은 90° 영역과 비행체 후방 영역으로 나타났는데, 이는 해당 영역에서 평평한 표면에 의한 Specular Reflection 효과에 기인한 것이다. PO-GO 기법이 적용된 방위각 0°에서 50° 구간의 RCS 크기는 PO 기법만 적용했을 때와 대비하여 대폭 상승하였음을 알 수 있다. 해당 구간의 평균 RCS는 6.96 dBsm으로 PO 기법에 의한 평균 RCS 보다 약 26 dBsm이 상승하였다. 이 결과를 통해 비행체의 Inlet 영역이 RCS 해석 결과에 지대한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

III. 결 론

비행체와 같이 복잡한 형상의 초기 설계단계에서의 효율적인 RCS 계산을 위해 고주파 영역에서의 RCS 근사 해석기법으로 널리 사용되는 물리광학법과 기하광학법을 연계한 PO-GO 혼합코드를 개발하였다. 예측코드는 Matlab을 이용하여 작성하였고, CAD Neutral File을 예측코드 입력에 적절한 포맷으로 변환하는 코드를 동시에 개발하여 복잡한 삼차원 형상을 용이하게 다룰 수 있도록 하였다. 또한 해석코드를 바탕으로 GUI를 제작하여, 물리광학법, 기하광학법 및 PO-GO 혼합기법, 각종 해석 경우 선택을 편리하게 하였다.

예측 코드의 정확성을 검증하기 위하여 물리광학법인 경우 구의 해석해와 비교하였고, 기하광학법인 경우 Plate와 Rectangular Cavity 해석을 통해 기존 해석해와 비교하였다. 또한 PO-GO 혼합기법의 경우, Inlet 효과를 모사하는 Cavity가 포함된 구형상 해석을 고려한 다음, MOM 기법의 Full Wave 해와 비교하여 그 결과

의 타당성을 확인하였다.

짧은 해석시간이 소요되는 물리광학법 및 기하광학법은 비행체와 같은 복잡한 형상에 대한 초기 고주파수 영역에서의 RCS 해석에 아주 효율적이다. 반면 상세설계 단계에서 중요해지는 형상 틈새, 모서리 회절 등의 복잡문제의 경우 CEM 기반의 Full Wave 해석코드 개발이 필요하다. 또한 본 연구에서는 개발의 편이를 위해 상용프로그램인 Matlab을 근간으로 코드를 개발하였으나, 향후 고주파 근사기법의 빠른 해석속도 장점을 최대한 살리기 위해서는 계산 전문 프로그램인 Fortran을 이용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국항공우주산업(주) 지원으로 수행하는 “RCS 해석코드 개발 및 감소설계” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

References

- 1) Ball, R. E., *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, AIAA Education Series, 2nd Edition, 2003.
- 2) Knott, E. F., Shaeffer, J. F. and Tuley, M. T., *Radar Cross Section*, Second Edition, Artech House, 1993.
- 3) Myong, R. S., *Aircraft Survivability and Stealth Technology*, Lecture Note, Gyeongsang National University, 2013.
- 4) Jenn, D. C., *Radar and Laser Cross Section Engineering*, AIAA Education Series, 2005.
- 5) Choi, S. W. and Boo, S. Y., “Computation of Radar Cross Section of Ship’s Structure using a Physical Optics Method,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 37, No. 4, 2006, pp. 82-916.
- 6) Lee, D. H., “A Study on the CEM Code for RCS Prediction of Flying Vehicle Based on FVTD Method,” *M. S. Thesis*, Gyeongsang National University, 2009.
- 7) Choi, N. S., “An Analysis of Helicopter Radar Cross Section Using Physical Optics Method,” *M. S. Thesis*, Gyeongsang National University, 2008.
- 8) Myong, R. S. and Cho, T. H., “Development of a Computational Electromagnetics Code for Radar Cross Section Calculations of Flying Vehicles,” *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, No. 4, 2005, pp. 1-6.
- 9) Özgün, S., “Computation of Radar Cross Sections of Complex Targets by Shooting Bouncing Ray Method,” *M. S. Thesis*, Middle East Technical University, 2009.
- 10) Ling, H., Chou, R. and Lee, S. W., “Shooting and Bouncing Rays: Calculating the RCS of an Arbitrarily Shaped Cavity,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 37, No. 2, 1989, pp. 194-205.
- 11) Ling, H., Chou, R. and Lee, S. W., “High-Frequency RCS of Open Cavities with Rectangular and Circular Cross Sections,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 37, No. 5, 1989, pp. 648-655.
- 12) Mahafza, B. R. and Elsherbeni, A. Z., *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, Chapman & Hall/CRC, 2004.
- 13) Chatzigeorgiadis, F., “Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction and Analysis Application,” *M. S. Thesis*, Naval Postgraduate School, 2004.
- 14) Garrido, E. E., “Graphical User Interface for a Physical Optics Radar Cross Section Prediction Code,” *M. S. Thesis*, Naval Postgraduate School, 2000.
- 15) *RadBase User’s Guide Version 2.0*, 2000.