

복합 구조물의 레이더 반사면적 해석 프로그램 개발

권현웅* · 홍석윤** · 송지훈***†

*, ** 서울대학교 조선해양공학과, *** 전남대학교 조선해양공학전공

Development of Radar Cross Section Analysis Program for Complex Structures

Hyun-Wung Kwon* · Suk-Yoon Hong** · Jee-Hun Song***†

*, ** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea

요약 : 본 연구에서는 복합 구조물의 레이더 반사면적을 해석하기 위한 프로그램 RACSAN을 개발하였다. 본 프로그램은 물리 광학을 기초로 한 고주파 대역에서의 키르히호프 근사법을 기반으로 하고 있다. 또한, 본 프로그램은 물리/기하 광학 혼합방법을 이용하여 복합 구조물의 다중 반사 효과를 고려 할 수 있다. 즉, 기하 광학을 이용하여 다중 반사 시 유효면적을 계산하고 최종 반사면에서는 물리광학을 이용하여 레이더 반사면적을 해석한다. 개발된 프로그램의 신뢰성 확보를 위하여 이론해가 있는 구조물들의 결과들과 비교하여 본 프로그램이 복합 구조물의 레이더 반사면적 해석에 유용하게 사용될 수 있는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 레이더 반사면적, 키르히호프 근사법, 물리광학, 기하광학, 다중 반사 효과

Abstract : In this paper, radar cross section (RCS) analysis program, RACSAN has been developed to predict RCS of complex structures. RACSAN is based on the high frequency range analysis method of Kirchhoff approximation in physical optics (PO). This program can present RCS including multi-bounce effect in complex structures by combination of geometric optics (GO) and PO method. GO method has a concern in the evaluation of the effective area, and PO method is involved in the calculation of RCS for the final effective area that is evaluated by GO method. Comparisons of the predicted results and analytical solutions showed that the developed program could be an effective tool for predicting RCS in complex structures.

Key Words : Radar cross section, Kirchhoff approximation method, Physical optics, Geometric optics, Multi-bounce effect

1. 서론

함정, 항공기, 미사일 등의 군사용 무기체계와 같은 복합 구조물은 임무 수행 중 레이더를 이용하여 상대방의 정보를 획득한다. 따라서, 각국에서는 적 레이더에 의한 탐지 가능성을 줄이기 위한 레이더 반사면적(RCS; radar cross section) 저감 방안을 군사용 무기체계 설계에 적극 반영하고 있으며 그 방안으로는 복합 구조물의 구조와 형상에 대한 변경 그리고 레이더 신호를 흡수하는 전파 흡수체 적용이 고려될 수 있다. 그러나 전파 흡수체의 적용은 중량, 비용 증가 등으로 제한적 요소를 내재하고 있다. 그러므로 RCS 저감 방

안을 복합 구조물 설계에 효율적으로 적용하기 위해서는 구조와 형상 변경에 따른 RCS 특성 분석이 필요하다.

RCS 특성은 복합 구조물의 기하학적 형상에 의해서 결정이 된다. 대표적인 기하학적 형상인 평판, 구, 실린더 등에 대한 RCS는 이론적으로 이미 알려져 있으며(Urick, 1983) 보다 복잡한 형상에 대해서는 수치해석을 통한 해석 및 예측이 가능하다. 대표적인 수치해석 방법에는 모멘트법(method of moment), 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method) 등의 저주파수 해석 기법과 물리광학법(PO; physical optics), 기하광학법(GO; geometric optics), 키르히호프 근사법(Kirchhoff approximation) 등의 고주파수 해석 기법이 이용되고 있다(Knott et al., 1993, Schneider et al., 2003). 이들 중 군사용 무기체계와 같이 입사파장에 비해 크기가 큰 복합 구조물의 RCS 해석에는 상대적으로 계산량과 오차

* First Author : khw1@snu.ac.kr, 02-880-7331

† Corresponding Author : jhs@jnu.ac.kr, 061-659-7156

가 적은 키르히호프 근사법이 일반적으로 널리 사용되고 있다(Schneider et al., 2003). 국내에서도 Choi and Boo(2000), Choi et al.(2005)이 물리광학을 기초로 한 키르히호프 근사법을 적용하여 단순반사에 대한 RCS 해석을 수행하였으며, Kim et al.(2005)은 가시면 분할 알고리즘을 이용하여 다중반사 효과를 고려하였으며, Kim et al.(2007)은 유전자 알고리즘을 이용하여 RCS 감소를 위한 광대역 전파흡수체 최적설계방법을 구현하였고, Kim and Cho(2011)은 수상함 선체외관의 영구변형이 RCS에 미치는 영향을 고찰하였으며, Kwon et al.(2013)은 음향 표적강도 감소를 위한 알베리히 무반향 코팅재 효과를 고려하였다.

본 연구에서는 복합 구조물의 RCS를 해석할 수 있는 프로그램, RACSAN을 개발하였다. 본 프로그램은 GO를 이용하여 다중 반사 시 경로와 유효면적(effective area)을 계산하고 최종 반사면에서는 PO를 이용하여 RCS를 해석한다. 개발된 프로그램의 신뢰성 확보를 위하여 이론해가 있는 구조물들의 결과들과 비교하여 검증하였다.

2. 이론

2.1 레이더 반사면적(RCS)

RCS는 레이더에서 송신된 전자파가 목표물에 의해 산란되어 되돌아오는 산란파의 전력과 송신 전자파의 전력의비로 다음과 같이 정의한다(Knott et al., 1993).

$$\sigma \equiv \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

여기서, σ 는 RCS, E_i 는 레이더에서 송신한 전자파가 표적에 입사되는 입사파, E_s 는 표적에서 산란되어 레이더 방향으로 되돌아오는 산란파, R 은 레이더와 표적 사이의 거리를 의미한다.

식(1)의 RCS 정의를 이용하여, 복잡한 표적의 RCS 해석은 전체 표적을 기하학적으로 단순한 형태를 갖는 여러 개의 요소로 나누어서 각각의 RCS를 해석한 후 이를 합하여 전체 RCS를 구하며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{\sigma}_{total} \approx \sum \sqrt{\sigma}_{element} \quad (2)$$

2.2 기하광학법(GO)

GO는 경계 면에서 반사 법칙을 이용하는 일종의 선 추적(ray tracing) 기법이다(Bechtel, 1965). GO는 간단하면서도 역사가 깊은 예측 방법으로 표적 위에서의 반사점(specular

point)에서의 곡률 반경을 알면 식(3)과 같이 매우 간략한 형태로 RCS를 구할 수 있다.

$$\sigma = 10 \log(\pi a_1 a_2) \quad (3)$$

여기서, a_1, a_2 는 주 곡률 반경을 의미한다.

그러나 GO의 경우 식(3)에서도 확인할 수 있듯이 곡률이 한 쪽 방향으로만 있는 경우라던가 평평한 표적인 경우 곡률 반경이 무한대로 발산하게 되어 RCS를 추정할 수 없다는 단점을 갖고, 실제 구현에서도 각각의 입사되는 방향에서의 반사점을 일일이 추적하는 것이 어렵다는 단점을 갖는다.

2.3 물리광학법(PO)

2.2절의 GO가 갖는 단점을 극복할 수 있는 기법이 PO이다. PO는 기본적으로 파장에 비해서 표적 표면이 매우 크고 평평하다라는 가정에서 출발해서, 반사되는 장(field)은 표면의 장의 값을 적분함으로써 예측할 수 있다(Klement et al., 1988). PO를 이용하면 곡률이 한 쪽으로 진 곡면이나 평평한 면에 대해서도 RCS를 추정할 수 있다. 즉, 전자기파 이론에서 Stratton-Chu 적분 방정식을 이용해서 표면에서 산란되는 장을 구한 다음 그 것을 적분함으로써 RCS를 구하는 것이다.

PO로 구해지는 RCS식과 키르히호프 근사법으로 얻어지는 RCS식은 서로 같게 되는데, 다만 각 이론이 적용되는 분야관점에서 차이를 보이고 있다. 즉, PO의 경우 주로 레이더 이론에서 사용되는 반면 키르히호프 근사법은 음향학에서 사용되는 등 서로 분야가 다르지만, 사용되는 적분식의 형태가 모두 기본적으로 Helmholtz-Kirchhoff 적분식과 같은 형태라는 점에서 서로 같은 RCS를 추정할 수 있다.

2.4 임의의 다각한 평판에 대한 RCS

임의의 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 RCS를 해석하기 위해서는 형상을 여러 개의 요소로 모델링해야 한다. 기존의 RCS 이론식(Urick, 1983)은 위상정보가 없고, 삼각형, 오각형 등의 임의의 다각형 형상을 가진 요소에 대한 식이 없기 때문에 다음 식을 사용한다(Gordon, 1975).

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{\cos\theta}{\sqrt{\pi T}} \exp[jkr_0 \cdot \bar{w}] \sum_{m=1}^M (\hat{p} \cdot \bar{a}_m) \times \exp[jkr_m \cdot \bar{w}] \frac{\sin(ka_m \cdot \bar{w}/2)}{ka_m \cdot \bar{w}/2} \quad (4)$$

여기서, 각 변수들은 다음과 같다.

- k = 입사파의 파수(wave number)
- \hat{n} = 평판의 법선 단위 벡터
- θ = 법선 벡터와 입사 벡터 사이의 각
- \vec{r}_0 = 레이더에서 원점을 가리는 위치 벡터
- $\vec{w} = \hat{i} - \hat{s}$
- \hat{i} = 입사 방향 단위 벡터
- \hat{s} = 반사 방향 단위 벡터
- \vec{a}_m = m 번째 변의 길이와 위치를 나타내는 벡터
- \vec{r}_m = m 번째 변의 중점을 가리키는 위치 벡터
- $T = \vec{w}$ 을 정사영시켰을 때의 벡터길이
- $\hat{p} = \hat{n} \times \vec{w} / |\hat{n} \times \vec{w}|$
- M = 변의 개수

T 항에 의한 특이점(singular point)이 발생하는 경우($T=0$)에는 식(4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jkA}{\sqrt{\pi}} \cos\theta \exp[jkr_0 \cdot \vec{w}] \quad (5)$$

여기서, A 는 다각 평판의 면적을 의미한다.

식(4)는 임의의 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 RCS를 요소의 모서리들에 의한 영향의 합으로써 구할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 식(4)과 식(5)는 적분이 필요 없기 때문에 수치해석시간, 적분 오차 등 기존의 유한요소법, 경계요소법이 갖고 있는 문제점들을 해결할 수 있다.

2.5 다중 반사 효과

임의의 형상을 갖는 복합 구조물을 구성하고 있는 여러 다각형 요소들간의 상호반사에 의한 RCS 영향을 고려하기 위해서는 다중 반사 효과를 고려해 주어야 한다. 즉, 레이더에서 송신한 전자파가 표적에 입사하여 다른 요소로 반사되어 최종적으로 레이더로 들어오는 영향을 고려해야 한다. 이를 위해 최종 반사면의 유효면적을 구해야 한다.

다중 반사 효과를 고려할 때, PO-PO를 이용하여 파의 진행 경로를 계산하는 방법은 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 파의 진행 경로(a)와 유효면적의 계산(b)은 GO를 이용하였고, 최종 반사면에서는 PO를 이용하여 다중 반사 효과를 구현하였다.

3. RCS 해석 프로그램 개발

3.1 RACSAN 구성

2장의 이론들을 기반으로 Fig. 2와 같은 임의의 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 RCS를 해석하기 위한 프로그램

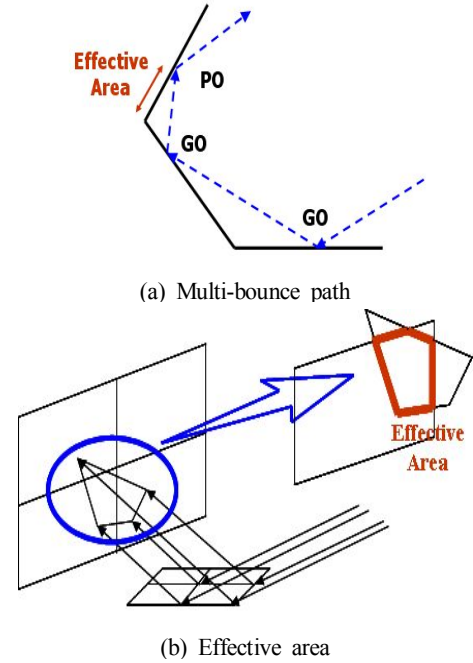


Fig. 1. Concept of multi-bounce.

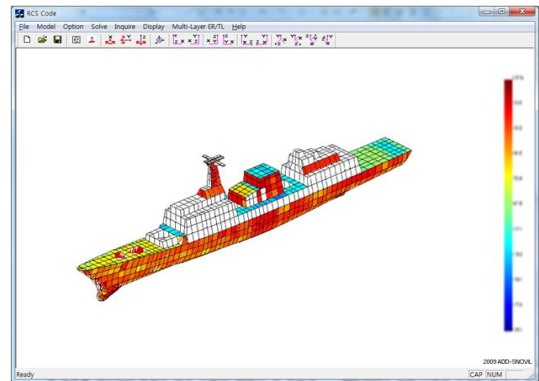


Fig. 2. Model viewer window.

RACSAN(RADAR Cross Section ANalysis program)을 개발하였다.

RACSAN의 구성은 임의의 형상을 갖는 복합 구조물의 주요 방위각 및 고각에 대한 내/외부 단반사 및 다중반사 RCS 해석 모듈, RCS 반사신호 시간패턴 해석 모듈, 전파흡수체 반사/투과계수 해석 모듈로 구성되어 있다.

3.2 RACSAN 주요기능

RACSAN의 RCS 해석 모듈에서는 복합 구조물의 내/외부 단반사 및 다중 반사 효과를 고려할 수 있다. 또한, 레이더의 송수신 위치가 동일한 단상태와 송수신 위치가 상이한 양상태를 고려할 수 있다. RCS 반사신호 시간패턴 해석 모듈은 펄스 형태의 입력 신호를 주파수 영역으로 FFT(fast fourier transform) 시켜 주파수 영역에서 반사파의 크기와 곱

을 하고 이를 다시 시간 영역으로 IFFT (inverse fast fourier transform) 시켜 반사 신호의 패턴을 계산한다. Fig. 3은 RCS 해석 범위, 레이더와 표적의 위치 및 시간 패턴 해석 조건을 입력하는 창을 나타내고 있다.

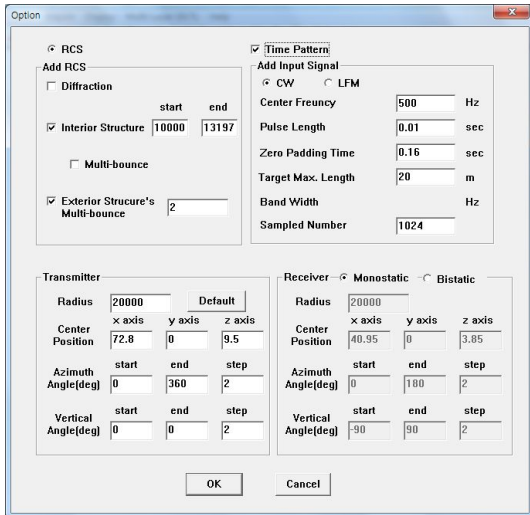


Fig. 3. Analysis and input position option window.

전파흡수체 반사/투과계수 해석 모듈에서는 탄성층, 평판, 보 형상의 보강재가 부착된 평판이 적층되었을 때 반사 및 투과계수를 계산한다. Fig. 4는 RCS 해석 주파수와 전파흡수체의 반사 및 투과 특성을 입력하는 창을 나타내고 있다.

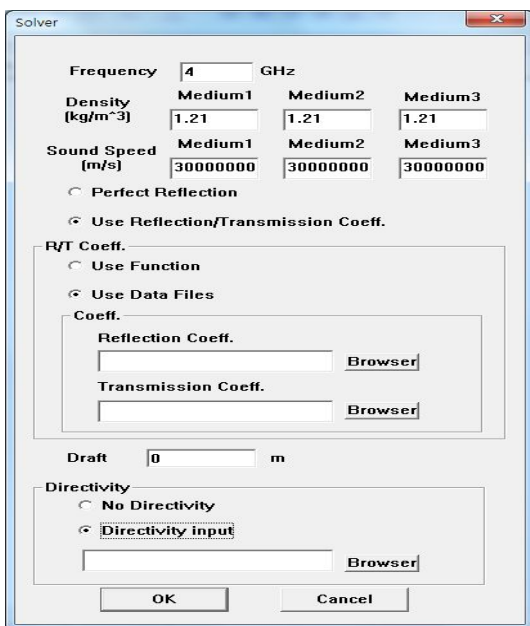


Fig. 4. Solver and Radar absorbing material option window.

RACSAN은 표적 형상 입력을 해석 대상 유한요소 모델의 노드(node), 요소(element), 재료 물성치(material property) 정보를 이용하여 직접 작성하거나, PATRAN 등과 같은 유한요소 모델링 프로그램을 사용하여 작성한다. PATRAN을 이용하여 유한요소 모델링을 할 경우 *.bdf 형식 파일 포맷으로 저장하면 RACSAN에서 내부적으로 자동 변화하여 별도의 추가적인 모델링 작업이 필요 없도록 프로그램을 개발하였다.

RACSAN의 유한요소 모델은 2.4절에서 언급한 것처럼 임의의 다각형 요소로 이루어진다. 유한요소법과 경계요소법 요소의 경우와 같이 해석의 정확도를 위해 파장의 최소 1/6의 요소 크기를 요구하지 않으며, 표적의 형상을 정확히 묘사하기 위해 충분한 곡률을 표현할 수 있는 크기로 요소를 분할하면 된다. 단, 식(4)의 RCS 기본 방정식이 원거리 조건에서의 근사식이므로 요소의 크기는 다음 식과 같은 원거리 조건을 만족해야 한다.

$$D < \sqrt{R\lambda} \quad (6)$$

여기서, D 는 요소의 크기, R 은 요소와 표적 사이의 거리, λ 는 파장을 의미한다.

RACSAN을 이용한 RCS 해석 절차는 Fig. 5와 같다.

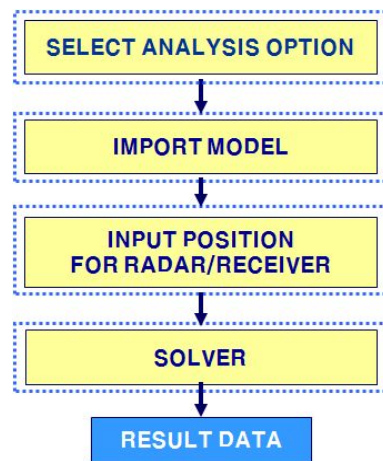


Fig. 5. Flow chart of RACSAN.

4. 복합 구조물의 RCS 해석

3장에서 개발한 RACSAN의 신뢰성 확보를 위하여 RCS 해석 결과를 이론해(Urick, 1983)가 있는 사각 평판 및 실린더 구조물의 결과들과 비교하여 검증하였다. 또한, 보다 복잡한 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 해석 정확도를 검증하기 위해 2면각의(dihedral) 복합 구조물의 RCS 해석 결과를 문헌

실험 결과(Knott et al., 1993)와 비교하였다. 마지막으로 본 연구에서 개발한 프로그램의 실효성을 검토하기 위하여 DDG-51 type 함정의 RCS 해석을 수행하였다.

4.1 사각 평판

임의의 형상을 갖는 복합 구조물을 구성하는 주요 요소는 사각 평판이므로 사각 평판 모델에 대한 검증이 필요하다. 사각 평판에 대한 RCS 이론식은 다음과 같다(Urick, 1983).

$$\sigma = 10 \log \left[\left(\frac{ab}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right)^2 \cos^2 \theta \right] \quad (7)$$

여기서, a , b 는 각각 사각 평판의 가로, 세로 길이, k 는 파수, λ 는 파장, θ 는 입사파와 평판의 법선 벡터와의 사이 각을 의미한다.

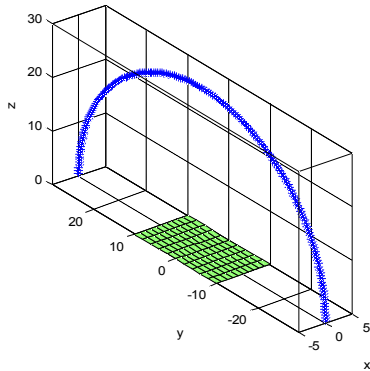


Fig. 6. Plate model.

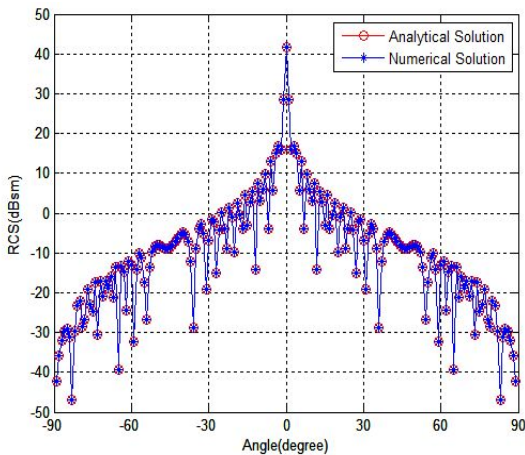


Fig. 7. Comparison of the analytical and numerical solutions for RCS analysis of the plate model.

Fig. 6에 나타낸 해석 대상은 $10m \times 20m$ 크기의 사각 평판으로 다시 작은 크기의 사각 평판으로 나누어 모델링 하

였으며, 사각 평판의 정중앙을 0° 로 하여 -89° 부터 $+89^\circ$ 까지 1° 간격으로 회전할 때 10 GHz의 전자파가 고각 0° 로 입사할 경우에 대한 RCS 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 7과 같으며 모든 방위각에 대하여 RCS 해석 결과와 이론해가 일치된 결과를 얻었다.

4.2 실린더

임의의 형상을 갖는 복합 구조물은 일반적으로 곡률을 갖고 있으므로 곡률을 갖는 실린더 모델에 대한 검증이 필요하다. 유한한 길이의 실린더에 대한 RCS 이론식은 다음과 같다(Urick, 1983).

$$\sigma = 10 \log \left[\left(\frac{aL^2}{2\lambda} \right) \left(\frac{\sin(kL \sin \theta)}{kL \sin \theta} \right)^2 \cos \theta \right] \quad (8)$$

여기서, a 는 반경, L 은 길이, k 는 파수, λ 는 파장, θ 는 입사파와 실린더가 이루는 각을 의미한다.

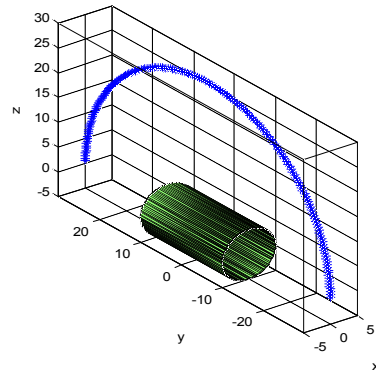


Fig. 8. Cylinder model.

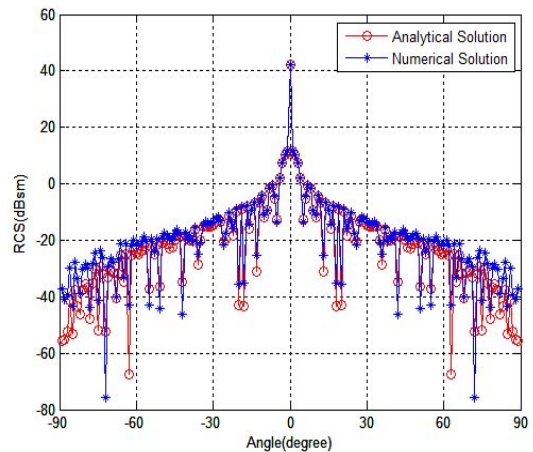


Fig. 9. Comparison of the analytical and numerical solutions for RCS analysis of the cylinder model.

Fig. 8에 나타낸 해석 대상은 반경이 5m, 길이 20m 크기의 실린더로 곡률 방향에 대해서 충분한 다각 평판으로 나누어 모델링 하였으며, 실린더의 정중앙을 0°로 하여 -89°부터 +89°까지 1° 간격으로 회전할 때 10 GHz의 전자파가 고각 0°로 입사할 경우에 대한 RCS 해석을 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 9와 같으며 RCS 해석 결과와 이론해가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 2면각의 복합 구조물

4.1, 4.2절의 사각 평판, 실린더 구조물 보다 복잡한 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 해석 정확도를 검증하기 위해 2면각의(dihedral) 복합 구조물의 RCS 해석 결과를 문헌 실험 결과(Knott et al., 1993)와 비교하여 검증하였다. 특히, 2면각의 복합 구조물의 경우 2.5절의 다중 반사 효과를 검증하기 위해 Fig. 10에 나타낸 0.179m × 0.179m 사각 평판 2개로 구성된 구조물에 대해서 2회 반사(double bounce)를 고려한 해석을 수행하였다. 3회 반사(triple bounce)의 경우 유효면적은 발생하지만 정반사 방향이 표적의 방향과 어긋나기 때문에 영향이 거의 없고, 4회 이상의 반사에서는 유효면적이 거의 발생하지 않기 때문에 가장 영향이 큰 2회 반사만을 고려하였다.

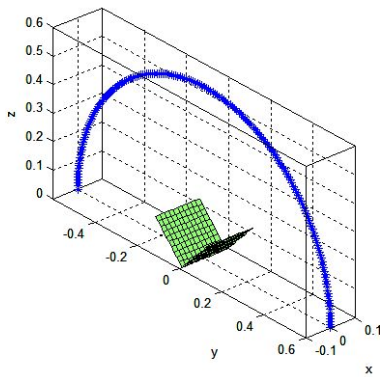
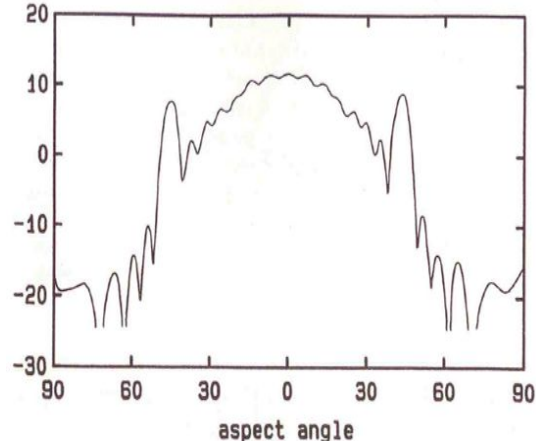


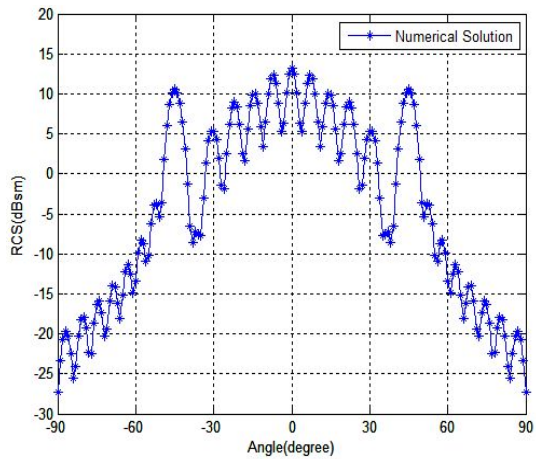
Fig. 10. Dihedral plate model.

Fig. 10의 평판들이 이루는 각은 90°이고, 2면각의 복합 구조물의 정중앙을 0°로 하여 -89°부터 +89°까지 1° 간격으로 회전할 때 9.4 GHz의 전자파가 고각 0°로 입사할 경우에 대한 RCS 해석을 수행하였다. 해석 결과는 실험 결과와 함께 Fig. 11에 나타내었으며, RCS 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 0°일 때를 기준으로 RCS 해석 결과가 대칭성을 잘 나타낼 뿐만 아니라, 특히 RCS가 상대적으로 크게 나타나는 -45°부터 +45°까지의 해석 결과가 실험 결과와 잘 일치

함을 확인 할 수 있다. 다만, 그 이외의 전자파 입사 각도에서는 실험 결과보다 다소 작는데 이는 본 연구에서 고려하지 않은 회절 등의 고차산란파의 영향인 것으로 판단한다.



(a) Measured data



(b) Numerical solution

Fig. 11. Comparison of the measured data and numerical solutions for RCS of the dihedral plate model.

Fig. 12는 Fig. 10에 나타낸 해석 대상의 다중 반사 효과를 비교하기 위해 단반사와 다중반사의 RCS 해석 결과를 비교하였다. 다중 반사 효과에 의한 영향이 -45°부터 +45°까지에서 나타나고, 특히 0°일 때 최대 38.59 dB로 가장 큰 것을 확인 할 수 있다. 따라서, Fig. 11(a) 실험 결과에서도 확인 가능하듯이 임의의 형상을 갖는 복합 구조물의 RCS 해석에는 반드시 다중 반사 효과를 고려해 주어야 된다는 것을 확인할 수 있다.

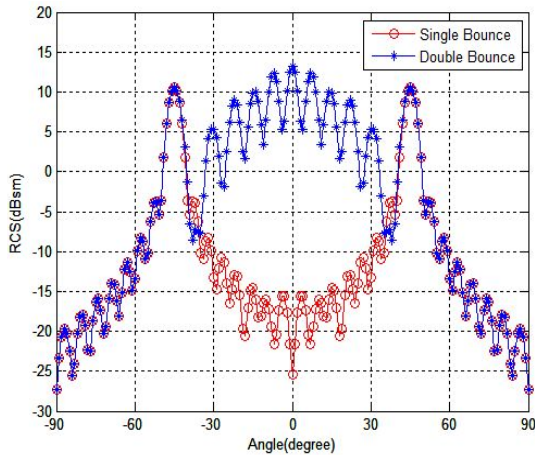


Fig. 12. RCS analysis covering double bounce effect for dihedral plate model.

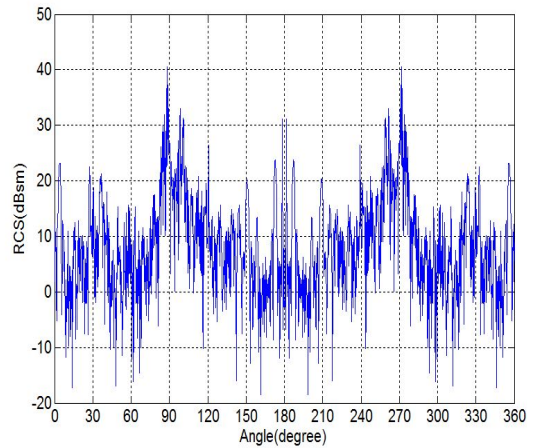


Fig. 14. RCS analysis results for DDG-51 type warship model.

4.4 DDG-51 type 함정

본 연구에서 개발한 프로그램의 실효성을 검토하기 위하여 Fig. 13에 나타난 길이 154 m, 폭 20 m, 높이 32 m의 DDG-51 type 함정을 4,882개의 요소로 모델링하여 RCS 해석을 수행하였다.

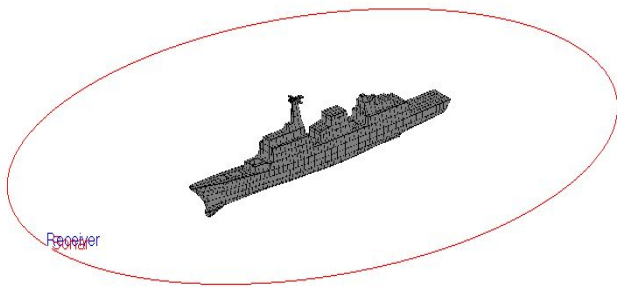


Fig. 13. DDG-51 type warship model.

Fig. 14는 Fig. 13에 나타난 함정에 고각 0° 인 10GHz의 전자파가 방위각 0° 부터 360° 까지 0.1° 간격으로 입사할 경우에 대한 3회 다중 반사를 고려한 RCS 해석 결과를 나타내었다. Fig. 14에서 볼 수 있듯이 180° 일 때를 기준으로 RCS 해석 결과가 함정의 기하학적 대칭성을 정확하게 반영하고 있음을 확인 할 수 있다. 또한, 함정의 기하학적 형상에서 예측할 수 있듯이 전자파 입사각이 90° 와 270° 인 경우에 RCS 해석 결과가 최대 40 dB로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, 30° , 100° , 260° , 330° 등의 특정 방위각 근처에서 RCS 해석 결과가 크게 나타난 것은 상부 구조물의 다중반사 효과 때문인 것으로 판단한다.

5. 결론

본 연구에서는 복합 구조물의 레이더 반사면적을 해석하기 위한 프로그램 RACSAN을 개발하였다. 본 프로그램은 물리 광학을 기초로 한 고주파 대역에서의 키르히호프 근사법을 기반으로 하고 있으며, 물리/기하 광학 혼합방법을 이용하여 복합 구조물의 다중 반사 효과를 고려 할 수 있도록 개발하였다.

개발된 프로그램의 신뢰성 확보를 위하여 RCS 해석 결과를 이론해가 있는 사각 평판 및 실린더 구조물의 결과들과 비교하였고, 복합 구조물의 다중 반사 효과에 대한 해석 정확도를 검증하기 위해 2면각의 복합 구조물의 RCS 해석 결과를 문헌 실험 결과와 비교한 결과가 이론해 및 실험 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한, 개발한 프로그램의 실효성을 검토하기 위하여 DDG-51 type 함정의 RCS 해석을 수행하였다. 따라서, 본 프로그램이 임의의 형상을 갖는 복합 구조물의 레이더 반사면적 해석 및 저감 설계에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단한다.

향후에는 함정, 항공기, 미사일 등의 군사용 무기체계와 같은 실제의 복합 구조물에 대한 추가적인 정확도 검증과 전파흡수체를 적용한 RCS 저감 설계 방안 연구 등의 추가 연구 수행이 요구된다.

후 기

본 연구는 차세대함정첨단함형 특화연구실의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Bechtel, M. E.(1965), Application of Geometric Diffraction Theory to Scattering from Cones and Disks, Proceedings of the IEEE, Vol. 53, No. 8, pp. 877-882.
- [2] Choi, S. W. and S. Y. Boo(2000), Computational 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, pp. 82-91.
- [3] Choi, Y. H., K. C. Shin, J. S. You, J. S. Kim, W. H. Joo, Y. H. Kim, J. H. Park, S. M. Choi and W. S. Kim(2005), Numerical Modeling and Experimental Verification for Target Strength of Submerged Objects, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 64-70.
- [4] Gordon, W. B.(1975), Far Field Approximation of the Kirchhoff-Helmholtz Representation of Scattered Field, IEEE transactions on Antennas and Propagation, Vol. 23, pp. 590-592.
- [5] Kim, K. H., J. H. Kim and D. S. Cho(2005), RCS Analysis of Complex Structures Using Object Precision Method, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 2, pp. 159-164.
- [6] Kim, K. H., D. S. Cho and J. H. Kim(2007), Broad-band Multi-layered Radar Absorbing Material Design for Radar Cross Section Reduction of Complex Targets Consisting of Multiple Reflection Structures, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 4, pp. 445-450.
- [7] Kim, K. H. and D. S. Cho(2011), Study on Effect of Shell Plate Deformation to Radar Cross Section of Warship, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 6, pp. 509-515.
- [8] Klement, D., J. Preissner and V. Stein(1988), Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computation of Complicated Objects, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 36, No. 2, pp. 228-237.
- [9] Knott, E. F., J. F. Shaeffer and M. T. Tuley(1993), Radar Cross Section, 2nd Edition, Artech House, Boston-London, pp. 183-224.
- [10] Kwon, H. W., S. Y. Hong, H. M. Kim and J. H. Song (2013), Analysis of Acoustic Target Strength for the Submarine with Alberich Anechoic Coating Effects, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 19, No. 4, pp. 410-415.
- [11] Schneider, H. G., R. Berg, L. Gilroy, I. Karasalo, I. MacGillivray, M. T. Morshuizen and A. Volker(2003), Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop, ICSV10, pp. 2475-2482.
- [12] Urlick, R. J.(1983), Principles of underwater sound, 3rd Edition, Mcgraw-Hill, New York, pp. 291-327.

원고접수일 : 2014년 05월 09일

원고수정일 : 2014년 06월 05일

게재확정일 : 2014년 08월 27일