

## 복합구조물의 RCS 저감을 위한 효율적 산란중심 해석에 관한 연구

김국현<sup>†\*</sup>, 김진형<sup>\*\*</sup>, 조대승<sup>\*\*</sup>

(주)한진중공업 특수선설계팀<sup>\*</sup>

부산대학교 조선해양공학과<sup>\*\*</sup>

### A Study on the Effective Scattering Center Analysis for Radar Cross Section Reduction of Complex Structures

Kookhyun Kim<sup>†\*</sup>, Jin-Hyeong Kim<sup>\*\*</sup> and Dae-Seung Cho<sup>\*\*</sup>

Special Ship Design Team, Hanjin Heavy Industries and Constructions Co. Ltd.<sup>\*</sup>  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

Scattering center extraction schemes for radar cross section reduction of large complex targets, like warships, was developed, which are an 1-D radar image method(range profile), and a direct analysis based on an object precision method. The analysis result of partial dihedral model shows that the presented direct analysis method is more efficient than the 1-D radar image method for scattering center extraction of interested targets, in terms of radar cross section reduction design, not signal processing. In order to verify the accuracy of the direct analysis method, a scattering center analysis of an naval weapon system was carried out, and the result was coincident with that of another well-known RCS analysis program. Finally, an analysis result of RCS and its scattering center of an 120m class warship-like model presented that the direct analysis method can be an efficient and powerful tools for radar cross section reduction of large complex targets.

\*Keywords: Radar cross section reduction(레이더 단면적 감소), Scattering center(산란중심), Direct analysis(직접해석), Range profile image(RP 영상), Object precision method(OPM)

---

접수일: 2005년 4월 4일, 승인일: 2005년 5월 26일

†주저자, E-mail: kimkh@hanjinsc.com

Tel: 051-410-8013

#### 1. 서론

함정, 차량, 비행기 등의 군사용 수송기기와 같은 복합 구조물은 임무 수행 중 적 레이더에 의한

탐지 가능성을 줄이기 위한 RCS (radar cross section) 저감 설계가 요구된다. 복합 구조물의 RCS 저감 설계 방법으로는 형상화(shaping), 차폐(shielding), 특수재료(RAM, RAP, GRP 등) 적용 등이 있다.

이들 중 함정과 같은 대형 복합 구조물에 대해서는 형상화 방법이 RCS 저감 설계에 가장 효과적이고 경제적인 방법으로 평가되고 있다. 한편, 복합 구조물의 외형을 조정하여 입사된 레이더 신호의 산란 각도를 최적화하는 형상화 방법을 설계에 적용하기 위해서는 설계 형상에 대한 RCS 해석은 물론 표적을 구성하는 각 표면의 RCS 기여도를 산정하여 주요 산란원을 신속정확하게 규명할 수 있는 효율적인 산란중심(scattering center) 해석이 필요하다.

산란중심 해석 방법으로 표적 인식을 위한 레이더 신호처리에서 사용되는 1차원 영상인 RP (range profile), 2차원 영상인 ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 등의 화상처리 방법 (Knott 1993)이 일반적으로 적용되어 왔다. 그러나 이 방법은 정확한 산란중심 추출을 위해 높은 해상도 확보가 필수적이며, 이에 따라 방대한 계산량을 요구한다. 뿐만 아니라 함정과 같은 대형 복합구조물의 경우 수많은 산란중심이 존재하고 다중반사에 의한 산란중심 위치 왜곡현상이 심해 영상을 이용한 산란중심 위치의 정확한 파악과 설계방안 수립에는 큰 어려움이 따른다. 한편 McKenna and Upson(2004)은 산란중심의 위치와 기여도를 별도의 영상이 아닌 해석모델 상에 직접 표시하여 직관적인 산란중심 파악이 가능한 직접 해석 방법을 개발한 바 있다.

이에 본 연구에서는 함정과 같은 대형 복합 구조물의 RCS 저감을 위한 형상화 설계 정보를 효율적으로 도출하기 위하여 RCS 해석과 동시에 각 표적면에서의 단일 및 다중 반사에 의한 RCS 기여도를 직접 해석하는 방법을 정립하였다. 또한, 레이더 표적인식에 널리 활용되고 있는 1차원 영상인 RP 화상처리방법을 구현하였다. 이를 토대로 단순형상의 부분 이중반사구조물을 대상으로 RP 영상과 직접 해석 방법으로 산란중심을 해석하고 각각의 방법에 대한 장단점을 비교하였다. 또한,

직접 해석 방법의 정확도 검증을 위해 함정 탑재 장비 유사 구조물에 대해 산란중심 해석을 수행하고 그 결과를 범용 RCS 해석 프로그램에 의한 결과와 비교하였다. 마지막으로 120m급 함정형상에 대한 RCS 해석과 산란중심해석을 통해 본 연구에서 제시된 직접 해석 방법의 실무 적용성을 확인하였다.

## 2. OPM을 이용한 RCS 해석

본 연구에서는 산란중심 평가에 요구되는 RCS 해석을 위해 단일 및 다중반사 효과를 고려할 수 있는 기하/물리광학 혼합방법인 OPM(Object Precision Method)을 적용하였다(김국현 등 2005).

이 방법은 원거리에서 입사, 산란되는 레이더 전자기파는 평면파로 표적에 입사하여 구면파로 산란된다고 간주한다. 또한, Fig. 1에 보인 바와 같이 구조물의 표면을 유한개의 독립된 표적면으로 분할하고, 단일 및 다중 반사에 의한 구조물의 RCS를 산정한다.

다중 반사를 유발하는 표적면의 RCS 계산은 가상면(virtual surface) 개념을 적용한다. 즉, Fig. 2에 예시한 바와 같이 3개의 표적면이 있는 경우, 레이더로부터 @면에 입사된 전자기파 에너지는 반사후 ㉠면에 입사된다. 또한, ㉠면에 입사된 전자기파 에너지는 ㉡면에 의해 가려지지 않는 표적면만이 이중 반사효과를 가진다. 이때, ㉠면에 의한 RCS는 ㉠면에 대응되는 가상면 ㉢을 이용해서 물리광학법에 해당하는 위상적분식으로 RCS를 계산한다.

한편, 기하광학법에 의거한 반사면 평가를 위한 가시면과 은면 산정은 구조물 표적면을 삼각형 면들의 조합체로 모델링하는 적응 삼각형 빔 방법

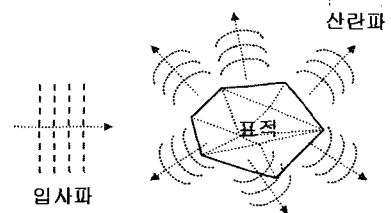


Fig. 1 Division of structure

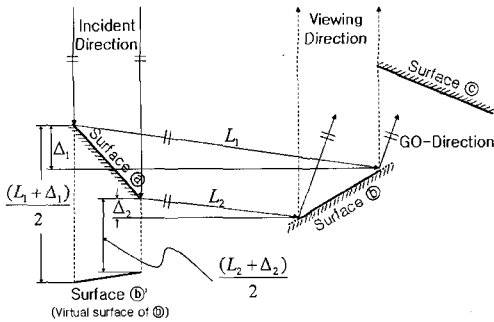


Fig. 2 Concept of virtual surface

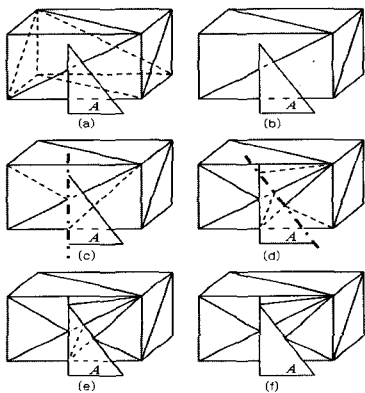


Fig. 3 Hidden surface removal procedure

(조대승 등 2003)을 적용한다. Fig. 3에는 상기 방법을 이용하여 단일 반사에 대한 RCS 계산을 위한 가시면 산정 절차를 예시한 것이다. 상기의 이 중 반사 표적면에 대한 RCS 계산 방법은 3차 이상의 고차 반사가 발생하는 표적면의 RCS 계산에 동일하게 적용할 수 있다.

### 3. 산란 중심 해석

#### 3.1 Range Profile 영상 방법

RP(Range Profile) 영상은 레이더 표적에 대한 반사 특성을 거리에 대한 함수로 나타낸 것으로 표적의 산란중심에 대한 거리방향으로의 위치정보를 제공하여 표적 식별에 사용되는 전통적인 레이더 신호처리 방법 중 하나이다(Knott 1993).

RP 영상은 거리  $x$ 의 함수로서 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$g(x) = \int_f E(f) e^{-j\pi x/c} df \tag{1}$$

여기서,  $j$ 는  $\sqrt{-1}$ ,  $f$ 는 주파수,  $E(f)$ 는 해당 주파수  $f$ 에 대한 수신된 전기장 신호,  $c$ 는 전자기파의 속도를 의미한다. 식 (1)은  $f_x = -2f/c$ 로 변수치환할 경우 식(2)와 같은 IFT (Inverse Fourier Transform)으로 나타낼 수 있다.

$$g(x) = \int_{f_x} E(f_x) e^{j2\pi f_x x} df_x \tag{2}$$

또한, 식 (2)를 이산화된 근사식으로 표현하면 식 (3)과 같은 IDFT (Inverse Discrete Fourier Transform)이 된다.

$$g(x) \approx \sum_x E(f_x) e^{j2\pi f_x x} \tag{3}$$

본 연구에서는 입사 방위각에 대해 주파수별 RCS 값을  $E(f)$ 로 간주하고, 식(3)에 대해 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)를 적용하였다 (Embree and Danieli 1999).

한편, RP 영상의 계산을 위한 IFFT를 수행하기 위해서는 자료 개수  $N$ 이 2<sup>n</sup>개가 되어야 한다. 이때, 주파수 자료 개수가 상기의 조건을 만족하지 않는 경우에는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 계산 주파수 대역 이외의 영역에 0값을 추가 입력하는 zero padding 기법을 적용하였다(Embree and Danieli 1999). 또한, IFFT 계산 결과로부터의 거리정보  $L$ 은 식 (4)와 같이 산정하였다.

$$L = \frac{c}{2 \times \Delta f} \tag{4}$$

여기서,  $\Delta f$ 는 계산 주파수 간격이다. 따라서,  $\Delta f$ 가 작으면 원거리의 RP 영상을 확보할 수 있으나, 공간 영역에서의 분해능은 상대적으로 저하된다. 반면에  $\Delta f$ 를 크게 하면 높은 분해능을 갖는 단거리의 RP 영상을 확보할 수 있다. 따라서, RP 영상은 해석 대상체의 크기 및 관심 영역에 따라 적절한 계산 주파수 간격을 적용하여야 한다.

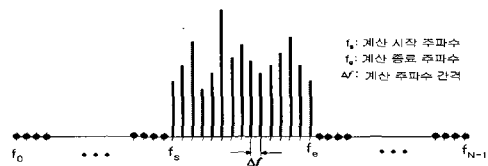


Fig. 4 Zero padding method for IFFT

3.2 직접 해석 방법

3.1절에서 기술한 RP 영상 방법은 RCS 해석 후 IFFT를 위한 별도의 연산이 요구될 뿐만 아니라 표적형상이 복잡해 산란중심 개수가 많아질 경우 정확한 산란중심의 위치 산출이 쉽지 않다. 특히, 다중반사에 의해 발생하는 산란중심이 일정거리 이상 이격되어 있는 경우 잘못된 산란중심 위치정보를 제공하는 단점이 있다.

이에 본 연구에서는 OPM에 해당하는 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 RCS 해석 단계에서 초기 생성된 각 삼각형 빔의 적응 추적시 표적면에서의 반사 경로와 분할된 삼각형 빔 정보 및 이의 RCS 값을 저장하여 각 분할 표적면의 RCS 기여도를 직접 평가하는 방법을 정립하였다.

즉, 임의 레이더 입사 각도에 대해 각 분할 표적면의 1차 반사 RCS 값을 표적면 ID와 함께 저장한다. 한편, 이차 반사에 의한 RCS 값은 Fig. 5에 보인 바와 같이 A 요소로부터 반사된 삼각형 빔에 의해 B 요소에 입사된  $A_1$  삼각형에 ID를 부여하고, 이의 속성으로서 B 요소의 ID와 삼각형  $A_1$ 에 의한 RCS 값을 저장한다. 또한,  $A_1$ 에 해당하는 삼각형 빔이 재차 반사하여 C 요소에 입사한  $A_{11}$  삼각형에도 ID를 부여하고, 이의 속성으로서 C 요소의 ID와 RCS 값과 함께  $A_1$  삼각형의 ID를 저장한다.

상기와 같은 방법으로 지정된 반사차수까지 적응 분할된 삼각형 반사면에서의 RCS 값을 표적면에 도시하면 단일 및 다중 반사에 의한 RCS 기여도와 반사 경로를 직관적으로 규명할 수 있다.

본 연구에서는 상기 산란중심 직접 해석 방법을 전산기로 구현하기 위하여 Fig. 6에 보인 바와 같이 트리 형태의 자료구조를 갖는 적응 삼각형 빔 방법을 적용하였다.

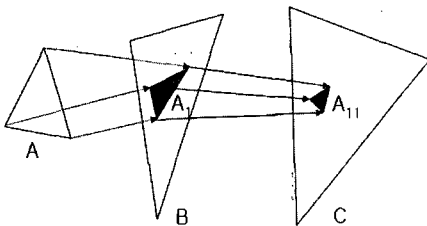


Fig. 5 Triangular beam tracing

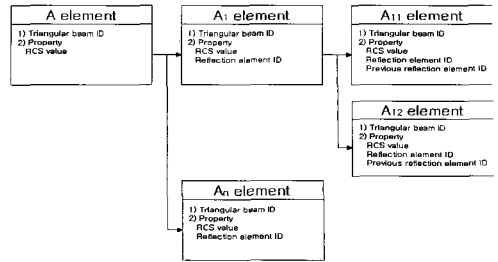


Fig. 6 Data structure of triangular beam to evaluate scattering center

4. 수치계산 예 및 고찰

RP 영상과 직접 해석 방법에 대한 장단점을 비교하고 직접 해석 방법의 정확도와 RCS 저감 설계 효율성을 검토하기 위해 단순 형상의 부분 이중반사구조물, 항정 탑재장비 유사 구조물, 120m급 가상항정 형상에 대한 수치해석을 수행하였다.

4.1 부분 이중 반사 구조물

Fig. 7에 보인 바와 같이 단일반사와 이중반사가 동시에 발생 가능한 부분 이중반사 구조물에 대해 RP 영상 방법과 직접 해석 방법으로 산란중심해석을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이로부터 상기 구조물은 2개의 지배적인 산란중심, 즉, 중앙부 평면의 단일반사에 의한 산란중심과 측면 양 날개의 이중반사에 의한 산란중심이 있음을 알 수 있다.

한편, RP 영상 방법을 이용할 경우, 단일반사에 의한 산란중심이 중앙면 상에 위치하는 것을 쉽게 찾을 수 있으나 이중 반사에 의한 산란중심은 측면 양 날개 면상이 아닌 두 평면이 교차되는 직선상에 나타남을 확인할 수 있다. 이는 다중반사를 일으키는 면들이 이격되어 있을 경우 RP 영상 방법으로 산란중심 위치를 파악하기 곤란하다는 것을 나타낸다. 면에 직접 해석 방법에 의한 산란중심 해석결과(Fig. 8(b))은 산란중심위치가 단일반사 및 다중반사가 일어나는 해당 면상에 직접 표시되므로 산란중심 부분을 정확히 찾아낼 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서, RCS 저감 설계를 위한 산란중심 위치 평가에는 RP 영상 방법보다 직접 해석방법이 유용하다고 판단한다.

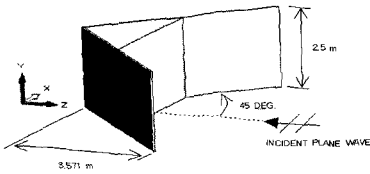


Fig. 7 Partial dihedral model and calculation direction

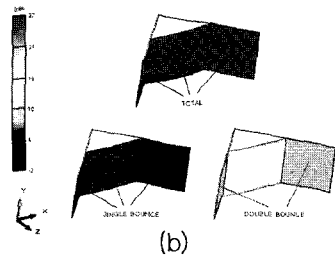
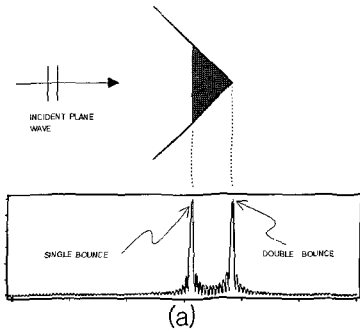
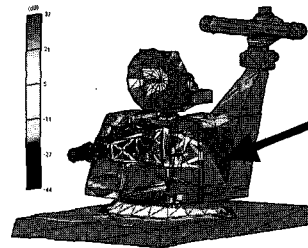


Fig. 8 Estimate results of scattering center location using (a) a range profile image method and (b) a direct analysis method.

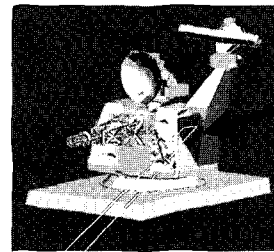
4.2 함정 탑재장비 유사 구조물

직접 해석 방법의 정확도를 검증하기 위해 길이 x 폭 x 높이가 4.6m x 4.0m x 3.7m 인 함정 탑재장비 유사 구조물에 대한 산란중심 해석을 수행하였다. 이때, 구조물 형상은 4,288개의 삼각형 면으로 모델링 하였으며, 수치해석은 18GHz의 주파수를 갖는 레이더파가 고각 6도, 방위각 35도로 입사되는 경우에 대해 수행하였다.

Fig. 9에는 해당구조물에 대해 직접 해석 방법에 의한 산란중심 해석 결과를 나타내었다. 이에 는 범용 RCS 해석 프로그램인 SIGNET에 의한 해석결과(McKenna and Upson 2004)도 함께 나타내었는데 양자의 산란중심 위치 평가 결과가 동일함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 9 Scattering center analysis results of a weapon system for warship using (a) present method and (b) SIGNET

4.3 가상 함정 형상

함정 RCS 저감설계에 본 연구에서 제시한 직접 해석 방법을 이용한 산란중심 평가 방법의 적용 가능성을 고찰하고자 길이가 120m인 가상 함정에 대한 수치해석을 수행하였다. 이때, 가상 함정 형상은 31,530개의 삼각형 요소로 모델링하였으며, 해석은 18GHz의 주파수를 갖는 레이더가 고각 4도에서 입사될 경우 360도의 방위각에 대해 1도 간격으로 수행하였다.

본 함정에 대한 해석결과를 Fig. 10에 보였는데, HV 및 VH 편파성분이 상당히 크게 나타나는 것으로 볼 때 전 방위각에 걸쳐 다중반사에 의한 영향이 지배적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 본 연구에서 개발한 직접해석방법을 이용해 방위각 23도에 대한 산란중심 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이로부터 고각 4도, 방위각 23도에서의 RCS 피크는 마스트 구조와 주위 장비의 고차반사 효과로 인해 발생하였음을 확인할 수 있다. 따라서, 함정 RCS 저감을 위해서는 단일 반사는 물론 선체 구조와 탑재장비간의 고차반사효과를 고려한 설계가 필요하다고 판단한다.

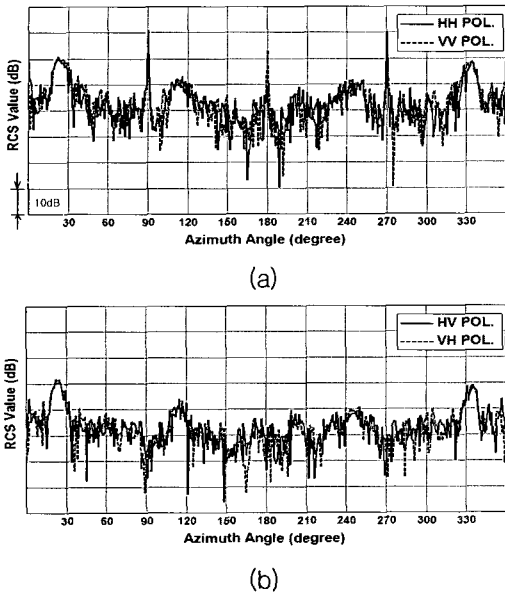


Fig. 10 RCS analysis results of 120m class warship-like model, (a) co-polarization (b) cross-polarization.

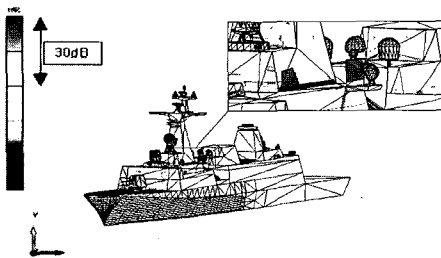


Fig. 11 Scattering center analysis results of 120m class warship-like model using a direct analysis method.

5. 결론

본 연구에서는 함정과 같은 복합 구조물의 효율적인 RCS 저감설계를 위해 RP 영상 방법과 직접 해석 방법을 기반으로 한 산란중심 해석기법을 정립하였다. 또한, 부분 이중 반사구조물에 대해 산란중심 해석을 통해 직접 해석 방법이 RP 영상 방법보다 정확한 산란중심 위치 정보를 제공함을 확인하였다. 아울러, 직접 해석 방법을 이용한 산란중심 해석방법의 정확성은 함정탐재장비 유사

구조물을 대상으로 한 수치해석을 통해 검증하였다.

한편, 120m급 가상함정에 대한 RCS 해석과 산란중심 해석을 수행한 결과 직접 해석방법을 이용한 산란중심 평가 방법은 단일 반사는 물론 함정 구조와 탑재 장비의 상호 간섭효과로 인한 고차 반사효과가 발생하는 위치를 정확하게 평가할 수 있음을 확인하였다. 이에 본 연구에서 제시한 직접 해석방법을 이용한 산란중심 평가 방법은 실제 함정의 RCS 저감 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

후기

본 연구는 (주)한진중공업과 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- 김국현, 김진형, 조대승, 2005, "Object Precision 방법을 이용한 복합구조물의 RCS 해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 159-164.
- 조대승, 성상경, 김진형, 최재호, 박일권, 2003, "적응 삼각형 빔 방법에 의한 실내음장 해석," 한국소음진동공학회 논문집, 제 13권, 제 3호, pp. 217-224.
- Embree, P.M. and Daneli, D., 1999, C++ Algorithms for Digital Signal Processing, Prantice Hall.
- Knott, E.F., 1993, Radar Cross Section Measurements, Van Nostrand Reinhold.
- McKenna I.H., and Upson, C.J., 2004, Introduction to SIGNET, BAESYSTEMS.



< 김 국 현 >



< 김 진 형 >



< 조 대 승 >