

Object Precision 방법을 이용한 복합 구조물의 RCS 해석

김국현^{†*}, 김진형^{**}, 조대승^{**}

(주)한진중공업 특수선선체설계팀^{*}
부산대학교 조선해양공학과^{**}

RCS Analysis of Complex Structures Using Object Precision Method

Kookhyun Kim^{†*}, Jin-Hyeong Kim^{**} and Dae-Seung Cho^{**}

Hanjin Heavy Industries and Constructions Co. Ltd.^{*}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University^{**}

Abstract

Monostatic RCS analysis of complex structures has been done with a combined method of physical and geometric optics, commonly applied to high frequency electromagnetic backscattering problems. In the analysis, the complex structure is modeled as a number of flat surfaces and the RCS of whole structure is calculated by summing RCS of each surface, which can be obtained from an analytical solution of flat surface phase integral derived from physical optics. The reflected and hidden surfaces are searched by an object precision method based on adaptive triangular beam method, which can take account for effects of multiple reflections and polarizations of electromagnetic wave. The validity of the presented RCS analysis method has been verified by comparing with exact solutions and measured data for various structures.

※Keywords : Radar Cross Section(레이더 단면적), Physical/Geometric Optics(물리/기하 광학), Object Precision Method(OPM), Adaptive Triangular Beam Method(적응 삼각형 빔 방법)

1. 서 론

함정, 차량, 비행기 등의 군사용 수송기기와 같은 복합 구조물은 임무 수행중 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 가장 효과적이고 경제적인 방법으로 평가되고 있다. 또한, 복합 구조물의 외형

접수일: 2004년 10월 6일, 승인일: 2005년 1월 3일

† 주저자, E-mail: kimkh@hanjinsc.com

Tel: 051-410-8013

을 조정하여 입사된 레이더 신호의 산란 각도를 최적화하는 형상화 방법을 설계에 적용하기 위해서는 설계 형상에 대한 효율적인 RCS 해석이 요구된다.

RCS 해석 방법으로는 모멘트법(method of moment), 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method) 등의 저주파수 이론과 기하광학법(geometric optics), 물리광학법(physical optics), 기하광학 회절이론(geometric theory of diffraction), 물리광학 회절이론(physical theory of diffraction) 및 물리/기하광학 혼합 방법 등의 고주파수 이론이 있다(Knott et al. 1990, 부성운 2001, 최상욱과 부성운 2000). 이들 중 함정과 같이 파장에 비해 크기가 크고, 복잡한 형상을 갖는 대형 복합구조물의 다중 반사를 고려한 RCS 해석에는 가시면과 은면(hidden surface) 산정에 기하광학 이론을 적용하고, 최종 반사면에서의 RCS는 물리광학 이론을 적용하는 물리/기하 광학 혼합방법이 적합하다(Wang and Jeng 1997).

물리/기하 광학 혼합 방법은 가시면 및 은면 처리 방식에 따라 IPM(image precision method)과 OPM(object precision method)으로 분류할 수 있다. IPM은 대상 표적에 대한 입사면을 무수히 많은 광선으로 나누고 각각의 광선을 화소로 간주하는 방법이다. 이 방법은 상대적으로 알고리즘 구현이 용이하나 광선분할 간격을 레이더 파장의 1/16 이하로 해야만 정밀도가 보장되기 때문에 구조물 크기가 커질수록, 주파수가 높아 질수록 계산량이 급격히 증가하는 단점이 있다.

한편, OPM은 표적면을 가시면과 은면으로 분할하여 반사면을 산정하고, 분할된 반사면에 대해 위상 적분식을 이용하여 RCS를 계산하는 방법이다. 이 방법은 레이더 주파수에 무관하기 때문에 레이더 파장보다 훨씬 큰 치수를 갖는 반사면에 대해서도 RCS를 한 번에 계산할 수 있다. 따라서, OPM은 대형 복합 구조물의 RCS 해석에 있어서 IPM 보다 매우 효율적인 방법으로 평가되고 있다. 그러나, OPM은 복잡한 형상을 갖는 표적면을 가시면과 은면으로 구분하는 알고리즘의 구현이 매우 까다롭다.

본 연구에서는 함정과 같은 대형 복합 구조물의 효율적 RCS 해석을 위하여 가시면과 은면 처리에 적응 삼각형 빔 방법(adaptive triangular beam method; ATBM) (조대승 등 2003)을 적용한 OPM을 정립하였다. 또한, 정립된 알고리즘을 토대로 다중 반사 및 편파 효과를 고려할 수 있는 RCS 해석 프로그램을 개발하였다. 제시된 방법의 정확도와 유용성은 이론해가 있는 단순 형상체들과 다중 반사와 편파 현상이 발생하는 복합 구조물 및 실물 크기의 corvette 함정에 대한 RCS 수치해석을 수행하여 검증하였다.

2. 물리/기하 광학 혼합 방법

구조물에 입사된 전자기파의 산란은 반사, 회절, 표면파(creeping wave) 등에 의해 발생하며, 강(steel)과 같이 완전 도체(perfect electrical conductor)에 가까운 재료로 구성된 대형 복합 구조물의 RCS는 반사 효과가 가장 지배적으로 영향을 미친다. 이에 본 연구에서는 대형 복합구조물에 대한 효율적 RCS 해석에 적용하고자 단일 및 다중 반사 영향을 고려할 수 있는 물리/기하 광학 혼합 방법을 적용하였다.

원거리에서 입사, 산란되는 레이더 전자기파는 평면파로 표적에 입사하여 구면파로 산란된다고 간주할 수 있다. 또한, 단상태(monostatic)인 경우 Fig. 1에 나타난 직교 좌표계를 적용하면 입사파와 산란파의 전자기장 E_i 와 E_s 는 식(1)과 식(2)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\overline{E}_i = (A_x \hat{x} + A_y \hat{y}) \exp(jkr) \tag{1}$$

$$\overline{E}_s = (B_x \hat{x} + B_y \hat{y}) \exp(jkr) \tag{2}$$

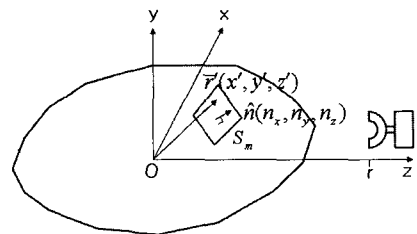


Fig. 1 Complex structure in cartesian coordinate

여기서, j 는 $\sqrt{-1}$, k 는 파수, \hat{x} 와 \hat{y} 는 각각 x -축과 y -축에 대한 단위 방향벡터, r 은 레이더와 표적간의 이격 거리이다. 또한, 입사파와 산란파의 x -방향, y -방향 편파(polarization) 성분을 각각 나타내는 A_x, A_y 및 B_x, B_y 는 식(3)과 같은 관계식을 가진다(Klement et al. 1988).

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{4\pi r^2}} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, 산란행렬(scattering matrix)인 $[a_{ij}]$ 는 j 방향에서 입사된 편파에 대해 i 방향으로의 편파 성분을 의미한다. 또한, RCS 행렬 $[\sigma]$ 는 식(4)와 같이 정의된다.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |a_{xx}|^2 & |a_{xy}|^2 \\ |a_{yx}|^2 & |a_{yy}|^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

한편, 고주파수 영역에서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 구조물의 표면을 유한 개의 독립된 표적면으로 분할 가능하다. 또한, 표적면이 완전 도체라 가정하고, 단일 반사만 고려하면 구조물의 전체 RCS는 편파 효과가 없는 식(5)와 같이 산정된다(Klement et al. 1988).

$$\sigma_{ij} = \begin{cases} \frac{k^2}{\pi} \left| \sum_{m=1}^N I_m \right|^2, & i=j(x, y) \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

여기서, N 은 분할된 표적면 개수를 나타내며, I_m 은 m 번째 표적면의 면적 S_m 에 대해

$$I_m = \int_{S_m} e^{2jkhz'} dx' dy' \quad (6)$$

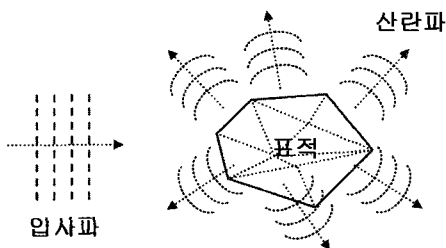


Fig. 2 Division of structure

와 같이 산정되는 값이다. 여기서 x', y', z' 은 Fig. 1에 나타난 표적면 S_m 상에 있는 임의의 점의 위치벡터 \vec{r}' 의 좌표 성분이다.

한편, 표적면에 반사된 산란파가 타 표적면에 입사될 경우, 구조물 표면이 완전도체라 하더라도 전자기파는 분극(depolarization) 현상이 나타나며, 이때의 RCS 산식은 식(7)과 같이 유도된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{k^2}{\pi} \left| \sum_{m=1}^N (I_m)_{ij} \right|^2 \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [(I_m)_{ij}] &= \begin{bmatrix} (I_m)_{xx} & (I_m)_{xy} \\ (I_m)_{yx} & (I_m)_{yy} \end{bmatrix} \\ &= I_m \begin{bmatrix} \hat{p}_s \cdot \hat{x} & \hat{p}_s \cdot \hat{y} \\ \hat{p}_s \cdot \hat{x} & -\hat{p}_s \cdot \hat{y} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

이고, \hat{p}_s 는 편파벡터로서

$$\hat{p}_s = [\hat{n}_b \times \{ (\hat{n}_a \times \hat{p}_e) \times \hat{e}_{ab} \}] \times \hat{z} \quad (9)$$

와 같다. 또한, \hat{n}_a 와 \hat{n}_b 는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1차 반사면인 ㉔면과 2차 반사면인 ㉕면의 단위 법선벡터, \hat{p}_e 는 입사파의 전자기장에 대한 단위 편파벡터, \hat{z} 는 z -축방향 단위 벡터, \hat{e}_{ab} 는 ㉔면 반사후 ㉕면으로 향하는 단위 벡터로서

$$\hat{e}_{ab} = 2(\hat{z} \cdot \hat{n}_a) \hat{n}_a - \hat{z} \quad (10)$$

이다.

본 연구에서는 식(7)을 이용한 다중반사를 유발하는 표적면의 RCS 계산을 위해 가상면(virtual

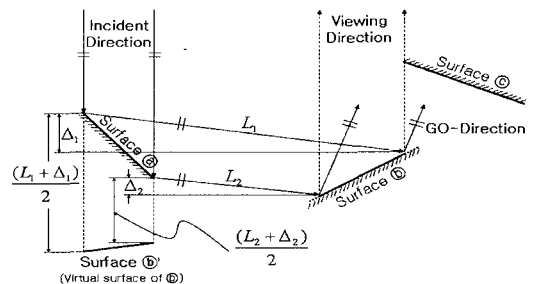


Fig. 3 Concept of virtual surface

surface)개념을 도입하였다. 즉, Fig. 3에 예시한 바와 같이 3개의 표적면이 있는 경우, 레이더로부터 ㉠면에 입사된 전자기파 에너지는 반사후 ㉢면에 입사된다. 또한, ㉢면에 입사된 전자기파 에너지는 ㉡면에 의해 가려지지 않는 표적면 만이 이중 반사효과를 가진다. 이때, ㉢면에 의한 RCS는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 ㉢면에 대응되는 가상면 ㉣'을 이용해서 식(7)로 계산한다.

상기의 이중 반사 표적면에 대한 RCS 계산 방법은 3차 이상의 고차 반사가 발생하는 표적면의 RCS 계산에 동일하게 적용할 수 있다.

3. 표적면의 가시면과 은면 산정

물리광학법은 전자기파 에너지가 직접 조사된 면에 대해서만 적용된다. 따라서, RCS 해석에 이를 적용하기 위해서는 기하광학법을 이용하여 입사파에 대한 복합 구조물의 표적면을 가시면과 은면으로 분할하여 반사면을 산정해야 한다.

본 연구에서는 이를 위하여 알고리즘 구현은 까다로우나, 분할된 반사면에 대해 위상 적분식으로 RCS를 계산하여 연산 효율이 뛰어난 OPM을 적용하였다. 이때, 가시면과 은면 산정은 구조물 표적면을 삼각형 면들의 조합체로 모델링하는 적응 삼각형 빔 방법(조대승 등 2003)을 적용하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 적용한 방법을 이용한 단일 반사에 대한 RCS 계산을 위한 가시면 산정 절차를 예시한 것이다. 즉, 삼각형 면으로 모델링된 직육면체의 전치 삼각형 면 A 가 직육면체에 조사되는 전자기파 에너지를 부분적으로 가릴 경우 (Fig. 4a), 직육면체를 구성하는 삼각형 면들 중 법선벡터가 전자기파 입사 방향 벡터와 이루는 각이 90° 이 아닌 삼각형 면은 은면에 해당하여 삭제된다(Fig. 4b). 또한, A 면에 의해 부분적으로 가려진 삼각형 면들은 A 면 변들의 연장선과 직육면체 구성 삼각형 변들의 교차점을 꼭지점으로 하는 세부 삼각형 면들로 순차적으로 분할된다(Fig. 4c,d). 상기와 같이 적응 분할된 삼각형 면들과 A 면에 대해서 깊이 검사(depth test)를 수행하면 가시면과 은면을 구분할 수 있다(Fig. 4e). 따라서, 최종적인 가시면은 Fig. 4f에 나타난 것과 같은 세

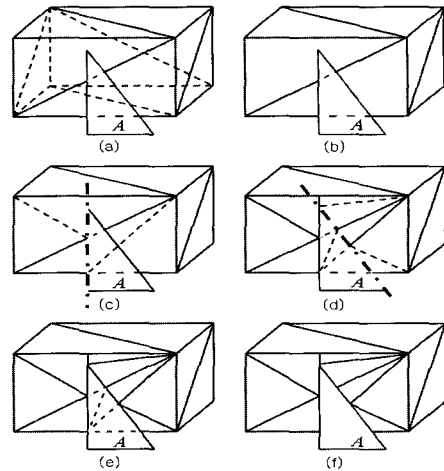


Fig. 4 Hidden surface removal procedure

부 삼각형 면들의 조합체로 표현할 수 있으므로 OPM을 이용한 물리광학법으로 RCS 해석을 수행할 수 있다.







한편, Fig. 4f에 나타난 각각의 삼각형 가시면은 다음 차수 RCS 계산을 위한 가시면 산정시의 전치 삼각형 면에 해당한다. 따라서, 각 삼각형 가시면에서의 전자기파 반사각 방향에 대해 상기와 동일한 방법으로 가시면과 은면에 해당하는 세부 삼각형 면으로 분할하면 실제 반사 전자기파가 입사되는 은면에 대한 RCS를 물리광학법으로 계산할 수 있다.

4. 수치해석결과

본 연구에서 적용한 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 OPM에 의한 RCS 해석의 정확도와 유용성을 검토하고자 평판, 원통, 구, 이중/삼중 반사 구조물에 대한 수치해석을 수행하고, 그 결과를 해석조건과 함께 Table 1에 나타내었다. 이에는 기하광학 방법에 의한 이론해(Knott et al. 1990)도 함께 나타내었는데 양자간의 부합성이 매우 높음을 확인할 수 있다.

또한, 보다 복잡한 형상을 갖는 구조물에 대한 해석 정확도를 검증하기 위해, Fig. 5에 나타난 복합 구조물이 y -축에 대해 -45° 부터 135° 까지 0.1° 간격으로 회전할 때 16.6 GHz의 전자기파가

Table 1 Comparison between analytical and numerical RCS calculation results of simply shaped structures

Type	Geometry	Peak RCS formula & value (dBsm)	해석결과 (dBsm)
Flat plate		$\sigma = \frac{4\pi a^2}{\lambda^2}$ 40.5 at 9GHz, $\alpha=1$	40.5
Cylinder		$\sigma = \frac{2\pi ab^2}{\lambda}$ 19.5 at 9GHz, $a=0.5, b=1$	19.7
Sphere		$\sigma = \pi a^2$ -1.05 at 9GHz, $a=0.5$	-1.05
Dihedral		$\sigma = \frac{8\pi a^2}{\lambda^2}$ 43.5 at 9GHz, $\alpha=1$	43.6
Trihedral		$\sigma = \frac{12\pi a^2}{\lambda^2}$ 45.3 at 9GHz, $\alpha=1$	45.3
Triangular Trihedral		$\sigma = \frac{4\pi a^2}{3\lambda^2}$ 35.8 at 9GHz, $\alpha=1$	35.8

고각 0°로 입사할 경우에 대한 RCS 해석을 수행하였다. 상기 수치해석 결과는 실험치(Klement et al. 1988)와 함께 Fig. 6에 나타내었다. 이로부터 xx - 및 yy -편파에 대한 해석결과가 실험치와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 기하학적인 형상에 의한 편파 효과를 확인하기 위해 Fig. 5에 나타낸 구조물을 y -축과 z -축에 대해 각각 -45° 회전시킨 후 y -축에 대해 -30°에서 30°까지 0.1° 간격으로 회전시킨 경우의 RCS 해석을 수행하였다. 상기 해석 결과는 실험치(Klement et al. 1988)와 함께 Fig. 7에 나타내었는데, xy - 및 yx -편파의 RCS 해석결과가 대칭성을 잘 나타낼 뿐만 아니라 RCS가 상대적으로 크게 나타난 -7°에서 7°까지의 해석 결과가 실험치와 잘 일치함을 확인할 수 있다. 다만, 그 이외의 전자기파 입사 각도에서는 실험치보다 다소 작는데 이는 본 연구에서 고려하지 않는 회절, 표면파 등 고차산란파의 영향인 것으로 판단한다.

본 연구에서 적용한 방법의 실용성을 검토하고자 Fig. 8에 나타낸 90 m급 corvette 함정(길이: 91 m, 폭: 13 m, 높이: 20 m)을 307 개의 삼각형 평면 요소로 모델링하여 RCS 해석을 수행하였다.

Fig. 9에 고각 0°인 9 GHz의 전자기파가 방위 각 0°부터 360°까지 0.1° 간격으로 입사될 경우의 RCS 해석 결과를 나타내었다. 이로부터 수치해석 결과는 함정의 기하학적 대칭성을 정확하게 반영하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 10°, 80°, 100°, 170° 등의 특정 방위각에서 xy - 및 yx -편파성분이 xx - 및 yy -편파성분보다 크게 난 것은 상부 부가 구조물의 다중 반사 효과 때문인 것

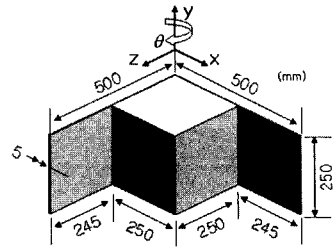
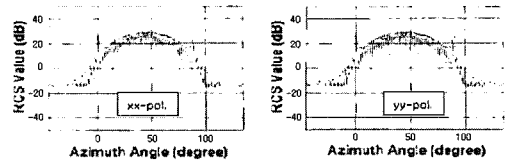
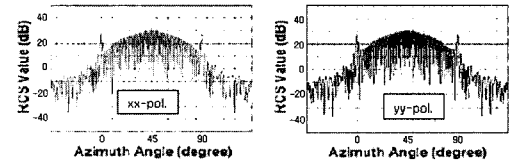


Fig. 5 Double dihedral

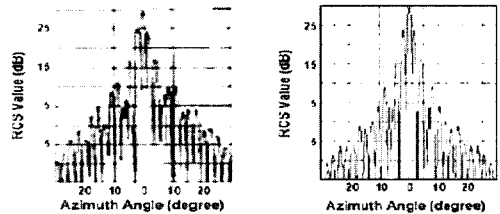


(a) Measured data



(b) Numerical data

Fig. 6 Comparison between numerical and measured RCS data of double dihedral (co-polarization)



(a) Measured data

(b) Numerical data

Fig. 7 Comparison between numerical and measured RCS data of double dihedral (co-polarization)

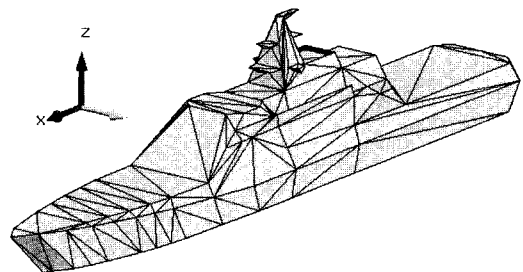


Fig. 8 90M class corvette warship

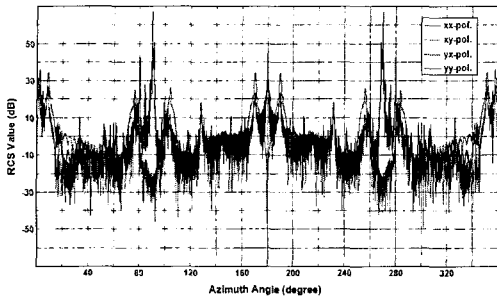


Fig. 9 Numerical analysis results of a 90m class corvette warship

으로 판단한다. 한편, 상기 수치해석에 소요된 총 연산시간은 1.6 GHz CPU를 탑재한 PC상에서 11분 7초가 소요되었다. 이에 본 연구에서 정립한 방법은 함정과 같은 대형 복합구조물의 효율적 RCS 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 다중 반사 및 편파 효과를 갖는 함정과 같은 대형 복합 구조물의 효율적 RCS 해석을 위하여 물리/기하 광학 혼합방법을 적용하고자 시면과 은면 산정에 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 object precision 방법을 정립하였다. 또한, 이를 토대로 개발한 RCS 해석 프로그램을 이용하여 다양한 구조물에 대해 수치계산을 수행한 결과가 이론해 및 실험치와 부합성이 매우 높음을 확인하였다. 아울러, 90 m급 corvette 함정에 대한 RCS 해석으로부터 적용한 방법의 연산효율이 양호함을 확인하였다.

이에 보다 복잡한 형상을 갖는 복합 구조물에 대한 추가적인 정확도 검증과 함께 문제영역 식별을 위한 산란중심(scattering center) 도출 알고리즘을 추가하면 본 연구에서 적용한 방법은 대형 복합 구조물의 RCS 해석 및 저감 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 부성운, 2001, “곡면패치 물리광학법을 이용한 곡면체의 RCS 및 TES 계산,” 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 1호, pp 62-71.
- 조대승, 성상경, 김진형, 최재호, 박일권, 2003, “적용 삼각형 빔 방법에 의한 실내음장 해석,” 한국소음진동공학회 논문집, 제 13권, 제 3호, pp. 217-224.
- 최삼욱, 부성운, 2000, “물리광학법을 이용한 함정구조물의 레이더 반사면적 계산,” 대한조선학회 논문집, 제 37권, 제 4호, pp. 82-91.
- Klement, D., Preissner, J., and Stein V., 1988, "Special problems in applying the physical optics method for backscatter computation of complicated objects," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 36, No. 2, pp 228-237.
- Knott, E, Shaeffer J., and Tuley, M., 1990, Radar Cross Section, 2nd Edition, Artech House, Boston·London.
- Wang, S.Y. and Jeng, S.K., 1997, "A deterministic method for generating a scattering center model to reconstruct the RCS pattern of complex radar targets," IEEE Transactions on Antennas and Propagations, Vol. 39, No. 4, pp. 315-323.



< 김 국 현 >



< 김 진 형 >



< 조 대 승 >