

물리 광학법을 이용한 함정구조물의 레이더 반사면적 계산

최삼욱*, 부성윤**

Computation of Radar Cross Section of Ship's Structure using a Physical Optics Method

Sam-Wook Choi* and Sung Youn Boo**

요 약

본 연구에서는 물리 광학법을 이용하여 완전도체의 레이더 반사면적(Radar Cross Section, RCS)을 예측할 수 있는 수치기법을 개발하였다. 그리고 원통실린더와 구에 본 기법을 적용하여 RCS를 계산한 후 해석해와 비교 검증하는 과정을 거쳐 고속함정의 구조물에 대한 RCS를 계산하였다. 전자파 입사각이 0°일 때 이 함정의 주요 반사체가 주선체의 선미와 상부 구조물임을 알 수 있었다. 따라서 이 구조물에 12°의 경사를 주어 형상화한 선체에 대한 RCS의 계산 결과 그 값이 형상화 전보다 크게 감소함을 확인하였다.

Abstract

In this study, a numerical scheme based on physical optics method is developed to predict RCS of perfectly conducting body. The scheme is verified through the comparisons of numerical values of cylinder and sphere with analytical ones. It is also applied to compute RCS of a fast naval craft. Major reflection of this ship at threat angle of 0 degrees is found to be due to superstructure and stern part of main hull. In order to investigate the shaping effects on the ship, inclination angles of the stern of main hull and superstructure are set to 12 degrees. The RCS of the ship with shaping is proven to be much reduced in comparison with one without shaping.

접수일자: 1999년 12월 29일, 승인일자: 2000년 9월 15일

*학생회원, 군사과학대학원 해양공학과 석사과정(E-mail:samwook@intizen.com)

**정회원, 해군사관학교 조선공학과 부교수(E-mail:wavemodeling@intizen.com)

1. 서론

과거에는 합정 탑재 장비들의 설치성이나 운용성이 합정설계에서 더 큰 비중을 차지하였고 또한 합정에 대한 RCS 감소 설계기술이 부족하여

상대방 레이더에 대한 탐지위협이 큰 합정을 설계할 수밖에 없었다. 그러나 최근에는 RCS 감소 기술의 발달로 각국이 레이더 스텔스 설계를 합정 설계에 적극 반영하고 있다. 일반적으로 RCS를 줄이기 위한 방법으로 합정구조물의 형상화(Shaping)와 전파흡수재 등을 사용되어 왔다.

RCS를 예측하는 기법에는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 수치 계산 기법과 측정 장비를 이용한 측정 기법이 있다. 컴퓨터를 이용한 RCS 계산 기법은 측정 기법에 비해 비용이 적게들어 경제적인 면에서 유리하기 때문에 합정의 초기 설계 단계에서 합정의 RCS 주요 예측 수단이 된다. 이러한 수치 해석 기법의 종류에는 표적의 크기가 파장에 비해 크지 않는 구조물에 적합한 저주파 해석 기법과 파장에 비해 표적의 크기가 매우 큰 구조물에 적합한 고주파 해석 기법 등이 있다(1). 저주파 해석 기법에는 모멘트법, 유한요소법(2), 유한차분법, 경계요소법(3)(4) 등이 있고 고주파 해석 기법에는 물리 광학법(Physical Optics: PO)(5)(6)(7), 물리회절이론(6), 기하광학법, 기하회절이론(8) 등이 있다. 저주파 해석 기법은 입사파장에 비하여 매우 큰 군사표적물의 경우 계산 시간이 매우 길기 때문에 부적합한 반면 고주파 해석 기법은 입사파장에 비하여 크기가 매우 큰 표적, 즉 미사일(5), 항공기(9), 그리고 합정(10)(11)등의 RCS 예측에 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 물리 광학법을 이용하여 합정을 평판으로 모델링한 후 합정구조물의 RCS를 예측할 수 있는 수치 기법을 개발하였다. 그리고 이 수치 기법을 검증과정을 거쳐 소형 고속합정에 적용하여 합정 RCS를 예측하였다. 과거에는 합정 탑재 장비들의 설치성이나 운용성이 합정설계에서 더 큰 비중을 차지하였고 또한 합정에 대한 RCS 감소 설계기술이 부족하여 상대방 레이더에 대한

탐지위협이 큰 합정을 설계할 수밖에 없었다. 그러나 최근에는 RCS 감소 기술의 발달로 각국이 레이더 스텔스 설계를 합정 설계에 적극 반영하고 있다. 일반적으로 RCS를 줄이기 위한 방법으로 합정구조물의 형상화(Shaping)와 전파흡수재 등을 사용되어 왔다.

RCS를 예측하는 기법에는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 수치 계산 기법과 측정 장비를 이용한 측정 기법이 있다. 컴퓨터를 이용한 RCS 계산 기법은 측정 기법에 비해 비용이 적게들어 경제적인 면에서 유리하기 때문에 합정의 초기 설계 단계에서 합정의 RCS 주요 예측 수단이 된다. 이러한 수치 해석 기법의 종류에는 표적의 크기가 파장에 비해 크지 않는 구조물에 적합한 저주파 해석 기법과 파장에 비해 표적의 크기가 매우 큰 구조물에 적합한 고주파 해석 기법 등이 있다(1). 저주파 해석 기법에는 모멘트법, 유한요소법(2), 유한차분법, 경계요소법(3)(4) 등이 있고 고주파 해석 기법에는 물리 광학법(Physical Optics: PO)(5)(6)(7), 물리회절이론(6), 기하광학법, 기하회절이론(8) 등이 있다. 저주파 해석 기법은 입사파장에 비하여 매우 큰 군사표적물의 경우 계산 시간이 매우 길기 때문에 부적합한 반면 고주파 해석 기법은 입사파장에 비하여 크기가 매우 큰 표적, 즉 미사일(5), 항공기(9), 그리고 합정(10)(11)등의 RCS 예측에 적합하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 물리 광학법을 이용하여 합정을 평판으로 모델링한 후 합정구조물의 RCS를 예측할 수 있는 수치 기법을 개발하였다. 그리고 이 수치 기법을 검증과정을 거쳐 소형 고속합정에 적용하여 합정 RCS를 예측하였다.

2. 물리 광학법의 정식화

2.1 산란적분 방정식

Fig.1에 원거리에서 레이더가 전자파를 방사하여 물체의 표면에 부딪쳐 반사되어 되돌아오는 산란파를 수신하는 개념을 도시하였다. 여기서 (x, y, z) 는 직각 좌표, \hat{z} 는 z 방향의 단위 벡터,

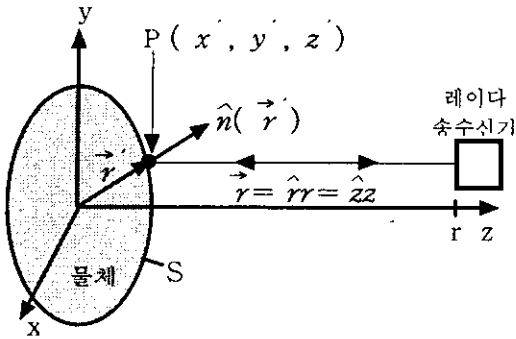


Fig.1 Radar geometry

r 은 레이더와 물체사이의 거리, \vec{r} 는 원점에서 산란체까지의 벡터, $\hat{n}(\vec{r})$ 는 산란체 표면상의 임의의 P점에서의 단위 법선 벡터, \hat{r} 은 r 방향의 단위 벡터, S 는 산란체 표면, (x', y', z') 는 산란체 표면의 P점의 좌표를 나타낸다. 임의의 위치 \vec{r} 에서의 전자파는 입사파와 산란파의 합으로 표현할 수 있다. 따라서 전체 전계 \vec{E} 와 전체 자계 \vec{H} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_i(\vec{r}) + \vec{E}_s(\vec{r}) \quad (1)$$

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}_i(\vec{r}) + \vec{H}_s(\vec{r}) \quad (2)$$

여기서 \vec{E}_i 와 \vec{H}_i 는 입사 전계와 자계, \vec{E}_s 와 \vec{H}_s 는 산란 전계와 자계를 나타낸다. 이때 \vec{E} 와 \vec{H} 는 다음과 같은 맥스웰 방정식을 만족해야 한다[12].

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = -j\omega \mu_0 \vec{H}(\vec{r}) \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = j\omega \epsilon_0 \vec{E}(\vec{r}) + \vec{J}_i(\vec{r}) \quad (4)$$

식(3)과 (4)에서 ω 는 각주파수, j 는 복소수, ϵ_0 는 자유공간에서의 유전율, μ_0 는 자유공간에서의 투자율을 나타낸다. 그런데 원전원 \vec{J}_i 가 물체로부터 멀리 떨어져 있다면 입사되는 파는 평면파로 가정할 수 있다. 또한 산란파도 물체에서 멀

리 떨어진 z 축상의 점에서 구한다고 하면 원거리에서의 산란 전계 $\vec{E}_s(\vec{r})$ 는 다음과 같은 적분식으로 나타내어진다[7].

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = j\omega \mu_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{4\pi r} \hat{r} \times \int_S dS [\hat{r} \times \{ \hat{n}(\vec{r}') \times \vec{H}(\vec{r}') - \frac{1}{Z_0} (\hat{n}(\vec{r}') \times \vec{E}(\vec{r}')) \}] e^{jk_0 z} \quad (5)$$

여기서 $\vec{E}(\vec{r}')$, $\vec{H}(\vec{r}')$ 는 물체 표면에서의 전계와 자계, k_0 는 자유공간상의 파수, $Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0}$ 은 진공의 임피던스이다.

2.2 물리 광학법에 의한 RCS 계산

식(5)에서 산란전계 $\vec{E}_s(\vec{r})$ 를 구하기 위해서는 물체 표면상의 전계 $\vec{E}(\vec{r}')$ 와 자계 $\vec{H}(\vec{r}')$ 를 알아야 한다. 그런데 물체가 완전도체일 경우에 물리 광학법에 의하면 물체 표면에서의 전계와 자계는 다음의 관계를 만족한다[13].

$$\hat{n}(\vec{r}') \times \vec{E}(\vec{r}') = 0 \quad (6)$$

$$\hat{n}(\vec{r}') \times \vec{H}(\vec{r}') = \begin{cases} 2\hat{n}(\vec{r}') \times \vec{H}_i(\vec{r}') & \text{반사영역} \\ 0 & \text{그늘영역} \end{cases} \quad (7)$$

식(6)과 (7)을 식(5)에 대입하면 z 축으로 입사하는 평면파가 완전도체에 의해 산란되는 전계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_s = - \left(\frac{jk e^{-jkr}}{2\pi r} \int_S e^{2jkz'} dx' dy' \right) E_i \quad (8)$$

여기에서 E_s 는 산란 전계, E_i 는 입사 전계이다. 물체의 RCS는 식(8)과 입사전계를 이용하여 구할 수 있다. 즉 RCS는 산란되는 전자파의 전력량을 입사되는 전자파의 전력량으로 나눈 후 거리를 보정해준 값이다. 물체를 N개의 평판의 합으로 모델링할 경우 물체의 RCS 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RCS(m^2) = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = \frac{k^2}{\pi} \left(\sum_{i=1}^N \int_{S_i} e^{2jkz'} dx' dy' \right)^2 \quad (9)$$

여기서 k 는 파수(wave number)이고, S_i 는 i 번째 평판의 표면을 나타낸다. 식(9)의 위상 적분은 사각형 또는 삼각형 평판의 경우 해석적으로 구할 수 있다[14]. 그리고 각 평판의 위상 적분을 합하면 평판으로 모델링한 물체 전체의 RCS가 된다. RCS의 단위는 m^2 또는 $dBsm$ 단위로 나타내며 두 단위의 관계는 다음과 같다.

$$RCS(dBsm) = 10 \log_{10} \left\{ \frac{RCS(m^2)}{1(m^2)} \right\} \quad (10)$$

3. 은면(shading) 처리

물리 광학법은 기하광학의 레이(ray) 개념을 도입한 것이므로 관측점에서 보이지 않는 평판에는 적용할 수 없다. 관측점에서 보이지 않는 평판은 크게 두 경우로 나누어 생각할 수 있다[15]. 첫째는 평판이 관측점에서 보이지 않는 방향을 향하는 경우이고, 둘째는 평판이 향하는 방향은 관측점에서 보이지만 또 다른 평판에 의해서 그 평판의 일부 혹은 전부가 가려지는 경우이다.

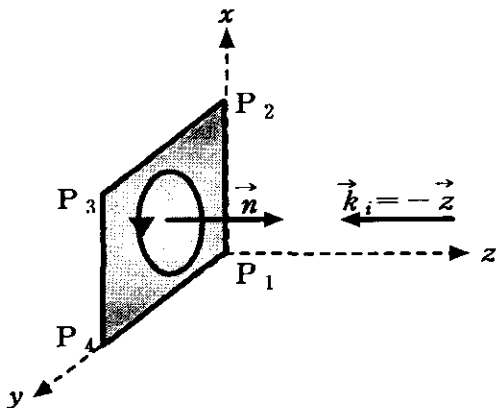


Fig.2 Plane normal and incident wave vector

평판이 관측점에서 보이지 않는 방향을 향하고 있는 경우는 평판의 법선 벡터와 입사파의 방향 벡터의 관계로 알 수 있다. Fig.2에 도시한 바와 같이 다음 식 (11)을 만족하면 관측점에서 평판이 보이는 경우이다.

$$\cos^{-1}(\vec{n} \cdot \vec{k}_i) > \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

이 때 $\vec{k}_i = -\vec{z}$ 는 입사파의 방향이고, \vec{n} 은 평판의 법선 벡터로 물체 외부로 향하는 방향을 양으로 정의한다. 다른 평판에 의해 가려지는 경우는 위의 경우보다 더욱 복잡해진다. 이 경우에는 물체공간과 회상공간 그리고 혼합방식을 이용한 다양한 알고리즘을 이용하여 가려지는 부분을 찾을 수 있다.

4. 수치해의 수렴도 검토

구 또는 실린더 등의 수학적 구조물에 대한 RCS 해석해[16]가 잘 알려져 있으므로 본 연구의 기법을 우선 구와 실린더에 적용하여 수치기법의 수렴도를 검토하였다.

4.1 실린더의 RCS

전기적으로 큰 실린더의 RCS는 기하광학법을 사용하여 해석적으로 구할 수 있다. 길이가 l , 반지름이 a 인 실린더의 RCS는 다음과 같다.

$$RCS(m^2) = \frac{2\pi f}{c} a l^2 \quad (12)$$

여기서 c 는 광속, f 는 주파수이다.

곡면 구조물을 평판으로 모델링 할 경우 파장당 적정 평판수를 결정하고자 한다. 이를 위해서 실린더를 Fig.3과 같이 모델링하여 실린더의 평판수를 변화시키면서 RCS를 계산하여 해석해와 비교하였다. 실린더 반지름은 10λ , 길이는 30λ , 주파수는 10GHz이다. 평판수의 변화에 대한 실린더의 RCS를 Fig.4에 도시하였다. 평판수가 60

개 이상, 즉 파장당 평판수가 1개 이상일 때 수치해가 해석해에 수렴하였다.

그리고 실린더의 RCS는 식(12)에 의하면 주파수에 비례하여 증가하는 성질을 갖고 있다. 이를 검토하기 위하여 주파수를 10GHz부터 100GHz까지 10GHz씩 증가시키면서 실린더의 RCS를 계산하여 그 결과를 Fig.5에 도시하였다. 그리고 이



Fig.3 Typical modeling of cylinder

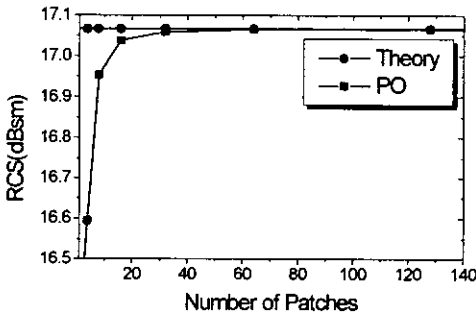


Fig.4 RCS of cylinder with variation of number of patches

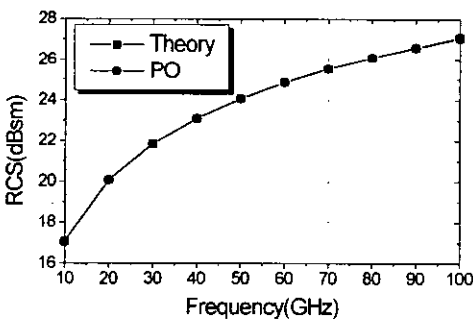


Fig.5 RCS of cylinder with variation of frequency

수치 실험에서는 주파수가 100GHz 일 때의 파장당 평판수 조건을 맞추기 위해서 평판의 개수를 1024개로 높여 계산하였으며 RCS 계산 결과를 Fig.5에 도시하였다. 수치계산에 의한 실린더의 RCS는 해석해와 잘 일치하였다.

4.2 구의 RCS

반지름이 파장에 비해서 매우 클 경우 반지름이 a 인 구의 RCS는 다음과 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$RCS(m^2) = \pi a^2 \tag{13}$$

구의 경우는 Fig.6과 같이 위도방향과 경도방향으로 평판수를 변화시키면서 모델링 하였다. 이때 구의 반지름은 $1m(=3.33\lambda)$, 주파수는 1GHz이다.

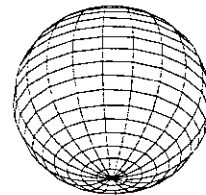


Fig.6 Typical modeling of sphere

먼저 파장당 최적의 평판수를 구하기 위해 평판수를 변화시키면서 RCS를 계산한 결과를 Fig.7에 나타내었다. 이 때 위도방향의 평판수는 경도방향의 평판수의 반으로 하였다. 경도 방향의 평판수를 40개 이상으로 설정할 경우 물리 광학법으로 구한 구의 RCS가 해석해의 값에 수렴하였다. 즉 구의 경우 파장당 2개 이상의 평판을 사용하여 모델링해야 함을 알 수 있다.

그리고 반지름이 파장에 비해서 클 경우 식(13)에 의하면 구의 RCS는 주파수에 무관하다. 이를 검토하기 위하여 경도방향의 평판수를 52개로 고정하여 주파수를 1GHz부터 2GHz까지 0.2GHz씩 증가시키면서 RCS를 계산하였다

(Fig.8). 주파수 변화에 의해 수치해가 다수 진동하나 수치해의 평균값은 해석해에 수렴함을 알 수 있다.

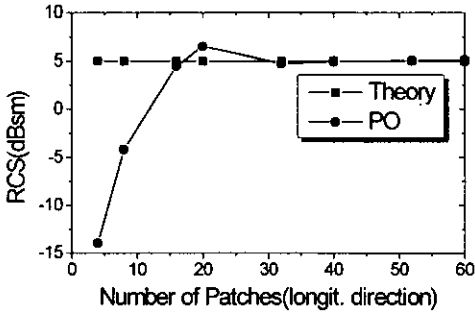


Fig.7 RCS of sphere with variation of number of patches

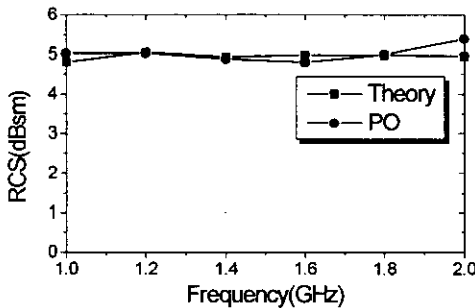


Fig.8 RCS of sphere with variation of frequency

5. 함정 구조물의 RCS 계산 및 검토

5.1 함정 구조물의 모델링

대상함정으로 길이 47m, 폭 7m, 흘수 1.5m, 만재 배수톤수가 약 250톤급인 고속함정을 택하였다. 이 함정의 오프셋과 일반 배치도를 이용하여 만재흘수선 상부의 주선체와 상부구조물을 평판으로 모델링(Fig.9)하였으며 연돌이나 마스트 등은 대상에서 제외하였다. 그리고 함정에 대한 전자파의 입사각은 0°로 정하였다. 사용한센서의 주파수는 1GHz이며, 파장당 약 1개의 평판



Fig.9 Patch distribution of ship before shaping



Fig.10 Patch distribution of ship after shaping

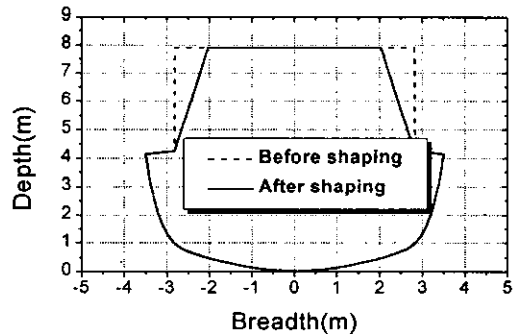


Fig.11 Midship section of ship before and after shaping with inclination of 12 degrees

으로 모델링하였다. 이 경우 평판수는 주선체 5282개, 상부구조물 2640개이다. 그리고 형상화 전후의 RCS 변화를 계산하기 위하여 상부구조물과 주선체의 선미부분에 12도 경사를 주어 형상화하였다(Fig.10). Fig.11은 형상화 전후의 중앙

횡단면도이다. 여기서 선체 경사각은 함정의 횡동요각과 전자파 입사각의 합보다 커야 하므로 이 두 각도를 고려하여 선정하였다.

5.2 RCS 계산 및 검토

입사각이 0°일 경우 0~360°방위에 대한 RCS 계산 결과를 Fig.12~14에 도시하였다. 여기서 0°와 180°는 정 선수미, 90°와 270°는 정 좌우현 방향을 나타낸다. 주선체의 형상화 전후의 RCS를 Fig.12에 비교하였다. 형상화 전의 주선체 RCS는 함미와 좌우현 방향에서 값이 크고 선수부는 경사구조로 되어 있어서 상대적으로 값이 작게 나타나고 있다. 반면에 주선체의 선미부분만을 형상화했을 경우는 선미부분의 신호의 크기와 폭이 작게 나타났고 좌우현 방향과 선수부분은 경사를 주지 않았기 때문에 형상화 전과 유사하게 나타났다. 형상화 후의 RCS 평균값은 약 19dB로서 형상화 전보다 약 63% 정도 줄었다.

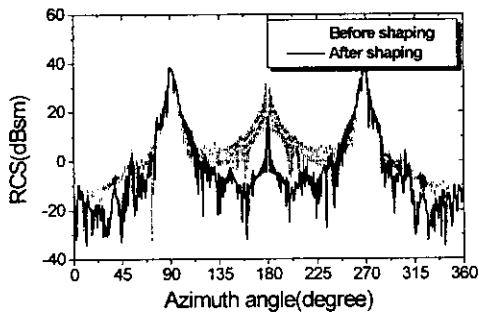


Fig.12 RCS of main hull before and after shaping

그리고 형상화 전후의 상부구조물의 RCS를 Fig.13에 비교하였다. 형상화 전의 RCS는 현측과 선수방향의 직각 구조물의 영향으로 큰 신호가 나타났다. 그러나 형상화 후에는 신호 값이 크게 줄었고 신호의 폭도 작게 나타났다. 그리고 형상화 전에는 주선체와 비교하여 노출면적이 상대적으로 작아도 RCS는 오히려 크게 나타났으나 형상화 후에는 주선체에 비해 RCS 값이 매우 작게 나타났다. 따라서 함정의 RCS를 줄이기 위해서는

직각구조물인 상부구조물의 신호를 줄이는 것이 중요하다고 할 수 있다. 형상화 후의 RCS 평균값은 형상화 전보다 약 99% 감소한 7dB로 나타났다.

형상화 전후의 함정 전체에 대한 RCS 값을 Fig.14에 나타내었다. 형상화 전에는 주요 반사점의 위치가 선수미와 좌우현 방향임을 알 수 있다. 좌우현 방향의 신호의 폭이 선수미 방향보다 넓게 나타났다. 형상화 후에는 전체적인 함정 RCS 값이 크게 감소하였고 특히 선수미 방향의 신호 크기와 폭이 현측부분에 비해 현저하게 감소하였다. 따라서 현측부분의 RCS 값을 줄이기 위해서는 추가적으로 주선체의 현측부분의 형상화가 필요하다. 함정 전체의 RCS 평균값은 형상화 전

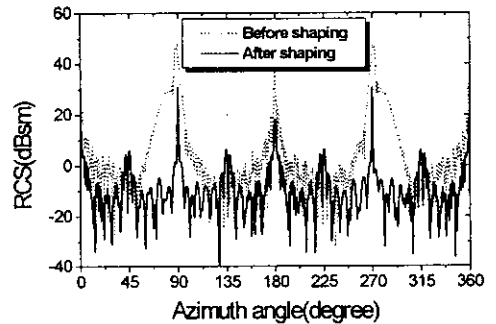


Fig.13 RCS of superstructure before and after shaping

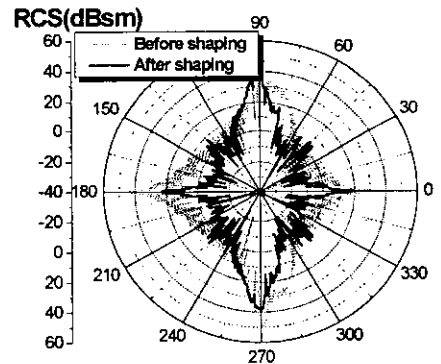


Fig.14 RCS of ship before and after shaping

에는 약 27.8dB, 형상화 후는 약 19dB로 약 87%의 RCS 감소효과가 나타났다.

5.3 구조물의 국부 반사특성

전자파의 입사 방위에 대한 함정 구조물의 국부적 반사 특성을 검토하기 위하여 입사 방위에 대한 RCS를 Fig.15~18에 비교하였다. 여기서 등고선(Contour)의 크기는 최대 RCS값을 1로 가정하였을 경우 각 평판 RCS의 상대적인 크기를 나타낸 것이고 밝게 보이는 부분이 어둡게 보이는 부분보다 상대적으로 RCS 값이 큰 부분이다.

Fig.15와 Fig.16에 형상화 전후의 함수 방향에서 전자파가 입사할 경우의 RCS를 나타내었다.

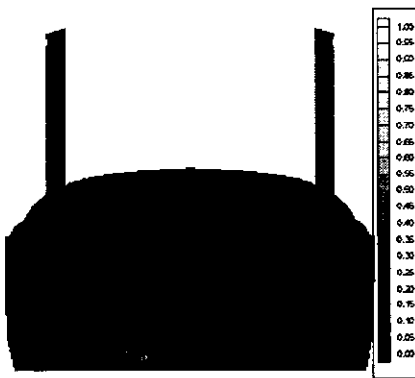


Fig.15 RCS contour before shaping (azimuth 0°)

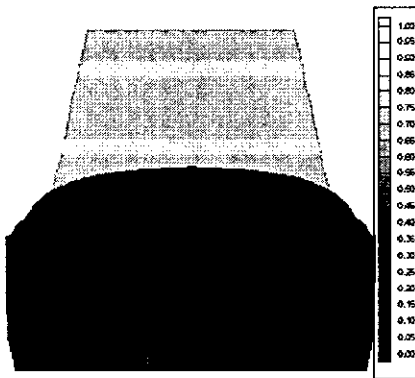


Fig.16 RCS contour after shaping (azimuth 0°)

형상화 전에는 주선체보다는 상부구조물에 의한 반사가 대부분이지만 형상화 후에는 상부구조물의 반사강도가 감소함을 알 수 있다.

우현 방향에서 전자파가 입사할 경우 형상화 전후의 RCS를 Fig.17과 Fig.18에 비교하였다. 주선체의 현측부분은 형상화를 하지 않았기 때문에 RCS가 서로 유사하게 나타났다. 그러나 상부구조물의 경우 경사효과에 의하여 전자파 반사특성이 서로 다르게 나타났다. 따라서 현측 방향의 RCS 값을 줄이기 위해서는 기존함정의 주선체 현측도 형상화해야 함을 알 수 있다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 물리 광학법을 이용하여 함정의 RCS를 예측할 수 있는 수치 기법을 개발하였다. 수치 기법의 수렴도를 검증하기 위하여 원통실린더와 구에 본 기법을 적용하여 RCS를 구한 후 해석해와 비교한 결과 원통실린더는 파장당 1개, 구는 파장당 2개 이상의 평판으로 모델링할 경우 수치해의 수렴성을 확보할 수 있었다. 그리고 수치 기법을 고속함정에 적용하여 함정구조물의 RCS를 계산하였다. 대상함정의 주선체와 상부구조물을 사각형 또는 삼각형 평판으로 모델링하였으며 연돌이나 마스트 등의 복잡구조물은 모델링에서 제외하였다. 그리고 함정의 상부구조물과 주선체의 선미를 12° 경사를 주어 형상화하기 전후의 RCS를 비교하였다. 형상화 전에는 좌우현, 선수미 방향에서의 RCS 값이 다른부분에 비해 상대적으로 크게 나타났지만 형상화 후에는 전체적인 함정구조물의 RCS 값이 감소하였고 특히 선수미 방향의 RCS 값은 크게 줄었지만 현측방향의 크기는 주선체의 현측의 영향으로 크게 줄지 않았다. 따라서 저탐지 함정설계를 위해서는 함정 전체 구조물에 대한 형상설계가 요구된다고 할 수 있다. 그리고 모델링에서 제외하였던 연돌이나 마스트 그리고 포탑 등을 모델링에 포함시켜 복잡구조물의 영향을 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다.

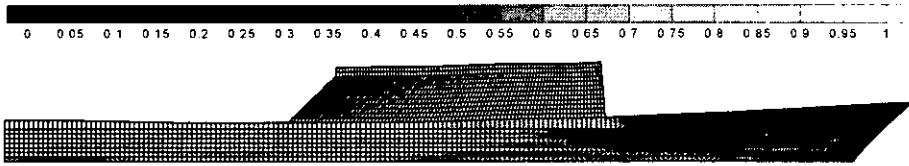


Fig.17 RCS contour before shaping (azimuth 270°)

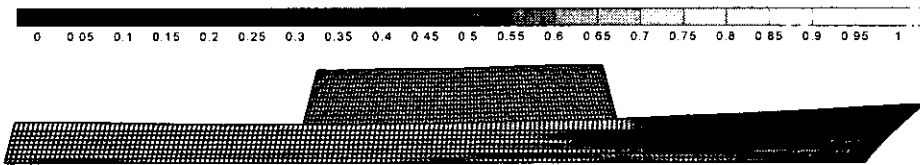


Fig.18 RCS contour after shaping (azimuth 270°)

후 기

본 연구는 무기체계개념 특화연구센터의 “차세대 한국형 함정의 스텔스화에 관한 연구”에 대한 '99년도 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. T. Lo, S. W. Lee, "Antennas Handbook", Van Nostrand Reinhold Company, 1986
- [2] J. M. Jin, V. V. Liepa, "A Note on Hybrid Finite Element Method for Solving Scattering Problems", IEEE Trans. Antennas Propagation, Vol. 36, No. 10, pp. 1486~1490, 1988
- [3] K. Yashiro, S. Ohkawa, "Boundary element method for electromagnetic scattering from cylinder", IEEE Trans. on AP, Vol. AP-33, No. 4, pp. 383~389, 1985
- [4] 양한진, 부성윤, "고차경계요소법을 이용한 2차원 도체의 레이다 반사면적 계산", 한국군사과학기술학회, '97 추계 학술대회 논문집, 1997
- [5] 석성하, "물리 광학 방법을 이용한 레이더 단면적 예측에 관한 연구", 석사논문, 포항공과대학교 대학원, 전기전자 공학과, 1997
- [6] T. Griesser, C. A. Balanis, "Backscatter Analysis of Dihedral Corner Reflectors Using Physical Optics and the Physical Theory of Diffraction", IEEE Trans. on AP, Vol. AP-35, No. 10, pp. 1137~1147, Oct., 1987
- [7] D. Klement, J. Preissner, V. Stein, "Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computation of Complicated Objects", IEEE Trans. on AP, Vol. 36, No. 2, pp. 228~237, Feb., 1988
- [8] M. E. Bechtel, "Application of Geometric

Diffraction Theory to Scattering from Cones and Disks", Proc., IEEE, pp. 877~882, August, 1965

[9] M. Domingo, F. Rivas, J. Perez, R. P. Torrez, M. F. Catedra, "Computation of the RCS of Complex Bodies Modeled Using NURBS Surfaces", IEEE Trans. on AP, Vol. 37, No. 6, pp. 36~46, December, 1995

[10] M. A. West, "Practical Aspects of Developing Low Radar Signature Surface Ships", Proc. IMDEX 97, Vol. 1, 1997, U.K

[11] D. J. Rothwell, "HIGHLIGHT : A Suite of Codes for radar cross section and Target echo Strength Prediction", IEE Colloquium, Friday 8 march, 1996

[12] C. A. Balanis, "Advanced Engineering Electromagnetics", John Wiley & Sons, 1989

[13] N. Skolnik, "Radar Handbook", MacGraw Hill, 1990

[14] 최삼욱, "물리 광학법을 이용한 함정 구조물의 레이더 반사면적 계산", 석사논문, 군사과학대학원, 해양공학과, 2000

[15] 이현찬, 채수원, 최영, "컴퓨터 그래픽스 및 형상 모델링", 시그마프레스, 1996

[16] G. T. Ruck., "Radar Cross Section Handbook", Plenum Press, 1970