

## 곡면패치 물리광학법을 이용한 곡면체의 RCS 및 TES 계산

부성윤\*

### Computation of RCS and TES of Curved Objects Using a Curved-Patch Physical Optics Method

Sung Youn Boo\*

#### 요 약

레이다 반사면적(RCS)은 레이더 탐지에, 그리고 음향 표적강도(TES)는 소나 탐지에 직접 관련이 있기 때문에 이 두 신호는 함정설계 초기단계에서 검토되어야 하는 중요한 요소 중의 하나이다.

따라서 본 연구에서는 곡면패치 물리광학법을 도입하여 완전반사 곡면구조물의 RCS와 TES를 계략적으로 예측하는 기법을 개발하였다. 수치기법의 검증을 위하여 원형 실린더, 구, NACA3317 날개의 RCS를 계산한 후 가용한 자료와 비교 검토하였다. 또한 본 연구의 기법을 잠수함에 확장 적용하여 수상 항해시의 RCS와 잠수 항해시의 TES를 각각 계산하였다. 그리고 레이더 파와 소나 음파의 입사방위와 고각에 따른 주요 반사구조물의 위치를 확인하였다.

#### Abstract

Prediction of ship's signature of RCS(Radar Cross Section) and TES(Target Echo Strength) is mostly required in the initial design stage of naval craft, because RCS is directly related to the radar detection while TES to the sonar detection.

In this research, a numerical scheme using a curved-patch physical optics method is proposed to evaluate signature of a perfectly reflecting curved object. The scheme is validated by comparing numerical RCS values of circular cylinder, sphere and NACA3317 airfoil with available data. It is also further applied to predict RCS of a surfaced submarine and TES of fully submerged one. Major reflectors of the surfaced or submerged submarine for the various incident angles of radar and sonar waves are investigated as well.

---

접수일자: 2000년 10월 31일, 승인일자: 2001년 1월 18일

\* 정희원, 해군사관학교 조선공학과 부교수 (현재 미 해사 교환교수)  
(E-mail: wavemodeling@hotmail.com)

### 1. 서 언

탐지센서에 의한 탐지확률이 낮은 저탐지 합정을 설계하는 것은 합정 생존성의 관점에서 매우 중요하다. 합정신호(ship signature)중에서 특히 전자파 신호와 수중음향 신호는 센서에 의한 탐지에 결정적인 영향을 미친다고 할 수 있다. 즉, 레이더파의 산란에 의한 레이더 반사면적(RCS)은 레이더에 의한 수상표적의 탐지에, 그리고 수중음파의 산란에 의한 음향 표적강도(TES)는 능동소나에 의한 수중표적의 탐지에 직접적인 관련이 있다. 합정신호의 감소는 합정 설계단계부터 반영되어 건조완료 시점까지 관리되어야 하며, 건조 후에는 수정이 거의 불가능하므로 설계 초기단계의 합정신호 예측은 무엇보다 요구되는 사항이다.

합정 RCS의 감소는 과거 20여년전 부터 시도되어 왔지만 항공기와는 달리 구조의 복잡성과 크기 때문에 기술의 개발이 제한적으로 이루어져 왔다. 그러나 최근에 전산기 성능의 발달로 CAD와 연동한 예측기법이 개발되었고, 합정설계에 직접 반영하고 있다.

탐지센서에 사용하는 전파나 음파의 파장은 표적의 크기보다 상대적으로 매우 작으므로 합정을 모델링할 경우 패치(patch)의 수가 크게 늘어나게 된다. 따라서 저주파 기법 보다는 고주파 기법이 합정의 RCS를 예측하는데 일반적으로 사용되어 왔다. 고주파 기법에는 물리광학법, 기하광학법, 회절이론, 등가전류법 등이 있으며, 각 방법에 대한 세부적인 내용의 기술은 생략하기로 한다.

본 연구에서는 고주파 기법중의 하나인 물리광학법을 이용하여 완전반사 곡면 물체의 RCS와 TES를 개략적으로 예측하는 기법을 개발하였다. 따라서 RCS와 TES의 정확한 값의 예측보다는 전체 구조물 중에서 반사에 크게 기여하는 구조물의 위치를 찾아내는데 주안점을 두었다.

물리광학법의 경우 물체를 평판(patch)으로 모델링하는 평판패치 기법이 주로 사용되어 왔다. West(1997)는 평판패치 물리광학법을 합정에 적용하여 RCS를 계산하였다. 특히

Rothwell(1996)은 이 기법을 합정의 RCS와 수중물체의 TES에 동시에 적용한 바 있다. 그리고 국내에서도 최근에 이 분야에 관심이 높아지면서 몇몇 연구 결과가 보고되고 있지만 주로 비행체나 유도탄의 RCS 예측에 초점을 맞추고 있다. 합정의 RCS 예측의 경우 국내에서는 연구결과가 극소수에 불과하다. 양한진/부성운(1997)은 고차경계요소법을 이용하여 2차원 고속정 단면과 이면각 구조에 대한 RCS를 예측하였다. 그리고 최삼욱/부성운(2000)은 평판패치 물리광학법을 적용하여 소형합정의 RCS를 개략적으로 예측한 바 있다.

평판 패치기법을 이용하여 곡면물체를 모델링할 경우 해의 수렴도가 떨어지고 또한 물체의 기하학적 오차를 유발하는 단점이 있을 뿐만 아니라 엄청난 수의 패치가 필요하다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 곡면 패치기법도 도입되기 시작하였고, CAD와 연동이 가능한 NURBS 패치를 이용한 모델링 기법이 김세운(1997), Domingo 등(1995)에 보고되고 있다.

본 연구에서는 2차 곡면패치(bi-quadratic patch)를 도입하여 곡면체를 모델링한 후 물리광학법을 적용하여 RCS와 TES를 구하였다. 그리고 원형 실린더, 구, NACA3317 날개에 적용하여 수치기법을 검증하였다. 또한 수상 잠수함의 RCS와 수중 잠수함의 TES 예측에 확장 적용하여 각각의 신호 특성과 주요 반사 구조물의 위치를 검토하였다.

### 2. 곡면 패치 물리광학법의 정식화

#### 2.1 물리광학법에 의한 RCS

입의 형상의 표적에 전자파가 입사하는 경우 좌표계는 Fig. 1과 같다. 여기서,  $(r, \theta, \phi)$ 는 구면 좌표계이고 물체는 완전 반사체라고 가정한다. 이 경우 표적에 입사하는 입사 전계(electric field)  $\vec{E}_i(\vec{r})$ 와 원거리(far field)에서 측정된 역산란(back scattering) 전계  $\vec{E}_s(\vec{r})$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}_i(\vec{r}) = (\hat{\theta}_i A_\theta + \hat{\phi}_i A_\phi) e^{jk\vec{r} \cdot \vec{r}} \quad (1)$$

$$\vec{E}_s(\vec{r}) = (\hat{\theta}B_\theta + \hat{\phi}B_\phi)e^{-jkr} \quad (2)$$

$$\hat{\zeta} = \hat{x}\sin\theta_i\cos\phi_i + \hat{y}\sin\theta_i\sin\phi_i + \hat{z}\cos\theta_i \quad (3)$$

여기서,  $k$ 는 파수,  $j$ 는 복소수,  $\hat{\theta}_i$ 와  $\hat{\phi}_i$ 는 입사각(elevation)  $\theta_i$ 와 입사방위(azimuth)  $\phi_i$ 의 단위벡터.  $A_\theta$ 와  $A_\phi$ 는 입사파의 편파(polarization),  $B_\theta$ 와  $B_\phi$ 는  $\theta$ 와  $\phi$ 의 함수인 위상(phasor)이다. 그리고  $\vec{r}$ 은 관측점의 위치 벡터,  $r$ 은 원점에서  $\vec{r}$ 까지의 거리,  $\hat{\theta}$ 와  $\hat{\phi}$ 는 구면좌표계의 단위 벡터이다. 역산란의 경우  $\theta = \theta_i, \phi = \phi_i, \hat{\theta} = \hat{\theta}_i, \hat{\phi} = \hat{\phi}_i$ 가 성립된다.

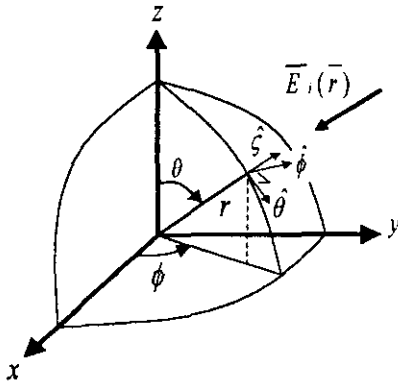


Fig. 1 Coordinates and directions of incidence

또한 식 (2)의  $B_\theta, B_\phi$ 는 다음의 산란 행렬식(scattering matrix)으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} B_\theta \\ B_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{\theta\theta} & B_{\theta\phi} \\ B_{\phi\theta} & B_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_\theta \\ A_\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $\theta$  편파의 경우  $A_\theta=1, A_\phi=0$  그리고  $\phi$  편파의 경우  $A_\theta=0, A_\phi=1$  이다. 따라서  $\theta\theta$  편파의 경우  $B_\theta=B_{\theta\theta}$   $\phi\phi$  편파의 경우  $B_\phi=B_{\phi\phi}$ 이 된다. 위의 산란 행렬식을 이용한 RCS 행렬식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta\theta} & \sigma_{\theta\phi} \\ \sigma_{\phi\theta} & \sigma_{\phi\phi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= 4\pi \begin{bmatrix} |B_{\theta\theta}|^2 & |B_{\theta\phi}|^2 \\ |B_{\phi\theta}|^2 & |B_{\phi\phi}|^2 \end{bmatrix}$$

전자파 산란 적분방정식에 물리광학 이론, 즉 입사전계  $\vec{E}_i(\vec{r})$ 가 표적에 입사할 경우 발생한 표면전류  $\vec{J}(\vec{r})$ 는 반사영역에서는  $\vec{J}(\vec{r}) = 2\hat{n} \times \vec{H}_i(\vec{r})$  그리고 음영구역에서는  $\vec{J}(\vec{r}) = 0$ 이라는 조건을 이용하면 단일반사(single reflection)에 대한 산란 행렬식은 최종적으로 다음과 같이 유도된다(Wang/Jeng 1997).

$$\begin{bmatrix} B_{\theta\theta} & B_{\theta\phi} \\ B_{\phi\theta} & B_{\phi\phi} \end{bmatrix} = \frac{k}{j2\pi} \begin{bmatrix} \hat{\zeta} \cdot \hat{I} & 0 \\ 0 & -\hat{\zeta} \cdot \hat{I} \end{bmatrix} e^{j2k\hat{\zeta} \cdot \vec{r}_c} \quad (6)$$

$$\hat{I} = \int_S \hat{n}(\vec{r}') e^{j2k\hat{\zeta} \cdot (\vec{r} - \vec{r}')} dS \quad (7)$$

여기서,  $\vec{H}_i(\vec{r})$ 는 입사 자기계(magnetic field),  $\hat{n}$ 는 물체 외부로 향하는 단위 법선벡터,  $\vec{r}'$ 은 원점에서 반사점  $(x', y', z')$  사이의 거리,  $S$ 은 표적표면  $S$ 에서 산란되는 영역,  $\vec{r}_c$ 는 원점에서 산란중심  $(x_c, y_c, z_c)$  사이의 거리이다 (Fig. 2). 식 (6)에 의하면  $B_{\theta\theta} = -B_{\phi\phi}, B_{\theta\phi} = B_{\phi\theta} = 0$ 임을 알 수 있다.

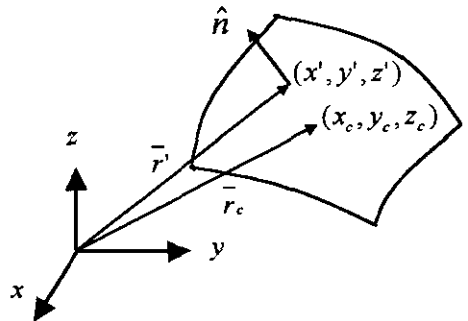


Fig. 2 Illuminated patch and definition

만약 표적을 삼각형 또는 사각형 등의 곡면 패치를 이용하여 총 N개의 패치로 모델링할 경우 표적에 대한 RCS인  $\sigma$ 는 각 패치의 RCS를 합하여 구할 수 있다. 식 (5)~(7)을 이용하면 임의 형상의 표적의 단방향(monostatic) RCS는 다음의 식으로 최종 유도된다.

$$\sigma = \left| \frac{k}{j\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^N \hat{\xi}_i \cdot \int_{S_i} \hat{n} e^{j2k\hat{\xi}_i \cdot (\vec{r} - \vec{r}_o)} dS \cdot e^{j2k\hat{\xi}_i \cdot \vec{r}_o} \right|^2 \quad (8)$$

식 (8)은 패치의 특성에 따라 해석 또는 수치적분이 가능하다. 참고로 식 (8)의 단위는  $m^2$ 이며, dBsm 단위는 다음의 식으로 환산한다.

$$\sigma(dBsm) = 10 \log_{10} [ \sigma(m^2) / 1(m^2) ]$$

### 2.2 물리광학법에 의한 TES

음선이론과 기하광학법 등은 수중표적에 대한 음향 표적강도, 즉 TES 예측에 널리 쓰이는 방법 중의 하나이다. 물리광학법도 이러한 기법과 함께 수중표적의 TES 예측에 사용되고 있다. 수중표적의 크기가  $2\pi a/\lambda \gg 1$  ( $a$ : 물체 크기,  $\lambda$ : 파장)을 만족하는 완전반사체일 경우 수중표적에 대해서도 물리광학법을 사용할 수 있다(Rothwell 1996, Marston 1997, Urick 1970).

예를 들면 가로와 세로의 길이가  $a$ 와  $b$ 인 직사각형 평판의 RCS는 식 (8)을 이용하면 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma = 4\pi \left( \frac{ab}{\lambda} \right)^2 \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (9)$$

식 (9)는 아래에 기술한 음향표적강도와 비교하기 위하여 식(8)에  $\phi=0$ 의 조건을 적용하여 유도하였다. 그리고 동일 제원에 대한 직사각형 평판의 단방향 TES인  $\sigma_t$ 는  $m^2$ 의 단위로 나타낼 경우 다음과 같다(Urick 1970).

$$\sigma_t = \left( \frac{ab}{\lambda} \right)^2 \frac{\sin(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (10)$$

따라서 식 (9)와 (10)은 상수  $4\pi$ 만 서로 고려하면 동일한 식이 되므로 식 (8)을 TES 계산에 직접 사용할 수 있다.

### 2.3 곡면패치 모델링

본 연구에서는 2차 곡면패치를 도입하였다. 우선 Fig. 3과 같이 9개 절점을 갖는 곡면패치를 고려할 경우 이 곡면패치에 대하여 다음의 관계식이 성립된다.

$$(x', y', z') = \sum_{\alpha=1}^9 (x'_\alpha, y'_\alpha, z'_\alpha) M_\alpha \quad (11)$$

$$\hat{n} = \frac{\partial \vec{r}'}{\partial \xi} \times \frac{\partial \vec{r}'}{\partial \eta} \quad (12)$$

$$dS' = \left| \frac{\partial \vec{r}'}{\partial \xi} \times \frac{\partial \vec{r}'}{\partial \eta} \right| d\xi d\eta \quad (13)$$

식 (11)에서  $(x'_\alpha, y'_\alpha, z'_\alpha)$ 와  $M_\alpha$ 는 절점  $\alpha$ 에 대한 좌표와 형상함수이다

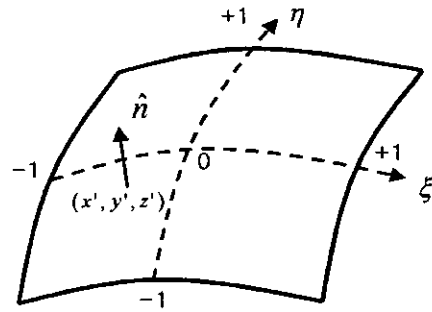


Fig. 3 Bi-quadratic patch

그러므로 식 (11)~(13)를 사용하여 식 (8)을 다시 쓸 수 있다. 삼각형 곡면패치인 경우 식 (11) 대신에 삼각형에 대한 좌표와 형상함수로 바꾸어 주면 식 (12)와 (13)을 수정없이 사용 가능하다. 그리고 평판패치를 사용할 경우에도 유사한 방법으로 RCS를 계산할 수 있다. 식 (8)의 적분은 Gauss 적분법을 이용하여 계산하였다. 적분 오차를 줄이기 위하여 Gauss 차수를 높여가면서 계산하되 이전 차수를 이용하여 계산한 값과

$10^{-4}$  이하의 오차 범위에 이를 때까지 반복하여 적분을 수행하였다.

### 3. 수치기법의 검증

#### 3.1 원형 실린더 및 구의 RCS 계산

본 연구에서 도입한 2차 곡면패치 물리광학법을 검증하기 위하여 우선 해석해가 있는 수학 모형, 즉 원형 실린더와 구에 대하여 수치실험을 수행하였다. 수치해의 수렴성 검증은 RCS 평균오차, 표준편차, 기하학적 오차(용적오차) 등을 고려하여 검토하였다. 반지름  $a$ , 길이  $l$  인 실린더의 RCS의 해석해는  $\sigma = (2\pi/\lambda) \cdot a^2$  이고, 반지름이  $a$  인 구의 RCS는 반지름이 파장에 비하여 매우 클 경우  $\sigma = \pi a^2$  이다.

우선 반지름이  $0.3\text{ m}$  길이가  $0.9\text{ m}$  인 원형 실린더에 주파수  $10\text{GHz}$ 의 전자파가 입사한다고 가정하였다.

평판패치를 사용한 경우(Table 1) 파장당 평판수가 증가할수록 전반적으로 오차가 감소하고 있다. 파장당 평판수가 2개 이상일 경우 RCS의 평균 오차가 0.2%, 표준편차 오차가  $0.78\text{ (m}^2\text{)}$  기하학적 오차(용적)가 0.04%이하로 감소하였다. 따라서 원통형 물체의 RCS를 해석할 경우 평판패치를 파장당 약 2개 이상 분포해야 함을 알 수 있다.

**Table 1.** Convergence of the flat patch scheme for circular cylinder

total patches	16	32	64	128
RCS mean error(%)	0.44	50.10	0.17	<b>0.21</b>
standard dev. ( $\text{m}^2$ )	54.30	16.27	3.96	<b>0.78</b>
volume error (%)	2.55	0.65	0.16	<b>0.04</b>
no. of patches/ $\lambda$	0.25	0.51	1.02	<b>2.04</b>

원형 실린더에 곡면패치 기법을 적용한 경우 (Table 2) 파장당 평판수의 증가에 따라 RCS의

평균 오차는 감소하다가 증가하지만 표준편차는 지속적으로 감소하고 있다. 특히 기하학적 오차는 소수의 패치를 사용하더라도 그 오차가 현저히 줄어들고 있다. 평판패치와 비교하여 파장당 0.5개의 곡면패치를 분포하더라도 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

**Table 2.** Convergence of the curved patch scheme for circular cylinder

total patches	16	32	64	128
RCS mean error(%)	0.91	<b>0.07</b>	0.15	0.2
standard dev. ( $\text{m}^2$ )	3.25	<b>1.87</b>	1.24	0.74
volume error (%)	0.02	<b>0</b>	0	0
no. of patches/ $\lambda$	0.25	<b>0.51</b>	1.02	2.04

**Table 3.** Convergence of the curved patch scheme for sphere

total patches	32	128	162	648
RCS mean error(%)	27.7	5.6	<b>2.78</b>	10.73
standard deviation ( $\text{m}^2$ )	0.19	0.18	<b>0.66</b>	0.68
volume error (%)	0.45	0.02	<b>0.02</b>	0.0
no. of patches/ $\lambda$	0.40	0.80	<b>1.60</b>	3.60

그리고 곡면패치 기법을 반지름이  $0.3\text{m}$ 인 구에 적용하여 수치실험을 수행하였으며 그 결과를 Table 3에 요약하였다. 수치실험에 사용한 입사 주파수는  $1\text{GHz}$ 이다. 구에 대한 RCS의 오평균오차와 기하학적 오차는 평판수의 증가에 따라 감소하다가 증가하는 추세를 보이고 있다. 구 형태의 표적의 경우 파장당 2개 이상의 곡면패치 분포가 요구된다.

Table 1~3의 결과를 종합하면 RCS의 평균오차는 패치수의 증가에 따라 감소하다가 증가하는 경향을 보이고 있다. 따라서 오차가 지속적 감소하면서 수치해가 해석해에 수렴한다기 보다는 진

동하면서 해석해에 수렴하는 것으로 판단된다.

3.2 항공기 날개의 RCS 계산

항공기 날개 문제는 앞전(leading edge)과 날개 표면에서의 반사(specular refelction), 뒷전(trailing edge)의 불연속면에서의 산란(edge diffraction)을 포함하는 복잡한 문제 중의 하나이다. 따라서 항공기 날개의 RCS 계산 문제는 수치계산 결과의 정확도를 확인하는데 자주 사용되고 있다.

수치계산을 위하여 Hu 등(1997)에서 사용한 NACA3317 날개의 제원을 사용하였다. 날개의 폭은 7.6 m (30in), 시위는 폭의 1/5, 입사 주파수는 16GHz이다.

Fig. 4에 날개 표면에서의 곡면패치의 분포를 도시하였다. 패치는 코사인 구간법(cosine spacing)을 이용하여 생성하였으며, 파장당 평판수는 원형 실린더 문제 해석에서 얻어진 결과를 사용하여 정하였다.



Fig. 4 Patch distribution on NACA3317 airfoil

입사방위  $\phi$ 를 0도로 고정하고, 고각  $\theta = -180 \sim +180$ 도 사이를 1도씩 증가하면서 RCS를 계산하였다. 이 경우 고각은 앞전이 90도, 뒷전이 -90도, 윗면(top side)이 0도, 아랫면(bottom side)이  $\pm 180$ 도 등으로 정의된다. Fig. 5에 평판패치와 곡면패치를 사용한 본 연구의 결과를 서로 비교하였다. 적은 수의 곡면패치(36개)의 결과가 다수의 평판패치(54개)의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

그리고 본 연구의 결과를 기 발표된 자료와 비교하기 위하여 Fig. 6에 NURBS 패치를 사용한 Hu 등(1997)의 결과를 도시하였다. 참고로

Fig. 6의 각도(aspect angle)의 정의는 본 연구에서 사용한 정의(Fig. 5)와 반대이다. Fig. 6은 불연속면의 산란효과를 고려하지 아니한 경우의 결과로서 본 연구에서도 이 효과를 고려하지 아니 하였으므로 서로의 결과를 비교하는데 매우 적합한 자료라고 할 수 있다. 2차원 곡면패치를 사용한 본 연구의 결과와 NURBS 패치를 사용한 결과가 전체 고각에 대하여 대체로 잘 일치하고 있다. 뒷전 부근에서 서로 다소의 차이가 있는데 이 부분은 불연속면이므로 날개의 모델링 기법에 따라 수치해가 민감하게 변할 수 있다.

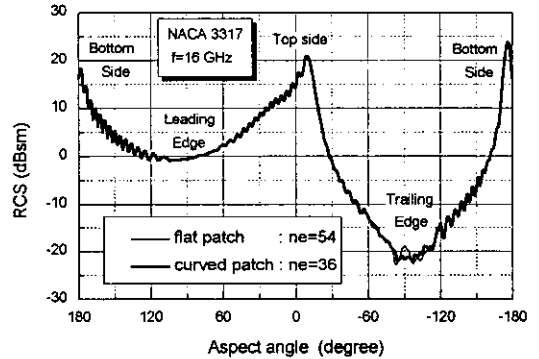


Fig. 5 Comparison of RCS of NACA3317 airfoil (present method)

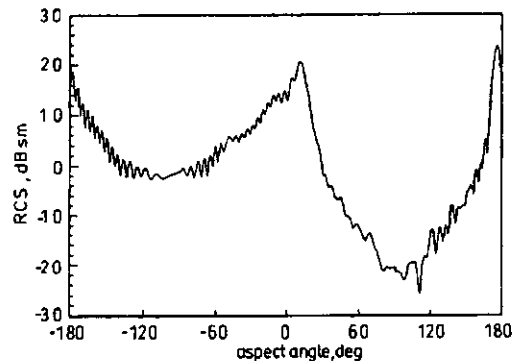


Fig. 6 RCS of NACA3317 airfoil from published data (NURBS patch method)

#### 4. 복합 곡면체의 RCS와 TES 계산 및 검토

잠수함은 선체 대부분이 곡면으로 구성된 복합 곡면 구조물이므로 본 연구에서 개발한 곡면패치 기법을 적용하기에 매우 적절한 대상이다. 대상함정으로 Jane's Fighting Ship 연감에 있는 잠수정을 택하였으며, 재원은 56m×6.2m×5m, 함교(sail)는 NACA0018 단면, 함수는 반구형, 내압동체는 원형 실린더, 함미부는 원뿔, 함미의 수직 및 수평타는 평판이라고 가정하여 모델링하였다. 그리고 내압선체 상부에 위치한 갑판 등은 모델링 대상에서 제외하였다. 파장당 패치의 분포밀도는 원형 실린더 및 구의 문제 해석에서 얻어진 결과와 항공기 날개 실험으로 얻어진 결과를 이용하여 각각의 구조물에 맞도록 결정하였다. 대상함정에 대한 곡면패치 분포 결과를 Fig. 7에 도시하였다.

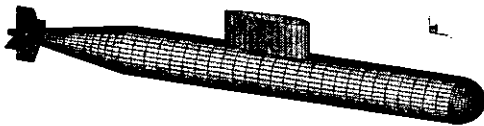


Fig. 7 Patch distribution on submarine

##### 4.1 해상 표적의 RCS

해상 표적의 RCS를 계산하기 위하여 위에서 기술한 Fig. 7의 잠수함이 해면에 부상하여 수상 항해를 한다고 가정하였다. 수상항해를 할 경우 선체의 함교가 완전히 해면에 노출되고 또한 내압선체와 함미 수직타도 부분적으로 해면 위에 노출된다. 따라서 수면 아래에 잠긴 패치는 RCS 계산에서 제외하도록 알고리즘을 조정하였다.

레이더파의 입사각이 90도(해면과 평행)일 경우 전체 방위에 대한 해면 위에 노출된 함정 구조물의 반사에 의한 RCS를 Fig. 8에 도시하였다. 상용화된 대함 및 대공 탐지 레이더의 주파수는 2~4GHz이므로 평균값인 3GHz를 본 연구의 수치실험에 사용하였다. 일반적으로 해상상태(sea state)에 따라 RCS 값이 달라지지만 본 연구에

서는 해면효과를 무시하였다.

함교에 의한 영향 때문에 좌우현(port, STBD) 부근에서 큰 신호가 나타나지만 함미 방향(180도)은 다른 방향의 신호 보다 매우 작게 나타나고 있다. 그리고 선수(bow)를 중심으로 좌우현 60도 사이의 신호는 매우 완만하게 변하고 있다. 방위 90도와 270도에서 나타난 피크(peak) 신호는 함미의 수직타에 기인하는 것으로 판단된다.

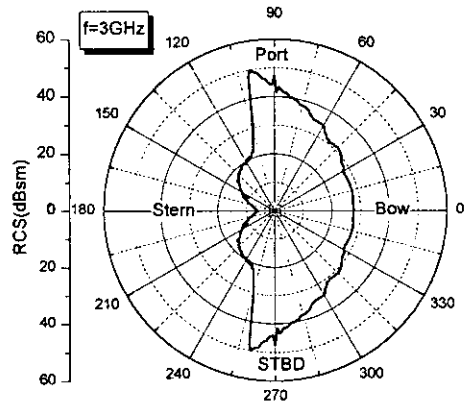


Fig. 8 RCS of surfaced submarine at 90° elevation

##### 4.2 수중 표적의 TES

Fig. 7의 잠수함이 잠수할 경우 전체 구조물이 수중에 있으므로 패치 전체가 물에 잠겨 있다고 가정하여 TES를 계산하였다. 그리고 상용 능동소나의 주파수를 고려하여 5KHz를 소나의 입사주파수로 택하였다.

Fig. 9에 수중음파의 입사각이 90도인 경우 전체 방위에 대한 잠수함의 TES를 도시하였다. 좌우현 방향의 신호가 상대적으로 크며, 특히 방위 90도와 270도에서는 선미 수직타에 의한 영향 때문에 큰 피크 신호가 나타났다.

Fig. 10에 수중음파의 입사방위가 0도인 경우 전체 고각에 대한 TES를 도시하였다. Fig. 1의 구면좌표계에서 고각은 0°~±180°로 변하지만 Fig. 9에서는 편의상 -180°~0°를 180°~360°

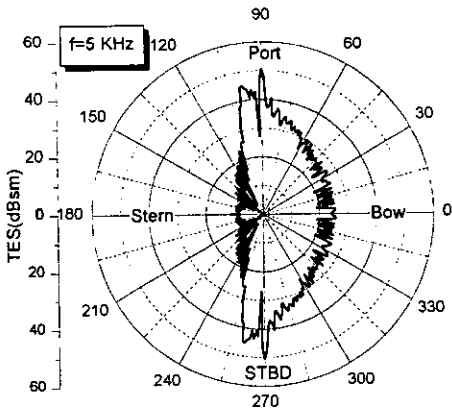


Fig. 9 TES of submarine at 90° elevation

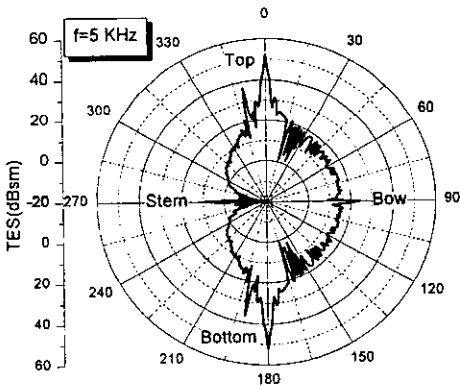


Fig. 10 TES of submarine at 0° azimuth

로 나타내었다. 선수방향에서 음파가 입사하는 경우는 선수 중심부근의 반사영향. 그리고 위(top)와 아래(bottom) 방향에서 입사하는 경우는 선미 수평타의 반사영향으로 피크 신호가 발생하였다. 그리고 약 193도와 347도 방향의 피크 신호는 함교의 영향이라고 판단된다.

수중음파의 반사에 크게 기여하는 반사 구조물 위 위치를 구체적으로 확인하기 위하여 0도, 270도, 315도 방위에서 음파가 입사하는 경우 각각의 입사방향에서 보이는 함정의 형상과 TES의 등고선을 Fig. 11~13에 도시하였다. 여기서 수중음파의 입사각은 90도로 고정하였다. TES

등고선은 TES의 최대값으로 무차원화(normalization)하였기 때문에 등고선의 밝은 부분이 어두운 부분에 비하여 상대적으로 반사가 큰 곳이다.

선수방향(방위 0도)에서 수중음파가 입사할 경우(Fig. 11) 수중음향 반사강도는 선수 중심(nose)에서 가장 크고, 함교 앞부분에서도 소량의 반사가 관측되고 있다.

그리고 우현방향(방위 270도)에서 입사할 경우(Fig. 12)는 함미의 수직타와 함교의 앞 중간 부분이 주요 반사체이고, 이외에도 동체의 중앙부에서도 국부적으로 반사가 관측되고 있다.

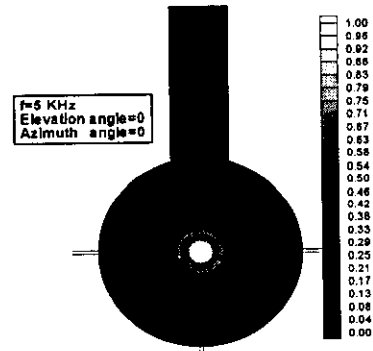


Fig. 11 Scattering surface and TES contour at 0° azimuth, 90° elevation



Fig. 12 Scattering surface and TES contour at 270° azimuth, 90° elevation



Fig. 13 Scattering surface and TES contour at 315° azimuth, 90° elevation



우현 선수방향(방위 315도)에서 입사하는 경우 (Fig. 13)는 함수 부분과 함교의 일부가 반사체임을 알 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

저탐지 합정 설계를 위하여 설계 초기단계에 신속히 RCS나 TES를 예측, 합정설계에 반영하는 것은 중요한 설계 요소중의 하나이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 물리광학법을 이용하여 완전반사 곡면물체의 RCS와 TES를 개략적으로 예측하는 기법을 개발하였다. 따라서 RCS와 TES의 정확한 예측보다는 전체 구조물 중에서 합정 신호에 크게 영향을 미치는 주요 반사체의 위치를 찾아내는데 초점을 맞추었다.

평판패치를 이용한 물리광학법의 단점을 보완하기 위하여 2차 곡면패치를 이용한 물리광학법을 도입하였다. 본 연구의 기법을 대표적인 곡면체인 원형 실린더와 구의 RCS 계산에 적용하여 수치기법을 검증하였다. 그리고 NACA3317 날개의 RCS 계산결과를 기 출판된 자료와 비교하여 수치기법을 추가 검증하였다.

또한 본 연구의 기법을 잠수함에 확장 적용하여 수상항해시의 RCS와 완전잠수 항해시의 TES를 각각 계산하였다. 수상항해시 레이더 파의 입사 각이 수면과 평행할 경우 레이더 파의 주요 반사 구조물은 함교와 함미 수직타임을 확인할 수 있었다. 그리고 완전히 잠수한 잠수함의 TES는 수중음파의 입사 방위와 고각에 따라 크게 다르게 나타났다. 좌우현 방향에서 수중 음파가 입사할 경우의 신호가 다른 방향에서 입사하는 경우의 신호보다 상대적으로 크며, 이때 음파 반사의 주요 구조물은 함교, 내압선체, 선미타 등이고, 선수방향에서 입사할 경우는 선수부 등으로 나타났다.

향후 수치기법의 정도를 높이기 위하여 불연속점의 산란을 포함한 예측기법의 개발이 추가로 요구된다. 그리고 이면각 구조물 등과 같은 다중반사체를 해석하기 위한 기법의 보완도 필요하다.

## 후 기

본 연구는 해군사관학교 해군해양연구소의 부분적인 연구비 지원(1999년도)에 의하여 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- 김세운 1997 "고해상도 ISAR Imaging.에 관한 연구," 국방과학연구소 연구결과보고서, TMED-417-971510.
- 양한진, 부성윤 1997 "고차경계요소법을 이용한 합정단면의 RCS 계산," 대한조선학회 추계학술대회 논문집.
- 최삼욱, 부성윤 2000 "물리 광학법을 이용한 합정 구조물의 레이더 반사면적 계산," 대한조선학회 논문집, 제37권, 4호.
- Domingo, M., Rivas, F., Perez, J. Torres, R.P. 1995 "Computation of the RCS of Complex Bodies Modeled Using NURBS Surfaces," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 37, No. 6.
- Hu, J.-L., Lin, S.-H., Wang, W.-B. 1997 "Computation of PO Integral on NURBS Surface and its Application to RCS Calculation," Electronics Letters, January, Vol. 33, No. 3.
- Marston, P.L. 1997 "Quantitative Ray Methods for Scattering," Encyclopedia of Acoustics, edited by Malcolm J. Crocker, John Wiley & Sons.
- Rothwell, D.J. 1996. "HIGHLIGHTS: A Suit of Codes for Radar Cross Section and Target Echo Strength Prediction," IEE, Colloquium on Common Modelling Techniques for Electromagnetic Wave and Acoustic Wave Propagation.
- Urick, R.J. 1983 "Principles of Underwater Sound," McGraw-Hill Book Co.
- Wang, S.-Y., Jeng, S.-K. 1997 "A

Deterministic Method for Generating a Scattering Center Model to Reconstruct the RCS Pattern of Complex Radar Targets," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 39, No. 4.

- West, M.A. 1997 "Practical Aspects of Developing Low Radar Signature Surface Ship," Proc. IMDEX.