

수중표적에 대한 고주파수 음향산란 해석

김국현^{†*}, 조대승^{**}, 김종철^{***}

(주)한진중공업 특수선설계팀^{*}
부산대학교 조선해양공학과^{**}
국방과학연구소 제2체계개발본부^{***}

High Frequency Acoustic Scattering Analysis of Underwater Target

Kookhyun Kim^{†*}, Dae-Seung Cho^{**} and Jong-Chul Kim^{***}

Hanjin Heavy Industries & Constructions Co. Ltd.^{*}
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University^{**}
Agency for Defense Development^{***}

Abstract

A mono-static high frequency acoustic target strength analysis scheme was developed for underwater targets, based on the far-field Kirchhoff approximation. An adaptive triangular beam method and a concept of virtual surface were adopted for considering the effect of hidden surfaces and multiple reflections of an underwater target, respectively. A test of a simple target showed that the suggested hidden surface removal scheme is valid. Then some numerical analyses, for several underwater targets, were carried out: (1) for several simple underwater targets, like sphere, square plate, cylinder, trihedral corner reflector, and (2) for a generic submarine model. The former was exactly coincident with the theoretical results including beam patterns versus azimuth angles, and the latter suggested that multiple reflections have to be considered to estimate more accurate target strength of underwater targets.

※Keywords: High frequency acoustic scattering(고주파수 음향산란), Underwater target(수중표적), Sonar cross section(소나 단면적), Target strength(표적강도), Kirchhoff approximation(키르코프 근사), Hidden surface removal(은연삭제), Multiple reflection effect(다중반사 효과)

접수일: 2005년 4월 2일, 승인일: 2005년 6월 15일

† 주저자, E-mail: kimkh@hanjinsc.com

Tel: 051-410-8013

1. 서론

전통적으로 음파는 수중에서 쓰이는 가장 효과적인 통신 및 탐지수단 중 하나이다. 이에 음파를

이용하는 소나(sonar)는 수중함 및 기뢰 탐지, 해저면 탐사, 어군탐지 등의 군사용 및 상업용으로 널리 사용되고 있다. 소나는 목적에 따라 수동소나와 능동소나로 구분되나, 최근 수중함의 저소음화 기술이 발전함에 따라 수동소나보다는 능동소나가 군사적 중요성을 더해가고 있다(Tyler 1992).

능동소나의 성능은 음향출력(source level), 지향성(directivity index), 탐지문턱(detection threshold) 등의 소나 자체성능 뿐 아니라 음파전달손실(transmission loss), 주변소음수준(ambient noise level) 등의 해양특성과 대상체의 표적강도(target strength; TS)에 의해 크게 영향을 받는다. 이들 인자 중 수중함과 같은 수중함의 탐지 목적으로 능동소나를 운용할 경우에는 운용해역의 음향특성을 알고 있는 경우가 대부분이므로, 표적강도가 수중함 탐지 성능에 가장 중요한 요소가 된다. 따라서, 적 능동소나로부터 수중함의 피탐지 확률을 낮추기 위해서는 이의 표적강도를 저감시키는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 수중함의 표적강도 저감 설계는 축소 모형시험이나 수치해석적 방법으로 수행한다. 이에 세계 각국에서는 수중함 설계 목적으로 다양한 이론을 적용한 표적강도 해석 프로그램을 개발·운용하고 있으며, Schneider et al.(2003)은 이들의 정확도를 비교하고자 benchmark 시험을 수행한 바 있다.

한편, 국내에서는 부성운(2001)과 최영호 등(2005) 등이 수중함 형상의 표적강도 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다. 이들 연구에서는 Kirchhoff 근사방법을 적용하여 단일반사가 지배적인 단순형상에 대한 고주파수 표적강도 해석에는 적합하나, 복잡한 형상을 갖는 수중함의 은면(hidden surface) 및 다중반사 효과를 평가하기에는 원리적으로 곤란하다.

본 연구에서는 단일 반사는 물론 다중반사 효과를 고려한 수중함의 표적강도 해석을 위하여 원거리 Kirchhoff 근사식을 기반으로 은면 처리가 가능하고 다중반사를 고려할 수 있는 고주파수 표적강도 해석기법을 개발하였다. 제시된 방법의 타당성은 은면처리의 경우 임의 표적에 대한 은면 산정시험, 해석 정확도의 경우 이론해를 갖는 단순

표적과 수중함 압력선체 형상에 대한 해석 결과를 이론해 또는 기존 프로그램 해석결과와의 비교·검토에 의해 수행하였다. 또한, 제시된 방법의 유용성을 확인하고자 이상화된 가상 수중함 표적에 대한 수치해석을 통해 다중반사 효과가 표적강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

2. 표적강도 해석 이론

2.1 가시면의 표적 강도

소나가 수중표적으로부터 무한히 멀리 떨어져 있는 경우 소나 단면적 σ (far-field sonar cross section)은 평면파로 입사되는 파의 압력 p_i 에 대해 표적 반사 후 구면파로 산란되는 파의 압력 p_s 의 거리 감쇠 효과를 고려하여 식 (1)과 같이 정의되며, 표적강도 TS와는 식 (2)와 같은 관계를 갖는다(New et al. 1974).

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(4\pi r^2 \frac{|p_s|^2}{|p_i|^2} \right) \quad (1)$$

$$TS = 10 \log \frac{\sigma}{4\pi} \quad (2)$$

여기서, r 은 소나와 수중표적간의 거리이다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 일정한 반사율을 갖는 단일평판이 직교좌표 원점 근방에, 능동소나가 표적으로부터 z-축방향으로 충분히 먼 거리에 위치해 있을 경우, 입사파는 평면파로 간주할 수 있고, 수중표적의 크기가 음파의 파장보다 충분히 크다고 가정하면 소나 단면적 σ 는 Kirchhoff 근사식을 이용하여 식 (3)과 같은 위상 적분식으로 유도된다(김국현 등 2005). 또한, 식 (3)을 식(2)에 대입하면 고주파수 원거리 표적강도 계산식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{k^2}{\pi} \left| R \int_S e^{-2jkz} dx dy \right|^2 \quad (3)$$

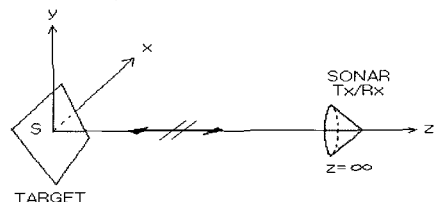


Fig. 1 Coordinate systems

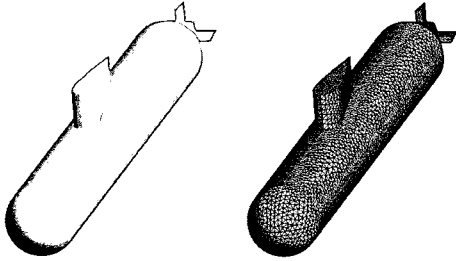


Fig. 2 Target modeling: (a) a target surface model and (b) a finite flat surface model.

$$TS = 10 \log \left[\frac{k^2}{4\pi^2} \left| R \int_S e^{-2jkz} dx dy \right|^2 \right] \quad (4)$$

여기서, k 는 파수(wavenumber)로 $2\pi f/c$ 이며, j 는 $\sqrt{-1}$, f 는 주파수(Hz), c 는 음속으로 수중에서는 약 $1,500m/s$ 이다. 또한 R 은 표적면의 복소 반사계수(complex reflection coefficient), S 는 수중표적의 표적면을 나타내며, x, y, z 는 Fig. 1에 나타난 표적면의 위치좌표에 해당한다.

식 (4)의 위상 적분식은 표적면이 평면일 경우 해석 해(Klement et al. 1988)를 갖는다. 따라서, 수중 표적면을 Fig. 2에 보인 바와 같이 삼각 또는 사각 평면체의 결합체로 나타내면 전체 표적강도는 각각의 평면에 대한 표적강도를 합하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$TS = 10 \log \left[\frac{k^2}{4\pi^2} \left| \sum_{i=1}^N R_i \int_{S_i} e^{-2jkz} dx dy \right|^2 \right] \quad (5)$$

여기서, N 은 표적면의 분할개수, R_i 는 각 분할면 S_i 에서의 반사계수를 나타낸다.

2.2 가시면과 은면 처리 방법

수중표적을 나타내는 분할 평면들 중에서 음파에 대한 가시면(visual surface)만이 표적강도에 기여한다. 따라서, 볼록 면(convex surface)과 오목 면(concave surface) 등이 혼재하는 복잡한 수중 표적면에 대해 단일 및 다중 반사 효과에 의한 표적강도를 산정하기 위해서는 가시면과 은면

(hidden surface)에 대한 효율적 판별이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 표적면을 구성하는 평면 요소들의 크기에 상관없이 삼각형 빔에 해당하는 음파와 이에 조사되는 표적면과의 교정을 이용하여 가시면을 삼각형 면으로 자동 재분할하는 적응 삼각형 빔 방법(김국현 등 2005, Klement et al. 1988)을 적용하였다. Fig. 3에는 직육면체에 삼각형 빔에 해당하는 음파가 조사될 경우 가시면과 은면을 구분해 내는 절차를 예시한 것이다.

2.3 다중반사 효과

복잡한 형상을 갖는 수중표적에 대한 음파의 다중반사 효과에 의한 표적강도를 고려하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4에 보인 바와 같은 가상면(virtual surface) 개념을 도입하였다(김국현 등 2005, Klement et al. 1988). 즉, Snell 법칙을 이용하여 단일 반사가 일어나는 가시면에 대해 2차 이상의 반사가 일어나는 반사면을 추적한다. 이때, 반사면의 표적강도 기여분은 입사파의 진행 방향에 반사 경로 길이의 절반에 해당하는 곳에 위치한 가상면을 이용하여 식 (5)로 계산한다. 여기서, 다중반사면은 Fig. 3에 제시된 절차로 파악된 은면에 해당한다.

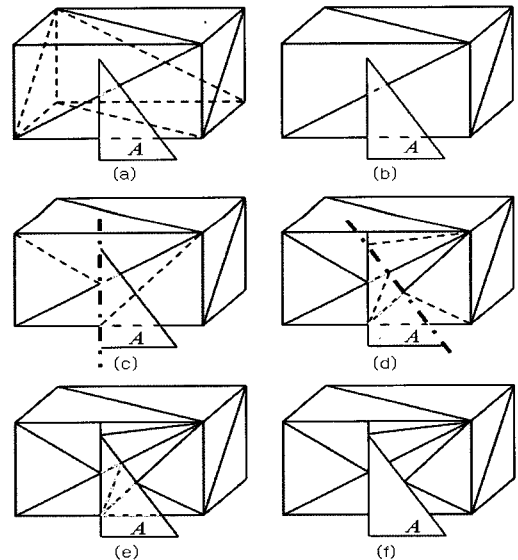


Fig. 3 Hidden surface removal procedure

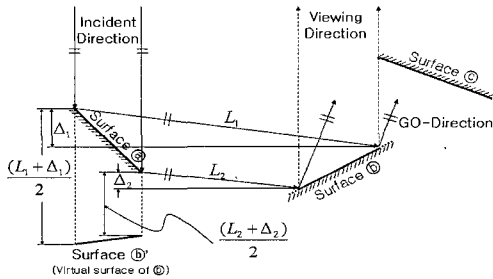


Fig. 4 Virtual surface concept

3. 수치해석 및 고찰

본 연구에서 적용한 표적강도 해석기법의 타당성과 정확도는 가시면 산정 정확성, 이론해를 갖는 단순표적형상과 기존 수치해석 결과가 있는 압력선체 형상에 대한 표적강도 해석, 이상화 수중함 형상에 대한 다중반사 효과 평가 등으로 나누어 검토하였다. 수치해석에 있어서 표적면은 완전 반사체($R = 1$)로 가정하였다.

3.1 가시면 분할 알고리즘 검증

2.2절에 제시된 가시면 분할 알고리즘의 정확도 검토를 위해 은면을 갖는 단순표적에 대한 가시면/은면 분할 수치시험을 수행하였다. Fig. 5는 수치시험 모델과 그 결과를 나타낸 것이며, 입사 음파에 대한 가시면들이 적응 삼각형 빔 방법에 의해 삼각형 면으로 적절히 자동 분할됨을 확인할 수 있다. 여기서, 음파의 입사방향은 방위각(θ) 330도, 고각(ϕ) 10도이다.

3.2 이론 해를 갖는 단순 표적

구, 평판, 원통, 3중 반사구조체 등 이론해(Urick and Pryce 1953)를 갖는 단순표적에 대한 표적강도 해석을 수행하고, 그 결과를 Table 10에 해석조건 및 이론 해와 함께 나타내었다.

또한, Table 10에 나타낸 평판을 대상으로 고각 0도일 경우 방위각이 -90도에서 90도까지 0.1도 간격으로 변화할 때의 표적강도 해석 결과를 이론 해와 함께 Fig. 6에 나타내었다. 이로부터 단순표적에 대한 표적강도 해석결과는 이론해와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

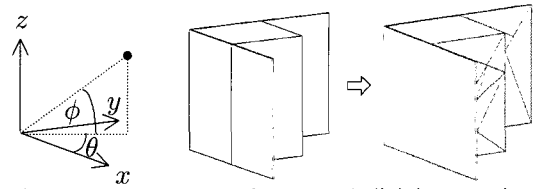


Fig. 5 Target surface subdivision using hidden surface removal and adaptive triangular beam method

Table 1 Target strength of simple-shaped targets with exact solutions

Target	Shape	Theoretical TS		Theory
				Present
sphere		$\frac{a^2}{4}$	a:radius	-6.02 dB
				-6.02 dB
square plate		$(\frac{b^2}{\lambda})^2$	b:edge length	30.46 dB
				30.46 dB
cylinder		$\frac{cL^2}{2\lambda}$	c:radius L:Height λ :wave length	12.22 dB
				12.23 dB
triangular corner reflector		$\frac{d^4}{3\lambda^2}$	d:height λ :wave length	25.69 dB
				25.69 dB

주) $a = b = c = d = L = 1m$, $\lambda = 0.03m$

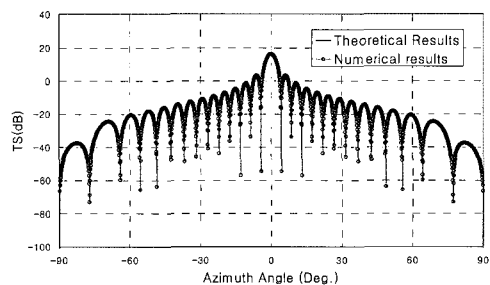


Fig. 6 Comparison between numerical and theoretical results for 1m x 1 m square plate (Frequency: 10 kHz, Elevation angle: 0 degree, Azimuth angle: -90 to 90 degrees)

3.3 압력 선체 형상

음파의 파장과 비교하여 상대적으로 큰 수중체를 대상으로 본 연구에서 적용한 해석 방법의 정

확도를 검증하고자 길이 40m, 직경 7m인 원통 양끝에 반경 4m인 반구가 붙어 있는 압력선체 형상에 대해 주파수 200 Hz와 1 kHz에서의 표적강도 해석을 수행하고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이에는 외국 기관에서 운용중인 표적강도 해석 프로그램들에 의한 결과(Schneider et al. 2003)도 함께 나타내었는데 본 연구에서 제시한 결과가 대부분의 타 기관 해석 결과와 부합성이 높음을 확인할 수 있다. 특히, 비교적 저주파수 영역인 200Hz에서는 본 연구에서와 동일한 고주파수 해석기법을 적용한 해석결과 (KOCKUMS, DSTO) 뿐만 아니라 저주파수 영역에서 적합한 것으로 알려진 경계요소법을 적용한 해석결과 (DRDC-AV, FOI-BIE)와도 잘 일치하고 있어 본 연구에서 제시한 해석방법이 중고주파수 대역에서의 표적강도 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료한다.

3.4 이상화 수중함 형상

음파의 다중 반사 효과가 수중함의 표적강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 8에 나타난 이상화 수중함 형상을 대상으로 주파수 10 kHz에서 고각(ϕ)와 방위각(θ)이 각각 360도 변화할 때 0.2도 간격으로 5차 반사까지 고려한 표적강도 해석을 수행하였다. 또한, 해석결과는 미세 각도 변화시 수치 해석 결과의 변동성(fluctuation)을 줄이고자 3도 간격의 선형 창필터(linear window filter)를 이용하여 1도 간격으로 정리하였다.

Fig. 9에는 상기와 같이 산정한 표적강도 수치 해석결과를 전체 표적강도와 반사 효과가 뚜렷하게 나타난 3차 반사까지의 반사차수별 기여도를 나타내었다. 이로부터 상기 이상화 수중함의 표적강도는 대부분의 방위각과 고각에서 단일 반사 영향이 가장 지배적임을 확인할 수 있다. 그러나, 방위각 37도, 323도, 고각 37도, 323도 등에선 함미 수평/수직타와 선미부의 상호 간섭효과 등에 의해 3차 반사영향이 단일 반사영향과 비교하여 크거나 대등하게 나타남을 확인할 수 있다. 따라서 수중함과 같은 수중 표적의 정밀 표적강도 해석 및 저감설계를 위해서는 다중반사 효과를 반드시 고려해야 한다고 판단한다.

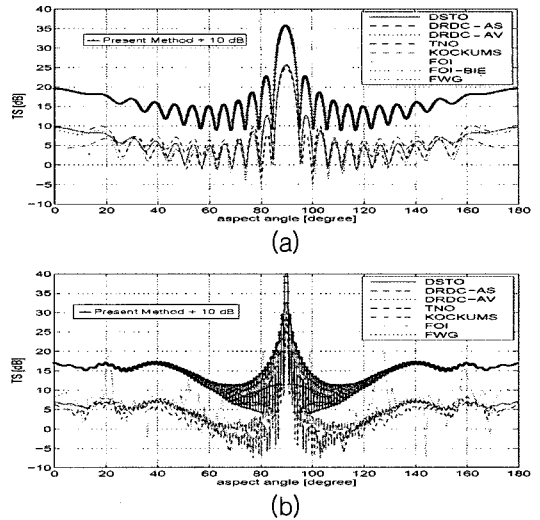


Fig. 7 Target strength of the rigid pressure hull at (a) 200Hz and (b) 1kHz.

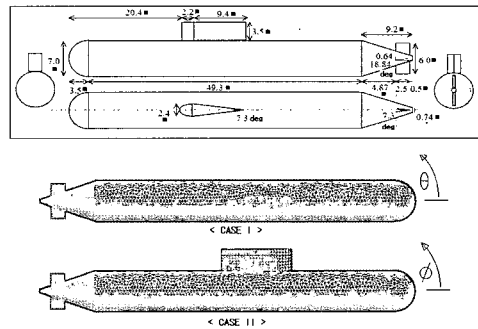


Fig. 8 A generic submarine model and TS calculation directions(CASE I & CASE II)

4. 결 론

본 연구에서는 음면 및 다중 반사 효과를 고려한 수중체의 표적강도 해석을 위하여 Kirchhoff 근사식을 적용하되 적응 삼각형 빔 방법과 가상면 개념을 도입한 원거리 고주파수 표적강도 해석기법을 개발하였다. 또한, 제시된 방법의 타당성과 정확도는 이론해를 갖는 단순 표적형상과 기존 수치 해석 결과가 있는 압력선체 형상에 대한 표적강도 해석을 수행하여 확인하였다.

아울러, 수중체의 다중 반사효과를 평가하기 위하여 이상화 수중함 형상에 대한 표적강도 해석을

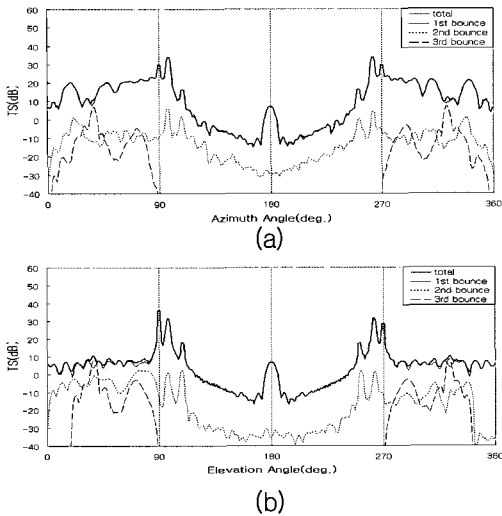


Fig. 9 Target strength for the number of reflection versus variations of (a) azimuth angles (CASE I) and (b) elevation angles (CASE II) at the frequency of 10 kHz.

수행한 결과 대부분의 음파 입사각도에 대해선 단일 반사 효과가 지배적이나 일부 방위각과 고각에서는 수중함 형상의 상호 간섭효과로 인해 다중 반사 효과가 단일 반사 효과와 대등하거나 큼을 확인하였다. 따라서, 수중함과 같이 표적강도 저감이 중요한 구조물에 대한 표적강도 해석은 다중 반사효과를 반드시 고려해야 한다고 판단한다.

한편, 수중함 등에 대한 고정도 표적강도 해석과 저감설계를 위해서는 향후 본 연구에서 고려하지 않은 유체로 채워진 내부 탱크효과에 관한 연구가 필요하다고 판단한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김국현, 김진형, 조대승, 2005, "Object Precision 방법을 이용한 복합 구조물의 RCS 해석," 대한조선학회 논문집, 제 42권, 제 2호, pp. 159-164.

- 부성윤, 2001, "곡면패치 물리광학법을 이용한 곡면체의 RCS 및 TES 계산," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 1호, pp. 62-71.
- 최영호, 신기철, 유진수, 김재수, 주원호, 김영현, 박종현, 최상문, 김우식, 2005 "수중물체에 대한 음향 표적강도의 수치해석과 실험적 검증", 한국해양공학회지, 제 19권, 제 1호, pp. 64-70.
- Klement, D., Preissner, J., and Stein V., 1988, "Special problems in applying the physical optics method for backscatter computation of complicated objects," IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. 36, No. 2, pp. 228-237.
- New, R., Andrew, F.A., Brill, D.W., Eisler, T.J., and Uberall, H.M., 1974, Technology Transfer / A Case Study: Target Strength, Catholic University of California.
- Schneider, H.G., Berg, G., and Gilroy, L., 2003, "Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop", ICSV10, pp. 2475- 2482.
- Tyler, G.D., 1992, "The Emergency of Low-frequency Active Acoustics for as a Critical Antisubmarine Warfare Technology", John Hopkins APL Technical Digest, Vol.13 No.1, pp. 145-159.
- Urick, R.J., and Pryce, A.W., 1953, A Summary of Underwater Acoustics Data: Part II Target Strength, ONR.



< 김 국 현 >



< 조 대 승 >



< 김 중 철 >