

## 수중물체에 대한 음향 표적강도의 수치해석과 실험적 검증

최영호\* · 신기철\* · 유진수\* · 김재수\* ·  
주원호\*\* · 김영현\*\* · 박종현\*\* · 최상문\*\*\* · 김우식\*\*\*  
\*한국해양대학교 해양개발공학부, \*\*현대중공업 선박해양연구소, \*\*\*국방과학연구소

### Numerical Modeling and Experimental Verification for Target Strength of Submerged Objects

YOUNG-HO CHOI\*, KEE-CHUL SHIN\*, JIN-SU YOU\*, JEA-SOO KIM\*  
WON-HO JOO\*\*, YOUNG-HYUN KIM\*\*, JONG-HYUN PARK\*\*, SANG-MUN CHOI\*\*\* AND WOO-SHIK KIM\*\*\*

\*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

\*\*Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Ind. Co., Ltd, Busan, Korea

\*\*\*Agency for Defense Development, Busan, Korea

KEY WORDS: Target Strength 표적강도, Kirchhoff Approximation 키르히호프 근사법, Active Detection 능동탐지, Specular Reflection 거울면반사, Scale Target 축소표적

ABSTRACT: Target Strength(TS) is an important factor for the detection of the target in an active sonar system: thus the numerical model for the prediction of TS is widely being developed. For the frequency range of several kHz, the most important scattering mechanism is known to be specular reflection, which is largely affected by the geometrical shape of the target. In this paper, a numerical algorithm to predict TS is developed based on the Kirchhoff approximation which is computationally efficient. The developed algorithm is applied to the canonical targets of simple shapes, for which the analytical solutions exist. The numerical results show good agreement with the analytical solutions. Also, the algorithm is applied to more complex scatterers, and is compared with the experimental data obtained in the water tank experiment for the purpose of verifying the developed numerical model. Discussions on the effect of spatial sampling and other aspects of numerical modeling are presented.

### 1. 서 론

음파는 수중통신, 수중물체 탐지, 해저측량, 해저지층 탐사 등 다양한 수중분야에 적용되고 있으며, 대부분의 경우 활발한 연구 활동과 해외 교류를 통해 국내의 기술 집적도가 높은 편이다. 그러나 수중물체 탐지분야는 군사적 특수성으로 인한 선진국들의 자국 기술력 보호로 기술 집적도가 낮은 편이어서 많은 연구가 수행되어야 한다. 본 논문에서는 수치해석과 실험검증을 통한 수중 물체의 탐지의 한 분야인 표적강도를 연구하였다.

수중음향학에서 표적강도(Target Strength, TS)는 음향산란체의 음파 반사정도를 나타내는 척도로서 식 (1)과 같이 음향산란체로 입사되는 음파의 세기(incident intensity:  $I_{inc}$ )와 음향산란체에서 반사되는 음파의 세기(reflect intensity:  $I_{ref}$ )의 비로 정의된다.

표적강도는 능동소나방정식(active sonar equation)의 중요한 변수로서 탐지측면에서는 음향산란체의 능동탐지(active

detection)확률을 좌우하는 변수가 되고, 설계측면에서는 수중음향 음향 설계 매개변수(design parameter)로 사용된다. 식 (2)에서  $EL$ 은 반향음 준위(Echo Level),  $SL$ 은 음원준위(Sound source Level),  $TL$ 은 음향 전파에 따른 전달손실(Transmission Loss),  $TS$ 는 표적강도(Target Strength),  $NL$ 은 소음준위(Noise Level),  $DI$ 는 음원의 지향성지수(Directivity Index)이다.

$$TS = 10 \log_{10} \frac{I_{ref}}{I_{inc}} \quad (1)$$

$$EL = SL - 2TL + TS - NL + DI \quad (2)$$

Fig. 1은 음향산란체의 음향산란 메커니즘(mechanism)으로 파수(wave number)와 음향산란체의 크기에 따라 음향산란 영역이 결정되며, 각각의 음향산란 영역은 고유의 음향산란 특성을 가진다. 현대 소나(sonar)시스템의 음향산란 영역은 Fig. 1에 나타난 것처럼 대부분이 물리광학 영역(physical optics region)과 기하광학 영역(geometric optics region)에 속하며, 이들 영역에 음향산란 특성은 거울면반사(specular reflection) 특성을 보인다. 거울면반사 특성은 음향산란체의 기하학적 형상에 의해 지배되기 때문에 음향산란체의 기하학적 형상을 알 수 있다면, 수치해석을 통한 표적강도의 해석 및 예측이 가능하다.

제1저자 최영호 연락처: 부산광역시 영도구 동삼2동

051-410-4979 yhchoi@bada.hhu.ac.kr

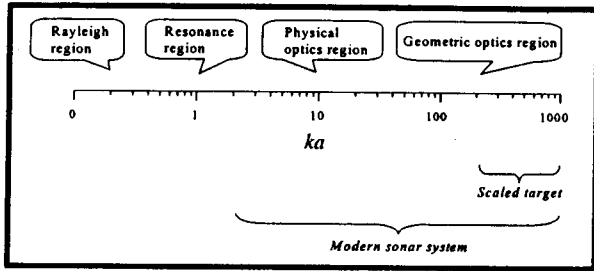


Fig. 1 Acoustic scattering physics, K(wave number), a(target dimension)

현재까지 알려진 표적강도 수치해석 기법으로는 FEM(Finite Element Method), GTD(Geometrical Theory of Diffraction), BIE(Boundary Integral Equation), BEM(Boundary Element Method), Kirchhoff approximation 등이 있다(Schneider et al., 2003).

수치해석시  $ka$  값이 커질수록 즉, 탐지 주파수가 높아지거나 음향산란체의 크기가 커질수록 계산량이 늘어나고, 이에 따른 수치오차도 커진다. 그러나 Kirchhoff approximation은 고주파 근사해법으로 이러한 문제점을 극복(Medwin and Clay, 1998) 할 수 있어, 현재 가장 많이 사용되고 있다(Schneider et al., 2003). 본 연구에서는 이러한 점에 의거하여 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발 및 검증하였다.

프로그램의 개발 언어는 Matlab을 이용하였고, 성능 검증에는 이론해가 알려진 단순형상 음향산란체의 이론해 검증과 축소모형 음향산란체의 실험 검증이 수행 되었다. 이론해 검증은 구형, 원통형 두 가지의 단순형상 음향산란체를 검증하였고, 실험 검증은 잠수함 형태의 세 가지 축소모형 음향산란체를 검증하였다.

## 2. 표적강도 수치해석

표적강도 수치해석은 음향산란체의 표면을 요소망 생성(mesh generation)을 통해 수치적으로 근사시키기 때문에 이로 인한 수치계산 오차를 수반한다. 또 일부 수치해석 기법에서는 음향산란체의 외부 형상만을 고려하기 때문에 표면을 투과하여 내부에서 재방사(reradiation)되는 음파의 효과를 해석하기 어렵다는 단점도 있다. 그러나 해석시간과 비용면에서 실험적 해석에 비해 경제적이며, 복잡한 형상의 해석이 가능하다는 장점으로 인해 음향산란체의 표적강도 해석에 많이 이용되고 있다. 현재 여러 국가에서 표적강도 수치해석 프로그램을 개발하여 사용하고 있고, 서론에서도 언급했듯이 여러 가지 수치해석 기법 중 Kirchhoff approximation이 많이 이용되고 있음을 Table 1에서 확인할 수 있다.

Table 1. Numerical analysis programs for Target Strength (Schneider et al., 2003)

Participants	Affiliation	Code	Method
R. Berg	Kockums (SE)	ARTES	Kirchhoff
L. Gilroy	DRDC (CA)	BASIS AVAST ASBIEM	GTD FEM/BEM BIE
I. Karasalo	FIO (SE)	XFEM-S	BIE Kirchhoff
I. MacGillivray	DSTO (AU)	Model 3	Kirchhoff
M. Ter Morshuizen A. Volker	TNO-TPD (NL)	RASP	Fraunhofer/ Kirchhoff
H. G. Schneider Ch. Fiedler	FWG (GE)	ZIELMA SYSNOISE	Kirchhoff BEM

\* SE(sweden), CA(canada), AU(australia), NL(netherlands), GE(germany)

음향산란체에서 반사된 음장은 음향산란체 표면의 법선방향 면적 적분식인 식 (3)의 Helmholtz-Kirchhoff 적분으로 표현된다 (Medwin and Clay, 1998).

$$U(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left[ U \frac{\partial}{\partial n} \left( \frac{e^{-ikR}}{R} \right) - \left( \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right) \right] ds \quad (3)$$

여기서  $U(x, y, z, t)$ 는 시공간상의 음압,  $U$ 는 표적 표면에서의 음압,  $k$ 는 파수,  $R$ 은 음원과 표적 표면요소간의 거리,  $n$ 은 법선 방향을 의미한다.  $U$ 는 반사계수(reflection coefficient)  $R$ 을 통하여 식 (4)와 같이 표현되고, 이를 통해 식 (3)은 식 (5)와 같은 1차 Kirchhoff approximation으로 유도된다.

$$U = R U_s, \quad \frac{\partial U}{\partial n} = -R \frac{\partial U_s}{\partial n} \quad (4)$$

$$U(x, y, z, t) = \frac{R}{4\pi} \int_s \frac{\partial}{\partial n} \left( U_s \frac{e^{-ikR}}{R} \right) ds \quad (5)$$

Fig. 2의 기하학적 조건을 이용하여  $U_s$ 는 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며, 식 (6)을 이용하여 식 (5)는 식 (7)과 같은 Fresnel approximation으로 표현된다.

$$U_s = P_{inc} \approx \frac{P_0 R_0 D \exp(-ikR_s)}{R_s} \quad (6)$$

여기서  $P_{inc}$ 는 음원으로부터 입사된 음압,  $D$ 는 음원의 방향성(directionality),  $P_0$ 는 기준 음압(reference pressure),  $R_0$ 는 기준

거리(reference distance)를 의미한다.

$$P(f) = \frac{P_0 R_0 R}{4\pi} \int_s D \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{\exp[-ik(R_R + R_S)]}{R_R R_S} \right\} ds \quad (7)$$

여기서  $R_S$ 는 음원과 음향산란체 표면요소간의 거리,  $R_R$ 는 수신기와 음향산란체 표면요소간의 거리를 의미한다.

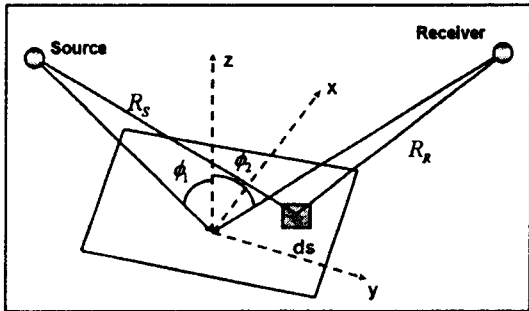


Fig. 2 Schematics of Kirchhoff approximation

Fig. 2의 기하학적 조건을 이용하면 식 (7)의 법선방향 편미분 항은 식(8)과 같이 근사할 수 있으며, 이를 이용하여 식 (7)을 최종적으로 식 (9)와 같이 표현할 수 있다. 식 (9)에서  $N$ 은 음향산란체표면 요소망의 요소수를 의미한다.

$$\frac{\partial W}{\partial n} = -ik(\cos \phi_1 + \cos \phi_2) W, \quad W = \frac{\exp[-ik(R_R + R_S)]}{R_R R_S} \quad (8)$$

$$P(f) = \frac{P_0 R_0 R}{4\pi} \sum_{j=1}^N -ik(\cos \phi_1 + \cos \phi_2) \left\{ \frac{\exp[-ik(R_{R_j} + R_{S_j})]}{R_{R_j} R_{S_j}} \right\} \quad (9)$$

### 3. 이론해 검증

#### 3.1 구형 음향산란체 검증

Kirchhoff approximation은 거울면반사 특성을 고려한 해석 기법 이므로 검증은 구형 음향산란체의 물리광학영역 표적강도 이론해인 식 (10)을 이용하여 수행하였다(Kerr, 1988; Urick, 1983). 이 식에서  $a$ 는 음향산란체의 반경,  $k$ 는 파수를 의미한다.

$$TS = 10 \log_{10} \left[ \frac{a^2}{4} \left( 1 - \frac{\sin(2ak)}{ka} + \frac{\sin(ak)^2}{k^2 a^2} \right) \right] \quad (10)$$

구형 음향산란체는 반경이 4cm이고, 모델링에서 내부가 공기로 처리 되었으며, 내부가 공기로 채워져 있을 경우 반사계수는 -1이 된다. 식 (10)은 음향산란체가 강체로 가정되어 유도된 식이며, 강체일 경우 반사계수가 1이 된다. 1과 -1의 반사계수는

모두 전반사(perfect reflection)를 의미하고, 음의 부호는 위상의 역전을 의미한다. 그러므로 두 경우 위상의 차이만 있고 표적강도의 크기는 동일하기 때문에 표적강도의 계산에서는 같은 의미를 가진다(Urick, 1983).

송·수신 위치는 구형 음향산란체의 기하학적 중심에서 1m 거리 즉, 기하학적 확산손실이 0dB인 지점에 위치한다. 구형 음향산란체의 요소망은 삼각형과 사각형의 혼합된 요소망을 사용하였으며, 음원의 주파수가 100kHz일때 이를 만족하는 조건으로 요소망을 생성하였다.

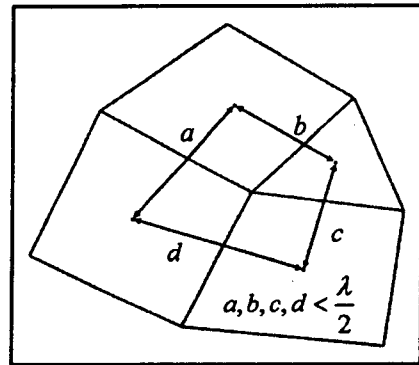


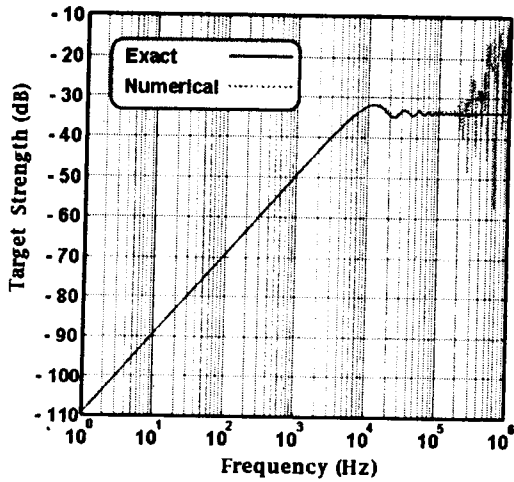
Fig. 3 Condition of mesh generation

Kirchhoff approximation은 Fig. 3과 같이 인접한 두 요소의 기하학적 중심 사이의 거리가 음원 주파수의  $\frac{1}{2}$  파장보다 커질 경우 각각의 요소에서 산란된 음파들의 간섭(interference)으로 인해 표적강도가 수렴하지 못하는 특성을 보인다(Medwin and Clay, 1998). 그러므로, 요소망 생성조건은 요소의 상대적 크기가 음원 주파수의  $\frac{1}{2}$  파장 이내여야 하며, 검증에서는  $\frac{1}{4}$  파장 조건을 사용하여 검증하였다.

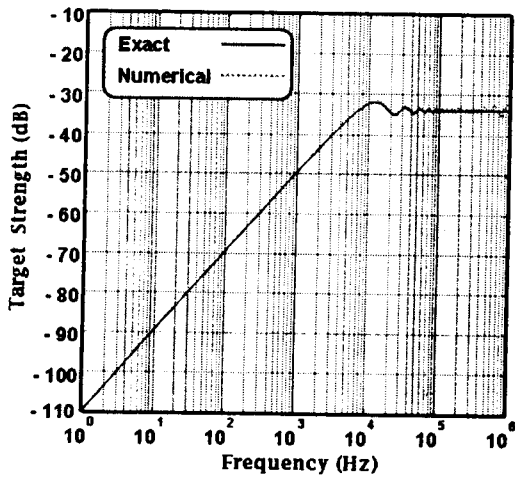
Fig. 4는 구형 음향산란체의 주파수별 표적강도 검증 결과이다. Fig. 4의 (a)는 프로그램내부에서 요소망을 재생성하지 않았을 때의 결과로 200kHz에서 수렴성이 파괴된다. 이는 요소망 생성조건으로 100kHz의  $\frac{1}{4}$  파장조건을 사용하였기 때문에  $\frac{1}{2}$  파장이 되는 200kHz에서 수렴성이 파괴되는 것이다.

Fig. 4의 (b)는 프로그램 내부에서 증가되는 주파수에 따라 요소망을 지속적으로 재생성 하였을 때의 결과이며, 주파수의 증가에도 수렴성이 파괴되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 500kHz 부터 미소한 파괴 현상이 나타나는데, 이는 요소망을 재생성하여도 전처리 프로세서에서 요소망을 생성하며 손실된 곡률까지는 보상할 수 없기 때문이다.

복잡한 면을 가지는 음향산란체의 경우 일정한 요소망 크기를 유지하기 어렵다. 그리고 음향산란체의 크기가 크고 음원이 고주파수인 경우 요소수의 증가로 인해 상용프로그램으로 요소망을 생성하지 못하는 경우도 발생한다. 그러므로 표적강도의 정확한 수렴을 위해서 프로그램 내부에서 요소망을 재생성하는 알고리즘이 필수적이다.



(a) Non-remeshing



(b) Remeshing

Fig. 4 Target strength of sphere as a function of frequency

### 3.2 원통형 음향산란체 검증

원통형 음향산란체의 크기는 반경이 1cm이고, 길이가 40cm이다. 이론해가 음향산란체의 끝단(end-fire)은 고려하지 않기 때문에 양 끝단이 열린 형태로 모델링 되었고, 주파수는 200kHz를 사용하였다. 원통형 음향산란체의 이론해는 식 (11)과 같다 (Kerr, 1988, Urlick 1983).

$$TS = 10 \log_{10} \left[ \frac{aL^2}{2\lambda} \left( \frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \cos \theta \right], \quad \beta = kL \sin \theta \quad (11)$$

$$ka \gg 1 \quad (12)$$

$$r_i \frac{L^2}{\lambda} \quad (13)$$

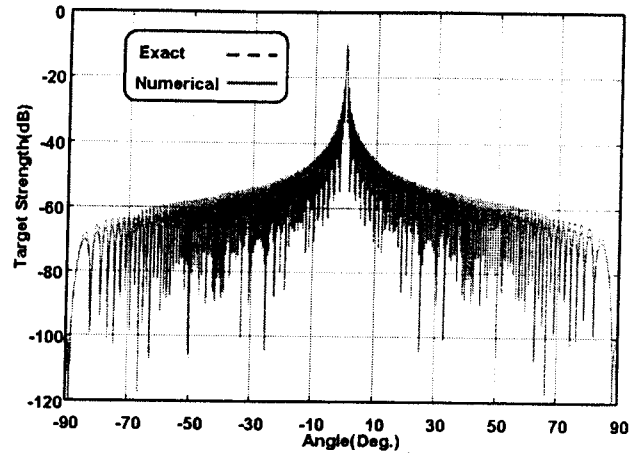


Fig. 5 Target strength of cylinder as a function of angle(0.1°)

여기서  $a$ 는 반경,  $r$ 는 음원과 음향산란체의 기하학적 중심과의 거리,  $L$ 은 길이를 의미한다. 식(12)는 산란 영역이 기하광학 영역이상인 조건으로, 모델링된 원통형 음향산란체의  $ka$ 값은 339로 Fig. 1에서 기하광학 영역에 속하며, 충분히 조건을 만족한다. 식(13)은 원거리 음장(far-field) 조건을 의미하며, 표적강도는 원거리 음장 조건에서 정의되므로 이 식을 만족하여야 한다. 식(13)을 통해 모델링된 원통형 음향산란체의 근거리 음장(near-field)과 원거리 음장의 경계는 21.6m로 계산되므로 송·수신 위치는 21.6m이상이어야 한다. 검증에서는 원거리 음장 조건을 충분히 만족하도록 송·수신 위치가 음향산란체의 기하학적 중심으로부터 50m에 위치한다.

Fig. 5는 식(11)을 통해 각도별(-90°~ 90°까지 0.1°간격)로 검증한 결과이다. 이론해는 원거리 음장 조건하에 유도된 식이므로 거리에 무관하지만 수치해석 기법은 거리에 유관하다. 그러므로 거리에 따른 전달손실을 보상하여 검증하여야 한다. 검증 결과 수치해석과 이론해가 거의 일치함을 알 수 있다.

## 4. 실험 검증

실험에 사용된 축소모형 음향산란체는 선체(Hull)와 함교(Sail)만으로 구성된 단순형상의 잠수함 형태로 Fig. 6과 같은 기하학적 재원을 가진다. K1GT1은 함교(sail)가 없는 순수 원통형 음향산란체로 끝단이 절단된 형태이다. K1GT2는 K1GT1에 수직형 함교를 탑재한 형태이고, K1GT3은 K1GT1에 경사형 함교를 탑재한 형태이다. 세 가지 음향산란체 모두 내부가 공기로 채워져 있기 때문에 반사계수가 -1인 전반사 음향산란체이다.

실험은 송·수신이 가능한 420kHz의 음향변환자(transducer)를 사용하였고, 음파의 형태는 12μsec 톤 버스트(tone burst)파를 사용하였다. 음향 변환자 위치는 음향산란체의 기하학적 중심에서 2m거리에 위치하며, 세 가지 음향산란체 모두 좌우 대칭형이기 때문에 선측면을 따라 방위각으로 0°에서 180°까지 10°간격으로 회전하며 측정하였다. 자세각의 정의는 Fig. 7에 나

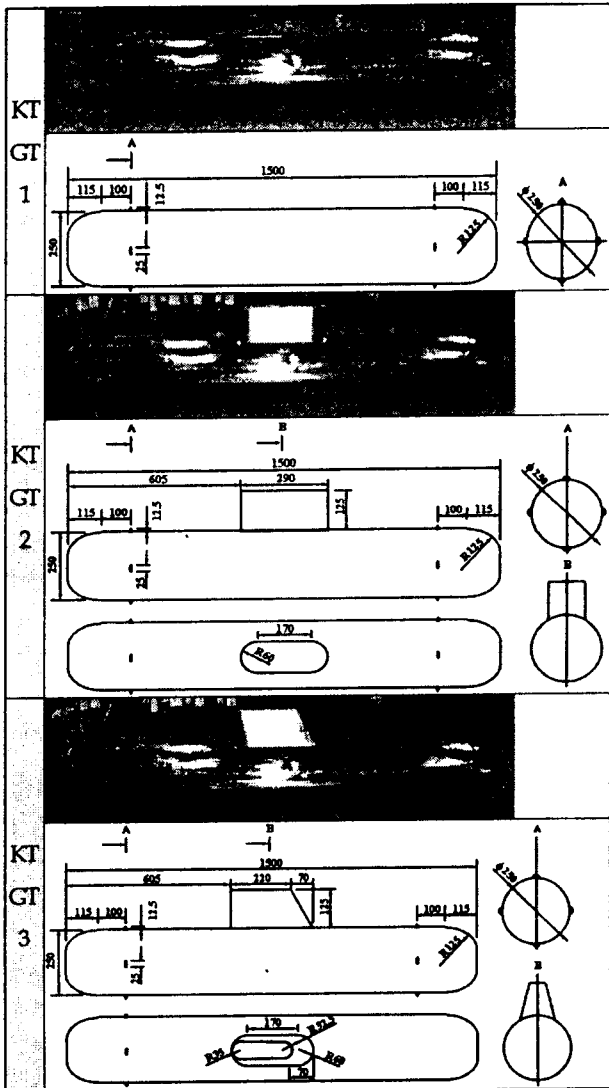


Fig. 6 Specifications of scale model

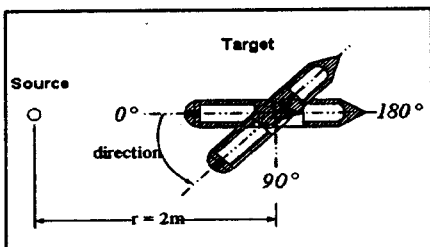
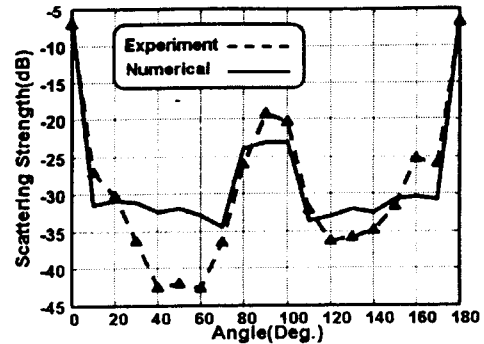


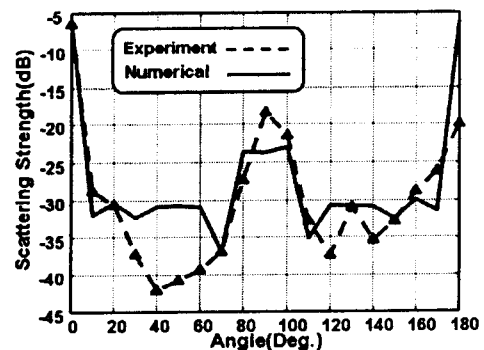
Fig. 7 Definition of target aspect angle

타내었으며, 그림에서도 알 수 있듯이 방위각만을 고려하였고 고각은 0°로 변화 없이 실험을 수행하였다.

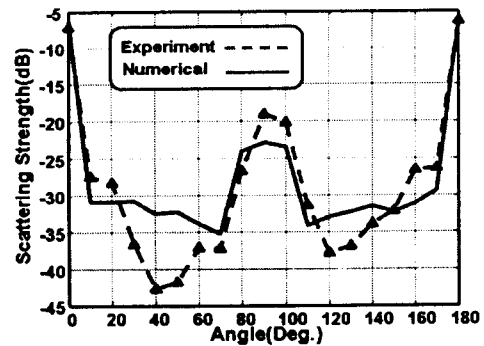
식 (13)을 통해 실험에 사용된 음향산란체의 원거리 음장 조건은 417m로 계산된다. 표적강도는 원거리 음장 조건에서 정의되기 때문에 음원의 송·수신 위치가 417m이상이어야 한다. 그러



(a) KGT12



(b) KGT2



(c) KGT3

Fig. 8 Experimental verification of target strength

나 실제로 이러한 환경조건은 구현이 불가능하기 때문에 실험은 근거리 음장 조건에서 수행되었고, 표적강도의 정의상 근거리 음장 조건에서는 표적강도란 용어를 사용하는 것은 부적절하다. 그러므로 이후 근거리음장 조건에서의 표적강도는 산란강도(Scattering Strength), 원거리 음장 조건에서의 표적강도는 표적강도라 칭한다.

Fig. 8은 근거리 음장 조건하의 산란강도 실험 검증 결과로 다음과 같은 특징을 파악 할 수 있다.

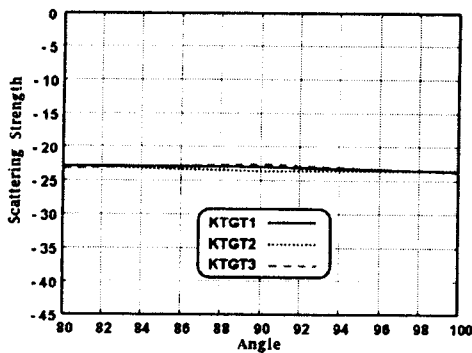
첫째 전·후(0°, 180°)면의 표적강도는 정확히 일치하는 반면 그 외의 각도에서는 오차가 발생한다. 실험에 사용된 음향산란체는 전·후면이 절단된 형태로 절단면이 필렛(fillet)되어 있어 정확한 직경을 측정할 수 없다. 그렇기 때문에 전·후면의 산란강도가 일치한 것은 우연의 일치로 검증의 기준이 될 수 없

며, 측면(90°)을 기준으로 검증하는 것이 타당하다. 40°부근에서 산란강도가 큰 차이를 보이는데, 이는 로그 스케일(Logarithmic scale)로 인한 결과이며, 음압으로 환산한 선형스케일(Linear scale)에서는 오차 범위 내의 값으로 인정된다.

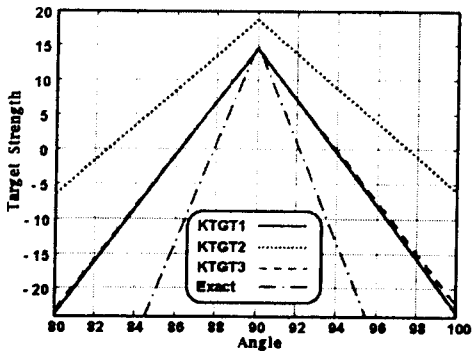
둘째 Fig. 8의 (b)에서 전면과 후면의 산란강도가 큰 차이를 보인다. 음향산란체는 축대칭형태이므로 산란강도 역시 대칭성을 보여야 한다. 그러나 (b)와 같이 전면과 후면이 차이를 보이는 이유는 측정시 발생한 자세각의 미세한 차이로 인해 발생한 오차로 추정된다.

셋째 전·후면이 반구 형태인 일반적인 원통형 음향산란체는 측면(90°)이 전·후(0°, 180°)면에 비해 음원을 향하는 면적이 넓기 때문에 측면의 산란강도가 더 크다(Urick, 1963). 그러나, 실험에 사용된 음향산란체의 경우 전·후면이 절단된 형태이고, 실험이 근거리 음장 조건에서 수행되었기 때문에 측면에 비해 오히려 전·후면의 산란강도가 더 크게 나타난다.

넷째 실험결과와 경우 실험오차로 인해 측면(90°)을 기준으로 산란강도의 크기가 대칭성을 보이지 않을 수 있으나 수치해석의 경우 일반적으로는 대칭성을 보여야 한다. 그러나 이는 전처리 프로그램에서의 비선형 요소분할로 인한 결과이며, 선형적으로 요소가 분할된 3.2절의 원통형 음향산란체의 경우는 대칭적인 결과를 보인다.

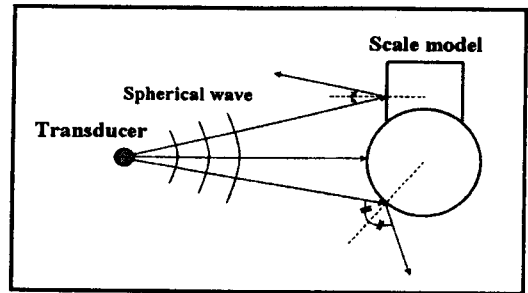


(a) Scattering strength in near-field

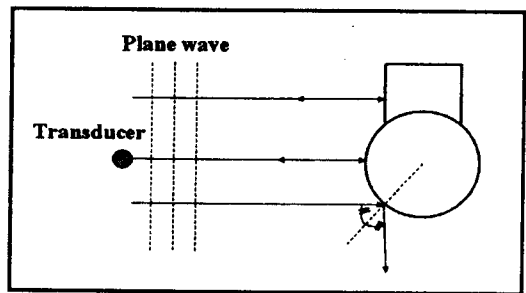


(b) Target Strength in Far-Field

Fig. 9 Scattering strength in near-field and target strength in far-field



(a) Spherical wave



(b) Plane wave

Fig. 10 Schematics of reflection (Spherical and plane wave)

Fig. 9의 (a)는 근거리 음장 조건에서의 산란체 측면(90°) 산란강도 수치해석 결과이다. 일반적으로 함교가 있는 산란체가 그렇지 않은 산란체에 비해 그리고 수직인 함교가 경사진 함교에 비해 산란강도가 커야 한다. 그러나 결과에서 알 수 있듯이 근거리 음장조건에서는 함교의 유·무와 함교경사의 유·무에 따른 산란강도의 차이가 매우 미약하게 나타난다. 이러한 결과가 나타나는 이유는 Fig. 10(a)로 설명된다. 근거리 음장조건에서는 (a)처럼 음파가 구형확산을 하기 때문 수직입사를 제외한 대부분의 음파가 손실되고 이로 인해 산란강도의 차이가 미약하게 나타난다.

Fig. 9의 (b)는 음원과 수신기를 원거리 음장조건을 만족하는 500m에 위치시켜 계산한 결이다. 원거리 음장조건에서 음파는 Fig. 10의 (b)처럼 평면파 형태로 진행하기 때문에 Fig. 9의 (a)와는 달리 (b)에서는 함교의 유무와 함교의 형태에 따른 표적강도의 명확한 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 9의 (b)를 살펴보면 함교의 형태가 수직인 산란체의 표적강도가 가장 크게 나타나며, 함교가 경사졌을 경우 음향 스텔스(acoustic stealth)효과로 인해 함교가 없는 표적과 유사한 크기의 표적강도를 보인다. 이러한 결과는 실제 잠수함 함교의 음향 설계시 스텔스효과를 고려한 함교경사각 결정에 응용될 수 있다.

Fig. 9(b)의 일점쇄선은 식 (11)을 이용하여 구한 원통형 음향산란체의 이론해 표적강도로 측면에서 함교가 없는 실험산란체인 KTGT1과 유사한 크기를 보이는데, 이는 KTGT1이 원통형 몸체 전·후부에 반구가 추가된 형태이지만 음향스텔스로 인해 측면에서의 전·후부 반구는 표적강도에 기여도가 낮기 때문이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발하였고 이를 이론해와 실험을 통하여 성능을 검증하였다. 검증 결과 이론해와는 정확한 일치로 보였으며, 축소 모형 음향산란체 실험과도 측정오차와 수치 계산 오차를 고려할 때 비교적 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 또 실험으로 구현하기 어려운 원거리 음장 조건의 구현과 이를 통한 실제 잠수함의 음향설계 및 해석의 응용성도 확인 할 수 있었다.

수중 음향산란체의 내부가 물로 채워진 경우 특정 각에서 내부 투과파가 존재하며, 이로 인해 내부 재방사가 일어나 표적강도에 영향을 미치게 된다. 그러므로 완전한 수중 음향산란체의 표적강도에 대한 수치해석이 이루어지기 위해서는 내부 재방사 특성이 고려되어야만 한다. 내부 재방사 특성은 Kirchhoff approximation 자체만으로는 구현하기 어렵고, 다른 수치해석 기법과 연성을 하여야 하며, 이는 추후 연구되어야 할 부분이다.

## 후 기

이 논문은 2003년도 Brain Busan 21사업자원에 의한 연구결과

이며, 연구비 지원에 감사로 드립니다.

## 참 고 문 헌

- Nelson, D.E. (1975). A Statistical Scattering Model for Time-Spread SONAR Targets, Ph.D. Dissertation, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Rochester, New York, U.S.A.
- Kerr, D.E. (1988). Propagation of Short Radio Waves, Peninsula Publishing.
- Schneider, H.G., Berg, R., Gilroy, L., Karasalo, I., MacGillivray, I., TerMorshuizen, M. and Volker, A. (2003). "Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop", ICSV10, pp 2475-2482, Stockholm.
- Medwin and Clay (1988). Fundamentals of Acoustica ceanography, Oceanography, Academic Press.
- Urick, R.J. (1983) Principles of Underwater Sound, 3rd ed., McGraw-Hill Book , New York.

---

2004년 10월 12일 원고 접수

2004년 11월 23일 최종 수정본 채택

Source : 한국해양공학회지, (2005), 19(1): 64-70

