

# 표적강도 수치해석 기법 개발과 실험적 검증

최영호\*, 김재수\*, 신기철\*, 유진수\*,

주원호\*\*, 김영현\*\*, 박종현\*\*, 최상문\*\*\*, 김우식\*\*\*

한국해양대학교 해양개발공학부\*, 현대중공업 선박해양연구소\*\*, 국방과학연구소\*\*\*

## Numerical Analysis Method for Target Strength and Experimental Verification

Y. H. Choi, J. S. Kim, K. C. Shin, J. S. You,

W. H. Joo, Y. H. Kim, J. H. Park, S. M. Choi, W. S. Kim

Division of Ocean Development Engineering Korea maritime University

Hyundai Maritime Research Institute, Hyundai Heavy Ind. Co., Ltd.

Agency for Defense Development

yhchoi@bada.hhu.ac.kr

### 요약

표적강도는 수중 산란체의 능동 탐지 확률을 좌우하는 중요한 변수중 하나이며, 산란체의 기하학적 형상에 의해 결정이 되기 때문에 수치해석을 통한 해석 및 예측이 가능하다. 수치해석 기법은 현재 여러 가지가 알려져 있으며, 그중 Kirchhoff approximation이 다른 해석 기법에 비해 거울면 반사특성의 산란해석에 적합하며, 프로그램으로의 적용이 용이하다는 장점으로 인해 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 장점에 의거하여 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발 및 검증하였다. 프로그램의 성능 검증은 원통형 산란체에 대한 이론해 검증과 원통형 실험 산란체를 통한 실험 검증을 수행하였다.

### 1. 서론

표적강도(TS-Target Strength)는 수중 산란체의 능동 탐지 확률을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이다. 표적강도는 산란체의 음향산란 메커니즘에 의해 지배되며, 현대 소나(Sonar)시스템의 음향산란 특성은 대부분이 물리광학 영역(Physical optics region)과 기하광학 영역(Geometric optics region)에 속하며, 이들 영역에의 산란

특성은 거울면 반사(Specular reflection)특성을 보인다. 거울면 반사는 산란체의 기하학적 형상에 의해 지배되기 때문에, 산란체의 기하학적 형상을 알 수 있다면 수치해석 기법을 통한 표적강도의 해석 및 예측이 가능하다. 현재까지 알려진 표적강도 수치해석 기법으로는 BIE(Boundary Integral Equation), GTD (Geometrical Theory of Diffraction), BEM(Boundary Element Method), FEM (Finite Element Method), Kirchhoff approximation 등이 있으며[1]. 이 중 Kirchhoff approximation이 거울면 반사특성의 산란해석에 적합하며, 다른 해석기법에 비해 프로그램으로의 적용이 용이하다는 장점으로 인해 현재 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 장점에 의거하여 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발 및 검증하였다.

프로그램의 성능 검증은 원통형 산란체의 이론해 검증과 원통형 실험 산란체의 실험 검증을 수행하였다.

### 2. 표적강도 수치해석 기법

표적강도 수치해석 기법은 산란체의 표면을 요소망 생성(Mesh generation)을 통해 수치적으로 근사시키기 때문에 이로 인한 수치계산 오차를 수반한다. 또 일부 수치해석 기법에서는 산란체의 외부 형상만을 고려하기

때문에 표면을 투과하여 내부에서 재방사(Reradiation)되는 음파들의 효과를 해석하기 어렵다는 단점도 있다. 그러나 해석시간과 비용에서 실험적 해석기법에 비해 경제적이며, 복잡한 형상의 해석이 가능하다는 장점으로 인해 수중 산란체의 표적강도 해석에 많이 이용되고 있다.

표 1. 국가별 표적강도 수치해석 프로그램[1]

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

산란체에서 반사된 음장은 산란체 표면의 법선방향 면적 적분인 식(1)의 Helmholtz-Kirchhoff 적분식으로 표현된다[2].

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

여기서,  $U(x, y, z, t)$ 는 시공간상의 음압,  $U$ 는 산란체 표면에서의 음압,  $k$ 는 파수,  $R$ 은 음원과 산란체 표면 요소간의 거리,  $n$ 은 법선방향을 의미한다.  $U$ 는 반사 계수(Reflection coefficient)  $\mathbb{R}$ 을 통하여 식(2)와 같이 표현되고, 이를 통해 식(1)은 식(3)과 같은 1차 Kirchhoff approximation으로 유도된다.

$$U = \mathbb{R} U_S, \quad \frac{\partial U}{\partial n} = -\mathbb{R} \frac{\partial U_S}{\partial n} \quad (2)$$

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

그림 1의 기하학적 조건을 이용하여  $U_S$ 를 식(4)와 같이 표현할 수 있으며, 식(4)를 이용하여 식(3)은 식(5)와 같은 Fresnel approximation으로 표현된다.

$$U_S = P_{inc} \approx \frac{P_0 R_0 D \exp(-ikR_S)}{R_S} \quad (4)$$

여기서,  $P_{inc}$ 는 음원으로부터 입사된 음압,  $D$ 는 음원의 방향성(Directionality),  $P_0$ 와  $R_0$ 는 기준 음압(Reference pressure)과 기준 거리(Reference distance)를 의미한다.

$$P(f) = \frac{P_0 R_0 \mathbb{R}}{4\pi} \int_S D \frac{\partial}{\partial n} \times \left[ \frac{\exp[-ik(R_R + R_S)]}{R_R R_S} \right] ds \quad (5)$$

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

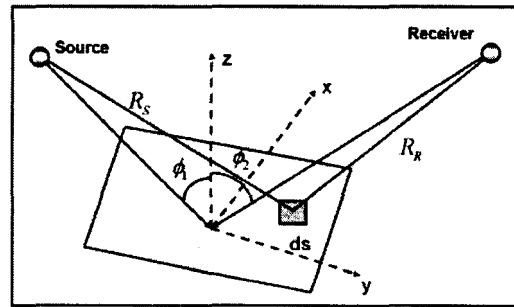


그림 1. Kirchhoff approximation의 기하학적 조건

그림 1의 기하학적 조건을 이용하면 식(5)의 법선방향 편미분 항은 식(6)과 같이 근사할 수 있으며, 이를 이용하여 식(5)를 최종적으로 식(7)과 같이 표현할 수 있다. 식(7)에서  $N$ 은 산란체 요소수를 의미한다.

$$\frac{\partial W}{\partial n} \approx -ik(\cos\phi_1 + \cos\phi_2) W \quad (6)$$

$$W = \frac{\exp[-ik(R_R + R_S)]}{R_R R_S}$$

$$P(f) = \frac{P_0 R_0 \mathbb{R}}{4\pi} \sum_{j=1}^N -ik(\cos\phi_1 + \cos\phi_2) \times \left\{ \frac{\exp[-ik(R_{Rj} + R_{Sj})]}{R_{Rj} R_{Sj}} \right\} \quad (7)$$

### 3. 원통형 산란체의 이론해 검증

원통형 산란체는 반경이 1cm이고, 길이가 40cm이다. 이론해가 산란체의 끝단(End-fire)은 고려하지 않기 때문에 양 끝단이 열린 형태로 모델링 되었고 주파수는 200kHz를 사용하였다. 원통형 산란체의 이론해는 식(8)과 같다.

$$TS = 10 \log_{10} \left[ \frac{aL^2}{2\lambda} \left( \frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \cos(\theta)^2 \right] \quad (8)$$

$$\beta = kL \sin(\theta)$$

$$ka \gg 1 \quad (9)$$

$$r > \frac{L^2}{\lambda} \quad (10)$$

여기서,  $a$ 는 반경,  $L$ 은 길이,  $r$ 은 음원과 산란체의 기하학적 중심과의 거리를 의미한다. 식(9)는 산란 영역이 기하광학 영역이상인 조건으로, 모델링된 원통형 산란체의  $ka$  값은 339로 충분히 조건을 만족한다. 식(10)은 원거리 음장 조건을 의미한다. 모델링된 원통형 산란체의 근거리 음장(Near-field)과 원거리 음장(Far-field)의 경계는 21.6m이다.

그림 2는 모델링된 산란체를 측면(90°)에서 거리별로 표적강도를 계산한 것으로 그림을 보면 식(11)로 계산된 21.6m는 완전한 근거리와 원거리 음장의 경계는 되지 못함을 알 수 있다.

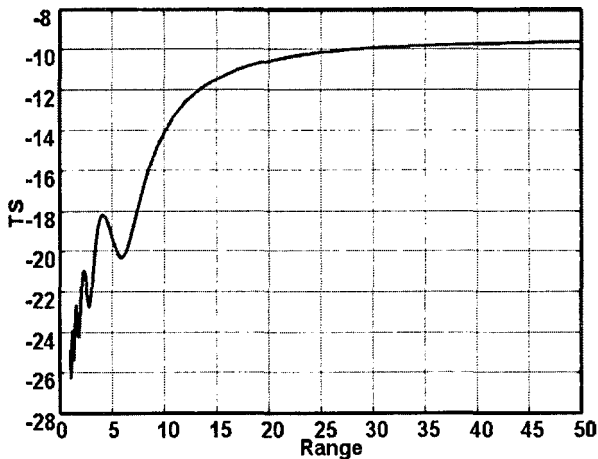


그림 2. 원통형 산란체의 거리별 표적강도(측면: 90°)

식(10)은 그림 3을 통하여 유도할 수 있다. 그림에서 조건을  $\frac{\lambda}{8}$ 로 할 경우 식(10)을 유도할 수 있으며,

$\frac{\lambda}{32}$ 로 하여 유도된 식을 사용할 경우 경계는 81m로 계산되며, 그림 2에서 살펴보면 이는 충분히 원거리 음장에 속함을 알 수 있다.

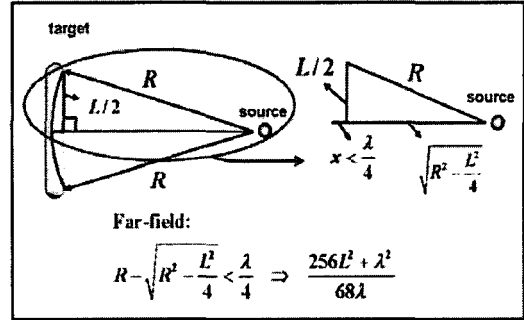


그림 3. 조건식 유도

그림 4는 원통형 산란체의 이론해를 통해 검증한 결과이다. 수치해석을 통한 표적강도는 음원과 수신기의 거리를 산란체의 기하학적 중심으로부터 원거리 음장 조건에 맞게 81m에 위치시켜 계산하였다. 그리고 이를 원통형 확산에 따른 전달손실(TS: Transmission Loss)을 보상하여 이론해와 검증하였다. 검증 결과 수치해석과 이론해가 비교적 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다.

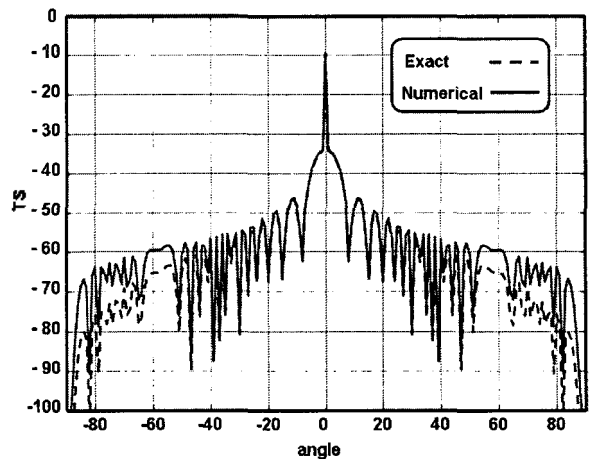
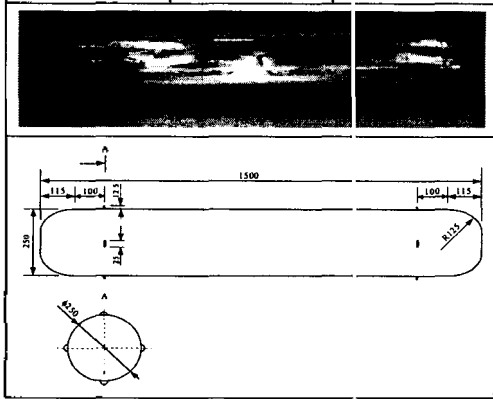


그림 4. 원거리 음장 조건 검증

### 4. 실험 산란체 검증

실험에 사용된 원통형 실험 산란체의 제원은 표 2와 같다. 원통형 산란체는 내부가 공기로 채워진 반사계수가 -1인 전반사체(Perfect reflector)이다.

표 2. 원통형 실험 산란체 제원

원통형 실험 산란체의 제원		
재질	두께	내부 상태
스테인리스	2mm	공기
		

실험은 송·수신이 가능한 420kHz의 음향 변환자 (Transducer)를 사용하였고, 음파는 12 $\mu$ sec 톤 버스트 (Tone burst)파를 사용하였다. 음향 변환자의 위치는 실험 환경의 제약조건으로 인해 산란체의 기하학적 중심에서 2m거리에 위치하며, 이는 근거리 음장 조건이다.

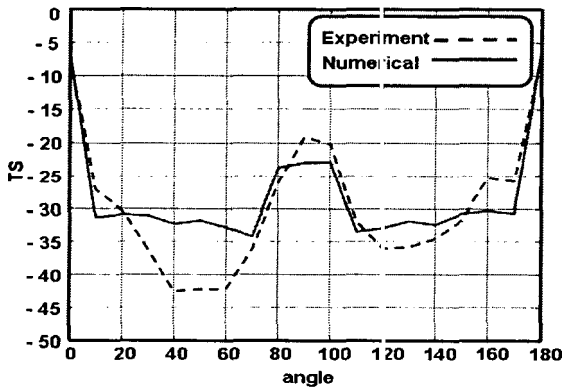


그림 5. 원통형 실험 산란체 검증

그림 5는 원통형 실험 산란체의 검증 결과이다. 실험 오차와 수치 계산 오차를 고려한다면 수치해석과 실험 결과가 비교적 유사한 결과를 보여준다고 할 수 있다. 일반적으로 원통형 산란체는 측면이 전·후(0°, 180°)면에 비해 음원을 바라보는 면적이 넓기 때문에 측면의 표적강도가 더 크지만[5], 실험에 사용된 산란체의 경우 전·후면이 절단된 형태이기 때문에 측면에 비해 오히려 전·후면의 표적강도가 더 크게 나타난다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 Kirchhoff approximation을 이용하여 표적강도 수치해석 프로그램을 개발하였고, 이를 이론해와 실험을 통하여 성능을 검증하였다. 성능 검증 결과 이론적인 해와는 정확한 일치를 보였으며, 원통형 실험 산란체와도 실험 오차와 수치 오차를 고려할 때 어느 정도 유사한 결과를 확인할 수 있었다.

그러나 산란체의 내부가 물로 채워진 경우 특정 각에서 내부 투과파가 존재하며, 이로 인해 내부 재방사가 일어나 표적강도에 영향을 미치게 된다[6]. 그러므로 완전한 표적강도에 대한 수치해석이 이루어지기 위해서는 내부 재방사 특성이 고려되어야만 한다. 내부 재방사 특성은 Kirchhoff approximation 자체만으로는 구현하기 어렵고, 다른 해석기법과 연성을 하여야 하며, 이는 추후 연구되어야 할 부분이다.

## 참고문헌

1. H.G. Schneider, R. Berg, L. Gilroy, I. Karasalo, I. MacGillivray, M. TerMorshuizen, A. Volker, "Acoustic scattering by a submarine: results from a benchmark target strength simulation workshop", ICSV10, Stockholm, pp. 2475-2482, July 2003.
2. Medwin and Clay, *Fundamentals of acoustical oceanography*, (Academic Press, 1998)
3. D. E Kerr, *Propagation of short radio waves*, (Peninsula Publishing, 1988)
4. William S. Burdic, *Underwater Acoustic System Analysis - 2nd ed.*, (Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey, 1991)
5. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound - 3rd ed.*, (McGraw-Hill Book Company, 1983)
6. Henry Primakoff, Joseph B. Keller, "Reflection and Transmission of Sound by Thin Curved Shells", *J. Acoust. Soc. Am.*, 19, 820-831, Sept. 1947