

## 구면투영법을 이용한 수중표적의 근거리장 소나단면적 해석

김국현\*, 조대승†\*\*

(주)한진중공업 특수선체설계팀\*  
부산대학교 조선해양공학과\*\*

### Near-field Sonar Cross Section Analysis of Underwater Target Using Spherical Projection Method

Kookhyun Kim\* and Dae-Seung Cho†\*\*

Special Ship Hull Design Team, Hanjin Heavy Industries and Constructions Co. Ltd.\*  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University\*\*

#### Abstract

In this paper, a new numerical method is proposed to analyze near-field sonar cross section of acoustically large-sized underwater targets such as submarines. A near-field problem is converted to a far-field problem using a spherical projection method with respect to the objective target. Then, sonar cross section is calculated with a physical optics well established in far-field acoustic wave scattering problems. The analysis results of a square flat plate compared with those obtained by other method show the accuracy of the proposed method. Moreover, it is noted that the sonar cross section is varied with respect to the targeting point as well as the range. Finally, numerical analysis results of real-like underwater target such as a submarine pressure hull are discussed.

※Keywords: Near-field(근거리장), Sonar cross section(소나단면적), Spherical projection method(구면투영법), Physical optics(물리광학법)

#### 1. 서론

수중에서 가장 효과적인 탐지수단 중 하나인 소나(sonar)는 목적에 따라 수동소나(passive sonar)와 능동소나(active sonar)로 구분되며, 최근 잠수

함의 저소음화 기술의 발달로 능동소나의 군사적 중요성이 더욱 부각되고 있다(Tyler 1992).

능동소나의 탐지성능은 음향출력(source level), 지향성(directivity), 탐지문턱(detection threshold) 등의 소나 자체 성능 뿐 아니라 전달손실(transmission loss), 주변 소음수준(ambient noise level) 등의 해양특성과 대상 표적의 소나단면적(sonar cross section) 또는 음향표적강도

접수일: 2008년 7월 1일, 승인일: 2008년 11월 5일

† 교신저자: daecho@pusan.ac.kr, 051-510-2482

(acoustic target strength)에 의해 영향을 받는다 (Urick 1983). 특히, 특정 해역에서 정해진 성능의 능동소나가 수중표적을 탐지하고 있다고 가정하면, 소나의 탐지 성능은 수중표적의 소나단면적에 의해 전적으로 의존하게 된다. 따라서 수중표적의 설계에 있어서 소나단면적 감소설계는 매우 중요한 설계인자가 되므로 이에 대한 정량적 평가가 요구된다.

일반적으로 설계 단계에서 소나단면적에 대한 정량적 평가는 축소모형시험이나 수치해석을 통해 가능하다. 최근 컴퓨터 성능이 향상되면서 다양한 음향해석이론을 바탕으로 한 수치해석방법이 개발되어 왔다. 특히, 잠수함과 같이 크기가 큰 수중표적에 대해서는 물리광학법, 기하광학법, 물리회절이론, 기하회절이론 등과 같은 고주파수 해석기법이 유용한 것으로 알려져 있다(New et al. 1974). Schneider et al.(2003)은 세계 각국에서 개발/운영하고 있는 소나단면적 해석 프로그램의 특성과 정확도 비교를 위한 benchmark 시험을 수행한 바 있다. 국내에서는 Boo(2001)이 물리광학법을 적용하여 단일 반사(single reflection)를 고려한 수치해석방법을 제안하였으며, Kim et al.(2005)은 단일 반사 뿐 아니라 은면(hidden surface)과 다중 반사(multiple reflection)를 함께 고려할 수 있는 object precision 방법에 근거한 물리광학/기하광학 혼합방법을 제안한 바 있다.

이상에서 언급한 국내외 연구들은 소나가 수중표적으로부터 충분히 멀리 떨어져 있다고 가정하는 경우, 즉 원거리 음장 기준(far-field criterion)을 만족하는 경우에 대해서만 유효한 해를 제공할 수 있다. 이는 수중표적이 능동 소나가 장착된 어뢰에 의해 공격 받는 경우나 실선 시험 시 환경요인으로 인해 충분한 이격거리를 확보하지 못하는 경우와 같이 표적과 소나간의 이격 거리가 작아지면 원거리 음장 기준을 만족하지 못하게 되며 앞서 언급한 수치해석방법을 적용할 수 없게 된다. 이에 근거리장(near field) 문제에 대해 유효한 해를 제공할 수 있는 해석방법에 대한 연구가 요구된다.

이에 최근 다양한 근거리장 소나단면적 해석방법들이 제안되고 있다. Jin et al.(1999)은 그래픽

처리방법 중 하나인 원근변환(perspective transform)을 바탕으로 한 근거리장 물리광학법을 제안하였으며, Legault(2004)는 기존의 물리광학법에서 사용되는 적분방정식에 수정된 Green 함수를 적용하여 근거리장에서의 해석 정확도를 향상시키기 위한 연구를 수행한 바 있다. 또한, Choi et al.(2005)은 기존의 물리광학법을 그대로 적용하되 해가 수렴할 때까지 수중표적면을 구성하는 요소의 크기를 재귀적으로 분할해 나가는 방법을 제안하고 그 결과를 축소모형시험 결과와 비교한 바 있다. 특히, Jin et al.(1999)이 제안한 방법은 3차원 그래픽 가속기를 이용해 대상 표적면을 스크린상의 각각의 픽셀(pixel)에 투영시킨 후 픽셀의 면적과 표적에 대한 깊이 정보만을 이용하므로 3차원 그래픽 가속기의 성능만 보장된다면 비교적 빠르고 정확한 해석이 가능하다. 그러나 표적이 커지고 주파수가 높아질수록 높은 스크린 해상도를 요구하게 되는 근본적인 단점을 가지고 있다(Rius et al. 1993).

본 연구에서는 잠수함과 같이 음향학적으로 크기가 큰 수중표적에 대한 새로운 근거리장 소나단면적 해석방법을 제안한다. 이 방법은 Jin et al.(1999)이 제안한 원근변환 개념을 적용하되 대상 표적을 스크린에 투영시키는 대신 대상표적 자체를 원근변환하는 방법이다. 이때, 근거리장 문제는 원거리장 문제로 바뀌게 되므로 원거리장에 유용한 수치해석방법들을 근거리장 소나단면적 해석에 그대로 적용할 수 있게 된다. 참고로, 본 연구에서는 원근변환을 위해 구면투영법(spherical projection method)을 적용하고, 원거리장 수치해석방법으로 물리광학법을 적용한다.

본 연구에서 제시한 수치해석방법의 타당성을 검토하기 위해 정사각형 평판과 잠수함 압력선체에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 고찰한다.

## 2. 해석이론

### 2.1 원거리장 소나단면적 해석

소나단면적  $\sigma_s$ 는 수중표적에 대한 음파의 산란을 정량적으로 표시할 수 있는 물리량이며 식 (1)과 같이 정의된다(New et al. 1974).

$$\sigma_s = \lim_{R \rightarrow \infty} \left[ 4\pi R^2 \frac{|p_s|^2}{|p_i|^2} \right] \quad (1)$$

여기서,  $R$ 은 소나와 표적간의 이격거리를 나타내며,  $p_i$ 와  $p_s$ 는 입사 음장과 산란 음장을 각각 나타내는 음압(acoustic pressure)을 의미한다.

Fig. 1에 보인 바와 같이 소나가  $z$ 축 상에서 수중표적으로부터 충분히 멀리 떨어져 있는 경우 표적으로 입사되는 음파는 평면파로 간주할 수 있다. Kirchhoff 근사이론에 근거한 물리광학법을 적용하면 완전반사면을 갖는 대상표적의 소나 단면적은 식 (2)에 의해 계산이 가능하다(Kim et al. 2005).

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

여기서,  $j$ 는 단위허수( $\sqrt{-1}$ ),  $k(=2\pi f/c)$ 는 파수(wavenumber),  $f$ 는 주파수,  $c$ 는 음속,  $S$ 는 표적면을 의미하며,  $x', y', z'$ 은 표적면상 임의 위치 좌표이다.

또한, Fig. 2에 보인 바와 같이 표적면이 유한개의 평면 다각형 평면요소로 구성되어 있다면 표적의 소나단면적은 식 (3)에 의해 구할 수 있다.

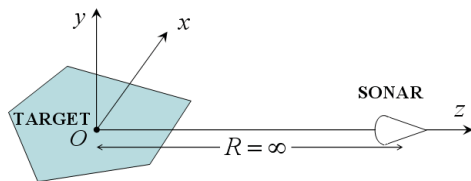


Fig. 1 Target illuminated by sonar located in far distance.

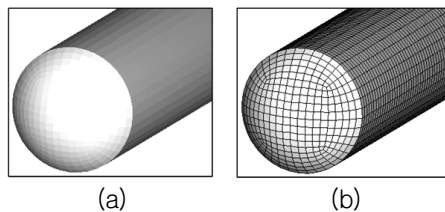


Fig. 2 Dividing target surface with flat polygon elements: (a) original and (b) divided target

이때, 각각의 요소에 대한 위상적분은 그 크기에 상관없이 Klement et al.(1988)이 제안한 해석 해를 이용해 구할 수 있다.

$$\sigma_s \approx \frac{k^2}{\pi} \left| \sum_{i=1}^N \int_{S_i} e^{-2jkz'} dx' dy' \right|^2 \quad (3)$$

여기서,  $N$ 은 표적의 분할 평면 요소수,  $S_i$ 는  $i$ 번째 평면요소를 나타낸다.

### 2.2 원거리장 물리광학법을 이용한 근거리장 소나단면적 해석

표적으로 평면음파가 입사한다고 가정하면 Fig. 3(a)에 점선으로 나타낸 바와 같은 완전 평면파면(perfect plane wave surface)이 형성될 것이다. 반면, 거리  $R$ 만큼 떨어진 곳에 위치한 점음원(point source)에 의해 구면파(spherical wave)가 입사할 경우, 완전 평면 파면과는 다른 구면파 등위상면(equi-phase surface)이 형성될 것이다. 이때 발생하는 최대 위상차  $kh$ 가  $\pi/8$ 보다 같거나 작은 경우, 구면파는 평면음파로 간주할 수 있으며, 식 (4)와 같은 원거리 음장 기준(far-field criterion)이 마련된다(Knott 1993).

$$R \geq 2L^2/\lambda \quad (4)$$

여기서,  $L$ 은 표적의 특성길이(characteristic length)를 의미하며,  $\lambda$ 는 파장(wave length)이다.

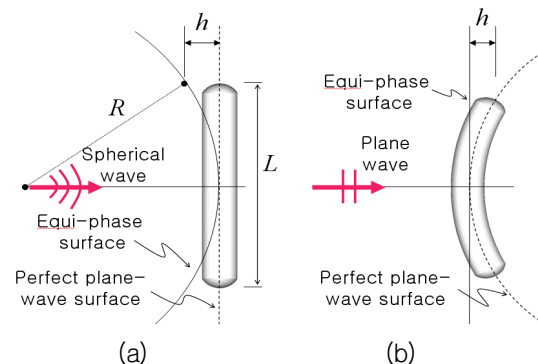


Fig. 3 (a)Far-field criterion and (b)concept of near- to far-field transform

한편, 수중표적과 소나간의 이격거리가 식 (4)를 만족하지 못하는 경우 음향산란 문제는 근거리장 문제가 된다. 이 때, 식 (3)을 이용해 대상 표적에 대한 소나단면적 해석을 수행할 경우 오차가 발생하며,  $R$ 이 작아질수록 그 오차는 더욱 더 커지게 된다. 그러나 이러한 오차를 줄이기 위해 Fig. 3(b)에 보인 바와 같이 구면파의 등위상면이 완전 평면 파면과 같은 평면이 되도록 대상 표적의 형상을 변환(transform)시키면 근거리장 문제는 원거리장 문제로 바뀌게 되어 식 (3)의 원거리장 물리광학법을 근거리장 소나단면적 해석에 그대로 적용할 수 있게 된다. 이를 위해 본 연구에서는 구면투영법을 적용한다.

2.3 구면 투영법

본 연구에서 제안한 근거리장 소나단면적 해석 방법은 구면 투영법을 이용한 근거리장-원거리장 변환 방법을 바탕으로 하며, 다음과 같이 가상구 생성, 구면상 투영 정점 산정, 근거리장-원거리장 변환, 소나단면적 해석 등의 절차를 따른다. 이 절차는 모든 다각형 평면 요소에 대해 적용이 가능하나 여기서는 절차 설명을 단순화하기 위해 표적면을 구성하는 하나의 삼각형 평면 요소에 대해서만 기술한다.

1) 가상구 생성

Fig. 4(a)에 보인 바와 같이 소나 위치가 중심이고 반경이  $R$ 인 구면파 등위상면에 해당하는 가상 구(virtual sphere)를 생성한다.

2) 구면상 투영정점 산정

삼각형 평면요소  $A$ 의 정점(vertex)  $v_o^1, v_o^2, v_o^3$ 을 가상 구면 상에 투영시켜  $v_p^1, v_p^2, v_p^3$ 을 구한다. 이 때 투영된 점으로부터 원래 정점까지의 거리  $d_1, d_2, d_3$ 를 저장해 둔다(Fig. 4a).

3) 근거리장-원거리장 변환

가상 구면 상에 투영된 점들을  $x-y$ 평면 상 ( $z=0$ )에 대응시켜  $v_i^1, v_i^2, v_i^3$ 를 구한다(Fig. 4b). 이들로부터  $-z$ 방향으로 앞서 저장한  $d_1, d_2, d_3$ 만큼 이격시켜  $v^1, v^2, v^3$ 을 구한 후 변환된 요소  $A'$

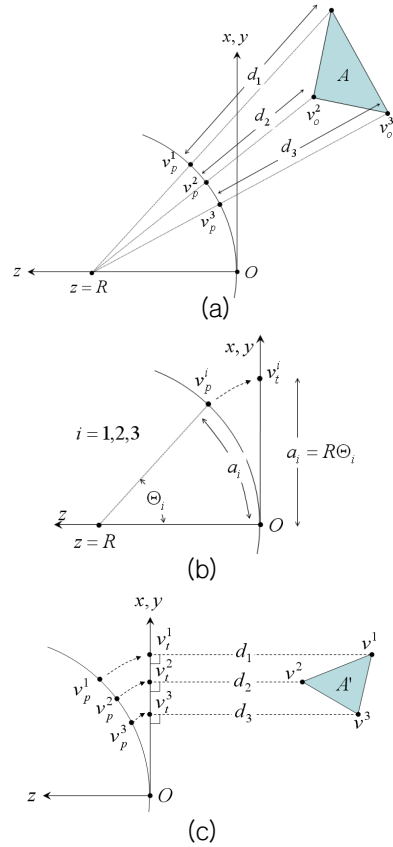


Fig. 4 Procedure of near to far-field transform with spherical projection: (a) projection of vertex of objective element onto sphere, (b) near- to far-field transform with same arc length( $a_i$ ) and (c) regeneration of the element.

를 완성한다(Fig. 4c). 이 때, 변환된 요소는 기하학적 형상은 변하지만 요소면 임의 점에서의 위상차는 그대로 유지된다.

4) 소나단면적 해석

최종적으로 식 (3)을 이용해 요소  $A'$ 에 대한 소나단면적을 계산한다.

3. 수치해석 및 고찰

본 연구에서 제시한 방법의 타당성을 검토하기

위해 Fig. 5에 보인 바와 같은 정사각형 평판과 잠수함 압력선체에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 정사각형 평판의 크기는 폭과 높이가 각각 0.5 m이며,  $x-y$  평면 상( $z=0$ )에 놓여 있다. 잠수함 압력 선체의 길이는 42.1 m이며, 폭과 높이가 모두 7 m이다.

Fig. 6에는 소나 주파수가 50 kHz이고, 표적 중심과 소나의 이격거리  $R$ 이 1m, 3m, 1km인 경우에 정사각형 평판 표적을  $y$ 축에 대해  $0^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지  $0.5^\circ$  간격으로 회전시키면서 수행한 근거리장 소나단면적 해석 결과를 나타내었다. 이에는 비교검토 목적으로 원거리장 물리광학법을 적용한 수치해석결과도 함께 나타내었다. 또한, Fig. 7에는  $R=1\text{m}$ ,  $\theta=0^\circ$ 일 경우의 구면투영법을 이용한 대상표적의 근거리장-원거리장 변환(near-field to far-field transform) 결과를 나타내었다. 참고로, 정사각형 평판은 일정 크기의 삼각형 요소로 분할하였는데, 그 크기는 본 수치해석에서의 최소 거리인 1m에 대해 식 (4)의 원거리 음장조건을 충분히 만족하도록 결정하여 근거리장 변환에 따른 거리감소효과가 나타나지 않도록 하였다.

상기로부터  $R=1\text{km}$ 에서의 결과는 원거리장 해석결과와 정확히 일치함을 확인할 수 있다. 이는 대상모델의 최대 특성길이(0.707m)를 고려할 때 식 (4)의 원거리 음장 기준(33.3m 이상)을 충분히 만족하기 때문이다.  $R=1\text{m}$ , 3m에서의 결과는 원거리장 결과와는 확연한 차이를 보일 뿐 아니라 거리가 가까워질수록  $\theta=0^\circ$  근방에서의 값이 작아지고 이외의 각도에서는 값이 커지고 있다. 이는 거리가 가까워질수록 근거리장 효과에 의해 평판이 왜곡되어 나타나기 때문이다. 아울러, 이상의 결과는 대상 표적을 스크린에 투영하는 원근변환 방법을 적용한 Jin et al.(1999)의 결과와 동일함을 확인하였다.

Fig. 8에는 소나 주파수가 1kHz이고, 표적 중심과 소나의 이격거리  $R$ 이 100m, 1km, 10km인 점 경우의 잠수함 압력선체에 대한 근거리장 소나단면적 해석결과를 나타내었다. 이때 타 수치해석 조건은 사각형 평판에서와 동일한 조건을 적용하였다.  $R=10\text{km}$ 에서의 결과는 정사각형 평판과 마찬가지로 원거리장 해석결과와 정확히 일치하고

있다. 이는 대상모델의 최대 특성길이(42.1m)를 고려할 때 식 (4)의 원거리 음장 기준(2.36km 이상)을 충분히 만족하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 정사각형 평판과 마찬가지로 근거리장 효과로 인해 거리가 가까워질수록  $\theta=0^\circ$  근방에서의 값은 작아지고 이외의 각도에서는 값이 커지고 있음도 알 수 있다.

한편, 능동 소나 장착 어뢰가 표적으로 접근하는 경우, 그 경로에 따라 소나 단면적이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 상황을 모의하기 위해 어뢰가  $z$ -축과 평행하게 다양한 표적면을 향해 접근할 경우에 대한 수치해석을 수행하고 그 결과를 고찰하였다. 이 때, 대상표적들은  $\theta=0^\circ$ 로 고정하

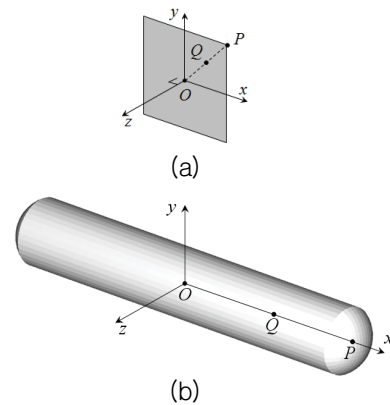


Fig. 5 Objective model: (a) square flat plate and (b) submarine pressure hull

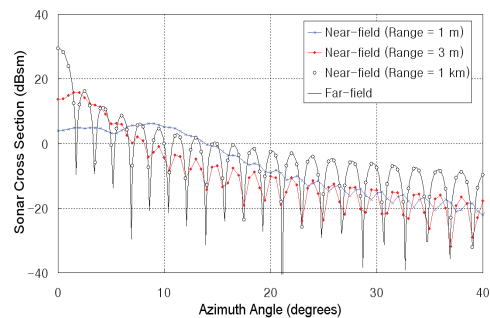


Fig. 6 Near-field sonar cross section of the square flat plate ( $f=50$  kHz,  $R=1\text{m}$ , 3m, 1km).

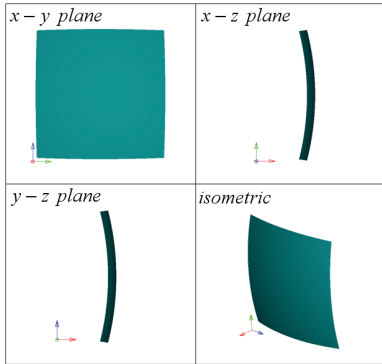


Fig. 7 Near-field to far-field transform results with the spherical projection method of the square flat plate( $R=1m$ ,  $\theta=0^\circ$ )

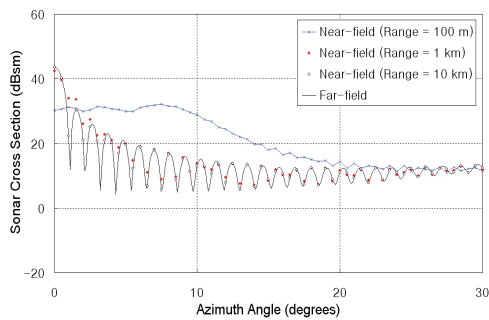


Fig. 8 Near-field sonar cross section of the submarine pressure hull ( $f=1kHz$ ,  $R=100m$ , 1km, 10km).

였으며, 기타 해석조건은 이전과 동일하다.

정사각형 평판에 대해 소나 장착 어뢰가 Fig. 5(a)에 보인  $o(0,0,0)$ ,  $q(0.125,0.125,0)$ ,  $P(0.25,0.25,0)$ 의 세 군데 목표점을 향해 1km에서 1m까지 접근한다고 가정한 경우의 해석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 이로부터 원거리에서는 동일한 소나 단면적 값을 보이지만, 거리가 가까워짐에 따라 그 값이 변동하면서 작아진다. 특히, 목표점에 따라 소나 단면적 값이 작아지기 시작하는 거리가 다르게 나타난다. 이는 목표점이  $o$ 일 경우 최대 특성길이가 0.707인데 반해 목표점이  $q$ 와  $p$ 인 경우 표적중심을 고려한 최대 특성길이가 각각 1.06m와 1.41m로 커졌기 때문이다. 또한, 소나가 대상표적으로 가까워지면서 접근 목표점이

표적중심으로부터 멀수록 값이 작게 나타나지만, 약 3m 이하에서는 목표점이  $o$ 일때 보다  $q$ 일때 오히려 값이 크게 나타나는 구간이 발생한다. 이는 거리가 가까워짐에 따라 표적점 위치 변화에 따라 음파의 위상차 효과가 다르게 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

잠수함 압력선체에 대해 소나 장착 어뢰가 Fig. 5(b)에 보인  $o(0,0,0)$ ,  $q(10,0,0)$ ,  $P(20,0,0)$ 의 세가지 목표점을 향해 10km에서 100m까지 접근한다고 가정한 경우의 해석 결과는 Fig. 10에 나타내었다. 이로부터 정사각형 평판에서와 마찬가지로 원거리에서는 동일한 소나 단면적 값을 보이지만, 거리가 가까워짐에 따라 그 값이 작아지고 있으며, 목표점에 따라 값이 작아지기 시작하는 거리가 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

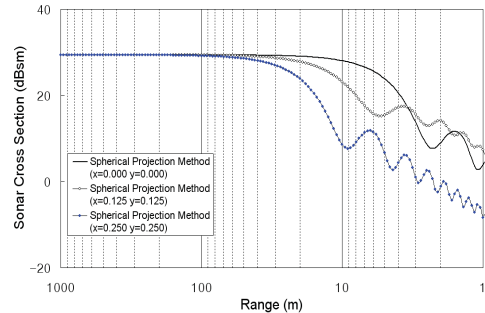


Fig. 9 Near-field sonar cross section with respect to targeting points of the square flat plate when range decreases from 1km to 1m( $f=50kHz$ ,  $\theta=0^\circ$ )

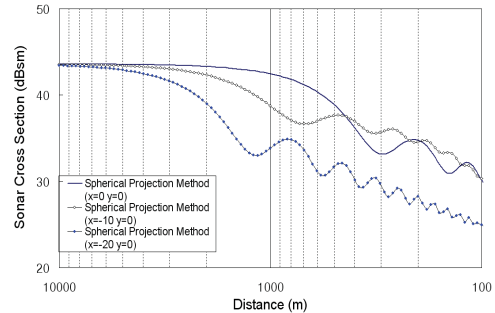


Fig. 10 Near-field sonar cross section with respect to targeting points of the submarine pressure hull when range decreases from 10km to 100m( $f=1kHz$ ,  $\theta=0^\circ$ )

#### 4. 결 론

본 연구에서는 잠수함과 같이 음향학적으로 크기가 큰 수중표적에 대한 근거리장 소나단면적 해석을 위해 구면투영법(spherical projection method)을 이용하여 근거리장 산란 문제를 원거리장 산란 문제로 변환한 후 대상 표적의 근거리장 소나단면적을 기존의 원거리장 물리광학법으로 계산하는 방법을 제안하였다.

제시된 근거리장 소나단면적 해석 방법의 타당성을 검토하기 위해 정사각형 평판과 잠수함 압력 선체에 대한 수치해석을 수행한 결과 원거리 음장 기준을 만족하는 거리 이상에서는 원거리 소나 단면적 해석 결과와 동일하고, 그 이하의 거리에서는 근거리장 효과로 인해 값이 변동하면서 작아짐을 확인하였다. 또한, 근거리장에서는 소나의 접근 경로에 따라 값이 다르게 나타남을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 제시한 방법은 잠수함과 같은 대형 수중표적의 근거리장 소나 단면적 해석 및 소나 장착 어뢰가 다양한 경로를 통해 수중표적으로 접근하는 경우에 대한 소나단면적 시뮬레이션 도구로 활용될 수 있을 것으로 사료한다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- Boo, S.Y., 2001, "Computation of RCS and TES of Curved Objects Using a Curved-Patch Physical Optics Method," J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 38, No. 1, pp. 62-71.
- Choi, Y.H., Shin, K.C., You, J.S., Kim, J.S., Joo, W.H., Kim, Y.H., Park, J.H., Choi, S.M. and Kim, W.S., 2005, "Numerical Modeling and Experimental Verification for Target Strength of Submerged Objects," J. of Ocean Engineering and Technology, Vo. 19, No. 1, pp. 64-70.
- Jin, C., Xu, J. and Wan, W., 1999, "Graphical Computational Method for Near-field Backscattering Problems," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, Vol. 13, pp. 227-235.
- Kim, K.H., Cho, D.S. and Kim, J.C., 2005, "High Frequency Acoustic Scattering Analysis of Underwater Target," J. of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 42, No. 5, pp. 528-533.
- Klement, D., Preissner, J. and Stein V., 1988, "Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Aackscatter Computation of Complicated Objects," IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. 36, No. 2, pp. 228-237.
- Knott, E.F., 1993, Radar Cross Section Measurements, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Legault, S.R., 2004, "Refining Physical Optics for Near-field Computations," Electronics Letters, Vol. 40, No. 1, pp. 71-72.
- 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.
- Rius, J.M., Ferrando, M. and Jofre, L., 1993, "High-frequency RCS of Complex Radar Targets in Real-time," IEEE Trans. Ant. Prop., Vol. AP-41, No. 2, pp. 1308-1319.
- Schneider, H.G., Berg, G. and Gilroy, L., 2003, "Acoustic Scattering by a Submarine: Results from a Benchmark Target Strength Simulation Workshop," ICSV10, pp. 2474-2482.
- 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., 1983, Principles of Underwater Sound, 3rd Ed., McGraw-Hill.



< 김 국 현 >



< 조 대 승 >