

근접장 구면파 소스의 다중 반사 효과를 고려한 수중함의 음향표적강도 해석

조병구^{†*}, 홍석윤^{**}, 권현웅^{**}

해군사관학교 기계조선공학과^{*}
서울대학교 조선해양공학과^{**}

Acoustic Target Strength Analysis for Underwater Vehicles Covering Near Field Spherical Wave Source Originated Multiple Bounce Effects

Byung-Gu Cho^{†*}, Suk-Yoon Hong^{**} and Hyun-Wung Kwon^{**}

Dept. of Mechanical Engineering and Naval Architecture, R.O.K. Naval Academy^{*}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University^{**}

Abstract

For the analysis of Acoustic Target Strength(TS) that indicates the scattered acoustic intensity from the underwater vehicles, an analysis program that is applicable to scatterers insonified by spherical wave source in near field is developed. In this program, the Physical Optics(PO) method is embedded as a base component. To increase the accuracy of the program, multiple bounce effects based on Geometrical Optics(GO) method are applied. To implement multiple bounce effects, GO method is used together with PO method. In detail, GO method has a concern in the evaluation of the effective area, and PO method is involved in the calculation of Acoustic Target Strength for the final effective area that is evaluated by GO method. For the embodiment of near field spherical wave source originated multiple bounce effects, image source concept is implemented additively to the existing multiple bounce algorithm which assumes plane wave insonification. Various types of models are tested to evaluate the reliability of the developed program and finally, a submarine is analyzed as an arbitrary scatterer.

※Keywords: Acoustic target strength(TS, 음향표적강도), Sonar cross section(SCS, 소나단면적), Near field(근접장), Physical optics(PO, 물리광학), Geometrical optics(GO, 기하광학), Mirror image source(가상소스)

접수일: 2009년 7월 28일, 승인일: 2010년 2월 2일

†교신저자: jobaeng2@gmail.com, 011-1745-5439

1. 서론

소나 방정식에서 산란체에 입사하는 음파에 대한 산란 특성을 대표하는 중요한 변수가 바로 음향표적강도(TS: Acoustic Target Strength)이다. 음향표적강도는 원거리장(Far Field)에서 일반적으로 거리에 상관없이 산란체의 기하학적인 형상과 소스-산란체-리시버가 이루는 각도에 의해서 결정된다. 소스와 리시버의 위치가 일치하지 않는 양상태(Bistatic)에서는 소스와 산란체, 산란체와 리시버의 상대적 자세각이 음향표적강도에 영향을 주는 반면, 소스와 리시버의 위치가 일치하는 단상태(Monostatic)에서는 소스(리시버)와 산란체의 상대적 자세각이 음향표적강도에 영향을 준다. 대표적인 형상인 사각평판, 실린더, 구 등에 대해서는 이론적으로 음향표적강도식이 이미 많은 참고문헌에서 다루어졌다(Urick 1975). 산란체의 형상이 복잡한 경우, 과거에는 구, 실린더 등의 조합으로 형상을 근사화시켜 음향표적강도를 구하였으나 이는 정확한 해석방법이 아니다. 일반적으로 산란체의 형태가 정형이 아닌 실제 복잡한 형상인 경우 수치적인 해법으로 접근을 해야 한다. 일반적으로, 음장을 해석할 때에 가장 많이 사용되는 수치 해석 방법으로는 유한요소법(FEM: Finite Element Method)과 경계요소법(BEM: Boundary Element Method)이 있다. 그러나 유한요소법과 경계요소법 모두 고주파수 영역에서는 한계를 갖고 있는 수치해석 기법들이다. 유한요소법의 경우, 고주파수 영역에서는 관심영역을 매우 작은 요소로 나누어야 하며 삼중 적분을 요하고, 수치적인 적분 시에 적분 오차가 쌓이기 때문에 적합하지 않다(Velamparambii et al. 2003). 경계요소법의 경우, 음장이 무한장이므로 음장 해석시에 가장 일반적으로 쓰이는 수치해석 기법이다. 그러나 적분 영역이 2차원일 뿐 유한요소법과 동일한 한계를 갖는다.

고주파수 영역에서 유한요소법과 경계요소법은 한계를 갖기 때문에 이 영역에서는 기하광학(GO: Geometrical Optics) 또는 물리광학(PO: Physical Optics)적 해석 기법을 사용한다. 특히 기하광학

적 기법의 경우 파장이 0으로 수렴하는 극단적 고주파수 영역에서의 해석기법으로, 간단한 2차원 및 3차원 산란체에 대한 음향표적강도식이 1940년대와 1950년대에 개발되었다(Urick 1975). 기하광학적 기법은 산란체에 입사하는 음파의 정반사점(Specular Point)에서의 국부 곡률반지름을 이용하여 음향표적강도식을 유도한다. 따라서 실린더와 같이 한 쪽 방향 곡률반지름이 무한대인 모델이나 두 방향 곡률반지름이 모두 무한대인 평판에 대해서는 기하광학적 기법을 적용할 수 없다. 물리광학적 기법은 Huygens, Fresnel의 고전 산란이론을 정식화한 Helmholtz-Kirchhoff 적분식을 바탕으로 Kirchhoff 근사를 적용한 기법이다. Kirchhoff 근사는 1) 3차원 산란체의 임의의 위치에서의 반사 및 투과계수가 그 점에 접하는 무한 평면의 반사 및 투과계수와 같다는 가정과 2) 산란체의 기하학적 그림자 영역(Shadow zone)에서는 음장이 0이라는 두 가지 가정으로 이루어진다(Chumachenko et al 2008). 물리광학적 기법은 기하광학적 기법과는 달리, 실린더 또는 평판과 같이 곡률반지름이 무한대인 모델에 대한 적용이 가능하기 때문에 일반적으로 곡률이 없는 작은 요소평판으로 모델링되는 임의의 산란체에 대한 음향표적강도를 계산하기에 적합한 기법이다. 물리광학적 기법은 유한요소법, 경계요소법, 기하광학적 기법 등이 갖는 한계를 갖지 않기 때문에 전자기파 분야에서 레이더 단면적(RCS: Radar Cross Section)의 예측기법으로 널리 활용되고 있다(Pouliguen et al. 2006, Legault 2003).

본 논문에서는 물리광학적 기법에 Maggi(1888)와 Rubinowicz(1917)에 의해 제시된 Theory of Boundary Diffraction Wave를 적용하여 음장을 해석하였다. 물리광학적 기법에 Theory of Boundary Diffraction Wave를 적용하는 경우, 면적분이 아닌 선적분이 요구되며, 일정 조건을 만족하는 영역에서는 Gordon(1975)이 제시한 근사식을 사용할 수 있다. Gordon이 제시한 산란된 음장에 대한 식과 소나 단면적(SCS: Sonar Cross Section)의 정의식, 그리고 음향표적강도와 소나 단면적의 관계식을 바탕으로 다각 평판에 대한 원

거리장에서의 음향표적강도식을 얻을 수 있다. 이 식은 수치적분이 필요없고, 곡률반지름이 무한대인 모델에도 적용 가능한 장점이 있다.

위 기법을 바탕으로 좀 더 정확한 음향표적강도를 얻기 위해 다중 반사 효과를 고려하였다. 이를 위해 입사파와 반사파를 광선으로 가정하는 기하광학적 가정을 바탕으로, 반사파의 경로를 계산하여 반사에 의해 발생하는 유효면적(Effective Area)을 계산하였다. 이 때 적용한 기하광학적 가정은 단순히 유효면적을 계산하기 위해 음파를 광선으로 가정한 것이다. 즉, 무한대의 곡률반지름을 갖는 산란체에 의해 산란된 음장을 구할 때에는 기하광학적 가정이 적용될 수 없지만, 단순히 반사에 의한 유효면적을 구할 때에는 기하광학적 가정이 적용될 수 있는 것이다.

본 논문에서는 특히 축소 모델에 대한 실내 수조 실험, 또는 실제 크기의 모델에 대한 비교적 가까운 거리에서의 다중 반사 효과를 고려한다. 이에 앞서 해석에 사용되는 정의식과 기법들이 적용 가능한 관심영역 또는 근접장(Near Field)에 대한 명확한 정의를 내려야 한다. 음향학에서 근접장과 원거리장(Far Field)에 대한 개념은 다양하게 사용된다. 음압과 입자속도의 위상일치 여부, 위상측면에서 평면파와의 유사성, 진폭 측면에서 구면파와의 유사성 등의 다양한 기준으로 근접장과 원거리장을 구분한다. 이러한 기준들을 바탕으로 관심영역에 대한 정의를 내리고, 이 영역을 '근접장'으로 표현한다. 이러한 근접장에서는 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과가 원거리장에서의 그것과는 다른 방식으로 나타나는데, 원거리장에서는 반사하는 음파의 퍼지는 효과를 고려할 필요가 없지만, 근접장에서는 반사하는 음파의 퍼지는 효과를 고려해야 한다. 이러한 효과를 반영하기 위해 가상 소스(Mirror image source) 개념을 적용하여 근접장에서의 다중 반사 효과를 반영하였다.

마지막으로, 프로그램의 신뢰성 확보를 위해 사각 평판과 실린더에 대한 기존의 알려진 음향표적강도 식과 해석 결과를 비교하였다. 또한 근접장 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과는 3개의 평판으로 이루어진 간단한 구조물의 유효면적의 계

산결과를 통해 검증하였다. 이를 바탕으로 임의의 형상을 가진 산란체인 잠수함 모델에 대해서 근접장 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과를 고려한 음향표적강도 해석을 수행하였다.

2. 이론 배경

2.1 관심 영역에 대한 정의

음향학에서 정의하는 근접장, 원거리장에 대한 정의는 다양하다. kr (k 는 파수, r 은 소스-산란체 또는 산란체-리시버 사이의 거리) 값으로 근접장과 원거리장을 구분하기도 하고, 소스 또는 산란체에 의해 방사된 음파의 거동이 진폭의 측면에서 얼마나 구면파와 비슷한지, 위상의 측면에서는 얼마나 평면파와 비슷한지를 기준으로 근접장과 원거리장을 구분하기도 한다. 따라서 본 논문에서 관심을 갖는 영역에 대한 명확한 정의가 필요하다.

2.1.1 음압과 입자속도의 위상일치 여부

일반적으로 음압과 입자속도의 위상은 일치하지 않는다. 그러나 소스 또는 산란체로부터 수 개의 파장만큼 멀어지면, 음압과 입자속도의 위상은 일치한다. 즉,

$$kr \gg 1 \quad (1)$$

식을 만족시키는 영역에서 음압과 입자속도의 위상은 일치하게 된다. 이 영역에서는 인텐시티를 음압 또는 입자속도의 제곱형태로 나타낼 수 있으며, 바로 이 영역이 본 논문의 관심영역이 된다. 여기서 k 는 파수, r 은 소스-산란체 또는 산란체-리시버 사이의 거리를 나타낸다.

2.1.2 입사파의 위상 측면

구면파 소스에 의한 입사파의 위상이 산란체의 표면상에서 평면파로 근사될 수 있는 경우에 위상의 측면에서 원거리장으로 구분한다.

Fig. 1은 구면파 소스에 의해 방사된 입사파가 산란체의 표면에서 평면파와 얼마만큼의 위상차를 가지고 입사하는 지 보여준다. 특히, 산란체에

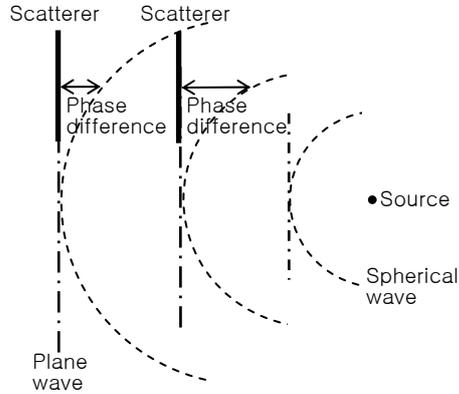


Fig. 1 Phase difference between spherical wave source & plane wave source

입사하는 음파가 수직으로 입사하는 경우에 대해서

$$\Delta_{phase} \leq \frac{\pi}{16} \quad (2)$$

의 조건을 사용하면,

$$\frac{\lambda r}{D^2} \geq 4 \quad (3)$$

와 같은 식을 유도할 수 있다(Pouliguen and Desclos 1996). (2)식에서 Δ_{phase} 는 산란체에 구면파가 수직하게 입사할 때, 산란체의 중심과 끝단의 위상차이다. 또 (3)식에서 λ 는 파장을, D 는 산란체의 최대길이, r 은 산란체와 소스 사이의 거리를 의미한다. (3)식은 위상 측면에서 원거리장과 근접장을 구분하는 기준이 되는 식으로, 이를 만족시키는 거리 r 은 위상 측면에서 원거리장으로 근사할 수 있다. 본 논문에서는 (3)식을 만족하는 영역을 다룬다. 즉, 위상 측면에서는 입사하는 구면파를 평면파로 근사할 수 있는 영역이 관심 영역이다. 이 영역에서는 위상 측면에서 입사하는 구면파를 평면파로 가정할 수 있으므로, Gordon(1975) 가 제시한 근사식을 적용할 수 있다.

2.1.3 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과 고려 여부

본 논문은 근접장 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과를 고려하였다. 따라서 구면파 소스에 의한 입사파가 산란체를 맞고 반사될 때, 퍼지는 효과를 고려해야 하는 영역에 대한 명확한 정의가 필요하다.

최대길이 D 인 산란체에서 다중 반사는 D 만큼 떨어진 요소평판끼리 일어날 수 있다. 따라서 D 만큼 떨어진 요소평판간의 다중 반사 효과를 고려할 때, 구면파에 의한 퍼짐효과를 고려한 인텐시티와 퍼짐효과를 고려하지 않고 평면파를 가정한 인텐시티의 비율을 이용해 관심영역을 정의할 수 있다.

Fig. 2 와 Fig. 3 에서 D 는 산란체의 최대길이를, r 은 소스와 산란체간의 거리를 의미한다. Fig.2 는 입사하는 음파를 평면파로 가정한 경우의 다중 반사 현상을 설명하는 그림으로 반사파의 퍼짐효과를 나타내지 않고 있다. 반면, Fig. 3 은 입사하는 음파를 구면파로 가정했을 때의 다중 반사 현상을 설명하는 그림으로 반사파의 퍼짐효과를 잘 나타내고 있다. 반사파의 퍼짐 효과를 고려한다는 것은 1) 요소평판 1 과 요소평판 2 사이의 거리 D 에 의한 인텐시티의 진폭 감소 효과와 2) 반사파가 비추는 영역이 넓어지는 효과를 고려한다는 것을 의미한다. 이러한 진폭의 감소는 반사파가 진행할수록 비추는 영역이 넓어지기 때문에 일어나는 현상이므로, 1)과 2) 는 같은 효과를 나타낸다. 이러한 퍼짐효과를 고려해야 하는 영역의 정의를 위해,

$$10 \log_{10} \frac{I_{scattered}^{plane\ wave}}{I_{scattered}^{spherical\ wave}} \geq 0.1dB \quad (4)$$

와 같은 조건을 적용하였다. 여기서 $I_{scattered}^{plane\ wave}$ 는 반사파를 평면파로 가정했을 때의 인텐시티를 나타내고, $I_{scattered}^{spherical\ wave}$ 는 반사파를 구면파로 가정했을 때의 인텐시티이다. (4)식을 r 과 D 에 대한 식으로 바꾸면,

$$10 \log_{10} \left(\frac{r+D}{r} \right)^2 \geq 0.1dB \quad (5)$$

와 같이 나타낼 수 있고, 이를 정리하면,

$$r \leq 86.4D, \text{ 또는 } \frac{\lambda r}{D^2} \leq 86.4 \frac{\lambda}{D} \quad (6)$$

와 같은 관심영역에 대한 조건식을 얻을 수 있다. 즉, (6)의 조건을 만족시키는 영역 내에서는 다중 반사 효과의 고려시, 구면파의 퍼짐효과를 고려해야 한다.

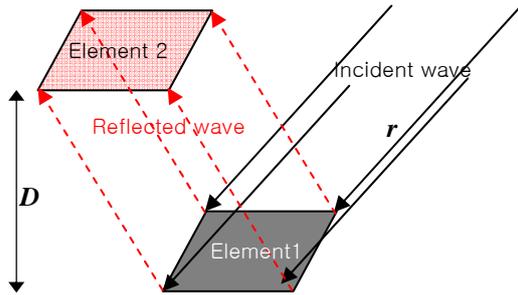


Fig. 2 Plane wave incidence assumed multiple bounce effect

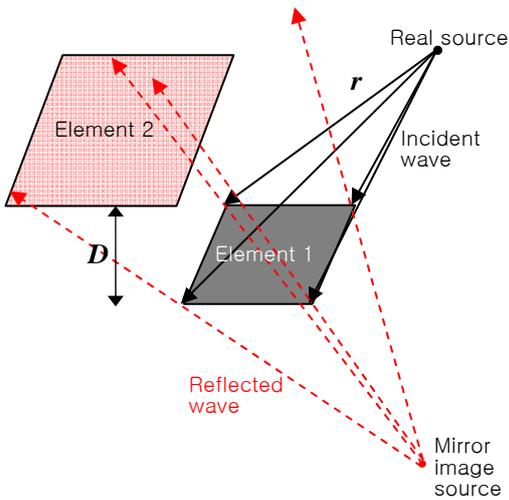


Fig. 3 Spherical wave incidence assumed multiple bounce effect

2.1.4 관심 영역의 정리

본 논문에서 관심을 갖는 영역은 (1)식, (3)식, (6)식을 만족시키는 영역이다. 이를 도표로 정리하면 다음과 같다.

여기서 가로축은 D/λ 를, 세로축은 $\lambda r/D^2$ 이다. 위 Fig. 4 에서 볼 수 있듯이, $D/\lambda < 21.6$ 의 영역에서는 $4 < \lambda r/D^2 < 86.4(D/\lambda)^{-1}$ 인 범위가 발생한다. 이 영역이 바로 본 논문의 관심 영역이 되며 (1)식을 기준으로 원거리장, (3)식을 기준으로 원거리장, 그리고 (6)식을 기준으로 근접장에 해당하는 영역이다. 이러한 세 가지 조건을 만족하는 영역을 본 논문에서는 ‘근접장’ 이라고 부르기 한다. 논문의 주제가 다중 반사 효과인 만큼, 마지막 세 번째 기준이 가장 중요하므로 명칭을 위와 같이 붙이기로 한다. 이 영역이 물리적으로 갖는 특징은 다음과 같다. 근접장에서 진행하는 음파의 음압과 입자속도의 위상은 일치하므로, 인텐시티는 음압의 제곱, 또는 입자속도의 제곱으로 표현할 수 있다. 또한 근접장에서는 산란체로 구면파와 평면파 입사가 각각 이루어질 때, 산란체 표면에서 발생하는 위상차는 $\pi/16$ 이내이다. 즉, $\pi/16$ 이내의 위상 오차범위 내에서 Gordon (1975) 이 제시한 근사식을 사용할 수 있다. 마지막으로, 근접장에서는 산란체로 구면파와 평면파 입사가 각각 이루어질 때, 산란체 표면에서 발생하는 진폭의 차이는 0.1dB 이상이다. 즉, 식 (6)에서 볼 수 있듯이, 소스-산란체간의 거리가 산란체의 최대길이의 86.4 배에 비해 작은 영역을 의미하므로, 이 기준으로는 근접장에 해당한다. 그리고 이 영역에서는 평면 입사파에 의한 다중 반사 효과가 아닌 구면 입사파에 의한 다중 반사 효과를 고려해야 한다.

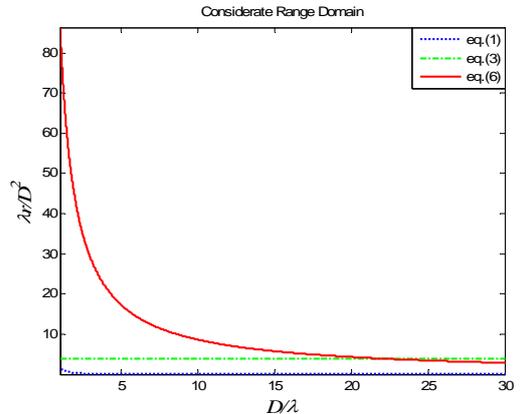


Fig. 4 Considerate range domain

2.2 음향표적강도와 소나단면적

음향표적강도와 소나단면적은 산란되는 음파의 인텐시티와 초기 방사된 음파의 인텐시티 비를 나타낸다. 따라서, 음향표적강도와 소나단면적간의 간단한 관계식을 유도할 수 있고, 소나단면적의 계산을 통해 음향표적강도를 계산할 수 있다.

2.2.1 음향표적강도의 정의

음향표적강도는 소스에서 방사된 초기 음파가 산란체에 맞을 때의 인텐시티와 산란체에 의해 산란된 인텐시티의 비로,

$$\begin{aligned}
 TS &\equiv 10\log_{10} \left| \frac{I_r}{I_i} \right|_{r=1m} & (7) \\
 &= 10\log_{10} \frac{|I_r|_{r=1m}}{|I_i|} = 20\log_{10} \frac{|P_r|_{r=1m}}{|P_i|}
 \end{aligned}$$

와 같은 식으로 정의한다. 여기서 $|I_i|$ ($|P_i|$) 는 소스로부터 방사된 초기 음파가 산란체의 표면에서 갖는 인텐시티(음압) 의 크기를, $|I_r|_{r=1m}$ ($|P_r|_{r=1m}$) 는 산란된 음파가 산란체의 음향 중심으로부터 $1m$ 떨어진 위치에서 갖는 인텐시티(음압) 의 크기를 각각 의미한다. 그러나 $|I_r|_{r=1m}$ ($|P_r|_{r=1m}$) 는 실제 리시버의 위치를 음향 중심으로부터 $1m$ 떨어진 위치에 놓고 측정된 값이 아닌, 리시버의 위치는 임의의 위치에 놓고 인텐시티(음압) 를 측정 한 뒤에 $r=1m$ 의 위치의 수치로 환산한 인텐시티(음압) 이다(Urick 1975). 이렇게 정의되는 음향 표적강도는 원거리장에서는 산란체와 리시버의 거리에 상관이 없지만 근접장에서는 거리에 상관은 파라미터이다.

위 (7) 식의 마지막 등호는 (1)식을 만족하는 영역에서만 성립한다. 이 영역에서는 음압과 입자 속도의 위상이 일치하기 때문에 인텐시티의 비는 음압의 비의 제곱으로 표현할 수 있다.

2.2.2 소나단면적(SCS : Sonar Cross Section)의 정의

소나단면적은 소스에서 방사된 음파가 산란체의

표면에서 갖는 음압과 산란체에 의해 산란된 음압의 비로 일반적으로

$$\sigma(SCS) \equiv \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|P_r|^2}{|P_i|^2} \quad (8)$$

와 같이 정의한다(Knott et al. 1993). 여기서, $|P_i|$ 는 소스로부터 방사된 음파가 산란체의 표면에서 갖는 음압의 크기를 의미하고, $|P_r|$ 은 산란된 음압의 크기를 나타낸다. 그리고 R 은 리시버와 산란체 사이의 거리를 의미한다. 소나단면적 역시 음향표적강도와 마찬가지로 원거리장에서는 거리에 무관한 파라미터이다.

위의 소나단면적 정의를 이용하여 소나 단면적의 제곱근을

$$\sqrt{\sigma} \equiv \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi} R \frac{P_r}{|P_i|} \quad (9)$$

와 같이 정의할 수 있다. 여기서 사용한 기호들은 (8) 식에서 사용한 기호들과 동일하며, 위 정의는 P_r 의 위상을 그대로 가지고 있기 때문에 여러 개의 요소로 모델링된 산란체의 $\sqrt{\sigma}$ 를 각 요소에 대한 $\sqrt{\sigma}$ 의 합으로 나타낼 수 있는 장점이 있다.

2.2.3 음향표적강도와 소나 단면적의 관계

(7)식의 음향표적강도 정의와 (8)식의 소나단면적 정의를 이용한 두 파라미터간의 관계식은

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

와 같이 나타낼 수 있다.

2.3 임의의 형상의 음향표적강도 계산

여러 개의 요소평판으로 이루어진 임의의 형상을 갖는 산란체의 음향표적강도는 각 요소평판에 대한 소나단면적의 제곱근($\sqrt{\sigma_{element}}$)을 구한 후 그것의 단순합으로써 전체 소나단면적의 제곱근($\sqrt{\sigma_{total}}$)을 구할 수 있는데, 이는 고주파수 영역

에서만 가능한 기법이다. 즉, 고주파수 영역에서는 산란체의 표면을 따라서 포복파(Creeping Wave)가 발생하지 않기 때문에(Knott et al. 1993),

$$\sqrt{\sigma}_{total} = \sum \sqrt{\sigma}_{element} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 $\sqrt{\sigma}_{total}$ 은 임의의 형상을 갖는 산란체의 소나단면적의 제곱근을 의미하고, $\sqrt{\sigma}_{element}$ 는 각 요소의 소나단면적의 제곱근을 의미한다.

2.4 임의의 다각형 평판에 대한 소나단면적

임의의 형상을 갖는 산란체에 대한 음향표적강도를 해석하기 위해서는 형상을 작은 요소평판으로 모델링 해야 한다. 기존의 음향표적강도식(Urick 1975) 은 위상정보가 없고, 삼각형 또는 오각형 형상을 가진 요소평판에 대한 식이 없기 때문에 임의의 형상을 가진 산란체에 대한 해석을 수행하기에는 부적합하다.

이에 대한 방안으로 Theory of boundary diffraction wave(Miyamoto and Wolf 1962) 를 바탕으로, 다각 평판에 평면파가 입사했을 때의 산란되는 음장에 대한 식(Gordon 1975)을 사용한다. 다음과 같이 임의의 N 각형 평판에 대해서

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{(\vec{R}_1 \cdot \vec{\eta} - \vec{\xi}_i \cdot \vec{\eta}) e^{jk\vec{r}_0 \cdot \vec{w}}}{T \cdot 2\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^N \left(\hat{p} \cdot \Delta a_n \frac{\sin \left[\frac{k}{2} \vec{w} \cdot \Delta a_n \right]}{\left[\frac{k}{2} \vec{w} \cdot \Delta a_n \right]} e^{\left[\frac{jk}{2} \vec{w} \cdot (a_n + a_{n+1}) \right]} \right) \quad (12)$$

- $\sqrt{\sigma}$ 양상태 소나의 소나단면적 제곱근
- $\vec{\xi}_i$ 소스에서 방사된 음파의 진행방향
- $\vec{\eta}$ 다각평판의 법선단위벡터
- \vec{R} 다각평판상의 임의의 점으로부터 리시버를 잇는 벡터
- R $|\vec{R}|$
- \vec{R}_1 \vec{R}/R

- \vec{w} $\vec{\xi}_i - \vec{R}_1$
- T \vec{w} 를 S 에 정사영 시킨 길이
- \hat{p} $\frac{\vec{\eta} \times \vec{w}}{|\vec{\eta} \times \vec{w}|}$
- \vec{a}_n 다각 평판상의 꼭지점의 위치벡터
- Δa_n $\Delta a_n = \vec{a}_{n+1} - \vec{a}_n$ ($n < N$)
 $\Delta a_n = \vec{a}_1 - \vec{a}_N$ ($n = N$)
- L 소스
- P 음장내의 임의의 점
- k 초기 음파의 파수
- \vec{r}_0 소스점 L 과 평판상의 점 또는 평판 근처의 점을 잇는 벡터
- r_0 $|\vec{r}_0|$
- O 다각 평판상의 원점

와 같이 유도할 수 있다. $T=0$ 인 경우에,

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jkA}{2\sqrt{\pi}} (\vec{R}_1 \cdot \vec{\eta} - \vec{\xi}_i \cdot \vec{\eta}) e^{jk\vec{r}_0 \cdot \vec{w}} \quad (13)$$

A 다각평판의 넓이

와 같다. 위의 (12)식과 (13)식의 각 변수들은 Fig. 5 에 나타나 있다. (13)식은 T 항에 의한 특이점(singular point) 이 발생하는 경우에 소나단면적의 제곱근($\sqrt{\sigma}$) 을 구할 수 있는 식이다. 위에서 유도한 (12), (13)식은 (3)식을 만족하는 영역에서만 적용가능하다.

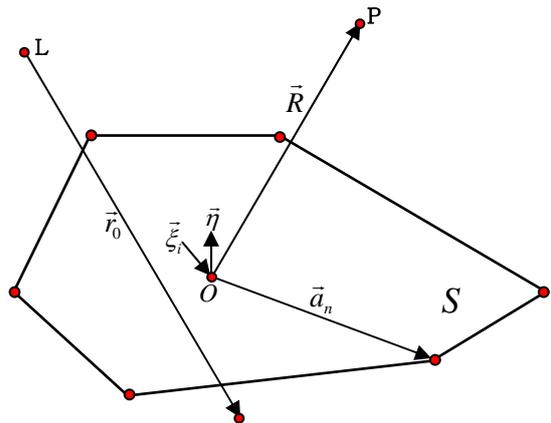


Fig. 5 Illustration of terms in equation (12)

(12)식은 산란체의 소나단면적을 요소의 모서리들에 의한 영향의 합으로써 구할 수 있다는 것을 의미한다. (12)식과 (13)식은 적분이 필요 없기 때문에 수치 해석 시간, 적분 오차 등 기존의 유한요소법, 경계요소법이 갖고 있는 문제점을 해결할 수 있다.

2.5 다중 반사 효과의 적용

임의의 형상을 가진 산란체의 경우, 산란체를 이루고 있는 요소평판들간의 상호반사가 일어나게 된다. 이러한 요소 평판들간의 상호반사는 산란체의 음향표적강도에 영향을 주게 되므로 정확한 음향표적강도를 해석하기 위해서는 다중 반사 효과를 고려해 주어야 한다.

다중 반사 효과를 고려하기 위해서는 기하광학 및 물리광학 기법을 동시에 사용한다. 물리광학적 기법은 1 장에서 밝힌 바와 같이 Helmholtz-Kirchhoff 적분식에 Kirchhoff 근사를 적용한 기법이다(Chumachenko et al 2008). (12)식과 (13) 식은 Helmholtz-Kirchhoff 적분식에 물리광학적 가정과 Stokes' Theorem 을 적용하여 얻은 식으로 음파의 진행 경로 계산이 힘든 기법이다. 반면에 기하광학적 기법은 음파를 광선으로 가정하는 기법으로 정확한 음압 분포를 구하는 데는 적당하지 않지만, 음파의 진행 경로를 쉽게 계산할 수 있는 장점을 가지고 있다(Knott 1977). 실제 능동소나의 주파수는 1kHz ~ 10kHz 로 충분히 고주파수이므로 기하광학적 기법의 사용이 가능하다.

본 논문에서 다중 반사 효과를 고려할 때, 음파의 진행 경로 계산과 유효면적의 계산에는 기하광학적 기법을 사용하였고, 최종 산란에서는 물리광학적 기법을 사용하는 방법으로 다중 반사 효과를 구현하였다(Fig. 6 참조).

다중 반사 효과의 구현방식은 본 논문에서 정의한 원거리장, 근접장에서 모두 기하광학적 기법과 물리광학적 기법을 혼용한다. 그러나 반사되는 음파의 방향이 원거리장에서는 요소평판상의 모든 점에서 같지만, 근접장에서는 요소평판상의 점마다 다르다. 따라서 다중 반사 효과를 구현 할 때, 원거리장에서 음파의 경로 및 유효면적에 대한 자

료구조와 근접장에서의 자료구조는 상이하게 된다. 본 논문에서는 근접장에서의 다중 반사 효과를 구현하였으며, 경로의 계산과 유효면적의 계산시에 Beam¹ 이라고 명명한 자료 구조를 사용하였다.

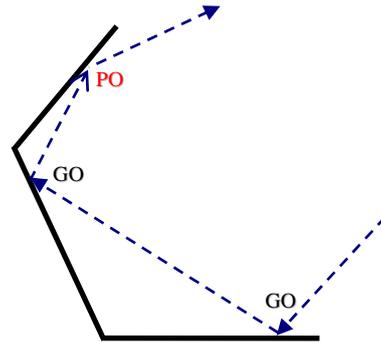


Fig. 6 Concept of multiple bounce

2.5.1 원거리장에서의 유효 면적 계산

본 논문에서 정의하는 원거리장은 (1)식, (3)식 그리고

$$r > 86.4D \text{ 또는 } \frac{\lambda r}{D^2} > 86.4 \frac{\lambda}{D} \quad (15)$$

의 조건을 만족시키는 영역이다. 원거리장에서는 구면파를 평면파로 가정할 수 있기 때문에 요소평판을 맞고 반사되는 음파의 방향은 요소평판상의 모든 점에서 같다(Fig. 7 참조).

이러한 원거리장에서 유효면적을 구하기 위해서는 반사가 일어나는 요소평판(Fig. 7 의 요소평판 1)의 노드점과 산란되는 음파의 방향이 필요하며, 이 두 가지가 원거리장에서 사용되는 Beam 을 구성한다.

¹ Beam 은 요소평판의 꼭지점과 각 꼭지점에서 반사되어 진행하는 음파의 방향벡터로 이루어진 자료구조이다.

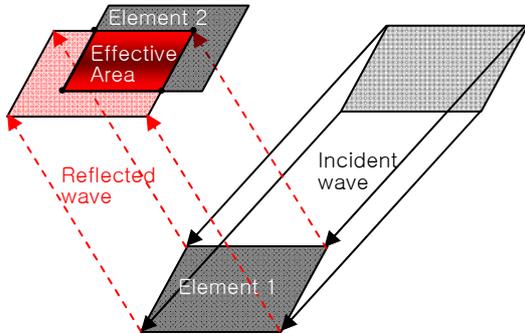


Fig. 7 Concept of multiple bounce in far field

2.5.2 근접장에서의 유효 면적 계산

원거리장이나 근접장에서 다중 반사 효과를 고려하기 위해 경로와 유효면적을 계산하는 과정은 공통적으로 기하광학적 기법을 바탕으로 하고 있다. 원거리장에서는 구면파를 평면파로 근사할 수 있으므로 반사되는 음파의 방향이 요소평판의 모든 점에서 같다(Fig. 7 참조). 그러나 (1)식, (3)식, (6)식을 만족시키는 근접장에서는 요소평판을 맞고 반사되는 음파의 방향이 요소상의 점마다 다르기 때문에 원거리장에서 사용하는 Beam 구조와는 다른 Beam 구조를 갖는다. 근접장에서 사용하는 Beam 구조를 간단하게 하기 위해 본 논문에서는 실제소스의 반사면에 대한 대칭 위치에 놓인 가상 소스(Mirror Image Source)의 개념을 적용하였으며, 이를 이용해 음파의 진행 경로와 유효면적을 구하였다(Fig. 8 참조).

근접장에서 반사되는 음파와 요소평판(Fig. 8의 요소평판 2)이 만나는 유효면적을 구하기 위해서는 반사가 일어나는 요소평판(Fig. 8의 요소평판 1)의 노드점과 반사가 일어나는 요소평판에 대칭인 가상소스의 위치가 필요하다. 따라서 이 두 가지가 근접장에서의 Beam 을 구성한다. 가상소스의 개념을 사용함으로써 요소평판의 노드점마다 다른 방향으로 반사되는 음파의 방향을 계산할 수 있게 되므로 알고리즘의 구성시 많은 이점을 갖게 된다.

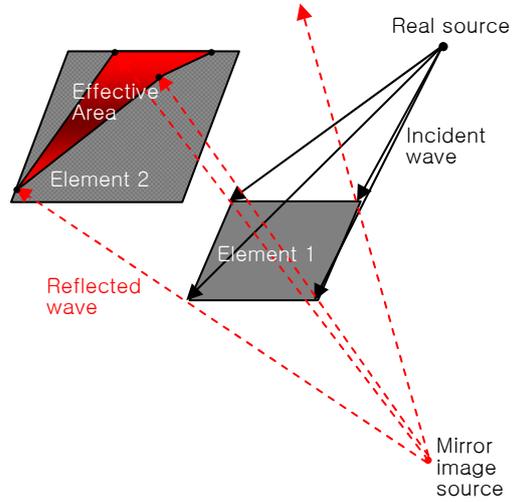


Fig. 8 Concept of multiple bounce in near field

2.5.3 최종 반사에서의 음향표적강도계산

기하광학적 기법을 이용하여 최종 반사에서의 유효 면적을 구한 후, 물리광학적 기법을 이용하여 유효 면적에 대한 음향표적강도를 계산하게 된다. 즉 (12)식과 (13)식을 이용하여 산란체에 대한 소나 단면적을 구하고, (10)식을 이용하여 최종 음향표적강도를 구한다. (12)식과 (13)식은 (3)식을 만족하는 영역에서 적용이 가능한 식으로 본 논문에서 사용하는 근접장에 포함되므로 적용이 가능하다.

3. 간단한 형상에 대한 검증

임의의 형상을 갖는 모델에 대한 음향표적강도를 구하기에 앞서 (12)식과 (13)식을 실린더에 대해 검증하였다. 또한 근접장에서의 다중 반사 효과를 검증하기 위해 3 개의 평판으로 구성된 구조물에 대한 검증을 하였다.

3.1 실린더 검증

실린더의 경우 곡률이 한 방향으로 존재한다. 일반적으로 복잡한 형상의 모델은 곡률을 갖고 있으므로 곡률을 갖는 실린더 모델에 대한 검증이 필요하다. 실린더에 대한 단상태 음향표적강도는

$$TS = 10 \log \left[\left(\frac{aL^2}{2\lambda} \right) \left(\frac{\sin(kL \sin \phi)}{kL \sin \phi} \right)^2 \cos \phi \right] \quad (17)$$

와 같다(Urick 1975). 여기서, a 는 반경, L 은 길이, k 는 파수, λ 는 파장, ϕ 는 소스(리시버)와 실린더가 이루는 각이다.

본 논문에서 정의한 근접장 환경에 대한 검증을 하면, 반경 $5m$, 길이 $20m$, 주파수 $1kHz$, 소스(리시버)와 실린더간의 거리가 $2km$ 이므로, (3)식을 만족한다(Fig. 9 참조).

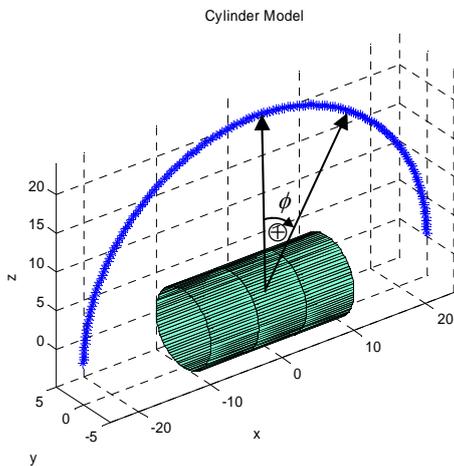


Fig. 9 Cylinder model

Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 실린더와 같이 곡률을 갖는 구조물의 경우에도 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 (12)식과 (13)식은 곡률반지름이 작은 경우에 나타나는 회절 효과(Diffraction effect)를 반영하지 않기 때문에 곡률반지름이 작은 실린더에 대해서는 일반적으로 적용하기 힘들다(Knott et al. 1993).

3.2 근접장에서의 다중 반사 효과 검증

근접장에서의 다중 반사 효과를 검증하기 위해 Fig. 11과 같이 $3m \times 3m$ 평판 2개와 $3m \times 4m$ 평판 1개로 구성된 구조물(Trihedral plate)에 대해서 2회 반사(Double Bounce)를 고려한 해석

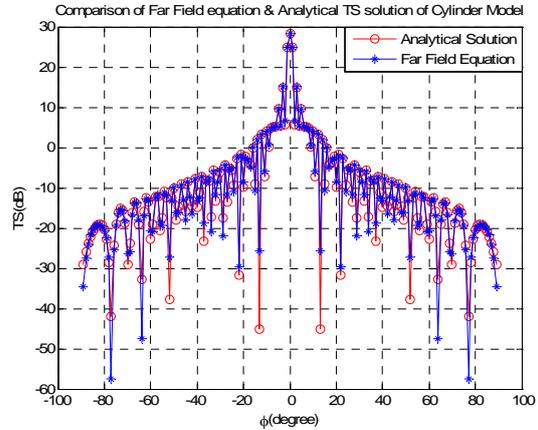


Fig. 10 Comparison of the eq.(12), (13) and the theoretical TS equation (eq.(17)) for a cylinder model

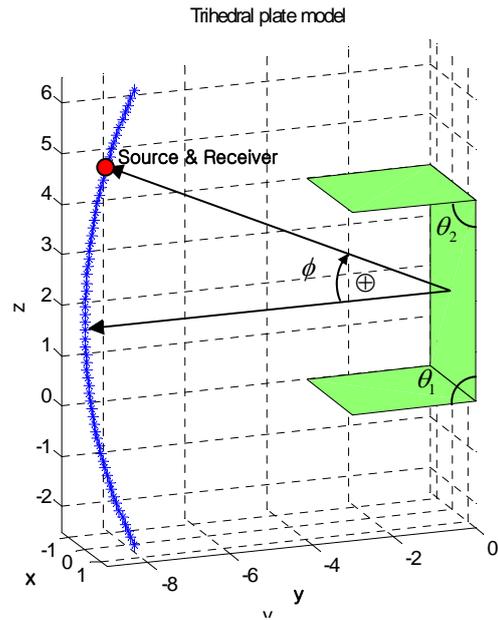


Fig. 11 Trihedral plate model(Monostatic)

을 수행하였다. 3회 반사(Triple Bounce)의 경우 유효면적은 발생하지만 정반사 방향이 리시버의 방향과 어긋나기 때문에 영향이 거의 없고, 4회 이상의 반사에서는 유효면적이 거의 발생하지 않기 때문에 가장 영향이 큰 2회 반사만을 고려하

였다. 각 평판이 이루는 각은 $\theta_1 = 90^\circ$, $\theta_2 = 90^\circ$ 이고, 소스(리시버)와 산란체간의 거리는 $50m$, 주파수는 $1kHz$ 이다. 이러한 조건하에서 $D/\lambda = 2.67$, $\lambda r/D^2 = 4.69$ 이므로 근접장 다중 반사 효과를 적용해야 하는 관심영역에 속한다. Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 소스(리시버) 위치가 0° 일 때를 기준으로 대칭적인 결과가 나오는 것을 볼 수 있다. 이는 산란체가 0° 를 기준으로 대칭적인 형상이기 때문이다. 또한 다중 반사 효과에 의한 영향이 -11° 와 11° 에서 $29.98dB$ 로 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 -11° 와 11° 에서 단일 반사만을 고려한 음향표적강도가 위상의 영향으로 작기 때문에 나타나는 현상으로 유효면적이 가장 크기 때문은 아니다.

유효면적의 증가에 따른 음향표적강도의 증가 현상은 소스(리시버)와 산란체가 이루는 각이 증가함에 따라 나타나는 두 그래프의 전체적인 경향성으로 알 수 있다(Fig. 12 참조). 다중 반사를 고려하지 않았을 때에는 소스(리시버)와 산란체가 이루는 각이 커질수록 음향표적강도가 감소하는 경향이 있다. 반면에 다중 반사 효과를 고려했을 때에는 소스(리시버)와 산란체가 이루는 각이 커질수록 음향표적강도가 커지는 경향을 볼 수 있다. 따라서 소스(리시버)와 산란체가 이루는 각이 커질수록 다중 반사 효과의 영향은 전체적으로 증가하는 경향을 보여준다. 즉, 위상의 영향으로 생기는 동요를 무시하면 -30° 와 30° 에서 다중 반사 효과에 의한 영향이 $20.86dB$ 으로 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 전체적인 경향성은 소스(리시버)와 산란체가 이루는 각이 증가할수록 반사에 의한 유효면적이 증가하기 때문에 나타나는 것이다.

다음으로, 3 회 반사의 효과를 살펴보기 위해서 Fig. 11 과 같은 구조물에 대하여 양상태 음향표적강도를 계산하였다. 3 개의 면으로 구성된 Fig. 11 과 같은 구조물에서는 단상태의 경우, 3 회 반사의 효과가 뚜렷하게 나타나지 않는다. 따라서 Fig. 13 과 같이 리시버의 위치를 고정시키고, 소스의 위치를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 소스(리시버)와 산란체간의 거리는 $50m$, 주파수는 $1kHz$ 이다.

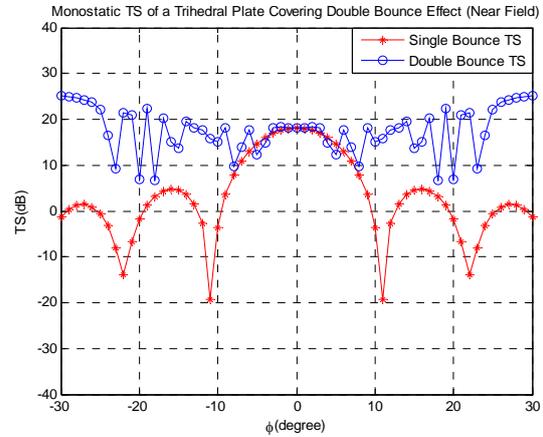


Fig. 12 TS Analysis covering double bounce effect for trihedral plate model in near field(Monostatic)

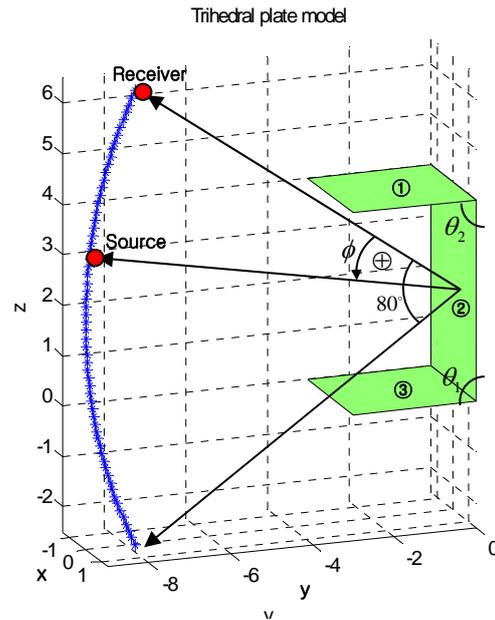


Fig. 13 Trihedral plate model(Bistatic)

Fig. 14 에서 볼 수 있듯이, $\phi \geq 70^\circ$ 에서 3 회 반사의 효과가 나타나기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 또한 $\phi = 80^\circ$ 에서 가장 큰 $8.81dB$ 의 차이를 나타낸다. $\phi \geq 70^\circ$ 영역에서는 2 회 반사의 효과가 미비한 반면, 3 회 반사의 효과가 비교적 크

게 나타나는 것을 볼 수 있다(Fig. 14의 Single Bounce TS와 Double Bounce TS는 차이가 거의 없는 반면, Triple Bounce TS와는 차이가 비교적 크다.). 이는 Fig. 13에서 볼 수 있듯이, 소스 → ①번 평판 → ②번 평판 → ③번 평판 → 리시버의 순서로 음파가 진행하는 3회 반사 효과가 지배적이기 때문이다.

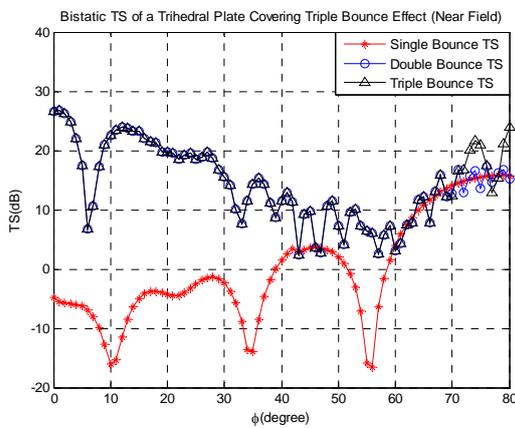


Fig. 14 TS Analysis covering triple bounce effect for trihedral plate model in near field(Bistatic)

4. 임의의 형상을 갖는 모델에 대한 수치 적용

본 논문에서 사용하고 있는 (12)식과 (13)식은 다각 평판에 대한 음향표적강도식으로, 실린더의 음향표적강도 이론식과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 또한 다중 반사 효과에 의한 영향 역시 타당하게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 일반적인 형상을 가진 잠수함에 대해서 (12)식과 (13)식을 적용한 음향표적강도 해석을 수행하였다. 또한 높은 정확도를 위하여 다중 반사 효과를 고려하였다. 본 논문에서 사용한 다중 반사 효과 알고리즘은 원거리장 및 근접장에서 모두 사용할 수 있는 알고리즘이다. 따라서 원거리

장과 근접장에서 다중 반사 효과를 고려한 음향표적강도 해석을 수행하고 다중 반사 효과가 미치는 영향을 비교해 보았다.

4.1 원거리장에서의 다중 반사 효과

원거리장에서 다중 반사 효과를 보기 위하여 Fig. 15와 같이 길이 50m인 잠수함에 대해서 소스(리시버)가 100km 떨어져 있고, 주파수가 10kHz인 경우에 다중 반사 효과를 고려한 해석을 수행하였다. 이 경우, $D/\lambda = 333.3$, $\lambda r/D^2 = 6$ 으로 원거리장에 해당하는 영역이다.

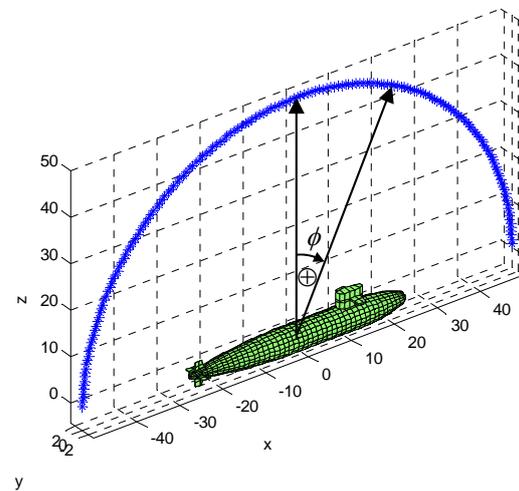


Fig. 15 Real submarine model

Fig. 16에서 볼 수 있듯이 -89° 부터 89° 까지 179개의 각도에 대해 다중 반사 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 표준편차는 약 13.7dB이다. 또한 다중 반사 효과가 -45° 와 45° 부근에서 가장 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

4.2 근접장에서 다중 반사 효과의 적용

Fig. 17과 같이 길이 1.2m의 작은 잠수함에 대해서 소스(리시버)가 5m 떨어져 있고 주파수가 1kHz인 경우에 근접에서의 다중 반사 효과를 고려한 해석을 수행하였다. 이 경우 $D/\lambda = 0.8$, $\lambda r/D^2 = 5.21$ 로 근접장에 해당하는 영역이다.

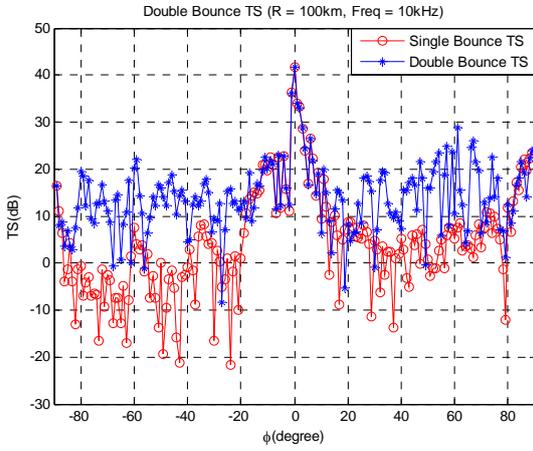


Fig. 16 TS analysis for a real submarine model including far field multiple bounce effects

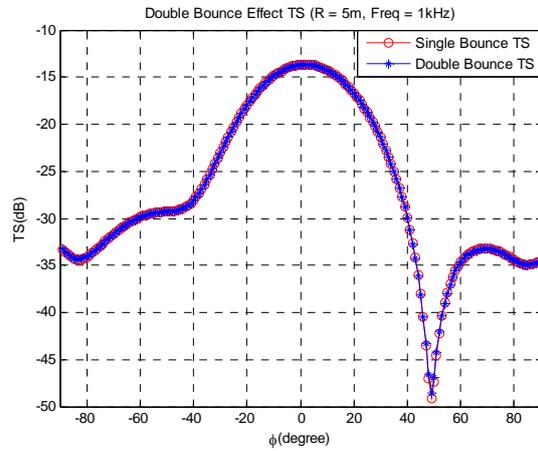


Fig. 18 TS analysis for a small submarine model including near field multiple bounce effects

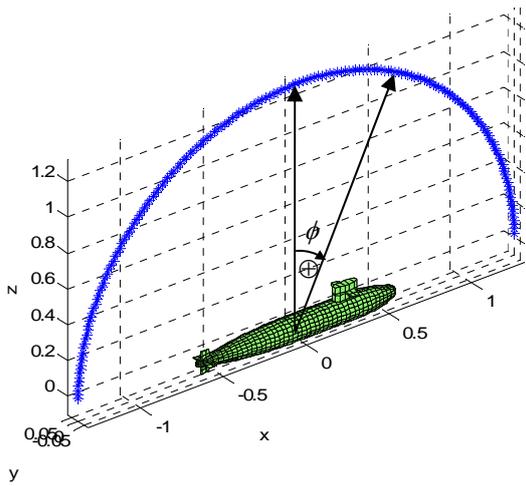


Fig. 17 Small submarine model

다중 반사 효과의 경우, 원거리장에서는 Fig. 16 과 같이 효과가 크게 나타나는 반면, 근접장에서는 Fig. 18 과 같이 효과가 거의 나타나지 않는다. 이는 $1/r$ 에 비례하는 초기 음파(구면파)의 특성 때문이다. 원거리장에서는 요소평판 사이의 거리 Δr 에 의한 음압의 감소가 거의 나타나지 않는 반면 근접장에서는 음압의 감소가 비교적 크게 나타나기 때문이다. 즉, 원거리장에서의 $1/100000$ 과 $1/(100000+50)$ 의 차이는 거의 없지만 근접장에서의 $1/5$ 과 $1/(5+1.2)$ 은 상대적으로 차이가 극심하기 때문이다.

5. 결론

본 논문에서는 물리광학적 기법에 Theory of Boundary Diffraction Wave 를 적용한 음향표적강도식을 사용함으로써 복잡한 형상의 모델에 대한 음향표적강도해석을 가능하게 하는 기반을 마련하였다. 또한 정밀한 음향표적강도 해석을 위해 다중 반사 효과를 고려하였다.

일반적으로 근접장에서의 음향표적강도는 원거리장에 비해 상대적으로 작은 음압의 변화에도 크게 영향을 받으므로 정밀한 해석이 필요하다. 그러나 수치해석결과에서 볼 수 있듯이 근접장에서 다중 반사 효과는 상대적으로 영향이 작은 것을 확인하였다. 따라서 근접장에서는 다중 반사 효과는 고려하지 않아도 된다. 그러나 근접장과 원거리장의 경계가 되는 천이영역에서는 다중 반사 효과의 영향이 크므로 고려해 주어야 한다.

본 논문에서는 근접장 구면파 소스에 의한 다중 반사 효과를 고려하였으며 이를 위해 가상소스의 개념을 적용한 알고리즘을 개발하였다. 또한 근접장에서 다중 반사 효과의 영향을 수치적으로 검증하였으며, 이를 바탕으로 수중함의 음향설계시 고려해야 할 파라미터에 대한 기준을 제시하였다. 그러나 다중 반사 효과 뿐 아니라, 음파 산란시 발생하는 회절 효과와 내부구조물의 영향 등도 근접

장에서 고려해야 한다. 근접장에서의 음향표적강도는 이러한 효과에 민감한 특성을 보일 것이므로 이러한 효과들을 정밀하게 계산할 수 있는 이론과 알고리즘의 확보가 이루어져야 근접장에서의 정확한 음향표적강도 해석이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

- Chumachenko, V.P., Krapivny, A.V. and Chumachenko, Y.V., 2008, "An Estimation Method for Acoustic Scattering from Convex Bodies," J. of Sound and Vibration, Vol. 310, Issue 4-5, pp. 845-854.
- Gordon, W.B., 1975, "Far Field Approximation of the Kirchhoff-Helmholtz Representation of Scattered Field," IEEE trans. on antenna and propag., Vol. 23, pp. 590-592.
- Knott, E.F., 1977, "RCS Reduction of Dihedral Corners," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, Vol. 25, Issue 3, pp. 406-409.
- Knott, E.F., Shaeffer, J.F. and Tuley, M.T., 1993, Radar Cross Section, Artech House, Inc., Boston.
- Legault, S.R., 2003, A Refined Physical Optics Formulation for Near-field Computations, Defence R&D Canada - Ottawa, Ottawa.

- Miyamoto, K. and Wolf, E., 1962, "Generalization of the Maggi-Rubinowicz Theory of the Boundary Diffraction Wave, Parts I and II," J. of the Optical Society of America, Vol. 52, pp. 615-625, 626-637. Legault.
- Pouliguen, P., Damiens, J.F., Hemon, R. and Sailard, J., 2006, "RCS Computation in Near Field," Days on Diffraction, Proceedings of the International Conference, pp. 252-265.
- Pouliguen, P. and Desclos, L., 1996, "A Physical Optics Approach to Near Field RCS Computations," Annals of Telecommunications, Vol. 51, No. 5-6, pp. 219-226.
- Urlick, R.J., 1975, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, New York.
- Velamparambii, S., Chew, W.C. and Song, J., 2003, "10Million Unknowns: Is it that big?," IEEE Antennas and Propagation Magazines, Vol. 45, Issue 2, pp. 43-58.



< 조 병 구 > < 홍 석 윤 > < 권 현 웅 >