

Kirchhoff 근사 방법을 이용한 축소모델의 표적강도 예측

Target Strength Prediction of Scaled Model by the Kirchhoff Approximation Method

김영현* · 주원호** · 김재수***

Young-Hyun Kim, Won-Ho Joo and Jea-Soo Kim

Key Words : Target Strength, Kirchhoff Approximation Method, Numerical Method

ABSTRACT

The acoustic target strength (TS) of submarine is associated with its active detection, positioning and classification. That is, the survivability of submarine depends on its target strength. So it should be managed with all possible means. An anechoic coating to existing submarine or changing of curvature can be considered as major measures to reduce the TS of submarine. It is mainly based on the prediction of its TS. Under this circumstances, a study on the more accurate numerical methods becomes big topic for submarine design.

In this paper, Kirchhoff approximation method was adopted as a numerical tool for the physical optics region. Secondly, the scaled models of submarine were built and tested in order to verify its performance. Through the comparison, it was found out that the Kirchhoff approximation method could be good design tool for the prediction of TS of submarine.

1. 서 론

잠수함의 표적강도는 적의 능동소나에 의한 탐지 가능성을 나타내는 지표로써 함의 생존성 향상을 위해 효과적으로 제어해야 할 항목 중 하나이다. 표적강도를 제어하기 위해서는 형상을 변경하거나 무반향 코팅재를 부착하는 등의 방법을 사용할 수 있으며 표적강도 예측 결과를 토대로 그 제어 방법이 결정된다. 잠수함의 표적강도 예측은 일반적으로 평면, 실린더 등과 같이 단순한 형태에 대한 이론식을 사용하여 수행되나, 최근에는 해석의 정확도 향상을 위하여 수치해석으로 표적강도를 계산하려는 방법이 연구되고 있다.

본 연구에서는 설계단계에 사용가능한 수치해석 기법을 확보하고자 축소모델을 제작하여 수조에서 표적강도 측정 실험을 수행하였으며, 표적강도 수치해석 기법 중 하나인 Helmholtz-Kirchhoff 방법을 이용하여 축소모델의 표적강도를 예측하였다. 실험 결과와 예측 결과의 비교를 통하여 수치해석 기법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 표적강도 수치 해석 기법

2.1 표적강도 정의

표적강도는 수신기 방향에서 표적의 음향중심(acoustic center)으로부터 1미터 거리에서 측정된 표적 반향음의 세기 I_r 과 입사하는 신호의 세기 I_i 와의 비를 상용로그에 10을 곱한 것으로써 식 (1)과 같다.

$$TS \equiv 10 \log \left. \frac{I_r}{I_i} \right|_{i=1m} \quad (1)$$

그러나 실제 표적의 반향음은 사용된 펄스의 길이와 표적의 유효길이에 따라 변하므로 일반적인 소나 방정식에서는 식 (2)와 같이 입사파와 반사파의 최대값의 비율로 표시한다.

$$TS = 10 \log \frac{p_{rmax}^2}{p_{imax}^2} \quad (2)$$

참고로 표적강도는 음향원과 수신기의 위치에 따라 양상태(bi-static) 또는 단상태(mono-static)으로 구분되나 대부분의 소나는 입사된 음파가 표적에 의해 후방산란(backscattering)되는 단상태 형식이므로 본 연구에서는 단상태에 대해서만 논하였다.

* 현대중공업 선박해양연구소
E-mail : hyun@hhi.co.kr
Tel : (052) 230-7402, Fax : (052) 230-5455

** 현대중공업 선박해양연구소

*** 한국해양대학교 해양개발공학부

2.2 Helmholtz-Kirchhoff method

공간상에서 표적에서 반사된 음장은 식 (3)와 같은 Helmholtz-Kirchhoff 적분식으로 표현된다.

$$U(Q) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{-ikR}}{R} \right) - \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right] dS \quad (3)$$

여기서 U 는 음압, k 는 파수, R 은 음원과 표적간의 거리, n 은 법선방향을 의미한다.

반사계수가 일정하다고 가정하면 음압과 음압의 접선방향 편미분은 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

$$U = \Re U_S \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n} = -\Re \frac{\partial U_S}{\partial n} \quad (5)$$

여기서 \Re 는 반사계수, U_S 는 입사음압을 의미한다.

그림 1과 같은 단위 요소에 대하여 거리에 의한 감쇠를 무시하면 입사음압은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$U = P_{inc} \approx \frac{P_0 R_0 D \exp(-ikR_S)}{R_S} \quad (6)$$

여기서 P_0 는 기준 음압, R_0 는 기준 거리, D 는 방향성,

R_S 는 음원과 표적간의 거리를 의미한다.

식 (4)~식 (6)을 식 (3)에 대입하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$P(f) \approx \frac{P_0 R_0 \Re}{4\pi} \int_S D \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{\exp[-ik(R_R + R_S)]}{R_R R_S} \right\} dS \quad (7)$$

여기서 R_R 는 수신기와 표적간의 거리이다.

식 (7)을 이용하면 단위 요소에서 반사되는 음압을 계산할 수 있으며 이를 전체 표적으로 확장 적용하고 식 (2)를 이용하면 전체 표적의 표적강도를 계산할 수 있다.

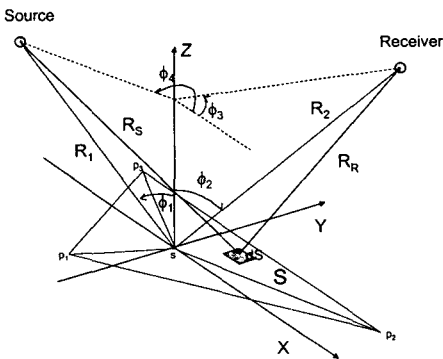


그림 1 표적강도 계산을 위한 단위 요소

3. 수치 해석 신뢰성 검증

3.1 구형 표적

구의 표적강도는 구의 크기가 파장에 비하여 아주 작은 Rayleigh 영역과 구의 크기가 파장에 비하여 아주 큰 물리광학 영역에 대한 이론해가 알려져 있다. 본 연구의 관심 대상인 잠수함의 표적강도는 물리광학 영역에 해당하며, 앞서 설명한 표적강도 수치해석 기법도 물리광학 영역에서 유효한 식이다.

물리광학 영역에 대한 구의 표적강도는 식 (8)과 같다.

$$TS = 10 \log \left(\frac{a^2}{4} \left(1 - \frac{\sin(2ka)}{ka} + \frac{\sin(ka)^2}{(ka)^2} \right) \right) \quad (8)$$

여기서 a 는 구의 반경이다.

반경 1미터인 구에 대한 계산 결과를 비교하여 그림 1에 수록하였다. 이론해와 수치해석의 결과가 20kHz까지 일치하는 것을 알 수 있다. 20kHz 이상의 주파수에서 차이를 보이는 것은 수치해석에 사용된 요소의 크기와 관련된 것이므로 요소 크기를 변경하면 이론해와 일치하는 값을 얻을 수 있을 것이다.

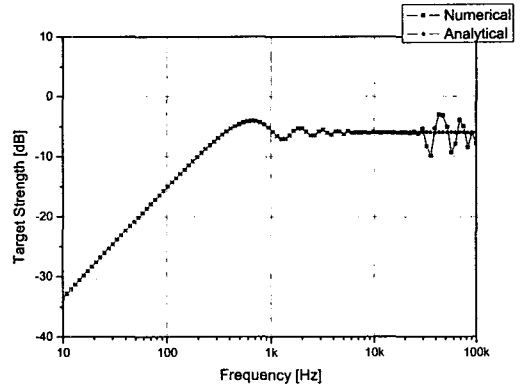


그림 2 구형 표적의 표적강도 비교

3.2 사각 평판

사각 평판의 표적강도 이론해는 식 (9)와 같으며

$r > \frac{a^2}{\lambda}$ 에서 유효하다.

$$TS = 10 \log \left[\left(\frac{ab}{\lambda} \right)^2 \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right)^2 \right] \cos^2(\theta) \quad (9)$$

여기서 $\beta = ka \sin(\theta)$, a, b 는 변의 길이, λ 는 파

장, θ 는 입사각을 의미한다.

각 변이 1미터인 정사각 평판에 대한 표적강도 계산 결과를 비교하였다. 계산에 사용된 주파수는 10kHz이며 이론해가 유효하기 위해서는 음향원과 평판의 거리가 6.67미터 이상이어야 한다. 수치해석은 이러한 거리 제한이 없으므로 표적강도에 미치는 음향원과 평판간의 거리 영향을 보기위해 평판과의 거리 100미터, 6.67미터, 1미터에 대하여 계산하였다.

이론해와 수치해석 결과 비교는 그림 3과 같다. 음향원과 평판간의 거리가 100미터인 경우 즉, 이론해에서 제시하고 있는 제한 거리보다 충분히 큰 경우는 이론해와 수치해석 결과가 일치한다. 음향원과 평판간의 거리가 6.67미터 즉, 이론식의 제한 거리에서는 입사각 90도에서 수치해석 결과가 약 2dB 적다. 그리고 음향원과 평판간의 거리가 1미터 즉, 이론해의 제한 거리보다 적은 경우는 이론해와 수치해석 결과가 큰 차이를 보인다. 이상의 비교로부터 수치해석 결과와 이론해가 잘 일치한다는 것을 알 수 있으며 음향원과 표적간의 거리가 이론해의 제한 거리보다 적은 경우 수치해석이 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

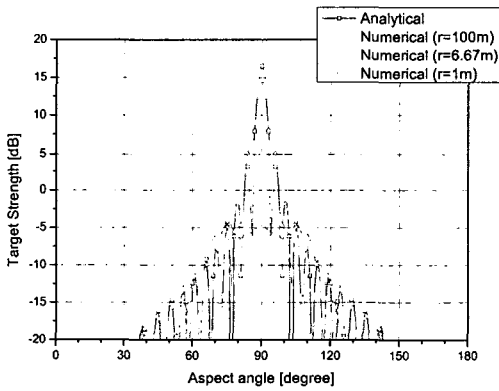


그림 3 사각 평판의 표적 강도 비교

3.3 실린더

실린더의 표적강도 이론해는 식 (10)과 같으며 $r > \frac{L^2}{\lambda}$ 에서 유효하다.

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

여기서 $\beta = ka \sin(\theta)$, a 는 반경, L 은 실린더의 길이, λ 는 파장, θ 는 입사각을 의미한다.

반경 0.3미터, 길이 4미터인 실린더에 대한 표적강도를 비

교하였다. 계산에 사용된 주파수는 3kHz이며 이론해가 유효하기 위해서는 음향원과 실린더의 거리가 32미터 이상이어야 한다. 사각 평판의 경우와 마찬가지로 음향원과 평판간의 거리 영향을 보기위해 평판과의 거리 100미터, 32미터, 4미터에 대하여 계산하였다.

이론해와 수치해석 결과 비교는 그림 4과 같다. 비교 결과로부터 이론해와 수치해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

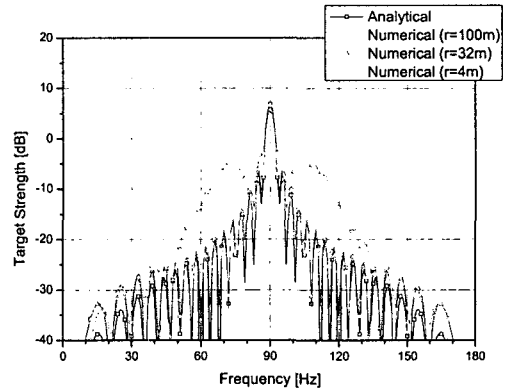


그림 4 실린더의 표적강도 비교

4. 축소 모델의 표적강도 예측

4.1 표적강도 실험

축소 모델의 표적강도 실험은 한국해양대학교의 음향 수조에서 수행하였다. 그림 5와 같이 음향 변환자는 모델 중심에서 2미터 거리에 위치하며 음파의 형태는 420kHz의 톤버스트(tone burst)파이다. 계측은 0도에서 180도까지 10도 간격으로 수행하였다.

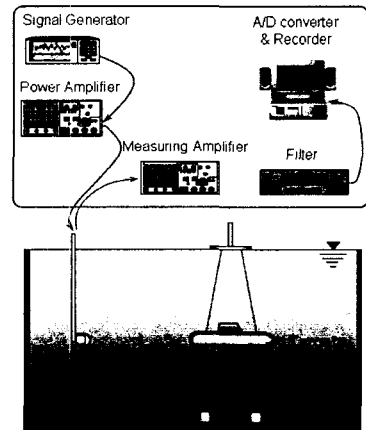


그림 5 축소 모델 표적강도 측정 실험 도식



(a) 모델 No.1



(b) 모델 No.2



(c) 모델 No.3



(d) 모델 No.4

그림 6 축소 모델

4.2 축소 모델 제원

실험에 사용된 축소 모델은 실린더 형상이며 그림 6과 같이 모델 No.1~No.4로 이루어진다. 모델 No.1은 가운데 실린더 부분과 앞뒤의 부분적으로 평면인 반구로 구성되고 모델 조작용을 위한 고리가 부착되어 있다. 모델 No.2는 전체적으로 모델 No.1과 동일하나 뒤쪽이 원뿔로 구성되고 고리의 모양이 다르다. 모델 No.3과 No.4는 모델 1에 사령탑에 해당하는 부분이 추가된 것이다. 그리고 모든 모델은 내부가 공기로 채워져 있다.

4.3 표적강도 예측

표적강도 예측은 하이라이트 분석을 곁하기 위하여 실린더, 선수선미, 고리 및 사령탑으로 나누어 수행하였다. 모델 내부가 공기로 채워져 있으므로 음파가 모델 외부에서 전반사된다고 가정하여 모델 외부의 반사만 고려하였다. 예측 결과와 실험 결과의 비교는 그림 7~그림 10에 수록하였다.

모델 No.1의 비교 결과인 그림 7을 보면 90도 부근에서는 실린더의 기여도가 가장 높으며, 나머지 각도에서는 선수선미부의 기여도가 가장 높다. 주목할 점은 모델 조작용 고리의 기여도가 전 입사각에서 높기 때문에 모델 제작시 고리에서 반사되는 성분이 최소화 되도록 주의해야 한다는 것

이다. 실험 결과와 예측 결과를 비교하면 예측 결과가 실험 결과보다 0도와 180도 부근을 제외한 나머지 입사각에서 5dB 이상 크게 나타난다. 이는 실험 오차 즉, 음향 변환자와 모델의 위치를 육안으로 조정하는데 따른 오차와 실험 모델의 형상 오차 등에 기인한 것으로 판단된다.

모델 No.2의 비교 결과인 그림 8을 보면 모델 No.1의 경우와 마찬가지로 90도 부근에서는 실린더의 기여도가 가장 높으며, 0도에서 90도까지는 선수부의 기여도가 가장 높다. 그러나 90도 이후에서는 전반적으로 고리의 기여도가 높고 130도 부근에서는 원뿔의 기여도가 높다. 실험 결과와 예측 결과를 비교하면 30도에서 90도 사이를 제외하면 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다. 실험과 예측의 차이가 발생하는 이유는 모델 No.1의 경우와 마찬가지로 판단된다.

모델 No.3과 No.4의 비교 결과인 그림 9와 그림 10을 보면 실험 결과와 예측 결과가 모델 No.1의 경우와 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 표적강도가 거의 동일한 이유는 예측 결과에서 알 수 있듯이 사령탑의 기여도가 너무 낮아서 전체 표적강도에 미치는 영향이 거의 없기 때문으로 판단된다. 그래서 그림 11, 그림 12와 같이 실험 결과에 time window로 사령탑의 표적강도를 추출하여 예측 결과와 비교하였다. 그림 11을 보면 실험 결과와 예측 결과가 비교적 잘 일치하나 그림 12에서는 다소 차이를 보인다. 이는 실험 결과에서 사령탑 이외의 신호가 포함되었기 때문으로 판단된다. 그리고 그림 11과 그림 12를 비교하면 사령탑의 기울기가 표적강도 미치는 영향을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 표적강도 수치해석기법 중 가장 많이 사용되고 있는 Kirchhoff 근사 방법과 이론해를 비교하였고, 축소모델의 표적강도를 예측하고 실험 결과와 비교하였다.

수치해석 결과는 이론해와 거의 일치하였으며 이론해로 계산하기 어려운 가까운 거리에서 수치해석이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 축소모델의 예측 결과는 특정 입사각을 제외하면 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다. 따라서 향후 잠수함 설계시 수치해석 기법을 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

- (1) Herman Medwin and Clarence S. Clay, 1998, "Fundamentals of Acoustical Oceanography", Academic Press.
- (2) Robert J. Urick, 1983, "Principles of Underwater Sound", McGraw-Hill, Inc.
- (3) Donald E. Kerr, 1988, "Propagation of Short Radio Waves", Peninsula Publishing.