

접수 원통형 구조물의 표면 진동속도를 이용한 총 방사음향파워 계산

Estimation of Total Acoustic Radiation Power of Submerged Circular Cylindrical Structure Using Surface Vibration Velocity

한승진†‡ · 이종주* · 강명환* · 배수룡* · 정우진*

Seungjin Han, Jongju Lee, Myunghwan Kang, Sooryong Bae and Woojin Jung

Key Words : Acoustic Radiation Power(음향방사파워), Acoustic Radiation Efficiency(음향방사효율), Vibration Velocity(진동 속도)

ABSTRACT

Most naval underwater weapon system can be simplified to a circular cylindrical structure which has vibrating machineries inside. In order to predict efficiently the total acoustic radiation power of cylindrical structure, surface velocity is measured and radiation efficiency of surface element is calculated. Then, they are substituted to the surface pressure in the simplified Helmholtz integral equation which assumes acoustic far-field and plane-wave approximation at the surface. Surface velocity and total acoustic radiation power for a submerged cylinder are measured in water-tank. In this example, it is found that total acoustic power output obtained from the prediction is in good agreement with that of measurement in mid-high frequency range.

1. 서 론

원통형 구조로 단순화 가능한 대부분의 수중무기 체계는 내부의 엔진 및 펌프 등 기계류에 의해 가진 되어 수중으로 방사소음을 발생시킨다. 이러한 원통형 구조물의 음향방사파워를 예측하기 위해서 많은 계산 요소와 시간이 소요되는 BEM, FEM 등의 수치해석적 방법은 실시간 모니터링 목적으로는 비효율적이다. Crawford⁽¹⁾, Takaaki⁽²⁾는 헬름홀츠 적분 방정식(Helmholtz Integral Equation)으로부터 원음장 조건 가정과 구조물 표면에서의 평면파 가정을 적용하고 근거리 음압 측정값을 이용하여 잠수함의 방사소음을 예측하였다. Takaaki⁽³⁾는 평판 구조물

표면을 분할하고 다이폴 음원으로 가정하고 표면 음압을 측정하는데 있어서 다이폴음원의 방사효율과 표면 진동속도를 이용한 진동-음향 변환 근사식을 도입함으로써 음압의 측정 없이 표면 진동 속도를 이용하는 방법을 제시하였다. Han⁽⁴⁾은 수상함을 평판 요소로 분할하고 분할된 평판 요소의 방사효율 근사식을 이용하여 각 분할 요소의 파워 합을 계산함으로써 함정의 수중 방사소음을 예측하였다.

본 연구에서는 이러한 관련 연구내용을 바탕으로 수중에서의 음향방사 특성이 고려되도록 Cheng⁽⁵⁾, Kim⁽⁶⁾의 접수 평판의 방사효율 근사식에 관한 연구를 이용하여 총 음향방사파워를 산출하였다. 예측 결과는 수치해석 결과 및 실험 결과와 비교하였다.

2. 음향방사파워 예측 방법

2.1 총 음향방사파워 산출 방법

구형 원음장면의 음향 인텐시티를 적분하면 총 음향방사파워는 식 (1)과 같다.

† 교신저자; 정회원, 국방과학연구소
E-mail : sjhan@add.re.kr
Tel :055-540-5413, Fax :055-542-3737
‡ 발표자; 국방과학연구소
* 국방과학연구소

$$W_{tot} = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{\phi=-\pi/2}^{\pi/2} \frac{|p(r_0)|^2}{2\rho_0 c_0} r_0^2 \cos\phi d\phi d\theta \quad (1)$$

Fig. 1은 원통형 진동 구조물 및 원음장 좌표계이다. 헬름홀츠 적분 방정식으로부터 거리 r 인 지점, P 의 음압은 식 (2)와 같다. \vec{n} 은 표면요소 dS 에 수직인 벡터이고 β 는 \vec{n} 과 \vec{r} 벡터가 이루는 각이며 $g = -\frac{e^{ikr}}{4\pi r}$ 는 자유음장 그린함수이다.

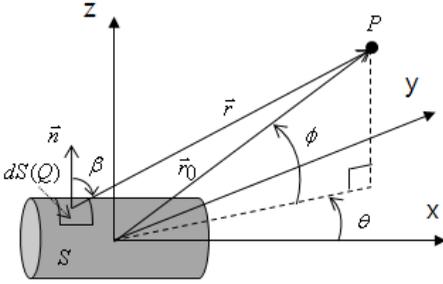


Fig.1 Vibrating structure and coordinates

$$p(P) = - \iint_S \left(p(Q) \frac{\partial g}{\partial n} - g \frac{\partial p(Q)}{\partial n} \right) dS \quad (2)$$

원음장 가정 및 표면에서의 평면파를 가정하면 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) \approx -ik \left(\frac{e^{ikr}}{r} \right) \cos\beta \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} \approx ikp \quad (4)$$

식 (2), (3), (4)로부터 원음장 점 P 에서의 음압은 식 (5)와 같다.

$$p(P) = -\frac{ik}{4\pi} \iint_S A_r dS \quad (5)$$

$$A_r = (1 + \cos\beta) \frac{e^{ikr}}{r} p(Q)$$

표면에서의 총 음향파워는 식 (6)과 같이 근사할 수 있다.

$$\frac{|\bar{p}|^2}{2\rho_0 c_0} dS = \frac{1}{2} \rho_0 c_0 \bar{v}^2 dS \sigma \quad (6)$$

여기서 ρ_0 는 매질의 밀도, c_0 는 음속 그리고 방사 효율 σ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma(\omega) = \frac{W(\omega)_{rad}}{\rho_0 c_0 \Delta S \bar{v}(\omega)^2} \quad (7)$$

식 (1), (5), (6)으로부터 총 음향방사파워는 식 (8)과 같다.

$$W_{tot} = \frac{1}{2\rho_0 c_0} \int \int p \cdot p^* r_0^2 \cos\phi d\phi d\theta$$

$$p \cdot p^* = \frac{k^2}{16\pi} \sum_i^N \sum_j^N \frac{1}{2} (A_{ri} A_{rj}^* + A_{ri}^* A_{rj})$$

$$= \frac{\rho_0^2 c_0^2 k^2}{32\pi^2} \sum_i^N \sum_j^N \frac{1}{r_i r_j} (1 + \cos\beta_i)(1 + \cos\beta_j)$$

$$\cdot (\bar{v}_i \bar{v}_j^* e^{ik(r_i - r_j)} + \bar{v}_i^* \bar{v}_j e^{ik(r_j - r_i)}) \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \Delta S_i \Delta S_j \quad (8)$$

식 (8)은 식 (5), (6)에서 표면의 방사 임피던스를 $z = p/v = \rho_0 c_0 \sqrt{\sigma}$ 로 가정한 것과 동일한 결과이다. 따라서 식 (5)와 (6)의 가정은 고주파수 영역에서의 임피던스($z = \rho_0 c_0$)가정과 유사하다.

2.2 표면 요소의 음향방사효율 산출 방법

Cheng⁽⁵⁾, Kim⁽⁶⁾은 유체하중에 의한 부가질량의 영향을 고려하여 접수 평판의 방사효율을 연구하였다. 무한 평판 가정하에서의 부가질량 효과를 유한 평판에 적용하였으며 평균 방사효율 근사 공식은 식 (9)와 같다.

$$\sigma = \frac{4S}{c_0^2} f^2, \quad f < f_{1,1}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^2}{c_0^2 S} \frac{D}{m_s (1 + \beta)}, \quad f_{1,1} < f < f_B$$

$$\sigma = \frac{P c_0}{4\pi^2 S f_c} \frac{(1 - \alpha^2) \ln[(1 + \alpha)/(1 - \alpha)] + 2\alpha}{(1 - \alpha^2)^{3/2}}, \quad f_B < f < f_c$$

$$f_B = 100 \left(\frac{\lambda_c}{P} \right) \left(\frac{c}{P} \right), \quad \alpha = \sqrt{\frac{f}{f_c}}, \quad f_c = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho(1 - \nu^2)}{E}} \quad (9)$$

Fig. 2에 $L_x = 0.4m$, $L_y = 0.53m$, $h = 8mm$ 인 강판의 평균 방사효율 계산결과를 모달 합산 방법(modal summation approach)⁽⁵⁾⁽⁷⁾과 근사 공식의 계산 결과를 각각 나타내었다. 강판의 물성치는 $E = 199 \times 10^9 N/m^2$, $\rho_s = 7850 kg/m^3$, $\nu = 0.3$, $\eta = 0.001$ 이다. 평균 방사효율의 근사 공식(식 (9))을 표면 요소의 방사효율로 대입하였다.

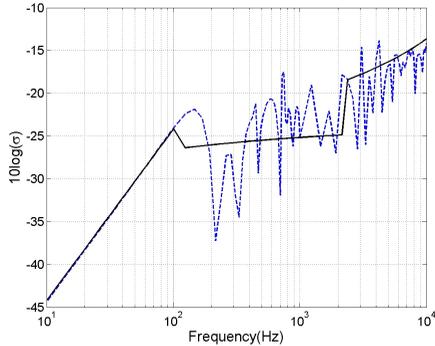


Fig.2 Average radiation efficiency rectangular steel plate(- : modal summation approach, --: approximation formulae)

3. 총 음향방사파워 산출 예

직경 1.35m, 길이 4m, 두께 8mm의 원통 구조물 모델을 점 가진하는 경우 상용 SW인 ABAQUS를 이용하여 표면 진동장을 계산하고 계산된 속도를 SYSNOISE의 경계조건으로 이용하여 총 음향방사파워를 계산하였다.

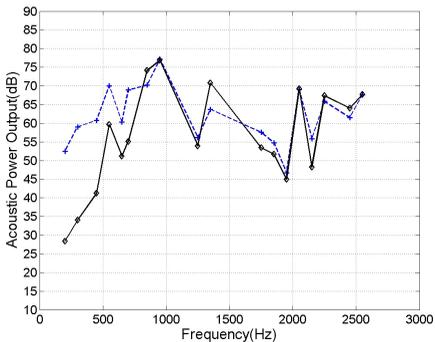


Fig.3 Total acoustic radiation power(- : predicted, -- : numerical result)

Fig.3에 예측값과 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 저주파수 영역에서 오차가 커지나 800Hz 이상의 중고주파수 영역에서는 비교적 잘 일치한다.

수치해석 모델과 동일한 크기의 원통에 대한 가진 실험을 수조에서 수행하였다. 내부 벽면에 총 64개의 가속도 센서를 부착하였으며 근접 음장 측정 단면의 원주방향 31개 지점에 하이드로폰을 배열하고 길이방향으로 스캔하여 음압을 측정하였다. 함정 기계류 소음원을 모의하기 위하여 마운팅 블록 위에 가진기를 설치하고 가진 하였다(Fig.5). 측정 주파수는 250, 450, 650, 850, 1250, 1550, 1750, 1950, 2150, 2450Hz이다. ACOEM사의 NetdB 근접음장 측정시스템 및 dBVision SW⁽⁸⁾를 이용하여 측정하고 총 음향방사파워를 산출하였다.

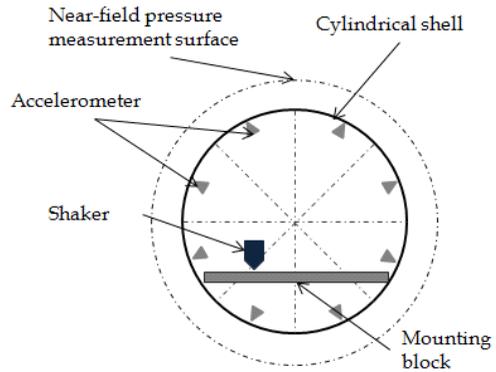
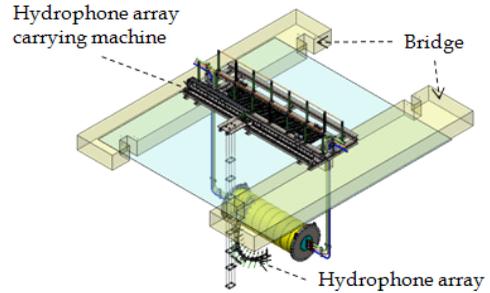


Fig.4 Measurement setup and accelerometer position

식 (8)을 이용하여 원통을 가속도 센서 위치에 해당하는 64개의 표면 요소로 나누고 동일 면적 ($0.4m \times 0.53m$)의 평판 평균방사효율 근사 공식을 적용하여 음향방사파워 예측값을 산출하였다. Fig. 5에 총 음향방사파워 측정값과 예측값을 비교하여 나

타내었으며 수치해석의 결과와 유사하게 저주파수 영역에서는 오차가 크지만 800Hz 이상의 중·고주파수 영역에서는 약 5dB 이내에서 비교적 잘 일치하는 경향을 보여준다.

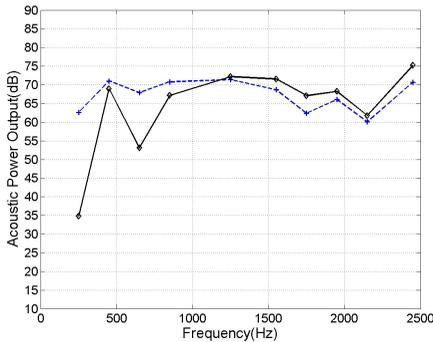


Fig.5 Total acoustic radiation power(— : predicted, -- : measured)

5. 결 론

원통형 수중 운동체 내부의 기계류 진동에 의한 수중에서의 음향방사파워를 효율적으로 예측하기 위하여 선체표면의 진동 속도측정값과 접수 평판의 평균방사효율 계산 값을 적용하는 방법을 기술하였다. 수중에서 원통형 구조물에 대한 가진 실험을 통하여 표면 속도를 측정하였고, 근접음장 계측을 통하여 총 음향방사파워를 측정하였다. 예측 값과 측정값의 비교 결과 저주파수 영역에서는 오차가 크나 중·고주파수 영역에서는 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Crawford, F. R. 1975, Submarine Radiated Noise Far-Field Beam Pattern for Discrete Frequencies from Near-Field Measurements, Naval Postgraduate School.

(2) Takaaki Musha and Akira Shinohara, 1993, Evaluation of Ship Radiated Noise Level from Near-Field Measurements, Applied Acoustics, Vol. 40, pp. 69~78.

(3) Takaaki Musha and K. Sawatari, 1995,

Far-Field Radiated Noise Prediction using the Cross-Spectrum of Surface Vibration Velocity, Journal of Acoustic Society of Japan. Vol. 16, No. 6. pp. 381~383.

(4) H. S. Han and K. H. Lee, 2013, Estimation of Underwater Radiated Noise of Naval Vessel Using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23. No. 5, pp. 394~400.

(5) Zhao Cheng, Jun Fan, Bin Wang and Weilin Tang, 2012, Radiation Efficiency of Submerged Rectangular Plates, Vol. 73, pp. 150~157.

(6) H. S. Kim, J. S. Kim, B. K. Kim and S. R. Kim, A Study on the Approximation Formula for Radiation Efficiency of a Simply Supported Rectangular Plate in Water, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 1. pp. 21~27.

(7) G. Xie, D. J. Thompson and C. J. C. Jones, 2005, The Radiation efficiency of baffled plates and strips, Journal of Sound and Vibration, Vol. 280, pp. 181~209.

(8) ACOEM, 2012, dBVision 5.51 User's Manual.