

수조에서의 원통형 구조물 음향방사효율 측정에 관한 연구

Measurement of Acoustic Radiation Efficiency of the Submerged Circular Cylindrical Structure in Water Tank

한 승 진[†] · 강 명 환* · 이 종 주*
Seungjin Han, Myunghwan Kang and Jongju Lee

(Received September 22, 2015 ; Revised October 21, 2015 ; Accepted October 21, 2015)

Key Words : Acoustic Radiation Efficiency(음향방사효율), Reverberation Time(잔향시간), Underwater Radiated Noise(수중방사소음)

ABSTRACT

Underwater radiated noise is an important characteristic in the naval weapon systems. It is difficult to measure the radiation efficiency of underwater vehicle, such as UUV(unmanned underwater vehicle) and underwater weapons in real operation environment. In this study, acoustic radiation efficiency of a circular cylindrical structure is measured in the laboratory-water tank. The radiation efficiency is compared with the numerical results and it is found that they are in a good agreement. Therefore, the measurement method can be applied effectively for predicting the underwater radiation noise and effectiveness of radiation reduction means.

1. 서 론

수중 운동체의 수중방사소음은 소나를 이용한 운동체의 탐지 및 식별에 중요한 영향을 미치는 인자이다. 운동체의 기계적 진동 특성에 따라 수중방사소음을 예측하고 소음원의 소음 특성을 잘 표현할 수 있는 지표로써 음향방사효율이 사용된다. 음향방사효율은 구조물 표면의 진동에너지 수준에 대한 총 음향방사 에너지의 비로써 정의된다.

$$\sigma(\omega) = \frac{W(\omega)_{rad}}{\rho_0 c_0 S v(\omega)^2} \quad (1)$$

여기서 ρ_0 는 매질의 밀도, c_0 는 음속이고, W 는 총

음향 방사 파워, S 는 구조물의 표면적, $\overline{v^2}$ 는 구조물 표면의 진동속도 제곱의 평균값이다.

따라서 수중음향 방사효율을 측정하기 위해서는 수중 물수체 표면의 진동 수준의 측정 및 음향방사 파워의 측정이 필요하다. 총 음향방사파워는 자유음장(free field) 조건에서 모든 음향방사 방향의 인텐시티의 합이다. 그러나 실제 운동체가 운용되는 해양 환경에서는(특히 천해) 해저/해수면에서의 반사 등 음파전파 특성 때문에 완전한 자유음장 조건을 충족시키기 어려우며 실험에 많은 비용과 노력이 소요된다. 따라서 이 연구에서는 상대적으로 적은 노력과 비용이 소모되는 실내 수조에서 음향방사파워 및 표면 진동수준을 측정하여 수중 음향방사효율을 산출하고자 한다.

일반적으로 소나(sonar) 음원의 경우에는 벽면 반

[†] Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development
E-mail : sjhan@add.re.kr

* Member, Agency for Defense Development

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

사파가 도달하기 전에 방사된 음파를 계측하는 방법 (gated pulse method)을 사용한다. 이 방법은 음원의 출력이 정상상태(steady state)까지 매우 급격하게 증가하는 경우에 사용할 수 있다. 그러나 수중 무기체계와 같이 내부의 기계류 진동에 의한 소음원은 이러한 빠른 응답을 보일 수 없으므로 적용 불가능하다.

따라서 이 연구에서는 수조에서 내부 기계류 진동에 의한 수중 구조물의 음향방사파위를 측정하기 위해서 수조 벽면에서의 반사음파의 영향을 보정할 수 있는 잔향음장에서의 음향파위 측정 방법을 적용한다. 이러한 잔향음장에서의 음향파위 측정은 주로 공장 내부의 장비 소음 및 함정 내부의 격실 소음 수준 측정 등과 같이 공기 중에서 유용하게 사용되었다^(1,2). 수중에서는 벽면의 반사계수가 공기 중보다 작고 음압의 감쇠가 빠르므로 잔향음장 조건을 만족시키기 어려운 것으로 알려져 있으며 William⁽³⁾은 구형의 단순 음원을 이용하여 잔향음장에서의 음향파위 측정법이 공기 중뿐 아니라 수중에서도 적용 가능함을 확인하였다. Cochard⁽⁴⁾는 잔향음장 음향파위 측정법을 이용하여 수조에서 UUV의 소음을 측정하였고, Qi⁽⁵⁾는 수중 운동체의 프로펠러 소음을 측정할 사례가 있으나 국내에는 관련 연구를 찾아볼 수 없다.

이 연구에서는 기존의 잔향음장에서의 음향파위 측정법을 적용하여 수중 운동체의 형상을 모델링한 원통형 구조물에 대한 수중 음향 방사효율을 측정 방법 및 측정 결과를 기술하고, 구조물의 근접음장 측정결과를 이용한 수치해석 결과와 비교하여 측정 방법의 타당성을 간접적으로 확인하였다.

2. 수조에서의 음향파위 측정방법

실험 수조 내부의 임의 지점에서의 음압은 식 (2)와 같이 음원으로부터의 직접 전파음(P_d , effective pressure amplitude)과 수조 경계면에서의 음파반사에 의한 잔향음(P_r , spatially averaged effective pressure amplitude)의 합으로 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

$$P^2 = P_d^2 + P_r^2 = \rho_0 c_0 \Pi_{src} \left(\frac{D}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \tag{2}$$

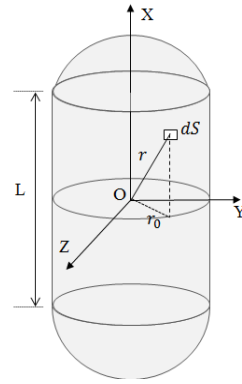


Fig. 1 Coordinates & integral surface

여기서, P 는 총 유효음압(total effective pressure), Π_{src} 는 음원 파워, D 는 음원의 지향지수(directivity), r 은 음원으로부터 거리이다.

음원의 지향성이 없다고 가정하면($D=1$) 총 음향방사파위는 식 (3)과 같다. 적분면은 Fig. 1과 같이 원통 구조물 양끝 방향은 반구형 곡면, 측면 방향은 원통형 곡면으로 설정하였다.

$$\Pi_{tot} = \Pi_{src} \left(\int \frac{1}{4\pi r^2} dS + \int \frac{4}{A} dS \right) \tag{3}$$

식 (3)에서 알 수 있듯이 잔향음장 적분면에서 직접적으로 계측한 총 음향파위(Π_{tot})와 수조내의 흡음력(A)를 측정하면 음원의 음향파위(Π_{src})를 산출할 수 있다. Π_{tot} 은 구조물 주위에 하이드로폰을 설치하여 직접적으로 측정할 수 있으며 A 는 수조의 잔향시간(reverberation time)을 측정하여 식 (4)와 같이 산출할 수 있다⁽⁶⁾.

$$A = \frac{55.2V}{RT_{60}c_0} \tag{4}$$

여기서, V 는 수조의 부피이고, RT_{60} 은 수조의 잔향 시간이다.

3. 음향방사효율 측정

3.1 표면 진동수준 및 음향파위 측정

Fig. 2 및 Fig. 3에 구조물 내부의 가진기와 가속도계 설치 위치 및 실험 장치 구성 개념도를 나타내었다. 원통형 구조물은 알루미늄 재질이고 길이 6m,

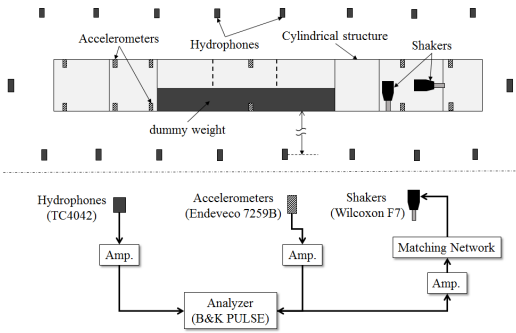


Fig. 2 Experimental setup sketch

직경 0.25 m이며 내부에 격벽 및 음성부력 유지를 위한 무게추가 있다. 탑재 기계류의 가진력을 모사하기 위하여 원통형 구조물 내부에 축방향 및 반경 방향으로 두 개의 가진기를 설치하여 각 방향 가진 및 동시 가진의 경우를 측정하였다. 내부 벽면에 24 개의 가속도 센서를 부착하여 구조물 표면의 가속도 수준을 측정하였고, 18개의 하이드로폰을 원통형 구조물 주위에 설치하여 음향파위를 측정하였다.

3.2 잔향 시간 측정

음향파위 측정 시 수조내 벽면 반사파의 영향은 잔향시간을 측정하여 흡음특성을 추정함으로써 고려할 수 있다. 잔향시간은 음원이 꺼졌을 때($\Pi_{src} = 0$) 음향에너지가 60 dB 감소하는데 소요되는 시간으로 정의되며 식 (5)와 같다.

$$RT_{60} = \frac{55.2V}{Ac_0} \tag{5}$$

여기서, V 는 수조의 부피, A 는 총 흡음력이다. 수조(길이: 18 m, 폭: 10 m, 수심: 10 m) 내에 원통형 구조물을 설치한 상태에서 무지향성(omni-directional) 음원(neptune D/17)을 설치하고 18개 지점에서 하이드로폰으로 음압을 측정하였다(Fig. 3). 송신 신호는 각 주파수 밴드(Table 1참조)별로 소스레벨(source level) 100 dB~150 dB의 랜덤신호(random signal)이다. 잔향음장 조건을 충족시키기 위해서 하이드로폰은 수조 벽면 및 음원으로부터 충분한 거리에 설치되어야 한다. 또한 수조내의 공진 모드가 발생하므로 위치별로 음압차가 크게 발생할 수 있다. 따라서 충분히 많은 모드들을 포함하여 균일한 음장 조건을 만족시킬 수 있도록 측정 주파수 밴드를 설정

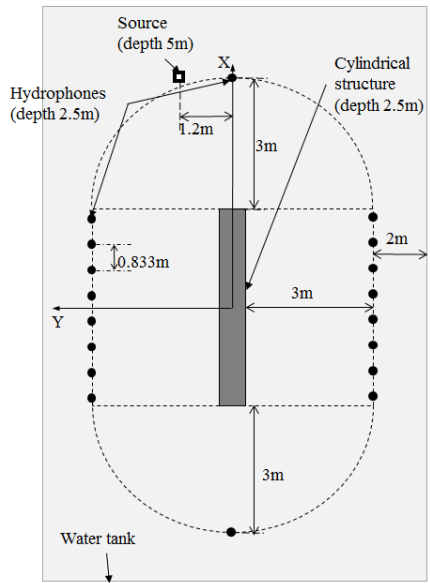


Fig. 3 Source & hydrophones setup

정해야 한다. 통상 1/3 옥타브 밴드를 사용하며 이 연구에서는 계측장비 특성상 1/3 옥타브 밴드와 유사하게 임의의 측정주파수(Table 1)를 설정하였다.

수조 내부 소음 감쇠 곡선을 구하기 위하여 음원 중단법(interrupted noise method)을 사용하였다^(7,8). 설정한 주파수 밴드의 음파 송출 후 시간 t_0 에 음원 신호를 차단하여 하이드로폰에 측정되는 음향신호 감쇠를 분석하였다.

Fig. 4(a)는 음원 작동 상태에서 차단할 때의 하이드로폰 계측 신호이다. 식 (6)과 같이 측정된 음압의 제곱을 적분하여 음향파위의 감쇠 곡선을 구할 수 있으며 Fig. 4(b)와 같다⁽⁴⁾.

$$C(0) = p^2(0), t_n = 0$$

$$C(t_n) = p^2(t_n) + C(t_{n-1}), t_n > 0 \tag{6}$$

여기서, $p(t_n)$ 은 시간 t_n 에서의 음압이다.

Fig. 4(b)의 선형 감소 구간의 기울기를 구하면 잔향시간을 계산할 수 있다. 18개 각 측정위치에서의 잔향시간을 계산하고 평균 잔향시간 및 잔향시간의 표준편차를 산출하여 Table 1과 Fig. 5에 나타내었다. 잔향시간은 저주파수 영역에서 고주파수보다 길며, 표준편차는 저주파수 영역에서 5% 내외로 크고 고주파수 영역에서는 표준편차가 2% 내외로 작아진다. 이는 고주파수 영역에서 주파수 밴드 내에 더

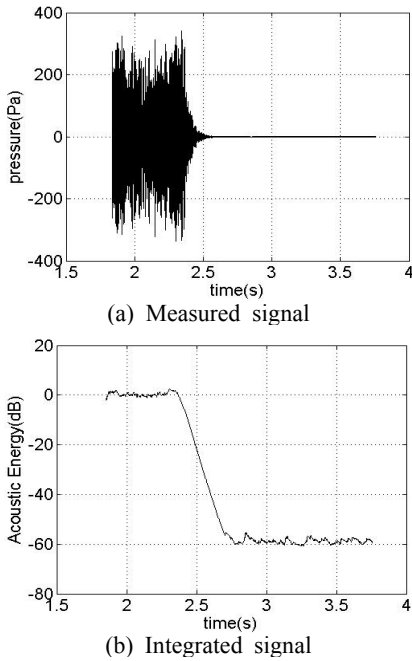


Fig. 4 Measured & integrated signal

Table 1 Mean and standard deviation of measured reverberation time

Center frequency(Hz)	Mean rev. time(s)	Standard dev. of rev. time(s)
1050	0.3973	0.0320
1250	0.3692	0.0346
1550	0.3588	0.018
1950	0.3189	0.0112
2350	0.3367	0.025
2750	0.3626	0.0223
3150	0.3338	0.0136
3750	0.3382	0.012
4550	0.3303	0.0093
5350	0.3235	0.006
6150	0.3302	0.0072
6950	0.3371	0.0079
7750	0.3322	0.0142
8950	0.3234	0.0069
10 550	0.3152	0.0075
12 150	0.3094	0.0081
14 550	0.3133	0.0058
17 750	0.319	0.0057
20 950	0.3261	0.0067
24 150	0.3259	0.0069

많은 모드들이 중첩되어 수조 내부 잔향음장이 더 균일하기 때문이며 상대적으로 저주파수 영역에서 음향파워 산출 오차가 클 수 있음을 의미한다.

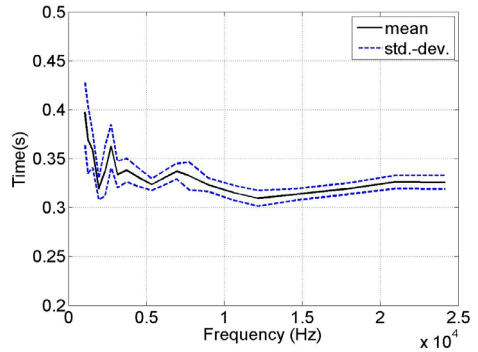


Fig. 5 Measurement results of reverberation time

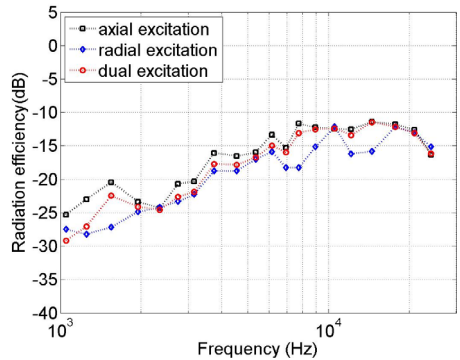


Fig. 6 Measurement results of acoustic radiation efficiency

3.3 음향방사효율 산출

축방향 및 반경방향으로 주파수 0 kHz ~ 25.6 kHz 의 광대역 랜덤신호로 각각 그리고 동시 가진하여 세 가지 가진 경우에 대한 구조물 표면 진동 수준을 측정하였다. 음향 방사파워는 직접적으로 측정된 잔향 음장 음향파워와 잔향시간을 식 (3), (4)에 대입하여 구한다. 표면 진동 수준과 음향 방사파워를 식 (1)을 이용하여 음향방사효율 산출하면 Fig. 6과 같다.

4. 수치해석 결과와 비교

음향방사효율 측정결과와 비교하기 위하여 상용 소프트웨어인 LMS Virtual.Lab의 FEM Acoustics 모듈을 이용한 음향방사파워 해석을 수행하였다. 원통형 구조물의 근점 음장을 계측하여 수치해석을 위한 음원면(source surface)을 구성하였다(Fig. 8(a)). 음원면 음압은 16개의 하이드로폰으로 구성된 원형 배열(Fig. 7)을 제작하여 구조물의 길이 방향으로

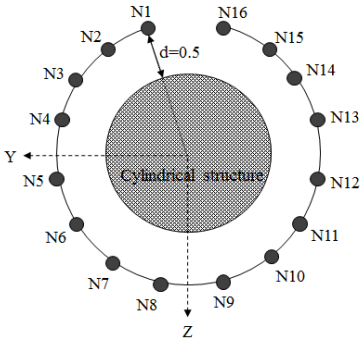
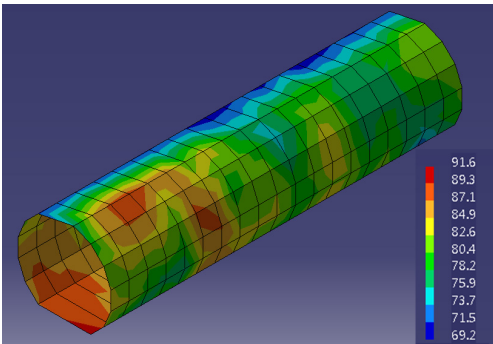
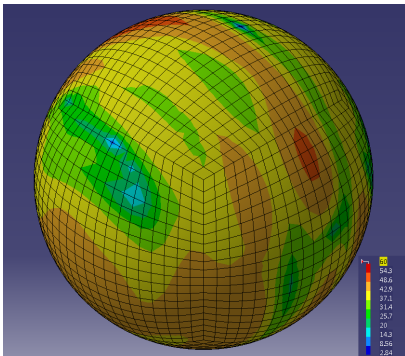


Fig. 7 Hydrophone array



(a) Source surface from near-field measurement



(b) Acoustic radiated pressure at far-field

Fig. 8 Numerical analysis(1 kHz, dual excitation)

순차적으로 스캔하여 측정하였다. 음원면의 계측점간 거리는 원주방향과 길이방향 모두 0.3 m이며 해석 가능한 최대 주파수는 약 2.4 kHz($f_{max} < \lambda/2 = \Delta$ (측정점간 거리))로 제한된다. 음원면 데이터로부터 Fig. 8(b)와 같이 원음장 음압 및 음향 방사파위를 계산하고 측정된 진동수준을 이용하여 음향방사효율을 산출하였다.

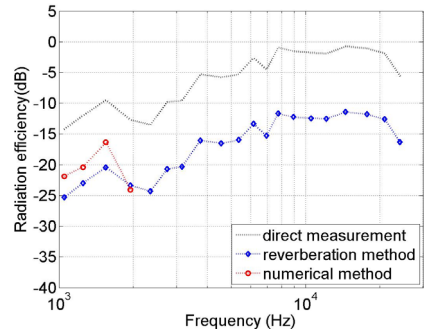


Fig. 9 Radiation efficiency(measurement vs. numerical method, axial excitation)

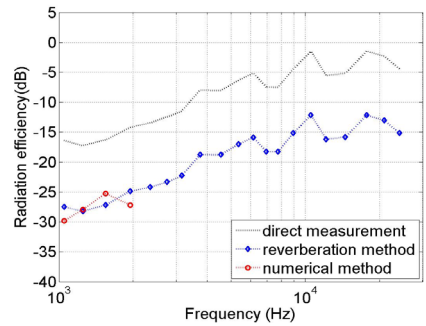


Fig. 10 Radiation efficiency(measurement vs. numerical method, radial excitation)

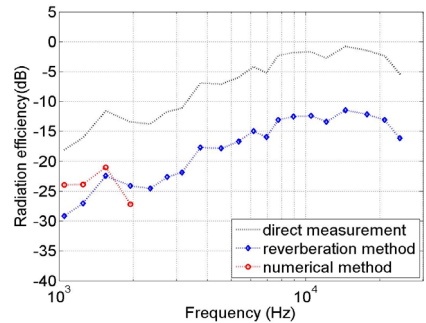


Fig. 11 Radiation efficiency(measurement vs. numerical method, dual excitation)

직접적으로 측정된 잔향음장 음향파위 수준을 이용한 음향방사효율 산출 결과(direct measurement), 수조 내부 잔향음 효과를 보정한 음향파위를 이용한 음향방사효율 측정결과(reverberant method) 그리고 Virtual.Lab으로 계산한 음향파위를 이용한 음향방사효율 산출 결과(numerical method)를 비교하면 Figs. 9 ~ 11과 같다. 직접적으로 측정된 음향방사효율

의 경우 수조내의 음파 반사에 의한 잔향효과가 포함된 음향 방사파워가 측정되므로 실제 음향방사효율보다 크게 평가된다. 세 가지 가간의 경우 모두 수치해석 가능한 저주파수 영역에서는 측정 결과와 잘 일치하였다. 잔향음장 조건이 고주파수 영역에서 저주파수 영역보다 잘 만족되므로 음향 방사파워 예측 오차가 감소할 것으로 추정된다. 따라서 고주파수 영역에서도 측정결과와 수치해석 결과가 잘 일치할 것으로 판단된다.

5. 결 론

잔향음장에서의 음향파워 측정법을 적용하여 수중에서 원통형 구조물의 음향방사효율을 측정하였고 근접음장 측정결과를 이용한 수치해석 결과와 비교하여 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 따라서 수조에서의 음향방사효율 측정방법은 수중에서의 원통형 구조물에 적용 가능하고, 향후 수중 운동체의 수중 방사소음 예측 및 소음 저감 수단의 효과 분석 등에 효과적으로 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

(1) Na, H. J. and Lim, B.-D., 2012, A Study on the Errors at the Measurement of Sound Power, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 10, pp. 917~924.
 (2) Han, H.-S., Park, M.-Y., Cho, W.-G., Kim, J.-G., Im, D.-B. and Son, Y.-J., 2010, Investigation of the Indoor Noise of Naval Vessel with Regarding to the

Sound Absorption and Reverberation Time in a Cabin, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 10, pp. 960~967.

(3) Blake, W. K. and Maga, L. J., 1975, Chamber for Reverberant Acoustic Power Measurements in Air and in Water, Journal of Acoustic Society of America, Vol. 57, No. 2, pp. 380~384.

(4) Cochard, N., Lacoume, J. L., Arzelies, P. and Gabillet, Y., 2000, Underwater Acoustic Noise Measurement in Test Tanks, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 516~522.

(5) Li, Q., Shang, D., Shang, D. and Tang, R., 2014, Sound Source Performance Measurement Take in Reverberant Tank with Reverberation Method, ICSV21, Beijing, China.

(6) Kinsler, L. E., 1982, Fundamentals of Acoustics 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc.

(7) ISO 354:2003(E) : Acoustics-measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room.

(8) Kuttruff, H., 2000, Room Acoustics 4th Edition, Spon Press, pp. 254~260.



Seungjin Han received his B.S. and M.S. degree in aerospace engineering from KAIST in 1999 and 2001 respectively. He is currently a senior researcher in Agency for Defense Development. His research interests include naval ship stealth technologies and operation research.