

선박 구조기인 수중방사소음의 거리에 따른 점근특성

Asymptotic Characteristics of Structure-borne Underwater Radiated Noise from Surface Ship

이 두 호[†] · 이 성 현^{*}
Dooho Lee[†] and Seong-Hyun Lee^{*}

(Received March 4, 2026 ; Revised April 22, 2026 ; Accepted May 11, 2026)

Key Words : Structure-borne Underwater Radiated Noise(구조기인 수중방사소음), Asymptotic Characteristics(점근특성), FE/BE Coupled Approach(FE/BE 연성해석)

ABSTRACT

In this study, the propagation characteristics of structure-borne underwater radiated noise from a surface ship is investigated, and how these characteristics transition from the near field to the far field is also examined. While far-field acoustic modeling in a semi-infinite ocean is commonly approximated using point-source-based methods, practical situations involving large ships require detailed structural-acoustic analysis, leading to significant computational cost. Using a high-fidelity finite element/boundary element coupled model of an actual surface vessel, underwater sound pressure levels are computed at various distances and directions, normalized by ship length. The results show that up to approximately 100 Hz, both near-field and far-field responses exhibit decay behavior consistent with a dipole source. In the far field, most directions follow the expected $1/r$ (20 dB/decade) decay, while the horizontal direction uniquely shows a $1/r^2$ (40 dB/decade) decay, which is analytically explained based on the dipole formulation. To conclude, this study provides practical criteria for identifying the transition region between the near-field and far-field behavior in ship-generated underwater noise.

기 호 설 명

d : 쌍극자 음원 거리
 p : 음압
 $\dot{Q}$: 체적속도
 r : 음원까지의 거리
 t : 시간
 θ : 음원의 위치 각도

1. 서 론

바다에서 운행하는 선박과 같이 대단히 넓은 반 무한 공간에서 소음원이 있을 때 음파의 전파특성은 중요한 관심사가 되어 왔다^(1,2). 최근에는 계산능의 급격한 발전으로 소음원의 상세모델과 유체와의 연성을 고려한 근접장의 상세해석이 가능하다⁽³⁾. 그러나 반무한 공간에서 원거리 전파특성의 경우,

[†] Corresponding Author ; Member, Dept. of Mechanical Engineering, Dongeui University, Professor
E-mail : dooho@deu.ac.kr

^{*} Korea Institute of Machinery and Materials, Principal Researcher

[‡] Recommended by Editor Won Seok Yang
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

공간의 이산화에 기반한 방법은 모델의 크기가 급격히 증가하게 되고 계산용량을 쉽게 초과하게 되어 헬름홀츠 지배방정식을 근사하는 방법을 사용하게 된다^(4,5).

바다에서의 원거리 음장은 깊이에 따른 음속의 변화, 수온, 감쇠, 그리고 바닥의 지형에 따라 변하게 되며 이를 모델링하는 근사법은 음선법(ray method), 파수적분법(wavenumber integration method), 정규모드법(normal mode method), 포물형방정식법(parabolic equation method) 등이 있다. 이러한 접근법은 모두 점음원(point source)를 포함하고 있고, 점음원에서 발생한 에너지가 원거리 음장으로 전파하는 특성을 근사하는데 효과적으로 이용되고 있다⁽⁶⁻⁸⁾.

소음원이 바다를 운행하는 선박일 경우 선박의 크기를 무시할 수 없는 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 음장의 근접장 해석이 필요하게 되고 많은 요소분할이 필요하게 되어 계산비용이 급격히 증가하게 된다. 그러나, 선박의 상대적인 크기에 대비하여 어느 정도의 거리에서 음장의 전파특성이 원거리 음장특성을 갖게 되는지에 대한 실증적인 데이터는 찾아보기 어렵고 대략적인 경험치에 의존하여 이를 판단하게 된다. 이러한 어려움은 불필요한 시행착오를 일으키는 원인이 된다.

이 연구에서는 실제 선박의 수치해석 모델을 통해서 함정 장비의 작동에서부터 기인한 구조기인 소음원이 있는 경우에 대해서 반무한 수중의 음향 응답을 함정중심에서의 거리의 함수로 주파수별로 계산하고, 이를 바탕으로 근거리 음장에서 원거리 음장으로 전환되는 공간영역을 살펴서 전술한 어려움에 대한 하나의 기준점을 제시하고자 한다.

2. 수중방사소음의 해석

2.1 점음원 응답

수상이나 수중의 함정에서 충분히 먼 거리의 수중 방사소음은 함정을 하나의 점음원으로 가정해서 해석할 수 있다. 무한한 깊이를 갖는 수중에서 점음원이 존재할 때 수중에서의 음압은 수면을 기준으로 거울상의 위치에 역위상을 갖는 동일 크기의 점음원을 Fig. 1과 같이 위치시키는 모델을 사용한다. 그러므로 원거리에서의 수중 응답은 쌍극자 음원(dipole source)의 응답으로 구할 수 있다.

Fig. 1에서 응답점의 위치가 음원에서 충분히 멀게

되면 $\theta \approx \theta_1$ 이 되고 $\Delta r = d \cos \theta$ 의 관계가 성립하여 식 (1)과 같이 음압 p 를 표시할 수 있다⁽⁹⁾.

$$p = -\frac{\rho_0 d \cos \theta}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\Delta r} \left[\frac{\dot{Q} \left[t - \frac{r + \Delta r}{c_0} \right]}{r + \Delta r} - \frac{\dot{Q} \left[t - \frac{r}{c_0} \right]}{r} \right] \right\} \quad (1)$$

식 (1)에서 ρ_0 는 밀도, c_0 는 음속, $\dot{Q}$ 는 체적속도를 의미한다. 식 (1)에서 $\Delta r \rightarrow 0$ 인 극한을 고려하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$p = -\rho_0 d \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{\dot{Q} \left[t - \frac{r}{c_0} \right]}{4\pi r} \right] \quad (2)$$

일정한 강도 $\dot{Q}_0$ 의 점음원이 각주파수 ω 의 조화함수로 작용하고 있다면 식 (2)는 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$p = \rho_0 d \dot{Q}_0 \cos \theta \frac{1 + jkr}{4\pi r^2} e^{j(\omega t - kr)} \quad (3)$$

식 (3)에서 k 는 파수(wave number)이고 ω 는 각주파수이다.

식 (3)을 거리에 변화에 따라서 Fig. 2에 그렸다. 그림과 식을 살펴보면 쌍극자 음원의 경우 kr 이 작은 경우(근접장이거나 저주파수의 경우) 수중소음은 $1/r^2$ 에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있고, kr 이 커지게 되면 $1/r$ 에 비례하여 감소하는 특성을 볼 수 있다.

2.2 FE/BE 연성해석법

선박과 같은 복잡한 구조물이 소음원으로 작용하는 경우, 정확한 수중방사소음 해석을 위해서는 구조물과 음장의 이산화를 통한 상세해석이 필수적이다. 영역의 이산화를 통한 근사적 해석법은 다양한 접근

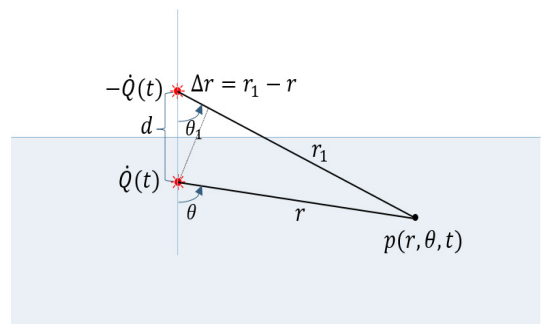


Fig. 1 Dipole source

이 가능하지만 이 연구에서는 거리에 따른 점근적인 접근이 가능한 유한요소(finite element, FE)/경계요소(boundary element, BE) 연성해석법을 사용한다^(10,11).

수중방사소음에 대한 FE/BE 연성해석법의 전체적인 해석 절차를 Fig. 3에 요약하였다. FE/BE 연성해석법의 해석 절차는 세 단계로 나누어 진행된다. 첫 단계는 접수면의 표면만을 경계요소로 분할하여 각 노드점에 각 방향 단위 힘에 의한 접수면의 응답을 계산하는 과정이고 이를 이용해서 접수면의 부가 질량/감쇠행렬(added mass/damping matrices)을 계산할 수 있다. 두 번째 단계는 수중구조물을 유한요소법을

이용하여 분할하여 계의 강성, 감쇠 및 질량행렬을 계산하고 첫 단계에서 계산한 부가 질량/감쇠 행렬을 더하여 구조물의 응답을 구하는 과정이다. 이를 통해서 접수면에서의 구조물의 속도를 구할 수 있다. 마지막 세 번째 단계는 구조물의 접수면 속도를 경계조건으로 수중방사소음 문제를 첫 번째 단계의 경계요소해석모델을 사용하여 풀고, 이를 이용하여 수중에서의 관심점에서 음압 및 속도값을 후처리하는 과정이다. 자세한 내용은 지면의 간소화를 위해 생략한다.

3. 선박의 수중방사소음 해석

대상 선박에 대해서 FE/BE 연성해석법을 이용하여 수중방사소음을 계산하였다. Fig. 4에는 대상 선박의 유한요소 해석 모델과 접수면의 경계요소모델을 그렸다. 구조모델의 경우 50만 요소의 크기이고, 접수면 경계요소의 경우 5300의 요소수를 가는 크기이다.

선박의 한 동력실에 가상의 힘을 작용시키고 FE/BE 연성해석 모델을 이용하여 수중에서의 방사소음을 주파수 영역에서 계산하였다. 선박의 중앙부 근접장에서 동일거리의 좌현, 우현, 수직 아래점에서의 수중방사소음을 계산하였다. 보안상의 이유로 응답의 크기도 임의의 값을 더하여 표시한다.

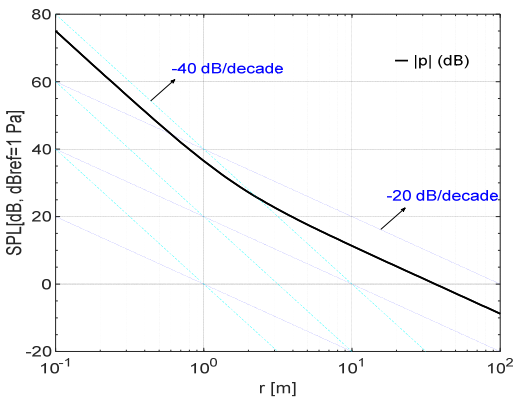


Fig. 2 Sound pressure level due to a dipole source along distance

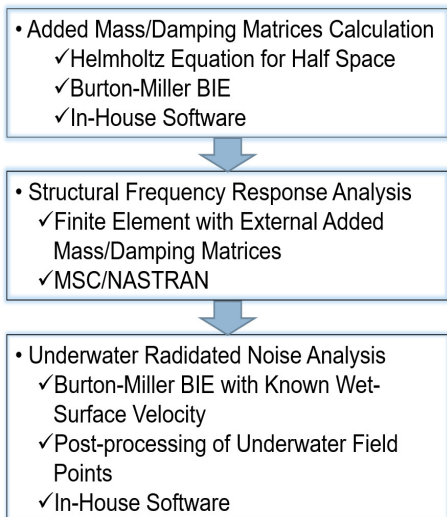


Fig. 3 Procedure of underwater radiated noise analysis using the FE/BE coupled approach

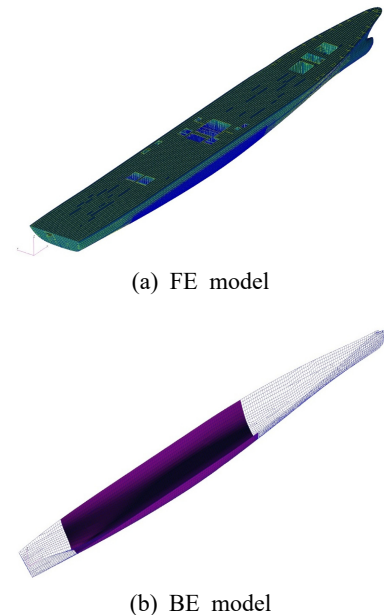


Fig. 4 FE/BE models for a surface ship

4. 수중방사소음의 접근 해석

FE/BE 연성 해석 모델을 이용하여 선박의 수중 중심으로부터의 거리에 따라 수중방사소음이 감소하는 특성을 해석하였다.

방향에 따라 변화하는 감소특성을 관찰하기 위해 정의된 수중중심에서 우현방향으로 수평선으로부터 수직 선방향으로 일정한 각도로 기울어진 직선을 Fig. 5와 같이 정의하였다. 직선상에 위치한 점에서의 수중방사소음 크기를 계산하고 이를 거리에 따라 그렸다. 거리는 선박의 크기에 따른 효과를 정규화하기 위해 선박 길이로 나눈 무차원 값을 사용한다. 수중방사소음의 크기는 일정한 수로 암호화한 값을 사용하였다.

Fig. 6에는 여러 각도에서의 해석결과를 주파수별로 그렸다. Fig. 7에는 각 주파수에서 방향별로 음압의 크기를 거리별로 그렸다. 그림들을 살펴보면 우선 선박의 수중방사소음의 크기는 원거리에서 수평방향을 제외하면 모두 거리에 반비례하여 감소(20 dB/decade)하는 것을 볼 수 있다. 이는 쌍극자 소음원에 의한 감소특성과 동일한 특성이며 일반적으로 예상되는 결과이다. 그러나 수상함의 중심에서 수면과 수평방향인 경우(즉, STBD 0°인 경우)는 원거리에서의 음압크기가 거리의 제곱에 반비례하여 감소(40 dB/decade)하는 것을 볼 수 있다. 이는 모든 주파수에서 공통적으로 나타나며, Fig. 7에서 보듯이 수평방향에서 약간만 벗

어나도 거리에 반비례 감소로 회귀하는 특성을 보이고 있어 수평방향만의 특성이라고 할 수 있다. 이 수평 방향은 수면과 평행하지만 수면은 아니고(이미지법에 의하여 반무한 수중을 정식화 하였으므로 수면에서의 음압은 0이다), 수중에 위치한 선박 중심에서 우현방향으로 수면과 평행한 방향이다. 우현방향이 아닌 수면과 평행한 방향에서도 동일한 해석 결과를 보이지만 예시로 보이지는 않았다.

예상과는 달리 수평방향에서 원거리일 때 거리의 제곱에 반비례하여 수중소음이 감소하는 원인을 살펴기 위해 식 (3)을 살펴보면, 이 경우 거리의 차이를 근사하는 $d \cdot \cos\theta$ 값이 0이 되어 유효한 값이 아님을 알 수 있다. 이는 Fig. 3의 근사화에 사용한 Δr 의 표현식이 유효하지 않기 때문이다. 이를 $\theta = 90^\circ$ 인 경우에 정확히 쓰면 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= r_1 - r = \sqrt{r^2 + d^2} - r \\ &= r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{d}{r} \right)^2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 제곱근을 이항정리를 이용하여 근사하면 식 (5)와 같다.

$$\sqrt{1 + \left(\frac{d}{r} \right)^2} \approx 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{d}{r} \right)^2 \quad (5)$$

최종적으로 식 (5)를 식 (4)에 적용하면 식 (6)과 같다.

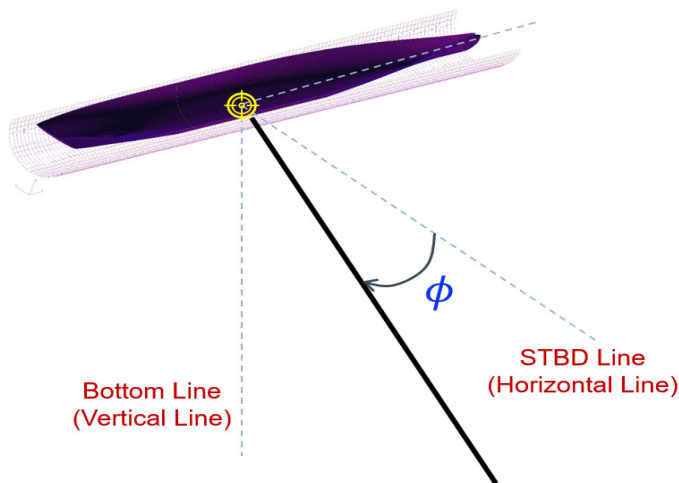


Fig. 5 Definition of a field-point line

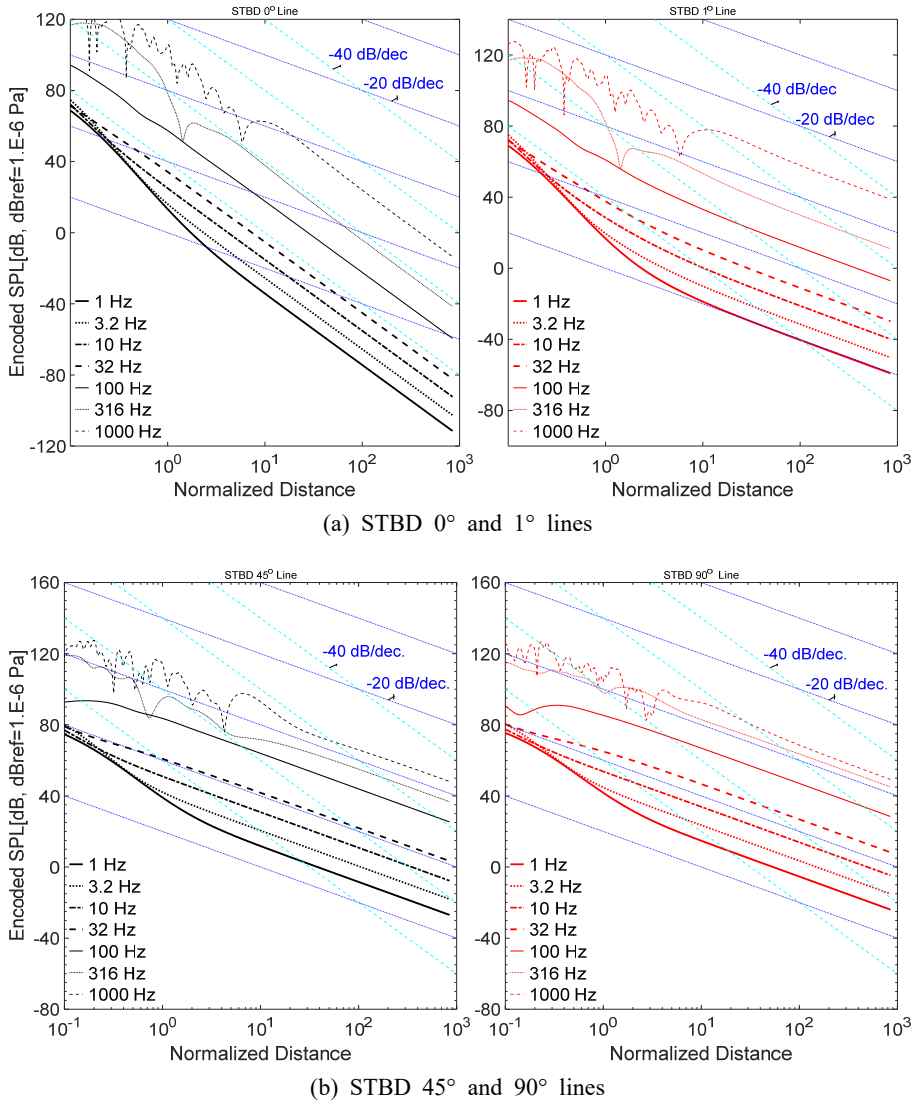


Fig. 6 Analysis results of underwater radiated noise along the STBD lines

$$\Delta r = \frac{d^2}{2r} \quad (6)$$

식 (6)과 식 (3)을 살펴보면 수평방향의 경우 원거리에서는 거리의 제곱에 비례하여 수중방사소음의 크기가 감소해야 함을 알 수 있다.

근거리에서의 특성을 살펴보면 선박의 경우 매우 저주파인 경우 쌍극자 소음원과 같이 거리의 제곱에 비례하여 음압의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있고 고주파로 갈수록 그 영역은 낮아지거나 복잡해지는 것을 볼 수 있다. 수평방향의 경우는 저주파에서 거

리의 제곱을 넘어서 비례하여 감소하는 경향도 볼 수 있다.

이 선박의 경우 대략 100 Hz 정도까지는 쌍극자 음원과 유사한 방사특성을 보이고 있으며, 근접장에서 원거리장으로의 전환은 주파수에 따라 다르지만 정규화된 거리의 1 ~ 10 정의 영역에서 일어나는 것을 볼 수 있다. 그러나 이는 한 수상함에 대한 특별한 결과이므로 이를 일반화하기 위해서는 다양한 경우에 대한 해석 결과를 비교 검토하는 것이 필요하다.

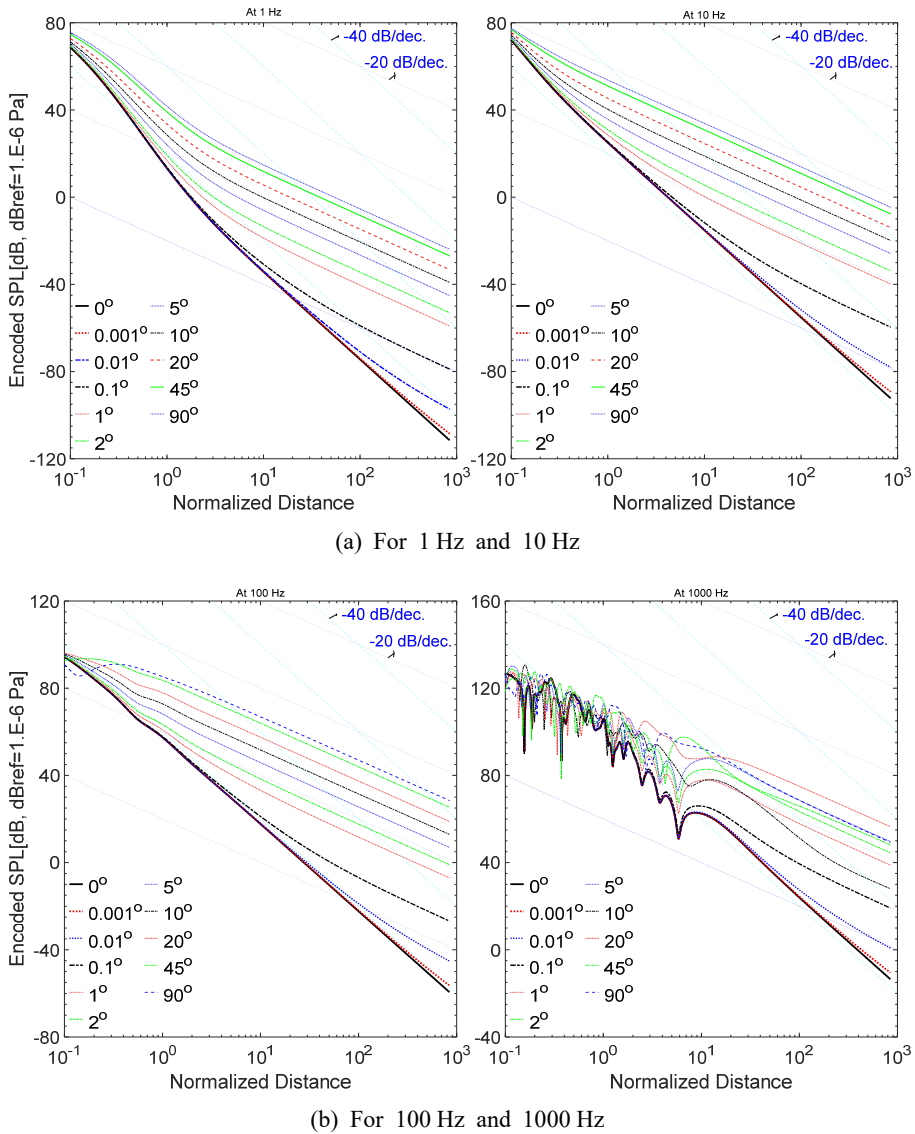


Fig. 7 Analysis results of underwater radiated noise along the STBD lines

5. 결 론

이 연구에서는 한 선박의 구조기인 음원에 대한 상세해석을 통해서 계산한 수중방사소음의 전파특성을 쌍극자 음원의 특성과 비교하고 고찰하였다.

복잡구조물인 선박의 상세해석은 FE/BE 연성 해석법을 사용하여 선박의 상세 구조해석과 무한 수중에서의 구조기인 방사소음 특성을 해석 하였다. 정규화된 거리의 함수로 음압의 감소특성으로 살펴본 결

과 선박의 수중방사소음은 약 100 Hz 정도의 주파수까지는 근접장, 원거리장 모두 쌍극자 음원과 동일한 특성으로 묘사될 수 있으며 그 이후의 영역에서는 주파수 따른 전환영역을 판별할 수 있었다. 원거리장의 경우는 자명하게 쌍극자 음원의 특성을 따름을 확인하였지만 반무한 조건이 아닌 실제 해양환경에서는 해면파랑, 수온 등의 환경이 크게 작용하는 것 또한 유의하여야 한다.

특이사항으로 수면과 수평인 방향의 접근해석의

경우 원거리장에서 거리의 제곱에 반비례하여 감소하는 현상이 나타나는 데 이 현상을 살펴보고 쌍극자 소음원 모델에서 현상을 설명하였다.

후 기

이 연구는 한국연구재단(NRF-2022R1A2C1006938)과 2025년도 한국기계연구원 기본사업(NK257A)의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사 드립니다.

References

- (1) Han, H. and Lee, K., 2013, Estimation of the Underwater Radiated Noise of a Naval Vessel using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 394-400.
- (2) Kwon, H. W., Hong, S. Y., Lee, S. Y., Hwang, A. and Song, J. H., 2012, Underwater Radiated Noise Analysis for an Unmanned Underwater Vehicle using Power Flow Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 328-334.
- (3) Li, D. Q., Hallander, J. and Johansson, T., 2018, Predicting Underwater Radiated Noise of a Full Scale Ship with Model Testing and Numerical Methods, Ocean Engineering, Vol. 161, pp. 121-135.
- (4) Wang, Y., Tu, H., Xu, G. and Gao, D., 2023, A Review of the Application of Spectral Methods in Computational Ocean Acoustics, Physics of Fluids, Vol. 35, No. 12, 121301.
- (5) Wang, L. S., Heaney, K. D., Pangerc, T., Theobald, P. D., Robinson, S. P. et al., 2014, Review of Underwater Acoustic Propagation Models, NPL, NPL Report AC12, London, United Kingdom.
- (6) Petrov, P. S. and Petrova, T. N., 2014, Asymptotic Solution for the Problem of Sound Propagation in a Sea with an Underwater Canyon, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136, No. 4, pp. EL281-EL287.
- (7) Brown, M. G. and Viechnicki, J., 1998, Stochastic Ray Theory for Long-range Sound Propagation in Deep Ocean Environments, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 104, No. 4, pp. 2090-2104.
- (8) Bayliss, A., Goldstein, C. I. and Turkel, E., 1985, The Numerical Solution of the Helmholtz Equation for Wave Propagation Problems in Underwater Acoustics, Computers & Mathematics with Applications, Vol. 11, No. 7-8, pp. 655-665.
- (9) Blackstock, D. T., 2000, Fundamentals of Physical Acoustics, John Wiley & Sons, NY, United States.
- (10) Lee, D. H., Kim, H. S., Kim, B. K. and Lee, S. H., 2012, Underwater Structure-borne Noise Analysis Using a Finite Element/Boundary Element Coupled Approach, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering A, Vol. 36, No. 7, pp. 328-334.
- (11) Lee, D., Kim, B. K., Kim, H. S. and Lee, S. H., 2018, Comparison of the Measurement Methods of Underwater Radiation Efficiency Using a Finite Element/Boundary Element Coupled Model, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 42, No. 3, pp. 231-237.