

운행 중 전달경로해석법을 이용한 선박의 수중방사소음 예측

Prediction of the Underwater Radiated Noise Using Operational Transfer Path Analysis

이 성 현[†] · 마 평 식^{*} · 서 윤 호^{*} · 김 봉 기^{*} · 이 석 규^{**}

Seong-Hyun Lee[†], Pyung-Sik Ma^{*}, Yun-Ho Seo^{*}, Bong-Ki Kim^{*} and Sock-Kyu Lee^{**}

(Received February 17, 2023 ; Revised May 17, 2023 ; Accepted May 31, 2023)

Key Words : Underwater Radiated Noise(수중방사소음), Submerged Plate(접수판), Acceleration Level(가속도 레벨), Transfer Path Analysis(전달경로해석법)

ABSTRACT

It is necessary to predict underwater radiated noise with sensors attached to the ship because measuring noise radiated from ships has limitations such as the requirement for additional measurement systems, the requirement for low background noise, and the need for the absence of ships operating nearby. To estimate underwater radiated noise and determine the contribution of noise sources, operational transfer path analysis is used. Accelerometers are mounted on a variety of machinery and submerged plates to evaluate the transmission path while considering noise sources. To measure the underwater radiation noise, a buoy system is deployed in the water. Under various speed conditions, with or without cavitation, the acceleration and underwater radiated noise are measured simultaneously. The independent principle components describing the transfer function are determined using the singular value decomposition algorithm. The underwater radiated noise predicted using the measured acceleration level and transfer function is compared to the measured noise. For each speed case, the contribution of noise sources is investigated.

1. 서 론

선박의 수중방사소음은 기계류의 작동에 의한 소음과 추진기 등에 의하여 발생하는 유체소음으로 구분할 수 있으며, 최근에는 해양생태계 보호를 위하여 관련 규제를 강화하고 있는 추세이다. 운항 중인 선박의 수중방사소음을 예측하기 위해서는 별도의 측정 시스템(전용 측정 선박이나 측정용 부이시스템)을 이

용하여야 하며, 배경소음이 낮고 주변에 운항하는 선박이 없는 위치에서 측정해야 하기 때문에 자주 측정하는 것이 불가능하다. 또한 측정 환경 및 조건(기상 상태, 파고 및 추진기 상태 등)에 따라 다른 결과를 나타낼 수 있다. 이러한 수중방사소음 특성 파악의 어려움으로 인하여, 운항 중인 선박의 캐비테이션 발생 여부 및 수중방사소음 레벨을 실시간으로 모니터링하고자 하는 연구들이 진행되고 있다.

기계류에 의한 소음은 작동하는 주요 장비 및 배관

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Institute of Machinery & Materials, Senior Researcher
E-mail : sh.lee@kimm.re.kr
^{*} Korea Institute of Machinery & Materials, Researcher
^{**} LIG Nex1, Senior Researcher

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2022 Annual Autumn Conference
[‡] Recommended by Editor Hanshin Seol
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에서 발생하는 공기소음 및 구조소음이 선박 구조물의 진동을 유발하고, 물과 접한 접수판의 진동이 물로 방사되어 발생하게 된다. 유체소음은 추진기의 캐비테이션에 의한 소음, 해수 배관계의 흡입/토출부위에서 직접 방사되는 소음 및 선체를 따라 흐르는 유동에 의한 소음으로 구분할 수 있다. 별도의 측정시스템 없이 수중방사소음을 모니터링하기 위해서는 선체 부착가능한 센서를 이용하여야 하며, 주요 추진장비 및 접수판의 진동레벨을 활용할 수 있다.

선체 부착형 센서를 이용하여 수중방사소음을 모니터링하는 경우, 접수판의 가속도 레벨 및 방사효율을 이용하여 기계류에 의한 소음을 예측할 수 있으며, 추진기의 캐비테이션에 의한 소음은 추진기 상부 판의 가속도 레벨을 이용하여 추정할 수 있다. 다만, 기계류에 의한 소음을 예측함에 있어 전체 접수판의 진동레벨을 측정하는 것이 물리적으로 불가능하며, 선박과 같이 크고 복잡한 구조물의 방사효율을 정확하게 예측하는 것은 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 이 연구에서는 전달경로해석법을 사용하여 수중방사소음을 예측하고, 각 소음원의 기여도 분석을 수행하였다.

2. 해석 방법

2.1 전달경로해석법

전달경로 해석법(TPA, transfer path analysis)은 다양한 소음원으로부터 소음 및 진동이 발생하여 수음점으로 전달되는 시스템에서 각 소음원의 기여도를 파악하여 소음 저감설계를 하기 위한 방법으로서, 고전적인 TPA(classical TPA), 부품기반 TPA(component-based TPA) 및 전달합수기반 TPA(transmissibility-based TPA)로 구분할 수 있다⁽¹⁾. 고전적인 TPA는 각각의 소음원(active part)을 대상 구조물(passive part)에서 분리하고 가진점과 수음원 사이의 주파수 응답 함수(frequency response function)를 측정 한 후에, 소음원을 조립하고 가진점에서의 작동중합(혹은 음향과위)을 측정하여 수음원에서의 응답을 예측하는 방법이다. 소음원 분리, 전달합수 측정 등에 소요되는 시간 및 비용이 매우 크다는 단점이 있으며, 구조물에서는 소음원을 분리하는 것이 불가능한 경우도 있다. 또한 소음원과 구조물이 연결된 상태에서 힘을 측정하여 분석하기 때문에, 구조물만의 설계 변경

에 의한 효과를 예측하기 어렵다⁽²⁾. 이를 극복하기 위하여 부품 기반 TPA가 제안되었으며, 소음원의 가진력을 구조물의 동특성과 무관하게 등가 힘이나 등가 속도로 모사하여 분석을 수행하는 방법이다. 구조물의 전달합수는 소음원이 결합된 상태에서 소음원을 작동시키지 않고 측정하여 분석한다⁽³⁾. 전달합수 기반 TPA는 구조물의 전달합수를 측정하지 않고 운전 중 소음원이 연결된 부분 근처에 센서를 설치하여 응답만을 측정하여 분석하는 방법으로, 운행 중 전달경로해석법(OTPA, operational transfer path analysis) 및 외부입력을 이용한 운행 중 전달경로 해석법(OPAX, operational transfer path analysis with eXogenous inputs) 등이 있다. 짧은 시간에 간단한 측정으로 분석이 가능하지만, 측정 지점 선정에 따라 전달경로 추정 등에 불확실성 등이 반영되어 오차가 크게 발생할 수 있다. 전달합수 역행렬을 구하는 과정에서 특이값 분해(singular value decomposition)를 이용하여 전달합수 간의 간섭을 최소화할 수 있으며, 전달경로가 모두 포함되도록 측정위치를 선정해야 한다⁽⁴⁻⁶⁾.

이 연구에서는 전달합수 기반 TPA의 한 방법인 OTPA를 이용하여 선박의 수중방사소음을 예측하고, 주요 소음원에 대한 기여도 분석을 수행하고자 한다. 일반적으로 소음원(active part)과 구조물(passive part)은 탄성마운트로 연결되며, OTPA를 이용하여 전달경로를 분석하는 경우, 구조물에 가속도 센서를 설치하게 된다. 센서를 설치하는 위치(indicators)는 다른 전달경로와의 간섭을 최소화하기 위하여 소음원(active part)에 가깝게 한다. Vaitkus 등⁽⁷⁾은 센서 위치를 마운트의 상단(active part)와 하단(passive part)에 설치하여 각각의 가속도 레벨 및 상/하단 간의 차이를 이용하여 OTPA를 수행하여 결과를 비교하였으며, 상단의 가속도 레벨 및 상/하단 간의 차이를 이용한 해석이 하단의 레벨을 이용하는 경우에 비하여 좋은 결과를 나타냄을 확인하였다. 이 연구에서는 주요 소음원의 마운트 상단에 가속도 센서를 설치하였으며, 일부 마운트가 없는 장비는 고정부위에 설치하였다.

2.2 운행 중 전달경로해석법

선박의 주요 소음원으로부터 수중방사소음으로 방사되는 전달경로에 대한 해석을 수행하기 위해서는 주요 경로상의 응답과 수중방사소음을 다양한 운전조건에서 측정하여 전달합수를 얻게 되며, 식 (1)과 같

이 나타낼 수 있다:

$$\begin{bmatrix} X_1^{(1)}(\omega) \cdots X_m^{(1)}(\omega) \\ \vdots \\ X_1^{(r)}(\omega) \cdots X_m^{(r)}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{1,1}(\omega) \\ \vdots \\ H_{m,1}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1^{(1)}(\omega) \\ \vdots \\ Y_1^{(r)}(\omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $X_1^{(r)}(\omega)$ 는 주요 경로상의 응답, $Y_1^{(r)}(\omega)$ 는 수중 방사소음, $H_{m,1}(\omega)$ 는 전달함수, m 은 소음원(source)의 수, r 은 다양한 운전조건에서 측정된 횟수를 의미한다. 전달함수를 구하기 위해서는 역행렬을 구해야 하고 이를 위해서, 측정된 횟수 r 은 소음원의 수 m 보다 반드시 커야 한다. 식 (2)는 다음과 같이 행렬식으로 나타낼 수 있다:

$$X_{r \times m} H_{m \times 1} = Y_{r \times 1} \quad (2)$$

전달함수 $H_{m \times 1}$ 은 식 (3)과 같이 $X_{r \times m}$ 의 역행렬을 이용하여 계산할 수 있다.

$$H_{m \times 1} = X_{r \times m}^+ Y_{r \times 1} \quad (3)$$

역행렬을 구하는 과정에서 소음원간의 상관성이 높은 경우에는 오차가 크게 발생할 수 있으며, 이를 저감시키기 위하여 특이값 분해를 이용하였다.

$$X_{r \times m} = U_{r \times r} \Sigma_{r \times m} V_{m \times m}^T \quad (4)$$

여기서, 식 (4)의 행렬 $U_{r \times r}$ 와 $V_{m \times m}$ 는 유니타리 행렬(unitary matrix)이고, $\Sigma_{r \times m}$ 은 대각행렬(diagonal matrix)이다. 대각행렬에서 누적기여율(cumulative contribution rate)을 이용하여 기여도가 높은 l 개의 특이값을 선정하여 역행렬을 계산하였다.

$$CCR(l) = \sum_{j=1}^l \sigma_j / \sum_{j=1}^m \sigma_j, (l \leq m) \quad (5)$$

여기서 식 (5)의 $CCR(l)$ 은 누적기여율, σ_j 는 j 번째 특이값을 의미한다. 이로부터 전달행렬을 구할 수 있다.

$$H_{m \times 1} = V_{m \times l} \begin{bmatrix} 1/\sigma_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1/\sigma_l \end{bmatrix}_{l \times l} U_{r \times l}^T Y_{r \times 1} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 전달행렬을 구한 후에, 선박의 소음원 위치에서의 가속도 레벨 측정결과를 이용하면 식 (7)과 같이 관계에 의하여 수중방사소음을 예측할 수 있으며, 각 소음원으로부터 전달되는 경로의 기여도 분석을 수행할 수 있다.

$$Y_{\text{Test}} = X_{\text{Test}} H_{m \times 1} \quad (7)$$

3. 가속도 및 수중방사소음 계측

선박의 수중방사소음은 기계류에 의하여 발생하는 소음과 추진기의 캐비테이션에 의하여 발생하는 소음으로 구분할 수 있다. 전달경로 해석법을 적용하기 위해서는 주요 전달경로가 모두 포함되도록 센서를 설치해야 한다. 기계류에 의한 소음을 분석하기 위하여 주요 장비의 마운트 상부에 가속도 센서를 설치하고, 추진기 소음을 분석하기 위해서 추진기 상부의 선체에 가속도 센서를 설치하였다. 선박의 수중방사소음은 부이형 측정장비에 연결된 하이드로폰을 이용하여 측정하였다.

대상 선박의 주요 장비는 3개의 기관실에 배치되어 있으며, 운행 중에 작동하는 장비 16대와 좌/우현 추진기를 소음원으로 선정하고 센서를 배치하였다. Fig. 1은 대상 선박의 주요 장비 및 가속도계 설치 위치를 나타내고 있다. No. 1과 No. 2 기계실에서 각각 8대의 장비를 선정하여 마운트 상단에 센서를 설치하였으며, No. 3 기계실은 좌/우현 추진기 상부의 접수판에 센서를 설치하였다. 가속도 측정에는 B&K LAN-XI(type 3053) 및 PCB 가속도계(352C33)가 사용되었다.

수중방사소음은 무선 부이를 이용하여 측정하였으며 Fig. 2에 측정용 무선부이에 대한 개요를 나타내고 있다. 측정용 부이 시스템은 하이드로폰, 하이드로폰 케이블, 깊이 센서 등으로 이루어져 있으며, 해면과 및 함정 조파에 의한 하이드로폰의 수직운동을 막기 위하여 탄성고무줄 및 원판형 추를 이용하였다. OTPA에 사용된 신호는 58 m 깊이에 설치한 하이드로폰의 신호를 사용하였다. 수중방사소음은 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 ANSI S12.64⁽⁸⁾ 및 ISO 17208-1⁽⁹⁾에 정

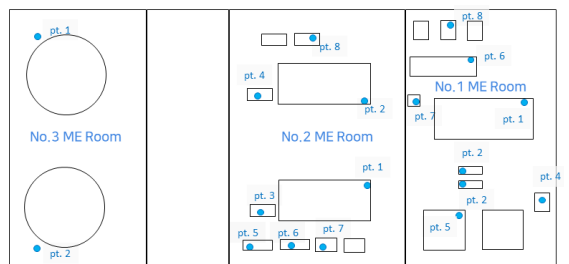


Fig. 1 Selected accelerometer position

의하고 있는 최근접점(closest point of approach, CPA)을 고려하여 데이터 측정 거리(data window length, DWL) 및 데이터 측정 기간(data window period, DWP)을 설정하였다.

운행 중 전달경로해석법의 정확도를 높이기 위해서는 다양한 부하 조건에서 가속도 레벨 및 수중방사소음을 측정해야 한다. 이 연구에서 사용된 대상 선박의 경우 함속에 따라 추진용 장비의 조합이 변경되어 저속에서는 추진전동기로, 고속에서는 디젤 엔진으로 추진하게 된다. 따라서 각각의 추진체계별로 회전수를 저속에서 고속으로 증가시키면서 측정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 다만, 이 연구에서는 선박에 설치된 계측장비와 부이형 수중방사소음 계측 장비를 동기화를 할 수 없어서, 함속을 증가시키거나 감소시키면서 모든 r/min 대역에서 계측하는 것이 불가능하였다. 일정한 함

속으로 운항하는 경우의 가속도 레벨 및 수중방사소음이 정상상태라고 가정하고, 5개의 일정한 함속으로 선박을 운항하면서 각각 좌현(port)/우현(STBD)에 대하여 측정하였다. 각 경우에 대한 구조소음 및 수중방사소음 측정데이터는 1초씩 분할하여 신호처리를 수행하였으며, 총 167개의 1초 데이터를 이용하여 OTPA를 수행하였다. 역행렬을 계산하기 위하여 충분한 데이터가 사용되지 않으면, 식 (3)에서 과소 결정 시스템이 되어 결과의 정확도가 떨어질 수 있다. 이를 확인하기 위하여 전 주파수 대역에 대하여 행렬 X의 rank를 계산하였으며, 소음원 개수와 동일한 18을 나타냄을 확인하였다. Table 1은 측정 조건별 최근접점 및 데이터 측정 길이를 나타내고 있다. A kn~C kn 조건은 캐비테이션이 발생하기 전 함속이며, D kn~E kn은 캐비테이션이 발생하는 조건의 함속이다. 속력이 증가하면 선박을 수중방사소음 측정용 부이에 가깝게 운항하기가 어려워져 CPA가 증가할 수 있으며, 가장 빠른 조건인 E kn에서 CPA가 다른 함속에 비하여 크게 측정되었다.

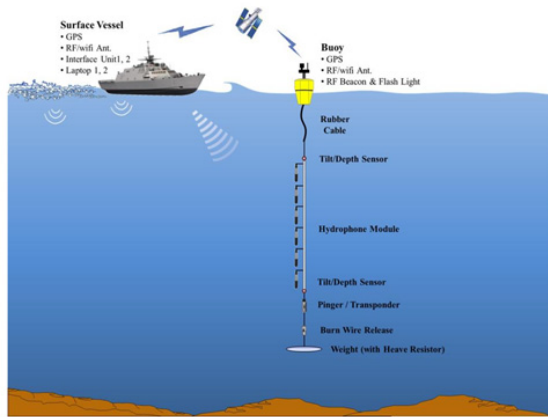
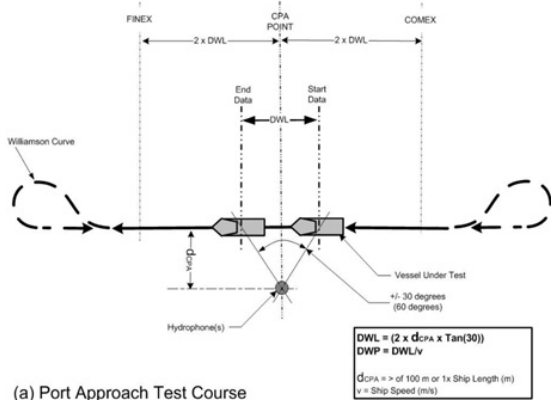


Fig. 2 Measurement setup with remote buoy system

4. 분석 결과

각 운전조건에서 소음원의 마운트 상단 및 추진기 상부의 가속도, 무선부이의 수중방사소음을 시간 데이터로 측정하였으며, 각 운전조건에서 계측된 시간 데이터는 1초 간격으로 주파수 분석을 하였다. 수중방사소음의 경우 측정대상 선박과 측정용 부이사이의 거리에 의하여 전달손실이 발생하게 되어 이 연구에서는 20 log(CPA)로 거리를 보정하여, 선박 1 m에서



(a) Port Approach Test Course
Fig. 3 Measurement course configuration

Table 1 CPA and DWL for URN measurements

Mode	CPA [m]	DWL [m, data window length]
A kn [P]	41	47
A kn [S]	52	60
B kn [P]	46	53
B kn [S]	55	64
C kn [P]	46	53
C kn [S]	54	62
D kn [P]	57	66
D kn [S]	54	62
E kn [P]	97	112
E kn [S]	82	95

의 소음으로 변환하였다.

시간 데이터는 8192 Hz로 샘플링하여 주파수 영역 데이터는 4 kHz까지 분석하였다. 누적 기여율은 0.98 이상이 되는 특이값들을 선정하여 신호 간의 간섭의 영향을 배제하였다. 소음원으로 선정된 18개의 가속도 측정결과로 구성된 행렬의 특성을 검토하기 위하여 조건 수(condition number) 및 누적 기여율을 고려하여 선정된 주성분의 수를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 특정 주파수 이상에서는 조건 수가 증가하고 주성분의 수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 수중방사소음 예측시에 오차가 발생할 수 있는 요소이다. Fig. 6은 전달경로해석법을 이용하여 예측한 각 함속별 수중방사소음과 측정결과를 비교하고 있다. 캐비테이션 발생 이후 함속인 D kn, E kn에서는 측정결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 캐비테이션 발생 이전 함

속인 A kn ~ C kn에서는 일부 peak들은 측정값과 유사하나 전반적으로 크게 예측하고 있다. 다양한 운항 조건에 대한 측정이 이뤄지지 않아서, 저속에서의 예측 결과에서 오차가 발생한 것으로 판단된다.

수중방사소음 예측값은 각각의 소음원에서 계측된 가속도 레벨과 전달함수를 이용하여 계산된 개별 소음원에 의한 수중방사소음의 합으로 계산한다. 각 소음원의 기여도를 분석하기 위하여 각 소음원에 의한 수중방사소음 예측결과를 모든 소음원에 의한 예측결과 및 측정결과와 비교하여 Figs. 7, 8에 나타내었다. 여기서 measured는 계측결과, synthesis는 모든 소음원을 반영한 예측결과, No. 1 M.R. Pt. 1 ~ No. 3. M.R. Pt. 2는 각 기계실의 소음원으로부터 예측된 수중방사소음을 나타낸다. Fig. 7은 캐비테이션이 발생 이전 함속인 A kn에 대한 결과이며, Fig. 8은 캐비테이션 발생 이후인 E kn에 대한 결과이다. 협대역 결과로는 각 소음원의 기여도를 정확하게 파악하는데 한계가 있어서, Table 2에 특정 주파수 범위 내의 음향에너지 합으로 나타내었다. A kn에서는 No. 2 ME Room의 Pt. 3, 4 위치의 장비로 추진을 하게 되며, 이 장비는 Pt. 1, 2의 장비와 직결로 연결되어 있는데, No. 2 ME Room의 Pt. 1 ~ 4가 높은 기여도를 갖는 것을 볼 수 있다. E kn에서는 캐비테이션 발생에 의하여 추진기 상부인 No. 3 ME Room의 Pt. 1, 2의 기여도가 높게 나타나고 있다.

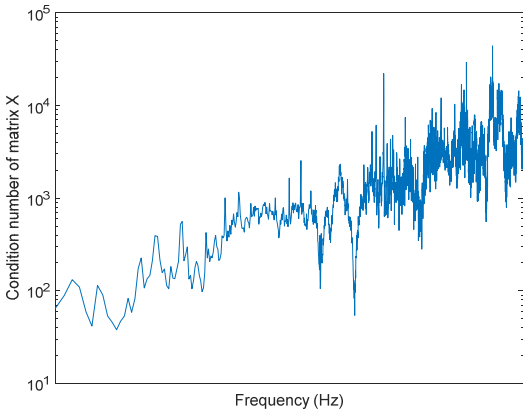


Fig. 4 Condition number of matrix X

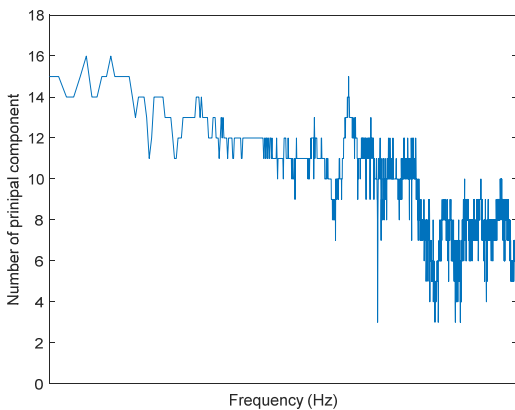


Fig. 5 Number of principal components

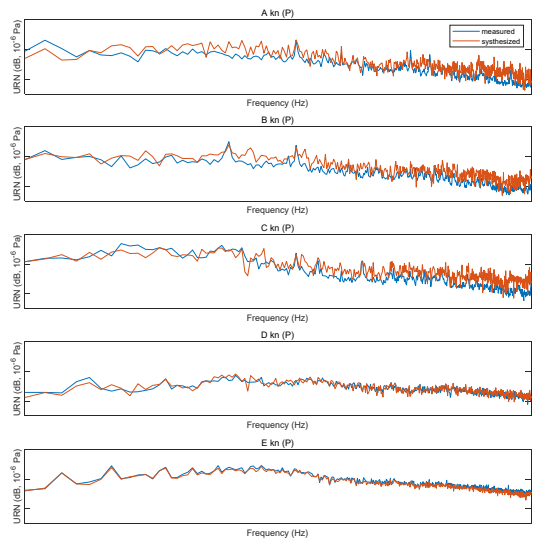


Fig. 6 Comparison of measured and synthesized results

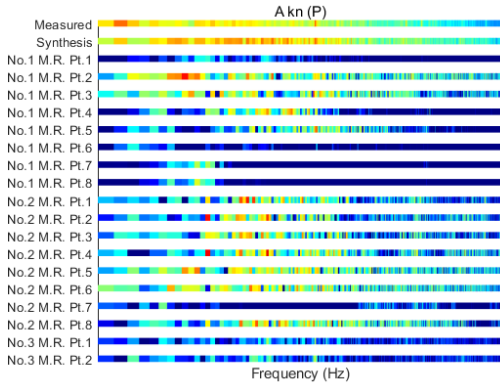


Fig. 7 Contribution analysis (A kn [P])

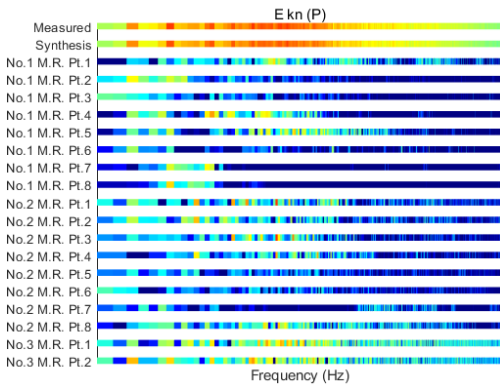


Fig. 8 Contribution analysis (E kn [P])

Table 2 Contribution analysis using overall level [dB, re. 10⁻⁶ Pa]

	A kn [P]	E kn [P]
Measured	157.1	185.9
Synthesis	159.4	185.1
No.1 M.R. Pt.1	140.7	169.2
No.1 M.R. Pt.2	157.9	161.0
No.1 M.R. Pt.3	156.9	158.4
No.1 M.R. Pt.4	152.9	168.8
No.1 M.R. Pt.5	152.8	171.7
No.1 M.R. Pt.6	130.3	163.2
No.1 M.R. Pt.7	135.7	160.4
No.1 M.R. Pt.8	139.3	162.0
No.2 M.R. Pt.1	157.9	172.9
No.2 M.R. Pt.2	162.8	171.3
No.2 M.R. Pt.3	160.7	169.8
No.2 M.R. Pt.4	160.8	169.8
No.2 M.R. Pt.5	158.0	159.6
No.2 M.R. Pt.6	157.1	160.0
No.2 M.R. Pt.7	141.4	164.0
No.2 M.R. Pt.8	157.2	169.6
No.3 M.R. Pt.1	139.9	175.9
No.3 M.R. Pt.2	141.1	174.4

5. 결론

선박의 수중방사소음을 예측하고, 각 장비의 기여도를 분석하기 위하여 운행 중 전달경로해석법을 적용하여 측정결과와 비교하였다. 선박의 운항 중에 작동하는 장비들의 마운트 상단에 가속도계를 설치하여 다양한 운항조건에서 진동레벨을 측정하였으며, 수중방사소음은 부이형 측정장비를 이용하여 계측하였다. 운행 중 전달경로해석법 적용을 위해서는 다양한 운항조건에 대한 측정이 필수적이며, 자동차 산업에서 적용되는 경우 엔진 run-up 및 run-down과 같이 엔진이 작동하는 모든 조건에 대하여 측정을 수행하여 전달경로를 해석하는 것이 일반적이다. 다만, 이 연구에서는 실 해역에서 선박 운항에 의한 수중방사소음 및 진동을 측정함에 따른 물리적 한계로 인하여, 다섯 가지 속력 조건에 대하여 측정을 수행하였다.

전달경로해석법을 이용하여 예측한 수중방사소음을 측정결과와 비교하였으며, 캐비테이션 발생 이후 함속에서는 측정값과 유사하게 예측하였고, 캐비테이션 발생 이전 함속에서는 일부 peak들은 유사하게 예측되었으나, 전반적으로 오차가 발생하고 있다. 좀 더 다양한 함속에 대한 측정결과가 확보된다면, 오차의 원인에 대한 분석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

수중방사소음에 영향을 미치는 소음원을 분석하기 위하여 각 전달경로에 대한 기여도 분석을 수행하였으며, 저속에서는 추진기관과 관련된 경로에서 기여도가 높게 나타났고, 고속에서는 캐비테이션과 관련된 추진기관 상부 접수판의 기여도가 높게 나타남을 확인하였다.

추후 실제 운항 중인 선박의 수중방사소음 예측의 정확도 향상을 위해서는 다양한 조건에서 주요 전달경로의 가속도 레벨 및 수중방사소음을 계측이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 방위사업청과 방위산업기술지원센터의 지원(사업명: 선체 부착 센서를 이용한 함정추진기 CIS 모니터링 기술, 계약번호: UC200001D)하에, LIG넥스원 공동연구(계약번호: LIGNEX1-2020-0949 (00))로 진행되었습니다.

References

(1) van der Seijs, M. V., de Klerk, D. and Rixen, D. J., 2016, General Framework for Transfer Path Analysis: History, Theory and Classification of Techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 68-69, pp. 217~244.

(2) van der Auweraer, H., Mas, P., Dom, S., Vecchio, A., Janssens, K. and van de Ponsele, P., 2007, Transfer Path Analysis in the Critical Path of Vehicle Refinement: The Role of Fast, Hybrid and Operational Path Analysis, SAE Technical Paper 2007-01-2352.

(3) Elliott, A. S., Moorhouse, A. T., Huntley, T. and Tate, S., 2013, In-situ Source Path Contribution Analysis of Structure Borne Road Noise, Journal of Sound and Vibration, Vol. 332, No. 24, pp. 6276~6295.

(4) Noumura, K. and Yoshida, J., 2006, Method of Transfer Path Analysis for Vehicle Interior Sound with No Excitation Experiment, Proceedings of FISITA 2006 World Automotive Congress, F2006D183.

(5) de Klerk, D. and Ossipov, A., 2010, Operational Transfer Path Analysis: Theory, Guidelines and Tire Noise Application, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 24, No. 7, pp. 1950~1962.

(6) Putner, J., Fastl, H., Lohrmann, M., Kaltenhauser, A. and Ullrich, F., 2012, Operational Transfer Path

Analysis Predicting Contributions to the Vehicle Interior Noise for Different Excitations from the Same Sound Source, Proceedings of 41st International Congress and Exposition on Noise Control Engineering: InterNoise 2012, pp. 2336~2347.

(7) Vaitkus, D., Tcherniak, D. and Brunskog, J., 2019, Application of Vibro-acoustic Operational Transfer Path Analysis, Applied Acoustics, Vol. 154, pp. 201~212.

(8) American National Standards Institute, 2009, Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships — Part 1: General Requirements, ANSI/ASA S12.64-2009/Part 1.

(9) International Organization for Standardization, 2016, Underwater Acoustics — Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships — Part 1: Requirements for Precision Measurements in Deep Water Used for Comparison Purposes, ISO-17208-1:2016.



Seong-Hyun Lee received his M.S. and Ph.D. degree in Mechanical Engineering at KAIST. He is currently working at Korea Institute of Machinery & Materials as a senior researcher. His research interests are noise and vibration controls in industrial fields.