

# 쌍축선 추진기 캐비테이션 소음 모형시험 연구

박철수<sup>1,†</sup>·김건도<sup>1</sup>·임근태<sup>1</sup>·박영하<sup>1</sup>·장현길<sup>2</sup>·장영훈<sup>2</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>1</sup>  
대우조선해양<sup>2</sup>

## A Study on the Model Test for the Twin Propeller Cavitation Noise

Cheolsoo Park<sup>1,†</sup>·Gun-Do Kim<sup>1</sup>·Geun-Tae Yim<sup>1</sup>·Young-Ha Park<sup>1</sup>·Hyun-Gil Jang<sup>2</sup>·Young Hun Jang<sup>2</sup>  
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering<sup>1</sup>  
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering CO., LTD.<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The experimental results of the model tests for the twin propeller cavitation noise are presented. The model test was carried out by means of procedure of noise measurement followed by the signal processing and full-scale extrapolation. In order to convert the measured sound pressure level into the sound source level, transfer function measurements for three conditions were performed according to the combination of locations and number of virtual sources. White noise and LFM signal were used as a source signals to examine the influence of the input signal. For the twin propellers, 5 transfer functions were defined and the results were discussed. Cavitation noise measurement tests were performed similarly to the transfer function measurement test. Noise source localization analysis was performed to confirm the test effectiveness. It was confirmed that the source level of the twin propeller can be estimated reliably by using transfer function corrections. Finally, the model test results were converted into full-scale by applying the ITTC '87 model-ship scaling law, and the validity of the model test was confirmed by comparison with the full-scale measurement result.

**Keywords** : Twin propeller cavitation noise(쌍축 추진기 캐비테이션 소음), Model test(모형시험), Transfer function(전달함수)

## 1. 서론

선박의 수중방사소음 연구는 주로 소음성능이 중요한 함정 및 잠수함과 음향 시험을 수행하는 연구선 등 특수선을 중심으로 수행되었으나 최근에는 국제해사기구의 선박 수중소음 규제 동향(IMO MEPC.1/Circ.833, 2014)과 맞물려 일반 상선으로 관련 연구가 확대되고 있는 추세이다. 선박의 수중소음은 선박 내부 또는 외부에서 발생한 소음 및 진동이 수중으로 방사되는 소음으로서 음원에 따라 크게 기계적 소음, 프로펠러 소음 그리고 유체 동력학적 소음 등 세 가지로 나눌 수 있다. 이 중 프로펠러의 회전으로 인해 발생하는 캐비테이션은 상선의 주된 음원으로 알려져 있다(Park, et al., 2015). 따라서 프로펠러의 캐비테이션 소음의 해석, 예측 및 계측은 선박 수중방사소음의 주요 연구 분야로 주목받고 있다.

모형시험은 선박의 다른 성능과 마찬가지로 설계단계에서 추진기 소음 성능을 평가하는 유용한 도구이다(Seol, et al.,

2015; Lafeber & Bosschers, 2016). 이에 따라 최근 다양한 계측 및 분석 표준이 제시되고 있다(ISO/DIS 20233-1, 2016; ITTC, 2014). 추진기 소음 모형시험은 주로 추진기 음원인 캐비테이션을 모사할 수 있는 캐비테이션 터널과 감압수조에서 수행된다. 모형시험 기관 및 표준에 따라 다소 차이는 있으나 추진기 소음 모형시험은 일반적으로 소음계측 - 신호처리 - 실선확장의 과정으로 수행된다. 소음계측은 추진기 캐비테이션 소음을 계측하는 과정으로써 이로부터 음압준위(sound pressure level)를 얻을 수 있다. 음압준위는 음원과 청음기사이의 거리 및 계측 환경에 따라 변하는 값이므로 이를 거리 및 환경에 독립적인 음원준위(sound source level)로 환산하는 과정과 배경소음의 영향을 고려하는 과정이 신호처리에서 수행된다. 신호처리를 통해 추정된 모형선 스케일의 음원준위는 모형선-실선 상관관계를 이용하여 실선 스케일로 확장된다. 현재까지 널리 활용되고 있는 모형선-실선 상관관계는 ITTC에서 제안한 스케일링 법칙(ITTC, 1987)이다. ITTC '87 스케일링 기법은 주로 얇은층 캐비테이션

에 대해 적용할 수 있는 기법으로서, 최근 날개끝 보오텍스의 레이놀즈 효과를 고려한 새로운 상관관계가 제안된 바 있다 (Park & Seong, 2017).

추진기 소음의 관점에서 단축선과 쌍축선의 가장 큰 차이는 소음원의 개수와 위치이다. 모형시험에서 예측된 소음의 음압준위로부터 음원준위를 환산하기 위해서는 전달함수(transfer function)의 추정 또는 예측이 필요하다. 전달함수는 소음원에서부터 청음기에 도달하기까지의 매질 및 환경에 따른 음전달 현상을 나타내는 것으로서 소음원이 한 개인 단축선에 비해 소음원이 두 개인 쌍축선의 경우 그만큼 고려할 요소가 많아지게 된다. 음원의 개수와 더불어 두 음원의 상대적 위상차 또한 고려되어야 할 요소이다. 두 개의 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션 및 소음이 동일한 위상을 취할 것이라는 것은 일반적인 상황에서는 기대하기 어렵다. 따라서 두 음원의 위상차에 따라 발생하는 현상의 파악도 필요하다. 이에 본 연구에서는 두 개의 음원중심이 존재하는 쌍축선의 전달함수에 관한 실험 연구를 수행하였다.

선박의 추진기 캐비테이션 소음을 예측하는 방법은 모형시험과 더불어 경험식 (Ross, 1976) 및 수치해석 (ITTC, 2014) 등이 있다. 이 중에서 경험식은 대부분 단축선을 대상으로 적용되었다. 또한 수치해석은 쌍축선의 두 프로펠러 중 기준이 되는 하나의 프로펠러에 대한 해석을 수행 후 두 개의 프로펠러에 대한 소음준위로 확장하는 것이 편리하다. 이 때, 기준 프로펠러 해석결과를 쌍축 프로펠러로 확장할 때 양 프로펠러에서 발생하는 캐비테이션의 양은 동일하고 두 소음 신호 간의 상호작용은 무시한다는 가정 하에 단일 프로펠러 파워에 단순히 두 배, 즉 +3 dB의 보정을 하여 추정하는 것이 일반적이다. 모형시험의 경우 앞서 언급하였듯이 예측된 음압준위로부터 추정 또는 예측된 전달함수의 보정을 통해 음원준위를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 모형시험을 통해 전달함수를 이용한 쌍축선 음원준위 추정기법의 타당성을 확인하고자 한다.

본 논문은 다음의 구성으로 이루어졌다. 제 2장에서는 추진기 소음 모형시험 절차를 간략하게 기술하였고, 제 3장에서는 쌍축선 전달함수 예측시험 내용 및 결과를 서술하였다. 제 4장에서는 쌍축선 추진기 소음계측 모형시험 분석 및 실선계측과의 비교 결과를 제시하였고, 끝으로 제 5장에서 요약 및 결론을 맺었다.

## 2. 추진기 소음 모형시험 절차

선박 추진기 소음 모형시험은 모형선 프로펠러에서 발생한 소음 측정을 통해 실선의 소음성능을 추정하는데 그 목적이 있다. 선박의 운항 중 발생하는 다양한 소음 중 추진기 소음을 구분하여 측정이 어려운 실선 시험에 비해 캐비테이션 터널을 이용한 모형시험은 프로펠러 캐비테이션 소음만을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 캐비테이션 터널에서 신호처리를 통해 획득된 음원준위는 모형선 스케일에서 추정된 결과이므로 스케일 효과 등을 고려해 이를 실선으로 확장하는 과정이 추가로 필요하다. 본 연구에서 모형시험은 다음의 절차를 따라 수행되었다.

모형시험에 의한 추진기 소음성능을 평가하기 위해서는 모형선-실선 사이의 상사법칙에 따라 소음원인 캐비테이션을 재현하는 것이 중요하다. 캐비테이션 시험에서 반류는 시험시설에 따라 반류스크린, 더미 바디, 모형선 등을 이용해 재현하거나 때에 따라서는 이들의 조합을 활용하기도 한다. 또한 예측 기관의 기준에 따라 모형선 스케일의 반류를 사용하거나 실선 반류를 추정하여 사용하기도 한다 (ISO/DIS 20233-1, 2016; ITTC, 2014). 본 연구에서는 선박해양플랜트연구소의 대형터널에 모형선을 설치하여 반류를 재현하였다. 캐비테이션 시험조건으로서 추력(thrust)과 캐비테이션수(cavitation number)는 추진기 단독성능, 저항 및 저항시험결과를 바탕으로 결정하였다.

프로펠러 캐비테이션 소음은 대형터널 관측부 하부에 설치된 45채널 청음기배열을 이용하여 예측하였다(Fig. 1 참조). 청음기 배열은 소음원의 위치를 판별하여 해당 소음원을 제거하거나 그 크기를 최소화하기 위한 목적으로도 활용될 수 있다 (Park, et al., 2016). 각 청음기에서 예측된 음압( $p$ )은 다음과 같이 음압준위( $L_p$ )로 표현된다.

$$L_p = 10 \log_{10} \left( p^2 / p_{ref}^2 \right) \text{ [dB re. } 1 \mu\text{Pa]} \quad (1)$$

여기서,  $p_{ref}$ 는 기준음압으로서 수중에서는  $1 \mu\text{Pa}$ 를 의미한다. 또한, 모형선의 프로펠러를 더비허브로 교체하여 배경소음을 예측하였다. 배경소음 예측은 추진기 소음계측 시험조건과 동일한 환경에서 수행되었다. 각 주파수 대역에서 예측된 추진기 소음( $\rho_{src}$ )과 배경소음( $\rho_n$ )의 음압준위를 비교하여 그 차이가 10 dB 이상의 신호는 배경소음 보정을 수행하지 않았고 3 dB 미만의 신호는 해석에서 제외하였다. 또한 그 차이가 3 dB 이상 그리고 10 dB 미만의 신호는 다음과 같이 보정을 수행하였다 (ISO/DIS 20233-1, 2016).

$$L_p' = 10 \log_{10} \left[ 10^{(L_{src}/10)} - 10^{(L_n/10)} \right] \text{ [dB re. } 1 \mu\text{Pa]} \quad (2)$$

음압준위는 음원과 청음기 사이의 거리에 따라 달라진다. 또한, 캐비테이션 터널 안에서의 다중반사 및 청음기의 설치방식 등 예측환경에 의해 영향을 받는다. 따라서 소음성능의 평가를 위해서는 하나의 대푯값, 즉, 음원준위의 환산이 필요하다. 음원준위는 소음원을 이상적인 무한음장(free field)에서 무지향성 음원(omni-directional source)으로 가정한 후, 음원으로부터 거리 1 m 떨어진 위치에서 예측했을 때 음압준위로 정의된다. 본 연구에서는 전달함수( $TL$ )를 예측 후 다음과 같이 음원준위( $L_s$ )를 계산하였다.

$$L_s = L_p' + TL \text{ [dB re. } 1 \mu\text{Pa @ } 1 \text{ m]} \quad (3)$$

쌍축선의 전달함수 예측시험은 제 3장에서 자세하게 기술하였다. 끝으로, 모형 스케일의 음원준위를 다음의 ITTC '87 상관식을 따라 실선 스케일로 확장하였다 (ITTC, 1987).

$$\Delta L_s = 20 \log_{10} \left[ \left( \frac{D_s}{D_m} \right)^2 \left( \frac{n_s D_s}{n_m D_m} \right)^4 \left( \frac{\rho_s}{\rho_m} \right)^2 \right] \text{ [dB]} \quad (4)$$

$$\frac{f_s}{f_m} = \frac{n_s}{n_m} \quad (5)$$

식 (4)에서  $\Delta L_s$  는 모형 스케일 대비 소음준위 증가량이고  $D$  는 프로펠러 직경,  $n$  은 프로펠러 회전속도(rps) 그리고  $\rho$  는 밀도를 나타낸다. 또한, 첨자  $s$  와  $m$  은 각각 실선과 모형선 스케일을 의미한다. 식 (5)는 주파수( $f$ ) 상관관계를 나타낸다.

### 3. 쌍축선 전달함수 계측시험

전달함수 계측은 아날로그 신호발생기-신호증폭기-트랜스듀서로 구성된 가상음원(virtual source)을 사용하여 수행되었다. 아날로그 신호발생기에서 생성된 입력신호(전압)는 신호증폭기를 통해 증폭된 입력신호(전압)의 형태로 트랜스듀서에 전달되며, 트랜스듀서는 입력된 전압신호를 음압으로 전환하는 기능을 수행한다. 이 때, 가상음원의 음원준위( $L_{sv}$ )는 다음의 관계식으로 알 수 있다.

$$L_{sv} = 10 \log_{10} \left( \frac{V_i^2}{V_{ref}^2} 10^{T_{VR}/10} \right) \text{ [dB re. } 1 \mu\text{Pa @ } 1 \text{ m}] \quad (6)$$

여기서,  $V_{ref}$  는 기준전압으로서 1 V로 정의된다. 또한  $T_{VR}$  (transmitting voltage response)은 트랜스듀서의 입력전압 대비 출력음압의 관계를 데시벨 단위로 표시한 것으로서 제작사에서 제공하는 것이 일반적이다. 광대역 주파수 대역의 가상음원 입력 신호로는 주로 백색잡음(white noise) 또는 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호가 사용된다 (Park, et al., 2016). LFM 신호는 해당 주파수 대역에서 주파수 별 크기가 일정하고, 백색잡음은 각 주파수 별 신호특성이 무작위인 특징이 있다.

특정 위치( $r_s$ )에서 가상음원에 의해 생성된 음원준위( $L_{sv}$ )와 수음점( $r$ )에서 청음기에 의해 계측된 음압준위( $L_{pv}$ )를 이용하여 식 (3)으로부터 다음과 같이 전달함수를 정의할 수 있다.

$$TL(r_s, r) = L_{sv}(r_s) - L_{pv}(r) \text{ [dB]} \quad (7)$$

이 때, 가상음원의 위치( $r_s$ )는 정의된 음원중심(acoustic center)으로 설정하였다. 음원중심은 프로펠러의 캐비테이션과 같이 공간상에 분포된 소음원을 한 곳의 집중 소음원으로 치환할 때, 대표적인 소음원의 위치를 의미한다. 캐비테이션이 발생한 프로펠러의 음원중심은 공동(cavity)의 크기가 최대일 때 공동 중심으로 정의하거나 프로펠러 센터로 정의할 수 있다 (ISO/DIS 20233-1,

2016). 본 연구에서는 편의상 프로펠러 센터, 즉 샤프트 축과 프로펠러의 교점을 음원중심으로 정의하였다.

단축선의 경우 단일 음원중심을 가정하므로 전달함수에 영향을 주는 인자는 음원중심의 위치가 된다. 그러나 쌍축선의 경우 좌(port-side) / 우(starboard-side) 두 쌍의 음원중심이 존재하므로 음원중심의 위치뿐만 아니라 각 음원의 세기(음향강도) 및 위상차(phase) 또한 전달함수에 영향을 주는 인자가 된다. 이러한 인자별 전달함수의 특성을 고찰하기 위해 Table 1과 같이 전달함수 계측시험을 구성하였다. Table 1에서 PORT와 STBD에서는 선미에서 선수를 바라볼 때 좌측과 우측 프로펠러에 각각 하나의 음원중심을 가정하였고, TWIN은 양 측 모두 동시에 존재하는 두 개의 음원중심을 가정하였다.

Fig. 1은 모형시험 장치구성 개요를 보여준다. 본 시험의 대상 선박은 173K급 쌍축 LNG 운반선으로써 모형선은 Fig. 1의 상단 그림과 같이 캐비테이션 터널의 시험부(test section)에 설치되었다. 본 시험에서 가상음원은 ITC1032 트랜스듀서를 사용하였고 음원중심으로 가정된 프로펠러 샤프트의 끝단에 설치하였다. 또한 음압 계측은 Fig. 1의 하단 그림과 같이 음향계측부(acoustic trough) 내부에서 프로펠러 하방에 설치된 45채널 청음기 배열을 사용하여 수행되었다. 이 때, 터널 시험부와 음향계측부는 아크릴 재질의 음향창으로 분리되어 있으므로 시험부에서는 선수에서 선미방향으로의 유동이 존재하나 음향계측부 내부에는 유동이 존재하지 않는다.

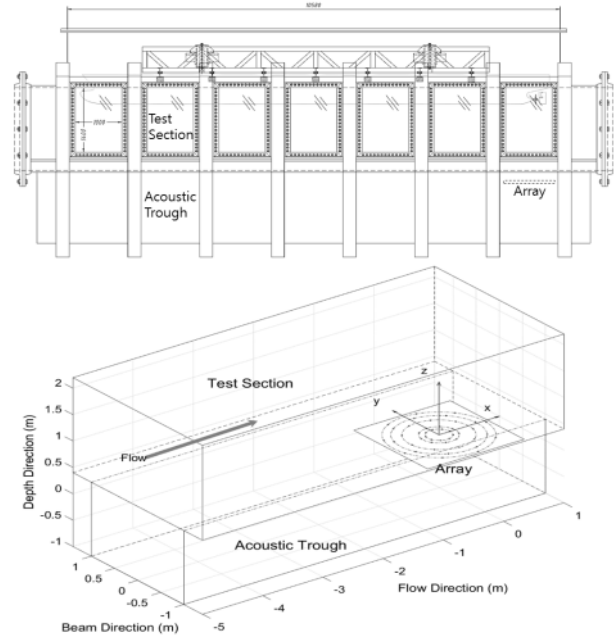


Fig. 1 Schematic diagram of the model test setup. The model is installed inside the test section(see top figure) and the hydrophone array is located inside the acoustic trough(see bottom figure)

Table 1에서 정의된 바와 같이 PORT, STBD 그리고 TWIN 조건에서의 전달함수 계측시험을 순차적으로 수행하였다. 각 시험

조건을 구현하기 위해 해당 가상음원에만 입력전압을 가하였고 해당 음원으로부터 발생 후 전파된 음압신호를 청음기 배열에서 계측하였다. 이 때, 각 시험조건에서 가상음원의 입력신호로는 백색잡음과 LFM 신호를 각각 사용한 후 그 차이를 비교하였다. 백색잡음의 주파수 대역과 신호의 크기 실효값(root mean square)은 세 조건에서 동일하다. LFM 신호의 경우 시작 주파수와 끝 주파수는 각각 100 Hz와 100 kHz로, 시작 주파수에서 끝 주파수까지 변환되는 시간은 1초로 설정하였다.

Table 1 Description of transfer function tests

Test condition	Virtual source position (acoustic center)
PORT	End of port-side propeller shaft axle (single acoustic center)
STBD	End of starboard-side propeller shaft axle (single acoustic center)
TWIN	Ends of both propeller shaft axis (twin acoustic centers)

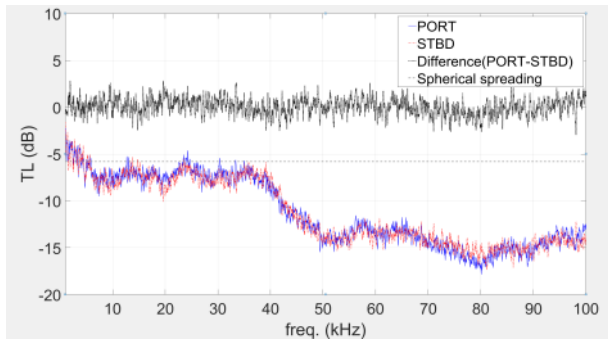


Fig. 2 Transfer function of PORT and STBD experiments. The description of experiments are given in Table 1

Fig. 2는 PORT와 STBD 조건에서 추정된 전달함수[식 (7)]을 비교하여 보여준다. 그림에서 전달함수는 편의상 평균 전달함수로 나타내었다. 이 때, 평균 전달함수는 45채널의 전달함수의 주파수 별 채널 평균값을 의미한다. 각 채널의 개별 전달함수는 음원 및 청음기의 위치에 따라 Fig. 2에서 제시된 평균 전달함수와 상이할 것이다. 또한, Fig. 2에는 구형확산(spherical spreading)을 가정할 때 전달함수가 제시되었다. 가상음원에서 청음기 배열 중심까지의 거리가 약 1.95 m이므로 이상적인 환경에서 전달함수는 그림에서와 같이 약 -5.58 dB가 될 것이다. 그런데 이상적인 환경에서의 전달함수와 실제 터널환경에서 전달함수 사이에는 상당한 차이가 발생하였고, 이러한 차이는 터널 내부의 다중 반사와 계측장비의 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

PORT와 STBD 조건의 전달함수 차이를 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 이 때, 전달함수 차이는 그래프에서 제시된 PORT 조건의 평균 전달함수와 STBD 조건의 평균 전달함수의 주파수별 차이를 의미한다. Fig. 2의 전달함수 차이(PORT-STBD)는 주파

수 별로 그 값이 상이하며 주파수 평균 결과 평균 0.04 dB, 표준편차 0.88 dB의 값을 보였다. 이로부터 두 음향중심에서 청음기 배열까지 전달함수는 평균적으로 유사하다고 볼 수 있다. 이러한 결과는 대상선과 청음기 배열의 배치가 평균적으로 좌우(port-starboard) 대칭에 가까운데 기인하는 것으로 판단된다. 45채널 평균 전달함수가 아닌 각 채널에서의 개별 전달함수는 두 음원과 청음기의 상대적 위치에 따라 서로 다른 전달함수 특성을 보일 것이다.

TWN 조건의 경우 두 가상음원에서 발신된 음압신호는 동일한 종류이나 상대적 위상은 무작위로 추출되었다. 이 때, 청음기에서 수신된 음압신호는 두 가상음원에서 발신된 음압신호가 서로 합쳐져 구분이 불가능하다. PORT와 STBD 조건 또한 TWN 조건과 동일하게 발신된 신호는 동일한 종류이나 상대적 위상은 무작위로 추출되었다. 그러나 수신된 두 신호는 순차적으로 수신되었으므로 서로 구분이 가능하다. 따라서 PORT와 STBD 두 경우의 수신신호와 발신신호를 적절히 조합하면 TWN 조건의 상태를 모사할 수 있을 것이다. 이를 위해 다음과 같이 두 종류의 파워합을 정의하였다.

i) 일관 파워합(coherent power sum) :

$$P_c = P_1 + P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T (s_1(t) + s_2(t))^2 dt \quad (8)$$



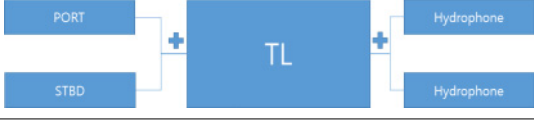
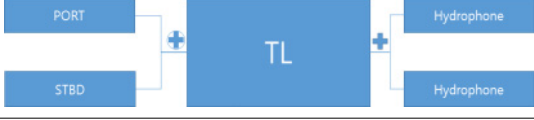
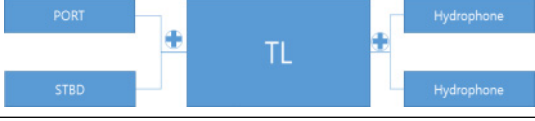
ii) 비일관 파워합(incoherent power sum) :

$$P_i = P_1 \oplus P_2 = \frac{1}{T} \int_0^T (s_1(t)^2 + s_2(t)^2) dt \quad (9)$$

이 때, 첨자  $c$ 와 연산자  $+$ 는 일관합(coherent sum)을 나타내고 첨자  $i$ 와 연산자  $\oplus$ 는 비일관합(incoherent sum)을 의미한다. 파워를 계산할 때 일관합은 두신호의 위상을 고려하는 반면 비일관합은 위상을 고려하지 않는 차이가 있다.

전달함수의 정의가 명확한 단축선과는 달리 쌍축선은 식 (7)에서 음원준위( $L_{si}$ )와 음압준위( $L_{pi}$ )가 다양한 방식으로 정의될 수 있다. 본 논문에서는 Table 2와 같이 5 종류의 쌍축음원 전달함수를 고려하였다. 각 전달함수의 정의와 신호모델은 Table 2에 제시된 바와 같다. Table 2의 정의에서 첨자  $i$ 와  $o$ 는 각각 입력음압과 출력음압을 의미하며 첨자  $T$ ,  $P$  그리고  $S$ 는 각각 Table 1에서 제시된 시험조건 TWN, PORT 그리고 STBD를 의미한다. 또한, 전달함수 Type 1과 Type2에서 첨자  $T1$ 과  $T2$ 는 각각 좌현과 우현의 가상음원을 의미한다. 한편, 신호모델에서 입력은 해당 위치의 가상음원에서 발신된 음압신호를, 출력은 청음기에서 계측된 음압신호를 의미한다. 전달함수 Type 1과 Type 2는 두 음원중심에 위치한 트랜스듀서들이 서로 다른 음압신호를 동시에 발신하고 청음기에서 동시에 수신하는 TWN 조건에 대해 적용된다. 이 때 입력신호는 각각 좌현과 우현 하나씩 총 두 개

Table 2 Definition of transfer function for twin propellers

Transfer function	Definition of transfer function	Related transfer function test in Table 1 / Signal model
Type 1	$TL_1 = -10 \log_{10} \frac{P_{o,T}}{P_{i,T1} + P_{i,T2}}$	TWIN test / 
Type 2	$TL_2 = -10 \log_{10} \frac{P_{o,T}}{P_{i,T1} \oplus P_{i,T2}}$	TWIN test / 
Type 3	$TL_3 = -10 \log_{10} \frac{P_{o,P} + P_{o,S}}{P_{i,P} + P_{i,S}}$	PORT & STBD tests / 
Type 4	$TL_4 = -10 \log_{10} \frac{P_{o,P} + P_{o,S}}{P_{i,P} \oplus P_{i,S}}$	PORT & STBD tests / 
Type 5	$TL_5 = -10 \log_{10} \frac{P_{o,P} \oplus P_{o,S}}{P_{i,P} \oplus P_{i,S}}$	PORT & STBD tests/ 

가 존재하나 출력음원은 청음기에서 동시에 계측된 한 개만 존재한다. Type 1은 음원준위( $L_{s,i}$ )를 입력신호의 일관합[식 (8)]으로 정의되었고 Type 2는 입력신호의 비일관합[식 (9)]으로 정의되었다. 전달함수 Type 3부터 Type 5까지는 PORT 조건과 STBD 조건에서 각각 계측된 데이터에 적용될 수 있도록 정의하였다. 이 때, 입력신호와 출력신호 공히 PORT 조건과 STBD 조건에서 계측된 두 개가 존재한다. Type 3은 입력신호와 출력신호 공히 비일관합으로 정의되었고, Type 4는 입력신호는 비일관합으로 그리고 출력신호는 일관합으로 정의되었다. Type 5는 Type 3과 반대로 입력신호와 출력신호 모두 일관합으로 정의되었다.

Fig. 3은 백색잡음을 음원으로 사용했을 때 전달함수 Type 1과 Type 2 추정결과를 비교하여 보여준다. Fig. 2에서와 동일하게 Fig. 3의 그래프는 45채널 평균 전달함수로 나타내었다. Type 1과 Type 2의 평균 전달함수는 주파수 평균 0.07 dB 표준편차 0.05 dB의 차이를 보인다. 이로부터 백색잡음의 경우 두 전달함수의 차이는 거의 없는 것으로 판단할 수 있다. 한편, Fig. 2의 단일음원 전달함수와 Fig. 3의 쌍축 전달함수는 유사한 주파수 특성과 크기를 보임을 알 수 있다. 이는 Fig. 2에서 PORT와 STBD 조건의 45채널 평균 전달함수가 유사했기 때문이다. 그러나 개별 청음기에서는 청음기의 위치에 따라 단일음원 전달함수와 쌍축 전달함수가 서로 상이할 수 있음에 유의하기 바란다.

Fig. 4는 LFM 신호를 음원으로 사용했을 때 Type 1과 Type 2

45채널 평균 전달함수를 비교하여 보여준다. LFM 신호의 경우 Type 1과 Type 2의 평균 전달함수는 주파수 평균 0.45 dB, 표준편차 0.13 dB의 차이를 보인다. 입력신호에 따른 Type 1과 Type 2의 평균 전달함수의 차이를 비교할 때, 그 차이는 백색잡음에 비해 LFM 신호에서 더 크게 나타났다. 이는 백색잡음의 무작위 특성으로 인해 입력신호의 비일관 파워합과 일관 파워합의 차이가 크지 않은 반면에 LFM 신호의 경우 두 음원에서의 발신된 신호의 위상차에 따라 간섭(interference)의 특성은 달라지나 백색잡음에 비해 두 발신신호 사이의 상관도(correlation)가 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

Type 3, Type 4, 그리고 Type 5의 전달함수에 대해서 유사한 분석을 수행하였다. 입력신호의 종류와 전달함수 정의에 따른 차이를 살펴보기 위해 입력신호가 백색잡음일 때 Type 1에서의 45채널 평균 전달함수 대비 다른 해당 조건에서 45채널 평균 전달함수 차이의 주파수 평균값을 Table 3에 수록하였다. Table 3에서 입력신호가 백색잡음인 경우에는 최대 평균 차이가 0.09 dB로써 모든 전달함수에서 추정결과가 유사함을 알 수 있다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 백색잡음의 경우 무작위 성격으로 인해 입출력 신호 공히 일관합과 비일관합과의 차이가 크지 않기 때문인 것으로 판단된다. 반면에 LFM 신호를 입력신호로 할 경우 전달함수 별 차이가 상대적으로 컸다. 특히 입력신호가 비일관합이고 계측신호가 일관합인 Type 4에서 가장 큰 차이가 발생하였다.

이상의 결과로부터 쌍축선 전달함수를 계측할 때 입력신호는 위상차에 대한 민감도가 상대적으로 적은 백색잡음을 사용하는 것이 타당하다고 판단된다.

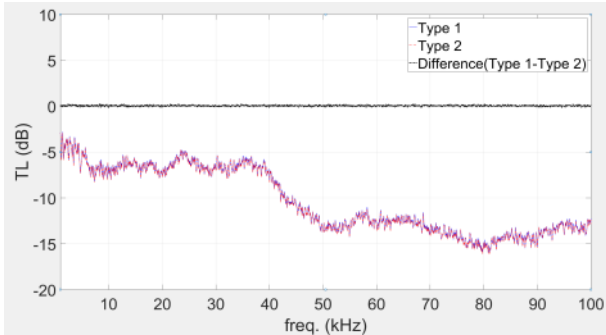


Fig. 3 Transfer function of Type 1 and Type 2 in Table 1 and their difference (white noise input, average of 45 channels)

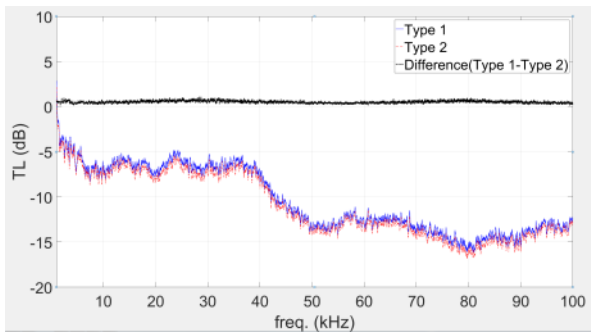


Fig. 4 Transfer function of Type 1 and Type 2 in Table 1 and their difference (LFM input, average of 45 channels)

Table 3 Relative mean errors of transfer functions and input signals to the type 1 of white noise

Transfer function	Input signal	Mean error (dB)
Type 1	white noise	-
	LFM	0.15
Type 2	white noise	0.07
	LFM	0.60
Type 3	white noise	0.09
	LFM	0.51
Type 4	white noise	0.09
	LFM	0.90
Type 5	white noise	0.07
	LFM	0.12

## 4. 쌍축선 추진기소음 계측시험

### 4.1 모형시험 개요

전달함수 적용을 통한 쌍축선 음원준위 추정기법의 타당성을 검토하고자 173K급 쌍축 LNG선을 대상으로 3장의 전달함수 계측시험과 유사하게 캐비테이션 소음계측 시험을 구성하였다. 본 대상선은 ballast 흡수에서 NCR 속도 시운전 중 실선스케일 소음 계측이 수행된 바 있다 (Park, et al., 2017). 실선계측 결과와 비교하기 위해 모형시험 조건은 실선 시운전 결과를 바탕으로 도출하였다.

모형시험 계측대상은 좌측 프로펠러(PORT) 시험, 우측 프로펠러(STBD) 시험 및 쌍축 프로펠러(TWN) 시험 시 해당 프로펠러에서 발생한 캐비테이션 소음이다. 각각의 모형시험은 다음의 절차를 따라 수행되었다.

좌측 프로펠러를 대상으로 캐비테이션 소음계측, 전달함수 계측 그리고 배경소음 계측을 순차적으로 수행하였다. 캐비테이션 소음계측을 위해 좌측 프로펠러는 시험조건에 맞추어 모터와 동력계로 회전시켰고, 우측 프로펠러는 유동에 의해 자유 회전할 수 있도록 구속이 없는 상태를 유지하였다. 전달함수 계측은 대상 프로펠러인 좌현의 프로펠러를 탈착하고 샤프트 끝단에 트랜스듀서를 설치한 후 3장에서 기술한 바와 같이 시험을 수행하였다. 끝으로 배경소음 계측은 양 축의 프로펠러를 모두 탈착하고 더미허브를 부착한 후 캐비테이션 소음계측 시험과 동일한 조건에서 좌측의 모터와 동력계만을 구동한 채 배경소음을 계측하였다.

우측 프로펠러를 대상으로 좌측 프로펠러 시험과 동일한 과정으로 시험을 수행하였다.

쌍축 프로펠러 시험에서는 좌/우측 프로펠러 공히 시험조건에 맞추어 모터로 회전시킨 후 캐비테이션 소음을 계측하였다. 전달함수 계측은 양측 프로펠러를 탈착하고 양 샤프트 끝단에 두 개의 트랜스듀서를 설치한 후 3장에서 기술한 방식에 따라 수행되었다. 배경소음 계측은 양 축의 프로펠러를 모두 탈착하고 더미허브를 부착한 후 캐비테이션 소음계측 시험과 동일한 조건에서 양측의 모터와 동력계를 동시에 구동한 채 배경소음을 계측하였다.

계측된 음압준위는 각 상황에 맞는 전달함수 보정을 거쳐 음원준위로 환산되었다. 이 때 전달함수는 백색잡음을 입력신호로 하여 추정된 결과를 사용하였다. 끝으로, ITTC '87 상관식을 이용하여 실선 스케일의 음원준위로 확장 후 실선스케일 계측결과와 비교하였다.

### 4.2 모형시험 결과

Park 등 (Park, et al., 2016)은 청음기 배열을 이용한 소음원 위치추정 기법을 제안한 바 있다. 본 기법은 소음원이 존재할 수 있는 후보 영역을 그리드(grid)로 구성한 후 모든 위치에서 추정 음장(replica)과 계측음장의 상관도를 평가해 상관도가 높은 영역을 소음원의 위치로 판단하는 기법이다. 본 연구에서는 시험의 적정성을 확인하기 위해 Park 등이 제안한 기법을 적용하여 소음원 위치추정을 수행하였다. Fig. 5는 PORT, STBD 그리고 TWN 시험에 대해 전달함수 계측에 활용된 가상음원(그림에서 좌측)과 프로펠러 캐비테이션 시험(그림에서 우측)을 대상으로 소음원 위

치추정 결과를 보여준다. 그림에서 밝은 색상일수록 상관도가 높은 영역이다. 본 결과로부터 계측된 소음은 정확히 대상 소음원에서 발생하였음을 확인할 수 있다.

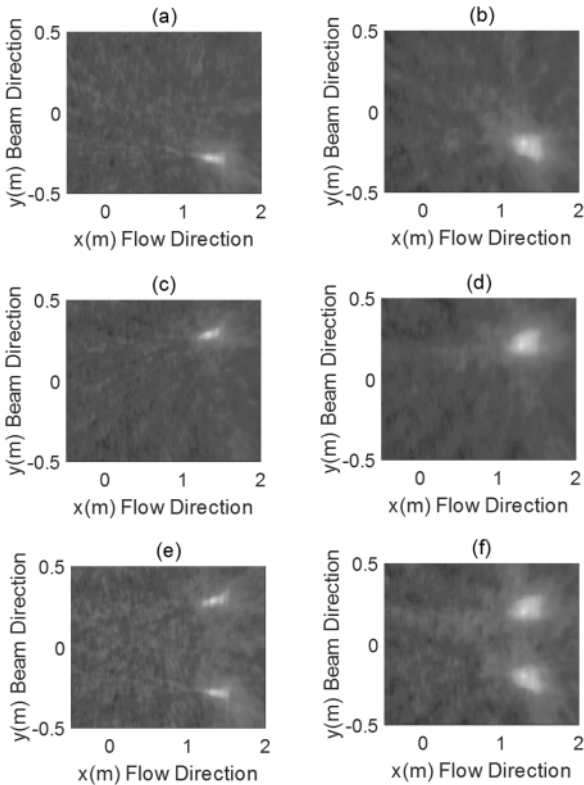


Fig. 5 Source localization results : (a)PORT virtual source, (b)PORT propeller cavitation, (c)STBD virtual source, (d)STBD propeller cavitation, (e)TWIN virtual sources, (f)TWIN propeller cavitation

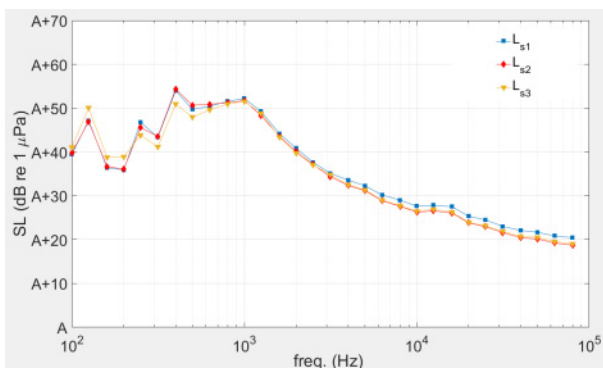


Fig. 6 Comparison of estimation results of twin propeller cavitation source level

본 연구에서는 쌍축선 추진기의 캐비테이션 음원준위를 다음의 세 가지 방법으로 추정하였다.

PORT 시험을 통해 계측된 음압준위와 전달함수를 각각  $L_p^P$ 와  $TL^P$ 라 할 때 음원준위  $L_s^P$ 는 식 (3)으로부터  $L_p^P - TL^P$

이 된다. 마찬가지로 STBD 시험을 통해 계측된 음압준위와 전달함수를 각각  $L_p^S$ 와  $TL^S$ 라 할 때 음원준위  $L_s^S$ 는  $L_p^S - TL^S$ 와 같다. 좌현과 우현 추진기의 음원준위를 각각 추정 후 다음과 같이 두 음원준위의 비일관함을 위해 쌍축선의 첫 번째 음원준위로 정의하였다.

$$\widehat{L}_{s1} = 10 \log_{10} \left[ 10^{(L_p^P/10)} + 10^{(L_p^S/10)} \right] \quad (10)$$

비록 PORT 시험과 STBD 시험이 독립적으로 수행되었지만 각각의 시험에서 계측된 음압의 시간이력을 서로 합하면 TWN 시험에서 계측된 음압의 시간이력에 준하는 것으로 간주할 수 있다. 두 음압의 합에 일관함을 취해 구해진 음압준위  $L_p^{P+S}$ 와 Table 3의 백색잡음 Type 1의 전달함수  $TL_1$ 을 활용하여  $\widehat{L}_{s2} = L_p^{P+S} - TL_1$ 를 두 번째 음원준위로 정의하였다. 끝으로 TWN 시험에서 계측된 음압준위  $L_p^{TWIN}$ 과  $TL_1$ 을 이용하여 세 번째 음압준위를  $\widehat{L}_{s3} = L_p^{TWIN} - TL_1$ 으로 정의하였다.

이상의 정의에 대해 추정된 음원준위를 1/3 옥타브 밴드 스펙트럼으로 Fig. 6에 나타내었다. KRISO 대형터널에서 1 kHz 이하의 저주파 대역은 배경소음의 영향이 큰 영역임을 감안하여 1 kHz 이상의 주파수 영역을 대상으로 세 종류의 음원준위 추정치에 대한 주파수 평균을 수행하였다. 그 결과 해당 주파수 대역에서 음원준위를 가장 크게 추정한  $\widehat{L}_{s1}$  대비  $\widehat{L}_{s2}$ 와  $\widehat{L}_{s3}$ 는 각각 -1.1 dB와 -0.9 dB의 평균 차이를 보였다. 음원준위 추정기법에 따른 결과의 차이 원인으로서는 다음의 두 가지를 고려하였다.

첫 째, 전달함수 추정 시 오차를 고려할 수 있다. 본 연구에서와 같이 음원중심을 한 점에 집중된 것으로 가정할 경우 캐비테이션 터널과 같이 다중 반사가 발생하는 환경에서는 반사파의 영향으로 음압신호가 상쇄되어 음압이 계측되지 않는 널(null) 주파수가 무수히 존재한다 (Harrison & Harrison, 1995). 이러한 널 주파수에서는 입력음압 대비 계측음압, 즉, 전달함수 값이 0에 수렴하게 된다. 널 주파수는 음원의 위치 또는 청음기의 위치에 따라 서로 다를 것이다. 서로 다른 위치에 두 개의 음원이 존재한다고 가정할 때, 두 음원의 널 주파수가 서로 일치할 경우에만 전달함수의 널 현상이 유지 될 것이다. 이 때 일치하지 않는 널 주파수에서는 적어도 하나의 음원에서 발생한 음압신호는 계측 될 것이기 때문이다. 따라서 음원이 두 개인 경우에는 하나의 음원에 비해 전달함수의 널 현상이 완화된 것으로 볼 수 있고, 이러한 널 완화는 음원의 개수가 늘어날수록 더욱 커지게 된다. Fig. 6에서  $\widehat{L}_{s2}$ 와  $\widehat{L}_{s3}$  대비  $\widehat{L}_{s1}$ 의 값이 크게 추정된 이유는 널 완화로 설명될 수 있다. 본 논문에서  $\widehat{L}_{s1}$ 은 하나의 음원으로 추정된 전달함수를 적용하여 추정되었고,  $\widehat{L}_{s2}$ 와  $\widehat{L}_{s3}$ 는 두 개의 음원으로 추정된 전달함수로부터 추정되었다. 따라서  $\widehat{L}_{s2}$ 와  $\widehat{L}_{s3}$  대비  $\widehat{L}_{s1}$ 의 값이 크게 추정된 이유는 음압준위로부터 음원

준위를 추정할 때 상대적으로 널 주파수가 많은 전달함수를 적용한  $\hat{L}_{s1}$ 가  $\hat{L}_{s2}$ 와  $\hat{L}_{s3}$ 에 비해 크게 보정되었기 때문인 것으로 판단된다. 이상의 분석결과로부터 소음원(공기방울)이 무수히 많이 분포된 실제 추진기 캐비테이션 현상을 반영할 수 있도록 전달함수 추정기법의 개선을 위한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

음원준위 추정기법 사이에 발생한 차이의 두 번째 원인으로써 모형시험 시 소음원의 상사를 고려하였다. 본 연구에서 수행된 PORT, STBD 그리고 TWN 시험은 동일한 시험조건에서 수행되었다. 따라서  $\hat{L}_{s2}$ 와  $\hat{L}_{s3}$ 의 소음원, 즉, 양 측 추진기의 캐비테이션은 유사할 것으로 기대되나, 만약 시험의 오류 또는 PORT 및 STBD 시험에서는 구현되지 못한 두 추진기 사이의 유의미한 상호작용에 의해 소음원간의 상사가 이루어지지 못했다면 두 음원준위 추정결과에는 상당량의 차이가 발생했을 것이다. 그런데 동일한 전달함수를 사용한  $\hat{L}_{s2}$ 와  $\hat{L}_{s3}$ 는 약 0.2 dB의 적은 차이를 보임에 따라 소음원의 상사는 기대한 바와 같이 잘 이루어진 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 연구 목적으로 다양한 방식의 모형시험과 그에 따른 음원준위 추정법을 고려하였으나 쌍축 추진기의 소음계측 시험은 물리적인 현상을 잘 반영할 수 있는 TWN 시험과  $\hat{L}_{s3}$  음원준위 추정법의 적용이 타당할 것으로 판단된다.

끝으로,  $\hat{L}_{s3}$  음원준위에 식 (4)와 (5)를 적용하여 실선으로 확장한 후 실선계측 결과와 비교하였다. 실선계측 시험은 2016년 4월 대한해협에서 수행되었다. 시험해역의 수심은 약 110 m로 균일하였으며, 소음계측은 수심 24 m, 52 m 그리고 90 m 수심에 위치한 수중청음기에서 수행되었다. 대상선의 운용을 비롯한 수중소음계측 및 신호처리 절차는 ISO 표준절차(ISO 17208-1: 2016, 2016)를 따랐다.

Fig. 7은 NCR 조건(86% MCR 조건)에서 계측된 173K급 쌍축 LNG선 실선 음원준위와 모형시험에서 추정된 실선 음원준위를 비교하여 보여준다. 그림에서 실선계측 및 모형시험 추정결과는 높은 일치도를 보였고, 이로부터 본 연구에서 제시된 쌍축선 추진기 소음 모형시험 기법의 효용성을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 쌍축선 추진기 캐비테이션 소음 모형시험 연구 결과를 제시하였다. 모형시험은 소음계측 - 신호처리 - 실선확장의 절차로 수행되었다.

계측된 음압준위를 음원준위로 환산하기 위해 가상음원의 위치 및 개수에 따라 PORT, STBD, TWN 등 세 조건의 전달함수 계측시험을 수행하였다. 이 때, 입력신호의 영향을 살펴보기 위해 백색잡음과 LFM 신호를 각각 입력신호로 사용하였다. 총 5종의 전달함수를 정의한 후 전달함수 계측시험 결과를 분석하였다. 분석결과 백색잡음의 경우 5종의 전달함수 공히 유사한 결과를

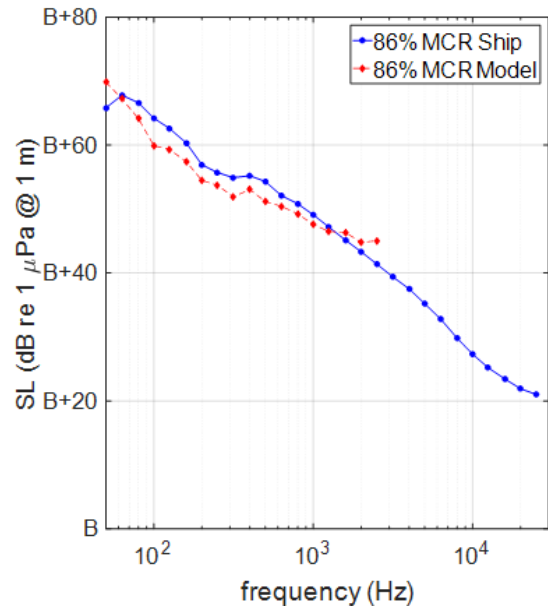


Fig. 7 Comparison between source levels of the 173K LNG carrier with twin propellers obtained from the full-scale measurement and the model test.

보임에 반해 LFM 신호는 상대적으로 전달함수 별 차이가 커졌음을 확인하였다. 이로부터 쌍축음원 전달함수 시험에서는 백색잡음이 입력신호로 적합하다고 판단되었다.

전달함수 계측시험과 유사하게 PORT, STBD, TWN 등 세 조건의 추진기 캐비테이션 소음 계측시험을 수행하였다. 시험의 유효성을 판단하기 위해 소음원 위치추정을 수행한 결과 각 조건에서 계측된 소음은 정확히 대상 소음원에서 발생하였음을 확인하였다. 세 종류의 쌍축선 추진기 음원준위 추정기법에 대해 분석을 수행한 결과 최대 1.1 dB의 차이가 발생하였고, 그 차이는 주로 적용된 전달함수 추정법의 차이에 기인한 것으로 판단되었다. 끝으로 모형시험 결과를 ITTC '87 모형선-실선 상관관계를 적용하여 실선스케일로 환산하였고, 실선계측 결과와 비교를 통해 본 모형시험 기법의 효용성을 확인하였다.

## 후기

본 연구는 산업통상자원부 산업융합원천기술개발사업 “선박 추진기 소음 기반기술 및 소음저감 설계 핵심기술 개발” 과제 (과제번호: 10045337)의 지원을 받아 수행되었습니다. 실선계측 데이터를 제공해 주신 한국해양과학기술원의 김봉채 박사님께 감사드립니다.

## References

Harrison, C.H. & Harrison, J.S., 1995. A simple



relationship between frequency and range averages for broadband sonar. *Journal of Acoustical Society of America*, 97(2), pp.1314–1317.

IMO MEPC.1/Circ.833., 2014. *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life*. IMO: London.

ISO 17208-1:2016(E), 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: Geneva.

ISO/DIS 20233-1:2016, 2016. *Ships and marine technology–Model test method for propeller cavitation noise evaluation in ship design–Part 1: Source level estimation*. ISO: Geneva.

ITTC Cavitation Committee., 1987. Final report and recommendations to the 18th ITTC. *18th International Towing Tank Conference*, Kobe, Japan, 1987.

ITTC–Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-01-05., 2017. *Model scale noise measurements*. ITTC: Kgs. Lyngby.

Lafeber, F.H. & Bosschers, J., 2016. Validation of computational and experimental prediction methods for the underwater radiated noise of a small research vessel. *13th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Copenhagen, Denmark, 4–8 September 2016.

Park, C.S. Kim, G.D. Moon, I.S. & Lee, D.K., 2015. Technical report on the possible regulation on the shipping noise and related technology development. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(3), pp.42–51.

Park, C.S. Kim, G.D. Park, Y.H. Lee, K. H. & Seong, W.J., 2016. Noise localization method for model tests in a large cavitation tunnel using hydrophone array. *Remote Sensing*, 8(3), pp.1–24.

Park, C.S. Kim, G.D. Park, Y.H. & Moon, I.S., 2017. *Development of fundamental technology for ship propeller noise and key technology for noise reduction design*. Deajeon: KRISO Report No. BSPNS2760–11138–6.

Park, J.S. & Seong, W.J., 2017. Experimental study on the effect of number of bubble occurrences on tip vortex cavitation noise scaling law. *Journal of Fluids Engineering*, 139(6), pp.1–15.

Ross, D., 1976. *Mechanics of underwater noise*. Pergamon Press, Inc: New York.

Seol, H.S. Paik, B.G. Park, Y.H. Kim, K.Y. Ahn, J.W. Park, C.S. Kim, G.D. & Kim, K.S., 2015. Propeller cavitation noise model test in KRISO large cavitation tunnel and its comparison with full-scale results, *4<sup>th</sup> International Conference on Advanced Model Measurement Technology for the Maritime Industry*, Istanbul, Turkey, 7–9 October 2015.

