

PRAIRIE 적용 함정의 공기 누출 조건에 따른 수중방사소음 특성 연구

A Study on Underwater Radiated Noise Characteristics of Naval Vessel with PRAIRIE According to Air Leakage Condition

문영선* · 이희창* · 최재용* · 김성용†

Youngsun Moon*, Heechang Lee*, Jae-Yong Choi* and Seong-Yong Kim†

(Received March 11, 2022 ; Revised May 12 2022 ; Accepted June 8, 2022)

Key Words : Underwater Radiated Noise(수중방사소음), Propeller Air Injection System(프로펠러 공기 분사 시스템), Cavitation(캐비테이션), Air Leakage(공기 누출)

ABSTRACT

Recently, a propeller air-induced emitting (PRAIRIE) system has been adopted for naval vessels to reduce propeller cavitation noise. However, air leakage occurs around the injection hole because of the low pressure around the propeller blade. To investigate the noise characteristics of air leakage, we measured underwater radiated noise during sea trials using a shut-off valve. Noise data were analyzed in terms of the band energy level and signal modulation. We found that the air leakage of the PRAIRIE system affects the characteristics of the underwater radiated noise.

1. 서 론

함정의 프로펠러 소음은 수중방사소음(URN, underwater radiated noise)에 기여하는 요소 중 하나이다. 프로펠러 소음은 비공동 소음과 공동(cavitation) 소음으로 구분되는데, 속력이 증가함에 따라 추진기 축 RPM(revolutions per minute)이 높아지면서 캐비테이션 소음이 지배적으로 발생한다. 캐비테이션은 고속으로 회전하는 프로펠러 블레이드 표면의 압력 감소에 의하여 해수가 기화되어 기포를 발생시키는 현상이다.⁽¹⁾ 발생한 기포는 성장 및 붕괴를 반복하면서 강한 충격성 소음이 광대역 주파수 성분을 갖고 발생하여 수중방사소음을 크게 증가시킨다. 따라서

캐비테이션의 발생 유무는 함의 음향 스텔스 성능에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 캐비테이션 소음 저감 기술 적용 및 발생 시점 식별을 통하여 지속적인 관리가 필요하다.

현재 캐비테이션 소음을 감소시키기 위하여 대부분의 전투함정 프로펠러에 PRAIRIE(propeller air induced emitting) 시스템을 갖추고 있다. 이는 캐비테이션 발생 시 프로펠러 앞날(leading edge)에서 공기를 분출하여 캐비테이션의 급격한 성장 및 붕괴를 지연시켜 소음을 저감하는 시스템이다. 따라서 PRAIRIE 시스템의 효과와 캐비테이션 소음 관리를 위하여 수중 청음기를 이용한 수중방사소음 측정 및 분석을 지속적으로 수행하고 있다. 최근에는 함 운용 중 캐비테이션 발생을 식별하기 위하여 선체하부에 가속도계

† Corresponding Author ; Member, Agency for Defense Development, Senior Researcher
E-mail : syongkim@add.re.kr

* Member, Agency for Defense Development, Researcher

‡ Recommended by Editor Seon Jun Jang
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

및 음향센서를 부착하거나 관측창을 설치하여 모니터링하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다^(2,3). 이 중 관측창을 이용한 시각적 모니터링 연구 수행 과정에서 프로펠러 앞날에 위치하고 있는 PRAIRIE 분출구를 통해 공기가 누출되는 현상이 발견되고 있다.

공기 자연 누출은 프로펠러가 회전할 때 감압면의 압력이 감소하면서 공기 배관을 따라 압력 구배가 형성되고, 프로펠러의 PRAIRIE 공기 구멍(air hole)으로 시스템 내의 공기가 분출되어 나타나는 현상이다. 함에 따라 시스템 내의 공기 잔류량 및 차단 밸브의 운용 조건이 다르기 때문에 누출량 차이가 발생할 수 있으나, 공기 누출 시 캐비테이션과 유사하게 프로펠러 주변에 기포를 생성시킬 것으로 예상된다. 이러한 현상은 캐비테이션과 같이 기포에 의한 소음으로 인하여 수중방사소음 특성을 변화시킬 것으로 판단되며, 함정들의 음향 스텔스 성능에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다. 따라서 공기 누출 원리를 파악하고, 누출 조건에 따른 시험을 통하여 수중방사소음 특성에 대한 고찰이 필요하다.

이 논문에서는 PRAIRIE 시스템에서의 공기 누출 원리에 대하여 유체역학 이론을 이용하여 기술하였으며, 실제 시험을 통하여 공기 누출로 인한 소음 특성을 캐비테이션 분석 방법을 이용하여 확인하고자 하였다. 또한 일부 함급에서 공기 자연 누출과 차단 상태로 조건을 나누어 속력에 따른 공기 누출 효과를 확인하기 위한 시험을 수행하고, 기존에 PRAIRIE를 적용하고 있는 함과의 비교를 통하여 경향성을 확인하였다. 이에 따라 2장에서 공기 누출 원리와 캐비테이션 분석 방법에 대한 이론적 배경 간단하게 기술하였다. 3장에서는 공기 누출에 따른 수중방사소음 시험 및 결과에 대한 설명, 4장은 결론으로 기술하였다.

2. 이론적 배경

2.1 공기 누출 발생 원리

공기 누출은 프로펠러 회전에 의한 감압면의 압력 감소로 인하여 배관에 압력 구배가 형성되어 나타나는 현상이다. 공기 배관 내부의 존재하는 유체에 대하여 비압축성, 비점성, 정상상태의 이상 유체라 가정한다면 베르누이 원리를 적용하여 설명할 수 있다. PRAIRIE 시스템의 간단한 모식도는 Fig. 1과 같이 표현 가능하다. PRAIRIE 구멍은 프로펠러 루트(root)

부터 앞날(leading edge)을 따라 끝단(tip)까지 존재하지만, 여기서는 프로펠러 끝단(tip)을 중점적으로 설명한다. 이 때 공기 압축기와 PRAIRIE 구멍에서의 베르누이 방정식은 식 (1)과 같다.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho_{air} v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho_{air} v_2^2 \quad (1)$$

$v_1 = 0$ 라고 가정하면 PRAIRIE 구멍의 유체 속도 v_2 는 식 (2)와 같다.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho_{air}}} \quad (2)$$

PRAIRIE 구멍의 전압을 p_{2T} , 프로펠러 끝단의 유체속도를 v_p , 해수의 밀도를 ρ_s 라고 하면 p_2 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_2 = p_{2T} - \frac{1}{2} \rho_s v_p^2 \quad (3)$$

따라서 v_p 가 증가할수록 p_2 는 감소하고 v_2 는 증가하게 된다. 이에 따라 PRAIRIE 구멍의 면적을 A 라고 하면, 공기배출유량 Q 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$Q = v_2 \times A = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_{2T} + \frac{1}{2} \rho_s v_p^2)}{\rho_{air}}} \times A \quad (4)$$

그러므로 프로펠러 RPM 증가함에 따라 PRAIRIE 구멍의 공기배출유량이 증가할 수 있고, 공기 배출량 변화에 따라 소음 특성이 달라질 수 있다.

2.2 캐비테이션 소음 분석 방법

프로펠러 공기 누출 현상은 캐비테이션과 유사할

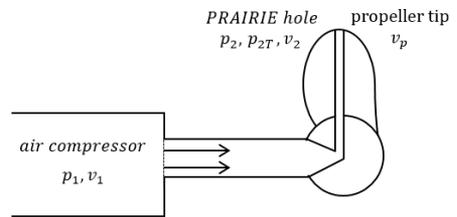


Fig. 1 Schematic drawing of air flow arrangement of the PRAIRIE system

것으로 예상되기 때문에 이 논문에서는 캐비테이션 소음 분석 방법을 활용하였다. 캐비테이션 분석 방법은 크게 3가지로 총 음압 준위(OASPL, overall sound pressure level), 1/3 옥타브 밴드 분석, DEMON(detection of envelope modulation on noise) 분석이 있다⁽⁴⁾. 캐비테이션은 기포의 급격한 성장과 붕괴가 지속되며 광대역 주파수 성분을 갖는 충격성 소음이 발생하여 특정 속력의 RPM에서 급격하게 총 음압 준위를 증가시킨다. 따라서 속력에 따른 총 음압 준위 변화량을 계산하여 캐비테이션 발생여부를 분석한다. 그리고 캐비테이션 발생 정도와 형태에 따라 주파수 대역에서의 차이가 발생하기 때문에⁽⁵⁾ 1/3 옥타브 밴드를 이용하여 주파수에 따른 소음 특성을 분석한다.

또한 캐비테이션으로 인한 충격성 소음이 프로펠러 회전에 의해 변조되어 진폭 변조를 일으키는데, 이를 식별하기 위해 DEMON 신호처리를 Fig. 2와 같이 수행한다.⁽⁶⁾ 먼저 계측한 소음 신호 $x(n)$ 을 대역 통과 필터(band-pass filter)를 적용하여 기포로 인한 음압 준위가 증가하는 주파수를 선택한다. 그 후 포락선 검출을 위하여 신호를 제곱(square)한 뒤, 저역 통과 필터(low-pass filter)를 이용하여 PSR(propeller shaft rate)과 BR(blade rate) 발생 주파수 대역에 대하여 처리한다. 이후 DC 신호를 제거하고 고속 푸리에 변환(FFT, fast fourier transform)과 정규화(normalization)를 수행하여 스펙트럼 $J(f)$ 를 얻을 수 있으며, PSR 및 BR 주파수에 대한 소음 발생여부를 식별할 수 있다.

이와 같은 특성들은 기포의 발생에 의한 소음이 원인이며, 공기 누출 현상도 이와 유사하게 기포를 발생시킨다. 따라서 캐비테이션 소음 분석 방법을 활용하여 공기 누출에 의한 수중방사소음 특성을 분석하는 것이 적절하다고 판단된다.

3. 시험 및 결과

3.1 시험 개요

시험 절차는 수중방사소음 측정 표준 ISO 17028-1⁽⁷⁾을 준용하여 수행하였다. 배경소음으로 인한 영향을 최소화하기 위해 과고 1 m 이하, 풍속 12 kts 이하, 수심 1000 m 이상의 기상 및 해양 환경 조건에서 측정하였다. 함정은 측정용 부이(buoy)와 일정한 CPA(closest point of approach) 거리로 통과하며 기동하였다. 측정용 센서는 B&K 8106 수중 청음기이며, ADC(analog to digital converter)는 65 kHz 샘플링 레이트(sampling rate)를 갖는 ADS 1672 아날로그 - 디지털 변환기이다. 부이의 위치 정보 저장 및 동기화를 위하여 GPS를 탑재하였다. 원음 데이터는 부이 및 함에 설치된 GPS 정보를 이용하여 부이와 함정 간의 거리와 함께 저장하여 분석에 활용하였다.

시험은 총 20척에 대하여 공기 자연 누출 상태로 수행하였으며, 한 가지 함급에 대해서는 누출되는 공기를 차단하여 시험을 수행하였다. 시험은 RPM을 증가시키며 속력별 수중방사소음을 측정하였으며, CPA 통과 전후의 일정 시간의 데이터를 사용하여 분석하였다. 소음 준위 측면에서는 1/3 옥타브 밴드 분석을 이용하여 주파수 특성을 분석하였다. 또한 특정 주파수 대역의 총 음압 준위를 통계적으로 처리하여 경향성을 확인하였다. 추가적으로 변조 신호 분석을 위해서 DEMON을 사용하여 분석하였다. 함정의 음향 징표 및 정보가 노출되는 것을 막기 위해 함속과 시험 결과 그래프의 가로축과 세로축 정보는 표기하지 않았다.

3.2 프로펠러 공기 자연누출/차단 시험 결과

먼저 A 함급에 대해서 공기 누출 차단과 자연 누

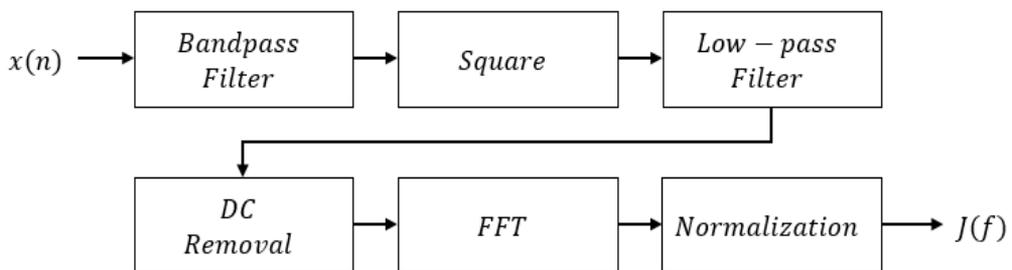


Fig. 2 Algorithm of DEMON processing

출 조건으로 나누어 시험을 수행하였다. Fig. 3부터 Fig. 6은 속력에 따른 1/3 옥타브 밴드 분석을 이용하여 공기 누출 상태에 따라 속력별로 비교한 결과이다. 자연 누출 상태에서 특정 주파수 이상의 고주파 대역의 소음 준위가 증가하였으며, 속력에 비례하여 변하는 것을 확인할 수 있다. 속력이 증가함에 따라 축 RPM이 증가하면서, 프로펠러 주위 압력이 낮아져 누출되는 공기량이 증가하는 것으로 추정된다. 반면에 저주파 대역에서는 기계류, 보기류 소음이 지배적이기 때문에 공기 누출에 대한 효과를 확인하기 어렵다. 이를 통해 누출되는 공기가 주로 고주파 대역에 영향을 미치는 것으로 추정할 수 있다. 저속 시험이었던 00-3 kts에서 전체 대역을 비교하였을 때 소음 준위 차이가 크지 않다. 고주파대역에서 공기 누출 상태의 소음 준위가 높지만, 이는 시험 당시 해상 환경에 의하여 발생할 수 있는 차이로 판단된다. 저속에서는 RPM이 고속보다 상대적으로 낮기 때문에 배관과 외부의 압력차가 크지 않아 공기 누출 발생량이 상대적으로 낮았을 것으로 추정된다. 이러한 현상은 프로펠러 캐비테이션 소음과 유사한 특성을 갖는데, 캐비테이션이 발생하지 않은 상태에서도 함정의 수중방사소

음을 증가시킬 것으로 예상된다.

해당 함급에서의 비교를 위하여 특정 주파수 대역에 대한 총 음압준위를 계산하여 Fig. 7과 같이 나타내었다. 해당 주파수 대역은 1/3 옥타브 밴드 분석 결과에서 공기 누출로 인하여 증가하였던 대역이 포함된 고주파 대역이다. A 함급에 대하여 4번의 시험을 수행하였으며, 누출 차단 상태와 자연 누출 상태로 나누어 속력에 따라 나타내었다. 각 결과의 편차를 분석하기 위하여 다항식 추세선과 68% 신뢰 예측 구간을 추정하여 통계적 분석을 수행하였다.

먼저 자연 누출 상태의 결과에 예측 구간을 벗어나는 값이 다수 존재하며 편차가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 동일한 함급에서도 함에 따라 공기 누출량에 차이가 발생하는 것으로 추정된다. 하지만 대체적으로 공기 차단 상태의 총 음압준위가 누출 상태보다 낮은 것을 확인할 수 있으며 중간 속력 구간에서 차이가 크게 발생한다. 저속에서는 유사한 소음 준위가 발생하는 것은 상대적으로 축 RPM이 낮기 때문에 공기 누출량이 적을 것으로 예상되며, 수중방사소음에 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다. 고속에서는 프로펠러 주위의 압력이 급격

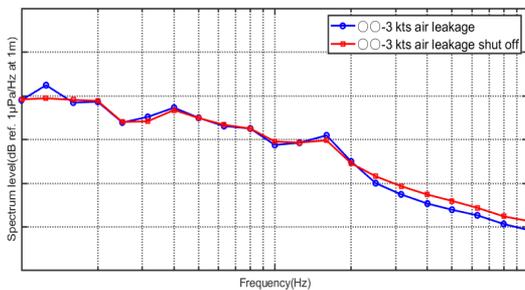


Fig. 3 1/3 octave band result of 00-3 kts

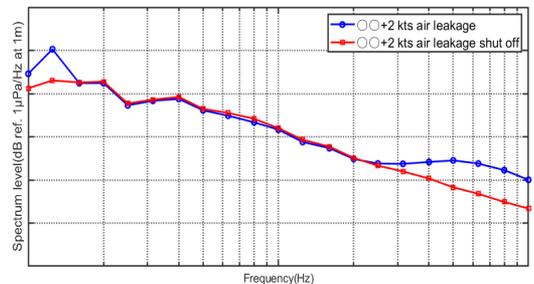


Fig. 5 1/3 octave band result of 00+2 kts

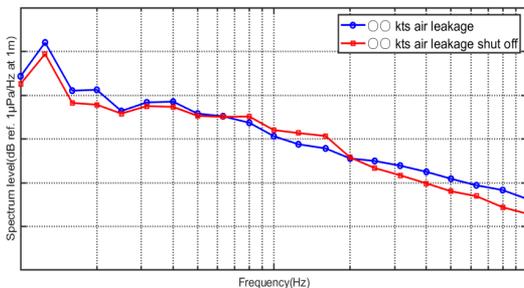


Fig. 4 1/3 octave band result of 00 kts

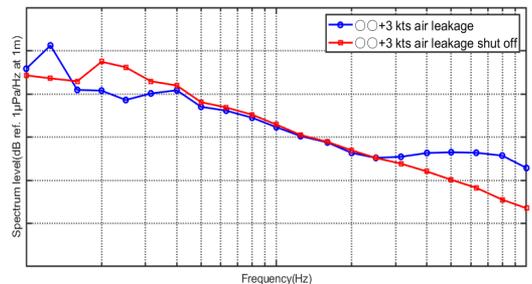


Fig. 6 1/3 octave band result of 00+3 kts

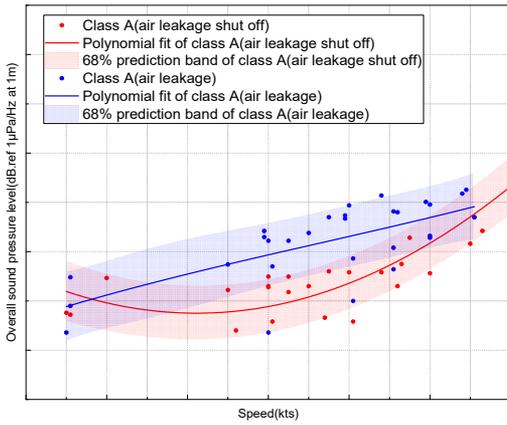


Fig. 7 Overall sound pressure level of class A according to air leakage condition

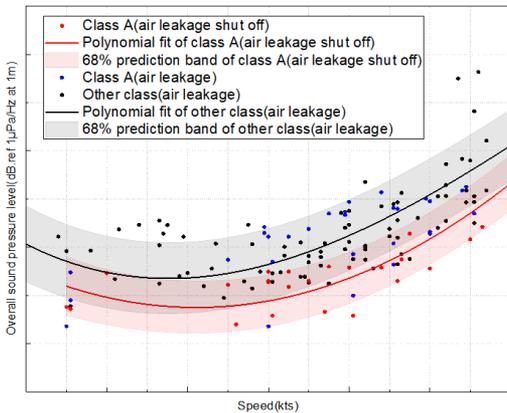


Fig. 8 Result of overall sound pressure level with other class

하게 낮아지며 캐비테이션이 발생할 수 있는 속력 구간이기 때문에 캐비테이션 소음으로 인하여 공기 누출에 대한 효과만을 확인하기는 어렵다. 그럼에도 불구하고 공기 차단 시 소음준위가 낮게 형성되어 있다.

Fig. 8은 다른 함급의 총 20척에 대하여 공기 자연 누출 상태로 시험한 결과를 포함시킨 그래프이다. 총 음압준위 수준이 A 함급의 자연 누출 상태와 유사하게 누출 차단 상태보다 높게 형성되는 것을 볼 수 있다. 마찬가지로 누출 상태에서의 소음준위 편차가 크게 발생하는 것으로 보아 누출량에 차이가 있는 것으로 추정된다. 하지만 현재 시스템에서는 누출되는 유량 및 유속을 정량적으로 계측할 수 없기 때문에 추후 연구에서 추가 시험을 통하여 검증이 필요하다.

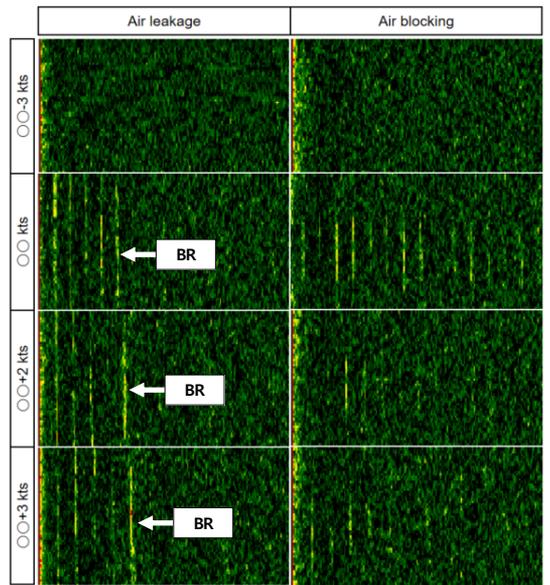


Fig. 9 DEMON result comparison by air leakage condition according to vessel speed

추가적으로 변조 신호 특성 확인을 위하여 Fig. 9와 같이 속력에 따른 DEMON(detection of envelope modulation on noise)분석을 총 음압준위를 계산하였던 주파수 대역에 대하여 수행하였다. 자연누출 상태에서는 PSR(propeller shaft rate)에 대한 주파수가 5차 성분인 BR(blade rate)까지 나타나며, 전체 시간에 걸쳐 식별된다. 누출된 공기에 의한 소음이 함정의 추진기 회전 성분과 변조되는 것으로 추정된다. 공기 차단 상태에서는 CPA 시간에서 PSR 조화성분이 나타나지만, 식별되는 시간이 자연 누출 상태보다 짧은 것을 확인할 수 있다. 하지만 추진기 변조 신호와는 특성이 다르기 때문에 기타 소음에 의한 성분으로 추정된다. 이를 통해 공기 누출이 추진기 회전 성분에 대한 변조 신호를 발생시킨다는 것을 추정할 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 PRAIRIE가 적용된 함정들에 대하여 공기 자연 누출의 소음 특성 변화를 확인하기 위한 시험을 수행하였다. 실제 기동하는 함정에서 공기 자연 누출 상태와 완전 차단 상태에 대하여 수중방사 소음을 각각 측정하였다. 1/3 옥타브 밴드 분석을 통하여 자연 누출에 의한 소음의 주파수 특성을 확인하

였으며, 특정 주파수 대역의 총 음압준위를 통계적으로 처리하여 분석하였다. 그 결과 누출되는 공기로 인하여 특정 주파수 대역의 소음 준위가 증가하는 경향성을 보였으나, 시험에 따라 편차가 크게 나타났다. 따라서 함에 따라 누출량에 차이가 있는 것으로 예상된다. 하지만 대체적으로 공기 누출 차단 상태에서 소음준위가 더 낮았으며, 추진기 회전 성분을 갖는 변조 신호를 발생시키는 경향성을 확인하였다.

하지만 현재 공기 누출 차단에 대한 시험 사례가 많지 않기 때문에 명확한 영향성을 확인하기 위한 추가 시험이 필요하다. 따라서 누출되는 공기량을 정량적으로 측정하고, 관측장 및 선체 하부 음향 시험과 연계하여 수중방사소음 특성 변화에 대한 연구가 필요하다.

References

(1) Seol, H. S., Lee, S., Pyo, S. and Suh, J. C., 2004, Numerical Analysis of Underwater Propeller Noise(Part 2. Cavitating Noise), Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 2, pp. 33~46.

(2) Ahn, J. W., Paik, B. G., Seol, H. S., Park, Y. H., Kim, G. D., Kim, K. S. et al., 2016, Comparative Study of Full-scale Propeller Cavitation Test and LCT Model Test for MR Tanker, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 53, No. 3, pp. 171~179.

(3) Kim, S. Y., Lee, H. C., Choi, J. Y. and Oh, J. S., 2017, Study on the Analysis of Cavitation Inception Speed using Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27,

No. 5, pp. 602~607.

(4) Lee, P. H., Ahn, B. G., Lee, C. S. and Lee, J. H., 2011, An Experimental Study on Noise Characteristics of Propeller Cavitation Inception, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 1, pp. 1~7.

(5) Gindroz, B. and Billet, M. L., 1998, Influence of the Nuclei on the Cavitation Inception for Different Types of Cavitation on Ship Propellers, Journal of Fluids Engineering, Vol. 120, No. 1, pp. 171~178.

(6) Nielsen, R. O., 1991, Sonar Signal Processing, Artech House, Boston.

(7) ISO 17208-1:2016, 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.



Youngsun Moon received his B.S. and M.S. in Aerospace Engineering from Chungnam National University in 2017 and 2019. He is currently a researcher at Agency for Defense Development, Korea.



Seong-Yong Kim received his B.S. and M.S. in Mechanical Engineering from Korea University in 2006 and 2008. He is currently a researcher at Agency for Defense Development, Korea.