

# 프로펠러 공기 분출 시스템 사용에 따른 캐비테이션 소음 특성 연구

## Study on Cavitation Noise Characteristics according to the Use of Propeller Air Injection System

문영선\* · 이희창\* · 강승희\* · 김성용†

Youngsun Moon\*, Hee-Chang Lee\*, Seung-Hee Kang\* and Seong-Yong Kim†

(Received October 7, 2021 ; Revised December 13, 2021 ; Accepted December 13, 2021)

**Key Words :** Propeller Air Injection System(프로펠러 공기분출 시스템), Underwater Radiated Noise(수중방사소음), Propeller Cavitation Noise(프로펠러 캐비테이션 소음), Naval Vessel(해군함정), Noise Reduction(소음 저감)

### ABSTRACT

Propeller cavitation contributes to underwater radiated noise (URN), which affects the probability of detection and survivability, especially for naval vessels. To reduce noise induced by propeller cavitation, several naval vessels have adopted the propeller air injection system. However, there are insufficient case studies on noise reduction; thus, it is necessary to verify the effect of this system on a full-scale ship. This study attempts to address this by measuring the URN during trials and analyzing the effect of the propeller air injection system based on the range of speed. As a result, we found that noise is reduced at specific frequency bands and the characteristics of the modulation signal are changed.

### 1. 서론

함정의 추진기 캐비테이션(cavitation)은 고속으로 회전하는 추진축 및 프로펠러 주변 유체의 상대 속도가 증가함에 따라 압력이 감소하여 임계 압력 이하로 낮아질 경우 기화가 발생하는 현상이다<sup>(1)</sup>. 발생한 기포들은 주위의 해수 압력으로 인해 압축 및 폭발이 지속되어 프로펠러 표면 등에 침식을 유발하고, 소음을 크게 발생시키는 것으로 알려져 있다<sup>(2,3)</sup>. 따라서 캐비테이션의 발생은 함정의 내구성뿐만 아니라 피탐

확률 및 생존성과 관련된 수중방사소음(URN, underwater radiated noise)에 영향을 미친다.

이러한 캐비테이션 현상은 주로 함정이 저속(축의 저회전)에서 고속(축의 고회전)으로 변화하는 과정에서 나타난다. 또한 저속에서도 낮은 피치율로 인한 캐비테이션이 발생하기도 한다. 캐비테이션으로 인하여 소음이 증가하면 자함 피탐 확률 증가뿐만 아니라, 저속에서 주로 운용하는 함정의 음탐 체계의 운용성 능력에도 영향을 미칠 수 있다.

현재 일부 함정에서는 캐비테이션으로 인한 함정의 성능 저하를 방지를 위해 프로펠러 끝단에서 공기

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

\* Member, Agency for Defense Development, Researcher

‡ Recommended by Editor Cheol Ung Cheong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

를 분출하는 시스템을 사용하고 있다<sup>(4)</sup>. Fig. 1과 같이 공기 분출 시스템은 가스터빈 압축기에서 발생한 공기를 냉각 및 감압시켜 프로펠러 날개 끝단에서 분사하는 장치이다. 분출된 공기는 캐비테이션 현상으로 발생된 기포의 압축-폭발 과정을 지연시키며 소음 억제, 선체진동 감소, 프로펠러 침식 방지와 같은 효과를 얻을 수 있다. 그러나 캐비테이션이 발생하는 프로펠러에서의 위치 및 형태에 따라 소음 특성이 달라지면서 시스템의 정확한 수치적 해석이 어렵다. 따라서 관련된 자료가 제한적이며, 실제 함정에서 반복적인 시험을 통해 소음 저감 효과의 검증이 필요하다.

이 논문에서는 함정의 운용속력 별 공기 분출 시스템을 사용했을 때 소음 특성 변화 경향성을 확인하고자 하였다. 이를 위해 3가지 함급에 대하여 고속에서 캐비테이션이 발생하였을 때 시험을 수행하고, 결과를 분석하였다. 또한 저속에서 캐비테이션이 발생하는 함정에 대하여 해당 시스템 적용 시 효과를 확인하였다. 2장에는 수중방사소음 분석 방법 및 특성 3장에서는 수중방사소음 측정 개요에 대하여 설명하였다. 4장에서는 고속기동과 저속기동으로 나누어 시험 결과를 기술하였으며, 5장은 결론이다.

## 2. 캐비테이션 분석 방법 및 특성

대부분의 함정에서 캐비테이션 발생 여부가 큰 관심사이며, 캐비테이션 발생 속도를 관리하기 위해 주기적으로 수중방사소음 측정 시험을 수행한다. 수중방사소음을 이용한 캐비테이션 분석은 1/3 옥타브 밴드 음압 준위, 전체 음압 준위(OASPL, overall sound pressure level)의 속도에 따른 변화와 특정 주파수 대역의 포락선을 검출하여 변조 신호를 식별할 수 있는 DEMON(detection of envelope modulation on noise)을 이용하여 분석한다<sup>(5)</sup>. 하지만 DEMON의 경우 전체 주파수 대역의 변조 특성을 한 번에 확인하

기 어렵기 때문에 순환정상성(cyclo-stationarity)을 이용하여 반송 주파수(carrier frequency)와 변조 주파수 특성을 전체 대역에서 분석하기도 한다<sup>(6)</sup>.

일반적으로 캐비테이션 발생 초기에는 Fig. 2와 같이 전체 소음 준위가 급격하게 증가하는 현상이 나타난다. DEMON 분석 결과에서는 Fig. 3과 같이 축의 회전 성분(PSR, propeller shaft rate)의 변조신호가 식별된다. 이후, 캐비테이션 발생 완전 성숙단계에서는 프로펠러 날개 개수에 따라 PSR의 배수로 날개 성분(BR, blade rate)이 변조되는 경향을 보인다. 마찬가지로 순환정상성 분석에서도 PSR과 BR이 Fig. 4와 같이 나타나며 반송 주파수 영역을 확인할 수 있다. 해당 결과에서는 PSR 및 BR이 전체 반송 주파수 대역에서 발생하고 있다. 이러한 현상들이 캐비테이션 발생 시 나타나는 일반적인 소음 특성이다. 이 논문에서는 이와 같은 분석 방법을 이용하여 캐비테이션이 발생하였을 때 공기 분출 시스템 사용 시 소음 특성 변화를 확인하였다.

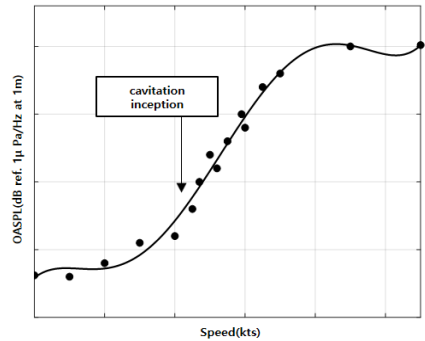


Fig. 2 OASPL of the fixed pitch propeller vessel

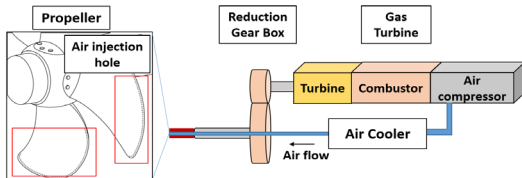


Fig. 1 Schematic drawing of the propeller air injection system

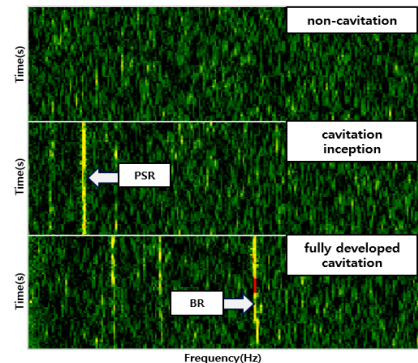


Fig. 3 DEMON spectrum of the propeller cavitation noise

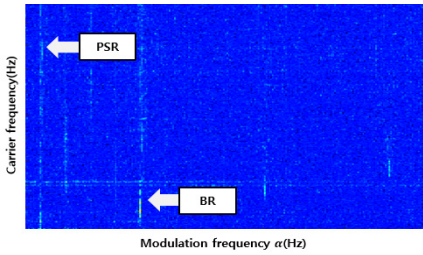


Fig. 4 Cyclo-stationary analysis of the propeller cavitation noise

### 3. 시험 개요

시험 절차는 함정 수중방사소음 측정 표준 ISO 17028-1<sup>(7)</sup>의 Grade B를 준용하였다. 기상으로 인한 배경 소음의 영향을 최소화하기 위해 파고 0.6 m 이하, 풍속 12 kts 이하, 수심 1000 m 이상의 해양 조건과 반경 10 mile 이내 통행 선박이 없을 때 시험을 진행하였다. 함정은 부이와 특정 CPA(closest point of approach) 거리를 직선으로 통과한다. 측정용 부이(buoy)에 탑재된 센서는 높은 수신 감도를 갖는 B&K사의 B&K 8106 하이드로폰이며, 일정한 수심 간격으로 설치되었다. DAQ는 65 kHz 샘플링레이트(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 함정간의 거리와 함께 저장하여 분석에 활용하였다.

시험은 3가지 함급에 대하여 캐비테이션이 발생하는 고속 기동 속력에서 공기 분출 시스템 사용 유무로 나누어 반복 측정하였다. 또한 저속 캐비테이션 발생 환경에서 공기분출 시스템의 효과를 확인하기 위해 속력별 소음특성 시험을 추가적으로 수행하였다.

### 4. 프로펠러 공기 분출 시험 결과

공기 분출 시스템 사용에 따른 소음 특성을 앞서 기술하였던 음압 준위와 변조 신호 특성 측면에서 비교하였다. 음압 준위 측면에서는 총 음압 준위와 1/3 옥타브 밴드에서 각 주파수의 음압 준위 변화를 분석하였고, 변조 신호 분석은 DEMON과 순환정상성을 이용하였다. 또한 음압 준위와 순환정상성은 함정과 수중 청음기 위치가 가장 가까운 최근접점(CPA, closet

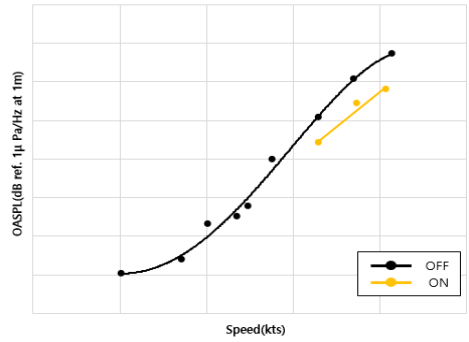


Fig. 5 OASPL with air injection system at high speed vessel

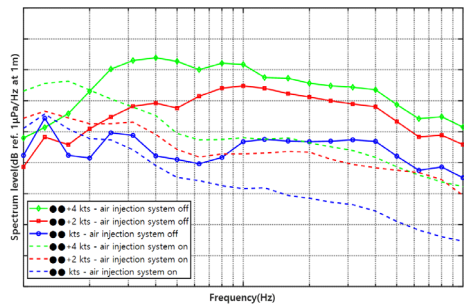


Fig. 6 1/3 Octave band level with air injection system

point of approach) 시점의 데이터를 사용하였다.

함정의 공기 분출 시스템 및 추진기 체원이 노출되는 것을 막기 위해 시험 항목의 함속 및 관련 정보와 함정의 음향 징표를 제공할 수 있기 때문에 가로축 및 세로축에 대한 정보는 표기하지 않았다.

#### 4.1 고속 기동 시험 결과

먼저 다수의 시험 함정들 중에서 특정 함정에 대한 시험 결과를 예시로 기술하였다. Fig. 5는 속력에 따른 전체 소음 준위에 대한 결과이다. 시스템 미운용 시 캐비테이션 발생으로 인하여 속도가 증가함에 따라 전체 소음 준위가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 캐비테이션이 발생하는 3개의 속력의 시험에서 공기 분출 시스템을 운용하였을 때 전체 소음준위가 5 dB 이상 감소하여 소음 감소 효과가 있음을 확인하였다.

Fig. 6은 각 속력에서의 1/3 옥타브 밴드 주파수 분석 결과이다. 실선 그래프는 공기 분출 시스템 미운용 시험모드이며 점선 그래프는 시스템을 운용한 시험모

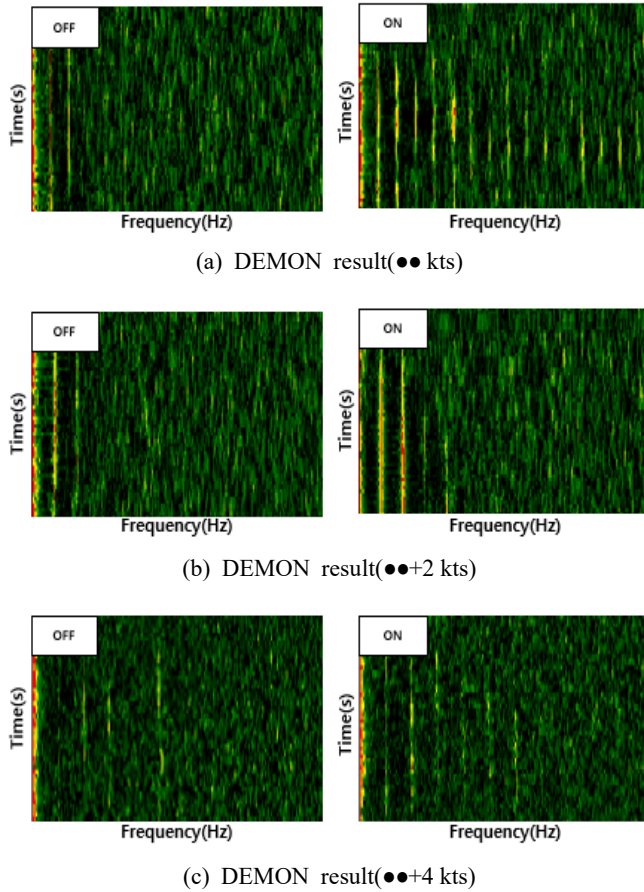


Fig. 7 DEMON result with vessel speed

드로 나타내었다. 시스템 미운용 모드에서는 ●● kts에서 캐비테이션이 발생하면서 생성되는 기포들에 의해 고주파 대역의 소음이 증가하는 것을 확인할 수 있다. ●●+2 kts로 속력이 증가함에 따라 캐비테이션이 성장하면서 저주파 대역을 제외한 주파수 대역에서의 소음이 증가하였으며, ●●+4 kts에서는 전체 주파수 대역의 소음이 증가하는데 캐비테이션 형태에 따라 기포의 크기 및 형태가 변화에 의하여 주파수에 따른 소음 특성 차이가 발생한다<sup>(8,9)</sup>.

시스템 운용 모드에서 주파수에 따른 소음 수준을 비교하였을 때 대부분의 주파수 대역에서 소음 저감 효과가 나타났으나, 대역에 따라 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 고주파 대역에서의 소음 저감 효과가 크게 나타나고 있다. ●●+2 kts, ●●+4 kts의 고주파 대역의 소음 준위가 ●● kts의 미운용 모드 수준으로 감소하였으며, 두 속력의 고주파대역 소음 수준이 유사하다.

하지만 함의 속력이 증가함에 따라 저주파 대역의 소음이 증가하였다. 이러한 현상은 각 속력에서 캐비테이션 생성 형태에 따라 프로펠러 앞전에서 분출되는 공기 방울이 캐비테이션 거동에 미치는 영향이 다르기 때문에<sup>(10)</sup> 저주파 대역의 소음이 증가하며, 주파수 대역별 소음 특성 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 DEMON 분석 결과이다. x축은 변조 주파수, y축은 시간이며, 시간이 흐름에 따라 측정함은 측정 시스템에 접근하여 거리가 감소하고 CPA를 통과한 후 멀어지는 데이터 전체의 결과를 나타내었다. Fig. 7(a,b)는 공기분출 시스템을 미운용 모드에서 PSR 성분이 변조되어 나타나고 있으며, Fig. 7(c)에서는 BR 성분도 식별되고 있다. 3가지 속도구간에서의 공기 분출 시스템을 운용하였을 때 변조 특성은 CPA에서 PSR의 조화 성분이 나타난 후 거리가 멀어짐에 따라 사라지는 특징을 갖고 있다. CPA에서는 분출되

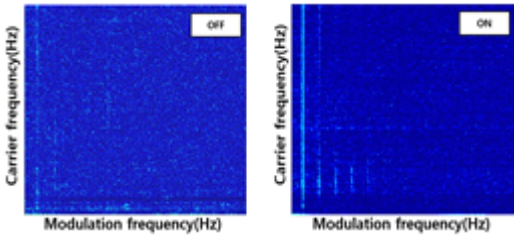


Fig. 8 Cyclo-stationarity result at ●● kts

Table 1 Statistics of sound pressure level with air injection system

Class	Statistics value	○○ Hz	◇◇ Hz	△△ Hz	□□ Hz	No. of trials
A	$\mu_A$	-1.3 dB	3.5 dB	3.6 dB	5.3 dB	7
	$\sigma_A$	2.9 dB	1.3 dB	0.9 dB	0.8 dB	
B	$\mu_B$	-3.6 dB	2.1 dB	1.0 dB	7.4 dB	5
	$\sigma_B$	0.9 dB	3.6 dB	4.8 dB	4.7 dB	
C	$\mu_C$	-3.7 dB	6.1 dB	6.2 dB	5.6 dB	8
	$\sigma_C$	2.8 dB	4.1 dB	3.8 dB	2.8 dB	

는 공기가 캐비테이션이 발생했을 때와 유사한 현상을 만들어 캐비테이션 양을 늘리기 때문에 PSR 신호를 더 강하게 하는 것으로 판단된다. 추가로 측정된 시험들에서도 위와 동일한 현상이 나타나는 것을 확인했다. Fig. 8은 CPA에서 변조신호 특성을 전체 주파수 대역에서 분석하기 위해 순환정상성 분석을 수행한 결과이다. x축은 변조 주파수이며, y축은 반송 주파수를 나타낸다. 시스템을 미 운용하였을 때는 PSR 성분이 전체 대역에서 나타나고 시스템을 운용하였을 때는 PSR 성분이 강해진다. 또한 Fig. 6 결과에서 저주파 소음이 증가하였는데, Fig. 8의 시스템 운용 모드에서도 반송 주파수의 저주파대역에서도 조화 성분이 식별되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 공기 분출 시스템의 소음 저감 효과의 경향성 확인을 위해 3가지 함급 대하여 고속에서 총 20회를 측정하였으며, 1/3 옥타브값 중 4개 중심 주파수를 각 대역에서 선정하였다. ○○ Hz는 공기 분출 시스템 운용에 따라 증가하였던 저주파수 대역이다. ◇◇ Hz는 캐비테이션이 성숙 단계에서 증가하는 주파수 대역, △△ Hz와 □□ Hz는 캐비테이션 초생 단계에서 증가하는 주파수 대역으로 판단되어 선정하였다. 각 주파수에서 시스템 운용 시 함급별 소음 감소 수준을 평균

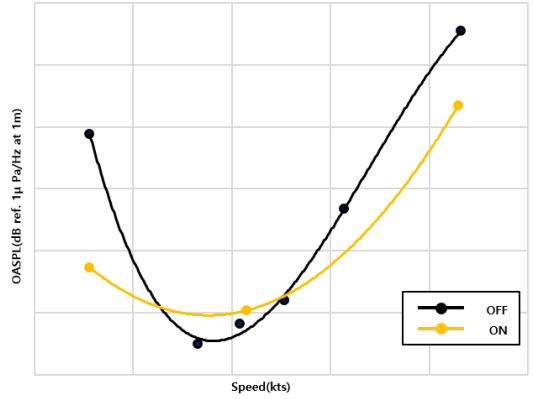


Fig. 9 OASPL variation result with air injection system at low speed

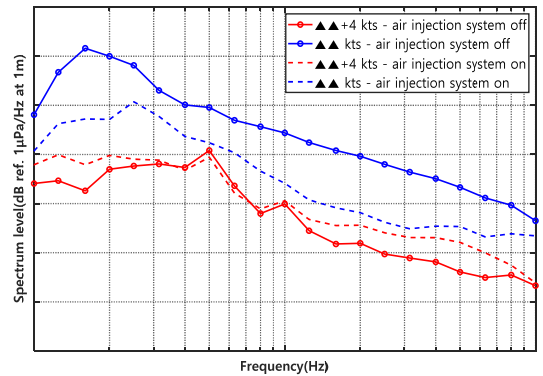


Fig. 10 1/3 octave band level with air injection system at low speed

( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )로 결과를 나타내었다. 평균값이 양의 값일 때는 시스템 운용 모드에서 소음 준위가 감소한 것이고, 음의 값은 증가한 것이다. 모든 함급에서 저주파대역인 ○○ Hz에서는 평균적으로 소음 준위가 증가하였으며, 다른 대역에서는 소음 준위가 감소한 것을 확인할 수 있다. 가장 주파수 대역이 높은 □□ Hz 대역에서 효과가 크게 나타났으나, 이하 주파수 대역에서는 함급에 따라 소음 감소 수준에서 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. A, B 함급의 경우 주파수가 낮아질수록 소음 저감 효과가 감소하지만, C 함급의 경우 소음 감소 수준이 유사한 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 함급에 따라 캐비테이션 발생 형태, 프로펠러 형상 및 유동 환경, 공기분출구의 위치와 유량에서 차이가 나기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

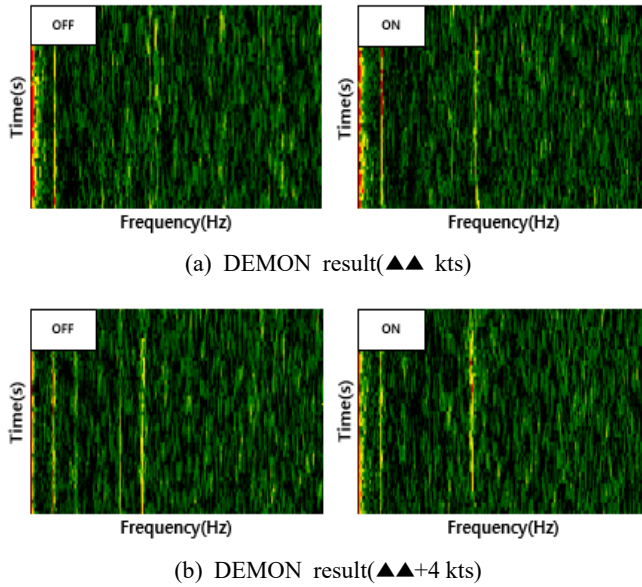


Fig. 11 DEMON result at low speed

#### 4.2 저속 기동 시험 결과

이 절에서는 저속 캐비테이션이 발생하는 상황에서 시험을 수행하였으며, 고속을 제외한 2개의 낮은 속력에서의 시험 결과를 분석하였다.

Fig. 9는 저속 캐비테이션이 발생하는 함정의 속력에 따른 전체 소음 준위 변화 그래프이다. 낮은 속력에서의 소음 준위가 Fig. 2와 다르게 높게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 공기 분출 시스템 운용 모드 저속에서 소음 감소 효과가 크게 나타나지만, 캐비테이션이 간헐적으로 발생하는 것으로 추정되는 중간 속력 구간에서는 소음준위가 증가하였다.

Fig. 10의 ▲▲ kts 결과에서는 고속 기동 시 고주파 대역이 증가하였던 것과 다르게 전체 주파수 대역의 소음준위가 높게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 CPP(controllable pitch propeller)를 사용하는 함정에서 주로 발생한다. 함정의 경우 저속에서 고 RPM(축 회전), 저 피치율을 사용하게 되면서 유동 입사각이 변화하여 흡입면 뿐만 아니라 압력면에서도 캐비테이션이 발생할 수 있다. 이 때 캐비테이션 양이 증가하면서 ▲▲ kts의 소음 특성처럼 나타난다. 따라서 캐비테이션 소음이 전체 대역에 걸쳐 발생하기 때문에 저주파 대역에서도 공기 분출에 의한 소음 저감 효과가 나타난 것으로 판단된다.

▲▲+4 kts에서는 저주파와 고주파 대역의 소음 준위

가 증가하였다. 해당 속력에서는 캐비테이션이 간헐적으로 발생하는 구간이기 때문에 공기 분출로 인하여 저주파와 고주파대역 소음 준위가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 11은 저속 구간에서의 DEMON 결과이다. 4.1장의 고속 기동 결과와 동일하게 ▲▲ kts와 ▲▲+4 kts 모두 시스템 운용 모드에서 PSR 성분이 강해지지만, 조화성분이 식별되지는 않았다. 하지만 BR 신호가 지속적으로 식별되는 것을 확인할 수 있다.

이를 통해 실제 공기 분출 시스템을 사용하였을 때 주파수에 따른 소음 준위와 변조 신호 특성의 변화를 속력별로 확인하였다. 하지만 저속 캐비테이션에 해당 시스템을 적용한 시험 표본이 부족하므로 추가적인 연구가 필요하다.

### 5. 결 론

이 논문은 프로펠러 공기 분출 시스템을 이용하였을 때 캐비테이션 소음 특성 변화를 확인하기 위한 시험을 수행하였다. 실제 해상 시험을 통해 기동하는 함정에서 캐비테이션이 발생하였을 때 공기 분출 시스템 운용, 미운용 상태의 수중방사소음을 측정하였다. 측정된 데이터를 특정 주파수 대역에서 총 음압 수준, 1/3 옥타브 소음 준위, DEMON, 순환정상성 분석을 수행하였다. 총 음압 수준을 비교하였을 때

소음 저감 효과를 확인하였다. 주파수대역 따라서는 대부분의 주파수 대역에서 소음 감소 효과가 나타났으나, 저주파 대역에서는 소음 준위가 증가하였다. 또한 변조 신호 특성은 기본 주파수 성분이 강해졌으며, CPA 근처에서 조화성분이 나타나는 특성을 확인하였다. 순환정상성 분석 결과 저주파 대역의 소음이 조화성분을 발생시키는 것으로 판단된다. 추가적으로 저속에서 캐비테이션이 발생하였을 때 공기 분출 시스템을 적용하여 소음 저감 효과를 확인하였으며, 캐비테이션이 발생하지 않는 속력에서는 소음이 증가하는 것으로 판단된다. 속력별 공기 분출 시스템의 소음 저감 효과를 확인하였다.

향후 추가적인 시험을 통해 공기 분출시스템의 효과적인 사용에 관한 연구를 수행할 예정이다.

### References

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

(2) Kim, J. D., Hong, S. Y. and Song, J. H., 2011, Prediction of Marine Propeller Noise Considering Scattering Effect, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 5, pp. 468-474.

(3) Kim, S. H., Cheong, C. U., Park, W. G. and Seol, H. S., 2016, Numerical Investigation of Cavitation Flow Around Hydrofoil and Its Flow Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 2, pp. 141-147.

(4) Spence, J. H., 2007, A Summary of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sounds from Oil and Gas Industry Activities, OCEANS, pp. 1-15.

(5) 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.

(6) Lee, H. C., 2017, Study on Classification of Modulated Noise Sources in a Naval Vessel Using

Cyclo-stationarity, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 790-797.

(7) ISO 17208-1:2016, Underwater Acoustics : Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships.

(8) Plesset, M. S., 1949, Dynamics of Cavitation Bubbles, Journal of Applied of Mechanics, Vol. 16, No. 3, pp. 277-282.

(9) Lecoffre, Y., 1999, Cavitation: Bubble Trackers, A.A. Balkema, Rotterdam.

(10) Seol, H. S. and Jeong, H. S., 2021, Study on the Cavitation and Noise Characteristics by Air Injection in Three Dimensional Hydrofoil, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 40, No. 1, pp. 38-45.



**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.



**Hee-Chang Lee** received his B.S. and M.S. in Electronics Engineering from Kyungpook National University in 2012 and 2014. He is currently a researcher at Agency for Defense Development, Korea.



**Seung-Hee Kang** received her B.S. and M.S. in Mechanical Engineering from Changwon National University in 2012 and 2014. She 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.