

# 음향스텔스 성능 향상을 위한 PRAIRIE 공기 분사량 제어 실험

이희창<sup>\*,1)</sup> · 문영선<sup>1)</sup> · 강승희<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 해양기술연구원

## Tests on Ventilation Control of PRAIRIE for Improving Acoustic Stealth Performance

Heechang Lee<sup>\*,1)</sup> · Youngsun Moon<sup>1)</sup> · Seunghee Kang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 29 June 2020 / Revised 22 September 2020 / Accepted 25 September 2020)

### Abstract

PRAIRIE(Propeller Air Induced Emission) system is a kind of underwater radiated noise suppression systems to reduce the probability of the identification or classification of our warship's acoustic signature by an enemy ship. It is effective in case of strong cavitation events. This is because air bubbles emitted from the PRAIRIE system mitigate drastic collapses of the cavity bubbles that can generate an intense shock wave. However, when the PRAIRIE system is operated in a non or weak cavitation condition, it might increase the total level of underwater radiated noise and induce the acoustic signatures. Therefore, this paper presents the trial results on ventilation control of PRAIRIE to find a more efficient operation depend on the cavitation condition. Then, we show a variation of the amplitude modulation characteristics according to ventilation control.

Key Words : Cavitation Noise(공동소음), PRAIRIE System(프라이어리스시스템), Acoustic Stealth(음향스텔스)

### 1. 서론

PRAIRIE(Propeller Air Induced Emission) 시스템은 함정 내 가스터빈 공기압축기에서 생성된 고압공기를 프로펠러 축계 내부에 위치한 관을 통하여 프로펠러 날개 앞날(leading edge)과 끝단(tip) 근처로 보낸 후, 미세한 공기분사구를 통해 프로펠러 외부로 공기방울

을 분출시키는 시스템이다<sup>[1]</sup>.

회전하는 프로펠러 날개 주위에 공동(cavity)이 발생할 경우 PRAIRIE 시스템에서 분출된 공기방울은 캐비테이션 소음 억제, 선체진동 감소, 프로펠러 침식 방지 등의 효과를 얻을 수 있다<sup>[2]</sup>. 그러나 캐비테이션 발생위치 및 형태에 따라 발생하는 캐비테이션 소음 특성이 크게 변함으로 인해 동일 클래스 함정에서도 PRAIRIE 시스템의 효과가 일정하지 않으며, PRAIRIE 시스템 작동 환경 하에서 공동의 발생 및 성숙에 대한 정확한 물리적 해석이 어렵기 때문에 함정 건조

\* Corresponding author, E-mail: icaruswings@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

후 인수단계에서 반복적인 시운전을 통해 그 효과를 검증하는 방법을 적용할 수밖에 없는 실정이다. 또한 캐비테이션 초생 속도(CIS, Cavitation Inception Speed) 이전 단계 또는 캐비테이션 초기단계(weak cavitation)에서 PRAIRIE 시스템을 사용할 경우 프로펠러 날개 끝단에서 분출되는 공기방울이 광대역 소음을 발생시켜 오히려 수중방사 소음준위 전체를 증가시킬 위험이 있다. 이로 인해 실제 함정 운용 시에는 캐비테이션 성숙단계에서만 제한적으로 PRAIRIE 시스템이 활용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 별도의 PRAIRIE 시스템 수정없이 PRAIRIE 공기 분사량만을 조절하여 캐비테이션 성숙 단계에서 PRAIRIE 작동으로 인한 소음 감소 효과를 증가시킬 뿐만 아니라, 캐비테이션 초기단계에서도 PRAIRIE 시스템에서 분출되는 공기량을 줄임으로 광대역 소음 증가를 완화시킴과 동시에 캐비테이션 소음 감소에 효과를 얻고자 하였다. 이 논문은 2장에서 캐비테이션 소음 측정을 위한 시험구성 및 시험환경을 간단히 살펴본 후 3장에서는 PRAIRIE 공기 분사량 조절 시에 캐비테이션 소음 특성 변화를 확인하였다. 그 후 4장에서는 결론을 기술하였다.

## 2. 시험 개요

함정의 캐비테이션 소음 측정실험 및 분석절차는 ISO 17208-1 standard<sup>[3]</sup> 내의 Grade B를 준용하였으며, 소음간섭을 최소화하기 위하여 반경 10 mile 내 통행 선박이 없으며, 파고 0.6 m 이하, 풍속 12 knot 이하, 수심 1000 m 이상의 해상조건에서 실험을 진행하였다. 실 해상환경에서 캐비테이션 소음 측정을 위해 사용된 장비는 Fig. 1과 같으며, 캐비테이션 초기단계에서 발생하는 미세한 변동까지도 비교할 수 있도록 높은 수신감도의 하이드로폰과 높은 이득을 가지는 진치증폭기를 연결하여 사용하였다. 또한 높은 분해능을 가지는 ADC(Analog Digital Converter) 장비를 사용하여 양자화 오차를 최소화하였으며, 소형 원자클럭을 이용하여 주파수 정밀도를 높였다<sup>[4]</sup>.

PRAIRIE 공기 분사량 제어 실험 전 캐비테이션 초생 속도 및 초기단계를 판별하기 위하여 1 knot 단위의 단계별 증속시험을 추가적으로 수행하여 해당 함정의 CIS를 음향학적으로 추정<sup>[5]</sup>하였다. 그 후 캐비테이션 초기단계로 추정되는 3개 속도에서 PRAIRIE 운용

및 미운영 상태로 나누어 PRAIRIE의 작동에 따른 효과를 확인하였으며, PRAIRIE 운용 상태에서도 공기 분사량에 따라 4단계(30 %, 50 %, 70 %, 100 %)로 나누어 실험을 수행하였다. 본 논문에서는 실험결과 중 소음감소 효과가 크지 않았던 PRAIRIE 운용(30 % 분사) 및 PRAIRIE 운용(50 % 분사) 항목을 제외한 PRAIRIE 미운영, PRAIRIE 운용(100 % 분사), PRAIRIE 운용(70 % 분사) 항목에 대해서 PRAIRIE 공기 분사량이 음향스텔스에 미치는 영향을 정리하였다.

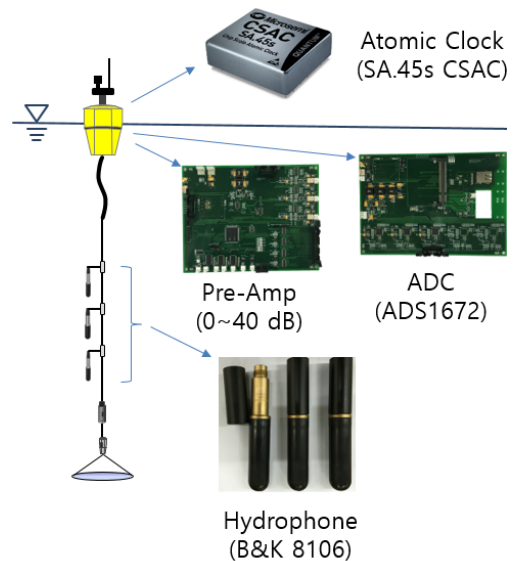
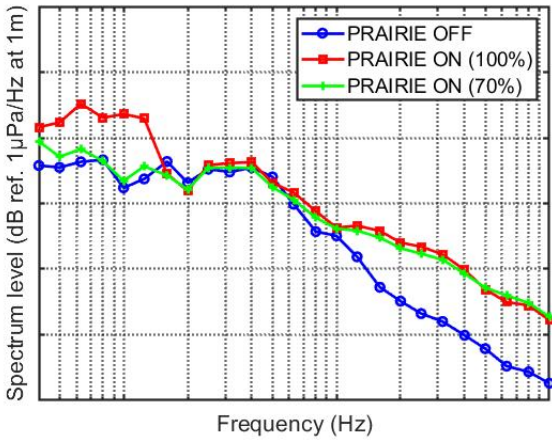


Fig. 1. Cavitation noise measurement system

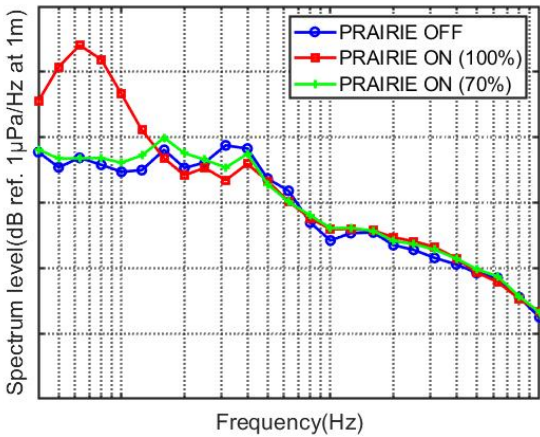
## 3. PRAIRIE 공기 분사량 제어 실험 결과

PRAIRIE 공기 분사량 제어에 따른 음향스텔스 성능 비교는 소음준위 및 변조성분 측면에서 성능 비교를 진행하였다. 이때 해당 함정의 PRAIRIE 시스템 제원이 노출되는 것을 막기 위하여 시험항목의 정확한 함속, 유량 및 압력 관련 정보는 기재하지 않고 상대적인 값만을 기재하였다. 또한 실험 결과 그래프에서도 가로축 및 세로축 정보는 함정의 음향징표를 제공할 수 있으므로 제외하였다.

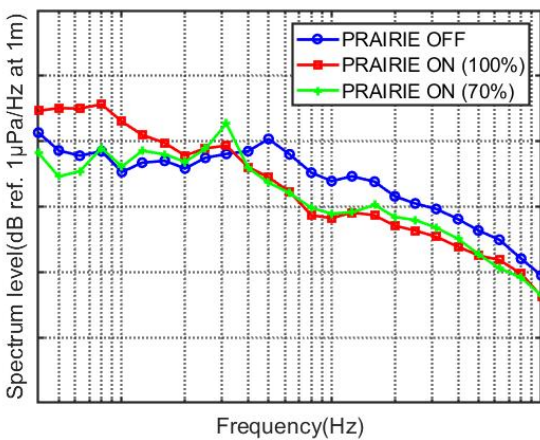
먼저, PRAIRIE 공기 분사량이 함정의 소음준위에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 2와 같이 개별 속력구간에서 1/3 옥타브 그래프를 나타내보았다. 여기서 가로축은 1/3 옥타브 대역, 세로축은 해당 대역



(a) 1/3 Octave(○○ knot)



(b) 1/3 Octave(○○+3 knot)



(c) 1/3 Octave(○○+5 knot)

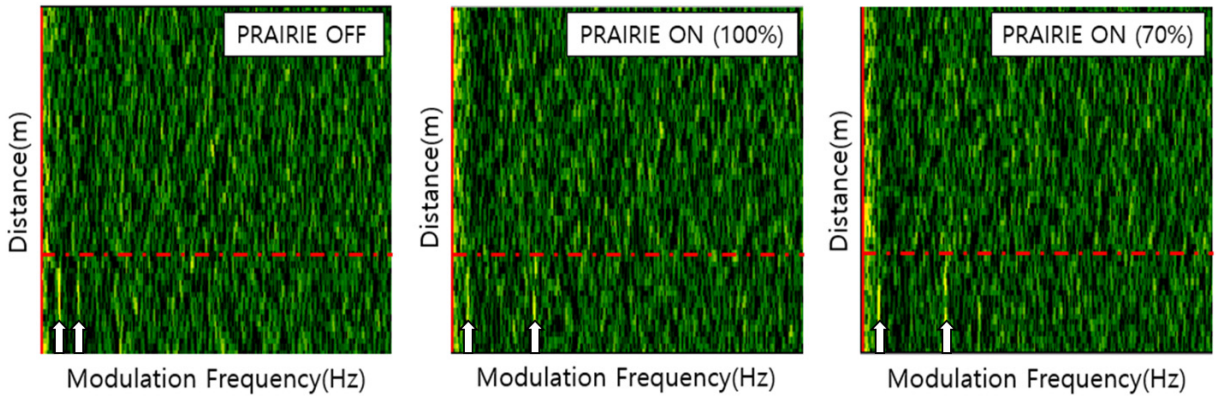
Fig. 2. Noise level according to the ship speed

의 소음준위를 나타낸다. 그리고 y축의 한 눈금의 크기는 10 dB이다.

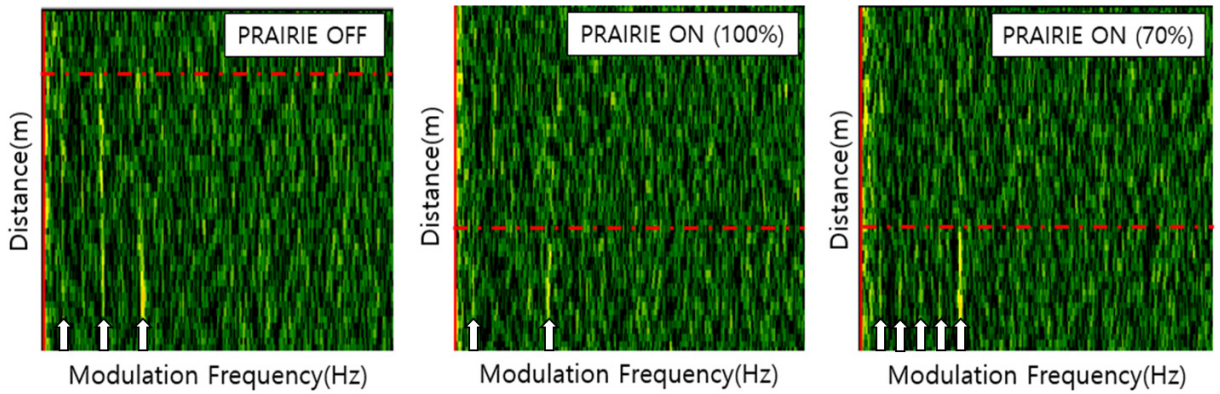
Fig. 2 (a)는 증속시험을 통해 추정된 CIS(○○ knot)에서의 1/3 옥타브 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 PRAIRIE 운용 상태에 비해서 PRAIRIE 미운용 상태의 소음준위가 전체적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 CIS 구간에서는 공동이 간헐적으로 발생하기 시작하는 단계이므로 캐비테이션이 전체 함정소음에 미치는 영향은 작은 반면 PRAIRIE를 통해 분출되는 공기방울의 영향은 상대적으로 크기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다<sup>6)</sup>. 그리고 PRAIRIE 동작 상태에서 공기를 그대로 내보내어 운용할 경우(100 % 분사)와 기준과 달리 공기 분사량을 줄여서 운용할 경우(70 % 분사)를 비교해보면 저주파수 대역에서 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2 (b)는 CIS에서 3 knot 증가된 시점에서의 1/3 옥타브 그래프를 나타낸다. 이 시점에서도 ○○ knot와 같이 저주파수 대역에서는 PRAIRIE 운용(100 % 분사)시에 PRAIRIE 미운용보다 소음준위가 높게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 PRAIRIE 미운용 경우, 고주파수 소음준위가 크게 증가하여 PRAIRIE 운용 상태의 소음준위와 거의 동일한 수준으로 나타난다. 이는 일반적으로 캐비테이션 초기단계에서 발생하는 공동은 평균적으로 크기가 작아 저주파수 대역보다는 고주파수 대역의 소음증가에 영향을 많이 미치기 때문에 추정된다<sup>7)</sup>.

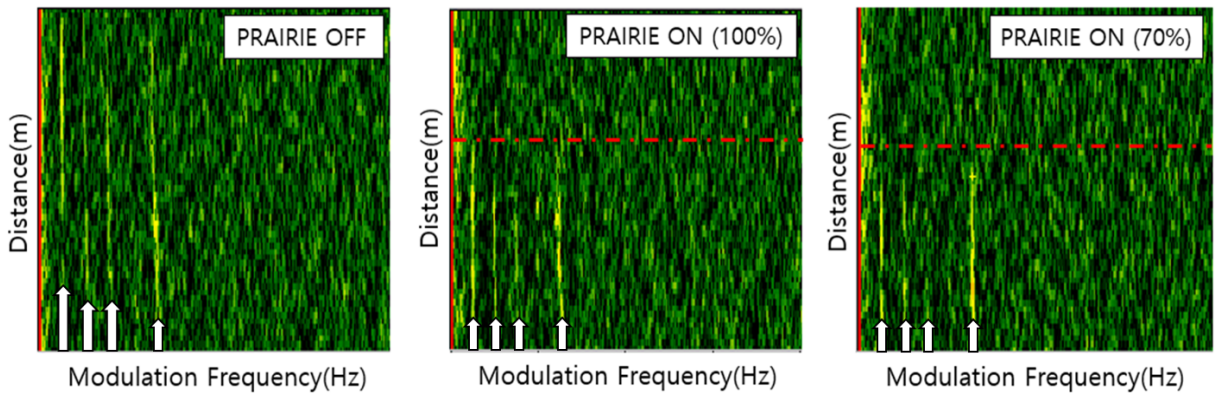
CIS에서 5 knot 증가된 속도 구간에서의 1/3 옥타브 그래프는 Fig. 2 (c)와 같다. 이 그래프에서는 PRAIRIE 미운용 경우보다 PRAIRIE 운용 상태에서 고주파수 대역의 소음준위가 더 낮다는 것을 확인할 수 있다. 다만 PRAIRIE 동작 상태에서 공기를 그대로 내보내어 운용할 경우(100 % 분사)에는 Fig. 2 (a), (b)의 결과와 동일하게 저주파수 대역의 소음준위가 상당히 높게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 반면 공기 분사량을 줄여서 운용할 경우(70 % 분사)에는 저주파수 대역의 소음준위 증가없이 고주파수 대역의 소음 감소 효과를 얻을 수 있었다. 즉, PRAIRIE 동작 상태에서 공기 분사량을 잘 제어하여 최적의 공기 분사량을 찾을 수 있다면 기존 PRAIRIE 운용방식에 비해 더 낮은 속도구간에 사용할 수 있을 뿐만 아니라 소음 감소효과도 크게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



(a) DEMON signal processing(00 knot)



(b) DEMON signal processing(00+3 knot)



(c) DEMON signal processing(00+5 knot)

Fig. 3. Results of DEMON signal processing according to the ship speed and ventilation control (00, 00+3, 00+5 knot, High-frequency band)

PRAIRIE 공기 분사량이 변조성분 발생에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig.3과 같이 데몬 신호처리 기법(DEMON, Detection of Envelope Modulation on Noise)<sup>[8]</sup>을 활용하였다. 데몬 신호처리 기법은 특정 주파수 대역 내에 존재하는 포락선을 검출하여 진폭변조 전의 원신호 주파수 특성을 추정하기 위한 알고리즘으로써, 수동소나체계에서 표적 탐지 및 식별을 위해 주로 사용되나 함정 캐비테이션 발생 여부 판단에도 최근 활발히 활용되고 있다<sup>[9]</sup>. Fig. 3에서는 데몬 신호처리 수행 시에 캐비테이션 변조성분 검출을 위해 고주파수 대역만을 선정하였으며, 변조성분 식별을 향상시키기 위하여 정규화 단계에서 OTA(Order Truncate Average) 기법을 적용하였다.

먼저, CIS 속도 구간에서의 데몬 신호처리 결과 그래프는 Fig. 3 (a)과 같다. 위 그래프에서 확인할 수 있듯이 PRAIRIE 운용 상태에 상관없이 화살표로 표기된 추진기의 날개 통과 주파수(BPF, Blade Passage Frequency) 성분들은 양측 모두에서 발생하고 있다<sup>[10]</sup>. 다만 PRAIRIE 운용 상태에 따라 발생하는 날개 통과 주파수의 조화성분 차수는 조금씩 다르게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 함정과의 거리에 따른 변조성분 발생 여부를 확인해보면 3항목 모두 유사한 거리에서 날개 통과 주파수 성분들이 사라지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3 (b)는 CIS에서 3 knot 증가된 시점에서의 데몬 신호처리 결과 그래프이다. 이 속도구간에서는 PRAIRIE 운용 상태와 PRAIRIE 미운용 상태 결과 그래프가 차이를 보이기 시작하는데, 특히 날개 통과 주

파수 성분들이 식별되는 거리에서 큰 격차를 보인다. PRAIRIE 미운용 상태에서는 이전 CIS 속도구간보다 날개 통과 주파수 식별 거리가 2배 이상 증가한 거에 비하여 PRAIRIE 운용 상태에서는 이전 CIS 속도구간에서의 결과와 큰 차이를 보이지 않는다. 결과적으로 이 속도구간에서 PRAIRIE 공기 분사량을 약 70 %로 조정한다면 소음준위 증가없이 변조성분이 전파되는 거리를 줄일 수 있을 것으로 판단된다<sup>[11]</sup>.

CIS에서 5 knot 증가된 시점의 데몬 신호처리 결과는 Fig. 3 (c)와 같다. 이 속도구간에서는 이전 속도구간에 비해 날개 통과 주파수 성분 식별거리가 전체적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3 (b) 그래프 결과와 유사하게 PRAIRIE 미운용 상태에서는 PRAIRIE 운용 상태에 비해 날개 통과 주파수 성분의 식별거리가 더 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 PRAIRIE 공기 분사량 제어에 따른 변조성분 변화는 미미하였으며 날개 통과 주파수 성분 식별거리 또한 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 4는 CIS에서 5 knot 증가된 시점에서 저주파수 대역을 선정하여 데몬 신호처리를 수행한 결과이다. 아래 그래프에서 확인할 수 있듯이 PRAIRIE 운용(100% 분사) 시에 날개 통과 주파수 성분의 식별거리가 가장 크게 나타나는데 이 결과는 Fig. 3 (c) 그래프와는 상반되나 Fig. 2 (c) 그래프의 저주파수 특성 결과와 일치한다. 즉 저주파수 대역과 고주파수 대역의 변조성분 특성을 함께 고려했을 때, PRAIRIE 공기 분사량을 약 70 %로 운용할 경우가 음향스텔스 성능면에서 가장 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

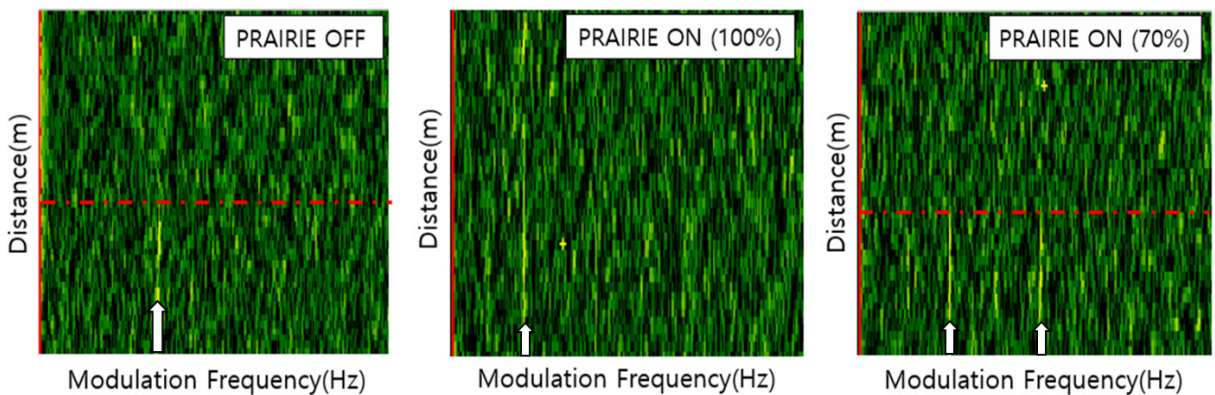
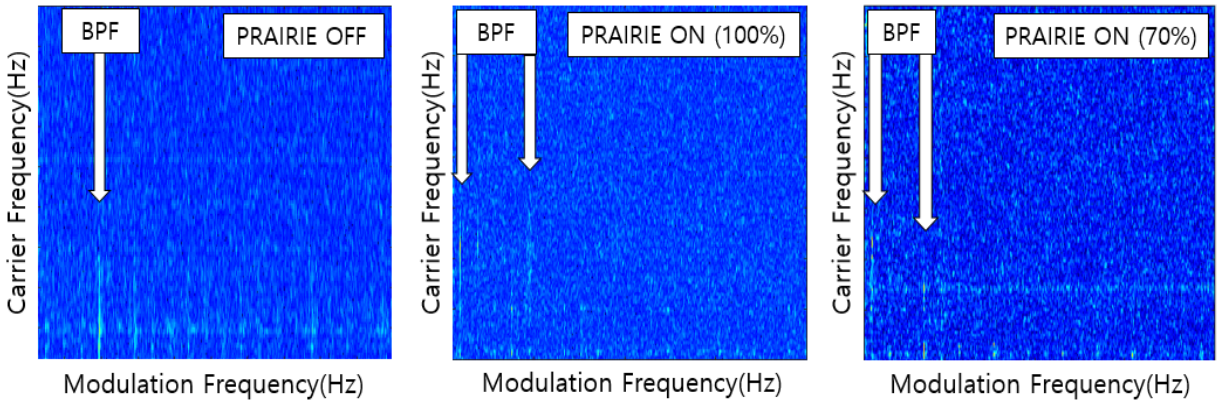
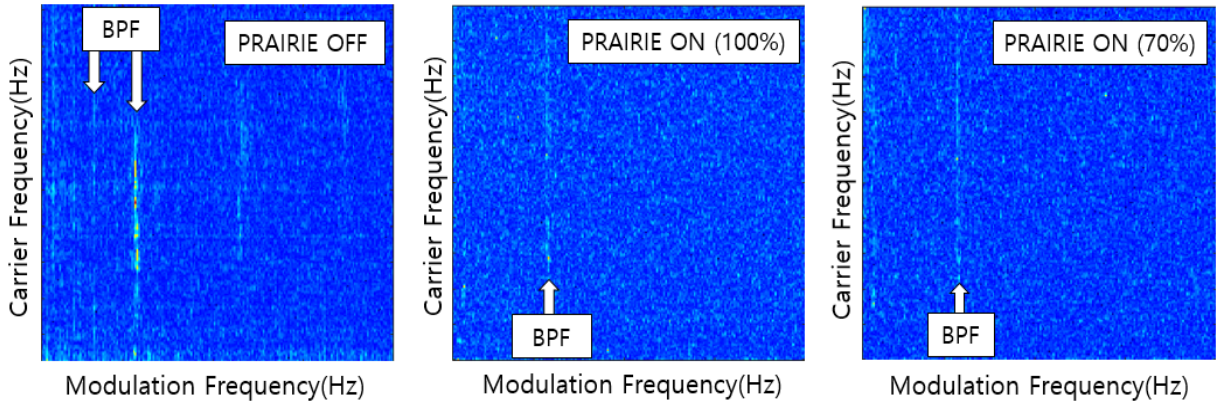


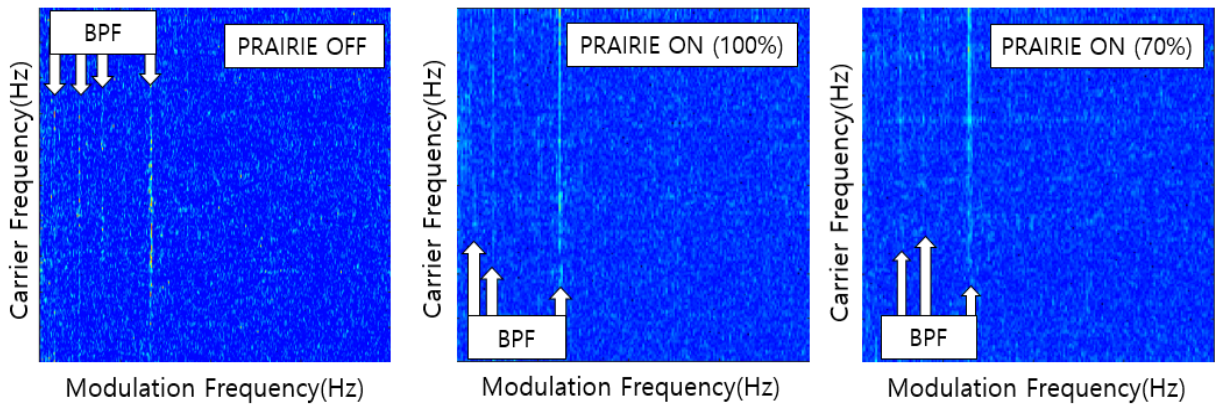
Fig. 4. Results of DEMON signal processing according to ventilation control (○+5 knot, Low-frequency band)



(a) Cyclostationary analysis(00 knot)



(b) Cyclostationary analysis(00+3 knot)



(c) Cyclostationary analysis(00+5 knot)

Fig. 5. Results of Cyclostationary analysis according to the ship speed and ventilation control

마지막으로 Fig. 5는 PRAIRIE 공기 분출량에 따른 순환정상성 분석<sup>[12]</sup> 결과를 나타낸다. 가로축이 변조 성분, 세로축이 거리를 나타내는 데몬 신호처리와 달리 순환정상성 분석은 가로축이 변조 성분, 세로축이 반송과 주파수(carrier frequency) 대역을 나타낸다. 따라서 순환정상성 분석 결과를 이용하면 변조 성분이 어떤 주파수 대역에서 진폭 변조되었는지를 한 번에 확인할 수 있다. Fig. 5 (a)에서는 변조 성분이 약하게 확인이 되어 PRAIRIE 운용조건에 따른 반송과 주파수 특성 차이를 확인하기 어려우나, Fig. 5 (b), (c)의 결과에서는 PRAIRIE 운용 상태와 PRAIRIE 미운용 상태에 따른 차이를 확연하게 확인할 수 있다. 이를 통해 실제로 PRAIRIE에서 분출된 공기가 캐비테이션의 주파수 특성을 어떻게 변경시키는지에 대해 알 수 있었으며 어떤 대역이 강하게 발생하는지, 어떤 대역이 약하게 발생하는지 추정할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문은 PRAIRIE 공기 분사량이 캐비테이션 소음에 미치는 영향을 확인하기 위하여 실제 해상에서 실험을 수행하였다. 그 후 측정데이터를 1/3 옥타브, 데몬 신호처리, 순환정상성 분석을 통하여 정리하였고, 그 결과 PRAIRIE 공기 분사량을 잘 조정한다면 음향스텔스 성능 향상을 얻을 수 있다는 것을 증명하였다. 향후 이 실험결과를 바탕으로 PRAIRIE 최적 공기 분사량 도출에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### References

- [1] J. H. Spence, "A Summary of Existing and Future Potential Treatments for Reducing Underwater Sounds from Oil and Gas Industry Activities," OCEANS 2007, pp. 1-15, 2007.
- [2] A. D. Waite, "Sonar for Practising Engineers," Wiley, 2002.
- [3] ISO 17208-1:2016, Underwater Acoustics : Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships.
- [4] Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 646-652, 2019.
- [5] M. A. Hosien, S. M. Selim, "Acoustic Detection of Cavitation Inception," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 10, No. 1, pp. 31-40, 2017.
- [6] C. M. Plumb, A. M. Kendrick, "Surface Ship Noise Reduction," Journal of Naval Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 377-383, 1981.
- [7] Y. Lecoffre, "Cavitation: Bubble Trackers," CRC Press, 1999.
- [8] M. Cheong, S. Hwang, S. Lee and J. Kim, "Multiband Enhancement for DEMON Processing Algorithms," Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 32, No. 2, pp. 138-146, 2013.
- [9] H. Lee, T. Kim, K. Son and P. Lee, "Cavitation Noise Detection Method using Continuous Wavelet Transform and DEMON Signal Processing," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 20, No. 4, pp. 505-513, 2017.
- [10] J. Lim, W. Hong and Y. Pyeon, "Hidden Period Estimation in the Broad Band Propeller Noise Using Auto-Correlation and Filter-Bank Structure," Journal of Korea Information and Communications Society, Vol. 39B, No. 8, pp. 538-543, 2014.
- [11] J. Kim, S. Hwang and C. Lee, "A DEMON Processing Robust to Interference of Tonals," Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 31, No. 6, pp. 384-390, 2012.
- [12] A. Napolitano, "Cyclostationary Processes and Time Series: Theory, Applications, and Generalizations," Elsevier Science & Technology, 2019.