



Received: 2023/01/22
Revised: 2023/02/03
Accepted: 2023/03/02
Published: 2023/03/31

***Corresponding Author:**

Sang Gu Lee

Tel: +82-55-549-1918

E-mail: god239@mnd.go.kr

수중음향 스텔스 성능 향상을 위한 공기분사장치 최적 운용 방안 연구

A Study on the Optimal Operation of the PRAIRIE System for the Improvement of Underwater Acoustic Stealth Performance

이상구^{1*}, 서종혁², 이제동³, 이재영⁴, 김지형⁵, 정현규⁶

¹해군군수사령부 함정기술연구소 소음진동선임연구원

²해군군수사령부 함정기술연구소 기관연구과장

³해군군수사령부 함정기술연구소 연구소장

⁴해군군수사령부 함정기술연구소 밸런싱연구원

⁵해군군수사령부 함정기술연구소 기관성능선임연구원

⁶해군군수사령부 함정기술연구소 추진기/감속기연구원

Sang Gu Lee^{1*}, Jong Hyeok Seo², Je Dong Lee³, Jae Young Lee⁴, Ji Hyung Kim⁵, Hyun Kyoo Jung⁶

¹Noise & Vibration Senior Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

²Command, ROK Navy/Chief of Engineering Research Department, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

³Director of Engineering Research Department, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

⁴Balancing Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

⁵Engine Performance Senior Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

⁶Propeller/Reduction Gear Researcher, Naval Technology Research Institute, Naval Logistics Command

Abstract

현재 운용 중인 선박의 추진기에는 선박의 수중음향 스텔스 성능 향상을 위해 PRAIRIE system을 적용하고 있다. 하지만, PRAIRIE system에 대한 공기분사량 조절과 수중방사소음에 미치는 기여도 분석 등의 운용성 측면에서 최적화 연구는 미흡한 수준이다. 이에, 본 논문에서는 실적함 수중방사소음 측정 결과 분석을 통해 효율적인 PRAIRIE system 운용 방안과 수중방사소음 최적화를 위한 추가 연구방향을 제시하였다.

Currently, the PRAIRIE System is applied to the propeller of the naval ship in operation to improve the underwater acoustic stealth performance of the naval ship. However, optimization research is insufficient in terms of operability, such as controlling the amount of air injection into the PRAIRIE System and analyzing the contribution to underwater radiation noise. Therefore, in this paper, an efficient PRAIRIE system operation plan and additional research directions for optimizing underwater radiation noise were presented through analysis of the results of underwater radiation noise measurement.

Keywords

추진기공기분사장치(PRAIRIE System), 수중방사소음(Underwater Radiated Noise), 추진기(Propeller), 공동(Cavitation), 공동초생속력(CIS), 소음차폐공기분사장치(Masker Air System), 역체크밸브(Reverse Check Valve)

1. 서론

수중음향스텔스 성능은 생존성 강화를 위한 함정의 중요한 성능 중의 하나로 지속적인 기술발전이 필요한 분야이다. 최근 건조되는 함정에서는 수중방사소음 감소를 위한 신기술 적용 및 저소음 함형상 개발 등의 연구가 진행 중이며, 주(主) 추진시스템의 소음저감기술 또한 지속적인 발전을 이루고 있다. 운용 중인 최신함정 중에는 기계식과 전기식 추진시스템을 복합적으로 운용할 수 있는 hybrid 추진방식을 적용하면서 엔진에 대한 수중방사소음을 통제하고 있다. 하지만 전기추진을 적용하면서 엔진 및 감속기 소음은 감소하였으나, Fig. 1에

나타낸 바와 같이 보기류 장비의 경우, 1986년 제정된 미국 해군 기준을 한국 해군에서는 현재까지 동일하게 적용되는 관계로 여전히 수중방사소음 감소를 위한 노력은 필요하다.

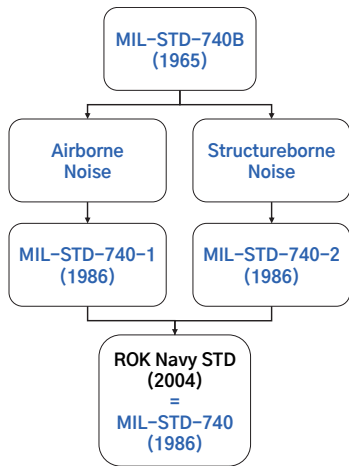


Fig. 1. 함정 설계/건조 기준의 배경

선진 해군의 경우, 개별장비들의 일괄적인 소음통제를 위해 공기분사방식을 적용하고 있으며, 이는 선체의 판의 기관실 구역에 설치하여 탑재장비의 소음통제를 목적으로 하는 masker air system(MAS)과 propeller (추진기)에서 발생하는 cavitation noise(공동소음) 통제를 위한 PRAIRIE(propeller air induced emission) system(PAS)으로 나눌 수 있다. 이 중에서 한국 해군은 PRAIRIE system만 적용 중이나, 현재까지 system 운용을 위한 최적화된 지침이 정립되지 않아 그 효과가 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 PAS의 특성과 확화에 발표된 국방과학연구소의 수중방사소음 실험 논문[1]을 토대로 PAS의 수중음향 특성과 최적 운용성을 위한 발전 방향을 연구하였다.

2. 수중방사소음 특성

수중방사소음에 기여하는 소음원별 사양에 따라 영향을 미치는 지배주파수 또한 차이가 발생한다. 펌프나 압축기와 같은 보기류 장비는 1,800 rpm으로 구동하는 모터가 동력원이므로 장비의 구성요소에 따른 order(차수) 성분을 감안해도 약 400 Hz 이하 주파수에서 영향을 미친다. 그러나, 엔진 또는 감속기어와 같은 주 추진장비의 경우 회전수(rpm)가 매우 높거나 실린더의 개수 및 많은 수의 기어 치차를 감안할 때 저주파

수 대역보다는 1 kHz 이하의 중주파수 영역에서 기여도가 높은 특성을 가진다. 마지막으로 propeller의 경우, 공동소음의 영향이 높으므로 CIS(cavitation inception speed, 캐비테이션 초생 속도) 수준에 따라 대잠작전 속도까지 영향을 미친다. CIS 이전의 propeller 소음은 약 1.5 dB/kts - 2 dB/kts 수준으로 증가하나, CIS 이후에는 약 3.5 dB/kts 이상의 소음 증가가 발생한다. Cavitation은 진공버블로 구성되며, 그 크기가 매우 작아서 1 kHz 이상의 고주파수 대역에 강한 영향을 미친다. 주파수 대역별 소음원 지배주파수 분포는 Fig. 2에 나타났다.

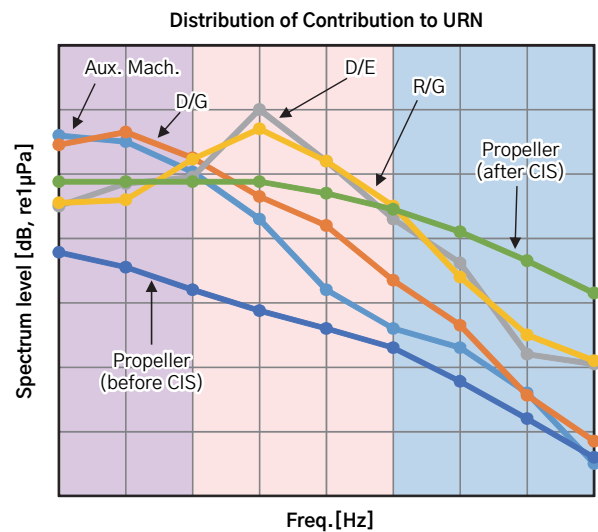


Fig. 2. 소음원별 수중방사소음 기여도 예

Cavitation 성장 수준에 따라 고주파수에서 저주파수 대역으로 지배주파수가 낮아져 기존에는 전 주파수 대역에 영향을 미치는 특성을 가지며, 그 수준은 최대 25 dB 이상의 수중방사소음 증가를 가져오기도 한다[2]. 함속에 따른 propeller cavitation의 영향은 Fig. 3에 나타났다.

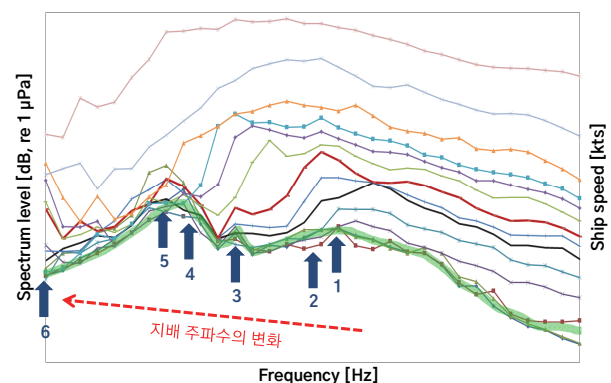


Fig. 3. 함속별 propeller cavitation 분포 예

최신함정의 경우, 수중방사소음 감소를 목적으로 기계식 엔진을 전기식 추진전동기(propulsion motor)로 변경하고 있다. 하지만 Fig. 2에서 알 수 있듯이 1 kHz 이하 중주파수 대역의 소음감소는 기대할 수 있으나, 보기류 장비가 주성분인 저주파수 및 propeller의 1 kHz 이상 고주파수 대역의 소음은 여전히 개선이 어려울 것으로 예상된다.

3. PRAIRIE system 특성

공기분사를 이용한 수중방사소음의 대표적 저감기술에는 MAS와 PAS가 있으며, 본 논문에서는 이들 두 가지 시스템을 통칭하여 masked system이라 하였다. Masked system은 함정 수중음향 신호의 인지 또는 식별을 방지하기 위해 설치된다. 타 해군에서는 공기버블로 인한 음향 임피던스(ρc) 불일치(acoustic impedance mismatch)를 이용해 소음 차폐 성능을 유도하는 MAS를 기관구역의 장비 소음 차폐장치로 적용하고 propeller cavitation 소음은 PAS로 통제하고 있다. 본 장에서는 한국 해군에서 적용 중인 PAS에 대한 작동원리 및 설치 등 일반적인 특성을 기술하였다.

3.1 기본 원리

PAS의 주요 목적은 propeller cavitation에 의한 소음 증가 최소화 및 발생 억제이다. 회전하는 propeller blade 뒷전(trailing edge)의 압력은 주변 해수의 증기압(vapor pressure, 2,340 Pa)보다 더 낮아져 임계점이 하가 된 액체가 기화되거나 물속 기체들이 압력이 낮은 곳으로 모여들어 수증기 기포가 형성된다. 이러한 기포는 propeller blade의 저기압 영역에서 벗어나면 바로 물속에서 붕괴되어 큰 소리로 폭발(cavitation noise)하며, 그 소음은 원거리까지 전달된다[3]. 그러나 propeller blade 끝단부의 앞전(leading edge)에서 공기가 방출(PRAIRIE)되면 cavitation 기포 내부에 약간의 공기가 존재하여 수증기 내 기포를 완전히 닫지 못하므로 cavitation에 의한 추가 소음은 거의 발생하지 않는다. 또한 cavitation은 해수의 낮아진 증기압으로 인한 액체의 기화 현상이므로 G/T에서 발생된 압축공기를 propeller로 보내기 전에 PRAIRIE를 냉각(PRAIRIE air cooler)시켜 기화 현상을 억제하며, 시스템의 개략도는 Fig. 4와 같이 나타났다. 이와 유사한 공기분사장치로는 영국 해군(Royal Navy)의 아고티(Agouti) 시스템이 있다[4].

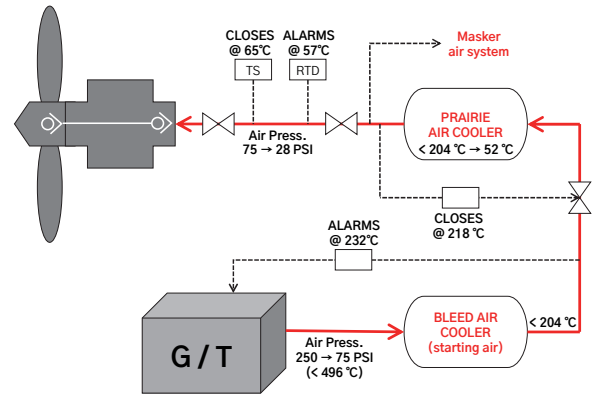


Fig. 4. 타 해군 공기분사장치 적용 예

3.2 함정 설치

가스터빈(G/T) 압축기에서 PRAIRIE air cooler를 통해 냉각된 공기는 감속기어 O.D(oil distribution) box로 전달하기 전에 공기압력을 약 75 PSI에서 약 28 PSI로 감압하여 함정 propeller blade 끝단부의 작은 hole로 배출된다[5]. 한국 해군에서 운용 중인 PAS 시스템의 운용 메커니즘을 파악하기 위하여 유사 실적함정 중 DOO Class의 PAS 배관 계통도를 Fig. 5에 나타냈다.

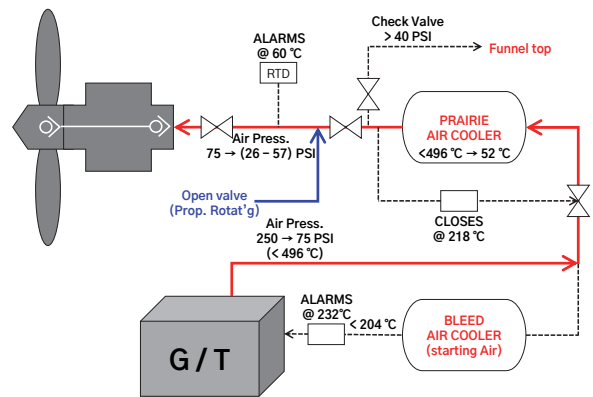


Fig. 5. DOO Class 공기분사장치 적용 예

DOO Class의 PAS 배관 배치는 G/T → PRAIRIE air cooler → 감속기어(R/G)로 공기를 이동시키며, 이는 미국 해군 개념인 2차 직렬 냉각(bleed air cooler → PRAIRIE air cooler)과는 다소 차이가 발생하며, 최종 감속기어단으로 전달되는 공기 냉각 수준을 유사한 조건으로 만들기 위해 한국 해군의 PRAIRIE air cooler 용량 대형화 및 냉각 효율성에서는 다소 불리할 가능성이 있다. 그리고 PRAIRIE air cooler와 R/G 사이에 propeller 회전시 항상 개방하는 valve가 설치되어 있다. 이는 propeller 회전시 발생하는 음압(-)으로 인한 추

진축(중공축) 내부 배관 보호를 목적으로 하는 safety 관점의 by-pass 개념을 가지고 있어서, 함을 운항할 때 실제 PAS가 작동하지 않더라도 항상 소량의 공기는 배출된다.

4. 수중방사소음 분석

4.1 시험결과 검토

PAS가 수중방사소음에 미치는 영향 및 특성을 분석하기 위해서는 실선 시험결과가 필요하므로, 최근 국방과학연구소(ADD)에서 발표한 논문 시험결과를 인용하였으며, 이를 Figs. 6-8에 나타냈다[1].

논문에 따르면, Figs. 6-8에 나타낸 것과 같이 PAS를 작동함에 따라 일정 함속별 소음수준이 증감하는 특성을 보인다. 특히 Fig. 7에 나타낸 CIS +3 kts의 2 kHz 이상 주파수 대역을 비교하면 함속이 낮은 Fig. 7에서는 PAS의 영향이 크며, 함속이 증가하는 Fig. 8은 PAS off 조건의 소음이 크다는 것을 알 수 있다. 또한, PAS 공기분사량에 따라 함속과 무관하게 저주파 대역에 영향을 미치며, 이는 공기분사량 70 %를 초과할 경우 저주파수 대역 소음이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 다시 말

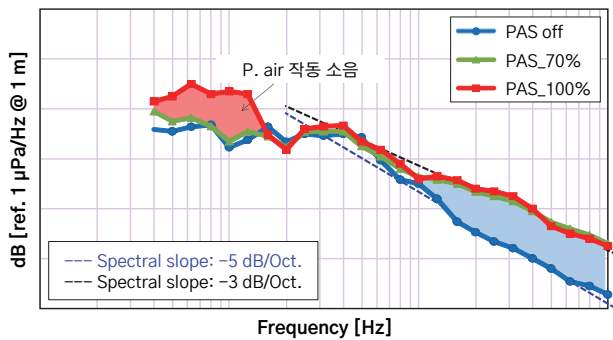


Fig. 6. 함속별 수중방사소음 수준(CIS kts)

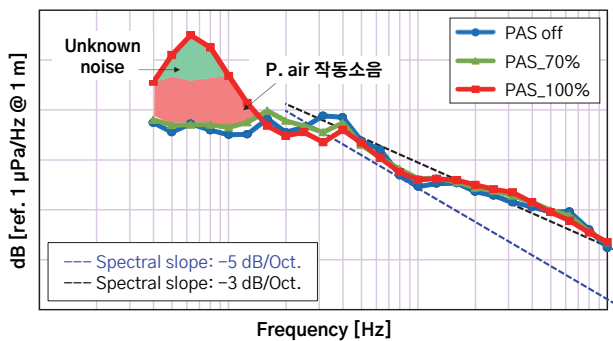


Fig. 7. 함속별 수중방사소음 수준(CIS + 3 kts)

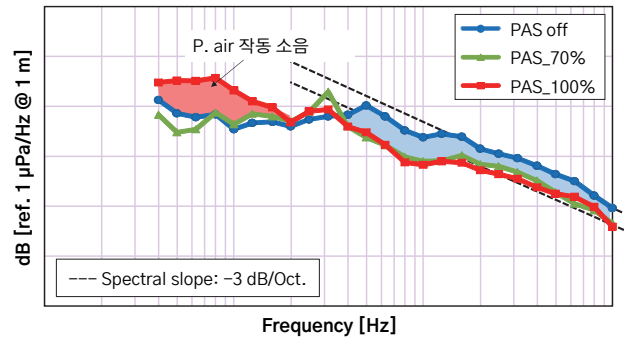


Fig. 8. 함속별 수중방사소음 수준(CIS + 5 kts)

해 PAS 공기분사량 70 %를 기준으로 할 때, 100 % 증가시 고속에서는 추진기 소음을 조금 더 감소시키는 작용을 하지만 저주파수 소음이 높아지는 특성을 가진다.

4.2 패턴 분석

공기분사량 조건에 따른 수중방사소음 패턴을 분석하기 위하여 2 kHz 이상 주파수 영역의 변화 추이를 분석하여 Fig. 9에 나타냈다. PAS off 조건에서 CIS 대비 + 3 kts까지 약 3.3 dB/kts 수준의 소음증가가 식별된다. + 5 kts에서도 약 3.4 dB/kts 수준으로 유사하게 증가하며, 이는 propeller에서 cavitation 발생 시의 일반적인 소음증가 패턴인 약 3.5 dB/kts와 매우 유사한 수준을 보이며, 함속의 증가에 따라 cavitation의 지배주파수가 고주파수에서 저주파수로 내려오는 패턴 또한 식별되었다.

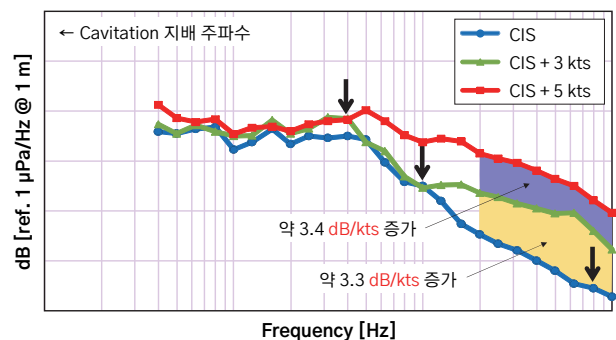


Fig. 9. PAS-off시 수중방사소음 변화

PAS 운용시 공기분사량을 70 % 및 100 %로 작동시킨 2가지 조건의 수중방사소음 수준을 Figs. 10-11에 나타냈다. 모든 조건에서 CIS 대비 + 3 kts까지는 0.4 dB - 1.0 dB 수준의 증가가 보이나, 실제 소음이 증가한 것인지 또는 측정 오차로 인지해야 할지 판단하기는 어렵

다. 하지만, CIS + 3 kts 이하에서 유사한 소음수준이 발생한다는 것은 PAS에서 방출되는 공기버블에 의한 소음이 실제 propeller의 소음보다 높아서 masking되었을 가능성이 높은 것으로 추정된다. 그러나 CIS + 3 kts 대비 + 5 kts 수준은 약 2.4 dB - 3.1 dB가 증가하였으나, 2 kts 함속 증가시 유사 실적함정의 cavitation에 의한 소음증가 패턴인 약 6.8 dB보다는 낮은 경향을 보인다. 이는 non-cavitation speed에서 함속 증가에 따른 일반적인 소음증가 수준인 1.5 dB/kts - 2 dB/kts와 유사하다는 점에서 PAS가 cavitation을 억제했다고 판단할 수 있다. 따라서, PAS가 작동하게 되면 cavitation에 의한 소음 증가 패턴인 3.5 dB/kts보다는 non-cavitation 영역에서의 propeller 소음증가 수준인 약 1.5 dB/kts - 2 dB/kts의 패턴을 가진다고 볼 수 있다. PAS 100 % 분사 조건일 때 CIS 및 CIS + 5 kts 대비 CIS + 3 kts의 저주파 소음이 유독 강하게 식별되는 점은 공기분사량의 증가에 기인한 영향일 가능성이 있으므로 추가적인 검토가 필요하다.

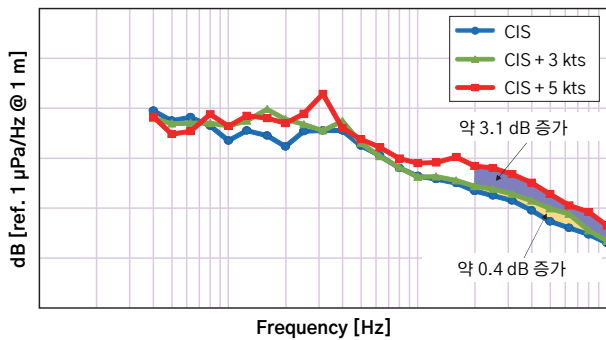


Fig. 10. PAS-70 %시 수중방사소음 변화

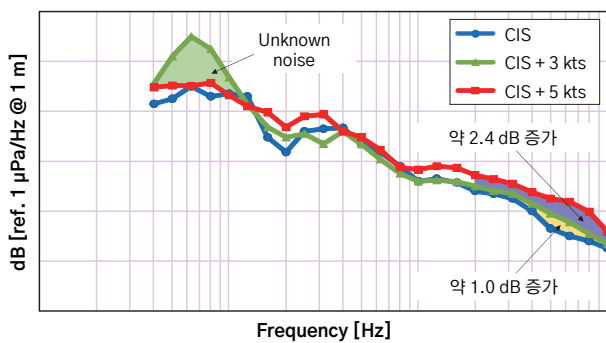


Fig. 11. PAS-100 %시 수중방사소음 변화

수중방사소음 변화 패턴을 추가 분석하기 위해 PAS off 대비 공기분사 조건에 대한 함속별 차이를 비교하여 Fig. 12 - Fig. 14에 나타냈다. CIS에서는 PAS 작동시

고주파수 대역의 소음증가가 커지며, 분사 100 %에서는 저주파수 대역의 소음 또한 증가한다. CIS + 3 kts는 고주파수 대역은 PAS 분사 조건별로 큰 차이는 없으나, 저주파수 대역에서는 100 %에서만 소음 증가가 식별된다. CIS + 5 kts는 PAS 분사시 고주파수 대역에서 소음이 감소하나, 저주파수 대역에서는 다른 함속 조건과 동일하게 100 % 분사에서만 소음이 증가된다.

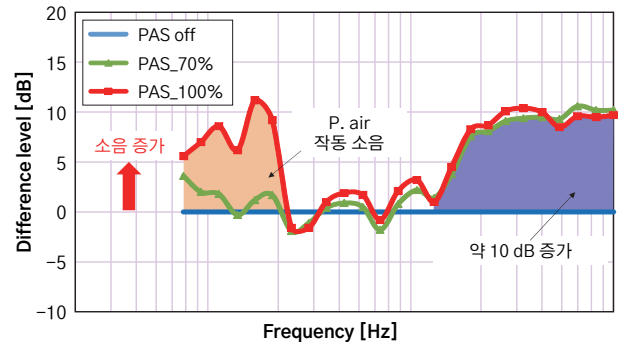


Fig. 12. PAS 작동시 수중방사소음 변화(CIS kts)

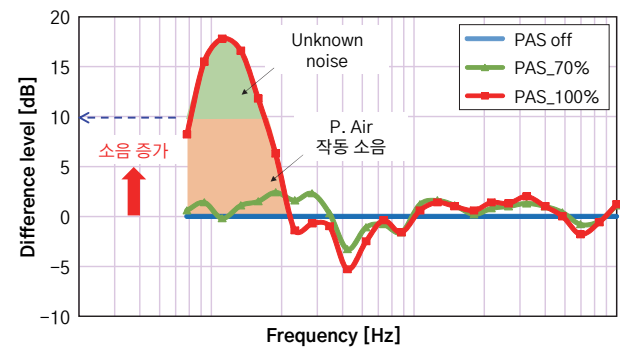


Fig. 13. PAS 작동시 수중방사소음 변화(CIS + 3 kts)

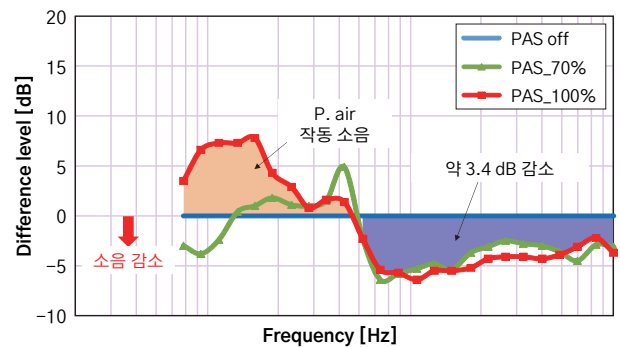


Fig. 14. PAS 작동시 수중방사소음 변화(CIS + 5 kts)

이러한 결과를 정리하면, PAS 분사는 저주파수 및 고주파수 대역에 각각 영향을 미친다. 이는 PAS를 분사할 경우 일정한 수준의 PAS 자체소음(self noise)이 고주파수 대역에서 발생하며, 분사량에 따라 저주파수 대역

에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

PAS 작동에 대한 self noise 대비 propeller 소음이 낮은 함속에서는 cavitation 발생유무와 상관없이 PAS self noise에 masking되어 함속이 증가해도 고주파수 대역의 소음은 거의 일정한 수준을 유지한다. 그러나, propeller 소음이 PAS self noise보다 높은 함속에서는 non-cavitation 조건의 함속별 소음증가 수준의 특징을 가진다. CIS + 5 kts까지는 PAS 70 %와 100 %의 소음증감 차이가 유사한 수준이며, 이렇게 추정된 함속별 PAS 영향성에 대한 패턴은 Fig. 15에 나타났다.

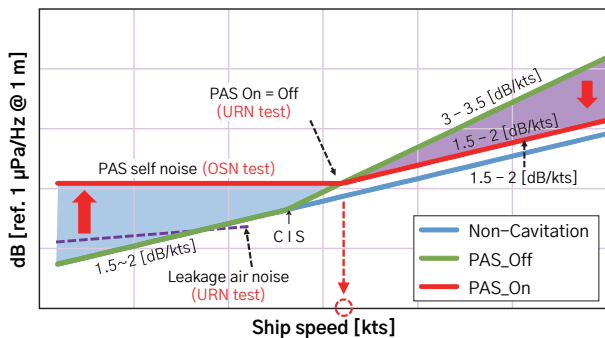


Fig. 15. 함속별 PAS 영향성에 대한 패턴

그러나, 그 이후의 속력에서도 유사한 수준의 소음감소가 발생하는지에 대해서는 추가적인 시험결과 검토를 통한 운용성 정립이 필요하다. 상황에 따라서 PAS 70 % 및 100 %의 2가지 모드(mode)로 운용할 필요성도 있다.

5. 발전 방안 제안

함정의 수중음향 스텔스 성능 향상을 목적으로 적용하는 공기분사장치의 운용성을 최적화하기 위해서는 향후 확보되어야 하는 기술과 추가적인 연구가 필요한 기술이 있으며, 함정의 실선 배치 후 운용단계에서도 효율적인 관리 또한 요구된다.

5.1 선행 과제

효율적인 공기분사장치 운용을 위해서는 선행 과제 추진이 필요하다.

첫 번째는 함정별 PAS 특성 분석이다. 수중방사소음 시험결과의 추가 분석을 통한 함정별 PAS 운용시 주파수 특성이 파악되어야 한다. 운용함정의 경우, 건조 및 운용 중에 실시한 수중방사소음 시험결과가 있으며, 해

당 결과를 토대로 함속별 PAS 운용 유무에 대한 주파수별 소음증감 특성의 분석이 필요하다. 이때 propeller의 CIS 특성과 함속별 pitch 정보를 포함해야 한다.

두 번째는 PAS 작동시 공기분사량에 따른 propeller의 단독 수중소음(overside noise) 특성 분석이 필요하다. 수중방사소음이나 탑재장비별 overside noise 시험은 일반적으로 함정에서 수행하고 있으나, PAS 단독 작동시 propeller에서 발생하는 overside noise 시험은 수행하지 않는다. 따라서, PAS가 수중방사소음에 미치는 영향을 판단하기 위해서는 PAS 단독 수중소음에 대한 특성 자료가 확보된 후 함정의 수중방사소음 특성과 상호 비교 분석을 한다면 공기분사장치의 최적 운용방안 추정에 더 높은 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다.

5.2 개발 연구

PAS 및 수중음향 스텔스 성능의 최적화를 위해 추진되어야 하는 추가 연구가 있으며, 첫 번째로는 PAS 배관과 청수 공급 배관 연결이 필요하다. 기존 함정은 수중방사소음 시험시 PAS에 동일한 압력의 공기가 분배되었다는 가정을 적용하지만, 함정을 운용하면서 발생할 수 있는 propeller 끝단부 공기 토출 hole의 막힘 현상은 확인이 어렵다. 타 해군의 경우 정박시 propeller 끝단부로 청수를 약하게 흘려보내 해양생물체에 의한 hole 막힘 현상을 방지하고 있다[5]. 이것은 해양생물체가 민물에서 살 수 없다는 단순한 원리를 이용한 것이다. 이런 시스템 적용을 위해 청수를 사용할 경우, 함정 건조시 청수탱크 용량 증가로 이어질 수 있으나, 조수기(fresh water maker)를 이용한다면 별도의 탱크 용량 변경 없이 운용함정에도 적용 가능할 것으로 판단된다. 또한, Fig. 16에 나타난 바와 같이 건조단계에서부터 운용함정까지 propeller 공기 토출 hole간 유사한 압력의 발생 유무 확인도 용이할 것이다.

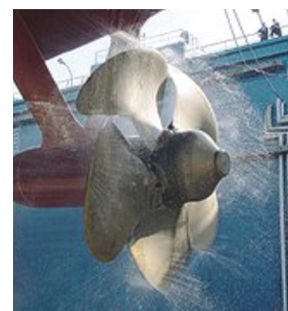


Fig. 16. 건조시 propeller의 PAS 검사 예

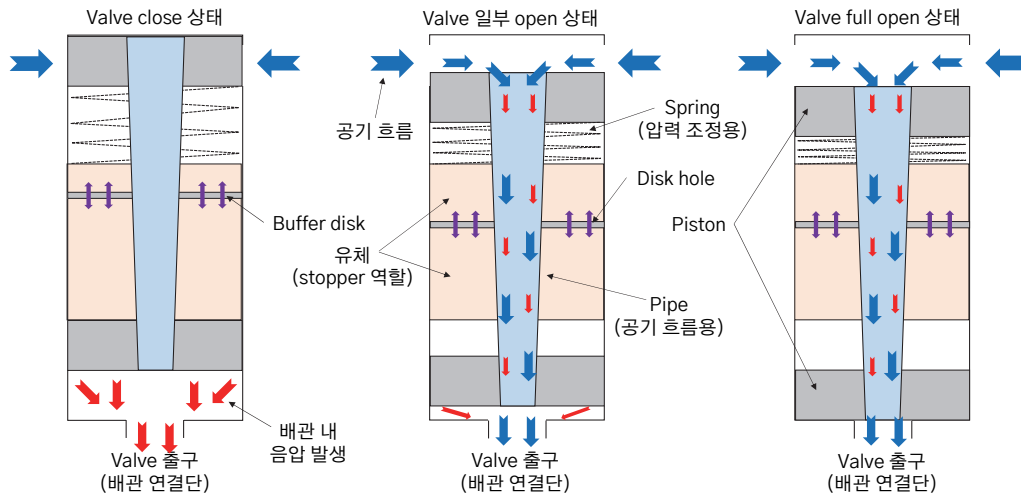


Fig. 17. Reverse-check valve 개념 예

두 번째는 PAS 배관계통 safety 역체크 밸브(reverse-check valve)의 개발이다. Fig. 15에 나타낸 바와 같이 PAS 공기전달을 위한 R/G-propeller 간 배관 내 음압 발생에 의한 손상 방지를 위해 propeller 회전시 항시 개방하는 safety 밸브가 있다. 함정 운항 중에는 PAS 작동 유무와 상관없이 이 밸브를 통해 일정량의 공기는 propeller로 방출되어 저속부터 일정 함속까지 수중방사소음 증가에 기여하고 있다. Safety 밸브를 강제로 차단할 경우 공기전달 배관 내 음압이 발생하여, 배관의 손상(이음새 등), 관내 해수 유입으로 인한 부식, 또는 propeller hub 내부의 각종 제어밸브 등의 손상이 발생할 수 있다. 이러한 공기 배출과 관내 음압 발생의 두 가지 문제를 해결하기 위하여 safety 밸브를 reverse-check 밸브 형태로 적용할 수 있으며, 개념도는 Fig. 17에 나타냈다.

Reverse-check 밸브는 propeller 회전 속도에 따라 발생하는 관내 음압에 의해 밸브 개방 유무를 결정한다. 음압이 낮은 저속 회전에서는 밸브가 차단된 후 일정 회전속도 이상의 음압 발생시 개방되며, 그 압력 수준은 강성조절 스프링과 유압 disk damper로 제어된다. 밸브 개방 압력은 함정의 CIS 또는 기존 safety 밸브가 수중방사소음에 영향을 미치는 함속의 발생 음압을 측정하고, 그 압력에 맞게 reverse-check 밸브의 스프링 강성을 조절하는 것으로 설정되어야 한다.

마지막으로 PAS 운용시 공기 이외의 물질 적용 가능성에 관한 연구이다. Cavitation은 propeller 회전시 발생하는 해수압력 저하로 인해 기화 임계점 또한 낮아져서 발생하므로 propeller 주변을 기화 임계점보다 더 낮

은 온도로 감쌀 경우, 해수의 기화 현상은 지연될 수 있다. 이런 조건을 만들기 위해 기존에 사용되는 공기보다는 열전도율이 높은 액체(청수 등)를 생각해 PAS에 적용할 경우, 해수의 기화점을 낮추어 cavitation 발생 자체가 억제될 가능성이 있다.

6. 결론

함정의 수중음향 스텔스 성능 향상을 위해 PAS를 운용하고 있으나, 음향특성 파악이 미흡하여 효율적인 운용은 현재까지 어려운 상태이다. 이는 propeller cavitation에 의한 수중방사소음 영향을 최소화하기 위해 설치된 PAS를 운용할 때 분출되는 공기버블이 특정 함속에서 수중방사소음을 증가시키는 역효과를 가져오기 때문이다.

이에 본 연구에서는 함정의 수중방사소음에 대한 음향특성을 분석하고 PAS에 대한 함속별 기여도를 추정하였다. 또한, PAS 운용 최적화를 위해 수행되어야 하는 추가적인 시험 항목들을 기술하고 함정의 수중음향 스텔스 성능 향상을 위한 공기분사장치 운용 최적화를 실현하기 위한 연구 필요항목들도 기술하였다.

본 연구는 수중방사소음 시험결과의 접근성 한계로 인해 특정 함정에 국한한 결과를 도출한 관계로 전 함정에 대한 대표성을 가지기에는 무리가 있다. 하지만 본 연구에서 수행한 방법을 토대로 다른 함정의 수중방사소음 패턴 추정 및 AI 분석기법을 활용한 경향 분석을 수행한다면 신뢰성 있는 공기분사장치의 최적 운용방안이 도출될 것이다.

참고문헌

- [1] 이희창, 문영선, 강승희, “음향스텔스 성능 향상을 위한 PRAIRIE 공기 분사향 제어 실험,” Journal of the KIMST, Vol. 23, No. 6, pp. 602-608, 2020.
- [2] 이상구, 김노성, 공영모, 신수용, 정성현, “수중방사소음 관점의 추진시스템에 대한 고찰,” 함정기술세미나 추계학술대회, 2012.
- [3] Underwater Ship Husbandry Manuals, Chapter 3, Propellers, 2005.
- [4] Prairie / Masker, FAS, Military Analysis Network, man.fas.org
- [5] Prairie ans Masked Air Flow Rates, DDG 51 Class Advisory NR 04-94.