

예인 음탐기 콘솔의 냉각 배출 팬 소음 저감을 위한 소음기 개발

Development of the Silencer for Reducing Noise from the Exhaust Cooling Fan of the TASS Console

한 형 석*·박 미 유*·조 흥 기*·김 중 길*·임 동 빈*·손 윤 준*

Hyung-Suk Han, Mi-Yoo Park, Heung-Gi Cho, Joong-Gil Kim,

Dong-Been Im and Yoon-Jun Son

(2010년 8월 23일 접수 ; 2010년 10월 19일 심사완료)

Key Words : Plenum Chamber(프리넘 챔버), Acoustic Elbow(흡음 곡관), TASS Console(예인 음탐기 콘솔), Sound Insertion Loss(음향 삽입 손실)

ABSTRACT

The indoor noise of the naval vessel is very important related to the optimum environmental conditions for crews as well as the ability of fighting power of antisubmarine. Especially, sonar equipment room is one of the rooms where require to be silent because the informations of the underwater noise are collected and analyzed in there. In this paper, the sound reduction of the TASS console, one of the main noise sources in a sonar equipment room for a typical naval vessel, is described. The noise source of this TASS console is the flowing noise of cooling fan. In order to reduce this kind of noise, the plenum chamber and acoustic elbow were developed. Related to the development of the plenum chamber, the area of the air-outlet and sound absorption of the inner lining were investigated experimentally with the evaluation system of the sound insertion loss. Acoustic elbow was also manufactured and evaluated with the evaluation system of the sound insertion loss. Finally, in order to evaluated the ability of noise reduction of the plenum chamber and acoustic elbow, the indoor noise of the sonar equipment was measured when they were applied to TASS console.

1. 서 론

함정의 수중소음은 대잠전에 있어 매우 중요한 정보로 이러한 정보를 수집, 분석하는 음탐사들은 함에 장착되어 있는 능동 및 수동 소나(sonar)를 통해 수중정보실 내에서 수중 소음을 감시하게 된다. 이러한 수중 정보를 다루는 수중정보실의 경우 극도로 정숙함이 요구되는 격실로 함 건조 시 실내

소음을 엄격하게 관리하고 있으며 이러한 격실을 포함한 함정의 함내소음을 줄이기 위해 많은 연구들이 수행되고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

천안함 사태 이후 이러한 수중 소음에 대한 중요성이 더욱 강조되면서 음탐사들은 수중 정보 분석의 효율을 보다 높이기 위하여 함정 내 수중정보실의 소음 수준에 대한 추가적인 저감을 요구하고 있다. 실제로 현재 한국 해군에서 관리하고 있는 실내 소음 기준은 미해군 일반 규격⁽⁵⁾으로 수중정보실의 경우 기준치를 68 dBA로 관리되고 있다. 하지만 이 기준은 수중정보실의 성격을 고려해 볼 때 다소 높다고 판단된다.

† 교신저자; 정회원, 국방기술품질원
E-mail : hshan@dtaq.re.kr
Tel : (051)750-2533, Fax : (051)758-3992
* 국방기술품질원

특정 함정의 수중정보실에 대한 실내 소음 분석 결과 기계실에서 전달되는 추진기 및 보기류 소음, 내부 격실의 HVAC 소음 등 일반적인 소음원 외에 수중 정보실 내의 예인 음탐기 콘솔에서 매우 큰 소음이 발생됨을 알 수 있었다. 예인 음탐기 콘솔의 주요 소음원 분석 결과 소음 증가 원인은 냉각팬의 토출구 소음임을 알 수 있었다.

따라서 이 논문에서는 예인 음탐기 콘솔에 적합한 소음기 종류를 선정하고 소음기의 주요 설계 변수에 대한 실험적 분석을 수행하여 예인 음탐기 콘솔의 냉각팬 소음을 효과적으로 저감할 수 있는 소음기를 개발하고자 한다.

2. 소음기 선정 및 평가

이 논문에서 다루는 함정은 최근 건조된 구축함으로 정박 중 수중정보실 내에서 예인 음탐기 콘솔만(총 3대) 동작했을 때 실내 소음은 64.1 dBA이다. 최대 속도 운항 중 수중정보실의 실내 소음이 67.6 dBA임을 고려해 볼 때 예인 음탐기 콘솔이 실내 소음 레벨 상승의 주요 원인임을 알 수 있다.

이러한 예인 음탐기 콘솔은 Fig. 1과 같이 벽면과 30~40 cm 정도 떨어져 있으며 3개의 냉각팬 배출구가 벽면으로 향해 있어 음탐기 콘솔의 소음은 배출구에서의 소음뿐만 아니라 이 좁은 공간에서의 반사음 효과까지 포함하고 있는 상태였다.

따라서 예인 음탐기 콘솔의 냉각팬 배출구 소음 저감을 위해서는 소음 저감뿐만 아니라 배출구의 유동 방향이 벽면을 향하지 않도록 배출 공기의 유동 방향을 변경시킬 수 있는 소음기가 적용되어야만 한다.

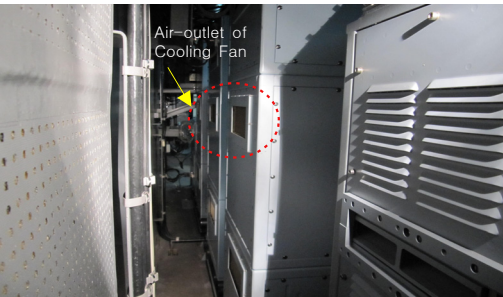


Fig. 1 Installation of the TASS console and its cooling outlet

이 논문에서는 이러한 요구조건을 만족할 수 있는 소음기로 프리넘 챔버(plenum chamber)를 선정하였으나, 3개소의 배출구 중 1개소의 경우 프리넘 챔버를 설치할만한 공간이 부족하여 이 부분에 대해서는 흡음 곡관(acoustic elbow)을 소음기로 선정하였다.

프리넘 챔버는 HVAC 계통에서 일반적으로 사용되는 소음기로 내부 흡음재에 의한 흡음 효과 외에도 입출구 및 챔버 내부의 면적비에 따른 임피던스 부정합 현상에 의해 소음을 저감시킨다. 프리넘 챔버의 음향투과손실은 식 (1)의 근사식⁽⁶⁾이 많이 사용되고 있으며 주로 고주파 대역에서 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

$$TL = -10 \log_{10} \left[S_{out} \left(\frac{Q \cos \theta}{4\pi r^2} + \frac{1 - \alpha_A}{S \alpha_A} \right) \right] \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

여기서 TL 은 투과손실, S_{out} 은 프리넘 챔버 출구면적, S 는 프리넘의 벽면 면적, r 은 프리넘의 입구와 출구 간의 거리, Q 는 방향성 팩터(directionality factor, $\cong 4.0$), α_A 는 프리넘 라이닝(plenum lining)의 평균 흡음 계수, θ 는 프리넘의 길이에 대한 r 의 각도이다.

흡음 곡관의 경우 평면과가 진행될 때 음파의 진행방향이 바뀌면서 일부는 흡음재에 의해 감쇠되고 상류 측으로 반사된다. 여기서 나머지 음은 진행방향을 바꾸는 과정에서 흡음재가 설치된 벽면과 여러 번의 반사를 일으켜 감쇠된다. 이와 같은 원리로부터 흡음 곡관은 일반 흡음 덕트(acoustic duct)에 비해 흡음 효과가 더 뛰어나지만 유동방향의 변화로부터 발생하는 압력강하로부터 풍량의 저감이 발생된다는 단점이 있다.

흡음 덕트의 소음 감쇠량(NR)은 식 (2)와 같이 Piening의 실험식⁽⁷⁾으로 예측할 수 있다.

$$NR = 1.5 \frac{P}{A} \bar{\alpha} L \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

여기서 A 는 덕트의 단면적, P 는 흡음부 설치 둘레, L 은 흡음재료의 축방향 설치길이, $\bar{\alpha}$ 는 흡음재의 평균 흡음계수이다.

2.1 프리넘 챔버의 설계

수중정보실 내의 예인 음탐기 콘솔과 벽면까지의

공간이 충분하지 않아 프리넘 챔버 크기를 최소화해야 하는 제약조건이 발생하여 그 크기를 최소화하여 Fig. 2와 같이 예인 음탐기 콘솔의 냉각팬 배출구 소음 저감용 프리넘 챔버를 설계하였다.

앞서 기술한 식 (1)로부터 프리넘 챔버의 투과손실에 영향을 주는 주요 인자를 출구 면적과 내부 라이닝 흡음재의 흡음계수로 설정하고 이에 대한 영향도 분석을 수행하였다.

Fig. 3은 프리넘 챔버의 출구 폭을 114 mm에서 94 mm, 74 mm 및 54 mm로 줄여 출구면적을 각각 82%, 65% 및 47%까지 줄인 경우 투과손실 변화를 보여준다. Fig. 3으로부터 프리넘 챔버 출구면적을 줄이면 음향투과손실은 증가함을 알 수 있다. 하지만 유동저항 증가로 인한 압력강하 증가 및 풍량 저감 가능성을 고려하면 무한정 출구면적을 줄일 순 없으므로 이를 고려하여 최소의 출구 면적을 선정해야만 한다.

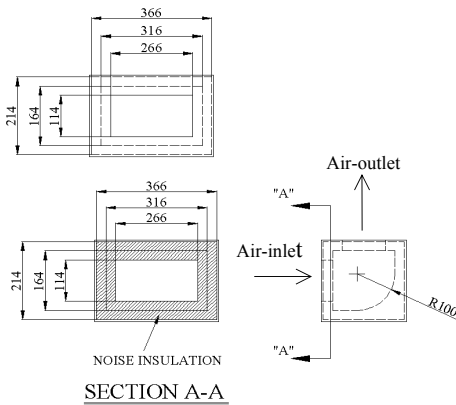


Fig. 2 Schematic diagram of the plenum chamber for the cooling air-outlet of TASS console

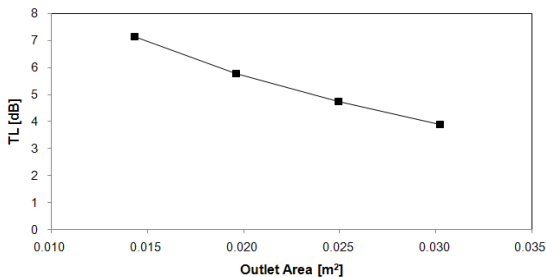


Fig. 3 Sound transmission loss of the plenum chamber according to the variation of air-outlet area

Fig. 4는 프리넘 챔버 내부 라이닝 흡음재의 흡음계수에 따른 음향 투과손실 계산 결과이다.

Fig. 4에서와 같이 프리넘 챔버 내부 라이닝의 흡음계수 증가에 따라 투과손실은 증가하므로 내부 라이닝은 흡음계수가 최대한 높은 흡음 소재를 사용해야함을 알 수 있다.

2.2 흡음 곡관의 설계

예인 음탐기 콘솔 냉각팬 3개 배출구 중 1개소에는 2.1절의 프리넘 챔버를 설치할 만한 공간이 나오지 않아 이 구간에 대해서는 Fig. 5와 같이 흡음 곡관 형태의 소음기를 설계하여 적용하였다.

흡음 곡관의 경우 앞서 기술한 식 (2)로부터 흡음재 설치 둘레와 덕트의 단면적 비, 흡음재의 흡음계수 및 흡음재 설치 길이에 따라 소음 감쇠량이

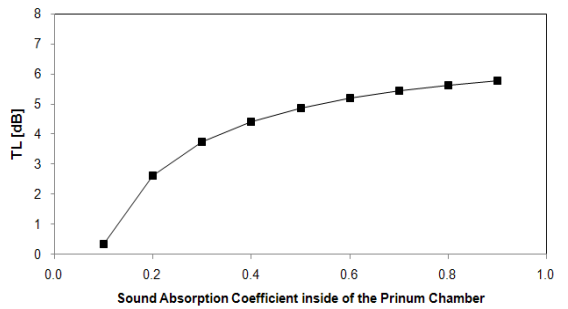


Fig. 4 Sound transmission loss of the plenum chamber according to the sound absorption coefficient of the inner lining

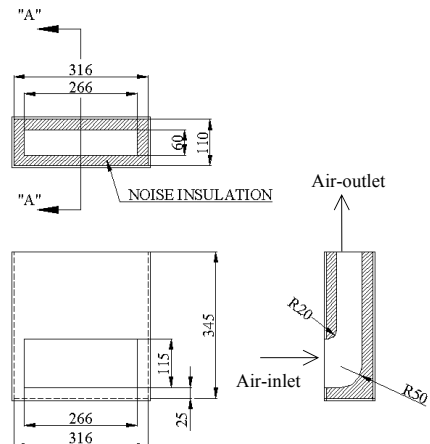


Fig. 5 Schematic diagram of the acoustic elbow for the cooling air-outlet of TASS console

달라진다. 하지만 흡음재 설치 둘레와 덕트의 단면적 비의 경우 설치 공간의 제약조건에 따라 변화시키기 힘들다. 따라서 높은 소음 감소량을 얻기 위해서는 가능한 높은 흡음계수를 가지는 흡음재를 설치해야하며, 압력손실에 따른 풍량 저감을 고려하여 덕트의 길이를 최대화해야 함을 알 수 있었다.

2.3 소음기의 삽입손실 평가

2.1절의 검토 결과를 바탕으로 프리넘 챔버와 흡음 곡관을 제작하고 팬과 덕트를 이용하여 소음기 평가 장치를 Fig. 6과 같이 구성하여 제작된 프리넘 챔버 및 흡음 곡관을 평가하였다. 소음기의 음향 투과손실을 구하는 것보다 음향 삽입손실을 구하는 것이 보다 손쉬우므로 이 논문에서는 소음기 적용 유무에 대한 소음 차이인 음향 삽입손실로 소음기의 성능을 평가하였다.

평가 시스템은 Fig. 6과 같이 소음원으로 팬을 이용하였으며 팬의 풍량은 3단계로 조절할 수 있도록 하였다. 여기서 연결 덕트 끝단 출구 크기는 예인 음탐기 콘솔과 동일하게 제작하였으며 연결 덕트는 아크릴로 제작된 2m 길이의 사각 덕트를 사용하였다. 입구측 소음을 모니터링하기 위해서 마이크로폰(B&K Type 4189)을 덕트 출구의 500 mm 이전에 설치하였다. 또한 소음기 설치 유무에 따른 소음 및 삽입 손실을 측정하기 위해서 출구로부터 500 mm 떨어진 지점에 마이크로폰(B&K Type 4189)을 설치하였다. 일반적으로 소음기는 유동 저항 증가에 따른

압력손실을 발생시키며 이에 따라 풍량저감을 일으킨다. 따라서 이러한 풍량을 측정하기 위해서 풍속계(Lutron, Model AM-4605M)를 이용하여 풍속을 측정하였다.

(1) 프리넘 챔버

Fig. 6의 평가 장치를 통해 전절에서 언급한 바와 같이 프리넘 챔버의 투과손실에 대한 주요결정인자인 프리넘 챔버의 출구 면적과 내부 라이닝 흡음재의 흡음계수에 따른 삽입손실을 평가하였다.

Fig. 7은 출구면적 감소에 따른 소음 및 풍량 변화 측정 결과이다. 프리넘 챔버를 2.1절의 Fig. 2와 같이 제작하여 삽입손실 및 풍량을 평가해 본 결과 Fig. 7(a),(b)와 같이 프리넘 챔버의 출구면적이 덕트 출구의 출구면적과 동일할 경우 풍량은 거의 변하지 않으며 소음은 약 3 dB 감소됨을 알 수 있었다. 여기서 출구 면적을 줄임에 따라 소음 및 삽입 손실이 추가적으로 저감되며 출구면적을 약 52%까지 줄였을 때 토출구 소음이 약 4 dB까지 줄어들음을 알 수 있었다. Fig. 7(c),(d)는 출구면적 감소에 따른 1/1 옥타브 소음 스펙트럼 및 음향 삽입손실이며 출구면적 감소에 따라 전 주파수 대역에서 소음레벨이 감소함을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 7(b)와 같이 출구면적이 52%까지 줄어들어 풍량이 25%까지 저감되기 때문에 풍량 저감 허용치를 고려하여 출구 면적을 결정해야만 한다.

여기서 15% 까지 풍량을 저감해도 시스템에 문제가 없다고 가정하면 출구면적을 35% 까지 줄일 수 있으며 이 경우 출구소음은 약 4 dB 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 8은 프리넘 챔버 내부 라이닝에 따른 소음 변화 측정 결과이다. Fig. 8(a)로부터 내부에 흡음재가 없는 프리넘 챔버를 적용한 경우 소음은 프리넘 챔버가 없을 때와 거의 동일함을 알 수 있으며 Fig. 8(b)~(c)로부터 내부에 흡음재가 없는 프리넘 챔버 적용 시 저주파 영역은 오히려 증가하며 고주파 영역의 소음만 일부 감소함을 알 수 있었다. 내부 흡음재가 없을 경우 챔버 내부의 반사음으로 인해 저주파 영역에서 소음이 증가한 것으로 판단되며 입출구 면적 변화에 따른 임피던스 부정합 현상에 의해 고주파 성분의 소음은 일부 감소한 것으로 예측된다.

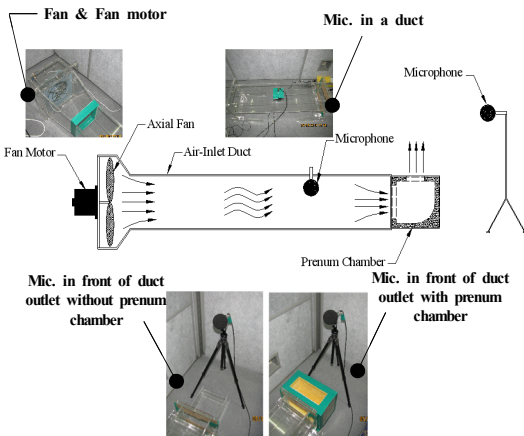


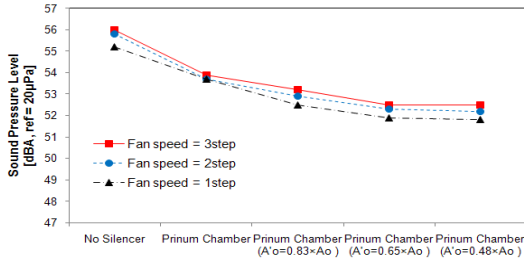
Fig. 6 Test setup for evaluating the insertion loss for the plenum chamber

Fig. 8에서 내부 흡음재를 Fig. 9(a)와 같이 폴리 마이드(polymide)를 사용할 경우 흡음효과로 인해

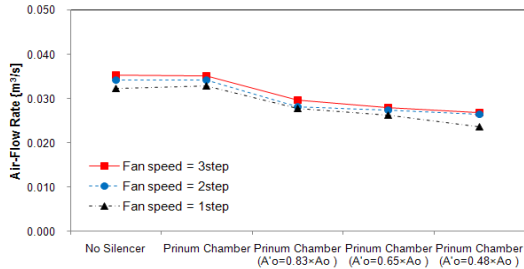
전 주파수 영역에서 출구 소음이 약 56 dBA에서 약 52 dBA까지 크게 떨어짐을 알 수 있었으며, Fig. 9(b)와 같이 전주파수 영역에서의 흡음계수가 폴리마이드보다 더 높은 폴리에스테르(polyester)를 적용한 경우 출구소음이 약 1 dB 정도 더 감소됨을 알 수 있었다.

(2) 흡음 곡관

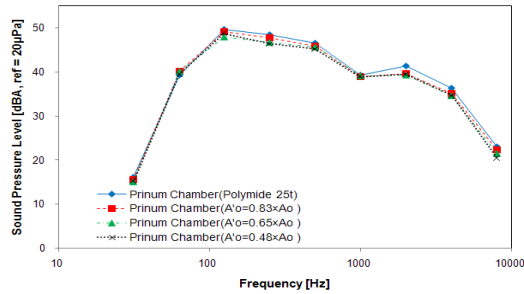
Fig. 6의 평가 장치를 통해 2.2절에서 설계한 흡음



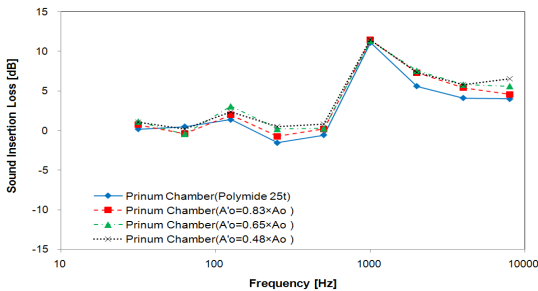
(a) Overall noise at air-outlet



(b) Air flow rate

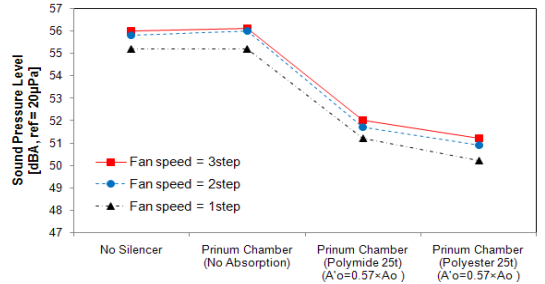


(c) 1/1 octave spectrum at air-outlet (fan speed = 3steps)

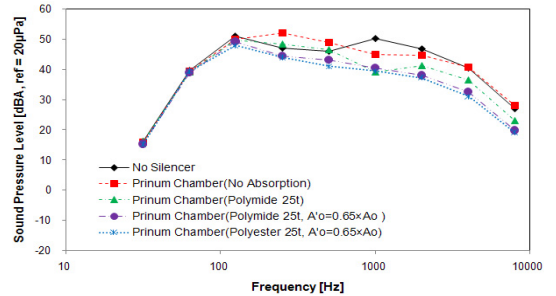


(d) 1/1 octave sound insertion loss at air-outlet (fan speed = 3steps)

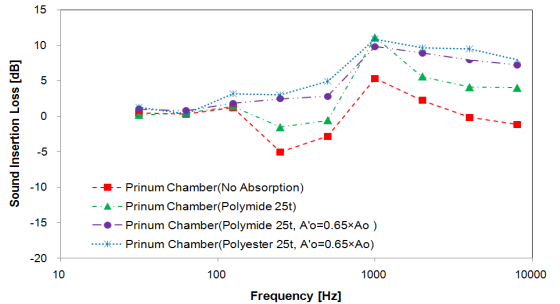
Fig. 7 Variations of sound pressure level and air flow rate according to the reduction of air-outlet area



(a) Overall noise at air-outlet



(b) 1/1 octave spectrum at air-outlet (fan speed = 3steps)



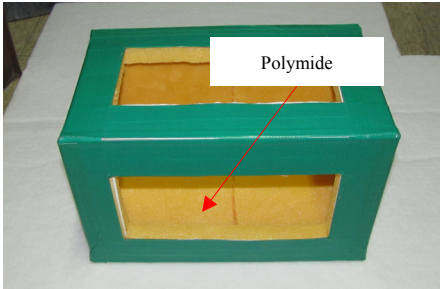
(c) 1/1 octave sound insertion loss at air-outlet (fan speed = 3steps)

Fig. 8 Variations of sound pressure level and air flow rate according to the sound absorption material for inner lining of plenum chamber

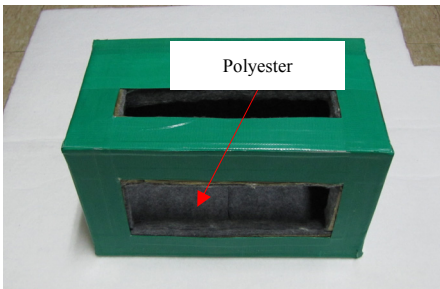
곡관에 대한 음향 삽입손실을 평가하였다. 여기서 내부 흡음재는 앞서 프리넘 챔버에 적용한 폴리에스테르 25t를 사용하였다.

Fig. 10(a)와 (b)는 측정결과 토출구에서의 소음과 풍량을 보여준다. Fig. 10(a)와 같이 흡음 곡관 설치 시 토출구에서의 소음은 약 4.5~4.9 dB 감소하지만 Fig. 10(b)와 같이 풍량은 약 13~16.6% 저감됨을 알 수 있었다. 앞절에서 언급한바와 같이 15% 정도 풍량 저감이 허용된다면 이 연구에서 고안한 흡음 곡관의 적용 시 약 4~5 dB 정도 소음 감소를 기대할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 10(c)와 (d)는 흡음 곡관과 앞절의 프리넘 챔버에 대한 1/1 옥타브 소음 스펙트럼 및 음향 삽입손실의 비교 결과이다. Fig. 10(c)~(d)로부터 흡음 곡관이 1 kHz 이상 고주파에서는 프리넘 챔버보다 높은 소음 감쇠 특성을 가지지만 저주파 구간(500 Hz 대역)에서는 프리넘 챔버에 비해 소음 감소 특성이 떨어짐을 알 수 있었다. 흡음 곡관의 경우 공간의 제약 조건으로 인해 콤팩트하게 제작되어 유속증가, 급격한 유동방향의 변화 등으로 인해 500 Hz 대역의 소음 감쇠가 크지 않은 것으로 예측된다.

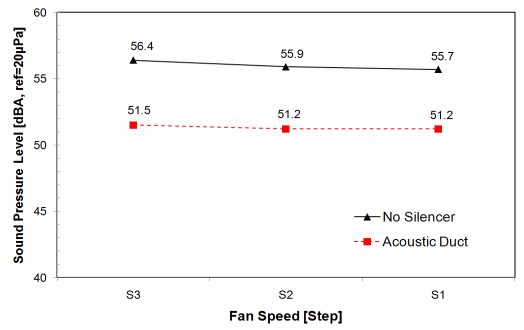


(a) Polymide(thickness = 25 mm)

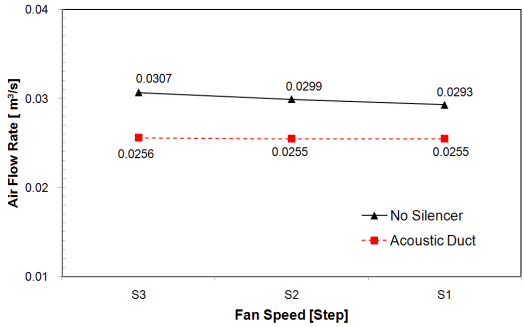


(b) Polyester(thickness = 25 mm)

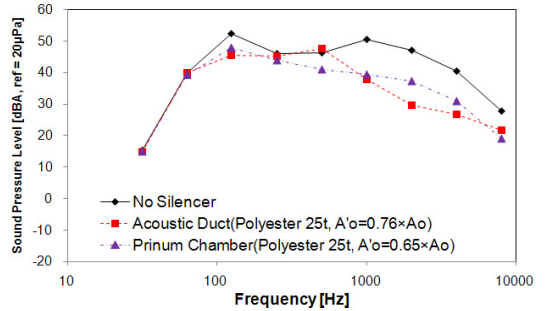
Fig. 9 Type of the sound absorption material for inner lining of plenum chamber



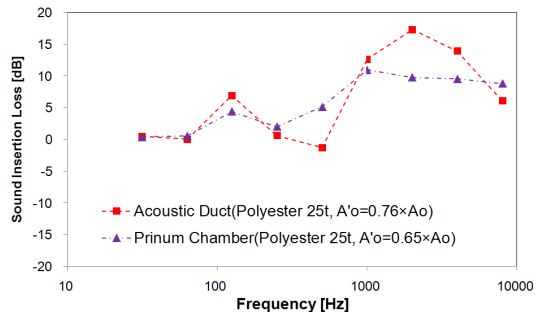
(a) Overall noise at air-outlet



(b) Air flow rate



(c) 1/1 octave spectrum at air-outlet (fan speed = 3steps)



(d) 1/1 octave sound insertion loss at air-outlet (fan speed = 3steps)

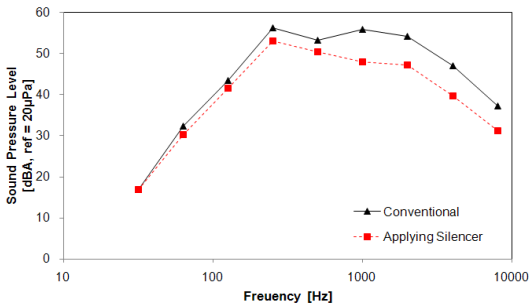
Fig. 10 Sound pressure level and air flow rate for acoustic elbow

3. 소음기 적용 후 예인 음탐기 콘솔 소음 평가

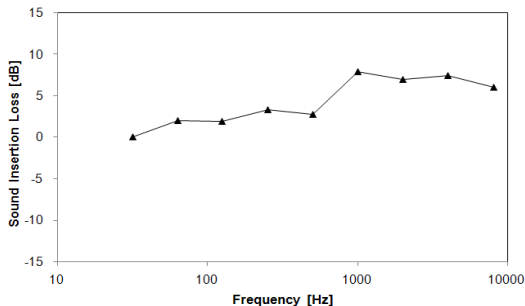
2절의 검토 결과로부터 예인 음탐기 콘솔 소음기의

Table 1 Specification of the plenum chamber and acoustic elbow

Items	Value	
	Prenum chamber	Acoustic elbow
Inlet size(Ainlet)	266 mm×114 mm	266 mm×114 mm
Outlet size(Aoutlet)	266 mm×74 mm (=0.65 Ainlet)	266 mm×65 mm (=0.57 Ainlet)
Type of inner lining	Polyester	Polyester
Insertion loss from theory	5.8 dB	17.3dB
Insertion loss from evaluation in a Lab	5.1 dB(9.5 dB averaging from 1 kHz~8 kHz)	4.9 dB(12.5 dB averaging from 1 kHz~8 kHz)
Reduction of air -flow rate	15 %	15 %



(a) 1/1 octave spectrum of the sound



(b) 1/1 octave spectrum of the sound insertion loss

Fig. 11 1/1 octave spectra of the sound pressure and sound insertion loss for TASS console in the sonar equipment room applying plenum chamber

최종 사양은 Table 1과 같으며 이들을 예인 음탐기 콘솔에 조립하여 수중정보실의 실내 소음 저감을 확인하였다.

수중정보실의 예인 음탐기 콘솔 냉각기 토출구에 프리넘 챔버를 적용하여 실내 소음을 평가한 결과 Fig. 11과 같이 전주파수에서 소음이 줄어들며 특히 1 kHz 이상에서 7 dB 이상 소음이 저감됨을 확인하였다. 따라서 예인 음탐기 콘솔 1대 운전 시 실내 소음이 61.4 dBA에서 56.5 dB로 약 4.8 dB 저감됨을 확인하였다.

수중정보실 내 측정 결과로부터 실험실에서 구성한 평가장치를 통해 예측된 음향 삽입손실이 실제 콘솔 조립 시 음향 삽입손실 결과와 어느 정도 일치함을 알 수 있었다.

여기서 개스터빈 발전기 흡기구 전달소음과 HVAC 소음이 일정하다고 가정하고 최초 예인 음탐기 콘솔 장비 소음측정 결과에 대해 프리넘 챔버 적용 시 음향 삽입손실을 반영하여 식 (3)을 통해 수중정보실의 소음을 재계산해 보면 최초 66.9 dBA에서 63.7 dBA로 약 3.2 dB 저감됨을 예측할 수 있다.

$$L_{total} = 10 \log(10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + 10^{L_3/10}) \quad (3)$$

여기서 L_{total} 은 전체소음, L_1 은 개스터빈 발전기 흡기구 전달 소음, L_2 는 HVAC 소음, L_3 는 예인 음탐기 콘솔 장비 소음이다.

4. 결 론

수중정보실의 소음 저감을 위해 주요소음원 중 하나인 예인 음탐기 콘솔 소음 저감을 위하여 프리넘 챔버 및 흡음 곡관의 적용 검토 결과 다음과 같은 결론을 도출 할 수가 있었다.

(1) 음향 삽입손실 평가 시스템을 통해 예인 음탐기 콘솔 소음 저감 용 프리넘 챔버의 소음 감소 특성을 평가한 결과 출구측 면적을 입구측 면적 대비 약 65%로 하고, 챔버의 내부 라이닝을 흡음율이 높은 폴리에스테르를 사용했을 때 토출구 소음이 약 5.1 dB 저감됨을 알 수 있었다.

(2) 음향 삽입손실 평가 시스템을 통해 예인 음탐기 콘솔 소음 저감 용 흡음 곡관의 소음 감소 특

성을 평가한 결과 토출구 소음이 약 4.9 dB 저감됨을 알 수 있었다.

(3) 예인 음탐기 콘솔장비 냉각팬 토출구에 프리넘 챔버 및 흡음 곡관 적용 시 소음은 단위 장비당 약 4.8 dB 저감됨을 알 수 있었으며 수중정보실 내 3대의 콘솔장비 모두 프리넘 챔버 및 흡음 곡관 적용 시 수중정보실 소음은 최초 측정된 소음 레벨(66.9 dBA) 대비 약 3.2 dB 정도 저감될 것으로 예측된다.

(4) 예인 음탐기 콘솔에 프리넘 챔버 및 흡음 곡관을 적용할 경우 압력강화로 인해 풍량이 일부 감소하기 때문에 반드시 풍량 감소에 대한 시스템의 영향도 분석이 이루어져야하며 장비 제작사와 충분한 협의를 통하여 사용 여부를 판단해야 할 것으로 사료된다.

실제로 수중정보실과 같이 정숙함이 요구되는 격실의 경우 현재 국내 해군에서 관리하고 있는 규격만으로 승조원의 요구 조건을 만족 시킬 수 없다. 따라서 작전상 고도의 정숙함이 요구되는 격실에 대해서는 실내 소음 기준의 재검토뿐만 아니라 단위장비의 철저한 소음관리, HVAC 소음 및 실내 잔향시간 관리 등 새로운 관리 지표 개발 및 검토가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구를 위해 협조해 주신 해군 관계자분들께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Seo, S. I. and Seo, S. O., 1990, "A Method for the Noise Prediction in Ships," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 27, No. 1, pp. 99~106.

(2) Kwon, J. H., Kim, M. S., Cho, D. S. and Kim, B. H., 2006, "Noise Analysis of Large Container Carrier Vessel on HVAC Noise," Special Issued of the Society of Naval Architects of Korea, pp. 65~70.

(3) Kim, J. C., Park, I. K. and Cho, D. S., 2003, "Statistical Investigation on Airborne Noise Levels of Navy Shipboard Compartments," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 8, pp. 637~644.

(4) Han, H. S., Park, M. Y. and Cho, H. G., 2010, "Study of the Indoor Noise Limit for Naval Vessels Considering the Satisfaction of the Crew," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 47, No. 4, pp. 567~575.

(5) US Navy, 1955, "General Specification for Ships of US Navy Sec.073".

(6) Vèr, I. L. and Beranek, L. L., 2006, "Noise and Vibration Control Engineering," John Wiley & Sons.

(7) Munjal, M. L., 1987, "Acoustics of Ducts and Mufflers - with Application to Exhaust and Ventilation System Design," John Wiley & Sons.