

선내 탑재된 소음기 성능평가 방법에 관한 연구

A Study on Silencer Performance Assessment under Onboard Condition

이도경*·진봉만**·이철원**·김노성**·최수현**

Do-Kyung Lee, Bong-Man Jin, Cheul-Won Lee, Nho-Sung Kim and Su-Hyun Choi

Key Words : Exhaust Nois(배기소음), Silencer(소음기), Probe Microphone(탐침형 마이크로폰), Noise Reduction(소음 저감량), Onboard Measurement(실선 실험).

ABSTRACT

The exhaust noise of auxiliary engine in ships is directly transmitted to bridge wing with only distance attenuation. It is not easy to find out practical treatment to be applied between exhaust pipe and bridge wing to reduce the transmission of the exhaust noise. In general, therefore, a silencer is fitted to reduce the exhaust noise and correspondingly noise of bridge wing. The silencer should be properly designed under the consideration of the frequency component of the exhaust noise and the required performance such as noise reduction or insertion loss. In general, the gas inside the exhaust pipe flows with high temperature and speed and thus onboard test condition is more adverse than the standard atmospheric condition.

In this study, the test method to evaluate silencer performance using a probe microphone is introduced.

1. 서론

여객선, 군함 등 일부 특수 목적의 선박을 제외한 대부분의 선박의 경우, Bridge Wing 이 발전기 (Diesel Generator) 등의 배기관과 인접되어 있으면서 배기관에서 방사되는 소음의 직접적 영향을 받게 된다. 따라서 배기구와 Bridge Wing 간의 거리 및 발전기의 소음 특성 등을 고려하지 않고 소음기(Silencer)가 설계된 경우 종종 심각한 소음문제가 발생하기도 한다.

이때 배기소음 저감을 위해 설치되는 소음기는 최근 국산으로 대부분 대체되어 사용되고 있으나 실선 소음 환경을 고려할 수 있는 유속, 온도 등을 고려한 실험 결과가 선박 설계자에게 제시되지 못하고 있으며, 특정 소음원의 주파수 특성을 고려하지 못하고 있는 실정이다.

최근에 유속을 고려한 선박용 소음기 성능 실험에 대한 연구 논문이 국내에서 발표된 바 있지만, 유속의 변화 추이에 따른 성능 평가가 충분히 이루어지지 않았고 실선과 유사한 환경 하에서의 실험은 전무한 형편이다.

따라서 소음기 성능에 있어서 제작업체에서 실시한 시험 결과와 실선 환경에서의 성능에 관한 조사 및 확인 등의 검증을 통한 설계단계에서의 효과적인 소음기의 성능 평가가 이러한 제반 문제를 해결하기 위한 필수적 요소라고 판단된다.

일반적으로 선박용 발전기 배기관은 약 300~400℃의 고온의 유체가 30~35m/sec 정도의 고속으로 흐르고 있는 등 표준 대기상태와는 달리 소음 측정 환경이 매우 열악하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 실선 환경(Onboard Test Condition)에서의 소음기 성능실험을 위해 탐침형 마이크로폰(Probe Microphone)을 이용한 실험절차를 기초실험을 통해 확립하고자 하였다.

2. 실선에서의 소음기 성능평가 방법 고찰

발전기의 배기관 내에는 고온(약 300~400℃)의 유체가 고속(약 30m/sec)으로 흐르기 때문에 상온에서 주로 사용되고 있는 콘덴서형 마이크로폰의 배기관 내 직접적 삽입에 의한 소음계측은 불가하다. 또한 배기관에 설치된 소음기의 탈부착이 거의 불가능하기 때문에 '삽입손실(Insertion Loss)'에 의한 성능실험이 현실적으로 어렵다. 따라서 고온에서 사용 가능한 센서에 의한 '소음 저감량(Noise Reduction)'의 계측이 실선에서의 소음기 성능실험 방법으로 적합하다고 판단된다.

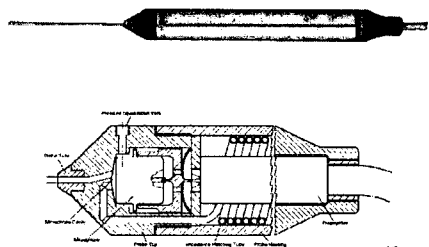


Fig.1 Schematic representation of probe microphone

현재까지 개발된 소음 계측용 마이크로폰 중 실선에서와 같이 고온 환경에서의 소음 측정이 가능한 마이크로폰은 Fig.1 에 나타난 '탐침형 마이크로폰(Probe Microphone)'으로서 그 용도 및 특성은 아래의 Table 1 에 요약하였다.

Table 1 에서 요약된 바와 같이 탐침형 마이크로폰은 일반적 소음 측정 주파수 구간인 1Hz~10kHz 에서 비교적 평탄한 주파수 응답 특성을 가진다.

그러나 Fig.2 에서 나타난 '탐침의 길이별 주파수응답 특성 곡선'에 의하면 1000Hz 이상의 고주파수 영역에서는 다소 측정 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있는데, 이는 주파수별 감도 보정에 의해 그 오차를 극복할 수 있다.

탐침형 마이크로폰을 이용한 실선에서의 소음기 성능실험

* 대우조선해양㈜

E-mail : dklee1@dsme.co.kr

Tel : (055) 680-5547, Fax : (055) 680-2174

** 대우조선해양㈜

험은, 반사파(Reflection Wave)의 영향을 최소화하면서 관내 소음의 정도 있는 계측을 위해 아래의 Fig.3 에 나타낸 바와 같이 'Wave-guide Tube'라는 소음 측정용 소형관을 천공한 배기관에 부착하여 계측을 수행한다.

Table 1 탐침형 마이크로폰의 용도 및 특성

용도	특징
<ul style="list-style-type: none"> • 근접음장 소음 측정 • 전화기, 악기 등의 음장분포 조사 • 복잡한 기계 장비류의 방사소음 측정 • 배기계의 소음측정 • 청력보호기의 소음 감쇠량 측정 • 음향입피턴스 측정 	<ul style="list-style-type: none"> • 평탄한 주파수응답 특성 • 소형 경량 (약 45g) • 측정환경에 따른 측정용 탐침(Flexible probe or Stiff probe)의 자유로운 선택 • 약 700°C까지의 고온 환경에서 소음 측정이 가능

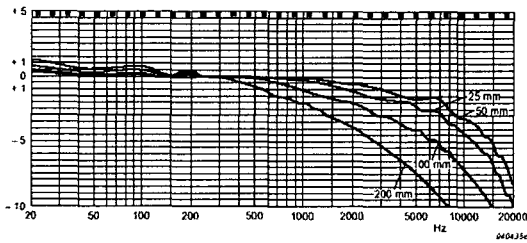


Fig.2 Typical frequency responses for various stiff probe tube length

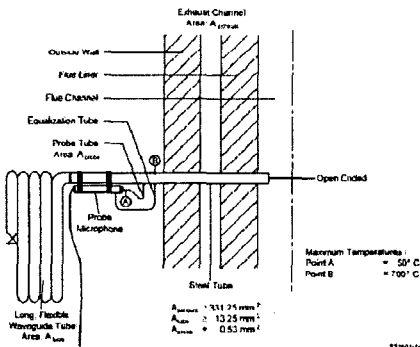


Fig.3 Application of probe microphone for noise measurements on exhaust systems

이때 Wave-guide Tube 의 치수는 내부 단면적이 13.25mm² 이상이고 측정 대상 배기관 단면적의 4% 이하이면 정도 있는 실험 결과를 얻을 수 있다고 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 일반 상선에 주로 적용되는 발전기 배기관의 치수(약 400A Pipe)를 고려하여 15A steel pipe 를 배기 소음 측정용 Wave-guide Tube 로 사용하였으며, 그 Tube 끝단을 동일 직경의 고온 고압용 Metal flexible hose 로 연결하여 반사파의 영향을 최소화 할 수 있도록 하였다.

3. 실선실험 방법의 검증을 위한 기초실험

본 연구에서는 실선에서의 소음기 성능실험 방법의 검증

을 위해 별도의 기초실험을 수행하였으며, 기본적으로 '탐침형 마이크로폰의 정도 검증'과 'Wave-guide Tube 를 이용한 소음 측정 방법의 정도 검증' 등으로 구분하여 수행하였다.

수행된 기초실험의 개략도는 Fig.4 에 나타내었으며, 측정 및 분석을 위해 사용된 장비 목록은 Table 2 에 나타낸 바와 같다.

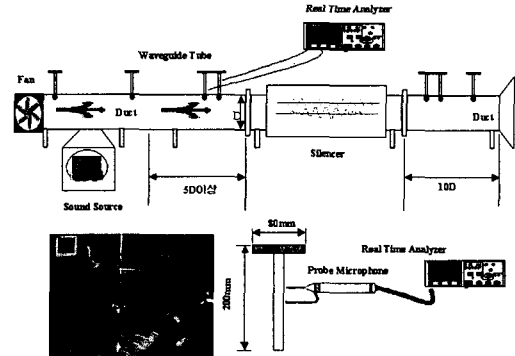


Fig.4 Schematic diagram of basic experiment for the verification of onboard test method

기초실험 개략도에서 나타낸 관내 소음 측정용 Wave-guide Tube 는 실선 실험 적용과 동일하게 15A size 의 Wave-guide Tube 를 맞대기 이음 형식으로 연결 후, 약 5m 정도의 고온 고압용 Metal Hose 를 연결하였다.

Table 2 Equipment list for basic experiments

Item	Type
Analyzer	Pulse3560, B&K3550,SD390
Probe Microphone	B&K Type 4182x2sets
1/2" Microphone	B&K Type 4165/4190, Larson Davis Type 2541
Sound Source	B&K Type 4224
Power Supply	B&K Type 2804/5935

3.1 탐침형 마이크로폰의 정도 검증

(1) 1/2" 마이크로폰과의 비교 검증

일반적으로 상온에서 소음 계측용으로 널리 사용되고 있는 콘덴서형 1/2" 마이크로폰은, 가청 주파수 범위에서 평탄한 주파수응답 특성(Fig.5 참조)을 가지고 있으므로 실선 실험에서 사용될 탐침형 마이크로폰의 정도 확인을 위한 좋은 기준이 된다.

따라서 본 실험에서는 관내 동일 지점에서 동일 소음원에 대한 탐침형 마이크로폰 및 콘덴서형 1/2" 마이크로폰의 주파수별 소음레벨을 측정하여 그 정도를 확인하였다.

소음레벨 측정은 기초실험용 소음원인 Fan 과 Sound Source 의 근접음장(Near Field) 영향으로부터 벗어난 소음기 입구(Inlet) 위치에서 수행하였으며, 실선에서와 같이 유속이 있는 음원 환경을 구현하기 위해 Fan 과 Sound Source 를 동시에 작동시켜 소음레벨을 측정하였다.

정밀한 결과 분석을 위해 연속스펙트럼(Continuous spectrum)으로 결과를 분석하였으며 두 마이크로폰의 주

과수별 음압레벨 비교는 Fig.6 에 나타낸 바와 같다.

Fig.6 의 연속스펙트럼에서 나타나듯 전체적인 주파수 경향은 매우 잘 일치하고 있다. 그러나 2000 Hz 이상의 고주파수 영역에서는 다소 음압레벨의 편차가 발생하고 있는데, 이는 전술한 바와 같이 탐침형 마이크론의 감도가 이러한 고주파수 영역에서 떨어지는데 기인한 것으로 판단된다.

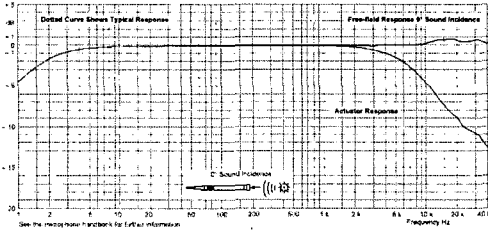


Fig.5 Typical frequency response for 1/2" microphone

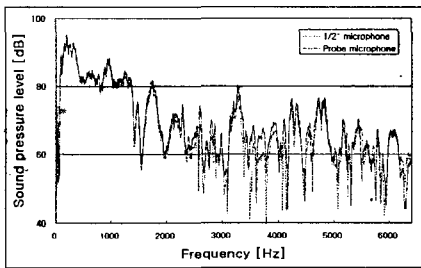


Fig.6 Comparison of sound pressure level between 1/2" microphone and probe microphone

따라서 Fig.2 에서 나타난 탐침형 마이크론의 주파수 응답 특성 곡선을 이용하여 이러한 고주파수 영역에서 감도 보정을 한 후 재분석을 수행하였으며, 그 결과를 Fig.7 에 나타내었다.

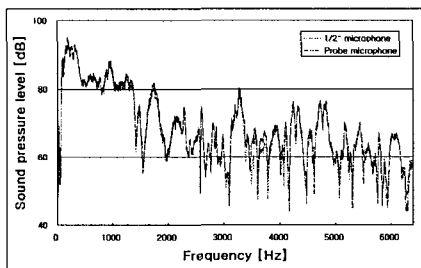


Fig.7 Comparison of sound pressure level between 1/2" microphone and probe microphone after the correction of frequency response

고주파수 영역에서의 감도 보정 후의 재분석 결과는 Fig.7 에서 보아 알 수 있듯이 주파수 경향뿐만 아니라 음압레벨의 정량적 측면까지 모두 잘 일치하고 있다.

(2) 고속의 유체 유동 환경에서의 정도 검증

콘덴서형 1/2" 마이크론을 이용한 상온에서의 소음계 측 시, 일반적 옥외 환경에서는 방풍망(Wind Screen)의 부착 등에 의해 유속에 의한 영향을 최소화 하지만 Wind Tunnel, 덕트 등과 같이 고속의 유체가 흐르는 환경에서

는 'Nose Cone'이라는 별도의 장치를 마이크론에 부착하여 계속하는 것이 일반적이다.

Nose Cone 은 유체 유동에 대한 저항을 가능한 한 최소화 할 수 있도록 잘 연마된 유선형(Streamlined shape)으로 되어 있어서 고속의 유체가 흐르는 환경에서 공기역학적으로 유지되는 소음 성분을 최소화할 수 있는 것으로 알려져 있다.

참고로 Nose Cone 의 외형과 1/2" 마이크론에 부착하여 사용할 시의 주파수 응답 특성을 Fig.8 과 Fig.9 에 각각 나타내었다.

Fig.9 에서 보이는 바와 같이 Nose Cone 을 부착한 1/2" 마이크론의 주파수 응답 특성은 약 10kHz 까지는 감도상의 오차 없이 측정 가능함을 알 수 있다. 따라서 Nose Cone 을 부착한 1/2" 마이크론은 실선의 배기관과 같이 고속의 유체가 흐르는 환경 하에서 탐침형 마이크론의 직접적 사용에 따른 계측 정도의 확인을 위해 좋은 기준이 된다.

고속의 유동 환경을 조성하기 위한 음원으로 축류팬(Axial Flow Fan)을 사용하였으며 유속을 57m/sec 로 유지시켜 탐침형 마이크론 및 Nose Cone 을 부착한 1/2" 마이크론의 주파수별 음압레벨을 계측하고 비교하였다.

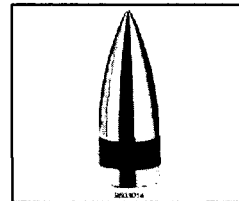


Fig.8 External shape of nose cone

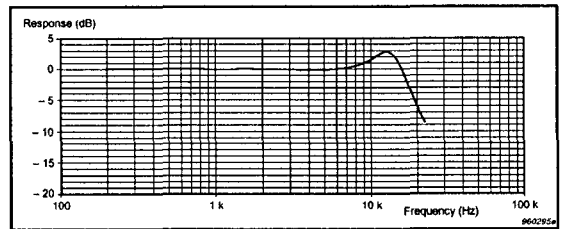


Fig.9 Typical frequency response for 1/2"microphone with Nose Cone

소음원으로 사용한 축류팬의 사양은 Table 3 에 요약하였다. 이때 측정된 결과는 옥타브 밴드(Octave Band)에 의해 분석하였으며 탐침형 마이크론 및 Nose Cone 을 부착한 1/2" 마이크론의 주파수별 음압레벨은 Fig.10 에 나타내었다 (단, 탐침형 마이크론에 의한 결과는 주파수별 감도 보정을 한 결과임).

Fig.10 의 결과 그래프는 고속의 유체가 흐르는 환경에서 탐침형 마이크론과 Nose Cone 을 부착한 1/2" 마이크론에 의한 음압레벨 측정치가 서로 잘 일치함을 보여 주고 있다. 따라서 고속의 유체가 흐르는 환경에서는 탐침형 마이크론의 관내 직접적 삽입에 의한 소음 측정을 하여도 무방할 것으로 판단된다.

Table 3 Specification of the fan

Type	Axial Flow Fan
Total Pressure [Pa]	1500
Static Pressure [Pa]	1464
Dynamic Pressure [Pa]	36
Flow Rate [m/sec]	57.2
Output of Motor [kW]	1.1
RPM of Motor	6072
Discharge [m ³ /hr]	1441

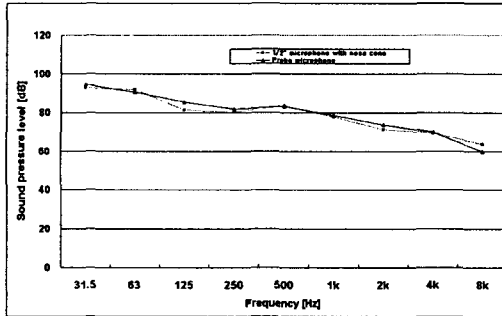


Fig.10 Comparison of sound pressure level between probe microphone and 1/2" microphone with nose cone in high wind speed condition

3.2 Wave-guide Tube 를 이용한 소음 측정 방법의 정도 검증

고압의 유체가 흐르는 배기관 내의 소음 레벨을 측정하기 위해서는 Wave-guide Tube 를 통한 소음 측정이 불가피하다. 따라서 이러한 Wave-guide Tube 를 이용한 소음레벨과 실제 관내의 소음레벨의 비교를 통해 측정 방법상의 오차의 확인 및 검증을 하고자 하였다.

관내의 소음레벨은 콘덴서형 1/2" 마이크로폰을 이용하여 소음 수준을 측정하였고, Wave-guide Tube 내의 소음레벨은 탐침형 마이크로폰을 이용하여 소음 측정을 수행하였다.

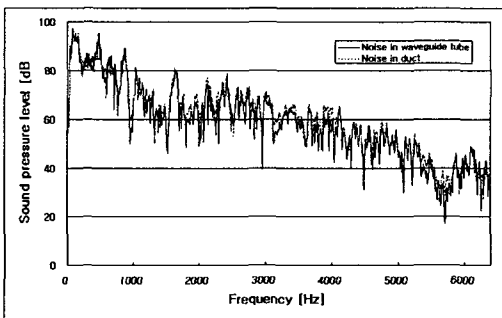


Fig.11 Confirmation of the accuracy for noise measurement using wave-guide tube

연속스펙트럼에 의한 분석 결과는 Fig.11 에 나타낸 바와 같이 분석된 전 주파수 영역에서 매우 잘 일치함을 알 수 있으며, 소음기의 실선 성능 실험에서 적용할 Wave-guide Tube 에 의한 소음 측정은 방법상의 오차가 거의 없음을 확인할 수 있었다.

이상의 실험 결과를 고려할 때, 탐침형 마이크로폰을

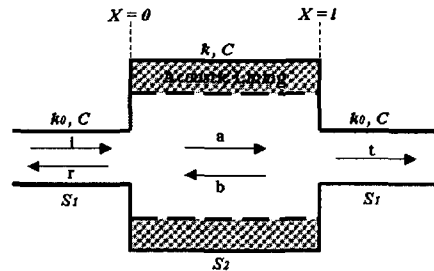
이용한 소음 측정 시에는 고주파수 영역에서의 적절한 감도 보정을 고려한 실험이 이루어진다면 매우 정도 있는 결과를 얻을 수 있으며 Wave-guide Tube 를 이용한 소음 측정 방법에 기인한 오차는 거의 없을 것으로 판단된다.

4. 소음기 성능 예측식의 비교

4.1 소음기 성능 예측식의 유도

유한 길이의 흡음형 소음기(Dissipative silencer)의 전달손실(Transmission Loss, TL)은 소음기를 '내장형 확장관(Lined expansion chamber)'으로 가정함으로써 유도될 수 있다.

흡음형 소음기의 지배 방정식 유도에 대한 이해를 돕기 위해 소음기 입출구에서의 음파 전달 모델을 Fig.12 에 나타내었으며, 관내 유체의 흐름을 평면파(Plane wave)라고 가정하면, 소음기 내부와 입출구에서의 음압은 다음과 같이 각각 하나의 값으로 대표할 수 있다.



< k : wave number, C : sound speed, S : cross-sectional area >

Fig.12 Sound transmission for dissipative silencer

$$P_i = p_i e^{-jk_0 x}, \quad P_r = p_r e^{-jk_0 x}, \quad P_a = p_a e^{-jkx},$$

$$P_b = p_b e^{-jkx}, \quad P_t = p_t e^{-jk_0 x} \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서 P_i = 소음기 입구에서의 입사파 압력

P_r = 소음기 입구에서의 반사파 압력

P_a, P_b = 소음기 내부의 압력

P_t = 소음기 출구로 전달되는 압력

이때 소음기 입구 및 출구에서의 압력의 연속성(Pressure continuity) 및 유동 체적의 연속성(Volume flow rate continuity)과 소음기 내부의 흡음체에 의한 영향을 고려하면 다음의 식이 유도된다.

$$\frac{P_t}{P_i e^{\alpha l}} = \frac{1}{4} \left[\left(m + \frac{1}{m} + 2 \right) - e^{-2j(k_0 - j\alpha)l} \left(m + \frac{1}{m} - 2 \right) \right] \quad \text{-----} \quad (2)$$

여기서 α = Energy attenuation constant

$$m = \frac{S_2}{S_1}$$

따라서 상기 식(2)를 전달손실(Transmission Loss, TL)의 형태로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$TL = 10 \log \left| \frac{P_t}{P_i} \right|^2 = 10 \log \left[\left[\cosh \frac{\alpha l}{2} + \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m} \right) \sinh \frac{\alpha l}{2} \right]^2 \cos^2 kl \right]$$

$$+ \left[\sinh \frac{\sigma l}{2} + \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{m} \right) \cosh \frac{\sigma l}{2} \right]^2 \quad [\text{dB}] \quad \text{-----} \quad (3)$$

식 (3)은 임의의 형상을 가지는 소음기 내부의 유동을 평면파로 가정했을 경우의 소음 감쇠량을 나타내는 것으로서, 본 연구의 소음기 성능 예측의 지배방정식으로 사용하였다.

한편 관내의 유체 온도에 의한 영향은, 음파 파장과 온도와의 다음 관계식으로 고려할 수 있다.

$$\lambda = \frac{345}{f} \sqrt{\frac{\theta_c + 273}{295}} \quad \text{-----} \quad (4)$$

여기서 f = 주파수 [Hz]

θ_c = 관내의 유체 온도 [°C]

상기 소음기 성능 예측식은 기본적으로 평면파 가정 하에서 유도되었기 때문에 '차단주파수(Cutoff frequency)' 이하의 주파수 영역에서만 유효하다.

차단주파수는 관내 유체의 유동 속도와 관의 직경에 따라서 결정될 수 있으며 관의 유형에 따른 관계식은 다음과 같다.

$$f_{c0} = \begin{cases} \frac{c_0}{2a} & \text{(for rectangular duct)} \\ 0.586 \frac{c_0}{d} & \text{(for circular duct)} \end{cases} \quad \text{-----} \quad (5)$$

여기서 f_{c0} = 차단주파수 [Hz]

c_0 = 관내 유체의 유동 속도 [m/sec]

a = 사각덕트 단면의 큰 변의 길이 [m]

d = 원형 덕트의 직경 [m]

소음기 성능 예측식의 파라미터 중 에너지 저감 상수는 이론적으로 구하기 어려우며 미국 NEBB(National Environmental Balancing Bureau) (1994)에서 제시한 아래의 경험식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\sigma = \begin{cases} 0.010 \left(0.305 \frac{P}{A} \right)^{1.959} (0.039t)^{0.917} & \text{at 63 Hz} \\ 0.0434 \left(0.305 \frac{P}{A} \right)^{1.41} (0.039t)^{0.941} & \text{at 125 Hz} \\ 0.205 \left(0.305 \frac{P}{A} \right)^{0.824} (0.039t)^{1.079} & \text{at 250 Hz} \\ 0.767 \left(0.305 \frac{P}{A} \right)^{0.500} (0.039t)^{1.087} & \text{at 500 Hz} \end{cases} \quad \text{---} \quad (6)$$

여기서 P = 소음기 단면의 둘레 길이 [m]

A = 소음기의 단면적 [m²]

t = 소음기 내부 흡음재의 두께 [mm]

4.2 성능 예측식에 의한 실험결과 검증

전술한 탐침형 마이크로폰 및 Wave-guide Tube 를 이용한 실험 방법의 정도를 확인하기 위해 간이 소음기(Sample Silencer)에 대한 성능실험을 수행하고 그 결과를 식 (3)에 의한 계산 결과와 비교하였다.

이 때 실험 및 계산에 적용된 소음기의 개략적인 치수 및 형상은 Fig.13 에 나타내었다.

간이 소음기 모델의 성능실험은 전술한 탐침형 마이크

로폰 및 Wave-guide Tube 를 이용한 실험 방법으로 평가하였으며, 실험 및 계산 결과의 비교는 Fig.14 에 나타낸 바와 같다.

이때 실험 및 계산 모델로 사용한 간이 소음기 모델의 치수 등을 고려한 차단주파수는 약 775Hz 가 된다. 따라서 계산 및 실험의 결과 분석은 옥타브 밴드로 63Hz~500Hz 까지 수행하였으며, Fig.14는 계산 및 실험 결과가 비교적 잘 일치함을 보여주고 있다.

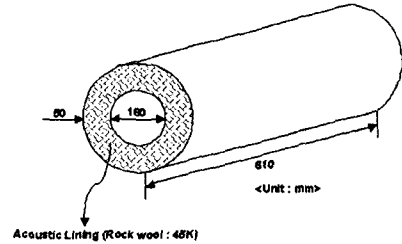


Fig.13 Sample silencer - circular type

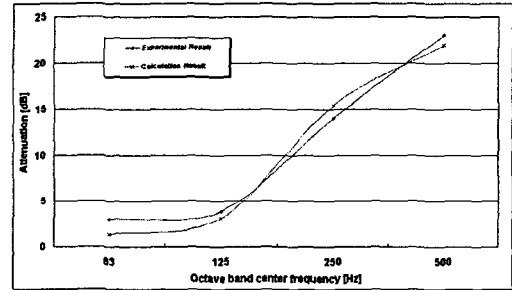


Fig.14 Comparison between calculation and experiment for sample silencer

5. 선내 탑재된 소음기의 성능 실험

본 연구에서는 실제 선박에 탑재된 발전기 배기관용 소음기의 성능을 전술한 방법에 의해 평가하고 이를 간이 소음 예측식과 비교하였다.

5.1 실험 대상 선박에 탑재된 발전기의 주요 사양
실험 대상 발전기의 주요 사양은 Table 4 에 요약한 바와 같다.

Table 4 Principal specification of diesel generator

Ship Type		105K COT
Specification of D/G	Type	6L23/30H
	Output	1060 PS
	RPM	720
	No. of Cylinder	6(In-Line)
D/G Silencer Type		SB-ES25-350

5.2 실선 성능실험 결과

실선에서의 소음기 성능 평가는 실험 대상 선박의 안벽 계류 상태에서 발전기 Load Test 중에 실시하였으며, 실선 환경에서의 소음기 성능실험의 각 위치는 Fig.15 에 나타낸 바와 같다.



(a) Measuring point A - Silencer Inlet



(b) Measuring point B - Silencer Outlet

Fig.15 Photograph of onboard measuring points

Table 4 에서 언급한 대상 선박에 탑재된 소음기에 대한 실선 환경에서의 성능실험 결과와 전술한 식(3)의 성능 예측식에 의한 계산 결과를 함께 비교 평가하였으며, 그 결과는 Fig.16 에 나타난 바와 같다.

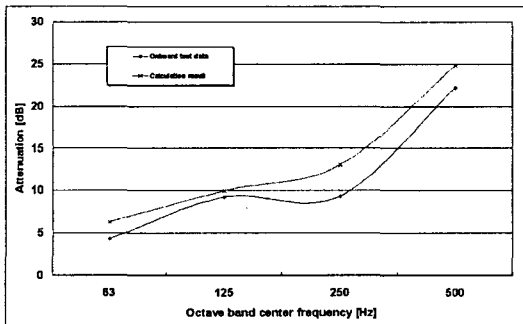


Fig.16 Comparison between theoretical calculation and onboard test result

Fig.16 에 나타난 이론적 성능 예측식에 의한 계산 결과 및 실선 성능실험 결과의 비교는 차단 주파수 이하의 주파수 영역에서 수행되었으며, 그 결과가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서 수행된 Wave-guide Tube 를 이용한 소음 저감량(NR) 계측에 의한 방법이 배기관외의 차단 주파수 이하의 영역에서 유효하게 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

6. 결론

(1) 소음기의 성능 실험 방법에 대한 고찰을 통해 실선 환경에 적합한 '소음 저감량 (Noise Reduction, NR)' 측정에 의한 실선 실험 절차를 확립하였다.

(2) 간이 소음기 모델에 대한 실험 및 이론적 성능예측식에 의한 계산을 통해 Wave-guide Tube 및 탐침형 마이크로폰(Probe Microphone)을 이용한 소음기 성능 실험

방법의 정도를 확인하였다.

(3) 실제 선박에 탑재된 소음기의 성능실험 결과와 이론적 성능 예측식에 의한 계산결과와의 비교를 통해 본 연구에서 적용한 소음기 성능 평가 방법의 유효성을 확인하였다.

(4) 본 연구에서 이용한 소음기 성능평가 방법은 차단주파수 이하의 영역에 대해서 의미 있는 결과를 갖는 방법으로서, 그 이상의 주파수 영역이 지배적인 소음 환경에서 적용하는 데는 다소 무리가 따를 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) Leo L. Beranek, "Noise and Vibration Control", McGraw Hill Book Company, 1988.
- (2) 엄재광, 김사수, "관내 유속을 고려한 상선의 배기관용 소음기의 성능실험 연구", 대한조선학회논문집 Vol. 38, No.1, pp.108~115, 2001. 2.
- (3) 선박 진동 소음 제어지침 연구위원회, "선박 진동 소음 제어지침", 한국선급, 1997.
- (4) Barry Clark et al., "Sound and Vibration - Design and Analysis", NEBB, 1994.
- (5) 윤제원, 김사호, 김영찬, 김두훈, "흡음형 소음기의 음향성능 해석", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.554~560, 1998.
- (6) Chao-Nan Wang et al., "Experimental study of the absorption characteristics of some porous fibrous materials", Applied Acoustics Vol. 62, pp.447~459, 2001.
- (7) K. O. Ballagh, "Acoustical Properties of Wool", Applied Acoustics Vol. 48, pp.101~120, 1996.
- (8) Samir N. Y. Gerges et al., "Numerical simulation and experimental tests of multilayer systems with porous materials", Applied Acoustics Vol. 58, pp.403~418, 1999.
- (9) R. Kirby, "Simplified Techniques for Predicting the Transmission Loss of a Circular Dissipative Silencer", Journal of Sound and Vibration Vol. 243, No.3, pp.403~426, 2001.
- (10) N. Voronina, "Comparison between theoretical and empirical models for elastic porous materials", Applied Acoustics Vol. 58, pp.255~260, 1999.
- (11) 김찬목, 방국호, 배인수, "흡음형 소음기가 부착된 덕트시스템의 음향특성에 대한 연구", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.643~648, 1999.
- (12) 정인화, 강연준, "소음제어용 탄성다공물질이 대어진 원형덕트 내의 음파전달", 한국소음진동공학회지 제 9 권 제 2 호, pp.302~309, 1999.
- (13) R. Glav, "The Transfer Matrix for a Dissipative Silencer of Arbitrary Cross-section", Journal of Sound and Vibration Vol. 236, No.4, pp.575~594, 2000.
- (14) "Instruction Manual - Probe Microphone Type 4182", B&K, 1990.