

공명기 배열을 이용한 중속 디젤엔진 배기 소음기의 저주파수 대역 성능 개선 연구

A Study on the Performance Improvement of Medium Speed Diesel Engine Exhaust Silencer in the Low-frequency Range Using Array Resonators

김 영 현* · 주 원 호* · 배 종 국**

Young-Hyun Kim, Won-Ho Joo and Jong-Gug Bae

(2009년 3월 25일 접수 ; 2009년 6월 25일 심사완료)

Key Words : Diesel Engine(디젤엔진), Silencer(소음기), Insertion Loss(삽입 손실), Array Resonator(공명기 배열), Low-frequency Range(저주파수 대역)

ABSTRACT

Various acoustic tests were carried out to investigate the acoustic performance of diesel engine exhaust silencers. In order to consider flow effects, the test facility was set up composed of fan, duct and silencer. Using the test facility, insertion loss tests were carried out to improve the acoustic performance in the low-frequency ranges. Through a series of tests, it was found out that the array resonators having multi-perforated holes inside the exhaust silencer, might be very effective in the low frequency range. Consequently, the hybrid-type silencer which is the combination of reflective silencer with array resonators and conventional absorptive silencer, was proposed and its high performance in the low-frequency range was also verified.

1. 서 론

중속(medium speed) 디젤 엔진은 선박, 해양구조물 및 육상 발전 설비 등 높은 출력이 요구되는 곳에 다양한 용도로 많이 사용되고 있다. 특히 선박의 경우 디젤 발전기로서 기관실 내에 탑재되고 있으며, 선박 연돌(funnel) 상단의 디젤 엔진 배기구에서 방사되는 배기 소음은 선박 소음 측면에서 상당히 중요한 소음원 중 하나로 간주되고 있다.

또한, 최근에는 중속 디젤 엔진이 육상 발전용으로 많이 설치되고 있으며, 주변 주거지역에서의 환경 소음 문제로 인하여 엔진 배기소음이 큰 문제로

지적되고 있다.

디젤 엔진 배기소음 저감을 위하여 배기단에 소음기(silencer)를 장착하고 있으나, 대부분의 경우 스피커 작동시의 성능시험 결과를 토대로 설계된 것으로서 실제 디젤 엔진에 탑재시 소음 저감 효과가 기대에 못 미치는 경우가 많다.

이러한 현상은 약 35 m/s에 이르는 배기가스의 유동에 의해 발생하는 유동소음에 의한 소음기의 성능 저하 때문인 것으로 추정되고 있다⁽¹⁾.

배기소음에서 주로 문제가 되는 성분은 엔진 폭발 차수 성분(firing order)에 해당하는 저주파수 대역의 소음이다. 저주파수 대역 소음 제어는 소음기의 크기 및 배압 등의 제한에 의해 기존에 많이 사용되고 있는 단순 팽창형 또는 흡음형 소음기로 저감하는데 한계가 있다.

저주파수 대역의 소음 제어에는 공명기(resonator)가 효과적인 것으로 알려져 있다. 공명기는 특정 주

* 교신저자; 정희원, 현대중공업 진동소음연구실

E-mail : hyun@hhi.co.kr

Tel : (052)202-3066, Fax : (052)202-5495

* 현대중공업 진동소음연구실

** 현대중공업 기술개발본부

과수 영역에서는 비교적 효과적인 소음 제어 성능을 발휘하지만, 그 제어 주파수의 폭이 매우 좁다는 단점을 지니고 있다.

이 연구에서는 공명기가 지닌 좁은 제어 주파수 영역의 단점을 극복하면서 효과적으로 저주파수 대역을 포함하여 전 영역에서 소음을 저감할 수 있는 디젤 엔진 소음기를 설계하였다. 그리고, 엔진의 배기단에 설치되는 소음기의 특수성, 즉 유동 효과를 고려하기 위해서 쉘을 이용한 시험 장치를 구성하여 실제 덕트 내부에 빠른 속도의 유동을 불어넣으면서 다양한 소음기 성능 시험을 수행하였다. 또한 저주파수 대역의 효과적인 소음 제어를 위해 서로 다른 지름의 공명기를 원주 방향과 덕트 길이 방향으로 적절히 조합한 공명기 배열을 통하여 디젤 엔진 소음기의 저주파수 대역 소음 저감 성능을 향상시키는 연구를 진행하였다.

2. 소음기 성능 시험 장치 구성

유동을 고려한 소음기 성능 시험을 위하여 Fig. 1과 같이 시험장치를 구성하였다. 시험장치는 공기음 가진을 위한 스피커, 유동 발생을 위한 구동 쉘, 소음기 및 덕트로 구성되며 총 4지점에서 음압을

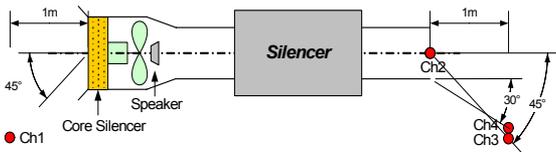


Fig. 1 Schematic diagram of exhaust silencer acoustic test facility



Fig. 2 Exhaust silencer test facility

계측할 수 있도록 하였다. 구동 쉘의 경우, 디젤 엔진의 배기가스에 의한 유동 효과를 반영하기 위해서 최대 40 m/s의 유동이 발생할 수 있도록 시험장치를 구성하였다. 또한 쉘 앞 단에 코어 소음기를 장착하여서 쉘 소음에 의한 잡음을 최소화하여 시험의 정확성을 높였다.

구동 쉘을 인버터와 연결시켜서 쉘의 회전수를 변경시킬 수 있도록 시험 장치를 구성하여 다양한 유속 상태에서 소음기의 특성 파악이 가능하도록 하였다.

소음기 성능 파악을 위한 소음 계측은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다. 우선 소음기의 성능을 파악하기 위하여 스피커로 공기음을 가진하고, 각 위치의 음압을 소음기 설치 전·후에 대하여 각각 계측하고 삽입 손실(insertion loss, IL)을 계산하였다⁽²⁾. 이를 통하여 유동의 효과가 배제된 소음기의 성능을 파악하는 한편, 유동의 효과를 파악하기 위해서 인버터 구동 쉘을 작동시켜 같은 방법으로 삽입 손실을 계측하였다. 또한 보다 면밀히 유동의 효과를 고찰하기 위해서 구동 쉘의 주파수 변경에 따라 유속을 조절하면서 시험을 수행하였다. 최종적으로 구성된 시험 장치의 외관은 Fig. 2와 같다.

3. 기존 소음기 성능 파악 시험

저자가 근무하고 있는 회사에서 현재 사용되고 있는 디젤 엔진 소음기에 대하여 삽입 손실을 계측하여 소음 저감 성능을 평가하였다. 소음기는 일반적인 흡음형 소음기로서 길이 약 3.4 m, 직경 0.7 m 인 원형이다. Fig. 1의 ch3에서의 계측된 음압을 이용하여 삽입 손실을 계산한 결과는 Fig. 3과 같다.

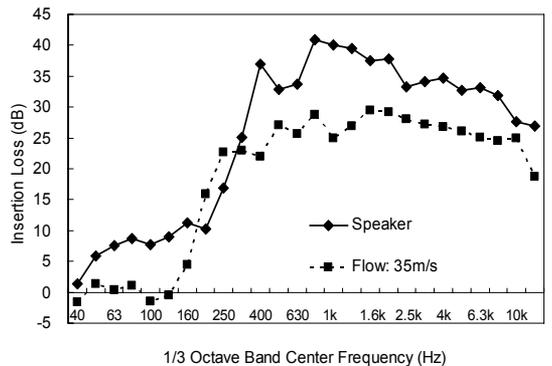


Fig. 3 Insertion loss of absorptive silencer

삽입 손실 계측 결과, 유동 소음 없이 스피커로 가진한 경우 약 27 dB, 유동 소음 가진 시 19 dB로 유동에 의해 약 8 dB의 삽입 손실 차를 확인하였다.

스피커 시험 결과를 살펴보면, 흡음형 소음기의 특성인 고주파수 영역에서 소음 감소 효과가 우수한 것을 확인할 수 있다. 삽입 손실 값은 500 Hz 이상의 주파수 대역에서 높은 값을 보이며 상대적으로 100 Hz 이하의 저주파수 대역에서는 약 6 dB 정도로 낮은 값을 보인다.

유동이 존재하는 경우의 삽입손실 결과를 살펴보면 스피커 가진시의 값보다 전반적으로 값이 낮음을 확인할 수 있다. 이로서 유동으로 인해서 소음기의 흡음 성능이 제대로 발휘가 되지 않고 있다는 사실을 파악할 수 있다.

결론적으로 현재 쓰이고 있는 일반적인 흡음형소음기로는 엔진 폭발 성분과 관련된 저주파수 대역에서 효과적인 소음 제어가 힘들며, 이에 대한 성능 개선이 절실히 요구된다고 할 수 있다.

4. 개선 소음기 도출 및 성능 시험

4.1 성능 개선 방안 검토

소음기의 성능을 나타낼 때 많이 사용되는 투과 손실(transmission loss, TL)은 단순 확장형 소음기인 경우 평면파만 고려할 때 식(1)과 같이 간단하게 표현된다. 식(1)로부터 소음기의 길이를 최적으로 선정하면 원하는 주파수에서 최대의 투과손실을 얻을 수 있으며, 투과손실의 크기는 단면적의 비에 비례한다는 것을 알 수 있다. 즉, 소음기의 직경을 크게 하면 소음기의 성능을 향상시킬 수 있다.

$$TL = 10 \log \left[1 + \frac{1}{4} \left(m + \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kL \right] \quad (1)$$

where m = ratio of cross-sectional areas
 L = length of silencer
 k = wave number

이와 같은 단순확장형 소음기를 이용한 방법은 비교적 간단한 형상 변경을 통해 손쉽게 저감 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있는 반면, 소음기의 부피가 커지는 단점이 있다. 특히 디젤 엔진 소음기의 경우 현장에서 설치 여건이나 엔진 배치 등의

문제로 소음기의 설치 공간은 매우 제한적이다.

저주파수 대역에서의 성능 향상을 위한 두번째 방법은 공명기를 이용하는 것이다. Fig. 4와 같은 공명기의 경우, 1, 2지점에서 음압과 속도는 식(2)와 같은 관계에 있으며, 이로부터 투과 손실은 식(3)과 같이 표현된다.

공명기가 원주 방향, 또는 덕트 길이방향으로 연속적으로 배열된 경우에는 식(2)의 전달 행렬(transfer matrix)의 곱을 통하여 공명기 배열에 대한 투과 손실을 확장하여 계산할 수 있다^(3,4).

$$\begin{pmatrix} P_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{-jZ_c \cot kh + Z_h} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_2 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

where $Z_c = \rho c / S_c$

$$Z_h = \frac{\rho c}{S_h} [0.0072 + jk(l + 0.75)]$$

$$S_h = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{A}{C} \right|$$

$$= 20 \log_{10} \left| \frac{2 + Z \left(\frac{1}{-jZ_c \cot kh + Z_h} \right)}{2} \right| \quad (3)$$

공명기의 경우는 덕트 내부에 설치 해야 하므로 비교적 제한된 공간 내에서 저주파수 소음 제어가 가능하지만, 제어 주파수의 범위가 좁으므로 소음기의 원래 목적인 광대역 소음 제어에는 효과적이지 않다는 단점이 있다.

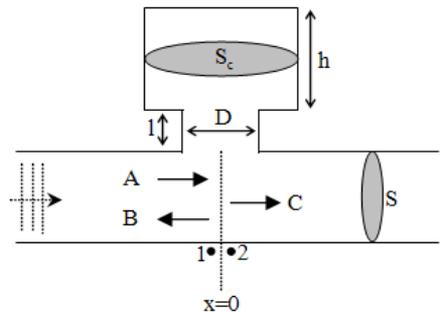


Fig. 4 Helmholtz resonator

4.2 개선 소음기 모델 도출

(1) 공명기 배열 성능 평가

소음기의 개선을 위하여 실현 가능한 방안에 대해서 이론적, 실험적으로 검토해 본 결과 최종적으로 공명기 배열을 이용하여 저주파수 대역의 소음 저감 성능을 향상시키는 것이 가장 효과적임을 확인하였고, 이에 대한 연구를 수행하였다. 먼저 공명기 배열의 효과를 파악하기 위해서 Table 1과 같은 공명기 배열을 갖는 소음기를 제작하였다. 제작된 소음기의 모습은 Fig. 5와 같으며, 소음기의 소음 저감 성능을 파악하기 위하여 스피커와 유동 시험을 통하여 삽입 손실을 측정하였다.

Fig. 5의 공명기 배열 모델은 공명기들 간의 구획을 구분해주는 격벽이 설치되지 않았다. 이는 현실적으로 용접을 통해서 좁은 간격을 지닌 공명기들 사이에 격벽을 제작하기 매우 어렵다는 생산 측면을 고려한 것이다. 즉, 격벽이 없는 경우에도 개별 공명기에 대응하는 음장이 마치 구획이 있는 것처럼 거동할 것이라는 가상 구획이라는 개념을 적용한 것이다.

결과를 살펴보면, 스피커로 가진 한 경우 315 Hz에서 약 25 dB의 소음 저감 성능을 보이며, 유동 존재 시 약 15 dB의 삽입 손실 값을 지니는 것을 확인할 수 있다. 이론에 의해 계산한 공명기 배열 부분의 투과 손실 해석 결과와도 비교적 유사한 경향을 확인하였다. 따라서 공명기들 구획을 구분하는 격벽이 없는 경우에도 구획이 있는 것과 유사할 것이라는 가상 구획 개념이 타당하다는 것을 알 수 있다.

이로서 공명기 배열을 이용하면 특정 저주파수 대역을 포함하여 비교적 넓은 제어 주파수에 걸쳐서 소음을 저감할 수 있음을 확인하였다.

(2) 공명기 배열 변경에 따른 소음저감성능 파악

공명기 배열의 변경에 따른 소음저감 성능의 변화 양상을 파악하기 위해 Table 2와 같이 공명기 배열의 개수를 변경하여 제어주파수를 변경시킨 경우에 대하여 삽입 손실을 측정하였다.

Case 2는 Case 1과 비교하여, 원주 방향으로의 분포는 동일하나, 길이방향으로 공명기 배열을 많이 분포시킨 것으로 삽입 손실 측정 결과를 통해 공명기 배열의 길이방향 분포 시 소음저감 특성을 파악할 수 있다. 측정 결과는 Fig. 7과 같다.

Table 1 Specification of array resonator

Hole array	Resonance freq.(Hz)
Φ23, n _θ =10, n _x =5	170
Φ60, n _θ =10, n _x =3	240
Φ120, n _θ =10, n _x =2	300

* n_θ=circumferential hole no., n_x=radial hole no

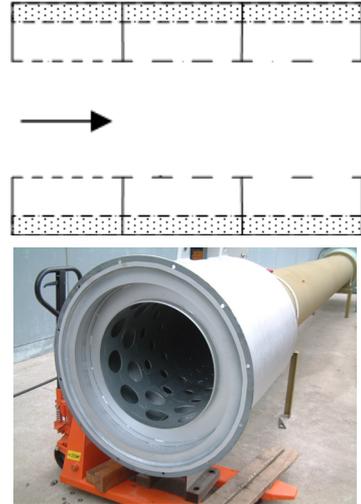


Fig. 5 Array resonator

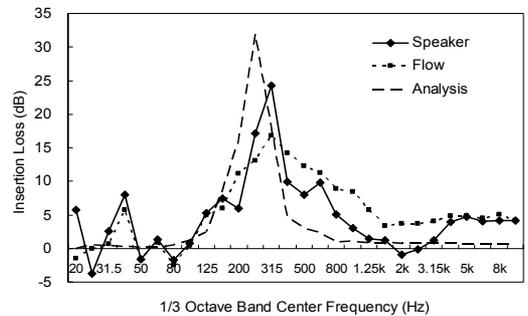


Fig. 6 Comparison of IL of array resonator

공명기의 배열을 길이방향으로 분포시켜 제어주파수가 250~300 Hz 대역으로 증가함에 따라서 삽입 손실이 해당 주파수 영역에서 약 10 dB 증가한 것을 확인할 수 있으며, 제어 주파수의 밴드폭도 상당히 넓게 분포하고 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여 공명기 배열을 덕트 길이방향으로 분포시킬 경우, 일반적인 공명기가 지닌 좁은 제어 주파수의 문제점을 극복할 수 있을 것으로 기대된다. 공명기의 지름을 변경함에 따른 소음 저감 특성을 파악하기 위해서 Table 3과 같은 공명기 배열 변경 시험을 수행하였다.

Table 2 Increase of longitudinal hole number in the array resonator

	Hole array	Resonance freq.(Hz)
Case 1	$\Phi 23, n_{\theta}=10, n_x=1$	66
	$\Phi 60, n_{\theta}=10, n_x=1$	113
	$\Phi 120, n_{\theta}=10, n_x=1$	161
Case 2	$\Phi 23, n_{\theta}=10, n_x=5$	170
	$\Phi 60, n_{\theta}=10, n_x=3$	240
	$\Phi 120, n_{\theta}=10, n_x=2$	300

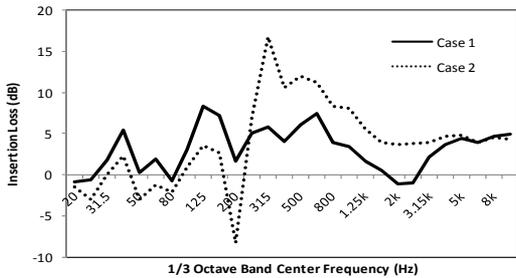


Fig. 7 Comparison of IL_{flow} according to the modification of array resonator

Table 3 Modification of hole diameter in the array resonator

	Hole array	Resonance freq.(Hz)
Case 1	$\Phi 23, n_{\theta}=10, n_x=5$	170
	$\Phi 60, n_{\theta}=10, n_x=3$	240
	$\Phi 120, n_{\theta}=10, n_x=2$	300
Case 2	$\Phi 23, n_{\theta}=10, n_x=5$	170
	$\Phi 60, n_{\theta}=10, n_x=3$	240
	$\Phi 90, n_{\theta}=10, n_x=1$	290
	$\Phi 120, n_{\theta}=10, n_x=1$	290

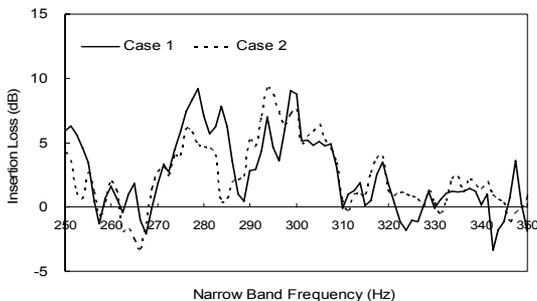


Fig. 8 Comparison of IL_{flow} according to the modification of array resonator

Case 2는 Case 1과 비교하였을 때, $\Phi 90$ 인 공명기 배열이 추가됨에 따라서 제어주파수가 300 Hz에서 290 Hz로 변경된 것으로 삽입 손실 계측 결과는 Fig. 8과 같다.

결과를 살펴보면, 홀의 지름이 변경됨에 따라서

제어주파수가 300 Hz에서 290 Hz로 변경됨을 확인할 수 있다. 이를 통하여, 공명기의 홀의 지름변경을 통해서 제어주파수를 자유롭게 변경할 수 있는 가능성을 확인하였다.

(3) 공명기 배열을 이용한 개선 소음기 도출

이상과 같이 공명기 배열에 대하여 각각도로 검토해 본 결과 최종적으로 Fig. 9와 같이 가상 구획으로 구분되는 공명기 배열과 흡음형 소음기를 결합시킨 형태의 조합형 소음기(hybrid silencer)를 개선 소음기로 도출하였다.

개선 소음기의 형상을 살펴보면, 소음기 전반부는 저주파수 대역의 소음 저감 성능 향상을 위하여 공명기 배열을 배치하였고, 후반부는 일반적인 흡음형 소음기의 구조에 흡음 코어를 중앙에 설치한 것이다. 흡음 코어는 전반부의 공명기 배열에 의해 손실될 수 있는 흡음 성능을 보완하고자 시도하였다. 특히 공명기 배열에 있어서 다양한 지름의 공명기를 원주방향과 길이방향으로 배치하여 비교적 넓은 주파수 대역에서 소음 저감 성능이 발휘할 수 있도록 설계하였다.

4.3 개선된 조합형 소음기 성능 시험

(1) 개선된 조합형 소음기 성능 시험

Fig. 9에 나타난 개선된 조합형 소음기에 대하여 삽입 손실 계측을 통한 성능 평가가 수행되었다. 3장과 동일한 방법으로 삽입손실 계측을 수행하였고, 결과는 Fig. 10과 같다.

삽입 손실 계측 결과, 전체 삽입 손실은 약 11 dB로 오히려 기존 소음기 12 dB와 비교 시 성능이 오히려 나쁘게 평가되었다. 이에 대한 원인을 파악하여 개선하기 위하여 다음과 같이 흡음 코어의 제거에 대한 추가 시험을 수행하였다.

(2) 개선된 조합형 소음기 흡음 코어 제거

개선된 조합형 소음기의 삽입 손실이 감소한 주원인을 분석한 결과, Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 63 Hz 및 160 Hz 대역 삽입 손실의 감소에서 기인한 것으로 분석되었고, 이는 빠른 유동으로 인해 덕트 내부의 흡음 코어에서 발생한 유동 소음이 그 원인으로 판단되어 흡음 코어를 절단하여 제거한 후 동일한 시험을 수행하였다. 이때 삽입 손실 계측

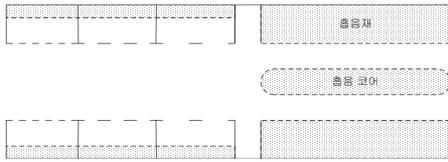


Fig. 9 Hybrid silencer

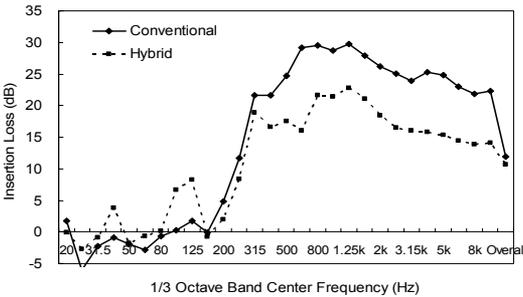


Fig. 10 IL_{flow} of hybrid silencer

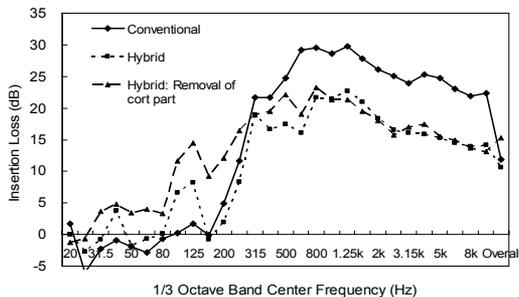


Fig. 11 Comparison of IL_{flow} of hybrid silencer

결과는 Fig. 11과 같다.

흡음 코어 제거 시 측정된 삽입 손실을 보면, 63 Hz 및 160 Hz 대역 근방의 값이 증가한 것을 확인

할 수 있다. 이로써 흡음 코어의 경우, 유동이 존재하는 덕트에 설치되는 경우 오히려 유동 소음의 추가 발생으로 소음 저감 성능이 감소할 수 있다는 사실을 확인하였다. 유동을 고려한 흡음 코어 제거 시 삽입 손실 측정 결과는 15 dB로 흡음 코어 존재 시의 11 dB보다 약 4 dB 소음 성능 향상을 나타낸다. 최종적으로 흡음 코어를 제거한 개선된 조합형 소음기에 의해 저주파수 대역에서 기존 소음기보다 약 5~10 dB의 성능 향상을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 중속 디젤 엔진 소음기의 저주파수 대역 성능 향상을 위해서 유동을 고려한 소음기의 삽입 손실을 측정할 수 있는 소음기 시험 장치를 구성하고, 유동 효과 및 공명기 배열을 통한 저주파수 소음 제어 등 일련의 소음 시험을 수행하였다. 이를 통해 저주파수 대역인 디젤 엔진 폭발 차수 성분을 효과적으로 제어할 수 있는 방안으로 가상구획으로 구분되는 공명기 배열을 갖는 공명형 소음기와 흡음형 소음기를 결합시킨 조합형 소음기를 제안하였으며, 이는 향후 디젤 엔진의 저소음화에 크게 기여할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, T.-K., Joo, W.-H. and Bae, J.-G., 2008, "Exhaust Noise Control of Diesel Engine Using Hybrid Silencer," Inter-noise 2008.
- (2) Lee, S.-H., Ih, J.-G. and Choi, W.-Y., 2005, "The Acoustic Performance Measurement of Silencers in Reflective Field," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 625~628.
- (3) Seo, S.-H. and Kim, Y.-H., 2005, "Silencer Design by Using Array Resonators for Low-frequency Band Noise Reduction," J.Acoust. Soc. Am. Vol. 118, No. 4, pp. 2332~2338.
- (4) Seo, S.-H. and Kim, Y.-H., 2004, "Acoustic Characteristics of a Silencer by Using Array Resonators," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 10, pp. 975~982.