공명기 배열을 이용한 디젤엔진 소음기의 저주파수 대역 성능 개선 연구

A Study on the Improvement of Acoustic Performance of Diesel Engine Exhaust Silencer in the Low-Frequency Range using Array Resonators

이태경† 김영현* 주원호* 배종국*
Tae-Kyung Lee, Young-Hyun Kim, Won-Ho Joo and Jong-Gug Bae

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, test equipment composed of fan, duct and silencer was set up. Using the test equipment, insertion loss tests were carried out to improve the performance in the low-frequency ranges. Through a series of tests, the fact that array resonators may be effective in the low-frequency noise has been verified. Consequently, the hybrid-type silencer which is the combination of reflective silencer with array resonators and conventional absorptive silencer were proposed and its high acoustic performance in the low-frequency range has also been verified.

1. 서 론

중, 대형 디젤 엔진은 선박의 주기관, 발전기 등 높은 출력이 요구되는 곳에 다양한 용도로 많이 사용되어 왔으며, 최근 중형 디젤 엔진의 경우 육상 발전용으로 설치가 많이 되고 있다. 이렇게 육상 발전용으로 설치 되는 경우 가장 큰 문제로 지적되는 것 중 하나는 디젤 엔진의 배기소음에 의한 주변 주거지역의 환경 소음 문제이다.

디젤 엔진의 경우 배기구 끝단의 소음 수준이 약 130dB 로 매우 높기 때문에 배기 소음 제어는 중요하며, 많은 경우 소음기(silencer)를 장착하여 소음 저감을 하고 있다.

하지만 디젤 엔진 배기 가스의 경우 최대 35m/s 의 빠른 유속을 지니고 있기 때문에 일반적으로 소음기의 성능이 제대로 발휘되지 못하는 경우가 많다. 또한 배기 가스로 인한 유동 소음 문제뿐만이 아니라, 엔진 폭발 성분(firing order)으로 이루어지는 저주파수 대역의 소음 성분들은 단순 팽창, 흡음형 소음기로 저감하는 데는 한계가 있다.

일반적으로 저주파수 대역 소음 제어를 위해 공명기(resonator)를 많이 사용하고 있지만, 이 또한 특정 주파수 영역에서는 비교적 효과적인 소음 제어 성능을 발휘하지만, 그 제어 주파수의 폭이 매우 좁다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 공명기가 지닌 좁은 제어 주파수 영역의 단점을 극복하면서 효과적으로 저주파수 대역의 소음을 저감할 수 있는 디젤 엔진 소음기를 설계하고, 엔진의 배기단에 설치되는 소음기의 특수성, 즉 유동 효과를 고려하기 위해서 팬을 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 Figure 1 과 같이 시험장치를 구성하였다. 시험장치는 공기음 가진을 위한 스피커, 유동 발생을 위한 구동 팬, 소음기 및 덕트로 구성되며 총 4 지점에서 음압을 계측할 수 있도록 하였다. 구동 팬의 경우, 디젤 엔진의 배기가스에 의한 유동 효과를 반영하기 위해서 최대 40m/s 의 유동이 발생할 수 있도록 시험장치를 구성하였다. 또한 팬 앞단에 코어 소음기를 장착하여서 팬 소음에 의한

† 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실
E-mail : tklee05@hhi.co.kr
Tel : (052) 202-7402, Fax : (052) 202-5495
* 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실

잡음을 최소화하여 시험의 정확성을 높였다.

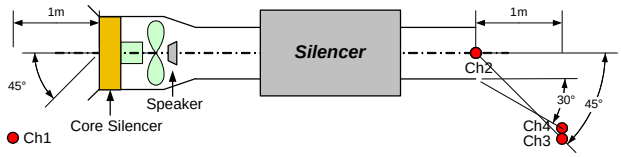


Figure 1 소음기 시험 장치 개념도

구동 팬을 인버터와 연결시켜서 분당 회전수(RPM)를 변경시킬 수 있도록 구성하여 다양한 유속 분포 시 소음기의 특성 파악이 가능하도록 하였다.

소음기 성능 파악을 위한 계측은 다음과 같은 과정으로 이루어졌다. 우선 소음기의 성능을 파악하기 위하여 스피커로 공기음 가진을 가진하고, 각 위치의 음압을 소음기 설치 전, 후에 대하여 각각 계측하고 삽입 손실을 계산하였다. 이를 통하여 유동의 효과가 배제된 소음기의 성능을 파악하는 한편, 유동의 효과를 파악하기 위해서 인버터 구동 팬을 작동시켜 같은 방법으로 삽입 손실을 계측하였다. 또한 보다 면밀히 유동의 효과를 고찰하기 위해서 구동 팬의 주파수를 변경시켜 유속을 조절하여 시험을 수행하였다. 최종적으로 구성된 시험 장치의 모습은 Figure 2 와 같다.

Figure 2 소음기 시험 장치

3. 기존 소음기 성능 파악 시험

당사에서 현재 사용되고 있는 디젤 엔진 소음기에 대하여 삽입 손실을 계측하여 소음 저감 성능을 평가하였다. 소음기는 일반적인 흡음형 소음기로서 길이 약 3.4m, 직경 0.7m 인 원형의 소음기이다. Figure 1 의 ch3 에서의 계측된 음압을 이용하여 계산된 삽입 손실 결과는 Figure 3 과 같다.

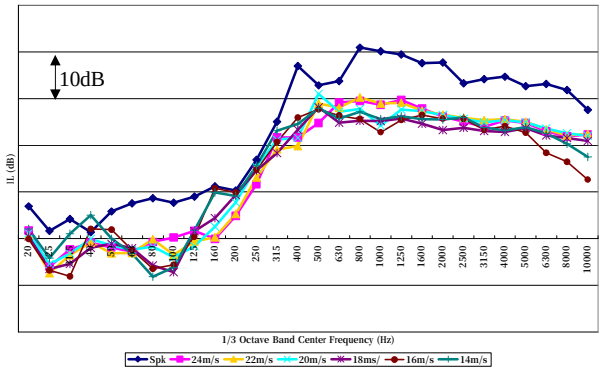


Figure 3 디젤엔진 소음기의 삽입 손실 결과

삽입 손실 계측 결과, 유동이 존재하지 않은 경우 약 19dB, 유동 존재 시 약 12dB 로 유동에 의해 약 7dB 의 삽입 손실 감소를 파악하였다.

우선 스피커 시험 결과를 살펴보면, 흡음형 소음기의 특성인 고주파수 영역에서 소음 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다. 삽입 손실 값은 500Hz 이상의 주파수 대역에서 높은 값을 보이며 100Hz 이하의 저주파수 대역에서는 약 6dB 정도의 작은 삽입손실 값을 지님을 알 수 있다.

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

결론적으로 현재 쓰이고 있는 일반적인 흡음형 소음기로는 적절한 소음 제어가 이루어지기 힘들며, 특히 엔진 폭발 성분을 비롯한 저주파수 대역의 소음기 성능향상이 필요하다 할 수 있다.

4. 개선 소음기 도출 및 성능 시험

4.1 성능 개선 방안 검토

저주파수 대역의 성능 향상을 위한 개선 방안이 검토되었다. 저주파수 대역의 삽입 손실을 증가시키는 방법은 일반적으로 소음기 단면적 비를 증가시키는 방법과 공명기를 이용한 방법이 알려져 있다.

먼저 소음기의 단면적 비를 증가시키는 방법으로, 단면적에 의한 임피던스 부정합 현상(impedance mismatching) 이용하여 소음을 저감시키는 방법으로 식(1)에서 m 값을 증가시키는 방법이다.

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

where m = ratio of cross-sectional areas

L = length of silencer

k = wave number

이러한 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 설치 현장의 사정이나 엔진 배치 등의 문제로 소음기의 부피가 무한정 커지는 것에 제약이 있을 수 있다.

저주파수 대역에서의 성능 향상을 위한 두번째 방법은 공명기를 이용하는 것이다. Figure 4 와 같은 공명기의 경우, 1, 2 지점에서 음압과 속도의 연속성을 이용하면 투과 손실(Transmission loss)을 식(3)과 같이 구할 수 있다.

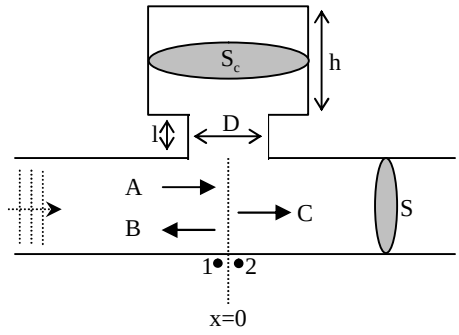


Figure 4 헬름홀쯔 공명기

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

where $Z_c = rc/S_c$

$$Z_h = \frac{rc}{S_h}\left[0.0072 + jk(l+0.75)\right]$$

$$TL = 20\log_{10}\left|\frac{A}{C}\right| = 20\log_{10}\left|\frac{2+Z\left(\dfrac{1}{-jZ_c \cot kh + Z_h}\right)}{2}\right| \qquad \text{식(3)}$$

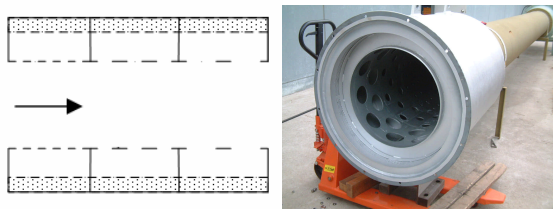
공명기가 원주 방향, 또는 덕트 길이방향으로 연속적으로 배열된 경우에는 식(2)의 전달 행렬(transfer matrix)의 곱을 통하여 공명기 배열에 대한 투과 손실을 확장하여 계산할 수 있다[2].

공명기의 경우는 덕트 내부에 설치가 가능하기 때문에 비교적 작은 부피의 증가로 저주파수 소음 제어가 가능하지만, 제어 주파수의 범위가 좁으므로 넓은 주파수 대역 소음 제어에는 효과적이지 않다는 단점이 있다.

4.2 개선 소음기 모델 도출

(1) 공명기 배열 성능 평가

개선 소음기 모델의 도출을 위하여 다각도로 여러 방안에 대해서 이론적, 실험적으로 검토해 본 결과 최종적으로 가상 구획으로 구분되는 공명기 배열을 이용하여 저주파수 대역의 소음 저감 성능을 향상시키는 것으로 연구를 진행하였다. 먼저 공명기 배열의 효과를 파악하기 위해서 Figure 5 와 같이 가상 구획으로 구분되는 공명기 배열을 갖는 덕트를 제작하여 스피커와 유동 시험을 통하여 삽입 손실을 계측하였다.



공명기 배열	제어 주파수 (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=원주방향 홀 개수, n_x=길이방향 홀 개수

Figure 5 공명기 배열 시험 모델

공명기 배열 모델을 살펴보면, 공명기들 간의 구획을 구분해주는 격벽이 모두 설치가 되지 않음을 알 수 있다. 이는 현실적으로 용접을 통해서 좁은 간격을 지니는 공명기들 사이에 격벽을 제작하기 매우 어렵다는 생산 측면에서의 문제점을 해결하고, 격벽이 없는 경우에도 개별 공명기에 대응하는 음장이 마치 구획이 있는 것처럼 거동할 것이라는 가상 구획이라는 개념을 도입한 것이다.

공명기 배열에 대한 삽입 손실 계측 결과는 Figure 6 과 같다.

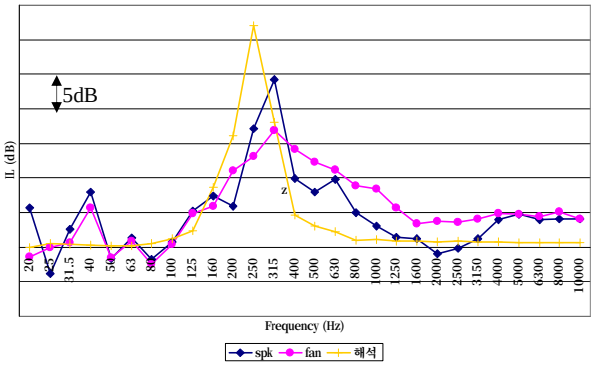


Figure 6 공명기 배열 삽입 손실

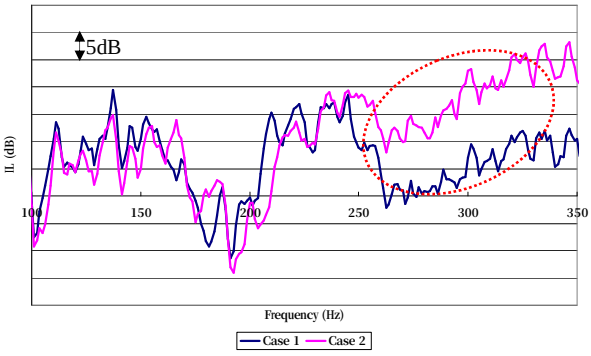


Figure 7 공명기 배열 길이 방향 추가

결과를 살펴보면, 스피커로 가진 한 경우 315Hz 에서 약 25dB 의 소음 저감 성능을 보이며, 유동 존재 시 약 15dB 의 삽입 손실 값을 지니는 것을 확인할 수 있다. 이론에 의해 계산한 공명기 배열 부분의 투과 손실 해석 결과와도 비교적 유사한 경향을 보임을 확인하였다. 이로서 공명기 배열을 이용하면 특정 저주파수 대역에서 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 1 과 같이 공명기 배열을 변경하면서 삽입 손실을 계측하였다.

Table 1 공명기 배열 변경 (길이방향 분포)

	공명기 배열	제어주파수(Hz)
Case 1	Φ23, n_θ=10, n_x=1 Φ60, n_θ=10, n_x=1 Φ120, n_θ=10, n_x=1	66 113 161
Case 2	Φ23, n_θ=10, n_x=5 Φ60, n_θ=10, n_x=3 Φ120, n_θ=10, n_x=2	170 240 300

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

공명기의 배열을 길이방향으로 분포시켜 제어주파수가 250~300Hz 대역으로 증가함에 따라서 삽입 손실이 해당 주파수 영역에서 약 10dB 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 2 와 같은 공명기 배열 변경 시험을 수행하였다.

Table 2 공명기 배열 변경 (홀 지름 변경)

	공명기 배열	제어주파수(Hz)
Case 1	Φ23, n_θ=10, n_x=5 Φ60, n_θ=10, n_x=3 Φ120, n_θ=10, n_x=2	170 240 300
Case 2	Φ23, n_θ=10, n_x=5 Φ60, n_θ=10, n_x=3 Φ90, n_θ=10, n_x=1 Φ120, n_θ=10, n_x=1	170 240 290

Case2 는 Case 1 과 비교하였을 때, Φ90 인 공명기 배열이 추가됨에 따라서 제어주파수가 300Hz 에서 290Hz 로 변경된 것으로 삽입 손실 계측 결과는 Figure 8 과 같다.

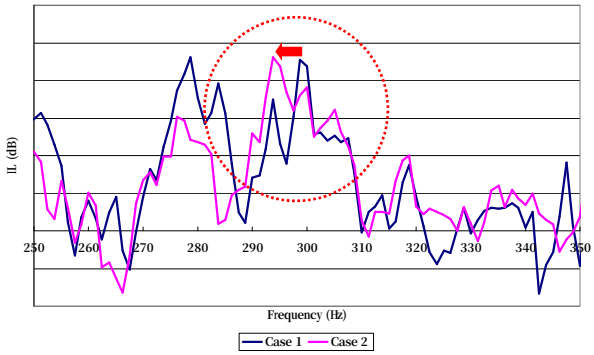


Figure 8 공명기 홀 지름 변경

결과를 살펴보면, 홀의 지름이 변경됨에 따라서 제어주파수가 300Hz 에서 290Hz 로 변경됨을 확인할 수 있다. 이를 통하여, 공명기의 홀의 지름 변경을 통해서 제어주파수를 자유롭게 튜닝할 수 있는 가능성을 확인하였다.

(3) 공명기 배열을 이용한 개선 소음기 도출

이상과 같이 공명기 배열에 대하여 다각도로 검토해 본 결과 최종적으로 Figure 9 와 같이 가상 구획으로 구분되는 공명기 배열을 이용하여 저주파수 대역의 소음 저감 성능을 향상시키는 것으로 개선 소음기의 방향을 확정하였다.

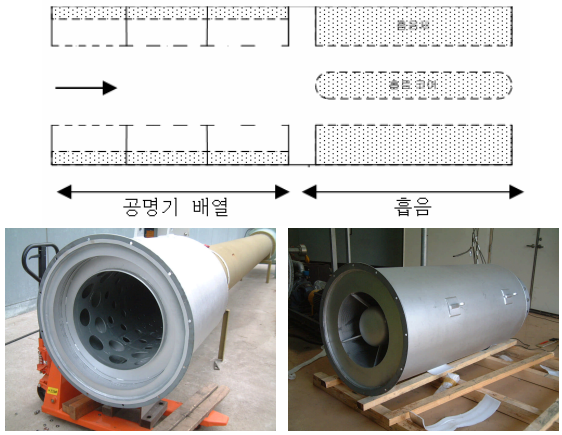


Figure 9 개선 소음기 형상

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 원주 방향과 길이방향으로 배치하여 비교적 넓은 주파수 대역에서 소음 저감 성능이 발휘할 수 있도록 설계하였다.

4.3 개선 소음기 성능 시험

(1) 개선 소음기 성능 시험

Figure 9 에 나타난 개선 소음기에 대하여 삽입손실 계측을 통한 성능 평가가 수행되었다. 3 장과 동일한 방법으로 삽입손실 계측을 수행하였고, 결과는 Figure 10 과 같다.

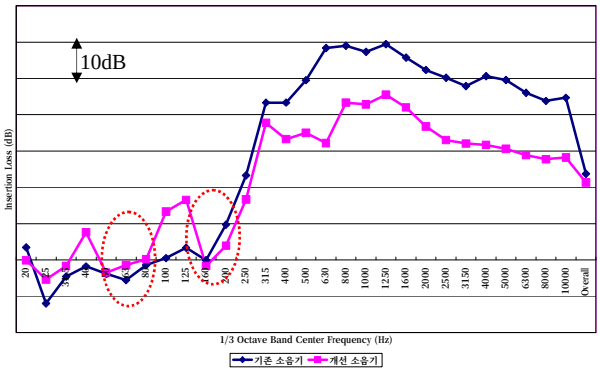


Figure 10 개선 소음기 삽입 손실

삽입 손실 계측 결과, 전체 삽입 손실은 약 11dB 로 오히려 기존 소음기 12dB 와 비교 시 성능이 나쁘게 평가되었다. 이에 대한 원인을 파악하기 위해 많은 검토를 거친 결과, 다음과 같이 흡음 코어의 제거에 대한 추가 시험을 진행하였다.

(2) 개선 소음기 흡음 코어 제거

개선소음기의 삽입 손실이 감소한 주원인을 분석한 결과, Figure 10 에서 확인할 수 있듯이 63Hz 및 160Hz 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. 삽입 손실 계측 결과는 Figure 11 과 같다.

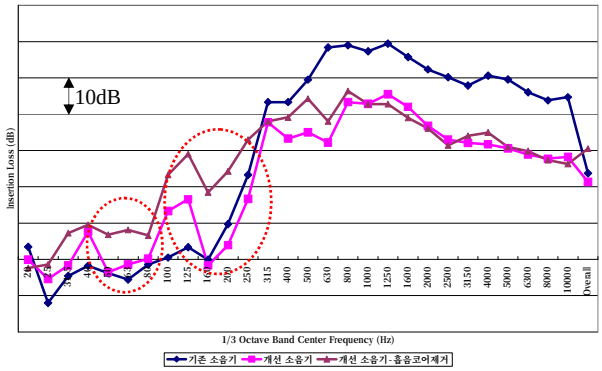


Figure 11 최종 개선 소음기 삽입 손실 비교

흡음 코어 제거 시 계측된 삽입 손실을 보면, 63Hz 및 160Hz 대역 근방의 값이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이로서 흡음 코어의 경우, 유동이 존재하는 덕트에 설치되는 경우 오히려 유동 소음의 추가 발생으로 소음 저감 성능이 감소할 수 있다는 사실을 파악할 수 있다. 흡음 코어 제거 시 삽입 손실 계측 결과는 유동이 고려되었을 때 15dB 로 흡음 코어 존재 시의 11dB 보다 약 4dB 소음 성능 향상을 나타낸다. 최종적으로 개선 소음기에 의해 저주파수 대역에서 기존 대비 약 10dB 의 성능 향상을 확인할 수 있다.

5. 결 론

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

참고문헌

(1) 김영현, 주원호, 2007, "쿠바 UNE 공사용 디젤엔진 Silencer 의 성능 검증 및 향상, 연구보고서", 현대중공업 선박해양연구소 진동소음연구실.

(2) Sang-Hyun Seo, Yang-Hann Kim, 2005, "Silencer design by using array resonators for low-frequency band noise reduction", J.Acoust. Soc. Am. 118(4), pp. 2332 2338.

(3) 이성현, 이정권, 최원용, 2005, "반사파가 존재하는 음향장에서의 소음기의 음향성능 측정", 춘계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 625 628.