

입구와 출구의 중심이 일치하는 하이브리드 소음기 설계

Design of a Hybrid Silencer with Aligned Inlet and Outlet Centers

이 해 영* · 이 진 우†
Hae Young Lee* and Jin Woo Lee†

(Received May 8, 2025 ; Revised July 3, 2025 ; Accepted July 9, 2025)

Key Words : Hybrid Silencer(하이브리드 소음기), Noise Reduction(소음 저감), Pressure Drop(압력 차이), Acoustic Metamaterial(음향 메타물질), Generative Design Technique(생성적 설계 기법), Transmission Loss(투과 손실)

ABSTRACT

In this study, a hybrid silencer was designed to improve noise attenuation performance and fluidic characteristics. Generally, a silencer with aligned inlet and outlet centers is filled primarily with absorptive materials to attenuate incoming noise. However, this design results in high flow resistance, leading to reduced efficiency in internal combustion engines. Additionally, its noise reduction performance is significantly lower in the low-frequency range compared with the high-frequency range. To overcome the limitations of dissipative silencers, a hybrid silencer design strategy was proposed, replacing half of the absorptive material-filled space with a reactive silencer. The internal structure of the reactive silencer was based on acoustic metamaterials. To optimally determine the unit cells of the acoustic metamaterials, an acoustic shape optimization problem was formulated and solved using a generative design technique. The optimally designed reactive silencer was fabricated, and its improved noise attenuation performance and fluidic characteristics were experimentally validated in comparison with an existing dissipative silencer.

1. 서 론

덕트(duct)를 통해 외부로 배기 가스를 배출하는 기계 제품에서 발생되는 소음은 생활 환경뿐만 아니라 작업 환경에도 악영향을 줄 수 있는데, 심할 경우에는 작업자들의 청력을 손상시키기도 한다. 이런 소음 문제를 해결하기 위해, 내연 기관의 배기계에 소음기(silencer)를 장착하여 배출되는 소음의 크기를 줄이려고 한다⁽¹⁾. 이런 소음기의 내부를 효과적으로

설계하려는 연구자들의 노력은 굉장히 오래 전부터 꾸준히 진행되고 있다⁽²⁻⁷⁾. 소음기는 입사되는 소음을 반사시켜서 투과 소음을 줄이는 반사형 소음기(reactive silencer), 내부에 흡음재를 채워서 소리 에너지를 열 에너지로 변환하여 소음을 줄이는 흡음형 소음기(dissipative silencer)와 두 소음기를 함께 사용하는 하이브리드 소음기(hybrid silencer)로 나누어진다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 반사형 소음기는 소음 저감 성능을 높이기 위해 일반적으로 입구와 출구의 중심이 일치하지 않고 내부는 여러 개의 다공성 칸막이(perforated baffle)와

† Corresponding Author ; Member, Ajou University, Professor
E-mail : jinwoolee@ajou.ac.kr
* Member, Ajou University, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2025 Annual Spring Conferenc
‡ Recommended by Editor Cheolung Cheong
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

삽입관(tube)으로 구성되어 있다. 따라서, 유로가 복잡하고 칸막이와 삽입관의 배치와 구멍의 공극률에 따라 소음 저감 성능이 달라지므로, 목표 주파수 대역을 고려하여 칸막이와 삽입관의 치수를 최적으로 결정하여 제작하여야 한다. 이에 반해서, 흡음형 소음기는 다량의 흡음재를 내부에 넣어서 소음 저감을 도모하므로, 입구와 출구의 중심이 일치하는 경우에도 널리 사용된다⁽¹¹⁾. 상대적으로 제작은 용이하나 고주파수 대역에 비하여 저주파수 대역의 소음 저감 효과가 급격히 떨어진다. 그래서, 이 두 소음기의 특성을 적절히 혼합하여 체계적인 하이브리드 소음기의 설계 방법이 필요하다.

최근에 내부 구조를 단순화하면서 소음 저감 성능을 향상시키는 반사형 소음기에 대한 연구에서는 음향 메타물질을 이용해 소음 저감 주파수 대역을 넓은 다양한 결과들이 보고되고 있다⁽¹²⁻¹⁷⁾. 이런 연구 결과를 바탕으로 음향 메타물질과 흡음재를 함께 사용하여 소음을 줄이는 연구도 진행되고 있다⁽¹⁸⁻²⁰⁾. 따라서, 흡음형 소음기에 음향 메타물질을 이용한 반사형 소음기를 연결하여 고주파수 대역은 물론이고 저주파수 대역의 소음을 줄이면서도 유동 저항도 줄일 수 있는 입구와 출구의 중심이 일치하는 하이브리드 소음기를 설계하는 연구는 산업계의 소음기 개발 연구에 크게 기여할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 흡음형 소음기 전문 업체의 기존 소음기의 저주파수 대역 소음 저감 성능과 유동 저항을 동시에 개선할 수 있는 하이브리드 소음기를 구성하여, 실험으로 그 소음기의 음향과 유동 특성을 검증한다. 이를 위해, 보편적으로 사용되는 기존 흡음형 소음기의 부피를 길이 방향으로 1/2로 줄이고, 줄어든 공간에 음향 메타물질 기반의 반사형 소음기(이후, 반사형 소음기를 음향 메타소음기라고 지칭한다.)를 설계하여 연결한다. 음향 메타소음기를 설계하기 위해, 기존에 보고된 논문의 내부 구조를 음향 메타물질을 구성하는 단위체(unit cell)의 초기 형상으로 설정하여 음향 형상 최적화 문제를 정식화하고⁽²¹⁾, 생성적 설계 기법(generative design technique)을 이용하여 여러 개의 최적화 구조를 구한 후에 저주파수 대역의 소음을 크게 줄일 수 있는 단위체를 선정하여 음향 메타소음기 내부 구조를 결정한다. 설계된 음향 메타소음기와 같은 크기의 흡음형 소음기를 제작하여 음향과 유동 실험을 수행하여 그 특성을 비교하고,

이 두 소음기를 연결하여 구성한 하이브리드 소음기의 음향 특성도 실험으로 확인해 본다.

2. 음향 메타소음기 설계

2.1 설계 전략

음향 메타소음기는 일반적으로 동일한 내부 구조를 갖는 단위체를 연속적으로 배열하여 목표 소음 주파수 대역에서 높은 소음 저감 특성을 보이도록 설계된다⁽²⁰⁾. 일반적으로, 이 과정에서 음향 형상 최적화 문제를 정식화 하여 최적의 내부 구조를 구하는 노력이 동반된다. 그런데, 목표 주파수 대역이 저주파수로 내려갈수록 유효 주파수 대역이 좁아지고 소음 저감 성능도 감소된다⁽²¹⁾. 이런 단점을 극복하고, 저주파수 대역에서 유효 주파수 대역의 폭을 넓히면서 상당한 소음 저감 성능을 확보하기 위해 정식화 된 음향 형상 최적화 문제를 생성적 설계 기법을 이용하여 풀게 되면, 좀 더 다양한 내부 구조와 유효 주파수 대역의 단위체를 얻게 된다. 이렇게 얻어진 최적의 단위체들에 대해 추가적인 선택 기준을 적용하여 몇 개의 단위체를 선별하여 소기의 목표를 달성하는 음향 메타소음기를 설계하고자 한다.

Fig. 1은 이 연구에서 진행한 음향 메타소음기 설계 과정을 단계별로 정리한 것이다. 1단계에서는 단위체 설계를 위해서 음향 형상 최적 설계 문제를 정의한다. 단위체의 소음 저감 주파수 대역은 분산 곡선(dispersion curve)에서 쉽게 파악할 수 있는데⁽²²⁾, 동일한 단위체를 여러 개 배열하여 구성된 메타소음기의 소음 저감 성능은 투과 손실(TL: transmission loss) 곡선에서 파악할 수 있다⁽²³⁾. 일반적으로 분산 곡선의 밴드 갭과 투과 손실이 높은 값의 주파수 대역이 거의 일치한다^(24,25). 목표 소음 저감 주파수 대역의 하한값에서 첫 번째 밴드 갭(band gap)의 시작 주파수가 생성되면서, 그 폭이 가능한 넓어지도록 목적 함수와 제한 조건으로 구성된 음향 형상 최적 설계 문제를 정식화 한다. 2단계에서는 라틴 하이퍼 큐브 표본 추출(latin hypercube sampling) 방법을 사용하여 설계 변수의 초기값을 다양하게 구성한다⁽²⁶⁾. 이 연구에서는 50개의 초기 형상을 사용한다. 3단계에서는 이렇게 얻어진 50개의 초기 단위체에 대해 정식화 된 음향 형상 최적 설계 문제를 풀어서 많은 수의 최적 단위체를 얻는다. 4단계에서는 이렇게 얻어진 수많은

단위체 중에서 저주파수 대역의 소음 저감에 크게 기여할 수 있는 단위체를 선택한다. 5단계에서는 선택된 단위체들 중에서 실제로 소음기 내부에 장착되어 소음 저감에 크게 기여할 수 있는 단위체와 그 개수를 최종적으로 결정한다. 마지막 6단계에서는 최종 결정된 단위체들이 연결된 소음기를 제작한 뒤, 음향/유동 실험을 통해 설계 목표 달성 여부를 확인한다.

2.2 음향 형상 최적 설계 문제 정식화

Fig. 2는 음향 메타소음기의 내부를 구성하는 단위체의 단면을 보여 주고 있다⁽²¹⁾. 이 연구에서는 입구와 출구의 중심이 일치하면서 단면이 원(circle)인 확장방 소음기를 다루기에, 그림과 같은 축 대칭 모델에 대해 음향 해석과 설계를 진행한다. 이 연구에서는 Fig. 2를 단면으로 사용하지만, 소음 저감 성능만 개선할 수 있다면 다양한 내부 구조가 가능하다.

단위체 내부를 최적화하기 위한 음향 형상 최적화 문제의 목적 함수(F_1)와 제한 조건을 식 (1) ~ 식 (3)에 나타내었다. 식 (1)에서, f_i 과 f_u 는 각각 첫 번째 밴드

갭의 하한값과 상한값을 나타내고, f_i^{tar} 는 목표하는 밴드 갭의 시작 주파수이다. 각 항에 곱해진 가중치 (w_1 와 w_2)는 풀이 과정에서 구제화된다. 식 (2)에서, s_i^{low} 와 s_i^{upp} 는 설계 변수(s_i)의 하한값과 상한값을 나타내며, 식 (3)은 두께가 2 mm인 내부 구조물이 설계 영역 내부에만 존재하면서 서로 간섭하지 않도록 설계 변수 간에 설정한 제한 조건이다.

$$\text{Min } F_1 \tag{1a}$$

$$F_1 = w_1(f_l - f_l^{tar})^2 + w_2\left(\frac{f_l}{f_u}\right) \tag{1b}$$

$$s_i^{low} \leq s_i \leq s_i^{upp} \quad (i = 1, 2, \dots, 8) \tag{2}$$

$$s_1 - s_2 \geq r_1 \tag{3a}$$

$$s_6 - s_1 + s_2 \geq r_2 \tag{3b}$$

$$s_1 - s_6 - s_7 \geq r_3 \tag{3c}$$

$$s_3 - s_5 - s_4 \geq r_4 \tag{3d}$$

$$s_3 - s_8 \geq r_5 \tag{3e}$$

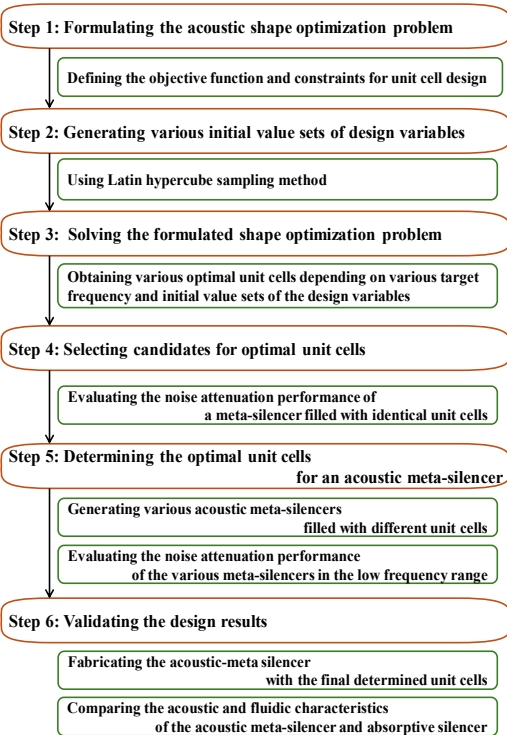


Fig. 1 Flow chart for optimal design of unit cells for acoustic meta-silencer

2.3 음향 형상 최적 설계 결과

형상 최적화 문제의 최적해는 설계 변수의 초기값에 강하게 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁽²⁷⁾. 따라

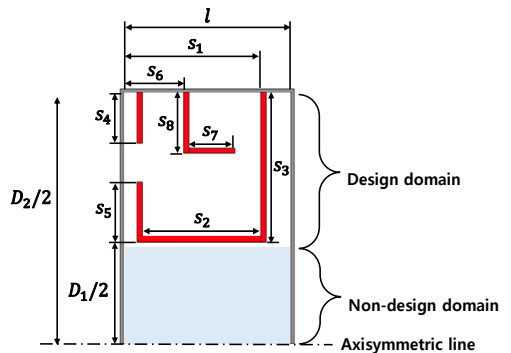


Fig. 2 Cross section of a unit cell with design variables

서, 라틴 하이퍼 큐브 표본 추출 방법을 사용하여, 서로 다른 초기 형상을 50개 생성하였다⁽²⁶⁾. Fig. 3과 Table 1은 대표적인 형상 4개와 설계 변수의 초기값을 보여주고 있다. 그리고, 최종 설계될 음향 메타소음기의 목표 주파수 대역을 200 Hz 이하로 설정하였다. 그래서, f_i^{tar} 은 150 Hz에서 25 Hz까지 10 Hz 또는 15 Hz 단위로 감소시키면서 선정하여, 모두 22개의 f_i^{tar} 를 사용하였다. 이 연구에서 사용한 단위체는 공

명방(resonator)의 일종이라고 할 수 있는데, f_i 은 공명방의 공명 주파수(f_r)와 거의 일치한다. f_r 이 공명방의 부피 제공근에 반비례한다는 것을 고려하여, f_i^{tar} 가 작아질수록 단위체의 폭(l)을 증가시켰다.

Fig. 4는 Fig. 3(c)의 초기 형상에 대하여 $f_i^{\text{tar}} = 110$ Hz 일 때, 형상 최적화를 수행하는 동안 f_i 과 f_u 의 변화 과정과 최적 설계 결과를 보여준다. 단위체 내부 구조가 최적화되면서 밴드 갭의 하한값이 목표값에 도

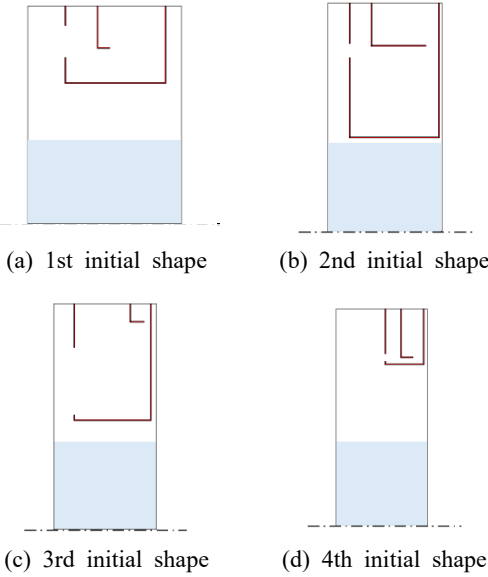
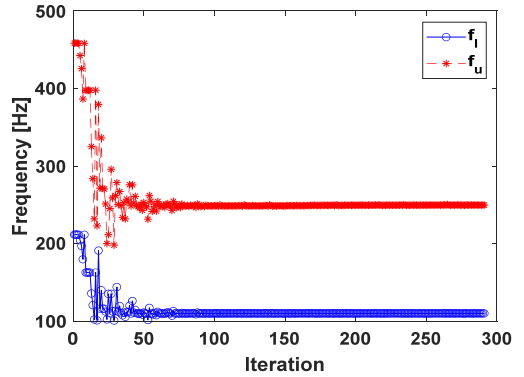


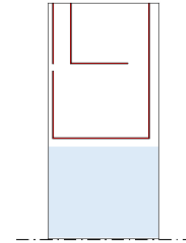
Fig. 3 Representative initial shapes for unit cell design

Table 1 Initial values of the design variables in Fig. 3 [unit: mm]

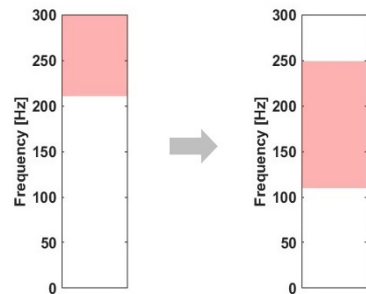
Design variable	Initial shape of unit cell			
	1	2	3	4
s_1	267	213	188	172
s_2	193	170	147	74
s_3	156	259	227	113
s_4	39	78	85	91
s_5	53	154	11	7
s_6	135	83	148	127
s_7	22	104	26	23
s_8	86	83	36	99
l	300	220	200	180



(a) Variation of f_i and f_u during optimization



(b) Optimal shape



(c) Comparison of band gaps of initial and optimal shapes

Fig. 4 Optimal design results of the initial shape in Fig. 3(c) for $f_i^{\text{tar}} = 110$ Hz

달하고, 밴드 갭의 폭도 넓어지는 것을 알 수 있다. 이 연구에서는 음향 해석과 최적 설계에 COMSOL with MATLAB(Ver. 6.1)의 acoustics module과 optimization module을 사용하였다. 배기계 내의 온도가 315°C라고 가정하고, 이에 따라 음속(c)과 밀도(ρ) 값을 각각 486.13 m/s와 0.60026 kg/m³로 설정하여, 총 1100개의 단위체를 생성하였다. 모든 최적 설계에서 가중치 값으로 0.5를 부여하였다. $w_1 = w_2 = 0.5$. 식 (3)의 제한 조건에 필요한 r_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)도 구체화하였다 ($r_1 = 4$ mm, $r_2 = 2$ mm, $r_3 = 4$ mm, $r_4 = 2$ mm, $r_5 = 4$ mm).

2.4 단위체 선택

음향 메타물질은 일반적으로 동일한 단위체를 일렬로 배열하여 소음 저감 특성을 평가한다. 그래서, 앞서 생성된 단위체들 중에서, 동일한 단위체를 일렬로 배열하여 구성된 소음기의 투과 손실 값이 해당 단위체의 밴드 갭 구간에서 30 dB가 넘는 주파수 구간을 갖는 22개의 단위체를 우선적으로 선별하였다. 그러나, 선정된 단위체의 유효 주파수 대역(투과 손실 값이 30 dB 이상인 구간)이 그리 넓지 못하였다. 그래서, 이 연구에서는 여러 개의 단위체를 한꺼번에 선택하여 배열하는 음향 메타소음기를 구성해 보았다. 각 음향 메타소음기를 구성하는 단위체들의 배열 순서를 변경하거나 개수를 1개 또는 2개로 변경해가면서 후보 소음기(candidate silencer)를 다수 구성하여 투과 손실 곡선을 구하였다. 이 과정에서 소음기의 길이는 1400 mm를 넘지 않도록 하였다. 투과 손실 값은 식 (4)를 이용하여 계산하였다. 식 (4a)에서, Π_{in} 와 Π_{out} 는 각각 입사파와 투과파의 음향 파워(acoustic power)를 나타내고, 식 (4b)와 식 (4c)에서의 p_{in} 와 p_{out} 는 입사파와 투과파의 진폭을 나타낸다. 투과 손실 계산 과정에서는 출구의 끝에 음향 매질의 임피던스를 부여하여 무반사 경계 조건을 구현하였다.

$$TL = 10 \log_{10} \frac{\Pi_i}{\Pi_t} \tag{4a}$$

$$\Pi_i = \int_{S_i} \frac{|p_i|^2}{2\rho c} dS \tag{4b}$$

$$\Pi_t = \int_{S_t} \frac{|p_t|^2}{2\rho c} dS \tag{4c}$$

이렇게 구한 투과 손실 곡선들 중에서, 80 Hz ~ 200 Hz 대역에서 소음 저감 성능이 가장 우수한 단위체들의 조합을 결정하였다. 이 음향 메타소음기는 4개의 단위체(unit cells A, B, C, D)로 구성되고, 그 형상 정보를 Fig. 5와 Table 2에 정리하였다. 이렇게 선정된 단위체를 배열하여, Fig. 6(a)와 같은 음향 메타소음기를 구성하였다: $L_1 = 60$ mm, $L_2 = 1320$ mm, $D_1 = 340$ mm, $D_2 = 876$ mm. L_1 과 L_2 는 각각 입/출구

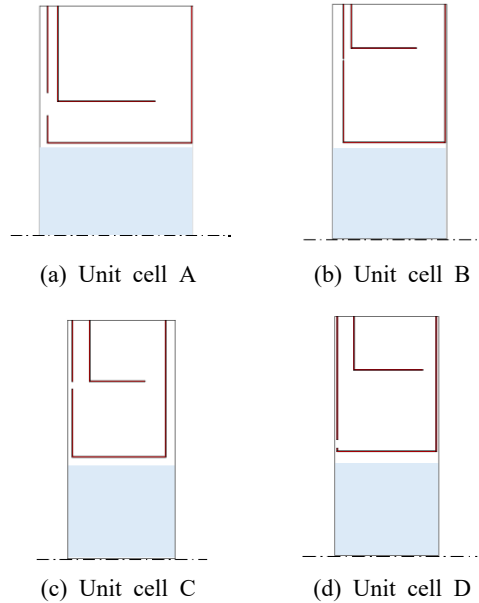


Fig. 5 Cross sections of finally selected unit cells

Table 2 Dimensions of the design variables of finally selected unit cells

[unit: mm]

Design variable	Unit cell			
	A	B	C	D
s_1	296	216	181	175
s_2	280	194	171	170
s_3	261	259	252	248
s_4	165	102	113	226
s_5	53	154	126	7
s_6	35	35	40	32
s_7	189	125	102	119
s_8	182	83	113	99
l	300	220	200	180

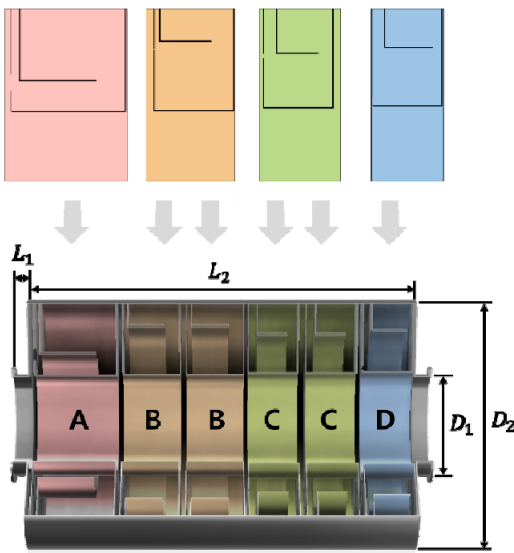
단의 길이와 확장방의 길이를 나타낸다. 이 음향 메타소음기에는 단위체 A와 D는 하나씩, 단위체 B와 C는 두 개씩 배열하였다. 이 소음기와 길이(1320 mm)가 동일하면서 내부가 비어 있는 소음기(nominal silencer)의 투과 손실 곡선을 Fig. 6(b)에서 비교한다. 80 Hz ~ 200 Hz 대역에서 투과 손실 값이 상당히 높아진 것을 알 수 있다.

설계된 음향 메타소음기의 유동 특성도 살펴보기 위해, COMSOL Multiphysics(Ver. 6.1)의 CFD module을 사용하였다. 소음기의 내부에서 유동이 난류라고 가정하고, 이런 내부 유동 문제에서 비교적 안정적으로 수렴하며 계산 비용이 저렴한 Turbulent Flow k-ε 난류 모델을 선택하였다. 입구에는 29.8 m/s의 유속을

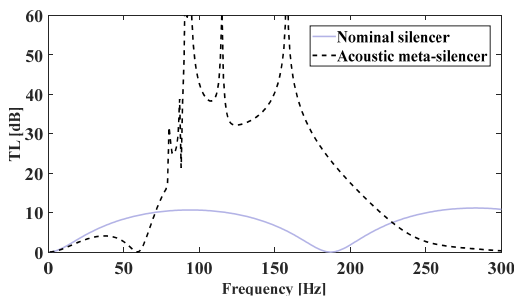
부여하였고, 출구에는 압력(0 Pa)을 부여하였으며, 유체의 온도는 315°C로 설정하였다. 내부가 빈 소음기(nominal silencer)와 음향 메타소음기의 입/출구의 압력차는 각각 835.22 Pa와 279.24 Pa로 메타소음기의 유동 특성이 대폭 향상된 것을 확인할 수 있다. Fig. 7은 두 소음기에 대해 수행한 유동 해석 결과로 얻은 압력 분포를 보여주고 있다. 빈 소음기에서는 단면의 급격한 확장과 축소로 입구와 출구 사이에 큰 압력 차이가 발생하였지만, 설계한 음향 메타소음기에서는 단위체를 구성하는 맨 아래 격벽이 유동의 흐름을 원활하게 해 주는 가이드(guide) 역할을 하면서 양단의 압력차이를 줄일 수 있었다고 판단된다.

2.5 음향 메타소음기의 성능 검증 실험

Fig. 8(a)와 같이, 앞서 설계된 음향 메타소음기를 금속 재료(구조용 탄소강관)로 제작하여, 실험으로 소음 저감 성능을 확인해 보았다. Fig. 8(b)는 이 음향 실험에 사용된 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. 먼저 LMS SCADAS에서 발생된 가진 신호가 증폭기(amplifier)를 거쳐서 스피커에 입력된다. 스피커에서 발생된 음향 신호는 소음기의 입구와 출구에 연결된 아크릴 연결부(acrylic adapter)에 장착된 4개의 마이크로폰(microphone)에 도달한다. 마이크로폰(microphone)

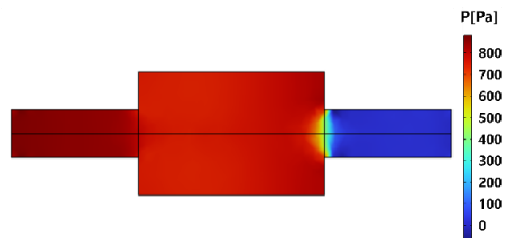


(a) Internal structure

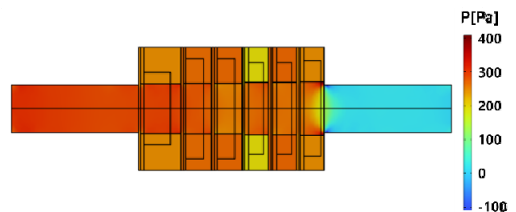


(b) Comparison of TL curves of designed meta-silencer and nominal silencer

Fig. 6 Acoustic meta-silencer



(a) Nominal silencer



(b) Meta-silencer

Fig. 7 Pressure distributions obtained by flow analysis carried out for two silencers

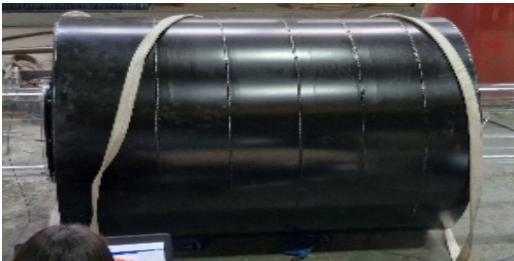
에서 측정된 음압 데이터를 이용하여 투과 손실 곡선을 얻을 수 있으며, 이때 LMS SCADAS로 수집된 데이터는 ASTM E2611-19 표준에 따라 LMS Test Lab의 sound transmission loss using impedance tube module을 이용하여 계산되었다⁽²⁸⁾. 이 방법에서는 4단자 정수법(4-pole parameter method)를 기반으로 투과 손실을 계산하게 된다.

소음기의 해석 온도와 실험 온도가 다르기 때문에, Lee 등이 제안한 방법을 이용하여, 실제 실험에서 얻은 투과 손실 곡선의 주파수를 보정하였다⁽²⁹⁾. 식 (5a)에서

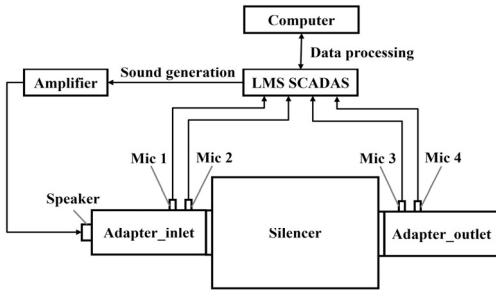
볼 수 있듯이, 실험에서 얻은 주파수(f_e)에 식 (5b)의 보정 계수(γ_T)를 곱하여서 보정된 주파수(f'_e)를 계산하였다. 해당 식에서, T_d 와 T_e 는 각각 절대 온도로 변환된 설계 온도와 실험 온도를 나타낸다. Fig. 8(c)는 이렇게 취득한 투과 손실 곡선을 음향 해석에서 구한 투과 손실 곡선과 비교한다. 일부 주파수를 제외하고는 두 곡선의 개형이 비슷한 것을 알 수 있다. 일부 주파수에서 발생한 오차는 단위체를 제작하는 과정에서 용접의 편의를 위해 단위체 내부 격벽의 두께를 최종 설계한 값보다 조금 증가시켜서 제작하였고, 무향실이 아닌 소음기 제작 공장 내부에서 음향 실험을 하는 동안 다른 소음원이 실험 결과에 영향을 준 것으로 추정된다. 또한, 입구와 출구의 직경에 의해 결정되는 차단 주파수(cut-off frequency)가 837.4 Hz이라는 것을 고려할 때, 837.4 Hz 이상 주파수 대역에서는 이것으로 인한 오차가 발생했을 것으로 추정한다.

$$f'_e = \gamma_T \times f_e \tag{5a}$$

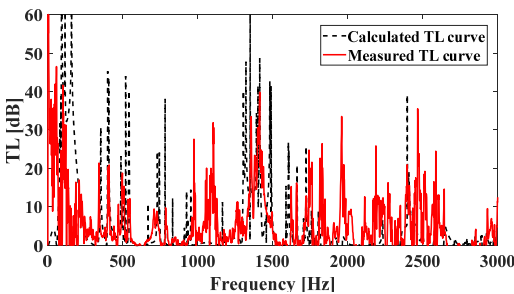
$$\gamma_T = \sqrt{\frac{T_d}{T_e}} \tag{5b}$$



(a) Fabricated acoustic meta-silencer



(b) Experimental setup



(c) Comparison of measured and calculated TL curves of the designed acoustic meta-silencer

Fig. 8 Acoustic validation experiment

3. 하이브리드 소음기의 음향 특성

3.1 흡음형 소음기 제작

앞서 설계한 음향 메타소음기와 동일한 입/출구와 확장방의 치수를 갖는 흡음형 소음기를 제작하였다. 제작 과정에서 흡음형 소음기 제작 전문 업체와 논의 하여, Fig. 9(a)와 같이 내부 치수를 결정하였고, 해당 업체에서 일반적으로 사용하는 흡음재를 Fig. 9(b)와 같이 내부에 장착하였다: $e_1 = 120$ mm, $e_2 = 386$ mm, $e_3 = 200$ mm. 음향 해석에 필요한 흡음재의 물성치를 알 수 없고 이 연구의 목적이 흡음형 소음기의 설계 정확도에 있기 않기에, 흡음형 소음기의 투과 손실을 수치적으로 계산하지 않았다.

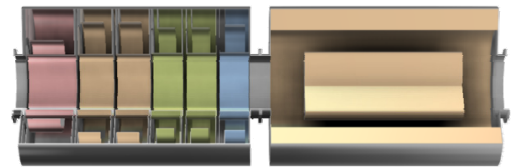
3.2 하이브리드 소음기의 제작과 음향 특성

Fig. 10(a)와 같이 제작한 음향 메타소음기와 흡음형 소음기를 연결하여 하이브리드 소음기를 구성하였다. Fig. 8(b)와 같은 실험 장치를 사용하여, 흡음형 소음기와 하이브리드 소음기의 투과 손실을 측정하여 Fig. 10(b)에서 비교하였다. 파란색 점선의 흡음형 소

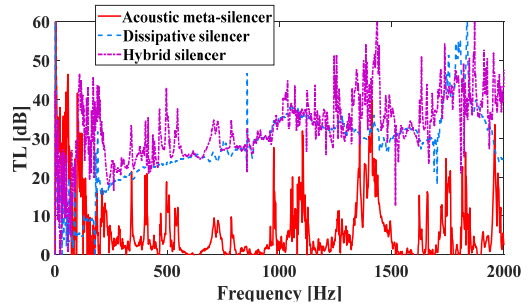
음기의 투과 손실 곡선에 빨간색 실선의 음향 메타소음기의 투과 손실 값이 더해져서 하이브리드 소음기의 투과 손실 곡선(보라색 일점 쇄선)이 형성된 것을 쉽게 알 수 있다. 좀 더 구체적으로 표현하면, 음향 메타소음기는 대략 20 Hz ~ 70 Hz 주파수 대역에서, 흡음형 소음기는 대략 300 Hz 이상의 주파수 대역에서 투과 손실이 20 dB를 넘는다. 즉, 음향 메타소음기는 저주파 대역에서, 흡음형 소음기는 중/고주파 대역에서 좋은 소음 저감 성능을 보인다고 할 수 있다. 이런 특성은 Fig. 10(c)와 같이 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 비교한 투과 손실 히스토그램에서 좀 더 확실히 확인할 수 있다. 중심 주파수 25 Hz ~ 63 Hz 대역에서 메타소음기의 높은 소음 저감 특성은 하이브리드 소음기에서도 해당 주파수 대역과 주변 주파수 대역의 소음 저감 성능을 향상시키는 결과로 이어졌다. 흡음형 소음기는 중심 주파수 315 Hz 이상인 1/3 옥타브 밴드 들에서는 대부분 투과 손실 값이 20 dB를 넘어 중/고주파 대역에서 성능이 우수함을 알 수 있다. 이런 특성은 하이브리드 소음기의 특성으로 그대로 이어져서 중심 주파수 100 Hz 이상의 주파수 대역

에서 모두 20 dB를 넘었다. 따라서, 흡음형 소음기에 비하여 하이브리드 소음기는 보다 넓은 범위의 주파수 대역에서 우수한 소음 저감 성능을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

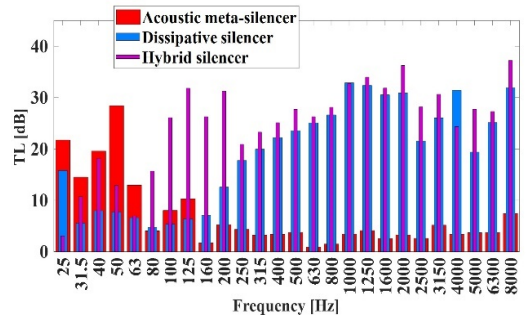
하이브리드 소음기에서 음향 메타소음기와 흡음형 소음기의 특성이 시너지 효과(synergy effect)를 나타내는 것을 좀 더 명확히 비교하기 위해서, 세 소음기의 입구 측과 출구 측에서 측정된 음압을 1/3 옥타브 밴드에서 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)에서 보듯이, 음향 메타소음기의 출구측 음압은 63 Hz ~ 100 Hz 주파수 대역에서만 줄어든 것을 알 수 있고,



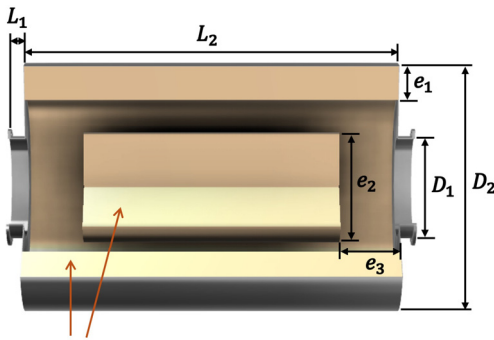
(a) Three-dimensional drawing



(b) Comparison of measured TL curves of acoustic meta-silencer, absorptive silencer and hybrid silencer in a narrow band



(c) Comparison of measured TL curves of acoustic meta-silencer, absorptive silencer and hybrid silencer in 1/3 octave band



(a) Three-dimensional drawing



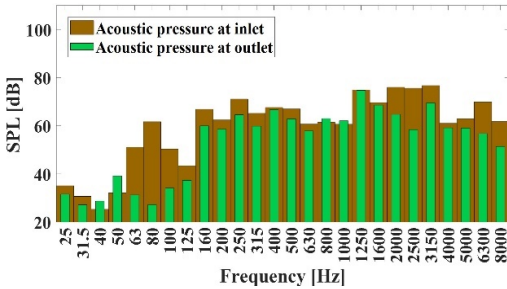
(b) Fabricated silencer

Fig. 9 Dissipative silencer

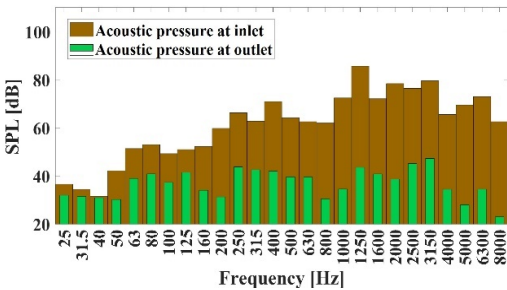
Fig. 10 Hybrid silencer

흡음형 소음기는 전 주파수 대역에서 소음을 줄이고 있지만 125 Hz 이하 주파수 대역에서는 상대적으로 소음 저감 성능이 다른 주파수 대역에 비해 떨어지는 것을 Fig. 11(b)에서 확인할 수 있다. 그러나, 이 두 소음기를 연결한 하이브리드 소음기의 입구와 출구의 음압을 비교한 Fig. 11(c)에서는 흡음형 소음기의 소음 저감 성능이 부족한 주파수 대역을 음향 메타소음기가 충분히 보상해 주는 것을 알 수 있다. 각 소음기의 시너지 효과를 한눈에 비교하기 위해 Fig. 12에서 소음기

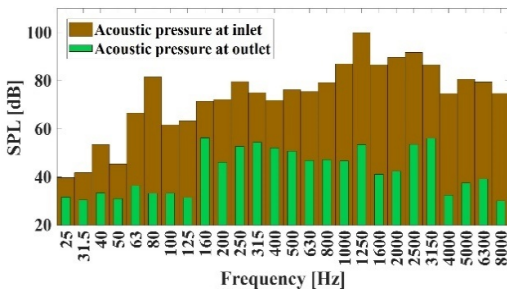
별 입구와 출구의 음압 차이(NR: noise reduction)를 나타내고, Table 3은 세 종류의 소음기의 입/출구의 음압 레벨(acoustic pressure level)과 전체 소음 저감량(NR)을 계산하여 정리하였다. 음향 메타소음기의 전체 소음 저감량은 작지만, 흡음형 소음기로 줄이는 것이 불가능한 저주파 대역의 소음을 저감시킬 수 있다. 따라서, 저주파수 대역에서 소음 저감 성능이 우수한 음향 메타소음기와 넓은 중/고주파 대역에서 소음 저감 성능이 우수한 흡음형 소음기가 연결된 하이브리드 소음기에서는 전주파수 대역에서 소음 저감 성능이 향상되면서, 전체 소음 저감량도 5 dB 가량 증가되는 것을 알 수 있다.



(a) Acoustic meta-silencer



(b) Absorptive silencer



(c) Hybrid silencer

Fig. 11 Comparison of measured acoustic pressures at inlet and outlet

4. 유동 특성 측정 실험

흡음형 소음기 제작 전문 업체의 풍동 실험 장치를 이용하여 Fig. 13(a)와 같이 소음기와 덕트의 압력 강하를 측정하는 실험을 수행하였다. 해당 실험 장치의

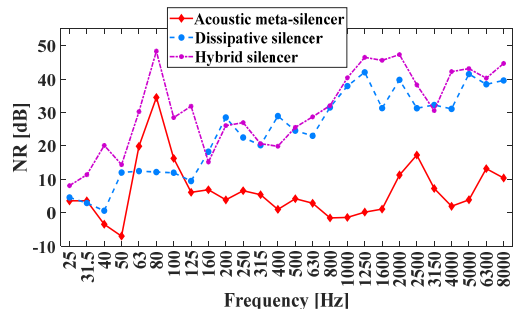


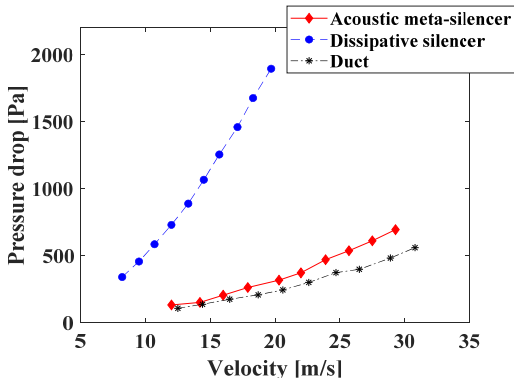
Fig. 12 Comparison of NR values of acoustic meta-silencer, dissipative silencer, and hybrid silencer in one-third octave band

Table 3 Comparison of sound pressure levels at inlet and outlet and NR of acoustic meta-silencer, dissipative silencer and hybrid silencer [unit: dB]

Silencer	Sound pressure level		NR
	Inlet port	Outlet port	
Acoustic meta-silencer	83.2	78.3	5
Dissipative silencer	88.2	53.3	34.9
Hybrid silencer	101.6	62.6	39



(a) Experimental setup



(b) Comparison of pressure drop of acoustic-meta-silencer, dissipative silencer and duct

Fig. 13 Wind tunnel experiment

좌측에는 회전 속도를 조절할 수 있는 팬(fan)이 설치되어 있고, 장착된 소음기의 입구와 출구 쪽에 압력계를 장착하여 소음기에 의한 압력 강하(pressure drop)를 측정할 수 있었다. 입구 유속에 따른 입구와 출구의 압력 차이를 Fig. 13(b)에 도시하였다. 흡음형 소음기는 유동 저항이 커서 해당 실험 장치로 발생시킬 수 있는 최고 유속이 상대적으로 낮았지만, 음향 메타소음기에 발생시킬 수 있는 최고 유속은 덕트만 연결되어 있는 경우와 거의 비슷하였다. 실제로 동일 유속인 경우를 비교해 보면, 19.7 m/s에서 흡음형 소음기는 1895 Pa의 압력 강하가 발생하였지만, 음향 메타소음기의 압력 강하는 302 Pa로 덕트만 있는 경우(225 Pa)와 비슷하였다. 하이브리드 소음기에 대한 압력 강하 실험은 업체 사정상 수행하지 못하였지만, 유동 특성이 우수한 음향 메타소음기가 적용된 하이브리드 소음기의 유동 특성은 기존 흡음형 소음기 보다 우수할 것으로 예상된다.

5. 결 론

이 연구는 하이브리드 소음기를 구성하기 위한 반사형 소음기로 음향 메타소음기를 설계하는 방법을 제시하고, 동일한 크기의 흡음형 소음기와 음향과 유동 특성을 비교하여 하이브리드 소음기의 설계 방향을 제시하였다. 흡음형 소음기는 제작이 용이하고, 중/고주파 대역에서 높은 소음 저감 성능을 보여주지만, 저주파수 대역에서의 낮은 소음 저감 성능과 유동 저항이 크다는 단점을 지니고 있다. 따라서, 저주파수 대역에서 소음 저감 성능을 향상시키고 유동 저항을 낮추기 위해, 형상 최적화 기법을 이용하여 여러 개의 단위체를 얻은 후에 설계 목표에 부합하는 우수한 단위체를 선정하여 음향 메타소음기 내부 구조를 결정하였다.

설계한 음향 메타소음기는 20 Hz ~ 70 Hz 대역에서 투과 손실 값이 20 dB 이상으로 높았고, 소음기의 압력 강하값은 동일한 크기의 흡음형 소음기의 1/6배 수준으로 아무런 소음기가 연결되지 않은 덕트와 유사한 값을 가졌다. 두 소음기를 연결하여 제작한 하이브리드 소음기의 투과 손실 곡선은 두 소음기의 투과 손실 곡선의 특성이 잘 반영되어 시너지 효과를 잘 나타내고 있었다.

따라서, 제한된 공간에 장착되는 소음기로 저주파수 대역부터 광대역 소음을 저감하고, 소음기로 인한 압력 강하를 가능한 줄이기 위해서는 음향 메타소음기와 흡음형 소음기를 함께 사용하는 하이브리드 소음기를 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 즉, 흡음재가 삽입되는 공간의 1/2에는 기존 흡음형 소음기를 사용하고 나머지 1/2 공간에는 유동 특성과 저주파수 대역의 소음 저감 성능이 우수한 음향 메타소음기를 장착하여 하이브리드 소음기를 구성하는 것이다. 이렇게 되면, 전체 소음 저감 성능이 향상될 것이며, 지나치게 흡음재를 많이 사용하여 발생하는 입구와 출구의 큰 압력 차이를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 성과는 아주대학교 산학 협력단의 ‘기술 사업화 유망 기술 발굴 지원 과제’ 사업과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2024-00345634). 또한, 소음

기 실험에 도움을 주신 (주)장성EPS 담당자분들께도 감사드립니다.

References

(1) Haghghi, M., Mirzaei, R., Putra, A. and Taban, E., 2024, A Comprehensive Review of Advances and Techniques in Muffler Acoustics and Design, *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol. 21, pp. 8695-8716.

(2) Kirby, R., 2001, Simplified Techniques for Predicting the Transmission Loss of a Circular Dissipative Silencer, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 3, pp. 403-426.

(3) Lee, J. W. and Kim, Y. Y., 2009, Topology Optimization of Muffler Internal Partitions for Improving Acoustical Attenuation Performance, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 80, No. 4, pp. 455-477.

(4) Yu, X., Tong, Y., Pan, J. and Cheng, L., 2015, Sub-chamber Optimization for Silencer Design, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 351, pp. 57-67.

(5) Pavlov, G. I., Nakoryakov, P. V. and Sukhovaya, E. A., 2017, Development of Silencer for Low-power Internal Combustion Engines, *Procedia Engineering*, Vol. 206, pp. 1690-1695.

(6) An, B. H. and Lee, J. W., 2024, Deep-learning-based Generative Design for Optimal Reactive Silencers, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 284, 109736.

(7) Lee, S.-S., Jang, J.-Y. and Song, K., 2025, Enhanced Acoustic Attenuation in a Coiled Meta-silencer: Broadband Low-frequency Noise Control through Rainbow Trapping, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 222, 111744.

(8) Selamat, A., Lee, I. J. and Huff, N. T., 2003, Acoustic Attenuation of Hybrid Silencers, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 262, No. 3, pp. 509-527.

(9) Williams, P., Kirby, R., Hill, J., Åbom, M. and Malecki, C., 2018, Reducing Low Frequency Tonal Noise in Large Ducts Using a Hybrid Reactive-dissipative Silencer, *Applied Acoustics*, Vol. 131, pp. 61-69.

(10) Karami, F., Rad, M. S. and Karimpour, I., 2024, Review on Attenuation Methods of Low-frequency

Noise in Passive Silencers, *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, Vol. 43, No. 4, pp. 1679-1695.

(11) Denia, F. D., Sánchez-Orgaz, E. M., Martínez-Casas, J. and Kirby, R., 2015, Finite Element Based Acoustic Analysis of Dissipative Silencers with High Temperature and Thermal-induced Heterogeneity, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 101, pp. 46-57.

(12) Chen, A., Yang, Z., Zhao, X., Anderson, S. and Zhang, X., 2023, Composite Acoustic Metamaterial for Broadband Low-frequency Acoustic Attenuation, *Physical Review Applied*, Vol. 20, 014011.

(13) Nguyen, H., Wu, Q., Xu, X., Chen, H., Tracy, S. et al., 2020, Broadband Acoustic Silencer with Ventilation Based on Slit-type Helmholtz Resonators, *Applied Physics Letters*, Vol. 117, No. 13, 134103.

(14) Xiang, X., Wu, X., Li, X., Wu, P., He, H. et al., 2020, Ultra-open Ventilated Metamaterial Absorbers for Sound-silencing Applications in Environment with Free Air Flows, *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 39, 100786.

(15) Zhang, J., Hu, B. and Wang, S., 2023, Review and Perspective on Acoustic Metamaterials: From Fundamentals to Applications, *Applied Physics Letters*, Vol. 123, No. 1, 010502.

(16) Kim, M. and Lee, J. W., 2019, Design of Acoustic Metamaterial to Improve Sound Insulation Performance of a Holey Rigid Plate, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 245-254.

(17) Zhang, Z., Yu, D., Xiao, Y., Hu, B., Bai, Y. et al., 2023, Compact Broadband Acoustic Meta-silencer Based on Synergy Between Reactive and Resistive Units, *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 56, No. 1, 015303.

(18) Liu, P., Zuo, S., Wu, X., Chen, S. and Kong, Y., 2022, Acoustic Attenuation Characteristics of the Muffler Phononic Crystal with Hybrid Resonators, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 234, 107677.

(19) Chua, J. W., Li, X., Yu, X. and Zhai, W., 2023, Novel Slow-Sound Lattice Absorbers Based on the Sonic Black Hole, *Composite Structures*, Vol. 304, No. 2, 116434.

(20) Chen, Y., Yu, K., Fu, Q., Zhang, J., Lu, X. et al., 2024, A Broadband and Low-frequency Sound Absorber of Sonic Black Holes with Multi-layered Micro-perforated Panels, *Applied Acoustics*, Vol. 217, 109817.

(21) An, B. H. and Lee, J. W., 2021, Metamaterial-based Muffler with Broadband Tunability in a Limited Space: Optimal Design, Theoretical Investigation and Experiment, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 205, 106594.

(22) Ren, F. M., Xiong, J. R., Li, S. F., Tian, S. Y., Li, Y. S. et al., 2024, Low-frequency Bandgap Characteristics and Vibration Attenuation Performance of Metamaterial-tailored Concrete-filled Steel Tube Columns, *Thin-walled Structures*, Vol. 198, 111714.

(23) Lee, J. K., Oh, K. S. and Lee, J. W., 2020, Methods for Evaluating In-duct Noise Attenuation Performance in a Muffler Design Problem, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 464, 114982.

(24) Zhang, Z., Yu, D., Liu, J., Hu, B. and Wen, J., 2021, Transmission and Bandgap Characteristics of a

Duct Mounted with Multiple Hybrid Helmholtz Resonators, *Applied Acoustics*, Vol. 183, 108266.

(25) Rova, D. and Hussein, M. I., 2021, Broadband and Intense Sound Transmission Loss by a Coupled-resonance Acoustic Metamaterial, *Physical Review Applied*, Vol. 16, No. 5, 054018.

(26) Stein, M., 1987, Large Sample Properties of Simulations Using Latin Hypercube Sampling, *Technometrics*, Vol. 29, No. 2, pp. 143~151.

(27) Sokolowski, J. and Zolésio, J.-P., 1992, *Introduction to Shape Optimization*, Springer-verlag GmbH Heidelberg, Heidelberg, Germany.

(28) ASTM International, 2019, Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties based on the Transfer Matrix Method, ASTM E2611-19, PA, United States.

(29) Lee, J. K., Lee, I. and Lee, J. W., 2021, Reliability-based Acoustical Topology Optimization of Mufflers under Noise Frequency and Temperature Uncertainties, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 16, 107854.