

# 선박용 공기조화 덕트용 헬름홀츠 공명기 기반 메타물질 음향 라이너 설계

## Design of Helmholtz Resonator-based Metamaterial Acoustic Liners for HVAC Ducts of Ships

구본현\* · 원세정\*\* · 강병민\*\* · 함일배\*\* · 이종학\*\*\*

김홍태\*\*\* · 임희창† · 홍진숙††

Bonheon Ku\*, Sejung Won\*\*, Byeongmin Kang\*\*, Ilbae Ham\*\*, Jonghak Lee\*\*\*

Heungtae Kim\*\*\*, Hee-Chang Lim† and Chinsuk Hong††

(Received October 1, 2025 ; Revised October 28, 2025 ; Accepted December 14, 2025)

**Key Words :** 헬름홀츠 공명기(Helmholtz Resonator), 메타원자(Meta-atom), 음향라이너(Acoustic Liner), 전달손실(Transmission Loss)

### ABSTRACT

Fan noise generated within shipboard heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) ducts exhibit dominant narrowband low-frequency components, which are challenging to mitigate using conventional absorptive materials. This study proposes a metamaterial acoustic liner composed of Helmholtz resonator-based meta-atoms, each precisely tuned to target key tonal frequencies commonly found in fan noise (115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, and 460 Hz). The meta-atoms were arranged into an array structure, and their acoustic performance was evaluated using finite element analysis. The results demonstrated notable transmission loss improvements, with each resonance achieving more than 10 dB of attenuation over an effective control bandwidth of approximately 16 Hz at 115 Hz, 32 Hz at 230 Hz, 56 Hz at 345 Hz, and 35 Hz at 460 Hz. A peak transmission loss of nearly 90 dB was observed at 115 Hz. These results indicate that the proposed metamaterial liner offers both selective attenuation of tonal low-frequency noise and broader bandwidth control, making it a promising solution for noise reduction in ship HVAC systems.

### 1. 서론

선박용 공기조화시스템(HVAC)은 승조원의 생활

환경 유지와 장비의 열관리 측면에서 필수적이거나, 덕트를 통한 공기 유동 및 구조적 진동은 다양한 주파수 대역의 소음을 발생시켜 거주 쾌적성과 작업 효율에 부정적인 영향을 미친다<sup>(1,2)</sup>. 특히 HVAC 시스템

† Corresponding Author ; School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Professor  
E-mail : hclim@pusan.ac.kr

†† Corresponding Author ; Member, Department of Naval Systems Engineering, Ulsan College, Professor  
E-mail : cshong@uc.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Graduate Student

\*\* Center for Advanced Meta Materials, Researcher

\*\*\* LIG Nex1, Researcher

‡ Recommended by Editor Jin Woo Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

에서 가장 두드러진 소음원은 팬(fan)이며, 이는 날개통과주파수(blade passing frequency, BPF)와 그 하모닉스(harmonics)에서 강한 협대역 성분을 나타낸다. 이러한 협대역 소음은 단순한 흡음재로는 제어가 어렵고, 선박 환경에서는 장시간 노출 시 피로 누적과 집중력 저하를 초래할 수 있다. 군사적 관점에서는 팬 소음이 덕트를 통해 외부로 방사될 경우는 밀성을 중시하는 잠수함의 생존성을 위협할 수 있으며<sup>(3,4)</sup>, 따라서 HVAC 덕트에서 발생하는 협대역 팬 소음을 효과적으로 제어할 수 있는 기술 확보가 필요하다.

HVAC 소음 제어를 위해 다양한 기술적 접근이 시도되어 왔다. 전통적으로는 다공성 흡음재, 천공판(perforated plate) 라이너, 그리고 사일렌서(silencer) 등이 널리 적용되어 왔으며, 특히 중·고주파 대역에서 효과적인 소음 저감 성능을 보인다<sup>(1,5)</sup>. 그러나 저주파 소음, 특히 팬 BPF와 같은 협대역 주파수에서는 공진 현상이 지배적이므로 기존 흡음재는 성능 한계가 크다. 또한 덕트 내부 설치 시 공간 제약으로 두꺼운 흡음재를 적용하기 어려우며, 유지관리와 내구성 문제도 고려해야 한다. 최근 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 공진기를 이용한 제어 기법에 주목하고 있으며, 그 중에서도 헬름홀츠 공명기(Helmholtz resonator, HR) 기반 설계는 소형 구조로 특정 주파수에서 높은 흡음 성능을 제공하여 HVAC 소음 제어의 유망한 대안으로 제시되고 있다<sup>(5,6)</sup>.

실제로 HR 기반 메타 물질 라이너는 특정 주파수에 맞춰 다수의 공명기를 배열함으로써 BPF와 그 하모닉스에서 높은 소음 제어 성능을 입증하였다<sup>(6,7)</sup>. 그러나 단일 HR의 협대역 특성으로 인해 광대역 제어에는 한계가 있으며, 다수의 공명기를 조합할 경우 구조가 복잡해지고 대규모 설계가 필요하여 제작성 및 설치성에 제약이 따른다<sup>(7,8)</sup>. 또한 실제 팬 작동 시 회전수 변동으로 인해 BPF가 이동하면, 고정 주파수에 맞춘 HR의 성능은 급격히 저하될 수 있다. 이러한 문제점을 고려할 때, HR 기반 메타 물질 라이너 연구는 여전히 발전이 필요하며, 협대역성을 극복하고 실 환경 적용성을 확보할 수 있는 하이브리드 설계, 가변형 구조, 능동 제어 결합이 중요한 방향으로 제시된다<sup>(7,8)</sup>. 이 연구는 팬 주요 저주파 성분을 타겟으로 HR 기반 메타물질 음향 라이너를 설계하고, BPF 및 그 하모닉스에서 전달손실이 최대화되도록 공진 특성을 조정하며, 운전 조건 변화에도 안정적인 협대역

감쇠 성능을 확보하는 방안을 제시하고자 한다. 특히 공간 활용 측면에서, 일반적인 단순확장관은 충분한 확장비와 길이를 확보할 때 수십 dB 수준의 전달 손실을 구현할 수 있으나, 실제 덕트 시스템에 큰 규모의 공간을 확보하기는 어려워 제한된 체적에서는 2 dB ~ 5 dB 정도의 제한적인 성능만 발휘하는 것으로 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 반면, 이 연구에서 제안하는 HR 기반 메타 구조는 동일한 설치 공간 내에서도 훨씬 높은 전달손실을 실현할 수 있어, 공간 효율성과 음향 성능 면에서 단순 확장관 대비 명확한 우수성을 가진다.

## 2. 수학적 배경

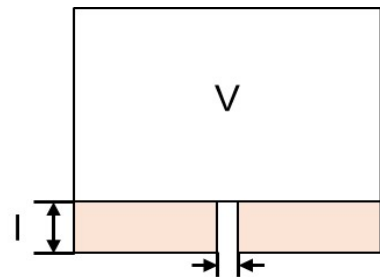
### 2.1 Helmholtz Resonator Meta-atom 이론

HR 기반 메타 원자의 주요인자는 Fig. 1과 같다. HR 메타 원자의 공명 현상은 임피던스가 최소가 되는 조건에서 발생하며, 감쇠가 충분히 작은 경우 공명주파수는 식 (1)과 같이 근사적으로 표현된다.

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{Vl'}} \tag{1}$$

여기서,  $f_r$ 은 공명주파수,  $s, V, l'$ 은 각각 HR의 목 입구 단면적, 체적 유효 길이를 나타낸다.

목의 유효 길이는 입구의 상태에 따라 정해지며,



(a) Schematic configuration



(b) Finite element analysis model

Fig. 1 Helmholtz resonator-based meta-atom

이 경우 제어 대상 음장과 상호작용이 일어나는 입구면에서 음향 임피던스는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$Z_{HR} = R' + j\left(\frac{qwl'}{s} - \frac{\rho c^2}{\omega V^2}\right) \quad (2)$$

여기서,  $Z_{HR}$ 은 음향 임피던스,  $R'$ 은 등가저항,  $q$ 는 유량,  $w$ 는 유효 단면 폭,  $l'$ 은 유효길이,  $s$ 는 HR 목의 단면적,  $\rho$ 는 음압,  $c$ 는 공기 중 음속,  $\omega$ 는 각 주파수,  $V$ 는 HR 체적을 나타낸다.

**2.2 평면파 음파 분리 및 전달손실**

이 연구에서는 사각 단면 도파관에 메타 원자 또는 메타 물질 음향 라이너 설치하고, 파동 전파 특성을 해석하여 메타 원자 및 메타 물질 음향 라이너 성능을 정량화하고자 한다. 도파관은 메타 원자 및 음향 라이너를 기준으로 상류와 하류로 구분되며, 상류 끝단에서 발생한 파동이 메타 원자 및 음향 라이너를 지나 하류로 전달되는 과정을 수치적으로 분석하였다. 이 과정에서 메타 원자 및 음향 라이너에 의해 반사 및 감쇠가 발생하며, 상류 및 하류 각각의 지점에서 측정된 음압 데이터를 이용하여 진행파와 반사파 분리가 가능하다. 이를 통해 메타 원자 및 음향 라이너의 전달손실(transmission loss)을 계산할 수 있으며, 음파 분리에 대한 개념도는 Fig. 2와 같다.

유한요소 해석을 통해 얻을 수 있는 도파관 내 음장은 식 (3)과 같이 입사파 A와 반사파 B의 중첩으로 나타낼 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$F_p(\omega; x) = F_A(\omega)e^{-jkx} + F_B(\omega)e^{jkx} \quad (3)$$

따라서, 각 해석 결과를 추출할 지점(MIC.1 ~ MIC.4)에서의 음압은 식 (4)와 같다.

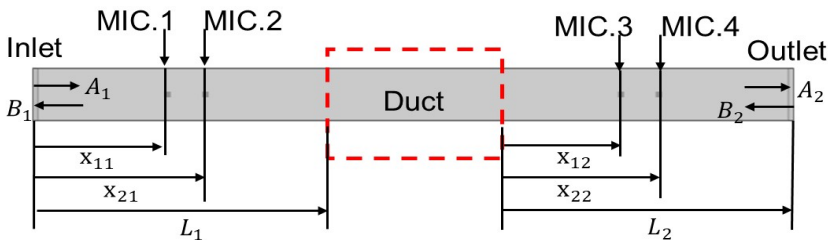
$$\begin{aligned} F_{P11} &= F_{A10}e^{-jkx11} + F_{B10}e^{jkx11} \\ F_{P21} &= F_{A10}e^{-jkx21} + F_{B10}e^{jkx21} \\ F_{P12} &= F_{A20}e^{-jkx12} + F_{B20}e^{jkx12} \\ F_{P22} &= F_{A20}e^{-jkx22} + F_{B20}e^{jkx22} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $F_{P11}$ 과  $F_{P21}$ 은 상류부에 있는 두 마이크에서의 음압이고,  $F_{P12}$ 과  $F_{P22}$ 는 하류부에 있는 두 마이크에서의 음압이다. 그리고  $F_{A10}$ 와  $F_{B10}$ 는 각각 상류부의 입사파와 반사파이고  $F_{A20}$ 와  $F_{B20}$ 는 각각 하류부의 입사파와 반사파이다. 위와 같은 식 (4)를 이용하여 상류부와 하류부의 입사파와 반사파로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} F_{A10} &= \frac{F_{p21}e^{-jkx21} - F_{p11}e^{jkx11}}{e^{jkd_1} - e^{-jkd_1}} \\ F_{B10} &= \frac{F_{p11}e^{-jkx11} - F_{p21}e^{jkx21}}{e^{jkd_1} - e^{-jkd_1}} \\ F_{A20} &= \frac{F_{p12}e^{-jkx22} - F_{p22}e^{jkx12}}{e^{jkd_2} - e^{-jkd_2}} \\ F_{B20} &= \frac{F_{p22}e^{-jkx12} - F_{p12}e^{jkx22}}{e^{jkd_2} - e^{-jkd_2}} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $k$ 는 파수,  $d_1$ 과  $d_2$ 는 상부 및 하부 마이크 간 거리이며, 파동의 위상 차 계산을 위해 사용된다.  $F_{Aij}$ 와  $F_{Bij}$ 는 각 위치  $x_{ij}$ 에서의 진행파 및 반사파의 복소 진폭을 의미한다.

또한, 식 (5)를 이용하여 메타 원자 및 음향 라이너 입구( $x = L_1$ )에서의 입사파와 반사파는 각각 식 (6)과 같다.



**Fig. 2** Concept of wave decomposition in the duct model for finite element analysis

$$F_{A1L1} = \frac{F_{p21}e^{-jkx21} - F_{p21}e^{jkx11}}{e^{jkd_1} - e^{-jkd_1}} e^{-jkL_1} \tag{6}$$

$$F_{B1L1} = \frac{F_{p11}e^{-jkx21} - F_{p11}e^{jkx11}}{e^{jkd_1} - e^{-jkd_1}} e^{-jkL_1}$$

따라서, 메타 원자 및 음향 라이너의 전달손실(TL)은 입구에서의 입사파와 하류의 시작점(라이너 출구)에서의 입사파 사이의 에너지 비를 통해 정량적으로 평가할 수 있으며, 이는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$TL = 10 \log_{10} \frac{F_{A1L1}F_{A1L1}^*}{F_{A20}F_{A20}^*} \tag{7}$$

여기서,  $F_{A1L1}$ 과  $F_{A20}$ 은 식 (6)에서 구한 입사파 및 반사파이며,  $F_{A1L1}^*$ 과  $F_{A20}^*$ 은 입사파 및 반사파의 복소 켈레이다.

### 3. 음향 라이너 설계 및 성능 해석

#### 3.1 메타 원자 설계 및 해석

이 연구는 저주파 소음을 효과적으로 제어하기 위

해 블레이드 팬(blade fan) 소음의 주요 성분 주파수 (115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz)를 목표로 하였다. 이를 위해 해당 주파수에 맞추어 튜닝된 메타 원자를 설계하고, 모델링 및 성능 해석을 통해 주파수 대역폭 확장을 검토하였다. 유한요소 해석은 COMSOL Multiphysics(version 6.2)의 acoustic physics 모듈을 활용하여 수행하였다.

Fig. 3은 도파관 내 메타 원자 및 메타 물질 음향 라이너 성능 평가를 위한 해석 모델을 나타낸 것으로, 15 cm × 15 cm의 사각형 모델은 블레이드 팬을 모사하였으며, 소음원 역할을 한다. 도파관 중앙부에 각 단일 메타 원자 및 메타 물질 음향 라이너를 배치하여 팬 소음의 주요 주파수 성분에 대응하는 제어 효과를 분석하였다. 또한 소음원 전후에는 MIC.1~MIC.4까지 네 개의 마이크로폰 측정 지점을 설치하여 상류부와 하류부의 음압 데이터를 수집하였으며, 이를 통해 진행파와 반사파를 분리하고 전달손실을 정량화하였다.

Fig. 4는 단일 메타 원자, 소수 배열 구조(각 단일 메타 원자들이 조합된 모델링) 및 메타 물질 음향 라이너의 수치 해석을 위한 유한요소 모델링을 나타낸다. Fig. 4(a)는 115 Hz에 맞추어 설계된 단일 메타

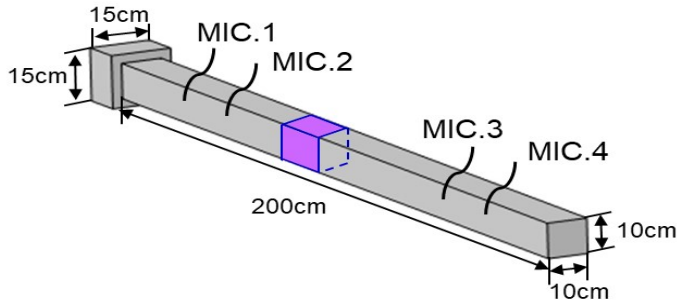


Fig. 3 Three-dimensional finite element model of the duct with sound source and microphone positions for evaluating meta-atom and liner performance

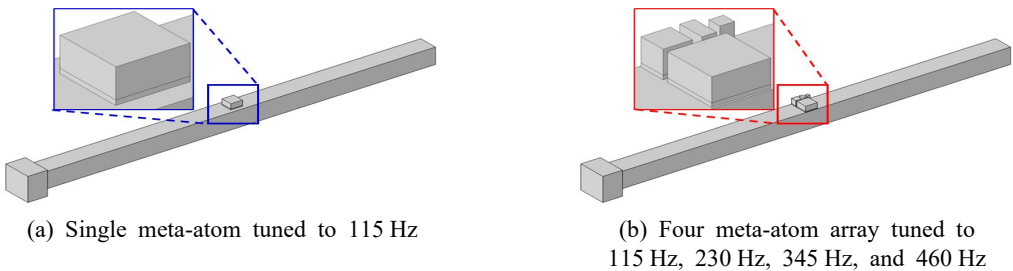
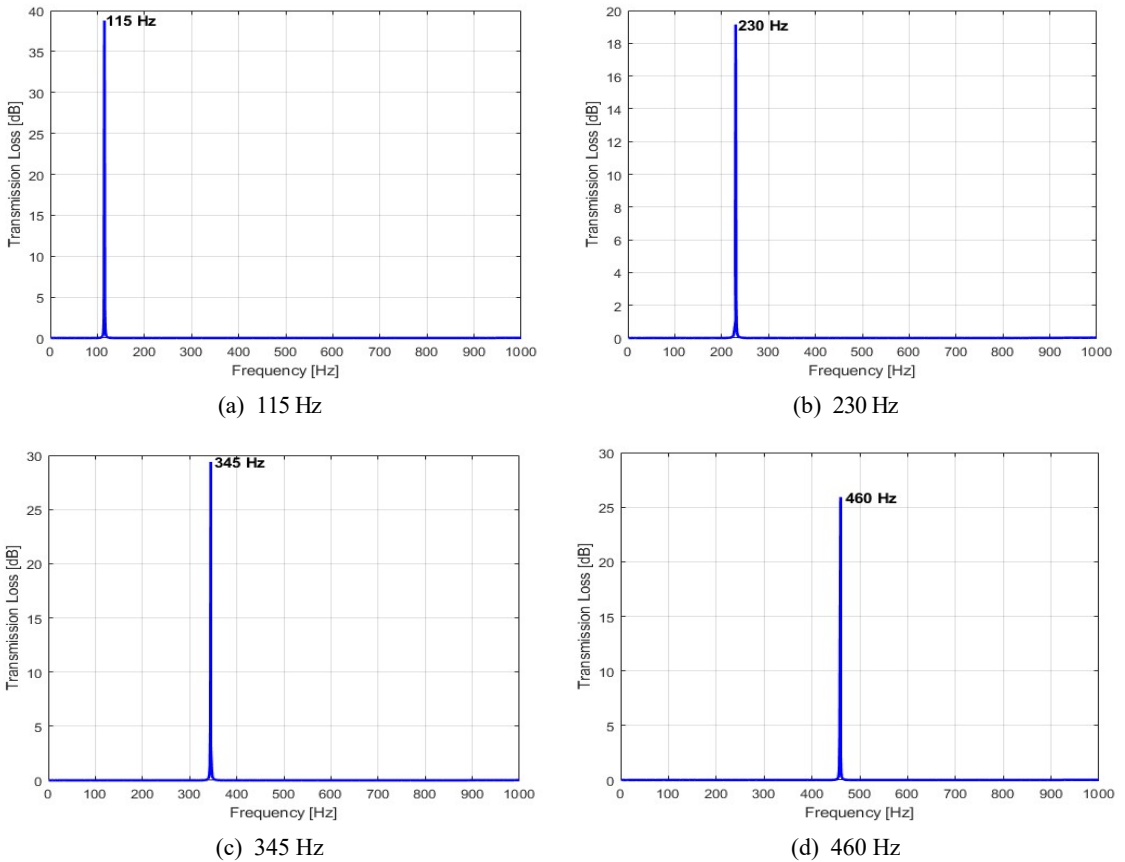


Fig. 4 Finite element analysis models for acoustic performance evaluation



**Fig. 5** Transmission loss characteristics of single meta-atoms tuned to the target frequencies of 115 Hz, 230 Hz, 345 Hz and 460 Hz

원자 모델링이며, 특정 공진주파수에서 선택적 전달 손실을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz에 튜닝된 메타 원자를 결합한 소수 공진 구조로, 팬 소음의 주요 주파수 성분에 대응하도록 설계되었다.

Fig. 5는 단일 메타 원자에 대한 전달손실 결과이다. Fig. 5(a) ~ Fig. 5(d)는 각각 튜닝된 메타 원자의 응답 특성을 나타내며, 뚜렷한 공진 피크가 관찰되었으며, 단일 메타 원자에 대한 성능을 확인하였다.

Fig. 6은 Fig. 4(b)와 같이 단일 메타 원자들을 제한된 공간에서 이를 조합하여 모델링하였다. Fig. 5에서 나타난 튜닝된 공진 주파수가 동일하게 재현됨을 보여주고 있으며, 이를 통해 공간 효율성 및 음향 성능을 확인하였다.

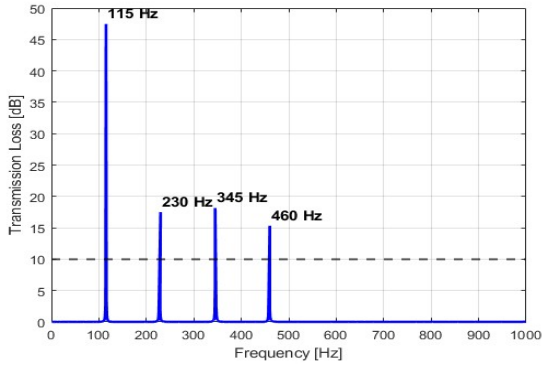
Fig. 7은 메타 물질 라이너 내부에서 각 공진 주파수(115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz)에서의 음압 분포를 나타낸다.

Fig. 7(a) ~ Fig. 7(d)는 각각 해당 공진 주파수에서의 음향 압력 분포를 보여주며, 공진이 발생하는 주파수 대역에서 음압이 라이너 내부에 강하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

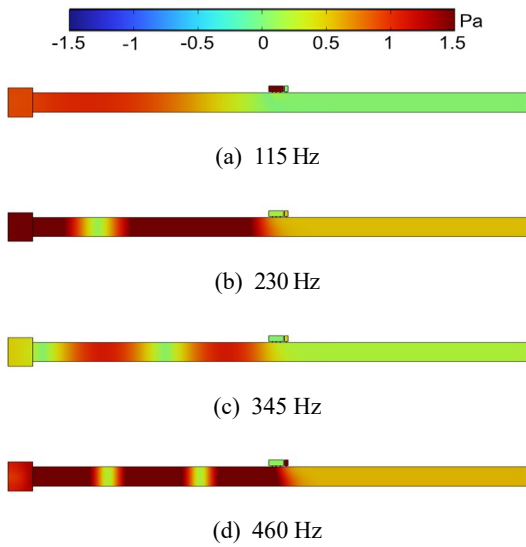
### 3.2 메타 물질 음향 라이너 설계 및 해석

3.1절에서는 각 단일 메타 원자의 특성을 분석하였으며, 이 절에서는 이를 조합한 다수 배열 구조의 성능을 평가하는 연구를 수행하였다. 이를 통해 메타 원자의 공진 주파수 특성을 유지하면서 주파수 대역 폭을 확장할 수 있는 연구를 수행하였으며, 이에 대한 성능 확인을 하였다.

Fig. 8은 다수 메타 원자 10개를 도파관 중앙부 영역 (10 cm × 10 cm)에 배열 및 모델링을 하였으며, 다수 메타 원자에 대한 제원은 Table 1과 같이 설계하였다. 개별 공진기의 특성이 중첩되어 높은 전달손실 효과를



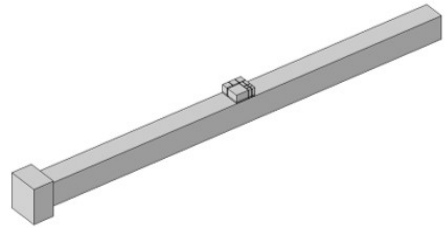
**Fig. 6** Transmission loss of the metamaterial liner showing attenuation peaks at 115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, and 460 Hz



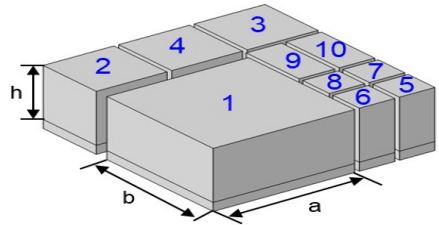
**Fig. 7** Acoustic pressure distributions within the metamaterial liner at the target frequencies of 115 Hz, 230 Hz, 345 Hz and 460 Hz

유도할 수 있는 다수의 메타 원자를 설계 및 모델링을 Fig. 8(a)와 같이 하였으며, 제한된 공간에서도 높은 전달손실을 구현하기 위해 Fig. 8(b)와 같이 고려하였다.

이 연구에서는 Fig. 9와 같은 형상을 기반으로 한정된 공간 영역에서 총 80개의 메타 원자를 도파관의 네 면에 각각 20개씩 균일하게 배치하여 메타 물질 음향 라이너를 구성하였다. 각 메타 원자는 지름 매개변수를 변화시켜 설계되었으며, 이를 통해 음향 라이너의 성능을 해석하였다. 그 결과, 한정된 공간에서도 단일 주파수 공진에



(a) 3D configuration



(b) Design of each liner position

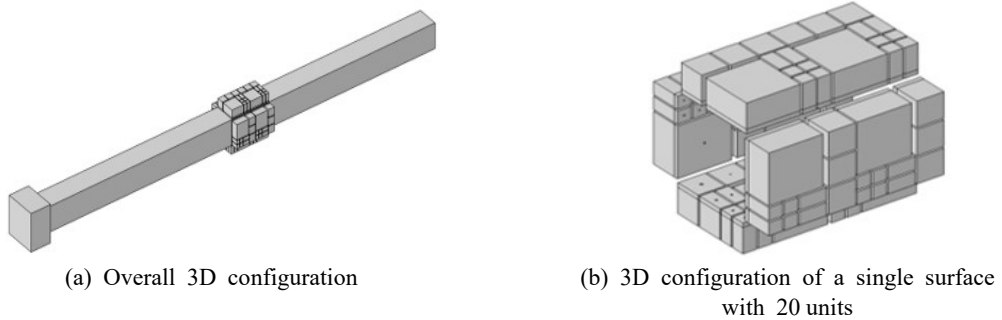
**Fig. 8** Multiple array structure (10-unit metamaterial acoustic liner)

국한되지 않고 블레이드 팬 소음에 대응하는 다중 공진 특성을 효과적으로 결합하여 도파관 내 소음 제어의 주파수 대역폭을 확장할 수 있음을 확인하였다.

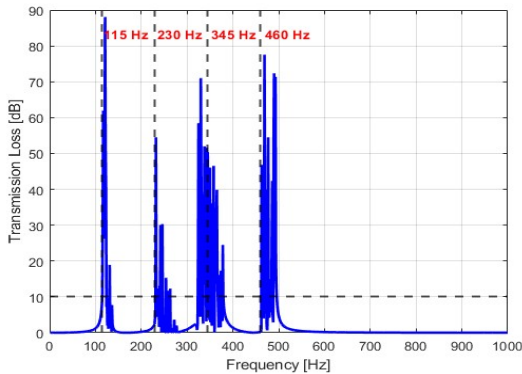
Fig. 10은 제안된 메타 물질 라이너의 전달손실 특성을 나타내며, 튜닝 주파수인 115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz 근처에서 명확한 전달손실 피크가 관찰된다. 각 공진 주파수에서의 최대 전달손실은 약 70 dB ~ 80 dB 수준으로, 메타 원자가 공진하는 주파수 대역에서 효과적인 소음 차단 성능을 보였다. 특히 115 Hz에서 가장 높은 약 90 dB의 손실이 발생하였으며, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz에서도 각각 약 40 dB 이상의 전달손실이 형성되어 다중 주파수 제어에 유리함을 확인할 수 있다. 또한 각 공진주파수 주변에서는 10 dB 이상의 전달손실이 일정 주파수 범위에 걸쳐 유지되었으며, 협대역은 다음과 같이 나타났다. 1차 하모닉스(115 Hz)에서 약 16 Hz, 2차 하모닉스(230 Hz)에서 약 32 Hz, 3차 하모닉스(345 Hz)에서 약 56 Hz, 4차 하모닉스(460 Hz)에서 약 35 Hz의 협대역 감쇠 특성을 확인하였다. 이는 단일 공진기에 비해 제어 주파수 범위가 확장되었음을 의미하며, 메타 원자의 배열 구조에 따른 다중 공진 효과에 기인한 결과이다. 따라서 제안된 메타 물질 라이너는 실질적 공간을 통해 협대역 감쇠 특성을 보여주며, 음향적 성능도 함께 확보할 수 있었다.

**Table 1** Configuration of the multiple array structure

	$L$ [m]	$D$ [m]	$a$ [m]	$b$ [m]	$h$ [m]	$V$ [m <sup>3</sup> ]	Frequency [Hz]
1	0.005	0.002	0.6	0.6	0.3	0.108	116
2	0.005	0.002	0.3	0.3	0.3	0.027	232
3	0.005	0.00111	0.3	0.3	0.3	0.027	130
4	0.005	0.00295	0.3	0.3	0.3	0.027	320
5	0.005	0.001	0.015	0.015	0.3	0.0000675	244
6	0.005	0.00216	0.015	0.015	0.3	0.0000675	490
7	0.005	0.002	0.015	0.015	0.3	0.0000675	462
8	0.005	0.0016	0.015	0.015	0.3	0.0000675	377
9	0.005	0.00211	0.015	0.3	0.3	0.00135	340
10	0.005	0.00226	0.015	0.3	0.3	0.00135	360



**Fig. 9** Multiple array structure (80-unit metamaterial acoustic liner)



**Fig. 10** Transmission loss of the 80-unit meta-atom array (metamaterial acoustic liner)

**4. 결 론**

이 연구에서는 블레이드 팬 주요 소음의 저주파 성분(115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz)을 제어하기 위해 HR 기반 메타 원자를 설계하고, 이를 조합한 메타

물질 음향 라이너의 성능을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) HR의 체적 및 목 반경은 공진주파수를 결정하는 주요 파라미터로, 이를 조절하여 목표 주파수에 맞는 메타 원자를 정확하게 설계할 수 있었다.

(2) 단일 메타 원자는 공진 주파수(115 Hz, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz)에서 뚜렷한 전달손실 피크를 보였고, 이를 조합한 배열 구조에서는 공진 특성이 유지되면서 동시에 주파수 대역폭이 확장되었다.

(3) 단일 메타 원자들을 한정된 공간에 모델링 및 높은 전달손실을 구현할 수 있었다.

(4) 80개 메타 원자로 구성된 메타 물질 라이너는 블레이드 팬 주요 주파수 115 Hz에서 가장 높은 약 90 dB의 손실이 발생하였으며, 230 Hz, 345 Hz, 460 Hz에서도 각각 약 40 dB 이상의 전달손실이 형성되었다.

(5) 블레이드 팬 주요 공진 피크 주변 일정 범위의 주파수 대역에서 10 dB 이상의 손실이 유지되었으며, 협대역은 다음과 같은 1차 하모닉스(115 Hz)에서 약 16 Hz, 2차 하모닉스(230 Hz)에서 약 32 Hz, 3차 하모닉스(345 Hz)에서 약 56 Hz, 4차 하모닉스(460 Hz)에서 약 35 Hz의 협대역 감쇠 특성을 확보하였다.

이로써 이 연구에서 수행한 HR 기반 메타물질 음향 라이너는 제한된 공간에서도 튜닝된 단일 메타원자의 조합을 통해 높은 전달손실을 구현할 수 있으며, 각 하모닉스 성분에서 우수한 협대역 감쇠 특성을 실현할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

이 연구는 LIG NEX1 산학협력 과제 지원으로 연구되었습니다.

## References

- (1) Munjal, M. L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers with Application to Exhaust and Ventilation System Design*, John Wiley & Sons, NJ, United States.
- (2) Bodén, H. and Abom, M., 1995, *Modelling of Fluid Machines as Sources of Sound in Duct and Pipe Systems*, *Acta Acustica*, Vol. 3, pp. 549-560.
- (3) Urick, R. J., 1975, *Principles of Underwater Sound*, McGraw-Hill, OH, United States.
- (4) Junger, M. C. and Feit, D., 1986, *Sound, Structures, and Their Interaction*, 2nd Edition, MIT Press, London, United Kingdom.
- (5) Yang, M. and Sheng, P., 2017, *Sound Absorption Structures: From Porous Media to Acoustic Metamaterials*, *Annual Review of Materials Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 83-114.
- (6) Kim, S. J., Stach, E. A. and Handwerker, C. A., 2010, *Fabrication of Conductive Interconnects by Ag Migration in Cu-Ag Core-shell Nanoparticles*, *Applied Physics Letters*, Vol. 96, No. 14, 144101.
- (7) Su, Z., Wang, Q., Chen, Z.-G. and Lu, M.-H., 2024, *Hybrid Porous Helmholtz Resonator for low-frequency Broadband Absorption*, *Physical Review Applied*, Vol. 22, No. 4, 044032.
- (8) Zhen, N., Huang, R.-R., Fan, S.-W., Wang, Y.-F. and Wang, Y.-S., 2025, *Resonance-based Acoustic Ventilated Metamaterials for Sound Insulation*, *npj Acoustics*, Vol. 1, No. 7, pp. 1-22.
- (9) Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V., 2000, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, NJ, United States.
- (10) Seybert, A. F., 1988, *Two-sensor Methods for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, No. 6, pp. 2233-2239.