

# 저주파수에서 동작하는 가벼운 음향 메타구조 설계

김호진\*<sup>1</sup>, 정윤식\*<sup>2</sup>, 조성실\*\*<sup>1</sup>, 박성균\*\*\*<sup>1</sup>, 홍익표\*\*\*<sup>2</sup>

## Design of Lightweight Acoustic Metastructures Operating at Low Frequency

Ho-Jin Kim\*<sup>1</sup>, Yun-Sik Jung\*<sup>2</sup>, Sung-Sil Cho\*\*<sup>1</sup>, Seong-Gyoon Park\*\*\*<sup>1</sup>, and Ic-Pyo Hong\*\*\*<sup>2</sup>

### 요약

본 논문에서는 일상생활에서 발생하는 낮은 대역의 소음을 줄일 수 있는 가벼운 음향 메타물질을 제안하였다. 제안된 음향 메타물질은 사각 형태의 육면체 구조를 포함한 단위구조가 배열된 구조로, 500Hz 인근의 소음을 저감시킬 수 있으며, FDM 방식의 3D 프린터로 제작이 용이할 뿐만 아니라 비교적 가벼운 특징을 가진다. 단위구조의 각 파라미터 변화에 따른 최대 손실 주파수를 확인하여 구조 최적화를 진행한 결과, 478Hz에서 67dB의 최대 손실을 가지며 448-546Hz의 밴드갭 특성을 가짐을 확인하였다. 또한 다양한 음향 메타물질의 성능을 검증하기 위해 경제성 및 휴대성을 고려한 라즈베리 파이를 기반의 간이 음향 측정 시스템을 제작하였다. 간이 음향 측정 시스템의 성능을 검증하기 위해 선행 연구된 구조 중에서 389Hz에서 최대 투과 손실을 갖는 음향 메타물질을 제작 및 측정 실험을 진행하여 측정결과를 해석결과와 비교 분석하였다. 분석결과, 최대 투과 손실 주파수의 오차는 5.39%로, 제작된 간이 음향 측정 시스템을 이용하여 음향 메타물질의 성능을 예측할 수 있음을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, we proposed a lightweight acoustic metamaterial that can reduce the low band noise in everyday life. The proposed acoustic metamaterial is a structure in which the unit structure including the square resonator can reduce noise around 500Hz, and it is easy to manufacture by FDM type 3D printer and has a relatively light feature. As a result of the structural optimization by checking the maximum loss frequency according to the change of each parameter of the unit structure, it was confirmed that the maximum loss of 67dB at 478Hz and the bandgap characteristics of 448-546Hz. In order to verify the performance of various acoustic metamaterials, a simple acoustic measurement system based on Raspberry Pi was developed considering economics and portability. The previously studied structure was fabricated and measured to confirm the frequency cut-off characteristics of acoustic metamaterials through experiments for verifying the performance of the simple acoustic measurement system.

### Keywords

acoustic metamaterial, locally resonant, lightness, sound level measurement system

\* 공주대학교 정보통신공학부 학부생  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0001-9158-9487>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-1547-7488>  
\*\* 공주대학교 스마트 자연공간 연구센터 연구원  
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0878-077X>  
\*\*\* 공주대학교 정보통신공학부 교수(교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-2729-8041>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>

• Received: Dec. 06, 2019, Revised: Feb. 20, 2020, Accepted: Feb. 23, 2020  
• Corresponding Author: Ic-Pyo Hong  
Dept. of Information & Communication Eng. Kongju National University,  
Cheonan, Korea,  
Tel.: +82-41-521-9199, Email: [iphong@kongju.ac.kr](mailto:iphong@kongju.ac.kr)

## 1. 서 론

최근 전자기학, 광학, 음향학에서 연구되고 있는 메타물질은 단위 구조를 주기적으로 배열하여 자연계에 존재하지 않는 특성을 구현한 물질로서 구조의 크기, 형태, 소재에 따라 특정한 주파수에서 음의 특성을 갖는다[1]. 초기에는 전자기학 분야에서 메타물질에 대한 연구가 진행되었으나, 음파와 전자기파의 작동 원리가 유사성을 가지며 전자기장의 특성을 나타내는 유전율(투자율)이 탄성률의 역수(밀도)와 유사하게 동작한다는 특징을 바탕으로 음향 메타물질의 기술이 발전되어 왔다[2]. 특히, 일상생활에서 발생하는 소음이 청력 손실, 심혈관 질환 및 인지 능력 저하를 야기한다는 문제가 제시됨에 따라[3], 음향 메타물질을 건물이나 차량, 파이프 등에 적용하여 소음을 저감시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다[4]-[14].

일상생활에서 발생하는 소음을 저감시키기 위한 가장 기본적인 방법은 차음재와 같은 일반적인 재료를 이용하는 것이다. 하지만 이는 저주파수 대역(<500Hz)에서 낮은 감쇄 특성을 갖기 때문에 효과적으로 소음을 차단하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 효율적으로 외부의 소음을 감쇄시키기 위해서는 고밀도 재료와 두꺼운 두께의 재료 사용이 요구되어 시공이 어렵다는 단점을 가진다. 하지만 음향 메타물질은 밀도와 구조의 두께, 주파수와 투과손실(Sound transmission loss)이 비례하는 질량-밀도 법칙에 종속되지 않는 구조로 구현할 수 있어 그림 1에 나타낸 바와 같이 주기적인 단위구조를 기반으로 질량-밀도 법칙과 관계없이 특정한 주파수 대역에서 전파가 되지 않는 밴드갭 특성을 이용해 소음을 억제할 수 있다[5].

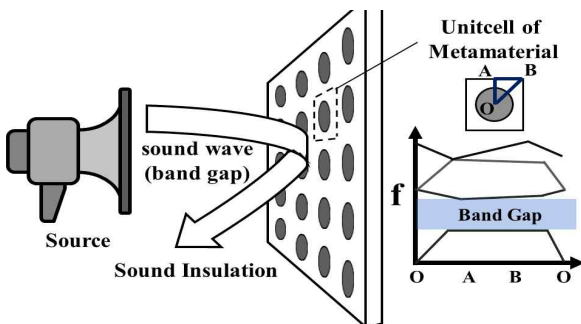


그림 1. 동작 시나리오  
Fig. 1. Operation scenario

음향 메타물질을 구현 하는 방법은 크게 동작 주파수의 파장과 유사한 주기구조에서 발생하는 브래그 산란을 이용한 포노닉 크리스탈(Phononic crystal)과 국부 공진(Locally resonant)을 유도하는 주기적인 단위구조를 이용한 기법이 있다. 포노닉 크리스탈을 이용한 기법은 격자무늬나 구멍, 또는 첨가물을 갖는 단순한 주기구조로 구현할 수 있지만 동작 주파수 대역의 파장과 비슷한 길이의 주기구조가 요구됨에 따라 주로 초음파 영역에서 고려되고 있다[2].

따라서 낮은 대역에서 동작하는 메타물질을 설계하기 위해서 파장보다 작은 주기 구조로 구현 가능한 국부 공진 기법을 주로 사용하고 있다. 이 기법은 주기적으로 배열된 단위구조의 국부 공진 특성으로 해당 주파수와 인접한 음파와 설계 구조에서 역 방사된 파동의 간섭에 의해 음파가 존재하지 않는 밴드갭이 형성되어 포노닉 크리스탈 기법보다 낮은 대역의 소음 저감이 가능하다[4].

본 논문에서는 낮은 대역의 소음을 저감 시킬 수 있는 음향 메타물질의 성능을 검증하기 위해 경제성 및 휴대성을 고려한 간이 음향 측정 시스템을 제작하고 측정을 통해 음향 메타물질의 성능을 예측할 수 있는지 확인하였다. 또한 국부 공진 기법을 이용하여 일반적인 차음재보다 가볍고, 3D 프린팅 방식으로 제작이 가능한 새로운 경량 음향 메타물질을 설계하였다.

## II. 음향 메타물질 연구동향

낮은 주파수 대역의 소음 저감이 가능한 국부 공진 기법의 음향 메타물질은 2000년 처음으로 연구되었다[9]. 이 구조는 실리콘 내부에 금속 구를 포함한 단위구조로 구성되어 있지만, 매우 무겁고 두께가 두껍다는 단점이 있다. 따라서 이를 개선하기 위해 사각 허니컴구조(Square honeycomb), 공진기구조(Resonator), 이중 층 구조, 샌드위치 구조 등 다양한 형태의 단위구조가 연구되어왔다. 사각 허니컴구조는 얇은 판 위에 프레임(Frame)을 이용하여 단위구조의 옆면을 둘러싼 허니컴구조로, 두께가 얇고 안정적인 구조 특성을 가지지만 단위구조의 크기가 크고, 협대역 특성을 가진다[10].

공진기구조는 특정 주파수에서 공진특성을 갖는

3차원 구조로, 소형화의 장점이 있으며 평판 뿐만 아니라 파이프와 같이 곡면에도 적용이 용이하다 [4][11]. 하지만 사각 허니컴구조나 공진기구조는 동작하는 주파수 대역이 협대역임으로 이를 개선하기 위해 사각 허니컴 구조와 공진기구조를 결합하여 음향 메타물질을 설계하였다[12].

또한 최근에는 공진기구조 아랫면의 얇은 판을 이중으로 적층한 이중 층 구조를 설계하거나, 공진기구조를 적층하는 샌드위치 구조를 설계하여 대역폭을 확장하기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으나 두꺼운 구조와 제조 공정이 복잡하다는 단점을 가진다[13][14].

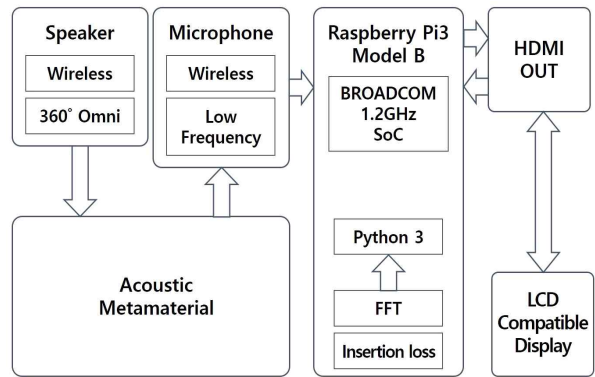
본 논문에서는 추후 소음 저감을 위한 차음벽으로 활용이 가능한 얇은 두께를 갖는 경량 음향 메타물질을 제안하였다. 두께가 얇은 구조를 설계하기 위해 사각 허니컴구조와 공진기구조를 결합한 구조를 이용하였으며, 3D 프린터로 제작이 가능함에 따라 제작이 쉽고, 무게가 가벼운 특징이 있어 다양한 곳에 적용이 유리하다.

### III. 음향 메타물질 성능 측정 시스템

#### 3.1 음향 스펙트럼 측정 시스템

본 논문에서는 음향 메타구조의 성능을 예측할 수 있는 음향 스펙트럼 측정 시스템을 제작하였다. 기존 음향 메타물질 측정 시스템은 도플러 레이저 진동계(Laser doppler vibrometer)를 이용하여 진동에 따른 구조의 특성 변화를 통해 공진 주파수를 확인하는 방법과 무반향실에 음향 메타물질을 적용하여 스피커와 마이크를 통해 음향 투과손실을 측정하는 음향 스펙트럼 측정 방법이 있다. 하지만 이 방식은 무반향실을 구축해야 하며, 음향 메타물질을 대면적으로 제작해야 하는 어려움이 있다. 따라서 싱글보드 컴퓨터인 라즈베리 파이3를 이용하여 저렴한 가격으로 작은 크기를 갖는 음향 메타물질의 음향 투과 손실 예측이 가능한 간이 측정 시스템을 그림 2와 같이 제작하였다.

제안한 간이 음향 스펙트럼 측정 시스템은 크게 음향 메타물질 성능 측정 부분과 측정결과를 계산 및 분석하는 부분으로 구분할 수 있다.



(a) 측정 시스템의 블록 다이어그램  
(a) Block diagram of measurement system



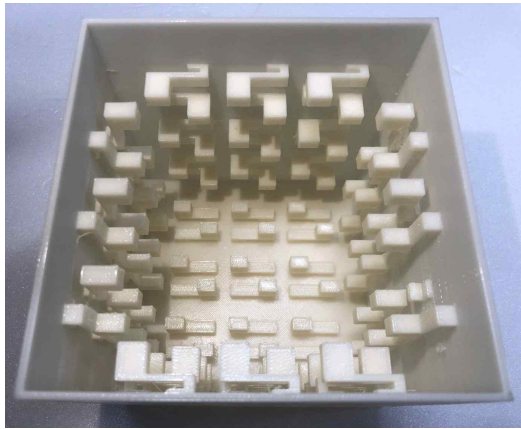
(b) 측정 환경  
(b) Measurement environment  
그림 2. 음향 스펙트럼 측정 시스템

Fig. 2. Acoustic spectrum measurement system

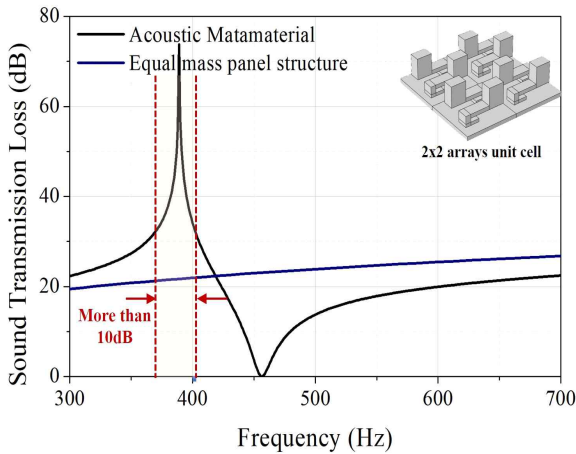
그림 2(a)는 시스템의 블록 다이어그램을 나타낸 것으로 음향 메타물질 내부에 있는 스피커에서 정현파 신호가 출력되면, 음향 메타물질 외부에 있는 고감도 마이크를 통해 신호의 세기를 측정하고, 측정된 신호는 리눅스 기반의 라즈베리 파이3 모델 B에 저장되어 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘을 통해 음향 투과 손실을 계산하여 보여준다. 그림 2(b)는 실제 측정 환경을 나타낸 것으로 휴대성을 용이하도록 하기 위해 합판을 이용하여 조립식 케이스를 구성하였고, 케이스를 통한 반사를 줄이기 위해 흡음재를 벽면에 부착하였다.

#### 3.2 측정 시스템 검증

제작된 음향 스펙트럼 측정 시스템의 성능을 검증하기 위해 선행 연구 [13]에서 제안한 구조를 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 3D 프린터를 이용하여 다시 제작하였으며, 밀도(Density)는  $1050\text{kg/m}^3$ , 영률(Young's modulus)은 2.2GPa, 푸아송비(Poisson's ratio)는 0.35를 갖는 ABS를 매질로 사용하였다.



(a) 제작한 구조  
(a) Fabricated structure



(b) 투과 손실 시뮬레이션 결과

(b) Simulated results of transmission loss  
그림 3. 시스템 검증을 위한 메타물질 구조

Fig. 3. Metamaterial structure for system verification

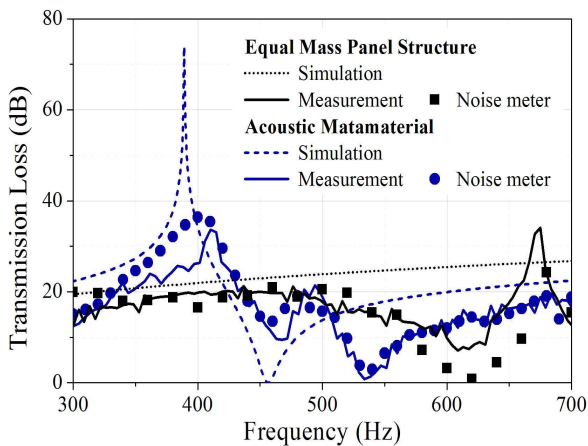


그림 4. 음향 스펙트럼 측정 시스템의 측정 결과

Fig. 4. Measured results of acoustic spectrum measurement system

그림 3은 시스템 검증을 위해 제작된 메타물질 구조와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 그림 3(a)에 나타낸 바와 같이  $12 \times 12 \times 12 \text{cm}$  크기를 갖는 박스형 구조로 제작하였다. 또한 선행 연구된 구조의 매질이 ABS로 변경됨에 따라 구조의 손실특성 변화를 확인하기 위해 상용 소프트웨어인 COMSOL Multiphysics를 사용하여 ABS 매질일 때의 투과 손실을 시뮬레이션 하였으며, 이를 그림 3(b)에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 389 Hz에서 74dB의 최대 손실을 가지며, 제작한 구조와 동일한 질량을 갖는 동일 질량 구조(Equal mass panel)와 비교했을 경우 367 - 403Hz에서 10dB 이상의 높은 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

제작된 메타물질 구조를 간이 음향 스펙트럼 측정 시스템에 적용하여 측정된 결과, 그림 4를 통해 알 수 있듯이 410Hz에서 33.6dB의 최대 투과 손실을 가짐을 확인하였다. 뿐만 아니라 간이 음향 스펙트럼 측정 시스템을 이용하여 측정된 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 일상생활에서 쉽게 구입할 수 있는 UNIT-T사의 UT353인 소음 측정기를 이용하여 주파수 변화에 따른 투과 손실을 측정하였으며 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 소음 측정기를 이용하여 측정된 결과, 400Hz에서 36.4dB의 최대 투과 손실을 가지며, 주파수 변화에 따라 간이 음향 스펙트럼 측정 시스템을 통해 측정된 결과와 비교적 유사한 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

하지만 측정 결과 모두 시뮬레이션 결과와 비교했을 경우 5.39%(21Hz)의 최대 손실 주파수 오차가 발생하며, 투과 손실 역시 오차가 발생하는데 이는 제작된 구조가 유한구조이며, 주변에서 발생하는 소음의 영향으로 인하여 생긴 오차로 사료된다.

#### IV. 음향 메타물질 설계 및 분석

##### 4.1 음향 메타물질 설계

한국산업규격(KS)에서 규정한 방음벽의 성능 평가 기준 주파수는 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz이며, 특히 일상생활에서 기피되는 주파수는 저주파수 대역인 125~500Hz에 집중되어 있다[15][16]. 따라서 본 논문에서는 저주파 소음이 인체에 미치는 영향

을 최소화하기 위하여 500Hz 인근의 소음 감쇄를 목표하였으며, 구조 소형화 및 단순한 형태의 구조를 설계하기 위해 공진기구조를 이용하여 음향 메타물질을 설계하였다.

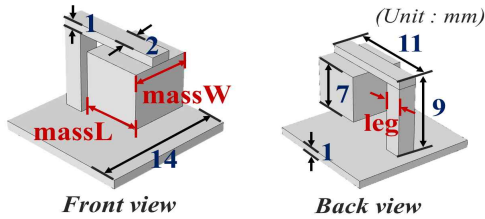
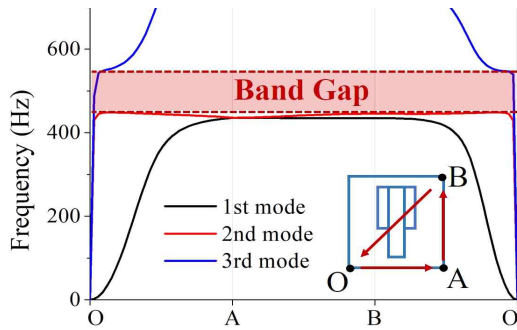


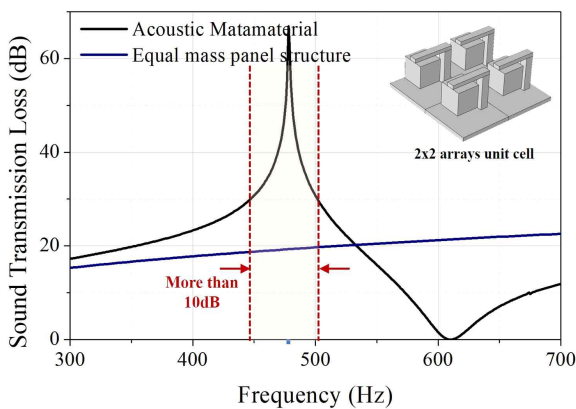
그림 5. 제안한 음향 메타물질  
Fig. 5. Proposed acoustic metamaterial

표 1. 설계 변수  
Table 1. Design parameter

Parameter	Value [mm]	Parameter	Value [mm]
massL	6	massW	5
leg	2		



(a) 단위구조의 분산 곡선  
(a) Dispersion curves for the unit cell



(b) 투과 손실  
(b) Transmission loss

그림 6. 제안한 음향 메타물질의 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulated results of proposed acoustic metamaterial

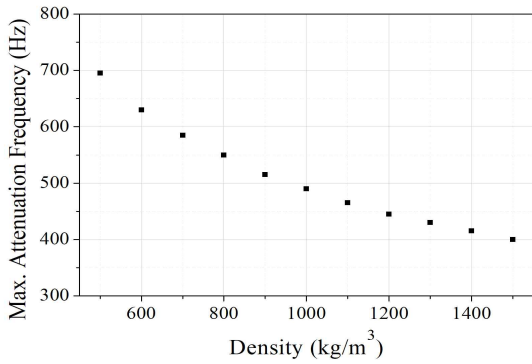
제안한 구조는 그림 5에 나타난 바와 같이 사각 형태의 육면체 구조가 지지대와 결합된 공진기구조로, 지지대와 육면체 구조의 사이 간격과 육면체 구조의 크기 변화에 따라 다양한 주파수 특성을 갖는다. 이를 확인하기 위해 각 설계 변수의 변화에 따른 성능 분석을 하였으며, 최적화된 설계 변수는 표 1에 나타내었다.

이때 구조의 매질은 FDM 방식의 3D 프린터로 제작하는 것을 고려하여 3.2장에서 나타낸 ABS의 매질과 동일하다고 가정하였다.

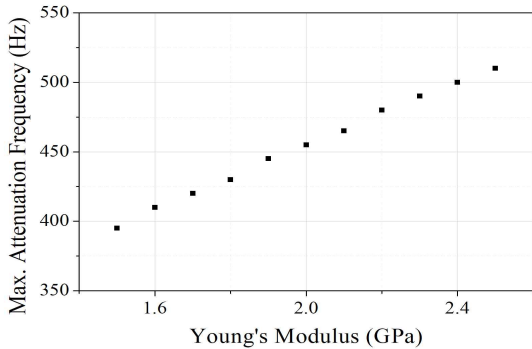
제안한 구조를 해석하는 과정에서 메모리와 해석 시간을 고려하여 Floquet Boundary로 무한배열 구조를 가정하였다. COMSOL Multiphysics의 Acoustic & Structure 모듈을 이용하여 분산곡선(Dispersion curve) 및 투과 손실을 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)는 제안한 음향 메타물질 단위구조의 분산 곡선 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 448~546Hz에서 밴드갭이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 주파수 변화에 따른 투과 손실을 확인한 결과 478Hz에서 67dB의 최대 투과 손실을 가지며, 440~505Hz 대역에서 등가 질량 구조보다 10dB 이상의 높은 손실을 가지는 것을 그림 6(b)를 통해 확인할 수 있다.

#### 4.2 물성 변화에 따른 성능 변화

음파는 매질의 분자를 진동시키면서 전파되며, 변형을 회복하는 정도인 체적 탄성 계수( $k$ )와 부피당 분자의 개수인 밀도( $\rho$ )의 비의 제곱근의 형태로 음파의 성질이 결정된다. 하지만 음향 메타물질에서는 브래그 산란 또는 구조의 공진 특성을 기반으로 자연계에서 확인할 수 없는 음파의 성질이 나타나는데, 이러한 물리적 특성을 설명하기 위해 유효 물성이 도입된다. 유효 물성(유효 체적 탄성 계수와 유효 밀도)은 매질의 종류뿐만 아니라 외부의 힘과 단위구조의 변화에 따른 구조의 진동변위에 의해 유효 물성이 결정되며, 이는 음향 메타물질의 차단 주파수와 대역폭에 영향을 준다[2]. 따라서 음향 메타물질을 설계하기 위해서는 매질의 선택이 중요하며, 동일한 매질이더라도 서로 다른 물성(탄성 계수, 밀도) 값을 가짐으로 물성 변화에 따른 성능 변화를 확인할 필요가 있다.



(a) 밀도에 따른 성능 변화  
(a) Performance change by density



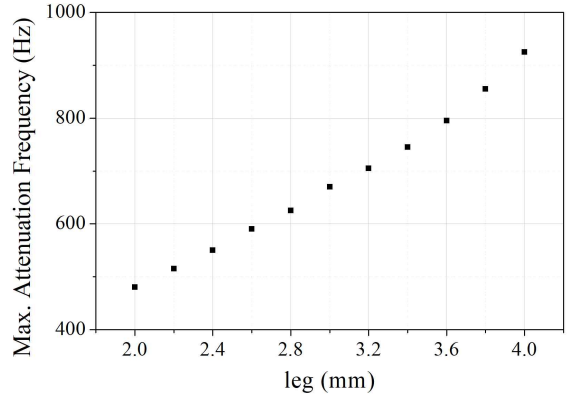
(b) 탄성 계수에 따른 성능 변화  
(b) Performance change by elastic modulus

그림 7. 물성 변화에 따른 주파수 응답 결과  
Fig. 7. Frequency response result by physical property change

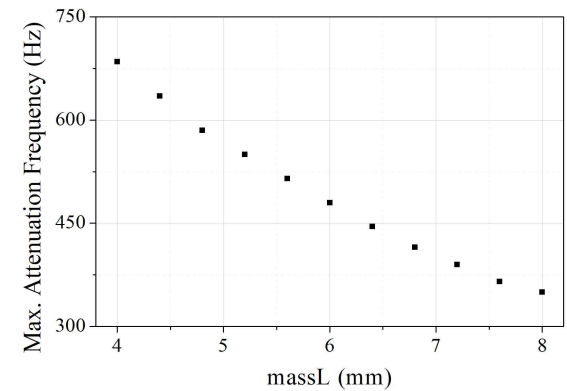
그림 7은 메타물질의 물성 변화에 따른 주파수 응답 특성을 해석한 결과로서 밀도가 100kg/m<sup>3</sup> 씩 증가함에 따라 최대 투과 손실 주파수가 저주파 대역으로 이동하는 특징이 나타나며, 탄성 계수가 증가할수록 최대 투과 손실 주파수가 고주파 대역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 통해 매질의 밀도와 탄성률이 유효 물성 값과 비례하여 영향을 주는 것을 확인할 수 있으며, 높은 밀도와 낮은 탄성 계수를 갖는 매질을 이용할 경우에는 보다 낮은 주파수에서 동작하는 음향 메타물질을 설계할 수 있음을 확인할 수 있다.

### 4.3 설계 변수에 따른 성능 변화

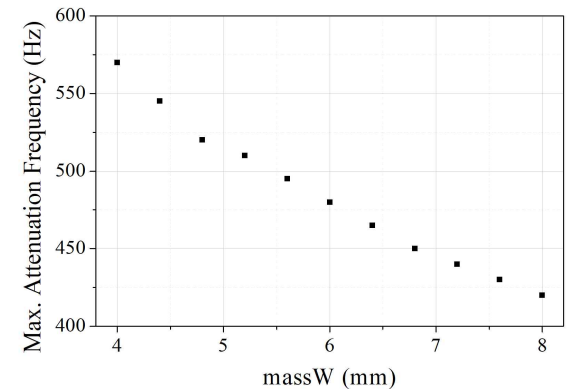
음향 메타물질의 성능을 결정하는 유효 물성은 4.2에서 언급한 바와 같이 매질의 물성뿐만 아니라 구조적 크기 변화에 따른 진동변위에 따라 유효 물성 값이 결정됨으로, 구조의 설계 변수에 따른 성능을 확인할 필요가 있다.



(a) 지지대의 두께에 따른 성능 변화  
(a) Performance change by the thickness of leg structure



(b) 육면체 구조의 길이에 따른 성능 변화  
(b) Performance change by the length of the hexahedron



(c) 육면체 구조의 넓이에 따른 성능 변화  
(c) Performance change by the width of the hexahedron

그림 8. 구조 파라미터에 따른 주파수 응답 변화  
Fig. 8. Frequency response result by structure parameters

제안된 구조의 설계 변수에 따른 최대 손실 주파수의 변화를 확인하기 위하여 육면체 구조(massL, massW)와 지지대(leg)의 두께를 설계 변수로 설정하여 최대 투과손실 주파수를 확인하였다.

그림 8(a)는 지지대의 두께의 변화에 따른 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로 육면체 구조의 무게

를 고려하여 2~4mm에 따른 주파수 응답을 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 설계 변수 leg의 증가에 따라 최대 투과손실 주파수가 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 육면체 구조의 길이와 넓이 변화에 따른 결과를 확인하기 위해서 설계 변수 massL, massW를 4~8mm 범위에서 조정하며 최대 투과손실 주파수를 확인하였으며, 해석결과를 그림 8(b), 그림 8(c)에 나타내었다.

해석 결과, 육면체 구조의 길이와 넓이가 증가하면 저지 대역이 저주파 대역으로 이동하는 특성이 나타나며, 설계 변수 leg와 정 반대의 경향성을 보임을 알 수 있다. 따라서 제안한 구조는 육면체 구조와 지지대의 두께가 유효 물성에 영향을 주는 파라미터임을 확인할 수 있으며, 구조 파라미터들을 적절히 조절하여 사용 목적에 따라 서로 다른 차단 주파수를 갖는 음향 메타물질을 설계 할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 사각 형태의 공진기구조를 기반으로 일상생활에서 기피되는 500Hz 인근의 소음을 저감시킬 수 있는 가벼운 음향 메타물질을 설계하였다. 설계된 음향 메타물질은 적층 방식의 3D 프린터로 제작하기 위해 매질은 ABS로 가정하였고, 시뮬레이션과정을 통해 478Hz에서의 최대 손실 주파수 67dB를 가지며, 448~546Hz에서 밴드갭을 갖는 것을 확인하였다.

제안한 구조를 제작하여 성능을 검증하기 위해서는 음향 측정 시스템을 구축해야함으로 본 연구에서는 음향 메타물질의 성능을 검증하기 위한 간이 음향 스펙트럼 측정 시스템을 제작하였다. 이는 저주파수 대역의 신호를 수신하여 FFT 과정으로 음압 세기를 실시간으로 측정 및 분석이 가능하며, 측정 시스템을 검증하기 위해 선행 연구된 구조를 제작하여 측정 실험을 진행하였다.

측정 결과, 시뮬레이션 결과와 최대 5.39% 오차가 발생함을 확인하였으며, 추후 제작한 간이 측정 시스템을 이용하여 제안한 음향 메타물질을 3D 프린팅 기법으로 제작 및 성능을 비교할 예정이다.

## References

- [1] J. H. Lee, M. C. Hong, J. T. Oh, and W. S. Yoon, "Design of a S-band oscillator using vertical split ring resonator", *Journal of KIIT*, Vol. 17, No. 3, pp. 43-50, Mar. 2019.
- [2] G. Ma and P. Sheng, "Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons", *Science Advances*, Vol. 2, No. 2, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501595>.
- [3] M. Basner, W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen, and S. Stansfeld, "Auditory and non-auditory effects of noise on health", *Lancet*, Vol. 383, No. 9925, pp. 1325-1332, Apr. 2014.
- [4] A. Nateghi, L. Sangiuliano, C. Claeys, E. Deckers, B. Plumers, and W. Desmet, "Design and experimental validation of a metamaterial solution for improved noise and vibration behavior of pipes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 455, pp. 96-117, Sep. 2019.
- [5] F. Z. Nejad and R. Fleury, "Active times for acoustic metamaterials", *Reviews in Physics*, Vol. 4, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.revip.2019.100031>
- [6] X. Wang, Y. Chen, G. Zhou, T. Chen, and F. Ma, "Synergetic coupling large-scale plate-type acoustic metamaterial panel for broadband sound insulation", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 459, Oct. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114867>
- [7] K. Lu, G. Zhou, N. Gaoc, L. Li, H. Lei, and M. Yu, "Flexural vibration bandgaps of the multiple local resonance elastic metamaterial plates with irregular resonators", *Applied Acoustics*, Vol. 159, Feb. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107115>
- [8] L. Wu, Q. Geng, and Y. M. Li, "A locally resonant elastic metamaterial based on coupled vibration of internal liquid and coating layer", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 468, Mar. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115102>

- [9] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, "Locally resonant sonic materials", *Science*, Vol. 289, No. 5485, pp. 1734-1736, Sep. 2000.
- [10] S. Varanasi, J. S. Bolton, and T. Siegmund, "Random incidence transmission loss of a metamaterial barrier system", *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, Melbourne Austria, pp. 5594-5601, Nov. 2014.
- [11] H. Peng, P. Frank Pai, and H. Deng, "Acoustic multi-stopband metamaterial plates design for broadband elastic wave absorption and vibration suppression", *Mechanical Sciences*, Vol. 103, pp. 104-114, Nov. 2015.
- [12] C. Claeys, E. Deckers, B. Pluymers, and W. Desmet, "A lightweight vibro-acoustic metamaterial demonstrator: Numerical and experimental investigation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 70-71, pp. 853-880, Mar. 2016.
- [13] N.G.R. d. M. Filho, L. V. Belle, C. Claeys, E. Deckers, and W. Desmet, "Dynamic mass based sound transmission loss prediction of vibro-acoustic metamaterial double panels applied to the mass-air-mass resonance", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 442, pp. 28-44, Mar. 2019.
- [14] Z. Liu, R. Rumlper, and L. Feng, "Broadband locally resonant metamaterial sandwich plate for improved noise insulation in the coincidence region", *Composite Structures*, Vol. 200, pp. 165-172, Sep. 2018.
- [15] C. H. Kim, "Road noise countermeasures in multi-family houses using soundproof walls", *Journal of KNV Eng.*, Vol. 26, No. 4, pp. 12-26, Jul. 2016.
- [16] P. Wu, Q. Mu, X. Wu, L. Wang, X. Li, Y. Zhou, S. Wang, Y. Huang, and W. Wen, "Acoustic absorbers at low frequency based on split-tube metamaterials", *Physics Letters A*, Vol. 383, No. 20, pp. 2361-2366, Jul. 2019.

저자소개

김 호 진 (Ho-Jin Kim)



2020년 2월 : 공주대학교  
정보통신공학부(공학사)  
관심분야 : 안테나, 주파수 선택구조  
설계 및 응용

정 윤 식 (Yun-Sik Jung)



2020년 2월 : 공주대학교  
정보통신공학부(공학사)  
관심분야 : 신호처리

조 성 실 (Sung-Sil Cho)



2016년 2월 : 공주대학교  
정보통신공학부(공학사)  
2018년 2월 : 공주대학교  
정보통신공학과(공학석사)  
2018년 3월 ~ 현재 : 공주대학교  
스마트자연공간 연구센터 연구원  
관심분야 : 안테나, 주파수

선택구조 설계 및 응용

박 성 균 (Seong-Gyoon Park)



1985년 2월 : 연세대학교  
전자공학과(공학사)  
1987년 2월 : 연세대학교  
전자공학과(공학석사)  
1994년 8월 : 연세대학교  
전자공학과(공학박사)

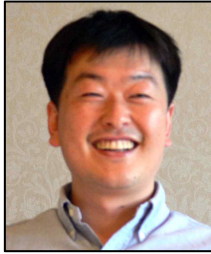
1987년 4월 ~ 1989년 8 : 삼성전자  
사무자동화기기 연구원

2009년 9월 ~ 2010년 8월 : Virginia Tech University,  
Visiting Scholar

1994년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 정보통신공학부 교수  
관심분야 : 무선통신, 재난통신, 전파공학



홍 익 표 (Ic-Pyo Hong)



1994년 2월 : 연세대학교

전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 연세대학교

전자공학과(공학석사)

2000년 2월 : 연세대학교

전기컴퓨터공학과(공학박사)

2000년 3월 ~ 2003년 2월 :

삼성전자 무선사업부 책임연구원

2006년 2월 ~ 2007년 2월 : Texas A & M University,

Visiting Scholar

2012년 2월 ~ 2013년 2월 : Syracuse University, Visiting

Scholar

2003년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 정보통신공학부 교수

관심분야 : 전자기 수치해석, 주파수 선택구조, 스펙트럼  
공학