

# 음향메타물질 단위격자 축소를 통한 소리 차단

## Sound Blocking Using Acoustic Metamaterial Scaling

박성준, 송경준\*, 김제도<sup>†\*\*</sup>

(SungJun Park, Kyungjun Song\*, and Jedo Kim<sup>\*\*†</sup>)

부경대학교 기계공학과, \*한국기계연구원, \*\*홍익대학교 기계시스템디자인공학과  
(Received June 2, 2015; revised July 20, 2015; accepted August 19, 2015)

**초 록:** 본 연구는 지그재그 형상의 음향메타물질 구조체를 1:1, 1:2와 1:4의 축적으로 구성하여 순차배치시킴으로써 나타나는 광대역 음파차단 현상을 유한요소법을 이용하여 분석하였다. 그 결과 단위격자를 축소시킨 구조체의 투과 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)은 각 구조체의 독립적인 투과 특성을 중첩한 것과 같은 효과를 얻었으며 이로 인해 음파차단 대역폭과 크기가 현저히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 유효물질 이론을 이용하여 음향메타물질이 매질의 임피던스와 굴절률을 높이는 것을 확인 하였다. 본 연구를 통해 다양한 메타물질을 이용하고 이를 단위격자를 축소시킴으로써 효과적인 광대역 소리차단을 실현 할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어:** 음향메타물질, 소음차단, 단위격자 축소, 멀티피직스

**ABSTRACT:** In this study, we use 1:1, 1:2, and 1:4 scale zig-zag shape acoustic metamaterial structure to achieve broad and effective sound blocking at the subwavelength scale. The SPL(Sound Pressure Level) results show that the SPL loss of the scaled metamaterial slab in series is a superposition of individual SPL losses. Also, we show that the metamaterial tailors the material properties to achieve high impedance and high refractive index using effective medium theory. Our results show that broad and effective sound blocking is possible at the subwavelength scale just by scaling acoustic metamaterial.

**Keywords:** Acoustic metamaterial, Sound blocking, Scaling, Multiphysics

**PACS numbers:** 43.50.-x, 43.10.-a

### 1. 서 론

일반적으로 소음방지기술은 흡음과 차음, 방진으로 나뉘진다. 방진기술은 소음원이 발생시키는 진동을 감소시키는 방법이다. 진동을 발생시키는 원인인 물체의 충돌이나 회전 및 왕복운동에 의해 발생하는 진동을 추나 완충재를 이용해 방지한다. 흡음기술은 흡음재를 이용해 음파를 흡수시키는 방법이다. 다공질형의 흡음재를 이용해 음에너지를 열에너지로 전환시키거나 다공판, 또는 슬릿을 이용한 공명현상으로 음파를 흡수시킨다. 차음기술은 두꺼운 벽면이나 이중벽을 이용해 음파의 투과손실을 발생시킨다.<sup>[1]</sup> 기존의 흡, 차음재는 높은 에너지 전환율이나 감쇠

효과를 위해서는, 파장 길이의 1/4의 홀수 배이거나, 질량법칙으로 인해 두꺼운 두께를 요구 한다. 하지만, 최근 각광받는 메타 물질<sup>[2-9]</sup>을 이용한 흡, 차음재는 단위 셀의 집합구조를 통해 공명주파수에서의 음파 차단이 이루어지며, 공명기 구조나 단위 셀의 크기가 음파의 파장보다 매우 작아질 수 있으므로, 적은 두께로 높은 흡음이나 차음효과를 기대할 수 있게 되었다.

본 연구는 파장의 약 1/8인 격자 크기를 가지고 고 임피던스와 고굴절률을 동시에 구현하는 음향메타물질<sup>[10]</sup>의 단위격자를 축소시켜 순차적으로 배치함으로써 음파의 반사와 공명현상을 이용한 소리 차단 현상을 개발자 프로그램인 Comsol Multiphysics를 이용하여 진행하였다. 파장보다 작은 구조물은 유효매질로서의 역할을 하며 지그재그 구조체의 경우 유효

<sup>†</sup>Corresponding author: Jedo Kim (jedokim@hongik.ac.kr)  
Hongik University, 94 Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Republic of Korea  
(Tel: 82-2-320-1692, Fax: 82-2-320-1125)

매질 내의 공간을 최대한 압축하는 결과를 가진다. 이로써 음파의 진행 방향으로는 굴절율과 임피던스에 영향을 주게 됨으로 매질과 음파의 상호작용을 효과적으로 제어할 수 있다.

## II. 차음재의 구조와 시뮬레이션 방법

### 2.1 메타물질의 기본구조와 시뮬레이션 영역

Fig. 1은 시뮬레이션에 사용된 메타물질 단위격자의 디자인과 2차원 모델이다. 지그재그 형태의 기본 구조물은 격자크기  $a$ 의 약 8배인 파장대에서 공진현상을 일으키는 메타원자이며, 기본구조물의 축척을 각각 1:1, 1:2, 1:4로 변화시켜 특정매질 공기 내에 직렬로 배치하였다. 선 A-B와 선 A'-B'에는 반복 경계 조건을 설정하였으며 구조물과 매질 사이에는 음향-구조 경계조건을 적용하였다.

### 2.2 지배방정식

음향 모델의 지배방정식은, 정상상태에서 유체가 손실이 없으며, 단열되어있고, 점성효과를 무시할 수 있으며, 등 엔트로피라고 가정하면, 헬름홀츠 방정식에서 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.<sup>[12]</sup>

$$\nabla \cdot \frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - \vec{q}_d) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m. \quad (1)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2, \quad (2)$$

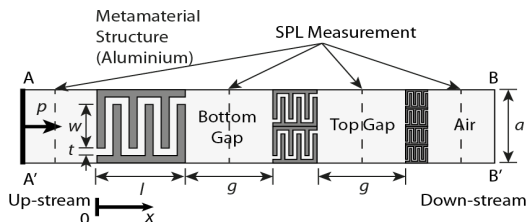


Fig. 1. Scaled identical unit cell acoustic metamaterial structure in series. The dimensions of the structures are  $l = 1.1$  cm,  $t = 0.1$  cm,  $w = 0.6$  cm,  $a = 1$  cm. Perfectly matched boundary layer condition was applied at B-B'. Periodic conditions were applied along lines A-B and A'-B'. The material in dark grey color is aluminium and the material in white is air. Acoustic structure boundary exists between the two.

$$k_{eq} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

여기서  $\rho_c$ 는 유체의 밀도,  $q_d$ 와  $Q_m$ 는 각각 쌍극자 음원과 단극음원이다.  $c_c$ 는 음속  $k_{eq}$ 는 파동수이며,  $\omega$ 는 각진동수이다.

탄성 구조체의 지배방정식은 아래와 같으며,

$$-\rho\omega^2 \mathbf{u} - \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}_v e^{i\phi}, \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_0 = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\epsilon} - \boldsymbol{\epsilon}_0), \quad (5)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u}^T + \nabla \mathbf{u})], \quad (6)$$

$\mathbf{C}$ 는 탄성텐서이며,  $\boldsymbol{\sigma}$ 와  $\boldsymbol{\epsilon}$ 은 응력과 변형률이다.  $\boldsymbol{\epsilon}_0$ 와  $\boldsymbol{\sigma}_0$ 는 각각 초기 변형률과 응력을 의미하며,  $\mathbf{u}$ 는 변형량,  $\mathbf{F}_v$ 는 물체력,  $\phi$ 는 위상인자이다.

$$-\vec{n} \cdot \left[ \frac{-1}{\rho_c} (\nabla p_t - \vec{q}_d) \right] = -\vec{n} \cdot \vec{u}_{tt}, \quad (7)$$

$$\vec{\sigma} \cdot \vec{n} = p_t \vec{n}. \quad (8)$$

위 식의  $\vec{n}$ 은 구조체의 내부에서 바깥쪽을 가리키는 법선벡터이며,  $u_{tt}$ 는 구조체의 변형량을 시간에 대해 두 번 미분한 항이다. 위의 식을 통해, 압력을 응력으로 전환시켜 구조체와 유체에서 일어나는 음파의 상호작용 해석이 가능하다.

### 2.3 재료 물성치와 물리현상 해석

본 연구에 이용된 파동의 전파매질은 공기이며 음향메타물질 구조체의 재료는 알루미늄이다. 사용된 매질과 재료의 물성치는 Table 1과 같다.

음향구조 해석은 주파수 영역에서 진행하였으며, Fig. 1의 한쪽 끝에서 압력  $p$ 의 평면파를 입사시켜 1:4 메타물질과 Down-stream의 경계면에서 1.5 cm 떨어진 곳의 절대압력을 측정하고, 입사된 평면 압력파를 기준압력으로 음압레벨(Sound Pressure Level, SPL)을 측정하였다. 측정된 SPL의 기준이 되는 압력

Table. 1. Material properties of the structure (Aluminum) and the medium (Air) using in this study.

Aluminum			Air	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson's ratio	Young's modulus (Pa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Speed of sound (m/s)
2700	0.33	70 × 10 <sup>9</sup>	1.29	330

은 평면 압력과  $p$ 이다. 단위격자를 특정배율로 축소시킨 구조체의 독립적인 SPL 투과특성 파악을 위해 1:1, 1:2, 1:4 축척의 메타물질의 시뮬레이션을 각각 진행하여 SPL을 확인하고, 구조물들 사이를 동일한 간격인  $g = 1.1$  cm로 순차 배치시켜 변화된 SPL을 확인하였다. 구조물을 순차 배치시켰을 때 SPL을 확인한 각 구간은 압력파의 진행방향 순서대로 Up-stream, Bottom Gap, Top Gap, Down-stream으로 구분했다. 또한, 순차적으로 배치된 음향 메타물질 사이의 간격  $g$ 를 0.7 cm에서 1.5 cm까지 0.4 cm 간격으로 변화시켜 SPL 투과 그래프를 확인하였다.

다음으로 음향메타물질의 물성치 변화 효과를 확인하기 위해 동일한 시뮬레이션을 유효물성치 값을 가지는 균질한 매질을 사용하여 진행하였다. 유효물성치 값은 매질의 밀도와 소리의 속도를 임의로 조절하여 통한 투과율 변화를 관찰하여 구할 수 있다. 또한 전자기학의 유전율과 도자율은 음향에서 동밀도와 동압축률로 1:1 상응됨으로 유한요소법을 통한 투과율과 반사율을 이용하여 음향 수치 산란 회수법을 통해서도 얻을 수 있다.<sup>[11]</sup>

### III. 시뮬레이션 결과

#### 3.1 음향메타물질의 SPL 손실 분석 결과

Fig. 2는 각 배율의 메타물질을 각각 배치하였을 때, Fig. 1의 메타물질과 Down-stream의 경계면에서 1.5 cm 떨어진 곳의 SPL을 측정하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 음압의 투과율은 1:1 축척의 메타물질은 3651 Hz, 7351 Hz, 11001 Hz, 14451 Hz에서, 1:2 축척의 메타물질은 7351 Hz, 14651 Hz, 1:4 축척의 메타물질은 14801 Hz에서 100%가 되었다. 축척의 변화에 따라 메타물질이 구현하는 물성치가 달라지며, 기본 공명주파수가 4:2:1로 축척에 반비례한다.

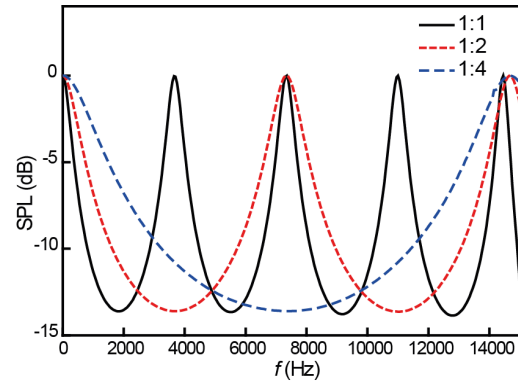


Fig. 2. Predicted the transmission characteristics across the individual scaled slabs (1:1, 1:2, and 1:4).

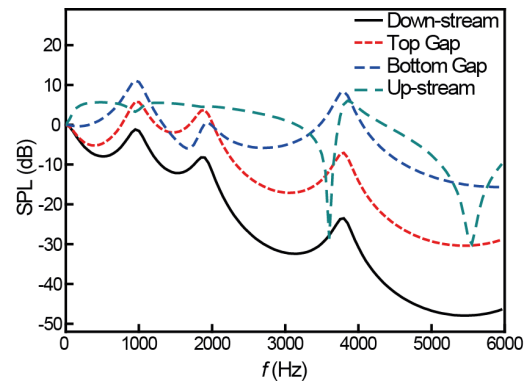


Fig. 3. Predicted SPL for the up-stream, top gap, bottom gap and down-stream of the acoustic metamaterial structure in series.

Fig. 3에서는 각 축척의 메타물질을 1.1 cm의 동일한 간격으로 순차 배치시켰을 때, 각 영역에서의 SPL을 확인하였다. Top Gap과 Bottom Gap은 각 영역의 중심에서, Up-stream과 Down-stream은 각 영역과 메타물질의 경계에서 1.5 cm 떨어진 지점에서 SPL을 측정하였다. 음파가 각 축척의 메타물질을 지나면서 SPL의 손실이 증가하였다. 그리고 Down-stream 영역에서의 SPL은 Fig. 2에서 확인한 단일 구조체의 투과특성과는 다르게 2000~6000 Hz의 넓은 주파수 대역폭에서 SPL 손실을 발생시켰다. 또한 SPL은 1:1 축척의 메타물질의 SPL 투과특성과 유사하게 꼭짓점이 나타났으며, 각 축척의 메타물질의 투과율 그래프를 중첩시킨 것과 유사한 것을 알 수 있다.

#### 3.2 유효매질의 시뮬레이션 영역

Fig. 4는 유효물질을 이용한 2차원 모델이다. 단위

격자를 각 배율로 변화시킨 메타물질에 대응하는 유효물성치를 갖는 물질인  $Z_1, Z_2, Z_3$ 을 공기 내에 동일한 간격  $g = 1.1 \text{ cm}$ 로 직렬배치한다.  $Z_1, Z_2, Z_3$ 는  $49 \text{ kg/m}^3$ 의 동일한 밀도와 각각  $81 \text{ m/s}, 82 \text{ m/s}, 83 \text{ m/s}$ 의 음속을 가지는 물질이다.

### 3.3 유효매질과 메타물질의 비교분석 결과

Fig. 5는 유효매질과 순차 배치된 음향 메타물질의 각 Down-stream 영역에서의 SPL을 확인한 것이다. 두 모델은 1:4 배율의 메타물질과 Down-stream의 경계,  $Z_1$ 과 Down-stream 영역의 경계에서  $1.5 \text{ cm}$  떨어진 위치의 SPL을 측정하였다. Down-stream 영역에서의 SPL은 두 모델이 거의 일치한다.

또한 두 시뮬레이션 모델의 정규화된 압력의 진폭과 국부속도, 음향강도를 x축의 원점을 기준으로  $-1 \text{ cm}$ 부터  $4.5 \text{ cm}$ 까지 측정하여, Fig. 6에서 비교해보았다. 국부속도는 매질 중의 미소한 부분이 음파에 의해 진동하는 속도이며, 정규화된 압력의 진폭은 입사파  $p$ 를 기준으로 측정된 부분의 절대압력을 정규

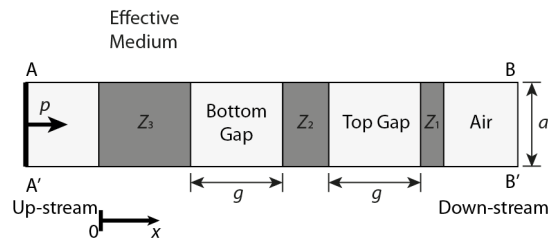


Fig. 4. Effective medium representation of the scale acoustic metamaterial in series.

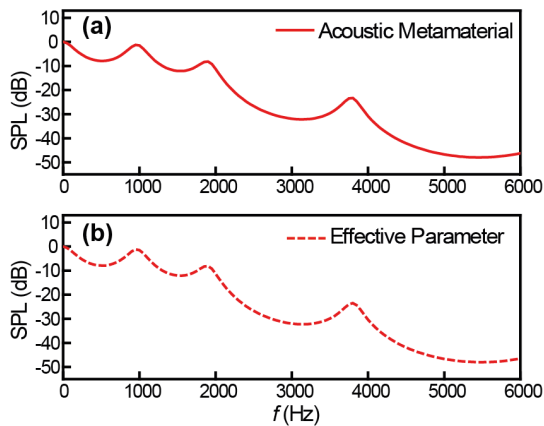


Fig. 5. Comparison between the SPL for the acoustic metamaterial and corresponding effective medium.

화 시킨 값이다. 음파가 진행하는 각 영역에서의 수치는 두 모델이 거의 일치하였다.

따라서 공기를 기준매질로 정의했을 때, 시뮬레이션에 사용된 메타물질이 기준매질의 임피던스를 약 9배, 굴절률을 약 4배 증가시켜, 자연에서는 존재하지 않는 물성치의 물질  $Z_1, Z_2, Z_3$ 을 구현해냈음을 보여준다. 굴절률은 기준매질에서의 파동의 속도를 다른 매질에서의 파동의 속도로 나눈 값이다.

### 3.4 간격변화 분석 결과

Fig. 7에서는 Fig. 1의  $g$ 를  $0.7 \text{ cm}$ 부터  $0.4 \text{ cm}$  간격으로  $1.5 \text{ cm}$ 까지 변형시켰을 때의 SPL을 Down-stream

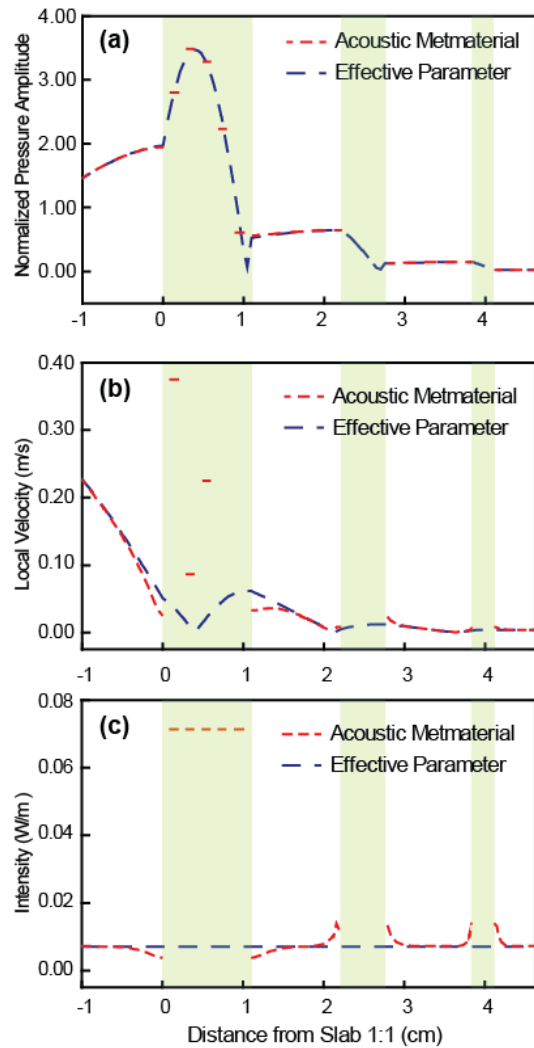


Fig. 6. Comparison between (a) the normalized pressure, (b) the velocity and (c) intensity for the acoustic metamaterial and corresponding effective medium.

영역에서 확인하였다.  $g$ 가 0.7 cm이면 두 번째 꼭짓 점은 2301 Hz에서 발생하며, 1.5 cm이면 1601 Hz에서 발생했다. 또한, 0.7 cm일 때와 1.5 cm일 때의 최저 음압은 -43 dB와 -49 dB로 나타났다. 따라서 각 축척의 메타물질 간의 간격이 늘어날수록 투과되는 SPL이 감소하고, 소음차단효과를 보이는 주파수 범위가 넓어지는 것을 확인했다.

#### IV. 결 론

파장의 약 1/8인 격자 크기의 지그재그 형상인 알루미늄 구조체를 1:1, 1:2, 1:4로 단위격자를 축소시켜 순차 배치했을 때 소리의 차단현상을 해석하였다. 유한요소법을 이용하여 평면 압력파가 한 단면으로 입사됐을 때, 각 축척의 구조체가 가지는 독립적인 투과특성과 구조체들을 순차 배치시켰을 때의 SPL의 손실과의 관계를 확인하였다. 각 구조체의 투과특성은 축척에 반비례하고, 순차 배치시켰을 때의 손실은 1:1 축척의 구조체의 투과특성이 지배적이며, 각 구조체의 SPL 투과 그래프를 중첩시킨 것과 유사했다. 각 구조체를  $49 \text{ kg/m}^3$ 의 동일한 밀도와 각각 81 m/s, 82 m/s, 83 m/s의 음속을 가지는 유효매질  $Z_1, Z_2, Z_3$ 로 대체해도 Down-stream 영역의 SPL 손실은 거의 일치했다. 또한 각 구조체 사이의 간격을 변화시켰을 때, 간격이 증가할수록 소음차단성능과 대역폭이 향상되었다. 향후 메타물질의 디자인 변경과 각 구조체 사이의 간격 조절을 통해 저주파수 영역까지 소리의 차단효과 범위를 확장시키고 소음차단

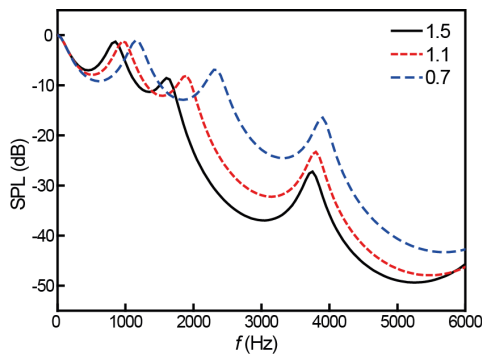


Fig. 7. Predicted SPL vs. frequency different gap sizes between scaled identical unit cell acoustic metamaterial structure in series.

성능을 증가시킬 예정이다. 본 연구를 통해 다양한 메타물질을 이용하고 이를 단위격자를 축소시킴으로써 효과적인 광대역 소리차단을 실현할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2014년도 부경대학교 자율창의학술연구비에 의하여 연구되었음.

#### References

1. C. Sujatha, *Vibration and Acoustics: Measurement and Signal Analysis* (McGraw-Hill, New York, 2009), pp. 86-102.
2. J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and Youngs, I., "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures," *Phys. Rev. Lett.* **76**, 4773-4776 (1996).
3. J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE T. Microw. Theory* **47**, 2075-2084 (1999).
4. R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science* **292**, 77-79 (2001).
5. N. Fang, D. Xi, J. Xu, M. Ambati, W. Srituravanich, C. Sun, and X. Zhang, "Ultrasonic metamaterials with negative modulus," *Nat. Mater.* **5**, 452-456 (2006).
6. S. Zhang, C. Xia, and N. Fang, "Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves," *Phys. Rev. Lett.* **106**, 024301 (2011).
7. J. Li and C. T. Chan, "Double-negative acoustic metamaterial," *Phys. Rev. E* **70**, 055602 (2004).
8. Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, Y. Y. Zhu, Z. Yang, C. T. Chan, and P. Sheng, "Locally resonant sonic materials," *Science* **289**, 1734-1736 (2000).
9. Z. Liang and J. Li, "Extreme acoustic metamaterial by coiling up space," *Phys. Rev. Lett.* **108**, 114301 (2012).
10. K. Song, K. Kim, S. Hur, J. H. Kwak, J. Park, J. R. Yoon, and J. Kim, "Sound pressure level gain in an acoustic metamaterial cavity," *Sci. Rep.* **4**, 7421 (2014).
11. D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, and C. M. Soukoulis, "Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients," *Phys. Rev. B* **65**, 195104 (2002).
12. COMSOL, *COMSOL Multiphysics reference manual*, version 4.4 (2013).

## 저자 약력

### ▶ 박 성 준 (Park SungJun)

2015년 2월: 부경대학교 학사



### ▶ 송 경 준 (Song Kyungjun)

2002년 8월: 서울대학교 기계공학부 학사  
 2004년 8월: University of Michigan Ann Arbor 기계공학과 석사  
 2010년 12월: University of Michigan Ann Arbor 기계공학과 박사  
 2012년 5월: University of Michigan 전자공학과 포스닥  
 2012년 6월 ~ 현재: 한국기계연구원 선임연구원



### ▶ 김 제 도 (Kim Jedo)

2004년 6월: University of Toronto 기계공학과 학사  
 2007년 8월: University of Michigan Ann Arbor 기계공학과 석사  
 2011년 6월: University of Michigan Ann Arbor 기계공학과 박사  
 2012년 8월: OCI 연구소 선임연구원  
 2012년 9월: 부경대학교 기계공학과  
 2015년 9월 ~ 현재: 홍익대학교 기계시스템 디자인공학과 조교수

