헬름홀츠 공명기들로 구성된 음향 메타물질의 파동전파 특성

Wave Propagation Characteristics of Acoustic Metamaterials with Helmholtz Resonators

권 병 진*. 조 충 희*. 박 광 춘**, 오 일 권†

Byung-Jin Kwon, Choonghee Jo, Kwang-Chun Park and Il-Kwon Oh

(Received October 23, 2012 ; Revised January 24, 2013 ; Accepted January 24, 2013)

Key Words : Acoustic Metamaterials(음향 메타물질), Acoustic Transmission Line Method(음향 전송선 방법), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공명기), Effective Impedance(유효 임피던스), Dispersion Relation(분산 관계)

ABSTRACT

The wave propagation characteristics of an acoustic metamaterial composed of periodically repeated one-dimensional Helmholtz resonator array was investigated considering the effects of dimensional changes of the resonator geometry on the transmission coefficient and band gap. The effective impedance and transmission coefficient of the acoustic metamaterials are obtained based on the acoustic transmission line method. The designed acoustic metamaterials exhibit band gaps and negative bulk modulus that are non-existent properties in the nature. The band gap of the acoustic metamaterial is strongly dependent on the geometry parameters of Helmholtz resonators and lattice spacing. Also, a new type of metamaterial that is periodically constructed with two different resonators was designed to open the local resonance band gap without change of Bragg scattering.

기 호 설 명

ρ_w : 물의 밀도

c_w : 물에서의 음속(speed of sound)

S_1 : 도파관의 단면적(l_1^2)

S_2 : 공명기 목의 단면적(πa_2^2)

S_3 : 공명기 공동의 단면적($l_3 \times w_3$)

l_1 : 도파관의 한 변의 길이

a_2 : 목의 반지름

d_2 : 목의 길이

l_3 : 공동의 너비

w_3 : 공동의 두께

d_3 : 공동의 높이

L : 격자간격

η : 물의 점성계수

† Corresponding Author ; Member, Division of Ocean System Engineering, School of Mechanical, Aerospace and System Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology
E-mail : ikoh@kaist.ac.kr

* Tel : +82-42-350-1520, Fax : +82-42-350-1510
Division of Ocean System Engineering, School of Mechanical, Aerospace and System Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

** Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

k : 파수(ω/c)
 α : 물의 흡수계수
 a : 피스톤의 유효 반지름
 z_{eff} : 유효 임피던스

1. 서 론

주기적인 격자구조로 이루어진 포노닉 크리스탈(phononic crystal)에서 음파가 진행할 때 밴드갭, 음굴절과 같은 파동 특이 현상이 나타나며 이로 인해 음향 메타물질의 파동 전파 특성이 많은 관심을 받고 있다. 특이한 음향 구조로 구성된 음향 메타물질에서 음파가 진행할 때 압력의 변화에 의해 음파가 변하게 되며, 이것은 음파가 진행할 수 없는 밴드갭 영역을 만들게 된다. 밴드갭 영역을 가지는 음향 메타물질은 파장 길이보다 훨씬 작은 인공 구조의 단위 셀로 구성된 복합체로서 자연계에 존재하지 않는 특이한 파동전파 특성을 가진다. 음향 메타물질이 가지고 있는 파동 특성은 필터와 웨이브가이드, 음향렌즈⁽¹⁾, 음향은폐⁽²⁾와 같은 응용분야에 활용될 수 있다.

특이한 파동전파 특성을 갖는 음향 메타물질의 분산 특성은 밀도와 음향 속도의 주기적인 변화에 의한 브래그 산란(Bragg scattering)과 소형구조체로 이루어진 복합체에 의한 국부 공진(local resonance)을 통해 나타난다⁽³⁾. 이런 현상은 다양한 크기를 가지는 소형구조체의 여러 국부 공진에 의해 넓은 주파수 영역에서도 나타날 수 있다⁽⁴⁾. 또한 소형구조체를 배열형 패널로 제작함으로써 흡음패널로 사용할 수도 있다⁽⁵⁾.

음향 메타물질에서 음파가 진행할 때 공진주파수 영역에서는 자연계에 존재하지 않는 음의 유효 체적 탄성 계수가 나타난다. 특히 헬름홀츠 공명기로 이루어진 단위 셀을 1차원으로 배열한 음향 메타물질에서도 공진주파수 영역에 대해 음의 유효 체적 탄성 계수를 가질 수 있다⁽⁶⁻⁹⁾.

음향 시스템은 전자기 시스템에 대해 유사성을 가지기 때문에 acoustic transmission line method(ATLM)를 이용하여 주파수에 따른 유효 임피던스와 전달계수(transmission coefficient)를 구할 수 있다⁽¹⁰⁾. 이때 도파관에서 진행하는 음파는 전송선을 따라 진행하는 전자기파와 유사성을 가지며 헬름홀

츠 공명기는 집중회로로 나타낼 수 있다. 또한 음향 시스템에서의 압력 차이와 체적 속도는 전자기 시스템에서의 전압 차이, 전류와 대응될 수 있다.

이 논문에서는 음향 메타물질의 특이한 파동전파 특성을 알아보기 위해 헬름홀츠 공명기들로 구성된 음향 메타물질에 ATLM를 적용하여 헬름홀츠 공명기의 형상변화에 따른 임피던스와 전달 계수의 변화를 알아보았다. 그리고 음향 메타물질에서 진행하는 음파의 전달 계수와 분산 관계를 통해 파동전파 특성을 확인하였으며 다른 종류의 소형구조체를 적용함으로써 국부 공진에 의한 밴드갭의 변화를 살펴보았다.

2. Acoustic Transmission Line Method

2.1 헬름홀츠 공명기

헬름홀츠 공명기들로 구성된 음향 메타물질에서의 파동전파 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같이 도파관과 헬름홀츠 공명기(Helmholtz resonator)를 커플링하여 음향 메타물질을 구성하였다. 헬름홀츠 공명기를 가지는 모든 단위 셀들은 동일한 크기를 가지고 있으며 격자간격은 헬름홀츠 공명기가 공진할 때의 파장 길이(λ)에 대해 $\frac{\lambda}{5}$ 의 크기를 가진다.

Fig. 2와 같이 단위 셀은 도파관 영역과 헬름홀츠 공명기 영역으로 나누어질 수 있으며 헬름홀츠 공명기는 목과 공동(cavity)으로 구성된다.

또한 단위 셀은 lumped parameter 형식으로 나타내어 압력과 R-L-C 회로로 구성될 수 있다. 헬름홀츠 공명기에서 목에 의한 음향 질량(M_h)은 인덕터와 같고 공동에 의한 음향 콘덴서(C_h)는 캐패시터와 같은 역할을 하게 되므로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾.

Fig. 1 Schematic diagram of the 1D acoustic meta-materials

$$M_h = \frac{\rho_w d_{eff}}{S_2}, \quad C_h = \frac{S_3 d_3}{\rho_w c_w^2} \quad (1)$$

헬름홀츠 공명기의 목을 통해 음파가 진행하면 방사로 인해 음압이 변하는 공간의 길이가 실제 목의 길이보다 더 길게 된다. 따라서 플랜지 형태로 구성된 헬름홀츠 공명기에 대해 공명기의 목 길이(d_2)는 $d_{eff} = d_2 + 1.7a_2$ 와 같이 수정된다⁽¹⁰⁾. 헬름홀츠 공명기의 목에서는 물에 의한 점성과 방사로 인한 저항(R_h)이 생기게 되며 이는 주파수(ω)에 비례한다⁽⁷⁾.

$$R_h = \frac{d_2 \sqrt{2\eta\omega\rho_w}}{\pi a_2^3} + \frac{\rho_w c_w (ka_2)^2}{S_2} \quad (2)$$

앞에서 구한 음향 질량과 음향 콘덴서 그리고 저항을 통해 헬름홀츠 공명기의 음향 임피던스는 다음과 같이 구해진다⁽¹⁰⁾.

$$Z_h = R_h + j\left(\omega M_h + \frac{1}{\omega C_h}\right) \quad (3)$$

음향 메타물질의 단위 셀에서 헬름홀츠 공명기의 크기에 의해 결정되는 공진주파수는 식 (4)와 같이 표현되며 목과 공동의 변화에 따라 달라진다⁽⁷⁾.

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{M_h C_h}} = \frac{c_w}{2\pi\sqrt{\frac{S_3 d_3 d_{eff}}{S_2}}} \quad (4)$$

단위 셀로 구성된 구조체(Fig. 3)의 유효 임피던스를 구하기 위해 음파의 파장 길이보다 큰 플랜지로 구성되고 끝이 열려있는 도파관을 가정한다. 도파관 출구에서 기계적인 방사로 인한 음향 임피던스를 아래와 같이 구한다⁽¹⁰⁾.

$$Z_{aL} = \frac{\rho_w c_w}{S_1} \times \left(\frac{k^2 a^2}{2} + j \frac{8ka}{3\pi} \right) \quad (5)$$

도파관 출구에서 구한 음향 임피던스는 변환식을 이용하여 N번째 단위 셀의 목부분 임피던스로 변환될 수 있으며 변환식은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$Z'_{aL} = Z \times \frac{Z_{aL} + jZ \tan(KL)}{Z + jZ_{aL} \tan(KL)} \quad (6)$$

(a) Dimensions of a single cell

(b) Equivalent acoustic transmission line circuit of a unit cell

Fig. 2 Unit cell of Helmholtz resonator

Table 1 The structure parameters

Parameters	Values
Density	998 kg/m ³
Speed of sound	1483 m/s
Viscosity coefficient	1.85×10 ⁻⁵
Absorption coefficient	3×10 ⁻¹⁴
L(lattice spacing)	9.2 mm
l_1	4 mm
d_2	1 mm
a_2	1 mm
d_3	5 mm
l_3	3.14 mm
w_3	4 mm

Fig. 3 Procedure for effective impedance in the 1D acoustic metamaterials

$$Z = \frac{\rho_w c_w}{S_1} \quad (7)$$

$$K = k - j\alpha \quad (8)$$

여기서 Z 는 도파관의 임피던스이며 L 은 격자구조로 구성된 음향 메타물질에서 단위 셀의 길이이다. 또한 파수는 도파관에 있는 유체의 영향으로 인해 흡수 계수를 포함한 식으로 수정된다.

N 번째 단위 셀에서 변환된 목부분의 임피던스는 헬름홀츠 공명기의 임피던스와 병렬로 연결되어 있으며 병렬계산을 함으로써 N 번째 단위 셀의 유효임피던스를 구할 수 있게 된다⁽¹⁰⁾.

$$\frac{1}{Z_N} = \frac{1}{Z_{aL}} + \frac{1}{Z_h} \quad (9)$$

ATLM에 의해 N 번째 단위 셀의 임피던스를 $N-1$ 번째의 헬름홀츠 공명기의 목부분 임피던스로 변환할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$Z'_N = Z \times \frac{Z_N + jZ \tan(KL)}{Z + jZ_N \tan(KL)} \quad (10)$$

이것은 다시 $N-1$ 번째 헬름홀츠 공명기의 임피던스와 병렬 계산되어 출구에서부터 $N-1$ 번째 단위 셀까지의 유효 임피던스를 구할 수 있게 된다. 이 과정을 반복하게 되면 도파관의 입구에서 음향 메타물질 전체에 대한 유효 임피던스를 구할 수 있게 된다. 구해진 음향 메타물질의 유효 임피던스와 도파관의 임피던스를 이용하여 음압 반사 계수를 구할 수 있으며 구해진 반사 계수를 통해 도파관을 지나가는 음파의 전달 계수를 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$r_p = \frac{Z_{eff} - Z}{Z_{eff} + Z} \quad (11)$$

$$r_I = |r_p|^2 \quad (12)$$

$$T = 1 - r_I \quad (13)$$

음향 메타물질의 단위 셀을 구성하고 있는 헬름홀츠 공명기의 파라미터와 임피던스에 사용된 변수들은 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 200개의 헬름홀츠 공명기를 가지는 음향 메타물질에 평면파가 진행할 때 주파수의

변화에 따른 유효 임피던스와 전달계수를 보여 주고 있다. 음향 저항이 음향 유도 저항보다 높은 영역에서는 전달 계수가 1에 가깝게 되어 음향 메타물질을 지나는 음파가 적은 손실을 가지고 진행하는 것을 알 수 있다. 하지만 음향 유도 저항이 음향 저항보다 높은 영역에서는 음파가 지나가지 못하는 밴드갭 영역이 발생하게 된다. 32.2 kHz 부근에서 생기는 밴드갭 영역은 헬름홀츠 공명기의 국부 공진에 의해 나타나는 현상이며 80.3 kHz 부근에서 생기는 밴드갭 영역은 헬름홀츠 공명기의 주기적인 격자 배열로 인해 발생하는 브래그 산란에 의해 나타나는 현상이다. 브래그 산란 영역 주파수는 다음과

Fig. 4 Effective impedance of waves passing through the acoustic metamaterials with 200 Helmholtz resonators

Fig. 5 Transmission coefficient of wave passing through the acoustic metamaterials with 200 Helmholtz resonators

같은 관계식을 통해 구할 수 있다⁽⁷⁾.

$$f_b = \frac{\lambda f_h}{2L} \quad (14)$$

헬름홀츠 공명기의 공진주파수와 브래그 산란에

Fig. 6 Pressure distribution fields of acoustic metamaterials with 200 Helmholtz resonators(FEM simulation results by COMSOL multiphysics)

의한 밴드갭 영역을 Fig. 6과 같이 finite element method(FEM) 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다. Fig. 6에서 밴드갭 영역인 32 kHz와 82 kHz 부근에서 압력이 낮아지며 음파가 차단되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 밴드갭 영역이 아닌 60 kHz에서는 압력이 유지되며 음파가 진행하게 된다.

헬름홀츠 공명기는 한 개만으로도 음파를 필터링할 수 있지만 음향 메타물질과 같이 여러 개의 헬름홀츠 공명기를 사용함으로써 국부 공진과 브래그 산란에 의한 밴드갭 영역에 대해서만 음파를 필터링할 수도 있다. 이는 파라미터 변화에 따라 공진주파수가 달라지므로 원하는 주파수 영역에 대해 음파를 차단할 수 있기 때문이다. 하지만 나머지 주파수 영역에서는 유체에 의한 손실을 제외하고 에너지 손실 없이 진행할 수 있게 된다. Fig. 7에서는 헬름홀츠

(a)

(b)

Fig. 7 Effective impedance (a) and transmission coefficient (b) by the change of the number of Helmholtz resonators in acoustic metamaterials

공명기의 개수변화에 따른 유효 임피던스와 전달 계수를 보여 주고 있다. 헬름홀츠 공명기의 개수가 증가할수록 파동변동이 수렴되는 것을 알 수 있다. 또한 20 kHz 이하의 주파수 영역에서 밴드갭과 비슷한 파동 특이현상이 나타난다. 이것은 단위 셀이 가지는 헬름홀츠 공명기에 의한 밴드갭보다 낮은 주파수 영역에서 나타난다. 20 kHz 이하의 주파수 영역에서 나타나는 파동 특이현상은 음향 메타물질에서 단위 셀의 개수변화에 따른 전체 도파관 길이의 변화에 따라 나타나는 음파 차단 현상이다. 단위 셀의 개수가 적을 때는 음향 메타물질의 전체 도파관 길이가 짧으며, 20 kHz 이하의 주파수 영역에서는 파장이 긴 음파가 지나가기 때문에 음파가 차단되는 현상으로 나타난다. 하지만 단위 셀의 개수가 많아질수록 전체 도파관 길이가 길어지므로 20 kHz보다 낮은 주파수 영역에서 음파 차단현상이 나타난다. 즉, 20 kHz 주파수 영역에서 나타나는 파동 특이현상은 헬름홀츠 공명기들 사이의 커플링 현상에 의한 영향 보다는 전체 도파관 길이에 의한 영향으로 나타나는 음파 차단 현상이다.

음향 메타물질의 밴드갭 영역을 확인하기 위해 음향 메타물질 안으로 흐르는 음파의 분산 관계를 알아보았다. 헬름홀츠 공명기가 주기적으로 배열된 구조체에 대한 음파의 분산 관계는 이미 연구되어 있다⁽¹¹⁾. 물의 점성에 의한 손실을 무시한다면 식 (15)와 같은 식으로 분산 관계를 나타낼 수 있다⁽⁸⁾.

$$\cos(KL) = \cos\psi + \frac{\eta\psi\sin\psi}{2[(\omega/\omega_0)^2 - 1]} \quad (15)$$

$$\psi = \frac{\omega L}{c_w} \quad (16)$$

Fig. 8은 단위 셀이 동일한 헬름홀츠 공명기로 구성된 음향 메타물질에서 음파가 진행할 때 나타나는 분산 관계를 보여주고 있다. 주파수에 따른 임피던스를 통해 알 수 있듯이 헬름홀츠 공명기의 형상에 의해 결정되는 국부 공명과 헬름홀츠 공명기의 주기적인 배열로부터 생기는 브래그 산란에 의해 분산 관계에서 밴드갭이 생기는 것을 확인하였다. 또한 전달 계수의 결과와 같이 분산관계의 밴드갭 영역에서 음파가 진행하지 못한다는 것을 알 수 있다.

2.2 헬름홀츠 공명기의 크기변화에 따른 파동전파 분석

Fig. 9에서 200개의 헬름홀츠 공명기로 구성된 음향 메타물질의 목과 공동의 파라미터 변화로 인해 공진주파수와 밴드갭 대역이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 헬름홀츠 공명기의 파라미터 변화로 인해 공진주파수가 달라지므로 국부 공진으로 생기는 밴드갭 영역이 달라지게 된다. 하지만 음향 메타물질을 구성하고 있는 단위 셀의 격자간격이 고정되어 있어 주기적인 격자 배열에 의한 브래그 산란의 밴드갭 영역은 80.3 kHz에 고정되어 있다. 헬름홀츠 공명기에서 목의 반지름 길이가 증가하게 되면 공진 주파수가 증가하게 되며 밴드갭 영역이 넓어지는 것을 볼 수 있다. 또한 헬름홀츠 공명기에서 공동의 부피가 작아짐에 따라 공진주파수가 감소하고 파동의 전달률이 감소하는 것을 알 수 있다.

헬름홀츠 공명기의 목과 공동의 크기 변화에 따라 밴드갭 영역의 주파수를 달리 할 수 있기 때문에 파라미터를 변화시킴으로써 음파가 차단되는 밴드갭 영역의 주파수 대역을 달리 할 수 있게 된다. Fig. 9는 200개의 헬름홀츠 공명기로 구성된 음향 메타물질에서 모든 헬름홀츠 공명기의 파라미터인 목의 반지름과 공동의 부피를 각각 변화시켜 유효 임피던스와 전달 계수를 보여주고 있다. 하지만 모든 헬름홀츠 공명기의 파라미터를 변화시키는 것은 비효율적이므로 200개 헬름홀츠 공명기 중 격자간격으로

Fig. 8 Dispersion curve and band structure of the acoustic metamaterials with identical helmholtz resonators

배치된 100개의 헬름홀츠 공명기의 파라미터를 변화시켜 전달 계수를 확인하였다. Fig. 10은 200개의 헬름홀츠 공명기 중 100개의 헬름홀츠 공명기가 격자간격으로 파라미터 변화를 가지는 음향 메타물질을 보여준다. 첫 번째 종류의 헬름홀츠 공명기는 Table 1에 나타나 있듯이 $a_2=1$ mm, $d_3=5$ mm의 파라미터를 가지고 있으며 두 번째 종류의 헬름홀츠 공명기는 $a_2=1.3$ mm, $d_3=3.3$ mm의 파라미터를 가지고 있다. Fig. 11에 나타난 것과 같이 파라미터의 크기가 다른 두 종류의 헬름홀츠 공명기가 가지는 공진주파수에서 밴드갭 영역이 생기는 것을 확인할 수 있다. 하지만 헬름홀츠 공명기의 파라미터가 달라짐에 따라 파동진행의 간섭이 생기게 되며 이로 인해 국부 공진으로 생기는 두 개의 밴드갭이 점점

하나로 합쳐져 더욱더 넓은 밴드갭이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 파라미터가 서로 다른 두 종류의

Fig. 10 Schematic diagram of the 1D acoustic metamaterials with the alternating dimensional variation of Helmholtz resonators

Fig. 9 Variation of effective impedance and transmission coefficients according to the change of neck parameters (a) and cavity parameters (b)

Fig. 11 Transmission coefficient of acoustic metamaterials composed of alternating two different geometries

헬름홀츠 공명기를 격자간격으로 배치하여 음향 메타물질을 만들게 됨으로써 특정 주파수 영역에서 생기는 두 개의 밴드갭 영역보다 넓은 주파수 영역에서 음파가 차단되는 것을 확인 할 수 있다.

두 종류의 헬름홀츠 공명기는 32.2 kHz와 47.1 kHz의 공진주파수를 가지고 있으며 헬름홀츠 공명기가 일정한 간격으로 배치되어 있으므로 브래그 산란에 의한 밴드갭 영역은 파라미터가 변하지 않은 헬름홀츠 공명기의 브래그 산란에 의한 밴드갭 영역과 같은 공진주파수를 가지게 된다.

3. 결 론

헬름홀츠 공명기와 도파관을 가지는 단위 셀로 구성되어 있는 1차원 음향 메타물질에서 ATLM을 이용하여 유효 임피던스와 주파수에 따른 전달 계수를 구하였다. 헬름홀츠 공명기의 공진주파수와 격자간격으로 배치된 단위 셀의 브래그 산란에 의한 밴드갭 영역으로 인해 음파가 차단되는 것을 전달 계수를 통해 알 수 있었다. 또한 음향 메타물질의 단위 셀에서 헬름홀츠 공명기의 파라미터를 변화시킴으로써 공진주파수에 의한 밴드갭의 위치와 주파수 대역폭을 변화시킬 수 있었다. 헬름홀츠 공명기에서 격자간격으로 파라미터를 변화시키면 두 종류의 헬름홀츠 공명기에 의한 두 개의 공진주파수와 파동진행의 간섭으로 인해 넓은 밴드갭 영역이 형성되는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소(계약번호 UD110096DD)의 연구비 지원에 의한 연구 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Zhang, S., Yin, L. and Fang, N., 2009, Focusing Ultrasound with an Acoustic Metamaterial Network, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 102, No. 19, 194301(4pp).
- (2) Zhang, S., Xia, C. and Fang, N., 2011, Broadband Acoustic Cloak for Ultrasound Waves, *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 106, No. 2, 024301(4pp).
- (3) Wang, Z. G., Lee, S. H., Kim, C. K., Park, C. M., Nahm, K. and Nikitov, S. A., 2008, Acoustic Wave Propagation in One-dimensional Phononic Crystals Containing Helmholtz Resonators, *J. Appl. Phys.*, Vol. 103, 064907.
- (4) Seo, S. H. and Kim, Y. H., 2005, Silencer Design by Using Array Resonators for Low-frequency Band Noise Reduction, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 118, No. 4, pp. 2332~2338.
- (5) Kim, S. R. and Kim, Y. H., 2005, A Helmholtz Resonator Array Panel for Low Frequency Sound Absorption, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 924~930.
- (6) Fang, N., Xi, D., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C. and Zhang, X., 2006, Ultrasonic Metamaterials with Negative Modulus, *Nature Materials*, Vol. 5, No. 6, pp. 452~456.
- (7) Cheng, Y., Xu, J. Y. and Liu, X. J., 2008, One-dimensional Structured Ultrasonic Metamaterials with Simultaneously Negative Dynamic Density and Modulus, *Phys. Rev. B*, Vol. 77, 045134.
- (8) Cheng, Y., Xu, J. Y. and Liu, X. J., 2008, Broad Forbidden Bands in Parallel-coupled Locally Resonant Ultrasonic Metamaterials, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 92, 051913.
- (9) Wang, Z. G., Lee, S. H., Kim, C. K., Park, C. M., Nahm, K., Nikitov, S. A., 2008, Effective Medium Theory of the One-dimensional Resonance Phononic Crystal, *J. Phys.: Condens. Matter* Vol. 20, No. 5,

055209(5pp).

(10) Kinsler, L. E., 1999, Fundamentals of Acoustics, 4rd ed., Wiley, New York.

(11) Sugimoto, N. and Horioka, T., 1995, Dispersion Characteristics of Sound Waves in a Tunnel with an Array of Helmholtz Resonators, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 97, No. 3, pp. 1446~1459.

Byung-Jin Kwon received B.S. degree in the school of mechanical engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea, in 2011. He is currently working toward Master's degree in the Division of Ocean Systems

Engineering, School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea. His research interests include acoustic metamaterials.

Choonghee Jo received B.S.(1987) and M.S.(1989) degrees in Naval Architecture and Ocean Engineering from Seoul National University, and M.Eng(2000) and Ph.D.(2008) degrees from McGill University and University of Ottawa, respectively.

He is currently working in the Division of Ocean Systems Engineering, School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering at KAIST, Daejeon, Korea as a Research Assistant Professor. His research interests include acoustic metamaterials, smart materials, numerical analysis, analytical model-

ing, design optimization.

K. C. Park received B.S. degree in mechanical engineering from Inha Institute of Technology, Incheon, Korea, in 1966, M.S. degree from Stanford University, Stanford, CA, in 1970, and Ph.D. degree in system analysis from

Clarkson College, Omaha, NE, in 1975. He had been a Senior Staff Scientist in the Lockheed Palo Alto Research Laboratory until he joined the faculty of the Aerospace Engineering Sciences Department, University of Colorado, Boulder, in 1985. He is a dynamics specialist in aerospace, mechanical, and civil systems.

Il-Kwon Oh received B.S. degree in aerospace engineering from Inha University, Incheon, Korea, in 1995, M.S. degree in aerospace engineering from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea, in 1997,

and Ph.D. degree in mechanical engineering from KAIST, in 2001. In 2010, he became an Associate Professor in the Division of Ocean Systems Engineering, School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering at KAIST. He is the Director of the Structural Dynamics and Smart System Laboratory at KAIST. His research interests include electro-active polymers, bio-medical active devices, vibration and noise control, and smart materials and systems.