헬름홀츠 공명기의 형상변화에 의한 음향 메타물질의 파동전파 특성

Wave propagation of acoustic metamaterials with tunable Helmholtz resonators

권병진* · 조충희* · 박광춘*,** · 오일권†

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

1. 서 론

음향 메타물질에서 발생하는 밴드갭, 음굴절과 같은 물리적 현상으로 인해 음파 진행 특성에 관한 연구가 많은 관심을 가지게 되었다. 메타물질은 파장보다 훨씬 작은 인공 구조의 단위 셀로 구성된 복합체로서 자연계에 없는 새로운 파동 특성을 가진다. 음향 메타물질이 가진 효과들은 수퍼렌즈, 음향은폐와 같은 응용분야에 활용될 수 있다. 특이한 파동전파 특성을 갖기 위한 분산 특성은 밀도와 음향 속도의 주기적인 변화에 의한 브래그 산란(Bragg scattering)과 소형구조체로 이루어진 복합체에서 생기는 국부 공진(local resonance)에 의해 발생된다. 헬름홀츠 공명기를 가지는 단위 셀을 1차원으로 배열하여 구성한 복합체는 공진주파수 부근에서 음의 유효 동적 탄성률을 가질 수 있다. 본 논문에서는 acoustic transmission line method(ATLM)를 이용하여 헬름홀츠 공명기의 형상변화에 따른 임피던스와 전달계수(transmission coefficient)의 변화를 통해 음향 메타물질에서 파동전파 특성을 살펴보았다.

2. Acoustic Transmission Line Method

2.1 헬름홀츠 공명기(Helmholtz Resonator)

단위 셀로 구성된 음향 메타물질에서의 파동전파 특성을 알아보기 위해 그림1과 같이 도파관과 헬름홀츠 공명기를 커플링하여 사용하였다. 모든 단위

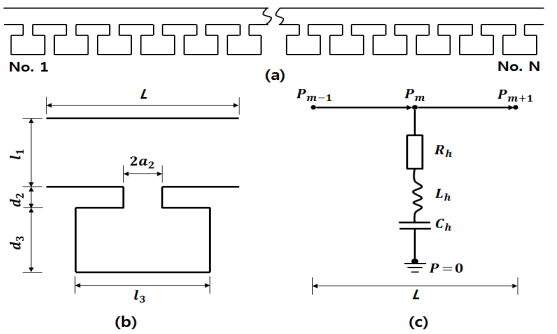

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the 1D acoustic metamaterials. (b) dimensions of a single cell. (c) The equivalent acoustic transmission line circuit of a unit cell

셀들은 동일한 크기를 가지며 파장의 길이보다 훨씬 작은 치수를 갖는다. 단위 셀에서 헬름홀츠 공명기의 공진주파수는 $f_h = c_w/\left(2\pi\sqrt{s_3 d_3 d_{effect}/S_2}\right)$로 표현되며 목과 빈구멍의 크기에 따라 달라진다.

ATLM에 의해 N번째 헬름홀츠 공명기의 목부분 임피던스를 구할 수 있으며 목의 임피던스는 N번째 헬름홀츠 공명기와 병렬 연결되어 있다. N번째 단위 셀의 임피던스는 $Z_{N-1} = Z \times \frac{Z_N + j\tan(KL)}{Z + jZ_N\tan(KL)}$의 변환식을 이용하여 N-1번째 헬름홀츠 공명기의 목부분 임피던스로 변환될 수 있다. 이 과정을 N번 반복하여

Table 1 The structure parameters

Parameters	Values
Density	998 Kg/m^3
Speed of sound	1483 m/s
d_2	1 mm
a_2	1 mm
d_3	5 mm
l_3	3.14 mm
w	4 mm
l_1	4 mm

† 교신저자; 정회원, 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템전공
E-mail : ikoh@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-1520, Fax : (042) 350-1510
* 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 해양시스템전공
** Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado at Boulder

복합체의 유효 임피던스를 구할 수 있으며 복합체를 통과하는 파동의 전달계수를 구할 수 있다. 헬름홀츠 공명기의 치수와 임피던스에 사용된 변수들은 Table 1 에 나타나 있다.

2.2 크기변화에 따른 파동전파 분석

그림2에서 200개의 셀로 구성된 음향 메타물질의 목과 빈구멍의 크기 변화로 인해 공진주파수와 밴드갭 대역이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 헬름홀츠 공명기의 크기변화로 인해 공진주파수가 달라지므로 소형구조체로 인해 생기는 밴드갭 영역이 달라지게 된다. 하지만 단위 셀의 길이가 고정되어 있기 때문에 주기적인 배열에 의한 브래그 산란의 밴드갭 위치는 80.3KHz에 고정되어 있다. 그림3은 200개 셀 중에서 100개 셀의 목과 빈구멍 크기 변화에 따른 전달계수를 보여주고 있다. 두 종류의 헬름홀츠 공명기가 주기적으로 배열되어 소형구조체에 의한 밴드갭 영역이 점점 넓어지고 있음을 알 수 있다.

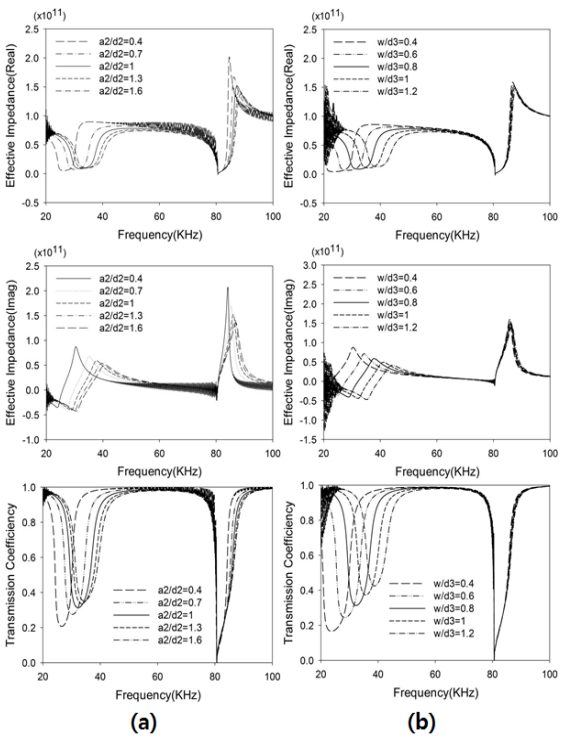

Fig. 2 Variations of effective impedance and transmission coefficient according to changes of neck parameters (a) and cavity parameters (b).

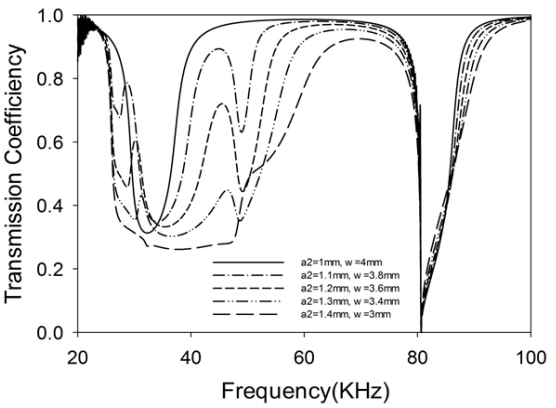

Fig. 3 Transmission coefficient of acoustic metamaterials composed of 100 Helmholtz resonators according to geometry variations.

3. 결 론

본 연구에서는 헬름홀츠 공명기의 단위 셀로 구성된 1차원 음향 메타물질에서 헬름홀츠 공명기 크기를 변화시킴으로써 밴드갭의 위치와 주파수 대역폭을 변화시킬 수 있으며 크기가 달라지는 헬름홀츠 공명기의 개수에 의해 주파수 대역폭이 달라질 수 있다는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

(1) Y. Cheng, J. Y. Xu, and X. J. Liu, 2008, One-dimensional structured ultrasonic metamaterials with simultaneously negative dynamic density and modulus, Phys. Rev. B Vol. 77, 045134

(2) Y. Cheng, J. Y. Xu, and X. J. Liu, 2008, Broad forbidden bands in parallel-coupled locally resonant ultrasonic metamaterials, Appl. Phys. Lett. Vol. 92, 051913

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