

음향 메타물질을 이용한 음향 및 진동 제어

조성진, 박준홍*
(한양대학교)

1. 머리말

음향 메타물질은 자연계에서는 발견되지 않는 특성을 지니도록 금속이나 플라스틱과 같은 소재를 이용하여 인공적으로 주기적인 형상을 만들어서 특정 주파수에서 소음진동제어가 가능하도록 구현된 소재이다. Phononic crystal이라고 불리우는 주기적인 인공 구조는 삼차원의 매트릭스 형태로 배열되어진 비균질인(inhomogeneous) 매질로 구성되어 있고 이로 인해 특정 주파수 대역에서의 음향 혹은 진동 에너지를 반사 및 투과시키지 않고 저지(band-stop) 시킬 수 있는 장점이 있다. 또 특정 영역을 이 메타물질로 감싸게 되면 외부의 파동 에너지로부터 완전하게 은폐(cloaking) 및 고립(isolation) 시킬 수 있는 장점이 있다. 음향 메타물질의 이러한 물성은 탄성률(modulus)이나 밀도(mass density)를 변경함으로써 구현할 수 있어서, 물질은 음향과, 굽힘과 등의 소음진동 저감 분야에서 관심이 집중되고 있고 최근 국내외적으로 많은 연구가 수행되고 있다.

메타물질의 개념은 1960년대에 Veselago⁽¹⁾에 의해 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 갖는 물질에 대한 가능성을 발표하면서 처음으로 제안되었으며 1990년대에 Pendry⁽²⁾가 주기적인 금속 와이어와 SRR(split ring resonator)을 통해서 인공적으로 각각 음의 유전율과 투자율을 구현할 수 있

음을 증명하였고 2000년대 Smith⁽³⁾ 연구팀이 금속 와이어와 SRR 구조를 조합하여 물질의 음수 값의 굴절률 특성을 실험적으로 추가 검증하였다. 주기적인 구조의 이러한 특징으로 인해 고효율 필터(high-power filter), 소음 및 진동 제어, 광학 현미경 및 전파 망원경, 초음파 이미징 및 의료용 기기, 잠수함의 소나 등의 각 분야에서 혁신을 가져올 것으로 기대된다.

메타물질을 이용한 은폐 기술에 관해서는 2006년 Pendry⁽⁴⁾가 유전율 텐서(permittivity tensor)와 투과율 텐서(permeability tensor)로 구성되는 Maxwell 방정식으로 지배되는 2차원 메타물질을 제안하고 좌표 변환법(coordinate transformation)을 통해 음향 은폐 기술을 구현하였고 2009년에 Farhat⁽⁶⁾이 반지름과 각도에 따라 질량과 탄성률

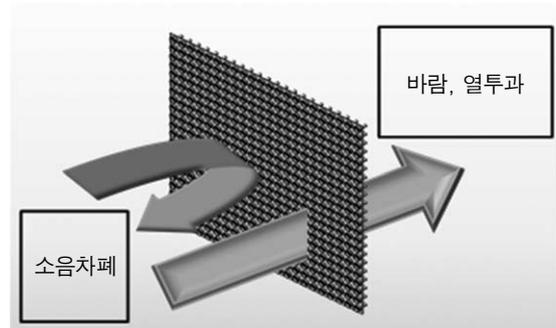


그림 1 소음은 차폐하면서 바람, 열은 통과하는 음향 메타소재 개념도

* E-mail : parkj@hanyang.ac.kr / Tel : (02)2220-0424

을 변화시켜서 굽힘파를 굴절시켜서 은폐를 구현하는 이론과 실험을 보여주었다. 2012년에 Stefan⁶⁾은 외부 굽힘파로부터의 은폐 기술을 등방성으로 균질한 탄성 재료에 다층 홀을 실린더 형상으로 배치하여 구현하였다. 이 은폐 기술은 앞에서 언급한 이론적으로 구현 가능하고 형상을 제작하여 실험적으로 어느 정도의 구현이 가능한 상태이다.

이 은폐 기술의 적용 분야로 내진 설계를 들 수 있다. 현재의 내진 설계는 건물 각각에 독립적으로 내진 기능을 설치하여 지진에 대한 건물의 요동을 최소화하는 방식이다. 이 은폐 원리는 물질의 굴절률을 점차적으로 변화시켜서 지진파의 방향을 바꾸어 외부의 충격파가 물체의 표면을 따라 휘어지게 진행하도록 하는 방법이다. 이 은폐 기술 적용으로 외부의 충격파로부터 특정 지역을 완전하게 은폐 및 보호할 수 있기 때문에 많은 이점이 예상된다. 또한 외부의 충격파로부터 군함이나 탱크, 장갑차 등의 내부에 있는 인력과 전자기기를 보호할 수 있기 때문에 군사 분야에도 유용하게 사용할 수 있다. 또한 일반 실생활에 사용되는 가전제품, 휴대폰 등의 실생활과 밀접한 연관이 있는 제품도 이 은폐 기술을 사용하면 유통 및 이동 중의 낙하로 인한 충격파로부터 제품을 보호할 수 있을 것으로 기대된다.

여기에서는 메타물질의 특성을 이용하여 특정 주파수 대역의 소음에너지를 저지시키고 배기가 가능하여 열에너지와 바람을 방출할 수 있는 통열 혹은 통풍 방음의 음향 메타 패널을 소개하고자 한다. 일반적으로 모터나 압축기를 포함한 시스템은 소음을 차폐하기 위해 흡차음재를 사용하고 있으나 이는 열의 배출이 힘들어 시스템의 성능 저하를 야기한다. 소개된 음향 메타 패널은 배기홀이 반영되어 있어 열이나 바람이 통과됨으로 인해 어떤 시스템의 흡차음재를 대신함으로써 성능을 상승시킬것으로 기대된다. 또한 메타물질을 이용하면 외부의 충격파가 내부 물체에 영향을 미치지 않고 회피하는 분석적인 방법을 사용하여 설명하고자 한다. 이를 위해 이 연

구에서는 박판의 가운데에 실린더 형태의 장애물을 배치하고 그 주위를 메타물질로 감싸는 구조를 모델링하였다. 외부 충격파는 평면파를 사용하였다. 은폐 구역은 메타물질로 채워져 있고 이 때의 파동 방정식은 음의 물성치를 구현하기 위하여 실린더의 반지름과 각도 방향의 함수인 2차 관성 텐서와 스칼라 영률로 물성치를 모델링하였다. 메타물질로 감싼 실린더 장애물과 메타물질이 없는 실린더에서의 파동 전파 특성을 비교하여 이렇게 모델링된 메타물질이 외부의 충격파를 어떻게 굴절시키는 지에 대해 이론적으로 가시화하고 메타물질이 없는 일반적인 파동 전파 형상과 비교하였다.

2. 구조 파동 제어 음향 메타소재

음향 메타소재는 일반적인 균질성의 소재와 달리 여러 단위셀의 조합으로 구성되어, 동적 특성을 나타내기 위해 유효물성을 이용한다. 이러한 유효물성은 기존의 기계물성측정 장비인 universal testing machine 등으로 측정이 되지 않으며 음향 진동 특성을 검출하기 위해 동적영역에서의 테스트 방법이 필요하다.

구조물에서의 일차원에서 구현된 메타소재를 그림 2가 보여 주고 있다⁷⁾. 이 메타소재는 종방향 구조파의 진행을 제어하기 위한 공진형 소재로써 주기적으로 동흡진기를 부착한 기구이다. 동흡진기의 물성값을 조절하여 유효물성을 다르게 할 수 있으며 진동 특성 제어에 최적화된 물성값을 부여 할 수 있다. 이때 유효 물성을 측정하기 위해 동적응답으로부터 진동 특성을 파악하고 이로부터 소재의 영률과 밀도를 계산한다. 이

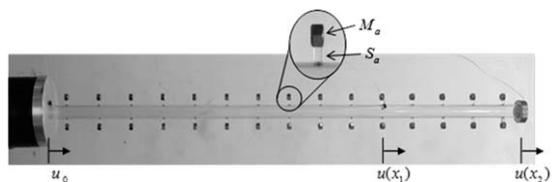


그림 2 구조파의 종방향 전달 제어를 위한 공진형 일차원 메타구조 실험모델

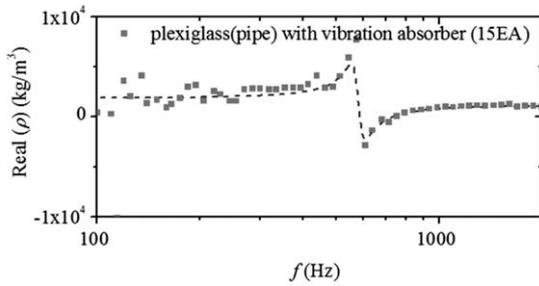


그림 3 구조파의 종방향 전달 제어를 위한 공진형 메타소재 실험모델 측정 결과⁽⁷⁾

러한 기계적 특성은 일반적인 소재와 달리 영율과 밀도 모두 복소수 형태가 된다. 즉 유효밀도가 진동 저감에 주요한 영향을 주게 된다. 이를 측정하고 해석하기 위한 실험으로부터 유효 파수를 먼저 구하고 이로부터 산출된 유효 밀도를 그림 3이 보여주고 있다. 유효밀도의 실수값이 음수가 될 때 진동 차단 효과가 극대화되며 실제 측정값에서 약 600 Hz영역에서 실제 측정된 값이 음의 질량을 갖는 것을 알 수 있다. 이 주파수가 저지(band-stop)영역이며 동흡진기의 개수, 간격, 질량, 강성 등을 변경하여 원하는 제어 주파수 영역으로 튜닝이 가능하다. 이를 활용하여 종방향 진동을 효율적으로 제어하는 설계가 가능하다.

3. 통열 통풍 방음 음향 메타 패널

3.1 단위 셀(unit cell) 설계 및 패널 제작

이차원 음향 메타 패널은 깔대기 형상의 단위 셀을 그림 4에서와 같이 주기적으로 사각형 매트릭스로 배열하여 구성하였다. 각각의 단위 셀은 멀티 밴드 공명기의 음향 특성을 가지고 있고 첫 번째 공명 주파수는 단위 셀의 바디형상에서 기인한 것이고 두 번째 공명 주파수는 단위 셀의 튜브형상에서 기인한다. 단위 셀은 헬름홀츠 공명기와 튜브 공명기로 구성되어 있고 공명기의 길이, 부피, 단면적, 튜브의 단면적과 튜브의 길이를 나타낸다. 여기에서 첫 번째 공명 주파수가 3500 Hz로, 두 번째 공명 주파수가 4000 Hz가 되도록 설계 변수 값들을 선택하였다. 단위 셀은

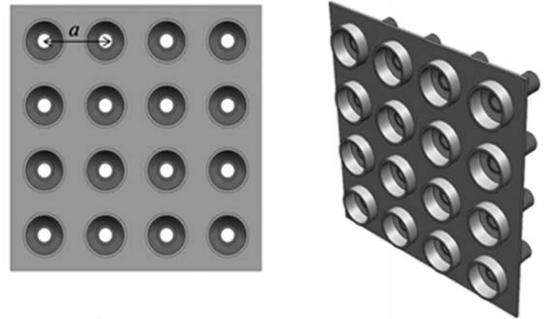


그림 4 단위 셀로 구성된 음향 메타 패널

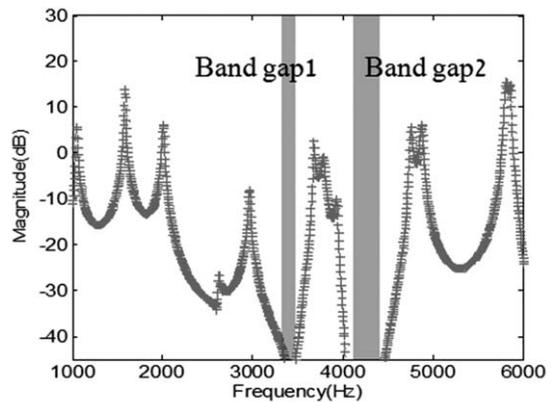


그림 5 음향 메타 패널의 주파수 응답 함수

ABS(arylonitrile butadiene styrene)와 PC(polycarbonate)로 만들어 졌다. 이 ABS와 PC 재질의 음향 임피던스는 공기의 음향 임피던스보다 많이 크기 때문에 rigid wall로써 설계되어진다.

단위 셀 가운데에 위치되어 있는 튜브는 열에너지나 바람을 통과 시킬 수 있는 배기홀의 역할을 하는데 이것으로 인해 현재의 흡차음재 보다 열을 더 방출 시킬 수 있고 현재의 방음벽에 적용하면 풍하중을 저감 할 수 있다.

3.2 주파수 밴드갭 및 음의 질량 측정

음향 메타 패널 단위 셀의 유효 질량 측정을 위해 임피던스 튜브법⁽⁸⁾이 이용되었다. 그림 5는 임피던스 튜브 안에서 측정된 음향 메타 패널 단위 셀의 주파수 응답 함수를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 3500 Hz와 4000 Hz에서 음향 에너지 저지 구간인 밴드갭이 나타나는 것을 알

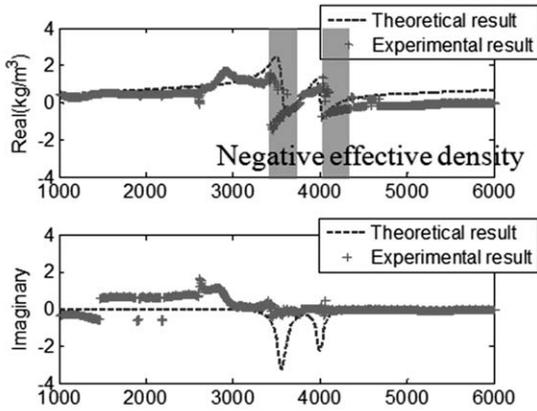


그림 6 임피던스 튜브를 이용한 유효 질량 측정값

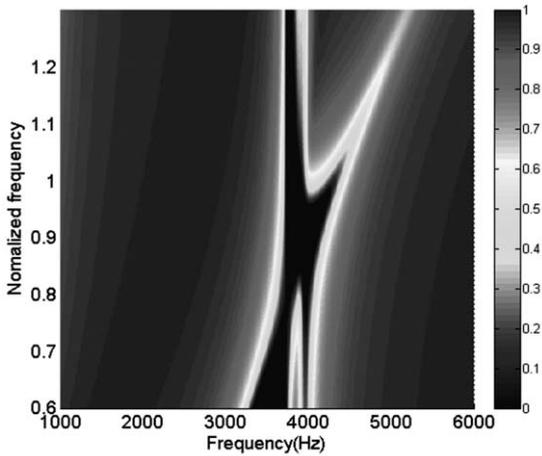


그림 7 멀티 공명기의 주파수의 위치에 따른 투과율

수 있었다. 이것은 단위 셀의 국부 공진(local resonance)에 의한 것으로 이 주파수 대역에서는 반사되는 음향 에너지가 입사 음향 에너지에 대해 역위상이 되는데 음의 질량이 존재하고 결국 많은 음향 에너지의 소산되어 효과적으로 소음을 제어할 수 있다. 3500 Hz는 단위 셀의 바디가 헬름홀츠 공명기 특성으로 작동하여 밴드갭이 구현된 것이고 4000 Hz는 단위 셀의 튜브가 튜브 공명기 특성으로 작동하여 구현된 것이다.

그림 6은 이 때 네 개의 마이크로폰을 가진 임피던스 튜브를 통해 측정되어진 유효 질량을 나타낸 것으로 밴드갭 구간에서는 음의 질량이 존재함을 알 수 있다. 이 연구에서 제시한 밴드갭은 제어하고자 하는 소음 특성에 따라 형상의 디자

인 변수 값을 선택하여 원하는 주파수로의 조정 가능하며 광대역 소음 제어 목적에서 광대역 밴드갭을 구현하고자 할 때는 두 개의 국부 공진 주파수를 근접시킴으로써 구현할 수 있다. 그림 7는 단위셀이 지닌 두 개의 국부 공진의 상대적인 위치에 따른 밴드갭 폭을 나타낸 것이다. 그래프에서 파란색으로 표현되는 부분의 투과율이 zero이므로 밴드갭으로 판단할 수 있다. 두 국부 주파수 공진의 위치를 normalized frequency로 표현하였으며 이 두 주파수가 근접할 때 넓은 주파수 밴드갭을 구현할 수 있다.

4. 굽힘파 은폐(Cloaking) 기술

4.1 분석적 방법(Analytical Method)

굽힘파 은폐 기술은 앞에서 언급한대로 이론적으로 구현하였고 형상을 제작하여 실험적으로 구현이 가능하나 현재 실제 적용된 사례는 미미하다. 이 원리가 응용 분야에 적용된다면 외부의 충격파로부터 특정 지역을 완전하게 은폐 및 보호할 수 있기 때문에 외부 충격파로부터의 주요 시설 및 물체 보호가 가능할 것으로 판단된다.

이 연구에서는 분석적 방법을 이용하여 굽힘파(flexural wave) 은폐 기술을 설명하고자 한다. 그림 6에서 보는 바와 같이 은폐 기술 설명을 위한 모델은 반지름 R1을 가진 실린더 형태의 장애물이 있는 얇은 판을 사용하였다. 입사되는 굽힘파는 평면파를 선택하였고 손실 없이 좌에서 우로 입사된다고 가정하였다. 은폐 구역은 반지름 R2인 메타물질로 채워져 있고 이 때의 파동 방정식은 실린더의 반지름과 각도 방향의 함수인 2차 관성 텐서와 스칼라 영률로 물성치를 모델링한다.

4.2 메타소재를 이용한 굽힘파 회절 제어

그림 6(a)는 좌에서 우로 외부의 충격파가 입사되었을 때의 일반적인 파동 형상을 나타낸 것이다. 충격파가 진행하다가 실린더 형태의 장애물을 만났을 때 일부 충격파는 반사되고 일부는

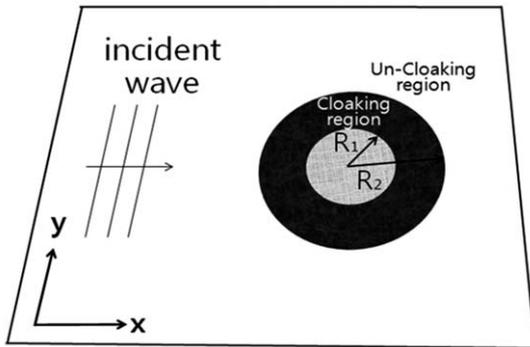


그림 8 균침파 회절 해석을 위한 수치 모델 개략도

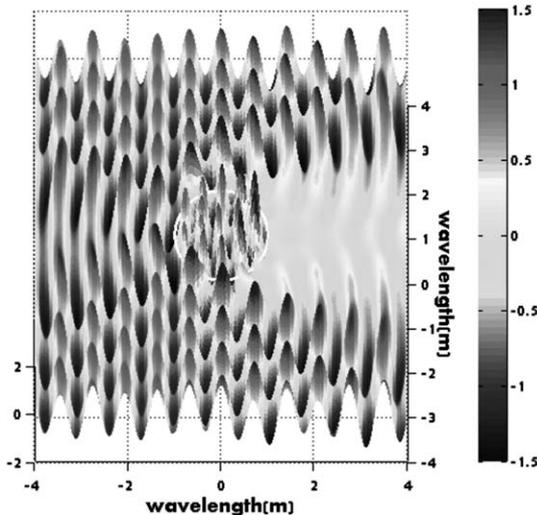


그림 9 장애물이 있을 때의 충격파 전파 특성

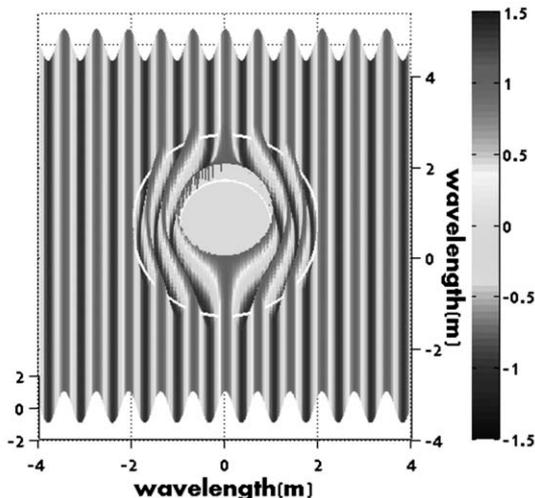


그림 10 메타물질로 감쌌을 때의 충격파 전파 특성

투과되는데 내부에 투과되는 충격파에 의해 장해물은 손상을 입게 된다. 하지만 그림 6(b)처럼 메타물질로 특정 물체를 둘러쌀 때의 파동 형상을 보면 외부의 충격파는 메타물질의 반지름과 각도에 따라 변화하는 굴절률을 가지게 되어 충격파가 영향을 주지 않고 진행되는 것을 알 수 있다.

이러한 파동 특성을 가진 메타물질로 은폐하고자 하는 시설을 감싼다면 외부의 충격파는 주요 시설에 손상을 입히지 않고 관통해 버리는 특성을 가지게 된다. 이는 앞에서 언급한 것처럼 실린더의 반지름과 각도 방향의 함수인 2차 관성텐서와 스칼라 영률로 물성치를 모델링한다면 가능하다. 반지름과 각도에 따라서 변화하는 탄성율과 질량을 가진 물질이나 형상이 개발된다면 우선적으로 지진파 저지에 이용 가능할 것으로 판단된다. 또한 외부의 충격파로부터 균침이나 탱크, 장갑차 등의 내부에 있는 인력과 전자기기를 보호할 수 있기 때문에 군사 분야에도 유용하게 사용할 수 있고 또한 일반 실생활에 사용되는 가전제품, 휴대폰 등의 실생활과 밀접한 연관이 있는 제품도 이 은폐 기술을 사용하면 유통 및 이동 중의 낙하로 인한 충격파로부터 제품을 보호할 수 있는 기술로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 맺음말

음향 메타소재는 자연계에서는 발견되지 않는 특성을 지니도록 인공적으로 주기적인 형상을 만들어서 음의 유효 물성(negative effective index material)을 구현하는 것을 보여 주었다. 기계구조물에서 모터나 압축기를 포함한 시스템에서 소음을 차폐하기 위해 흡차음재를 사용하고 있으나 이는 열의 배출이 힘들어 시스템의 성능 저하를 야기한다. 이에 이 연구에서는 특정 주파수 대역의 소음에너지를 저지시키고 배기홀을 가져서 열에너지와 바람은 방출할 수 있는 통열(풍)방음의 음향 메타 패널을 소개하였으며 밴드갭

을 구현하였고, 이 때 음의 질량이 존재하는 것을 측정하였다. 또한 메타물질을 이용하면 충격파(여기서는 굽힘파에 대해 기술)가 내부 물체에 영향을 미치지 않고 투과하는지에 대해 분석적인 방법을 사용하여 설명하였는데 은폐 구역은 메타물질로 채워져 있고 이 때의 파동 방정식은 실린더의 반지름과 각도 방향의 함수인 2차 관성 텐서와 스칼라 영률로 물성치를 모델링하면 구현할 수 있다는 것을 보여 주었다. 이 은폐 기술에 대한 적용을 위한 형상 설계는 지속적으로 연구되어야 할 것이다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Veselago, V. G., 1968, The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of the Permittivity and the Permeability, *Sov. Phys.-Usp.*, Vol. 10, 509-18.
- (2) Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J. and Stewart, W. J., 1999, Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, pp. 1~12.
- (3) Smith, D. R., Padilla, W. J., Vier, D. C., Nemat-Nasser, S. C. and Schultz, S., 2000, Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity, *Physical Review Letters*, Vol. 84, pp. 4184~4187.
- (4) Schurig, D., Mock, J. J., Justice, B. J., Cummer, S. A., Pendry, J. B., Starr, A. F. and Smith, D. R., 2006, Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies, *Science*, Vol. 314, pp. 977~980.
- (5) Farhat, M., Guenneau, S., Enoch, S. and Movchan, A. B., 2009, Cloaking Bending Waves Propagation in thin Plates, *Physical Review B* 79, 033102.
- (6) Farhat, M., Guenneau, S. and Enoch, S., 2012, Broadband Cloaking of Bending Waves via Homogenization of Multiply Perforated Radially Symmetric and Isotropic Thin Elastic Plates, *Physical Review B*, Vol. 85, 020301.
- (7) Park, J., Park, B., Kim, D. and Park, J., 2012, Determination of Effective Mass Density and Modulus for Resonant Metamaterials, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 132, 2793-99.
- (8) Song, B. H. and Bolton, J. S., 2000, A Transfer Matrix Approach for Estimating the Characteristic Impedance and Wave Numbers of Limp and Rigid Porous Materials, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 107, pp. 1131~1152.