

탄성 메타물질의 구현과 응용

이형진, 오주환, 김윤영*
(서울대학교)

1. 머리말

메타물질(metamaterials)이란 자연계에 존재하는 물질이 일반적으로 가질 수 없는 특성을 가질 수 있는, 인공적으로 설계한 물질을 의미한다. 일반적으로 둘 이상의 요소를 결합하여 하나의 메타물질 기본 격자(unit cell)를 구성하고, 그 기본 격자를 주기적 혹은 준주기적으로 배열하여 메타물질을 구성한다. 보통 구성 격자의 크기와 주기 간격(periodicity)이 파장에 비해 매우 작기 때문에, 메타물질은 균일한 매질(homogeneous

medium)과 같은 역할을 할 수 있다. 때문에 메타물질의 구성 요소를 정교하게 설계함으로써, 자연계에 존재할 수 없는 물성, 예를 들어 탄성 분야의 경우 음의 값의 단위 질량(mass density)이나 음의 값의 탄성 강성 계수(elastic stiffness constant)를 가진 매질을 구현할 수 있을 뿐만 아니라 자연계에 존재하는 물성, 예를 들어 특정 값의 양의 단위 질량이나 양의 탄성 강성 계수를 가진 매질 까지도 자유자재로 구현할 수 있다.

그림 1(a)는 탄성 분야에서 일반적으로 사용되고 있는 공진(resonant) 메타물질의^(1,2) 형상을 대

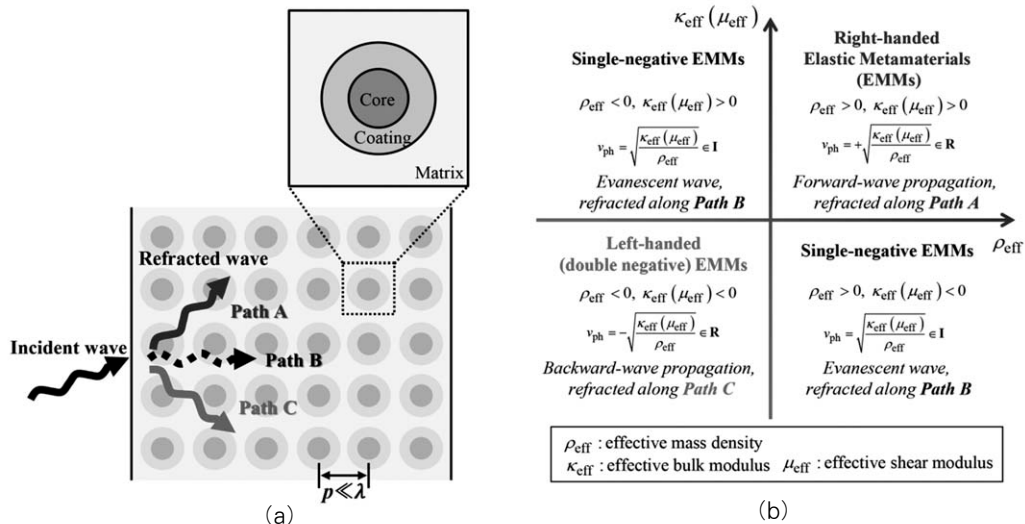


그림 1 (a) 일반적으로 사용되는 공진 기반 탄성 메타물질의 형상과 메타물질 내에서 전파하는 파동의 개략도, (b) 메타물질의 물성에 따른 특성

* E-mail : yykim@snu.ac.kr / Tel : (02)880-7154

략적으로 보이고 있다. 이와 같은 형상의 메타물질은 구성 요소의 물성이나 크기에 따라 양과 음의 값을 넘나드는 물성을 획득할 수 있고(그림 1(b)), 이러한 물성에 기인하여 입사하는 파동의 양의 굴절각(refracted angle) 방향(그림 1(a)의 path A) 뿐만 아니라 음의 굴절각 방향(path C)으로 전파시킬 수 있다. 또한 파동이 메타물질을 투과하지 못하고 온전히 감쇠하도록 만들 수도 있다(path B). 이와 같이 메타물질은 파동을 제어하는데 매우 효율적이고 획기적으로 사용될 수 있다. 특히 탄성 분야에 있어 메타물질은 진동 저감과 에너지 변환 분야, 초음파 비파괴 검사 분야 등에 널리 응용될 수 있기에 연구의 필요성이 매우 크다.

이 글에서는 현재까지 구현된 탄성 메타물질을 간단히 소개하고 적용 가능한 응용 분야에 대해서 설명하고자 한다.

2. 탄성 메타물질의 구현

메타물질은 (준)주기적인 구조체라는 점과 자연계에 존재하는 물질이 쉽게 가질 수 없는 획기적인 파동 전파 특성을 갖는다는 점에서 종종 포노닉 크리스털(phononic crystal)과 비교·구분되기도 한다. 메타물질은 일반적으로 낮은 주파수 대역에서 활용되기 때문에 파동의 전파 특성이 메타물질의 균질화 물성(homogenized material property)에 기인한 굴절(refractive) 특성에 의해 결정되는 반면, 포노닉 크리스털은 격자의 크기가 파장과 비슷한, 비교적 높은 주파수 대역에서 활용되기 때문에 파동의 전파 특성이 격자에서의 회절(diffraction)과 산란(scattering) 특성에 의해서 결정되게 된다.

이 글에서는 메타물질이란 용어를 일반적으로 메타물질이라 일컫는 파장 이하 크기의 주기 구조체뿐만 아니라 일반적으로 포노닉 크리스털이라 일컫는 파장 크기의 주기 구조체를 두루 지칭하는데 사용할 것이다. 현재까지 탄성분야에서 연구·구현된 대표적인 메타물질을 파장 대

비 구조체 주기의 크기에 따라 구분하여 소개하면 다음과 같다.

2.1 파장 이하 크기의 탄성 메타물질

파장이 메타물질을 구성하는 격자의 주기보다 매우 클 때(통상적으로 약 $p < \lambda/4$ 정도; p : 격자의 주기, λ : 파장), 파동은 메타물질을 특정 물성을 갖는 균일한 매질(homogeneous medium)로 인식하게 된다. 즉, 파장 이하 크기의 탄성 메타물질은 파동에 대하여 균질화(homogenization)가 가능하다. 메타물질 분야에서 균질화된 메타물질을 일반적으로 유효 매질(effective medium)이라고 일컫고 유효 매질의 물성을 유효 물성(effective property)라고 부른다. 메타물질의 파동 전파특성을 파악하고, 더 나아가 특정 유효 물성을 갖는 메타물질을 설계하기 위해서는 유효 물성을 파악하고 정의하는 것이 매우 중요하다.

탄성분야에서 메타물질의 유효 물성을 정의하기 위해 제안된 방법으로는 결맞는 포텐셜 근사법(coherent potential approximation)이나^(3,4) 다중 산란 방법(multiple scattering method)에⁽⁵⁾ 기초한 분석 모델을 사용하는 방법과 메타물질의 거시적인 평균 물리량 계산을 통한 이론적 분석 방법^(2,6), 메타물질의 조화 하중 하의 평균 물리량 계산을 통한 수치적 분석 방법^(7,8) 등이 있다.

(1) 공진(resonant) 메타물질

현재까지 제안된 파장 이하 크기 탄성 메타물질은 대부분이 공진 요소를 포함하고 있다. 앞서 그림 1에서 보인 것과 같이 공진 기반 탄성 메타물질은 일반적으로 탄성 모체(matrix)에 코팅된 원통(cylinder) 혹은 구(sphere) 형상의 코어(coated core)를 삽입한 형상을 가지고 있는데, 구성 물질의 물성과 크기를 적절히 설계함으로써 음의 유효 단위 질량 혹은 음의 체적 탄성 계수(effective bulk modulus), 음의 유효 전단 탄성 계수(effective shear modulus)를 구현할 수 있다.

이와 같은 형상의 탄성 공진 메타물질은 Liu 등이⁽¹⁾ 처음 제안하였다. 그는 에폭시(epoxy) 모체

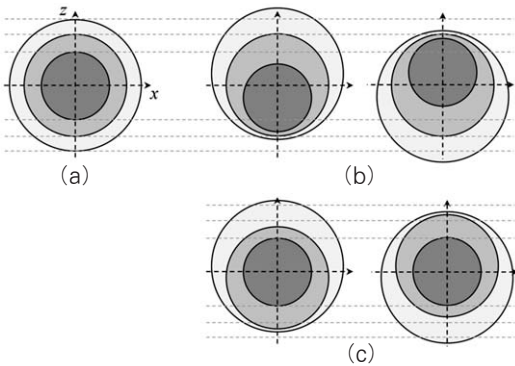


그림 2 (a) 변형 전 탄성 메타물질의 형상과 (b) 첫 번째, (c) 두 번째 쌍극자 공진 주파에서의 메타물질의 변형을 나타내는 개략도

에 고무(rubber)로 코팅된 구형상의 납(lead) 코어를 사용하였는데, 이러한 메타물질은 두 개의 쌍극자(dipole) 공진을 보인다. 첫 번째 공진에서 코어는 모체에 대해 역상으로(out-of-phase) 움직이며(그림 2(b)), 두 번째 공진에서 코팅 물질은 모체에 대해 역상으로 움직이게 된다(그림 2(c))²⁾. 이러한 쌍극자 공진 효과로 인해 제안된 메타물질은 음의 운동량(momentum)을 보이며, 음의 유효 단위 질량을 가질 수 있게 된다. 최근에는 코팅 물질의 형상을 타원형으로 설계하여 주축(principal axis) 방향에 따라 공진 주파수를 달리 함으로써 비등방성(anisotropic)의 음의 유효 단위 질량을 구현한 연구도 보고된 바 있다^(7,9).

탄성 메타물질이 등방성(isotropic)의 특성을 갖는다면, 메타물질의 유효 탄성 강성 계수(elastic stiffness constant)는 체적 탄성 계수와 전단 탄성 계수로 표현될 수 있다. Ding 등은⁽¹⁰⁾ 음의 체적 탄성 계수를 갖는 메타물질을 구현하기 위하여 에폭시 모체에 공기 방울(core)을 포함한 구형상의 물(water sphere; coating)로 이루어진 메타물질을 제안하였다. 이러한 메타물질은 그림 3에서 나타낸 것처럼 영차(monopole) 공진 시 특이한 변형 특성을 보인다²⁾. 메타물질이 팽창할 때 공진의 영향으로 공기인 코어는 원래 상태에 비해 더 많이 팽창하게 되는데, 이로 인해 코팅 물질인 물은 오히려 압축하게 된다. 물의 체적 탄성 계수가 공기의 계수보다 상당히 커서 메타물질 전반에 작

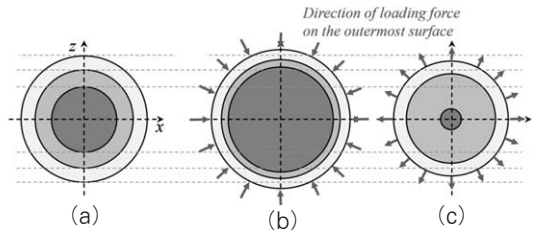


그림 3 (a) 변형 전 탄성 메타물질의 형상과 영차 공진에 의해 메타물질의 전체적인 형상이 (b) 팽창할 때와 (c) 수축할 때의 변형을 나타내는 개략도

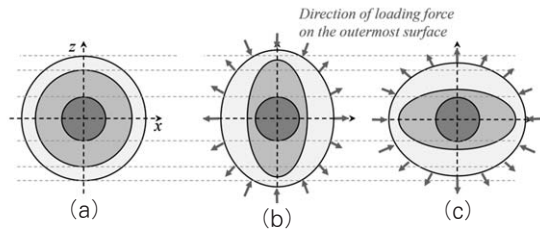


그림 4 (a) 변형 전 탄성 메타물질의 형상과 사극자 공진에 의해 메타물질의 전체적인 형상이 z 방향으로 (b) 팽창할 때와 (c) 수축할 때의 변형을 나타내는 개략도

용하는 힘의 상태는 물에 의해 결정되므로, 결과적으로 외부에서 압축 응력(stress)이 작용할 때 메타물질은 팽창하는 변형을 보이게 된다. 즉, 제안된 메타물질은 음의 유효 체적 탄성률을 갖게 된다.

한편 폴리에틸렌 폼(Polyethylene foam) 모체에 고무로 코팅된 구형상의 에폭시 코어를 사용함으로써 음의 유효 전단 탄성 계수를 구현할 수도 있다^(2,11). 그림 4는 메타물질이 음의 전단 탄성률을 보일 때의 변형 형상을 보여준다. 전체적인 메타물질 형상이 축방향 대칭(axisymmetric) 타원형태로 변형(전단 변형)될 때, 코팅 물질 역시 타원형태로 변형이 되는데 사극자(quadrupole) 공진에 의해 중횡비(aspect ratio)가 더 크게 변형된다. 때문에 모체는 z 방향으로 오히려 압축되게 되고 x-y 평면에서 팽창하게 되는데, 폴리에틸렌 폼 모체가 고무 코팅에 비해 강성이 크므로 메타물질 전반에 작용하는 힘의 상태는 모체에 의해서 결정되어 메타물질 변형과 역상으로 힘이 부가되게 된다. 즉, 제안된 메타물질은 음의 전단 탄성률을 갖게 된다.

정리하면 음의 유효 단위 질량은 메타물질 구

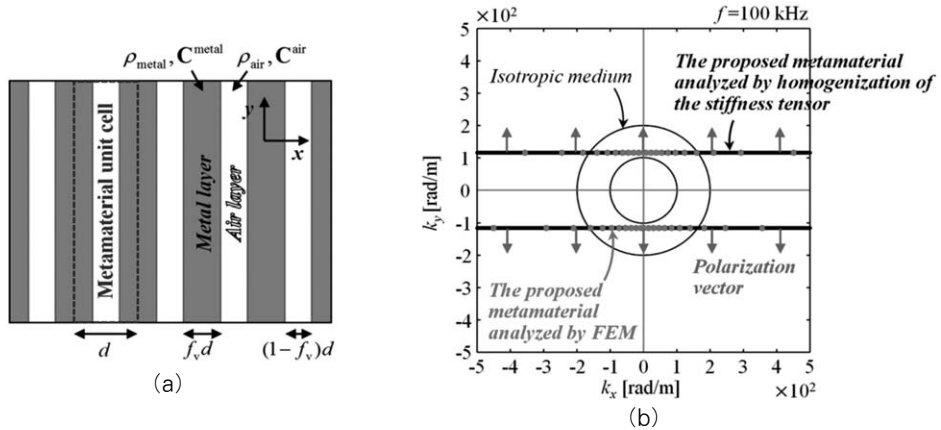


그림 5 (a) Lee et al.이⁽¹⁸⁾ 제안한 금속과 공기가 적층된 메타물질의 형상과 (b) 이러한 메타물질에서의 등주파수 곡선 (equi-frequency contour; 굵은 검은 실선)

성 요소의 쌍극자 공진을 통해서, 음의 체적 탄성 계수는 영차 공진을 통해서, 음의 전단 탄성 계수는 사극자 공진을 통해서 구현할 수 있다. 나아가 메타물질을 구성하는 요소의 물성과 크기를 적절히 선택하면 음의 물성을 보이는 주파수 대역을 서로 겹칠 수 있고, 이 경우 음의 위상속도 (phase velocity) 혹은 음의 굴절률(refractive index)을 구현할 수도 있다^(8,10-12).

(2) 비공진(non-resonant) 메타물질

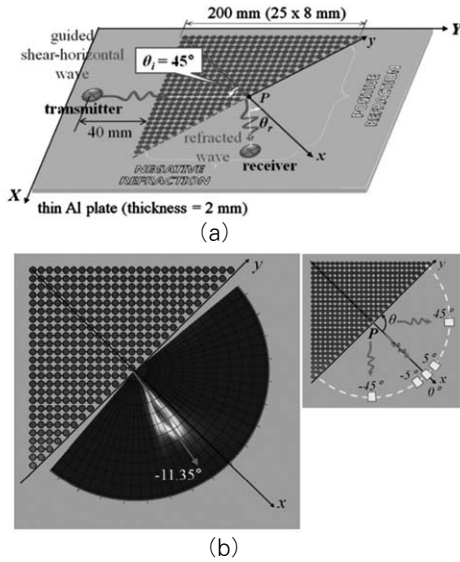
공진에 기반한 탄성 메타물질은 음의 물성을 구현할 수 있다는 점에서 매우 획기적인 파동 전파 특성을 보이지만, 그 형상이 다소 복잡하여 실제 설계와 제작이 어렵고 음의 물성을 보이는 주파수 대역이 협소하다는 단점이 있다. 때문에 비공진 구성 요소를 사용하는 탄성 메타물질 역시 많은 관심을 받고 있다. 최근에는 변형 기법(transformation method)의^(13,14) 도움으로 메타물질이 음의 물성과 같이 특이한 물성을 갖지 않아도, 메타물질을 공간상에 적절히 분포시킴으로써 클로킹 기기(cloak device)와 같은 고차원 시스템까지도 구현할 수 있다는 보고가 있다⁽¹⁵⁾.

현재까지 탄성 분야에서 제안된 비공진 파장 이하 메타물질에는 대표적으로 분포계수 (gradient-index) 메타물질이 있다^(16,17). 탄성 모체에 간단한 형상의 비공진 요소를 삽입하거나 모체

를 뚫어 내어 메타물질 격자를 구성하고, 격자의 유효 물성이 공간에 대해 변화하는 메타물질 시스템을 설계함으로써 파동을 집속하거나 전파 방향을 조절할 수 있다. 비공진 메타물질의 다른 예로, 그림 5에서 보인 것과 같이 금속과 공기층을 한 방향으로 적층하여, 적층 방향과 그 수직 방향에 대한 유효 탄성 강성 계수를 극한적으로 달리할 수 있는 메타물질이 있다⁽¹⁸⁾. 이러한 극한의 유효 특성에 의하여 파동이 회절되지 않고 한 방향으로만 전파할 수 있게 된다.

2.2 파장 크기의 탄성 메타물질(포노닉 크리스털)

파장 크기의 탄성 메타물질은 파장 이하의 메타물질과는 달리, 파동의 전파 특성이 구성 요소가 격자(unit cell)에서 차지하는 비율(filling fraction)과 격자의 배열 형태(lattice shape)에 의해 주로 결정된다^(19,20). 또한 파동의 분산 특성이 파동의 진행 방향과 주파수에 따라 급격히 변하기 때문에 보다 다양하고 획기적인 전파 특성을 구현할 수 있다. 파장 크기의 탄성 메타물질에서 발견되는 가장 중요한 파동 현상으로는 밴드갭 (bandgap) 현상이 있다. 파동이 메타물질 내부로 투과되지 못하고 온전히 반사되는 현상을 일컫는 밴드갭 현상은 메타물질 격자에서 산란된 파동이 물질의 주기성으로 인하여 상쇄되어 발생하며, 이러한 현상은 브래그 법칙(Bragg's law)에



Shear-horizontal wave mode exhibits negative dispersion slope !

$$v_{\text{phase}} = \frac{\omega}{k} < 0 \quad \& \quad v_{\text{group}} = \frac{\partial \omega}{\partial k} > 0$$

→ Negative refraction

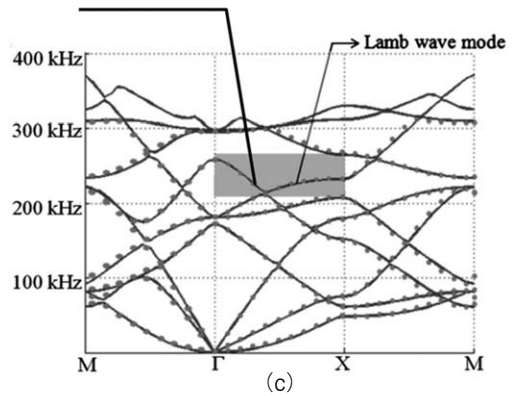


그림 6 (a) Lee 등이⁽¹⁹⁾ 제안한 파장 크기 메타물질 평판의 형상과 실험 환경을 나타내는 개략도와 (b) 음의 굴절을 실험 결과, (c) 메타물질 평판에서의 분산 특성과 음의 굴절 특성

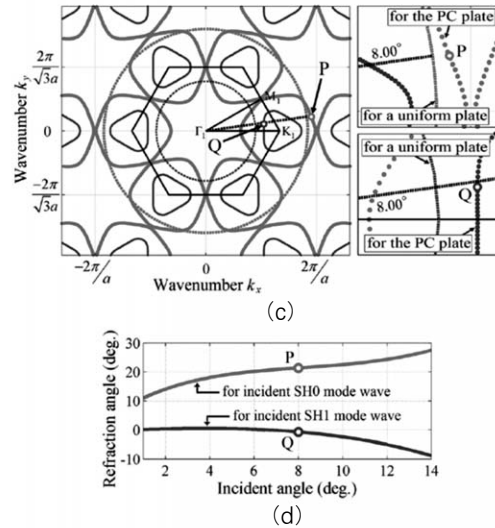
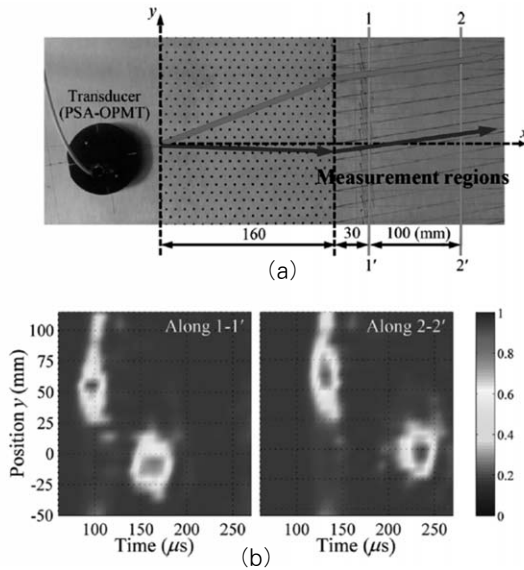


그림 7 (a) Ma 등이⁽²⁰⁾ 제안한 파장 크기 메타물질 평판의 형상과 실험 환경을 나타내는 개략도, (b) 유도 전단파의 공간적 모드 분리 실험 결과, (c) 실험 주파수에서 메타물질 평판의 파동의 등주파수 곡선과 (d) 파동 모드에 따른 굴절각

의해서 나타나게 된다⁽²¹⁾.

파장 크기의 탄성 메타물질은 간단한 형상으로도 획기적인 파동 전파 특성을 획득할 수 있기에 실제로 구현되어 실험적으로 검증된 예가 많다. 대표적으로 Lee 등은 정사각 격자 배열 구조의 원형 빈 공간(void hole)으로 이루어진 메타물질 평판이 유도 전단파(guided shear-horizontal wave)

에 대해서 음의 굴절 특성을 보임을 실험적으로 검증하였다(그림 6)⁽¹⁹⁾. 또한 Ma 등은 삼각형 격자 배열 구조의 원형 빈 공간으로 이루어진 메타물질 평판에서 유도 전단파는 모드에 따라 전파 방향이 달라질 수 있음을 제안하였고, 이러한 특성을 이용하여 공간적으로 모드를 분리해 내는데 성공하였다(그림 7)⁽²⁰⁾.

3. 탄성 메타물질의 응용

2000년대 초반부터 시작하여 근 10년간의 긴 시간동안 다양한 연구가 수행되어 온 전자기 메타물질 분야와는 달리, 탄성 메타물질 분야는 극히 최근에 들어 태동하기 시작한 기초적인 분야이다. 이로 인하여 탄성 메타물질의 실질적인 응용은 아직 이루어지지 않고 있다. 그러나 탄성 메타물질의 응용 가능성에 대한 연구는 일부 수행이 되고 있으며 이로 인하여 매우 높은 주파수의 초음파 영역에서부터 낮은 주파수의 진동에 이르기까지 탄성과 동전 영역에서 다양한 응용이 가능할 것으로 예측한다.

3.1 탄성 초음파 대역에서의 메타물질의 응용

탄성 초음파 기술은 의료 초음파나 구조안전진단 등의 분야에 널리 사용이 되고 있으며, 이러한 응용 분야에서도 탄성 메타물질은 널리 적용이 될 수 있을 것으로 예상된다. 특히 탄성 초음파 기반 이미징 기술에 있어서 가장 대표적인 이슈라 할 수 있는 해상도의 문제와 출력 문제 등에서 탄성 메타물질을 적용하여 획기적인 개선을 이루고자 하는 일련의 연구가 진행되고 있으며 탄성 메타물질을 통해 해당 분야에서의 큰 도약을 이룰 수 있을 것으로 전망한다.

(1) 탄성 초음파 기반 초고해상도 구현 기술

가장 대표적인 탄성 메타물질의 응용 가능 분야는 탄성 초음파 기반 이미징 기술의 초고해상

도 구현 기술이다. 기본적으로 파동에 기반한 모든 이미징 기술은 반파장 이하의 두 물체를 구분할 수 없는 회절 한계로 불리는 해상도의 한계가 존재한다. 이로 인하여 의료 초음파나 구조안전진단 기술의 경우 고질적인 해상도의 문제가 존재한다. 이러한 해상도의 문제는 탄성 초음파 기반 이미징 기술이 가진 인체나 피탐지체에 무해하며 이미징의 속도가 빠르다는 장점을 충분히 살리지 못하게 하는 가장 큰 요인이다.

탄성 메타물질에 기반한 응용 시스템 중 하나인 탄성 하이퍼렌즈(elastic hyperlens)는 이와 같은 문제에 대한 효과적인 해결책을 제시할 수 있을 것으로 예상된다. 탄성 하이퍼렌즈는 장거리 영역에서도 반파장 이상의 높은 해상도를 얻을 수 있게끔 해주는 탄성 메타물질 기반 파동 렌즈로, 기존의 빠른 이미징 속도를 유지하며 높은 해상도를 얻을 수 있는 장점이 있다. 탄성 하이퍼렌즈는 다음과 같은 메커니즘을 통해 회절한계 이상의 해상도를 얻는다. 특정 물체에서 반사된 파동은 일반적인 매질에서는 그림 8(a)와 같이 전방위로 퍼져 나가는 형상을 가진다. 이로 인하여 두 물체간의 간격이 반파장 이하로 매우 좁을 경우 전방위로 퍼져 나가는 반사파가 서로 섞이게 된다. 이는 장거리 영역(far-field)에서 두 물체로부터의 반사파를 서로 구분할 수 없도록 하여 결과적으로 정확한 이미징을 불가능하게 만든다. 탄성 하이퍼렌즈는 인위적으로 제작된 탄성 메타물질을 통해 특정 물체에서 반사된 파동이 전방위로 퍼지지 않고 오직 원주 방향으로만 퍼져

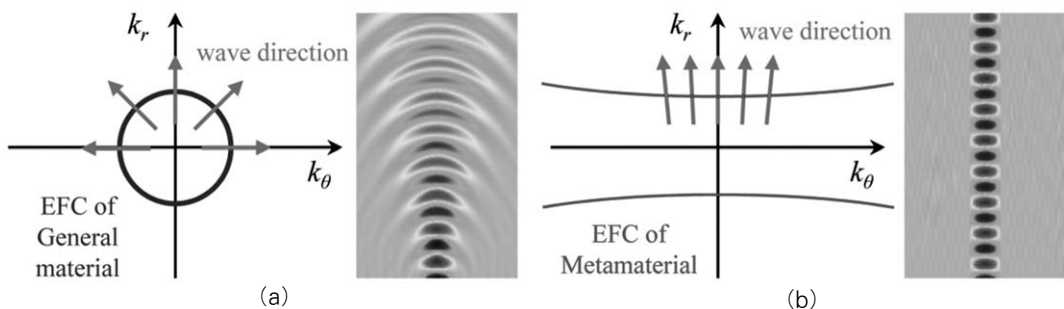


그림 8 (a) 일반적인 물질에서의 파동 전파 현상과 (b) 하이퍼렌즈를 이루는 메타물질에서의 파동 전파 현상

나가게 해주며(그림 8(b)) 이를 통해 반파장 이하의 두 물체에서 반사된 반사파가 장거리 영역에서도 서로 섞이지 않고 전파, 궁극적으로 보다 더 높은 해상도를 얻을 수 있게끔 해준다.

탄성 하이퍼렌즈를 제안하고자 하는 연구는 일부 있어왔으나⁽²²⁾ 대부분이 시뮬레이션이나 이론에 기초하고 있었으며, 사실상 최초로 구현된 탄성 하이퍼렌즈는 2011년에 구현된, 얇은 알루미늄 편을 주기적으로 배열한 구조이다(그림 9)⁽¹⁸⁾. 제안된 탄성 하이퍼렌즈는 방사 방향으로는 알루미늄 편 구조를 타고 탄성파의 전파가 가능하지만, 원주 방향으로는 알루미늄 편 구조와 공기가 주기적으로 배열되어 있어 알루미늄과 공기 간의 큰 임피던스 차이로 인하여 탄성파의 전파가 극히 어려워진다. 이를 통하여 하이퍼렌즈 내부 원에 위치한 가진원에서 방사된 파동이 원주 방향으로 퍼지는 현상을 크게 줄일 수 있으며 궁극적으로는 장거리 영역에서 반파장 이상의 높은 해상도를 얻는 것이 가능했다(그림 9(b)). 해당 하이퍼렌즈는 두 가진원 간의 최소 거리가 파장

의 약 0.21배로 매우 좁은 두 가진원을 장거리 영역에서 성공적으로 분리할 수 있었다.

비록 Lee 등에⁽¹⁸⁾ 의해 제안된 탄성 하이퍼렌즈로 반파장 이상의 높은 해상도가 구현된 바 있었으나, 이는 구현할 수 있는 해상도의 한계가 존재하였다. 제안된 탄성 하이퍼렌즈의 경우 원주

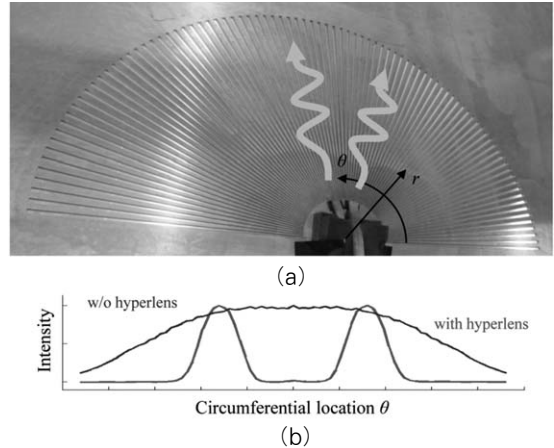


그림 9 (a) 최초로 구현된 탄성 하이퍼렌즈와⁽¹⁸⁾ (b) 탄성 하이퍼렌즈의 고해상도 실험 결과

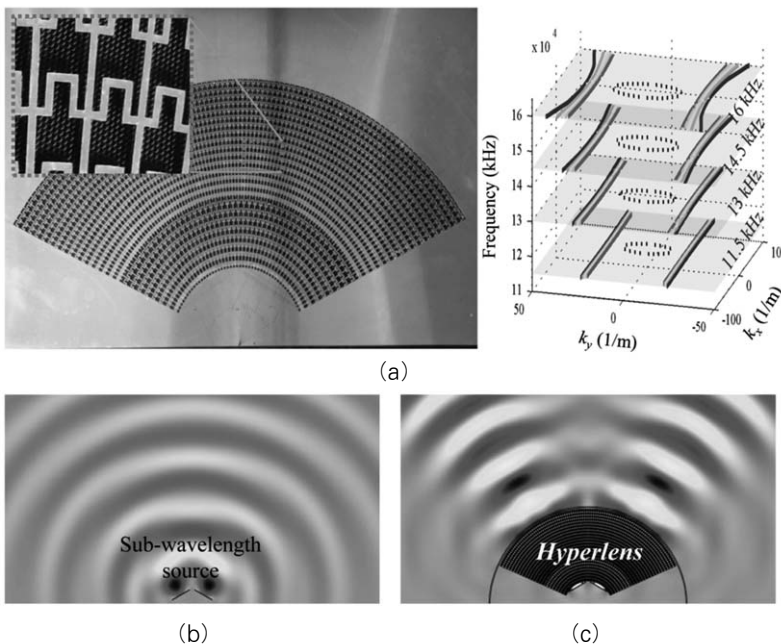


그림 10 (a) 보다 높은 해상도를 위해 새로 고안된 탄성 하이퍼렌즈와⁽²³⁾ 탄성 하이퍼렌즈가 (b) 없을 때와 (c) 있을 때의 파동 시뮬레이션 결과

방향으로는 알루미늄과 공기 간의 큰 임피던스 차이로 파동 전파를 극히 어렵게 만드는 메커니즘을 응용하고 있었으나 파동의 전파가 완벽히 차단된 것은 아니며, 이로 인하여 두 가진원에서 생성된 파동이 약간이나마 원주 방향으로 섞일 수가 있었다. 이는 두 가진원 사이의 간격이 극히 좁을 경우에는 여전히 구분이 불가능한, 즉 구현 가능한 해상도에 한계가 존재함을 의미한다. 이러한 단점을 해결하고 기존의 탄성 하이퍼렌즈보다 더 뛰어난 성능을 보이는 새로운 탄성 하이퍼렌즈가 최근 제안된 바 있다(그림 10)⁽²³⁾. 해당 하이퍼렌즈는 인위적으로 설계된 메타물질을 통하여 원주 방향으로의 파동 전파를 완벽하게 차단하였으며, 이를 통하여 두 가진원 간의 최소 거리가 파장의 약 0.01배인, 극히 좁은 두 가진원에서 생성된 파동을 장거리 영역에서 성공적으로 분리하였다. 이를 통해 그림 10(b)와 같이 구분이 불가능한 두 가진원을 그림 10(c)와 같이 구분해 낼 수 있는 높은 해상도를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 탄성 하이퍼렌즈 기술을 통해 탄성 초음파 기반 이미징 기술의 이미징 속도를 크게 희생하지 않은 채로 반파장 이상의 해상도를 구현하는 기술은 지속적으로 발전하고 있다.

탄성 하이퍼렌즈 외에도 초고해상도 구현에 응용이 가능한 기술은 탄성 슈퍼렌즈를 고려해 볼 수 있다. 탄성 슈퍼렌즈는 탄성 하이퍼렌즈와는 달리 탄성 메타물질이 지닌 음의 굴절 현상을 응용하여 파동을 정확히 특정 지점으로 모아주는 렌즈를 의미한다. 탄성파가 탄성 슈퍼렌즈를 통과할 때 음의 굴절 현상에 의해 진행파(propagating wave)의 경우 특정 지점에 다시 모이게 되며, 감쇠파(evanescent wave)의 경우는 진폭이 감쇠되지 않고 다시 증폭, 특정 지점에서 가진 시와 동일한 진폭을 가지게 된다. 결과적으로 특정 지점에서 파동은 가진 시의 그것과 완벽히 동일한 현상을 보이게 되며 해당 지점에서는 회절 한계의 완벽한 극복이 가능하다. 비록 탄성 하이퍼렌즈와 같이 장거리 영역에서 초고해상도를

구현하는 것은 불가능하기에 실질적인 응용 가능성에는 한계가 있을 것으로 예상된다. 그러나 탄성 슈퍼렌즈를 통한 파동 집속 영역의 크기는 파동의 주파수가 아닌 파동을 가진한 가진기의 크기에 비례하기에 기존에는 불가능한, 반파장 이상의 더 정밀한 영역에서의 탄성파의 집속이 가능하며, 이를 통하여 HIFU 의료초음파 수술 기법 등의 분야에 널리 응용이 될 수 있을 것으로 예상된다.

현재 탄성 슈퍼렌즈에 대한 연구는 극히 미비한 상태로 포노닉 크리스탈에 기반한 일부 슈퍼렌즈가 제안된 바 있다^(24,25). 그러나 기본적으로 파동의 회절에 의존하는 포노닉 크리스탈의 경우 파동 집속이 명확히 잘 이루어지지 않는 문제가 있다. 탄성 메타물질에 기반한 탄성 슈퍼렌즈 관련 기술은 아직까지도 연구가 진행 중이며, 해당 분야의 발전 가능성은 매우 높을 것으로 보인다.

(2) 초고효율 탄성 초음파 전달/발생 기술

탄성 초음파에 기반한 의료 초음파 기술이나 비파괴 검사 분야에 있어, 탄성 초음파의 출력과 전달효율을 높이는 기술은 매우 중요한 이슈이다. 실제 탄성 초음파 응용에 있어 외부 환경에 따른 노이즈의 생성이 있다는 점을 감안할 때, 원하는 탄성파의 에너지를 증대시킬 수 있는 출력/전달효율 증가는 노이즈 대비 원하는 신호의 크기를 향상시키며 이는 이미징 기술의 정확도와 탐상 범위 증가로 이어진다.

탄성 메타물질 기반 고효율 시스템은 주로 메타물질 내의 공진 현상을 응용하여 탄성파의 고효율 및 고전달 시스템을 구현한다. 가장 대표적인 방식은 탄성 메타물질 내의 공진 현상을 응용하는 기법으로 해당 공진 주파수에서 공진 현상을 통해 가진기 주변에 매우 높은 파동 에너지가 집속되며 이로 인하여 가진기에서 나오는 파동 에너지의 출력이 극대화되는 메커니즘을 이용한다. 포노닉 크리스탈 내에 인위적인 결함을 인가하여 공진 시스템을 만들고 해당 결함에 가진기를 설치, 해당 공진 주파수에서 파동을 가진하

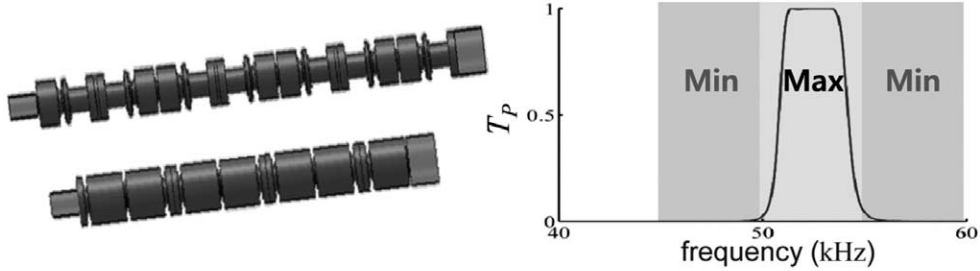


그림 11 탄성파 투과율 테일러링을 위해 제안된 탄성 임피던스 미러드 구조 기법으로 설계된 탄성파 고전달 메타물질 시스템⁽²⁹⁾

여 매우 높은 출력을 갖는 파동을 생성하는 방식이 제안된 바 있다⁽²⁶⁾. 이러한 방식은 파동의 출력을 높일 뿐 만 아니라, 특정 방향으로만 파동의 생성이 가능하고 반대 방향으로만 파동이 전혀 생성되지 않는 특성 등 추가적인 파동 특성이 구현이 가능하다는 장점이 있다. 해당 방식의 단점은 요구되는 시스템의 크기가 매우 크다는 것으로 이는 최근 음향 분야에서 제안된, 메타물질을 통해 인위적인 공진 시스템의 크기를 극히 소형화하여 파동 출력을 매우 높일 수 있는 시스템을 통해 새로운 연구 가능성이 확인된 바 있다⁽²⁷⁾.

탄성 메타물질 기반 파동에너지 고전달 시스템은 서로 다른 두 탄성 매질에서 탄성파동 에너지의 반사를 최소화하여 탄성파 에너지를 다른 매질로 최대한 많이 전달하는 기술이다. 대표적인 방식으로는 임피던스의 변화가 서서히 변화하게끔 점진적으로 변화하는 탄성 메타물질을 배열하여 서로 다른 두 매질에서의 반사파를 최소화하는 방식이 있다⁽²⁸⁾. 이러한 방식은 매우 넓은 주파수 대역에서 매우 높은 파동에너지 투과율을 구현하는 것이 가능하다는 장점이 있으나, 시스템의 크기가 일반적으로 매우 크다는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 탄성 메타물질 기반 임피던스-미러드 시스템 기법이 제안된 바 있으며(그림 11)⁽²⁹⁾, 해당 기법은 비교적 작은 수의 시스템으로도 넓은 주파수 대역의 파동 투과율을 극대화하면서 동시에 그 주변 주파수의 파동 투과율을 극히 낮추는 등의 보다 고차원적인 탄성파 투과율 제어가 가능한 기법으로 각광받고 있다.

3.2 탄성 진동 대역에서의 메타물질의 응용

회전체나 공작 기계에서의 원치 않는 진동 문제나 자동차, 주거에서의 소음/진동 문제 등 진동 관련 분야는 전통적으로 큰 이슈가 되어왔으며 다양한 연구가 수행되고 있다. 탄성 메타물질의 독특한 특성을 이용하여 기존의 진동 저감/제어 시스템보다 더욱 뛰어난 효율을 보이는 새로운 탄성 시스템을 구현하고자 하는 다양한 연구가 진행되고 있다. 특히 고질적인 문제가 되고 있는 저주파 대역에서의 진동 저감 분야에서 탄성 메타물질 기반 시스템은 높은 효율을 보이고 있으며 해당 분야의 새로운 진동저감 대책을 제시할 수 있을 것으로 기대한다.

(1) 탄성 진동 저감 기술

탄성 메타물질은 인위적인 구조로 음의 밀도나 음의 강성 등의 구현이 가능하며, 밀도와 강성중 하나의 값만이 음의 값을 가지고 나머지 값은 양의 값을 가질 경우 메타물질 내에 파동의 전파는 불가능해진다. 이러한 특성을 이용, 탄성 메타물질을 통해 진동의 전파를 차단하고자 하는 다수의 연구가 진행되고 있다. 탄성 메타물질 기반 진동 차단 기술은 물질 내에 진동 자체가 존재하지 않는 현상을 이용하기에 98%가 넘는 진동에너지 차단을 손쉽게 구현할 수 있다는 장점이 있다. 또한 인위적인 물질의 특성을 이용하기에 다수의 탄성 메타물질을 적용하여 넓은 주파수 대역에서의 진동 에너지 차단 역시 가능하다.

가장 대표적인 진동 차단 기술은 포노닉 크리스털의 밴드갭 현상을 이용하는 기술이다. 밴드

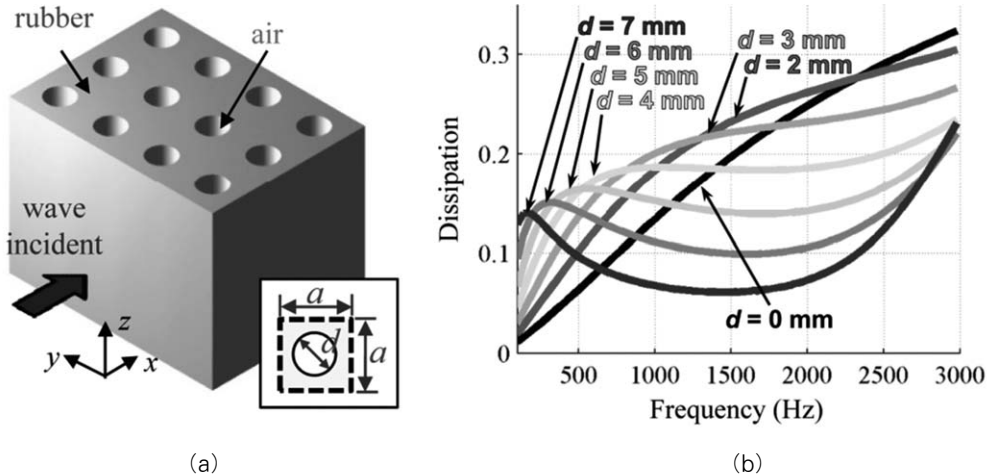


그림 12 (a) 점탄성 물질 기반 파장크기 메타물질(포노닉 크리스털)의 개략도와 (b) 메타물질 내 구멍의 직경에 따른 진동 에너지 소산율⁽³³⁾

갭 현상은 1990년대에 실험적으로 검증된 현상으로⁽²¹⁾, 밴드갭을 통한 진동 차단 효과를 극대화하기 위하여 밴드갭 현상이 발현되는 주파수 대역을 높이기 위한 다양한 연구가 이루어진 바 있다. 최근에는 보다 낮은 주파수대역에서의 진동 차단을 위하여 국부 진동형 포노닉 크리스털에 대한 연구가 수행되고 있으며⁽³⁰⁾, 압전 물질이나 자기변형 물질 등의 스마트 재료에 기반하여 진동 차단 주파수를 동적으로 제어할 수 있는 스마트 포노닉 크리스털 역시 연구가 진행되고 있다⁽³¹⁾. 특히 내부 공진 시스템에 기반한 탄성 메타물질의 경우 6~8개 정도의 단위 구조의 주기적 배열을 요구하는 포노닉 크리스털과는 달리 극히 소수의 탄성 메타물질로도 높은 진동 저감 성능을 얻을 수 있는 장점이 있다.

진동 에너지를 반사시켜 차단하는 기법과는 달리, 진동 에너지를 열에너지로 변환하여 감쇠시키는 진동 저감 기술에도 탄성 메타물질을 응용하고자 하는 다수의 연구가 수행되고 있다. 점탄성 물질에 기반한 포노닉 크리스털에서의 파동 특성에 대한 연구와⁽³²⁾ 함께 최근에는 그림 12(a)와 같은 점탄성 물질 기반 포노닉 크리스털을 통하여 저주파 대역에서 진동에너지 소산율을 3배 증가시킬 수 있음이 연구된 바 있다(그림

12(b))⁽³³⁾. 점탄성 물질에 기반한 메타물질의 구조적 특징을 통하여 내부의 에너지 분포와 파동전파 속도를 변화시키는 것이 가능하며 이러한 효과를 통하여 보다 작은 구조에서 높은 진동에너지 소산율을 얻는 것이 가능하다. 보다 낮은 주파수 대역에서 더 높은 에너지 소산율을 얻기 위한 방식으로 음향 분야에서 제안된, 공진형 에너지 감쇠 메타물질이 제안된 바 있다⁽³⁴⁾. 제안된 메타물질은 구성 요소의 공진 현상에 기인한 내부의 큰 변위를 이용하여 매우 낮은 주파수에서 극히 높은 에너지 소산율을 실험적으로 구현하였다. 비록 이러한 공진형 메타물질 기법은 특정 주파수에서만 높은 에너지 소산율을 보이는 단점이 있고, 이러한 단점을 극복하기 위하여 다양한 공진형 메타물질을 배열하여 광대역에서의 진동 에너지 소산율을 높이는 방식이 제안되었으며⁽³⁵⁾, 향후 다양한 진동저감 시스템으로의 발전이 기대된다.

그 외에도 진동 저감으로 응용이 가능할 것으로 예상되는 탄성 메타물질 시스템으로는 투명 망토의 기술로 흔히 알려진 탄성 클로킹 기술을 고려할 수 있다. 탄성 클로킹 기술은 특정 영역을 메타물질로 이루어진 영역으로 둘러싸서 파동이 해당 영역으로 투과되지 않고 우회하게끔 하

는 기술이다. 일반적으로 탄성 영역에서는 음향과 전자기파와는 달리 텐서에 기반한 물성치로 인하여 음향과 전자기파에서 적용이 되어 온 클로킹 기술을 그대로 적용하는 것이 불가능하다⁽¹³⁾. 그러나 매우 얇은 판에서의 굽힘 진동에 대해서, 탄성 영역과 음향/전자기 영역의 식 간의 오차가 크지 않아 제한적으로는 클로킹 기술이 적용 가능함이 확인되었다⁽³⁶⁾. 이러한 클로킹 시스템을 이용할 경우 파동이 특정 영역을 우회하여 전파하도록 만들 수 있기에 새로운 진동 회피 기술로 응용될 수 있을 것으로 예상된다.

(2) 탄성 진동 변환 기술

진동 대역에 있어 또 다른 응용 가능한 기술 분야로 진동에너지 수확 분야를 들 수 있다. 탄성 메타물질을 통해 진동 에너지를 집중하거나 혹은 탄성 메타물질 내부 구조에서의 큰 변형을 야기하는 등의 방식으로 비록 기초적인 단계이지만 기존의 진동에너지 수확 장치의 효율을 높이고자 하는 연구가 진행된 바 있다.

진동에너지를 집중하여 에너지 수확 장치의 효율을 높이는 기술로는 메타물질 내부의 결합에서 공진 현상을 통해 파동 에너지를 집중시켜 에너지 수확 효율을 높인 연구가 대표적이다. 해당 연구에서는 4 kHz 대역의 음향 파동에 대하여 포노닉 크리스털 내의 공진 현상을 통해 약 30 mV의 전압을 출력해 내었다⁽³⁷⁾. 해당 연구에서는 비록 고주파 대역의 음향 파동에 기반하고 있지만 메타물질을 통한 파동 에너지 집중을 에너지 수확 기술로 연결할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 이러한 기법을 바탕으로 얇은 탄성 판에서의 파동 에너지 집중을 통한 에너지 수확 기술이 개발된 바 있으며, 보다 다양한 방식을 이용하여 에너지 수확 기술의 효율을 높이고자 하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다.

4. 맺음말

탄성/음향 메타물질 기술은 세계 유수의 연구

기관이 향후 20~50년 내 크게 발전할 핵심 기술로 지목할 정도로 큰 잠재력을 내포하고 있는 기술이며, 이러한 만큼 기술·경제·산업적 측면에서 해당 분야의 파급 효과는 가히 폭발적일 것이다. 특히 탄성 분야에 있어 메타물질은 기존 초음파 기반 영상화 기술의 회절한계를 극복하고 초고해상도 이미징을 가능케 할 수 있으며 초음파 기기의 전달효율을 극대화하는데 사용될 수 있다. 또한 진동 저감 분야에 활용되어 층간 소음과 같은 이슈를 해결하는데 일조할 수 있을 것이며, 진동에너지 수확 장치에 적용되어 에너지 수확 효율을 획기적으로 높일 수 있을 것이다. 뿐만 아니라 탄성 메타물질은 향후 다양한 탄성 파동 기반의 기술에 적용되어, 기술적 혁신을 이뤄낼 것으로 기대한다. **KSNVE**

참고문헌

- (1) Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T. and Sheng, P., 2000, Locally Resonant Sonic Materials, *Science*, Vol. 289, No. 5485, pp. 1734~1736.
- (2) Zhou, X. and Hu, G., 2009, Analytic Model of Elastic Metamaterials with Local Resonances, *Physical Review B*, Vol. 79, No. 19, 195109.
- (3) Modinos, A., Yannopapas, V. and Stefanou, N., 2000, Scattering of Electromagnetic Waves by Nearly Periodic Structures, *Physical Review B*, Vol. 61, No. 12, pp. 8099~8107.
- (4) Wu, Y., Lai, Y. and Zhang, Z.-Q., 2007, Effective Medium Theory for Elastic Metamaterials in Two Dimensions, *Physical Review B*, Vol. 76, No. 20, 205313.
- (5) Wu, Y. and Zhang, Z.-Q., 2009, Dispersion Relations and Their Symmetry Properties of Electromagnetic and Elastic Metamaterials in Two Dimensions, *Physical Review B*, Vol. 79, No. 19, 195111.
- (6) Liu, Z., Chan, C. T. and Sheng, P., 2005, Analytic Model of Phononic Crystals with

- Local Resonances, *Physical Review B*, Vol. 71, No. 1, 014103.
- (7) Zhu, R., Liu, X. N., Huang, G. L., Huang, H. H. and Sun, C. T., 2012, Microstructural Design and Experimental Validation of Elastic Metamaterial Plates with Anisotropic Mass Density, *Physical Review B*, Vol. 86, No. 14, 144307.
- (8) Lai, Y., Wu, Y., Sheng, P. and Zhang, Z.-Q., 2011, Hybrid Elastic Solids, *Nature Materials*, Vol. 10, No. 8, 5.
- (9) Liu, A. P., Zhu, R., Liu, X. N., Hu, G. K. and Huang, G. L., 2012, Multi-displacement Microstructure Continuum Modeling of Anisotropic Elastic Metamaterials, *Wave Motion*, Vol. 49, No. 3, pp. 411~426.
- (10) Ding, Y., Liu, Z., Qiu, C. and Shi, J., 2007, Metamaterial with Simultaneously Negative Bulk Modulus and Mass Density, *Physical Review Letters*, Vol. 99, No. 9, 093904.
- (11) Wu, Y., Lai, Y. and Zhang, Z.-Q., 2011, Elastic Metamaterials with Simultaneously Negative Effective Shear Modulus and Mass Density, *Physical Review Letters*, Vol. 107, No. 10, 105506.
- (12) Liu, X. N., Hu, G. K., Huang, G. L. and Sun, C. T., 2011, An Elastic Metamaterial with Simultaneously Negative Mass Density and Bulk Modulus, *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 25, 251907.
- (13) Milton, G. W., Briane, M. and Willis, J. R., 2006, On Cloaking for Elasticity and Physical Equations with a Transformation Invariant Form, *New Journal of Physics*, Vol. 8, No. 10, 248.
- (14) Lee, M. K. and Kim, Y. Y., 2013, Horizontal Cloaking and Vertical Reflection by Transformation Acoustics, *AIP Advances*, Vol. 3, No. 5, 052114.
- (15) 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, No. 5801, pp. 977~980.
- (16) Lin, S. S., Huang, T. J., Sun, J.-H. and Wu, T.-T., 2009, Gradient-index Phononic Crystals, *Physical Review B*, Vol. 79, No. 9, 094302.
- (17) Wu, T.-T., Chen, Y.-T., Sun, J.-H., Lin, S.-C. S. and Huang, T. J., 2011, Focusing of the Lowest Antisymmetric Lamb Wave in a Gradient-index Phononic Crystal Plate, *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 17, 171911.
- (18) Lee, H. J., Kim, H. W. and Kim, Y. Y., 2011, Far-field Subwavelength Imaging for Ultrasonic Elastic Waves In a Plate Using An Elastic Hyperlens, *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 24, 241912.
- (19) Lee, M. K., Ma, P. S., Lee, I. K., Kim, H. W. and Kim, Y. Y., 2011, Negative Refraction Experiments with Guided Shear-horizontal Waves in Thin Phononic Crystal Plates, *Applied Physics Letters*, Vol. 98, No. 1, 011909.
- (20) Ma, P. S., Kim, H. W., Oh, J. H. and Kim, Y. Y., 2011, Mode Separation of a Single-frequency Bi-modal Elastic Wave Pulse by a Phononic Crystal, *Applied Physics Letters*, Vol. 99, No. 20, 201906.
- (21) Kushwaha, M. S., Halevi, P., Dobrzynski, L. and Djafari-Rouhani, B., 1993, Acoustic Band Structure of Periodic Elastic Composites, *Physical Review Letters*, Vol. 71, No. 13, pp. 2022~2025.
- (22) Ao, X. and Chan, C. T., 2008, Far-field Image Magnification for Acoustic Waves Using Anisotropic Acoustic Metamaterials, *Physical Review E*, Vol. 77, No. 2, 025601.

- (23) Oh, J. H., Seung, H. M. and Kim, Y. Y., 2014, A Truly Hyperbolic Elastic Metamaterial Lens, *Applied Physics Letters*, Vol. 104, No. 7, 073503.
- (24) Zhang, X. and Liu, Z., 2004, Negative Refraction of Acoustic Waves in Two-dimensional Phononic Crystals, *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 2, pp. 341~343.
- (25) Ke, M., Liu, Z., Cheng, Z., Li, J., Peng, P. and Shi, J., 2007, Flat Superlens by Using Negative Refraction in Two-dimensional Phononic Crystals, *Solid State Communications*, Vol. 142, No. 3, pp. 177~180.
- (26) Qiu, C., Liu, Z., Shi, J. and Chan, C. T., 2005, Directional Acoustic Source Based on the Resonant Cavity of Two-dimensional Phononic Crystals, *Applied Physics Letters*, Vol. 86, No. 22, 224105.
- (27) Song, K., Lee, S.-H., Kim, K., Hur, S. and Kim, J., 2014, Emission Enhancement of Sound Emitters Using an Acoustic Metamaterial Cavity, *Scientific Reports*, Vol. 4, No. 4165, 04165.
- (28) Chen, S., Zhang, Y., Hao, C., Lin, S. and Fu, Z., 2014, Functionally Graded Materials For Impedance Matching in Elastic Media, *Physics Letters A*, Vol. 378, No. 1-2, pp. 77~81.
- (29) Lee, I. K., Kim, Y. J., Oh, J. H. and Kim, Y. Y., 2013, One-dimensional Broadband Phononic Crystal Filter with Unit Cells Made of Two Non-uniform Impedance-mirrored Elements, *AIP Advances*, Vol. 3, No. 2, 022105.
- (30) Oudich, M., Assouar, M. B. and Hou, Z., 2010, Propagation of Acoustic Waves and Waveguiding in a Two-dimensional Locally Resonant Phononic Crystal Plate, *Applied Physics Letters*, Vol. 97, No. 19, 193503.
- (31) Oh, J. H., Lee, I. K., Ma, P. S. and Kim, Y. Y., 2011, Active Wave-guiding of Piezoelectric Phononic Crystals, *Applied Physics Letters*, Vol. 99, No. 8, 083505.
- (32) Merheb, B., Deymier, P. A., Jain, M., Alosyna-Lesuffleur, M., Mohanty, S., Berker, A. and Greger, R. W., 2008, Elastic and Viscoelastic Effects in Rubber/Air Acoustic Band Gap Structures: A Theoretical and Experimental Study, *Journal of Applied Physics*, Vol. 104, No. 6, 064913.
- (33) Oh, J. H., Kim, Y. J. and Kim, Y. Y., 2013, Wave Attenuation and Dissipation Mechanisms in Viscoelastic Phononic Crystals, *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, No. 10, 106101.
- (34) Mei, J., Ma, G., Yang, M., Yang, Z., Wen, W. and Sheng, P., 2012, Dark Acoustic Metamaterials as Super Absorbers for Low-frequency Sound, *Nature Communications*, Vol. 3, 756.
- (35) Zhu, R., Liu, X. N., Hu, G. K., Sun, C. T. and Huang, G. L., 2014, A Chiral Elastic Metamaterial Beam for Broadband Vibration Suppression, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 333, No. 10, pp. 2759~2773.
- (36) Stenger, N., Wilhelm, M. and Wegener, M., 2012, Experiments on Elastic Cloaking in Thin Plates, *Physical Review Letters*, Vol. 108, No. 1, 014301.
- (37) Wu, L.-Y., Chen, L.-W. and Liu, C.-M., 2009, Acoustic Energy Harvesting Using Resonant Cavity of a Sonic Crystal, *Applied Physics Letters*, Vol. 95, No. 1, 013506.