

# 음향 메타렌즈를 활용한 음파 집속 기술

오범석<sup>1</sup>, 김기윤<sup>1</sup>, 노준석<sup>1, 2, 3, 4, \*</sup>

<sup>1</sup> 포항공과대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 포항공과대학교 화학공학과, <sup>3</sup> 포항공과대학교 전자전기공학과,

<sup>4</sup> 포스코 메타포토닉스 평면 광학연구소

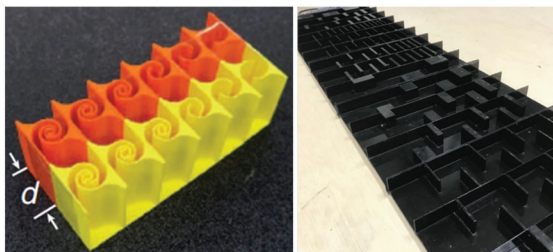
## 1. 서론

메타물질(Metamaterials)은 초월 혹은 무언가를 넘어선다의 의미를 담고 있는 그리스어 meta(μετά)와 물질(materials)의 합성어로, 자연계의 물질에서는 존재하지 않는 파동적 특성을 구현할 수 있도록 설계된 인공물질이다 [1, 2]. 자연계의 물질이나 재료는 이들을

구성하는 화학적 원소들의 배열/결합에 의해 그 특성이 결정된다. 하지만 메타물질의 경우, 이를 구성하는 최소 단위인 메타원자(meta atom)의 구조, 크기, 재료, 주기 및 배열 등을 다양하게 조절하여 자연계에 존재하지 않는 물성을 자유롭게 구현할 수 있다. 예를 들어, 특정 주파수의 파동을 효과적으로 차단하거나, 원하는 방향으로 투과/반사/굴절시키는 등의 다양한 기

a

Zig-zag structures



b

Helmholtz resonators

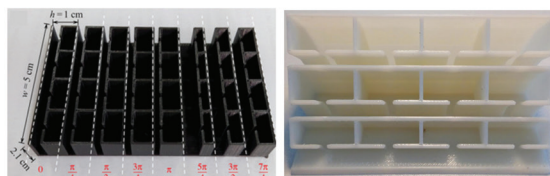


그림 1. 음향 메타표면을 구성하기 위한 대표적인 메타 구조체. (a) 지그재그 형태의 채널을 갖는 메타원자 구조체 [24, 25]. (b) 헬름홀츠 공진기의 배열과 채널을 결합한 형태의 메타원자 구조체 [26, 27].

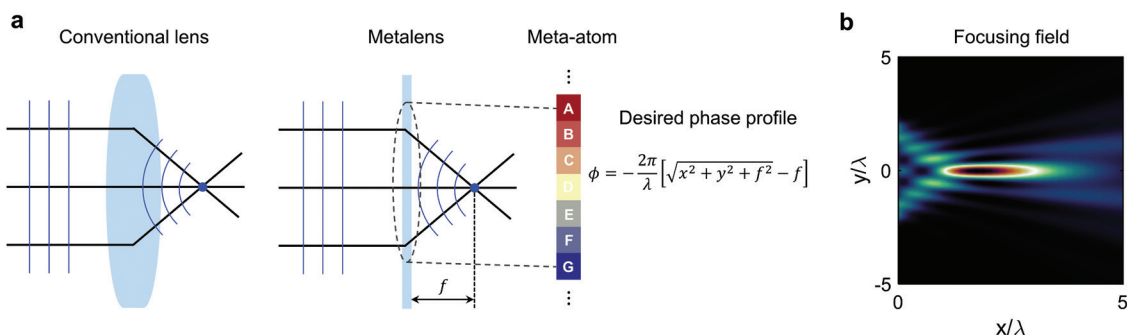


그림 2. (a) 기하학적으로 볼록한 렌즈의 개념도와 평면 형태를 갖는 메타렌즈를 통한 파동 집속 원리의 모식도. 메타렌즈 내에 위치하는 각 메타원자들은 집속 파면을 구현하기 위한 위상 프로파일 식을 따르도록 설계된다. (b) 하이퍼볼릭 위상 프로파일을 만족하도록 설계된 음향 메타렌즈를 통한 음파의 집속 음향장 예시.

능을 구현할 수 있다 [3]. 메타물질의 개념은 1968년 러시아의 과학자 Vagelago에 의해 처음 제안되었고 [4], 특히 그에 의해 음굴절(negative refraction)의 구현 가능성이 예측되었다. 이후 2000년대에 들어서 실험적인 구현이 이루어지며 메타물질이라는 분야에 대한 본격적인 연구가 시작되었다.

메타물질을 구성하는 가장 작은 단위의 구조를 메타원자 혹은 단위 격자(unit-cell)라 부르며, 이들의 크기는 주로 파동의 파장보다 작거나 비슷하게 구성된다. 특히, 이 세파장(subwavelength) 특성은 파동을 자유롭게 제어하기 위한 핵심 요소이다. 메타물질에 대한 연구는 초기에는 주로 광학 및 전자기학 분야에서 이루어졌지만, 음향 분야에서도 활발한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 음파의 경우에도 메타물질을 이용하면 기존의 고전적 음향 제어 방법과는 달리 음파의 전파 경로, 속도, 반사 및 굴절을 정밀하게 제어할 수 있으며 [5], 2000년 Liu et al. 에 의해 처음 음향 메타물질의 실험적 구현이 이루어졌다 [6].

음향 메타물질은 음파의 대표적인 특성인 음향 특성 임피던스(characteristic impedance)를 결정하는 밀도(density)와 전파 속도(sound speed)를 유효하게 변형시키도록 설계될 수 있으며, 이를 통해 전통적인 음

향 구조로는 불가능하다고 여겨져 왔던 다양한 음파 제어를 가능하게 한다. 예를 들어, 소음 저감 [7, 8], 음향 집속 및 이미징 [9–11], 음향 필터 [12, 13], 음향 은폐 [14, 15] 등 다양한 응용이 가능하다. 이 중 음향 에너지를 한정된 좁은 영역에 집속할 수 있는 장치인 음향 메타렌즈는 특정 주파수 대역의 음파를 원하는 위치(초점, focal point)에 집중시킬 수 있는 장치로, 돋보기나 카메라 렌즈가 빛을 모아 초점을 맞추는 역할과 유사하다. 일상 생활에서 흔한 음향 집속 방법은 기하학적으로 볼록 혹은 오목한 형태의 음향 렌즈를 사용하는 것이지만, 이는 구조의 부피가 크고 설계 자유도가 낮은 단점이 있다. 또한, 위상 배열(phased array) 방식을 이용, 음파의 시간차 제어로 간섭(interference)을 이용해 음파를 제어할 수 있는 기술이 있지만, 이는 전기적으로 복잡한 구조가 필요하기 때문에 큰 부피를 차지하며, 위상 배열을 이루는 각 유닛들이 주로 파장보다 크도록 설계되기 때문에 파면을 높은 해상도, 즉 높은 효율을 갖도록 제어할 수 없다는 단점이 있다. 메타물질을 이용한 음향 메타렌즈는 이러한 기존의 한계를 극복할 수 있다. 메타렌즈는 파장 보다 작은 구조체로 이루어지기 때문에 상대적으로 작은 부피(특히 두께)가 되도록 설계할 수 있고, 평면형태의 상대적으로 간

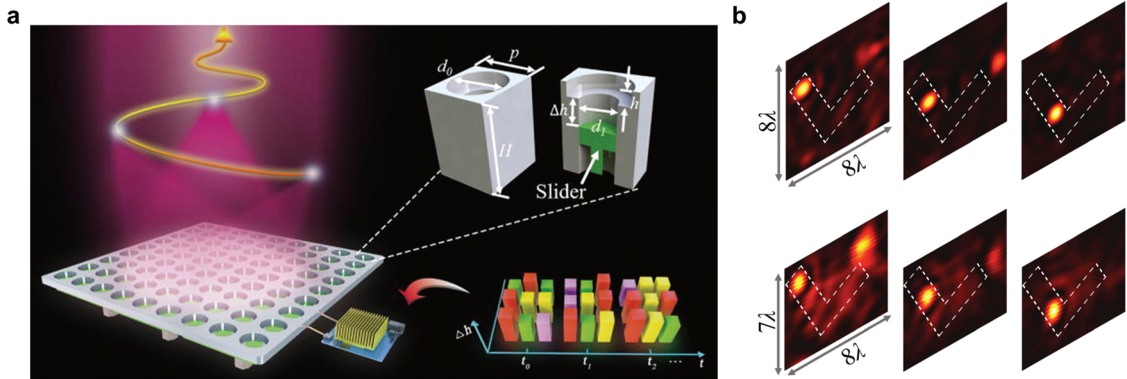


그림 3. (a) 액추에이터와 전기적으로 연결된 슬라이더의 제어를 통해 구현된 가변형 음향 메타렌즈. (b) 가변 메타렌즈를 통한 초점 위치의 제어 및 이에 따른 음향 집속장 분포의 해석 결과 (상) 및 실험 결과 (하) [33].

단한 형상으로 제작이 가능하며, 위상 제어에 대한 높은 자유도, 높은 공간 해상도를 갖도록 설계할 수 있기 때문에 고효율의 음파 집속을 가능하게 한다. 이는 고감도 음원 추적, 고해상도 음향 이미징, 에너지 하베스팅, 음향 통신, 비파괴 검사, 의료 초음파 등의 응용 분야에서 큰 파급력을 지니고 있다 [16–21].

본 논문에서는 음향 메타렌즈 기반 음파의 집속 기술을 소개하고 최근 연구 발전 동향에 대해 다루고자 한다. 음향 메타렌즈의 기본 원리와 설계 방법, 다양한 응용 사례를 통해 음향 메타물질의 현재와 미래를 조망할 것이며 그 잠재적 응용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 음향 메타렌즈의 기본 설계 및 작동 원리

음파는 전자기파와 다르게 파동의 전파를 위해서는 매질이 필수적으로 요구된다. 음파는 유체 (기체와 액체)를 통해 전파하며, 유체가 전단 응력에 대한 저항하지 않는 특성 때문에 압축과 팽창을 통한 밀도 변화, 즉 압력파의 형태로 에너지를 전달한다. 따라서 스칼라 형

태의 파동 전파 특성을 갖는다. 음파의 특성은 매질인 유체의 질량 밀도( $\rho$ ), 체적 탄성 계수( $k$ ), 입자속도( $v$ ), 음속( $c = \sqrt{k/\rho}$ ) 등에 결정되며 파동 방정식에 따라 거동한다. 선형 거동을 하는 음파의 파동 방정식은 다음과 같이 기술될 수 있다,

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 음압(sound pressure)을 나타낸다.

메타물질의 특성은 주로 유효 굴절률(effective refractive index,  $n_{\text{eff}}$ ) 혹은 위상 지연(phase delay,  $\phi = n_{\text{eff}}kd$  여기서  $k$ 는 파수벡터,  $d$ 는 메타물질의 두께)에 의해 결정되어진다 [22]. 메타물질은 세파장 특성을 갖기 때문에 유효 물성을 갖는(이는 자연계에 존재할 수도, 아닐 수도 있는 임의의 물성을 뜻함) 등방성(homogeneous) 물질로 간주될 수 있고 이와 관련된 이론을 유효 물성 이론이라 한다 [23]. 우리는 유효 물성 이론을 통해 음향 메타물질의 유효질량밀도(effective mass density), 유효부피탄성계수(effective bulk modulus)를 계산할 수 있고 핵심 인자인 굴절률, 위상 지연 등을 역으로 계산할 수 있다. 음향 메타물질에서, 메타원자의 설계는 주로 ‘구조’와 ‘공

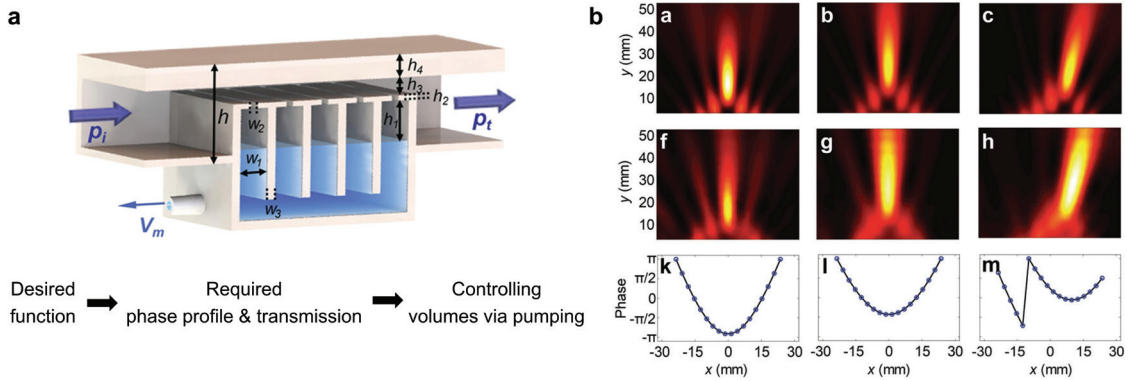


그림4. (a) 헬름홀츠 공진기 내에 채워진 물의 유량 조절을 통한 가변형 메타원자의 개략도. (b) 이러한 가변 음향 메타원자를 배열해 가변 초점을 구현하기 위한 위상 프로파일 (3열), 이에 따른 음향 집중장 분포의 해석 결과 (1열) 및 실험 결과 (2열) [34].

진' 특성에 기반하여 이루어진다. 예를 들어, 그림1(a)와 같이 도파관(waveguide) 내에 지그재그(zig-zag) 형태의 구조를 삽입하면, 외부에서 보여지는 도파관의 총 길이는 같으나 실제 음파의 내부 이동 경로를 길게 만들어 위상 지연 효과를 구현할 수 있다 [24, 25]. 이는 음파가 같은 길이의 음향 구조를 통과할 때 내부 이동 경로가 길어지면서 실제로는 음파가 더 늦게 도달하게 되므로, 주파수 영역의 관점에서는 큰 위상 지연이 발생하게 되는 것이다. 다시 말해, 메타표면은 이러한 상대적인 위상 차이를 갖도록 메타원자들을 적절히 배치함으로써 구현할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 메타표면은 수동 위상 배열(passive phased array)이라고도 불린다. 또한 그림1(b)와 같이 도파관에 헬름홀츠 공진기(Helmholtz resonator)를 여러 개 부착하고, 각 공진기의 부피를 조절함으로써 음향 임피던스의 허수부인 리액티브를 조절할 수 있다. 이는 결과적으로 투과하는 음파의 위상 지연을 유발하게 된다 [26, 27]. 이와 같이, 다양한 위상을 갖는 메타원자들의 특성을 사전에 구축하여 메타표면 설계에 활용할 수 있다. 이러한 사전 구축 정보를 메타원자 라이브러리(meta-

atom library)라고 부르며, 이는 메타표면의 대표적인 설계 방식 중 하나이다. 따라서, 필요한 위상을 갖는 메타원자들을 구현하고자 하는 목적에 맞게 배열함으로써 음의 굴절, 전반사, 집중 등의 자유로운 파면 변조(wavefront modulation)를 구현할 수 있다.

음향 메타렌즈는 이러한 메타표면 설계 방법을 활용해 기하학적으로 볼록하거나 오목한 구조의 필요 없이 평면 구조로 음파를 원하는 위치에 집중시킬 수 있는 장치이다 [28]. 메타렌즈는 크게 다음과 같은 단계를 통해 설계될 수 있다: 1) 메타원자 라이브러리 구축; 2) 집중 위상 지연 프로파일 설계; 3) 해당 위상 지연 프로파일에 맞도록 메타원자를 배열 혹은 매핑(mapping).

먼저 메타원자 라이브러리의 경우 목표 주파수 범위 내에서 메타표면이 동작할 수 있도록 사전에 음향 구조체를 설계하고, 위상 지연에 기여하는 음향 구조체의 기하학적 파라미터들을 조절함으로써 구축할 수 있다. 다음으로는 음향 집속을 위한 파면 변조를 위해 요구되는 위상 프로파일을 계산하는 단계이다. 기하학적으로 볼록한 렌즈를 투과한 파동은 구(spherical) 형태의 2차 파면을 형성하게 된다. 이를 평면 음향 메타

1 음파의 전파를 1차원 혹은 2차원 형태로 제한할 수 있는 '관' 형태의 음향 구조물을 의미한다. '덕트(duct)' 라고도 부른다.



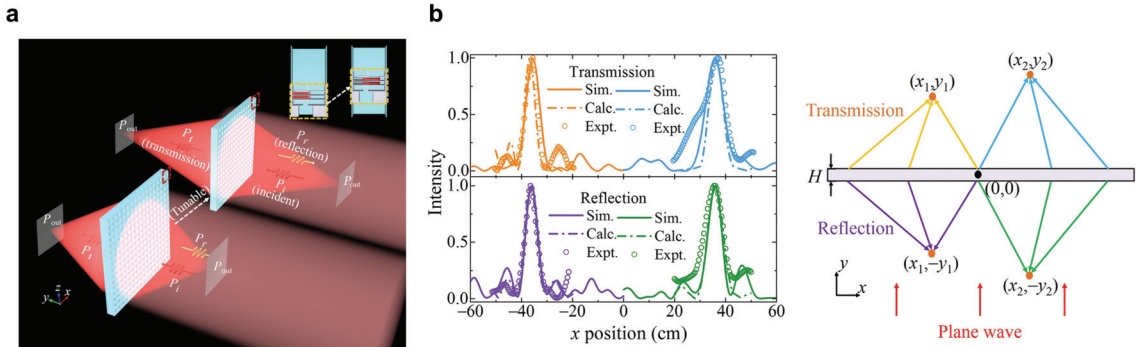


그림 5. (a) 투과-반사-결합 가변 음향 메타렌즈의 개략도, (b) 투과 및 반사 영역 모두에 대해 집속을 할 수 있도록 고안된 메타렌즈의 가변 초점 개념도와 (우) 이를 통해 설계된 메타렌즈의 1차원 다초점 음향 집속장 특성 (좌) [39].

렌즈 상에서 동일하게 2차 파면을 구현하기 위해 필요한 위상 프로파일을 설계한다. 렌즈를 투과하는 파동이 원하는 초점에 맺히도록 하기 위해, 필요한 위상 프로파일 식을 만족하도록 메타원자들을 배치하게 되면 평면 구조로도 음파를 집속할 수 있다. 이를 위해 주로 사용되는 식을 하이퍼볼릭 위상 프로파일(hyperbolic phase profile)이라 부르며, 이 식은 다음과 같이 표현된다 [28]:

$$\phi(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sqrt{x^2 + y^2 + f^2} - f], \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 음파의 파장,  $f$ 는 초점 거리,  $x, y$ 는 렌즈 위의 좌표를 나타낸다. 하이퍼볼릭 위상 프로파일을 사용하여 메타렌즈 내의 각 위치에 필요한 위상을 만족하도록 메타원자를 배열함으로써 메타렌즈의 설계가 이루어지고 파장 보다 작은 얇은 두께의 평면 구조로 효과적으로 음파를 집속할 수 있게 된다.

실제로 식 (2)는 연속 함수의 형태이지만, 메타표면에서는 이를 완벽하게 구현할 수는 없다. 그 이유는 메타원자들은 유한한 크기를 가지기 때문이다. 하지만 앞서 언급하였듯이 메타원자들은 세파장 특성을 갖기 때문에 이산적인 분포로 설계되더라도 충분히 높은 공간 해상도(spatial resolution)를 가지게 되고, 결과적으

로 연속적인 분포에 가까운 높은 효율로 파면을 변조할 수 있다. 이에 대한 자세한 내용은 본 논문에서는 다루지 않으며, 독자들은 관련 문헌 [29]을 참고할 수 있다. 그림 2(a)는 고전적 방식의 렌즈(볼록 혹은 오목한 형태의)와 평면 메타렌즈를 이용한 파동의 집속 메커니즘을 나타낸다. 메타렌즈의 경우 평면 형상을 가지지만, 각 메타원자에 적절한 위상 지연을 부여함으로써 기존의 기하학적 렌즈와 동일한 기능을 수행할 수 있다. 음파는 메타렌즈를 통과한 이후 집속장을 형성할 수 있는 파면으로 변조된다. 이 설계는 앞서 기술한 하이퍼볼릭 위상 프로파일을 만족하도록 이루어지며, 원하는 작동 주파수(또는 작동파장)와 초점 거리에 따라 메타렌즈를 설계할 수 있다. 그림 2(b)는 메타렌즈를 통해 형성된 집속장(focusing field)의 예시를 보여준다. 여기서 주목할 점은 메타렌즈는 기존의 렌즈와 동일한 기능을 수행하면서도 파장보다 얇은 두께를 갖기 때문에 구조의 경량화가 가능하다는 특별한 장점이 있다는 것이다.

### 3. 가변, 다기능 음향 메타렌즈

렌즈는 주로 하나의 기능을 수행하도록 설계되며, 따라서 제작이 완료된 후에는 초점거리, 작동 주파

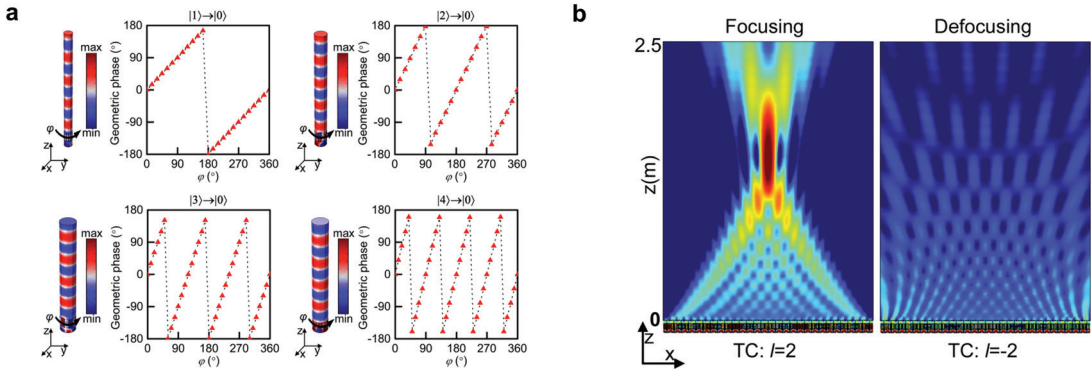


그림 6. (a) 궤도-각-운동량 기반 메타원자의 설치 각도 조절을 통한 가변 제어 메커니즘. 각 메타원자는 위상 전하를 '0'으로 만들도록, 즉 출력 파면이 평면파가 되도록 설계되며 각 메타원자의 배치 각도에 따라 출력 위상을 조절할 수 있다. (b) 입사되는 궤도-각-운동량의 위상전하에 따른 가변 음향장 구현 [40].

수, 대역폭 등의 특성을 변경하기 어렵다 [30, 31]. 예를 들어, 스마트폰 카메라에는 여러 개의 렌즈가 탑재되어 있는데, 이는 원하는 촬영 목적에 따라 초점거리, 화각(field-of-view, 혹은 시야각) 등이 다른 렌즈의 사용이 필요하기 때문이다. 메타렌즈도 마찬가지로 다양한 기능(작동주파수, 초점거리 등)을 수행하기 위해서는 여러 개의 메타렌즈를 구비해야 한다. 그러나 최근에는 하나의 메타렌즈로 다기능을 수행할 수 있는 가변형 다기능 음향 메타렌즈에 대한 연구들이 진행되고 있다 [32]. 이를 구현하기 위한 방법으로 기계적 변형(mechanical deformation), 압전효과(piezoelectricity), 능동 제어(active control) 등이 있다. 먼저 기계적 변형의 경우 메타원자의 기하학적 특성을 조절함으로써 위상, 투과율(transmission), 반사율(reflection) 등의 파동 제어를 위한 메타원자 특성을 변형하는 것이다. 예를 들어, 헬름홀츠 공진기의 배열 형태로 구성된 메타표면에서 메타원자 내의 공동(cavity)의 길이 조절을 위해 피스톤 형태의 슬라이드를 삽입하고, 이를 제어하여 부피 변화를 통해 위상 지연을 이룬 연구가 Zhang et al. 에 의해 수행되었다 [33].

그림 3(a)는 슬라이더를 전동 액추에이터에 연결한 가변형 음향 메타렌즈를 나타낸다. 이 메타렌즈는 각

메타원자들을 자유롭게 제어하여 원하는 위상 프로파일을 만족시키고, 이를 통해 초점 위치를 자유롭게 제어할 수 있다[그림 3(b)]. 이와 비슷하게, 헬름홀츠 공진기의 공동 내에 물을 채우고 유량을 조절하여 메타원자의 위상을 조절한 연구가 발표되기도 하였다 [34]. 그림 4는 다양한 메타표면 기능을 구현하기 위해 필요한 메타원자의 특성(위상 및 투과율)을 공동 내의 물의 부피 조절을 통해 구현한 것을 보여준다. 물의 음향 임피던스는 공기보다 대략 3500배 이상 높다. 따라서 메타렌즈를 작동시키고자 하는 매질이 공기일 경우, 물은 구조체와 같이 음향 임피던스가 매우 높은 강체(rigid body)로 가정할 수 있게 되며 결과적으로 물이 차지하는 부피만큼 헬름홀츠 공진기가 차지하는 부피가 줄어들게 되는 효과로 이어진다. 이를 통해 다양한 위상을 갖도록 메타 원자들을 제어함으로써 여러 가지의 집속 음향장을 구현할 수 있었다. 이 외에도 비등방성 메타원자의 회전을 통해 굴절률을 조절한 연구 [35], 나선형 코일 형태로 이루어진 메타원자의 피치를 조절하여 음파의 유효 이동 경로를 자유롭게 조절해 가변 위상 지연을 구현한 연구 [36, 37], 압전 단극(single electrode)을 바둑판 형태로 세분화해 각 메타원자들을 0 (off), 1 (on) 상태로 제어하여 다기능을 구현한 메타

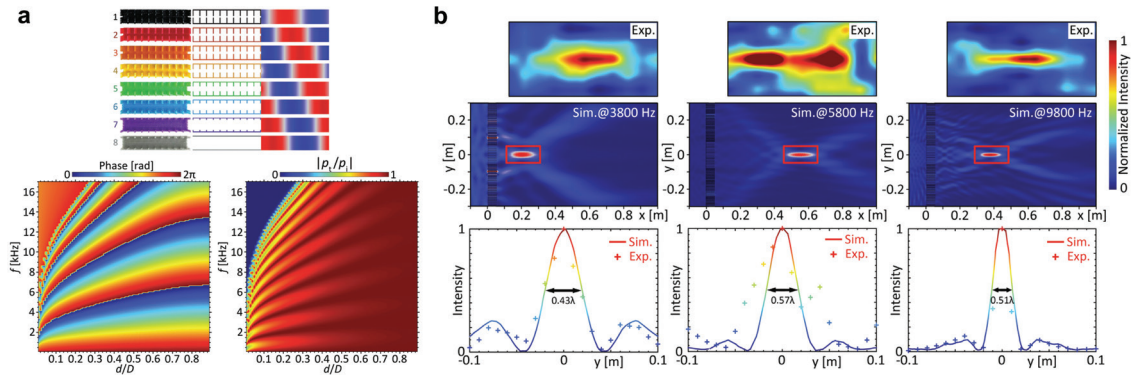


그림 7. (a) 음향 오리피스 배열 기반 메타원자 및 이의 광대역 응답 특성 (위상지연 및 투과율). (b) 이를 이용한 광대역 음파 집속 성능에 대한 실험 및 계산적 검증 [42].

렌즈 [38] 등이 발표된 바 있다.

메타표면의 또 다른 장점은 투과 및 반사에 제약 없이 원하는 기능을 자유롭게 설계할 수 있다는 점이다. 투과율이 1에 가까운 경우 이를 투과형 메타표면이라 부르며, 반사율이 1에 가까운 경우를 반사형 메타표면이라 부른다. 투과율과 반사율을 적절히 제어하면 음파가 입사할 때 일부는 반사되고 일부는 투과되도록 설계할 수 있다. 이러한 장점을 활용하여 Tang et. al. 은 투과와 반사파를 동시에 가변적으로 제어하는 ‘투과-반사-결합(transmission-reflection-integrated)’ 메타렌즈를 제안하였다 [39]. 이들은 음파의 투과 및 반사 계수를 적절히 부여하여, 투과 영역과 반사 영역에 모두 초점이 맺힐 수 있도록 메타렌즈를 설계하였다. 그림 5(a)는 이들이 제안한 음향 메타렌즈의 모식도를 나타내며, 메타원자 내에 위치한 패널을 적절히 조절하여 가변 특성을 구현할 수 있었다. 그림 5(b)는 투과, 반사 영역에 대해 모두 음향장이 집중되는 1차원 음향 집속장 분포를 보여준다. 이와 같이 다양한 가변 메타표면을 이용해 다기능을 수행할 수 있는 음향 메타렌즈를 설계할 수 있다.

지금까지는 주로 메타원자의 부피 조절을 통해 가변형 음향 메타표면을 구현하였다면, 최근에는 음향

궤도-각-운동량(orbital-angular-momentum, OAM) 및 메타원자의 배치 각도 조절을 통해 위상을 제어하고, 이를 통해 메타렌즈를 설계함으로써 음향 집속을 구현한 연구가 발표되기도 하였다 [40]. OAM은 기본적으로 나선형의 파면을 가지며, 정수로 표현되는 위상 전하(topological charge)에 따라 파면 특성이 결정되는 특징을 갖는다 [41]. 연구진들은 입사파에 반대되는 위상전하를 갖도록 메타원자를 설계하여 투과파가 평면파(plane wave)가 되도록 함과 동시에 각 메타원자들이 설치된 각도에 따라 위상이 조절되도록 하여 메타렌즈를 구현하였다 [그림 6(a)]. 그림 6(b)는 입사파의 위상 전하를 다르게 제어함으로써 초점을 집중하거나 초점이 이탈되도록 하는 가변 음향장을 나타낸다. 연구진들은 투과/반사 영역에 각각 2개의 다초점을 갖는 음향 집속장을 구현하였다.

## 4. 넓은 대역폭을 갖는 음향 메타렌즈

앞서 기술한 바와 같이, 음향 메타렌즈는 파장보다 얇은 두께, 그리고 평면 형상으로 설계가 가능하다는 등의 다양한 장점을 지니고 있다. 그러나 음향 메타물질의 특성상 공진 기반의 설계가 주를 이루기 때문에

한정된 대역에서만 작동할 수 있고, 따라서 대역폭에 한계가 있다 [28]. 또한, 특히 20 Hz 에서 20 kHz 사이의 영역인 가청주파수 대역은 전자기파의 가시광 영역인 400 nm 에서 760 nm 사이와 비교했을 때 약 10 옥타브(octave)<sup>2</sup>에 이르는 매우 넓은 주파수 범위를 갖는다. 따라서 넓은 대역폭을 갖도록 음향 메타렌즈를 설계하는 것은 큰 도전 과제 중 하나이다. 최근에는 이 문제를 해결하여 넓은 대역폭을 갖는 메타렌즈를 구현하기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다.

넓은 대역폭을 갖는 음향 메타렌즈의 한 예로, Fan et al. 은 오리피스(orifice)<sup>3</sup>가 배열된 형태의 음향 구조를 이용해 넓은 대역폭을 갖는 메타원자를 설계하고 이를 이용해 광대역 메타렌즈를 구현하였다 [42]. 그림 7(a)는 이들이 제안한 메타원자 형상 및 광대역 응답 특성을 나타내며 넓은 주파수 대역에서 높은 투과율을 갖는 특성을 확인할 수 있다. 그림 7(b)는 이를 이용해 구현된 3.8 kHz 에서 대략 10 kHz 에 이르는 2 옥타브 이상의 대역폭을 갖는 음향 집속을 해석적, 실험적으로 구현한 결과를 나타낸다.

또 다른 연구에서는 2.5 kHz 에서 5.5 kHz 에 이르는 주파수 영역에 대해 효과적으로 음파를 집속할 수 있는 음향 메타렌즈가 개발되기도 하였다 [43]. 이 연구에서는 지그재그 형태의 음향 채널을 활용, 배경 매질인 공기와 임피던스 정합을 이루도록 메타 원자를 설계해 높은 투과율을 갖도록 하였다[그림 8(a)]. 또한, 좁은 지그재그 채널로 인해 발생하는 열점성(thermoviscous) 손실과 음파에 의해 가진될 수 있는 메타 원자의 공진 모드에 의한 탄성 변형 등도 추가적으로 고려되었다[그림 8(b)]. 그림 8(c)는 2.5 kHz 에서 5 kHz 에 이르는 넓은 대역폭을 갖는 음향 메타렌즈의 실험 결과를 나타낸다.

광대역 응답 특성을 구현하기 위한 또 다른 방법으로, 역설계(inverse design)을 이용해 넓은 대역폭에 대해 구동될 수 있는 임의의 음향 메타원자를 구현한 연구가 Dong et. al. 에 의해 수행되기도 하였다 [44]. 이들은 역설계 기반 위상 최적화(topology optimization) 방법을 사용하였으며, 메타원자 영역 내에 원하는 대역폭과 위상을 만족하는 임의의 음향 구조가 형성되도록 메타원자를 설계하였다. 그림 9(a)는 픽셀 형태 기반의 위상 최적화 방법을 통해 임의의 기하학적 형상을 갖도록 음향 메타원자가 설계되는 과정의 모식도를 나타낸다. 각 메타원자는 원하는 음향학적 특성을 만족하도록 설계되며 최종적으로 임의의 형상을 갖게 된다. 그림 9(b)는 1000 Hz 부터 4000 Hz 에 이르는 넓은 주파수 영역에 대해 작동할 수 있도록 설계된 메타원자 및 굴절률을 나타낸다. 이를 통해 광대역 메타렌즈를 성공적으로 구현하였으며, 그림 9(c)는 음향 집속에 대한 해석 및 실험 결과를 나타낸다. 또한 연구진들은 주파수에 관계없이 일정한 초점 위치를 유지할 수 있는 음향 메타렌즈의 성능을 성공적으로 구현하였다.

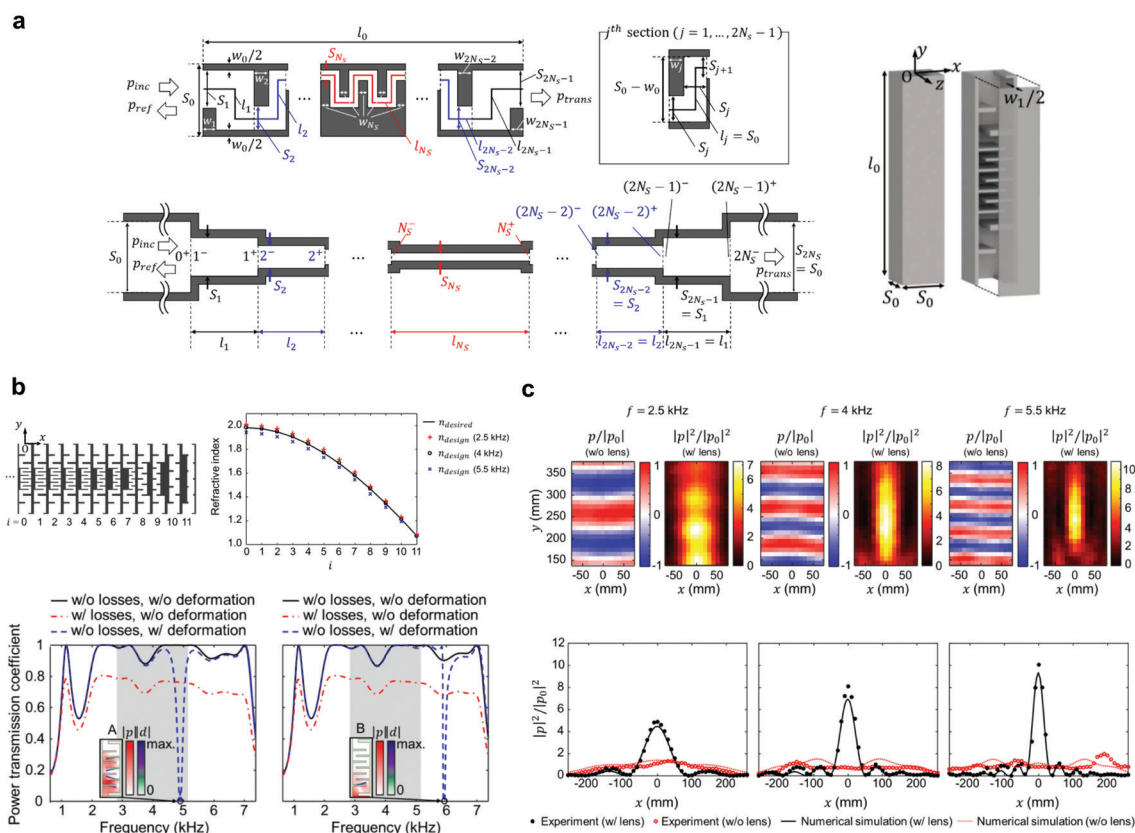
## 5. 넓은 청야각을 갖는 음향 메타렌즈

앞서 살펴보았듯이 음향 메타렌즈에 대한 다양한 연구가 지속적으로 수행이 되어 왔다. 그러나 기존 음향 메타렌즈 연구의 대부분은 음향파가 메타렌즈에 수직 입사하는 이상적인 상황에 초점을 맞추어 이루어졌다. 이는 실제 응용 환경에서 발생할 수 있는 다양한 음파의 입사 각도를 고려하지 않았다는 한계점이 있다. 실제로 음향파는 여러 방향에서 다양한 입사 각도를 가지고 메타렌즈에 입사할 수 있기 때문에, 이러한 복잡한

2 두 배의 주파수 비율 간격을 나타내는 척도이다.

3 그림 7(a)의 메타원자의 모식도와 같이 도파관 내에 슬릿(slit) 형태가 삽입된 음향 구조물을 의미한다.





**그림 8.** (a) 임피던스 정합을 위한 지그재그 형태로 구성된 메타원자의 개념도(좌상)와 이의 유효 도파관 모델(좌하). 메타원자는 크게 3가지 구역으로 나눌 수 있으며 구역간의 면적비는 임피던스 정합 조건에 따라 결정된다. 최종적으로 설계된 메타원자(우). (b) 광대역 음향 집속을 위해 필요한 메타원자의 배열과 굴절률 분포도(상). 열점성 효과와 탄성 변형까지 고려된 경우의 메타원자 투과율의 광대역 주파수 응답(하). (c) 설계된 음향 메타렌즈의 집속 성능 실험 결과 [43].

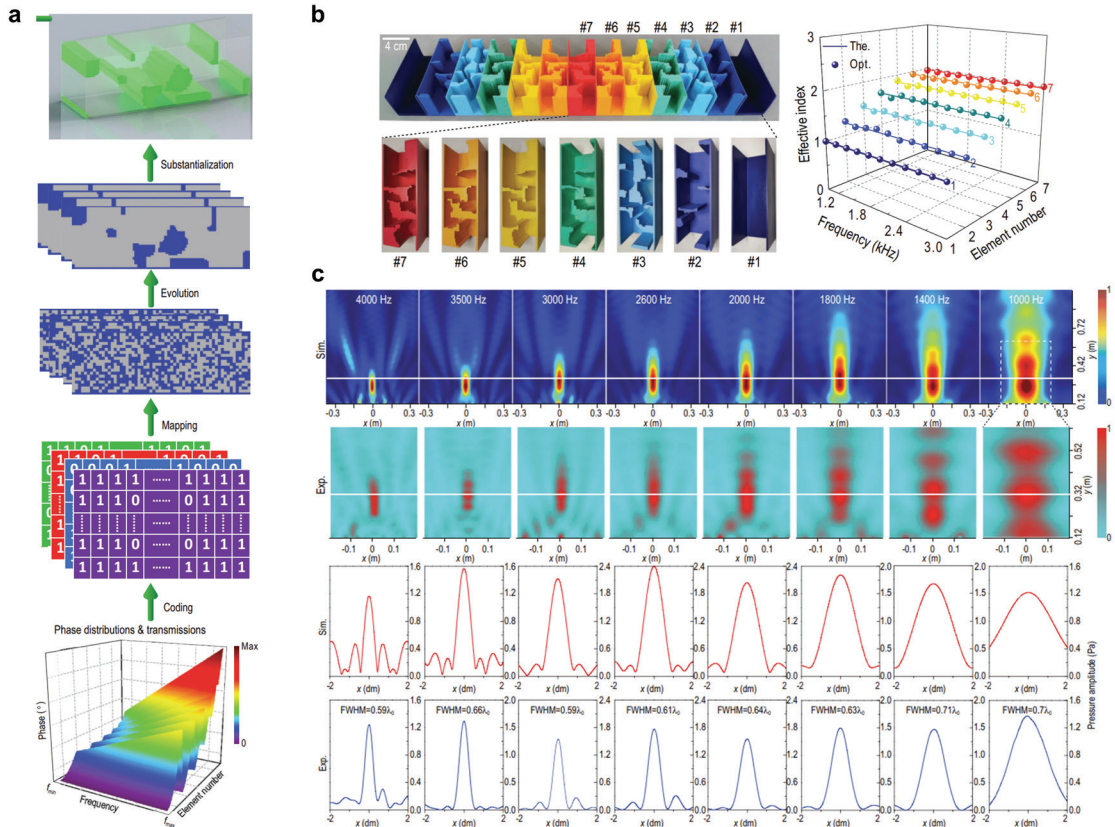


그림 9. (a) 역설계 기반 위상최적화를 이용한 광대역 음향 메타물질의 설계 과정. (b) 광대역 음향 집속을 위해 설계된 메타원자들과 이의 굴절률. 연구진들은 주파수 대역폭 내에서 굴절률이 변하지 않는 즉, 분산 특성으로부터 자유로운 메타원자를 설계하여 활용하였다. (c) 1000 Hz 부터 4000 Hz 에 이르는 넓은 주파수 영역에 대한 음향 집속 해석 및 실험 결과 [44].

curvature) 등이 있다. 이중에서 집속장을 왜곡시키고 흐림현상(blur)을 유발하는 주된 요인은 해성형 수차이다. 해성형 수차는 이상적인 '점'의 형태로 초점이 형성되지 않고 꼬리를 끄는 해성처럼 뻗이기 때문에 붙여진 이름이다. 광학 이미징 관점에서 생각해보면, 이는 흐린 피사체의 형태, 즉 초점이 맞지 않아 흐릿한 상이 형성되는 것으로 이해할 수 있다. 음향 집속의 관점에서는 원하는 초점 영역에 음향 에너지가 효율적으로 모이지 않고 상대적으로 넓은 영역에 흩어져 분포하는 꼴이 된다고 이해할 수 있으며 이는 곧 낮은 음향 강도를 갖

는 집속장으로 이어진다. 하이퍼볼릭 위상 프로파일은 수직 입사에 대해서는 완벽한 집속 파동장을 보장하지만, 다양한 입사각에 대해 완벽한 집속을 이루기 위해서는 메타렌즈 내의 메타원자들이 입사각에 따라 다른 위상을 갖는 특성을 갖도록 설계되어야 한다. 그러나 이는 물리적으로 거의 불가능하며 특히 메타렌즈는 한번 설계되면 그 기능이 고정되기 때문에 입사각에 관계 없는 집속을 위해서는 새로운 메타렌즈 설계 방식이 필요하다.

최근 넓은 각도의 음향 집속을 구현한 음향 메타렌

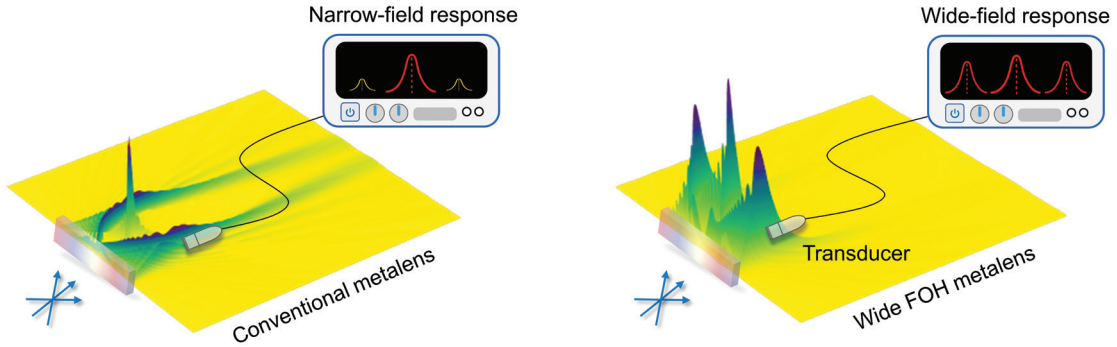


그림 10. 하이퍼볼릭 위상 기반 메타렌즈(좌)와 쿼드라틱 위상 기반 광청야각 메타렌즈(우) 및 이들을 이용한 음향 센싱의 개념도 [46]. 기존의 음향 메타렌즈는 한정된 입사각에 대해 집속이 가능한 반면 광청야각 메타렌즈는 입사각에 관계없는 일관된 집속장을 구현할 수 있다.

즈에 대한 연구가 국내 연구진들에 의해 세계 최초로 수행되었다 [46]. 해당 연구에서, 연구진들은 ‘청야각 (field-of-hearing)’이라는 개념과 그 필요성을 처음으로 제안하였다. 청야각은 음향 렌즈가 음파를 집속할 수 있는 입사각의 범위를 의미한다. 넓은 청야각을 갖는 음향 메타렌즈를 구현할 수 있다면, 초음파 이미징, 소나(SONAR), 수중 음향 모니터링 등 다양한 기술에 활용될 수 있다. 특히 기존 음향 메타렌즈의 경우 사 입사(oblique incidence)에 대한 고려가 부족했기 때문에, 해당 연구는 음향 메타렌즈 연구의 새로운 패러다임을 제시할 수 있게 되었다. 연구진들은 광청야각(wide field-of-hearing) 성능을 구현하기 위하여 쿼드라틱 위상 프로파일이라는 새로운 렌즈 프로파일을 이용하였다. 이 프로파일은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$\phi(r) = -\frac{k_0}{2f} r^2, \quad (3)$$

여기서  $r = \sqrt{y^2 + z^2}$  은 렌즈내의 위치를 나타낸다. 수식 (3)의 핵심은 모든 방향의 입사각에 대해 대칭 특성을 갖는 룬버그(Luneburg) 렌즈를 평면 렌즈로 변형하여 동일한 기능을 수행할 수 있다는 것이다. 룬버그

렌즈는 구 형태의 기하학적 구조를 가지고 있어 모든 입사각에 대해 동일한 조건을 갖는 구대칭 특성을 지닌다. 쿼드라틱 위상을 이용하면 얇은 평면 렌즈의 형태와 평면 형상의 초점면을 가지도록 렌즈를 설계할 수 있고 이를 대칭변환(symmetry transformation)이라 부른다. 수식 (3)에 따라 작동하는 메타렌즈에 임의의 각도를 갖는 음파가 입사되었을 때, 수식 (3)은 다음과 같이 등가적으로 변환될 수 있다:

$$\phi_{EP}(r, \theta_i) = -\frac{k_0}{2f} [(y + f \sin \theta_i)^2 + z^2] + \frac{fk_0 \sin^2 \theta_i}{2} \quad (4)$$

수식 (4)에서 초점의 위치는  $f \sin \theta_i$  에 의해 결정되며, 룬버그 렌즈와는 다르게 초점의 위치가 곡면이 아닌 평면 내에서 이동하게 된다. 이를 통해 설계된 메타렌즈는 매우 얇은 두께를 가지면서도 축-외 수차로부터 자유로운 광청야각 집속 능력을 가지게 된다. 이러한 특성은 기존 하이퍼볼릭 위상 프로파일 기반 렌즈와는 차별되며, 그림 10을 통해 두 렌즈의 차이를 알 수 있다.

그림 11(a)는 광청야각 메타렌즈의 기본 원리를 나타낸 개념도이다. 룬버그 렌즈에 다양한 각도로 음파

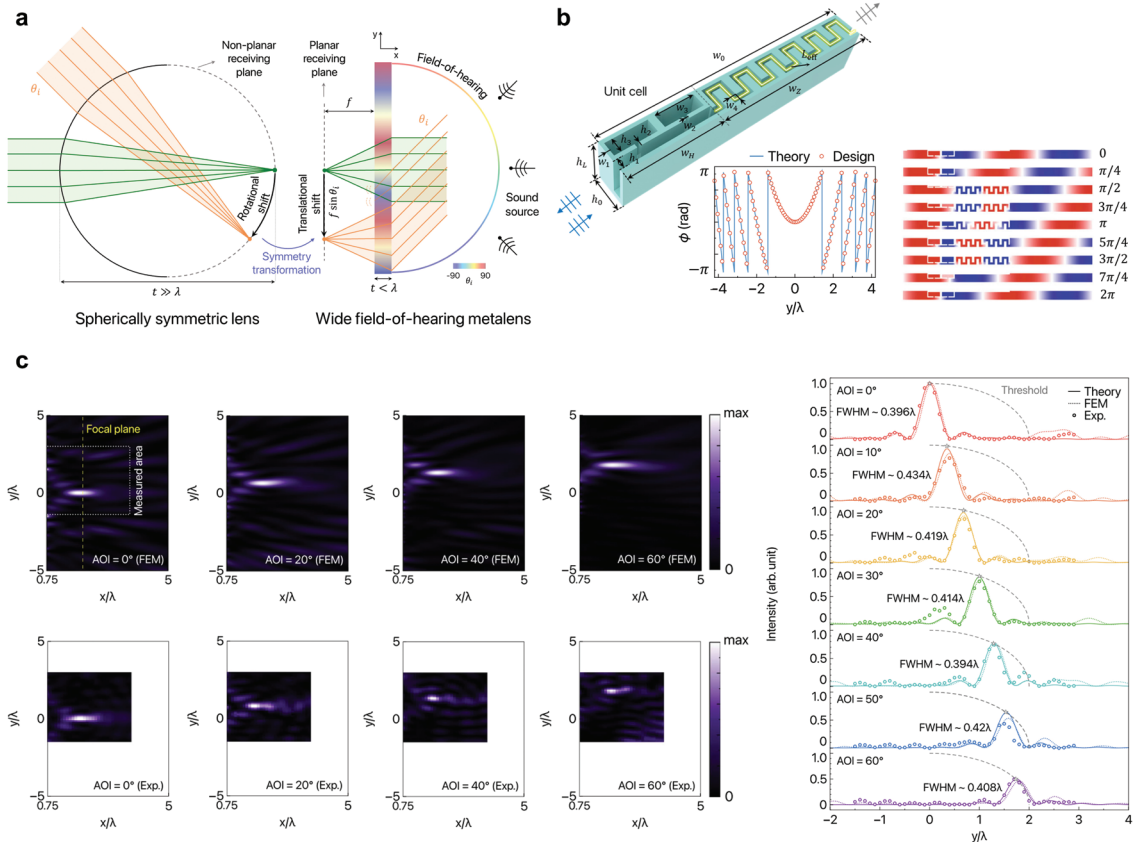


그림 11. (a) 대칭 변환을 통한 룬버그 렌즈의 평면 광축야각 메타렌즈로의 변환 메커니즘. (b) 광축야각 메타렌즈를 구현하기 위해 사용된 메타원자의 구조와 위상 분포도 및 쿼드라틱 위상 프로파일. (c) 수직 입사부터 60 도에 이르는 넓은 각도에 대한 음향 집속 분포도 [46].

가 입사할 때, 구대칭 특성에 따라 초점 역시 입사각에 따라 회전 이동(rotational shift)하며 초점면 역시 구형태를 갖게 된다. 반면, 광축야각 메타렌즈는 룬버그 렌즈의 입사각에 따른 회전 이동 특성을 평행 이동(translational shift)으로 등가적으로 변환하는 특성을 갖고 있기 때문에 평면 초점면을 가질 수 있게 된다. 그림 11(b)는 쿼드라틱 위상 프로파일을 만족시키기 위해 설계된 메타 원자의 모식도와 그 응답 특성을 나타내고 있다. 이렇게 설계된 광축야각 메타렌즈는 다양한 입사각(수직 입사부터 60 도)에 대해 효과적으로 음

파를 집속할 수 있으며 집속장 해석 및 실험 결과가 그림 11(c)에 도시되어 있다. 광축야각 메타렌즈의 또 하나의 장점은 높은 집속 효율뿐만 아니라 입사각도 별 초점의 위치가  $f \sin \theta_i$ 에 의해 결정되므로 모니터링된 집속 신호를 통해 음원의 방향(direction of arrival)을 역으로 추정할 수 있다. 또한 높은 집속 에너지는 곧 높은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)로 이어지며, 이는 특히 잡음(noise)이 많은 실생활 환경(수중 등)에서 큰 장점으로 발휘될 수 있다.



## 5. 맺음말

본 논문에서는 현재까지 보고된 음향 메타렌즈의 연구 동향 및 그 결과 등에 대해서 전반적으로 살펴보았다. 기존의 방법으로 구현하기 어려웠던 파동 현상을 실현할 수 있는 메타물질의 장점을 바탕으로, 특히 음향 집속 분야에서 다양한 연구들이 진행되고 있다. 그러나 메타물질에 대한 본격적인 연구는 시작된 지 채 20년이 되지 않았기 때문에, 현재 대부분의 연구들은 응용 연구보다는 물리, 수학 등 자연과학 분야에서 집중되어 있다. 또한, 특히 음향 메타렌즈의 경우 대부분의 연구가 가청주파수 대역에 초점을 맞추어 진행되고 있으며 초음파 대역의 음향 메타렌즈, 수중 음향 메타렌즈 등 더욱 실용성 상황에 가까운 연구가 필요하다. 따라서 현재의 이론 정립, 현상 구현 등의 수준을 넘어 실용화를 위한 공학적, 응용 연구가 필요하며, 더 나아가 궁극적 목표라 할 수 있는 메타렌즈의 실용화를 위해서는 구조체의 효율적인 생산 방법, 비용 절감, 성능 최적화 등 다양한 공학적 과제에 대한 해결이 요구된다. 메타렌즈를 활용한 음파의 집속에 대한 연구는 산업, 바이오, 국방 분야 등 다양한 분야와 밀접하게 연관되어 있다. 향후 음향 메타렌즈 기술이 고도화된다면 이러한 분야에 큰 파급력을 미치고 적극 활용 및 도입될 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

1. Shelby, R. A., Smith, D. R., & Schultz, S., *Science* **292**, 77-79 (2001).
2. Haberman, M. R., & Guild, M. D., *Phys. Today* **69**, 42-48 (2012).
3. Zheludev, N. I., & Kivshar, Y. S., *Nat. Mater.* **11**, 917-924 (2012).
4. V. G. Veselago, *Sov. Phys.* **10**, 509 (1968).
5. Cummer, S. A., Christensen, J., & Alù, A., *Nat. Rev. Mater.* **1**, 1-13 (2016).
6. Liu, Z., Zhang, X., Mao, Y., Zhu, Y. Y., Yang, Z., Chan, C. T., & Sheng, P., *Science* **289**, 1734-1736 (2000).
7. Ma, G., Yang, M., Xiao, S., Yang, Z., & Sheng, P., *Nat. Mater.* **13**, 873-878 (2014).
8. Li, J., Wang, W., Xie, Y., Popa, B. I., & Cummer, S. A., *Appl. Phys. Lett.* **109**, (2016).
9. Zhu, J., Christensen, J., Jung, J., Martin-Moreno, L., Yin, X., Fok, L., ... & Garcia-Vidal, F. J., *Nat. Phys.* **7**, 52-55 (2011).
10. Li, J., Fok, L., Yin, X., Bartal, G., & Zhang, X., *Nat. Mater.* **8**, 931-934 (2009).
11. Zhang, S., Yin, L., & Fang, N., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 194301 (2009).
12. Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B., & Hou, H., *Adv. Mater. Technologies.* **7**, 2100698 (2022).
13. Ma, G., Yang, M., Yang, Z., & Sheng, P., *Appl. Phys. Lett.* **103**(1), (2013).
14. Norris, A. N., *Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* **464**, 2411-2434 (2008).
15. Cummer, S. A., & Schurig, D., *New. J. Phys.* **9**, 45 (2007).
16. Shen, Y. X., Peng, Y. G., Cai, F., Huang, K., Zhao, D. G., Qiu, C. W., ... & Zhu, X. F., *Nat. Commun.* **10**, 3411 (2019).
17. Qi, S., Oudich, M., Li, Y., & Assouar, B., *Appl. Phys. Lett.* **108**(26), (2016).
18. Lee, G., Lee, S. J., Rho, J., & Kim, M., *Mater. Today Energy* **37**, 101387 (2023).
19. Zhang, H., Wang, Q., Fink, M., & Ma, G., *Nat. Commun.* **15**, 1270 (2024).
20. Park, C. I., Choe, S., Lee, W., Choi, W., Kim, M., Seung, H. M., & Kim, Y. Y., *Nat. Commun.* **14**, 7818 (2023).
21. Hu, Z., Yang, Y., Xu, L., Hao, Y., & Chen, H., *Front. Neurosci.* **16**, 984953 (2022).

22. Ma, G., & Sheng, P., *Sci. Adv.* **2**, e1501595 (2016).
23. Koschny, T., Kafesaki, M., Economou, E. N., & Soukoulis, C. M., *Phys. Rev. Lett.* **93**, 107402 (2004).
24. Xie, Y., Wang, W., Chen, H., Konneker, A., Popa, B. I., & Cummer, S. A., *Nat. Commun.* **5**, 5553 (2014).
25. Ghaffarivardavagh, R., Nikolajczyk, J., Glynn Holt, R., Anderson, S., & Zhang, X., *Nat. Commun.* **9**, 1349 (2018).
26. Li, Y., Jiang, X., Liang, B., Cheng, J. C., & Zhang, L., *Phys. Rev. Appl.* **4**, 024003 (2015).
27. Jiang, X., Li, Y., Liang, B., Cheng, J. C., & Zhang, L., *Phys. Rev. Lett.* **117**, 034301 (2016).
28. Oh, B., Kim, K., Lee, D., & Rho, J., *Mater. Today: Phys.* **39**, 101273 (2023).
29. Pan, M., Fu, Y., Zheng, M., Chen, H., Zang, Y., Duan, H., ... & Hu, Y., *Light Sci. Appl.* **11**, 195 (2022).
30. He, Q., Sun, S., & Zhou, L., *Research* **2019**, (2019).
31. Kim, J., Seong, J., Yang, Y., Moon, S. W., Badloe, T., & Rho, J., *Adv. Photonics* **4**, 024001 (2022).
32. Chen, A. L., Wang, Y. S., Wang, Y. F., Zhou, H. T., & Yuan, S. M., *Appl. Mech. Rev.* **74**, 020801 (2022).
33. Zhang, C., Cao, W. K., Wu, L. T., Ke, J. C., Jing, Y., Cui, T. J., & Cheng, Q., *Appl. Phys. Lett.* **118**, 13 (2021).
34. Tian, Z., Shen, C., Li, J., Reit, E., Gu, Y., Fu, H., ... & Huang, T. J., *Adv. Func. Mater.* **29**, 1808489 (2019).
35. Bai, L., Song, G. Y., Jiang, W. X., Cheng, Q., & Cui, T. J., *Appl. Phys. Lett.* **115**, 23 (2019).
36. Zhao, S. D., Chen, A. L., Wang, Y. S., & Zhang, C., *Phys. Rev. Appl.* **10**, 054066 (2018).
37. Fan, S. W., Zhao, S. D., Chen, A. L., Wang, Y. F., Assouar, B., & Wang, Y. S., *Phys. Rev. Appl.* **11**, 044038 (2019).
38. Li, Z., Fei, C., Yang, S., Hou, C., Zhao, J., Li, Y., ... & Yang, Y., *Adv. Func. Mater.* **32**, 2209173 (2022).
39. Tang, Y., Zhang, Y., Xie, B., Cheng, H., Tian, J., & Chen, S., *Phys. Rev. Appl.* **17**, 044027 (2022).
40. Liu, B., Wei, Q., Su, Z., Wang, Y., & Huang, L., *J. Appl. Phys.* **131**, 18 (2022).
41. Padgett, M. J., *Opt. Exp.* **25**, 11265-11274.
42. Fan, X., Zhu, Y., Su, Z., Li, N., Huang, X., Kang, Y., ... & Assouar, B., *Adv. Func. Mater.* **33**, 2300752 (2023).
43. Kim, C., Kim, J., & Jeon, W. J., *J. Sound Vib.* **529**, 116910 (2022).
44. Dong, H. W., Shen, C., Zhao, S. D., Qiu, W., Zheng, H., Zhang, C., ... & Cheng, L., *Natl. Sci. Rev.* **9**, nwac030 (2022).
45. Luo, X., Zhang, F., Pu, M., Guo, Y., Li, X., & Ma, X., *Nanophotonics* **11**, 1-20 (2021).
46. Lee, D., Oh, B., Park, J., Moon, S. W., Shin, K., Kim, S. M., & Rho, J., *Nat. Commun.* **15**, 3044 (2024).