메타물질을 이용한 회절 한계 극복

DOI: 10.3938/PhiT.21.019

신 종 화

Overcoming the Diffraction Limit with Metamaterials

Jonghwa SHIN

A metamaterial is an artificial material that can be designed to possess a diverse range of optical properties, including those that have never been found in nature. Far-field optical imaging was previously believed to have a fundamental limit in resolution due to diffraction. However, various novel imaging methods have recently been developed to overcome this limit, and a metamaterial, with its immense degree of freedom in its optical properties, is a versatile platform for developing such a new imaging methodology.

들어가는 글

보다 미세한 것을 보고 싶어 하는 인간의 호기심은 현미경 기술의 발전을 가져 왔고, 현미경은 미세 구조체 분석의 중요한 도구로서 물리, 화학, 생물 등 기초과학에서는 물론, 의료, 정보통신, 보안, 국방 등 실생활과 직접 관계있는 분야에서도 폭넓게 활용되고 있다. 이렇듯 빛(보다 넓게는 전자기파)을 이용한 관찰이 많이 쓰이고 있는 이유는, 빛이 공기, 유리, 아크릴, 물 등 여러 매질 안에서 큰 손실 없이 잘 전파하며, 렌즈, 광섬유 등을 이용하여 관찰 대상의 모습이 우리 눈의 망막이나 카메라 촬상소자 등 기록 매체에 상당한 “정확도”를 가지

고 재현되도록 할 수 있기 때문이다.

관찰 대상의 모양에 대한 정보가 기록 매체까지 전달되는 도중 어느 정도의 손실이 일어나는가가 “정확도”를 결정하게 되는데, 일반적으로 더 미세한 구조에 관한 정보일수록 도중에 손실이 잘 되기 때문에, 얼마나 작은 구조체를 분별할 수 있는가를 말하는 “분해능” 또는 “해상도”가 정확도의 척도가 된다. 일반적인 광학 현미경의 경우 수백 나노미터 정도의 크기가 한계가 된다. 즉, 가시광을 이용해서는 이보다 작은 구조체에 대한 모양 정보가 기록 매체까지 전달되기 어렵다는 것이다.

이처럼 광학 현미경에서 분해 가능 최소 크기가 생기는 것은 에돌이 한계(회절 한계, diffraction limit)라고 불리는 현상 때문이다. 빛이 매질 안에서 가지는 파장은 빛의 진동수와 매질의 굴절율에 따라 정해지는데, 반파장보다 작은 물체는 왜 빛으로 관찰하기 힘든지가 이 에돌이 한계와 관련이 있다. 전기장, 자기장은 반파장마다 그 부호가 바뀌며 반파장보다 더 작은 공간 범위 내에서는 그 값이 공간에 따라 많이 변하지 않는다. 작은 공간 범위 안에서는 전자기장이 거의 일정하기 때문에, 임의의 두 구조체가 정확히 얼마만큼 떨어져 있는지, 과연 두 개의 구조체인지 아니면 하나의 큰 구조체인지 등이 전자기장에 미치는 영향이 크게 다르지 않아서, 이러한 정보를 빛을 통해 알아내기 어려운 것이다 (그림 1). (단, 구조체가 금속과 같이 유전율이 큰 절대값을 가지거나 음의 값을 가지는 물질로 구성되어 있으면, 파장보다 훨씬 작은 거리 변화도 전자기장에 큰 영향을 줄 수 있다. 이는 금속을 이용한 회절 한계 극복의 바탕이 된다. 이에 대해서는 뒤에서 자세히 다룬다.)

보다 엄밀한 설명은 다음과 같다. 평면상에 있는 미세 구조체의 모양에 대한 정보는, 평면에 나란한 방향의 여러 공간 각진동수들의 합으로 표현할 수 있다. 이러한 구조체를 빛으로 관찰하기 위해서는 평면에 수직인 방향으로 평면파 형태의 빛을 쏘아주고, 평면에서 반사하거나 평면을 투과한 빛을 렌즈로 모아 상이 맺히게 하는 방법을 사용할 수 있다. 이때, 반사 또는 투과된 빛으로부터 구조체의 모양을 알 수 있는

저자약력

신종화 교수는 2008년 스탠퍼드대학에서 전자공학 박사학위를 취득하고, 한국과학기술원 물리학과 연수연구원 및 연구교수직을 거쳐, 2012년부터 한국과학기술원 신소재공학과 조교수로 재직 중으로 마이크로파, 테라헤르츠 및 가시광선 영역에서의 메타물질에 대해 연구하고 있다. (qubit@kaist.ac.kr)

Fig. 1. Interaction between objects and electromagnetic waves. (a) When the wavelength is on the order of the displacement between two objects, the two objects are excited with different phases (shown with different colors) and the exact distance between the objects becomes important. (b) When the wavelength is much larger than the displacement between two objects, the two objects are excited with almost the same phase and exact separation between the two is of less importance.

이유는, 평면상에서의 위치에 따라 빛이 반사, 투과하는 정도 (세기 및 위상)가 미세 구조체가 가지는 모양에 의해 좌우되기 때문이다 [그림 2(a)]. 즉, 구조체 모양을 이루는 공간 각 진동수 성분들이, 반사, 투과 등을 통해 미세 구조체와 상호 작용을 하고 난 빛이 가지는 공간 각진동수(파수, wave-number) 중에서 평면에 나란한 방향 성분을 결정하게 되는 것이다 [그림 2(b)].

나란한 성분이 결정되면, 평면에 수직인 방향으로의 파수는 빛이 매질 안에서 가질 수 있는 전체 파수에 따라 자동으로 정해지게 된다. 비결정성 매질이나, 입방 결정 등 높은 대칭성을 가지는 매질 안에서 빛이 가지는 전체 파수(k)는 빛의 진행 방향에 상관없이, 빛의 시간 각진동수(ω)와 매질의 굴절율(n)에 비례하고, 진공에서의 빛의 속도($c = 299,792,458$ m/s)에 반비례하는 값으로 결정된다.

$$k = \frac{n\omega}{c}. \quad (1)$$

파수 벡터(wave vector)의 개념을 쓰면, 전체 파수는 직각 좌표계에서 각 방향의 파수들과 피타고라스 정리 관계에 있다는 것을 알 수 있다.[그림 2(c)] 따라서, 빛의 시간 각진동수와 매질이 주어지면, 구조체가 있는 평면에 나란한 방향으로의 파수(k_x)에 따라 수직인 방향의 파수(k_y)가 결정된다.

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2. \quad (2)$$

진행 방향에 상관없이 전체 파수가 같기 때문에, 하나의 주어진 시간 진동수에 대하여 가능한 모든 파수 벡터를 점으로 찍으면, 그림 2(c)의 붉은 선과 같이 원이 된다. 이를 등진동수 선(equi-frequency contour, EFC)이라 하고, 3차원에서는 구

Fig. 2. (a) Light after interacting with objects is spatially modulated by the objects. (b) The transmitted light in (a) can be decomposed into various spatial frequency components with different amplitudes and phases. (c) Different in-plane (x - z plane) spatial frequency components have different out-of-plane spatial frequencies determined by equation (2). Same colors in (b) and (c) correspond to the same spatial frequency components.

면이 되어 등진동수면(equi-frequency surface, EFS)이라고 한다. (비등방성 물질에서는 등진동수선, 등진동수면이 원, 구면이 아니라 타원, 타원체, 또는 보다 복잡한 형태가 될 수 있다.)

편의상 빛이 x - y 평면상에서 진행한다고 ($k_z = 0$) 가정할 때, 만약 k_x 가 k 보다 작으면 위의 식에 의해 k_y 는 양의 실수가 되고, 해당하는 파는 y 방향으로 k_y 의 파수를 가지고 진행하게 된다. (이는 EFC상에 있는 한 점으로 표시가 된다.) 그러나, 만약 k_x 가 k 보다 크면, k_y 는 허수가 되며, 해당하는 파는 y 방향으로 전파하지 못하고, 지수함수적으로 감소하는 양상을 보이게 된다. 따라서 이와 같이 진행방향에 수직인 평면상에서 높은 공간 진동수를 가지는 성분은 진행방향으로 몇 파장 이상 떨어져 있는 기록 매체까지 전파되지 못하여, 정보의 손실이 일어나게 된다. 푸리에 관계에 의하면, 공간적으로 작은 모양일수록 더 큰 공간 진동수 성분을 가지고 있는데, 이처럼 전달될 수 있는 수직방향 공간 진동수 성분에 상한이 있으면, 공간적으로 구별할 수 있는 모양의 크기에 하한이 존재하게 된다.

완벽한 기록 매체가 존재한다면, 지수함수적으로 감소한 성분은 감소한 만큼 증폭해줌으로써 원래 이미지를 완벽하게 재생할 수도 있겠으나, 현실에서는 잡음의 존재 때문에 한계가 있다. 그러므로 광학 현미경의 분해능을 높이려고 한다면 전파 방향의 수직방향으로 높은 공간 진동수를 가지는 성분을 기록 매체까지 잘 전달할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 메타물질을 사용하면 이와 같은 일이 가능해진다.

메타물질을 이용한 회절한계 극복

메타물질의 개념을 사용하면 굴절율이 음수이거나^[1] 수백 이상의 큰 양수인 물질 등^[2] 자연에 존재하지 않는 광학적 성질을 가지는 물질을 만들어 낼 수 있는데, 그 방법은 화학적

인 합성에 기초하는 것이 아니라, 수학적이고 물리적인 구조 설계에 기초한다. 파장보다 작은 크기의 공간 안에서 금속과 비금속이 특정한 모양으로 얹혀 있는 구조체를 인공 “원자”처럼 사용하여 이를 규칙적으로 배열함으로써 새로운 거시적인 성질을 얻는 개념이다. 단위 구조체 내에서 금속, 비금속이 가지는 모양과 크기를 어떻게 설계하는가에 따라 매우 다양한 성질을 얻을 수 있다.

이러한 메타물질은 그 설계 패러다임에 따라 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 단위 구조체가 가지는 전자기적 고유 진동수 근처에서 전자기 특성값이 급격히 변하는 성질을 사용하여 설계된 공진 메타물질이 한 가지이고, 단위 구조체의 기하적인 모양으로 전기, 자기적인 경계 조건을 조절함으로써 원하는 특성값을 얻는 광대역(broadband) 메타물질이 다른 한 가지이다. 공진 메타물질은 곧 설명하게 될 음 굴절율 메타물질이 대표적인 예로, 1보다 작은 굴절율 등, 보다 다양한 광학적 성질을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 근본적으로 좁은 파장 대역에서만 원하는 특성값을 가지는 협대역성이 있으며, 공진 파장 근처에서 사용하기 때문에 다소 큰 광학적 손실을 수반한다는 단점을 가진다. 반면 광대역 메타물질은 뒤에 하이퍼렌즈 관련 구조에서 등장하는데, 넓은 파장에 걸쳐 원하는 특성값에 가까운 값을 유지할 수 있는 광대역성을 장점으로 가지나, 음의 굴절율 등 주파수 분산(frequency dispersion)이 큰 매질에서 얻을 수 있는 성질들은 얻기 힘들다는 단점이 있다. 원하는 응용이 레이저를 광원으로 쓰는지, 넓은 파장 대역의 광원을 쓰는지에 따라 쓸 수 있는 메타물질 종류가 달라지게 된다.

광학 현미경의 분해능을 높이는 문제는 워낙 그 파급효과가 광범위하기 때문에, 메타물질을 이용해 얻을 수 있는 새로운 광학적 성질을 이용해 광학 이미징의 분해능을 높이려는 노력은 이미 메타물질의 태동기 때 시작되었다. 지금까지 발표된 많은 수의 논문들을 그 제안 원리에 따라 분류하여 보면 크게 다음과 같은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 가장 초기부터 제안되어 온 바와 같이 음의 굴절율(또는 음의 유전율)을 이용하는 방법이고, 두 번째는 한 방향으로만 양의 유전율, 다른 방향으로만 음의 유전율을 가지는 메타물질을 이용하는 방법이다. 또한, 이 두 가지 방법에서 각기 근접장을 원장으로 변환할 수 있는 추가적인 구조를 써서 원장에서도 고 분해능을 얻을 수 있는 방법들이 제안되었다.

음 굴절율을 이용한 완전 렌즈

음의 굴절율을 가지는 물질에 대한 이론적인 연구는 40여 년 전에도 보고가 되었으나,^[3] 당시에는 이론적 흥미거리로만

여겨져서 후속 연구가 이어지지 못했다. 2000년대 들어와서 메타물질의 개념이 도입되어서야 비로소 음 굴절율을 가지는 물질을 실제로 만들 수 있게 되었고,^[1,4] 연구자들의 관심이 급격히 증가하였다. 마침 비슷한 시기에, 음 굴절율을 이용하면 이론적으로 회절 한계의 영향을 받지 않는 분해능을 가지는 “완벽한” 렌즈 시스템을 만들 수 있다는 논문이 발표된 것은 음 굴절율에 대한 관심을 더욱 증폭시켰다.^[5] 음 굴절율 메타물질과 이를 이용한 “완전 렌즈(perfect lens)”에 대한 논문은 여러 반박 논문과 재반박들을 낳았는데,^[6-11] 이러한 과정을 거치며 이론적으로 음 굴절율 메타물질 및 완전 렌즈의 가능성과 한계성에 대한 내용이 정립되었고,^[12-16] 실험적으로 여러 연구 그룹들에 의해 관련 결과가 확인됨으로써,^[17-20] 음 굴절 메타물질과 완전 렌즈는 메타물질의 대표적인 예로 자리잡게 되었다.^[21]

음 굴절율을 이용한 렌즈는 구조 상 매우 간단하다. 음의 굴절율을 가지는 물질로 평평한 얇은 막을 만들지만 하면, 막의 한 쪽 경계면 근처 바깥부분에 광원이 존재할 때, 막의 다른 쪽 경계면 근처 바깥부분에 광원의 상이 나타나게 된다(그림 3). 공간적으로 평평한 막이지만 이처럼 렌즈의 역할을

REFERENCES

- [1] D. R. Smith *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 4184 (2000).
- [2] J. Shin, J.-T. Shen and S. Fan, Phys. Rev. Lett. **102**, 093903 (2009).
- [3] V. G. Veselago, Soviet Physics Uspekhi **10**, 509 (1968).
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith and S. Schultz, Science **292**, 77 (2001).
- [5] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **85**, 3966 (2000).
- [6] G. W. t Hooft, Phys. Rev. Lett. **87**, 249701 (2001).
- [7] J. M. Williams, Phys. Rev. Lett. **87**, 249703 (2001).
- [8] J. Pendry, Phys. Rev. Lett. **87**, 249704 (2001).
- [9] P. M. Valanju, R. M. Walser and A. P. Valanju, Phys. Rev. Lett. **88**, 187401 (2002).
- [10] N. Garcia and M. Nieto-Vesperinas, Phys. Rev. Lett. **88**, 207403 (2002).
- [11] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. **91**, 099701 (2003).
- [12] R. W. Ziolkowski and E. Heyman, Phys Rev E **64**, 056625 (2001).
- [13] D. R. Smith *et al.*, Appl. Phys. Lett. **82**, 1506 (2003).
- [14] A. Grbic and G. V. Eleftheriades, IEEE T Microw Theory **51**, 2297 (2003).
- [15] A. L. Pokrovsky and A. L. Efros, Physica B: Condensed Matter **338**, 333 (2003).
- [16] J. B. Pendry and D. R. Smith, Phys Today **57**, 37 (2004).
- [17] A. A. Houck, J. B. Brock and I. L. Chuang, Phys. Rev. Lett. **90**, 137401 (2003).
- [18] A. N. Lagarkov and V. N. Kissel, Phys. Rev. Lett. **92**, 077401 (2004).
- [19] A. Grbic and G. V. Eleftheriades, Phys. Rev. Lett. **92**, 117403 (2004).
- [20] B.-I. Popa and S. A. Cummer, Phys. Rev. E **73**, 016617 (2006).
- [21] V. M. Shalaev, Nat Photon **1**, 41 (2007).

Fig. 3. (a) Left panel depicts positive refraction, right, negative refraction. (b) Equi-frequency contours for (left) two positive index materials with index 1 and 1.5 (right) materials with index 1 and -1. Green arrows indicate the wave vector in each medium. (c) Ray picture of the far-field components. (d) Amplification of the near-field components.

할 수 있고 더군다나 이론적으로 상의 해상도가 회절한계에 의해 결정되는 것보다 훨씬 좋을 수 있기 때문에, “완전 렌즈” 또는 “슈퍼렌즈(superlens)”라고 불리운다. 동작 원리는 앞서와 마찬가지로, x 방향으로 작은 공간 진동수를 가져서 EFS 상에 나타나는 성분과 x 방향으로 큰 공간 진동수를 가져서 EFS 상에 들어갈 수 없는 성분으로 나누어 살펴볼 수 있다.

이해를 돕기 위하여, 흡수손실이 없고 -1 의 굴절율을 가지는 물질이 얇은 막을 이루고 있는 상황을 가정하자. (실제로는 음의 굴절율을 가지기 위해서는 파장 분산성이 있어야 하고, 이를 만족하기 위해서는 Kramers-Kronig 관계에 의해 손실이 반드시 존재한다. 그러나, 여기에서는 문제를 간략화하기 위해 손실 0인 물질을 가정한다.) 먼저 작은 x 방향 공간 진동수를 가지는 성분에 굴절 법칙(Snell's law)을 적용하면, 평평한 막 이어도 렌즈 역할을 할 수 있는 이유를 기하광학적으로 이해할 수 있다. 굴절 법칙에 따르면 $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ (n_1, n_2 : 매질의 굴절율, θ_1, θ_2 : 입사각, 굴절각)가 만족되어야 하는데, $n_1 = -n_2$ 이면, $\theta_1 = -\theta_2$ 가 되어, 퍼져나가던 빛이 그림 3(a)의 오른쪽 그림에서처럼 다시 모이게 되는 것이다.

이러한 기하광학적 설명에는 빛이 파동으로서 가지는 위상이 명시적으로 고려되어 있지 않지만, 위상을 고려하더라도 같은 결론에 도달한다. 그림 3(b)는 그림 3(a)에 있는 양 굴절율 물질에서의 EFC(적색 원들)와 음 굴절율 물질에서의 EFC(청색 원)를 나타낸 것인데, 모두 등방성을 가정했기 때

문에 굴절율의 부호에 관계없이 EFC가 원이 되지만, 양 굴절율 물질에서는 에너지의 이동 방향이 파수 벡터(녹색 화살표)의 방향과 같고, 음 굴절율 물질에서는 반대 방향이라는 점이 다르다. 경계면은 x 방향에 나란하므로 굴절 전후에 x 방향 파수는 보존되어야 하고 따라서, 굴절된 후 파수 벡터는 그림 3(b)에서 검은 점선과 굴절된 파가 존재하는 물질에서의 EFC가 만나는 두 점 중에 존재한다. 굴절된 파는 경계면에서 멀어지는 방향으로 에너지가 흘러야 한다는 점을 고려하면 둘 중에 한 가지만이 물리적으로 가능한 해가 된다. 음 굴절율 물질에서는 에너지 흐름이 $+y$ 방향이 되려면 y 방향 파수가 음이 되는 점을 선택해야 하고, 따라서 $n_1 = -n_2$ 이면 매질 1과 매질 2에서 y 방향 파수가 정확히 크기가 같고 부호가 반대가 된다. 광원으로부터의 거리에 따른 위상 변화는 (파수) $\times$ (거리) 만큼 나타나므로, y 방향으로 이동한 거리가 (매질 1에서의 이동 거리) = (매질 2에서의 이동 거리) 즉, $y_b - y_a = 2d$ 가 되는 점에서는 위상 변화가 x 방향 파수에 관계없이 모두 상쇄되어, 광원의 위상과 같아진다. 즉, 광원에서 나온 빛 중 EFC 상에 존재하고 $+y$ 방향으로 진행하던 성분들은 모두 원래와 동일한 위상과 진폭으로 만나게 되어 상이 뚜렷이 생기게 된다 [그림 3(c)].

한편, EFS 상에서 가질 수 있는 최대값보다 큰 x 방향 파수를 가진 경우 y 방향으로 지수함수적 감소를 보인다고 앞서 설명하였는데, 수학적으로는 지수함수적으로 커지는 것도

가능한 해이다. Pendry의 최초 논문에서는 이러한 큰 x 방향 파수 성분들이 경계 조건에 의해 음 굴절을 내부에서 지수함수적으로 커지는 전기장 분포를 가져야 한다고 주장했다.^[5] 그 개념도는 그림 3(d)에 묘사된 바와 같다. 경계면에 나란한 전기장 성분은 경계에서 연속이어야 하고, 표면 전류가 없다면 경계면에 나란한 자기장 성분 역시 연속이어야 한다. 맥스웰 방정식에 의하면 투자율의 부호가 바뀌는 경계면에서는, 경계면에 나란한 전기장의 경계면에 수직한 방향으로의 공간 미분 또한 부호가 바뀌어야 경계면에 나란한 자기장이 연속이라는 것을 유도할 수 있다. 그 결과, 그림 3(d)에서와 같이 경계면을 기준으로 전기장의 공간 기울기의 부호가 바뀌고, 음 굴절을 매질 내에서는 전기장이 광원에서 멀어짐에 따라 지수함수적으로 증가하는 양상을 보이게 된다. 그리하여, $y_b - y_a = 2d$ 가 되는 지점에 이르면, 원래의 세기와 정확히 같은 세기를 가지게 된다. y 방향으로의 위상의 변화 없이 세기만 지수함수적으로 변하기 때문에, 위상 역시 원래의 위상을 보존하게 된다.

위의 두 가지 경우를 종합하면, 크고 작은 모든 x 방향 파수 성분들이 상의 위치에서 원래와 동일한 세기와 위상을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 원래의 점광원이 완벽하게 상의 위치에서 재현됨을 의미하고, 이 시스템이 완전 렌즈라 불릴 수 있는 근거가 된다. 그러나 이와 같은 이상적인 설명은 실제 시스템에서는 정확히 맞지 않는다. 음 굴절율은 이론상으로도 광학적 손실과 항상 같이 나타날 수밖에 없는데, 광학적 손실을 고려하게 되면 전술한 바와 같은 완벽한 점광원의 재현은 일어나지 않는다. 따라서 분해능이 무한히 좋을 수 있는 “완전 렌즈”는 이론상으로도 불가능하다. 그러나 회절한계에 의한 분해능을 극복할 수 있기 때문에 기존의 렌즈와는 확연히 구분이 되고, 이에 따라 “슈퍼렌즈”라고 부르는 데는 무리가 없다.

음 굴절을 이용한 분해능 향상은 기본적으로 지수함수적으로 감소하는 높은 공간 주파수 성분들의 증폭에 기반하고 있는데, 이는 비단 음 굴절물질뿐 아니라 음 유전율을 통해서도 얻을 수 있다. 정전기학에서 전기장은 자기장에 관계없이, 전위 또는 전하의 분포에 의해 결정된다. 완전히 정전기가 아니더라도 시간 진동수가 아주 낮아서 준정전기 영역으로 볼 수 있으면, 마찬가지로 전기장은 자기장과는 거의 독립적으로 정해지게 된다. 이러한 준정전기 근사는 시간 진동수가 낮아지는 대신, 파장보다 아주 작은 공간 내에서 도체와 전하가 불균일하게 분포하고 있는 문제를 들여다볼 때도 적용이 된다. 이것은 다시 말하자면, 이러한 작은 공간 내에서 도체와 전하에 의해 변하는 전기장을 구하는 문제로 국한하면 매질의 자기적인 성질(투자율)은 큰 영향을 주지 않는다는 말이 되고,

투자율의 음, 양에 관계없이 유전율만 음이어도, 음 굴절을 매질에서와 비슷한 전기장 분포를 얻을 수 있다는 뜻이 된다. 음 굴절을 물질은 투자율과 유전율이 동시에 음이 될 때만 가능하다는 것에 비하면, 조건이 크게 완화된 셈이다. 은, 금, 알루미늄 등 많은 금속들이 가시광선 파장 대역에서 음의 유전율을 가지고 있으므로, 단순히 금속 박막을 이용해도 슈퍼렌즈가 가능하다는 결론을 얻을 수 있고 실제로 관련 연구 결과들이 많이 발표되었다.^[22-27]

부정부호행렬 형태의 유전율을 이용한 하이퍼렌즈

음 굴절을 메타물질 렌즈는 큰 x 방향 파수(k_x)를 가지는 성분들을 증폭해줌으로써 고분해능을 얻었다. 만약 큰 k_x 를 가지는 성분이 y 방향으로 지수함수적인 감소를 보이지 않는다면, 증폭해줄 필요 자체가 없어지게 된다. EFC가 원이나 타원처럼 유한한 k_x 영역에서만 존재하지 않고, 쌍곡선처럼 무한히 큰 k_x 범위를 가질 수 있다면, 이와 같은 일이 가능하다. 쌍곡선은 x 축과 y 축이 서로 구별되므로, 쌍곡선 형태의 EFC를 가지기 위해서는 필연적으로 그 물질은 비등방성이 되어야 한다.

자연계에도 전기장의 방향에 따라 굴절율이 다른 비등방성 물질이 존재하지만, 굴절율의 차이는 그리 크지 않다. 예를 들어, 그 차이가 비교적 큰 물질인 방해석의 경우에도 590 nm 파장에서 0.17의 차이만이 있다.^[28] 방해석 등의 물질에서 굴절율이 전기장의 방향에 영향을 받는 이유는 결정의 형태가 비등방성이어서 전기장이 어떠한 방향으로 가해지는가에 따라 유전분극의 크기가 달라지고 결과적으로 유전율이 달라지기 때문이다. 그러나 자연에 존재하는 물질들은 그 달라지는 정도가 그리 크지 않다.

반면, 메타물질은 금속과 비금속으로 이루어진 단위 구조체의 모양을 마음대로 설계할 수 있으므로, 구조의 비등방성이 극단적으로 커지게 할 수 있다. 따라서 동일한 크기의 전기장을 가했을 때 생기는 유전분극의 크기가 전기장의 방향에 따라 매우 다르게 만들 수 있으며, 심지어 부호가 다르게 되도록 하는 것도 가능해진다. 유전분극이 전기장의 방향과 반대

REFERENCES

- [22] N. Fang *et al.*, Science **308**, 534 (2005).
- [23] L. Hyesog *et al.*, New Journal of Physics **7**, 255 (2005).
- [24] D. Melville and R. Blaikie, Opt. Express **13**, 2127 (2005).
- [25] E. Shamonina *et al.*, Electronics Letters **37**, 1243 (2001).
- [26] S. A. Ramakrishna *et al.*, Journal of Modern Optics **50**, 1419 (2003).
- [27] P. A. Belov and Y. Hao, Physical Review B **73**, 113110 (2006).
- [28] D. W. Thompson *et al.*, Thin Solid Films **313-314**, 341 (1998).

방향으로 강하게 생기면, 그 방향의 유전율은 음수가 되는데, 한 매질 안에서 방향에 따라 유전율이 양수이기도 하고, 음수이기도 하다면, 그 매질의 유전율 텐서는 수식 (3)의 예와 같이 특이한 형태를 가지게 된다. (수학적으로 말하자면, 자연계에 존재하는 매질의 유전율 텐서는 양의 정부호(positive definite) 또는 음의 정부호(negative definite) 행렬 형태를 가짐에 비해 이러한 메타물질은 부정부호(indefinite) 행렬 형태의 유전율 텐서를 가진다.^[29])

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} & \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} & \epsilon_{zy} & \epsilon_{zz} \end{pmatrix} = \epsilon_0 \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

수식 (2)에서는 등방성 물질에서 전체 파수와 각 방향으로의 파수의 관계에 대해 알아보았는데, 방향에 따라 유전율 부호가 달라질 수 있는 비등방성 물질에서는 이 관계가 수정되어야 한다. x - y 평면 상에서 전파하며 자기장이 z 방향으로 편광되어 있는 파의 경우 수식 (4)와 같이 나타난다.

$$\frac{k_o^2}{\epsilon_o} = \frac{k_x^2}{\epsilon_x} + \frac{k_y^2}{\epsilon_y}. \quad (4)$$

($k_o = \omega/c$ 는 진공 중에서의 파수.) 우선 $\epsilon_x = \epsilon_y = \epsilon_o$ 일 경우, 수식 (4)는 수식 (2)와 같아지고, EFC 역시 그림 4(a)의 왼쪽 그림처럼 원이 된다. 만약, $0 < \epsilon_x < \epsilon_y$ 이면, 그림 4(a)의 가운데 그림처럼 x 방향으로 길쭉한 타원이 된다. 마지막으로, $\epsilon_y < 0 < \epsilon_x$ 이면, 그림 4(a)의 오른쪽 그림처럼 쌍곡선이 된다.

마지막 경우처럼 EFC가 쌍곡선이 되면, x 방향으로 아무리 공간 각진동수가 크더라도 해당하는 모드가 EFC 상에 존재하므로, y 방향으로 지수함수적 감소를 보이지 않고 전파하는 것이 가능해진다. 다만, x 방향 공간 각진동수에 따라 y 방향 파수가 서로 다르면 y 방향으로 전파함에 따라 위상이 서로 달라져서 나중에 이를 보정해줘야 완벽한 상을 얻을 수 있다. ϵ_y 의 절대값이 매우 커서 쌍곡선의 곡률 반경이 매우 커지면, 위상차가 거의 없이 진행하게 되는데, 그렇게 되면 한쪽 면에서 상에 대한 정보가 회절한계의 영향없이 다른 쪽 면까지 그대로 전달되는 “상 전달” 현상이 일어날 수 있다.

부정부호 행렬 형태의 유전율을 가지는 메타물질은 의외로 간단한 구조로 구현할 수 있다. 그림 4(b)와 같이 유전율이 음인 금속과 양인 유전체가 파장보다 훨씬 작은 주기의 층구조를 이루면 전체 구조를 하나의 물질로 해석할 때 유효 굴절율이 부정부호 행렬 형태가 된다.^[30] 어느 방향 전기장에 대한 유전율이 음이 되는지는 복합구조를 형성하고 있는 금속과 유전체의 유전율의 실수 부분의 크기에 따라 달라진다. 그림 4(b)에서처럼 파장보다 훨씬 작은 두께의 박막 형태로

Fig. 4. (a) Equi-frequency contours for non-magnetic materials whose permittivity tensor is (left) positive definite and isotropic, (middle) positive definite and anisotropic, or (right) indefinite. (b) Metal-dielectric layered structure.

금속과 유전체가 같은 두께로 교대로 존재할 때, 전기장의 방향에 따른 유전율은 수식 (5)로 표현된다.

$$\epsilon_x = \frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{2}, \quad \epsilon_y = \frac{2\epsilon_m\epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d} \quad (5)$$

즉, 박막에 나란한 방향으로의 유전율은 두 물질의 산술평균이 되고, 박막에 수직인 방향으로의 유전율은 두 물질의 조화평균이 된다.^[30,31] 관심있는 파장 영역에서 금속의 유전율(ϵ_m)은 음수이고, 유전체의 유전율(ϵ_d)은 양수인데, ϵ_m 의 절대값이 더 크면 ϵ_x 가 음수, ϵ_y 가 양수가 되고, ϵ_d 의 절대값이 더 크면 반대가 된다.

첫 번째 경우(ϵ_x 이 음수일 때), x 방향으로 전파하는 빛이 매우 큰 y 방향 파수를 가질 수 있다. 즉, 금속 박막과 나란한 방향으로 상이 전달된다. 이때, 금속의 형상이 박막이 아니라, 얇은 원통의 형태이더라도 원통의 방향이 x 방향이면, 수식 (5)와 비슷한 형태의 유효 유전율이 생기고, 같은 원리를 적용할 수 있다. 실제로 이를 이용하면 회절한계보다 더 좋은 해상도를 가지고 상이 잘 전달된다는 이론적, 실험적 논문이 여럿 발표되었다.^[32-36]

두 번째 경우(ϵ_y 이 음수일 때), y 방향으로 전파하는 성분이 매우 큰 x 방향 파수를 가질 수 있다. 즉, 금속 박막과 수

REFERENCES

- [29] D. R. Smith and D. Schurig, Phys. Rev. Lett. **90**, 077405 (2003).
- [30] Z. Jacob, L. V. Alekseyev and E. Narimanov, Opt. Express **14**, 8247 (2006).
- [31] W. Cai, D. A. Genov and V. M. Shalaev, Phys. Rev. B **72**, 193101 (2005).
- [32] P. A. Belov, C. R. Simovski and S. A. Tretyakov, Phys. Rev. E **66**, 036610 (2002).
- [33] C. R. Simovski and P. A. Belov, Phys. Rev. E **70**, 046616 (2004).
- [34] P. A. Belov, C. R. Simovski and P. Ikonen, Phys. Rev. B **71**, 193105 (2005).
- [35] P. A. Belov, Y. Hao and S. Sudhakaran, Phys. Rev. B **73**, 033108 (2006).
- [36] A. Rahman *et al.*, Journal of Nanophotonics **5**, 051601 (2011).

직인 방향으로 상이 전달된다. 이를 적용한 연구 결과 역시 여러 그룹에서 발표되었다.^[27,30,31,37,38]

고분해능 원거리 이미징을 위한 근접장 원장 변환

앞서 설명한 렌즈들은 일반 매질 안에서 지수함수적으로 감소하는 근접장 성분들을 메타물질을 이용하여 증폭하거나(음 굴절율) 보존하는(부정부호 유전율) 방식으로 고해상도의 상을 얻는 방식인데, 이런 근접장 성분들은 메타물질에서 나오자마자 다시 지수함수적으로 감소하기 때문에, 근접장이 영향을 미치는 거리 내에 기록 매체가 있어야 한다.^[39] 그러나, 현실적으로는 관찰 대상에서 멀리 떨어진 촬상 소자에 상을 맺어야 하는 경우가 대부분이다. 이를 위해서는 앞서 설명한 원리에 덧붙여 근접장의 정보들이, 공기 중에서 멀리 전달될 수 있는 원장으로 어떤 방식으로든 변환이 일어나야 한다. 이를 이룰 수 있는 첫 번째 방법은 원통 형태(또는 구 형태)의 구조체를 사용하는 것이다.

음의 굴절율 또는 유전율을 가지는 물질이 원통 형태로 있을 때 회절한계보다 높은 해상도의 상을 얻을 수 있다는 이론은 지속적으로 발표되어 왔다.^[30,38,40,41] 특히 쌍곡선 형태의 EFC를 가지는 메타물질을 원통형 형태로 만들면, 원통의 바깥 방향으로 상이 전달되면서 점차적으로 확대되어, 공간 각진동수로 보자면 반지름 방향에 수직인 공간 각진동수가 점진적으로 축소되는 효과가 발생, 근접장 성분들이 차츰 공기 중의 EFC 상에 존재하는 원장 성분으로 변환된다.(그림 5) 이렇게 원장 성분으로 변환된 정보들은 공기 중에서 멀리 전파되므로, 원거리에서 있는 촬상 소자까지 잘 도달할 수 있게 된다.^[30,42,43]

또 한 가지의 방법은 이와 같은 점진적인 원장 변환 대신에 회절 격자 등을 써서, 단번에 근접장 성분을 원장 성분으로 변환하는 것이다.^[44-46] 이 방식은 3차원적인 메타물질을 만들 필요가 없고, 금속에 의한 광손실이 적은 장점이 있지만, 근접장 성분이 원장 성분으로 변환될 때, 원래 존재하던 원장 성분과 간섭을 일으켜 정보의 손실이 있을 수 있으며, 원장으로 변환 가능한 근접장 성분의 범위가 한정되는 등의 단점을 가진다.

맺음말

메타물질을 사용하면 음 굴절율이나 부정부호 유전율 등 자연에 존재하지 않는 광학적 성질을 얻을 수 있고 이를 이용하면, 완전 렌즈, 슈퍼렌즈, 하이퍼렌즈 등 새로운 개념의 광학적 이미징 시스템이 가능해지며, 고전적인 렌즈를 쓰는 기존 광학 현미경이 가지고 있던 근본적인 분해능 한계인 회절 한계를 극복한 고분해능 이미징이 가능해진다는 것을 알

Fig. 5. Far-field subwavelength imaging using magnifying hyperlens. (From [42]. Reprinted with permission from AAAS.)

펴보았다. 물론, 이러한 메타물질은 파장보다 훨씬 작은 구조성을 가지는 나노구조체이기 때문에, 그 모양에 따라 정도의 차이가 있으나, 삼차원 상에서 대면적으로 만들기에는 아직 해결해야 할 공정상의 문제들이 남아있다. 또한, 대부분 금속 구조체이므로, 금속 자체가 가지는 광손실이 상의 밝기를 어둡게 할 뿐 아니라 궁극적인 분해능에 영향을 주기도 한다. 그럼에도 불구하고, 이와 같이 메타물질을 이용한 새로운 이미징 방식은, 형광체나 비선형성을 이용하지 않고도 고분해능 영상을 얻을 수 있기 때문에, 그 폭넓은 응용성에 큰 기대를 받고 있으며, 앞으로 이러한 개념들의 현실화에 대한 많은 연구가 이어질 것으로 예상된다.

REFERENCES

- [37] B. Wood, J. B. Pendry and D. P. Tsai, Phys. Rev. B **74**, 115116 (2006).
- [38] A. Salandrino and N. Engheta, Phys. Rev. B **74**, 075103 (2006).
- [39] V. A. Podolskiy and E. E. Narimanov, Opt. Lett. **30**, 75 (2005).
- [40] N. A. Nicorovici, R. C. McPhedran and G. W. Milton, Phys. Rev. B **49**, 8479 (1994).
- [41] G. W. Milton *et al.*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science **461**, 3999 (2005).
- [42] Z. W. Liu *et al.*, Science **315**, 1686 (2007).
- [43] Y. Zhao *et al.*, New Journal of Physics **12**, 103045 (2010).
- [44] S. Durant *et al.*, J. Opt. Soc. Am. B **23**, 2383 (2006).
- [45] Z. Liu *et al.*, Nano Letters **7**, 403 (2007).
- [46] G. Lerosey *et al.*, Science **315**, 1120 (2007).