



## 1. 서론

메타물질(Metamaterials)의 메타(Meta-)는 그리스어에 어원을 둔 말로 '기존의 관념의 틀을 벗어나는'이라는 뜻을 가지고 있으며, 따라서 메타물질이란 기존에 있던 자연계의 물질이 가지지 않은 특정한 성질을 가진 새로운 물질이라는 말로 요약될 수 있다. 이러한 메타물질은 원자, 분자 등 자연적으로 존재하는 입자로 구성된 물질과 달리 금속이나 유전체 등으로 이루어진, 파장에 비하여 매우 작은 인공적 원자의 집합체로 이루어진 물질이다. 그중에서도 전자기파 메타물질(Electromagnetic metamaterials)에 대한 관심은 기존의 회절 한계를 뛰어넘는 빛의 파장보다 작은 분해능을 가지는 이미징 시스템, 음굴절률, 그리고 물체를 보이지 않게 할 수 있는 클로킹(Cloaking)기술과 같은 새로운 물리적 현상의 발

1968년 Veselago에 의해 이론적으로 예측되었다[1]. 하지만 실험을 통해 그 효과를 관찰하려면 실제적으로 구현이 가능한 물질의 설계 및 제작이 필요한데, 이는 약 10년 전이야 비로소 영국 임페리얼 칼리지의 Pendry교수에 의하여 원하는 파장대역에서 음의 유전율을 가능케 하는 금속선과 음의 투자율을 가지는 끊어진 고리형태의 공진기(SRR, Split Ring Resonator)의 형태로 각각 제안되었다[2]. 보다 자세히 살펴보면, 음굴절률을 구현하는 방법은 복소 유전율  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$  과 복소 투자율  $\mu = \mu' + i\mu''$  이  $\epsilon'\mu' + \mu''\epsilon'' < 0$  만족하도록 하는 것이다. 이렇게 함으로써 굴절률의 실수부가 음이 되도록 하는 것이다. 자연계에 존재하는 물질의 경우 유전율은 물질에 따라 (음의 유전율을 포함하여) 다양한 값을 보이지만, 광학파장에서의 투자율은 진공과 크게 다르지 않은 경우가 많다. 따라서, 음굴절률을 만드는 관건은 물질이

# 특집 | SPP

## 플라즈모닉 메타물질

민병기\*

견 및 새로운 소자의 발명과 더불어 폭발적으로 증가하고 있다. 메타물질을 통하여 우리의 일상생활을 지배하는 일반 물리법칙들(Laws of Physics)을 위반하는 발칙한 상상을 실현할 수 있는 것이다. 이처럼 우리를 또 다른 세계로 안내할 메타물질의 현 주소를 특히 플라즈모닉 메타물질에 중점을 두어 살펴보고자 한다.

### 2. 음굴절 메타물질

음굴절 물질은 메타물질의 개념이 생기기 훨씬 전인

음의 투자율을 갖도록 만드는 것이다.

음의 투자율을 가지는 대표적인 구조가 그림 1에 도시되어 있는 형태와 비슷한 SRR이다[3]. 이 구조는 전술한 바와 같이 Pendry교수에 의하여 이론적으로 제안되었으며, 실험적으로는 SRR을 mm크기단위로 만들으로써 GHz대역에서 음의 투자율이 생성된다는 것이 David Smith에 의해 처음으로 입증되었다. 이후 단위격자(unit cell)를 더 작게 만들으로써 그에 대한 자기적 반응이 더 높은 주파수 대역에서 발생하게 되어 자기적 공진 주파수를 1 THz대역까지 끌어올렸다(그림 1). 이 SRR 구조 대신 스테이플러와 비슷한 형태의 금속 거울 형태

\* 한국과학기술원 기계공학과

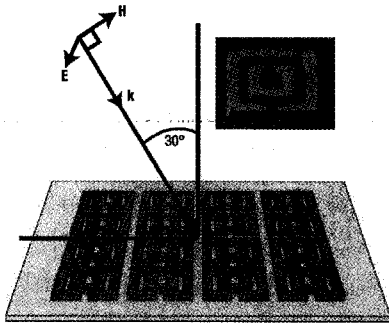


그림 1. 고리형태의 공진기 (SRR)

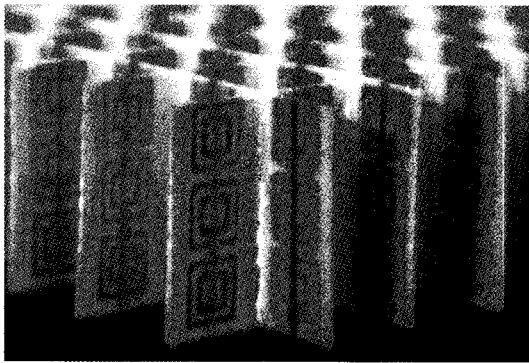


그림 2. Smith교수 연구팀이 실험에 사용한 마이크로파 대역 음굴절 메타물질

(metal mirror)를 사용하여 공진 주파수를 60 THz로 만들 수 있었으며, SRR 구조를 이용하여 공진주파수를 85 THz까지 만든 경우도 이후 보고되었다.

음의 유전율과 음의 투자율을 가지는 음굴절 메타물질은 Smith 교수팀에 의해 마이크로파 영역에서 2001년 실험적으로 증명되었다. 마이크로파 주파수에서 음의 유전율을 생성하는 구리선과 음의 투자율을 보이는 SRR(Split Ring Resonator)을 회로기판 위에 제작하는 방법으로 음굴절 메타물질을 제작하였다(그림 2)[4].

이후 보다 높은 주파수영역에서의 동작을 위하여 단위 격자를 소형화 하려는 시도가 잇따랐고, 테라헤르츠 주파수에서 NIM이 가능함을 확인하였다. 하지만 높은 주파수영역에서 파장 이하 크기를 가지는 구조는 복잡한 제작공정을 필요로 하게 되고, 금속의 내재적인 손실 특성, 즉 근적외선과 가시광선 대역에서의 커다란 에너지 손실은 이러한 높은 주파수영역에서의 메타물질 연구를 가로막아 왔다. 높은 주파수영역에서 음굴절률이 최초 보고된 것은 2005년에 나노공정을 통하여 만들어진 막대 쌍배열 단위격자 구조에 의해  $\lambda=1.5 \mu\text{m}$  대역에서  $n' = -0.3 \pm 0.1$ 의 굴절률을 보인 것이다[5]. 그러나 이 형태

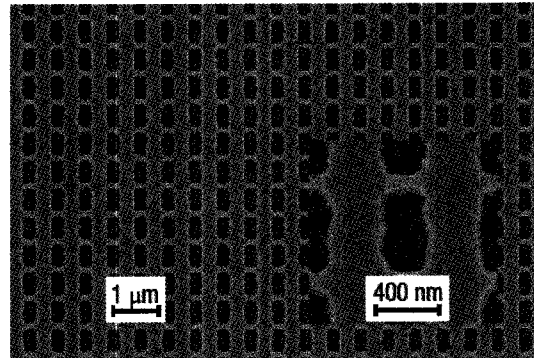


그림 3. 그물망 구조의 NIM

의 음굴절률 메타물질은 단위 구조체의 공진을 이용했기 때문에 공진주파수 부근에서 조금만 벗어나면 쉽게 사라지게 되며, 또한 상대적으로 광학적 손실이 큰 단점을 가지고 있었다. 음굴절률 메타물질에서의 손실은 보통  $F = |n'|/n'$ 에 의해 계량화 되는데,  $F$ 가 작으면 그 손실이 상대적으로 크다는 의미가 된다. 음굴절률 메타물질 중 가장 큰  $F$ 값을 갖는 것은 그림 3에 도시되어 있는 그물망(Fishnet) 구조를 만들어서 생성되었다. 이 구조에서는 상대적으로 넓은 금속면에서는 반대로 흐르는 전류(asymmetric currents)가 발생이 되어 음투자율이, 얇은 금속 부분에서 음유전율이 생성되게 만들어  $\lambda=1.45 \mu\text{m}$ 에서  $n' = -2$ ,  $\lambda=1.4 \mu\text{m}$ 부근에서는  $F=3$ 이라는 높은 값을 얻을 수 있었다.

통상적으로 전기적 공진주파수와 자기적 공진주파수를 같은 대역에서 얻는 것이 매우 어려워 NIM을 만드는 것이 쉽지 않았다. 게다가 공진주파수 대역에서는 많은 손실이 발생하게 되어 그 효율성이 낮은 문제를 지니고 있었다. 따라서 새로이 연구되는 방법 중의 하나가 공진이 되지 않는 음의 유전율 대역에, 자기 공진 주파수를 맞추는 것이다. 금, 은 등의 금속의 플라즈마 주파수 이하의 대역에서 음의 유전율이 쉽게 나타나기 때문이다. 다시 말해 자기 공진기의 위아래에 금속필름을 대어 주는 것 만으로도 음굴절률이 발생하게 할 수 있는 것이다. 버클리대학의 Zhang 교수 연구팀은 2008년 금속 Ag과 유전체  $\text{MgF}_2$ 를 번갈아 다층으로 쌓아 삼차원의 샘플을 제작하였고 이를 FTB 식각공정을 이용하여 비공진형 그물망 구조로 제작하였다[6]. 더 나아가 프리즘을 만들어 실험하여 프리즘을 통과한 광선이 CCD에 맞도록 하였고, 굴절률에 따른 상의 위치를 비교함으로써 음굴절을 근처

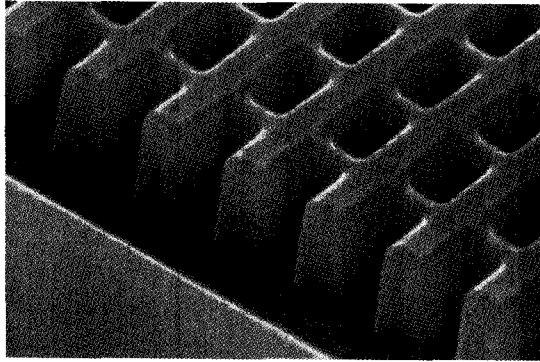
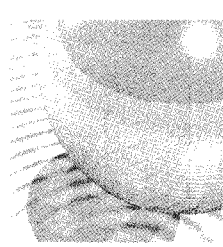


그림 4. 버클리 대학 Zhang 교수 연구팀의 다층 그물망 샘플의 SEM 사진.

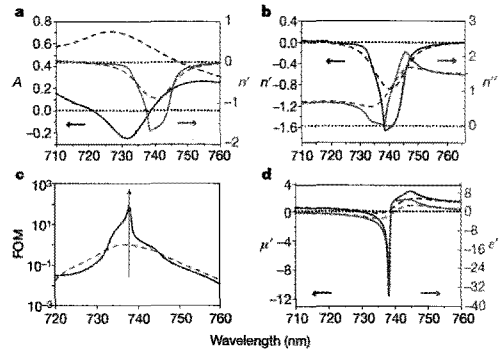


그림 6. 이득매질을 이용한 그물망 구조에서의 음굴절을 이론 및 실험치

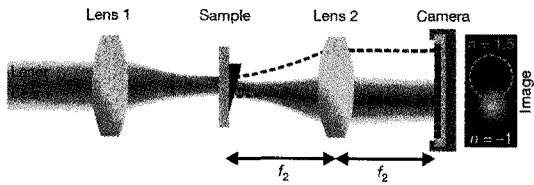


그림 5. 직관적인 광선광학(ray optics) 실험. CCD에 맺힌 상의 위치는 프리즘이 음의 굴절률을 가지고 있음을 명확히 보여준다.

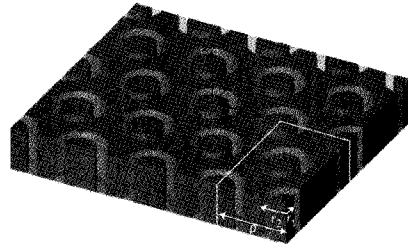


그림 7. 단층 플라즈모닉 도파로 음굴절 메타물질, 회색은 금속, 노랑색은 유전체를 의미한다. z-방향으로 빛이 진행한다.

외선 영역에서 시각적으로 확인하는 데에 성공하였다 (그림 4, 5).

현재까지 만들어진 대부분의 메타물질이 가진 가장 큰 문제점 중 하나는 손실이 크다는 것이다. 손실은 메타물질이 전자기파를 흡수하거나 반사시키게 되어 발생한다. 흡수되는 손실의 보상을 위해 제안된 방법이 이득매질을 활용하는 것이다. 퍼듀 대학의 Shalaev 교수 연구팀은 2010년 능동 음굴절률 메타물질을 발표하였다 (그림 6)[7]. 알루미늄(Alumina)와 은 그물망으로 이루어진 음굴절률 메타물질의 알루미늄 영역을 이득매질 Rh800으로 치환하였다. 기존 음굴절 메타물질에서는 손실로 인해 높은 음굴절률이나 높은 F값을 얻기가 힘들었다. 하지만 능동 메타물질에서는 손실을 보상함으로써 이 문제를 해결하여 굴절률이  $-0.66$ 에서  $-1.017$ 으로, F값이 1에서 26으로 향상되었다. 특히 특정 파장에서는 F값이 10의 6승 규모로 수동 메타물질에서 실현하기 힘든 높은 값을 나타내고 있다. 이 능동물질을 활용한 연구는 가시광선 대역 음 굴절률 메타물질 합성의 또 다른 가능성을 보여주고 있다.

음굴절을 구현에 있어서 이러한 그물망 구조와는 다르게 캘리포니아 공과대학의 Atwater 교수는 2010년에 입

체 플라즈모닉 광도파로 메타물질로 음굴절을 구현할 수 있음을 이론적으로 보였다 (그림 7)[8]. 그물망 구조는 전자기파의 강한 산란(scattering)을 위해 다층 구조가 되어야 하고, 따라서 복잡한 공정이 필연적이다. 하지만 플라즈모닉 광도파로는 공진에 의존하지 않아 손실이 적고, 편광각도와 무관하며, 간단한 단층 구조이다. 허용 가능한 입사각도도 넓으며, 최대 50도 각도로 입사되는 빛에 대해서도 음굴절 현상을 보여준다.

또 다른 시도로서, 음굴절을 직접 생성하는 구조와 달리, 쌍곡선 형태의 분산곡선을 가지는 물질을 이용하여 음굴절을 일으키는 연구도 활발히 진행되고 있다. 음의 굴절률을 가지는 물질안에서는 파수벡터( $k$ )가 에너지의 진행방향과 반대로 진행하지만, 쌍곡선 분산곡선을 가지는 물질에서는 파수벡터의 진행방향이 바뀌지 않는다는 점이 다르다. 쌍곡선 형태의 분산곡선은 금속 나노 와이어의 어레이를 이용해 만들어 질 수 있는데 2008년 버클리 대학의 Zhang 교수에 의해 실험적으로 증명되었다[9]. 금속 나노와이어 구조는 와이어에 평행한 방향으로 음의 유전율을, 수직인 방향으로 양의 유전율을 가지는데, 서로 다른 부호의 유전율은 TM 모드의 분산곡선을 쌍곡선 형태로 만들게 된다. 쌍곡선 형태의 분산

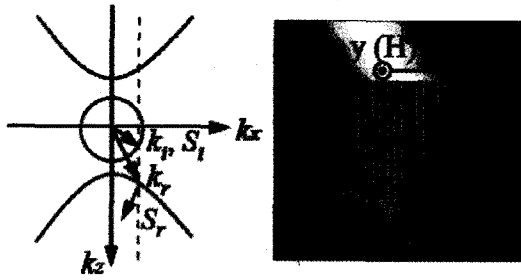


그림 8. 쌍곡선 형태의 분산곡선에서 나타나는 음굴절 현상

곡선을 가지는 물질에서 경계면에서의 운동량 보존법칙을 만족시키려면 포인팅 벡터의 방향을 바꿔야 하는데 이에 따른 결과로 음굴절 현상이 일어난다.

## 2. 메타물질을 이용한 파장이하 스케일 이미징

Pendry에 의해 이론적으로 제안되었듯이, 음의 굴절률을 가지는 매질은 높은 공간 주파수를 가지는 소멸파를 증폭시켜 완벽한 렌즈를 만들 수 있다. 최근의 메타물질 연구는 음의 굴절률을 가지는 매질을 실제로 만들 수 있게 해 주었지만, 파장에 비해 매우 얇은 금속 박막을 이용함으로써 특정한 편광에 대해서 비슷한 효과를 얻을 수 있다. 이는 2005년 버클리대학의 Zhang 교수 그룹에 의해 실험적으로 증명되었다[10]. 크롬막에 FIB(Focused Ion Beam)으로 새겨진 무늬가 얇은 은 박막 슈퍼렌즈를 통해 PR(Photo Resist)층에 image를 감광시켜 만들어진 결과는 은 박막이 슈퍼렌즈의 역할을 수

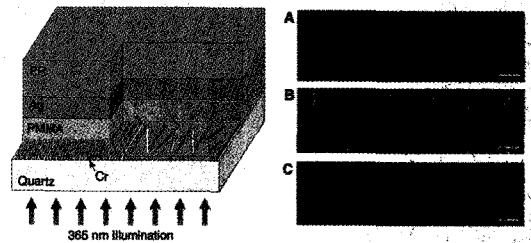


그림 8. 은박막을 이용한 슈퍼렌즈 실험 구조(좌)와 얻어진 이미지(우) (A) 크롬박막에 새겨진 원본 FIB이미지, (B) 슈퍼렌즈로 이미징 후 현상된 Photo resist의 AFM 이미지, (C) 슈퍼렌즈를 제거한 현상된 Photo resist의 AFM 이미지

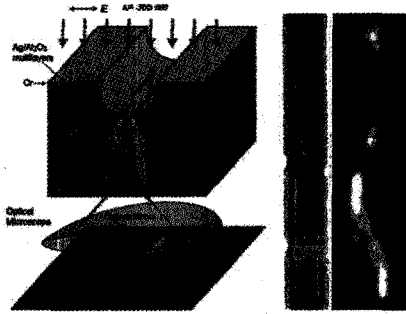


그림 9. 하이퍼렌즈와 그를 이용한 파장이하 분해능 이미지

행함을 보여준다. 슈퍼렌즈가 있는 경우에는 파장의 4인 약 89nm 선폭의 이미지를 얻을 수 있지만, 은 박막을 제거한 경우에는 선폭이 기존보다 약 4배가량 증가하여 파장과 거의 비슷한 선폭의 이미지가 나타난다.

파장이하 이미징을 위한 또 하나의 획기적인 방법은 하이퍼 렌즈를 이용하는 것이다. 버클리 대학의 Zhang 교수는 2007년 약 35nm 두께의 금과 알루미늄 나 박막을 겹겹이 쌓은 비등방성 구조로 만든 하이퍼 렌즈를 이용해 파장이하 이미징이 가능함을 보여줬다[11]. 이 구조는 양의 접선방향 유전율과 음의 방사방향 유전율을 가지는데 이는 이 구조가 하이퍼렌즈로 동작하는 중요한 원리이다. 서로 다른 부호의 유전율을 가진 비등방성 물질은 쌍곡선 형태의 분산 곡선을 가지게 되는데, 이러한 구조는 차단주파수가 존재하지 않아 회절한계 이하의 파도 진행할 수 있게 된다. 그림 9는 물체로부터 나온 빛이 하이퍼 렌즈 안에서 진행하는 모습을 보여준다. 실린더 형태의 구조는 파장이하 크기의 이미지를 확대시켜 파장한계에 걸리지 않을 만큼 큰 이미지로 확대시켜 주고 이를 일반적인 렌즈들을 이용해 다시 이미징 하여 하이퍼렌즈 이미지를 얻을 수 있다.

## 3. 플라즈모닉 ET 메타물질

전자기 유도 투과 현상(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)은 결맞은 광원과 원자와의 상호작용의 대표적인 현상으로서, EIT는 강한 결합광과 원자와 공진하는 주파수를 가진 조사광이 원자계와 상호작용하여 조사광이 공진 주파수에 흡수되지 않고 투과하는 현

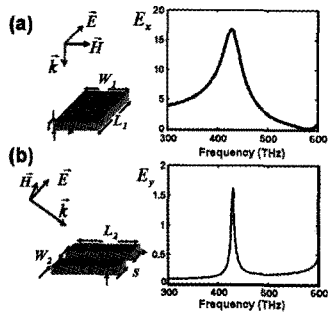
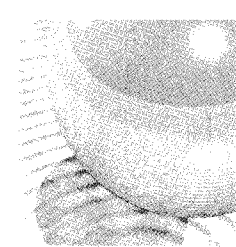


그림 10. 플라즈모닉 유사 EIT를 이루는 인공적인 원자.

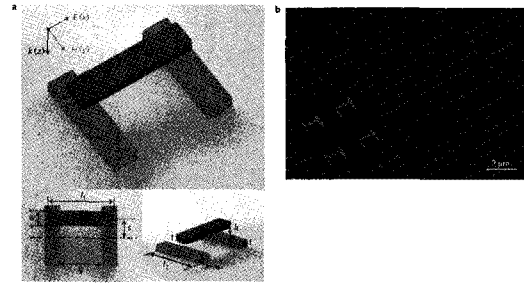


그림 12. 수직방향으로 방출원자가 놓여진 구조

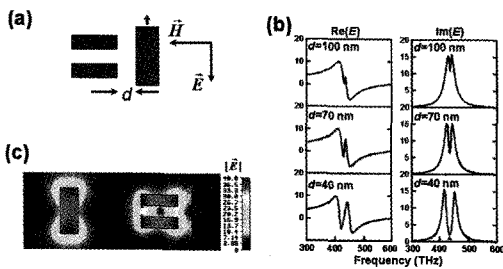


그림 11. (a) 플라즈모닉 시스템의 평면도. (b) 두 플라즈모닉 원자 사이의 거리에 따른  $E_x$ 의 실수 값과 허수 값. (c) 방출 원자만 있을 때(왼쪽)와 밝은 원자와 암흑 원자가 커플링될 때(오른쪽)의 2차원 전기장 분포.

상이다[12]. EIT 현상은 원자의 공진 주파수에서 투과 주파수 영역이 매우 좁아 광자 저장 및 빛의 속도 제어 등 다양한 연구가 수행되고 있다[13]. 최근에는 이러한 양자 현상을 고전 시스템에 적용한 유사 EIT 시스템들이 제안되고 있는데 그 중, 버클리 대학 Zhang 교수팀에서는 메타물질을 이용한 플라즈모닉 유사 EIT를 제안하였다[14].

그림 10은 이를 구현하기 위해 제안된 유사 플라즈모닉 분자를 나타낸다. 이 분자는 입사된 전기장과 강하게 커플링하는 (a) “방출 원자(radiative atom)”와 약하게 커플링하는 (b) “암흑 원자(dark atom)” 두 개의 인공적인 원자로 구성되어 있다. “방출 원자”는 전기적 쌍극자 안테나로서 작용하는 단일 금속 막대를 이용하였으며 “암흑 원자”는 자기적 쌍극자 안테나로서 작용하는 두 개의 평행한 금속 막대를 이용하였다.

일반적인 양자 EIT 시스템과 대조적으로 플라즈모닉 유사 EIT 시스템에서의 두 에너지 레벨 사이의 커플링은 방출원자와 암흑원자 사이의 거리를 조절 함으로서 구현할 수 있다. 그림 11(b)는 두 플라즈모닉 원자 사이의 거

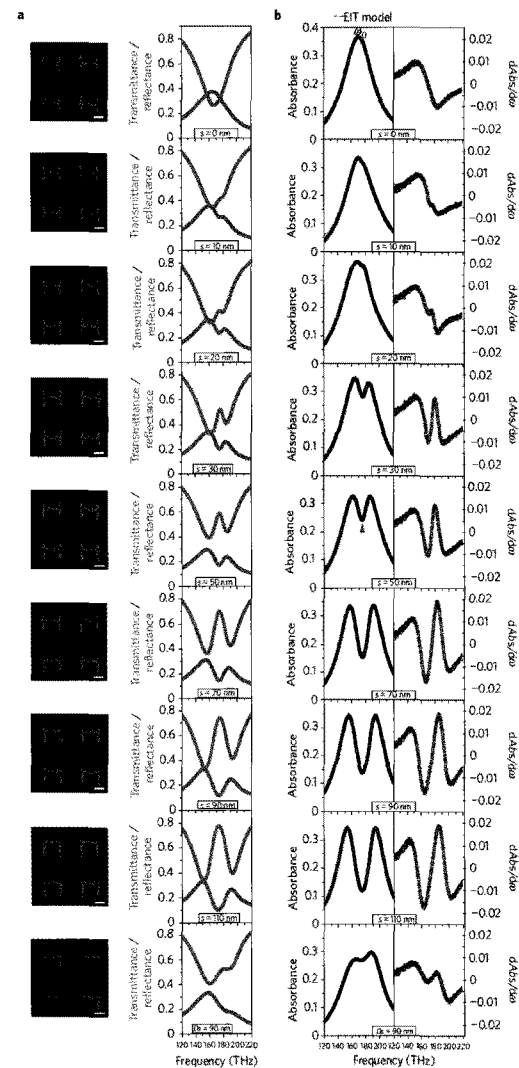


그림 13. 방출원자(붉은색 막대)의 중심과 평행한 두 막대 암흑원자(초록색 막대)의 중심 사이의 거리에 따른 투과와 반사 그리고 흡수 스펙트럼.

리에 따라 금속 막대 끝에서 방사되는 전기장의 실수부와 허수부를 나타낸다. 특히 허수부의 경우 양자 EIT에 서처럼 소멸간섭이 생기는 것을 볼 수 있으며 이는 거리가 짧아 질수록 더 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 2009년 독일의 Stuttgart 대학의 Giessen 교수팀에 의해 실험적으로 증명되었다[15]. 이번에는 단일 금 막대를 두 개의 평행한 금 막대의 수직 방향 위에 두고 (그림 12) 바닥의 평행한 막대의 중심과 위의 막대의 중심 사이의 거리  $s$  를 바꿔가며 투과와 반사를 측정하여 흡수 스펙트럼을 조사하였다(그림 13).

그 결과  $s$  값이 커질수록 흡수 스펙트럼에서 EIT 스펙트럼과 유사한 공진선 근처에서 조사광이 좁은 투과가 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 플라즈모닉 메타물질을 이용한 유사 EIT 현상은 실온에서 작동이 가능하며 넓은 대역폭을 갖는 장점이 있다. 또한 물질의 저항 감소는 화학적, 생물학적 센서의 성능을 높이는데 매우 유용할 것이라 예상된다.

## 4. 결론

메타물질에 대한 연구는 아직 활발하게 진행이 되고 있다. 실제적으로 근적외선 및 가시광선까지 영역을 넓혀가며 연구되고 있으며 이로써 기존에 자연계에서 존재하던 물질로는 불가능했던 음굴절률, 파장보다 작은 분해능의 달성 및 새로운 나노 포토리소그래피 등 실질적인 분야에 이르기까지 적용이 될 것으로 예상될 뿐 아니라 누구나의 흥미를 끌만한 클로킹 기술까지 다양한 분야를 아우르며 연구될 것으로 예측된다.

## 참고 문헌

[1] V. G. Veselago, Sov. Phys. Usp. 10, 509 (1968).  
 [2] J. B. Pendry, Phys. Rev. Lett. 85, 3966 (2000).  
 [3] S. Linden, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, T. Koschny, C. M. Soukoulis, Science 306, 1351 (2004).  
 [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, S. Schultz, Science 292, 77 (2001).

[5] V. M. Shalaev, W. Cai, U. K. Chettiar, H.-K. Yuan, A. K. Sarychev, V. P. Drachev, A. V. Kildishev, Opt. Lett. 30, 3356 (2005).  
 [6] J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. U.-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, X. Zhang, Nature 455, 376 (2008).  
 [7] S. Xiao, V. P. Drachev, A. V. Kildishev, X. Ni, U. K. Chettiar, H.-K. Yuan, V. M. Shalaev Nature 466, 735 (2010).  
 [8] S. P. Burgos, R. de Waele, A. Polman and H. A. Atwater, Nature Mater. 9, 407 (2010).  
 [9] J. Yao, Z. Liu, Y. Liu, Y. Wang, C. Sun, G. Bartal, A. M. Stacy, X. Zhang Nature 321 930 (2008).  
 [10] N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang, Science 308, 534 (2005).  
 [11] N. Fang, H. Lee, C. Sun, X. Zhang, Science 315, 1686 (2007).  
 [12] K. J. Boller, A. Imamoglu and S. E. Harris, Phys. Rev. Lett. 66, 2593 (1991).  
 [13] K. S. Choi, H. Deng, J. Laurat and H. J. Kimble, Nature 452, 67 (2008).  
 [14] S. Zhang, D. A. Genov, Y. Wang, M. Liu, and X. Zhang, Phys. Rev. Lett. 101, 047401 (2008).  
 [15] N. Liu, L. Langguth, T. Weiss, J. Kastel, M. Fleischhauer, T. Pfau and H. Giessen, Nature mater. 8, 758 (2009).

## 약 력



### 민범기

2009년 1월 - 현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수  
 2007년 7월 - 2008년 12월 University of California, Berkeley, 박사후 연구원  
 2006년 7월 - 2007년 6월 California Institute of Technology, 박사후 연구원  
 2006년 6월 California Institute of Technology, 응용물리학 박사  
 2001년 2월 서울대학교 전기공학부, 공학 석사  
 1999년 2월 서울대학교 전기공학부, 공학사