

# 메타물질과 메타표면 광학 기술

이승열 연구원 (한국전자통신연구원)

## 1. 서론

19세기 위대한 과학자 중 하나인 맥스웰 (James Clerk Maxwell, 1831~1879) 에 의해 전자기파의 전파 속도가 빛의 속도와 일치함이 예측된 이래로, 오늘날 우리는 빛 (가시광)이 약 수백 나노미터 (nm) 수준의 파장 대역을 지니는 전자기파임을 알고 있다. 최근 반도체 공정 기술의 발달로 인하여, 집중 이온 빔 (Focused Ion beam), 전자 빔 리쏘그래피 (E-beam lithography) 등의 공정 장비를 이용하여 수십 나노미터 이하의 미세 패턴을 형성할 수 있는 공정 기술들이 개발되었고, 이에 빛의 파장의 10분의 1 이하 수준의 주기를 지니는 구조물들을 만드는 것도 충분히 가능한 일이 되었다.

최근 나노포토닉스 (nanophotonics) 연구 분야에서는, 메타물질 기술이 새롭게 대두되어 관련 연구가 활발히 이루어지고 있는 상황이다. 메타물질 (metamaterial)이란, '더 높은', '초월한' 과 같은 의미를 지니는 접두어인 meta-와 물질을 나타내는 material이 결합된 신조어이다 [1]. 메타물질은 광범위한 의미로, 기존에 존재하는 물질들을 이용하여 적절한 기하학적 주기 구조를 설계함으로써, 자연상에 존재하지 않는 인위적인 물성을 지니도록 설계 및 제작된 물질을 일컫는다. 초기의 메타물질은 마이크로파 대

역에서 시작되었으며, 이는 상대적으로 훨씬 파장이 큰 마이크로파 대역에 맞추어 구조물들을 설계하는 일이 상대적으로 간단했기 때문이다 [2]. 사실 메타물질 설계는 전자기파에 대해서만 국한되는 것은 아니며, 음파 및 열전도 현상 등에 대해서도 비슷한 논리가 적용될 수 있다 [3]. 따라서 아주 넓은 의미에서는 음향 실험실의 방음벽 구조도 음파를 완전 흡수하는 메타물질이라고 볼 수 있다.

그러나 마이크로파 및 음파 대비 훨씬 파장이 짧은 광파에 대한 메타물질 설계는 보다 정밀한 수준의 나노 공정 기술들이 확립된 최근에서야 활발한 연구가 진행될 수 있었다. 물질 내 광파의 물성은 매질의 유전율 (permittivity)와 투자율 (permeability)에 의해 결정되므로, 임의의 유전율과 투자율을 가지는 물질을 설계하는 연구가 메타물질 분야에서 많이 이루어졌다. 최근에는 복잡한 3차원 메타물질 공정의 어려움과 실용성 등을 고려하여 2차원 박막 위에 물리적인 원리를 통해 설계된 단위 구조들을 배열하여 만들어지는 메타표면 (metasurface) 구조들에 대한 관심 또한 높아지고 있는 추세이다 [4].

본고에서는 최근 나노포토닉스 분야에서 대두되고 있는 메타물질 및 메타표면 광학 기술들에 대해서 그 기초 원리와 최신 동향을 소개하고, 이들 기술들이 가지는 잠재력과 가능성 높은 응용 분야들을 살펴보고자 한다.

## 2. 메타물질 기술

광과 대역에서 메타물질 기술이 대두되기 시작한 배경에는 J. B. Pendry 교수에 의해서 음굴절 물질(Negative refractive index material 또는 left-handed material)의 존재 가능성이 회자되기 시작한 것과 큰 관련이 있다[5,6]. 서론에서 설명한 바와 같이, 물질 내부에서 전자기파의 거시적인 거동을 설명하는 두 물질 상수는 유전율( $\epsilon$ )과 투자율( $\mu$ )이며, 광과 주파수 대역에서의 이 값의 부호에 따라 빛은 매질을 투과해 나아가거나 금속에서처럼 반사하게 된다. 그림 1은, 물질의 유전율과 투자율의 부호에 따른 매질의 특성과 대표적인 물질들을 보여주고 있다. 우리가 알고 있는 대다수의 투명한 유전체 물질들(SiO<sub>2</sub>, quartz, ITO, water 등)은 모두 양의 유전율과 투자율을 가지는 물질들로, 그림 1의 제 1사분면에 위치하는 물질들이다.

반면 음의 유전율 값을 지니면서 양의 투자율 값을 지니는 제 2사분면에 대표적인 물질들은 빛을 반사시키는 특성을 지니며, 가시광 주파수 대역에서는 금속들(금, 은, 알루미늄, 구리 등)이 이에 해당된다. 그러나 상대적으로 자연계에서 다양한 값을 지닐 수 있는 유전율에 비해, 투자율의 경우 자연계 대다수의 물

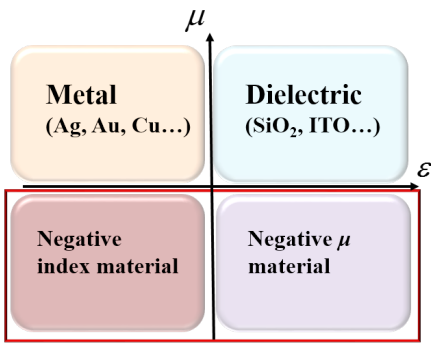


그림 1. 자연계 물질들의 유전율, 투자율에 따른 분류.

질들이 1에 가까운 값을 지니며, 몇몇 강자성체(ferromagnetic material)만이 상이한 투자율을 가짐이 알려져 있다. 특히, 그림 1의 제 3사분면에 위치하는 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 지니는 물질은 단위 물질로는 아직까지 자연계에 존재하지 않는 것으로 알려져 있다.

그림 1의 제 3사분면에 해당하는 물질이 음굴절 특성을 지니는 물질로 분류되는데, 빛이 통과하지 못하고 감쇄하는 2사분면과 4사분면의 물질과는 달리, 음굴절 물질은 1사분면의 물질과 같이 빛을 투과시키는 성질을 가진다. 이상적인 음굴절 물질은 그림 2에서와 같이 음의 각도로 빛을 굴절시키는 특징이 있으며, 감쇄파(evanescent wave)를 역으로 증폭시키는 특성을 갖추고 있어 완벽한 렌즈 구조(perfect lens)를 만들 수 있음이 알려져 있다. 여기서 perfect lens란, 일반적인 렌즈가 빛의 회절한계로 인하여 그 해상도가 빛의 파장의 절반으로 제한되는 것과 달리, 모든 감쇄파 성분까지 복원하여 이론상으로 그 해상도에 제한이 없이 광학 이미지를 만들 수 있는 렌즈를 의미한다.

자연계에 존재하지 않는 음굴절 물질을 만들려면 어떻게 해야 할까? 메타물질 연구자

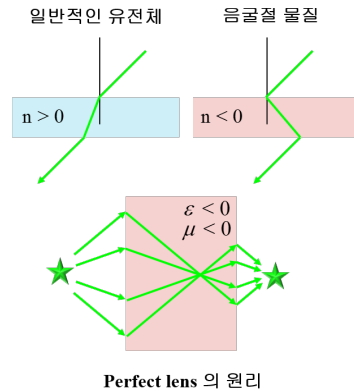


그림 2. (a) 일반적인 유전체와 음의 굴절률을 지니는 물질에서의 굴절 특성 차이. (b) 음굴절 물질을 이용한 perfect lens의 원리.

들은 빛의 주기보다 작은 구조물 내부에서 전자가 이동하면서 만들어내는 전기장, 혹은 전류가 회전하면서 만들어내는 자기장이 자연계 물질의 분극율 (polarizability)과 자화율 (magnetic susceptibility) 를 인위적으로 대체할 수 있음에 착안하였다. 인위적인 전자의 이동 및 전류의 회전을 만들어내기 위해 다양한 형태의 금속 구조물들이 음굴절 메타물질의 예로 제안되고 있다. 그림 3(a)는 그 중 가장 대표적으로 음의 투자율을 가지는 메타물질의 예시인 split-ring resonator (SRR) 구조를 나타내었다 [7,8].

SRR 구조의 기본 원리는 패러데이의 전자기 유도 법칙을 따른다. 입사하는 전자기파의 자기장 성분 중 SRR면에 수직한 성분이 존재하고, 전자기파의 진행에 따라 그 위상이 사인파 형태로 변화하는 경우, SRR 구조를 따라 회전하는 전류가 형성되며 SRR의 끊어진 부분을 캐패시터로 인식하여 그 양단에 전하가 축적될 수 있다. 그런데 이 현상이 극대화 되기 위해서는 SRR공진 조건이 만족되어야 하는데, SRR공진조건이란 입사광 파장의 절반과 SRR의 ring의 총 길이가 맞아 떨어져 SRR의 캐패시터 및 인덕터 성분으로 인한 공진 주파수와 입사광 주파수가 일치하게 되는 경우를 뜻한다. 이 현상이 만족되었을 때, 외부 자기장에 따른 SRR로부터 만들어지는 자기장이 매우 강해지며, 각각을 이루는 물질들의 투자율이 1이더라도, 공진에 의한 인위적인 투자율 변화가 그림 3(b)와 같이 나타나게 된다.

특히, SRR과 같이 두 개의 미세하게 다른 공진 조건을 지니는 ring이 결합되어 있으면, 그로 인한 공진 양상은 그림 3(b)와 같은 비대칭적 Fano resonance 양상을 띄게 된다. 이러한 공진 양상을 잘 이용하면 국부적인 주파수 영역에서 음의 투자율을 만드는 것도 가능하며, 그림 3(b)의 붉게 칠해진 영역이 이에 해당된다. 일반적으로 메타물질은 이렇게 물리적으로 설계된 단위 구조를 주기적으로 배열

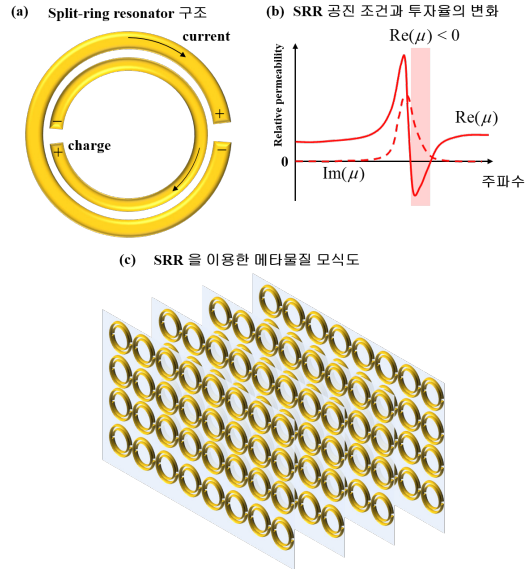


그림 3. (a) Split-ring resonator 단위 구조의 모식도와 전류, 전압 분포, (b) SRR 공진 조건과 그 주변에서의 투자율 값의 변화 양상. (c) SRR 기반 메타물질의 모식도.

하여 만들어지는데, 그림 3(c)는 SRR을 이용한 메타물질 구조를 모식도의 형태로 그린 것이다. 음의 굴절률을 지니기 위해서는 음의 투자율과, 음의 유전율 값을 동시에 가져야 한다. 다만 음의 유전율을 가지는 메타물질의 경우, 유전체 내부에 금속 선 구조 (wire) 혹은 그물 구조 (grid)를 형성하여 어렵지 않게 만들 수 있고, 이것과 SRR을 결합해 놓은 구조들이 대표적인 음굴절 메타물질의 예들로 제안되고 있다 [9].

### 3. 메타표면 기술

메타표면이라는 단어는 메타물질에서 파생된 것으로, 최근 정밀한 나노 공정 기술을 요구하는 가시광 대역의 메타물질들이 점차 개발되며 언급되기 시작하였다. 메타물질 연구자들의 일각에서는 단위 구조를 3차원적으로 쌓아 만들어지는 메타물질 기술이 가지는 공

정의 어려움과 비용적 측면을 고려하고, 굳이 3차원 적층 구조가 아닌 2차원 단일 박막 면을 통해서도 자연계에 존재하지 않는 음굴절 물성등을 구현해 낼 수 있다는 점에 착안하였고, 이러한 구조물에 메타표면이라는 단어를 사용되기 시작하였다.

메타표면은, 박막 구조를 기반으로 하는 공정 방식들에 보다 적합하며, 다양한 물성을 나타내는 물질을 얇은 박막 구조를 통해 구현할 수 있다는 장점을 지닌다. 특히 3차원 메타물질 구조 대비 공정이 용이하여, 각각의 단위 구조 사이에도 구조적 변화를 주는 경우가 많이 있다. 단위 구조의 기본 모양은 유지하면서도, 단위 구조의 회전각이나 구조 간 상대적 위치정보들을 주기 단위로 조절하여 다양한 특이 물성들을 얻어내기도 한다. 이번 절에서는 몇 가지 대표적인 메타표면 구조들의 예시를 통해 메타표면 설계원리를 설명하고자 한다.

그림 4는 가장 간단한 메타표면 단위 구조 중 하나인 단일 나노 막대기 (nanorod)를 이용한 메타표면 단위 구조와, 나노 막대기의 배열각에 따라 나타나는 광 투과 위상 지연 현상을 나타낸 모식도이다. 일반적으로 나노 막대기 구조는 그 길이나 두께, 나노 막대기를 이루는 물질 등에 따라 고유의 공진 조건을 가진다. 만약 입사광의 파장이 공진 조건과 일치하면, 입사광 편광 성분 중 나노 막대기와 평행

한 성분은 나노 막대기 구조에 의해 강하게 산란되며, 산란된 빛의 투과 성분은 그 위상이 지연되게 된다. 입사광 편광 상태가 원편광인 경우, 원편광은 매 위상에 따라 회전하는 전기장 벡터를 가지기 때문에, 나노 막대기의 배열각에 따라 위상 지연이 일어나는 편광 상태가 달라지고, 이는 투과되는 빛 자체의 위상 차이로 나타나게 된다. 다시 말해, 나노 막대기의 배열각 정보가 투과되는 빛의 위상 정보로 일대일 대응되는 메타표면 구조를 설계하는 것이 가능하다.

그림 5는 또 다른 특이 물성을 지니는 메타표면 구조를 나타낸 것이다. 그림 5(a)의 구조는 가로와 세로 방향의 길이가 서로 다른 나노 막대기를 겹쳐놓은 십자 모양의 배열 구조를 이루고 있는 메타표면 구조로, 선편광 광원 입사조건에 대해, 전기장의 방향이 긴 나노막대기 혹은 짧은 나노막대기와 평행한 경우 각각 투과 스펙트럼이 다르게 나타나게 된다 [10]. 긴 막대기가 장파장 대역에서 공진 조건을 가지기 때문에, 긴 막대기와 입사광이 평행한 경우, 적색과 녹색 빛은 흡수되고 청색 빛만 투과하며, 짧은 막대기와 평행한 편광의 경우 반대로 적색과 녹색 빛이 투과하여 노란색 스펙트럼이 나타나는 메타표면 구조이다.

그림 5(b)의 경우 더욱 특이한 광 투과 특성을 보여주는데, 그림 5(b)에 사용된 구조

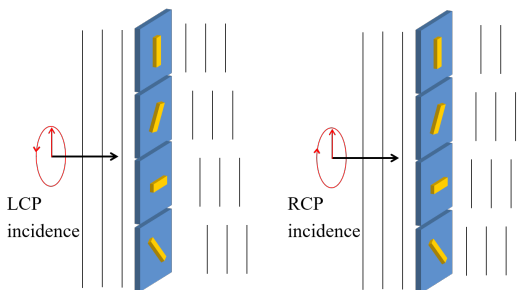
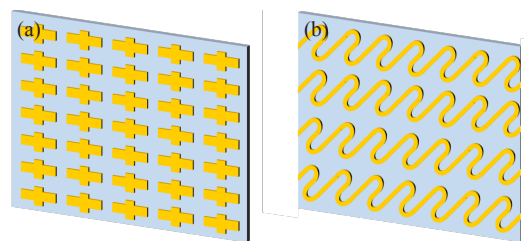


그림 4. 나노 막대기(nanorod) 구조의 배열각을 이용한 광 위상 지연 메타표면 단위 구조.



편광에 따라 다른 색상을 가지는 메타표면      키랄리티(chirality)를 가지는 메타표면

그림 5. 다양한 특이 물성을 지니는 메타표면 구조의 모식도. (a) 십자 나노 막대기 배열을 이용한 메타표면. (b) 물결형 배열 구조를 이용한 메타표면.

는 거울 비대칭적 (chiral)인 특성을 가진 구조로, 입사광이 좌선회 원편광인 경우와 우선회 원편광인 경우에 대해 서로 다른 투과 특성을 보이게 된다. 해당 물질무늬 구조의 경우, 좌선회 원편광에 대해서만 투과하고, 우선회 원편광은 흡수하는 특징을 지니고 있는데, 메타표면 구조를 뒤집게 되면 거울상(mirror image)이 되어 반대로 우선회 원편광을 투과시키게 된다. 이러한 특징을 토대로 생각하면, 원편광 된 빛이 메타표면의 어느 방향에서 입사되느냐에 따라 투과 혹은 흡수가 일어나는 것으로 생각할 수 있어, 아주 얇은 박막을 통해서도 optical isolator의 기능을 수행할 수 있다 [11].

이 외에도 최근 많은 연구를 통해 비선형성을 증폭하거나, 모든 방향에서 들어오는 광 성분을 거의 완벽하게 흡수할 수 있는 완전 광흡수체 등의 다양한 메타표면 구조들이 개발되고 있는 상황이다.

## 4. 메타물질/메타표면 응용 분야

### 4.1 변환 광학과 광 투명화 기술

메타물질을 이용하여 물질의 유전율과 투자율을 원하는 값으로 설계할 수 있게 되면서, 메타물질 연구자들은 변환 광학(transformation optics)을 이용한 광 투명화(optical cloaking) 기술과 같은 분야에 메타물질 기술을 응용하였다 [12,13]. 그림 6에서는 변환 광학의 개념을 나타내는 예시를 보여주고 있다. 변환 광학이란, 좌표 변환(coordinate transform)을 이용하여 빛의 이동 경로를 원하는 형태로 설계하는 기술을 뜻한다. 그림 6의 좌측 그림과 같이 일반적으로 빛은 어떤 균일한 매질이 있으면 매질 내부를 직진하며 진행한다. 그런데 일반적으로 맥스웰 방정식은 어떠한 좌표 변환을 적용 하더

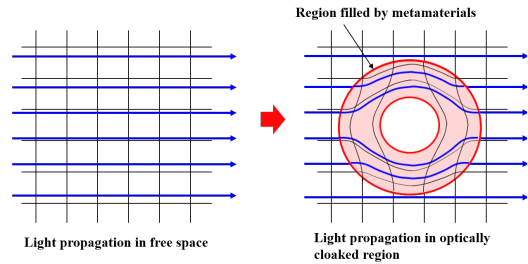


그림 6. 변환 광학을 이용한 빛의 진행 경로 조절 및 이를 이용한 optical cloaking의 예시.

라도 항상 성립하는 성질을 지니고 있기 때문에, 좌측 그림과 같은 직교 좌표의 한 점을 우측 그림 6과 같이 내부의 특정한 영역으로 넓히는 좌표 변환을 적용하는 것도 가능하다. 이 좌표 변환에 의해서 우측 그림의 중앙의 원 부분은 빛이 피해가는 영역이 되며, 이 내부에 어떤 물체가 있더라도 영역 밖에서는 내부의 물체를 볼 수 없는, 일종의 광 투명화(optical cloaking)현상이 일어난 것으로 볼 수 있다. 원래 이 영역을 통과했어야 하는 빛은 그 주변 영역을 돌아서 나아가게 되는데, 이 때 물리적으로 정말 공간이 일그러지는 것은 일반 상대성이론에 따라 엄청난 중력이 필요한 일이지만, 좌표 변환이 일어나는 영역의 유전율과 투자율 값을 재설계 함으로써 이를 간접적으로 모사하는 것이 가능하다.

그러나 좌표변환 조건을 만족하기 위한 유전율과 투자율 값은 복잡한 비등방성(anisotropy)을 가짐과 동시에 위치에 따라 상이한 값을 가져야만 했고, 이러한 조건을 모두 만족시키는 물질을 자연계에서 찾는 것은 현실적으로 불가능했다. 현재는 메타물질을 이용함으로써, 임의의 유전율과 투자율 값의 설계가 가능해지고, 이렇게 설계된 메타물질을 다시 위치에 따라 메타물질의 모양을 바꾸어가며 배치하여 광 투명화 현상이 실험적으로 증명되었고, 보다 다양한 각도의 연구결과들이 점차 증가해 가는 추세이다.

## 4.2 메타표면 광 홀로그래프 기술

메타표면 기술은 2차원상 박막 구조에서 모든 공정이 완료되며, 각각의 단위 구조를 조절하여 서로 다른 광 스펙트럼, 혹은 광 위상을 만들어 낼 수 있다는 점에 착안하여, 최근 홀로그래프 디스플레이 분야에 있어서 많은 관심을 받고 있다. 디지털 홀로그래프 디스플레이의 경우, 단위 픽셀의 크기는 곧 디스플레이의 광 시야각과 직접적으로 연관된다. 특히 가시광 대역 파장 (400~700 nm)에서 30도 이상의 충분히 넓은 광 시야각을 확보하기 위해서는 해당 빛의 파장 수준 (500~1,000 nm)의 픽셀 크기가 필요함이 알려져 있으나, 기존의 상용 디스플레이 (LCD 등)는 이와 같은 아주 작은 픽셀 크기에서는 국소적인 광 위상 차이를 만들어 내는데 한계가 있음이 알려져 있다.

그림 7에서는 메타표면을 이용한 반사형 홀

은 투과형 홀로그래프 구조의 모식도를 보여주고 있다. 일반적으로 메타표면 기술의 단위 구조 주기는 파장의 절반 수준이고, 나노막대기의 배열각에 따라 광 위상을 조절하는 것이 가능하기 때문에, 이를 이용한 넓은 시야각, full-phase modulation 홀로그래피 연구결과가 다방면으로 이루어지고 있다. 특히 메타표면 구조가 가지는 편광 의존성을 응용하여, 편광에 따라 서로 다른 이미지가 보이는 홀로그래프, 고효율의 홀로그래프 등이 최근 보고되고 있는 상황이다 [14,15]. 다만 메타표면 기반의 홀로그래프를 단위 픽셀 단위로 제어하기 위해서는 각각의 나노막대기 구조를 회전한다던가 하는 물리적인 변형이 필요하기 때문에, 메타표면을 이용하여 실시간으로 변화하는 홀로그래프 동영상을 만들어내는 단계까지는 현 시점에서 도달하지 못하고 있다.

## 5. 결론

지금까지 메타물질 및 메타표면 기술에 대해 간략하게 소개하였고, 그 응용 분야를 살펴 보았다. 물질 내에서의 빛의 거시적인 특성을 재료 고유의 화학적 특성이 아닌, 기하학적 구조의 물리적 특성만을 이용하여 새로운 특성을 가지는 물질을 설계하는 메타물질 기술 분야는, 분명 미래 기술을 선도하는 기술 중 하나가 될 것이라 생각한다. 특히 최근 발전하는 3D printing 기술, 또 마이크로/나노 크기의 3차원 구조를 만들어내는 Direct laser writing 기술 등과 맞물려, 앞으로는 더욱 다양하고 유용한 물성을 지니는 메타물질들이 개발될 수 있을 것이라고 기대한다. 광 투명화 현상, 초고해상도 디지털 홀로그래피 등을 가능하게 하는 메타물질 연구 분야는 국내에서도 지속적인 지원과 연구가 이루어져야 한다고 생각하는 바이다.

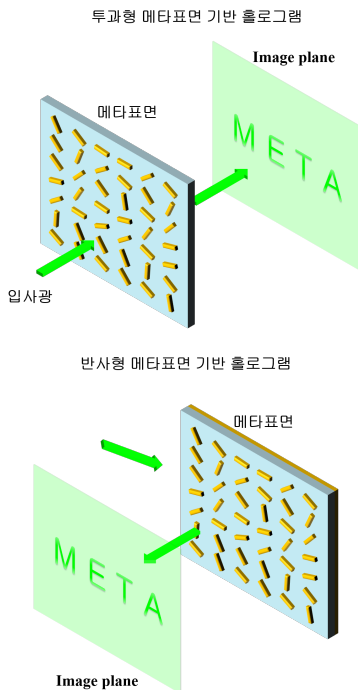


그림 7. 메타표면을 이용한 투과형 및 반사형 홀로그래프의 모식도.

## 참고 문헌

- [1] D. R. Smith, J. B. Pendry, M. C. K. Wiltshire, "Metamaterials and Negative Refractive Index," *Science*, vol. 305, pp. 788-792, 2004.
- [2] J. B. Pendry et al., "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* vol. 47, pp. 2075-2084, 1999.
- [3] J. Li and C. T. Chan, "Double-negative acoustic metamaterial," *Physical Review E* vol. 70, article 055602, 2004.
- [4] N. Yu and F. Capasso, "Flat optics with designer metasurfaces," *Nature Materials* vol. 13, pp. 139-150, 2014.
- [5] J. B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens," *Physical Review Letters* vol. 85, article 3966, 2000.
- [6] D. R. Smith and N. Kroll, "Negative Refractive Index in Left-Handed Materials," *Physical Review Letters* vol. 85, article 2933, 2000.
- [7] D. R. Smith et al, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Physical Review Letters* vol. 84, article 4184, 2000.
- [8] C. Rockstuhl et al, "Resonances of split-ring resonator metamaterials in the near infrared," *Applied Physics B*, vol. 84, pp. 219-227, 2006.
- [9] Vladimir M. Shalaev, "Optical negative-index metamaterials," *Nature Photonics* vol. 1, pp. 41-48, 2007.
- [10] T. Ellenbogen, K. Seo, and K. B. Crozier, "Chromatic Plasmonic Polarizers for Active Visible Color Filtering and Polarimetry," *Nano Letters* vol. 12, pp. 1026-1031, 2012.
- [11] V. A. Fedotov, A. S. Schwanecke, N. I. Zheludev, V. V. Khardikov, and S. L. Prosvirnin, "Asymmetric transmission of light and enantiomerically sensitive plasmon resonance in planar chiral nanostructures," *Nano Letters* vol. 7, pp. 1996-1999, 2007.
- [12] U. Leonhardt, "Optical Conformal Mapping," *Science* vol. 312, pp. 1777-1780, 2006.
- [13] W. Cai, U. K. Chettiar, A. V. Kildishev and V. M. Shalaev, "Optical cloaking with metamaterials," *Nature photonics* vol. 1, pp.

224-227, 2007.

- [14] L. Huang et al, "Three-dimensional optical holography using a plasmonic metasurface," *Nature communications* vol. 4 doi:10.1038/ncomms3808, 2013.
- [15] W. T. Chen et al, "High-Efficiency Broadband Meta-Hologram with Polarization-Controlled Dual Images," *Nano Letters* vol. 14 pp. 225-230, 2014.

## 저자약력



성명 : 이승열

◆ 학력

·2009년

서울대학교 공과대학

전기컴퓨터공학부 공학사

·2014년

서울대학교 대학원

전기컴퓨터공학부 공학박사

◆ 경력

·2014년 - 2015년

서울대학교 반도체공동연구소

연구원

·2015년 - 현재

한국전자통신연구원(ETRI)

연구원