

# 스마트 메타물질을 이용한 투명망토 소개

신동혁, 김경식\*

(연세대학교)

## 1. 머리말

빛이나 음파 같은 파동이 물질에 입사되면, 물질내부의 물성에 따라서 다양한 상호작용을 일으킨다. 빛의 경우 전자기장이 물질 내의 전자를 움직이고 이로 인하여 발생한 전자기적 에너지 교환은 빛의 파동을 제어할 수 있게 하는 수단이 될 수 있으므로 이를 이용한 다양한 광학장치가 개발되어 왔다. 일반적으로 물질 내 원자 사이 간격은 옴스트롬, 즉 0.1 나노미터 단위이다. 우리 눈에 보이는 가시 광 영역은 수 백 나노미터 이상의 파장을 가지는 파동으로 파장보다 훨씬 작은 개별원자를 인식하지 못한다. 그래서 우리는 파동과 상호작용하는 원자나 분자들의 집합을 하나의 균일한 연속체로 가정하여 분석할 수 있게 된다.

광학 장치에서는 주로 재료의 광학 특성이 그 품질과 기능성에 많은 영향을 미치게 되므로 자연에 존재하는 물질의 광학 특성의 한계에 의해서 그 성능도 한계 지워지게 된다. 따라서 물질의 구성요소인 원자와 분자들의 구성과 배열을 바꾸어 물질적인 한계를 극복하려는 연구들이 화학적인 방법으로 주로 진행되어 왔다.

최근 2000년대에 이르러 메타물질이 알려지면서 새로운 연구들이 진행되었다. 메타물질은 입사되는 파동이 파장보다 훨씬 작은 주기를 가지

는 구조체의 집합을 하나의 연속체로 인식하는 원리를 바탕으로 빛의 파장보다 작은 구조들을 원자들의 배열처럼 주기적으로 조합하여 빛이 개별적인 구조들의 집합을 하나의 물질로 인식하도록 만드는 기술이다. 이러한 방법을 통해 얻어진 메타물질의 성질은 기존에 자연계에서 볼 수 없었던 새로운 현상을 가능하게 만든다. 금속과 유전체의 공명현상을 이용하여 자연계에서 얻을 수 없는 음의 굴절률 값을 가지는 메타물질들이 선보였고 이를 이용하여 광범위한 분야에서 다양한 연구가 진행되어 가고 있다.

## 2. 메타물질

### 2.1 메타물질 투명망토

메타물질에 대한 관심을 크게 높여준 것은 메타물질로 투명망토를 구현할 수 있다는 연구결과 때문이었다. 2006년에 영국 임페리얼 칼리지의 펜드리 교수와 미국 듀크대학교의 스미스 교수는 최초의 투명망토에 대한 이론을 발표하고 이를 마이크로 웨이브 영역에서 작동하는 메타물질을 통하여 실험적으로 증명하는데 성공하였다<sup>(1,2)</sup>. 메타물질 투명망토를 설계하기 위하여 사용된 변환광학(transformation optics)은 좌표변환시에도 맥스웰 방정식이 변하지 않고 적용되는 기본 원리에 기반하여 빛이 지나가는 공간을

\* E-mail : kks@yonsei.ac.kr

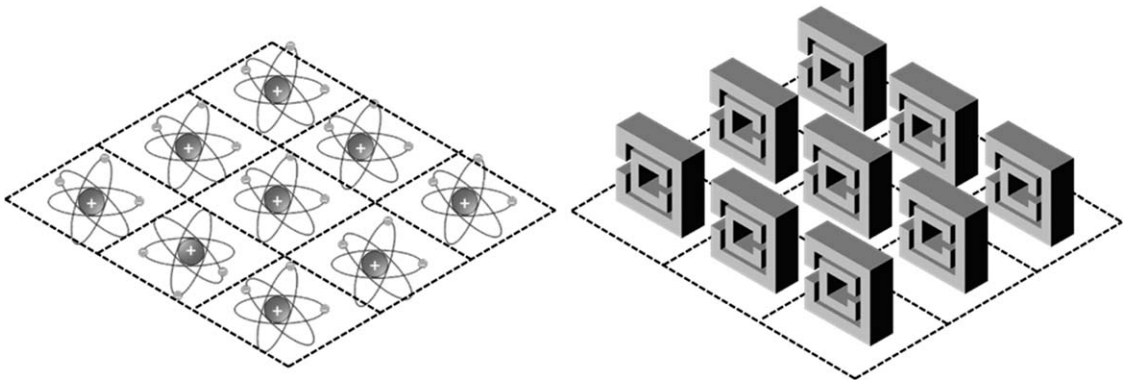


그림 1 원자의 구성과 메타물질의 주기구조 모식도

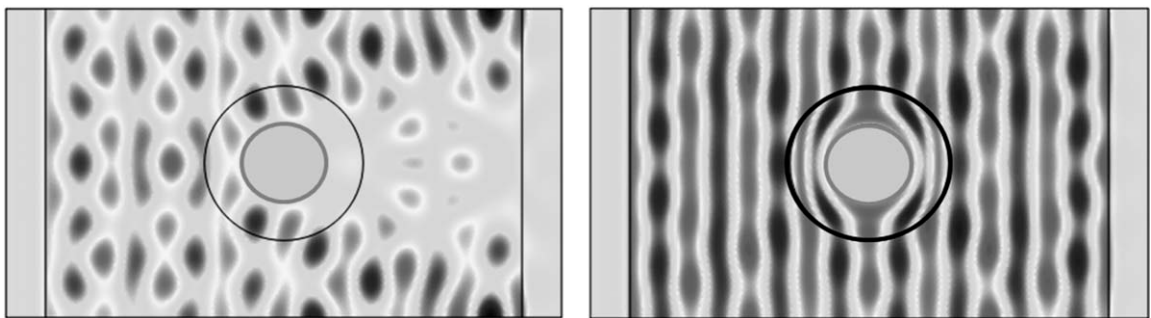


그림 2 투명망토가 작동하지 않는 경우와 작동하는 경우의 파동의 진행

일그러뜨려서 빛이 장애물 주변을 타고 흐르는 것처럼 진행하도록 물성의 분포를 설계한다. 공간의 변환에 따른 메트릭스의 변환을 통하여 실제 공간이 변화하는 것이 아니라 장애물이 있는 공간 주변의 전자기적 성질인 유전율(permittivity)과 투자율(permeability)을 좌표변환에 따라 변화시키는 것이다. 이렇게 하면 빛이 통과하지 못하는 장애물이 차지하는 공간이 마치 점으로 압축된 것처럼 빛이 인식하여 아무런 방해도 받지 않고 진행하는 것처럼 장애물 주변을 타고 흐르는 결과가 나오게 된다.

이러한 초기 메타물질 투명망토의 경우 이론적으로는 가능하지만 실제로 구현하기에는 매우 힘든 광학적 물성을 필요로 하였다. 일단 유전율 뿐만 아니라 투자율도 제어를 하여 특정 물성 분포가 요구되었다. 이 경우 공진기 형태의 공진 메타물질을 이용해야 하는데 공진을 일으키는 파장대역이 매우 좁아서 광대역에서의 성능을 기

대하기 어렵고, 공진기의 특성상 흡수손실이 커서 실제 구현 시 성능에 많은 문제점이 있었다. 또한 공진기 설계의 경우 금속을 이용한 복잡한 형상을 가지고 있으므로 작동 영역대역이 가시광 및 적외선 영역에서 구현하는데 현대의 나노기술로도 도전적인 과제로 여겨졌다.

이러한 단점들을 극복하고 실제로 구현하기 쉬운 투명망토 설계이론이 등장하였다<sup>(3)</sup>. 준등각사상(quasi-conformal mapping)을 이용하여 설계한 카펫형 투명망토는 초기 투명망토처럼 물체 주위를 둘러싸는 것이 아니라 바닥에 있는 물체를 덮어서 바닥과 구분이 가지 않게 하는 방법으로 투명망토의 역할을 하는 방식이다. 초기 투명망토는 면적을 한 점으로 압축하는 좌표변환을 이용하기 때문에 특이점이 생기면서 매우 까다로운 물성을 요구하였다. 그러나 카펫형 투명망토는 공간을 바닥 면으로 압축하는 방식이기 때문에 특이점이 생기지 않아서 구현하기 어려운 극

단적인 물성값을 요구하지 않는다. 또한 투자율은 1로 설정하고 설계를 진행할 수 있기 때문에 오직 유전율의 분포만으로 굴절을 분포를 구성하여 유전체만으로 제작이 가능하다. 상대적으로 공정이 수월하기 때문에 다양한 파장대역에서 이를 이용한 많은 연구와 실험 결과들이 발표되었다.

## 2.2 탄성을 이용한 스마트 메타물질

지금까지 연구되어왔던 메타물질과 변화광학 이론은 고정된 형태를 유지해야만 그 성능이 유지되었다. 설계자체도 미리 외부 경계 형상을 설정하고 이에 맞춰서 내부의 물성을 구성하는 방식으로 설계가 되었기 때문에 외부의 충격에 의한 변형에 약하고 한가지 목적으로만 사용할 수밖에 없었다. 2012년에 이 연구진은 기존의 메타물질에 탄성을 결합하여 외부의 변형에 적응하여 작동하는 스마트 메타물질 투명망토를 구현하였다<sup>(4)</sup>. 이 스마트 메타물질은 균일한 광결정 주기구조로 이루어져 있다가 원하는 형상에 맞게 변형시킬 경우 그 변화형상에 맞추어 내부의 광결정 구조 하나하나가 알맞은 물성을 가지게 되어 투명망토 성능이 스스로 유지하게 된다.

2014년에 발표된 연구결과에서는 음의 탄성을 가지는 스마트 메타물질을 이용하여 변환광학을 만족하는 스마트 변환광학에 대한 이론 및 실험에 대한 결과를 발표하였다. 변환광학에서 유전율 만을 물성으로 사용하는 준등각사상 설계 이론에서는 광결정 단위구조의 격자구조가 끼인각을 직각으로 유지하면서 정해진 형상에 맞게 설계된다. 이를 수학적으로 보면 라플라스 방정식(Laplace's equation)을 만족하면서 정해진 형상의 외부 경계조건이 sliding boundary 조건이 되면 역시 준등각사상을 만족한다는 결과가 기존에 나와있었다<sup>(5)</sup>. 2차원에서의 라플라스 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla_x^2 \vec{x}' = 0 \quad (1)$$

만약에 메타물질 구조에 변형이 일어날 때 언

제나 이 라플라스 방정식을 만족한다면 준등각사상, 즉 변환광학 역시 항상 만족하는 스마트 메타물질로서 작동함을 이론적으로 확인할 수 있다. 이를 수학적으로 증명하기 위하여 선형 탄성 물질로 가정하고 기본 방정식인 Hooke's law에서 증명을 시작하였다. Hooke's law의 식은 다음과 같으며 스트레스( $\sigma_{ij}$ ), 스트레인( $\epsilon_{ij}$ ), 그리고 탄성변형 텐서( $C_{ijkl}$ )로 구성되어 있다.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2)$$

여기서 탄성정역학 조건(elastostatic condition)에서는 스트레스와 스트레인 텐서 대신에 변위( $u_i$ )와 밀도( $\rho_0$ )를 이용한 Cauchy-Navier equation으로 단순화 될 수 있다.

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial X_i \partial X_j} = \rho_0 \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} \equiv 0 \quad (3)$$

선형 탄성 물질에서 변형텐서( $C_{ijkl}$ )는 다음과 같이  $6 \times 6$  매트릭스( $C_{\alpha\beta}$ )로 단순화될 수 있으며  $\nu$ 는 푸아송 비이고  $E$ 는 Young's modulus이다.

$$C_{\alpha\beta} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

정지상태에서 Cauchy-Navier equation은  $j(=1 \text{ or } 2)$ 의 값에 따라 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial X_2^2} \right) &= -\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial X_1 \partial X_2} \right) \\ \left( \frac{\partial^2 u_2}{\partial X_1^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial X_2^2} \right) &= -\frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial X_1 \partial X_2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial X_2^2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이 때 푸아송 비가 -1로 가는 경우에 오른쪽 항이 모두 0이 되면서 다음과 같이 변위( $u_i$ )에 대한 2차원 라플라스 방정식이 만족된다<sup>(6)</sup>.

$$\nabla_x^2 \vec{u} = 0 \quad (6)$$

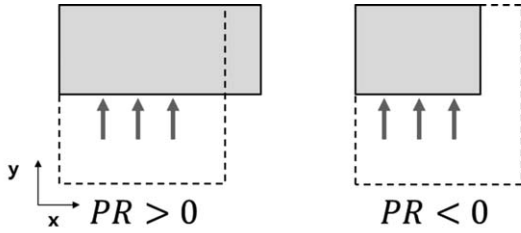


그림 3 양의 푸아송 비와 음의 푸아송 비를 가진 물질을 수직으로 압축한 결과<sup>6)</sup>

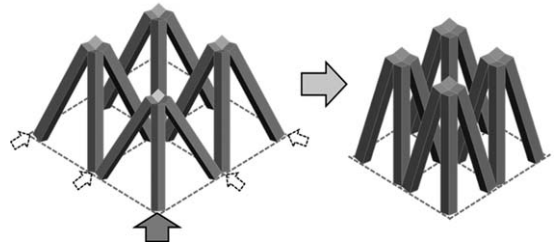


그림 4 푸아송 비가 -1이 되는 메타물질 구조의 변형 모식도<sup>6)</sup>

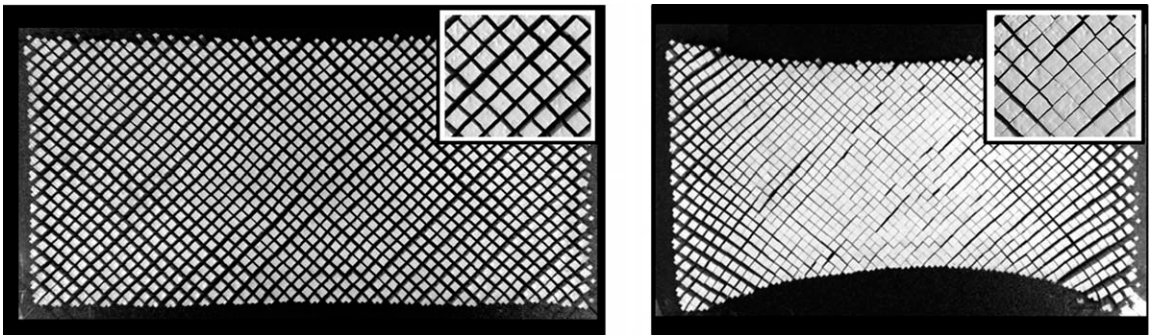


그림 5 -1의 푸아송 비를 가지는 스마트 메타물질 샘플의 압축 거동<sup>6)</sup>

따라서 푸아송 비가 -1이 되는 구조를 가지면 라플라스 방정식과 준등각사상을 만족하는 스마트 변환광학이론이 성립됨을 보였다. 푸아송 비는 고체역학에서 변형되는 수평성분과 수직 성분의 비율로써 일반적인 물질들은 대부분 양의 값을 가진다. 그림 3의 왼쪽에서처럼 일반적인 물질을 수직으로 압축하면 수평성분은 늘어나게 된다. 반대로 음의 푸아송 비를 가지는 경우 수직으로 압축하면 수평성분도 줄어들게 되는데 이렇게 음의 푸아송 비를 가지는 물질을 auxetics라고 한다. 푸아송 비가 -1이 되는 경우는 수직으로 압축된 만큼 수평으로도 같은 비율로 줄어들다는 것을 의미한다.

지금까지 푸아송 비가 -1인 조건에서 탄성변형에 적응하며 준등각사상을 만족하는 스마트 변환광학을 이론적으로 유도하였다. 이렇게 탄성변형에 의하여 준등각사상을 만족하는 내부 격자가 생성되면 그 격자를 이루는 단위구조 별로 변환광학을 만족하는 물성을 가져야 이론을 실제로 적용시킬 수 있다. 단위구조를 이루는 유전체와 주변공기의 유전율과 개별 부피비를 이용

하여 유효유전율을 구할 수 있는데 만약에 변형에 의해서 단위구조의 부피가 줄어들 경우에도 유전체의 부피는 유지가 되므로 전체 부피비에서 유전체가 차지하는 비율이 높아지게 된다. 따라서 다음의 유효 유전율 식을 만족하는 물성을 탄성변형에 따라 구할 수 있으며 준등각사상을 만족하는 단위구조들의 물성분포는 변환광학조건을 만족하게 된다.

$$\epsilon'_{eff} = \epsilon_{air} + (\epsilon_{dielectric} - \epsilon_{air})f \quad (7)$$

### 2.3 스마트 메타물질을 이용한 범용 변환광학 장치

앞에서 이론적으로 설계한 스마트 메타물질을 실제로 제작하기 위해서 4개의 다리를 가지는 포와송 비가 -1이 되는 구조를 고안하였다. 2차원 평면에서 작동하는 이 구조체는 4개의 유전체로 이루어진 다리가 하나의 단위구조를 형성하고 주변의 다른 단위구조들과 연결되어 4각형 격자를 형성한다. 그림 4에서 보이는 것처럼 평면에서 한쪽방향으로 압축할 경우 밀려난 다리가 나머지 다리들을 위로 끌어올려 전체적으로 동일



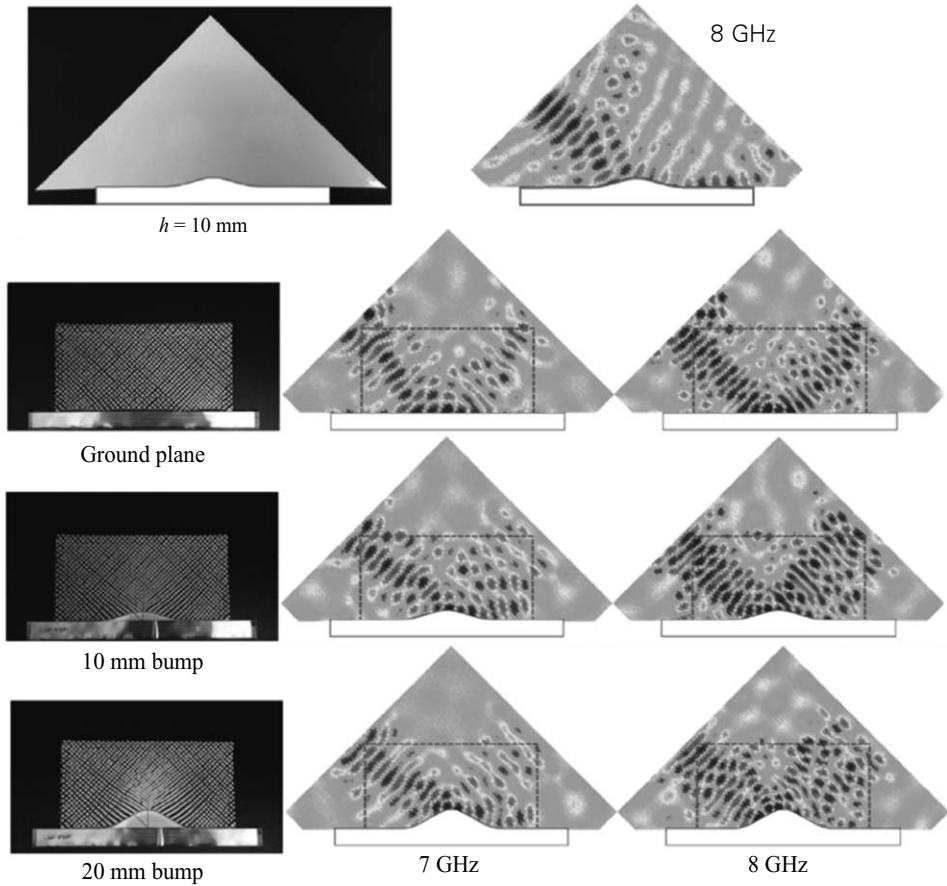


그림 6 스마트 투명망토 실험결과(좌측 열은 샘플사진)<sup>6)</sup>

하게 면적이 줄어들어 드는 것을 알 수 있다.

위에서 설계한 구조를 가지고 실제로 스마트 메타물질 샘플을 제작하였다. 유전율이 10.2인 PTFE ceramic을 재료로 하나의 다리가 1.2 mm × 1.2 mm × 10 mm의 크기를 가진 샘플로 총면적은 200 mm × 100 mm의 크기로 완성이 되었다. 그림 5에서 보이는 것처럼 이 스마트 메타물질 샘플은 -1에 가까운 음의 푸아송 비를 가지기 때문에 수평방향으로 압축시켰을 때 수직성분도 줄어들어 가는 것을 알 수 있다. 또한 이때 줄어든 부분의 면적이 줄어들면서 중심부분이 밀도가 높아짐을 볼 수 있는데 이는 유효 유전율이 더 높음을 의미한다.

위의 샘플은 2차원에서의 대부분 변형에 대하여 그 변형에 대응하는 변환광학물성을 가지게

되어 범용성을 가진 변환광학장치로 이용이 가능함을 7~8 GHz의 전파영역에서 실험적으로 증명하였다. 실험샘플의 단위구조가 파장보다 훨씬 작기 때문에 유효 유전율을 가진 메타물질로 인식이 가능하다. 250 mm × 250 mm의 2차원 전기장의 세기를 읽는 실험장치로 파동이 입사할 경우 스마트 메타물질 샘플이 반응하는 것을 관찰하였다.

그림 6은 금속표면을 가진 곡면 범프에 파동을 입사할 때 산란되는 결과와 스마트 메타물질 샘플이 높이가 다른 범프에 덮였을 때 입사되는 파동의 진행결과이다. 첫 줄의 산란되는 결과는 범프 위에 투명망토가 없이 균일한 실리콘고무 배경으로 입사된 전파의 반사 및 산란을 측정된 결과이다. 범프의 영향으로 반사면에서 두 개의 빔

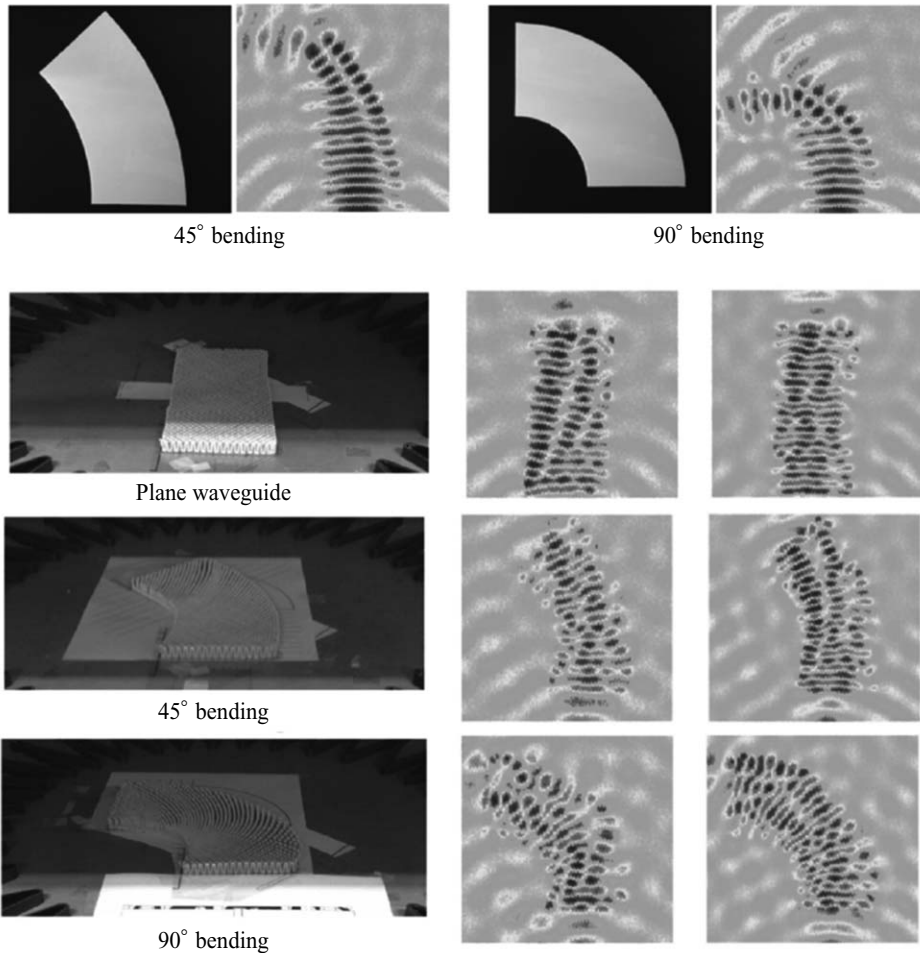


그림 7 스마트 도파로 실험결과(좌측 열은 샘플사진)<sup>(6)</sup>

으로 갈라지는 것을 볼 수 있다. 두 번째 줄은 평면 위에 변형전의 투명망토 샘플을 놓고 반사를 찍은 결과이고 3,4 번째 줄은 높이가 다른 범프 위에 덮인 스마트 메타물질 투명망토 샘플에 입사하는 파동을 마치 평면반사처럼 만들어주는 측정결과이다. 이러한 결과들로부터 범프의 높이나 유무에 상관없이 동일한 파동의 거동 결과를 얻을 수 있으므로 스마트 메타물질 샘플이 변형에 적응하는 스마트 투명망토로서 기능함을 실험적으로 확인할 수 있다.

그림 7은 다른 변환광학장치인 도파로를 실험한 결과이다. 일반적인 도파로가 내부의 전반사에 의하여 진행하지만 변환광학을 이용한 도파

로의 경우 파동이 구부러진 형상을 타고 흐르는 것처럼 휘어지게 된다. 투명망토로 쓰였던 스마트 메타물질 샘플을 그대로 스마트 도파로로 실험에 사용하였다. 투명망토 실험과는 다르게 샘플의 한쪽 면에 입사되는 파동이 구부러지는 반대쪽 면에서 어떻게 나오는지 보았다. 맨 윗줄의 두 가지 결과는 대조군으로 각각 균일한 실리콘 고무로 45°와 90°로 구부러진 형상의 고정된 도파로를 제작하여 변환광학이 적용되지 않는 경우 파동이 내부에서 전반사 되어 원하는 위상이 변화 및 간섭함을 보았다. 두 번째 줄은 일자로 놓인 도파로로 아무 변형이 없기 때문에 파가 그대로 진행함을 볼 수 있다. 세 번째와 네 번째

줄은 앞선 대조군과 같은 45°와 90°로 구부러진 도파로이며 대조군과는 다르게 내부에서 위상이 유지되면서 파동이 휘어지는 진행 거동을 볼 수 있다.

### 3. 맺음말

메타물질은 물질과 상호작용하는 빛의 파장보다 작은 구조체가 주기적으로 존재할 경우 이를 개별적으로 인식하지 않고 하나의 새로운 물성을 가지는 연속체로 인식한다는 점을 이용하여 자연계에서 얻기 어려운 새로운 특성을 지닌 구조체를 응용하는 연구분야이다. 최근에는 변환광학을 이용하여 투명망토로 쓰일 수 있는 메타물질에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 연구진이 개발한 스마트 메타물질은 탄성변형에 적응하여 내부의 물성분포가 변환광학을 스스로 만족하도록 재구성되는 특성을 가지고 있다. 특히 음의 탄성을 가질 경우 임의의 탄성변형에 대해서 변환광학을 만족하는 스마트 메타물질로서 작동할 수 있음을 기본방정식인 후크의 법칙으로부터 이론적으로 유도하였다. 또한 스마트 메타물질 샘플을 제작하여 전파영역에서 숨기려는 물체의 크기에 상관없이 작동하는 카펫형 투명망토와 자유롭게 구부러지는 스마트 도파로를 실험적으로 구현하였다. 이처럼 스마트 메타물질 장치는 탄성 변형에 적응하여 성능을 유지하는 특성을 가지면서 범용성이 높은 변환광학 장치로서의 역할을 수행할 수 있는 가능성을 지니고 있으며 이러한 연구 결과들은 전파영역뿐만 아니라 광학이나 음향 등 파동을 이용

하는 다른 분야에도 확장되어 적용될 수 있을 것이다. **KSNVE**

### 참고문헌

- (1) Pendry, J. B., Schurig, D. and Smith, D. R., 2006, Controlling Electromagnetic Fields, Science, Vol. 312, pp. 1780~1782.
- (2) 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, pp. 977~980.
- (3) Li, J. and Pendry, J. B., 2008, Hiding under the Carpet: A New Strategy for Cloaking, Phys. Rev. Lett., Vol. 101, 203901.
- (4) Shin, D., Urzhumov, Y., Jung, Y., Kang, G., Baek, S., Choi, M., Park, H., Kim, K. and Smith, D. R., 2012, Broadband Electromagnetic Cloaking with Smart Metamaterials, Nat. Commun, Vol. 3, 1213.
- (5) Chang, Z., Zhou, X., Hu, J. and Hu, G., 2010, Design Method for Quasi-isotropic Transformation Materials based on Inverse Laplace's Equation with Sliding Boundaries. Opt. Exp., Vol. 18, pp. 6089~6096.
- (6) Shin, D., Urzhumov, Y., Lim, D., Kim, K. and Smith, D. R., 2014, A Versatile Smart Transformation Optics Device with Auxetic Elasto-electromagnetic Metamaterials, Sci. Rep., Vol. 4, 4084.