

좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반
전자기파 투명화 기술

유인상·이용식
연세대학교 전기전자공학부

요 약

1967년 처음 보고된 메타 물질은 이론적 제안에 머물러 있던 그 독특한 특성이 2000년대에 들어서 실험적 검증을 거치면서 물리학과 공학 분야의 새로운 연구 분야로 크게 각광받고 있다. 특히 그 구현 기술의 획기적인 발전으로 음의 굴절률뿐만 아니라 자연계에서 얻을 수 없는 유전율과 투자율 구현이 가능해짐으로써 기존 기술의 단순한 대체 기술이 아닌 새로운 응용 분야를 열 수 있는 기술로 평가 받으며 전례 없는 응용 가능성을 보여주고 있다. 그 중에서도 메타 물질 기반의 전자기파 투명화 기술은 기존 스텔스 기술보다 훨씬 경제적이란 큰 장점과 함께 가시광선 대역에 응용되어 투명 망토를 구현할 수 있는 꿈의 기술로 주목 받고 있다. 본 논문에서는 전자기파가 휘어서 진행함으로써 마치 자유공간과 같은 효과를 나타내는 것을 기본 원리로 하는 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술의 기본 이론과 현주소, 향후 과제에 대해서 다룬다.

I. 서 론

메타 물질은 구성 물질의 화학적 조성보다는 그 전자기적 특성이 구조에 의해서 결정되는 설계된 물질을 일컫는다. 즉, 자연계에 존재하는 물질로부터 얻을 수 없는 독특한 특성을 바탕으로 한 다양한 분야의 응용 가능성 때문에, 메타 물질은 물리학과 공학 분야 모두에서 중요한 연구 분야로 근래에 자

리매김하고 있다.

러시아의 물리학자 Veslago에 의해, 1967년 이론적 접근이 처음으로 이루어진 메타 물질의 일종인 좌선회(left-handed) 물질에서 시작해서^[1], 최근 들어 음의 유전율 혹은 음의 투자율^{[2][3]}, 그리고 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 갖는 메타 물질이 고안^[4], 실험적으로 검증되면서 획기적인 전기를 맞이하게 된다^{[5]~[7]}. 이러한 메타 물질 연구 성과는 마이크로파 외에도 광파나 음파에도 적용되어 최근 국내 연구팀에 의해 메타 물질 내에서 음파의 역 도플러 현상을 실험적으로 관찰한 결과가 보고된 바 있다^[8]. 특히 음의 굴절률 구현으로 가능한 초 고해상도 렌즈(super lens)를 이용하면 회절 한계(diffraction limit)로 제한된 기존 광학 렌즈의 물리적 한계를 뛰어넘어서 원자와 같이 가시광선의 파장보다 훨씬 작은 물체도 관찰 가능하다는 이론이 제안되어^[9] 마이크로파 대역에서 실험적으로 검증된 바 있다^[10]. 이 기술은 초 고 해상도 자기 공명 영상(MRI) 기술에 응용되어 인체 내 세포 탐지에 사용되어온 기존 자기 공명 영상 기술을 획기적으로 발전시킬 것으로 크게 기대 받고 있다. 이밖에도 투명 물질로의 응용^[11] 등 2000년대 들어서 메타 물질 분야의 연구 결과는 전례 없는 응용 가능성을 보여주고 있다.

특히 메타 물질 구현 기술의 획기적인 발전으로 음의 굴절률뿐만 아니라 자연계로부터 얻을 수 없는 유전율, 투자율과 방향성을 갖는 물질을 구현하기에 이르렀으며, 이를 바탕으로 좌표계 변환을 이용한 전자기파 투명화 기술로 이어져 구현되기에 이르렀다^[12].

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원에 의해 수행되었습니다.

스텔스라는 표현으로 더 많이 알려져 있는 전자기파 투명화 기술에는 여러 가지 방법이 있는데, 좌표계 변환을 이용한 방법은 특정한 전자기적 특성을 갖는 물질로 금속과 같은 물체를 감싸므로써 전자기파가 물체에 반사되지 않고 그 물체를 피해서, 즉 그 물체 주위를 돌아서 진행하였다가 원래의 궤적을 되찾아 전파하도록 하는 것이 기본 원리이다. 결국 전자기파 투명화 물질을 포함한 전체 구조물은 외부에서 바라보았을 때 마치 아무것도 없는 자유 공간처럼 보이게 된다.

좌표계 변환에 기반한 전자기파 투명화 물질은 공간의 함수이자 비등방성인 유전율과 투자율 등 비교적 복잡한 전자기 특성을 가져야 하는데, 이러한 물질의 구현은 메타 물질 기술로 구현 가능하다. 메타 물질 기반의 스텔스 기술은 물질의 조성 과 투명화시키고자 하는 물체의 적절한 기하학적 구조 설계를 통해 전자기파의 흡수율을 높이고 반사율을 낮추는 원리에 기반한 기존 스텔스 기술과는 다른 것으로 설계 기술이 매우 복잡하다는 단점이 있으나, 기존의 기술과는 달리 투명화시키고자 하는 물체의 조성에 독립적이어서 상대적으로 경제적인 제작이 가능하다는 매우 큰 장점을 갖는다.

본 논문에서는 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술의 기본 원리와 현재 기술 수준을 소개하고, 앞으로의 발전 방향에 대해 다루고자 한다.

II. 좌표계 변환을 이용한 투명화 물질 설계 원리

전자기파는 균일한 매질 내에서 직진한다. 메타 물질을 이용하여 이러한 전자기파에 대해 임의의 물체를 투명화시키는 기술은 그 물체를 특정한 전자기적 성질을 갖는 메타 물질로 포장함으로써, 직진해야 하는 전자기파가 물체를 감싸서 나가도록 하는

것이 기본 원리이다. 이는 물질의 유전율과 투자율의 공간적인 분포를 조절해서 전자기의 보존량인 전속 밀도, 자속 밀도와 포인팅 벡터가 전자기파 투명화에 필요한 방향으로 전파되도록 함으로써 가능하다. 따라서 메타 물질에 기반한 전자기파 투명화 기술은 좌표계 변환을 기반으로 한다.

먼저, 직각 좌표계(x, y, z)내의 자유 공간에 존재하는 균일한 전기장이 특정 영역을 피하여 돌아가야 하는 경우를 생각해 보자. 이때 임의로 변형 가능한, 탄성이 있는 좌표계(q_1, q_2, q_3)를 가정해 보자. 이 두 좌표계 사이의 관계는 좌표계 변환식에 의해 결정되며 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_1(x, y, z), q_2(x, y, z), q_3(x, y, z) \quad (1)$$

맥스웰 방정식은 어느 좌표계에서도 그 형태가 유지되므로(form-invariant), 결국 좌표계 변환 후 새로운 좌표계에서는 변환 전과 다른 유전율 및 투자율이 요구된다. 변환 후 좌표계의 유전율(ϵ'), 투자율(μ') 및 전계 강도(E')와 자계 강도(H')는 변환 전 직각 좌표계에서의 유전율(ϵ), 투자율(μ) 및 전계 강도(E)와 자계 강도(H)는 다음의 변환 법칙을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} (\epsilon')^{ij} &= \epsilon g^{ij} \hat{e}'_1 \cdot (\hat{e}'_2 \times \hat{e}'_3) Q_1 Q_2 Q_3 (Q_i Q_j)^{-1}, \\ (\mu')^{ij} &= \mu g^{ij} \hat{e}'_1 \cdot (\hat{e}'_2 \times \hat{e}'_3) Q_1 Q_2 Q_3 (Q_i Q_j)^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

$$E'_i = Q_i E_i, H'_i = Q_i H_i \quad (3)$$

여기서

$$Q_{ij} = \frac{\partial x}{\partial q_i} \frac{\partial x}{\partial q_j} + \frac{\partial y}{\partial q_i} \frac{\partial y}{\partial q_j} + \frac{\partial z}{\partial q_i} \frac{\partial z}{\partial q_j}, Q_i^2 = Q_{ii}$$

이고, g^{ij} 는 계량 텐서(metric tensor), \hat{e}'_i 는 변환 후 좌표계의 단위 기저 벡터이며 $ij=1,2,3$ 이다. 보다 상세한 유도 과정은 참고문헌 [12]에서 찾을 수 있다.

이 때 좌표계 변환 후의 전자기장은 변환 이전과 동일한 구조적 관계를 만족해야만 한다.

$$\overline{D}' = \epsilon_0 \epsilon' \overline{E}', \quad \overline{B}' = \mu_0 \mu' \overline{H}' \quad (4)$$

여기서 ϵ' 와 μ' 는 각각 (2)에서 계산된 투명화 물질의 유전율 및 투자율로 비등방 및 비균질 특성에 따라 텐서량이다.

III. 원형 및 원통형 물체 투명화

가장 간단한 구조인 반지름이 R_1 인 구 영역의 전자기파 투명화를 위해 이를 감싸고 있는, 안쪽과 바깥쪽 반지름이 각각 R_1 과 R_2 인 환형의 투명화 물질을 위의 좌표계 변환을 이용하여 설계할 수 있다. 투명화하고자 하는 구 주위의 전기장과 자기장이 $R_1 < r < R_2$ 에 집중되도록 하는 선형 변환 식은 다음과 같다.

$$r' = R_1 + \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2} \right) r, \quad \varphi' = \varphi, \quad z' = z \quad (5)$$

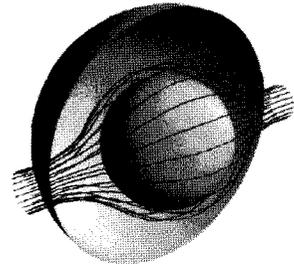
이 식에 변환 법칙 (2)를 적용하면, 투명화 물질의 유전율과 투자율은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r = \mu_r &= \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right) \frac{(r - R_1)^2}{r}, \\ \epsilon_\theta = \mu_\theta &= \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right) \\ \epsilon_\varphi = \mu_\varphi &= \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

이를 적용하면 투명화 물질 내에서 전자기파의 궤적은 [그림 1]과 같다^[12].

특정 편파에 대해서 (2)의 변환 법칙을 이용하며, 또 다른 간단한 구조인 원통형 물체의 투명화 물질 구현도 가능하다.

원통형 투명화 물질 설계를 위해, 좌표계 변환을



[그림 1] 구형 투명화 물질 내에서의 전자기파의 궤적^[12]

통하여 $0 < \rho < \rho_2$ 의 공간을 환형의 $\rho_1 < \rho' < \rho_2$ 의 공간으로 선형 변환을 이용하여 압축시켜 보면, 변환 전후의 좌표계 사이의 관계는 다음으로 표현된다.

$$\rho' = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \right) \rho + \rho_1, \quad \varphi' = \varphi, \quad z' = z \quad (7)$$

여기서 ρ, φ, z 는 변환 전의 원통 좌표계 성분, ρ', φ', z' 는 변환 후의 원통 좌표계 성분이며 ρ_1 과 ρ_2 는 각각 원통형 투명화 물질의 안쪽, 바깥쪽 반지름이다. 식 (7)의 선형 변환 외에 보다 높은 차수의 변환이 가능하며, 이 경우 투명화 물질 설계에 추가적인 자유도가 확보되어 임피던스 정합의 매개변수로서 이용될 수 있다^[13].

선형 변환식 (7)을 좌표계 변환 법칙에 적용하면, 원통형 투명화 물질의 유전율과 투자율은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \epsilon_\rho = \mu_\rho &= \frac{\rho - \rho_1}{\rho}, \quad \epsilon_\varphi = \mu_\varphi = \frac{\rho}{\rho - \rho_1}, \\ \epsilon_z = \mu_z &= \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \right)^2 \left(\frac{\rho - \rho_1}{\rho_2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 보면, 주어진 원통형 구조에 대해 매우 복잡한 전자기 특성을 갖는 메타 물질 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다. 하지만 실험 기기에서 전기장이 z 축 방향으로 편파되어 있다는 특성을 고려하여 유도할 경우, 스플릿 링 공진기(split-ring resonator)를

이용한 메타 물질로 구현 가능한 다음의 단순화된 유전율과 투자율을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_z = \left(\frac{\rho_2}{\rho_2 - \rho_1} \right)^2, \mu_\rho = \left(\frac{-\rho - \rho_1}{\rho} \right)^2, \mu_\phi = 1 \quad (9)$$

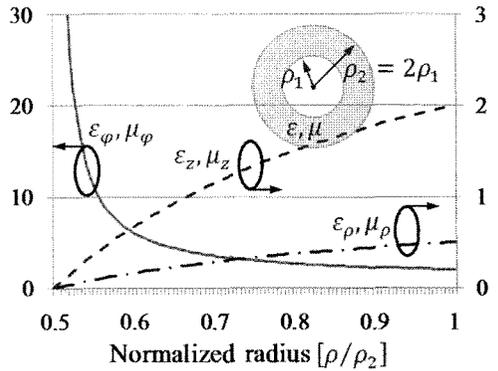
식 (9)의 유도는 메타 물질 내에서의 전자기파의 행동이 단지 분산 관계(dispersion relation)에 의존함에서 기인한 것인데, 이에 기반할 경우의 투명화 물질의 최외각 경계에서의 임피던스 정합이 이루어지지 않아서 ($Z = \sqrt{\mu_\phi / \epsilon_z} |_{r=R_2} \neq 1$) 반사파가 발생한다는 단점이 있다. [그림 2]에 식 (8)과 식 (9)를 이용하여 계산한 원통형 물체 전자기파 투명화에 필요한 물질의 유전율과 투자율을 나타내었다.

IV. 모의 실험 결과

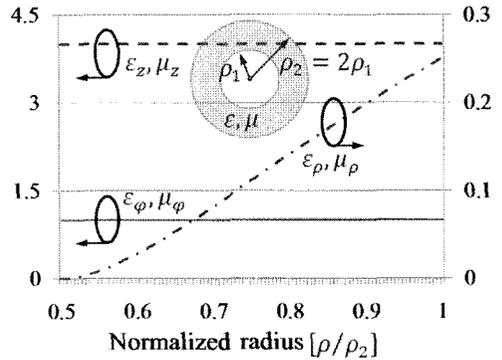
먼저 설계된 투명화 물질의 투명화 성능은 모의 실험에서 평면파의 동위상면을 관찰함으로써 평가할 수 있다. 식 (8)과 (9)의 유전율과 투자율을 이용하여 2 GHz의 TE 편파 평면파가 투명화 물질로 포장된 원통형 물체에 입사하여 진행되는 경우의 정규화된 전기장 2차원 모의 실험 결과를 [그림 3]에 나타내었다.

[그림 3](a)는 투명화 물질이 식 (8)로 계산된 이상적인 유전율과 투자율을 갖는 경우의 모의 실험 결과이다. 투명화 물질 밖 영역에서 전자기파는 산란이나 산란이 없이, 평면파 형태가 유지되며, 투명화 물질 안에서는 내부의 원통형 물체를 피해 투명화 물질을 따라 돌아가는 양상을 보여주고 있다. 이때 투명화 물질 안팎에서 포인팅 벡터의 방향이 평행하지 않으므로 투명화 물질이 상당한 비등방성 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

정량적인 투명화 물질의 성능 평가를 위해 원통형 물질의 단위 길이당 총 산란된 전력의 양을 계산할 수 있다. 이는 투명화 물질이 있을 때와 없을 때의 전력의 차이를 원통형 물질의 직경만큼의 선에



(a) 식 (8)을 이용하여 계산된 이상적인 유전율과 투자율

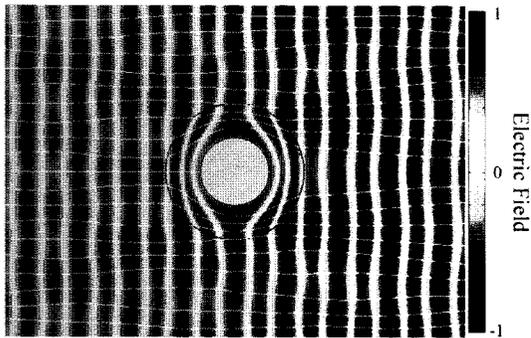


(b) 식 (9)를 이용하여 계산된 단순화된 유전율과 투자율

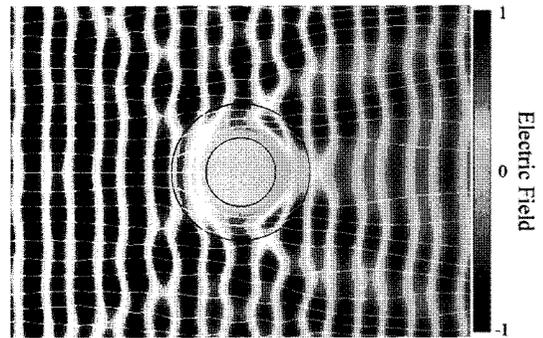
[그림 2] 원통형 투명화 물질을 위한 비유전율과 비투자율

입사하는 전자기파의 전력으로 정규화시킨 산란 폭(scattering width)으로, 2차원 RCS(Radar Cross Section)에 해당하는 개념이다^[14]. [그림 3](a)의 경우에 계산된 산란 폭은 0.06으로 설계된 투명화 물질 그 전자기파 투명화 성능이 수치적으로 매우 효과적임을 알 수 있다.

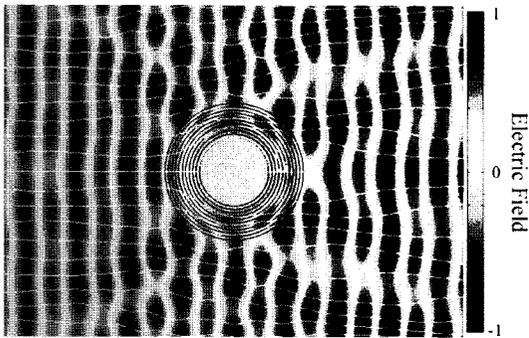
[그림 3](b)는 투명화 물질이 식 (9)로 계산된 단순화된 유전율과 투자율을 갖는 경우의 모의 실험 결과이다. 앞서 언급했듯이 최외각 경계에서의 임피던스 정합이 이루어지지 않아 반사파가 발생하였음을



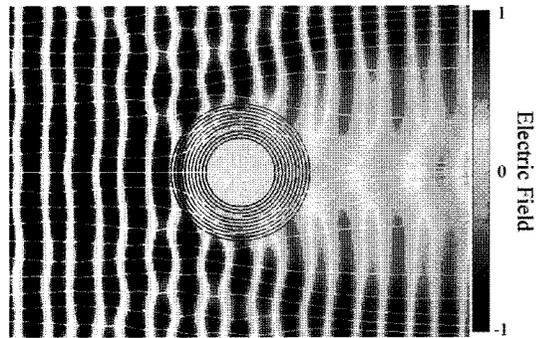
(a) 투명화 물질이 이상적인 유전율과 투자율을 갖는 경우



(b) 투명화 물질이 단순화된 유전율과 투자율을 갖는 경우



(c) 투명화 물질이 10개의 층으로 근사화된 단순화된 유전율과 투자율을 갖는 경우



(d) 투명화 물질이 10개의 층으로 근사화된 단순화된 유전율과 투자율을 가지며 손실이 있는 경우($\tan \delta_{\text{cm}}=0.1$)

[그림 3] 원통형 투명화 물질 근처의 전기장 2차원 모의 실험 결과. 중심 원통의 경계는 완전도체(PEC)이며, 흰 선은 전력의 흐름, 즉 포인팅 벡터를 나타낸다.

결과에서 확인할 수 있다. 계산된 산란 폭은 0.36으로, [그림 3](a)의 이상적인 경우와 비교했을 때 유전율 및 투자율의 단순화로 인해서 전자기파가 상대적으로 많이 산란되고 있음을 정량적으로 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 동위상 파면과 전력의 흐름을 보면, 이상적인 경우 마찬가지로 전자기파가 휘어서 원통형 물체를 피해 돌아가도록 하는 투명화 물질 자체의 역할은 유지됨을 확인할 수 있다.

[그림 3](c)는 식 (9)로 계산된 투명화 물질의 단순화된 유전율과 투자율을 10개의 불연속적인 층으로 근사화하여 사용한 모의 실험 결과이다. 이는 실제

구현 가능한 투명화 물질 구조를 모의 실험한 것이다. 그 결과, 실제 구현 가능한 유전율과 투자율로도 투명화 기능을 어느 정도 구현할 수 있음을 확인할 수 있다. 다만, 불연속 층을 이용하여 투명화 물질을 구현할 경우 각각의 계면에서 임피던스 정합이 이루어지지 않아서 전자기파의 반사 정도가 증가하여 산란 폭이 0.56으로 커진다.

[그림 3](d)는 [그림 3](c)와 동일한 투명화 물질을 가정하되 메타 물질 실제 구현시 불가피한 손실이 투명화 기능에 미치는 영향을 알아보기 위해서 전기적, 자기적 손실 탄젠트를 각각 0.1로 설정하여 모의

실험한 결과이다. 이 경우, [그림 3](c)와 마찬가지로 임피던스 비정합으로 인한 반사파가 발생하여 모노스태틱(monostatic) 투명화에 있어서의 성능이 감소하리라는 것을 모의 실험 결과 예측할 수 있다. 이와 더불어, 투명화 물질을 통과한 전자기파의 동위상면이 투명화 물질을 통과하지 않은 부분의 동위상면보다 다소 지연되어 있음을 확인할 수 있는데, 이를 통해 메타 물질에 인한 손실은 바이스태틱(bistatic) 투명화의 성능 저하도 동반할 것임 예측할 수 있다. 이러한 성능 저하 문제의 정량적 분석을 위한 산란 폭은 <표 1>에 정리되어 있다. 더불어, 원통형 투명화 물질의 손실 탄젠트 값에 의한 성능 저하는 미 산란(mie scattering) 모델을 통한 구형 투명화 물질 분석 방법에 의해 이론적으로도 증명되어 있다^[15].

V. 원통형 투명화 메타 물질의 구현

식 (8) 및 (9)와 같이, 좌표계 변환을 이용한 투명화에서 요구되는 유전율과 투자율을 갖는 물질 구현을 가능케 하는 것이 메타 물질 기술로, 지금까지 보고된 것은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

첫번째는 [그림 4](a)의 얇은 도체선 구조(TW, Thin-wire structure)로 전기장이 이에 평행하게 입사하는 경우에 등가의 전기 쌍극자 모멘트가 유도됨으로써 다음과 같은 유효 유전율 값을 갖는다^{[2],[16]}.

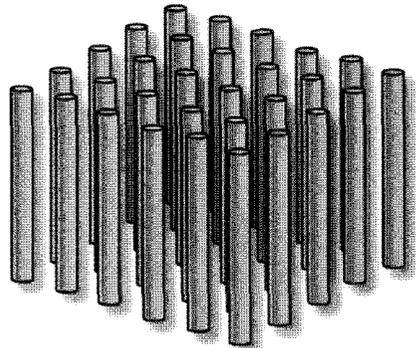
$$\epsilon_{eff} = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + j\omega\gamma} \quad (10)$$

<표 1> 모의 실험과 각 경우의 산란 폭

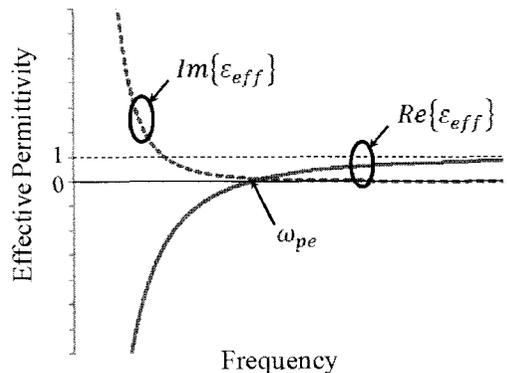
	이상적인 유전율과 투자율		단순화된 유전율과 투자율	
	연속	10개층	연속	10개층
무손실	0.06	0.27	0.36	0.56
$\tan \delta_{e,m}=0.01$	0.54	0.72	0.86	1.01
$\tan \delta_{e,m}=0.1$	2.04	2.08	2.29	2.32

여기서 ω_{pe} 는 전기적 플라즈마 주파수(electric plasma frequency)로, 얇은 도체선의 두께와 단위 셀의 크기의 함수이다. γ 는 감쇠 인자(damping factor)로 도체선의 구조와 도체 전도도(conductivity)의 함수이다. 즉, 도체선의 구조와 주기를 이용하여 [그림 4](b)의 예처럼 주파수 특성을 보이는 유전율의 메타 물질 설계가 가능하며, 특정 주파수 대역에서는 음의 유전율을 나타낼 수도 있다.

다른 하나는 [그림 5](a)의 스플릿 링 공진기 구조(SRR, Split-Ring Resonator)로, 자기장이 수직으로 입사할 경우, 등가의 자기 쌍극자 모멘트를 유도함으로써, 다음과 같은 유효 투자율 값을 갖는다^{[3],[16]}.

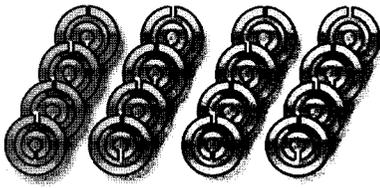


(a) 얇은 도체선 구조

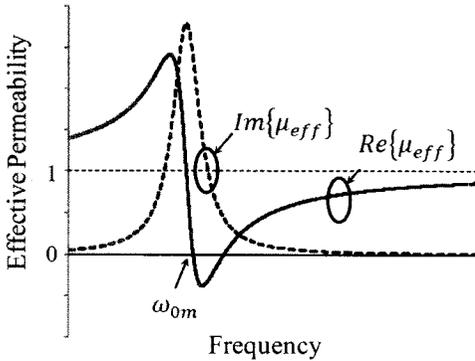


(b) 얇은 도체선 구조의 유효 유전율 예

[그림 4] 얇은 도체선 구조와 유효 유전율



(a) 스플릿 링 공진기 구조



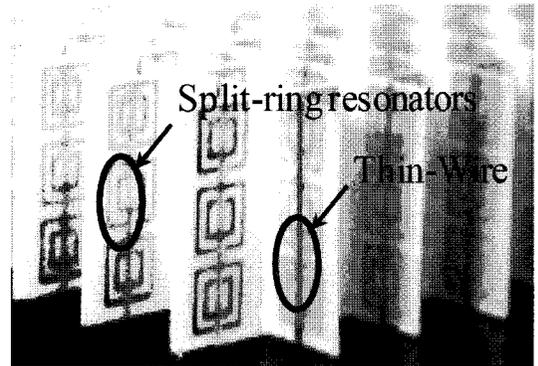
(b) 스플릿 링 공진기 구조의 유효 투자율 예

[그림 5] 스플릿 링 공진기 구조와 유효 투자율

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F\omega^2}{\omega^2 - \omega_{0m}^2 + j\omega\gamma} \quad (11)$$

여기서 F 는 $(a/p)^2$ (a 는 스플릿 링 공진기의 안쪽 링의 반지름, p 는 단위 셀의 한 변의 길이), ω_{0m} 는 자기 공명 주파수로 스플릿 링 공진기 구조의 함수이다. 또한 γ 는 감쇠 인자로 스플릿 링 공진기의 구조와 도체 전도도의 함수이다. 얇은 도체선의 구조와 마찬가지로 스플릿 링 공진기의 구조와 주기를 이용하여 [그림 5](b)의 예처럼 주파수 특성을 보이는 투자율의 메타 물질 설계가 가능하며, 특정 주파수 대역에서는 음의 투자율을 나타낼 수도 있다.

두 구조를 조합함으로써, 임의의 유전율과 임의의 투자율을 갖는 메타 물질을 설계할 수 있으며, 나아가서 동시에 음의 값을 갖는 좌선회(left-handed) 물질의 구현도 가능하다. 즉, 앞서 언급한 얇은 도체선 구조의 음의 유전율 주파수 대역과 스플릿 링 공진기의 음의 투자율 주파수 대역을 겹치도록 설계함으



[그림 6] TW 및 SRR 구조의 조합으로 구현된 최초의 좌선회 물질^[5]

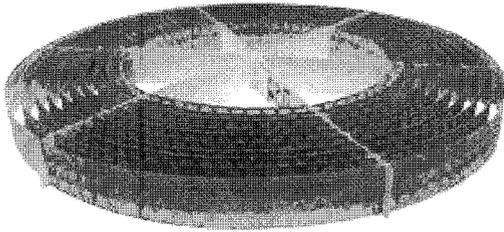
로써, 효과적으로 음의 굴절률을 갖는 메타 물질 설계가 가능하다^[4].

원통형 투명화 구현을 위해 식 (9)에서 계산된 투자율을 갖는 비등방성인 메타 물질의 구현도 스플릿 링 공진기 구조로 가능하다. [그림 7](a)는 실제 구현된 원통형 투명화 물질이며, 이에 대한 실험 결과는 [그림 7](b), [그림 7](c)와 같다^[11].

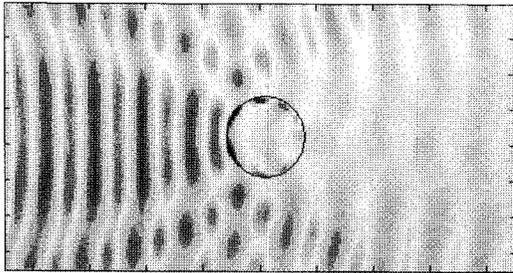
실험은 [그림 7](a)의 투명화 물질 가운데에 원통형 구리 물체를 놓고 이를 평면 도파관 내부에 위치시킨 뒤 X-band에서 그 주위의 전기장을 측정함으로써 이루어졌다. 구현된 투명화 물질의 실험 결과상 최적 주파수는 설계 주파수와 매우 근접한 8.5 GHz이다. 측정된 전자기파는 모의 실험 결과와 유사하게 투명화 물질 내에서 가운데 위치한 원통형 구리를 피하여 전파하고 있음을 [그림 7](c)에서 알 수 있다^[11].

VI. 향후 과제

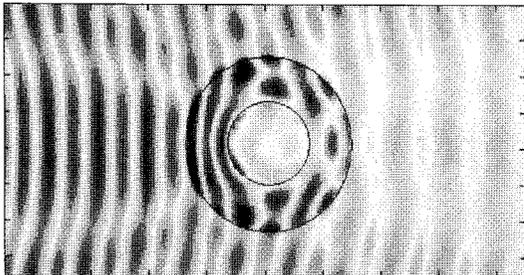
본 논문에서는 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술을 구와 원통형 물체에 적용한 최근 연구 결과의 기본 이론과 실험 결과를 소개하였다. 최근에는 타원형 기둥과 직육면체 등, 본 논문에서 언급된 물체보다 복잡한 형태의 물체에



(a) 메타 물질로 구현된 원통형 투명화 물질



(b) 구리 원통만 있을 때 측정된 전기장



(c) 투명화 물질이 있는 경우 측정된 전기장

[그림 7] 원통형 투명화 물질과 실험 결과^[11]

대한 투명화 연구도 진행된 바 있다^{[17]~[19]}. 하지만 좌표계 변환에 기반한 투명화 기술을 대칭성이 없는 구조에 적용할 경우 복잡한 설계 수식에 기반한 메타 물질 기술을 요함과 동시에, 얇은 도체선 구조 및 스플릿 링 공진기 구조의 매우 좁은 주파수 특성 때문에 현재의 기술로는 실제 운용 장비에 운용되기 어려울 수 있다.

또한, 좌표계 변환에 기반한 투명화 기술은 필연적으로 상반성(reciprocity)에 의한 한계를 갖는다. 즉, 투명화 물질로 포장된 물체는 외부 전파에 대해서

투명함과 동시에 물체 내에서도 외부의 전자기파를 관찰할 수 없다. 따라서 향후 현단계 기술에 의한 투명 망토 개발이 이루어지더라도, 그것의 응용 범위는 제한적일 수밖에 없다.

이러한 두 가지 요인과 투명화 성능에 손실의 영향을 최소화시키는 방법 등은 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술이 극복해야 할 향후 과제로 남아 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 최근 발표된 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술의 기본 원리에 대해 알아보고, 이를 대칭성적 구조인 구형과 원통형 물체에 적용, 설계 수식을 유도하였으며, 모의 실험을 통하여 TE 평면파의 전기장 패턴을 관찰함으로써 그 성능을 확인하였다. 또한, 전기적, 자기적 손실이 투명화 성능에 미칠 수 있는 영향에 대해서도 모의 실험을 통하여 알아보았다.

이러한 좌표계 변환을 이용한 메타 물질 기반 전자기파 투명화 기술은 구형이나 원통형 물체와 같이 대칭성이 있는 물체에 대해서는 완벽한 설계 수식 도출이 가능한 반면, 대칭성이 없는 복잡한 구조에 대해서는 현재의 기술 수준에서는 어려울 수 있다는 과제도 남아 있다. 하지만, 물체의 기하학적 최적 구조 설계와 전자기파 흡수 물질 코팅 기술에만 초점을 맞추었던 기존의 연구 방향에서 크게 벗어나, 메타 물질의 새로운 연구와 응용 가능성의 장을 열었음은 물론, 다양한 방법의 투명화 기술 연구의 시발점이라고 평가 받고 있다.

더불어 본 논문에서 언급된 방법의 투명화 기술은 비단 스텔스 기술에만 국한되지 않고, 가령 크기가 큰 이동체 플랫폼에 탑재된 안테나의 경우 플랫폼의 구조물 때문에 그 방사 방향으로 되려 영점(null)이 발생하는 문제, 또한 고 전력 시스템에서 더

속 문제시되는 배열 안테나의 고질적인 안테나 간 근거리장 커플링 문제 등의 해결책으로서의 응용 가능성 또한 보여주고 있다^[20].

참 고 문 헌

- [1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan., Feb., 1968.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 76, pp. 4773-4776, Jun. 1996.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [4] D. R. Smith, Willie J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 4184-4187, May 2000.
- [5] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [6] C. G. Parazzoli, R. B. Greegor, K. Li, B. E. C. Koltenbah, and M. Tanielian, "Experimental verification and simulation of negative index of refraction using snell's law", *Phys. Rev. Lett.*, 90: 107401, Mar. 2003.
- [7] Koray Aydin, Kaan Guven, Costas M. Soukoulis, and Ekmel Ozbay, "Observation of negative refraction and negative phase velocity in left-handed metamaterials", *Appl. Phys. Lett.*, 86: 124102, Mar. 2005.
- [8] <http://physicsworld.com/cws/article/news/37622>.
- [9] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens". *Phys. Rev. Lett.*, 85 : 3966-3969, Oct. 2000.
- [10] A. Grbic, G. V. Eleftheriades, "Overcoming the diffraction limit with a planar left-handed transmissionline lens", *Phys. Rev. Lett.*, 92: 1174031-4, Mar. 2004.
- [11] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science*, vol. 314, pp. 977-980, Nov. 2006.
- [12] J. B. Pendry, D. Schurig, and D. R. Smith, "Controlling electromagnetic fields", *Science*, vol. 312, pp. 1780-1782, Jun. 2006.
- [13] Wenshan Cai, Uday K. Chettiar, Alexander V. Kildishev, and Vladimir M. Shalaev, "Nonmagnetic cloak with minimized scattering", *Appl. Phys. Lett.*, 91: 111105, Sep. 2007.
- [14] S. A. Cummer, B. I. Popa, D. Schurig, D. R. Smith, and J. B. Pendry, "Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures", *Phys. Rev. E*, 74 : 036621, Sep. 2006.
- [15] Hongsheng Chen, Bae-Ian Wu, Baile Zhang, and Jin Au Kong, "Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak", *Phys. Rev. Lett.*, 99: 063903, Aug. 2007.
- [16] Christophe Caloz, and Tatsuo Itoh, *Electromagnetic Metamaterials : Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Wiley Interscience, pp. 4-9, 2006.
- [17] Do-Hoon Kwon, Douglas H. Werner, "Two-dimensional eccentric elliptic electromagnetic cloaks", *Appl.*

Phys. Lett., 92 : 013505, Jan. 2008.

- [18] Marco Rahm, David Schurig, Daniel A. Roberts, Steven A. Cummer, David R. Smith, and John B. Pendry, "Design of electromagnetic cloaks and concentrators using form-invariant coordinate transformations of Maxwell's equations", *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 6, issue 1, Jul. 2007.
- [19] Qun Wu, Kuang Zhang, Fan-yi Meng, and Le-Wei

Li, "Material parameters characterization for arbitrary N-sided regular polygonal invisible cloak", *Journal of Phys. D : Appl. Phys.* 42 : 035408, Dec. 2008.

- [20] Do-Hoon Kwon, Douglas H. Werner, "Shielding of antenna parameters in scattering environments using electromagnetic cloaking", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, San Diego, p. 11, Jul. 2008.

≡ 필자소개 ≡

유 인 상



2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2009년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 안테나, 메타 물질

이 용 식



1998년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2004년 4월: University of Michigan (Ph.D.)
2004년 10월: Post-doctoral Research Associate, Purdue University
2005년 7월: Senior Research Engineer, EMAG Technologies, Inc.
2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수
[주 관심분야] 초고주파 회로, 안테나, 메타 물질