

편광 상태와 메타 물질을 이용한 전자기파 유도 에너지 전달 제어

Polarization-Dependent Electromagnetically-Induced Transparency by Using Metamaterial

박진우 · 김성일 · 장원호* · 이영백

Jin-Woo Park · Sung-II Kim · Won-Ho Jang* · YoungPak Lee

요 약

메타 물질에서의 전자기파 유도 에너지 전달 제어에 관한 연구가 마이크로파 영역에서 실험 및 전산 모사를 통해 이루어졌다. 제시된 메타 물질은 기판을 사이로 두 개의 링 타입 공진기가 비대칭적으로 배열된 구조이고, 전자기파의 유도 에너지 전달이 편광 상태에 크게 의존함을 확인할 수 있었다. 본 연구는 마이크로파 제어 및 관련 응용 분야에 새로운 가능성을 제시할 수 있을 것이다.

Abstract

The classical electromagnetically-induced transparency(EIT)-like switching in metamaterial was experimentally and theoretically demonstrated in the microwave-frequency region. The metamaterial unit cell consists of two identical split-ring resonators, which are arranged on both sides of a dielectric substrate with asymmetry. It is found that the classical EIT-like switching can be achieved by changing the polarization of the incident electromagnetic wave. The results of this study are promising for practical applications.

Key words : Electromagnetically-Induced Transparency, Metamaterial, Split-Ring Resonator

I. 서 론

메타 물질(Metamaterial: MM)은 특정 주파수에서 자연 상태에 존재하지 않은 음의 유전율 또는 음의 투자율을 가질 수 있도록 파장보다 훨씬 짧은 주기적 구조로 이루어져 있다. 1999년 Walser는 MM을 “특정 입력에 대한 두 가지 이상의 반응들이 최적 결합될 수 있도록 설계된 입체적 주기적 셀 구조를 갖는 거시적인 합성 복합 재료”라고 정의하였다^[1]. MM은 지금까지의 물리적 현상을 보다 확장한 것으로

로서 인공적인 설계에 의하여 특이한 전자기적 특성 구현이 가능하게 했다.

MM 기술은 기존의 기술로는 불가능했던 주파수 영역에 관계없이 파장, 위상 및 굴절률 제어를 바탕으로 한 신개념의 차세대 기술로서 정보 통신 기기, 전자 제품 등의 초소형화, 고성능화 등의 실현이 가능하며, 고성능/고효율의 전파 통신 부품, 광통신 부품, 의료 진단 영상 장치, 보안 감시 시스템 등에 응용되어 사회의 산업 전반에 지대한 파급 효과를 미칠 것으로 보여짐으로써, 미래의 전·후방 산업에

「본 연구는 방송통신위원회의 지원을 받는 방송통신표준기술력 향상사업의 연구 결과로 수행되었음.」

한양대학교 물리학과(Department of Physics, Hanyang University)

*한국전파진흥협회 전자파기술원(Electromagnetic Wave Technology Institute, Korea Radio Promotion Association)

· Manuscript received December 13, 2011 ; Revised January 26, 2012 ; Accepted February 2, 2012. (ID No. 20111213-158)

· Corresponding Author : YoungPak Lee (e-mail : yplee@hanyang.ac.kr)

중요한 핵심 기술로 주목받고 있다^[1].

본 논문에서는 MM 기술을 이용한 특이 특성 중의 하나인 전자기파 유도 에너지 전달(electromagnetically-induced transparency: EIT)에 대한 연구를 보고하고자 한다. 이미 2008년 이후 수십 편의 관련 논문이 게재되는 등 활발한 연구가 진행 중인 상태이다^[2-7]. 최근에 Liu^[2], Singh^[3] 등에 의해 THz 영역에서 링 타입 공진 구조(split-ring resonator: SRR)로 이루어진 MM에서의 EIT 효과가 보고되었다. 이를 참고하여, 새로운 EIT MM 구조를 제안하고, 뿐만 아니라 편광 상태를 변화시킴에 따라 EIT 효과가 제어될 수 있음을 GHz 영역에서의 전산 모사와 실제적 측정에 의해 입증하였다.

II. 결과 및 토의

그림 1(a)은 새롭게 제시되는 MM 구조의 설계 조건 및 제작된 구조의 모습을 나타내고 있다. 제작에는 PCB(printed circuit board) 기법이 사용되었고, 구리의 두께는 $35 \mu\text{m}$ 이다. 기판의 유전 상수(dielectric constant)는 3.9 였고, 유전체 손실 탄젠트(dielectric loss tangent)는 0.025였다. 기판의 전체 크기는 $25 \times 25 \text{ cm}^2$ 이다. HP E8362B 네트워크 분석기(network ana-

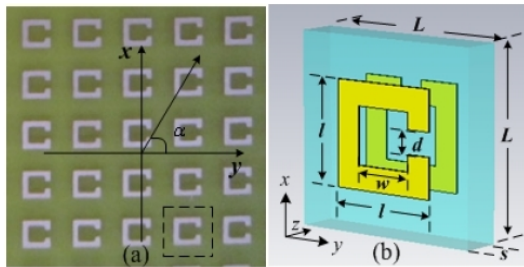


그림 1. (a) 제작된 MM 구조 사진. 점선 부분이 단위 구조(unit cell)이다. (b) 시뮬레이션으로 본 단위 구조의 입체적 모습. 기하학적 치수는 각각 $w=1.2 \text{ mm}$, $l=2.2 \text{ mm}$, $d=0.5 \text{ mm}$ 이다. x, y 방향으로 $L=3.8 \text{ mm}$ 의 주기성을 가진다.

Fig. 1. (a) Photograph of the investigated structure. Dashed box indicates the unit cell. (b) Slanted side view of the unit cell of the investigated structure. The geometric parameters are $w=1.2 \text{ mm}$, $l=2.2 \text{ mm}$, and $d=0.5 \text{ mm}$. The periodicity L is 3.8 mm in both x and y directions. The incident plane wave is irradiated along the z direction.

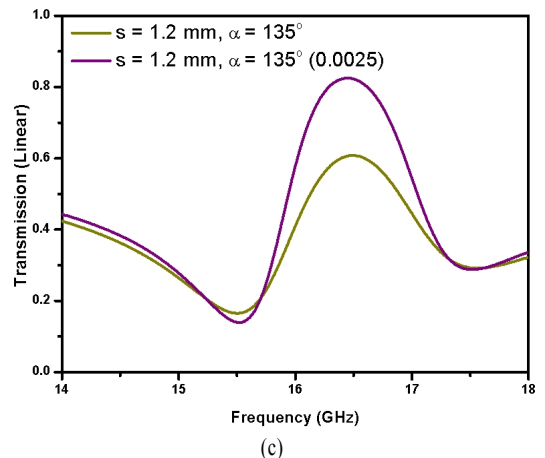
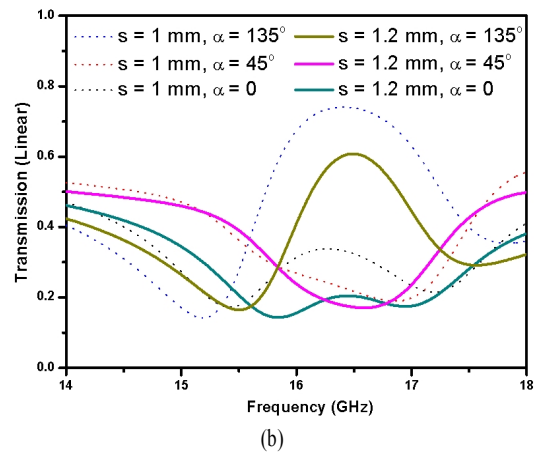
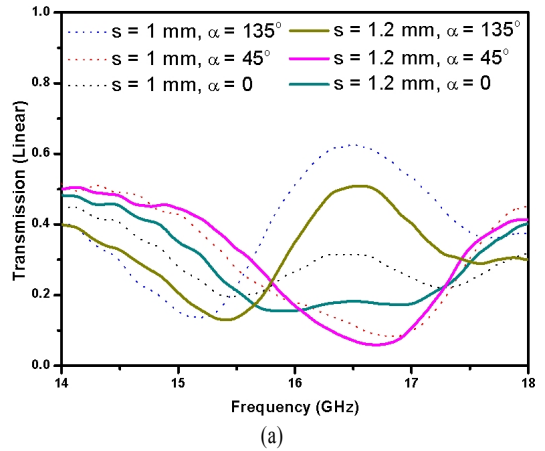
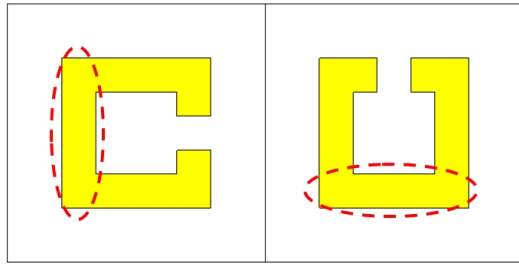
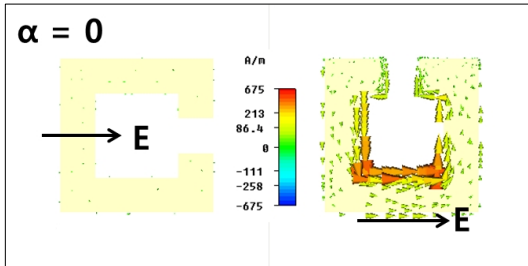


그림 2. 편광 상태에 따른 (a) 측정 및 (b) 시뮬레이션 투과율 데이터. (c) 기판의 손실 탄젠트에 따른 이론적 투과율 변화.

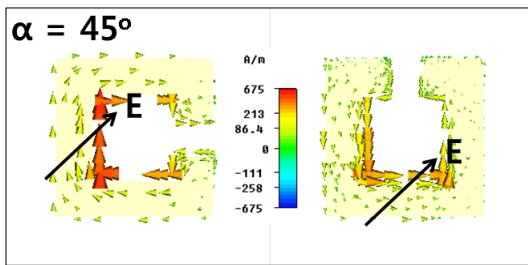
Fig. 2. (a) Measured and (b) simulated transmission spectra for different polarizations, and (c) simulated transmission according to the loss tangent.



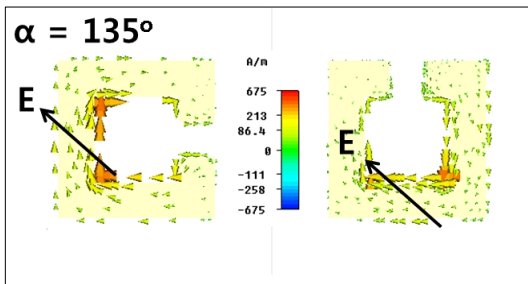
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. (a) x - y 평면상에 위치한 특정 방향성을 가진 SRR 구조체 모델. (b)~(d) 16.5 GHz에서의 편광 상태에 따른 시뮬레이션 표면 유도 전류 상태
 Fig. 3. (a) Simulation model of SRR structures on x - y plane with specific directionality. (b)~(d) Surface current maps for different polarizations at 16.5 GHz.

lyzer) 및 혼(horn) 안테나가 측정에 사용되었다. 시뮬레이션은 CST Microwave Studio 프로그램을 통해

이루어졌다. 그림 1(b)는 기판을 사이로 두 SRR 구조체가 특정 방향성을 가지고 존재함을 보이고 있다. 외부 전자기파의 입사 방향은 z 축 방향이었고, 전자기파의 전기장 성분 E의 방향은 y 축과 각 a를 이루었다.

그림 2는 편광 상태에 따른 투과율 그래프이다. 전반적으로 측정값과 시뮬레이션값이 일치함을 볼 수 있다. SRR의 공진 모드는 갭(gap)의 맞은편 부분과(그림 3(a)의 점선부) 외부 전자기파의 전기장 성분과의 방향성에 큰 영향을 받는다^[8]. 그림 3(b)에서 확인할 수 있듯이, a=0일 때, 16.5 GHz 전자기파의 전기장 성분에 의해 앞쪽의 SRR은 공진 모드가 형성되지 않는 반면, 뒤쪽의 SRR엔 공진 모드가 형성되게 된다. 연이어 뒤쪽 SRR의 공진 현상으로 인해 구조체 가운데에 유도되는 자기장은 앞쪽 SRR에 약한 표면 유도 전류를 형성하게 되는데, 이는 뒤쪽 SRR에 형성된 표면 유도 전류와 방향이 반대가 되게 된다. 이렇게 앞뒤 SRR에 다른 방향으로 형성된 표면 유도 전류는 각각의 SRR 사이에 유도되는 자기장 성분에 의해, 서로의 공진 모드를 억제하는 상호 작용(coupling) 효과를 가져오고, 이는 곧 외부 전자기파에 대해 금속 구조체가 갖는 전자기적 특성 감소와 16.5 GHz 전자기파 입장에서 기판에 SRR이 없는 듯한(투명한: transparent) 조건을 주게 되어 투과율 증가로 이어지게 된다. a=90°일 때도 a=0일 때와 같은 현상이 일어나게 됨을 구조체의 방향성을 통해 유추할 수 있다. 그러나 a=0, 90°에선 한 구조체 안의 공진 모드로 인해 유도되는 다른 구조체의 표면 유도 전류 현상이 충분히 크지 못하게 되므로, 미약한 억제 상호 작용 효과로 인한 16.5 GHz에서의 소폭의 투과율 증가를 그림 2를 통해 확인할 수 있다.

외부 전자기파의 전기장 성분 E가 비스듬히 입사될 때는 앞뒤 SRR에 모두 공진 모드가 형성됨을 기대할 수 있다. 그림 3(c)를 통해 확인할 수 있듯이, a=45°일 때는 두 SRR에 각각의 표면 유도 전류 방향이 서로 상반된 공진 현상이 일어나게 된다. 그러므로 SRR 사이에 유도되는 자기장의 방향 또한 다르게 되고, 그리하여, 서로의 공진 모드를 촉진하는 상호 작용을 유발한다. 외부 전자기파의 전기장은 두 SRR 구조체의 강한 공명 현상에 의해 상쇄되고, 이는 투과율 저하 현상으로 나타난다. 반면에 a=

135°일 때 또한 두 SRR 모두에 공진 모드가 형성되는 데, 각각의 표면 유도 전류 방향이 서로 같고(그림 3(d)), 이는 억제 상호 작용 효과의 극대화를 의미한다. EIT 효과의 증진은 16.5 GHz에서의 높은 투과율로 확인될 수 있다. 또한, 기관의 두께 비교를 통해, SRR 사이의 거리가 멀어짐에 따라 상호 작용 효과도 줄어들음을 알 수 있다. 실험 조건의 제약상, 유전체 손실 탄젠트 값이 0.025인 기관을 사용하였으나, 시뮬레이션에 의하면(그림 2(c)) 이보다 10배 작은 0.0025 값의 기관을 사용할 경우 크게 향상된 EIT 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 유전체 손실 탄젠트 값이 작아짐에 따라 MM의 EIT 특성이 향상됨은 보고된 바 있다^[9].

III. 결 론

EIT 특성을 갖는 새로운 MM 구조에 대한 제시와 편광 상태를 이용한 EIT 현상 제어에 관한 연구가 마이크로파 영역 실험 및 시뮬레이션을 통해 이루어졌다. 제시된 MM 구조는 기관을 사이로 두 개의 SRR 구조가 비대칭적으로 배열된 구조이고, 전자기파의 유도 에너지 전달이 편광 상태에 크게 의존함을 확인할 수 있었다. 즉, 기관의 회전 등을 통하여 특정 주파수를 통과시키거나 차단시키는 제어가 가능할 수도 있음을 의미한다. 본 연구는 마이크로파 제어 및 관련 응용 분야에 새로운 가능성을 제시할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] C. Caloz, T. Itoh, *Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons Inc., 2006.
 [2] N. Liu, S. Kaiser, and H. Giessen, "Magnetoinductive and electroinductive coupling in plasmonic me-

tamaterial molecules", *Adv. Mater.* vol. 20, p. 4521, 2008.
 [3] R. Singh, C. Rockstuhl, F. Lederer, and W. Zhang, "Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial", *Phys. Rev. B*, vol. 79, p. 085111, 2009.
 [4] N. Papasimakis, V. A. Fedotov, N. I. Zheludev, and S. L. Prosvirnin, "Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, p. 253903, 2008.
 [5] N. Liu, L. Langguth, T. Weiss, J. Kästel, M. Fleischhauer, T. Pfau, and H. Giessen, "Plasmonic analogue of electromagnetically induced transparency at the Drude damping limit", *Nature Mater.* vol. 8, p. 758, 2009.
 [6] X. R. Jin, Y. Lu, H. Zheng, Y. P. Lee, J. Y. Rhee, and W. H. Jang, "Plasmonic electromagnetically-induced transparency in symmetric structures", *Opt. Express*, vol. 18, p. 13396, 2010.
 [7] Y. Lu, J. Y. Rhee, W. H. Jang, and Y. P. Lee, "Active manipulation of plasmonic electromagnetically-induced transparency based on magnetic plasmon resonance", *Opt. Express*, vol. 18, p. 20912, 2010.
 [8] V. D. Lam, J. B. Kim, S. J. Lee, D. F. Wang, and Y. P. Lee, "Experimental observation of the electric coupling effect in split ring resonators and the prevention", *Phys. Status Solidil (a)*, vol. 204, p. 3975, 2007.
 [9] E. D. Gennaro, I. Gallina, A. Andreone, G. Castaldi, and V. Galdi, "Experimental evidence of cut-wire-induced enhanced transmission of transverse-electric fields through sub-wavelength slits in a thin metallic screen", *Opt. Express*, vol. 18, p. 26769, 2010.