

금속 접지 판이 없는 이중대역 메타 물질 흡수체

Dual-Band Metamaterial Absorber without Metallic Back-Plate

이 흥 민 · 이 형 섭

Hong-Min Lee · Hyung-Sup Lee

요 약

본 논문에서는 SRR의 자계 공진을 이용한 새로운 이중 대역 메타 물질 구조의 흡수체를 제안하였다. 제안된 메타 물질 구조의 단위 셀은 두 개의 OCSRR과 SRR의 구조로 이루어 졌다. 연구에서는 금속 접지 면을 갖지 않는 구조로 설계하기 위하여 평면 배열된 SRR들은 입사 전자파의 진행 방향과 평행하게 놓여졌다. FR-4 기판 양면에 총 39×39개의 단위 셀들의 배열로 이루어진 흡수체 시제품을 제작하고 측정하였다. 제안된 금속 접지 판이 없는 구조는 마이크로파 주파수대 흡수체로 응용이 가능함을 보였다.

Abstract

In this paper, the authors present a new design for a dual-band metamaterial(MTM) absorber that utilizes resonant-magnetic inclusion of a split-ring resonator(SRR). The proposed MTM unit cell is constructed by two open complementary split-ring resonators(OCSRRs) and an SRR arrangement. To avoid the need for metallic back plate a planar array of SRRs for resonant-magnetic inclusion is placed facing toward the incident wave propagation direction. Each unit cell is printed on the two sides of a FR-4 substrate. A prototype absorber was fabricated with a planar array of 39×39 unit cells, and measured. The proposed backplane-less absorber can be used for microwave applications.

Key words : Absorber, Double-Negative, Dual-Band, Metamaterial, SRR

I. 서 론

메타 물질 구조에 대한 대부분의 기존의 연구들은 음의 굴절율을 나타내도록 하기 위하여 메타 물질이 갖는 복소 유전율($\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$) 및 복소 투자율($\mu = \mu' + j\mu''$) 값 중에서 매질의 손실 성분을 나타내는 허수부분 값(ϵ'' , μ'')이 최소화되도록 초점을 맞추어 연구되어 왔다. 그러나 유전체의 손실 성분을 역으로 이용하여 이들 값을 오히려 인위적으로 크게 하여 주면 전자파 흡수 구조체를 구현할 수 있다. 연구 초기에는 자연계 상에 전파 흡수체 물질이 존재

하지 않는 테라헤르츠와 주파수 대역 이상에서 메타 물질 구조를 이용한 전파 흡수체에 대한 연구가 주로 진행되어져 왔다^{[1]~[3]}. 기존의 보고된 대부분의 메타 물질 흡수체 구조에는 금속의 접지 면이 사용되어져 왔다^{[4],[5]}. 그러나 메타 흡수체의 설계에서는 기본적으로 공진형 흡수체 구조를 사용하므로, 어떤 금속의 목표물을 숨기고자 할 경우에 설계되어진 주파수 대역 이외의 주파수에서는 금속 도체 접지 판이 오히려 금속의 목표물로 작용하여 레이더 단면적(Radar Cross Section: RCS)을 증가시키게 된다^[6]. 본 연구에서는 이러한 단점을 해소하기 위한 방안으로

「본 연구는 2011학년도 경기대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.」

경기대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kyonggi University)

· Manuscript received April 9, 2012; Revised May 16, 2012; Accepted May 22, 2012. (ID No. 20120409-040)

· Corresponding Author : Hong-Min Lee (e-mail : hmlee@kyonggi.ac.kr)

SRR의 자계 공진을 이용한 새로운 구조의 이중 대역 메타 물질 흡수체를 제안하였다.

II. 단위 셀의 설계

그림 1에 전계와 자계를 각각 독립적으로 결합시킬 수 있는 2개의 메타 물질 구조로 구성되어진 흡수체의 단위 셀 모양을 나타내었다. 제안된 메타 물질 구조의 단위 셀은 두 개의 open complementary split-ring resonators(OCSRR)과 split-ring resonator(SRR)의 구조로 이루어졌다. 설계주파수 대역에서 OCSRR과 SRR은 각각 음의 유전율과 음의 투자율 특성을 나타내며, 연구에서는 이중 대역 흡수체를 구현하기 위하여 서로 대칭적으로 놓인 두 개의 OCSRR이 사용되었다. FR-4(비유전율=4.4, 두께=0.8 mm) 유전체 기판의 양면에 OCSRR과 SRR의 금속 패턴을 위치시켰으며, 설계된 단위 셀의 최적 크기는 $a=7.4$ mm, $b=7$ mm, $w=0.3$ mm, $h=6.4$ mm, $d=k=0.3$ mm, $c=0.4$ mm, $e=3.2$ mm이다. 그림 2에 흡수체 단위 셀의 특성을 모의 실험하기 위하여 인가되는 전자계 및 입사되는 평면파의 방향을 나타내었다. 평면 배열된 SRR은 입사 전자파의 진행 방향과 평행하게 놓여졌다.

단위 셀에 인가되는 전자계는 SRR의 커패시티브 갭(gap) 방향으로 전계가 평행하며, SRR이 놓인 평면에 수직인 방향으로 자계가 입사되도록 하여 SRR의 bi-anisotropy 특성을 이용하였다. 제안된 두 대역에서 OCSRR과 SRR은 동시에 음의 유전율과 음의 투자율 특성을 나타내거나(double-negative), 음의 유전율 또는 음의 투자율 특성(single-negative)을 나타낸다. 그림 3에 모의 실험된 흡수체의 산란 파라미터를 나타내었다. 주파수 2.8 GHz와 3.2 GHz 부근에서

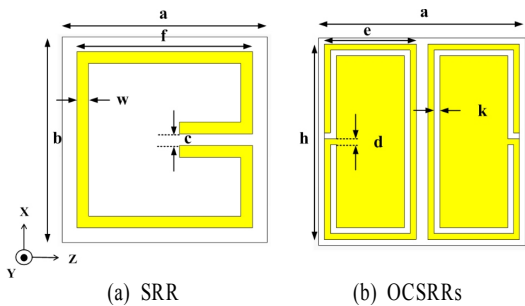


그림 1. 흡수체 단위 셀 구조
Fig. 1. Geometry of absorber unit cell.

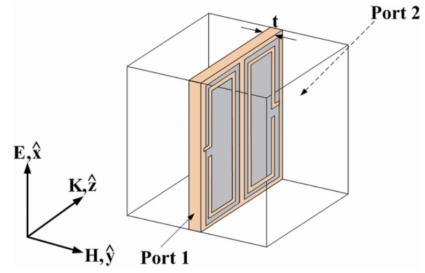


그림 2. 흡수체 단위 셀에 대한 모의실험 구성도
Fig. 2. Simulation setup for absorber unit cell.

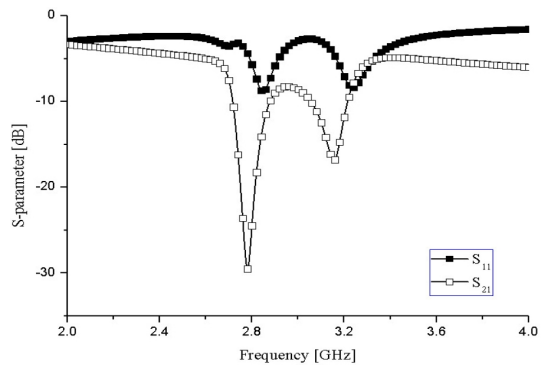
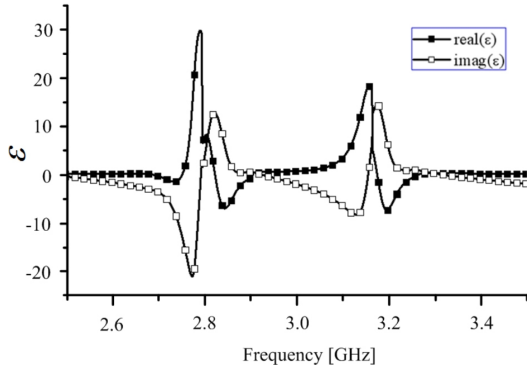


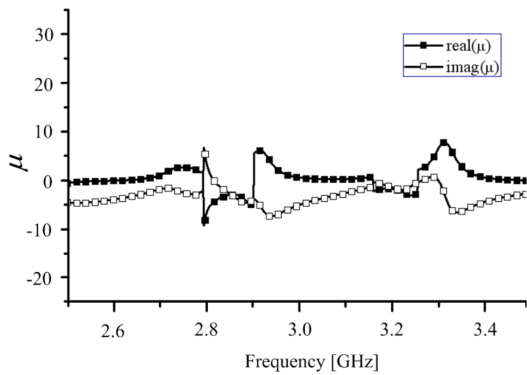
그림 3. 모의실험된 흡수체의 산란 파라미터
Fig. 3. The simulated scattering parameters for absorber.

반사 계수(S_{11})와 투과 계수(S_{21}) 들이 낮은 값을 나타내고 있으므로 입사되는 전자파 흡수율 값 $A(\omega) (= 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$ 는 높게 나타난다. 설계된 흡수체의 구조가 메타 물질 구조로 동작하는가를 파악하기 위하여 파라미터 추출법^[7]을 사용하여 계산된 매질의 실효 유전율 및 실효 투자율 값을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 주파수 2.8~2.9 GHz와 3.18~3.27 GHz인 이중 대역에서 복소 유전율 및 투자율을 갖는 등방성 매질이 메타 물질로 동작하기 위한 조건($\epsilon' \mu'' + \mu' \epsilon'' < 0$)^[8]을 만족하고 있다.

제안된 두 대역에서 OCSRR과 SRR은 동시에 음의 유전율과 음의 투자율 특성을 나타내거나(double-negative), 음의 유전율 또는 음의 투자율 특성(single-negative)을 나타낸다. 제안된 흡수체의 이중 대역 동작 특성을 파악하기 위하여 흡수체 단위 셀과 평행한 평면 및 수직인 평면에서 평균 전력 손실 밀도에 대한 컴퓨터 모의실험한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5에 나타난 바와 같이 $f_1=2.848$ GHz



(a) 실효 유전율
(a) Effective permittivity



(b) 실효 투자율
(b) Effective permeability

그림 4. 추출된 실효 매질 상수

Fig. 4. Extracted effective material parameters.

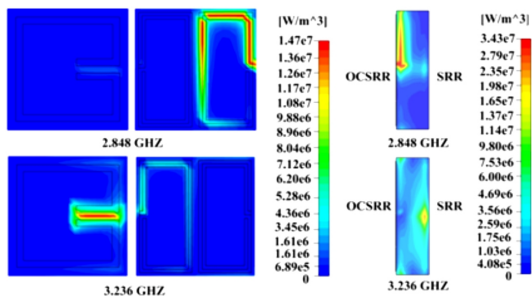


그림 5. 모의실험된 전력 손실 밀도 분포

Fig. 5. Simulated average power loss density.

에서는 우측에 위치한 OCSRR의 갭 사이의 유전체 공간에서 흡수가 강하게 발생되는 반면에 $f_2 = 3.236$ GHz에서는 SRR의 커패시티브 갭 사이 유전체 공간 상에서 주된 흡수가 이루어지는 것을 알 수 있다. 따

라서 메타 물질 구조의 흡수체에서 전자계 에너지의 흡수 현상은 유전체 공간 내에서 비 균일하게 발생 되는 유전체 손실에 기인함을 볼 수 있다.

제한된 흡수체 구조는 하위 주파수 f_1 에서는 OC-SRR에 의한 전계 공진에 의한 주된 전자파 에너지의 흡수가 이루어지며, 이 경우에 SRR 구조는 일종의 임피던스 정합 소자로 동작함을 알 수 있다. 반대로 상위 주파수 대역에서는 SRR에 의한 자계 공진과 OCSRR에 의한 전계 공진에 의한 흡수가 이루어져 이중 대역 흡수체 특성이 발생된다.

III. 제작 및 측정

그림 6에 제작된 흡수체 샘플 사진을 나타내었다. FR-4 기판 양면에 39개의 흡수체 단위 셀들을 배열 하여 7.4 mm× 300 mm 크기의 평판 스트립형 흡수체 구조들을 제작한 후에 이를 6 mm 간격으로 평면 배열시키어 총 39×39개의 단위 셀들로 구성된 평판형 흡수체를 아크릴 지그를 사용하여 제작하였다. 벡터 회로망 분석기(wiltron 360B)와 두 개의 R-band 혼 안테나를 사용하여 2.6~3.4 GHz 주파수 대역에서 반사계수 및 투과 계수를 측정하여 흡수율을 계산한 결과를 그림 7에 나타내었다. 측정에서는 우선 두 개의 혼 안테나를 흡수체 앞뒤에 50 cm 거리를 이격시키어 배치하여 근거리장의 영향을 최소화하도록 하였으며, 지면에서 120 cm 높이에 흡수체와 혼 안테나들을 일렬로 배치하여 입사되는 전자파가 흡수체에 정규 입사되도록 하여 측정하였다. 다음으로 두 개의 혼 안테나들을 흡수체 정면에 근접 배치하고, 흡수체 평면을 15° 단위로 회전시켜가면서 전파가 경사 입사됨에 따른 흡수율 변화를 측정하였다.

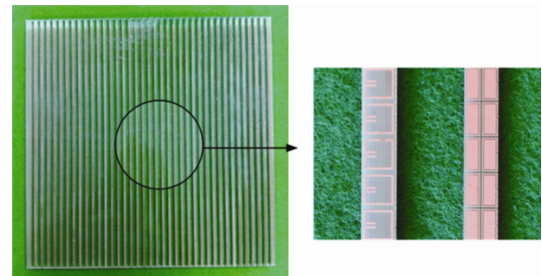


그림 6. 제작된 흡수체 샘플 사진

Fig. 6. Photo of the fabricated absorber sample.

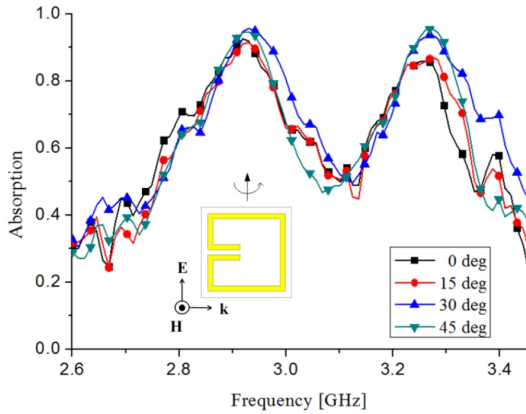


그림 7. 입사각 변화에 따른 흡수율 곡선
 Fig. 7. Measured absorbance curve for the various angles of incident.

흡수체에 입사되는 전파의 입사각의 변화가 0~45° 사이에서는 두 주파수 대역에서 높은 흡수율을 나타내고 있으나, 최대 흡수율을 나타내는 주파수는 설계 값과 비교하여 약 80 MHz 정도 상향되어졌다. 제작된 흡수체는 주파수 2.92 및 3.28 GHz에서 각각 94 % 및 88 % 이상의 최대 흡수율을 나타내었다. 그러나 입사되는 전파의 입사각이 50° 이상인 경우에는 흡수율이 크게 감소되었으며, 이 결과는 그림 7에는 제시하지 않았다. 이는 제안된 흡수체 구조가 자계 공진에 주로 근거하고 있으므로, 입사되는 전자파의 입사각이 크게 변화되면 OCSR 및 SRR 평면에 수직하게 입사되는 자계 값이 크게 감소하게 되므로 흡수체의 성능이 저하하기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자계 공진을 이용한 금속 접지 판이 없는 구조의 이중 대역 메타 물질 구조의 흡수체를 제시하였다. 제안된 흡수체 단위 셀은 유전체 기판의 상하면에 각각 설계되어진 두 개의 OCSR와 하나의 SRR로 구성되어 졌다. 제안된 구조는 하나의 소자가 전계 공진 또는 자계 공진 특성을 나타내는 경우에 다른 하나의 소자는 정합 소자로 작용하여 서로 인접한 두 주파수 대역에서 동작하는 이중 공진 흡수체 동작의 원리를 제시하였다. 제안된 구조

는 금속 접지 판을 사용하지 않는 흡수체 구조로서 마이크로파 주파수대에서 어떤 금속의 목표물을 숨기고자 할 경우에 적용이 가능한 흡수체 구조이다.

참 고 문 헌

- [1] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Phys. Rev. Lett.*, 100, pp. 274021-274024, Mar. 2008.
- [2] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization", *Opt. Express*, vol. 16, pp. 7181-7188, May 2008.
- [3] Y. Cheng, H. Yang, "Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 52, no. 4, pp. 877-880, Aug. 2010.
- [4] H. Tao, C. M. Bingham, D. Pilon, K. Fan, A. C. Strkwerda, D. Shrekenhammer, W. J. Padilla, X. Zhang, and R. D. Averitt, "A dual band terahertz metamaterial absorber", *J. Appl. Phys. D*, vol. 43, pp. 225102-225106, May 2010.
- [5] Y. Cheng, H. Yang, Z. Cheng, and N. Wu, "Perfect metamaterial absorber based on a split-ring-cross resonator", *J. Appl. Phys. A*, vol. 102, no. 1, pp. 99-103, Sep. 2010.
- [6] K. B. Alici, F. Bilotti, L. Vegni, and E. Ozbay, "Experimental verification of metamaterial based subwavelength microwave absorbers", *J. Appl. Phys.*, vol. 108, pp. 0831131-0831136, Oct. 2010.
- [7] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials", *Phys. Rev. E71*, pp. 0366171-10, Mar. 2005.
- [8] R. A. Depine, A. Lakhtakia, "A new condition to identify isotropic dielectric-magnetic materials displaying negative phase velocity", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, pp. 315-316, 2004.