

두 쌍의 ELC 공진기를 이용한 이중 대역 메타 흡수체의 설계

이 형 섭* · 이 홍 민**

Design of Dual-band Metamaterial Absorber using Two Pairs of ELC Resonators

Hyung-Sup Lee · Hong-Min Lee

요 약

본 논문에서는 4개의 ELC 공진기 구조를 사용하여 메타 흡수체 구조의 단위 셀을 설계하였다. 제안된 구조의 단위 셀의 크기는 9 mm x 9 mm x 2 mm 이다. 메타 흡수체의 대역폭 확장을 위하여 흡수체 단위 셀은 서로 다른 크기를 갖는 2 쌍의 ELC가 사용되었다. 제안된 흡수체는 전계가 ELC 갭에 수평하게 여기되고 자계가 단위 셀 면에 수직으로 여기 될 경우에 음의 유전율과 음의 투자율 특성을 나타낸다. 제안된 단위 셀은 8.53 GHz, 9.08 GHz에서 공진을 하며 각 주파수에서 90%이상의 흡수율을 갖는다.

ABSTRACT

This paper presents a metamaterial absorber unit cell structure with four-element electric-LC resonators (ELC). In order to enhance the operating bandwidth of the proposed absorber unit cell two pairs of ELC resonators with a different size are used. The proposed unit cell shows negative permittivity and permeability when the electric field is parallel to the capacitive gap and the magnetic field is normal to the plane of ELC resonator. The simulated results show peak absorbance over 90% at two frequencies of 8.53 and 9.08 GHz, respectively.

Keywords : Metamaterial, Absorber, Electric-LC, negative permittivity, negative permeability

1. 서 론

최근 각종 전자, 정보 기기들의 고속화 및 소형, 경량화 추세에 따라서 이러한 기기들로 부터 동시에 발생하는 전자파 노이즈의 주파수도 GHz

대역으로 높아지고 있다. 일상생활에서 이러한 전자파에 대한 노출을 줄이기 위해 차폐재 및 흡수체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전자 흡수체의 구현 방법은 페라이트나 카본 등과 같은 자연계 상에 존재하는 물질을 사용하여 재료적 구

* 경기대학교 전자공학과 RF 연구실

** 교신저자 경기대학교 전자공학과 (hmlee@kyonggi.ac.kr)

접수일자 : 2012년 1월 4일, 수정일자 : 2012년 1월 22일, 심사완료일자 : 2012년 1월 27일

현하는 방법과 인공적인 구조를 사용하여 설계하는 방법이 있다. 이러한 인공적인 구조로 가장 대표적인 구조는 salisbury screen이다[1]. 이 구조는 접지 면 위에 저항성 시트 및 공진기를 갖는 구조를 $\lambda/4$ 의 간격을 갖게 설계하여 접지 면에서 반사된 파와 시트 면에서 반사된 파가 180도의 위상차를 갖게 되어 서로 상쇄되는 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 $\lambda/4$ 의 간격으로 인하여 부피가 커지게 된다. 최근 메타 물질 구조를 사용하여 밀리미터 및 광 주파수 영역에 이르기 까지 메타 흡수체를 구현하는 연구가 활발하게 진행되고 있다 [2]-[4]. 대부분의 메타 흡수체 구조는 접지 면을 사용하고 있으므로 인하여 RCS (radar cross section)의 값이 증가하게 되어 스텔스 (stealth) 등에 적용에 어려움이 따른다. 이를 개선하기 위해서 magnetic response를 갖는 SRR (split ring resonator)와 저항시트를 사용하는 연구가 보고되었다 [5]. 그러나 두 가지 방법 모두 금속의 접지 면 또는 저항시트를 사용한다는 문제점을 갖고 있으므로 본 논문에서는 접지 면과 저항시트를 사용하지 않는 이중 대역 메타 흡수체를 제안하였다. 제안된 구조는 3-D field simulation tool인 CST MWS (microwave studio)를 이용하여 설계하였다[6].

II. 제안된 ELC 구조

그림 1에 ELC 구조를 나타내었다. ELC 구조는 $4.8\text{ mm} \times 4.8\text{ mm}$ 의 크기를 갖고 유전율 4.6 두께 2 mm 갖는 FR-4 기판 위에 설계 되었다. 기본적으로 ELC 구조는 ELC의 갭 부분에서 강한 커패시턴스를 형성하며 두 개의 인덕티브 루프가 형성되

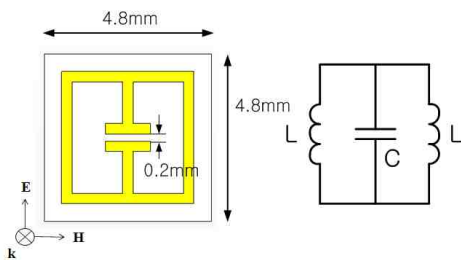


그림 1. ELC 공진기 구조 및 등가회로
Fig. 1. ELC resonator and equivalent circuit

므로 그림 1에 나타낸 바와 같이 LC 등가회로로 표현되어지므로 이들 공진기의 공진 각 주파수 ω_0 는 $\omega_0 = (2/LC)^{1/2}$ 이 된다. 이 경우에 두 인덕티브 루프에 흐르는 전류가 서로 반대 방향으로 흐르게 되므로 이들로 인하여 발생하는 자계성분은 서로 상쇄되고 결국 강한 커패시티브 성분만 남아 전계 공진만을 일으키게 되므로 음의 유전율을 발생하는 구조로 동작하게 된다[7]. 그림 2에는 4개의 ELC들로 구성된 흡수체의 단위 셀 및 컴퓨터 모의 실험에 의한 단위 셀 표면상의 전류분포를 나타내

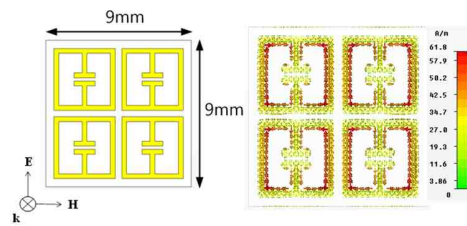


그림 2. 4개의 ELC 공진기 구조의 단위 셀
Fig. 2. Unit cell with four element ELC resonators

었다. 각 ELC 셀들의 양측의 암에 전류가 서로 반대로 흐르고 있으므로 이러한 구조는 등 가적으로 음의 유전율 특성을 나타낸다. 일반적으로 ELC 구조는 그림 2에 나타낸 바와 같이 전자기파가 단위 셀 평면에 수직으로 입사되게 설계하지만 본 논문에서는 접지 면이 없는 구조로 메타 흡수체를 설계하기 위하여 전자기파가 단위 셀 평면에 수직인 방향으로 입사되게 설계하여야 한다. 이러한 전자계 방향에 따른 ELC 공진기 구조의 주파수 특성을 살펴보기 위하여 그림 3에 나타난 바와 같이 한 쌍의 ELC 공진기가 각각 수직 및 수평방향으로 배열되어진 경우에 컴퓨터 모의실험을 통하여 얻어진 산란 파라미터 값 들을 그림 4에 비교 제시하였다.

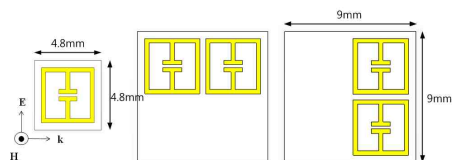


그림 3. 수평 및 수직 방향으로 배열된 한 쌍의 ELC 공진기
Fig. 3. Horizontally and vertically arrayed unit cell with one pair of ELC resonators

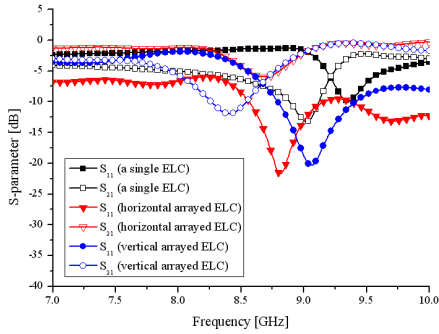


그림 4. 수평 및 수직 방향으로 배열된 한 쌍의 ELC 공진기의 산란 파라미터 비교

Fig. 4 Comparison of the scattering parameters for a single, horizontally and vertically arrayed with one pair of ELC resonators

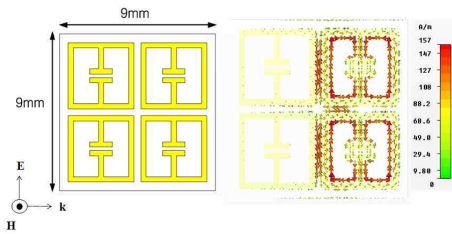


그림 5. 4개의 ELC 공진기 구조의 메타 흡수체 단위 셀

Fig. 5. Metamaterial absorber unit cell with four element ELC resonators

한 쌍의 ELC공진기가 수직 방향으로 흡수체가 높은 흡수율 ($= 1 - |S_{11}^2| - |S_{21}|^2$) 특성을 나타내기 위하여 S_{11} 과 S_{21} 값은 동일한 주파수에서 낮은 값을 가져야 한다. 그림 4에서 한 쌍의 ELC 공진기가 수평방향으로 배열되어진 경우에는 이와 같은 조건이 만족되어지나 수평 방향으로 배열되어진 경우에는 낮은 흡수율을 얻기가 어려움을 알 수 있다. 그림 2에 나타난 4개의 ELC들로 구성된 흡수체 단위 셀에 전자기파가 단위 셀 평면에 수직인 방향으로 입사되어진 경우에 컴퓨터 모의실험에 의한 주파수 8.6 GHz에서 단위 셀 표면상의 전류분포를 그림 5에 나타내었다. 공진주파수에서 오른쪽 수직 배열된 두 개의 ELC 및 왼쪽에 수직 배열된 두 개의 ELC 사이의 갭에 강한 전류가 흐르고 있다. 그러나 그림 2의 경우에는 다르게 수직 배열된 두 개의 ELC 사이의 갭에 발생하는 전류는 서로 반대 방향으로 놓이게 되므로 이들로 인

한 자기공진 현상이 나타나게 된다.

III. 유효 유전율 및 투자율

제안된 구조의 최적 설계를 위하여 메타 물질 구조의 흡수체 단위 셀의 유효 유전율 및 투자율을 파라미터 추출 기법을 사용하여 계산하였다 [8]. 단위 셀 구조에 대한 산란 파라미터 값으로부터 실효 유전율 및 투자율을 계산하여 제안된 구조가 메타 물질 구조의 특성인 음의 유전율과 음의 투자율 값을 나타내고 있는지를 파악하여야 한다. 그림 6에 가장 평행판도파관 구조에 그림 5에 나타난 제안된 메타 흡수체 단위 셀을 넣고 주기 경계 조건을 사용하여 모의실험 한 산란 파라미터를 나타내었다. S_{11} 과 S_{21} 의 최소값은 대략 주파수 8.6 GHz 부근에서 나타났다. 모의실험 결과 얻어진 산란 파라미터 값들로부터 Bloch-Floquet 이론에 의하여 Bloch 임피던스 Z_B 와 복소 전파상수 γ 를 구하여 제안된 구조의 실효유전율 ϵ_{eff} 및 실효 투자율 μ_{eff} 값을 각각 식 (1) 및 (2)에 나타내었다.

$$\mu_{eff} = \frac{\gamma Z_B}{k_0 Z_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\gamma Z_0}{k_0 Z_B} \quad (2)$$

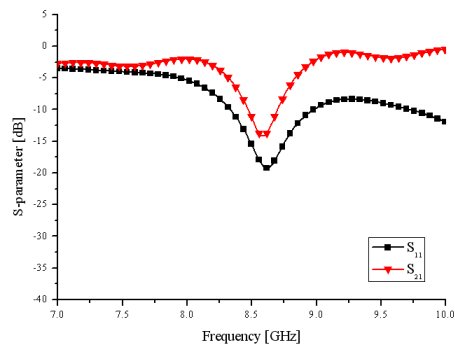


그림 6. 4개의 ELC 공진기 구조의 메타 흡수체에 대한 산란 파라미터

Fig. 6. Scattering parameters of metamaterial absorber with four element ELC resonators

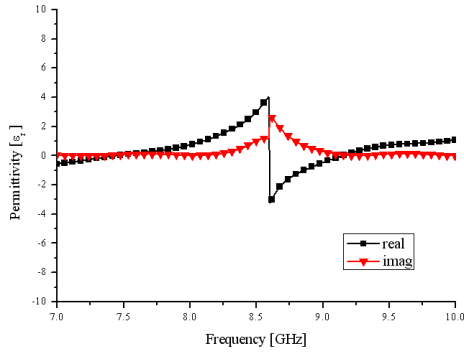


그림 7. 4개의 ELC 공진기 구조의 메타 흡수체에 대한 실효 유전율

Fig. 7. Effective permittivity of metamaterial absorber with four element ELC resonators

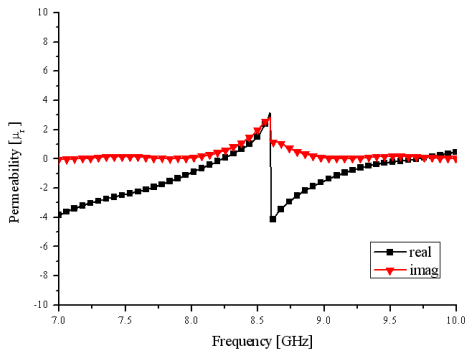


그림 8. 4개의 ELC 공진기 구조의 메타 흡수체에 대한 실효 투자율

Fig. 8. Effective permeability of metamaterial absorber with four element ELC resonators

여기서 k_0 는 자유 공간에서 전파 상수 값이다. 추출된 실효 유전율 및 투자율 값들을 각각 그림 7과 8에 나타내었다. 주파수 8.6GHz 부근에서 제안된 구조는 모두 음의 유전율 및 음의 투자율 값을 나타내고 있으므로 메타 흡수체 단위 셀로 동작하고 있다. 제안된 구조에 대한 흡수율 값 $A(=1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$ 를 계산한 결과를 그림 9에 나타내었다. 제안된 흡수체는 주파수 8.6GHz에서 95%의 높은 흡수율을 갖는다.

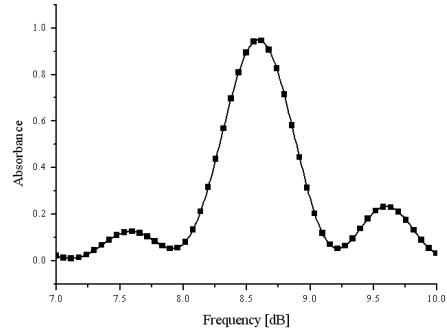


그림 9. 4개의 ELC 공진기 구조의 메타 흡수율
Fig. 9. Absorbance of metamaterial absorber with four element ELC resonators

IV. 이중 대역 ELC 메타 흡수체

앞에서 설계된 메타 흡수체는 단일 대역에서 동작하는 구조이므로 이중 대역에서 동작하는 흡수체를 구현하기 위하여 서로 다른 크기를 갖는 두 종류의 ELC 공진기로 구성된 새로운 흡수체 구조를 그림 10에 나타내었다. 그림 10에서 위쪽에 설계된 ELC 공진기의 크기는 3.8mm×3.8mm 이며 아래에 설계된 ELC 공진기는 3.7mm×3.7mm 이다. 이 구조는 서로 다른 크기의 ELC 공진기로 설계하여 각각의 ELC 공진기가 서로 다른 주파수(8.496GHz, 9GHz)에서 공진하게 되므로 2중 공진

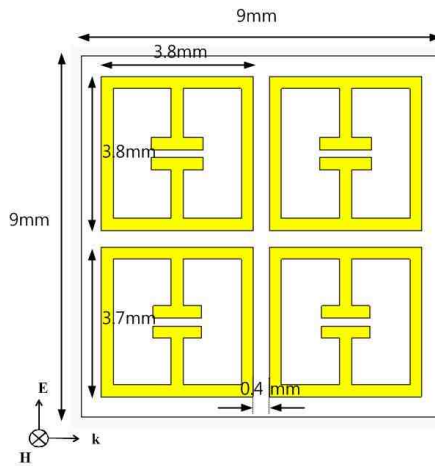


그림 10. 이중 공진 구조의 메타 흡수체
Fig. 10. Metamaterial absorber for dual resonance

특성을 나타내게 된다. 각 공진 주파수에서의 전류 분포를 그림 11 및 그림 12에 나타내었다. 위쪽 단위 셀들은 주파수 8.496GHz에서 공진하며, 아래쪽 단위 셀들은 9GHz에서 공진한다. 인접한 ELC 공진기 사이에 전자계의 상호 결합으로 인하여 각각의 공진주파수에서 모두 왼쪽의 ELC와 오른쪽의 ELC 사이에서 서로 다른 방향으로 전류가 흐르게 되므로 이들로 인하여 루프 전류가 생성되어 자계 공진을 일으키게 된다.

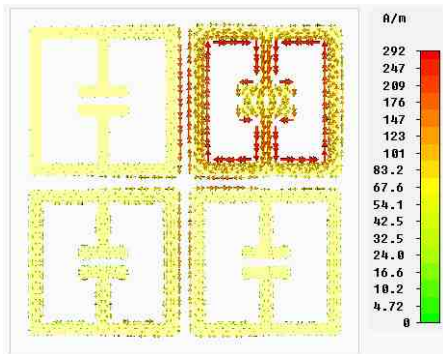


그림 11. 전류 분포 (8.496GHz)
Fig. 11. Current distribution(8.496GHz)

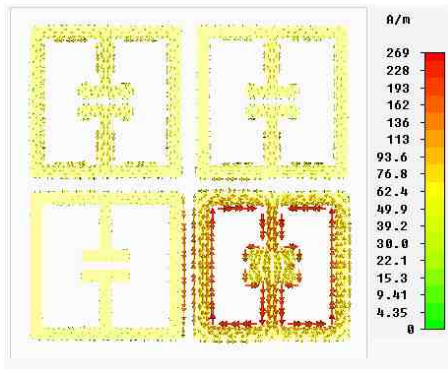


그림 12. 전류 분포 (9GHz)
Fig. 12 Current distribution(9GHz)

한편 ELC의 갭 부분에서 강한 커패시턴스가 발생하여 전계공진이 일어난다. 그림 13에 제안된 이중 대역 메타 흡수체의 반사 전력 R, 투과 전력 T, 흡수율A 값을 나타내었다. 두 공진주파수 (8.496GHz, 9GHz) 부근에서 반사 전력, 투과 전력 값이 모두 거의 0에 근접하여 흡수율 $A(= 1 - T - R)$ 이 최대값을 나타낸다. 흡수율 50% 기준으로 정의되는 대역폭 값은 800MHz (8.4GHz~9.2GHz)

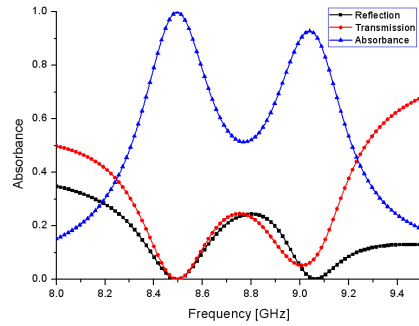


그림 13. 모의 실험된 R, T 및 A
Fig. 13. Simulated R, T and A

를 나타낸다. 제안된 이중대역 메타 흡수체 구조에서 전자파 전력의 흡수가 어느 곳에서 발생되는가를 파악하기 위하여 각각의 흡수율이 최대로 되는 주파수에서 전력 손실 밀도 분포를 그림 14 및 그림 15에 나타내었다. 대부분의 전력이 공진하는 ELC의 커패시턴스 갭 부분 유전체 공간에서 손실

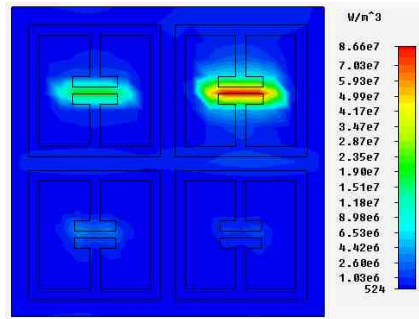


그림 14. 전력 분포 (8.496GHz)
Fig. 14. Power loss density (8.496GHz)

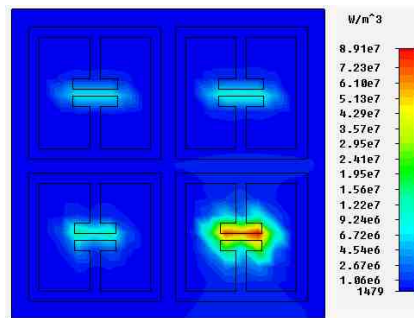


그림 15. 전력 분포 (9GHz)
Fig. 15. Power loss density (9GHz)

되는 것을 확인할 수 있다. 하지만 자체 공진이 발생하는 인접한 두 개의 ELC 사이 부분에서는 전력 손실이 거의 나타나지 않는다. 이는 메타 흡수체 구조에서 전자파 흡수는 결국 전체가 집중되는 부분에서 강하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 ELC 구조를 배열하여 이중 대역에서 동작하는 메타 흡수체를 설계하였다. ELC 구조는 전형적인 음의 유전율을 갖는 구조이고 ELC 구조 사이의 전자계 상호 결합을 통하여 음의 투자율 특성을 얻었다. 일반적인 ELC 구조는 전자파가 ELC 평면에 수직하게 입사되도록 하여 사용하지만 본 논문에서는 전자파가 ELC 평면에 평행하게 입사되도록 하여 음의 유전율 및 음의 투자율 값을 갖는 메타 흡수체를 구현할 수 있음을 새롭게 제안 하였다. 모의실험을 통하여 얻어진 산란 파라미터 값들을 이용하여 제안된 흡수체의 흡수율을 계산하여 본 결과 각각의 공진주파수에서 90% 이상의 최대 흡수율 값을 나타내었으며 흡수율 50%를 기준으로 약 800MHz의 대역폭을 확보하였다.

후 기

본 논문은 경기도지역협력연구센터(GRRC)의 재원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] R. L. Fante, and M. T. McCormack, "Reflection properties of the Salisbury screen," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 30, No. 10, pp. 1443-1454, October 1968.
- [2] Y. Z. Chen, and H. Yang, "Design, simulation, and measurement of metamaterial absorber," *Journal of Applied Physics*, Vol. 108, 034906, August 2010.
- [3] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization," *Optics Express*, Vol. 16, pp. 7181-7188, May 2008.
- [4] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber," *Physics Review Letter*, Vol. 100, pp. 274021-4, May 2008.
- [5] F. Bilotti, L. Nucci and L. Vegni, "An SRR based microwave absorber," *Microwave & Optical Technology Letters*, Vol. 48, No. 11, August 2006.
- [6] CST STUDIO SUITE TM 2006B MWS (Micro Wave Studio), CST Corporation.
- [7] R. S. Penciu, and K. Aydin, "Electric field coupled resonators for negative permittivity metamaterials," *Optics Express*, Vol. 16, No. 22, October 2008.
- [8] D. R. Smith, D. C. Vier, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials," *Physics Review*, pp. 031617-1-031617-10, March 2005.

저자약력

이 형 섭 (Hyung-Sup Lee) **학생회원**



2011년: 경기대학교
전자공학과 (학사)
2011년~현재: 경기대학교
전자공학과 석사과정

<관심분야> 안테나, RF수동소자, Metamaterial

이 홍 민 (Hong-Min Lee) **정회원**



1972년: 연세대학교
전기공학과 (학사)
1974년: 연세대학교
전자공학과 (석사)
1990: 연세대학교
전자공학과 (박사)
1991년~현재: 경기대학교
전자공학과 교수

<관심분야> 안테나 설계 및 해석, RF/MW 수
동소자, Metamaterial