

## Magnetic Resonance and Electromagnetic Wave Absorption of Metamaterial Absorbers Composed of Split Cut Wires in THz Frequency Band

Yo-Han Ryu and Sung-Soo Kim\*

Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 31 March 2017, Received in final form 17 April 2017, Accepted 18 April 2017)

Metamaterials composed of split cut wire (SCW) on grounded polyimide film substrate have been investigated for the aim of electromagnetic wave absorbers operated in THz frequency band. Reflection loss and current density distributions are numerically simulated with variations of the SCW geometries using the commercial software. The minimum reflection loss lower than  $-20$  dB has been identified at 5.5~6.5 THz. The simulated resonance frequency and reflection loss can be explained on the basis of the circuit theory of an inductance-capacitance ( $L-C$ ) resonator. Dual-band absorption can be obtained by arrangement of two SCWs of different length on the top layer of the grounded substrate, which is due to multiple magnetic resonances by scaling of SCWs. With increasing the side spacing between SCWs, a more enhanced absorption peak is observed at the first resonance frequency that is shifted to a lower frequency.

**Keywords** : metamaterials, absorbers, terahertz, electric properties, magnetic properties

## THz 대역에서 Cut Wire로 구성된 메타소재의 자기공진 및 전파흡수특성

류요한 · 김성수\*

충북대학교 신소재공학과, 충북 청주시 서원구 충대로 1, 28644

(2017년 3월 31일 받음, 2017년 4월 17일 최종수정본 받음, 2017년 4월 18일 게재확정)

THz 대역 전파흡수체를 구현하기 위해 split cut wire(SCW)와 배면 도체로 구성되는 단위 셀 구조를 제안하였다. 배면이 금속으로 단락된 유전체 기판 상에 SCW가 배열된 메타소재에서 SCW의 길이와 폭을 조절하여 THz 대역에서 완전 전파흡수체(5.5~6.0 THz에서 반사손실  $-20$  dB 이하)의 구현이 가능하였고, 인덕턴스-커패시턴스 ( $L-C$ ) 공진기 회로이론으로 이를 설명하였다. 길이가 서로 다른 두 개의 SCW를 하나의 단위 셀 안에 같이 배치함으로써 두 개의 흡수 피크를 얻을 수 있었다. SCW 간의 간격이 넓어짐에 따라 두 번째 공진주파수는 거의 변화가 없지만 첫 번째 공진주파수는 저주파로 이동하면서 반사손실 값이 현저히 감소하는 경향이 나타났다.

**주제어** : 메타소재, 전파흡수체, 테라헤르츠, 전기적 성질, 자기적 성질

### I. 서 론

테라헤르츠(terahertz: THz) 파는  $10^{11}$ ~ $10^{13}$  Hz의 주파수대에 존재하는 전자기파로 파장으로 보면 sub- $\mu\text{m}$  파에 해당하는 적외선과 마이크로파 사이에 걸쳐 있는 파동이다. X-선과는 달리 생체에 안전하기 때문에 X-선 이미징의 대체 등, 광범위한 분야에 응용될 것으로 예상되고 있다[1-3]. 마이크로파나 가시 광에 비해 그 발생 기술이나 검출 기술이 미개적인

주파수 대역이어서 일명 테라헤르츠 갭이라 불려지고 있다. 테라헤르츠 소자 개발에 있어 가장 큰 걸림돌은 이 주파수 영역에서 자기 응답이 가능한 재료가 존재하지 않는다는 것이다. 고주파 특성이 우수한 페라이트의 경우에도 THz 대역을 넘어서면 자기특성을 잃어버린다(투자율 = 0). 따라서 자연적인 소재로는 THz 영역에서 전파흡수체를 구성하기 어렵다.

이러한 문제점에 대한 해결 방안이 split cut wire(SCW) 또는 split ring resonator(SRR)를 이용한 메타소재이다[4, 5]. 메타소재는 구성재의 화학조성보다는 인공적으로 제작한 단위 셀(도체 패턴)의 구조 및 배열에 의해 전자기적 성질(유전율, 투자율)을 변화시키거나 제어하는 특성을 갖는다. 유효매

질 관점에서 메타소재는 유효투자율과 유효유전율에 의해 전자기적 성질이 결정된다. 메타소재의 손실성분을 이용하면 전자파를 흡수할 수 있고, 이러한 특성에 의해 완전 흡수체(100% 흡수율)의 실현이 가능하다. Landy 등은 electric ring resonator(ERR)와 cut wire(CW)로 구성되는 메타소재를 제안하고, 완전 흡수체의 구현 가능성을 처음 제안하였다[6]. 이후 다양한 구조(patch, split cut wire, cross resonator 등)의 메타소재 흡수체가 제안되었다[7-9]. 메타소재의 구성요소인 SCW 또는 SRR의 크기를 THz 파장( $\lambda = 300 \mu\text{m} \sim 3 \text{mm}$ )보다 작게 하고, 배면 접지 면과의 자기공진을 이용하면 THz 흡수체의 설계가 가능하다[10-15].

본 연구의 목적은 메타소재의 자기공진을 이용하여 THz 대역에서 완전 전파흡수체를 구현하는 것이다. 배면이 금속으로 단락된 유전체 기판 상에 split cut wire(SCW)가 배열된 메타소재에서 SCW의 길이와 폭을 조절하여 흡수 주파수를 조절하고, 개수를 늘리는 방법을 도입하여 다중 밴드 흡수체 설계를 시도하였다.

## II. 단일 SCW 전파흡수체

Fig. 1은 상부 SCW와 하부 접지 도체로 구성된 메타소재 흡수체의 구조도이다. 전자기파는 Fig. 1(a)에서와 같이 면에 수직(z 축)으로 입사하며 전계(E)와 자계(H)는 각각 x 축, y 축으로 편파되어 있다. SCW는 Fig. 1(b)와 같이 간격 d로 구분된 두 개의 도체 패치로 구성되어 있다.

메타소재 흡수체의 설계와 분석은 Ansoft사의 고주파 구조 시뮬레이터(high frequency structure simulator: HFSS)를 사용하였다. HFSS는 유한요소 방법(finite elements method: FEM)을 이용한 3차원 전자기 해석 tool이다[16]. HFSS의 시뮬레이션 과정은 ① 분석하고자 하는 모델의 설계 및 자료 입력, ② 경계조건 설정, ③ port 지정을 통한 전자파 인가

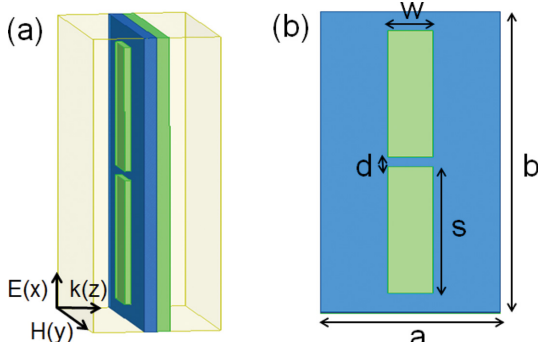


Fig. 1. (Color online) Schematic description of (a) split cut wire (SCW) on grounded dielectric substrate, and (b) its dimension ( $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $w = 5 \sim 8 \mu\text{m}$ ,  $t = 7 \mu\text{m}$ ,  $s = 15 \sim 18 \mu\text{m}$ ).

(excitation), ④ mesh 분할, ⑤ 결과 도출 및 분석으로 구분된다. 입/출력 port를 설정하여 S-parameter를 추출하고, 이를 통해 반사손실 및 투과손실을 복소수로 변환한다. 구조물이 지닌 전계(E), 자계(H) field 분포를 해석함으로써 실제 영역에서의 동작결과를 예측할 수 있다.

Fig. 1에서 제시한 메타구조에서 음의 유전율은 SCW의 L-C 공진에서 기인하고, 음의 투자율은 SCW와 배면도체의 조합에 의한 자기공진으로부터 오기 때문에, SCW의 크기 조절에 의해 유전율 및 투자율의 제어가 가능하고, 이에 따라 전파 특성(반사, 투과, 흡수)을 조절할 수 있다. 크기 변수는 Fig. 1(b)에서와 같이 단위 셀의 크기( $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ ), SCW의 폭( $w = 5 \sim 8 \mu\text{m}$ ) 및 간격( $d = 1 \mu\text{m}$ )과 길이( $s = 15 \sim 18 \mu\text{m}$ ), 그리고 유전체 두께( $t = 7 \mu\text{m}$ )이다. 사용한 유전체는 폴리이미드 필름으로 복수유전율은  $\epsilon_r = 2.88 + j0.09$ 로 주어진다. 금속 도체는 구리(전기전도도  $= 5.8 \times 10^7 \text{ S/m}$ , 두께  $= 0.035 \mu\text{m}$ )이다.

Fig. 2는 SCW의 치수 변화에 따른 반사손실의 변화를 보

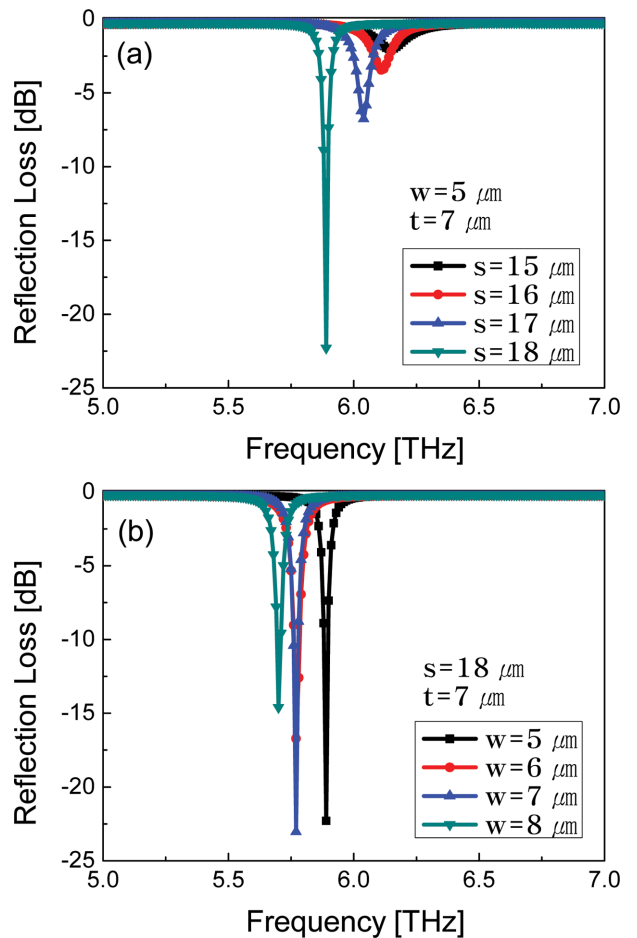


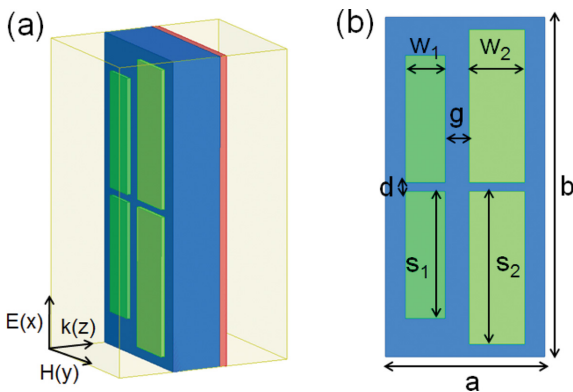
Fig. 2. (Color online) Parametric analysis of reflection loss with variation of (a) SCW length (s) and (b) SCW width (w).

여준다. 단위 셀 및 SCW 크기를  $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $w = 5 \mu\text{m}$ ,  $t = 7 \mu\text{m}$ 로 고정하고, 길이를  $s = 15 \sim 18 \mu\text{m}$ 로 변화시켰을 때, HFSS를 이용하여 simulation한 반사손실을 Fig. 2(a)에 나타내었다. SCW의 길이 ( $s$ )가 길어질수록 공진주파수는 저주파로 이동하면서 반사손실이 급격히 감소함을 볼 수 있다. 길이가  $s = 18 \mu\text{m}$  일 때, 반사손실은 5.8 THz에서 -22 dB로 감소한다. SCW의 길이가 증가할수록 인덕턴스와 커패시턴스가 모두 증가함으로 자기공진은 저주파로 이동한다. 따라서 반사손실은 SCW의 길이 증가에 따라 저주파 대역으로 이동한다.

Fig. 2(b)는 SCW의 길이를  $s = 18 \mu\text{m}$ 로 고정하고, 폭을  $w = 5 \sim 8 \mu\text{m}$  범위에서 변화시켰을 때, 반사손실의 변화를 보여준다. SCW 폭이 증가할수록 공진주파수는 약간씩 저주파 대역으로 이동하며, 모두 -15 dB 이하의 우수한 반사손실을 보인다. SCW의 폭이 증가할수록 인덕턴스는 감소하나 커패시턴스가 증가하기 때문에 공진주파수의 변화가 크지 않다. 따라서 흡수대역 또한 5.6~5.8 THz 범위에 몰려 있음을 볼 수 있다.

### III. 이중 SCWs 전파흡수체

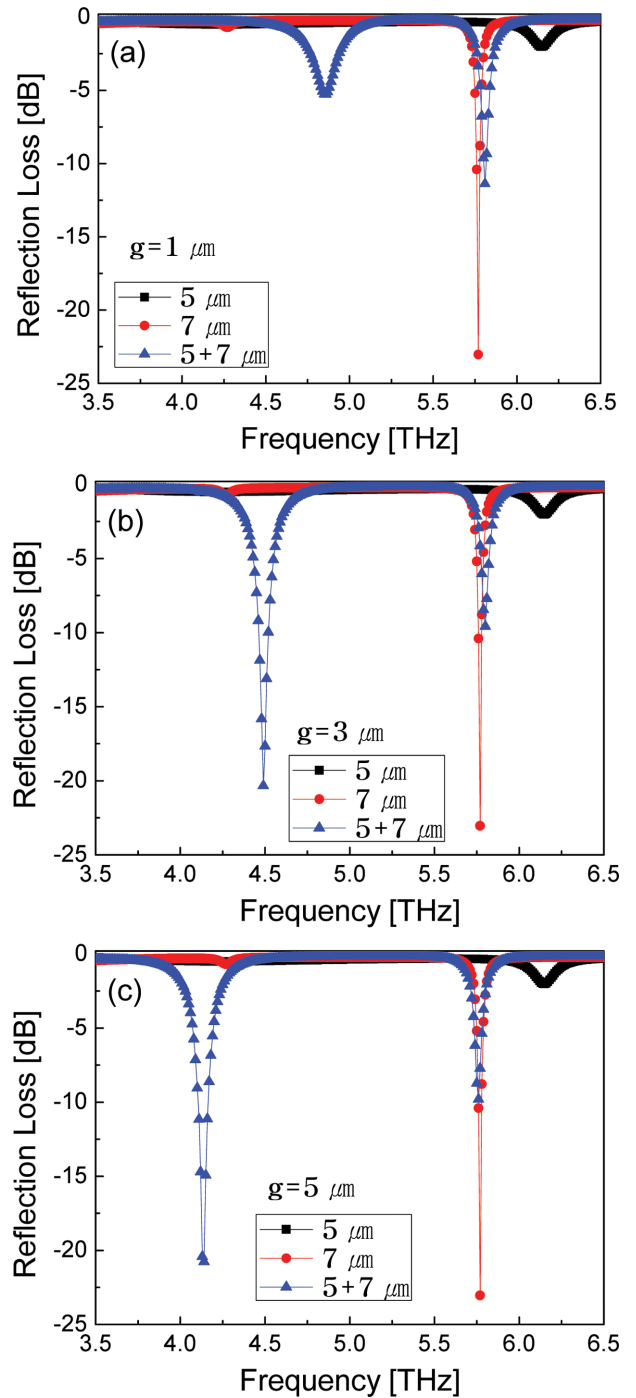
Fig. 3은 double split cut wires(DSCWs) 메타소재 흡수체의 단위 셀 구조도이다. 전자기파는 Fig. 3(a)에서와 같이 면에 수직( $z$  축)으로 입사하며 전기장( $E$ )과 자기장( $H$ )는 각각  $x$  축,  $y$  축으로 편파되어 있다. DSCWs는 Fig. 3(b)와 같이 간격  $g$ 로 구분된 두 개의 SCW 도체 패치로 구성되어 있다. 길이 또는 폭이 다른 두 개의 SCW 도체는 각각의  $L-C$  공진에 의한 공진 주파수를 가지고 있어 다중 흡수밴드를 보이는 흡수체의 설계가 가능하다. Fig. 3(b)에서와 같이 단위 셀



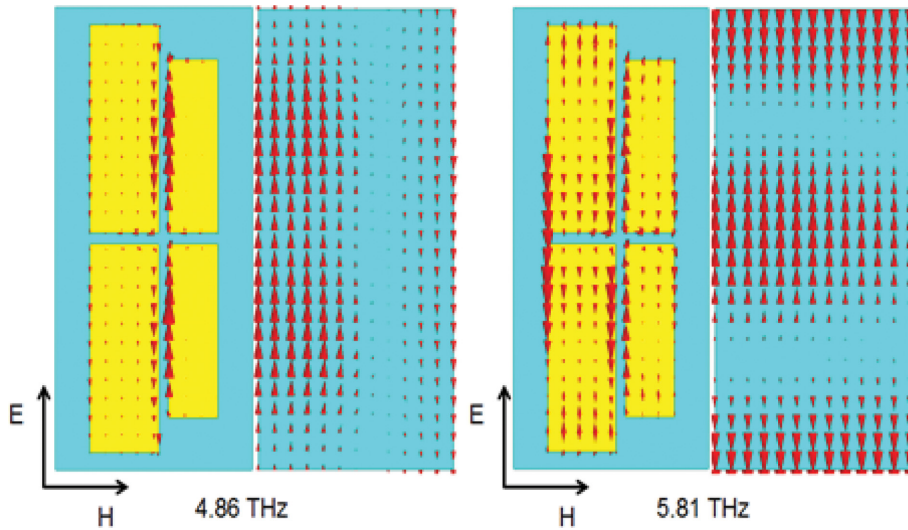
**Fig. 3.** (Color online) Schematic description of (a) double split cut wires (DSCWs) on grounded dielectric substrate, and (b) their dimensions ( $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = 5 \mu\text{m}$ ,  $w_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $s_1 = 15 \mu\text{m}$ ,  $s_2 = 18 \mu\text{m}$ ,  $ts = 1 \mu\text{m}$ ,  $g = 1 \sim 3 \mu\text{m}$ ).

의 크기( $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ )와, 유전체 두께( $ts = 7 \mu\text{m}$ ), SCW 간격( $d = 1 \mu\text{m}$ )를 고정하고, SCW의 폭( $w$ )과 길이( $s$ ), SCW 간의 간격( $g$ )을 변화시켰다.

Fig. 4는 단위 셀 및 DSCWs의 치수가  $a = 20 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \mu\text{m}$ ,  $d = 1 \mu\text{m}$ ,  $w_1 = 5 \mu\text{m}$ ,  $w_2 = 7 \mu\text{m}$ ,  $ts = 7 \mu\text{m}$ ,  $s_1 =$



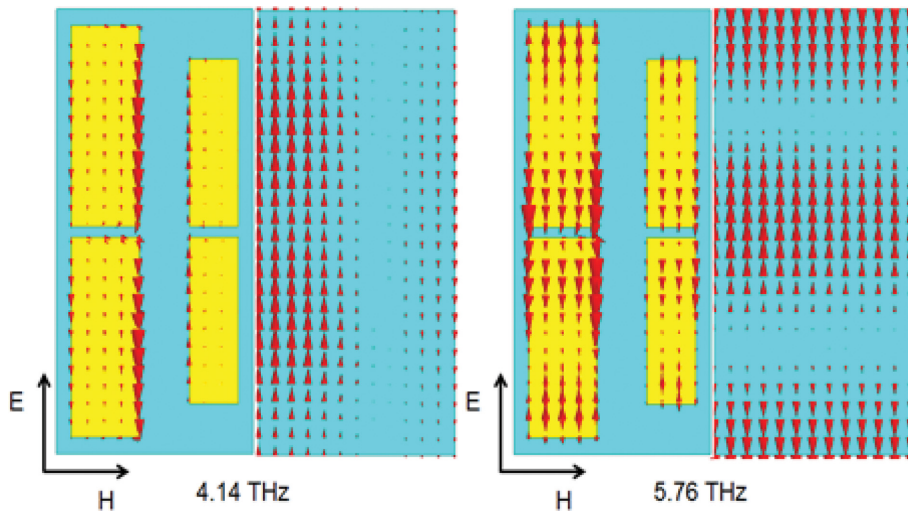
**Fig. 4.** (Color online) Reflection loss of DSCWs metamaterial absorbers with increasing the spacing between SCWs: (a)  $g = 1 \mu\text{m}$ , (b)  $g = 3 \mu\text{m}$ , (c)  $g = 5 \mu\text{m}$ .



**Fig. 5.** (Color online) Current density distribution at DSCWs ( $g = 1 \mu\text{m}$ ) and ground plane at the resonance frequencies: (a) 4.86 THz, (b) 5.81 THz.

$15 \mu\text{m}$ ,  $s_2 = 18 \mu\text{m}$ 로 주어지고, SCW 간의 간격을  $g = 1 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ 로 증가시켰을 때, HFSS를 이용하여 simulation한 반사손실 결과이다. 단일 SCW 흡수체 경우 SCW의 폭과 길이가 각각( $w = 5 \mu\text{m}$ ,  $s = 15 \mu\text{m}$ ), ( $w = 7 \mu\text{m}$ ,  $s = 18 \mu\text{m}$ ) 일 때, 공진주파수는 6.20, 5.75 THz이었는데, 이 두 SCW 흡수체를 간격( $g$ )를 달리하여 하나의 단위 셀에 배치하였을 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 두 개의 흡수 피크를 보인다. 간격이  $g = 1 \mu\text{m}$ ,  $3 \mu\text{m}$ ,  $5 \mu\text{m}$ 로 멀어짐에 따라 두번째 공진주파수는 거의 변화가 없는 반면( $f_2 = 6.20 \text{ THz}$ ), 첫번째 공진주파수는 각각  $f_1 = 4.80 \text{ THz}$ ,  $4.75 \text{ THz}$ ,  $4.15 \text{ THz}$ 로, 저주파로 이동하면서 반사손실은 현저히 감소함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 SCW 간의 간격이  $g = 1 \mu\text{m}$  일 때 공진주파수 ( $f_1 = 4.86 \text{ THz}$ ,  $f_2 = 5.81 \text{ THz}$ )에서 DSCW-PEC 쌍에 유기된 전류밀도를 보여준다. 4.86 THz에서  $s_1$ 에서만 강한 전류분포를 보이며, 배면의 PEC는 SCW와 반대 방향의 전류 분포를 보여 외부 자계에 대한 자기 반응을 보인다. 반면 두번째 흡수 피크가 나타나는 5.81 THz에서는  $s_1$ ,  $s_2$  두 개의 SCW 모두에서 같은 방향으로 전류가 흐르지만 상, 중, 하 세 부분으로 나뉘어진 전류 분포를 보이고 있다. 배면의 PEC 역시 SCW와 반대방향의 전류가 흐르면서 세 부분으로 나뉘어 각각 자기 공진을 일으키고 있다. 공진이 일어나는 전류의 분포 모형을 도체의 면적으로 본다면, 두 번째 흡수 피크가 나타나는 5.81 THz에서 도체의 면적이 넓고 짧기 때문에



**Fig. 6.** (Color online) Current density distribution at DSCWs ( $g = 5 \mu\text{m}$ ) and ground plane at the resonance frequencies: (a) 4.14 THz, (b) 5.76 THz.

SCW-PEC 간의 커패시턴스 감소에 의해 고주파 대역에서 자기공진을 보인다. Fig. 6은  $g = 5 \mu\text{m}$  일 때 공진주파수( $f_1 = 4.14 \text{ THz}$ ,  $f_2 = 5.76 \text{ THz}$ )에서 DSCWs-PEC 쌍에 유기된 전류밀도를 보여준다. 전류밀도 분포는  $g = 1 \mu\text{m}$  일 때와 큰 차이가 없다.

#### IV. 결 론

SCW로 구성된 메타소재 흡수체에서 SCW 도체의 치수 변화에 따른 전파의 반사, 흡수 특성을 THz 대역에서 조사하였다. 유전체 기판(폴리이미드 필름)에 평행한 자기장에 대하여 SCW-배면 도체 간에 반평행 전류가 유기되며 이는 자기공진을 일으킨다. 자기공진 주파수는 SCW 메타구조의 인덕턴스와 커패시턴스에 결정되며, 이에 영향을 주는 인자는 SCW의 폭과 길이이다. SCW의 길이가 증가할수록 인덕턴스와 커패시턴스가 모두 증가함으로 자기공진은 저주파로 이동하였다. 따라서 반사손실은 SCW의 길이 증가에 따라 저주파 대역으로 이동하였다. SCW의 폭이 증가할수록 인덕턴스는 감소하나 커패시턴스가 증가하기 때문에 공진주파수의 변화가 크지 않다. 적절한 SCW의 치수 조절에 의해 5.5~6.0 THz에서 -20 dB 이하의 반사손실을 보이는 전파흡수체를 설계할 수 있었다.

길이가 서로 다른 두 개의 SCWs를 하나의 단위 셀 안에 같이 배치함으로써 두 개의 흡수 피크가 나타나는 이중 밴드 흡수체를 설계할 수 있었다. 이중 밴드 흡수체에서 SCW 간의 간격( $g$ )이 넓어짐에 따라 두 번째 공진주파수는 거의 변화가 없지만 첫 번째 공진주파수는 저주파로 이동하면서 반사손실 값이 현저히 감소하는 결과를 보였다. 전류밀도 분포로부터 첫 번째 공진주파수에서는 길이가 긴 SCW와 배면 도체간의 자기공진이 일어나고, 두 번째 공진주파수에서는 두 개의 SCWs와 배면 도체 간의 자기공진이 일어남을 제시하였다.

시제품 제작과 실제 시험결과를 통한 상기의 설계치 확인은 이루어지지 못하였다. THz 대역에서 완전전파흡수체를 구현하는 메타소재의 패턴 및 치수 설계 방안 제시에 본 연구의 의미가 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호: 2016R1A2B4007970).

#### References

- [1] B. Ferguson and X.-C. Zhang, *Nature Mater.* **1**, 26 (2002).
- [2] H.-T. Chen, W. J. Padilla, J. M. O. Zide, A. C. Gossard, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, *Nature* **444**, 30 (2006).
- [3] W. J. Padilla, M. T. Aronsson, C. Highstrete, M. Lee, A. J. Taylor, and R. D. Averitt, *Phys. Rev. B* **75**, 041102(R) (2007).
- [4] T. J. Yen, W. J. Padilla, N. Fang, D. C. Vier, D. R. Smith, J. B. Pendry, D. N. Basov, and X. Zhang, *Science* **303**, 1494 (2004).
- [5] W. J. Padilla, A. J. Taylor, C. Highstrete, M. Lee, and R. D. Averitt, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 107401 (2006).
- [6] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 207402 (2008).
- [7] C. Hu, X. Li, Q. Feng, X. Chen, and X. Luo, *Opt. Express* **18**, 6598 (2010).
- [8] R. F. Huang, Z. W. Li, L. B. Kong, L. Liu, and S. Matitsine, *PIER B* **14**, 407 (2009).
- [9] V. D. Lam, J. B. Kim, S. J. Lee, and Y. P. Lee, *Opt. Express* **15**, 16651 (2007).
- [10] H. Tao, C. M. Bingham, A. C. Strikwerda, D. Pilon, D. Shrenkhamer, N. I. Landy, K. Fan, X. Zhang, W. J. Padilla, and R. D. Averitt, *Phys. Rev. B* **78**, 241103(R) (2008).
- [11] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, *Opt. Express* **16**, 7181 (2008).
- [12] A. K. Azad, A. J. Taylor, E. Smirnova, and J. F. O'Hara, *Appl. Phys. Lett.* **92**, 011119 (2008).
- [13] N. I. Landy, C. M. Bingham, T. Tyler, N. Jokerst, D. R. Smith, and W. J. Padilla, *Phys. Rev. B* **79**, 125104 (2009).
- [14] H. Zhou, F. Ding, Y. Jin, and S. L. He, *PIER* **119**, 449 (2011).
- [15] K. Iwaszczuk, A. C. Strikwerda, K. Fan, X. Zhang, R. D. Averitt, and P. U. Jepsen, *Opt. Express* **20**, 635 (2012).
- [16] Ansoft Co. web-site: "<http://www.ansoft.co.kr/>", Korea.
- [17] F. Costa and A. Monorchio, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60**, 4650 (2012).
- [18] F. Costa, S. Genovesi, A. Monorchio, and G. Manara, *IEEE Trans. Antennas Propag.* **61**, 1201 (2013).