

## X-대역 응용을 위한 광대역 전파 흡수체 설계

### Design of the Wideband Microwave Absorber for X-band Applications

홍 영 택 · 정 구 호 · 최 재 훈

Young-Taek Hong · Gu-Ho Jeoung · Jaehoon Choi

#### 요 약

본 논문에서는 X-대역(8~12 GHz) 응용을 위한 광대역 전파 흡수체를 제안하였다. 제안된 흡수체 unit cell 구조는 슬롯과 슬릿을 포함하는 공진기, 뒷면의 도체판, 8.5×8.5×0.5 mm<sup>3</sup>의 크기를 갖는 Taconic RF-30( $\epsilon_r=3$ ,  $\tan \delta=0.0014$ ) 기판으로 이루어져 있다. 제안된 흡수체는 9.83 GHz와 10.37 GHz에서 공진이 발생하는 이중 공진 특성을 갖는다. 제안된 흡수체 구조의 동작 원리를 검증하기 위하여 각각의 공진주파수에서 unit cell 구조의 표면 전류 분포를 분석하였다. 제안된 흡수체의 성능을 확인하기 위하여 20×20개의 unit cell 배열 시제품을 제작하였다. 측정 결과, 최대 흡수율을 갖는 지점에서 모두 99 % 이상의 흡수율이 측정되었으며, 측정된 full-width at half-maximum(FWHM) 대역폭은 1.1 GHz(9.51~10.61 GHz)이다.

#### Abstract

In this paper, a wideband microwave absorber for X-band(8~12 GHz) applications is proposed. The structure of the proposed absorber unit cell consists of a resonator with a slot and slit, a backing ground plate, and a Taconic RF-30( $\epsilon_r=3$ ,  $\tan \delta=0.0014$ ) substrate with a dimension of 8.5×8.5×0.5 mm<sup>3</sup>. The proposed absorber has a dual resonance at 9.83 and 10.37 GHz. To demonstrate the operating principle of the proposed absorber structure at each resonance frequency, the simulated current distributions on the unit cell are analyzed. To verify the performance of the proposed absorber, a prototype absorber was fabricated with a planar array of 20×20 unit cells. The measured results exhibit two absorptivity peaks stronger than 99 % and full-width at half-maximum(FWHM) bandwidth of 1.1 GHz(9.51~10.61 GHz).

Key words: Microwave Absorber, Wideband, Dual Resonance

#### I. 서 론

최근 무선통신 시스템의 통신 성능 개선, 군사 응용분야, 전자파 무반향실 구축 등의 다양한 분야에서 전파흡수체에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1]~[6]</sup>. 전파흡수체는 주로 3가지 종류로 분류가 되며, 첫 번째로 전

자파 무반향실 등에 주로 사용되는 피라미드 형태의 테이퍼드형 전파흡수체가 있다<sup>[7]</sup>. 또, 다른 타입의 전파흡수체로 물질의 유전율, 투자율 등이 매우 높은 손실형 전파흡수체가 있다<sup>[8],[9]</sup>. 이러한 종류의 전파흡수체들은 넓은 주파수 대역에서 전자파를 흡수하는 광대역 특성을 갖지만, 흡수체의 물리적인 크기가 크고, 제작 단가가 비싸다

「이 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었음.」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학부(Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received August, 1, 2017 ; Revised September, 5, 2017 ; Accepted September, 8, 2017. (ID No. 20170801-073)

· Corresponding Author: Jaehoon Choi (e-mail: choijh@hanyang.ac.kr)

는 단점이 있다. 마지막 흡수체 종류는 전자기적인 공진을 발생시켜 특정 주파수 대역에서 전파를 흡수하는 공진형 전파흡수체이다<sup>[10]~[13]</sup>. 이러한 공진형 흡수체들은 앞의 구조들과는 다르게 도체면의 구조적 변형을 통하여 설계되기 때문에 매우 낮은 높이를 가지며, 제작이 용이하고, 제작 단가 또한 저렴하다는 장점이 있다. 하지만 공진형 흡수체들은 특정 공진 대역에서만 전파흡수체로 동작하기 때문에 흡수 주파수 대역이 좁다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이중 공진 특성을 이용하여 X-대역(8~12 GHz) 내에서 광대역 특성을 갖는 평면형 전파흡수체를 제안하였다. 제안된 흡수체 구조는 9.83 GHz와 10.37 GHz에서 각기 다른 공진 특성을 가지며, 파라미터 분석을 통해 공진 주파수를 최적화하였다. 광대역 흡수 특성을 얻기 위해서는 두 개의 공진 모드가 높은 흡수특성을 유지하며, 적절히 결합되어야 한다. 제안된 흡수체를 제작하고 측정하여 시뮬레이션된 성능결과와 비교하였으며, 측정된 full-width at half-maximum(FWHM) 대역폭은 1.1 GHz(9.51~10.61 GHz)이다. 참고문헌 [13]의 기존 X-대역 흡수체 연구에서 흡수체는 단일공진을 가지며, 흡수 대역이 매우 좁다는 단점이 있다. 제안된 구조와 같이 이중 공진 특성을 이용하여 흡수체를 설계하는 경우, 보다 넓은 대역에서 사용가능하다는 장점이 있다.

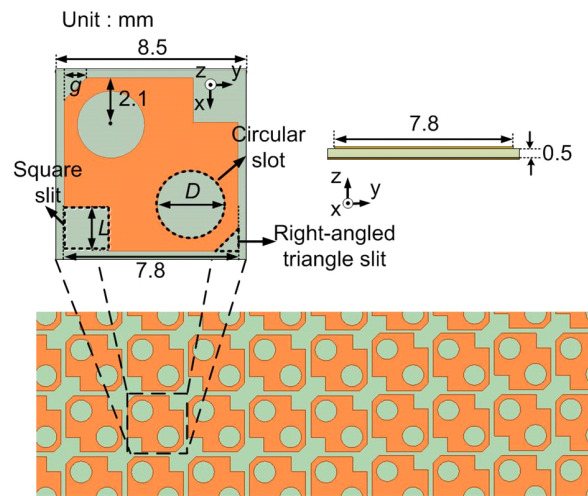
## II. 흡수체 설계

그림 1은 제안된 흡수체의 구조 및 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 제안된 흡수체는 그림 1(a)에 확대되어 표시된 unit-cell 구조가 주기적으로 배열되어 있는 형태이다. 흡수체 unit-cell 구조는  $8.5 \times 8.5 \times 0.5$  mm<sup>3</sup>의 크기를 가지며, Taconic사의 RF-30 ( $\epsilon_r=3$ ,  $\tan \delta = 0.0014$ ) 기판을 이용하여 설계되었다. 기판의 아래면은 8.5 mm의 길이를 갖는 정사각형 접지면이며, 윗면은 7.8 mm의 길이를 갖는 정사각형 도체면에 슬롯과 슬릿이 추가되어 있는 구조이다. 윗면에는 3 mm의 지름을 갖는 원형 슬롯이 좌, 우에 각각 1개씩 위치해 있으며, 4개의 모서리에는 정사각형, 직각삼각형 슬릿이 대칭적으로 위치해 있다. 제안된 흡수체 구조가 설계된 과정은 단계별로 다음과 같다.

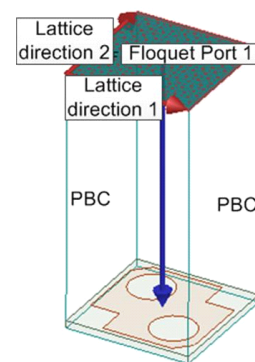
1. Prototype 이중 공진 흡수체로 원형 슬롯 2개만 있는 구조를 설계함.

2. 직사각형 슬릿을 적절히 추가하여 전체적인 공진주파수를 고주파대역으로 이동시킴.
3. 직각삼각형 슬릿을 추가하고 슬롯과 슬릿의 크기를 조절하여 10 GHz 대역에서 흡수체 성능을 최적화함.

슬롯과 슬릿의 설계변수의 변화에 따른 흡수체의 특성을 분석하기 위하여 원형 슬롯의 지름  $D$ , 직각삼각형 슬릿의 밑변 길이  $g$ , 정사각형 슬릿의 길이  $L$  등의 변수를 이용하였다.



(a) 제안된 흡수체의 구조  
(a) Geometry of the proposed absorber



(b) 시뮬레이션 환경  
(b) Simulation setup

그림 1. 제안된 흡수체의 구조 및 시뮬레이션 환경

Fig. 1. Geometry of the proposed absorber and simulation setup.

일반적인 흡수체의 흡수율은 식 (1)과 같이 반사계수 ( $\Gamma$ )와 투과계수( $T$ )를 통해 계산된다.

$$A(\omega) = 1 - \Gamma(\omega) - T(\omega) \quad (1)$$

그러나 제안된 구조의 경우, 기관의 아랫면 전체가 도체면으로 이루어져 있기 때문에 투과계수  $T(\omega)$ 를 0으로 가정할 수 있으며, 이때 흡수율은 반사계수  $\Gamma(\omega)$ 에 의해서 결정된다. 그림 1(b)는 제안된 흡수체의 unit cell 구조를 이용한 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 시뮬레이션은 ANSYS사의 HFSS를 이용하여 수행했으며 흡수체가 주기적으로 배열된 경우를 분석하기 위하여 Floquet-port 급전방식과 주기 경계 조건(Periodic Boundary Conditions: PBC)을 이용하였다<sup>[14]</sup>.

### III. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 2는 제안된 흡수체 구조의 시뮬레이션된 흡수율과 반사율 특성을 나타낸다. 제안된 구조는 9.83 GHz와 10.37 GHz에서 공진이 발생하는 이중 공진 특성을 가지며, 각각의 공진주파수에서 99 % 이상의 흡수율 성능을 가진다. FWHM 대역폭은 1.17 GHz(9.53~10.7 GHz)이다.

그림 3은 제안된 흡수체 구조의 동작 원리를 분석하기 위하여 각각의 공진 주파수에서 시뮬레이션된 표면 전류 분포를 나타낸다. 그림 3(a)는 9.83 GHz에서의 결과를 나타내며, 좌측 상단의 직각 삼각형 슬릿이 있는 지점에서 발생한 전류가 우측 하단의 직각 삼각형 슬릿이 있는 지점으로 흐르는 것을 확인할 수 있다. 두 슬릿 간 전류경로의 길이는 9.83 GHz의 공진 주파수에서 약 반 파장( $\lambda_g/2$ )

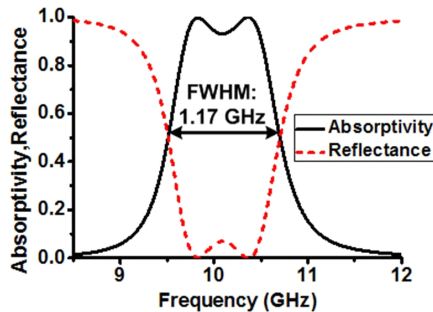


그림 2. 시뮬레이션된 흡수율과 반사율 특성  
Fig. 2. Simulated absorptivity and reflectance characteristics.

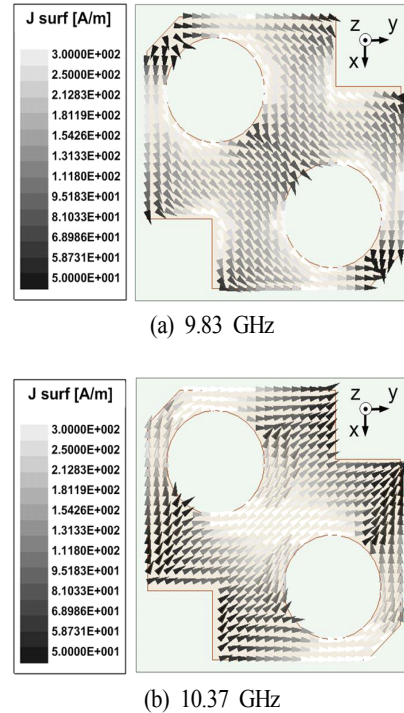
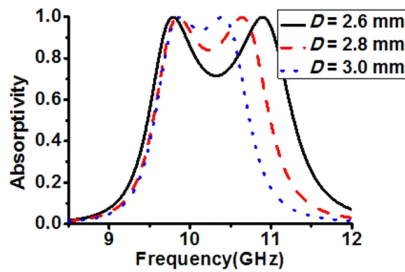


그림 3. 제안된 흡수체의 시뮬레이션된 표면전류분포  
Fig. 3. Simulated surface current distribution of the proposed absorber.

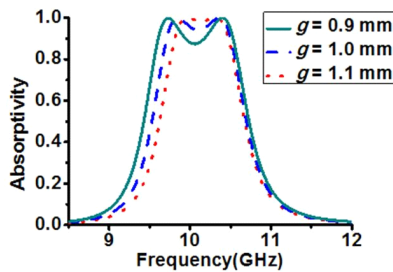
2)에 해당한다. 그림 3(b)는 10.37 GHz에서의 결과를 나타내며, 원형 슬롯을 기준으로 각각 좌측 하단에서부터 우측 상단으로 전류 경로가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 전류 경로 길이는 10.37 GHz의 공진주파수에서 약 반 파장( $\lambda_g/2$ )에 해당한다.

그림 4는 다양한 설계 변수의 변화에 따른 흡수율 특성 변화를 나타내며, 각각의 설계 변수를 변화시키기에 따라 공진주파수가 이동하는 것을 보여준다. 그림 4(a)는 원형 슬롯의 직경  $D$ 의 변화에 따른 흡수율 특성을 나타내며,  $D$ 의 길이가 증가함에 따라 11 GHz 근처의 두 번째 공진이 저주파 대역으로 이동하는 것을 보여준다. 이는 원형 슬롯의 크기가 커질수록 그림 3(b)에 나타나는 공진모드의 전류경로가 길어지기 때문이다. 또한  $D$ 의 길이가 변화하더라도 9.8 GHz에서의 공진특성은 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. 이는 그림 3(a)에 나타나 있듯이 좌측 상단에서 우측 하단으로의 전류경로가 원형 슬롯의 지름  $D$ 의 변화에 대해서 거의 영향을 받지 않기 때문이다. 그림

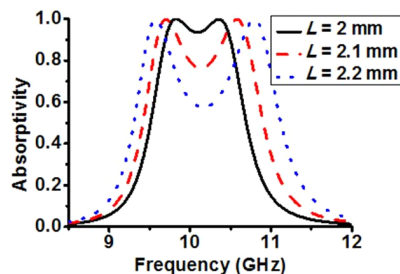
4(b)는 직각 삼각형 슬릿의 길이  $g$ 의 변화에 따른 흡수율 특성을 나타내며,  $g$ 의 길이가 증가함에 따라 9.5 GHz 근처의 첫 번째 공진이 고주파 대역으로 이동하는 것을 보여준다. 이는  $g$ 의 길이가 길어짐에 따라 그림 3(a)에 나타나는 첫 번째 공진의 전류경로가 짧아지기 때문이다. 그림 4(c)는 정사각형 슬릿의 길이  $L$ 의 변화에 따른 흡수율 특성을 나타낸다.  $L$ 의 길이가 감소함에 따라 첫 번째 공진의 공진주파수와 두 번째 공진의 공진주파수가 서로



(a) 원형 슬롯의 직경  $D$ 의 변화  
(a) Variation in the circular slot diameter  $D$



(b) 직각삼각형 슬릿의 길이  $g$ 의 변화  
(b) Variation in the length  $g$  of right-angled triangle slit

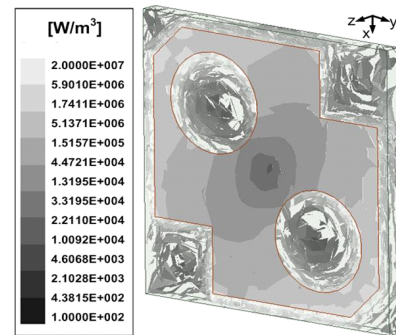


(c) 정사각형 슬릿의 길이  $L$ 의 변화  
(c) Variation in the length  $L$  of square slit

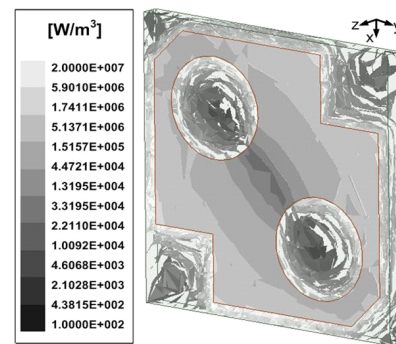
그림 4. 다양한 설계 변수의 변화에 따른 흡수율 특성  
Fig. 4. Simulated absorptivity characteristics for a various design parameter variation.

가까워지는 것을 보여준다. 그림 3에서 보이는 것처럼 각각의 공진주파수에서 나타나는 전류경로는 모두 정사각형 슬릿에 영향을 받는다. 정사각형 슬릿의 크기가 작아질수록 첫 번째 공진주파수에서의 전류경로가 짧아지며, 두 번째 공진주파수에서의 전류경로는 길어지게 된다. 설계 변수 최적화를 통해 얻어진 최종 설계 값은  $D=3$  mm,  $g=1$  mm,  $L=2$  mm이다.  $D$ ,  $g$ ,  $L$  외의 다른 설계 변수로 흡수체 구조의 두께, 원형 슬롯의 위치 등이 있다. 흡수체 구조의 두께를 증가시킬수록 높은 흡수율 성능을 확보할 수 있으며, 원형 슬롯의 위치를 조절하여 저주파 대역의 공진주파수를 변화시킬 수 있다. 최적화된 흡수체 구조의 두께는 0.5 mm이고, 원형 슬롯과 도체 외곽면 사이의 거리는 2.1 mm이다.

그림 5는 제안된 흡수체의 시뮬레이션된 3D 에너지 손



(a) 9.83 GHz



(b) 10.37 GHz

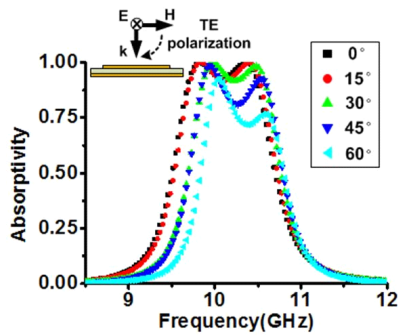
그림 5. 제안된 흡수체의 시뮬레이션된 3D 에너지 손실 분포

Fig. 5. Simulated 3D energy dissipation distribution of the proposed absorber.

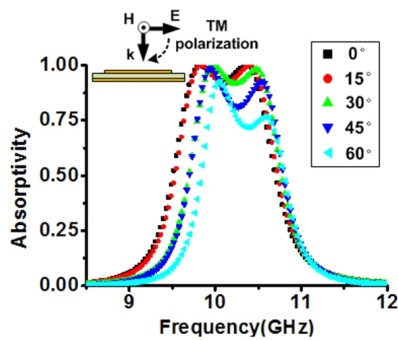


실 분포를 나타낸다. 그림 3의 전류분포와 유사하게 저주파공진의 경우, 직각삼각형 슬릿 간의 전류경로에서 에너지 손실이 많이 발생하고, 고주파 공진의 경우, 정사각형 슬릿 간의 전류경로에서 높은 에너지 손실이 발생한다. 또한 제안된 흡수체의 흡수율에는 기판의 손실성분에 의한 에너지흡수도 포함되지만, 사용된 Taconic RF-30 기판의 손실 값이 매우 낮기 때문에 기판에 의한 에너지 손실 분포는 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 다양한 입사각의 변화에 따른 흡수체의 흡수율 특성을 나타낸다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 TE 모드와 TM 모드 입사파에 대한 시뮬레이션 결과이며,  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 까지 입사각의 변화를 고려하였다. 입사각이  $60^\circ$ 일 때 FWHM 대역폭은 TE 모드의 경우 0.97 GHz( $9.86 \sim 10.83$  GHz)이



(a) TE 모드  
(a) TE mode



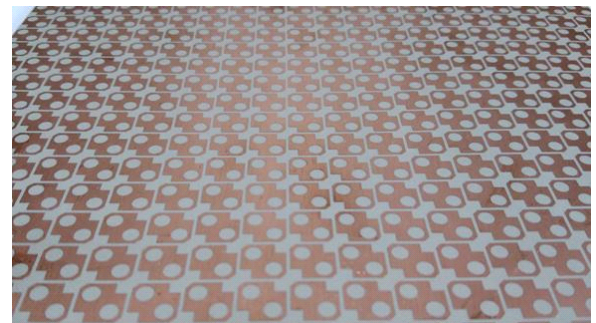
(b) TM 모드  
(b) TM mode

그림 6.  $0^\circ$ 에서  $60^\circ$ 까지 입사각의 변화에 따른 시뮬레이션된 흡수율 특성

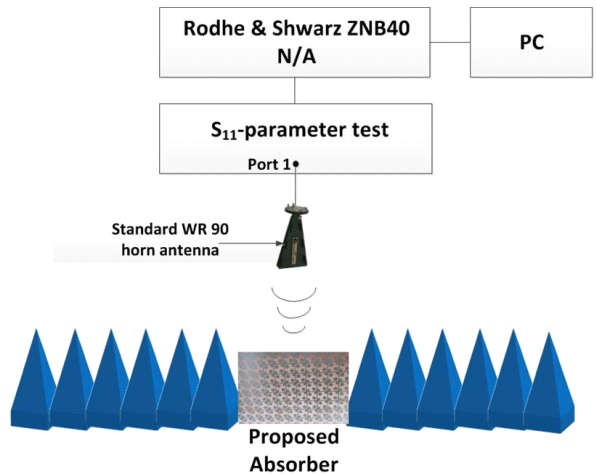
Fig. 6. Simulated absorptivity characteristics at different oblique incident angles ranging from  $0^\circ$  to  $60^\circ$ .

고, TM 모드의 경우 1.02 GHz( $9.85 \sim 10.87$  GHz)이다.

그림 7은 제작된 흡수체의 사진 및 측정 환경 개략도를 나타낸다. 제작된 흡수체 시제품은  $170 \times 170 \times 0.5$  mm<sup>3</sup>의 크기를 가지는 기판에 20×20개의 흡수체 unit cell 구조를 포함하고 있다. 그림 7(b)는 제작된 흡수체 시제품의 흡수율 성능을 측정하기 위하여 구축된 실험 환경을 나타낸다. 측정에는 Rodhe & Shwarz사의 ZNB40 벡터 네트워크 아날라이저와 WR-90 규격의 X-대역 혼 안테나가 사용되었으며, 피라미드 모양의 전파흡수체 물질을 이용하여 흡수체 주변에서 산란되는 전파를 제거하였다. 제안된 흡수체와 동일한 크기를 갖는 도체판을 이용하여 캘리브레이



(a) 흡수체 시제품  
(a) Prototype absorber



(b) 흡수율 측정을 위한 실험 환경  
(b) Test setup for absorptivity measurement

그림 7. 제작된 흡수체의 사진 및 측정 환경 개략도

Fig. 7. Photograph of a fabricated absorber and schematics of the measurement environments.

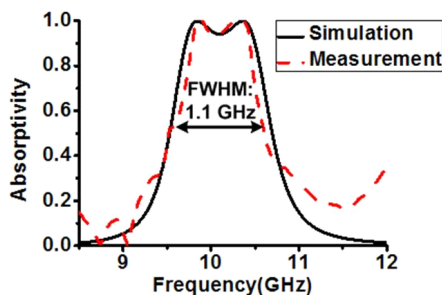


그림 8. 시뮬레이션 및 측정된 흡수율

Fig. 8. Simulated and measured absorptivity.

선(calibration)을 수행하고, 반사계수 측정을 진행하였다.

그림 8은 그림 7의 실험 환경을 통해 측정 및 계산된 흡수율 결과를 나타낸다. 9.88 GHz에서의 흡수율은 99.6 %이며, 10.33 GHz에서의 흡수율은 99.8 %이다. 측정된 FWHM 대역폭은 1.1 GHz(9.51~10.61 GHz)이며, 시뮬레이션 결과와 유사하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 X-대역 응용을 위한 광대역 전파 흡수체를 제안하였다. 제안된 흡수체는 9.83 GHz와 10.37 GHz의 주파수에서 서로 다른 공진 모드를 가진다. 흡수체의 표면전류분포를 이용하여 각각의 공진 모드에 영향을 미치는 설계 변수에 대해 분석하였고, 최적화된 설계 변수로 설계된 흡수체의 FWHM 대역폭은 1.17 GHz(9.53~10.7 GHz)이다. 제안된 흡수체의 성능을 검증하기 위해 시제품을 제작하고, 벡터 네트워크 아날라이저와 WR-90 규격의 X-대역 혼 안테나를 이용해 흡수체의 반사계수를 측정하였다. 측정된 반사계수를 이용하여 계산된 흡수체 시제품의 최대 흡수율은 9.88 GHz에서 99.6 %이고, 10.33 GHz에서 99.8 %이다. 제안된 X-대역 흡수체는 비행체의 스텔스 기술 구현 등 다양한 X-대역 응용분야에 활용 가능할 것으로 사료된다.

#### References

[1] A. Namai, S. Sakurai, M. Nakajima, T. Suemoto, K. Matsumoto, M. Goto, S. Sasaki, and S. I. Ohkoshi, "Synthesis of an electromagnetic wave absorber for high-speed wire-

less communication", *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 131, no. 3, pp. 1170-1173, 2009.

[2] T. Liu, X. Cao, J. Gao, Q. Zheng, W. Li, and H. Yang, "RCS reduction of waveguide slot antenna with metamaterial absorber", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 3, pp. 1479-1484, Mar. 2013.

[3] A. Fallahi, A. Yahaghi, H. R. Benedickter, H. Abiri, M. Shahabadi, and C. Hafner, "Thin wideband radar absorbers", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 12, pp. 4051-4058, Dec. 2010.

[4] S. Bhattacharyya, S. Ghosh, and K. V. Srivastava, "Bandwidth-enhanced metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator for airborne radar applications", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 55, no. 9, pp. 2131-2137, Feb. 2013.

[5] B. K. Chung, H. T. Chuah, "Modeling of RF absorber for application in the design of anechoic chamber", *Prog. Electromagn. Res.* 43, pp. 273-285, 2003.

[6] J. Lee, B. Lee, "Design of thin RC absorbers using a silver nanowire resistive screen", *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 2, pp. 106-111, Apr. 2016.

[7] M. Park, J. Choi, and S. Kim, "Wide bandwidth pyramidal absorbers of granular ferrite and carbonyl iron powders", *IEEE Trans. on Mag.*, vol. 36, no. 5, pp. 3272-3274, Sep. 2000.

[8] T. Nakamura, T. Miyamoto, and Y. Yamada, "Complex permeability spectra of polycrystalline Li-Zn ferrite and application to EM-wave absorber", *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 37, no. 11, pp. 340-347, Jun. 2002.

[9] L. Sun, B. Sun, J. Yuan, and Wending Tang, "Complex permittivity and microwave absorption properties of a composite dielectric absorber", *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 37, no. 11, pp. 2148-2154, Nov. 2005.

[10] J. Tak, Y. Jin, and J. Choi, "A dual-band metamaterial microwave absorber", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 2052-2057, Sep. 2016.

[11] S. Ghosh, S. Bhattacharyya, and K. Srivastava, "Band-

width-enhancement of an ultra thin polarization insensitive metamaterial absorber", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 56, no. 2, pp. 350-355, Feb. 2014.

- [12] S. Bhattacharyya, K. Srivastava, "Triple band polarization-independent ultra-thin metamaterial absorber using electric field-driven LC resonator", *J. Appl. Phys.*, vol. 114, no. 9, pp. 508-515, Jul. 1995.

- [13] Y. Liu, F. D. Flaviis, and N. G. Alexopoulos, "A thin X-band microwave absorber using a center shorted spiral medium", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 271-274, 2009.

- [14] HFSS : High Frequency Structure Simulator based on the Finite Element Method, v.15.0.0, ANSYS Inc.

## 홍 영 택



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)  
2013년 3월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석박사 통합과정  
[주 관심분야] 안테나 설계, WBAN 시스템, EMC

## 최 재 훈



1980년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
1986년: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학석사)  
1989년: 미국 Ohio State University 전기공학과 (공학박사)  
1989년~1991년: 미국 Arizona State University 연구교수

1991년~1995년: 한국통신위성사업단 연구팀장

1995년~현재: 한양대학교 융합전자공학부 교수

[주 관심분야] 이동통신/의료용 안테나 설계, 무선전력전송, WBAN 시스템, EMC

## 정 구 호



2016년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)  
2016년 3월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정  
[주 관심분야] 안테나 설계, WBAN 시스템