

그라운드를 전환하여 주파수를 가변할 수 있는 광대역 메타물질 흡수체

Wideband Frequency Tunable Metamaterial Absorber Using Switchable Ground Plane

정 희 준 · 임 성 준

Heijun Jeong · Sungjoon Lim

요 약

본 연구에서는 그라운드를 전환하여 주파수를 가변할 수 있는 광대역 메타물질 흡수체를 제안하였다. 그라운드 전환을 위해 두 개의 FR4 기판 구조를 제안하였으며, 중간 기판의 다이오드 ON/OFF에 따라 입사되는 신호의 반사, 투과를 조절하여 기판 두께에 따른 주파수 가변 구조를 제안하였다. 이를 증명하기 위해 시뮬레이션과 측정을 통해 중간층이 ON 상태일 경우, 3.5~11 GHz에서 90 % 이상의 흡수율을 가졌고, 중간층이 OFF 상태일 경우, 1.7~5.2 GHz에서 90 % 이상의 흡수율을 가졌다.

Abstract

In this study, we proposed a wideband frequency tunable metamaterial absorber using a switchable ground plane (SGP). We proposed two fire retardant or flame resistant 4 (FR4) substrate structures for the SGP. An SGP is placed at the middle layer, between the top pattern and the bottom ground plane. The SGP can either be made ground or reactive, by switching the PIN diode ON/OFF. As the frequency is determined by the substrate thickness, the frequency can be switched from the SGP. The proposed absorber is demonstrated by full-wave simulations and measurements. When the SGP is turned on, an absorptivity higher than 90% is achieved from 3.5 GHz to 11 GHz. When the SGP is turned off, an absorptivity higher than 90 % is achieved from 1.7 GHz to 5.2 GHz.

Key words: Metamaterial Absorber, Electromagnetic Absorber, Broadband, Frequency Tunable, Switchable Ground Plane

I. 서 론

메타물질은 주기적인 구조를 통해 자연계에서 발견될 수 없는 특이한 성질을 인위적으로 얻을 수 있는 전자기 구조체이다^[1]. 이러한 메타물질은 전자파 흡수 기능으로 피탐지 감소 기술^{[2],[3]}, EMI(Electromagnetic Interface)/EMC

(Electromagnetic Compatibility) 기술^[4] 등에 응용될 수 있다. 기존의 wedge-taper 물질^[5]이나 Jaumann 주파수 선택 구조^[6]와 같은 흡수체는 높은 흡수율과 광대역의 특성을 갖지만, 두껍고 큰 부피와 비용적 단점이 있다. 반면 메타물질 기반의 흡수체는 높은 흡수율을 가지면서도 얇은 두께와 부피로 구현이 가능하다. 또한 PCB 기판 기반으

「이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B3003856).」

중앙대학교 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

· Manuscript received February 20, 2018 ; Revised March 16, 2018 ; Accepted April 4, 2018. (ID No. 20180220-005S)

· Corresponding Author: Sungjoon Lim (e-mail: sungjoon@cau.ac.kr)

로 다양한 패턴을 간단하게 제작할 수 있고 공정 가격도 저렴하다.

반면, 이러한 장점들에도 불구하고, 메타물질 흡수체는 공진 주파수를 이용하기 때문에 좁은 대역폭을 갖는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 다중 공진^[7], 다층 구조^[8] 등을 활용한 대역폭 향상이나 저항성 소자^[9]와 같은 손실이 큰 물질을 사용하여 대역폭을 향상시키는 방법들이 연구되고 있다.

또한 이러한 대역폭의 확장뿐만 아니라, 능동 소자를 이용한 주파수 가변을 통해 더욱 넓은 대역에서의 흡수율을 갖는 흡수체 연구들이 진행되고 있다. 특히 핀 다이오드^[10]나 벡터 다이오드^[11], MEMS^[12]와 같은 전자소자를 이용한 주파수 가변 흡수체는 바이어스 라인 구성의 어려움과 비싼 가격의 단점이 있지만, 즉각적인 주파수 가변과 우수한 주파수 가변이 가능하기 때문에 레이더의 신호로부터 저피탐이 요구되는 스텔스 분야 등에서 많은 응용이 되고 있다.

본 연구에서는 다중 공진, 다층 구조, 저항성 소자를 통한 광대역 특성을 갖는 흡수체를 제안하였을 뿐만 아니라 가변 그라운드 구조(Switchable Ground Plane: SGP)를 통한 흡수 주파수를 가변할 수 있는 구조를 제안하였다. SGP의 ON/OFF에 따라 흡수체의 그라운드 층의 변화에 따른 기판 두께가 변화하기 때문에 이에 따라 SGP가 ON 상태 일 경우 고주파수 대역에서, SGP가 OFF 상태일 경우 저주파수 대역에서 90% 이상의 광대역 흡수 대역을 갖는 흡수체를 제안하였다. 본 연구를 증명하기 위해 시뮬레이션과 측정 결과를 통해 성공적으로 증명하였으며, 자세한 내용은 아래의 내용에서 설명할 예정이다.

II. 흡수체 설계 및 시뮬레이션

그림 1은 제안된 흡수체의 단위 구조이다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 ANSYS사의 high frequency structure simulator(HFSS)를 사용하였다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이, 제안된 흡수체는 두 개의 FR4 기판과 두 개의 공기층으로 구성되어 있다. FR4 기판(유전상수 4.4 손실 탄젠트 0.02)의 두께는 각각 $t_1=0.5$ mm, $t_3=0.8$ mm이며, 공기층은 $t_2=t_4=6$ mm이다. 그림 1(b)를 보면 윗면의 유닛셀은 다중 공진을 위한 두 개의 정사각형 패턴과 흡수체의 대역폭

을 확장시키기 위한 칩 저항($R_1=100$ Ω, $R_2=290$ Ω)으로 구성되어 있다. 또한 패턴을 통한 저주파수 대역에서의 공진주파수 형성에 어려움이 있기 때문에, 추가적으로 칩 인덕터($L_1=47$ nH)를 구성하였다. 그림 1(c)를 보면 중간 FR4 기판에 핀 다이오드를 사용하여 ON/OFF 상태에 따라 그라운드 층의 전환이 가능한 구조를 제안하였다. 이를 위해 SKYWORKS 사의 SMP1340-079LF RF 스위칭 핀 다이오드를 사용하였다. 결국, 중간 기판의 다이오드 ON/OFF 상태에 따라 다이오드가 ON 상태일 경우, 제안된 흡수체의 중간 기판이 그라운드 역할을 하고, OFF 상태일 경우, 맨 아랫면이 그라운드 역할을 하게 된다.

그림 2는 SGP 구조를 통한 주파수 가변 원리를 나타낸 그림이다. 제안된 흡수체의 단위 구조는 그림 2(a)와 같이 윗 면의 두 개의 사각 공진 구조에 의한 두 개의 병렬 회로(세션 A)와 중간층의 핀 다이오드의 스위칭에 의한 회

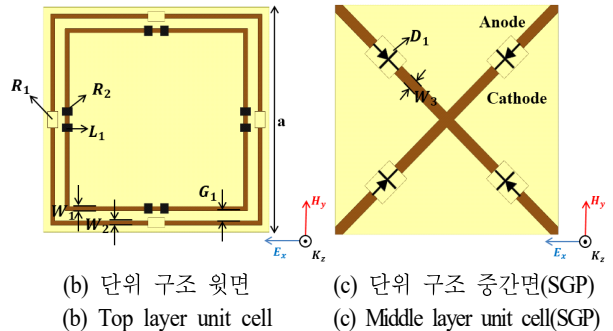
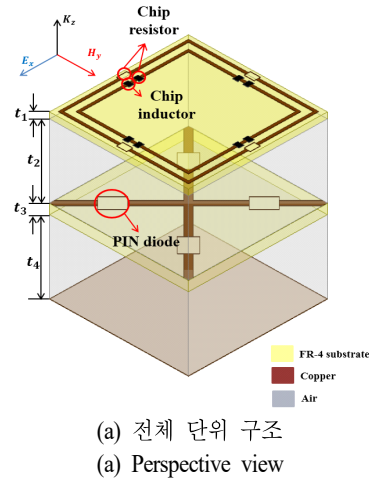


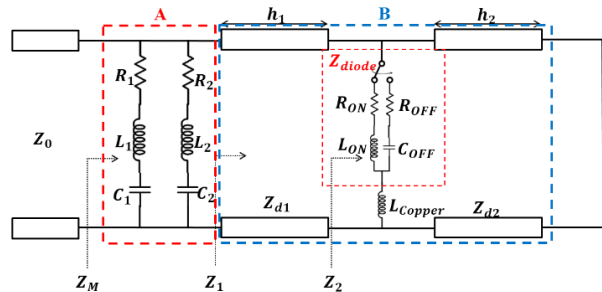
그림 1. 제안된 흡수체의 단위 구조

Fig. 1. Illustration of the unit cell of the proposed absorber.

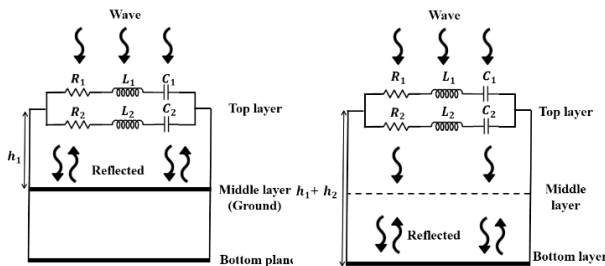
로(세션 B)로 모델링될 수 있다. 핀 다이오드가 ON 상태 일 경우 그림 2(b)와 같이 핀 다이오드는 단락 회로로 동작하기 때문에 중간층은 그라운드의 역할을 하게 된다. 결과적으로 전체 단위 구조의 두께(h_1)가 얇아졌기 때문에 이에 따른 관내 파장(λ_g)이 짧아져 고주파 대역에서 공진주파수를 형성하게 된다.

이와 반면에, 핀 다이오드가 OFF 상태 일 경우 그림 2(c)와 같이 핀 다이오드가 개방 회로로 동작하기 때문에 입사 신호는 중간층을 통과하게 된다. 따라서 전체 단위 구조의 두께(h_1+h_2)가 커져 전체 관내 파장(λ_g)이 커져 저주파 대역에서 공진주파수를 형성하게 된다.

그림 3은 공기층의 두께 변화에 따른 흡수 대역 변화를 나타낸 그래프이다. 그림 3(a)에서 볼 수 있듯이, 윗 공기층의 두께를 변화시켰을 경우, SGP가 ON 상태와 OFF 상



(a) 단위 구조의 등가 회로 모델
(a) The equivalent circuit model of the proposed absorber unit cell



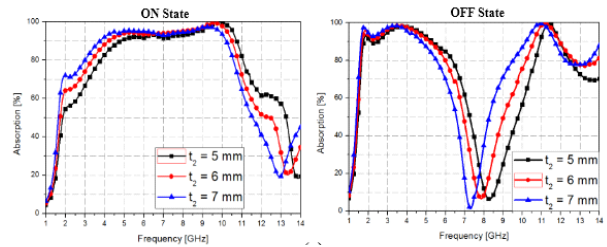
(b) SGP가 ON 상태일 경우 흡수체의 동작 원리
(b) When the SGP turns ON state
(c) SGP가 OFF 상태일 경우 동작 원리
(c) When the SGP turns OFF state

그림 2. SGP 구조를 통한 주파수 가변 원리
Fig. 2. Principal of the proposed frequency reconfigurable absorber using the SGP.

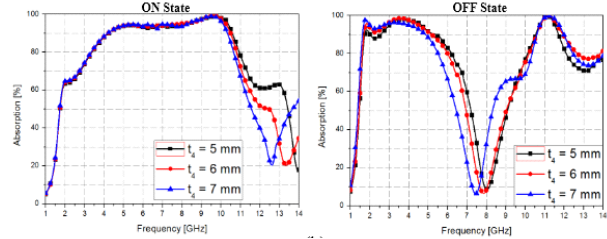
태 모두 흡수 주파수가 변하는 것을 확인할 수 있다. 이와 반면 그림 3(b)에서 확인할 수 있듯이, 아래쪽 공기층의 두께를 변화시켰을 경우, SGP가 ON 상태에서는 흡수 주파수의 변화가 거의 없지만 OFF 상태일 경우 흡수 주파수가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 SGP의 ON/OFF 상태에 따라 입사 신호가 윗 공기층에는 모두 영향을 받지만 아랫 공기층에 대해서는 OFF 상태에서만 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

III. 제작 및 측정

제안된 흡수체의 성능을 검증하기 위해 PCB 애칭 기법과 표면실장공정을 통해 시제품을 제작하였다. 제작된 샘플 크기는 297 mm×297 mm(단위구조 개수는 27×27개)이다. 그림 4(a)와 같이 윗 면에는 두 개의 사각 링을 PCB 애칭 기법을 통해 패터닝하였고, 바깥쪽 링에 1005 크기의 100 옴 칩 저항과 바깥쪽 링에 0603 크기의 290옴 저항을 표면실장공정을 통해 제작하였다. 중간층 역시 PCB



(a) 윗 공기층 두께 변화에 따른 흡수 대역 변화
(a) When upper air layer thickness (T_2) is varied



(b) 아래 공기층 두께 변화에 따른 흡수 대역 변화
(b) when bottom air layer thickness (T_4) is varied

그림 3. 공기층의 두께 변화에 따른 흡수 대역 변화 그래프

Fig. 3. The absorption bandwidth variation according to variation of air layer thickness.

에칭 기법을 통한 패터닝과 표면실장공정을 이용해 편 다이오드를 부착하였다. Skyworks사의 RF 스위칭 편 다이오드는 10 MHz에서 10 GHz까지 동작하기 때문에 본 연구에서는 해당 다이오드를 사용하였다. 또한 다이오드에 DC 바이어스를 인가하기 위하여 그림 4(c)와 같이 바이어스 라인을 구현하였다. 각 열을 하나로 묶어 바이어스 라인을 구현하였기 때문에 최종적으로 두 개의 바이어스 신호만 인가함으로써 바이어스 라인을 간소화하였다. 또한 각 다이오드의 바이어스 라인에 1 nH, 5 nH, 10 nH의 칩 인덕터를 배치하여 바이어스 라인에 불필요한 RF 신호들을 차단하였다(자기 공진 주파수: self resonant frequency는 각각 10 GHz, 7 GHz, 5.2 GHz).

그림 5는 수직 입사했을 때 흡수율을 측정하기 위한 측정 환경이다. 측정 샘플에서만 반사되는 신호를 측정하기 위해 Anritsu사의 MS2038 벡터 네트워크 분석기 장비와 time gating 기법을 이용하여 측정을 진행하였다. 또한 주변 환경으로부터의 반사 및 산란 신호를 제거하기 위해 흡수체 시제품 주위에 wedge-tapered 흡수체를 배치하였고, far-field 조건을 만족시키기 위해 시제품과 송수신용 혼 안테나의 거리는 1 미터로 유지하였다. 또한 편 다이

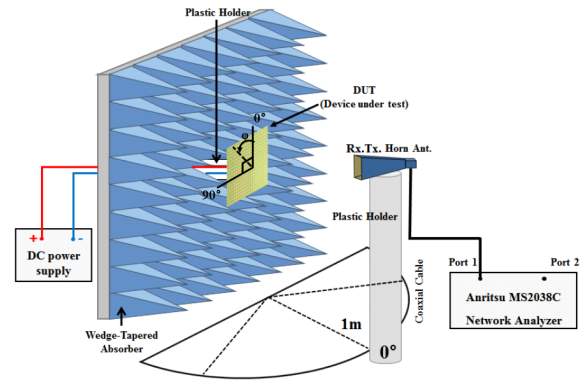


그림 5. 수직입사일 때 흡수율을 측정하기 위한 실험 환경 도시도

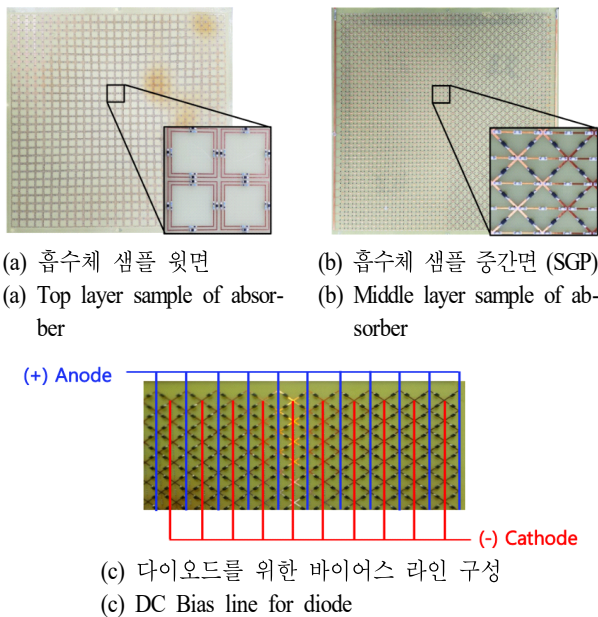
Fig. 5. Illustration of measurement setup for normal incidence.

오드의 DC 전원 공급을 위해 별도의 DC power supply 장비를 사용하였다. 흡수율($A(\omega)$)은 아래의 식 (1)에 의해 결정하였다.

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

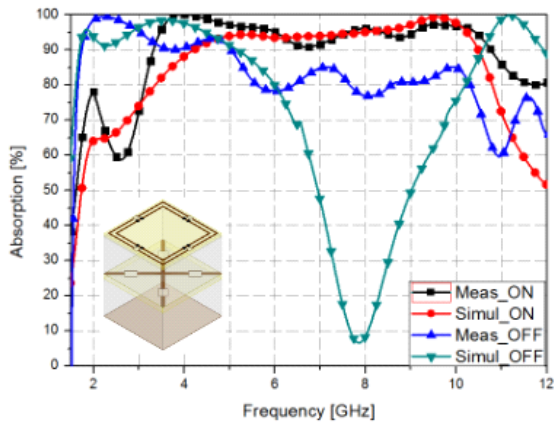
여기에서 제안된 흡수체의 뒷면은 완전히 구리로 덮여 있기 때문에 투과 계수 ($T(\omega)$)는 0으로 가정하였다. 따라서 흡수율 계산을 위해 본 연구에서는 반사 계수($\Gamma(\omega)$)를 측정하여 계산하였다.

그림 6은 SGP의 ON/OFF 상태에 따른 흡수 대역 시뮬레이션과 측정 결과이다. 그림 6(a)에서 확인할 수 있듯이, SGP가 ON 상태일 경우, 90% 이상 흡수 대역은 4.21 GHz에서 10.46 GHz의 시뮬레이션 결과와 3.4 GHz에서 10.8 GHz의 측정 결과를 갖는다. 반면 SGP가 OFF 상태일 경우 90% 이상 흡수 대역은 1.7 GHz에서 5.13 GHz의 시뮬레이션 결과와 1.7 GHz에서 5.0 GHz의 측정 결과를 갖는다. 또한 제안된 흡수체의 SGP ON/OFF를 위해 바이어스 라인이 요구되는데, 이를 추가한 그림이 6(b)이다. 그림 6(b)에서 확인할 수 있듯이, 바이어스 라인이 추가되었을 경우, 노이즈 차단을 위한 칩 인덕터들(2, 4.7, 10 nH)로 인해 4~10 GHz 대역에서 흡수율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 칩 인덕터의 자기공진주파수(10, 6.9, 5.2 GHz)로 인해 기존 그림 6(a)에서 발생하는 시뮬레이션과 측정 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

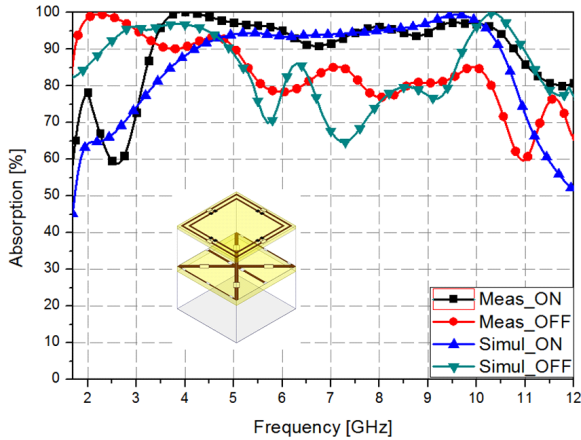


(a) 흡수체 샘플 윗면 (a) Top layer sample of absorber
 (b) 흡수체 샘플 중간면 (SGP) (b) Middle layer sample of absorber
 (c) 다이오드를 위한 바이어스 라인 구성 (c) DC Bias line for diode

그림 4. 제작된 흡수체 샘플
 Fig. 4. The fabricated sample of proposed absorber.



(a) 바이어스라인을 추가하지 않았을 경우
(a) Without bias-line



(b) 바이어스라인을 추가하였을 경우
(b) With bias-line

그림 6. SGP의 ON/OFF 상태에 따른 흡수 대역 시뮬레이션과 측정 결과

Fig. 6. Simulation and measurement results according to the SGP ON/OFF state.

IV. 결 론

본 연구에서는 그라운드를 전환하여 주파수를 가변할 수 있는 광대역 메타물질 흡수체를 제안하였다. 그라운드를 전환할 때 발생하는 단위 구조 두께의 변화를 통해 주파수 가변을 제안하였는데, 이를 위해 두 개의 FR4 기판과 중간 공기층을 제안하였다. 중간 FR4 층에 핀 다이오드를 배치하여 ON/OFF 상태에 따라 단락 및 개방 회로로 동작함으로써 중간 FR4 층에 입사 신호가 반사/투과하게

된다. 결과적으로 중간층이 SGP로 동작하게 되므로 그라운드 전환이 이뤄지게 된다. 이를 증명하기 위해 전자파 수치 해석과 실험을 통해 연구를 진행하였으며, 흡수율 측정을 위해 297 mm×297 mm 크기의 샘플을 PCB 애칭과 표면실장공정을 통해 제작하였다. 제작된 샘플의 흡수율 측정 결과, SGP가 ON 상태일 경우 시뮬레이션에서는 4.21 GHz에서 10.46 GHz까지, 측정치에서는 3.4 GHz에서 10.8 GHz까지 90 % 이상의 흡수율을 보였다. SGP가 OFF 상태일 경우 시뮬레이션에서는 1.7 GHz에서 5.13 GHz까지, 측정치에서는 1.7 GHz에서 5.0 GHz까지 90 % 이상의 흡수율을 보였다. 따라서 제안된 SGP 구조는 광대역 메타물질 흡수체의 주파수를 성공적으로 가변할 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 제안된 흡수체는 전자파 스텔스 기술과 같은 넓은 대역폭을 요구하는 흡수체 응용 분야에 실용적으로 적용될 것이라고 기대한다.

References

- [1] C. M. Watts, X. Liu, and W. J. Padilla, "Metamaterial electromagnetic wave absorber," *Advanced Materials*, vol. 24, no. 23, pp. 98-120, 2012.
- [2] D. Schuring, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, and A. F. Starr., "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies," *Science*, vol. 314, no. 5801, pp. 977-980, 2006.
- [3] K. Iwaszczuk, A. C. Strikwerda, K. Fan, X. Zhang, R. D. Averitt, and P. U. Jepsen, "Flexible metamaterial absorber for stealth applications at terahertz frequencies," *Optics Express*, vol. 20, no. 1, pp. 635-643, 2012.
- [4] S. Shahparnia, O. M. Ramahi, "Electromagnetic interference(EMI) reduction from printed circuit boards(PCB) using electromagnetic bandgap structure," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 46, no. 4, pp. 580-587, 2004.
- [5] C. L. Holloway, E. F. Kuester, "A low-frequency model for wedge or pyramid absorber arrays-II: Computed and measured results," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 36, no. 4, pp. 307-313, Nov. 1994.

- [6] L. J. Du Toit, "The design of Jauman absorbers," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 36, no. 6, pp. 17-25, Dec. 1994.
- [7] X. Y. Peng, B. Wang, S. Lai, D. H. Zhang, and J. Teng, "Ultrathin multi-band planar metamaterial absorber based on standing wave resonances," *Optics Express*, vol. 20, no. 25, pp. 27756-27765, 2012.
- [8] M. Yoo, H. K. Kim, and S. Lim, "Angular and polarization-insensitive metamaterial absorber using subwavelength unit cell in multi-layer technology," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 414-417, 2016.
- [9] C. Mias, J. H. Yap, "A varactor-tunable high impedance surface with a resistive-limped-element biasing grid," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 7, pp. 1955-1962, Jul. 2007.
- [10] W. Xu, S. Sonkusale, "Microwave diode switchable metamaterial reflector/absorber," *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 031902, 2013.
- [11] H. K. Kim, D. Lee, and S. Lim, "Frequency tunable metamaterial absorber using varactor-loaded fishnet-like resonator," *Applied Optics*, vol. 55, no. 15, pp. 4113-4118, May 2016.
- [12] H. Bilgin, S. Zahertar, S. Sadeghzadeh, A. D. Yalcinkaya, and H. Torun, "Physical a MEMS-based terahertz detector with metamaterial-based absorber and optical interferometric readout," *Sensors Actuators A: Physical*, vol. 244, pp. 292-298, 2016.

정 희 준



2016년 2월: 안양대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2018년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 2018년 3월~현재: 중앙대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 메타물질

임 성 준



2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학석사)
 2006년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학박사)
 2006년~2007년: University of California, Irvine Post-Doc.
 2007년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 정교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나