

## 단위 셀 크기에 따른 금속 픽셀 기반 메타표면 흡수체의 대역폭 분석

Analysis of Bandwidth of Pixelated Metallic Metasurface Absorber  
for Its Unit Cell Size

장 삼 봉 · 김 용 준\* · 이 정 해

Sambong Jang · Yongjune Kim\* · Jeong-Hae Lee

## 요 약

메타표면 흡수체의 대역폭은 기판의 두께, 기판 상부에 결합되는 전도성 패턴의 형상, 또는 전도율 변화를 통해 조절될 수 있는 것으로 알려져 왔다. 본 논문에서는 금속 픽셀로 구성된 메타표면 흡수체의 단위 셀 크기 변화에 따른 흡수 대역폭 변화를 분석하였다. 단위 셀은  $16 \times 16$ 개의 정사각 픽셀로 차분하였으며, 서로 다른 크기의 각각의 단위 셀에 금속 픽셀을 최적으로 배치하기 위하여 유전 알고리즘을 이용하였다. 이때, 단위 셀 크기는 수직 입사 조건에서 그레이팅 로브가 발생하지 않는  $1/2$  파장 부근에서 조절하였다. 전파 시뮬레이션 결과, 중심 주파수 5.8 GHz를 기준으로 단위 셀의 한 변의 길이를  $3/8$  파장 부근에서  $3/4$  파장까지  $1/8$  파장 간격으로 증가시킴에 따라  $-10$  dB 반사율 대역폭이 증가함을 확인하였다. 이로부터  $1/2$  파장 근처에서 메타표면 흡수체의 패턴이 최적으로 설계될 경우, 단위 셀의 크기 증가에 따라 흡수 대역폭이 증가함을 확인하였다.

## Abstract

The absorption bandwidth of a metasurface absorber can be adjusted by varying the thickness of the substrate, shape of the conductive pattern attached on top of the substrate, or conductivity of the pattern. In this study, the bandwidth of a pixelated metallic metasurface absorber was analyzed with respect to its unit cell size. The genetic algorithm (GA) was used to determine the best combination of the metallic pixels among  $16 \times 16$  square pixels for each unit cell size. The size of the unit cell was adjusted around the  $1/2$  wavelength, which guarantees the suppression of the grating lobe for the normal-incidence condition. Based on full-wave simulation results, the  $-10$  dB reflectance bandwidth was expanded as the size of the unit cell was increased from  $3/8$  to  $3/4$  wavelength with an interval of  $1/8$  wavelength at the center frequency of 5.8 GHz. The results demonstrate that the absorption bandwidth of the metasurface absorber is expanded by increasing the size of the unit cell around the  $1/2$  wavelength.

Key words: Metasurface Absorber, Absorption Bandwidth, Unit-Cell Size, Pixelated Metal, Genetic Algorithm

## I. 서 론

메타표면 흡수체는 금속 또는 높은 저항 성분을 갖는 전도성 패턴 설계를 통해 유전 손실(dielectric loss) 및 저

「이 연구는 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과 (Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

\*수원대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, The University of Suwon)

· Manuscript received August 22, 2022 ; Revised September 19, 2022 ; Accepted October 31, 2022. (ID No. 20220822-062)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

항성 손실(ohmic loss)을 이용하여 전자기파를 열로 소실시킬 수 있는 구조 기반의 흡수체이다<sup>[1]~[11]</sup>. 재료의 물성으로 흡수 성능이 결정되는 기존 흡수체와는 달리 메타표면 흡수체는 매우 얇은 유전체 상부에 패턴을 결합하여 흡수율을 높이거나<sup>[2],[3]</sup>, 바닥면에도 동시에 금속 패턴 또는 반사 층을 결합하여 완전 흡수<sup>[1]</sup> 또는 광대역 흡수 성능<sup>[4]~[11]</sup>을 구현할 수 있다.

그중 단일 구조를 이용하여 넓은 대역을 흡수할 수 있는 광대역 메타표면 흡수체 설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 이를 위해 기판의 유전율을 낮추고, 그 높이는 증가시키거나<sup>[5],[12]</sup>, 패턴의 층수 증가<sup>[6]</sup>, 또는 저항을 추가<sup>[4],[7]</sup>하여 흡수 대역폭을 넓히는 방법이 보고되었다. 하지만 기존 연구는 개방형 공진기(split resonator)<sup>[1]~[5]</sup>, 막대<sup>[6],[7]</sup>, 또는 십자가 구조<sup>[8]</sup> 등 정형화된 패턴을 이용하므로 패턴 설계 자유도가 낮아 흡수 대역폭을 물리적인 한계치까지 극대화하는 데 한계가 있다.

이를 극복하기 위한 방안으로 최근 유전 알고리즘<sup>[9]~[11],[13]</sup> 또는 코딩 방법<sup>[14]</sup>을 활용하여 비정형 패턴을 최적화하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 유전 알고리즘을 활용할 경우 메타표면 흡수체의 단위 셀 크기가 변하여도 동일한 설계 파라미터를 활용하여 시행착오 없이 메타표면 흡수체를 최적으로 재설계할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 유전 알고리즘으로 최적화된 금속 픽셀로 구성된 메타표면 흡수체의 단위 셀 크기 변화에 따른 대역폭 특성을 분석하였다. 이를 기반으로 단위 셀 크기 증가를 통해 흡수 대역폭을 넓힐 수 있음을 확인하였다.

## II. 단위 셀 크기에 따른 메타표면 흡수체 설계 결과

메타표면 흡수체 단위 셀 설계를 위해 그림 1과 같이 유전체 기판 상부를 x, y축 방향으로 16개의 정사각 픽셀로 차분하였다. 16개의 정사각 픽셀은 3/8 파장 크기의 단위 셀 설계를 통해 최소 픽셀 개수로 확인되었다. 기판으로는 유전율 4를 갖고 손실 탄젠트값이 0.014인 두께 3.2 mm의 FR4가 사용되었으며, 기판 하부에는 완전 도체(perfect conductor)를 결합하였다. 그림 1(a)는 유전 알고리즘에 사용되는 비트 배열의 첫 번째 비트와 매치되는 픽

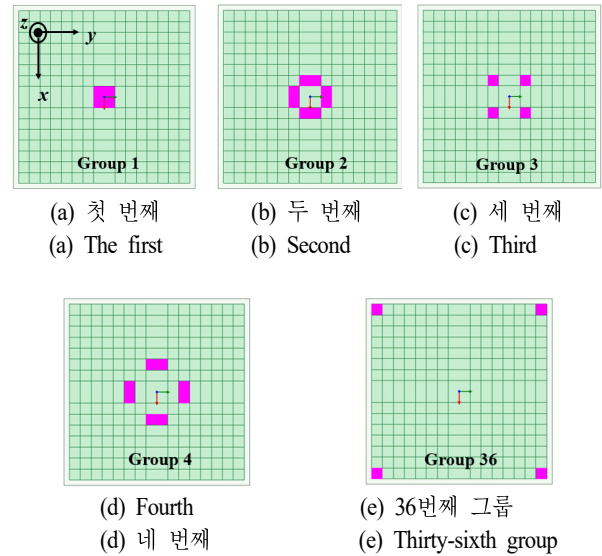


그림 1. 16×16개의 정사각 픽셀로 차분된 메타표면 흡수체 상부 및 유전 알고리즘의 비트에 매치되는 각각의 그룹

Fig. 1. The top of metasurface absorber discretized into 16×16 square pixels and each group matched to the bit used in the genetic algorithm.

셀 그룹을 나타낸다. x, y 축에 대한 대칭성을 유지하는 픽셀을 그룹으로 묶었으며 비트가 1인 경우 구리로, 0인 경우 공기로 채워지도록 설정하였다. 이때 비트를 픽셀로 매치시키는 과정을 디코딩, 픽셀을 비트로 매치시키는 과정을 인코딩으로 지칭한다. 그림 1(b)~그림 1(e)는 두 번째 그리고 마지막 36번째 비트와 매치되는 픽셀 그룹을 나타낸다. 본 논문에서는 단위 셀 크기가 증가하여도 차분된 픽셀 개수를 유지시킴으로써 동일한 조건으로 유전 알고리즘을 적용할 수 있다.

유전 알고리즘 적용을 위한 초기 조건으로 비트 수와 동일하게 36개의 비트 배열을 랜덤하게 생성한 뒤<sup>[9]~[11],[13]</sup>, 디코딩 과정을 거쳐 Ansys HFSS 시뮬레이터로 시뮬레이션 하였다. 성능 지표(figure of merit)로 식 (1)과 같이 중심 주파수인 5.8 GHz와 0.2 GHz 대역폭에 해당하는 5.7, 5.9 GHz 세 개의 주파수에서 반사율의 평균을 계산하였으며, 그 값이 최소가 되는 한 쌍의 비트 배열을 선택하였다.

$$FOM = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 |S_{11}(f_k)|^2 \quad (1)$$

반사율은 master/slave 경계조건하에 파워를 인가하는 Floquet 포트에서 계산되는  $|S_{11}|^2$ 으로 정의하였다.

선택된 한 쌍의 비트 배열에 유전 알고리즘을 적용하여 새로운 36개의 비트 배열을 생성하였으며, 그중 성능 지표가 최소가 되는 한 쌍을 선택하는 반복 과정을 거쳐 최적의 메타표면 흡수체 단위 셀을 설계하였다. 그림 2는 단위 셀 크기별로 유전 알고리즘 반복 횟수에 따른 성능 지표를 나타낸다. 단위 셀 크기는 중심 주파수 5.8 GHz를 기준으로 자유공간상의 한 파장을  $\lambda_0$ 이라 할 때  $3/8\lambda_0$ 부터  $3/4\lambda_0$ 까지  $1/8\lambda_0$  간격으로 증가시켰다. 단위 셀의 크기는 수직 입사 조건에서 흡수가 완벽히 이루어지지 않았을 때 패턴의 재방사로 인해 나타날 수 있는 그레이팅 로브 문제가 발생하지 않는  $1/2\lambda_0$  크기<sup>[15]</sup> 부근에서 조정되었으며, 알고리즘의 반복 횟수는 최대 20회로 설정하였다. 이때 성능 지표가 세 번 이상 같은 값으로 확인될 경우 설계가 충분히 수렴한 것으로 간주하고 시뮬레이션을

종료하였다.

그림 3은 최적으로 설계된 메타표면 흡수체의 주파수 축 반사 계수 결과를 나타낸다. 그림 3으로부터 단위 셀의 크기가 증가함에 따라  $-10$  dB 반사율 대역폭이 증가하는 경향성을 확인할 수 있다. 하지만 단위 셀의 크기가  $3/4\lambda_0$ 인 경우 그림 2(d)와 같이 성능 지표는 수렴하였지만 단위 셀 크기가  $5/8\lambda_0$ 인 경우 대비 대역폭이 더 증가하지 않는 것으로 확인되었다. 이는 성능 지표에 반영한 대역폭 0.2 GHz에서  $-10$  dB 반사율이 달성되었고, 단위 셀 크기가 증가함에 따라 정사각 픽셀의 크기도 같이 증가하여 패턴의 해상도가 낮아졌기 때문으로 판단된다. 따라서 단위 셀의 크기가  $3/4\lambda_0$ 인 경우 픽셀 개수를 20개로 증가시키고 성능 지표에 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 6.0 GHz에서의 반사율이 반영되도록 변경하여 최적화를 추가로 진행하였다. 그 결과 그림 4와 같이  $-10$  dB 반사율 대역폭이 증가된 결과를 확인하였다. 그림 5는 각각의 단위 셀 크기에 대한  $-10$  dB 반사율 대역폭을 나타내며, 단위 셀

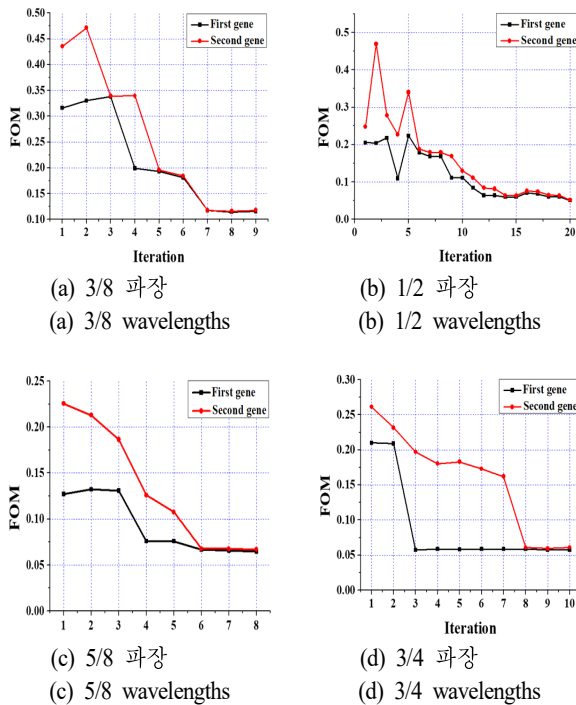


그림 2. 단위 셀 크기별 유전 알고리즘 반복 횟수에 따른 성능 지표

Fig. 2. Figure of merits vs. the number of iterations of the genetic algorithm for each unit cell size.

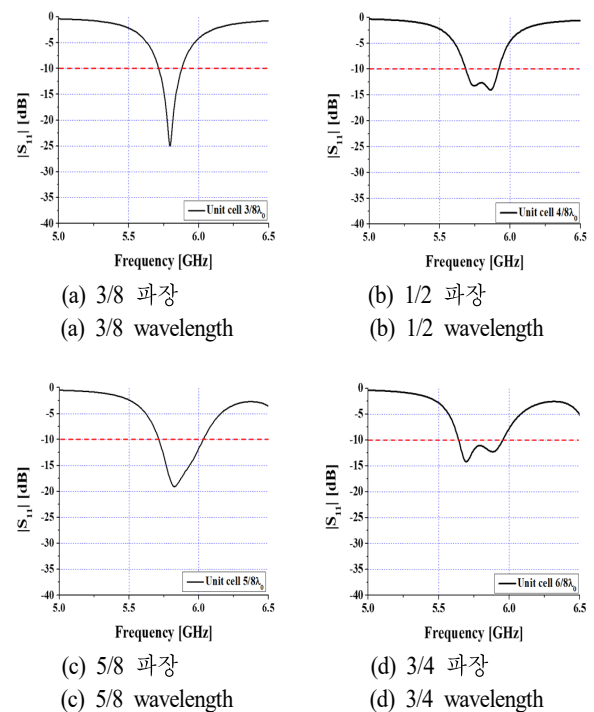


그림 3. 단위 셀 크기별 메타표면 흡수체의 반사 계수

Fig. 3. Reflection coefficient of the metasurface absorber for each unit cell size.

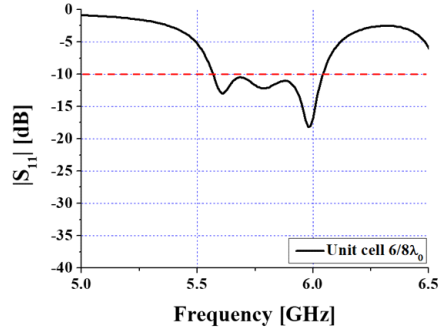


그림 4. 단위 셀 크기가 3/4 파장인 경우 20×20 픽셀을 이용하여 최적으로 설계한 메타표면 흡수체의 반사 계수

Fig. 4. Reflection coefficient of the metasurface absorber optimized using 20×20 pixels for 3/4-wavelength unit cell size.

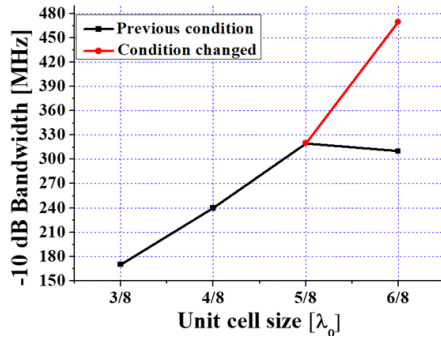


그림 5. 각각의 단위 셀 크기에 대해 최적 설계된 메타표면 흡수체의 -10 dB 반사율 대역폭

Fig. 5. -10 dB reflectance bandwidth of metasurface absorbers optimized for each unit cell size.

크기가 3/8, 4/8, 5/8, 6/8  $\lambda_0$ 일 때 각각 170, 240, 320, 310 MHz의 대역폭이 확인되었다. 단위 셀 크기가 3/4  $\lambda_0$ 인 경우 픽셀 개수를 증가시키고, 성능 지표를 조정한 후, 조정 전 확인된 대역폭 310 MHz보다 160 MHz 증가한 470 MHz의 대역폭이 확인되었다. 이로부터 단위 셀 크기와 픽셀 개수를 동시에 증가시킬 때 흡수 대역폭이 추가로 증가함을 확인할 수 있다.

표 1은 메타표면 흡수체의 대역폭을 그림 4에 나타낸 반사 계수의 대역폭으로 평가하는 것이 타당한지 검증하기 위해 계산한 결과를 나타낸다. 메타표면 흡수체의 구리 패턴과 기판 내부에서 power loss density<sup>[9]~[11],[16]</sup>를 각

표 1. 단위 셀 크기가 3/4 파장인 경우 20×20 픽셀을 이용하여 최적으로 설계한 메타표면 흡수체의 흡수율 검증

Table 1. Verification of absorption of the metasurface absorber optimized using 20×20 pixels for 3/4-wavelength unit cell size.

Frequency [GHz]	Ohmic loss [%]	Dielectric loss [%]	Total loss [%]	$1 -  S_{11} ^2$ [%]
5.8	57.0	37.0	94.0	93.9

각 적분하여 손실된 파워를 계산하고, 입사 전자기파의 파워 1 W로 나누어 저항성 손실율과 유전 손실율을 각각 계산한 뒤, 두 값을 더하여 총손실율을 계산하였다. 또한 입사파의 파워 비율 1과 반사율  $|S_{11}|^2$ 의 차이로부터 근사적으로 계산한 손실율을 표 1의 가장 우측 열에 정리하였다. 표 1로부터 적분을 통해 정확히 계산한 총손실율과  $1 - |S_{11}|^2$ 로 근사적으로 계산한 결과가 서로 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 이로부터 그림 3~그림 5로부터 확인한 -10 dB 반사율 대역폭이 메타표면 흡수체의 흡수 성능을 평가하는데 유효함을 확인할 수 있다.

표 2는 금속 픽셀로 최적화된 메타표면 흡수체와 동일하게 단층 기판과 단일 금속 패턴으로 설계된 기존 완전 흡수 메타물질 흡수체<sup>[1]</sup>, 전기적 공진<sup>[2]</sup> 및 비대칭 이중 공진기<sup>[17]</sup> 기반 메타표면 흡수체의 흡수 대역폭을 나타낸다. 이 중 단위 셀의 모양이 직사각형인 경우<sup>[1],[2]</sup> 가로와 세로 길이를 곱한 뒤 제곱근을 취하여 단위 셀의 크기를 정의하였고, 전기적 길이를 정의하는 파장은 흡수 대역의 중심 주파수를 기준으로 정하였다. 표 2로부터 제안된 메

표 2. 단층 기판과 금속 패턴으로 구성된 메타표면 흡수체의 90 % 흡수 대역폭

Table 2. 90 % absorption bandwidths of metasurface absorbers composed with single substrate and pattern.

	Unit-cell size ( $\lambda_0$ )	90 % absorption bandwidth	Fractional bandwidth (%)
Fig. 2 in Ref. [1]	0.28	11.57~11.72 GHz	1.29
Fig. 15 in Ref. [2]	0.17	9.06~9.14 GHz	0.9
Fig. 4 in Ref. [17]	0.61	4.54~4.58 THz	0.9
This work	0.75	5.58~6.05 GHz	8.1

타표면 흡수체의 90 % 흡수 상대 대역폭이 가장 넓음을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 메타표면 흡수체의 단위 셀의 크기를 1/2 파장 부근에서 조정하고 각각의 크기에 대해 금속 패턴을 최적으로 설계하여 단위 셀의 크기가 증가함에 따라 흡수 대역폭이 넓어짐을 확인하였다. 패턴을 최적으로 설계하는 동시에 단위 셀의 크기를 증가시키는 방법은 기존에 알려진 기관 유전을 감소, 두께 증가, 패턴의 층수 증가, 저항을 추가하는 방법에 더하여 메타표면 흡수체의 흡수 대역폭을 넓히는 데 활용이 가능하다. 또한 사각형 금속 픽셀로 구성된 메타표면 흡수체는 유전 알고리즘 적용을 통해 단위 셀의 크기에 따라 최적으로 패턴 설계가 가능하므로 원하는 대역폭 달성이 용이한 장점이 있으며, 안테나와 동일한 기관에 일체형으로 제작 가능하므로 안테나간 상호 결합 및 간섭을 방지하는 데 활용 가능하다.

### References

- [1] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber," *Physical Review Letters*, vol. 100, no. 20, p. 207402, May 2008.
- [2] H. M. Lee, "Electromagnetic wave absorbers with metamaterial structure for RCS reduction," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 26, no. 1, pp. 1-15, Jan. 2015.
- [3] Y. Kim, D. Kim, S. H. Lee, M. Seo, H. J. Jung, and B. Kang, et al., "Single-layer metamaterial bolometer for sensitive detection of low-power terahertz waves at room temperature," *Optics Express*, vol. 28, no. 12, pp. 17143-17152, Jun. 2020.
- [4] T. T. Nguyen, S. Lim, "Design of metamaterial absorber using eight-resistive-arm cell for simultaneous broadband and wide-Incidence-angle absorption," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 6633, Apr. 2018.
- [5] S. D. Assimonis, V. Fusco, "Polarization insensitive, wide-angle, ultra-wideband, flexible, resistively loaded, electromagnetic metamaterial absorber using conventional inkjet-printing technology," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 12334, Aug. 2019.
- [6] H. Xiong, J. S. Hong, C. M. Luo, and L. L. Zhong, "An ultrathin and broadband metamaterial absorber using multi-layer structures," *Journal of Applied Physics*, vol. 114, no. 6, p. 064109, Aug. 2013.
- [7] Y. Shi, Y. C. Li, T. Hao, L. Li, and C. H. Liang, "A design of ultra-broadband metamaterial absorber," *Waves in Random and Complex Media*, vol. 27, no. 2, pp. 381-391, 2017.
- [8] M. Lyou, G. Kim, and B. Lee, "Design of thin and wideband microwave absorbers using general closed-form solutions," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 5, pp. 430-438, Nov. 2021.
- [9] Y. Kim, S. G. Lee, and J. H. Lee, "Optimal design of broadband hexagonal electromagnetic metamaterial absorber unit cells," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 6, pp. 533-540, Jun. 2021.
- [10] Y. Kim, J. H. Lee, "Design of broadband and wide-angle hexagonal metamaterial absorber based on optimal tiling of rhombus carbon pixels and implantation of copper cylinders," *Symmetry*, vol. 13, no. 11, p. 2045, Oct. 2021.
- [11] Y. Kim, P. Park, J. Jo, J. Lee, L. Jeong, and J. Shin, et al., "Ultrawideband electromagnetic metamaterial absorber utilizing coherent absorptions and surface plasmon polaritons based on double layer carbon meta-patterns," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, p. 23045, Nov. 2021.
- [12] K. N. Rozanov, "Ultimate thickness to bandwidth ratio of radar absorbers," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 48, no. 8, pp. 1230-1234, Aug. 2000.
- [13] S. Jafar-Zanjani, S. Inampudi, and H. Mosallaei, "Adaptive genetic algorithm for optical metasurfaces design," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 11040, Jul. 2018.

- [14] M. C. Tran, V. H. Pham, T. H. Ho, T. T. Nguyen, H. T. Do, and X. K. Bui, et al., "Broadband microwave coding metamaterial absorbers," *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 1810, Feb. 2020.
- [15] Q. Chen, J. Bai, L. Chen, and Y. Fu, "A miniaturized absorptive frequency selective surface," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 80-83, 2015.

- [16] A. Hopper, R. Seviour, "Wave particle Cherenkov interactions mediated via novel materials," in *Proceedings of the 7th International Particle Accelerator Conference*, Busan, May 2016, pp. 1960-1962.
- [17] T. Lu, D. Zhang, P. Qiu, J. Lian, M. Jing, and B. Yu, et al., "Ultrathin terahertz dual-band perfect metamaterial absorber using asymmetric double-split rings resonator," *Symmetry*, vol. 10, no. 7, p. 293, Jul. 2018.

장 삼 봉 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3034-3210>

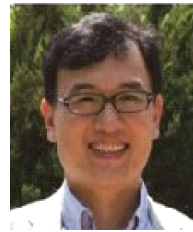


2017년 5월: 미국 Texas A&M University - College Station 전기전자공학과 (공학사)  
2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)  
2021년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 메타물질, 메타물질 흡수체, 안테나 등

이 정 해 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5135-6360>



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
1996년 2월: 미국 UCLA 전기공학과 (공학박사)  
1993년 3월~1996년 3월: General Atomics

교환연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor

1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자, 무선전력전송 등

김 용 준 [수원대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4724-8962>



2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
2016년 4월~2017년 4월: 싱가포르국립대학교 전기컴퓨터공학과 박사후연구원  
2017년 8월~2020년 8월: 파동에너지극한

제어연구단 선임연구원

2020년 9월~2022년 3월: 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수

2022년 4월~현재: 수원대학교 전기공학과 조교수

[주 관심분야] 메타물질, 메타물질 흡수체, 메타물질 투명화구조, 메타표면 안테나 등