THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2024 December; 35(12), 971～977.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.12.971
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

스마트 팩토리 IoT 센서를 위한 5.8 GHz 대역 전방향 고효율 렉테나 설계

Design of a 5.8 GHz Band Omnidirectional High-Efficiency Rectenna for Smart Factory IoT Sensors

우규식 · 최윤성* · 한우진** · 서철헌**

Kyusik Woo · Yunseong Choi* · Woojin Han** · Chulhun Seo**

요 약

본 논문은 스마트 팩토리 IoT 센서를 위한 5.8 GHz 대역 전방향 고효율 렉테나 설계에 관한 연구로, 무선전력전송 시스템에서 고효율 전력 변환과 안정적인 전력 전송을 목표로 한다. 전방향성 안테나와 메타물질을 활용한 설계를 통해 안테나 이득을 2.4 dB에서 4.6 dB로 향상시키고, F급 고조파 필터를 적용하여 전력 변환 효율을 높였다. 안테나와 정류기를 통합하여 하나의 모듈로 설계하였으며, 시뮬레이션과 실험적 검증을 통해 렉테나의 성능을 입증하였다. 실험 결과, 5.8 GHz에서 최대 전력 변환 효율은 12 dBm 입력 전력 시 72.2 %에 달하였으며, 최대 출력 전압은 3.86 V에 달성하였다. 또한, 1 m 거리에서도 렉테나를 통해 유효한 전력 전송이 가능함을 확인하였다. 이 연구는 스마트 팩토리와 IoT 환경에서 저전력 센서 네트워크를 위한 효율적인 무선전력전송 솔루션을 제공하여 높은 성능을 기대할 수 있다.

Abstract

This study presents a study on the design of a 5.8 GHz omnidirectional high-efficiency rectenna for IoT sensors in smart factories, aiming for efficient power conversion and stable power transmission in wireless power transfer (WPT) systems. By utilizing an omnidirectional antenna and a metamaterial-based design, the antenna gain was improved from 2.4 to 4.6 dB, and the application of a Class-F harmonic filter enhanced the power conversion efficiency. The antenna and rectifier were integrated into a single module, and the performance of the rectenna was validated through simulations and experiments. The experimental results showed that the rectenna achieved a maximum power conversion efficiency of 72.2 % at 12 dBm input power in the 5.8 GHz band, with a maximum output voltage of 3.86 V. In addition, successful power transmission was achieved over a distance of 1 m through the rectenna. This study provides an efficient wireless power transfer solution for low-power sensor networks in smart factories and IoT environments to ensure high performance.

Key words: Omnidirectional, Metamaterial, Rectenna, Wireless Power Transfer (WPT), Low-Power

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 SW중심대학사업의 지원을 받아 수행되었음(2024-0-00071).」

숭실대학교 정보통신융합학과(Department of Information and Communication Convergence, Soongsil University)
*숭실대학교 정보통신공학과((Department of Information and Communication Engineering, Soongsil University)
**숭실대학교 전자정보공학부(Department of Electronic and Information Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received October 24, 2024 ; Revised November 17, 2024 ; Accepted December 2, 2024. (ID No. 20241024-115)

· Corresponding Author: Chulhun Seo (e-mail: chulhun@ssu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

무선전력전송(WPT, wireless power tranfer) 기술은 IoT (internet of things) 센서 네트워크, 스마트 팩토리, 웨어러블 기기 등 다양한 응용 분야에서 중요성이 커지고 있으며, 이를 구현하기 위한 여러 방식들이 연구되고 있다. 최근에도 전자기파를 통한 방사형 WPT 방식이 주목받고 있으나, 시스템 효율이 낮고 신호 감쇠 문제가 제기되고 있다[1]~[5].

기존의 방사형 WPT 시스템은 송수신기 간의 방향성이 맞지 않을 경우 효율적인 전력 전송이 어렵다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 위치와 방향에 제약을 받지 않는 안테나 설계 기술이 요구된다[6]. 또한, 안테나의 성능을 더욱 향상시키기 위해 메타물질(metamaterial)을 사용하여 이득을 개선할 수 있다. 메타물질은 자연적으로 존재하지 않는 인공적인 구조로, 특정 주파수 대역에서 신호 전송 성능을 크게 향상시킬 수 있다[7].

소형 IoT 디바이스와 같은 애플리케이션에 적합하기 위해서는 높은 전력 변환 효율(PCE, power conversion efficiency)을 갖는 컴팩트한 정류기 설계가 요구된다. 기존 연구에서는 역F급 필터 등을 활용하여 고조파 성분 억제를 분석했으나, 이는 회로의 복잡성을 증가시키고 크기를 키우는 문제가 있었다[8],[9]. 반면, 일부 연구는 고조파 억제를 고려하지 않아 높은 변환 효율을 달성하지 못했다[10]~[12].

본 연구에서는 전방향 안테나와 메타물질을 결합하여 방향 정렬 없이도 다양한 각도에서 높은 이득을 제공하며, F급 고조파 필터와 배전압기 구조를 적용해 PCE를 개선하는 동시에 소형화된 구조를 유지하여 기존의 단점을 해결하고자 하였다. 이를 통해 스마트 팩토리 환경에서 다수의 수신기에 동시에 무선 전력을 공급할 수 있는 솔루션을 제안한다.

Ⅱ. 메타물질 기반 고이득 안테나 분석 및 설계

본 연구에서 5.8 GHz 대역 전방향 안테나를 설계하고 분석하였다. 그림 1에 나타나 있듯이, 설계된 안테나는 기판 양쪽에 반원형 다이폴 구조로 이루어져 있으며, 이를 통해 수평 전방향 방사 패턴이 발생한다. 두 개의 도체

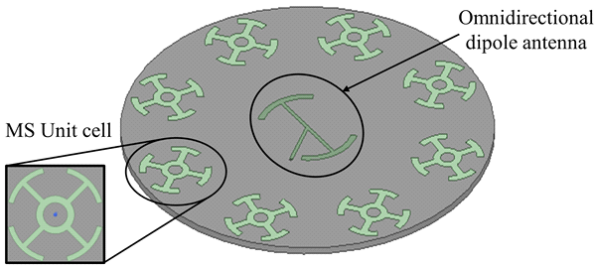

그림 1. 메타물질 단위 셀과 전방향 다이폴 안테나 레이아웃

Fig. 1. Metasurface unit cell and omnidirectional dipole antenna layout.

요소가 기판 양쪽에 위치해 있으며, 각각 반원형 패치를 포함하고 있어 수평면에서 방사되는 전파의 균일한 분포를 보장한다. 상하층의 대칭 구조로 인해 전파는 전방향성 패턴을 형성한다[6].

메타물질의 굴절률이 0에 가까운 값(NZIM, near-zero index metamaterial)을 가지며, 전자기파가 메타물질을 통과한 후 수평면으로 집중되는 단위 셀을 활용해서 수평 이득을 향상시켰다[7]. 메타물질 단위 셀의 설계는 HFSS 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션으로 진행되었다. 단위 셀의 굴절률은 그림 2와 같이 5.8 GHz 대역에서 실수 부분 0.32, 허수 부분 0.09로 계산되었으며, 스넬의 법칙에 따라 수평면으로 전자기파가 집중되도록 하였다. 이러한 단위 셀의 특성으로 인해, 메타물질 기반 안테나는 전방향성을 유지하면서도 높은 이득을 제공할 수 있다.

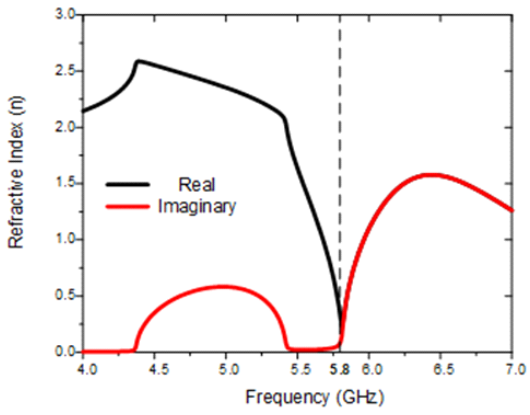

그림 2. 단위 셀의 굴절률 n

Fig. 2. Refractive index n of the unit cell.

Ⅲ. F급 필터 기반 고효율 정류기 분석 및 설계

그림 3에는 제안된 렉테나를 구성하는 안테나와 정류기 회로도가 나타나있다. 안테나 부분은 참고문헌 [9]와 같이, L_A와 C_A가 목표 대역에서 공진하여 동작하며 전송 손실은 저항 R_A로 표현되었다. 정류기 부분은 5개의 전송선로(TL, transmission line)를 활용하여 입력 정합 회로(TL1, TL2)와 F급 필터(TL3-TL5)로 설계되었다. 전송선로에 관한 식 (1) 및 식 (2)을 통해 2차, 3차 고조파 대역 임피던스가 각각 $Z_{T1} = Z_{S1} = 0$, $Z_{T2} = Z_{S2} = \infty$의 조건을 만족하도록 하는 전기적 길이 파라미터를 도출하였다[8],[9]. 계산된 결과를 바탕으로 마이크로스트립 전송선로를 활용하여 F급 모드로 동작하도록 설계되었다.

$$\theta_{TL3} = \lambda/8 \tag{1}$$

$$\theta_{TL4} = \theta_{TL5} = \lambda/12 \tag{2}$$

Ⅳ. 시뮬레이션 및 측정 결과

본 연구는 Ansys HFSS와 Agilent ADS 소프트웨어를 사용하여 이론적 결과를 입증하였다. HFSS는 전자기 시뮬레이션을 통해 안테나의 방사 패턴, 임피던스 특성, 이득 등을 검증하였고, ADS는 정류기 회로의 성능을 시뮬레이션하여 고조파 억제와 PCE 분석하는 데 활용되었다.

그림 4 및 그림 5는 메타물질을 적용한 전방향성 안테나의 성능을 비교한 것으로, 5.8 GHz 대역에서 안테나의 이득이 시뮬레이션과 실험 모두에서 향상됨을 보여준다. 이득 향상은 전송 거리와 전송 효율을 높이는 데 중요한 역할을 하며, 제안된 메타물질 구조는 2.4 dB에서 4.6 dB로 이득을 개선하였다. 또한 3D 방사 패턴 시뮬레이션 결과에서 메타물질 적용 후 방사 패턴의 균일성과 전방향성을 유지하면서 이득이 향상된 것을 확인하였다.

그림 6은 식 (1) 및 식 (2)에서 추출된 파라미터를 기반으로 설계된 2차(0.35+j2Ω), 기본파(47−j4Ω), 3차 고조파(105−j710Ω) 임피던스를 마이크로스트립 선로로 구현한 스미스 차트 결과를 보여준다. 이를 통해 F급 모드에서 고조파 필터가 효과적으로 동작하며, 우수한 임피던스 정합이 시뮬레이션으로 검증되었다.

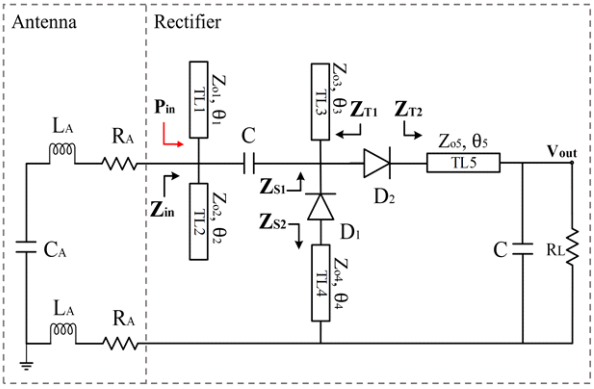

그림 3. 제안된 5.8 GHz 대역 고효율 렉테나 회로도
Fig. 3. Proposed 5.8 GHz band high-efficiency rectenna circuit diagram.

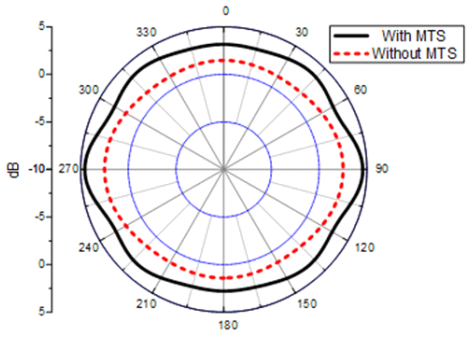

그림 4. 메타물질 구조의 이득 향상 비교
Fig. 4. Comparison of gain enhancement for the metamaterial structure.

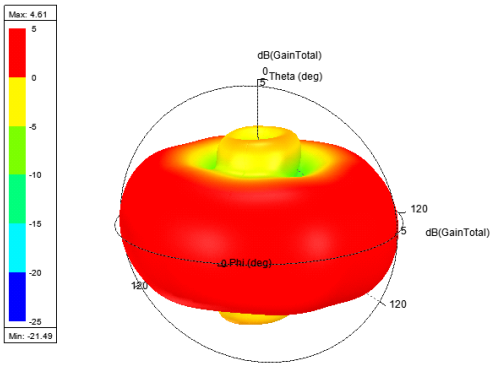

그림 5. 제안된 메타물질 기반 안테나 3D 방사 패턴 시뮬레이션 결과
Fig. 5. 3D radiation pattern simulation results of the metamaterial-based antenna.

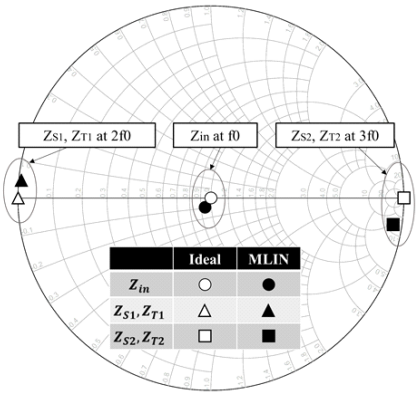

그림 6. 스미스 차트상 제안된 정류기 기본파 및 고조파 임피던스 위치

Fig. 6. Locations of fundamental and harmonic impedances for the proposed rectifier on the smith chart.

설계된 렉테나의 정류기 파라미터는 표 1에 정리되어 있으며 레이아웃은 그림 7에 나타나 있다. 실험적인 검증을 위해 Infineon BAT15-03W Schottky 다이오드와 Taconic TLY-5(0.8 mm) 기판을 채택하여 제작하였다.

그림 8은 연구실 환경에서 제작된 고효율 렉테나의 성능을 검증하기 위한 실험 셋업을 보여준다. 실험은 신호 발생기(SG, signal generator)를 사용하여 5.8 GHz 신호를 생성한 후, 직류전원으로 바이어스된 구동 증폭기(DA, driver amplifier)를 통해 1 W로 증폭하여 송신 안테나(Tx)로 방사하였다. 방사된 신호는 렉테나(Rx)로 전송되었으며, 렉테나에서 출력된 전압을 이용해 빨간색 LED를 켜는 방식으로 성능을 평가하였다. 측정 결과는 시뮬레이션 데이터와 비교하여 렉테나의 특성을 평가하였다.

그림 9에 나타난 시뮬레이션 결과에서, 렉테나는 입력

표 1. 제안된 정류기를 구성하는 전송선로 파라미터

Table. 1. Parameters of transmission lines comprising the proposed rectifier.

TL	Z0 (Ω)	$\theta at f_0(^\circ)$
TL1	84	44.3
TL2	84	44.3
TL3	70	45
TL4	90	30
TL5	90	30

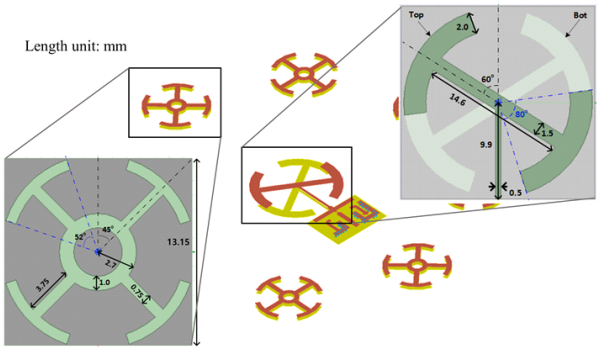

그림 7. 5.8 GHz 대역 전방향 고효율 렉테나 레이아웃

Fig. 7. Layout of the 5.8 GHz band omnidirectional high-efficiency rectenna.

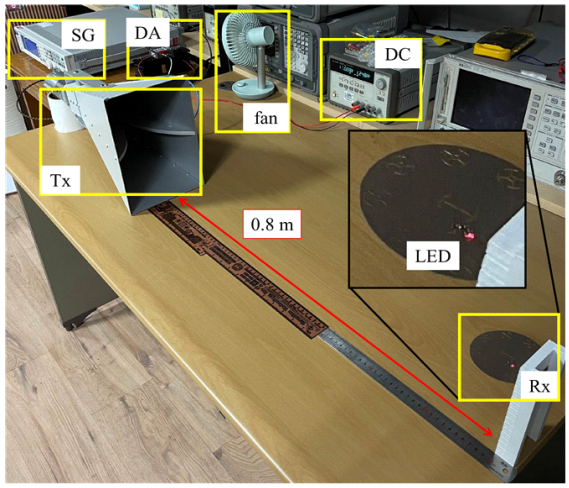

그림 8. 제작된 고효율 렉테나 측정 셋업 사진

Fig. 8. Photograph of the measurement setup for the fabricated high-efficiency rectenna.

전력 15 dBm에서 최대 74.9 %의 PCE를 기록하였다. 실험 결과에서는 입력 전력 12 dBm에서 72.2 %의 최대 PCE을 달성하며, 입력 전력 12 dBm 이하 구간에서는 시뮬레이션과 측정 간의 일관성을 검증할 수 있었다. 그림 10과 같이 출력 전압의 경우, 시뮬레이션에서는 15 dBm 입력 시 4.35 V에 도달하였고, 실험에서는 12 dBm 입력 시 3.86 V로 나타나, 설계된 렉테나를 통하여 고효율 DC 전력 변환을 구현할 수 있음을 확인하였다.

그림 11에 나타난 바와 같이, 제안된 렉테나의 반사 계수(S_{11})는 시뮬레이션과 측정 결과 모두 −10 dB 이하로

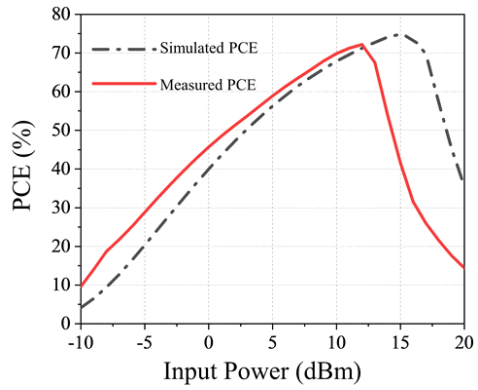

그림 9. 제안된 렉테나의 전력변환효율 시뮬레이션 측정 결과 비교

Fig. 9. Comparison of simulation and measurement results for the PCE of the proposed rectenna.

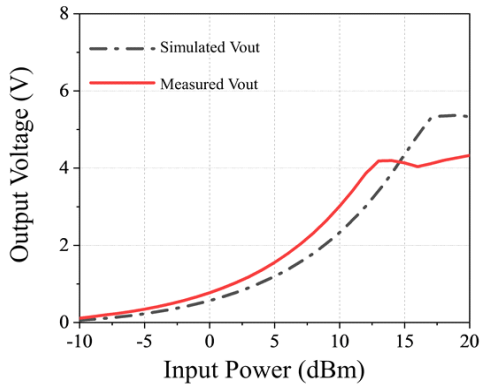

그림 10. 제안된 렉테나의 출력전압 시뮬레이션 측정 결과 비교

Fig. 10. Comparison of simulation and measurement results for the output voltage of the proposed rectenna.

유지되어 충분한 임피던스 정합을 확인하였다.

시뮬레이션과 실험 간의 일관된 결과는 렉테나 설계의 안정적인 동작을 보장함을 의미하지만 두 결과 간의 차이는 실제 소자 특성과 모델의 차이에서 비롯될 수 있다.

실험적 검증을 통해 최대 1 m 거리에서도 전력이 렉테나로 성공적으로 전송되었으며, 이는 기존 WPT 시스템의 거리 제한 문제를 극복하는 데 중요한 의미를 가진다.

표 2는 제안된 연구와 기존 전방향 렉테나의 성능을 정리한 표이며, 이를 통해 제안된 렉테나가 기존보다 우수

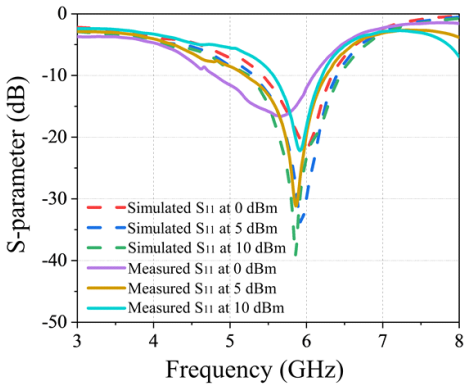

그림 11. 입력 전력에 따른 제안된 렉테나 반사계수 시뮬레이션 측정 결과 비교

Fig. 11. Comparison of simulation and measurement results for the reflection coefficient of the proposed rectenna according to input power.

표 2. 제안된 연구와 기존 전방향 렉테나 연구의 성능 비교

Table 2. Comparison of proposed and published omnidirectional rectennas.

Ref.	[10]	[11]	[12]	This work
Frequency (GHz)	2.45	5.8	5.8	5.8
Gain (dBi)	5.01	4.27	2.84	4.6
PCE (%)	70.5	41	52.2	72.2
Vout (V)	1.46	0.98	1.81	3.86
Technique	Dual-polarization	Multiband	Reconfigurability	MS, Class-F

한 전송 효율을 달성했음을 확인할 수 있다. 특히, 메타물질과 F급 고조파 필터를 활용하여 5.8 GHz 대역에서 높은 안테나 이득과 PCE를 구현하였다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 5.8 GHz 대역 전방향성 안테나와 메타물질을 활용하여 안테나 이득을 향상시키고, F급 고조파 필터를 통해 효과적으로 억제함으로써 PCE를 개선하였다. 실험 결과, 최대 1 m 거리에서도 안정적인 전력 전송이 이루어졌으며, 12 dBm 입력 전력에서 PCE는 72.2 %에 도달하였고, 출력 전압은 3.86 V를 기록하여 안정적인 전

력 공급 가능성을 입증하였다.

향후 연구로는 전송 거리 확장과 시스템 효율 향상을 위한 안테나 설계 최적화뿐만 아니라, 다중 대역 WPT 시스템으로의 확장을 고려할 수 있다. 또한, 거리와 방향에 제약이 적어 동적인 시스템에서 유리하다.

References

[1] K. W. Choi, A. A. Aziz, D. Setiawan, N. M. Tran, L. Ginting, and D. I. Kim, "Distributed wireless power transfer system for Internet of things devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2657-2671, Aug. 2018.

[2] Y. Yang, J. Li, L. Li, Y. Liu, B. Zhang, and H. Zhu, et al., "A 5.8 GHz circularly polarized rectenna with harmonic suppression and rectenna array for wireless power transfer," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 1276-1280, Jul. 2018.

[3] X. Zhang, C. Cao, and C. Song, "A compact dual-band dual-circular-polarization wideband rectenna using reverse Wilkinson power divider for wireless information and power transfer," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 9, pp. 2728-2732, Sep. 2024.

[4] M. Chang, Y. Li, J. Han, H. Liu, and L. Li, "A compact polarization-insensitive rectenna with harmonic suppression for wireless power transfer," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 119-123, Jan. 2024.

[5] D. H. Kim, S. Y. Oh, H. S. Park, and S. K. Hong, "A power dividing rectenna system for high-power wireless power transfer for 2.45-GHz band," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86631-86638, Jun. 2024.

[6] X. Hu, S. Yan, J. Zhang, V. Volski, and G. A. E. Vandenbosch, "Omni-directional circularly polarized button antenna for 5 GHz WBAN applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 8, pp. 5054-5059, Aug. 2021.

[7] C. Milias, R. B. Andersen, P. I. Lazaridis, Z. D. Zaharis, B. Muhammad, and J. T. B. Kristensen, et al., "Metamaterial-inspired antennas: A review of the state of the art and future design challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89846-89865, Jun. 2021.

[8] G. Moloudian, J. L. Buckley, and B. O'Flynn, "A novel rectenna with class-F harmonic structure for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 71, no. 2, pp. 617-621, Feb. 2024.

[9] T. Mitani, S. Kawashima, and T. Nishimura, "Analysis of voltage doubler behavior of 2.45-GHz voltage doubler-type rectenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 4, pp. 1051-1057, Apr. 2017.

[10] Y. Wang, N. Lu, H. Sun, and R. Ren, "A dual-polarized omnidirectional rectenna array for RF energy harvesting," *Micromachines*, vol. 14, no. 5, p. 1071, May 2023.

[11] Y. Wang, J. Zhang, Y. Su, X. Jiang, C. Zhang, and L. Wang, et al., "Efficiency enhanced seven-band omnidirectional rectenna for RF energy harvesting," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 9, pp. 8473-8484, Sep. 2022.

[12] P. Lu, X. S. Yang, "Pattern reconfigurable rectenna with omni-directional/directional radiation modes for MPT with multiple transmitting antennas," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 12, pp. 826-829, Dec. 2019.

우 규 식 [숭실대학교/석·박사통합과정]
https://orcid.org/0000-0002-2811-2173

2019년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 학사 졸업 (공학사)
2019년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신융합학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] RF Power Amplifier, 정류기

한 우 진 [숭실대학교/학사과정]
https://orcid.org/0009-0003-4447-1357

2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 학사과정
[주 관심분야] WPT, RF 능동회로

최 윤 성 [숭실대학교/박사과정]
https://orcid.org/0009-0006-8874-9412

2018년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업 (공학사)
2020년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 석사 졸업 (공학석사)
2019년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] WPT, 안테나, 레이다

서 철 헌 [숭실대학교/교수]
https://orcid.org/0000-0002-6765-8734

한국전자파학회논문지, 17(12) 참조