

2.45-GHz 무선전력송신을 위한 렉테나 구현

Implementation of Rectenna for 2.45-GHz Wireless Power Transfer

송재혁¹ · 임정택² · 이재은³ · 손정택⁴ · 김준형⁵ · 백민석⁶ · 이병찬⁷ · 박종성⁸ · 이은규⁹ · 김철영¹⁰Jae-Hyeok Song¹ · Jeong-Taek Lim² · Jae-Eun Lee³ · Jeong-Taek Son⁴ · Joon-Hyung Kim⁵ ·
Min-Seok Baek⁶ · Byeong Chan Yi⁷ · Jong Seong Park⁸ · Eun-Gyu Lee⁹ · Choul-Young Kim¹⁰

요 약

본 논문에서는 2.45 GHz RF 신호를 수신하여 DC 전력으로 변환하는 렉테나의 설계와 제작에 대해 다룬다. 렉테나는 패치 안테나, 정합 회로, 그리고 정류기로 구성되었으며, 0.76 mm 두께의 RF-35A2 기판을 사용하여 제작하고 측정되었다. 정합 회로는 전송선로와 개방형 스테브를 사용하여 구현되었고, 병렬 인덕터를 사용하여 RF 신호가 고정된 DC 전압으로 안정하게 변환되도록 설계되었다. 측정된 렉테나의 RF-DC 최대 변환 효율은 2.3 dBm의 입력 전력과 1.5 k Ω 부하 조건에서 38 %이었다. 제작한 패치 안테나와 함께 사용하여 10 cm 거리에서 90 Ω 부하에 대해 1.8 V, 36 mW의 전력이 송신되었다.

Abstract

This paper presents the design and fabrication of a rectenna that receives 2.45 GHz RF signals and converts them into DC power. The rectenna comprises a patch antenna, matching network, and rectifier. It was manufactured and measured using a 0.76-mm thick RF-35A2 board. The matching network was implemented using transmission lines and open stubs and designed to stably convert the RF signal into a fixed DC voltage by employing parallel inductors. The measured rectenna achieved a maximum RF - DC conversion efficiency of 38 % at 2.3-dBm input power and a 1.5-k Ω load. When used in conjunction with the fabricated patch antenna, it transmitted 1.8 V of power at 36 mW into a 90- Ω load at a distance of 10 cm.

Key words: ISM Band, Power Transfer, Rectenna, Rectifier, WPT

I. 서 론

최근 사물 인터넷(IoT), 웨어러블 장치 및 휴대용 기기
등을 위한 무선 충전기의 필요성으로 무선 전력 송신

「본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다 (2021RIS-004).」

충남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungnam National University)

1: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0003-3736-2753>), 2: 박사과정(<https://orcid.org/0000-0002-2698-6942>),

3: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0001-6616-6503>), 4: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0003-4794-5813>),

5: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-6873-9034>), 6: 석 · 박사통합과정(<https://orcid.org/0000-0002-3651-4498>),

7: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0001-9103>), 8: 학사과정(<https://orcid.org/0009-0007-5828-499X>),

9: 박사후연구원(<https://orcid.org/0000-0002-3835-2226>), 10: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-5532-7399>)

· Manuscript received October 8, 2023 ; Revised October 24, 2023 ; Accepted November 1, 2023. (ID No. 20231008-084)

· Corresponding Author: Choul-Young Kim (e-mail: cykim@cnu.ac.kr)

(WPT, wireless power transfer)에 대한 연구가 중요해지고 있다^[1]. RF(radio frequency) 신호를 이용한 무선 전력 송신의 주파수 대역은 ISM(industry science medical) 대역에서 비교적 전송 손실이 적은 2.45 GHz를 채택하고 있다. RF 신호를 수신하여 직류(DC, direct current) 전력으로 변환하기 위해 렉테나(rectifier와 antenna)가 필요하다^[2]. RF 신호를 DC 전력으로 변환하기 위해 정류기(rectifier)는 필수 회로이며, 주로 다이오드를 사용하여 구현된다. RF-DC 변환 효율은 렉테나의 주요 성능지표이며, 이를 향상하기 위한 연구가 진행되고 있다^{[3],[4]}.

본 논문에서는 2.45 GHz RF 신호를 수신하여 DC 전력으로 변환하기 위한 렉테나를 구현 및 측정하였다. RF-DC 변환 효율을 증가시키기 위해 수신된 RF 신호가 정류기에 최대로 전달될 수 있도록 정합 회로를 설계하였으며, 안정된 정류를 위해 병렬 인덕터를 사용하였다.

II. 렉테나 설계

그림 1은 구현된 렉테나의 구성도이다. 렉테나는 RF 신호 수신을 위한 패치 안테나와 DC 전력으로 변환하기 위한 정류기로 구성되며, 정합 회로는 RF 신호를 다이오드로 전달하기 위해 사용된다. 정류기는 충분히 큰 병렬 커패시터 부하를 가지고 있어 DC 전압을 충전 및 유지한다. 정합 회로의 병렬 인덕터는 전송선로의 DC 전압 레벨을 고정하며, 수신된 RF 신호가 최대 전압을 유지하고 다이오드가 일정한 DC 전압을 정류하도록 한다. 패치 안테나와 정합 회로는 전자기장(EM, electromagnetic) 시뮬레이션을 이용하여 설계하였고, 두께 0.76 mm(30 mil)의

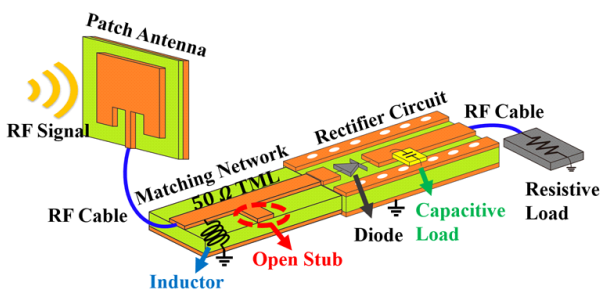


그림 1. 구현된 렉테나 구성도
Fig. 1. Configuration of implemented rectenna.

RF-35A2 기판을 사용하여 제작되었다. 그림 2는 제작된 패치 안테나 사진이며, 2.45 GHz에서 동작하도록 설계되었다.

그림 3은 정합 회로와 정류기의 제원과 사진이다. 정합 회로와 정류기는 하나의 PCB(printed circuit board)로 구현되었으며, 칩 다이오드, 칩 인덕터 그리고 칩 커패시터를 PCB에 실장하였다.

정합 회로는 패치 안테나와 정류기의 정합을 위해 전송선로와 개방형 스티브가 사용되었다. 그림 4는 다이오

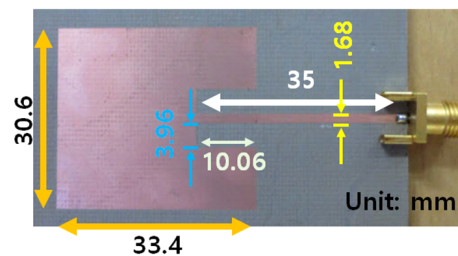
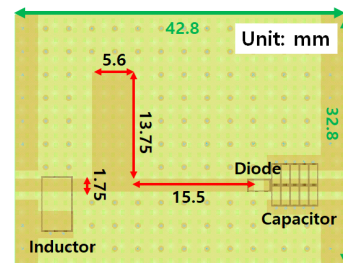
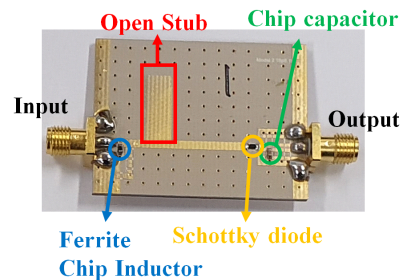


그림 2. 제작된 패치 안테나 사진
Fig. 2. Photo of fabricated patch antenna.



(a) 제원
(a) Specifications



(b) 사진
(b) Photograph

그림 3. 정합 회로와 정류기
Fig. 3. Matching network and rectifier.

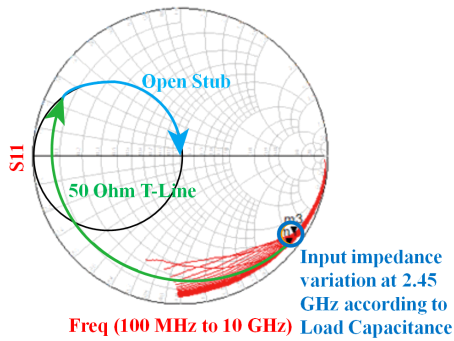


그림 4. 다이오드의 입력 임피던스와 정합 과정
Fig. 4. Input impedance of diode and matching process.

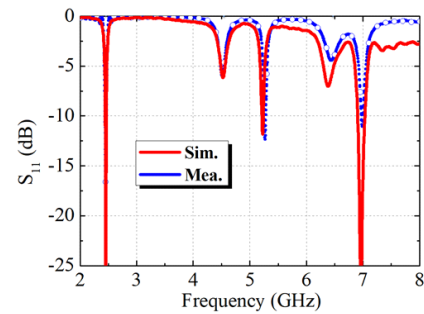
드의 입력 임피던스와 정합 회로에 의한 정합 과정을 도시한 것이다. 다이오드 출력부에 있는 커패시터값과 부하 저항값의 변화에 따른 정류기의 입력 임피던스의 변화가 2.45 GHz에서 적게 나타났다. 입력 임피던스를 안테나와 정합하기 위해 50옴으로 가져오는 정합 회로를 설계하였다. 정류기에 사용된 다이오드는 SMS7630-079-LF 쇼트키 다이오드를 사용하였고, DC 충전을 위한 커패시터는 1 nF를 사용하였다. 정합 회로에는 330 nH 인덕터를 사용하였다.

III. 측정 결과

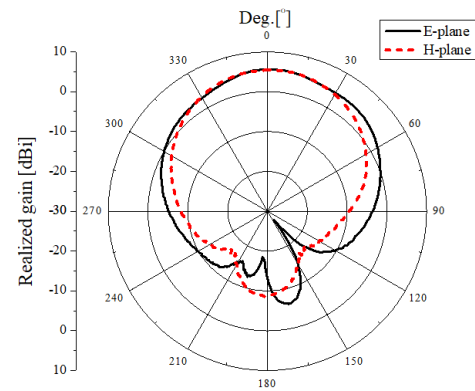
그림 5는 제작된 패치 안테나의 입력 반사 손실과 방사 패턴을 측정한 결과이다. 패치 안테나의 입력 반사 손실은 2.45 GHz에서 -18 dB이며, 최대 안테나 이득은 5.64 dBi, 효율은 68.2 %이다. 그림 6은 PCB의 입력 반사 손실이다. 2.45 GHz에서 측정된 반사 손실은 -17.6 dB이었다. 그림 7은 부하 저항에 따른 정류기의 RF-DC 변환 효율을 나타낸 것이다. 신호 발생기와 PCB를 RF 케이블로 직접 연결하고, 전자 부하를 사용하여 측정하였다. RF-DC 변환 효율은 식 (1)로 부터 계산되었다^[5].

$$n = \frac{V_{DC}^2}{R_L P_{in}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

V_{DC} 는 부하 저항에 인가된 직류 전압이며, R_L 은 부하 저항의 크기이고, P_{in} 은 정합회로로 입사된 전력이다. 2.3 dBm의 신호가 입사할 때, 부하 저항 1,500 Ω에서 최대 변



(a) 입력 반사 손실
(a) Input return loss



(b) 방사 패턴
(b) Radiation pattern

그림 5. 제작된 패치 안테나 측정 결과
Fig. 5. Fabricated patch antenna measurement results.

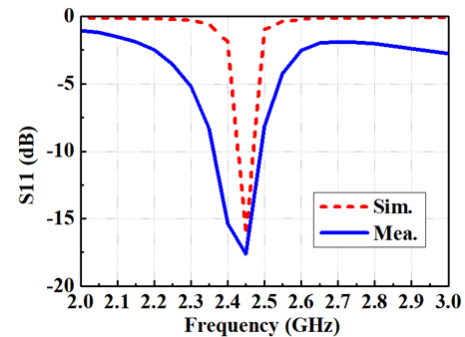


그림 6. 제작된 PCB의 입력 반사 손실
Fig. 6. Input return loss of fabricated PCB.

환 효율 38 %를 얻었다.

측정된 각 결과를 이용하여 그림 8과 같이 전체 렉테나의 성능을 측정하기 위해 구성했다. 신호 발생기의 신호

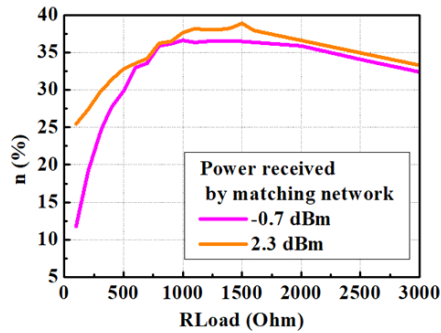


그림 7. 부하 저항에 따른 정류기의 RF-DC 변환 효율
Fig. 7. RF-DC conversion efficiency of rectifier according to load resistance.

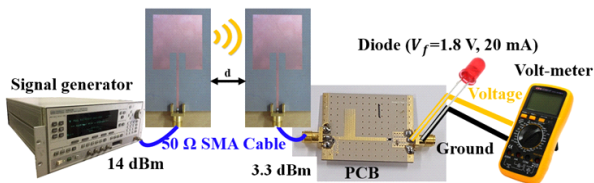


그림 8. 렉테나 성능 측정 환경
Fig. 8. Rectenna performance evaluation diagram.

를 패치 안테나를 통해 송신하고 렉테나가 수신한 RF 신호에 대한 정류된 DC 전압을 측정했다. 송수신 안테나 사이의 손실이 컸기 때문에, 신호 발생기의 출력 전력은 14 dBm을 사용하였다.

부하 저항으로 36 mW ($V_f=1.8$ V, 20 mA, On저항 90Ω, Off저항 21kΩ)에서 동작하는 LED를 사용하였고, 송수신 안테나 사이의 거리가 10 cm일 때, LED가 동작했다. 이때, 수신된 입사전력은 약 3.3 dBm이었고, 출력 직류 전압 1.8 V, 36 mW의 결과를 얻을 수 있었다. LED가 최적의 부하 저항이 아니어서 RF-DC 변환 효율이 떨어졌고, 가까운 송수신 안테나의 거리가 필요했다.

IV. 결 론

본 논문에서는 RF 신호를 DC 전압으로 변환하는 렉테나를 제작 및 측정했다. RF 신호를 효율적으로 정류하기

위해 정합 회로를 설계했고, 부하 조건에 따른 성능을 측정하였다. 제작된 렉테나는 2.45 GHz의 신호를 받아 성공적으로 무선 전력 송신을 달성하였다. 송신 전력이 크다면 더 먼 거리에서도 mW 수준의 전력을 정류 및 생성할 수 있을 것이며, 이는 RFID 등에 적용할 수 있다. RF-DC 변환 효율은 커패시터의 크기에 따라 민감하였으며, 다이오드의 등가 회로 특성을 시뮬레이션에 반영하여 정합 회로를 설계하는 것이 효율에 높이는 데 중요한 것으로 보인다.

References

- [1] N. Shinohara, "Trends in wireless power transfer: WPT technology for energy harvesting, millimeter-wave/THz rectennas, MIMO-WPT, and advances in near-field WPT applications," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 22, no. 1, Jan. 2021.
- [2] T. Matsunaga, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "5.8-GHz stacked differential rectenna suitable for large-scale rectenna arrays with DC connection," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 12, pp. 5944-5949, Dec. 2015.
- [3] N. J. Shimu, A. Ahmed, "Design and performance analysis of rectangular microstrip patch antenna at 2.45 GHz," in *2016 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision(ICIEV)*, Dhaka, May 2016, pp. 1062-1066.
- [4] Y. Giay, B. R. Alam, "Design and analysis 2.4 GHz microstrip patch antenna array for IoT applications using feeding method," in *2018 International Symposium on Electronics and Smart Devices(ISESD)*, Bandung, Oct. 2018, pp. 1-3.
- [5] J. H. Park, "Design and fabrication of rectenna for microwave wireless power transmission," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers*, vol. 20, no. 6, pp. 43-48, Jul. 2006.