

mmWave 대역(28GHz)에서의 무선전력전송을 위한 Microstrip Rectenna 설계 및 구현

김승현, 장종현, 윤소중, 정용수, 박서연, 홍순기*
승실대학교

duddndtjrl3@gmail.com, hp2312@naver.com, sojoong010@gmail.com,
wjddydt7@naver.com, as80730@naver.com, *shong215@ssu.ac.kr

Design of Microstrip Rectenna for 28GHz mmWave Wireless Power Transfer

Kim Seung Hyeon, Jang Jong Hyeon, Yun So Joong,
Jeong Yong Su, Park Seo Yeon, and Hong Sun Ki*
Soongsil Univ.

요 약

본 논문에서는 원거리 무선전력전송을 위한 마이크로스트립 렉테나를 구현하였다. 안테나와 정류기 모두 고주파 손실최소화를 위해 Rogers RT/duroid 5880 기판을 사용하였다. 4x4 배열 안테나는 실제 측정 결과 -35dB 이하의 반사 손실과 3GHz의 대역폭을 확보하였고, 정류기는 MA4E1317 다이오드와 Radial Stub 필터를 적용하여 18dBm 입력 시 31%의 효율을 달성하였다. 최종적으로 LED 점등 실험을 통해 IoT 기기에 대한 원거리 전력 공급 가능성을 검증하였다.

I. 서 론

최근 사물인터넷(IoT) 및 소형 웨어러블 기기 수요가 급증하고 있다. 이러한 소형 전자기기들은 배터리 교체와 유선 전력 공급에는 공간적 한계를 가지고 있는 경우가 많으며, 이를 극복하기 위한 대안으로 무선전력전송(Wireless Power Transfer, WPT) 기술이 주목받고 있다. 근거리 전송에 국한되는 기존의 자기 유도 공명 방식과 달리 원거리 전송이 가능한 마이크로파전력전송(Microwave Power Transfer, MPT) 기술이 활발히 연구되고 있다. 특히 밀리미터파(mmWave) 대역인 28GHz 주파수는 파장이 짧아 안테나와 회로의 소형화에 유리하며, 높은 지향성(Directivity)과 빔포밍(Beam-forming) 기술을 적용하여 원거리 전송 효율을 극대화할 수 있다는 장점이 있다. 이에 본 논문에서는 28GHz 대역에서 동작하는 고효율 마이크로스트립(Microstrip) 렉테나(Rectenna)를 제작하여 실제 제작 및 측정을 통해 IoT 기기의 무선 전력 공급원으로서의 활용 가능성을 검증하였다[1].

II. 본론

2.1 안테나 시스템 설계.

제안하는 안테나는 Microstrip Rectangular Patch를 기본 요소로 하여 그림 1과 같이 4x4 배열(Array) 구조로 확장 설계하였다[2]. 급전 네트워크는 각 패치에 동위상 및 동일 전력을 공급하기 위해 Corporate Feeding 방식을 적용하였으며, 임피던스 매칭을 위해 Quarter-Wave($\lambda/4$) Transformer를 사용하였다. 또한,

전송선의 굴곡 부위에는 Mitred Bend를 적용하여 임피던스 불연속을 최소화하였다. 기판은 비유전율(ϵ_r) 2.2, 유전정접($\tan\delta$) 0.0009의 저손실 특성을 갖는 Rogers RT/duroid 5880 (두께 0.254mm)을 사용하여 안테나 방사 효율을 높였다. 시뮬레이션 결과, 중심 주파수 28GHz에서 약 -35dB의 반사 손실(Return Loss)과 18.6dBi의 최대 이득(Gain)을 기록하였으며, 반전력 빔폭(HPBW)은 18.5°로 높은 지향성을 확보하였다.

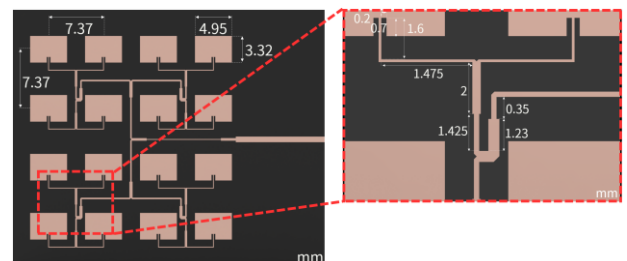


그림 1 : 안테나 구조

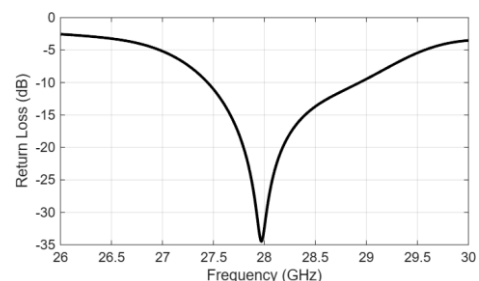


그림 2 : 시뮬레이션 반사 손실

2.2 정류기 시스템 설계

정류기(Rectifier)는 RF 신호를 DC 전력으로 변환하는 핵심 부품으로, 28GHz 대역에서 우수한 스위칭 특성을 갖는 MA4E1317 GaAs Flip-Chip Schottky Diode 를 선정하였다. 회로 설계 시 기생 성분(Parasitic effects)을 고려하기 위해 다이오드의 SPICE 모델을 적용하여 Advanced Design System 시뮬레이션을 수행하였다[3]. 임피던스 매칭 네트워크는 직렬 라인과 병렬 라인의 조합으로 구성하여 반사 손실을 최소화하였으며, 정류된 DC 성분이 안테나 측으로 역류하는 것을 방지하기 위해 매칭 회로와 다이오드 사이에 DC Block 용 캐패시터를 배치하였다. 또한 다이오드 전단에는 Shunt Branch 를 구성하고 Via 를 통해 접지하여 Closed Loop 를 형성하였다. 정류된 전력을 부하로 전달하기 위해 Radial Stub 기반의 DC Pass Filter 를 설계하였다. 방사형 스텝은 일반적인 개방형 스텝(Open Stub) 대비 대역폭이 넓고, 기본 주파수(28GHz) 뿐만 아니라 2 차(56GHz), 3 차(84GHz) 고조파 성분을 효과적으로 차단하여 변환 효율을 높이는 역할을 한다.

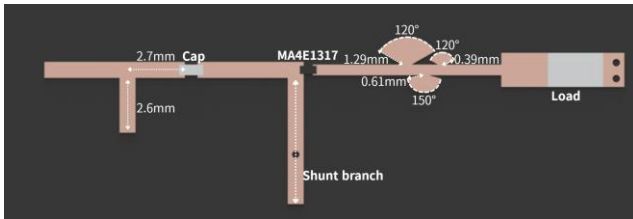


그림 3 : 정류기 구조

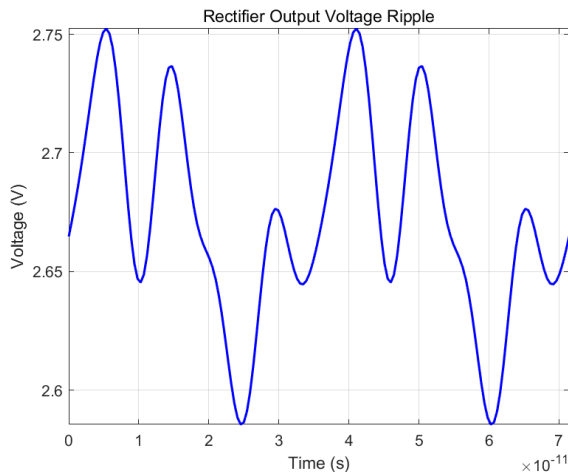


그림 4 : 시뮬레이션 출력전압 변화

2.3 제작 및 측정 결과

설계된 렉테나는 실제 제작 후 성능 검증을 수행하였다. 안테나 단품 측정 결과, 중심 주파수 28GHz 에서 약 -35dB 이하의 우수한 반사 손실 특성을 보였으며, 시뮬레이션과 유사한 약 3GHz 대역폭을 확보하였다. 정류기의 경우 Signal Generator 와 Amplifier 를 이용해 18dBm 의 전력을 인가했을 때 약 31%의 전력 변환 효율(PCE)을 보였다. 이는 시뮬레이션 결과(43.9%) 대비 다소 낮으나, mmWave 대역 특성상 커넥터 연결 손실 및 공정 오차, 그리고 주파수 Shift 현상에 기인한 것으로 분석된다. 최종적으로 안테나와 정류기를 결합한 통합 시스템 실험에서 송신 안테나로부터 28GHz 신호를 방사하였을 때, 수신된 전력으로 LED 가 정상적으로 점등됨을 확인함으로써 원거리 무선전력전송 시스템의 실제 동작을 검증하였다.

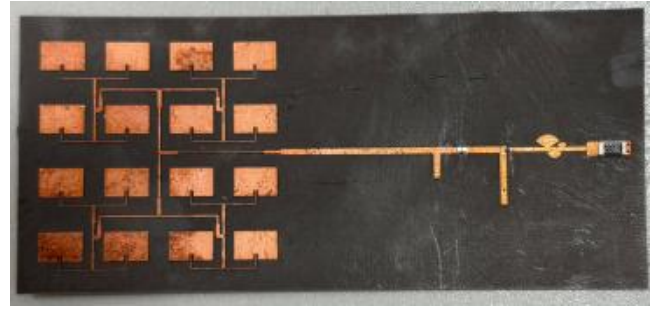


그림 5 : 렉테나 구조

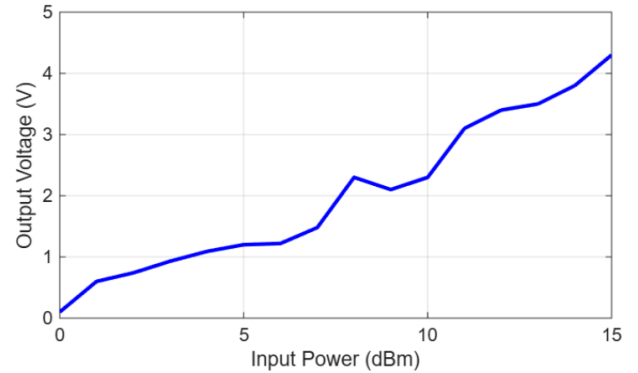


그림 6 : 렉테나의 입력 파워에 따른 출력 전압

III. 결론

본 논문에서는 28GHz mmWave 대역을 활용한 무선전력전송용 마이크로스트립 렉테나를 설계 및 구현하였다. 저손실 Rogers 기판과 4x4 배열 안테나 설계를 통해 18.6dBi 의 고이득을 달성하였으며, Radial Stub 을 적용한 정류기를 통해 고조파를 억제하고 변환 효율을 확보하였다. 비록 제작 공정상의 오차로 인해 시뮬레이션 대비 효율 감소가 발생하였으나, 실증 실험을 통해 IoT 센서 등 저전력 소형 기기에 대한 원거리 무선 전력 공급 가능성을 확인하였다는 데 의의가 있다. 향후 고이득 송수신 안테나 배열 최적화와 공정 정밀도 개선을 통해 전송거리 및 효율을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Sooyoung Oh, et al., "Millimeter-Wave Retrodirective Wireless Power Transfer Applicable to Small Electronic Devices" IEEE Journal of Microwaves, vol. 5, no. 2, pp. 322-332, Mar. 2025.
- [2] Kyoseung Keum and Jaehoon Choi, "A 28 GHz 4x4 U-Slot Patch Array Antenna for mm-wave Communication" 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), 2018.
- [3] Si-Ping Gao, et al., "Millimeter-Wave Rectifiers Using Proprietary Schottky Diodes: Diode Modeling and Rectifier Analysis" 2022 Wireless Power Week (WPW), pp. 180-184, 2022