

# 이중대역 정합회로를 이용한 고효율 무선전력 수신 정류 회로

정주희\*<sup>1</sup>, 형나현\*<sup>2</sup>, 한상민\*<sup>3</sup>

## Highly Efficient Wireless Power Receiving and Rectifying Circuit Utilizing a Dual-Band Matching Network

Juhee Jung\*<sup>1</sup>, Nahyun Hyeong\*<sup>2</sup>, and Sang-Min Han\*<sup>3</sup>

본 연구는 순천향대학교와 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021IRIS-004)과 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구 결과(1345356224)입니다.

### 요 약

본 논문에서는 기존 렉테나의 낮은 RF-DC 변환 효율을 극복하기 위해 2개의 ISM 대역 무선 신호를 동시에 수집 변환하는 이중대역 렉테나 시스템을 제안하였다. 교차하는 이중대역 신호와 고조파 신호의 선택적 제거 필터를 소형화 설계하여 2.4 GHz와 5.8 GHz의 신호를 동시 수신하였으며, 다이오드와의 이중대역 매칭회로를 통해 단일 링크를 갖는 이중대역 렉테나를 설계하였다. 설계된 이중대역 렉테나 시스템은 입력 무선 신호 전력을 증가시켜 높은 무선 전력 수집이 가능할 뿐만 아니라 높은 DC 변환효율을 얻을 수 있어 효율적인 무선전력전송을 구현할 수 있다. 제안된 이중대역 렉테나는 실험결과 입력전력 0 dBm 기준 이중 대역 구동시 변환 효율은 2.4GHz 단일대역 대비 0dBm에서 약 12.6%pt, 5.8GHz 단일대역 대비 15dBm에서 약 22.0%pt 더 높은 결과를 보였다.

### Abstract

In this paper, a dual-band rectifier system is proposed to overcome the low RF-to-DC conversion efficiency. The designed dual-band system simultaneously collects and converts signals from two ISM bands. By miniaturizing selective filters for dual-band and harmonic signals, the system receives signals at 2.4 GHz and 5.8 GHz. A dual-band matching circuit to diodes is designed to achieve a single-link system. The proposed dual-band rectifier not only enables high wireless power harvesting by increasing the input wireless signal power but also achieves high DC conversion efficiency, allowing for efficient wireless power transfer. According to experimental results, the proposed dual-band system showed significantly higher conversion efficiencies during dual-band operation. Specifically, compared to the 2.4 GHz single-band at 0 dBm input power, it exhibited an improvement of approximately 12.6% points. Similarly, compared to the 5.8 GHz single-band at 15 dBm input power, it showed an improvement of around 22.0% points.

### Keywords

conversion efficiency, energy harvesting, multi-band matching, rectifier, wireless power transfer, WPT

\* 순천향대학교 ICT융합학과(\*<sup>3</sup> 교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0009-0007-3759-4577>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0009-0002-3666-5445>  
- ORCID<sup>3</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-7521-6661>

• Received: Oct. 18, 2023, Revised: Nov. 27, 2023, Accepted: Nov. 30, 2023  
• Corresponding Author: Sang-Min Han  
Dept. of Information and Communication Eng., Soonchunhyang Univ., Korea  
Tel.: +82-41-530-1343, Email: smhan@sch.ac.kr

### 1. 서 론

최근 무선전력전송(Wireless power transfer) 기술은 선 없이 전기 에너지를 전달하고 모바일 기기에 충전을 할 수 있다는 유용함으로 매우 활발한 연구 결과와 상용화된 제품이 제안되고 있다. 무선으로 전송되는 전자파(Electromagnetic wave)를 수신 또는 전도시켜 디바이스에 사용 가능한 전원으로 변환해야 하므로 전송과 변환의 낮은 효율은 무선전력전송 기술의 한계로 지적되어 왔다. 무선전력전송에 대한 접근방식과 전송방식은 거리와 물리적 방식에 따라 크게 자기유도, 자기공진, 마이크로파 렉테나의 세 방식으로 분류되어 왔다[1].

자기유도 방식은 가장 변환효율이 높아 스마트 휴대 기기 충전 방식으로 많이 사용되고 있지만 전송 거리가 짧고 코일 정렬에 따른 유도 효율 저하 문제가 있어, 이중 구조 코일을 이용한 코일 자유도 개선[2], 전송 거리 증가 코일 연구[3] 등이 주요 이슈가 되고 있다. 중거리 전송 방식인 자기공진방식은 공진주파수가 동일한 다수 수신기에 전력 전송이 가능하다는 장점이 있으나 주변 환경에 영향에 코일 성능을 유지할 수 있는 기술 개발이 중요하다 [4]. 마이크로파 렉테나 방식은 1960년대 미국 NASA에 의해 우주 태양광 에너지를 지상으로 전송하는 프로젝트로부터 시작된 가장 오랜 역사를 가진 무선전력전송 기술이다 [5]. 보통 하나의 렉테나에 하나의 주파수를 받아 변환하는 것이 일반적이며[6] 원거리 전송의 장점에 비해 낮은 입력 무선전력과 수신 전력이 낮을수록 DC 변환 효율이 낮은 단점이 있어, 높은 무선 전력을 렉테나에 들어오도록 하기위해 송신기 안테나의 빔포밍을 통한 높은 입력전력 확보 기술에 대한 연구[7] 등이 활발하게 수행되고 있다.

본 논문에서는 우주 태양광 발전 등 유선으로 전력을 전송하기 힘든 환경에 적용하기 위한 이중대역 렉테나를 제안하였다. 에너지 변환 회로에 입사되는 무선 전력을 높이기 위해 2개 ISM 대역 신호 수신 가능한 이중대역 렉테나를 설계하였다. 렉테나 시스템은 입력 전력에 비례하여 높은 DC 변환 효율을 가지므로 수집되는 입력 무선 신호 전력을 증가시켜 변환효율을 증가시키고자 하였다. 2.4 GHz와 5.8 GHz의 ISM 대역은 풍부한 무선 신호원이 주변에 존재하여 주변의 신호를 전송하거나 수집하는데 용이한 대역이다. 제안된 시스템은 이중대역 매칭회로와 고조파 제거 필터, 쇼트키 다이오드를 사용한 정류 회로를 설계하였으며 단일대역 대비 이중대역의 전력 변환 효율을 측정, 비교하여 이중대역에서 전력 변환 효율이 더 높은 것을 확인할 수 있었다.

### II. 이중대역 렉테나 시스템 설계

본 논문에서 제안한 시스템은 정류회로의 쇼트키 다이오드에 의해 수신된 두 주파수 신호가 DC와 고조파의 신호를 생성하게 되며, 고조파 제거 여파기와 부하 방향의 DC 통과 여파기에 의해 다이오드에서 반복적으로 DC와 고조파 신호를 생성하게 된다. 따라서 렉테나 시스템의 변환 효율은 입력된 무선 신호를 다이오드 정류회로에 잘 전달하는 정합회로의 성능과, RF단의 고조파 제거 여파기 및 DC 통과 여파기의 성능에 의해 결정된다고 할 수 있다. 본 논문에서 제안한 이중대역 렉테나 시스템은 이중대역의 특수성으로 인해 선택적인 고조파 제거 여파기를 설계하는 것과 이중대역의 다이오드 정합회로를 설계하는 것이 시스템 설계의 주요한 이슈가 된다. 그림 1에서 이중대역 렉테나 시스템 구조를 보이고 있다.

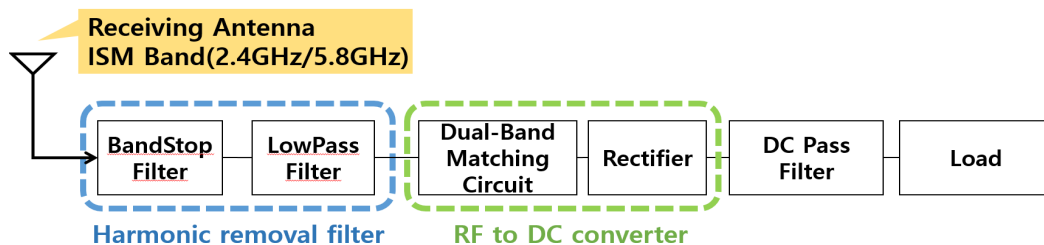


그림 1. 제안된 이중대역 렉테나 시스템 구조

Fig. 1. Configuration of the proposed dual-band rectenna system

2.4 GHz와 5.8 GHz의 신호를 안테나로부터 수신하고 고조파 제거 여파기, 이중대역 매칭 회로, 정류회로, DC통과여파기와 부하 저항으로 구성된다.

설계된 이중대역 렉테나 시스템은 2.4 GHz 신호와 5.8 GHz 신호를 동시에 수신하면서 각각의 고조파 신호를 제거하도록 설계되어야 한다. 다이오드에서 생성된 고조파가 안테나로 재방사될 경우 고조파 에너지가 DC로 변환되지 않아 변환효율이 감소하게 된다. 2.4 GHz의 2차 고조파 성분인 4.8 GHz와 3차 고조파 성분인 7.2 GHz는 수신 신호 주파수인 2.4 GHz와 5.8 GHz에 제거가 용이하지 않다. 따라서 본 설계에서는 저역통과여파기(Low Pass Filter, LPF)와 대역제거여파기(Band Stop Filter, BSF)를 복합하여 설계하였다. 그림 2는 Front-End 필터의 설계 개념도와 수신 신호와 고조파 신호의 필터링 방식을 나타내고 있다. 저역통과여파기는 5.8 GHz를 차단주파수로 하여 7.2 GHz의 3차 고조파 성분을 제거하고, 대역제거여파기는 4.8 GHz의 2차 고조파 성분을 제거하도록 설계하였다. 위 2단의 복합 여파기에 의해 주 신호 성분인 2.4 GHz와 5.8 GHz는 정류회로로 통과되며, 교차 위치한 4.8 GHz와 7.2 GHz의 고조파는 제거가 가능하다.

5.8 GHz의 고조파 성분은 상대적으로 높은 주파수에 위치하여 현재 여파기로 충분히 제거가 가능한 것으로 설계되었으며, 이중대역 안테나는 상용 제품인 Antenova사의 SR42W001를 사용하였다.

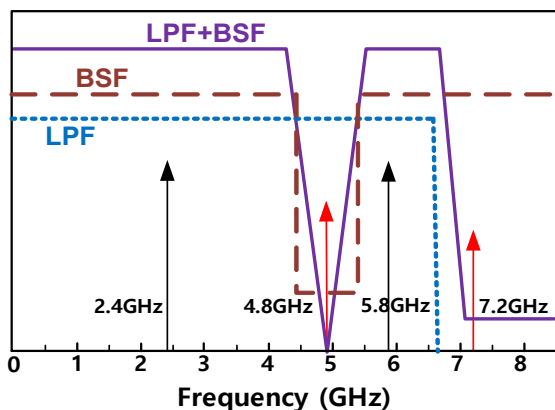


그림 2. 이중대역 수신 신호와 고조파의 필터링 설계  
Fig. 2. Filtering design of dual-band signals & harmonics

### III. 이중대역 렉테나 회로 설계

#### 3.1 Front-End 고조파 제거 여파기 설계

마이크로스트립 선로에 직접 특정 슬롯 패턴을 식각하여 만들어지는 결함마이크로스트립구조 (Defected Microstrip Structure, DMS)는 동일한 물리적 길이라도 전기적 길이가 증가하는 지연파(slow wave)를 얻어 회로의 소형화에 용이하여 회로를 작은 크기로 구현할 수 있다[8]. RF Front-End의 고조파 제거 여파기는 고조파를 20dB 이상 제거하는 것을 목표로 하였으며 회로의 소형화를 위해 DMS를 사용하여 두 개의 필터를 설계하였음에도 DMS로 설계하지 않은 고조파 제거 필터 대비 작은 크기로 설계하였다.

그림 3은 Ansys사의 EM Simulator인 HFSS로 고조파 제거 필터를 구현한 모습이다. 고조파 제거 여파기의 식각한 선로의 폭은 0.4mm, 총 기판의 크기는 가로 30.4mm, 세로 24mm로 작은 크기로 고조파 제거 필터를 구현하였다. 그림 4에서 BSF와 LPF 각각의 시뮬레이션 설계 결과와 두 여파기를 합친 복합 여파기의 설계 결과를 보이고 있으며 설계 결과는 다음과 같다. BSF 단독 시뮬레이션 결과 2.4 GHz와 5.8 GHz는 삽입손실이 1dB 이하, 제작 시 오차를 고려하여 4.56 GHz에서 반사손실 32dB로 고조파를 제거하였다. LPF 단독 시뮬레이션 결과 2.4 GHz와 5.8 GHz는 삽입손실이 대략 1dB, 제작 시 오차를 고려하여 6.86 GHz에서 반사손실이 51dB로 고조파를 제거하였다. 복합 여파기는 2.4 GHz와 5.8 GHz에서 삽입손실이 대략 1dB, 고조파 성분 반사손실은 4.56 GHz에서 33dB, 6.86 GHz에서 35dB로 제거하였다. 이를 통해 2.4 GHz와 5.8 GHz 신호의 손실을 최소화하고 고조파 성분을 효과적으로 제거했음을 확인하였다.

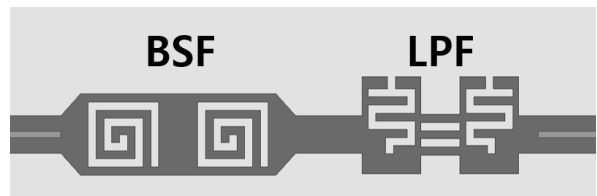


그림 3. 고조파 제거 필터 레이아웃  
Fig. 3. Layout of the harmonic rejection filter

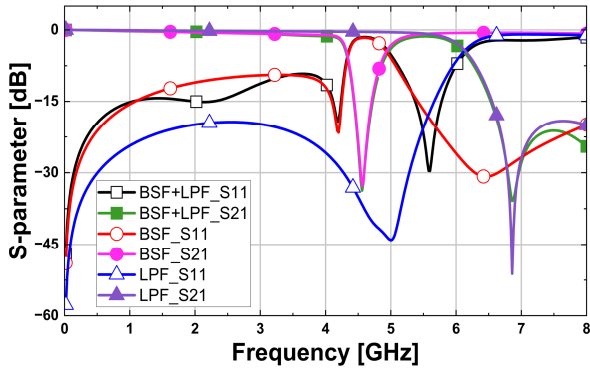


그림 4. 고조파 제거 여파기 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulated results of the harmonic rejection filter

### 3.2 정류회로 및 부하회로 설계

정류회로는 출력 전압을 얻기 위해 2개의 다이오드 구조를 사용하였으며, DC 통과 여파기는 병렬 캐패시터와 부하저항을 이용하여 구현하였다. 이때 다이오드의 선택은 변환효율에 중요한 요소인데 다이오드 자체 전력 소모원인 문턱 전압이 낮은 다이오드를 선택하는 것이 중요하다[9]-[11]. 시스템에 사용한 Skyworks Solutions사의 쇼트키 다이오드 SMS7630은 약 0.1V의 낮은 문턱 전압을 갖는다.

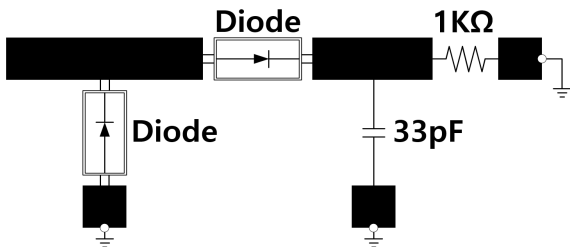


그림 5. 정류회로 및 부하회로의 구조  
Fig. 5. Configuration of the rectifier and load circuit

그림 5는 설계된 정류회로와 부하 회로를 나타내고 있다. 커패시터는 DC Pass Filter로 정류된 DC 신호만 흐르게 하는 역할을 한다. 부하 저항 값은 변환 효율과 변환 출력 전압을 결정하는 중요한 요소이다. 설계된 렉테나 시스템의 가변 부하 실험에 의해 최적의 부하를 결정하는 것이 가능 하나, 그림 5와 같은 정류회로와 부하 회로만을 사용하여 일정한 RF 입력 전력에 대해 대략적인 부하 저항 값을 실험적으로 얻을 수 있다. 위 회로와 동일한 회로를 사용한 실험에서 부하저항이 1K까지는 효율이 지속적으로 증가하다가 1,1K부터는 불안정하게 감소하는 모습을

나타내었다[12]. 그에 따라 안정적으로 효율이 증가한 부하저항 1K를 선택하여 정류회로를 설계하였다.

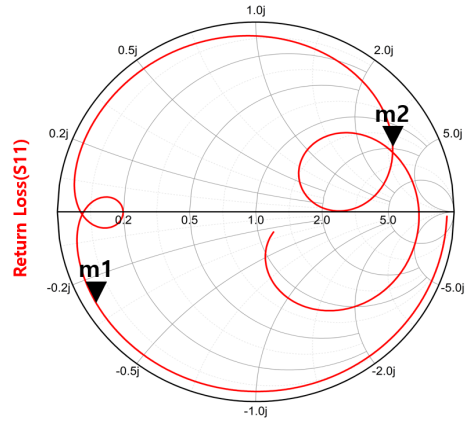


그림 6. 정류회로 및 부하회로의 입력임피던스  
Fig. 6. Input impedance of the rectifier and load circuit

구조 설계 결과 임피던스를 Keysight사의 Circuit Simulation Tool인 ADS(Advanced Design System)를 사용하여 두 주파수에서의 입력임피던스를 구하였다. 표시된 마커 m1은 2.4GHz에서 1.75-j12.6Ω, m2은 5.8GHz에서 96.55+j160.7Ω의 입력 임피던스를 나타내었다.

### 3.3 이중대역 정합회로 설계

정류 회로와 Front-End 회로의 임피던스 차에 의한 신호 손실을 최소화하기 위한 임피던스 매칭 회로는 렉테나의 효율에 매우 중요한 역할을 한다. 두 개의 주파수 대역 신호를 동시에 수신해야 하기 때문에 이중대역 매칭회로를 설계하여 정류 회로까지 손실을 최소화하여 전달하는 것이 중요하다. 이중대역 정합회로는 Quad-band rectenna 회로[13]를 참고해 3개의 오픈 스텐브(Open Stub)를 사용하여 설계하였고, 앞에서 설계한 정류회로 및 부하 회로를 포함하여 50Ω 정합이 되도록 ADS 시뮬레이터를 사용하여 설계하였다.

그림 7은 설계한 임피던스 매칭회로의 레이아웃이다. L3, L4, L5는 2.4GHz, L9, L10은 5.8GHz의 정합을 조정하며 설계하였다. 설계된 이중대역 정합회로는 L1=5mm, L2=10mm, L3=24.68mm, L4=5.34mm, L5=20.21mm, L6=10mm, L7=13.6mm, L8=10mm, L9=10mm, L10=8mm이다.



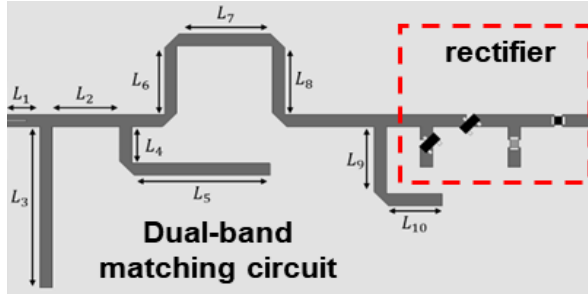


그림 7. 이중대역 정류기 회로의 레이아웃  
Fig. 7. Layout of the dual-band matching circuit

그림 8은 부하와 정류 회로를 포함한 이중대역 정합 회로의 S11 그래프이다. 2.46GHz에서 -24.7dB, 5.7GHz에서 -19.5dB의 S11 정합 특성을 확인할 수 있다.

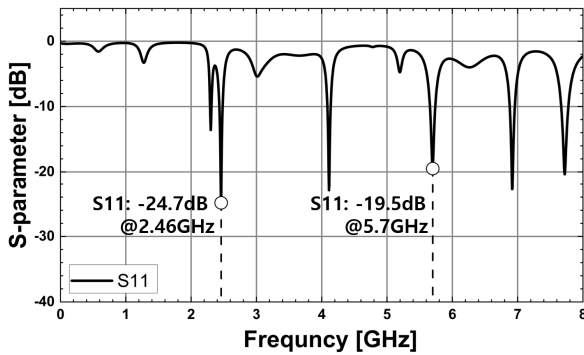
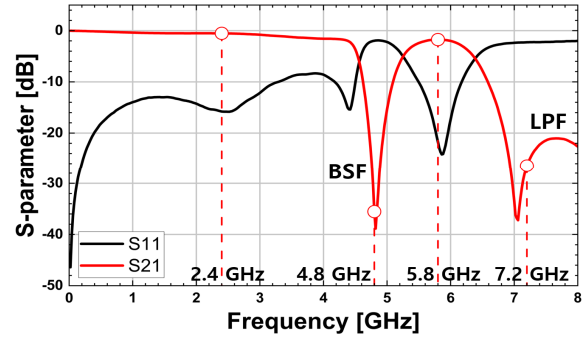


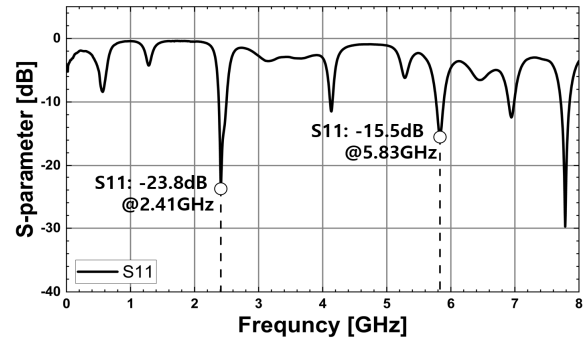
그림 8. 이중대역 임피던스 매칭 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulated results of the dual-band matching

#### IV. 이중대역 무선전력 수신회로 제작 및 측정

본 장에서는 설계한 회로들을 각각 제작하고 측정하여 성능을 평가하였다. 제작한 고조파 제거 필터를 측정한 결과를 그림 9(a)에 보이고 있다. 사용대역인 2.4GHz와 5.8GHz의 삽입 손실은 각각 0.53dB, 1.74dB이고 반사손실은 각각 15.79dB, 21.75dB이다. 고조파 성분인 4.8GHz와 7.2GHz의 삽입손실은 각각 35.53dB, 26.46dB를 얻었다. 목표했던 -20dB 이하의 값으로 고조파가 제거되었기 때문에 렉테나 시스템에서 효율적으로 신호를 전달하면서 고조파를 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다. 이중대역 매칭 회로와 정류기를 제작 및 측정 결과를 그림 9(b)에서 보이고 있다. 2.41GHz의 반사손실이 23.8dB, 5.83GHz에서 반사손실이 15.5dB로 목표했던 주파수 ISM 대역 2.4GHz와 5.8GHz에 맞게 이중대역 임피던스 매칭이 완료된 것 확인할 수 있다.



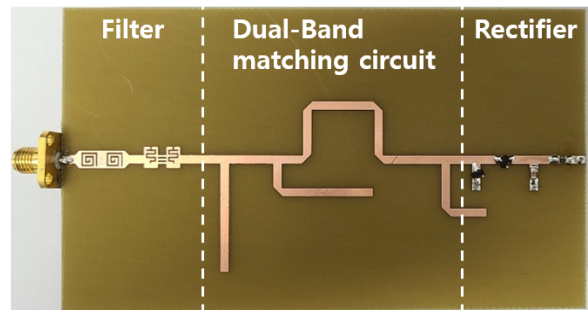
(a)



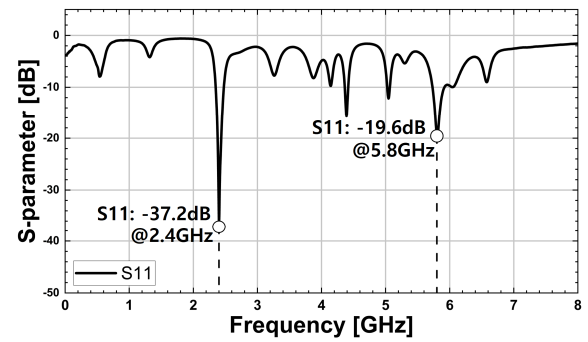
(b)

그림 9. 제작 측정 결과 (a) 고조파 제거 여파기 (b) 이중대역 정합회로 및 정류회로

Fig. 9. Measured results of (a) Harmonic rejection filter (b) Dual-band matching and rectifying circuits



(a)



(b)

그림 10. 제작된 이중대역 무선전력 수신회로 (a) 사진 (b) 측정결과

Fig. 10. Implemented dual-band rectenna (a) Photograph (b) Measured results

전체 이중대역 렉테나 시스템을 아래 그림 10 (a)와 같이 제작하여 이중대역 정합 특성을 측정하였다. 그림 10 (b)의 S11 측정 결과 2.4GHz에서 -37.2dB, 5.8GHz에서 19.6dB로 두 주파수 모두 정합이 된 것을 확인하였다. 대역폭은 반사손실 10dB 기준 2.4GHz 대역은 130MHz(2.35GHz~2.48GHz), 5.8GHz 대역은 190MHz(5.73GHz~ 5.92GHz)를 나타내었다.

제안된 이중대역 렉테나의 변환효율 및 출력 전압을 기존 2.4GHz와 5.8GHz 단일 주파수 렉테나 성능과 비교하였다. 2대의 RF 신호발생기를 이용하여 2.4 GHz와 5.8 GHz의 신호를 일정 전력(PRF)으로 발생하여 전력합성기(Power combiner)를 이용하여 두 개 신호를 동시에 렉테나 회로에 인가하였다. 이때 부하의 수신 DC 전압(VDC)을 이용하여 아래 식 (1)과 같은 변환식을 이용하여 변환효율을 계산하였다.

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \times 100 = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{P_{RF}} \times 100 \quad (1)$$

그림 11은 입력 전력에 따른 측정된 변환 효율을 나타내고 있다. 입력 전력에 따라 주파수별 차이는 있으나, 2.4 GHz 단일 신호 대비 0dBm 입력 전력에서 12.6%pt의 개선 효과를 보였으며, 5.8 GHz 단일 신호 대비 10dBm 입력 전력에 대해 22.0%pt 높은 변환 효율을 나타내었다.

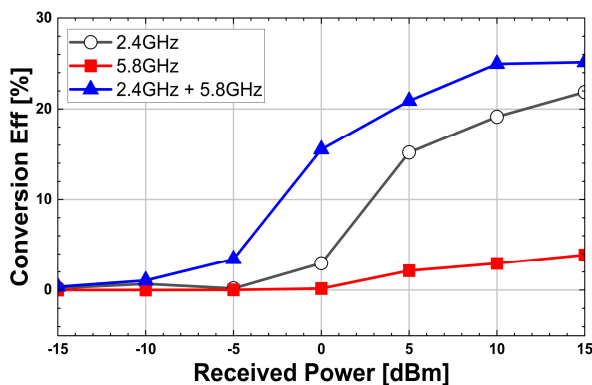


그림 11. 제안된 이중대역 렉테나의 변환 효율 비교  
Fig. 11. Conversion efficiency comparison of the proposed dual-band rectenna

### V. 결 론

마이크로웨이브 렉테나에 무선전력전송은 원거리

전력 전송의 유일한 솔루션임에도 불구하고 낮은 수신 전력과 변환효율 문제로 기술적 진보의 한계를 가지고 있었다. 이러한 문제를 개선하기 위해 본 논문에서는 다중 주파수 신호를 단일 안테나와 단일 정류 회로를 통해 DC로 변환하는 이중대역 렉테나 시스템을 제안하였다. 제안된 렉테나는 2.4GHz와 5.8GHz의 주파수에서 효과적인 고조파 제거 회로와 정교하게 맞춰진 매칭 회로를 이용하여 단일 링크로 설계되었다. 제작 및 측정에 의한 검증 결과 기존의 단일 주파수 대역 렉테나와 비교하여 다수 무선 주파수 전력의 수집과 DC 변환을 통해 더 많은 정류 전력을 얻을 수 있음을 증명하였다. 본 논문에 제안된 렉테나 시스템은 다중 주파수 신호의 수집에 따른 입력 전력의 증가와 전력에 비례하는 변환효율 증가 효과를 동시에 얻음으로써 고효율의 무선전력전송 시스템을 구현하였다. 제안된 시스템 설계 방법은 다양한 RF 시스템 설계와 무선 전력전송 시스템에 응용되어 효율적인 시스템 설계에 기여할 수 있을 것이다. 향후 렉테나의 문제가 이러한 연구를 통해 개선되면, 무선 통신 시스템의 발전에 큰 기여를 할 것으로 예상되며 그에 따라 우주 태양광 발전, 휴대기기 무선 충전, 드론 등에 적용되어 사용자의 휴대성, 편리성, 이동성 향상 등을 기대할 수 있다.

### References

[1] S.-H. Lee, "5.8GHz Microwave Wireless Power Transmission System Development and Transmission-Efficiency Measurement", Ph. D dissertation, Dept. Electron. Eng., Graduate School of Sunchon National Univ., Feb. 2015. <http://www.riss.kr/link?id=T13728024>.

[2] B. Choi, "Design of coils in magnetic induction and magnetic resonance wireless power transfer system", Ph. D. dissertation, Dept. Electronic and Electrical Eng., Graduate School of Hongik Univ., Feb. 2022. <http://www.riss.kr/link?id=T16037331>.

[3] J.-H. Son, W.-S. Kang, D.-H. Sung, M.-J. Kim, and G.-S. Park "Magnetic induction wireless charging coil design to increase charging distance",

- in Proc. Korean Institute of Electrical Engineers Conf., Gyeongju, Korea, pp. 86-88, Nov. 2021. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10755001>.
- [4] T. Y. Eom, C. S. Oh, and S. J. Park, "Wireless power transfer technologies trends", Journal of the Korean Energy Eng., Vol. 24, No. 2, pp. 174-178, Jun. 2015. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06396721>.
- [5] Y.-H. Kim, "The technical trend of far-field RF wireless power transfer", Journal of the Korean Electrical Engineers, Vol. 69, No. 7, pp. 6-12, Jul. 2020. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09372556>.
- [6] J. Jung, N. Hyeong, S.-H. Cho, T. Kim, and S.-M. Han, "Wireless power transmission system using a dual-band matching circuit", in Proc. Korean Institute of Communications and Information Sciences Conf., Korea, pp. 950, Feb. 2023. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE11227635>.
- [7] J. Bae, "Design of microwave power transfer system using LUT-based adaptive beam focusing technique and high-efficiency RF-dc converter", Ph. D dissertation, Dept. Electrical, Electronic, and Computer Eng., Graduate School of Sungkyunkwan Univ., Feb. 2020. <http://www.riss.kr/link?id=T15519186>.
- [8] M. Park, S. H. Kim, W. Lee, Y. J. Kim, D. Ahn, and S.-M. Han, "Minimized DMS filter design for multi-band wireless power scavenging", in Proc. Korean Institute of Communications and Information Sciences Conf., Korea, pp. 1387-1388, Jun. 2021. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10587536>.
- [9] S. A. morabetil, M. Rifi, H. Terchoune, and J. Zbitou, "High efficiency rectifier circuit for ambient RF energy harvesting applications at 5.8 GHz", in Proc. Mediterranean Congress of Telecommunications, Fez, Morocco, pp. 1-5, Dec. 2019. <https://doi.org/10.1109/CMT.2019.8931352>.
- [10] D.-S. Shin and C. Seo, "Study on the rectifier circuits for wireless energy transmission", Journal of the Korean Electrical Engineers-TC, Vol. 48, No. 2, pp. 90-94, Feb. 2011. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01611058>.
- [11] L. D. Manh, P. T. Bich, N. T. Linh, N. H. Hoang, T. X. Nam, and K. Ishibashi, "A concurrent triple-band RF energy harvesting circuit for IoT sensor networks", IEIE Transactions on Smart Processing & Computing, Vol. 10, No. 2, pp. 151-159, Apr. 2021. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10549297>.
- [12] Y. Jeong, "High efficiency rectenna design for energy harvesting systems", Journal of the Korean Electrical Engineers, Vol. 39, No. 8, pp. 16-22, Aug. 2012. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01936730>.
- [13] D. Elsheakh, M. Farouk, H. Elsadek, and H. Ghali, "Quad-band rectenna for RF energy harvesting system", Journal of the Scientific Research an Academic Publisher, Vol. 12, No. 5, May 2020. <https://doi.org/10.4236/jemaa.2020.125006>.

## 저자소개

### 정 주 희 (Juhee Jung)



2023년 2월 : 순천향대학교

정보통신공학과(공학사)

2023년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교

대학원 ICT융합학과 석사과정

관심분야 : RF 시스템, 무선전력,

무선 통신 시스템 설계

### 형 나 현 (Nahyun Hyeong)



2023년 2월 : 순천향대학교

정보통신공학과(공학사)

2023년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교

대학원 ICT융합학과 석사과정

관심분야 : RF 시스템, 무선전력,

Embedded inductor, SRF,

Q-factor

한 상 민 (Sang-Min Han)



1996년 2월 : 고려대 전파공학과  
(공학사)

1998년 8월 : 고려대 대학원  
전파공학과(공학석사)

2003년 8월 : 고려대 대학원  
전파공학과(공학박사)

2003년 10월 ~ 2004년 11월 :

UCLA Post Doctoral Research Fellow

2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구원

2013년 8월 ~ 2014년 7월 : 미국 Georgia Institute of  
Technology, Research Faculty

2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수

관심분야 : RF 시스템, Low power RF transceivers,  
Rectennas, Active integrated antenna