

# 마이크로파 무선전력전송을 위한 렉테나 설계와 구현

(Design and Fabrication of Rectenna for Microwave Wireless Power Transmission)

박정흠\*

(Jeong-Heum Park)

## 요 약

본 논문에서는 마이크로파를 이용한 무선전력전송시스템을 구현하기 위해 2.45[GHz] 마이크로파를 수신하여 직류전력으로 변환하는 렉테나를 설계, 구현하고, RF-DC변환효율을 높이기 위한 임피던스 매칭 및 튜닝 방법을 제시하였다. 구현된 렉테나는 넓은 Open Stub를 사용하여, 쉽게 튜닝이 가능하며, 정류회로의 RF-DC변환효율은 5[dBm]입사전력에 대하여, 최대 59[%]를 얻을 수 있었다. 제작된 패치안테나와 정류회로를 이용하여 소전력무선전송시스템을 구현한 결과, 송수신거리가 1[m]떨어진 거리에서 2.2[V], 1.5[mW]의 직류전력송신이 이루어졌으므로, 소전력 디지털시스템의 운용에 적용가능한 값을 얻을 수 있었다.

## Abstract

In this paper, the rectenna converting 2.45[GHz] microwave into DC power is designed and fabricated for wireless power transmission using microwave and the methode for impedance matching and tuning are proposed in order to maximize RF-DC conversion efficiency. The fabricated rectenna can be easily tuned by using a broad open stub and has the RF-DC conversion efficiency up to 59[%] when the 5[dBm] input power is applied. The 2.2[V], 1.5[mW] DC level, in the 1[m] distance between the transmitter and the receiver can be obtained and this value is available in the small power digital system.

Key Words : WPT(Wireless Power Transmission), Rectenna, RF-DC conversion efficiency

## 1. 서 론

무선전력전송(Wireless Power Transmission) 기술은 우주 공간에 설치된 태양전지판에 의해 생성된 직류전압을, 지구로 송전하기 위한 RF 전력으로 변

환하여 전송하고 지구에서는 다시 RF전력을 DC전압으로 변환하는 것으로 1968년 Peter Glaser 박사가 최초 제안한 이후, 차세대 청정에너지 개발의 일환으로 꾸준한 연구가 진행되어 왔다[1]. 최근에는 전기자동차, 관내검사용 로봇 등에 적용된 사례도 있었으며, 특히 RFID 시스템의 수동형 태그에 소전력을 공급하는 것이 응용분야의 중요한 사례로 부각되고 있다[2]. 또한 유비쿼터스 센서 네트워크가 향후 큰 시장으로 성장할 것이 예상됨에 따라 소형 이

\* 주저자 : 김포대학 IT학부 조교수  
Tel : 031-999-4654, Fax : 031-999-4775  
E-mail : jhpark@kimpo.ac.kr  
접수일자 : 2006년 3월 9일  
1차심사 : 2006년 3월 14일  
심사완료 : 2006년 4월 12일

## 마이크로파 무선전력전송을 위한 렉테나 설계의 구현

동체나 전원공급이 어려운 환경에서 동작하는 시스템에 전원을 공급하는 무선전력전송기술은 그 응용의 폭을 넓힐 것으로 예상된다.

본 연구의 목적은 무선전력전송을 위해 마이크로파로부터 직류전력을 끌어내기 위한 렉테나(Rectenna, Antenna와 Rectifier의 합성어)를 구성하는 것이며, 안테나, 정류회로, 필터, 임피던스 매칭 등이 렉테나의 성능향상을 위한 설계의 요소가 된다. 입력된 RF전력에 대한 정류 후의 DC전압에 의해 부하저항에서 소비되는 DC전력의 비를 계산하여 산출되는 RF-DC 변환효율이 렉테나의 성능을 나타내는 중요한 파라미터가 된다.

RF-DC 변환효율을 높이기 위해서는 첫째, 지향성과 선형이득이 큰 안테나가 설계되어야 하며, 둘째, 안테나와 정류회로 사이의 임피던스 매칭이 잘 되어야 하므로, 정류에 사용되는 Schottky 다이오드의 비선형적 특성을 정확히 고려해야 한다. 그러나 동작주파수에서 다이오드의 접합저항, 접합캐패시턴스 등의 정확한 파라미터를 예측하고 설계하는 것이 어렵기 때문에 튜닝이 용이한 매칭회로의 설계가 바람직하다.

이에 본 논문에서는 마이크로파를 이용한 무선전력 전송시스템 구현을 위해 2.45[GHz] 마이크로파를 수신하여 직류전력으로 변환하는 렉테나의 제작을 목적으로 하였다. 이를 위해, 제작과 튜닝이 용이한 안테나와 매칭회로를 제시하였고, RF-DC 변환효율에 영향을 끼치는 파라미터들을 실험적으로 분석함으로써, 무선전력전송기술의 응용의 폭을 넓히고자 한다.

## 2. 안테나 설계 및 제작

본 논문에서는 2.45[GHz] 원편파 마이크로스트립 패치안테나를 설계하고 전자계 시뮬레이터를 사용하여 모의실험을 행한 후 실제 안테나를 제작, 특성 측정을 통해, 렉테나용 안테나로서의 성능평가를 행하였다. 안테나의 소형화와 제작의 용이성을 이유로 마이크로스트립 패치 형태로 안테나를 제작하는 것이 바람직 하지만, 직선편파 사용 시 송신측 편파와 수신측 편파가 직교하는 경우는 통신이 되지 않으

로, 설치방향의 임의성을 위해서 원형편파로 구현하는 것이 필요하다. 그림 1에 설계된 패치안테나의 형상을 나타내었다. 패치의 길이 L은 프린징 필드에 의한 길이 연장효과를 고려하여 아래의 식으로 결정하였다[3].

$$L \cong 0.49 \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장,  $\epsilon_r$ 은 기판의 유전율이다.

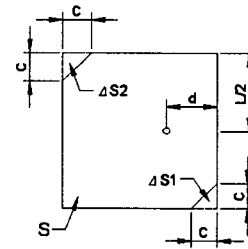


그림 1. 설계된 단일급전 원편파 안테나의 형상  
Fig. 1. Figure of Single feed circularly polarized microstrip antenna

급전은 복잡성을 피하기 위해 SMA 컨넥터를 사용하여 단일직접급전방식을 적용하였다.

입력 임피던스를 고려한 급전점의 위치를 결정하기 위해 아래의 식을 사용하였다[4].

$$Z_A = 90 \cdot \frac{r^2}{r-1} \cdot \left(\frac{L}{W}\right)^2 \quad (2)$$

$$Z = Z_A \cdot \cos^2 \frac{\pi d}{L}$$

여기서  $Z_A$ 는 패치 가장자리에서의 임피던스이고,  $d$ 는 가장자리에서 급전점까지의 거리,  $L$ 은 패치의 길이,  $W$ 는 패치의 폭이다.

원형편파를 발생시키는 방법에는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 perturbation segment를 이용하기 위해 사각형 패치의 마주보는 두 귀퉁이를 잘라서 원형편파를 생성하였다[5].

안테나의 실제 제작에 앞서 3차원 전자계 해석과 그에 따른 S-파라미터를 구하기 위해서 상용의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 사

용하였다. 이를 통해서 일반적인 식으로는 예측하기 어려운 최적의 급전점 위치를 결정하였고, 그 결과를 실제 측정치와 같이 그림 2에 나타내었다.  $d=8.6$  [mm]일 때, 목표 공진주파수인 2.45[GHz]를 구현할 수 있었고, 이 때의 반사손실은  $-22$ [dB]로, 시뮬레이션 값인  $-35$ [dB]와는 많은 차이가 있는데, 이는 컨넥터 내도체와 패치면과의 접합 부위에서의 손실, 급전점용 기판 홀과 컨넥터 내도체 사이의 공간 형성에 다른 유전손 등에서 기인하는 것으로 보인다.

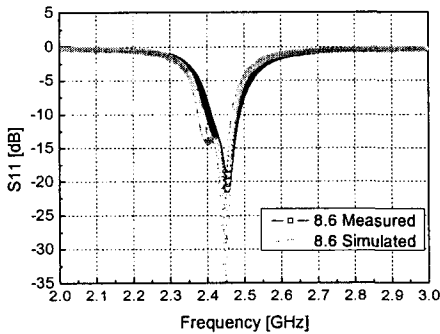


그림 2. 패치안테나의 반사손실의 측정값과 시뮬레이션값 비교  
 Fig. 2. The comparison of measured and simulated return loss in patch antenna

그림 3에 제작된 패치 안테나의 방사특성을 알아보기 위해, 두 개의 직교평면 상에서 관찰된 2.45 [GHz]에서의 방사패턴을 나타내었다. 우수한 우선

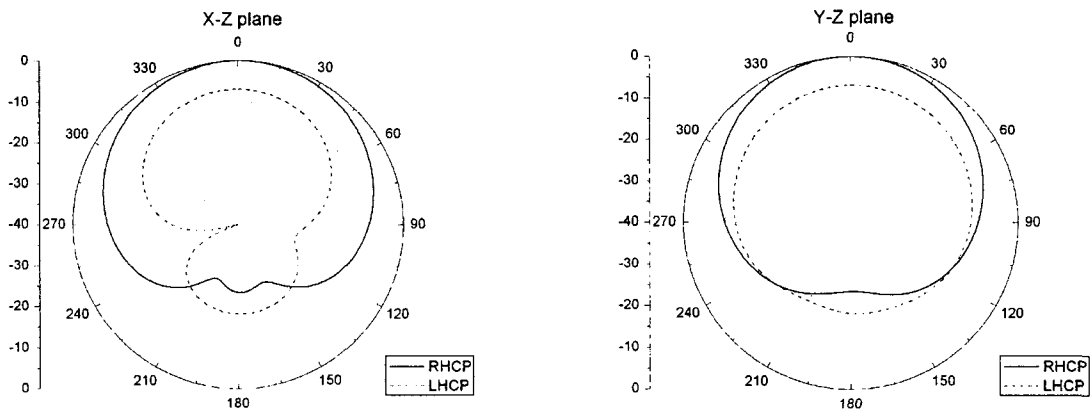


그림 3.  $d=8.6$ (mm)인 패치 안테나의 방사패턴  
 Fig. 3. Radiation pattern of patch antenna fabricated with  $d=8.6$ (mm)

회 원형편파가 얻어졌음을 알 수 있다.

표 1에서는 제작된 패치 안테나의 제 특성을 요약하였다.

표 1. 제작된 패치안테나의 특성  
 Table 1. Characteristics of the fabricated patch antenna

항목	제작된 안테나 사양
크기	61.3[L]×61.3[W]×1.58H[mm]
공진 주파수	2.449[GHz]
VSWR	1.2
3dB 빔폭	93[°]
선형이득	2.24[dBi]
편파	우수원형편파(RHCP)

### 3. 정류회로 설계

RF를 전원으로 변환하기 위한 기본적인 회로구성을 그림 4에 나타냈다. 안테나로부터 입사되는 RF는 정류회로를 거치기 전에 임피던스 매칭회로를 거쳐야 하는데, 이는 RF-DC변환효율을 높이기 위한 핵심적인 요소가 된다. 부하저항과 병렬연결된 커패시터는 다이오드에서 정류된 신호를 받아 DC전압으로 축적하는 역할을 하며, 또한 RF 바이패스 캐패시터의 역할과 함께, 부하저항으로부터의 RF 유입을 차단하게 된다.

마이크로파 무선전력전송을 위한 렉테나 설계와 구현

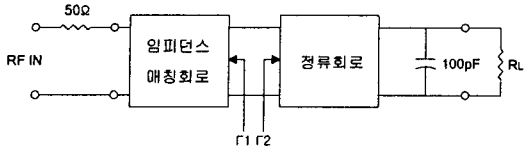


그림 4. 렉테나 회로의 기본 구성  
Fig. 4. The basic diagram of rectenna circuit

본 논문에서 사용한 정류용 다이오드는 HSMS-2850 zero bias single Schottky diode (SOT-23)이며, 이의 특성 파라미터를 사용한 등가모델을 그림 5에 나타내었다[6].

여기서  $R_j$ 는 접합저항으로 다이오드에 흐르는 전류  $i$ 에 의해 다음 식 (3)과 같이 비선형적으로 변화하지만, 본 논문에서는  $R_j$ 를 9[kΩ]으로 근사화 시켜서 계산하였다.

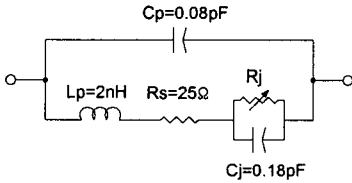


그림 5. HSMS2850 다이오드 등가모델  
Fig. 5. The equivalent circuit of HSMS2850 diode

$$R_j = \frac{V}{i} = \frac{8.33 \times 10^{-5} n T}{I_b + I_s} \quad (3)$$

HSMS-2850인 경우,  $n$ 은 1.06, 포화전류  $I_s$ 는  $3 \times 10^{-6}$ [A],  $I_b$ 는 외부에서 인가된 바이어스 전류,  $T$ 는 절대온도이다.  $C_j$ 는 접합 캐패시턴스로, 식 (4)로 표현되고,  $C_j(0)$ 은  $V=0$ 일 때의 접합 캐패시턴스이고,  $V_b=0.86$ [V]이다.

$$C_j = \frac{C_j(0)}{\sqrt{(1-V)/V_b}} \quad (4)$$

그림 6에 반파정류기로써 다이오드 등가모델을 상기한 바와 같이 적용하였을 때, 그림 4에서  $\Gamma_2$ 에서 바라본 임피던스를 2-10[GHz] 주파수 범위에서 도시하였다.

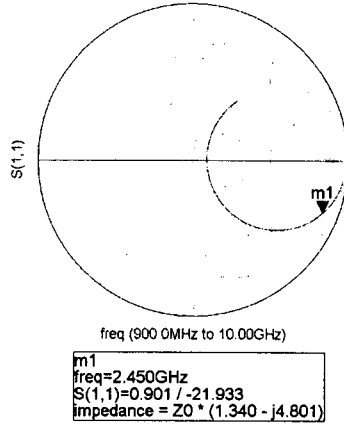


그림 6.  $\Gamma_2$ 에서 바라본 다이오드 등가모델의 임피던스  
Fig. 6. The impedance of equivalent circuit of HSMS2850 diode in  $\Gamma_2$

그림에서처럼 동작주파수인 2.45[GHz]에서  $\Gamma_2$ 에서 바라본 임피던스는 1.340-j4.801로 임피던스 정합이 까다로운 위치에 있다.  $\Gamma_2$ 에서의 임피던스를 50 [Ω]로 정합시키기 위해 개방형 스테브를 사용한 T형 매칭회로를 사용하였으며, 이후 튜닝을 용이하게 하기 위해 큰 폭의 개방형 스테브를 가지도록 그림 7과 같이 설계하였다.

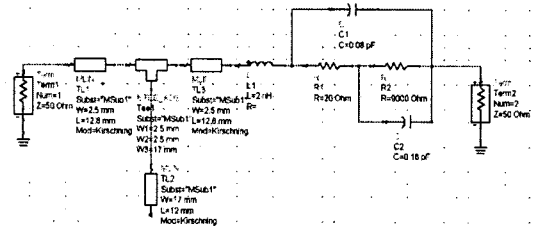
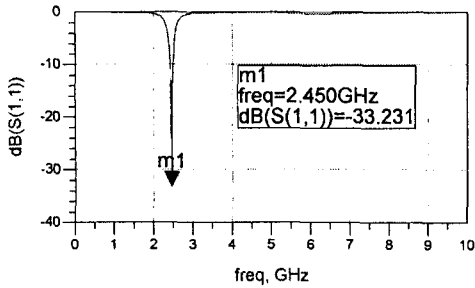
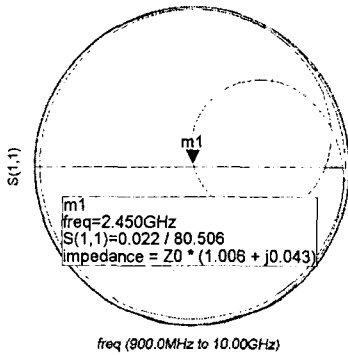


그림 7. 다이오드를 고려한 매칭회로 설계  
Fig. 7. The design of matching circuit for the diode

Agilent사의 ADS를 사용하여 매칭 후의 반사계수를 시뮬레이션 하였고 그 결과를 그림 8에 나타냈다. 시뮬레이션 결과, 그림 (a)에서의와 같이 동작주파수 2.45[GHz]에서 반사손실 -33.2[dB]를 얻었고, (b)에서의와 같이 50[Ω]부근에 정합된 결과를 얻을 수 있었다.



(a) S11



(b) Impedance Z

그림 8. 매칭 후의 S11 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. S11 simulation result after matching

유전율 4.2, 두께 1.58[mm]인 FR4 기판을 사용하여 실제 제작한 임피던스 정합된 정류회로를 사진 1에 나타냈다.

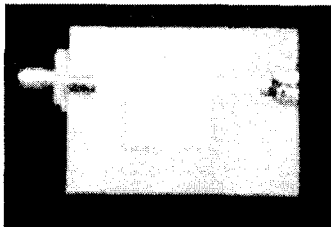


사진 1. 제작된 임피던스 정합된 정류회로  
Photo 1. The impedance-matched rectifier circuit

네트워크 어날라이저를 사용하여 제작된 회로의 S11 측정 결과를 그림 9에 나타냈다. 최초 제작된 임피던스 매칭된 정류회로의 공진주파수는 2.35[GHz]로 목표치인 2.45[GHz]에서 -0.1[GHz] 벗어나 있었으나, 개방형 스타브의 끝을 단순히

1[mm] 절단함에 의해 쉽게 주파수 튜닝을 구현할 수 있었다.

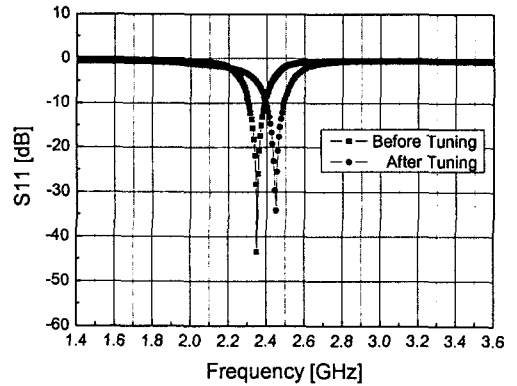


그림 9. 튜닝 전후의 정류회로 S11 비교  
Fig. 9. The comparison of s11 before and after tuning

부하저항과 입력전력에 따른 변환효율을 측정하기 위하여, RF-DC 변환효율을 아래 식으로 구하였다.

$$\eta = \frac{V_{dc}^2 / R_L}{P_{in}} \times 100 [\%] \quad (5)$$

$P_{in}$ 은 안테나로부터 들어오는 입사전력이고,  $V_{dc}$ 는 부하저항에 인가되는 정류된 직류전압,  $R_L$ 은 부하저항의 크기이다. 그림 10에 부하저항과 입력전력에 따른 RF-DC 변환효율을 나타냈다. 일반적인 RFID 시스템의 태그 안테나로부터의 입사전력이 2~5[mW]인 점을 고려하여[7], 네트워크 어날라이저를 사용하여 정류회로에 가변전력을 입사시켜 입사전력에 따른 RF-DC 변환효율을 구하였다.

그 결과 입사전력이 증가함에 따라, 변환효율이 증가하였으며, 5[dBm]입사 시 부하저항 525[Ω]일 때, 최대변환효율 59[%]가 구현되었다. 상기한 결과를 바탕으로 하여, 그림 11과 같이 무선전력전송시스템을 구성하여, 전체적인 렉테나의 성능을 평가하였다.

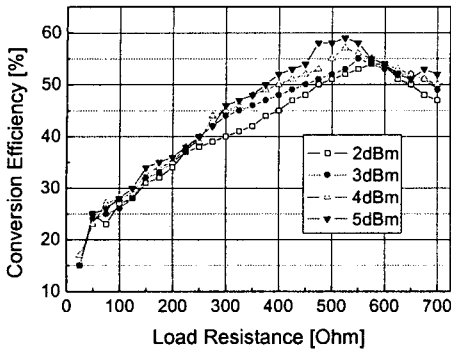


그림 10. 부하저항과 입력전력에 따른 정류회로의 RF-DC변환효율

Fig. 10. RF-DC conversion efficiency of rectifier circuit with the variation of load resistance and input power

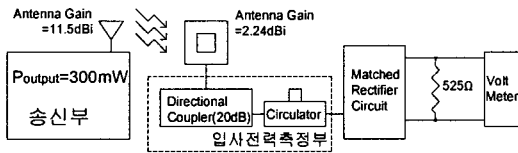


그림 11. 무선전력전송시스템의 렉테나 성능평가 구성도  
Fig. 11. The schematic of rectenna characteristics measurement system of wireless power transmission system

그림 11에서처럼, 입사전력측정부를 구성하여 송신측 안테나에서 수신측 안테나까지의 거리에 따른 정류회로의 입사전력을 측정하였다. 이 결과, 송신 및 수신 측 안테나 사이의 거리가 1[m]일 때 정류회로의 입사전력이 4[mW]로 측정되었고, 이 조건에서 입사전력 측정부를 제거하고, 수신측 안테나를 정류회로에 직접 연결하였을 때, 출력직류전압 2.2[V], 전류 700[μA]를 얻을 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 무선전력전송을 위한 렉테나를 구성하기 위해서 패치안테나와 정류회로를 설계, 제작하였다. RF-DC변환효율을 높이기 위해 Schottky 다이오드의 특성을 고려하여 안테나와 정류회로 간의 임피던스 매칭을 행하였고, 또한 튜닝을 쉽게 구

현할 수 있도록 넓은 Open Stub를 도입하였다. 그 결과 2.2[V], 1.5[mW] 직류출력을 얻을 수 있었고, 이 값은 소전력을 사용한 디지털시스템을 운용하는데 충분한 값이다. 향후 패치안테나의 협대역 특성을 보완하기 위한 광대역 안테나의 채용, 더 얇고 소형화된 안테나 및 정류회로를 제작하기 위한 사용기판의 재질 검토, 변환효율을 더욱 높이기 위한 정류회로 설계방법에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다. 본 논문에서 제안된 임피던스 튜닝을 위한 넓은 Open Stub 방식은 RFID용 태그의 제작공정에 유용하게 사용되리라고 기대된다.

#### References

- (1) William C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves", IEEE Trans. on MTT., Vol. MTT-32, No. 9, Sept., 1984.
- (2) Klaus Finkenzeller, RFID Handbook, Wiley, p.166, 2003.
- (3) R. E. Munson, "Conformal Microstrip Antenna and Microstrip Phase Arrays", IEEE Trans. Antenna & Propagation, Vol. AP-22, pp. 74-78, Jan. 1974.
- (4) D. R. Jackson and N. C. Alexopoulos, "Simple Approximate Formulas for Input Resistance, Bandwidth, and Efficiency of a Resonant Rectangular Patch", IEEE Trans. Antenna & Propagation, Vol. 3, pp. 407-410, Jan. 1974.
- (5) J. R. James and P. S. Hall, "Handbook of Microstrip Antenna", Peter Peregrinus, 1989.
- (6) Surface Mount Microwave Schottky Diode Technical Data, Hewlett Packard, p.3
- (7) Young-Soo Na et. al. "Design of a 2.45 (GHz) passive transponder using printed dipole rectenna for RFID application", Volume C, 21-24, Vol. 3, pp.547-549 Nov. 2004.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 박정흠 (朴正欽)

1967년 9월 23일생. 1990년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업(석사). 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업(박사). 1992~1994년 삼성전기 종합연구소 연구원. 1998~2000년 삼성전자 반도체연구소 선임연구원. 2003~2004년 영국 Birmingham Univ. EDT Center 방문연구원. 2000년~현재 김포대학 IT학부 조교수.