

2.45 GHz 대역 소전력 무선 전송

Low-Power Wireless Transmission at 2.45 GHz Band

최기주 · 황희용

Ki Ju Choi · Hee-Yong Hwang

요약

본 논문에서는 ISM 대역의 2.45 GHz 마이크로파를 이용하여 무선 전력 전송 시스템을 구현하였다. 이 주파수는 주파수 규제에 의해 송신 전력이 20 dBm으로 제한을 받는다. 이러한 규제에 부합하는 mW급의 소전력을 전송하여 벽시계를 구동시킬 수 있는 무선 전력 전송 시스템을 구현하였다. 이러한 시스템을 구현하기 위하여 정류회로의 최적화를 하였으며, RF-DC 변환기에는 제로 바이어스 쇼트키 다이오드를 사용하였다. 수신측을 단일 안테나와 RF-DC 변환기로 구성하여 80 cm의 거리에서 시계를 동작시켰고, 기존 문헌에 비해 부품의 수와 비용을 줄일 수 있었다.

Abstract

In this paper, we implemented a wireless power transmission system at 2.45 GHz. The transmission power is limited within 20 dBm according to the ISM frequency regulations. We used two zero-bias Schottky diode and optimized the RF-DC converter for working a clock at 80 cm distance using a receiver with a single antenna and an RF-DC converter to reduce parts and cost compared to previously reported literatures.

Key words : Wireless Power Transmission, RF-DC Converter, Yagi-Uda Antenna

I. 서론

마이크로파를 이용한 무선 전력 전송에 관한 연구는 1960년대 초반 미국으로부터 시작되었다. 이후로 무선 전력 전송에 대한 연구는 꾸준히 지속되어 왔으며, 다양한 방법의 무선 전력 전송 방식이 개발되어왔다. 이러한 무선 전력 전송 기술은 전기적으로 연결이 어려운 곳에서 응용되어 사용되어지고 있다. 관내 검사용 로봇, 전기자동차에 적용된 사례도 있었으며, 특히 RFID 시스템의 수동형 태그에 소전력을 공급하는 것이 응용 분야의 중요한 사례로 부각되고 있다^[1].

마이크로파를 이용한 무선 전력 전송 시스템에서 가장 핵심이라고 할 수 있는 부분은 렉테나(Rectenna)

이다. 렉테나란 Rectifier와 Antenna의 합성어로 수신된 마이크로파를 DC로 변환시켜주는 소자이다. 렉테나의 RF-DC 변환 효율은 전체 시스템의 효율 개선에 가장 큰 영향을 미친다. 이러한 렉테나는 지금껏 다양하게 연구되어지고 있으며, 다이오드에 20 dBm 이상의 큰 입력 전력이 있을 때, 최대 70~80%의 변환 효율을 얻을 수 있다^{[2]~[3]}. 이러한 입사 전력을 얻기 위해서는 수 W에서 수십 W 이상의 큰 전력을 송신해 주어야 한다.

무선 전력 전송을 위한 주파수 대역 선택에 대한 고찰과 연구는 그 필요성에 비해 적으며, 그 중 2.45 GHz가 비교적 공중에서의 손실이 적고, 소자들의 가격이 낮아 연구를 위해 제작하는 데 적합하고 비교적 높은 변환효율을 지니고 있다. 또한, 파장이 짧

「본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구 결과입니다.」

강원대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical & Electronics Engineering, Kangwon National University)

· 논문 번호 : 20090529-14S

· 수정완료일자 : 2009년 8월 24일

아 회로가 소형이라는 장점을 지니고 있어 무선 전력 전송에 주로 쓰이는 주파수이다^[4]. 그러나 주파수 규제에 의해 2.45 GHz의 ISM 주파수에서는 100 mW 초과 전력은 송신할 수 없다^[5]. 따라서 규제 범위에 있는 낮은 전력을 전송하고 이를 수신하여 적은 전력으로도 높은 변환 효율을 지니는 정류 회로를 설계하는 것이 필요하다. 정류 회로는 다이오드의 특성으로 인해 입사 전력이 증가할수록 RF-DC 변환 효율이 증가한다^[6]. 하지만 낮은 입사 전력에도 문턱 전압이 낮은 다이오드를 선택하면 소전력의 입사 전력에서의 변환효율을 증가시킬 수 있고, 설계 방법에 따라서도 적은 입사 전력에 대해 그 효율을 증대시킬 수 있다.

본 연구에서는 단일 안테나와 하나의 RF-DC 변환기를 갖는 수신단을 설계하여 벽시계를 동작시킴으로써, 기존의 문헌^[6]에서 여러 개의 랜테나를 직렬로 연결하여 수신 전력의 효율을 높이는 것에 비해, 적은 부품들과 비용을 사용하는 소전력 무선 전송 시스템을 설계한다. 이를 위하여 고지향성을 지니는 마이크로스트립 야기-우다 안테나를 설계 제작하고, 작은 RF 전력에서도 벽시계 구동을 위한 1.2 V의 DC전압을 얻을 수 있는 RF-DC 변환기를 제작한다.

II. 본 론

2-1 송신부의 제작

송신부는 DC 전력을 RF 전력으로 변환하고 전송하는 장치로 그림 1과 같은 구성으로 이루어진다. 송신부의 제작은 JOTS-3000 VCO를 사용하여 2.45 GHz의 신호를 발생시키고, AH11을 통해 증폭시킨 후 대역 통과 필터를 통하여 2.45 GHz 대역의 RF 전력을 안테나로 공급한다. KA7805는 레귤레이터로 오실레이터와 앰프에 안정된 5 V의 DC 전압을 공급하기 위하여 사용되었다. 대역 통과 필터(BPF)의 경우는 칩으로 된 집중 소자를 이용하여 제작하였다. 출력은 송신 전력 규제에 부합하도록 20 dBm 출력에 맞추었으며, 그림 2는 제작된 송신부의 사진이다.

2-2 마이크로스트립 야기-우다 안테나 설계 및 제작

무선 전력 전송 시스템의 전력 전송 거리를 늘리기

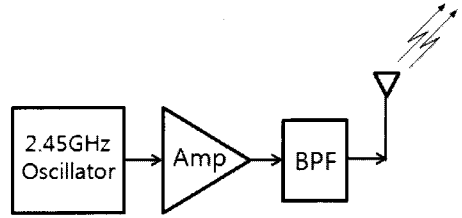


그림 1. 송신부 블록도
Fig. 1. Transmitter block diagram.

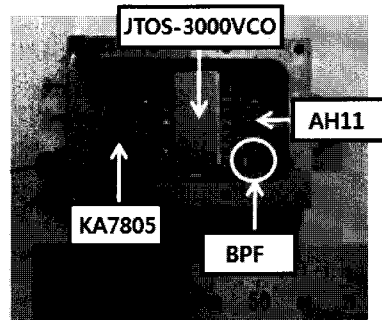


그림 2. 제작된 송신부
Fig. 2. Fabricated transmitter.

위해서는 고지향성의 안테나가 필요한데, 이를 위해 본 논문에서는 그림 3과 같이 마이크로스트립 야기-우다 안테나를 설계하였다. 안테나와 RF-DC 변환기를 일반적으로 함께 설계하지만 RF-DC 변환기만을 최적화하기 위해 안테나와 분리하여 각각 설계 제작하였고, 따라서 급전 선로의 입력 임피던스를 50 Ω으로 하여 RF-DC 변환기와 정합하였다.

그림 3에서, L 은 여진기(다이폴 안테나)의 길이, L_d 는 도파기의 길이, S_d 는 도파기간의 거리로 이 파

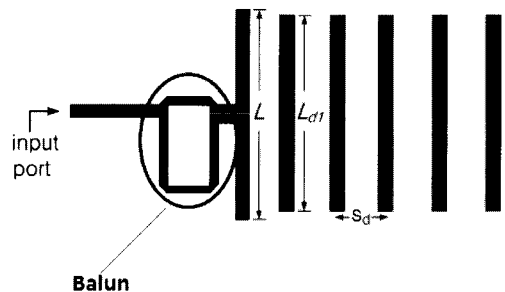


그림 3. 마이크로스트립 야기-우다 안테나 레이아웃
Fig. 3. Microstrip Yagi-Uda antenna layout.

표 1. 야기-우다 배열 안테나에 대한 기생 다이폴의 최적 길이^[7]

Table 1. Optimal lengths of parasitic dipoles for Yagi-Uda array antennas^[7].

$d/\lambda=0.0085$ $S_R=0.2\lambda$	Boom length of Yagi-Uda array, λ					
	0.4	0.8	1.20	2.2	3.2	4.2
Length of reflector, L_R/λ	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.475
D1	0.482	0.428	0.428	0.432	0.428	0.424
D2		0.424	0.420	0.415	0.420	0.424
D3		0.428	0.420	0.407	0.407	0.420
D4			0.428	0.398	0.398	0.407
D5				0.390	0.394	0.403
D6				0.390	0.390	0.398
D7				0.390	0.386	0.394
D8				0.390	0.386	0.390
D9				0.398	0.386	0.390
D10				0.047	0.386	0.390
D11					0.386	0.390
D12					0.386	0.390
D13					0.386	0.390
D14					0.386	
D15					0.386	
Spacing between directors (S_D/λ)	0.20	0.20	0.25	0.20	0.20	0.308
Gain relative to half-wave dipole, dBd	7.1	9.2	10.2	12.25	13.4	14.2

라미터들은 표 1^[7]을 이용하여 설계하였다. 이후 시뮬레이션 결과를 확인하며, 각 파라미터를 수정하여 최종 설계된 안테나의 각 성분의 길이는 모두 mm 단위로 $L=46.81$, $L_d=41.78$, $S_d=22.42$ 이다. 일반적인 야기-우다 안테나는 반사기를 가지고 있지만 본 논문에서는 급전 점을 안테나와 동일한 평면 위에 놓기 위하여 반사기는 가지고 있지 않다. 급전 방법은 발륜을 통하여 위상이 180도 차이 나는 전류를 다이폴 안테나에 공급하였다. 이와 같이 설계된 안테나는 유전율 4.4, 유전체 두께 0.762 mm, 손실 탄젠트 0.025 인 FR4 기판을 사용하여 제작하여 반사손실을 측정하여 그림 4와 같이 시뮬레이션 값과 측정값을 얻었다. 결과는 그림 4와 같이 2.45 GHz의 주파수에서 -14 dB의 반사 손실을 가지는 것으로 시뮬레이션 결과와

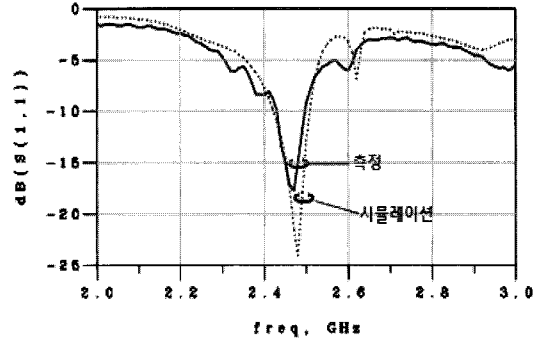


그림 4. 마이크로스트립 야기-우다 안테나의 반사 손실 측정값

Fig. 4. Measure of the return loss of the microstrip Yagi-Uda antenna.

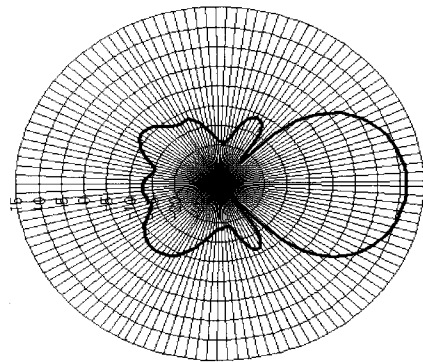


그림 5. 측정된 마이크로스트립 야기-우다 안테나의 방사 패턴

Fig. 5. Measured radiation pattern of microstrip Yagi-Uda antenna.

거의 일치하는 것을 확인하였다.

그림 5에서는 제작된 야기-우다 안테나의 방사 패턴으로 11.5 dBi의 이득을 가지는 것을 확인하였다.

2-3 수신부의 설계 및 제작

무선 전력 전송 시스템에 있어 RF-DC 변환 효율은 가장 중요한 요소 중 하나이다. 그림 6의 수신부 블록도에서 매칭 회로와 정류 회로를 합하여 RF-DC 변환기라고 하며, RF-DC 변환 효율을 높이는 것이 전체 시스템의 효율 증진에 큰 영향을 미친다.

송신 전력이 20 dBm이고, 거리 1 m에서 이득이 11 dB인 송수신 안테나를 사용한다고 할 때 다음의 프리스 전달 공식^[7]에 의하여 수신기에 수신되는 전력

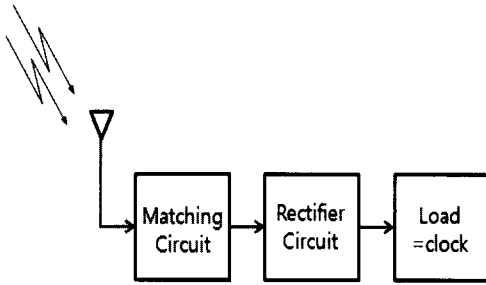


그림 6. 수신부 블록도
Fig. 6. Receiver block diagram.

을 계산할 수 있다.

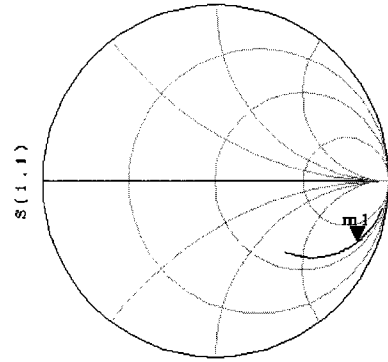
$$P_r = P_t \frac{G_r G_t \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (1)$$

여기서, P_t 는 송신 파워를, G_t 와 G_r 은 송수신 안테나의 이득, R 은 송신기와 수신기의 거리를 나타낸다.

이 식을 이용하여 계산된 수신 전력은 1.77 dBm이다. 따라서 거리 1 m에서 시계를 동작시키기 위해서는 2 dBm 이하의 RF 전력으로도 시계를 동작시킬 수 있도록 RF-DC 변환기를 설계하여야 한다.

RF-DC 변환기에 있어서 가장 중요한 소자는 다이오드로 임피던스 매칭 및 다이오드의 특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 논문에 사용된 다이오드는 HSMS2850 Zero bias Schottky diode로 문턱 전압 150 mV를 가진다.

ADS에서 제공하는 HSMS2850 모델을 이용하여 그림 7에서 다이오드의 앞단에서 임피던스 특성을 확인해 본 결과 그림 6과 같이 $1.387 + j4.547 \Omega$ 의 임피던스를 지니고 있었다. 이를 50 Ω 에 매칭해 주기 위하여 그림 8과 같이 개방 스테브를 사용하여 정합하였고, 그 결과 그림 9와 같이 2.45 GHz에서 정합된 것을 확인할 수 있었다. 이상과 같은 기본적인 매칭 이후 벽시계 구동을 위한 DC 전원을 얻어내기 위하여 RF-DC 변환기를 최적화시켰다. 부하로 사용할 시계의 평균 임피던스를 구하고 이를 고정 부하로 사용하여 전체 시스템을 50 Ω 으로 정합하여 최적화하였다. 벽시계는 초침이 움직일 때마다 1초 주기로 임피던스가 변화하므로 평균 전력을 구하여 평균 임피던스 값을 구할 수 있다. 벽시계의 소비 전력은 커패시터를 시계가 동작 가능한 전압 영역 안에서 충전한 후 시계와 연결하여 커패시터가 방전되는 시간을 측정



```

freq (1 000GHz to 6 000GHz)
m1
freq=2.450GHz
S(1,1)=0.889 / -22.832
impedance = Z0 * (1.387 - j4.547)
    
```

그림 7. HSMS2850 다이오드의 입력 임피던스
Fig. 7. Input impedance of HSMS2850 diode.

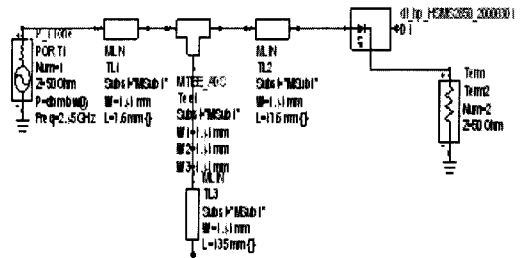
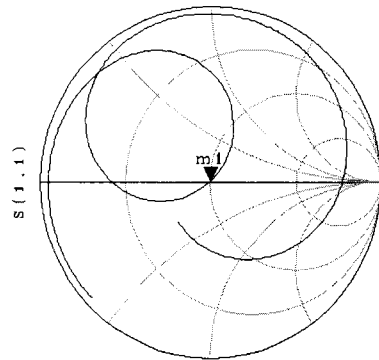


그림 8. 다이오드의 임피던스 매칭
Fig. 8. Diode impedance matching.



```

freq (1.000GHz to 6.000GHz)
m1
freq=2.450GHz
S(1,1)=0.005 / 84.707
impedance = Z0 * (1.001 + j0.009)
    
```

그림 9. 다이오드 매칭 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Diode impedance matching simulation result.

하고 식 (2), (3)을 통해 시계의 소모 전력을 계산하였다. V_2 는 처음 충전된 전압이며, V_1 은 동작 영역 내에서 방전된 후의 전압이다.

$$\Delta W = \frac{1}{2} C (V_2^2 - V_1^2) \quad (2)$$

$$P = \Delta W / t \quad (3)$$

계산된 시계의 소모 전력은 약 0.11 mW이며, 이를 식 (4)를 이용하여 시계의 임피던스를 계산하면 약 11 kΩ 임을 알 수 있다.

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (4)$$

그림 10은 위에서 계산된 시계의 임피던스 11 kΩ을 고정 부하로 사용하여 세부 정합 설계한 RF-DC 변환기의 ADS™ 회로도이다. 이 회로의 시뮬레이션 결과 3 mW의 입사 전력에 대하여 1.2 V의 DC 전압과 0.13 mW의 DC 전력을 얻어 시계를 동작시키기 충분한 전력을 얻을 수 있었다. 다이오드 뒷단에 있는 커패시터는 RF 바이패스 및 안정적인 DC 전원 공급을 위하여 탄탈 10 μF 및 전해 1,000 μF 커패시터를 부하와 병렬로 사용하였다.

설계된 RF-DC 변환기를 11 kΩ의 고정 부하에 입사 전력을 변화시켜 가며 식 (5)를 사용하여 변환 효율, η 를 계산하여 그림 11에 결과를 나타내었다.

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

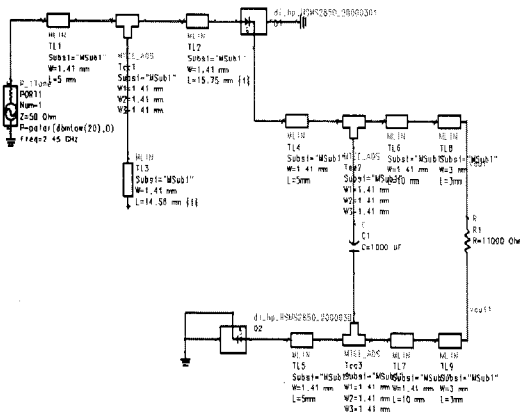


그림 10. 벽시계 구동을 위해 최적화 된 RF-DC 변환기
Fig. 10. Optimized RF-DC converter circuit for driving a wall clock.

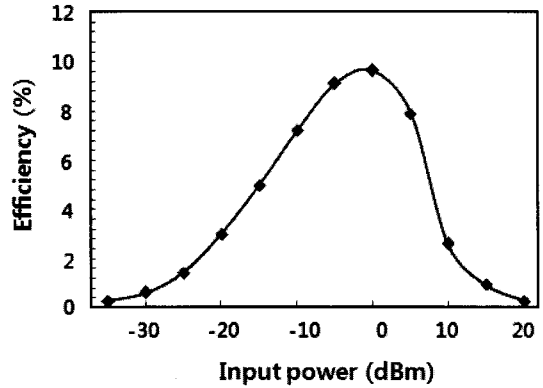


그림 11. 입사 전력에 따른 RF-DC 변환 효율
Fig. 11. RF-DC conversion efficiency by the input power.

여기서, P_{input} 은 RF-DC 변환기 입력으로부터 들어오는 RF 전력, V_{dc} 는 RF-DC 변환기에 의해 정류된 DC 전압, R_L 은 부하 저항의 크기를 의미한다.

입사 전력에 대한 변환 효율을 나타낸 그림 11에서 보듯이 입사 전력 -5~3 dBm 사이일 때 9% 이상의 가장 높은 변환 효율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

그림 12는 RF-DC 변환기에 입사 전력이 2 dBm이 입력될 때 부하의 변화에 따른 변환 효율을 비교한 그래프이다. 그림 12의 그래프에서 보면 최대 변환 효율을 지니는 최적의 임피던스는 1.1 kΩ이며, 이때 최대 25.26%의 변환 효율을 가질 수 있다. 그러나 벽시계의 평균 임피던스는 11 kΩ으로 시뮬레이션 상 약 8% 변환 효율을 얻을 수 있을 것으로 기대할 수 있다. 이와 같은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 유전율 4.4, 기판 두께 0.762, 손실 탄젠트 0.025의 FR4 기판에 회로 패턴을 프린트하여 그림 13과 같이 RF-DC 변환기를 제작하였다. 실제 제작된 회로는 1.99 mW의 입사 전력에서 0.13 mW의 DC 전력을 얻어 낼 수 있었으며, 식 (5)를 이용하여 RF-DC 변환 효율을 구하면 6.5%의 변환 효율을 가진다. 시뮬레이션 결과에서는 1.5 mW의 입사 전력으로 0.13 mW의 DC 전력을 얻은 것과 비교하면 실제 제작 과정에서 생긴 손실로 인해 시뮬레이션 결과와 입사 전력 0.49 mW의 오차 또는 1.5%의 변환 효율의 차이가 나타났다.

2-4 전체 시스템 구현

설계 제작된 송신기, 마이크로스트립 야기-우다

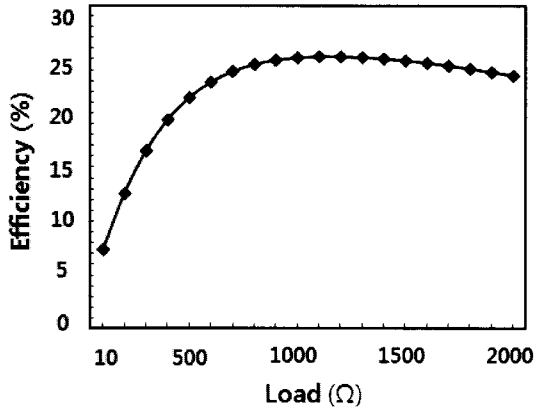


그림 12. 부하 저항 값 변화에 따른 변환 효율
Fig. 12. Conversion efficiency according to the load.

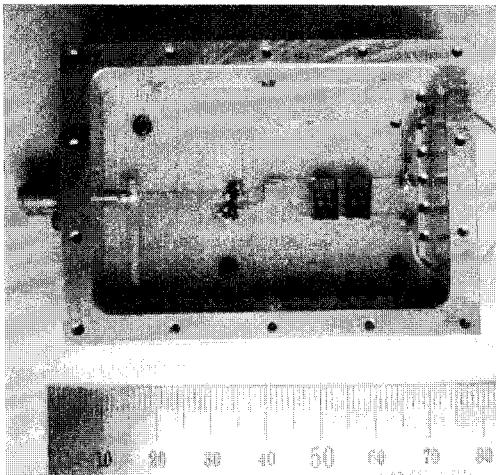


그림 13. 실제 제작된 RF-DC 변환기
Fig. 13. Fabricated RF-DC converter.

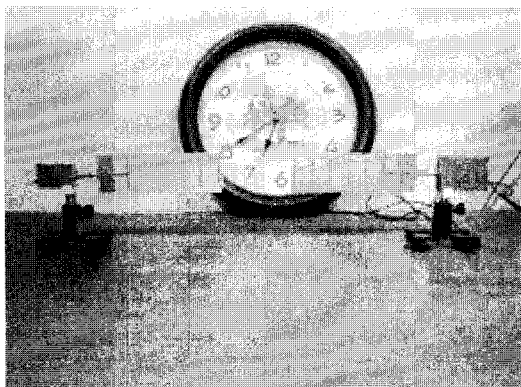


그림 14. 구현된 전체 시스템
Fig. 14. Whole implemented system.

안테나, 수신기를 결합하여 전체 시스템을 그림 14와 같이 구성하였다. RF-DC 변환기 출력 단자에는 부하로 사용되는 벽시계를 연결하여 변환된 DC 전압으로 시계를 동작시켰다. 송신부와 수신부의 거리를 늘려가며 시계가 동작할 수 있는 최대의 거리를 측정하고 결과 80 cm의 거리까지 시계가 동작하는 것을 확인할 수 있었고, 이때 전체 100 mW의 전력을 송신하여 최종 부하에서 0.11 mW의 전력을 소모하게 되어 전체 무선 전력 송수신의 효율은 0.11%를 나타냈다.

III. 결 론

본 논문에서는 2.45 GHz의 마이크로파를 사용하여 벽시계 구동을 위한 소전력 무선 전력 전송 시스템을 설계·제작하였다. 이를 위해 송신부, 마이크로스트립 야기-우다 안테나, RF-DC 변환기를 mW급 소전력 무선 전송을 위하여 최적화하였다. 본 논문에서는 여러 개의 렉테나를 직렬로 사용하는 기존의 연구와는 달리, 단일 안테나와 단일 RF-DC 변환기를 사용하여 그 부품의 수와 비용을 줄일 수 있었으며, 최대 80 cm의 거리에서 벽시계를 동작시킬 수 있었다.

무선 전력 전송이 실생활에 널리 사용되기 위해서는 현재보다 ‘더 먼 거리와 더 큰 전력’의 무선 전송이 필요하고, 이를 위해서는 전송주파수 할당에 대한 연구와 저 전력에서의 RF-DC 변환기의 효율 향상 기술, 소형 고지향성 안테나 기술에 대한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] William C. Brown, "The history of power transmission by radio wave", *IEEE Trans. on MTT*, vol. MTT-32, no. 9, Sep. 1984.
- [2] J. O. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, "A high conversion efficiency 5.8 GHz rectenna", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 547-550, 1997.
- [3] J. O. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, "Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz rectenna", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 45, pp. 2053-2060, Dec. 1998.

[4] Young-Ho Suh, Kai Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45-GHz and 5.8-GHz wireless power transmission", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 50, no. 7, pp. 1784-1789, Jul. 2002.

[5] Ministry of Information and Communication Bulletin, p. 9, 2007.

[6] Jeroen A. C. Theeuwes, Huib J. Visser, Martin C. van Beurden, and Gert J. N. Doodeman, "Efficient, compact, wireless battery design", *Microwave Conference*, pp. 991-994, Oct. 2007.

[7] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1998.

최 기 주



2009년 8월: 강원대학교 전자공학과 (공학사)
 [주 관심분야] RF 능동소자

황 희 용*



1988년 2월: 서울대학교 생물교육학과 (이학사)
 1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1995년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

2003년 5월~현재: 강원대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] RF, Microwave, Millimeter wave 분야의 부품 및 시스템

* 교신저자