

2.45 GHz대 저전력용 렉테나에 관한 연구

A Study on a Rectenna for Low Power Density at 2.45 GHz

박동국 · 서홍은* · 조익현** · 김예지

Dong-Kook Park · Hong-Eun Seo* · Ik-Hyun Cho** · Yea-Ji Kim

요 약

본 논문에서는 2 mW/cm^2 이하의 낮은 입력 전력 밀도에서 동작하는 2.45 GHz 렉테나를 제안하였다. 제안된 렉테나는 다이오드 2개를 사용하는 배전압 구조의 정류부와 다이오드에서 발생하는 2차 하모닉의 재 방사를 억압하기 위한 인쇄형 야기 안테나 구조를 사용하여 설계하였다. 인쇄형 야기 안테나는 2.45 GHz에서 약 5 dB의 이득을 가지며, 안테나를 통해 입력된 전력이 0~14 dBm일 때 렉테나의 변환 효율은 32~42 %으로 측정되었다. 개발된 렉테나는 저전력 소자의 전원 공급에 활용될 것으로 기대된다.

Abstract

This paper presents a study on a rectenna for rectification of incident low power microwave signals with power densities less than 2 mW/cm^2 at 2.45 GHz. The proposed rectenna is designed and implemented by a rectifier with voltage doubler structure and a printed Yagi antenna which suppress re-radiation of the second order harmonic of fundamental frequency. The printed Yagi antenna has a gain of about 5 dB, and the measured conversion efficiencies of the rectenna are from 32 % to 42 % when its incident power levels are from 0 dBm to 14 dBm. The developed rectenna is expected to be useful in the power transmission system.

Key words : Rectenna, Rectifier, RF-to-DC Conversion, Printed Yagi Antenna

I. 서 론

전자기파를 이용하여 무선으로 전원을 공급하기 위한 연구가 테슬라에 의해 제안된 이후 지금까지 꾸준히 연구가 진행되어 왔다^[1]. 최근에는 휴대용 디바이스 사용이 보편화되고 통신 기술이 일반화되면서 회로의 소형화에 걸림돌이 되고 있는 배터리와 전원 코드 문제를 해결하고 전원 공급과 충전을 무선으로 실현하려는 연구 및 언제 어디서나 이용할 수 있는 유비쿼터스 센서의 전원 공급을 위한 배터리의 제한과 공간적 장벽을 무너뜨리는 새로운 전원 공급 방법에 대한 연구도 다양한 분야에서 진행되고 있다

^[2]. 특히 2008년 미국 MIT에서 발행하는 테크놀로지 리뷰지에 미래 사회의 10대 유망 기술 중 하나로 무선 전력 전송이 포함되면서 많은 주목을 받고 있다^[3].

무선 전력 전송 방식에 의해 센서 등 기기를 구동할 수 있을 정도의 전력을 얻기 위해서는 비교적 큰 RF 전력을 수신하여야 한다^[4]. 그러나 이를 위해 높은 전력을 무분별하게 방사할 경우 다른 기기의 장애 및 인체에도 해로운 영향을 끼칠 수 있어 국가별로 전력 레벨에 대해 제한을 두고 있으며, 전자기파에 의한 인체의 영향을 고려하여 허용 전력 밀도에 대한 제한도 두고 있다. 미국의 경우, ISM 대역의 무선 기기는 최대 1 W 이내로 방사 전력의 제한을 두

한국해양대학교 전자통신공학과(Department of Electronic and Communication Engineering, Korea Maritime University)

*한국항공우주산업주식회사(Korea Aerospace Industries, Ltd.)

**광양만권 u-IT연구소(Ubiquitous Gwangyang & Global IT Inst.)

· 논문 번호 : 20090610-055

· 수정완료일자 : 2009년 8월 28일

고 있으며, ANSI/IEEE C95.1-1992에 의하면 ISM 대역인 2.45 GHz 주파수에서 인체 노출 허용 전력 밀도의 한계는 2 mW/cm^2 로 되어 있다^[5].

본 논문에서는 ISM 대역인 2.45 GHz의 주파수에서 2 mW/cm^2 이하의 낮은 전력 밀도 레벨의 신호를 수신하여 DC 전력으로 변환하는 무선 전력 전송 방식의 주요 소자인 렉테나(rectenna)를 개발하고자 한다.

II. 렉테나 설계

2 mW/cm^2 이하의 낮은 전력 밀도에서 고효율의 변환 효율을 가지는 렉테나를 설계하기 위해 그림 1과 같이 다이오드를 2개 사용하는 배전압 구조의 렉테나를 구상하였다. 안테나와 정류 다이오드 사이에는 안테나로 수신된 전력을 다이오드에 효과적으로 전달하기 위한 임피던스 정합 및 다이오드에서 발생하는 하모닉 성분의 신호의 재방사를 저지하기 위한 필터 회로가 놓이게 된다. 다이오드와 부하 사이에는 다이오드에 의해 정류된 DC 전력을 효과적으로 부하에 전달하기 위한 저역 통과 필터가 놓이게 된다. 이러한 렉테나의 구조도를 그림 1에 나타내었다.

본 논문에서 개발하고자 하는 저전력용 2.45 GHz 대역 렉테나를 설계하기 위해 RF 전력을 수신하는 안테나로 1개의 기생 소자를 갖는 평판 인쇄형 야기 안테나를 선택하였다^[6]. 안테나 설계를 위한 시뮬레이션 툴로는 Ansoft사의 Designer를 이용하였으며, 비유전율이 4.4이고, 높이가 1.6 mm인 FR4 기판을 사용하여 설계한 수신 안테나의 모양을 그림 2(a)에 나타내었다.

렉테나의 효율을 개선하기 위해서는 다이오드에서 RF 전력을 DC전력으로 변환할 때 생성될 수 있

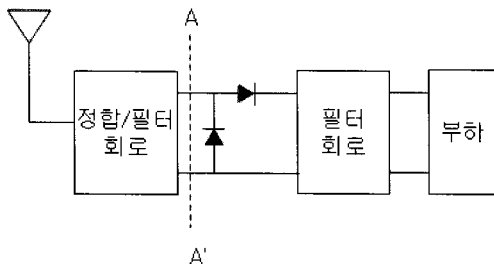


그림 1. 제안하는 렉테나 구조
Fig. 1. Proposed rectenna structure.

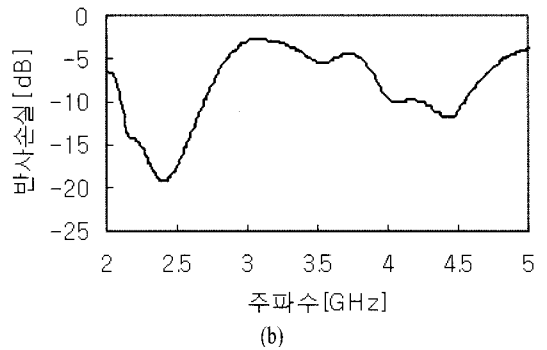
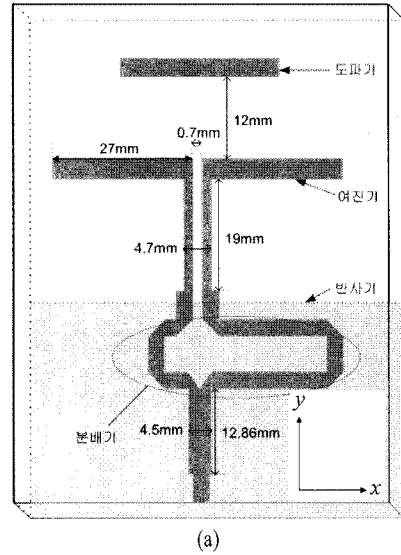


그림 2. (a) 설계된 안테나, (b) 시뮬레이션 반사 손실
Fig. 2. (a) Designed antenna, (b) simulated return loss.

는 하모닉 성분이 안테나를 통해 재방사되는 것을 저지할 필요가 있으며, 이러한 특성을 갖도록 하기 위해 안테나와 다이오드 사이에 저역 통과 필터를 두게 된다. 만약 안테나가 하모닉 성분에 대해 역압 특성이 있다면 저역 통과 필터가 필요 없거나 높은 차수의 저역 통과 필터가 필요치 않으므로 렉테나 설계를 용이하게 할 수 있다. 그러한 의미에서 본 논문에서 사용하는 평판 인쇄형 야기 안테나의 주파수 특성을 살펴보면 그림 2(b)에서 보듯이 2차 고조파 주파수인 4.9 GHz 근처에서 반사 손실이 약 4.6 dB로 일반적인 사각 패치 안테나에 비해 차단 특성을 갖게 되어 고효율의 렉테나 설계가 가능한 것을 볼 수 있다. 이러한 이유로 본 논문에서 렉테나용 안테나로 평판 인쇄형 야기 안테나를 사용하였다.

또한 낮은 전력 밀도에서 동작하는 렉테나를 설

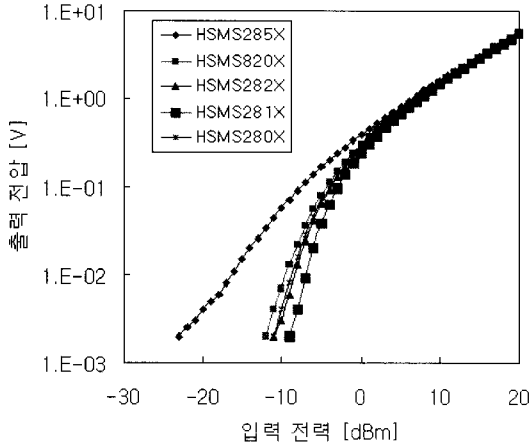


그림 3. Appcad를 사용한 출력 전압 시뮬레이션
Fig. 3. Simulated output voltages using Appcad.

계하기 위해서 기존의 렉테나 설계 방법과는 달리 다음과 같은 설계 방법을 따라 설계를 하였다.

첫째, 저전력에서 효율이 좋은 정류용 다이오드를 선택하였다. 이를 위해 본 논문에서는 Avago사의 Appcad 프로그램을 사용하여 단일 다이오드를 사용하는 정류기 모의 실험을 통해 출력 전압을 조사하였다. 다이오드는 일반적으로 렉테나에서 많이 사용하는 HSMS series를 조사하였고, 저전력에서 높은 출력 전압을 갖는 다이오드를 선정하는 방향으로 설계를 하였다. 그림 3에 그 결과를 나타내었고, 시뮬레이션을 통해 HSMS-285X series 다이오드가 다른 것에 비해 큰 출력 전압을 갖는 것을 확인하고, 배전압 구조를 위해 한 패키지에 다이오드 2개가 들어 있는 HSMS-2852 다이오드를 선택하였다. 이때 사용한 부하 저항으로는 부하 저항 변화에 따른 효율의 변화를 조사하여 효율이 가장 좋은 820 Ω을 사용하였다.

두 번째로 저전력에서 효율이 좋은 렉테나를 설계하기 위해서는 정합 회로 설계가 중요하다. 다이오드에 인가되는 전력에 따라 다이오드의 입력 임피던스가 변한다. 그림 1에서 입력 전력에 따라 A-A' 단에서 부하를 바라본 입력 임피던스의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 A점은 입력 전력이 -20 dBm일 때이며, B점은 +20 dBm일 때의 입력 임피던스를 나타내고 있다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 입력 임피던스는 입력 전력의 함수가 되므로 어떤 전력에 대해 임피던스 정합 회로를 설계할 것인가는 아주 중요하다. 이것은 개발하는 렉테나의 응용에 따라

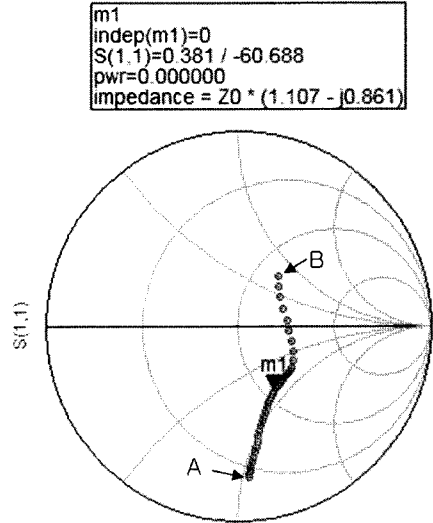


그림 4. 입력 전력에 따른 입력 임피던스 변화
Fig. 4. Input impedance as function of input power level.

수신되는 입력 전력의 값이 변하기 때문에 응용 목적에 따라 달라질 수 있다.

본 논문에서는 저전력에서 좋은 효율을 갖도록 하기 위해, 그림 4에서 0 dBm 입력 전력일 때의 다이오드의 임피던스에 대해 효율이 최대가 되도록 임피던스 정합 회로를 구현하였다.

구현된 정합 회로는 개방형 스텐브(open stub)를 사용하였으며, ADS 시뮬레이션 툴을 사용하여 설계를 하였다. 그림 5에 개방형 스텐브의 길이 변화에

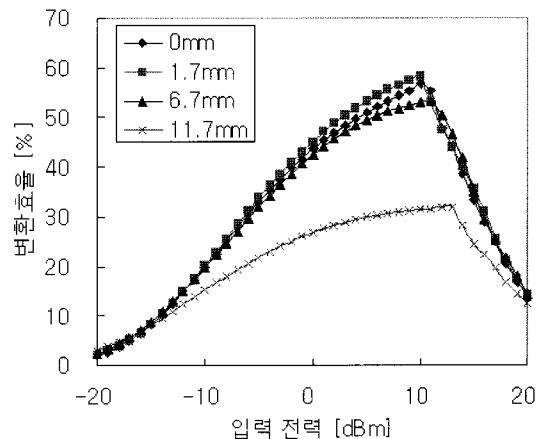


그림 5. 개방 스텐브 길이에 따른 변환 효율
Fig. 5. Conversion efficiency as function of length of open stub.

따른 변환 효율의 변화를 나타내었다. 스테르브의 길이 변화에 따라 변환 효율이 크게 변화하는 것을 볼 수 있으며, 본 논문에서는 1.7 mm로 스테르브의 길이를 결정하였다.

III. 측정 및 분석

그림 6에 설계를 바탕으로 제작한 렉테나의 모습을 나타내었다. 비유전율이 4.4이고, 높이가 1.6 mm인 FR4 기판을 사용하였고, 기판 전체 크기는 90×90 mm²이다. 그림 7에는 그림 6의 렉테나에 사용된 평면형 야기 안테나의 반사 손실과 방사 패턴을 나타내었다. 측정된 반사 손실과 방사 패턴은 시뮬레이션 결과 값과 매우 유사하였고, 안테나의 이득은 5.35 dB로 측정되었다.

그림 8에 제작된 렉테나의 효율을 측정하기 위한 실험 setup 장치를 나타내었다. 전파무향실에서 30 dBm의 2.45 GHz의 신호를 송신 안테나를 통해 렉테나에 송신하였다.

만약 수신 안테나로 2 mW/cm²의 전력 밀도가 입사되는 경우 5.35 dB의 수신 안테나를 통해 수신되는 전력은 약 80 mW로서 19 dBm이 된다. 본 논문에서는 전력 밀도가 2 mW/cm² 이하의 전력 밀도에서 동작하는 렉테나를 설계하는 것이므로 실험에서는 입력 전력 19 dBm 이하에서만 측정을 하였다.

렉테나에 입력되는 전력을 측정하기 위해 먼저 그림 2의 안테나를 렉테나 위치에 두고 송신 안테나

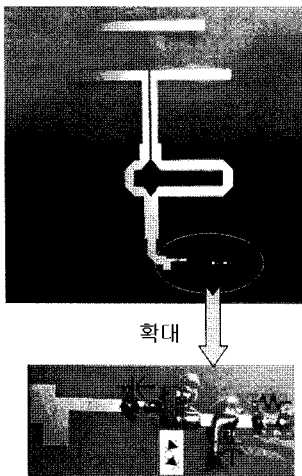


그림 6. 제작된 렉테나
Fig. 6. Fabricated rectenna.

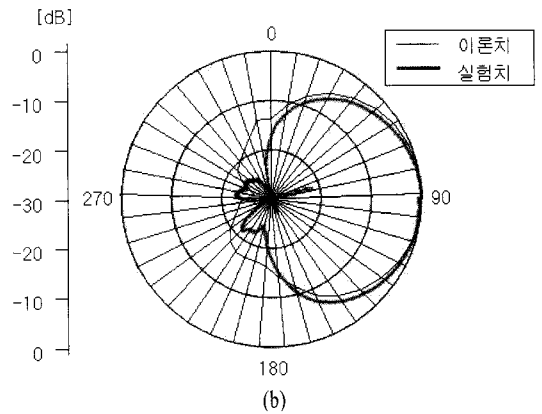
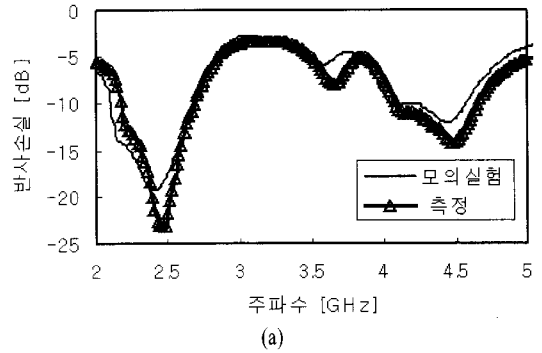


그림 7. 수신 안테나의 측정된 (a) 반사 손실, (b) E-면 방사 패턴.

Fig. 7. (a) Measured return loss and (b) E-plane radiation pattern of the antenna for the rectenna.

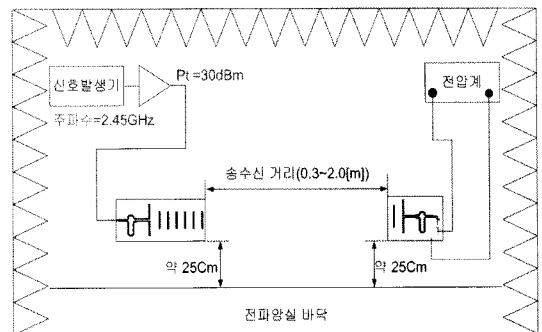


그림 8. 렉테나 특성 평가 구성도
Fig. 8. Measurement setup of the rectenna.

와 수신 안테나의 거리를 0.3~2 m로 변화시키면서 수신되는 전력을 측정하였다. 이를 바탕으로 수신 안테나 위치에 렉테나를 설치하고 부하 저항에 나타나는 전압을 측정하여 식 (1)을 사용하여 정류 회로의 변환 효율을 계산하였다.

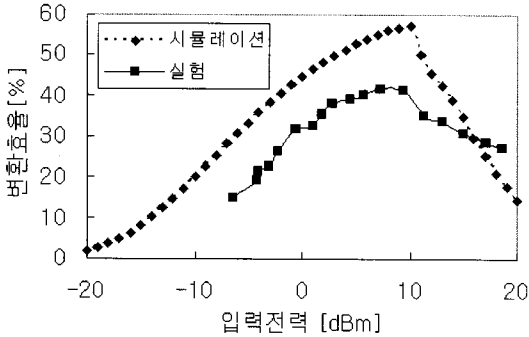


그림 9. 렉테나의 변환 효율 측정치 및 시뮬레이션값
Fig. 9. Measured and simulated conversion efficiency of the rectenna.

$$\text{변환효율} = \frac{\text{출력 DC 전력}}{\text{입력 RF 전력}} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

여기서 출력 DC 전력은 부하 저항의 전압과 전류의 곱을 나타낸다⁷⁾.

이러한 과정을 통해 측정한 변환 효율과 ADS 시뮬레이션을 통해 구한 변환 효율을 그림 9에 나타내었다. 0 dBm의 입력 전력에서 약 32 %의 변환 효율, 8 dBm의 입력 전력에서 최대 42 %의 변환 효율을 갖는 것으로 측정되었다.

그림 9에서 시뮬레이션치와 실험치의 크기가 다소 차이는 있지만 비슷한 경향을 가지고 있는 것을 볼 수 있다. 변환 효율의 크기가 이와 같은 차이가 발생한 것은 식 (1)의 ‘입력 RF 전력’의 값이 실험치에서 정확하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말하면, 식 (1)의 렉테나에 입력되는 RF 전력의 값으로, 정류기 부분이 없이 그림 2의 평판형 야기 안테나만을 사용하여 스펙트럼 분석기로 수신된 측정값을 사용하고 있는데, 이 값이 실제 렉테나에 입력되는 전력 값과 차이가 나는 것으로 사료된다.

왜냐하면 스펙트럼 분석기를 사용하여 측정할 때에는 안테나의 부하가 스펙트럼 분석기의 입력 임피던스인 50 Ω으로 되지만, 실제 렉테나의 경우 안테나의 부하는 50 Ω이 아니기 때문이다. 이로 인해 식 (1)의 ‘입력 RF 전력’이 부정확하여 변환 효율에 오차가 발생한 것으로 사료된다.

또한 본 논문에서 설계한 방법이 낮은 전력 밀도에서 동작하는 렉테나를 효과적으로 설계한 것인지에 대해 확인하기 위하여 참고문헌 [8]에 발표된 논문과 효율을 비교하여 그림 10에 나타내었다.

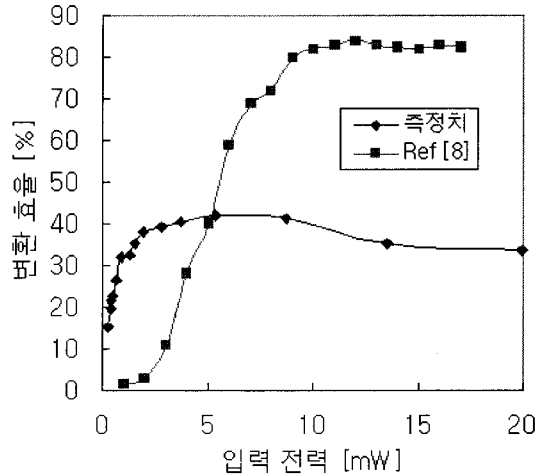


그림 10. 변환 효율 비교
Fig. 10. Comparison of conversion efficiencies.

그림 10에서 살펴보면 입력 전력이 5 mW 이하의 낮은 입력 전력에서 본 논문에서 제안하는 렉테나의 변환 효율 특성이 우수한 것을 볼 수 있다. 비록 5 mW 이상의 큰 입력 전력에 대해서는 본 논문에서 제시하는 렉테나의 변환 효율이 작지만, 실제 응용 관점에서 살펴보면 큰 전력의 경우 변환 효율이 나빠더라도 센서 등 구동에 필요한 전력을 얻는데 큰 어려움이 없으므로 문제가 되지 않는다.

IV. 결 론

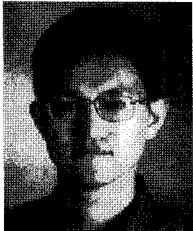
본 논문에서는 전력 밀도가 2 mW/cm² 이하의 낮은 전력 밀도에서 무선 전력 전송에 사용될 수 있는 렉테나를 제안하였다. 제안한 렉테나의 구조는 배압 구조의 정류회로와 인쇄형 야기 안테나 형태로 구성되어 있다. 제작된 렉테나의 안테나는 2.45 GHz 대역에서 약 5.35 dB의 이득을 가지며, 렉테나의 변환 효율은 입력 전력이 0~14 dBm 정도에서 30 % 이상의 변환 효율을 갖는 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 낮은 전력을 소비하는 소자의 대기 전원을 공급하는 응용에서 활용이 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, "무선에너지 전송기술", 전자통신동향분석, 23(6), pp. 59-69, 2008년 12월.

- [2] 박래만, 성희경, 전용일, 이유경, "유비쿼터스 에너지", 정보통신연구진흥원 주간기술동향, 1334호, pp. 27-36, 2008년 2월.
- [3] MIT, *Technology Review*, Mar./Apr. 2008.
- [4] Y. Ren, M. Farooqui, and K. Chang, "A compact dual-frequency rectifying antenna with high-orders harmonic-rejection", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 7, pp. 2110-2113, Jul. 2007.
- [5] J. U. M. Araiza, "Wireless transmission of power for sensors in context aware spaces", *Master of Science in Media Arts and Sciences at MIT*, Jun. 2002.
- [6] N. Kaneda, W. R. Deal, Y. Qian, R. Waterhouse, and T. Itoh, "A broad-band planar quasi-yagi antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 50, no. 8, pp. 1158-1160, Aug. 2002.
- [7] 윤동기, 박양하, 김관호, 이영철, "마이크로파 무선전력전송 시스템의 rectenna 변환 효율 분석에 관한 연구", 한국통신학회 학술대회논문집, 16(1), pp. 788-791, 1997년 1월.
- [8] 윤동기, "능동안테나를 이용한 microwave-DC 변환 효율 분석에 관한 연구", 경남대학교 대학원, 2000년.

박 동 국



1987년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1994년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1994년 8월~1996년 3월: LG전자

선임연구원

1996년 4월~현재: 한국해양대학교 전자통신공학과 교수
 2000년 1월~2001년 1월: 미국 UCLA 전기공학과 방문교수

[주 관심분야] 안테나, 이동통신 부품

조 익 현



2007년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2009년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월: 광양만권 u-IT연구소 연구원
 [주 관심분야] 안테나, RFID

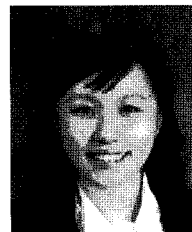
서 홍 은



2007년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2009년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2009년 3월: 한국항공우주산업주식회사 연구원
 [주 관심분야] 무선 전력 전송, 안테나

테나

김 예 지



2009년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 한국해양대학교 전자통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선 전력 전송, 안테나