



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

2.45GHz帶 低電力 렉테나 設計 및
製作에 관한 研究

Development of Rectenna for 2.45GHz
at Low-Input Power



指導教授 朴東國

2009年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科

徐 洪 殷

本 論 文 을 徐 洪 殷 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 金 基 文 (인)

위 원 孫 慶 洛 (인)

위 원 朴 東 國 (인)



2009년 2월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	
1장 서론	1
2장 이론적 배경	4
2.1 무선 전력 전송 방법	4
2.2 송·수전 시스템과 인체 보호기준	7
3장 렉테나 설계 및 제작	18
3.1 쿼지 야기 안테나 설계 및 제작	18
3.2 정류회로 설계 및 제작	23
4장 실험 및 결과	35
4.1 안테나 측정	35
4.2 정류회로 측정	37
4.3 렉테나 측정	42
5장 결론	48
참고문헌	50

ABSTRACT

The rectenna of 2.45GHz for low-input power is designed and implemented by voltage doubler structure and quasi yagi antenna. The rectenna uses schottky diode HSMS-2852 which is manufactured by Avagotechnology. It is difficult to match the impedance of antenna and that of rectifier to obtain maximum efficiency of conversion at low input power. Quasi yagi antenna is employed to get high gain and printed antenna, whose radiation pattern is endfire pattern. The simulation is conducted with ADS and HFSS and Designer. The conversion efficiency of the rectifier of the rectenna is about 32% when incident power received by the antenna of rectenna is 0dBm. The antenna of rectenna suppress the second order harmonic of fundamental frequency, whose gain is measured with 5.35dBi. The returnloss and operative bandwidth of antenna are respectively about 22dB and 510MHz.

제 1 장 서 론

최근 세계적으로 석유수출기구(OPEC; Organization of Petroleum Exporting Countries) 등의 단체에서 연료의 무기화로 인하여 화석 연료의 가격 폭등으로 범국가적인 에너지 절약을 위한 정책이 실시되고 있다. 그러나 여름철에는 사용최대전력이 꾸준히 증가하고 있으며, 2008년 8월 현재 우리나라의 에너지원별 전기를 발전하는 설비용량은 수력이 7.8%, 화력이 66.3%, 원자력이 25.2%, 대체에너지가 0.7%로 화력발전의 의존도가 매우 높다[1].

화석연료의 연소시 황산화물, 이산화탄소 등을 배출하여 지구온난화와 대기오염 등을 일으키는 문제점을 지적할 수 있다. 그리고 세계적으로 건강에 대한 관심이 증대되면서 국가적인 차원에서의 청정에너지개발에 총력을 기울이고 있다[2].

현재 대체청정에너지를 얻을 수 있는 방안으로 대두되고 있는 것은 우주태양광 발전과 핵융합발전이다. 핵융합발전은 가상의 태양을 만들어 전기를 생산하는 것으로 기초적인 연구가 마무리되었지만 상용화까지 50년 정도의 기간이 걸릴 것으로 예상되고 있다. 한편, 우주태양광 발전은 지구의 일기에 영향을 받지 않기 때문에 연중 내내 태양광발전이 가능하다.

특히 우주태양광발전의 기초적인 연구는 이미 오래전부터 실행되어왔으며 상용화가 가능하게 되었다. 그 역사는 1887년으로 거슬러 올라가서 독일의 물리학자 헤르츠(Heinrich Hertz)로부터 시작되었

다고 할 수 있다. Hertz는 높은 주파수 전력과 그것을 정류하는 수신기 종단과의 불꽃 틈새(Spark-gap)에 의해 대기환경에서 전자파가 전달되는 것을 증명하였다. 19세기말 Nicola Tesla의 방전유도실험이 시도된 후, 1959년 William C. Brown 는 무인헬기용 구동전원으로 마이크로파를 이용한 송전방식을 제안하였고 이에 대한 실험을 통해 무선으로 전력을 송전 및 수전하는 시스템에 대한 기본 개념이 확립되었다[3]~[4].

1968년 Peter Glaser에 의해 미래의 대체에너지를 확보하기 위한 수단으로 제안된 우주 태양광발전 시스템은 우주공간에 설치된 태양전지판에 의해 생성되는 DC전압을 지구로 송전하기 위해 RF전력으로 변환하고, 지구에서는 수전된 RF전력을 DC전압으로 변환하여 이용하는 것이다. 또한 1973년 미국국립 항공우주국(NASA; National Aeronautics and Space Administration)의 제트 추진 연구소(JPL; Jet Propulsion Laboratory)에서 30kW의 무선 전력전송의 가능성을 보였고, 그 이후로 각 국에서 기술의 실현을 위해 연구 개발이 꾸준히 진행되고 있다. 이를 위해서는 정류형 안테나라고 하는 렉테나가 필수적이라 할 수 있다. 또한 송전안테나와 수전안테나 사이에서 발생할 수 있는 편파의 오조준을 방지할 수 있도록 원-편파를 사용한 경우가 있었으며, 이를 위해서는 사각의 귀퉁이가 잘린 패치 안테나(Patch antenna) 및 링 슬롯 안테나(Ring slot antenna) 등을 사용한 논문 등이 발표되었다[5]~[6]. 그리고 높은 전력밀도에서 RF 전력이 DC 전력으로 변환되는 비율이 80%이상인 고효율 렉테나에 대한 논문도 발표되었다[7]~[8].

세계는 이미 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대로서 언제 어디서나 무선으로 엠펙쓰리(MP3; Moving Picture Experts Group-1 Audio Layer 3) 재생기(player)와 같은 여러 휴대용 기기의 사용이 증대되고 있지만 이러한 기기의 휴대성을 방해하는 것이 배터리(battery)의 용량이라 할 수 있겠다. 또한 배터리를 충전하는 방식에서도 도체 부분이 돌출되어 있어 감전의 위험이 있고 유선으로 연결해야 하는 불편함이 있다. 이를 해결하기 위해서 무선으로 전력을 송전하는 방식에 관한 연구가 필요하다. 여러 연구를 통해 높은 전력밀도내에서 비교적 높은 변환효율을 가지는 렉테나가 연구되어 왔으나, 높은 전력밀도를 가지는 환경을 위해서는 높은 전력의 방사가 필요하다. 그러나 높은 전력을 무분별하게 방사할 경우 다른 기기의 장애 및 인체에도 해로운 영향을 끼칠 수 있어 국가별로 기술기준을 정하여 제한하고 있다. 낮은 전력에서는 고효율을 얻기 힘들기 때문에 이전의 연구들이 주로 높은 전력밀도의 환경에서 이루어졌다. 따라서 낮은 전력밀도에서 높은 효율을 가지는 렉테나의 연구가 필요하다. 그래서 본 논문에서는 낮은 켜짐전압(Turn-on)을 갖는 쇼트키 다이오드를 이용하여 0dBm에서 부하저항이 32%의 변환 효율을 갖는 렉테나를 설계하였다.

제 2장에서는 무선전력전송의 종류와 송수전하는 거리에 따른 공기중 손실 및 국내외의 기술기준에 대해서 설명하였다. 제 3장에서는 렉테나를 설계하고 제작한 내용을 나타내었다. 그리고 제 4장에서는 설계된 렉테나의 실험 결과를 제시하였으며, 마지막 5장에서 결론을 기술하였다.

제 2장 이론적 배경

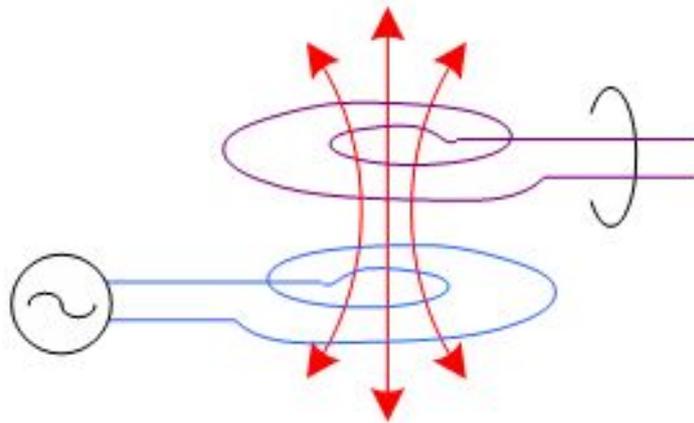
2.1 무선 전력 전송 방법

무선전력 전송은 응용가능거리 및 다이오드의 사용 유무, 전력 공급량 등을 바탕으로 유도전류에 의한 전력전송, 공명에 의한 전력전송, 라디오파 수신에 의한 전력전송으로 나누어 볼 수 있다. 3가지 전송방법에 대한 장·단점을 살펴보면 각각 다음과 같다.

가. 유도 전류에 의한 전력전송



<그림 2.1>은 유도전류에 의한 전력전송을 나타낸 그림이다. 두 개의 코일을 서로 인접시킨 후 한 개의 코일에 전류를 흘려보내면 이 때 발생한 자속이 다른 코일에 기전력을 일으키는 방식으로, 이 기술은 무선인식 (RFID; Radio Frequency Identification) 카드, 습식 면도기, 충전식 전동 칫솔 등 많은 분야에서 상용화되어 사용되고 있다[9]. 최대출력은 수 kW 까지 가능하나 전송범위가 1 cm 이내로 매우 짧아서 특정 위치에서 급속 충전이 가능한 분야에 응용될 수 있다.



<그림 2.1> 유도방식의 무선전력전송

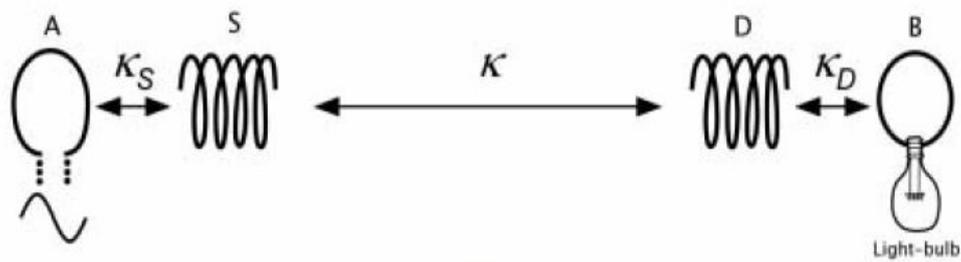
나. 공명에 의한 전력전송

<그림 2.2>는 공명에 의한 전력전송을 나타낸 것이다. 여기서 K는 화살표 사이의 직접결합(Direct coupling)을 의미한다. 그리고 A와 B와 S, D는 코일을 의미한다. 하지만 유도전류에 의한 무선 전력 전송 방식과 대조적으로 A와 S는 직접결합이 일어나지만 A와 D, A와 B는 직접적으로 결합이 일어나지 않음을 나타내었다[10].

공명에 의한 전력전송은 전자기파나 전류를 활용하는 대신 전기장이나 자기장을 이용하여 공진이 되도록 하여 전력을 전달하는 기술로서, 마치 여러 개의 유리잔에 각각 다른 높이로 물을 채워 놓고 일정한 주파수의 음파를 인가하면 인가하는 주파수와 공진이 되는 특정한 유리잔만 진동을 하는 현상을 이용한 것이다.

미국 MIT 물리학과와 마린 솔자식(Marin Soljagic) 교수가 지도

하는 연구팀이 2006년 11월에 이 기술을 전원공급 기술로 사용할 수 있는 가능성을 발표했으며, 무선전기라는 이름을 붙였다. 출력전력은 수 W ~ 수 kW 정도이고 전송 범위는 수 m의 고정 범위 내에서 이동하는 장치(Device)에 대한 직접 전원공급으로 적합하다.



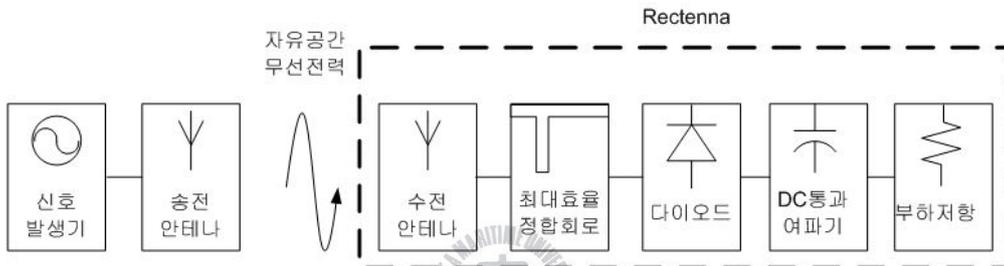
<그림 2.2> 공명방식의 무선전력전송

다. 고주파를 이용한 전력전송

라디오파 형태로 직접 전력을 송수신하는 기술이다. 이 기술은 <그림 2.3>과 같이 라디오파를 DC로 변환하는 정류과정을 위해 다이오드가 필요하며, 최근 변환 효율이 향상되면서 이 기술의 상용화가 가능할 것이다. 그리고 전송 범위는 수 cm ~ 아주 먼 거리까지 가능하며, 출력전력이 수 mW ~ 수백 mW 정도의 낮은 전력이므로 긴 대기시간 및 실내에서 지속적인 충전이 요구되는 단말기

등에 적합하다.

또한 라디오파 수전 방식을 이용한 예는 인공위성에서 태양 에너지를 저장하여 지상으로 전력을 송신하는 데도 쓰이는 것이다. 대기에서 다른 전파보다 전력 송신 효율이 높은 2.45GHz 대역을 사용하여 무선전력전송이 이루어진다.



<그림 2.3> 라디오파 수신방식의 무선전력전송

2.2 송·수전 시스템과 인체 보호기준

공업·과학·의료용 설비(ISM; Industrial Scientific and Medical Equipment)의 주파수는 소출력 무선기기에 사용되기 때문에 무선국 개설 허가가 필요없는 비허가 설비는 일정한 출력의 규제만 지키면 자유롭게 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문에 꾸준히 연구 개발이 이루어지고 있다.

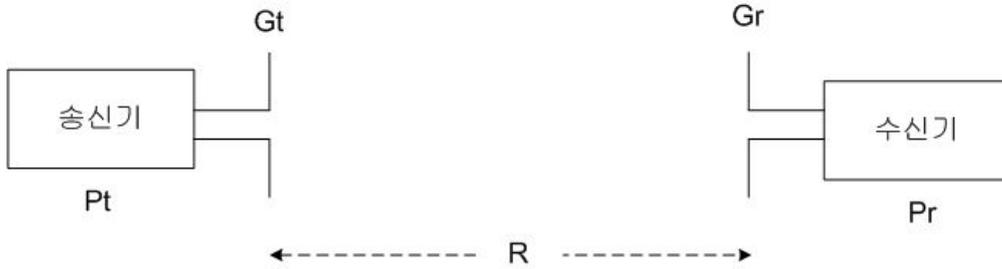
가. 송수전 시스템

안테나 설계에 있어서 통신 링크의 거리에 따른 대기 중 손실 및 수신단의 전력량을 아는 것이 매우 중요하다. 통신링크에 대해 간단히 나타낸 <그림 2.4>에 따른 전력 밀도나 수전전력을 예측하는 방법에 대해 살펴보면 P_t , P_r 은 각각 송전전력과 수전전력을 의미하며, G_t , G_r 은 각각 송신안테나의 이득과 수신 안테나의 이득을 의미한다. 여기에서 P_t 가 거리에 따라서 보존된다고 생각하고 지향성이 1이라고 생각하면 P_t 가 구(球) 표면적에 의해서 나누어지므로 전력밀도는 식(2.1)로 표현할 수 있다[11].

여기서 만약 송신안테나의 지향성을 가지는 안테나일 경우 송신되는 전력은 유효등방성복사전력 (EIRP; Effective Isotropic Radiation Power)이 달라지므로, 일반적으로 전력밀도는 식(2.2)로 표현할 수 있다.

$$S = \frac{P_t}{4\pi R^2} \text{ Wm}^2 \quad (2.1)$$

$$S = \frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \text{ Wm}^2 \quad (2.2)$$



<그림 2.4> 통신링크 블록도

전력밀도를 바탕으로 수신 전력을 얻기 위해서는 유효 개구 면적을 곱하여 주어야 한다. 이러한 개구 면적은 이득이 1인 등방성 수전 안테나가 있다고 생각하면 유효개구면적은 식(2.3)으로 표현할 수 있다.

여기서 만약 수전안테나의 지향성을 가지는 안테나일 경우 수전되는 전력은 이득에 영향을 받은 만큼 증가하므로 유효개구면적은 식(2.4)로 표현할 수 있다. 즉 주파수가 다른 경우 유효개구면적은 달라진다. 따라서 주파수가 높아지는 경우 주파수⁻²의 비율로 유효개구면적은 줄어든다는 것을 알 수 있다.

$$A_{er} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \quad (2.3)$$

$$A_{er} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (2.4)$$

렉테나 안테나에서 수신되는 수신 전력 P_r 는 식(2.2)와 식(2.4)에 의해 식(2.5)로 표현이 가능하다. 즉 송수전 안테나의 이득과 거리와 송신전력을 알고 있다면 수신되는 전력을 계산이 가능하다.

$$P_r = A_{er} S = \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \times \left(\frac{G_t P_t}{4\pi R^2} \right) = \frac{G_r G_t P_t \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2.5)$$



나. 국내 최대 가용 방사전력

국제전기통신연합(ITU; International Telecommunication Union)에서 지정한 ISM 대역중에서의 무선 전력 전송 주파수로 주로 사용하는 2.45GHz 대역과 5.8GHz 대역에서의 국내 가용 방사전력량과 용도를 <표 2.1>에 나타내었다[12]~[13].

<표 2.1> 국내 ISM 대역 내에서의 무선기술기준

2.45GHz			5.8GHz		
할당 주파수	용도	공중선 전력	할당 주파수	용도	공중선 전력
2.400 ~2.4835	무선데이터 통신시스템용 특정소출력 무선기기	10mW 이하 또는 10mW/MHz 이하	5.725 ~5.825	무선데이터 통신시스템용 특정소출력 무선기기	10mW 이하 또는 10mW/MHz 이하
2.427 ~2.453 2.434 ~2.465 2.439 ~2.470	이동체 식별 용 특정소출 력 무선기기	300mW 이 하			
2.410 2.430 2.450 2.470	영상전송용 특정소출력 무선기기	10mW이하			

무선 데이터 통신 시스템용 특정 소출력 무선기기는 주파수 호핑 방식이나 스펙트럼 확산 방식을 이용하게 된다. 따라서 공중선 전력은 주파수 대역별 전력 밀도로 표시된다는 것을 알 수 있다. 그리고 같은 대역을 여러 용도로 사용 중임을 알 수 있으며, ITU에서 규정한 전력에 비해서 비교적 작은 송신전력이 허용되고 있다. 그러므로 높은 전력밀도나 높은 수전 전력을 가질 때의 높은 효율을 가지는 록테나를 현재의 전파환경에서 사용하는 것이 어렵다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 높은 수전전력을 가질 때에 알맞게 설

계된 렉테나의 연구와 더불어 낮은 수전전력에서의 렉테나 연구가 필요하다는 것을 알 수 있다.

다. 국외 최대 가용 방사전력

<표 2.1>을 통해 살펴본 국내의 방사전력 기술기준과 비교하기 위해 미국의 기술 기준을 <표 2.2>로 나타내었다[14]~[16]. 국내의 기술기준과 비교하였을 때 미국의 공중선 전력이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 미국에서는 우리나라의 ISM 대역 주파수 규제 방식과 달리, 일부 비허가 무선설비에 대하여 주파수 대역별로 그 용도를 지정하고 있으나, 용도 개방형 주파수 대역을 따로 설정하여 허가 무선국에 간섭을 일으키지 않고, 주파수 대역별로 일정 조건을 만족한다면 용도 개방형 주파수 대역에서 허가없이 개설할 수 있다는 것이 우리나라와는 다른 특이한 사항이라 할 수 있다. 그리고 <표 2.3>, <표 2.4>는 각각 유럽 및 일본 기술기준을 나타내고 있다[14],[17]~[18].

국내의 2.45GHz 대역에서의 방사전력을 고려할 때 올바른 용도를 사용하는 경우, 국내에서는 300mW 정도의 전력송전이 가능하고 미국에서는 1W 정도의 전력을 송전이 가능하다. 그리고 미국에서는 1W에서 채택할 수 있는 안테나의 최대 이득은 6dBi(4배)이다. 또한 유럽에서는 4W의 유효등방성방사전력의 방사가 최대로 가능한 것을 알 수 있다. 즉, 미국에서의 최대 허용 방사전력과 유럽의 최대 허용 방사전력은 동일하다.

<표 2.2> 미국 ISM 대역에서의 기술 기준

2.45GHz				5.8GHz				
할당 주파수 (GHz)	용도	공중선 전력	전계강도 표준치	할당 주파수 (GHz)	용도	공중선 전력	EIRP	전계강도 표준치
2.4 ~ 2.435	SS transmitter	1W 미만		5.725 ~ 5.875	아마추어 서비스, ISM 서비스, 기타 Part15 기기	1W 미만	4W	
	Any		50,000uV/m@3m					
2.4535 ~ 2.465	SS transmitter	1W 미만		5.815 ~ 5.85	SS transmitter	1W 미만		
	Field Disturbance Sensors		500,000 uV/m@3m					
	Any		50,000uV/m@3m				Any	50,000 uV/m@3m
2.465 ~ 2.4835	SS transmitter	1W 미만		5.85 ~ 5.875	Any			50,000 uV/m@3m
	Any		50,000uV/m@3m					
2.4835 ~ 2.5	Spurious Emissions only		500uV/m@3m					

<표 2.3> 유럽의 ISM 대역에서의 기술 기준

2.45GHz			5.8GHz		
할당 주파수	용도	EIRP	할당 주파수	용도	EIRP
2.4 ~ 2.4875	미지정	10 mW	5.150 ~ 5.350	Hiper LAN	200mW mean
2.4 ~ 2.4835	무선 LAN	100mW	5.470 ~ 5.725		1W mean
2.257	눈사태 조난 감지 SRD	42dBuA/m @10m	5.795 ~ 5.805	RTTT	2W 8W
2.446 ~ 2.454	철도 응용 SRD	500mW			
2.400 ~ 2.4835	이동검출 SRD	25mW	5.805 -		2W 8W
2.446 ~ 2.454	RFID	500mW 4W	5.815		

<표 2.4> 일본의 ISM 대역에서의 기술 기준

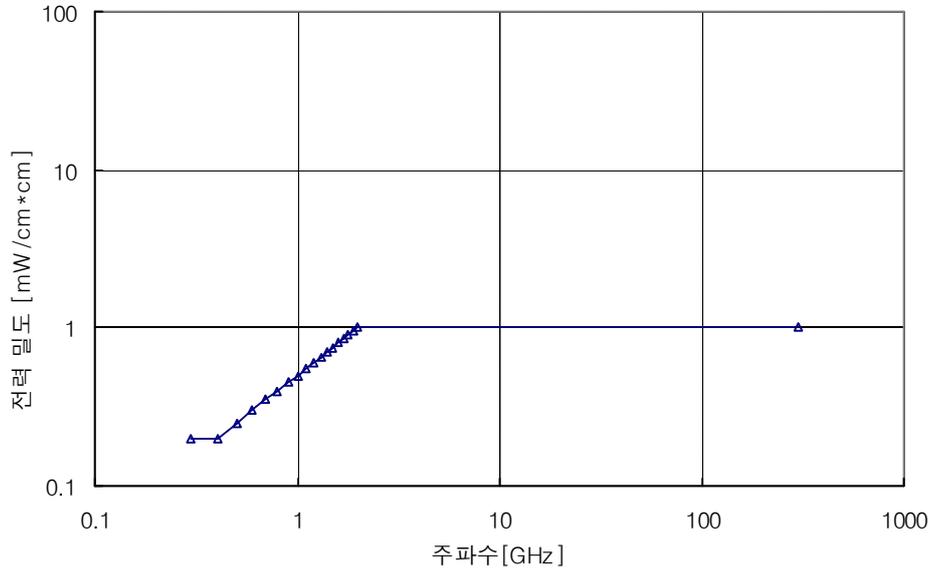
2.45GHz			5.8GHz
할당 주파수	용도	공중선전력	
2.000 ~ 2.4835	소출력 데이터 통신 시스템 무선국	(DSSS:3mW/MHz) (FHSS,DSSS+ FHSS: 10mW/MHz)	이용이 원활히 이루어 지지 않고 광대역 무선기기가 허용되지 않음
2.471 ~ 2.497		10mW/MHz 이하	
2.427 ~ 2.4353 2.43425 ~ 2.46575 2.4395 ~ 2.47075	이동체 식별 장치 무선국	10mW이하	

라. 인체안전성

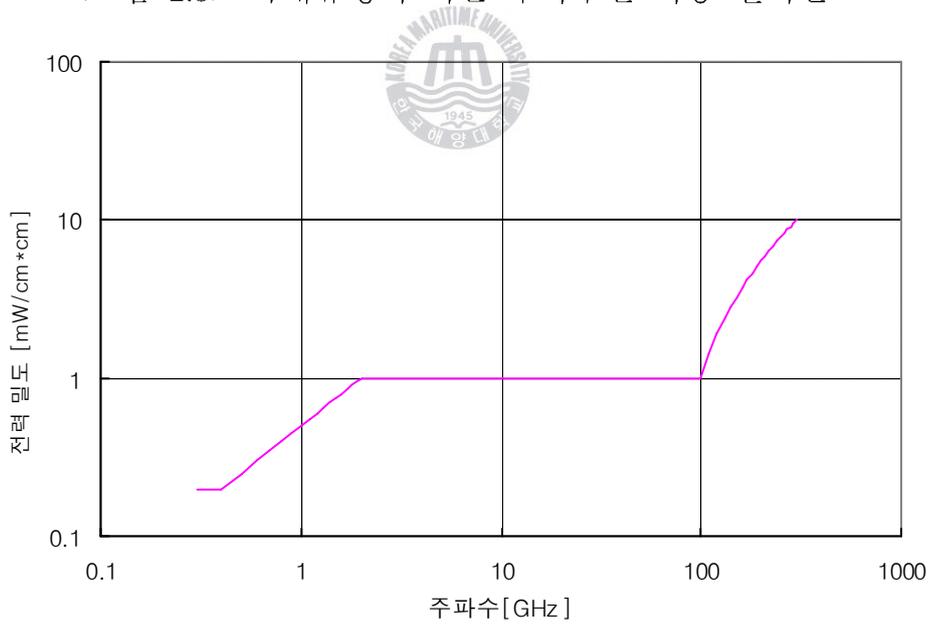
무선 전력전송을 이용하여 높은 DC전력을 얻기 위해서는 큰 전력 밀도의 전자기파가 수전 안테나로 입사되어야 한다. 이런 경우 가장 큰 문제는 무선으로 전송되는 큰 전력 밀도를 갖는 전자기파에 사람이 노출된다는 것이다.

우리나라 방송통신위원회의 고시(제 2008-37호;전자파 인체 보호 기준)와 미국연방통신위원회(FCC; Federal Communication Commission) 규정 및 미국표준협회/미국전기전자학회(ANSI/IEEE) 규정을 따라 <그림 2.5>, <그림 2.6>, <그림 2.7>으로 안전기준을 각각 나타내었다[19]~[21]

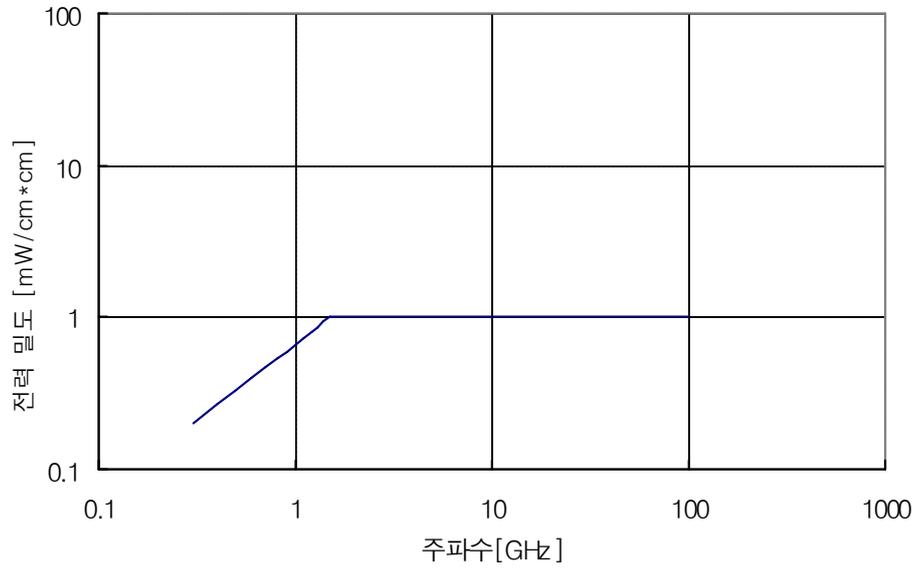
그림에서 보면 모든 규정에서 300MHz 주파수의 아래 쪽 범위에서 전력밀도는 $0.2\text{mw}/\text{cm}^2$ 이지만, 대체로 주파수가 올라감에 따라 증가한다. 이는 주파수가 높아지면 전력의 흡수의 대부분이 피부 표면에서 생기기 때문에 낮은 주파수에서보다 피해를 줄일 수 있기 때문이다. RF 및 마이크로파 노출 제한 기준은 각 나라마다 조금씩 다르지만, 대부분 비슷한 정도의 안전 기준에 대한 레벨을 가지고 있다. 그러므로 무선전력 전송 시스템의 전력밀도는 인체에 영향을 미치지 않는 범위에서 동작하도록 구성되어야 한다.



<그림 2.5> 국내규정의 따른 주파수별 허용 전력밀도



<그림 2.6> IEEE/ANSI규정에 따른 주파수별 허용 전력밀도



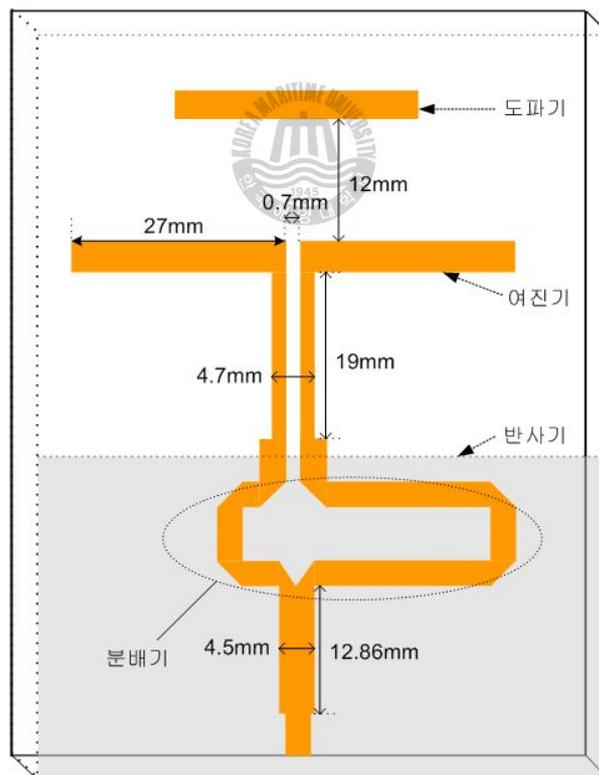
<그림 2.7> FCC규정에 따른 주파수별 허용 전력밀도



제 3장 렉테나 설계

3.1 쿼지 야기(Quasi yagi) 안테나 설계 및 제작

렉테나의 수전안테나는 쿼지 야기 안테나를 이용하여 설계하였다. 쿼지 야기 안테나의 개괄적인 모습을 <그림3.1>에 나타내었다 [22].



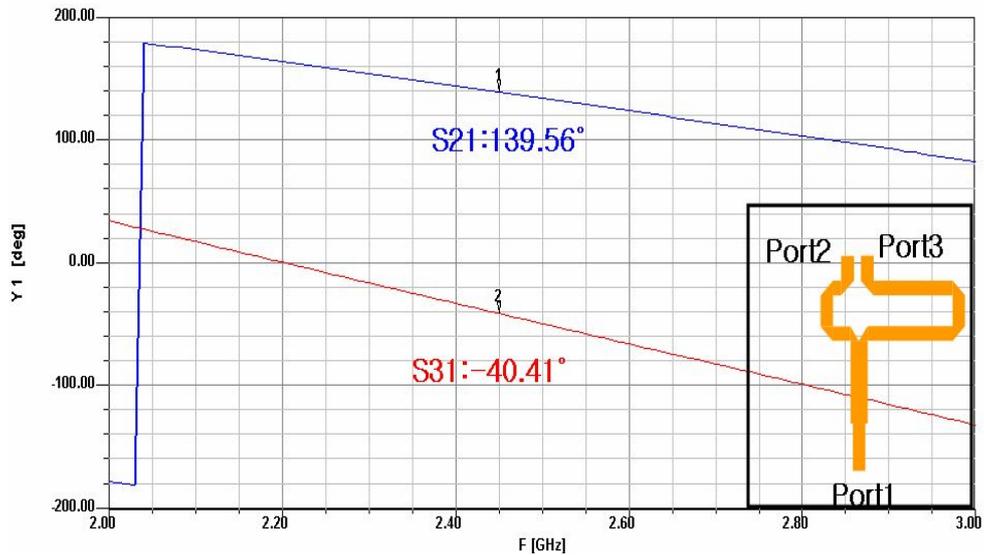
<그림 3.1> 수전안테나의 형태

가. 쿼지 야기 안테나 특징

쿼지 야기 안테나 는 인쇄형으로 만들어진 야기 안테나라 할 수 있다. 따라서 제작이 쉽고, 대량 생산이 가능하며, 제작가격이 저렴하다. 그리고 비유전율이 큰 기판을 사용할 경우 협대역이 될 수 있으나, 크기가 작아지는 장점이 있다. 도파기의 개수를 증가시키면 고이득 안테나 제작이 가능하다는 야기 안테나의 특징을 이용할 수 있으며, 분배기를 사용하여 마이크로 스트립 구조에서 CPS(Coplanar Strip) 구조로 변경된다. 또한 분배기의 접지(GND; Ground) 부분은 반사기로 작용하며 다이폴 부분 앞쪽에 있는 띄어진 라인은 도파기로 작용한다. 반사기는 여진기에서 약 $\lambda/4$ 정도 떨어진 지점에 놓이며 이득의 증가효과를 가진다. 따라서 일반적인 패치 안테나와는 달리 주빔의 최대값이 방사되는 방향이 안테나를 포함하는 평면위에 존재하는 엔드파이어(Endfire)형 안테나가 된다.

나. 쿼지 야기 안테나 설계 및 제작

쿼지 야기 안테나는 여진기의 양단에 급전이 이루어지기 위해서는 위상차가 180° 를 이루어야 한다. 이러한 위상변이를 만들기 위해서 월킬슨 분배기에 의해서 분배된 이후에 선로의 길이를 적절히 조절하여 S_{21} 은 139.56° 일 때, S_{31} 은 -40.41° 이란 결과를 통해 180° 의 위상차를 갖도록 설계되었음을 <그림 3.2>를 통해 확인할 수 있다.

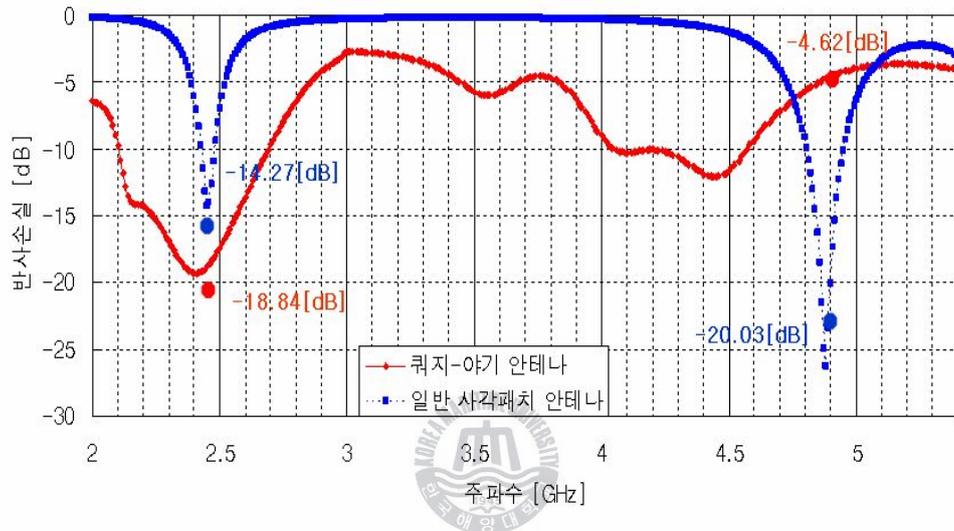


<그림 3.2> 분배기 설계와 위상 변이기 설계



<그림 3.3>는 설계되어진 안테나의 반사손실을 나타낸 그림이다. 일반 사각 패치 안테나는 Ansoft사의 Designer라는 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 $28.5 \times 28.5\text{mm}^2$ 의 크기로 정사각형 형태로 설계되었다. 쿼지 야기 안테나와 사각 패치 안테나는 2.45GHz에서 각각 18.84dB, 14.27dB의 반사손실을 가졌으며, 2체배 주파수인 4.9GHz에서는 각각 4.62dB, 20.03dB의 반사손실을 가진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 두 안테나 모두 2.45GHz 대역에서는 안테나로서 동작한다고 할 수 있다. 그러나 사각패치 안테나는 2체배 주파수에서도 안테나로서 동작한다고 할 수 있지만 수전안테나로 사용할 쿼지 야기 안테나의 경우 2체배 주파수에서는 안테나로 동작한

다고 보기 어렵다. 이러한 특성은 다이오드에서 정류시에 발생하는 2차배 고조파를 억압시킬 수 있다.

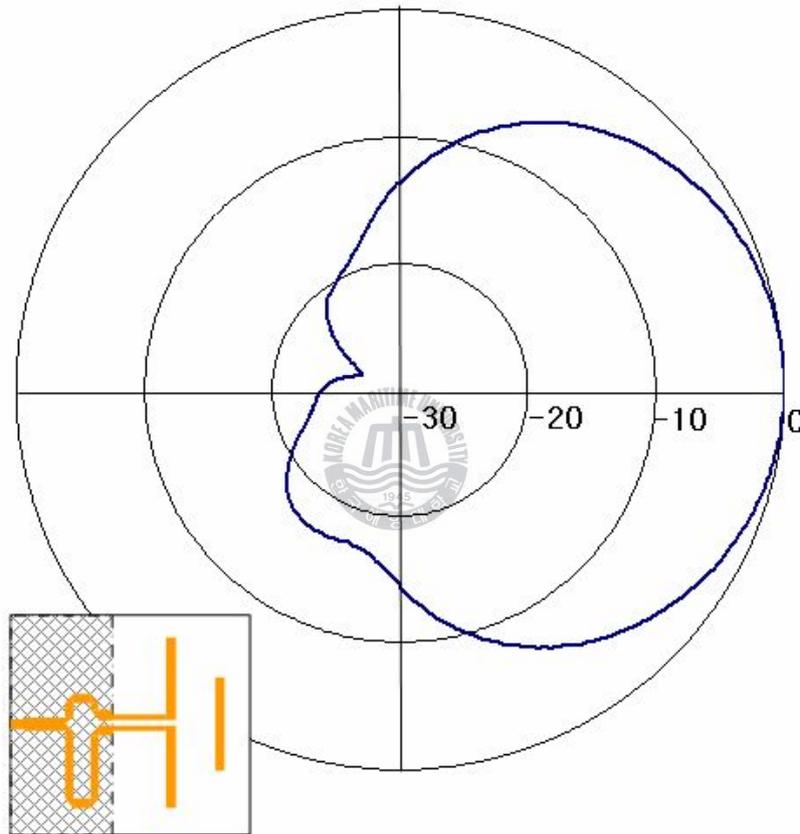


<그림 3.3> 안테나의 반사손실

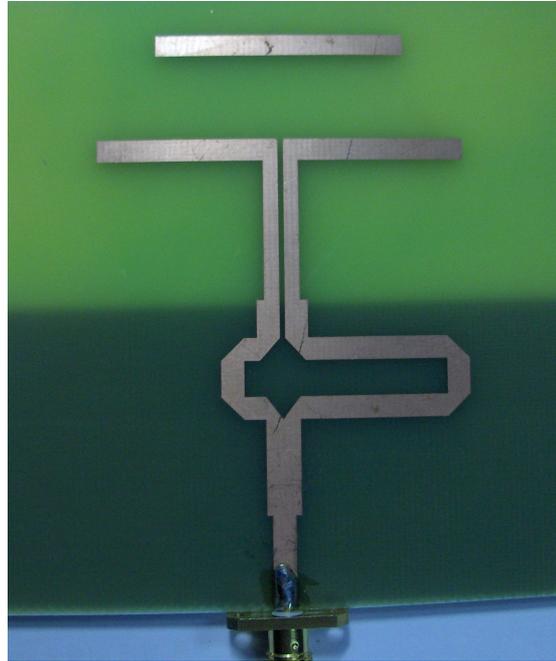
<그림 3.4>에서는 쿼지 야기 안테나의 방사패턴을 나타내었다. 안테나가 그림속의 모양처럼 놓여 있을 때 각도를 돌렸을 때의 모습이다. 이는 E평면에서의 안테나 방사 패턴으로 도파기방향으로 방사되고 있는 모습을 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 이득은 5.09dBi 이었다.

<그림 3.5>는 제작된 수전안테나의 모습이다. 그림에서 진하게 보이는 부분이 접지면으로 분배기의 GND역할과 야기안테나의 반

사기 역할을 한다. 수신안테나는 높이가 1.6mm이고 비유전율이 4.4인 FR4기판을 이용하여 설계되었다



<그림 3.4> 안테나의 시뮬레이션된 방사패턴



<그림 3.5> 제작된 안테나의 모습



3.2 정류회로 설계 및 제작

가. 다이오드 선택

쇼트키 다이오드를 선택하는 것은 정류회로 구성의 첫 번째 단계이자 매우 중요한 단계라 할 수 있다. 많은 연구를 통해 사용된 다이오드 중 낮은 전력에서 잘 동작할 수 있는 다이오드를 선택하기 위하여 Agilent사의 Appcad를 이용하여 출력전력에 대해 출력 DC 전압을 산출할 수 있도록 Spice parameter를 확인하였으며

Mathcad에서도 식 (3.1)을 바탕으로 하여 Bessel 함수의 역함수를 이용하여 입력전력에 대해 출력 전압을 산출하도록 수식을 작성하였다.

$$I_0\left(\frac{\Delta}{n}\sqrt{8R_g P_{inc}}\right) = \left(1 + \frac{I_0}{I_s} + \frac{V_0}{R_L I_s}\right) \exp\left\{\left[1 + \frac{R_g + R_s}{R_L}\right] \frac{\Delta}{n} V_0 + \frac{\Delta}{n} R_s I_0\right\} \quad (3.1)$$

여기서, I_0 : 베셀 함수의 제로차 함수, V_0 : 출력전압, I_s : 다이오드 포화전류, R_L : 부하저항의 크기, R_s : 다이오드 직렬 저항, R_g : 전원저항, P_{inc} : RF 입력 전력, n : 다이오드의 이상요소[23].



쇼트키 다이오드의 Spice Parameter의 값은 <표 3.1>에 나타내었다. 여기서 R_s 는 쇼트키 다이오드의 직렬 저항을 나타내고 E_g 는 접합양단의 에너지 차이를 나타내며 B_v 는 파괴전압을 나타내고 있다. B_v 는 다이오드의 사용가능 출력전압뿐 아니라 최대 효율이 나타날 입력전력과 관련이 깊다.

그러므로 수전전력이 높은 경우에는 파괴전압이 큰 것을 선택해야 한다. <그림 3.6>은 아바코 사의 Appcad라는 프로그램을 이용하여 단일 전력 정류기 구조에서의 820Ω의 부하저항을 가질 때 HSMS-820X에서의 입력전력에 대한 출력전압을 갖게 되도록 Spice Parameter를 삽입하였을 때의 모습이다. 이러한 과정을 통해서 Avago사의 쇼트키 다이오드를 모두 모의실험한 결과를 <그림

3.7>에 나타내었다.

Appcad와 수식을 활용한 모의실험은 임피던스 매칭에 관한 요소와 주파수에 영향은 배제하고 전원의 내부 임피던스가 50Ω인 동일한 상황에서 여러 종류의 다이오드를 정의하여 모의실험을 실시하였다. Appcad와 수식을 활용한 두 가지의 방식을 통해 획득된 입력 전력에 대한 출력전압은 대체로 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 다이오드는 HSMS-285X를 선택하게 되었다.

<표 3.1> 쇼트키 다이오드의 Spice Parameter

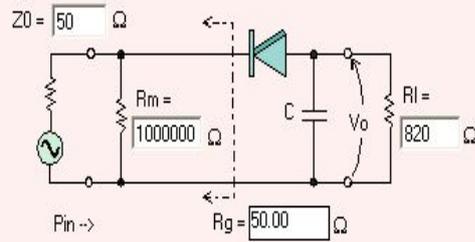
	HSMS 280X	HSMS 281X	HSMS 282X	HSMS 285X	HSMS 820X
R_s	30Ω	10Ω	6Ω	25Ω	7Ω
E_g	0.69eV	0.69eV	0.69eV	0.69eV	0.69eV
I_{s0}	30nA	4.8nA	22nA	3000nA	54nA
n	1.08	1.08	1.08	1.06	1.08
B_v	75V	25V	15V	3.8V	4V

Large Signal Detector

1. Enter diode parameters and circuit values :

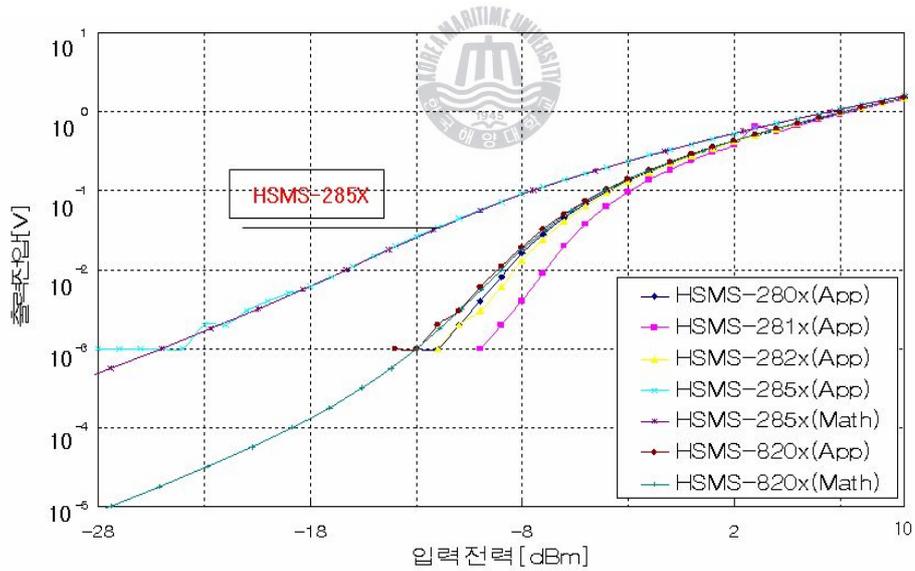
Diode Parameters:

T = 25 °C	R _s = 7 Ω
I _o = 0 μA	EG = 0.69 eV
I _{so} = 0.054 μA	n = 1.12



2. Enter Pin range: Pin Start = -30 Pin Stop = 20 Pin Step = 1 dBm

<그림 3.6> Appcad를 이용한 모의실험



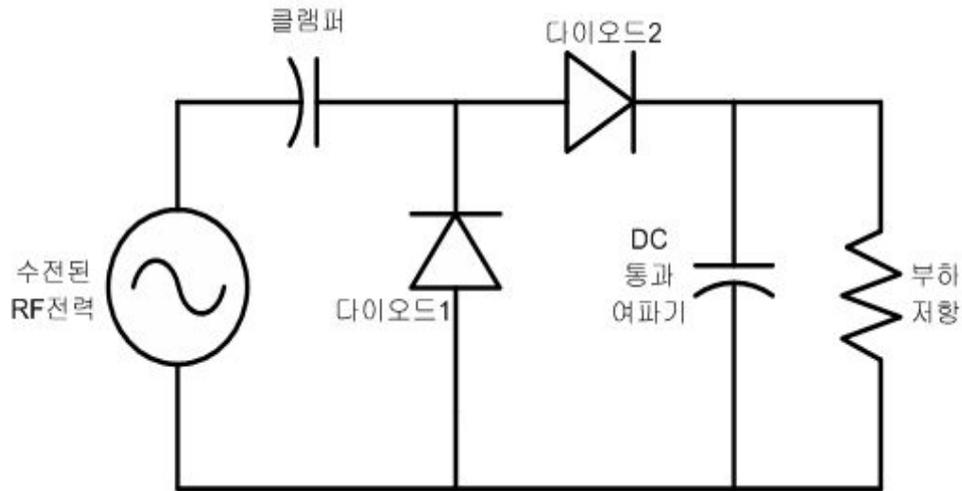
<그림 3.7> 다이오드 선택에 관한 모의실험

나. 정류회로 구성

앞 절에서 선택한 다이오드를 바탕으로 본 절에서는 정류회로의 구조가 어떤 구조를 취하였을 때 높은 효율을 얻을 수 있는가를 모의 실험하였다. 본 논문의 중심이 되는 렉테나는 낮은 전력에서 동작해야 하므로 배압 정류기 구조를 선택하게 되었다.

<그림 3.8>에서는 배압 정류기의 모습을 나타내었다. 단일 전력 정류기는 입력 RF전압의 첨두치를 최대로 부하저항에서 DC전압으로 변환할 수 있지만 2배압 전력정류기의 클램퍼(Clamper; 입력 신호 파형의 한 부위를 어느 일정한 레벨로 고정시키는 회로)역할을 하는 커패시터에 의하여 입력 RF전압의 2배까지 DC전압으로 변환이 가능하다는 장점을 가진다[24]. 그러므로 보다 높은 효율을 가질 수 있다.

또한 앞 절에서 선택한 쇼트키 다이오드인 HSMS-285X 시리즈 중 HSMS-2852는 2개의 다이오드가 하나의 패키지에 포함되어 있다. 그러므로 HSMS-2852를 사용하면 변환기의 전체 크기와 관련하지 않고 2배압 전력정류기의 설계가 가능하다.



<그림 3.8> 배압 정류회로구조

다. 효율 최적화 설계 및 제작



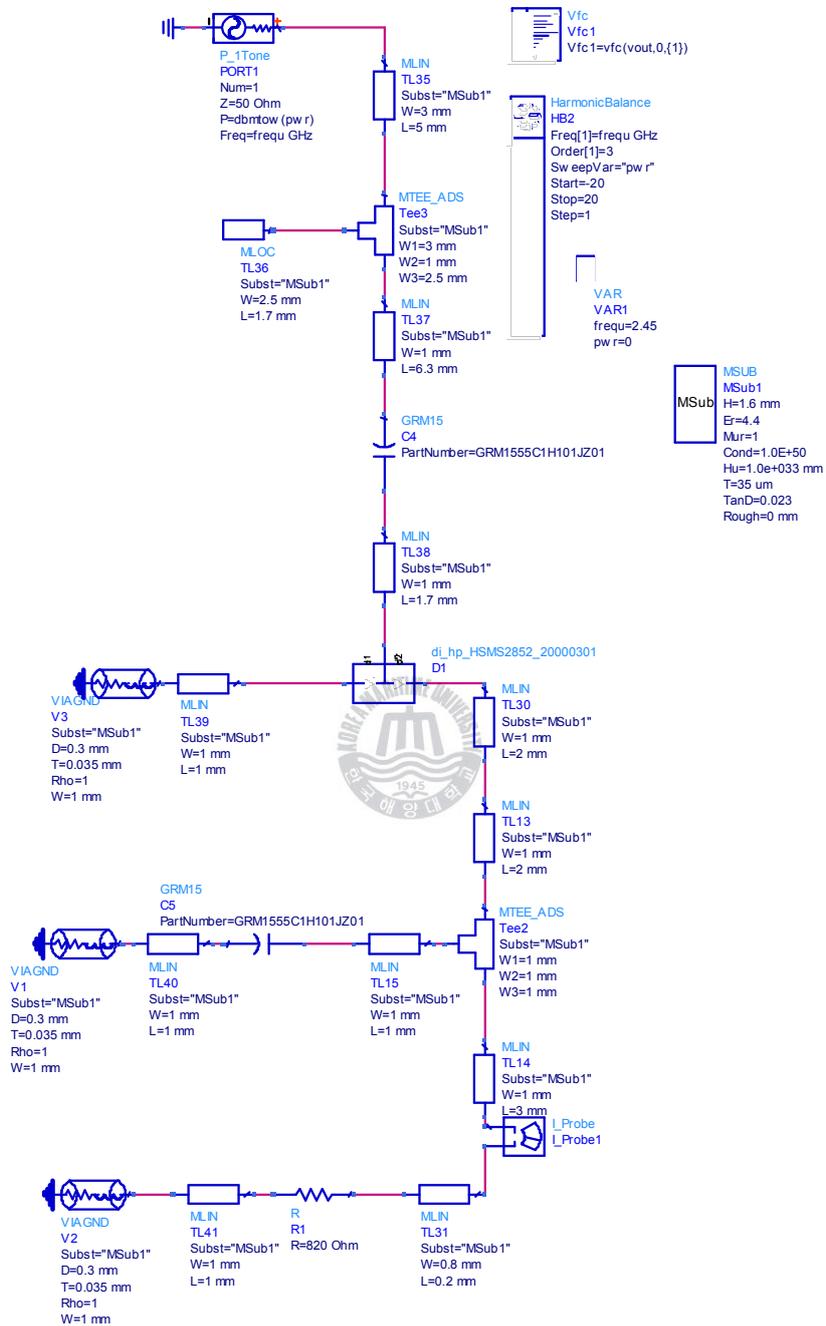
쇼트키 다이오드 선택과 정류회로의 구조에 대한 모의실험을 중심으로 쇼트키 다이오드 정류기를 FR4 기판($\epsilon_r=4.4$, $h=1.6\text{mm}$)을 사용하여 설계하였다. 효율 최적화 설계를 위해서는 고주파 회로 모의실험 프로그램인 Agilent사의 ADS(Advanced Design System)의 하모닉 발란스(Harmonic Balance)방식을 이용하여 입력전력에 대한 출력전압과 효율 등을 확인할 수 있었다. 하모닉 발란스 방식은 회로 시뮬레이션중 비선형 소자가 포함된 경우에 주로 사용하는 방식으로써 증폭기, 발진기, 혼합기 설계 등에서 사용하는 방식이다.

모의실험 프로그램을 이용하여 동일한 저항에 대해서 출력전압이 최대로 나타날 수 있도록 개방형 스텐브(open stub)의 길이와

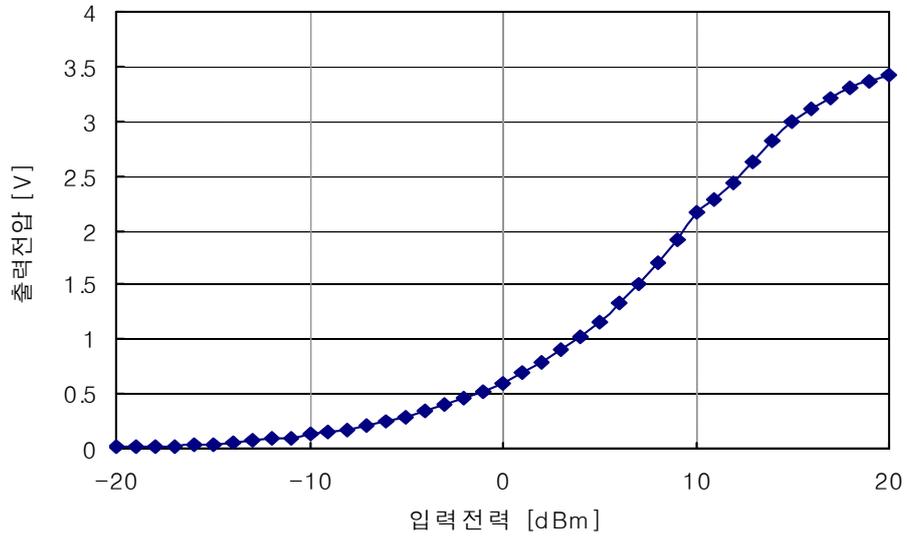
폭 그리고 스테브와 클램퍼 역할을 하는 커패시터사이의 마이크로 스트립의 길이를 조절하여 설계되었다. 설계된 정류회로의 회로도 는 <그림 3.9>에 나타내었다. 회로도에서 사용된 커패시터는 모두 100pF이 사용되었다. 설계된 회로를 이용하여 모의실험을 실시하여 <그림 3.10>에서는 정류회로의 입력전력에 대한 부하저항 양단의 DC 출력 전압을 나타내었다.

<그림 3.11>에서는 모의실험을 통한 입력전력에 대한 효율을 나타내었다. 여기서의 효율을 구하는 방법은 출력전압과 이 때 부하에 흐르는 전류를 곱하여 출력전력을 구하고 <그림 3.11>에 표시한 방법으로 효율을 구할 수 있다.

<그림 3.12>는 정류회로를 제작한 모습을 나타내었다. 제작한 정류회로와 안테나를 바탕으로 <그림 3.13>에서는 렉테나의 앞면(a)과 뒷면(b)의 레이아웃(Layout)을 나타내었다. 레이아웃은 음각 습식 식각(Negative Wet Etching)방식을 이용하여 <그림 3.14>과 같이 제작되었다. 이는 90mm×90mm의 크기로 제작되었다.



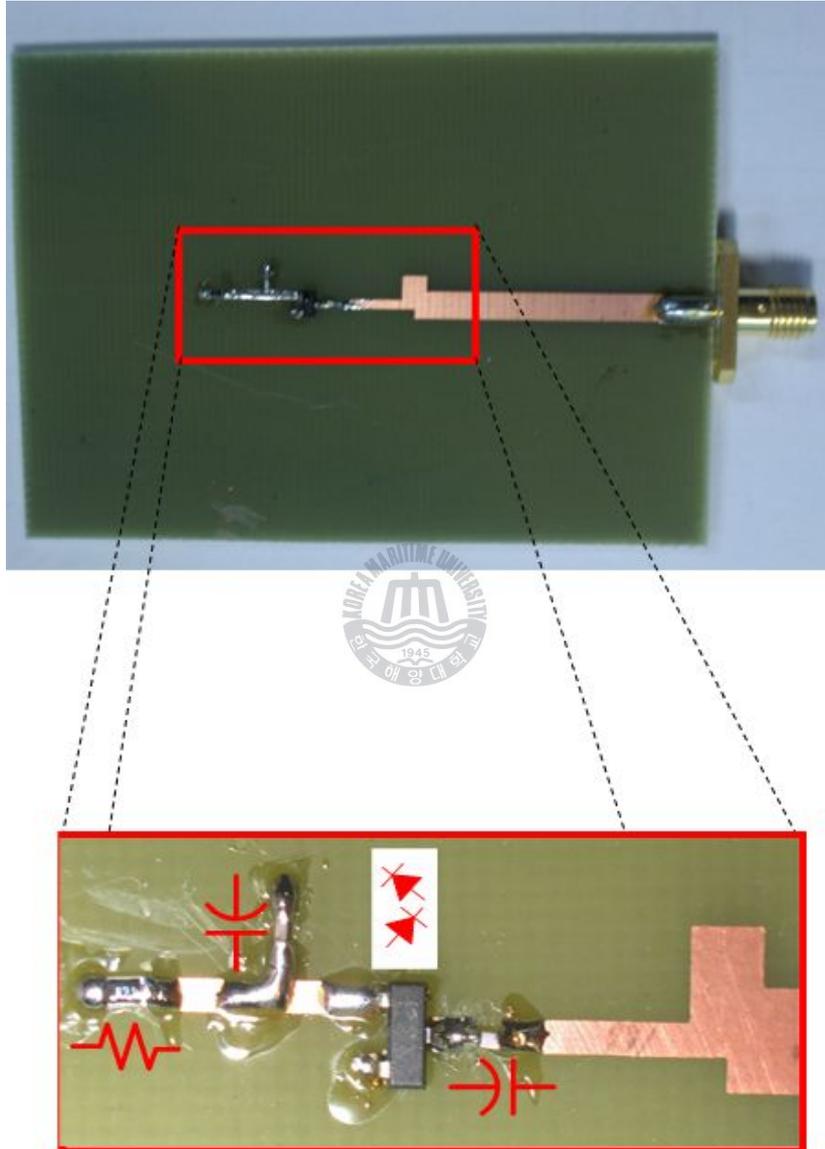
<그림 3.9> 정류회로의 회로도



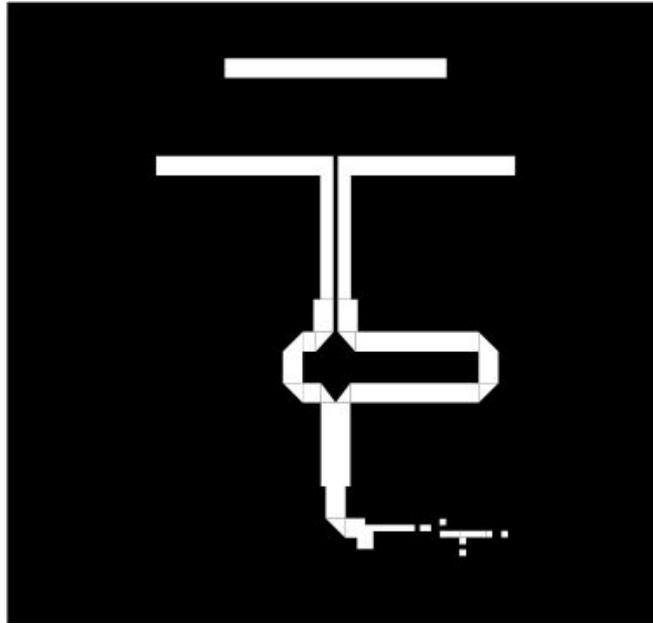
<그림 3.10> 정류회로의 입력전력에 대한 출력전압



<그림 3.11> 정류회로의 입력전력에 대한 효율



<그림 3.12> 제작된 정류회로의 모습

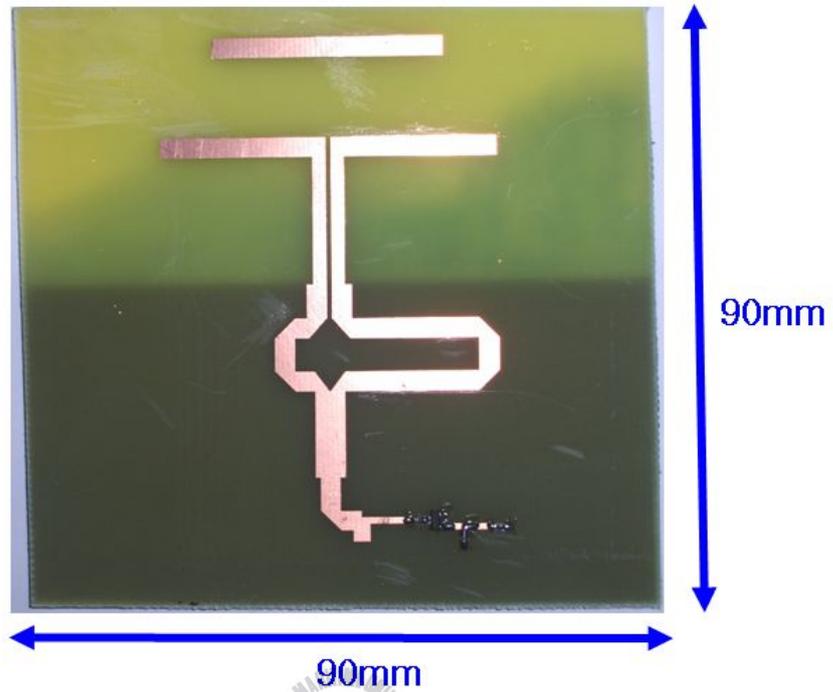


(a) 앞면



(b) 뒷면

<그림 3.13> 렉테나의 레이아웃



<그림 3.14> 제작된 랙테나의 모습

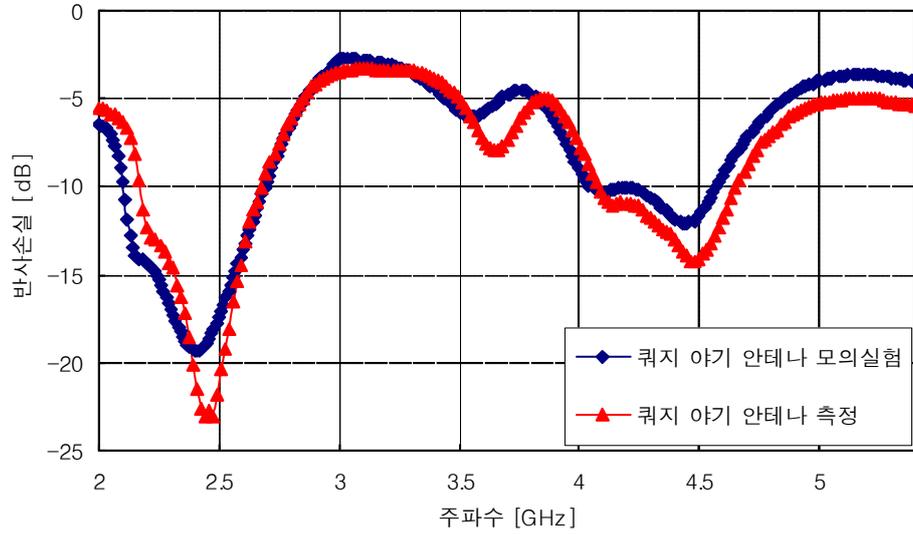
제 4장 실험 및 측정결과

4.1 안테나 측정

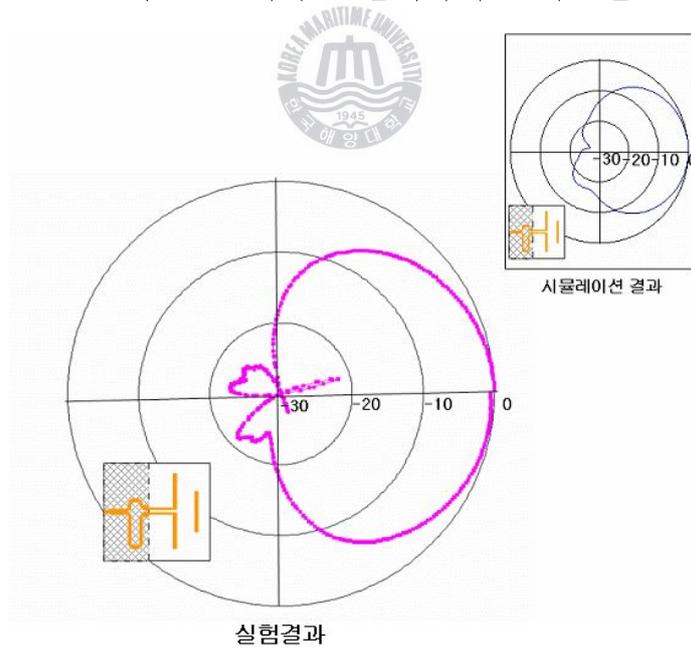
<그림 4.1>에서는 제작된 쿼지 야기 안테나의 반사손실을 나타내었다. 2.45GHz 대역에서의 반사손실은 약 22.8dB정도였으며 안테나로써 동작여부의 기준이 되는 반사손실이 10dB이상인 대역은 2.17 ~ 2.68GHz 으로 대역폭은 510MHz이었다. 이러한 대역폭은 야기안테나가 공진형 안테나에 속하다는 것을 고려해볼 때, 제작된 안테나의 대역폭은 넓은 편에 속한다.

2체배 주파수인 4.9GHz 대역에서의 반사손실은 약 5.6dB정도가 측정되었다. 이러한 반사손실의 결과는 모의실험의 결과를 잘 따르고 있음을 보여 주었고 4.9GHz 대역에서의 반사손실의 증가로 인하여 고조파 억압 능력은 모의실험에서 보다 조금 떨어지겠지만, 반사손실 10dB에 비하면 여전히 작은 값이라 할 수 있다.

<그림 4.2>에서는 측정된 방사패턴을 나타내고 있으며, 모의실험에 비하여 날카로운 모습은 아니지만 여전히 엔드파이어형태의 방사패턴을 가지고 있다. 이 때 측정된 이득은 5.35dBi이었다. 이는 모의실험에서의 이득인 5.09dBi에 비하여 조금 더 큰 값을 가지는 것을 알 수 있고, 이 정도의 이득은 일반적인 다이폴의 이득에 비하여 2배정도 크다는 것을 확인할 수 있다.



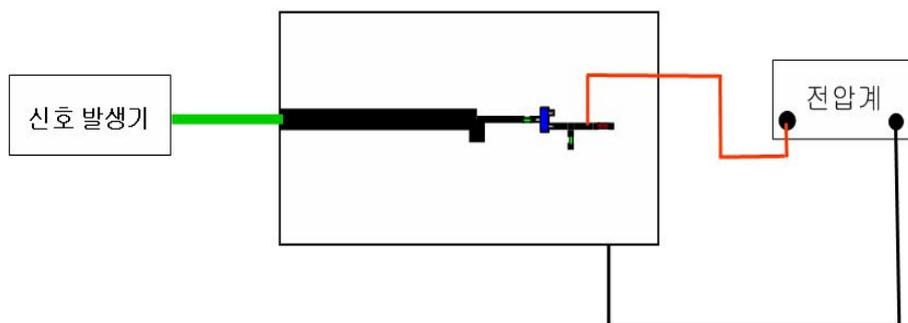
<그림 4.1> 제작된 안테나의 반사손실



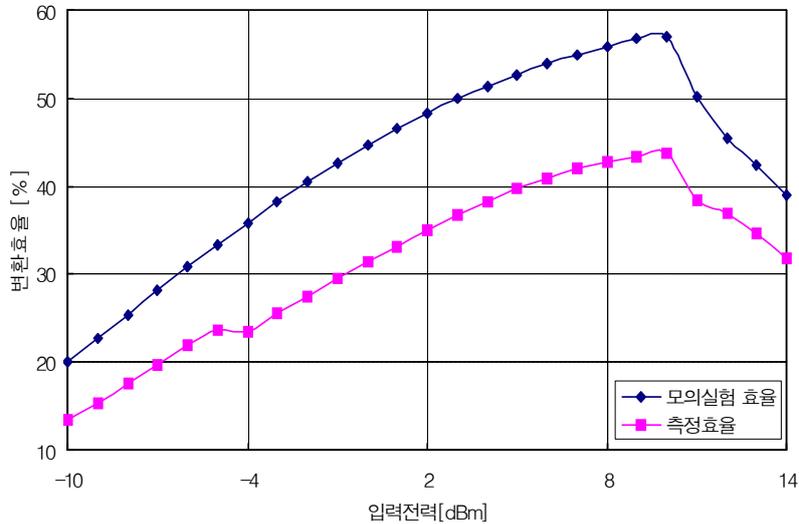
<그림 4.2> 제작된 안테나의 방사패턴

4.2 정류회로 측정

<그림 4.3>에서는 제작된 정류회로의 효율 측정을 위한 실험장치를 설정한 모습을 나타내었다. 신호발생기에서 발생주파수는 2.45GHz로 고정하고 출력전력을 변화시키면서 정류회로의 부하저항 양단의 DC전압을 전압계를 이용하여 측정하였다. 그리고 <그림 4.4>에서는 <그림 4.3>의 실험을 통해 측정된 DC전압의 제곱을 부하저항의 크기로 나눠 출력 DC 전력을 구하여 제작된 정류회로의 변환 효율을 나타내었다. 모의실험과 비교하여 보면 측정된 결과 역시 신호발생기에서 출력된 RF전력이 10 dBm 정도에서 최대 효율인 43%정도가 나타나는 것을 확인 할 수 있었지만 모의실험에 비하여 약 13%정도의 오차가 발생한다는 것을 볼 수 있다. 이는 시뮬레이션에서 사용한 다이오드의 등가모델이 소신호 분석을 이용하여 모델링되어 실제의 다이오드와는 약간의 오차가 있었던 것으로 생각된다.



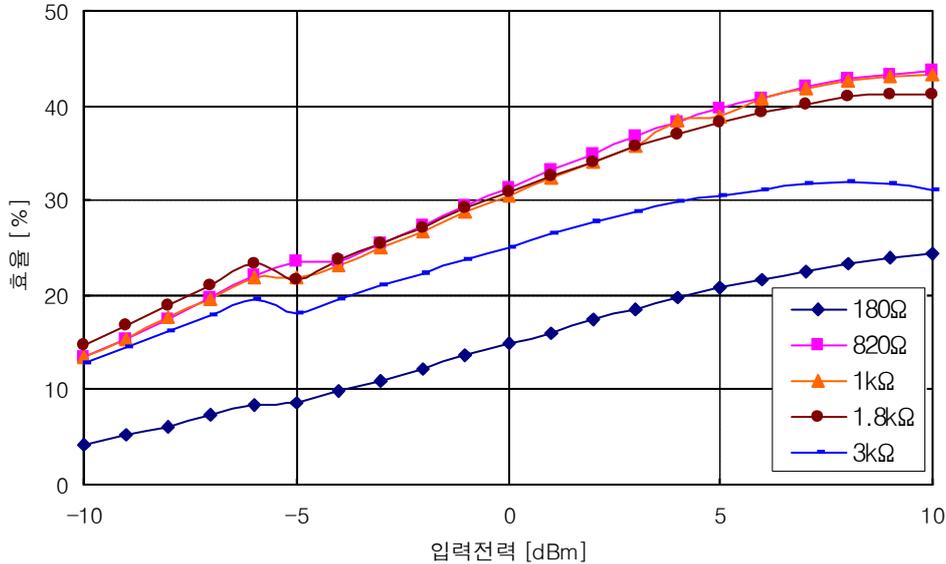
<그림 4.3> 정류회로의 측정방법



<그림 4.4> 제작된 정류회로의 변환효율



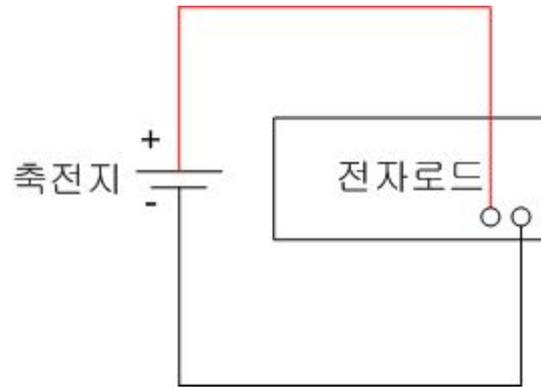
<그림 4.5>에서는 다양한 부하저항에 대해서 변환 효율이 어떻게 나타나고 있는지를 나타내었다. 820Ω이라는 부하저항에 맞도록 모든 것을 설계하였기 때문에 입력전력 0dBm 이상일 때부터는 부하저항이 820Ω일 때 효율이 높게 나타나고 있었지만, 다른 저항에 대해서도 비교적 높은 효율을 측정할 수 있었다. 하지만 180Ω, 3kΩ의 부하저항에서는 낮은 효율을 보이는 것으로 보아 부하저항의 임피던스 변화는 전체 입력임피던스에 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. 이러한 사실은 휴대용 기기에 적용할 때 휴대용 기기의 입력 임피던스도 고려해야 한다는 것을 확인할 수 있다.



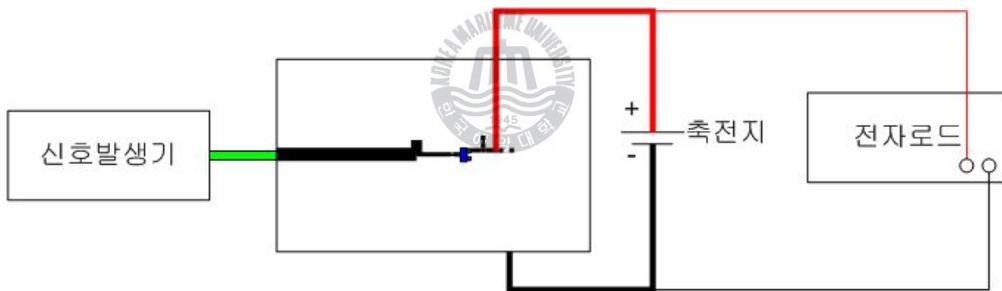
<그림 4.5> 다양한 부하저항에 대한 변환 효율



전자로드를 이용하여 3시간 마다 10분간 정전류 모드로 30mA를 소비하는 소자가 부하저항을 대신하여 <그림 4.6>과 같이 축전지에 연결되어 있다. <그림 4.6>(a)에서는 충분히 충전된 축전지를 3시간 마다 10분동안 전력소비가 일어나고 그 다음 3시간까지는 대기상태로 있는 경우의 실험회로를 나타내었다. 즉, 처음에 축전지는 완전충전 상태에서 시작되며 시간이 지남에 따라서 전력소모가 발생하지만 별도의 충전기에 연결하지 않는다. <그림 4.6>(b)에서는 신호발생기에서 RF 전력(2.45GHz, 9dBm)을 꾸준히 인가하면서 설계된 정류회로를 이용하여 축전지를 충전하면서 (a)와 같은 전력소비를 일으키도록 설정한 경우를 나타내었다.



(a)

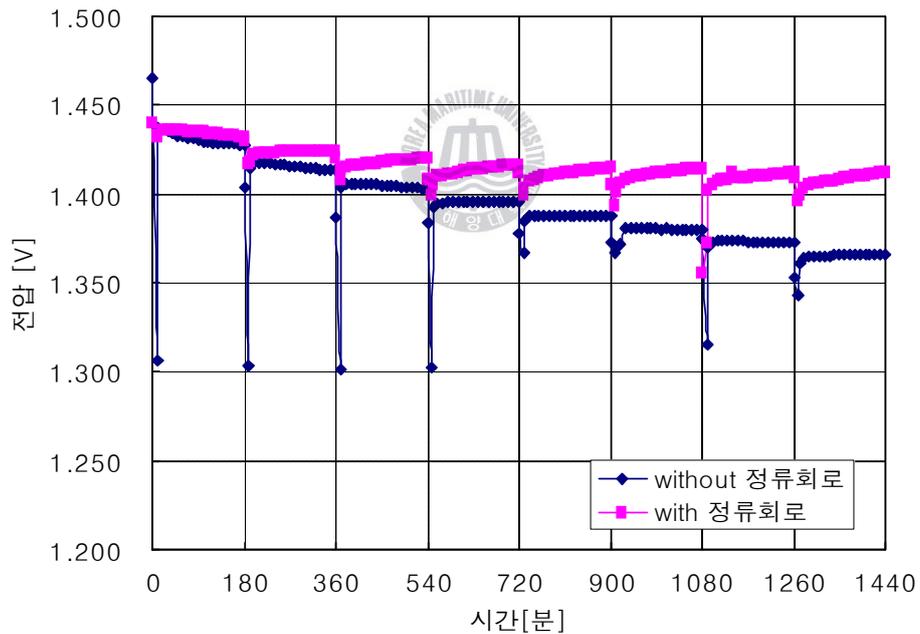


(b)

<그림 4.6>가상부하를 이용한 정류회로 실험

<그림 4.7>에서는 ‘without 정류회로’는 <그림 4.6>(a)에 해당될 때 출력전압을 나타낸 것이고 ‘with 정류회로’는 <그림 4.6>(b)에 해당될 때의 출력전압을 나타낸 것이다. 실험을 살펴보면, 방전이 이루어질 때는 두 상황에서 모두 전압이 감소하는 것을 확인 할 수

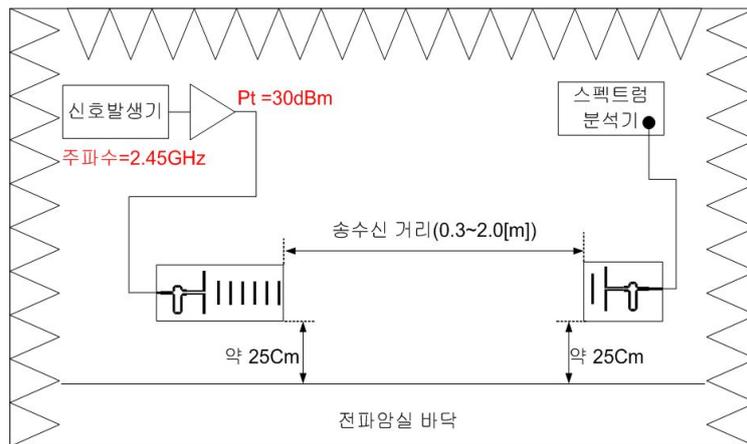
있지만, 방전이 끝나게 되면 정류회로가 없이 축전지만 있는 경우는 조금씩 전압이 강하되고 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나 정류회로를 가진 상황에서는 다시 전압이 상승되어 결국 방전 전(前)까지 기존의 상태로 변화됨을 확인할 수 있다. 따라서 정류회로를 이용한 충전이 가능하다는 것을 확인하였고, 무선으로 충전하는 것 역시 가능하다는 것을 확인 할 수 있었다.



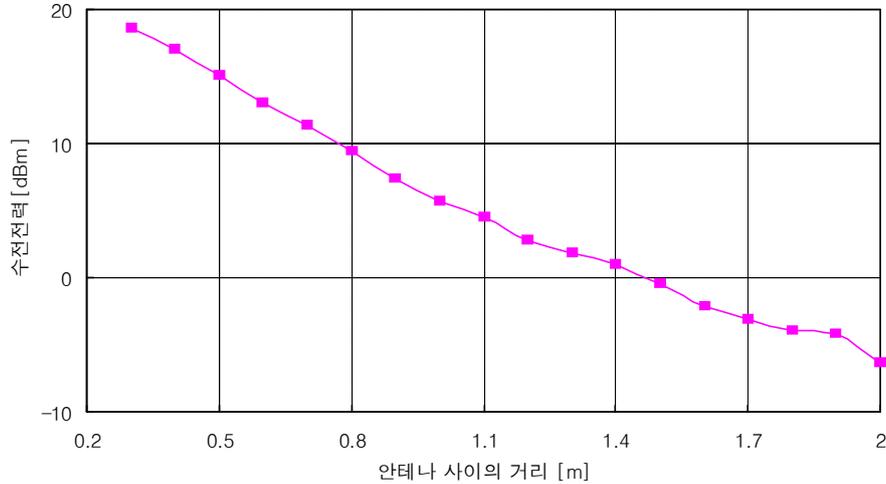
<그림 4.7> 시간에 따라 축전지 양단 전압

4.3 렉테나 측정

<그림 4.8>은 송수전 안테나 사이의 거리와 수전전력을 측정할 개략도를 나타내었다. 송전용 안테나는 쿼지 야기 안테나의 도파기의 개수를 증가시켜 10.8dBi의 이득을 갖는 안테나를 제작되었다. 측정은 전파암실 바닥에서 25Cm정도 띄워서 측정되었으며 신호발생기와 증폭기를 사용하여 입력 RF전력은 30dBm이 되도록 하고 송전 안테나를 이용하여 대기 중으로 방사시키고 방사된 RF전력을 수전안테나를 이용하여 수전하여 스펙트럼 분석기를 이용하여 수전전력을 확인하였다. 그리고 측정된 거리에 따른 수전 전력은 <그림 4.9>에 나타내었다. 30dBm이라는 큰 RF전력을 방사하였지만 송전 안테나에서 약 1.5m정도 떨어진 지역에서 0dBm정도의 전력을 수전할 수 있었다.

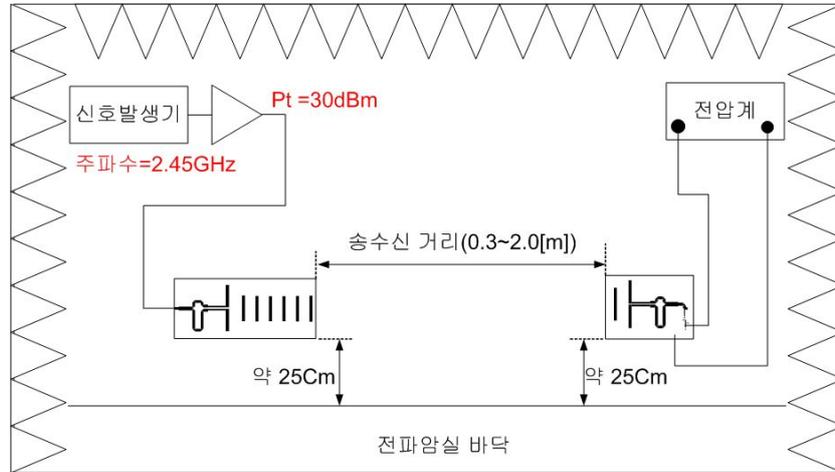


<그림 4.8> 송수전 거리와 수전전력 측정을 위한 셋업

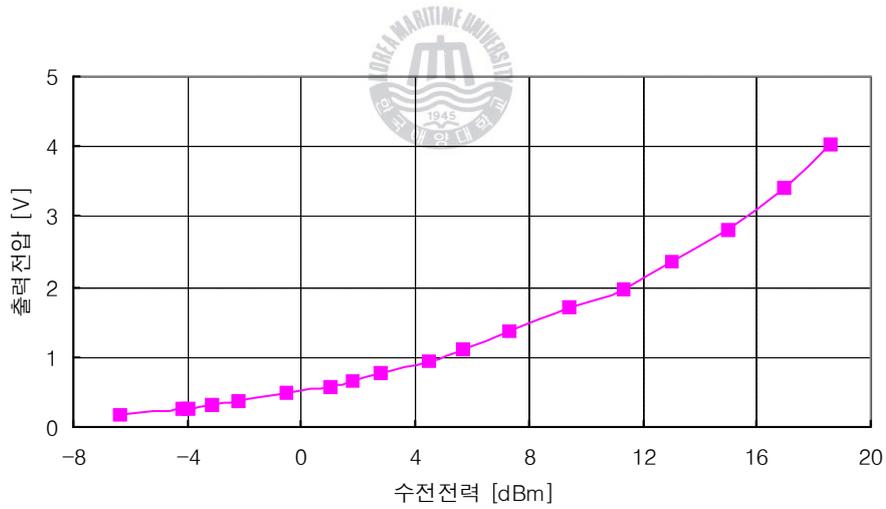


<그림 4.9> 송수전 안테나 사이의 거리에 따른 수전전력

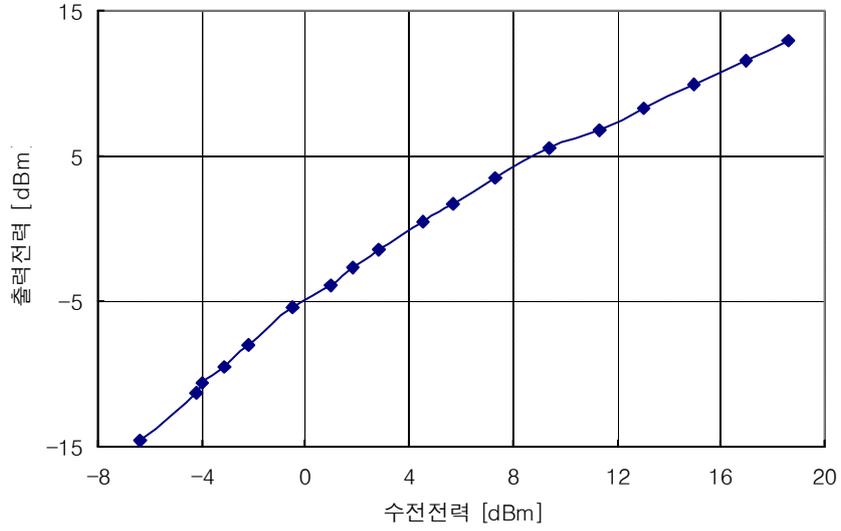
<그림 4.9>을 통해서 얻어진 수전전력을 이용하여 <그림 4.10>과 같이 구성한 측정을 통해서 DC출력전력을 알 수 있었다. 송전측 설비는 <그림 4.9>과 동일하게 설정되었으며, 출력전압을 측정하기 위해서 수전 안테나 대신 렉테나를 위치시키고 스펙트럼 분석기 대신 전압계를 이용하여 출력전압을 측정하였다. 측정된 출력전압은 <그림 4.11>에 나타내었다. 이때 출력전압은 <그림 4.10>에서 획득한 거리에 따른 수전전력량을 기초로 하여 거리를 이동시켜 가면서 측정하였다. 이를 바탕으로 출력 DC전력을 계산하여 <그림 4.12>에서는 수전 안테나에서 수전된 RF전력에 대해서 출력된 DC전력을 나타내었다. 그리고 <그림 4.13>에서는 렉테나의 수전된 전력에 대한 변환효율을 나타내었다.



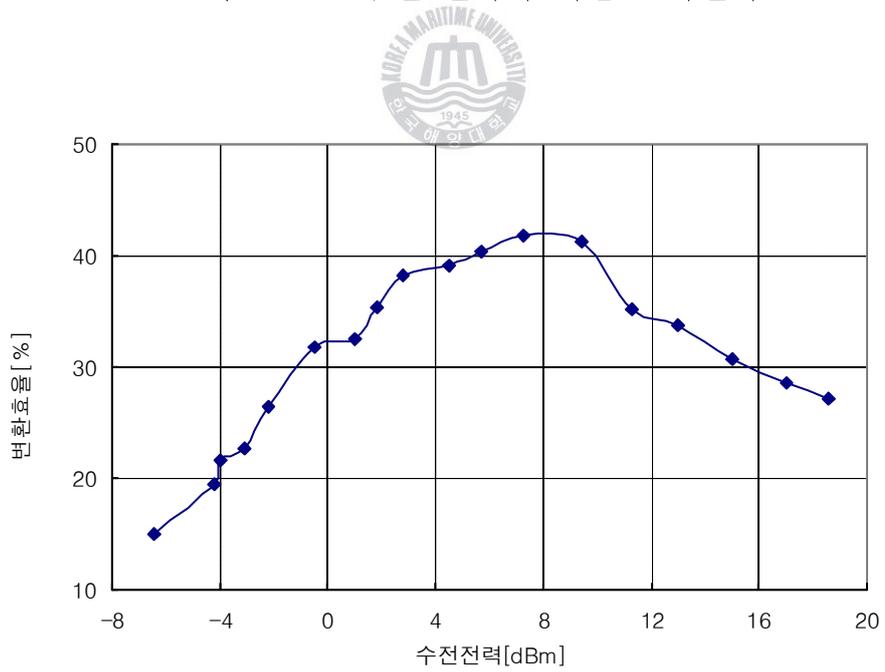
<그림 4.10> 렉테나 출력전압을 측정하기 위한 실험 셋업



<그림 4.11> 수전 전력에 대한 출력전압

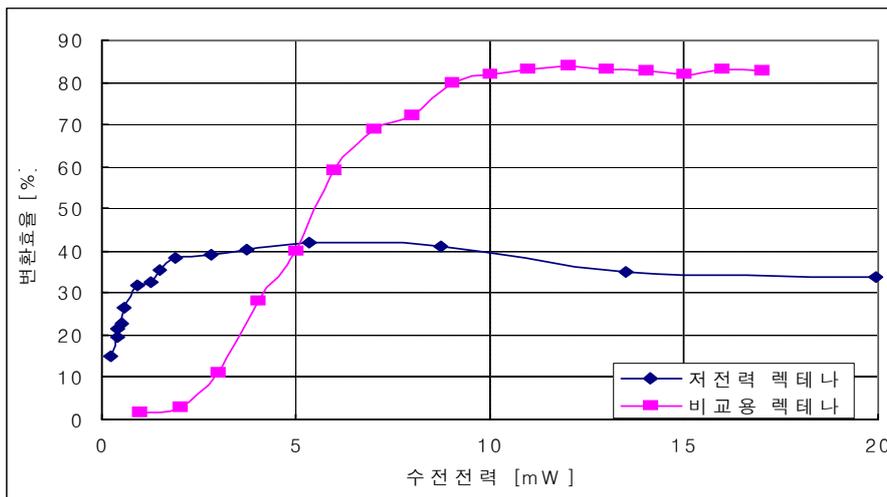


<그림 4.12> 수전 전력에 대한 출력전력



<그림 4.13> 수전 전력에 대한 변환효율

<그림 4.14>에서는 제안된 렉테나와 일반 고효율 렉테나를 비교해 보았다. 비교용 논문에서는 입력전력이 5mW 이상에서는 높은 효율을 보였고 10mW 이상의 전력에서는 80% 이상의 효율을 보였다 [25]. 하지만 낮은 입력전력인 0dBm 이하에 대해서는 제안된 저전력용 렉테나의 효율이 돋보였다. 이런 결과는 제안된 렉테나의 경우 낮은 전력에서 높은 효율을 보이기 위해서 효율 정합회로를 조정하였기 때문이다. 비교용 논문에서 사용한 다이오드는 본 논문에서 사용한 다이오드와 동일한 모델이었다. 그러나 비교연구에서는 높은 입력전력에서 높은 효율을 가지기 위해서 정류회로 구조를 전과정류구조로 설계되었다. 이를 통해 하나의 다이오드는 같은 파괴전압을 가지지만, 다이오드 하나에 걸리는 전압은 낮기 때문에 높은 입력전력에서 높은 효율을 보이는 것이라 생각된다.



<그림 4.14> 수전전력에 따른 변환 효율

국내의 ISM 대역인 2.45GHz대역에서 10mW이하의 공중선 전력 일 때 신고없이 사용이 가능하다. 이를 바탕으로 송전 안테나와 수신안테나가 반파장 다이폴이라고 가정하면 송수전 안테나의 이득은 각각 2.15dBi가 되고 식 (2.1)과 (2.5)를 이용하면 송전안테나로부터 떨어진 거리가 1Cm에서도 <그림 2.5>의 국내의 전자파 인체 보호 기준을 통과한다는 것을 알 수 있다. 그러나 1Cm 떨어진 지역에서 계산된 수신전력은 25mW정도로 계산되지만 실제 측정에서는 10mW를 넘지 못한다[26]. 또한 10Cm 떨어진 지역에서 계산된 수신전력은 0.4mW정도이다. 계산을 통해 살펴본 수신전력을 생각하면 10mW이상의 수신전력에 대한 연구에 비해 낮은 전력에서의 연구가 필요하다는 것을 알 수 있고 그런 의미에서 본 논문에서의 연구가 의의를 가진다고 할 수 있다.



제 5장 결론

무선 전력전송 기술은 점점 소형화 되어가는 휴대 단말기의 배터리 무선 충전 및 저 전력의 에너지 공급을 할 수 있고, 건축 공간에서 배선 등의 무선화를 가능하게 하여 건축물이 구조적으로 확장성을 갖게 할 수 있으며, 유비쿼터스 컴퓨팅 및 네트워크 환경의 전원 공급을 가능하게 하는 등 다가올 미래 사회에 꼭 필요한 기술이다.

본 연구에서는 미래의 혁신 기술인 무선 전력 전송 시스템 중 라디오파 수신 방식을 이용하여 무선전력 전송을 구현하였다. 이때 사용한 수신안테나의 이득은 약 5.35dBi 정도로 측정되었고 쿼지 야기 안테나를 사용하여 정류할 때 비선형 소자인 다이오드에서 발생하는 2차배 주파수의 재-방사를 막을 수 있었다. 안테나의 동작대역은 2.17 ~ 2.68GHz로 대역폭은 510 MHz이었고 목표주파수인 2.45GHz에서는 20dB 이상의 반사손실을 가졌다. 정류회로의 효율은 부하저항이 820Ω에서 기존에 발표된 타 논문에 비하여 낮은 입력전력인 0dBm에서는 비교적 높은 변환효율인 약 32%의 효율이 측정되었다. 송전전력이 약 1W이고 송수전 안테나 사이의 거리가 1.5m일 때 0dBm 정도의 전력을 렉테나의 수신안테나를 통해 수신할 수 있었다. 이때 렉테나는 약 0.5V의 출력전압을 가졌다. 렉테나는 90mm×90mm의 크기로 FR4기판으로 제작되었다. 또한 전자로드를 이용하여 전력을 간헐적으로 사용하는 소자를

가상적으로 설정한 실험에서는 정류회로를 이용하여 축전지를 충전할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.



참고문헌

- [1] 한국전력공사, 통계 속보(2008/10), <http://www.kepco.co.kr/>
- [2] 박래만, 성희경, 전용일, 이유경, “유비쿼터스 에너지(ubiquitous energy)는”, 정보통신연구진흥원 주간기술 동향, 통권 1334호, 2008. 2.20, pp27-36.
- [3] William C. Brown, “The History of Power Transmission by Radio Waves,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, vol. MTT-32, no. 9, pp.1230-1242, Sept. 1984
- [4] William C. Brown, “Experiments involving a microwave beam to power and position a helicopter,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* vol. AES-5, no. 5, pp. 692-702, Sept. 1969.
- [5] Y. Ren and K. Chang, “5.8-GHz circularly polarized dual-diode rectenna and rectenna arrays for microwave power transmission,” *IEEE Trans. Micro. theory Tech*, vol. MTT-54, no. 4, pp. 1495-1502, Apr. 2006.
- [6] J. Heikkinen and M. Kivikoski, “A novel dual-frequency circularly polarized rectenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 2, pp330-333, 2003.
- [7] Y. Suh and K. Chang. “A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission,” *IEEE Trans. Micro. theory Tech*, vol. MTT-50, no. 7, pp. 1784-1789, July. 2002.
- [8] J. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, “Design and

- experiments of a high-conversion-efficiency 5.8-GHz rectenna,” *IEEE Trans. Micro. theory Tech*, vol. MTT-46, no. 12, pp. 2053-2060, Dec. 1998.
- [9] Margery Conner, “Wireless power transmission: No strings attached,” *EDN Asia*, pp. 40-48, Oct. 2007.
- [10] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances,” *Science*, vol. 317, no. 6, pp. 83-86, July 2007.
- [11] 윤영중, 홍의석, 전계석, 김민준, 임영석, 정백호, 안테나 이론과 설계, 교보문고, 2000. 03.
- [12] 정신교외 6명, “소출력주파수 무선국 이용제도 개선연구,” 전파진흥협회 2004. 12. 31
- [13] 전파진흥협회, 대한민국 주파수 분배표, 2005. 6
- [14] 이영봉, 박덕규, 고진현외 8명, “개방용주파수의 이용실태 및 기술기준 개선방안에 관한 연구,” 전파진흥협회, 1999.12
- [15] FCC, 47CFR, Part 15.247, “Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz”
- [16] FCC, 47CFR, Part 15.249, “Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, 5725-5875 MHz, and 24.0-24.25 GHz”
- [17] Erc Recommendation 70-03, Relating To The Use Of Short Range Devices (SRD), 2007. 05. 30

- [18] 일본주파수할당계획 주파수 할당표 27.5 MHz-10000 MHz, 2007. 06. 29
- [19] 방송통신위원회, 고시 제2008-37호, “전자파 인체 보호기준,” 2008. 05. 29.
- [20] IEEE Standards Board, IEEE standrd for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300GHz, 19 April 2006
- [21] OET Bulletin 65, “Evaluating Compliance With FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields,” www.fcc.gov/oet/info/documents/bulletins/#65
- [22] N. Kaneda, W. R. Deal, Y. Qian, R. Waterhouse, and T. Itoh, “A broad-band planar quasi-yagi antenna”, *IEEE transactions on antenna and propagation*, vol. 50, no. 8, pp. 1158-1160, Aug. 2002.
- [23] Agilent Technologies, “Designing the virtual battery,” *application Note 1088*.
- [24] 김능연, 안점영, 오상광, 최성운, 전자회로, 교보문고, 6th edition.
- [25] 윤동기, “능동안테나를 이용한 Microwave-DC 변환효율 분석에 관한 연구”, 마산 경남대학교 대학원, 2000
- [26] 박진석, 김춘원, Ren Chun, 김미선, 강유미, 안병철, “다이폴 안테나 간의 근거리 전달계수,” 한국전자과학회 전자파 기술 하계 학술대회, pp. 19-23, 2008. 6. 27.