

# 다중 안테나를 사용하는 무선전력전송 시스템의 설계와 특성 평가

안창영\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Design and Characteristic Evaluation of Wireless Power Transmission System Using Multiple Antennas

Changyoung An\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

### 요약

본 논문에서는 목표 전력전송 효율을 달성할 수 있는 다중 안테나를 사용하는 무선전력전송 시스템 설계 방법과 주요 특성에 대한 평가결과를 제시한다. Microwave를 사용하는 무선전력전송 시스템은 장거리 전력전송에 효과적이다. 그러나 전력전송효율 측면에서는 아직 개선해야 할 부분이 많다. 따라서 무선으로 효율적인 전력전송을 하기 위해서는 전력 송수신기를 Link Budget 기반으로 체계적으로 설계해야 한다. 우선, 무선전력전송을 위한 목표 거리와 효율, 사용 주파수, RF-DC(Radio Frequency to Direct Current) 정류기의 최대 효율을 기반으로 최종 전송효율을 달성할 수 있도록, 송수신 안테나 이득 및 구성, 송신 전력의 크기를 결정하는 방안을 제시한다. 그리고 다중 안테나 구성을 통하여 효과적으로 요구 이득을 얻을 수 있음을 측정 결과를 통해 보이며, 최대 전송효율을 달성하기 위하여, RF-DC 정류기의 효율 특성에 따라 송신기의 송신 전력을 결정해야 함을 시뮬레이션 결과를 통하여 보인다.

**Key Words** : wireless power transmission, MPT, multiple antennas, RF-DC rectifier, power transmission efficiency

### ABSTRACT

In this paper, we present a method for designing a wireless power transmission (WPT) system using multiple antennas and its main characteristics to achieve the target power transmission efficiency. WPT system using microwave is effective for long distance power transmission. However, there are still many things to improve in terms of power transmission efficiency. Therefore, to efficiently transmit power in a wireless environment, power transceivers must be systematically designed based on link budget. First, we propose a method for determining antenna gain of power transmitter and power receiver, antenna configuration, and transmission power to achieve final transmission efficiency based on target distance, efficiency, frequency, and maximum efficiency of radio frequency to direct current (RF-DC) rectifier for WPT. The measurement results show that the required gain can be effectively obtained through the multi-antenna configuration, and the simulation results show that the transmission power of the transmitter must be determined according to the efficiency characteristics of the RF-DC rectifier in order to achieve the maximum transmission efficiency.

\* 이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1D1A1B01008046). 그리고 이 논문은 2019년도 한국연구재단의 국제협력사업의 지원을 받아 연구되었음 (2019K1A3A1A39102995). 또한, 이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2019)지원을 받아 작성되었음.

• First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 박사후연구원, 정회원  
<sup>o</sup> Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cnu.ac.kr, 정교수, 정회원  
 논문번호 : 201912-341-A-RN, Received December 19, 2019; Revised February 18, 2020; Accepted February 24, 2020

## I. 서 론

이동통신 시스템은 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 4G(4th Generation)에서는 통신 속도의 개선을 최우선 목표로 설정하여 통신 시스템을 구축하였다. 그러나 5G(5th Generation)에서는 다양한 KPIs(Key Performance Indicators)를 설정하고, 이를 활용하는 세 가지의 주요 시나리오 지원을 목표로 하고 있다<sup>1)</sup>. 세 가지 주요 시나리오는 eMBB(enhanced Mobile Broad-Band), mMTC(massive Machine Type Communications), URLLC(Ultra-Reliable Low Latency Communications)이다<sup>2)</sup>. 이 중, 현재 mmWave 대역을 사용하여 eMBB 시나리오를 지원하는 5G 이동통신이 상용화되었다. mmWave 대역을 사용하는 이동통신 시스템은 넓은 주파수 자원을 활용하여 고속 통신 지원한다<sup>3,4)</sup>. 현재, URLLC 시나리오에 대해서는 매우 제한된 성능을 만족할 수 있는 상황이며, mMTC 시나리오의 구현을 위한 연구 개발은 아직 부족한 상황이다<sup>5)</sup>. mMTC 시나리오는 초 다수의 장치에 대하여 효과적인 무선 통신을 지원하는 것이 목표이다. 특히, mMTC 시나리오를 효과적으로 구현하고, 이를 확산시키기 위해서는 각 장치의 전력공급 문제를 해결해야 한다. mMTC에서 지원하기 위한 장치들은 일반적으로 저비용, 저전력, 저속 프로세싱 및 저속 통신 등의 특성을 갖는다<sup>6,7)</sup>. 더욱이 mMTC 장치들은 주기적으로 접근이 어려운 환경에 활용될 수 있으므로, 이러한 특성을 갖는 초 다수의 장치에 각각 수동으로 배터리를 충전하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 최근 무선전력전송 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>8-12)</sup>. 무선전력전송을 활용할 경우 접근하기 어려운 지역 및 공간에 초 다수의 장치에 대한 전원공급을 효과적으로 할 수 있다. 무선전력전송은 크게 전기장, 자기장, 전자기파를 사용하는 방법으로 나뉜다. 이 중 전자기파를 사용하는 방식은 장거리 무선전력전송에 효과적이다. 전자기파를 사용하는 무선전력전송(MPT, Microwave Power Transmission) 시스템은 일반적인 통신 시스템과 같이 Link Budget을 계산하여 시스템을 설계해야 한다. 여기에는 사용 주파수, 송신 전력, 송신 안테나 이득, 경로 손실, 수신 안테나 이득, RF-DC(Radio Frequency to Direct Current) 정류기의 변환 효율 등의 특성이 고려된다. 장거리의 기기에 전력을 효과적으로 전송하기 위해서는 각각의 파라미터값을 효과적으로 설정해야 하며, 특히, 경로 손실로 인한 효율 저하를 극복하기 위하여 다수의 안테나를 사용하여 송

수신 안테나 이득을 증가시키는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 이와 같은 특성을 고려하여 전자기파를 이용한 장거리 무선전력전송을 위한 Link Budget 기반의 시스템 설계 방법과 시스템 특성 평가결과를 제시한다.

## II. 전자기파를 사용하는 무선전력전송 시스템

전자기파를 사용하는 무선전력전송 시스템은 전력 송신기와 전력 수신기로 구성된다. 우선 전력 송신기는 전원공급부, 발진기, 증폭기, RF 전력 분배, 다중 안테나로 구성된다<sup>11,12)</sup>. 발진기에서는 무선전력전송에 사용하기 위한 주파수의 신호를 생성한다. 일반적으로 무선전력전송은 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 대역을 사용하며, 낮은 주파수 대역 사용할 수록 경로 손실을 줄일 수 있으나 안테나의 크기가 증가하며, 높은 주파수 대역을 사용할 경우 경로 손실은 증가하나 안테나의 크기가 감소한다. 여기에서 안테나의 크기가 작을수록 다중 안테나 배열을 구성하기 쉬우며, 이를 통해 효과적인 빔포밍 환경을 구성할 수 있다. 발진기에서 근본 신호가 발생되면, 그다음 증폭기를 사용하여 이 신호의 전력을 증폭시킨다. 신호를 증폭시킬 때에는 우선 고이득 증폭을 수행한 후, 마지막 단계는 높은 전력을 출력할 수 있는 증폭기를 사용하여 신호의 전력을 증가시켜야 한다. 만약 증폭기의 출력 전력이 목표치보다 낮을 경우, 다수의 증폭기를 병렬연결하여 신호의 전력을 목표치까지 증가시킬 수 있다. 그다음 증폭된 신호를 각각의 다중 안테나로 분배한다. 이때, 다중 안테나의 구조에 따라 송신 이득이 변화하기 때문에, 안테나의 수와 구조를 효과적으로 결정해야 한다. 다음으로 전력 수신기는 다중 안테나, 임피던스 매칭(Impedance Matching) 회로, RF-DC 정류기, DC 전력 결합기, DC-DC 변환 및 관리기로 구성된다. 전력 수신 효율을 증가시키기 위해서는 수신기에서도 다중 안테나를 사용하여 전력을 수신해야 한다. 여기에서도 송신기와 같이 수신 안테나의 구조에 따라 전체 수신 전력량이 달라지므로, 안테나의 수와 구조를 효과적으로 결정해야 한다. 다음으로 각각의 안테나로부터 수신된 RF 신호를 효과적으로 RF-DC 정류기로 입력시키기 위해서는 각각의 안테나와 RF-DC 정류기 간에 임피던스 매칭을 해주어야 한다<sup>10)</sup>. RF를 사용하는 시스템의 경우 인덕터(Inductor)와 캐패시터(Capacitor) 소자를 이용한 매칭보다는 마이크로스트립(Microstrip) 선로를 이용한 임피던스 매칭을 사용하는 것이 효과적이다. 그다음

RF-DC 정류기에서는 RF 신호 전력을 DC 신호 전력으로 변환한다. 여기에서는 고주파 다이오드와 캐패시터를 사용하여 회로를 구성하며, 이 회로의 구성에 따라 변환 효율이 결정된다. 이 변환 효율은 세부적으로 사용 주파수, 입력 신호의 전력 크기, 신호의 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)에 따라 달라진다. 그다음 각각의 정류기로부터 변환된 DC 전력을 하나로 결합한 후, DC-DC 변환기를 사용하여 필요한 전압으로 변환하고 이를 저장한다.

### III. Link Budget 기반의 시스템 설계

전자기파를 사용하는 무선전력전송 시스템을 구성하는데 중요한 목표는 거리와 전송효율을 향상시키는 것이다. 일반적으로 이 두 가지 인자는 Trade-Off 관계에 있어서, 임의의 설계가 완료된 무선전력전송 시스템의 거리를 증가시킬 경우 전송효율이 감소하고, 전송효율을 증가시키기 위해서는 거리를 짧게 해야 한다. 우선 무선전력전송 시스템의 효율,  $E_{MPT}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{MPT} &= \frac{P_r}{P_t} \\
 &= \frac{P_t G_t G_r}{L P_t} * E_{RF-DC} * E_{DC-DC} \quad (1) \\
 &= \frac{G_t G_r}{L} * E_{RF-DC} * E_{DC-DC}
 \end{aligned}$$

식 (1)에서  $P_t$ ,  $P_r$ ,  $G_t$ ,  $G_r$ ,  $L$ ,  $E_{RF-DC}$ ,  $E_{DC-DC}$ 은 각각 송신 전력, 수신 전력, 송신 안테나 이득, 수신 안테나 이득, RF-DC 정류 효율, DC-DC 변환 효율이다. 여기에서 거리에 의한 경로 손실을 dB 스케일(Scale)로 표현한  $L_{dB}$ 는 다음과 같다.

$$L_{dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi d f}{c} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서  $d$ 는 거리,  $f$ 는 주파수,  $c$ 는 빛의 속도를 나타낸다. 거리가 증가할수록 경로 손실은 증가하며, 주파수가 높아질수록 경로 손실이 증가한다.

RF-DC 정류 효율과 DC-DC 변환 효율은 일반적으로 각각 60~70%, 80~90% 정도로 고려된다. 이외에도 효율에 영향을 주는 인자는 안테나 삽입손실, 대기의 상태, 각 연결부의 불완전한 임피던스 매칭, RF 커넥터 및 연장선 손실 등이 있다. 그러나 본 논문에서는 이러한 특성을 제외하고 식 (1)의 각 인자에 대한 영향에 초점을 맞춘다. 식 (1)을 보면, 거리에 따라 달라지는  $L$ 과 송수신 안테나 이득에 의해 효율이 큰 영향을 받는다. 그리고 RF-DC 정류 효율 및 DC-DC 변환 효율에 의해 최종적으로 무선전력전송 시스템의 효율이 결정된다. 여기에서 무선전력전송 시스템의 목표 효율과 전송 거리가 결정될 경우, 송수신 안테나의 이득을 계산할 수 있다. 송수신 안테나의 이득  $G_t G_r$ 을 얻기 위하여, 송신 안테나와 수신 안테나의 수와 구조를 효과적으로 선택해야 한다. 일반적으로 전력 수신기의 폼팩터(Form Factor)가 전력 송신기보다 작게 설계된다. 그러나 무선전력전송 시스템의 적용 애플리케이션(Application)에 따라 이는 얼마든지 변화할 수 있다. 전력 송신기에 요구 안테나 이득의 대부분을 할당한다면, 안테나의 수는 기하급수적으로 늘어나게 되며, 폼팩터 역시 크게 증가할 것이다. 반면, 전력 수신기에 적절하게 요구 안테나 이득을 배분한다면, 송수신기 모두 적절한 수의 배열 안테나를 이용하여 목표  $G_t G_r$ 을 만족시킬 수 있다.

본 논문에서는 식 (1)을 바탕으로, 전력 송수신기 간의 거리가 2m, 사용 주파수는 2.45GHz, 무선전력전송 효율이 5%인 전력 송수신기를 설계한다. 이때 RF-DC 변환 효율은 60%를 고려한다. 여기에서 경로 손실은 40.22dB로 계산된다. 주어진 조건을 바탕으로 송수신기의 안테나 이득을 계산하기 위한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 식 (1)을 바탕으로, 전력 송수신기 간의 거리가 2m, 사용 주파수는 2.45GHz, 무선전력전송 효율이 5%인 전력 송수신기를 설계한다. 이때 RF-DC 변환 효율은 60%를 고려한다. 여기에서 경로 손실은 40.22dB로 계산된다. 주어진 조건을 바탕으로 송수신기의 안테나 이득을 계산하기 위한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 10 \log_{10} \left( \frac{G_t G_r}{L} * 0.6 \right) &\geq 10 \log_{10} (0.05) \\
 G_{t,dB} + G_{r,dB} &\geq -13.01 \text{dB} + 2.22 \text{dB} + 46.25 \text{dB} \quad (3) \\
 G_{t,dB} + G_{r,dB} &\geq 35.4539 \text{dB}
 \end{aligned}$$

식 (3)에서  $G_{t,dB}$ 와  $G_{r,dB}$ 는 각각  $G_t$ 와  $G_r$ 의 dB 스케일 값이다. 최종적으로 송수신 안테나의 이득이 35.4482dB 이상 되어야 2.45GHz 주파수를 사용하여 2m 거리에서 5% 전송효율을 달성할 수 있다. 본 논문에서는 약 36dB의 이득을 얻기 위하여 송신 안테나부에 20dB, 수신 안테나부에 16dB를 할당하고, 이 조건을 달성하기 위하여 14dBi의 이득을 갖는 안테나 모듈을 사용한다고 가정한다. 일반적으로 안테나의 개수를 2배로 증가시키면 빔 이득은 3dB 증가하는 경향을 보인다. 따라서 송신기에는 20dB의 이득을 얻기 위하여 안테나 모듈 4개를 사용하고, 수신기에서는 16dB의 이득을 얻기 위하여 2개의 모듈을 사용한다.

이론적으로는 이 경우 송수신 안테나에서 총 37dB의 이득을 얻을 수 있다. 만약 송신기에 이득 대부분을 할당하게 된다면 매우 많은 수의 송신 안테나 모듈이 요구될 것이다. 예를 들어 전력 송신기에 약 22dB 이상의 요구 안테나 이득을 할당하면, 송신 안테나 모듈은 약 8개를 사용해야 한다. 이러한 경향은 주파수가 증가하고 거리가 멀어질수록 요구 안테나 이득이 증가하고 더욱 큰 수치의 이득 값을 전력 송신기에 할당하게 되면, 전력 송신기에서 필요로 하는 안테나 모듈의 수가 더욱 급격히 증가하게 될 것이다. 따라서 요구 안테나 이득을 전력 송신기와 전력 수신기에 적절하게 분배해야 한다. 이와 같은 사항들을 고려하여 전력 송신기와 전력 수신기를 구성한다.

본 논문에서는 2m 거리에서 전력전송효율 5%의 목표를 달성하기 위하여 그림 1과 같은 시스템 모델을 구성한다. 전력 송신기는 전원공급기, 2.45GHz의 발진기, 다단 증폭기, 전력 분배기, 안테나 모듈 4개로 구성한다. 그리고 전력 수신기는 안테나 모듈 2개, RF-DC 정류기 2개로 구성한다. 여기에서 RF-DC 정류기의 경우 입력 전력에 따라 효율이 달라질 수 있다. 너무 높거나 너무 낮은 전력이 RF-DC 정류기로 인가될 경우 정류 효율은 급감하는 특성이 있다. 그러므로 전체적인 Link Budget을 고려하여 송신 출력 전력을 설정해야 한다.

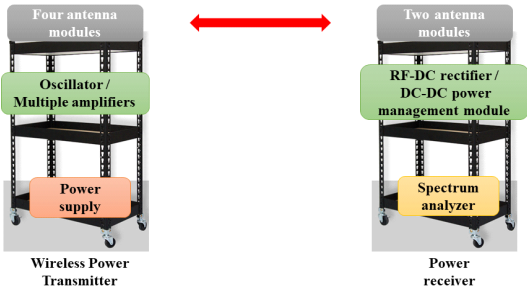
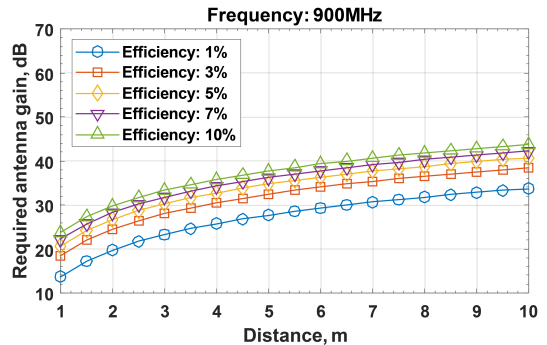


그림 1. 2m 거리에서 5%의 전력전송효율을 달성하기 위한 무선전력전송 시스템  
Fig. 1. Wireless power transmission system to achieve 5% power transmission efficiency at 2m distance.

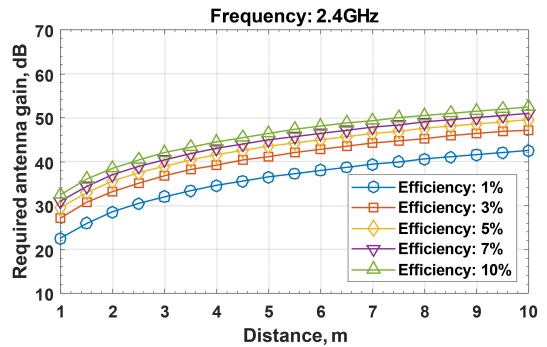
#### IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

시뮬레이션과 실험에 앞서 계산을 통하여 다양한 주파수 및 거리 조건에서 요구되는 전력 송수신기의 안테나 이득을 확인하였다. 무선전력전송 시스템은 목표 효율 및 주파수, 거리 등에 따라 전력 송수신기의 안테나 부에서 지원해야 할 이득이 결정된다.

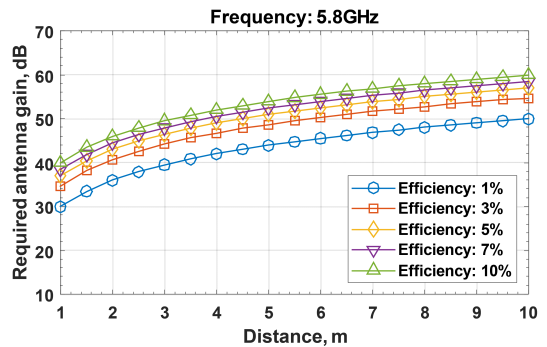
그림 2는 거리 및 사용 주파수에 따라 전력 송수신기에서 요구되는 총 안테나 이득을 그래프로 나타낸 것이다. 여기에서는 사용 주파수는 ISM대역인 900MHz, 2.45GHz, 5.8GHz를 고려하였고, 거리는 1m에서 10m까지 고려하였다. 그리고 전송효율은 1%, 3%, 5%를 고려하였다. 전체적으로 주파수와 거리, 목표 효율이 증가할수록 더욱 높은 안테나 이득이 요구



(a) 900MHz



(b) 2.4GHz



(c) 5.8GHz

그림 2. 목표 전력전송효율, 거리 및 사용 주파수에 따른 요구 안테나 이득  
Fig. 2. Required antenna gain according to frequency, distance, and target efficiency for wireless power transmission.

됨을 확인할 수 있다. 2m 거리에서 목표 효율을 5%로 설정하였을 때, 주파수가 900MHz, 2.45GHz, 5.8GHz일 경우, 각각 26.76dB, 35.45dB, 42.94dB의 안테나 이득을 요구하는 것을 확인할 수 있다. 높은 주파수를 사용할 경우 요구되는 안테나 이득 역시 높지만, 안테나의 크기가 감소하므로 한정된 공간에 많은 안테나 소자를 배열하여 더 높은 이득을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 2m 거리에서 전력전송효율 5%를 달성할 수 있는 무선전력전송 시스템을 설계하고, 이 시스템의 특성을 평가한다. 시뮬레이션 및 측정을 위한 파라미터는 다음과 같다. 무선전력을 송신하기 위한 신호의 주파수는 2.45GHz를 사용하였다. 이에 따라 경로 감쇄를 고려하여 요구되는 송수신기의 안테나 이득을 35.4539dB로 결정하고, 이를 만족시키기 위하여 전력 송신기에 20dB, 전력 수신기에 16dB의 요구 이득을 할당하였다. 이 요구사항을 만족시키기 위하여 하나의 모듈이 14dBi의 빔 이득을 갖는 패치(Patch)형 모듈 안테나를 사용하였다. 요구 이득을 만족시키기 위하여 각각 전력 송신기에는 4개, 전력 수신기에는 2개의 모듈 안테나를 사용하였다.

우선 본 논문에서 설계된 무선전력전송 시스템이 효과적으로 구현될 수 있는지 확인하기 위하여, 부분적인 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 첫 번째로, RF-DC 정류기에서 최대의 효율을 끌어낼 수 있도록 하기 위해, 정류기에 입력되어야 하는 전력량을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 둘째로 다수의 안테나 모듈을 배열하였을 때, 효과적으로 빔 이득이 증가하는 지 실험을 통해 확인하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터  
Table 1. Simulation parameter.

parameter	value
target efficiency	5%
frequency	2.45GHz
distance	2m
RF-DC rectifier efficiency	60%
path loss	46.2457dB
required antenna gain	35.4539dB
required Gt	20dB
required Gr	16dB
beam gain of an antenna module	14dBi
# of Tx antenna module	4
# of Rx antenna module	2
Diode for RF-DC rectifier	SMS7630

표 2는 RF-DC 정류기에 사용되는 SMS7630 다이오드의 세부 파라미터를 나타낸다. 그리고 그림 3은 SMS7630 다이오드를 사용하여 구성한 RF-DC 정류기의 이상적인 회로 모델과 실제 구현을 위한 Microstrip 선로를 사용한 회로 모델을 나타낸다. 이 정류기는 2개의 다이오드와 2개의 캐패시터를 이용하여 입력된 RF 신호를 전파(Full Wave) 정류한다. 그리고 정류기의 앞 부분에 임피던스 매칭 네트워크를 삽입하여 안테나로부터 입력된 신호가 반사되지 않고 정류기로 잘 입력 되도록 한다. 여기에서는 Stub를 추가하여 임피던스 매칭을 수행하였다.

그림 4는 그림 3에서 설계한 이상적인 회로도도 사용하는 정류기와 Microstrip 선로를 사용하는 정류기

표 2. SMS7630 다이오드의 파라미터  
Table 2. Parameters of SMS7630 diode.

parameter	unit	SMS7630
Is	A	5E-6
Rs	$\Omega$	20
N	-	1.05
TT	sec	1E-11
CJ0	pF	0.14
M	-	0.40
EG	eV	0.69
XTI	-	2
FC	-	0.5
BV	V	2
IBV	A	1E-4
VJ	V	0.34

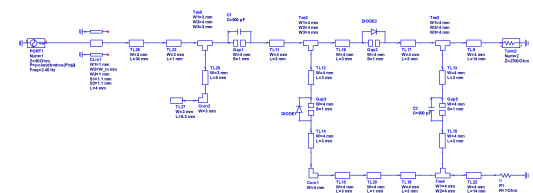
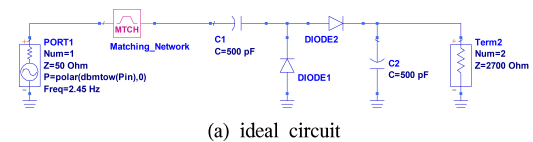
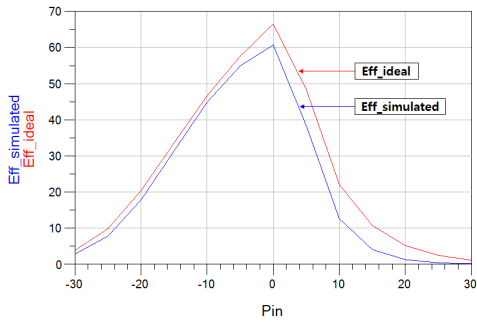
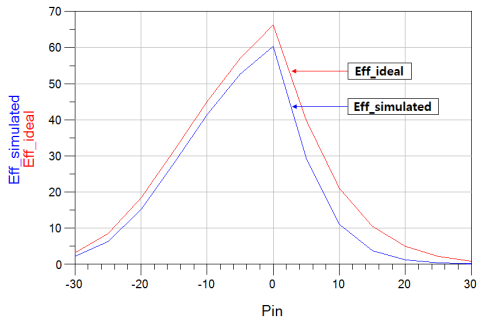


그림 3. RF-DC 정류기 설계를 위한 이상적인 회로도 및 Microstrip 선로를 이용한 회로도  
Fig. 3. Ideal schematic and schematic using microstrip lines for RF-DC rectifier design.



(a) ideal circuit



(b) circuit using microstrip line

그림 4. 이상적인 회로도 및 Microstrip 선로를 이용한 RF-DC 정류기의 효율.  
Fig. 4. Efficiency of RF-DC rectifiers using Ideal schematic and microstrip line.

모델의 시뮬레이션 결과이다. 빨간색 선은 RF 신호를 정류기에 입력하였을 때, 반사손실에 의해 반사된 전력을 제외하고 순수하게 입력된 신호가 DC 전력으로 변환되는 효율을 나타낸다. 파란색 선은 정류기에 입력되는 전체 RF 전력이 DC 전력으로 변환되는 효율을 나타낸다. 임피던스 매칭이 잘 될수록 파란색 선은 빨간색 선에 근접하게 된다. 시뮬레이션 결과를 통하여, 우선 이상적인 회로를 사용하는 정류기와 이를 Microstrip 선로를 이용하여 재구성한 정류기가 유사한 정류 효율을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고 반사된 신호를 제외한 RF 전력 대비 DC 전력의 변환 효율은 약 65%이며, 실제 입력된 RF 전력의 총량 대비 DC 전력의 변환 효율은 약 60%이다. RF-DC 정류기는 다양한 설계 방법을 통하여 70% 이상의 효율을 달성할 수 있다. 여기에서 중요한 점은 정류기에 입력되는 RF 신호의 크기가 클수록 좋은 것이 아니라 약 0dBm 크기의 신호가 입력될 경우 가장 높은 효율을 보인다는 점이다. 따라서 전체적인 Link Budget을 고려하여 전력송신기를 시작으로 전력수신기의 RF-DC

정류기에 도달하는 RF 신호의 크기를 0dBm으로 맞추어야 최적의 효율을 갖으면서 무선전력전송을 할 수 있다.

그림 5는 무선전력전송 시스템에서 목표 거리 및 효율을 달성하기 위하여 요구되는 다중 안테나 이득을 확인하기 위한 모델이다. 이를 통하여 안테나의 개수가 증가함에 따라 효율적으로 3dB 이득을 얻을 수 있는지 확인하였다. 모듈의 스펙이 2.45GHz인 발진기를 이용하여 시스템을 설계하였으나, 실측 결과 약 2.47GHz의 신호가 생성됨을 확인하였다. 이러한 오차는 발진기 자체의 설계 불완전성, 발진기에 입력되는 전압 오차, 발진기에 연결된 RF 회로들에 의한 임피던스 변화 등에 의해 발생할 수 있으므로, 최종 시스템을 구성할 경우에는 이러한 사항을 보완해야 한다. 계산된 경로 손실 값과 다중 안테나를 사용하여 전력을 전송할 때의 측정값은 표 3과 같다.

측정에서 스펙트럼 분석기의 침두치 값이 약 2 dB 범위 내에서 변동함으로 인하여, 측정된 값의 범위중 최대값을 선택하고, 소수점 이하의 값은 반올림하여 최종적으로 정수값으로 표현하였다. 실측 결과, 안테나를 1개, 2개, 4개로 증가시켰을 경우를 보면, 안테나 모듈의 개수를 2배로 증가시킬 경우 약 3dB의 이득을 얻을 수 있는 것을 확인하였다. 여기에서 스펙트럼 분석기의 침두치 값의 변동 존재하므로 정확한 수치보다는 안테나 모듈의 수를 증가시킬 경우 수신 신호의

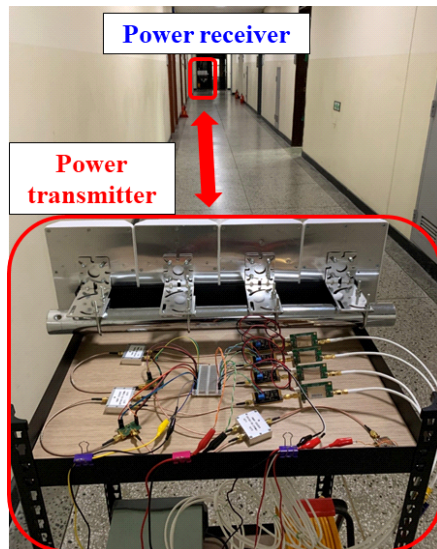


그림 5. 무선전력전송을 위한 다중 안테나 이득 특성을 확인하기 위한 시스템.  
Fig. 5. System for verifying multiple antenna gain characteristics for a wireless power transmission.



크기가 증가되는 경향에 초점을 맞추는 것이 효과적인 분석이다. 만약, 개별 안테나 모듈의 이득이 낮아질 경우, 더 많은 모듈을 구성하여 전체 안테나 이득을 증가시켜야 한다. 실험 결과를 정리해보면, 고이득 패치 안테나 모듈을 이용하여 ULA(Uniform Linear Array)로 구성할 경우에도 효과적으로 빔 이득을 개선시킬 수 있다. 그러나 안테나 모듈을 배열하는 구조의 불완전성 및 전력송수신기가 지향하는 방향이 정확히 일치하지 않을 경우를 고려하여, 요구 안테나 이득에 여유를 두어 시스템을 설계해야 한다.

시뮬레이션 및 측정을 통한 결과를 종합해보면, 정류기의 정류 효율 특성과 고이득 배열 안테나의 특성을 활용하여, 목표로 하는 무선전력전송 거리 및 효율을 달성하기 위한 시스템을 구성할 수 있다. 설계된 RF-DC 정류기는 0dBm에서 최고의 효율 60%를 보이므로, 목표 무선전력전송 효율을 고려하여 송신 출력  $P_t$ 를 계산하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 P_t + 20\text{dB} - 46.32\text{dB} + 16\text{dB} &= 0\text{dBm} \\
 P_t = 0\text{dBm} - 20\text{dB} + 46.32\text{dB} - 16\text{dB} & \quad (4) \\
 &= 10.32\text{dBm}
 \end{aligned}$$

즉, 송수신 안테나 이득 36dB, 효율이 60%를 RF-DC 정류기를 사용하여 거리가 2m, 전력전송효율이 5%인 시스템을 구성하기 위해서는 10.32dBm의 송신 전력이 요구됨을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 전체적인 시스템을 구현할 때, 커넥터 및 연장선의 손실, 안테나 구조의 불안정성, 채널 및 대기 환경 등의 다양한 손실 성분을 추가적으로 고려하여 송신 전력 크기를 조절하면 목표로 하는 무선전력전송 시스템을 효과적으로 구현할 수 있다.

표 3. 다중 안테나 개수의 따른 수신 전력 특성  
Table 3. Received power characteristics according to the number of multiple antennas.

	1m	2m	3m	4m
Path loss (2.47GHz)	40.29dB	46.32dB	49.84dB	52.34dB
1x1	1dBm	-6dBm	-11dBm	-17dBm
2x1	4dBm	-3dBm	-9dBm	-14dBm
4x1	7dBm	-0dBm	-6dBm	-11dBm

## V. 결 론

본 논문에서는 다중 안테나를 사용하는 무선전력전송 시스템의 Link Budget 기반 설계 방법과 특성 평가결과를 제시한다. 무선전력전송 시스템도 일반적인 무선통신 시스템과 같이 목표 전력전송 거리 및 효율을 달성하기 위해서는 다양한 요인을 고려하여 Link Budget을 구성하고 이를 바탕으로 전력 송수신기를 설계해야 한다. 특히, 사용하고자 하는 RF-DC 정류기의 효율을 먼저 결정하고, 이를 바탕으로 요구되는 안테나 이득을 계산하여 결정하여야 한다. 요구 안테나 이득이 결정되면 애플리케이션 및 시나리오에 따라 송신기와 수신기에 달성해야 하는 안테나 이득을 할당하고, 이를 바탕으로 배열 안테나를 구성해야 한다. 그리고 최종적으로는 최대 효율을 달성하기 위한 정류기의 입력 전력을 확인하고, 이를 바탕으로 송신 전력을 결정해야한다. 특히, 실제 시스템의 구현에서는 다양한 손실 성분들이 존재하기 때문에 이를 고려하여 송신 전력의 크기를 증가시킨다면 최종적으로 최적의 효율을 달성할 수 있는 무선전력전송 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

## References

- [1] P. Banelli, et al., "Modulation formats and waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM? An overview of alternative modulation schemes for improved spectral efficiency," *IEEE Sign. Process. Mag.*, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, Nov. 2014.
- [2] 3GPP TR 38.802 v. 14.2.0, "Study on New Radio (NR) Access Technology; Physical Layer Aspects," Tech. Spec. Group Radio Access Network, Rel. 14, Sep. 2017.
- [3] 3GPP TR 38.900 V14.3.1, "Study on Channel Model for Frequency Spectrum Above 6 GHz," Tech. Spec. Group Radio Access Network, Jul. 2017.
- [4] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, M. K. Samimi, and S. Sun, "Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design," in *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 9, pp. 3029-3056, Sep. 2015.
- [5] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision

of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,” arXiv preprint arXiv:1902.10265, 2019.

- [6] C. Bockelmann, et al., “Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks,” in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28969-28992, 2018.
- [7] C. Huang, S. Tseng, P. Lin, and Y. Kawamoto, “Radio resource scheduling for narrowband internet of things systems: A performance study,” in *IEEE Network*, vol. 33, no. 3, pp. 108-115, May/June. 2019.
- [8] S. Khang, D. Lee, I. Hwang, T. Yeo, and J. Yu, “Microwave power transfer with optimal number of rectenna arrays for midrange applications,” in *IEEE Ant. and Wireless Propag. Lett.*, vol. 17, no. 1, pp. 155-159, Jan. 2018.
- [9] C. Peng, et al., “On the load-independence of a multi-receiver wireless power transfer system,” in *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 563-565, Aug. 2019.
- [10] Y. Huang, N. Shinohara, and T. Mitani, “Impedance matching in wireless power transfer,” in *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp. 582-590, Feb. 2017.
- [11] B. Li, S. Liu, H. Zhang, B. Hu, D. Zhao, and Y. Huang, “Wireless power transfer based on microwaves and time reversal for indoor environments,” in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 114897-114908, 2019.
- [12] K. W. Choi, L. Ginting, P. A. Rosyady, A. A. Aziz, and D. I. Kim, “Wireless-powered sensor networks: How to realize,” in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 221-234, Jan. 2017.

**안 창 영 (Changyoung An)**



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)  
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2019년 8월 : 충북대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2019년 9월~현재 : 충북대학교 전자공학부 박사후연구원

<관심분야> 무선통신 시스템, 신호처리, B5G 이동통신 시스템

**유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)**



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학부 교수  
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

<관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리