

Retrodirective Antenna 기반 무선전력전송을 위한 전력 송수신기 설계 및 특성 평가

Design and Characteristic Evaluation of Power Transceiver for Wireless Power Transfer Based on Retrodirective Antenna

안 창 영 · 유 흥 균

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 link budget 분석을 통한 RDA(Retrodirective Antenna) 기반 무선전력전송 시스템 설계 방법을 제시하고, 이 방법의 가능성을 보이는 시뮬레이션 및 측정 결과를 제시한다. 이 시스템에서 전력 송신기는 전력수신기 방향으로 적응적 빔포밍을 하여 전력 신호를 전송할 수 있다. 이때, 파일럿 신호의 생성부터 정류된 전력 신호의 수신까지 다양한 인자를 고려해 시스템을 설계해야 무선전력전송을 위한 목표 거리 및 효율을 달성할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 link budget 분석에 기반이 되는 RF-DC(Radio Frequency to Direct Current) 정류기의 특성을 확인하였으며, 측정을 통하여 다수의 안테나 모듈을 사용하는 방법으로 요구되는 총 안테나 이득을 효과적으로 달성할 수 있음을 보였다. 즉, link budget 분석을 통해 RDA 기반 무선전력전송 시스템을 효과적으로 설계하는 것이 가능하다.

Abstract

This paper presents a retrodirective antenna(RDA)-based wireless power transmission system design method using link budget analysis. The simulation and measurement results demonstrate the feasibility of this method. The system can transmit a power signal by adaptive beamforming toward the power receiver. The system should be designed considering various factors from the pilot signal generation to the rectified power signal reception. Through this design method, the system can achieve the target distance and efficiency required for wireless power transmission. This study confirms the characteristics of the radio frequency-to-direct current rectifier used in the link budget analysis through a simulation. The measurement results indicate that the total antenna gain required can be effectively achieved by the design method using multiple antenna modules. In other words, the link budget analysis can be used to effectively design an RDA-based wireless power transmission system.

Key words: WPT, MPT, RDA, Link Budget, Efficiency

I. 서 론

최근 5G 이동통신의 목표 시나리오 중 하나인 mMTC

「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.」

충북대학교 전자공학부(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received December 26, 2019 ; Revised January 28, 2020 ; Accepted February 4, 2020. (ID No. 20191226-140)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cnu.ac.kr)

(massive Machine Type Communications) 또는 IoT(Internet of Things)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[1]~[4]}. mMTC 시나리오는 초 다수의 장치에 대해 효과적인 통신을 지원하는 것을 목표로 한다^[4]. mMTC 시나리오의 효과적인 확산을 위해서는 초 다수의 장치를 위한 효율적인 다중접속 기술을 연구 개발하는 것도 매우 중요하지만, 다수의 기기에서 요구되는 전력을 효과적으로 공급해주는 기술 역시 매우 중요하다. 초 다수의 기기들은 우선적으로 센서들과 같이 저비용, 저전력, 저속 통신 속도를 요구하는 장치들로 구성될 것으로 예상된다^[5]. 그리고 향후 점차적인 기술 발전을 통하여 보다 높은 성능을 갖고 다양한 처리를 하며, 고속 통신을 요구하는 기기들까지 효과적으로 지원하게 될 것이다. mMTC 기기들은 특정 위치에 설치될 수도 있지만, 임의의 넓은 지역에 불규칙하게 분포되거나, 이동성을 가질 수도 있다^[3]. 이러한 상황에서 각 기기들에 대한 배터리(battery)를 하나씩 충전하거나 교체하는 일은 매우 번거로운 일이며, 이렇게 될 경우 mMTC 시나리오가 효과적으로 확산되기 어렵다. 이처럼 초 다수의 기기들에 대한 전력공급 문제를 해결하기 위하여 최근 무선전력전송에 관한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[6]~[8]}. 무선전력전송은 자기유도, 자기공진 또는 RF(Radio Frequency) 신호를 활용하여 무선으로 전력을 전송하는 기술이다. 이중 장거리 무선전력전송에 적합한 방식은 RF 신호를 활용한 방식이다^[6]. RF 신호를 활용한 기술은 ISM(Industrial, Scientific and Medical) 대역의 신호를 이용하며, MPT(Microwave Power Transfer)라고 불린다. MPT 시스템의 목표는 전력전송 거리 및 효율을 증가시키는 것이다. 이를 위하여 다수의 안테나를 활용하여 전력 수신기의 위치로 전력 빔포밍(beamforming)을 해주는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반적으로 전력 빔포밍을 해주기 위해서는 전력 송신기에서 다수의 안테나로부터 수신받은 신호를 분석하여 DoA(Direction of Arrival)를 추정하고, 추정된 방향으로 빔포밍을 해주어야 한다. 그러나 DoA를 추정하는 방법은 다소 복잡한 신호처리를 요구한다. 이러한 신호처리의 복잡도 문제를 극복하기 위하여 무선전력전송에 RDA(Retrodirective Antenna) 기술을 활용하기 위한 연구가 이루어지고 있다^{[6],[9]}. RDA는 복잡한 신호처리 없이 각 안테나로 수신된 신호의 역위상 신호를 생성하여 전파가 입사한 방향으로 빔을 형성시키는 기술이다^{[10],[11]}.

무선전력전송에 RDA 기술을 활용할 경우, 전력 송신기에서 복잡한 신호처리 과정을 줄이고, 임의의 지역에 있거나 이동하는 기기들에 효과적으로 전력 빔포밍을 해줄 수 있다. 그러나 RDA 기술을 무선전력전송에 활용할 경우, 전력 수신기로부터 전송된 파울릿 신호가 전력 송신기를 거쳐 다시 전력 수신기까지 도달하는 경로에 대한 link budget을 효율적으로 구성해야 목표로 하는 무선전력전송 거리 및 효율을 확보할 수 있다. 본 논문에서는 이를 위하여 RDA 기술을 사용하는 무선전력전송 시스템을 link budget을 기반으로 설계하는 방법과 이에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과를 제시한다.

II. 무선전력전송 시스템

본 논문에서는 RF를 사용하는 MPT 시스템에 초점을 맞춘다. MPT 시스템은 전력 송신기와 전력 수신기로 구성된다. 일반적으로 MPT 시스템은 전력전송효율이 낮기 때문에, 다중 안테나를 이용하여 빔포밍을 하여 필요한 부분으로 전력 신호를 집중시킨다^[12]. 그리고 수신기에서도 더 많은 전력을 수신하기 위하여 다수의 안테나를 이용한다^{[6],[7]}. 우선 일반적인 무선전력전송 시스템의 전력 송신기와 전력 수신기를 살펴보면 다음과 같다. 전력 송신기는 발진기, 증폭기, 전력 분배기, 다중 안테나부로 구성된다. 발진기에서는 사용하고자 하는 대역의 주파수 신호를 생성한다. 그 다음 생성된 신호를 목표 전력까지 증폭한다. 이때 사용하고자 하는 증폭기의 최대 전력이 목표 전력치보다 낮을 경우, 다수의 증폭기를 병렬로 구성하여 목표 전력치의 신호를 생성할 수 있다. 그 다음 생성된 신호를 각각의 안테나 모듈로 분배한다. 전력 송신기에서 다수의 안테나 모듈을 사용할 경우, 안테나 모듈의 특성 및 배치 방법에 따라 빔 이득이 달라지므로 목표 시나리오를 고려하여 안테나부를 구성해야 한다. 다음으로 전력 수신기는 안테나부, 임피던스 매칭(impedance matching) 회로, RF-DC(RF to DC) 정류기, DC-DC(DC to DC) 변환 및 전력관리부로 구성된다. 전력 수신기에서는 전력 신호를 제한된 조건 내에서 최대한 많이 수신하기 위하여 다수의 안테나를 사용하는 것이 효율적이다. 이때, 송신 빔

패턴을 고려하여 안테나부를 구성해야 전력 신호를 효과적으로 수신할 수 있다. 예를 들어, 수평방향으로 전력 송신기의 빔폭(*beam width*)이 매우 좁을 경우, 다수의 안테나를 수평 ULA(Uniform Linear Array) 구조로 구성한다면, 중앙 부분의 안테나 부분에만 대부분의 전력신호가 집중되므로 전체적인 수신 안테나 이득을 얻기 어렵다. 이 경우 수직방향의 빔폭을 확인하고, 수직방향의 빔폭이 넓다면 전력 수신기의 안테나부도 수직으로 안테나를 배열하는 것이 효과적이다. 다음으로 수신된 RF 신호를 DC 전류로 변환하기 위해 RF-DC 정류기가 필요하다. 여기에서는 RF 신호가 정류기로 잘 입력될 수 있도록 정류기와 안테나 사이에 임피던스 매칭을 해주어야 한다^[8]. 마지막으로 정류된 DC 전력을 사용할 수 있는 전압으로 승압시키고, 이를 저장하기 위하여 DC-DC 변환 및 전력관리 네트워크가 사용된다. 일반적인 무선전력전송 시스템은 전력 송신기에서 신호를 생성 및 증폭하고, 빔포밍을 이용하여 송신하며, 수신기에서는 전력 신호를 수신하여 정류하고, 이를 승압하여 사용한다. 그러나 이러한 간단한 방식으로는 임의의 위치에 있는 전력 수신기에 전력 신호를 효과적으로 전송하기 어렵다. 그러므로 다양한 시나리오에 적용하기 위해서는 전력 수신기의 방향으로 빔포밍을 형성할 수 있는 적응적 무선전력전송 시스템이 요구된다.

적응적 무선전력전송 시스템은 전력 수신기에서 파일럿 신호를 먼저 송신하고, 전력 송신기에서는 수신된 파일럿 신호를 이용하여 전력 수신기 방향으로 빔을 형성한다. 적응적 무선전력전송 시스템을 설계하는 데에는 크게 DoA 추정 알고리즘 및 위상 천이기를 사용하는 방법과 RDA 구조를 사용하는 방법이 있다. DoA 추정 방법은 디지털 처리를 통해 구현되고, 신호처리 복잡도가 상승하는 반면^[13], RDA 구조를 사용하는 방법은 아날로그 영역에서 회로 구성을 통하여 구현되므로, 디지털 신호처리 부분을 최소화할 수 있다. RDA를 사용하는 무선전력전송 시스템 역시 일반적인 무선전력전송 시스템과 같이 전력 수신기는 임피던스 매칭 회로, RF-DC 정류기, DC-DC 변환 및 전력관리부를 가지고 있으며, 파일럿 신호 생성 및 증폭부와 파일럿 송신 안테나가 추가적으로 구성된다. 전력 송신기는 파일럿 수신 안테나부, 위상천이회로, 증폭기, 전력 송신 안테나부로 구성된다. RDA를 사용하는

무선전력전송 시스템은 파일럿 신호를 다시 증폭하여 전송하기 때문에, 전력 수신기의 파일럿이 전력 송신기를 거쳐 다시 전력 수신기로 돌아오는 구간에 대한 link budget을 분석하고, 이에 따라 시스템을 구성해야 한다.

III. 시스템 모델

본 논문에서는 link budget 분석을 통해 RDA 기반의 무선전력전송 시스템을 설계한다. 전력 수신기는 전력 신호를 요청하기 위한 파일럿 신호 송신부와 전력 신호를 수신하여 정류하는 전력 신호 수신부로 구성된다. 전력 송신기는 파일럿 신호 수신부와 위상천이부, 전력 송신부로 구성된다. 특히, RDA 기능을 구현하기 위해서는 반드시 파일럿 수신 안테나와 전력 송신 안테나는 배열안테나로 구성되어야 한다. 그림 1은 본 논문에서 설계하는 RDA 기반 무선전력전송 시스템 모델을 나타낸다.

우선 전력 수신기의 세부 구성은 다음과 같다. 첫 번째, 파일럿 송신부는 2.45 GHz의 발진기와 증폭기로 구성된다. mMTC 기기의 특성상 파일럿 신호를 증폭할 때, 많은 전력을 사용하기 어려우므로, 이를 고려하여 시스템을 구성한다. 생성된 파일럿 신호를 송신하는 안테나는 파일럿 신호의 빔 폭이 최대가 될 수 있도록 배열이 아닌 한 개의 모듈로 구성하여 구성한다. 두 번째, 전력 수신부는 다중 안테나 모듈, 임피던스 매칭 회로, RF-DC 정류기, DC-DC 변환 및 전력관리부로 구성된다. 송신된 전력을 더 많이 수신하기 위하여 모듈 안테나를 다중으로 사용하며, 각각의 전력 신호 수신 경로에는 임피던스 매칭 회로 및 정류기가 존재한다. 임피던스 매칭회로 및 RF-DC 정류기는 사용하는 주파수의 특성을 고려하여 마이크로스트립(microstrip) 선로로 구성한다. 세부적으로 임피던스 매칭 회로는 stub 형태로 구성하며, RF-DC 정류기는 SMS7630 다이오드(diode) 2개와 500 pF 커패시터(capacitor) 2개를 사용하여 전파(full-wave) 정류를 하는 회로로 구성한다. 그리고 각 안테나를 통해 정류된 DC 전력은 하나로 결합하여 DC-DC 변환 및 전력관리부와 연결한다. DC-DC 변환 및 전력관리부는 BQ25504EVM-674 모듈을 활용한다.

다음으로 전력 송신기의 세부 구성은 다음과 같다. 첫

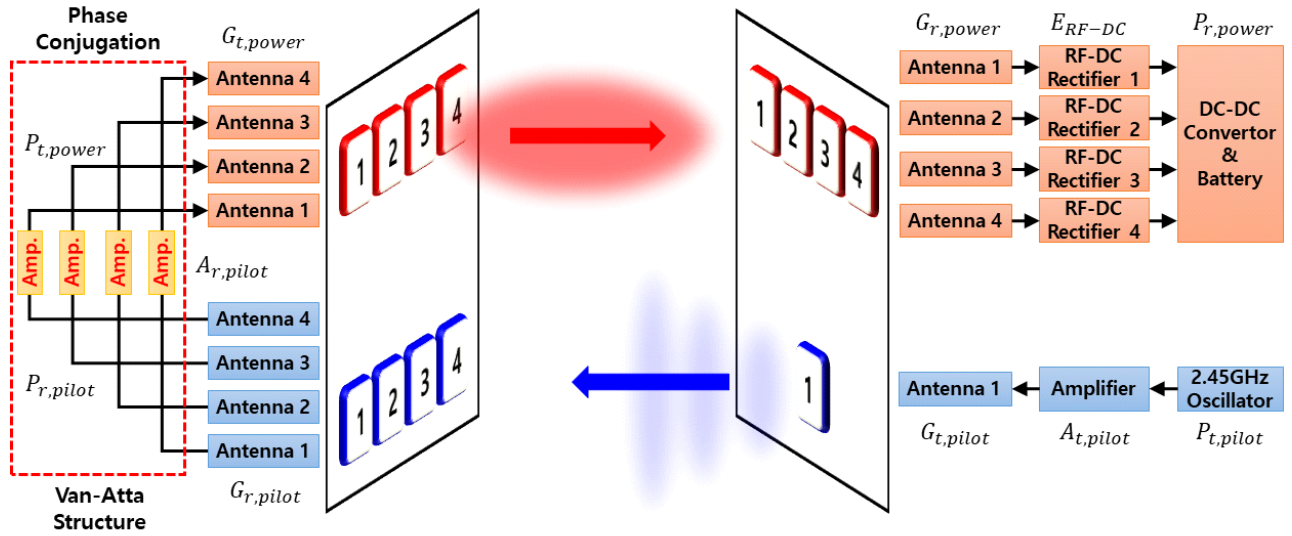


그림 1. Link budget 분석을 위한 RDA 기반 무선전력전송 시스템의 예시 모델

Fig. 1. Example model of an RDA-based wireless power transfer system for link budget analysis.

번째, 파일럿 신호 수신부는 파일럿 신호의 입사 방향에 따라 달라지는 위상 지연 특성을 활용하기 위하여 다중 안테나 모듈로 구성된다. 두 번째, 위상 천이 회로로는 가장 간단한 구조로 위상 천이를 할 수 있는 Van-Atta 구조를 사용한다. 다음으로 각각 위상 천이된 신호를 다단 증폭기를 이용하여 증폭한다. 이때, 증폭기를 전력 수신기의 정류기 효율 특성을 고려하여 구성한다. 그리고 다중 안테나 모듈을 이용하여 증폭된 신호를 빔포밍하여 송신한다.

전력 송신기와 전력 수신기를 구성할 때, 파일럿 수신부와 전력 송수신부의 안테나 모듈의 개수가 증가시키면 더욱 높은 빔 이득을 얻을 수 있으며, 더욱 많은 전력 신호를 수신할 수 있다^[14]. 그러나 이와 함께 전력 송신기의 위상 천이 및 다단 증폭부와 전력 수신기의 RF-DC 정류 모듈의 개수가 증가하여 복잡도와 제작 비용이 증가하고, 폼팩터의 크기가 커지게 된다. 따라서, 목표로 하는 무선 전력전송 거리 및 효율을 고려 link budget을 분석하고, 이를 바탕으로 전력 송수신기의 규모를 결정해야 한다.

RDA 기반의 무선전력전송 시스템을 사용할 경우, 전력 수신기가 전력 송신기의 정방향에 있지 않아도 적응적 빔포밍을 통해 전력을 전송할 수 있다. 따라서 RDA를

사용하는 무선전력전송 시스템을 설계할 때, 우선 목표로 하는 무선전력전송 거리와 효율을 먼저 결정해야 한다. 무선전력전송 시스템의 효율, E_{WPT} 는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_{WPT} &= \frac{P_{R,power}}{P_{T,power}} \\
 &= \frac{P_{T,power} G_{T,power} G_{R,power}}{LP_{T,power}} * E_{RF-DC} \\
 &= \frac{G_{T,power} G_{R,power}}{L} * E_{RF-DC}
 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서 $P_{T,power}$, $P_{R,power}$, $G_{T,power}$, $G_{R,power}$, E_{RF-DC} , L 은 각각 전체 송신 전력, 전체 수신 전력, 전체 전력 송신 안테나 이득, 전체 전력 수신 안테나의 이득, RF-DC 변환 효율, 경로 손실을 나타낸다. 일반적으로 DC-DC 정류기의 변환효율은 약 90 %이나, 본 논문에서는 DC-DC 변환 효율은 고려하지 않으며, 각 RF-DC 정류기의 출력 DC 전력을 합한 것을 수신 DC 전력으로 가정한다.

무선전력전송 거리 2 m, 전력전송효율 5 %를 목표로 RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계한다고 가정할 때, link budget 분석은 다음과 같은 절차로 진행된다. 무선전력전송 효율을 계산하기 위해서는 RF-DC 정류기의

효율을 가장 먼저 결정해야 한다. 본 논문에서는 0 dBm의 입력전력에서 약 60 %의 정류 효율을 갖는 정류기를 고려한다. 즉, 최대 효율로 무선전력전송을 하기 위해서는 전력 수신기에서 전송된 파일럿 신호가 전력 수신기를 거쳐 다시 전력 수신기에 수신되어 정류기에 도달했을 때, 0 dBm이 되어야 한다. 우선 주파수 2.45 GHz, 무선 전력 송수신기간의 거리 2 m, 정류기 효율 60 %인 조건에서 무선전력전송 효율 5 %를 달성하기 위해서는 전력 송수신기의 총 안테나 이득이 약 36 dB 요구된다. 이 요구 이득을 송신기나 수신기 한쪽에 할당할 경우, 요구되는 안테나 모듈의 수가 매우 증가한다. 따라서 송신기와 수신기에 적절하게 할당량을 분배해야 한다. 전력 송신기에 20 dB, 전력 수신기에 16 dB를 할당하고, 14 dBi의 이득을 갖는 안테나 모듈을 사용한다고 가정하면, 각 이득을 얻기 위하여 전력 송신 안테나 모듈은 4개, 전력 수신 안테나 모듈은 2개가 필요하다. 그리고 RF-DC 정류기의 입력부에서 RF 전력 신호의 크기가 0 dBm이어야 최대 효율로 정류할 수 있으므로, 송신 전력 크기는 전력 송신 안테나 이득 20 dB, 전력 수신 안테나 이득 14 dB, 경로 손실 46.32 dB를 고려하면 12.32 dBm로 계산된다. 즉, 12.32 dBm의 전력으로 송신할 경우, 4개의 안테나 모듈에 의해 20 dB 송신 안테나 이득을 얻고, 2 m, 2.45 GHz에 의해 46.32 dB의 경로 손실이 되며, 각 14 dB의 안테나 이득을 얻어 0 dBm의 전력이 RF-DC 정류기에 인가되며, 60 % 효율로 정류할 경우, -2.22 dBm의 전력이 수신된다. 여기에서 2개의 안테나 모듈로부터 전력이 수신되므로 0.78 mW의 전력이 수신된다. 이 경우, 전체 전송 효율은 약 7 %가 되며, 기존 목표치 5 %에 비해 높은 이유는 수신 안테나 이득이 16 dB 요구되지만, 단일 안테나 모듈의 이득이 14 dB이며, 2개를 사용하므로 17 dB의 수신 안테나 이득이 발생하기 때문이다.

예로 설계된 RDA 기반 무선전력전송 시스템은 최대의 무선전력전송 효율을 내기 위하여 약 12.32 dBm의 송신 전력이 요구된다. 여기에서 전력 송신 안테나는 4개를 사용하므로, 각 안테나로 인가되는 전력은 6.32 dBm이 된다. 이에 따라, 수신받은 파일럿 신호를 Van-Atta 구조를 통해 역방향으로 빔포밍을 할 수 있도록 신호를 구성한 뒤, 6.32 dBm까지 증폭 시켜주어야 한다. 전력 수신기에

서 2.45 GHz의 발진기가 0 dBm의 신호를 발생시키고, 이를 증폭없이 송신한다고 가정할 때, 전력 송수신기에서 안테나 모듈의 이득은 각각 14 dB이고, 경로 손실은 46.32 dB이므로 수신되는 파일럿 신호의 전력은 -18.32 dBm이 된다. 따라서 이를 6.32 dBm까지 증폭시키기 위해서는 약 24.64 dB의 증폭이 요구된다. 요구되는 전력 송신기의 증폭 수치는 파일럿 신호의 발생 크기에 따라 달라지게 된다. 그리고 이러한 link budget 계산 수치는 실제 구현에서 RF 연결 커넥터 및 케이블의 손실, 임피던스 매칭의 불완전성, 각종 소자의 삽입손실, 안테나 모듈 배열의 불완전성, 채널 환경, 빔폭에 의해 영향을 받을 수 있다.

전체적으로 RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계하는 방법을 다시 정리하면 다음과 같다. 우선 RF-DC 정류기의 효율을 고려하여 전력 송수신기에서 요구되는 총 안테나 이득을 계산한다. 그 다음 이득을 시나리오나 기기의 특성에 따라 전력 송신기와 전력 수신기에 이득을 분배한다. 그리고 각 이득을 얻을 수 있도록 안테나 모듈의 수를 결정한다. 다음으로 RF-DC 정류기에서 최대의 효율을 얻을 수 있는 입력전력을 확인한 뒤, 해당 전력이 입력될 수 있도록 송수신기 안테나 이득, 경로 감쇄를 고려하여 송신 전력을 결정한다. 다음으로 이 송신 전력을 얻기 위하여 전력 수신기의 파일럿 신호 출력 전력, 파일럿 송수신 안테나 이득, 경로 감쇄를 고려하여 파일럿 수신 전력을 계산한 뒤, 요구되는 송신 전력과 비교하여 요구되는 증폭 수치를 결정한다. 이러한 방법을 통하여 목표 거리 및 무선전력전송 효율을 달성할 수 있는 RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

본 논문에서 제시하는 RDA 기반 무선전력전송 시스템 설계를 위한 link budget 분석의 실현 가능성을 확인하기 위하여 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션 및 측정 결과를 보인다. 측정에서는 시스템의 요구 안테나 모듈의 개수는 더욱 많으나, 규모를 축소하여 안테나 모듈 개수의 증가에 따른 빔 이득 증가에 대한 경향성을 파악하며, 이러한 경향성이 파악될 경우, 추후 전체적인 시스템을 구현할 수 있을 것이다.

표 1은 시뮬레이션 및 측정을 위한 파라미터를 나타낸

표 1. 시뮬레이션 및 측정 파라미터

Table 1. Parameter for simulation and measurement.

Parameter	Value
Target efficiency	5 %
Target distance	2 m
Frequency	2.45 GHz
RF-DC rectifier efficiency	60 %
Path loss	40.22 dB
Required antenna gain	36 dB
Required Gt	21 dB
Required Gr	15 dB
Beam gain of an antenna module	9 dBi
# of required Tx antenna module	16
# of required Rx antenna module	4
# of Tx antenna module used for measurement	4
# of Rx antenna module used for measurement	2
Diode parameters for RF-DC rectifier	SMS7630

다. 무선전력전송 효율 5 %, 거리 2 m를 목표로 2.45 GHz의 주파수를 사용하고, RF-DC 정류기의 효율이 60 %일 때, 경로 손실은 40.22 dB, 요구되는 총 무선전력송수신 안테나 이득은 약 36 dB이다. 우선 본 논문에서는 RDA 기반 무선전력전송 시스템의 link budget 분석을 위해 가장 먼저 결정해야 하는 RF-DC 정류기를 시뮬레이션하여 특성을 평가하였다.

RF-DC 정류기의 회로 구성 및 특성을 평가하는 시뮬레이션은 Keysight의 ADS(Advanced Design System)를 통해 수행되었다. 그림 2는 시뮬레이션을 위하여 설계된 microstrip 선로 기반의 RF-DC 정류기이다. 그리고 그림 3

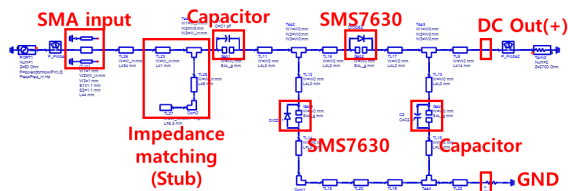
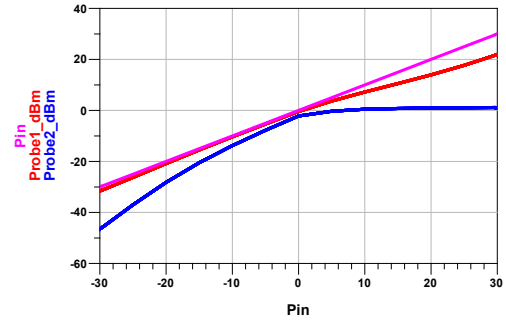


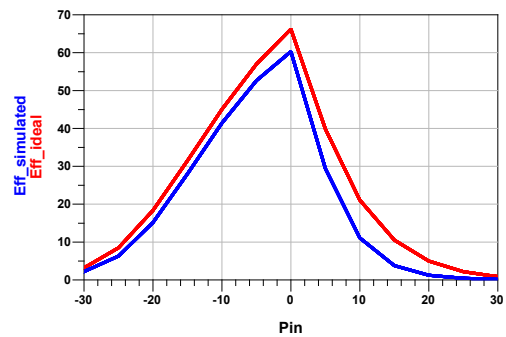
그림 2. 시뮬레이션을 위한 microstrip 선로 기반의 RF-DC 정류기 모델

Fig. 2. Microstrip line based RF-DC rectifier model for simulation.



(a) 입력 및 출력 전력

(a) Input and output power



(b) 정류 효율

(b) Rectification efficiency

그림 3. 설계된 RF-DC 정류기의 정류 효율

Fig. 3. Rectification efficiency of designed RF-DC rectifier.

은 설계된 RF-DC 정류기의 입력 전력 대비 출력 전력 특성을 나타낸다. 그림 3(a)에서 P_{in} 은 입력 전력 총량, $Probe1_dBm$ 은 신호 입력시 반사된 신호를 제외하고 실제 회로로 인가되는 전력량을 나타낸다. 그리고 $Probe2_dBm$ 은 정류된 DC 전력을 나타낸다. 시뮬레이션 결과, 입력 전력이 0 dBm 이하일 때는 입력 전력이 증가함에 따라 출력 전력도 증가하는 경향을 보이지만, 0 dBm 이상 부터는 입력 전력이 증가하더라도 출력 전력이 크게 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 입력 전력 대비 출력 전력에 대한 효율로 보면 그림 3(b)와 같다. 여기에서 Eff_ideal 은 $Probe1_dBm$ 대비 $Probe2_dBm$ 에 대한 효율이며, $Eff_simulated$ 는 P_{in} 대비 $Probe2_dBm$ 에 대한 효율이다. 결과적으로 0 dBm에서 가장 높은 정류 효율을 보이며, 전체 입력 전력 대비 출력 전력은 약 60 %의 효율로 정류됨을 확인할 수 있다.

다음은 RDA 기반 무선전력전송 시스템의 안테나부에 대한 특성 평가 결과를 보여준다. 우선 표 1의 요구되는 36 dB의 총 안테나 이득을 전력 송신기와 전력 수신기에 각각 21 dB, 15 dB로 할당하고, 9 dBi의 이득을 갖는 안테나 모듈을 사용하면 전력송신기에는 16개, 전력수신기에는 4개의 안테나 모듈이 요구된다. 안테나 모듈은 기존 개수의 2배가 되면 약 3 dBi의 이득을 얻을 수 있다. 이를 고려하면 각각 요구 안테나 이득을 달성할 수 있다. 표 2는 안테나 모듈의 개수에 따른 이상적인 빔 이득 수치를 나타낸다.

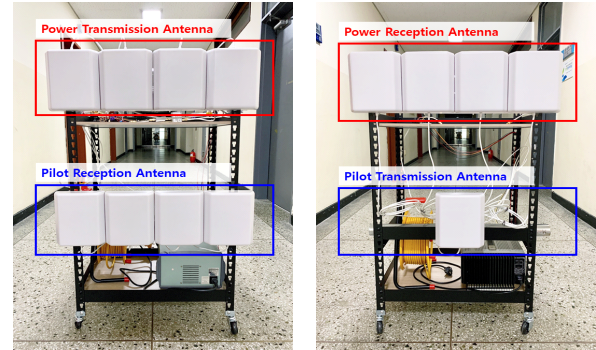
표 1의 목표를 달성하는 RDA 시스템을 구현하기 위해서는 전력송신 및 전력수신 안테나 모듈이 각각 16개, 4개가 요구된다. 그러나 실제 측정 과정에서는 전체 시스템의 규모가 크기 때문에 이를 축소하여 안테나 모듈을 4개까지 증가시켰을 경우의 전력 신호 및 파일럿 신호의 송수신 전력과 각 안테나 부의 빔 이득을 측정하였다. 이 측정 결과를 통해 빔 이득 증가의 경향성을 파악하면 목표로 하는 시스템을 구성할 수 있을 것이며, 또는 더 낮은 전력전송 효율과 거리를 지원하는 시스템을 설계하는데 활용될 수 있다. 그림 4는 이와 같은 측정을 위해 구현된 RDA 기반 무선전력전송 시스템이다.

구현된 RDA 기반 무선전력 송수신 시스템은 파일럿의 송수신부는 하단에 전력 송수신부는 상단에 위치되어 있다. 이러한 구조를 통하여 높은 송신 전력 신호가 파일럿 신호의 수신부에 미치는 영향을 줄이도록 하였다. 우선 전력전송 경로에 대한 측정을 하기 위해서 2.45GHz의 발진기와 다단 증폭기를 이용하여 30 dBm의 전력을 생성하였으며, 파일럿의 송수신 경로에 대해 측정을 하기 위해서는 증폭기 없이 2.45 GHz의 발진기만을 사용하여 6 dBm의 전력을 생성하였다. 그리고 무선전력 송신기와 수신기는 서로 LoS(Line of Sight)에 위치해 있으며, 무반사 챔버(chamber)가 아닌 일반적인 연구실 환경에서 측정하

표 2. 안테나 모듈의 개수에 따른 이상적인 빔 이득

Table 2. Ideal beam gain according to the number of antenna module.

# of antenna module	1	2	4	8	16
Beam gain [dBi]	9	12	15	18	21



(a) 전력 송신기

(a) Power transmitter

(b) 전력 수신기

(b) Power receiver

그림 4. 측정을 위해 구현된 RDA 기반 무선전력 송수신 시스템

Fig. 4. RDA-based wireless power transmission and reception system implemented for measurement.

였다. 각 환경에서 측정 결과는 표 3과 같다.

측정 결과를 보면, 전체적으로 전력 및 파일럿 신호의 수신전력에 대하여 계산치와 측정치에 대한 오차가 1.5 dB 이내에 있음을 확인할 수 있다. 우선 무선전력 송수신 경로에 대한 결과를 보면 3 m에서 송수신 안테나 모듈의 개수가 각각 1개, 1개일 때와 비교하여 송신기의 안테나 모듈이 2개로 증가하였을 때, 2.2 dB의 이득을 얻는다. 5 m에서 송신기 모듈이 2개에서 4개로 증가할 경우에는 약 2.23 dB의 이득을 얻는다. 다중 안테나 구성을 통하여 빔 이득이 개선됨을 확인할 수 있으며, 측정치는 이상적인 계산치인 3 dB와 비교하여 약 0.8 dB 정도의 오차를 갖는다. 더욱이 파일럿 송수신 경로에 대한 평가에서도 1개의 파일럿 송신 안테나로부터 송출된 전파가 파일럿 수신 안테나 모듈에 각각 수신되었을 때, 수신 전력은 최대 오차 0.76 dB 이내에서 측정되었다. 여기에서 추가적인 손실 성분의 영향을 극복하기 위해서는 안테나 모듈의 수를 더 증가시켜 다시 link budget을 분석하는 것이 필요하다. 이러한 시뮬레이션 및 측정 결과는 link budget 분석을 통한 RDA 기반 무선전력전송 시스템의 설계 및 구현이 가능함을 보인다.

추가적으로, 본 논문에서 수행된 실험은 전력송신기와 전력 수신기가 마주 보고 있는 상태에서 수행되었다. 그러나 전력수신기는 정면이 아닌 방향에 위치할 수도 있다.

표 3. RDA 기반 무선전력전송 시스템에서 전력 및 파일럿 신호에 대한 전력 측정 결과

Table 3. Power measurement results for power and pilot signals in the RDA-based wireless power transmission system.

Condition / parameter	Measured	Calculated (2.45 GHz)				Measured	Error ($P_{R,power}$) [dB]
	$P_{T,power}$ [dBm]	$G_{T,power}$ [dB]	L [dB]	$G_{R,power}$ [dB]	$P_{R,power}$ [dBm]	$P_{R,power}$ [dBm]	
2m, 1x1 (Power)	30	9	46.24	9	1.76	3.15 (2.448 GHz)	-1.39
3m, 1x1 (Power)	30	9	49.77	9	-1.77	-1.15 (2.467 GHz)	-0.62
1m, 2x1 (Power)	30	12	40.22	9	10.78	10.22 (2.465 GHz)	0.56
3m, 2x1 (Power)	30	12	49.77	9	1.23	1.05 (2.467 GHz)	0.18
5m, 2x1 (Power)	30	12	54.20	9	-3.2	-3.75 (2.47 GHz)	0.55
5m, 4x1 (Power)	30	15	54.20	9	-0.2	-1.52 (2.47 GHz)	1.32
2m, 1x1 (Pilot)	6	9	46.24	9	-22.24	-23 ~ -22 (2.465 GHz)	0.76

이러한 상황에서 RDA 기능이 없다면, 전력수신기가 정면에서 측면으로 이동할수록 수신 전력의 크기가 급격히 감소할 것이다. 그러나 본 논문에서 실험에 사용한 전력 송신기는 파일럿 신호를 다중 안테나 모듈을 이용하여 수신하고, 수신된 신호를 위상공액 처리 및 증폭하여 송신하므로, 전력수신기 방향으로 빔을 형성하여 전력을 송신할 수 있다. 즉, 빔 이득의 큰 감소 없이 전력을 전송할 수 있다. 물론, 본 논문에서 사용한 시스템은 패치 안테나 모듈을 이용하여 구성되었으므로, 정면을 기준으로 한계 각도 이내로만 적응적 빔 형성이 가능하며, 이러한 한계 각도는 안테나 모듈의 수와 형태 등에 따라 변할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 link budget 분석을 통하여 RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계하는 방법과 이와 관련된 시뮬레이션 및 측정 결과를 제시한다. RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계할 때, 이 시스템이 최고의 무선전력전송 효율을 갖도록 하기 위해서는 파일럿 신호의 송수신 경로와 증폭된 전력 신호의 송수신 경로에 대한 link budget의 분석이 중요하다. 본 논문에서는 파일럿 발진기, 파일럿 송신 안테나, 경로 손실, 파일럿 수신 안테나, Van-Atta 위상공액회로, 전력 신호 증폭기, 전력 송신 안테나, 전력 수신 안테나, 임피던스 매칭 회로 및 RF 정류기의 특성을 고려하여 시스템을 설계하는 방법을 제시하

였다. 그리고 RF-DC 정류기의 시뮬레이션을 통하여 전체 link budget을 계산하기 위한 정류 효율 특성을 파악하였고, 측정을 통하여 link budget에 의해 계산된 요구 안테나 이득은 다수 안테나 모듈을 사용하여 달성할 수 있음을 보였다. 즉, RDA 기반 무선전력전송 시스템을 설계함에 있어서 목표 전송거리와 효율을 결정하고, 사용 주파수와 RF-DC 정류기의 정류 효율을 고려하여 link budget을 분석하면 전체적인 시스템의 설계 및 구현을 효과적으로 할 수 있다.

References

- [1] *Study on New Radio(NR) Access Technology; Physical Layer Aspects*, 3GPP TR 38.802 V14.2.0, Sep. 2017.
- [2] *Study on Channel Model for Frequency Spectrum Above 6 GHz*, 3GPP TR 38.900 V14.3.1, Jul. 2017.
- [3] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Network*, pp. 1-9, Oct. 2019.
- [4] C. Bockelmann, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, and D. Gregoratti, et al., "Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 28969-28992, 2018.

- [5] C. Huang, S. Tseng, P. Lin, and Y. Kawamoto, "Radio resource scheduling for narrowband internet of things systems: A performance study," *IEEE Network*, vol. 33, no. 3, pp. 108-115, May/June 2019.
- [6] S. Khang, D. Lee, I. Hwang, T. Yeo, and J. Yu, "Microwave power transfer with optimal number of rectenna arrays for midrange applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 155-159, Jan. 2018.
- [7] C. Peng, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, and D. Gregoratti, et al., "On the load-independence of a multi-receiver wireless power transfer system," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 8, pp. 563-565, Aug. 2019.
- [8] Y. Huang, N. Shinohara, and T. Mitani, "Impedance matching in wireless power transfer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp. 582-590, Feb. 2017.
- [9] 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," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 114897-114908, 2019.
- [10] J. Bok, S. H. Lee, D. J. Shin, and H. G. Ryu, "Analysis of performance of digital retrodirective antenna technology in high-speed rail," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 11, pp. 1264-1271, Nov. 2012.
- [11] J. Bok, G. Y. Kim, and H. G. Ryu, "The communication security improvement technology using chaos modulation and retrodirective array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 4, pp. 410-416, Apr. 2013.
- [12] T. R. Roh, G. M. Kang, and O. S. Shin, "Feedback simplification scheme for wireless power transfer systems based on beamforming with phased array antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 3, pp. 195-201, Mar. 2019.
- [13] J. W. Paik, J. M. Kim, and J. H. Lee, "Closed-form expression of approximate ML DOA estimates in bistatic MIMO radar system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 11, pp. 886-893, Nov. 2017.
- [14] Y. Kim, S. Boo, G. Kim, N. Kim, and B. Lee, "Wireless power transfer efficiency formula applicable in near and far fields," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science(JEES)*, vol. 19, no. 4, pp. 239-244, Oct. 2019.

안 창 영 [충북대학교/박사후연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7829-7866>



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)

2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)

2019년 8월: 충북대학교 전자공학과 (공학박사)

2019년 9월~현재: 충북대학교 전자공학부

박사후연구원

[주 관심분야] 무선통신 시스템, 신호처리, 이동통신 시스템

유 흥 균 [충북대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7368-9860>



1988년~현재: 충북대학교 전자공학부 교수

2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장

[주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리