

# 효과적인 무선전력전송을 위한 ESPAR 안테나 설계 및 평가

안창영\*, 권형민\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Design and Evaluation of ESPAR Antenna for Effective Wireless Power Transfer

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

### 요약

본 논문에서는 RF(radio frequency) 신호를 사용하는 무선 전력 전송 시스템인 MPT(microwave power transfer) 시스템에 ESPAR(electronically steerable parasitic array radiator) 안테나를 적용한 시스템을 제안하고, 이 시스템에 사용하기 위한 3x3 ESPAR 안테나 설계 방법과 특성 평가 결과를 제시한다. MPT 시스템의 송신기에 ESPAR 안테나를 사용할 경우, 전력 소모 및 복잡도를 효과적으로 저감시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 설계된 3x3 ESPAR 안테나가 3D 빔포밍을 위한 빔 패턴 형성이 가능함을 확인하였으며, 다양한 리액턴스 집합이 적용된 상황에서도 2.45 GHz 대역을 효과적으로 지원하는 것을 확인하였다.

**Key Words** : wireless power transfer, beamforming, single RF chain, low complexity, ESPAR antenna

### ABSTRACT

In this paper, we propose a system in which an electronically steerable parasitic array radiator (ESPAR) antenna is applied to a microwave power transfer (MPT) system, which is a wireless power transmission system using a radio frequency (RF) signal. In addition, we also present the 3x3 ESPAR antenna design method and characteristics evaluation results for use in this system. When an ESPAR antenna is used for a transmitter of an MPT system, power consumption and complexity can be effectively reduced. Through simulation, it has been confirmed that the designed 3x3 ESPAR antenna can form a beam pattern for 3D beamforming, and it has been confirmed that it effectively supports the 2.45 GHz band even when various reactance sets are applied.

### I. 서론

최근 5G(5th generation) 이동통신 시대에 돌입하

면서 5G의 주요 시나리오 중 하나인 mMTC(massive machine type communication)와 관련한 IoT(internet of things) 시스템이 많은 관심을 받고 있다<sup>1-3)</sup>. IoT는

※ 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 2020년도 한국연구재단의 국제협력사업의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2020K2A9A2A08000106).

♦ First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 정희원

° Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정희원

\* Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, 학생회원

논문번호 : 202104-110-A-RN, Received May 26, 2021; Revised June 28, 2021; Accepted June 28, 2021

일반적으로 저전력 소비를 하는 수 많은 기기를 지원 하는 것을 목표로 한다. 대체로 이러한 기기들은 모바일 기기와 비교하여 상대적으로 낮은 통신 대역폭을 요구하며, 전력 소비가 매우 적은 특성을 갖는다<sup>4)</sup>. 이와 같은 특성을 갖는 시스템으로 다중 센서(sensor) 네트워크(network)가 있다. 이 네트워크는 다수의 센서로 구성되며, 각 센서의 정보를 수신하는 것이 목표이다. 이 네트워크에서 각 센서 기기들은 센서에서 정보를 수집하고, 이를 송신하기 위해 전력을 소모한다. 기존 소규모 센서 네트워크에서는 소형 배터리(battery)를 사용하고, 배터리를 주기적으로 교체해 주는 방식으로 운영을 하였다. 그러나 센서 네트워크의 규모가 점점 커지게 되면서, 수 많은 센서 기기의 배터리를 주기적으로 교체하는 것이 어려워 지고 있다. 현재, 이와 같은 IoT 기기의 전력공급 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중 하나로 RF(radio frequency) 신호를 이용하는 무선전력전송(wireless power transfer, WPT) 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>5-10)</sup>.

RF를 이용하는 WPT 기술은 MPT(microwave power transfer)로 분류된다. 이 기술은 장거리의 기기에 전력을 공급할 수 있는 장점이 있다. 그러나 거리에 따른 전파 감쇄 및 RF-DC(direct current) 변환 효율 등에 의해 전력전송 효율이 낮은 특성을 갖는다<sup>5)</sup>. 이러한 특성을 극복하고, 전력전송 효율을 높이기 위해서 MPT 시스템은 안테나 빔포밍(beamforming) 기술을 사용해야 한다<sup>11)</sup>.

일반적으로 빔포밍 기술을 사용하기 위해서는 다중 소자로 구성된 안테나가 요구된다. 그리고, 각 소자에는 전력을 소모하는 능동 소자들로 구성된 RF 체인(chain)이 연결된다. 즉, 배열 안테나의 안테나 수가 많아 질 경우 RF 체인의 수도 증가하여, 회로간 간섭, 발열, 폼팩터(form factor) 크기 증가, 소모전력 증가 등의 문제가 발생할 수 있다. 특히, 이러한 안테나를 MPT 시스템에 사용할 경우, 다중 RF 체인에 의해 발생하는 전력소모 증가로 인하여 전체적인 시스템의 전력전송 효율이 감소할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 단일 RF 체인을 사용하여 빔포밍을 할 수 있는 ESPAR(electronically steerable parasitic array radiator) 안테나를 MPT 시스템에 적용하는 방법을 제시한다. 본 논문에서는 효과적인 MPT 시스템 설계를 위해 전력 송신기 측에서 사용할 수 있는 마이크로스트립(microstrip) 패치(patch) 타입의 ESPAR 안테나를 설계하고, 전력 수신기의 위치에 따라 효과적으로 빔포밍을 수행할 수 있

도록 하는 리액턴스(reactance) 세트(set)을 파악한다. 설계된 안테나를 MPT 시스템에 결합할 경우 다양한 위치에 있는 전력 수신기의 방향으로 빔포밍을 효과적으로 수행할 수 있고, 다중 RF 체인으로 인한 문제점을 극복할 수 있으며, 소비 전력을 줄여 전력전송 효율의 개선을 기대할 수 있다.

## II. MPT 시스템

MPT 시스템은 낮은 전력전송 효율을 극복하기 위하여 고효율 RF-DC 정류기뿐 아니라 고이득 빔포밍이 가능한 배열 안테나 역시 필요로 한다. 일반적인 MPT 시스템의 송신기와 수신기는 그림 1과 같다.

그림 1은 MPT 시스템의 블록도를 나타낸다. MPT 시스템은 무선 전력 송신기와 무선 전력 수신기로 구성된다<sup>11)</sup>. 전력 송신기는 발전기에서 생성된 신호를 증폭하고, 위상 천이를 하여 다중 안테나를 통해 송신한다. 이러한 방법을 통해 고효율 전력 신호를 전력 수신기로 빔포밍하여 전송할 수 있다. 전력 수신기는 다중 안테나, 임피던스 매칭(impedance matching) 회로, RF-DC 정류기, DC-DC 변환기, 전력 관리 네트워크(network), 배터리로 구성된다. 전력 수신기는 RF 전력을 다수의 안테나로 수신하고, 이를 DC 전력으로 변환하여 저장한다. MPT 시스템에서는 거리에 따른 감쇄와 임피던스 매칭 및 RF-DC 변환 효율에 따라 전체 전력 전송 효율이 크게 영향을 받는다. 따라서 전력 수신기에서는 효과적인 임피던스 매칭 회로 구성과 고효율 RF-DC 정류기를 사용해야 한다. 그리고 전력 송수신기에서는 다수의 안테나를 사용하여 송수신 안테나 이득을 높여 경로 손실로 인한 전력 전송 효율의 감소를 극복해야 한다.

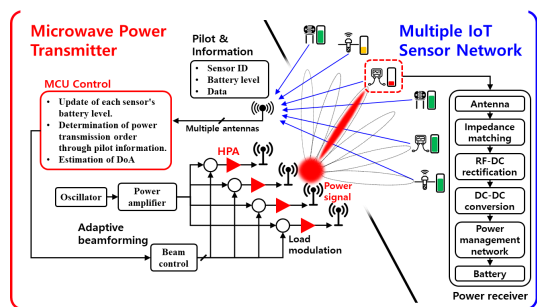


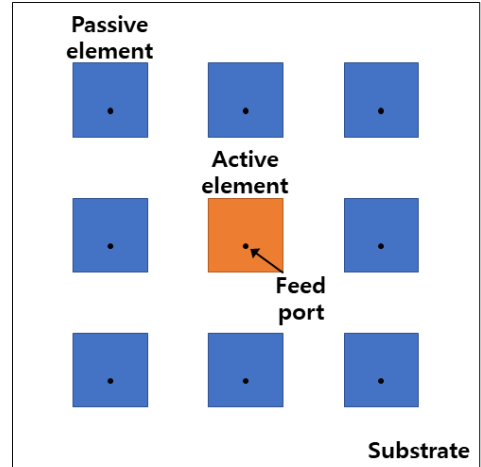
그림 1. 무선 전력송신기와 전력수신기로 구성된 MPT 시나리오  
Fig. 1. MPT scenario using wireless power transmitter and receiver.

### III. MPT 시스템을 위한 ESPAR 안테나

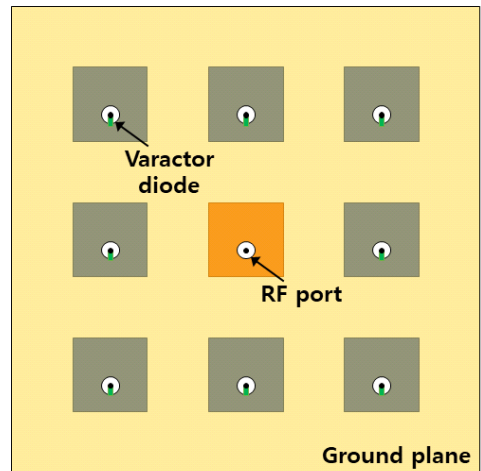
MPT 시스템에서 빔 조향이 가능하고 높은 송신 안테나 이득을 얻기 위하여 다수의 소자로 구성된 배열 안테나를 사용한다. 그러나 일반적인 배열 안테나의 경우, 안테나를 구성하는 능동 소자의 수를 증가시킬수록 더욱 높은 빔 지향성과 이득을 얻을 수 있다. 그러나, 능동 소자가 증가할수록 전력을 많이 소모하는 RF 체인의 수 역시 증가하여 다양한 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 문제는 RF 체인을 하나만 사용해도 빔 조향과 빔포밍이 가능한 ESPAR 안테나를 적용할 경우 효과적으로 극복할 수 있다.

일반적으로 수직 및 수평으로 빔포밍을 하기 위해서는 2차원 배열 형태의 안테나를 사용한다. 이때, 안테나의 각 소자에는 능동 RF 체인이 연결되며, 배열의 크기가 커질수록 RF 체인 역시 증가하게 된다. 예를 들어 3x3 배열 안테나의 경우 9개의 RF 체인이 사용된다. 이러한 방법으로 배열 안테나의 크기를 증가시킬 경우 많은 RF 체인으로 인하여 RF 체인간 간섭, 높은 전력 소모, 발열, 폼팩터 크기 증가 등의 문제를 야기할 수 있다. 이러한 단점은 ESPAR 안테나를 사용하여 극복할 수 있다. ESPAR 안테나는 중앙에 하나의 RF 체인이 연결된 능동 소자와 주변에 리액턴스가 가변되는 수동 소자로 구성되어 있다. 그리고, 각 수동 소자의 리액턴스 값에 따라 빔 패턴이 바뀌게 된다. 원하는 방향으로 빔포밍을 하기 위해서는 안테나를 설계한 후, 각 리액턴스 값을 적용시켜 보면서 생성되는 빔 패턴을 파악해야 한다. 본 논문에서는 일반 2차원 배열 안테나의 단점을 극복 하기 위한 2차원 배열의 ESPAR 안테나를 설계하고, 3D 빔포밍을 효과적으로 수행할 수 있도록 하는 리액턴스 값을 제시한다. 안테나의 설계와 시뮬레이션은 CST 안테나 설계 프로그램을 이용하며, CST에서 추출된 빔 패턴 특성을 MATLAB 프로그램을 이용하여 분석한다.

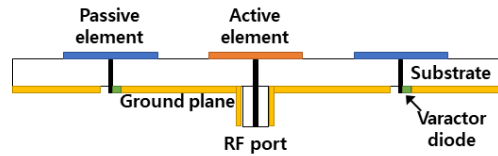
3D 빔포밍을 위한 ESPAR 안테나는 마이크로스트립 패치 소자를 2차원 배열하여 설계할 수 있다. 본 논문에서는 3x3 구조의 ESPAR 안테나를 설계하고 3D 빔포밍을 위한 리액턴스 값을 파악한다. 그림 2는 본 논문에서 설계한 3x3 구조의 ESPAR 안테나의 구성도를 보여준다. 우선, 전면을 보면, 중앙에는 RF 신호가 인가되는 능동 패치 소자가 위치하며, 주변에는 버랙터 다이오드 (varactor diode)가 연결되는 수동 패치 소자가 위치한다. 능동 소자에는 feed port를 이용하여 RF 신호를 급전한다. 패치 소자의 하단에는 substrate와 ground plane이 차례로 위치한다. 다음으



(a) front view



(b) back view



(c) side view

그림 2. 3x3 ESPAR 안테나 구조  
Fig. 2. Structure of 3x3 ESPAR antenna.

로 후면을 보면, 수동 소자에 연결된 port에는 커패시턴스(capacitance)를 조절할 수 있는 버랙터 다이오드가 연결된다. 이 다이오드는 양단에 인가된 DC 전압이 변하면 그에 따라 커패시턴스가 변화한다. 그리고 측면을 보면, 능동 소자에 연결된 RF 포트는 돌출된 형태로 구성되어 커넥터를 연결할 수 있도록 구성하였다.

#### IV. 시뮬레이션 결과 및 평가

본 논문에서는 MPT 시스템의 전력 송신기측에 사용하기 위한 단일 RF 체인 기반의 ESPAR 안테나를 설계하고, 특성을 평가한다.

ESPAR 안테나는 동작 주파수가 2.45 GHz 근처의 대역이 되도록 설계하였다. 그에 따라 안테나의 규격은 그림 3과 같이 설계하였다.

우선 안테나 구조를 보면, 패치 소자는 가로와 세로 길이가 27.12 mm이고, 각 패치 소자 간의 간격은 22.8 mm 이다. 그리고 substrate 크기는 가로 160

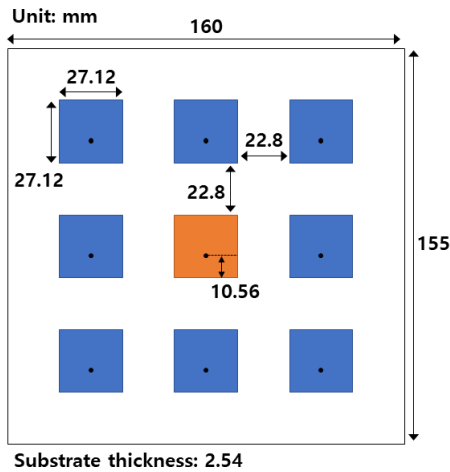


그림 3. 2.45 GHz 대역을 위한 3x3 ESPAR 안테나의 설계 스펙  
Fig. 3. Specification of 3x3 ESPAR antenna for 2.45 GHz band.

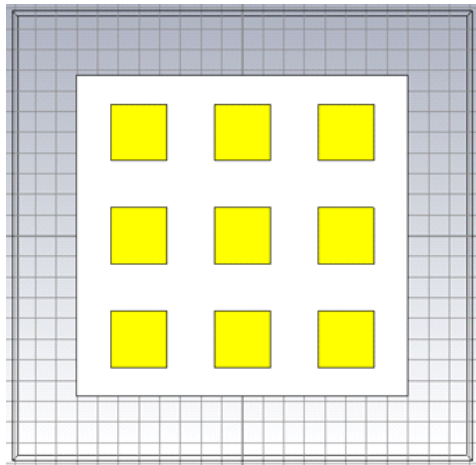


그림 4. CST에서 설계된 3x3 ESPAR 안테나  
Fig. 4. The 3x3 ESPAR antenna designed in CST.

mm, 세로 155 mm, 두께 2.54 mm 이다. 각 소자의 feed port는 하단에서 10.56 mm 이격된 곳에 위치한다. 다음으로, 안테나 소자와 접지면의 소재는 copper 이며, substrate는 FR-4 (lossy)를 사용하였다. 그림 4는 CST에서 설계된 ESPAR 안테나를 보여준다.

설계된 ESPAR 안테나의 빔포밍 특성을 확인하기 위하여, 각 수동소자에 인가되는 리액턴스를 1과 150로 변경하면서 시뮬레이션을 수행하였다. 8개의 수동소자가 각각 2개의 리액턴스 상태를 가지므로 총 256번의 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 5는 각각 설계된 3x3 ESPAR 안테나의 리액턴스 조합에 따른 S-parameter 특성을 나타낸다. 각 수동소자에 인가되는 리액턴스 집합이  $\{-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1\}$ 에서  $\{-150, -150, -150, -150, -150, -150, -150, -150\}$ 까지 256단계에 걸쳐 변함에 따른 S-parameter 특성을 보면, -10 dB를 기준으로 할 때, 대부분의 조건에서 이 안테나가 2.45 GHz 대역을 지원하며 동작할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 256가지의 리액턴스 조합에 따른 빔포밍

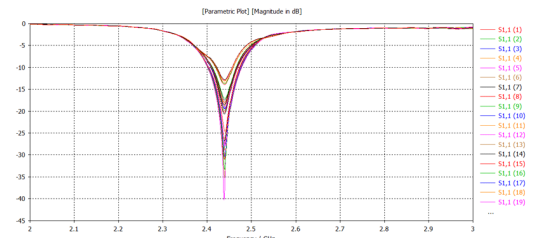


그림 5. 3x3 ESPAR 안테나의 S-parameter 특성  
Fig. 5. S-parameter characteristic of the 3x3 ESPAR antenna.

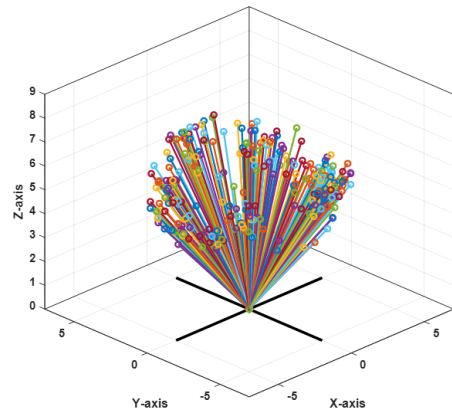


그림 6. 3x3 ESPAR 안테나의 빔포밍 특성  
Fig. 6. Beamforming characteristic of the 3x3 ESPAR antenna.

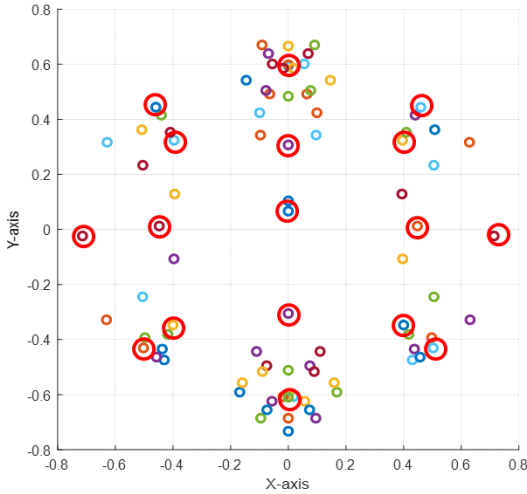


그림 7. 7 dBi 이상의 지향성을 갖는 경우의 빔포밍 방향 및 선택된 빔 패턴  
 Fig. 7. The beam directions with directivity above 7 dBi and the selected beam patterns.

의 방향과 이득을 벡터로 나타낸 것이다. 생성되는 빔 패턴의 지향 고도각(elevation angle)은 바닥면을 0°로 하고, 정면 방향으로 90°로 할 때, 약 60°에서 90°까지 변경할 수 있다. 즉, 전방을 기준으로 60° 범위를 지원할 수 있다.

그림 7은 지향성(directivity) 7 dBi를 기준으로 이보다 높은 지향성을 보이는 빔 패턴의 지향 방향을 보여준다. 즉, 안테나를 정면으로 보았을 때의 빔 방향을 보여주며, [0, 0]은 고도각 90°의 정면을 의미한다. 7 dBi 이상의 빔패턴 중 넓은 부분을 효과적으로 지원하기 위해 선택된 17개의 패턴을 보여준다. 작은 원은 지향성 7 dBi 이상의 후보 빔 패턴들이고, 붉은색 큰 원은 선택된 빔 패턴을 나타낸다. 선택된 17개의 빔 패턴에 해당하는 리액턴스 집합을 이용하면 다양한 위치의 전력 수신기에 효과적으로 빔포밍을 수행하여 고효율의 MPT 시스템 설계가 가능하다.

## V. 결 론

본 논문에서는 일반 2D 배열 안테나를 사용하는 MPT 시스템에서 전력 송신기의 다중 RF 체인에 의해 발생할 수 있는 고 전력 소모, RF 체인 간 간섭, 발열 증가, 폼팩터 크기 증가 등의 문제점을 효과적으로 극복할 수 있는 ESPAR 안테나 기반의 MPT 시스템을 제안하고, MPT 시스템에 효과적으로 사용할 수 있는 3x3 ESPAR 안테나 설계 방법과 성능 평가를 제시하였다. 본 논문에서는 2.45 GHz 대역에서 동

작할 수 있는 1개의 능동 소자와 8개의 수동 소자 갖는 3x3 ESPAR 안테나의 설계 스펙을 제시하였으며, 시뮬레이션을 통하여 안테나의 S-parameter와 빔 패턴 특성을 파악하였다. S-parameter 평가를 통하여 다양한 제안하는 안테나가 다양한 리액턴스 조합을 사용하더라도 2.45 GHz 대역에서 효과적으로 동작함을 보여주었으며, 빔 패턴 분석을 통하여 고도각 60°에서 90°까지 안테나의 전면방향을 효과적으로 빔포밍 하여 지원할 수 있음을 확인하였다.

## References

- [1] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, "The road towards 6G: A comprehensive survey," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 334-366, 2021.
- [2] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55-61, Mar. 2020.
- [3] L. Chettri and R. Bera, "A comprehensive survey on internet of things (IoT) toward 5G wireless systems," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 16-32, Jan. 2020.
- [4] H. Li, C. Yi, and Y. Li, "Battery-friendly packet transmission algorithms for wireless sensor networks," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 10, pp. 3548-3557, Oct. 2013.
- [5] C. Peng, et al., "On the load-independence of a multi-receiver wireless power transfer system," *IEEE Microw. and Wirel. Components Lett.*, vol. 29, no. 8, pp. 563-565, Aug. 2019.
- [6] Y. Huang, N. Shinohara, and T. Mitani, "Impedance matching in wireless power transfer," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp. 582-590, Feb. 2017.
- [7] 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.
- [8] K. W. Choi, L. Ginting, P. A. Rosyady, A. A. Aziz, and D. I. Kim, "Wireless-powered sensor networks: How to realize," *IEEE*



*Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 1, pp. 221-234, Jan. 2017.

- [9] B. T. Malik, V. Doychinov, A. M. Hayajneh, S. A. R. Zaidi, I. D. Robertson, and N. Somjit, "Wireless power transfer system for battery-less sensor nodes," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 95878-95887, 2020.
- [10] S. Kim and J. Choi, "Distributed wireless power transfer for multiuser multi-antenna systems using hybrid feedback," *J. KICS*, vol. 45, no. 9, pp. 1508-1516, 2020.
- [11] J. Bae, et al., "LUT-Based focal beamforming system using 2-D adaptive sequential searching algorithm for microwave power transfer," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 196024-196033, 2020.

**안 창 영 (Changyoung An)**



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학  
학과 (공학사)  
2015년 2월 : 충북대학교 전자공  
학과 (공학석사)  
2019년 8월 : 충북대학교 전자공  
학과 (공학박사)  
2019년 9월~현재 : 충북대학교

전자공학부 박사후연구원

<관심분야> 무선통신 시스템, 신호처리, 6G 이동통신  
시스템

[ORCID:0000-0002-7829-7866]

**권 형 민 (Hyeong Min Kwon)**



2020년 2월 : 충북대학교 전자공  
학과 (공학사)

2020년 3월~현재 : 충북대학교  
전자공학과 (석사과정)

<관심분야> 무선통신 시스템,  
WiFi 시스템, 안테나 설계,  
5G/6G 이동통신 시스템

[ORCID:0000-0001-8845-0951]

**유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)**



1988년~현재 : 충북대학교 전자  
공학부 교수

2002년 3월~2004년 2월 : 충북  
대학교 컴퓨터정보통신연구  
소 소장

<관심분야> 무선통신시스템, 위  
성통신, B5G/6G 이동통신 시  
스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리

[ORCID:0000-0002-7368-9860]