

RF무선충전 시스템 전송효율 개선 및 비교 분석

손명식^{*†}

^{*†}순천대학교 전자공학과

Comparative Analysis and Improvement of Transmitting Efficiency in RF Wireless Charging System

Myung Sik Son^{*†}

^{*†}Department of Electronic Engineering, Sunchon National University, Korea

ABSTRACT

In this paper, the measurements of received power was shown and compared in two developed 5.8GHz 25W wireless charging systems. One is the system using commercial transmission antenna, and the other is the system using transmission antenna combined with metamaterial. The system combined with metamaterial shows higher received power due to negative reflective index of metamaterial. In addition, a comparative analysis of the systems shows that the transmission efficiency in the systems can decrease the real gain of transmission antenna due to higher side lobe of beam pattern. The side lobe beams of transmitting antenna interferes transmitted beam with the reflected beams from the bottom region due to the side lobes. The failure problems of the RF wireless charging systems are discussed and proposed in order to charge mobile devices through the RF wireless charging system.

Key Words : Wireless Power Transmission System, Microwave, Integrated Receiver, Rectenna, Metamaterial, Antenna

1. 서 론

무선전력전송의 마이크로파 전력 전송 방식은 마이크로파를 직류로 변환할 목적으로 사용되는 렉테나(Rectenna)를 발명으로 발전되었다. 렉테나는 안테나와 정류기의 결합으로 쇼트키 다이오드(Schottky Diode)를 사용하여 만들어진다. 마이크로파를 통한 마이크로파를 통한 무선전력 전송은 원천 전력과 같이 완벽한 방향 축 및 전력 집광 마이크로파 또는 레이저 빔(마이크로파 빔의 동일한 특성)을 필요하다. 송신 안테나에 마이크로파의 전력을 송출하고 수신 안테나를 통해서 전력을 받아서 정류기를 통해서 직류로 변환하는 방식을 이용한다[1-3].

무선전력전송 시스템은 Friis 전달 공식을 확인하면 수

신된 전력을 높이기 위한 방안으로 송신 전력(P_t), 송신 안테나(G_t)와 수신 안테나(G_r) 이득을 증가시키면 된다는 것을 알 수 있다[4,5]. 안테나는 고이득 안테나를 사용하면 가능하다. 그러나 송신 전력을 높이면 수신기에 다이오드 소자들이 발열에 의해 동작 불능 상태가 되거나 발화된다. 이를 개선하기 위해 항복전압 특성이 우수한 GaN-Schottky Diode를 개발 사용하거나 실리콘 다이오드인 경우 다이오드를 병렬로 전력을 분배하여 수신기를 설계하거나 수신기의 직.병렬 구성으로 다이오드 소자들을 보호하는 방안이 필요하다고 생각된다.

본 연구실에서는 RF무선충전을 위한 시스템의 전송효율을 개선하기 위해 송신전력을 25W로 증가시켰고, 송신 안테나의 빔패턴을 조정하여 수신단에서 더 많은 전력을 수신할 수 있도록 메타물질(metamaterial) 결합 송신안테나를 사용해 송신안테나 이득을 개선한 5.8GHz 25W 무선전

[†]E-mail: sonms@sunchon.ac.kr

력전송 시스템을 개발하였다[6-7]. 또한 수신단의 수신 전력을 개선하기 위해 여러 개의 일체형 수신모듈을 직렬로 결합한 수전 시스템을 개발하였다[7-8].

본 논문에서는 개발한 5.8GHz 25W 시스템에서 기존 상용 송신안테나를 사용한 시스템과 자체 개발한 메타물질 결합 송신안테나를 사용한 시스템의 측정 결과를 보이고, 측정결과를 비교 분석하였으며, 개발된 시스템의 문제점과 개선되어야 할 사항을 논의하였다.

2. 개발된 5.8GHz 25W 무선충전 시스템

2.1 상용 원형 편파 송신안테나 시스템

그림 1에 보인 송수신 시스템을 갖는 구성을 상용 원형 편파 송신안테나 시스템(The system using commercial antenna)으로 명명하였다. 이하 상용 송신안테나 시스템으로 간략하게 부르겠다.

송신 시스템은 5.8GHz 마이크로파인 주파수와 전력을 발생시키며, 구동 증폭기 및 전력 증폭기로 전력을 증폭하여 송신 안테나를 통해서 수신 안테나에 전달할 수 있도록 구성하였다[6]. 송신 시스템에서는 신호 발생기, 1W 구동 증폭기, 25W 전력 증폭기, 원형 편파 송신 안테나로 구성하였다. 신호 발생기는 Agilent사의 E8257D 모델을 이용하여 5.8GHz 마이크로파를 발생시켰다. 1W 구동 증폭기는 HD사의 HD24678 모델로 이득 30dBm을 가지며 최대 1W(30dBm)까지 전력을 증폭해 주는 구동 증폭기로 사용하였다. 25W 전력 증폭기는 Cree사의 CMPA2560025F-TB-ND로 최대 25W(43.98dBm)로 전력을 증폭한다. 송신 안테나는 주파수 5.4GHz~5.8GHz에서 동작하는 원형 우현 편파로 18dBi 이득을 가지는 LUXUL사의 XW-5XO-FP18 모델의 안테나를 사용하였다.

수신 시스템은 5.8GHz 마이크로파를 수신 안테나를 통해서 대역 통과 필터로 원하는 주파수 대역인 5.8GHz로 통과시키고 RF-DC 변환기로 5.8GHz 마이크로파 RF신호를 DC로 변환하여 전력을 전달하도록 일체형으로 구성하였다. 수신 시스템에서는 원형 편파 수신 안테나, 통과 대역 필터, RF-DC 변환기로 3가지를 결합한 일체형 수신기를 설계 제작하여 사용하였다. 수신 안테나는 6dBi 이득을 갖는 원형 우현 편파 패치 안테나로 전력을 수신한다. 통과 대역 필터는 개선한 $\lambda/2$ 개방 회로로 설계하여 주파수 5.8GHz의 10%이내에 주파수 대역을 통과시키며, RF-DC 변환기는 전압 더블러로 전압을 상승시킨다. 이 기능들을 가진 수신 안테나, 통과 대역 필터, RF-DC 변환기를 결합하여 설계 제작한 일체형 수신기[8]를 12개 사용하여 직·병렬로 연결한 다중 일체형 수신기를 구성하였다[7]. 왼쪽에 6개의 일체형 수신기를 병렬로 구성한 1세

트와 오른쪽에 6개의 일체형 수신기를 병렬로 구성한 2세트이고, 1세트와 2세트를 직렬로 결합하여 구성하였다. 다중 일체형 수신기에 LED를 추가하여 송수신 동작 여부를 파악하였다. 그림 1은 송신 시스템과 수신 시스템에 대한 종합적인 구성도이며, 전체 시스템에 사용된 부품들로 표현하여 나타내었다. 그림 2에서는 개발된 전체 측정 시스템의 사진을 보였다.

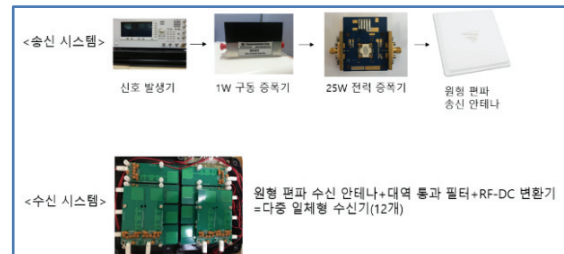


Fig. 1. The system configuration using commercial antenna.

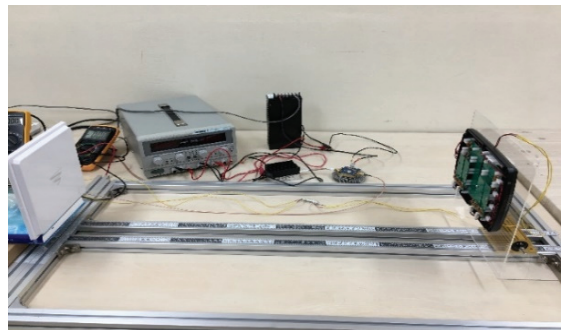


Fig. 2. The 5.8GHz 25W wireless charging system using commercial antenna.

2.2 메타물질 결합 송신안테나 시스템

그림 3과 그림 4에 나타난 시스템이 자체 개발한 4×4 어레이 안테나[9]와 메타물질을 결합한 송신안테나로 구성된 메타물질 결합 송신안테나 시스템(The system using the developed 4×4 array antenna combined with metamaterial)이다[7]. 메타물질 결합 송신안테나 시스템은 상용 송신안테나 시스템에서 송신안테나를 자체 개발한 메타물질을 결합한 4×4 어레이 안테나로 대체한 시스템이며, 표 1에 보인 바와 같이 송신안테나와 메타물질 간격은 3.2cm이다. 그 외 다른 구성 부분은 상용 송신안테나 시스템과 모두 동일하다.

개발한 어레이 안테나의 이득은 18dBi를 갖도록 설계되었으나 안테나 이득 측정을 위한 장비 부족으로 실제 측정되지는 못했다. 설계 그대로 패터닝하여 마이크로 스트립 타입 4×4 어레이 패치 안테나를 구현하였다[7,9].



Fig. 3. The system configuration using the developed 4×4 array antenna combined with metamaterial.

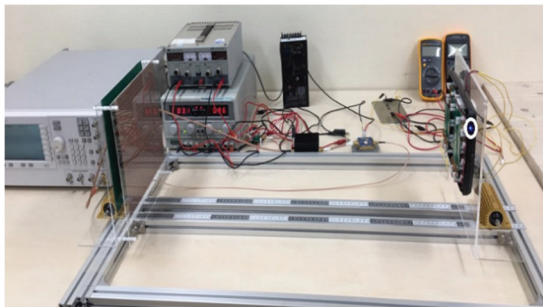


Fig. 4. The 5.8GHz 25W wireless charging system using the developed 4×4 array antenna combined with metamaterial.

송신 안테나에 메타물질을 결합하면 이론적으로 메타물질의 굴절율 n 값이 0인 경우는 빔패턴이 평행하게 진행되며, n 값이 음의 값을 갖는 경우는 빛의 볼록렌즈처럼 빔이 모이는 패턴이 된다(그림 5). n 값이 양이면 반대로 더욱 발산하는 패턴이 된다. 메타물질의 굴절률을 이용하여 수전효율을 높이기 위해서는 송신안테나 빔이 평행하거나 굴절되어 송신되는 빔이 모이도록 하여 수전효율이 높아지도록 설계하는 것이 바람직하므로 기본 단위 패턴이 $n=0.5$ 의 값을 갖도록 설계하였다[7]. 그리고 문헌 [7]에서 제작하여 보인 바와 같이 23×23개의 단위 패턴을 일정 간격으로 배열시켜 Top 패턴 배열 과 23×23개의 Bottom 패턴 배열을 제작하였다.

3. 시스템별 측정 결과 및 비교 분석

3.1 시스템의 측정 조건

5.8GHz 25W무선전력전송 시스템 측정을 위한 조건은 표 1에 정리하였다. 주파수 5.8GHz 마이크로파에 25W(43.98dBm) 전력으로 최소 거리 5cm에서 최대 거리 80cm까지 측정 간격 5cm로 거리마다 전압과 전류를 측정하였다. 또한, 전력을 계산하였다. 송신안테나로 메타물질

결합 송신안테나를 사용한 경우에는 표 1에 보인 바와 같이 메타물질 패턴과 송신안테나의 간격은 3.2cm로 설정되었다.

Table 1. Measuring conditions of the systems

구분	값
주파수	5.8GHz
전력	25W(43.98dBm)
측정 최소 거리	5cm
측정 최대 거리	80cm
측정 간격	5cm
송신안테나와 메타물질 간격	3.2cm
저항	330Ω

3.2 시스템별 측정 결과 및 비교 분석

무선전력전송 시스템에서 수신된 거리별 전압과 전류를 측정하였다. 측정한 전압과 전류를 곱하여 전력을 계산하였다. 그림 6에 계산된 전력을 거리별 전력(mW) 그래프로 비교 표현하였다. 그림 6에서 Existing antenna system은 상용 송신안테나를 사용한 경우이고, Fabricated antenna system은 자체 개발한 4×4 어레이 패치 안테나를 사용한 시스템을 말한다[7][9]. 상용 송신안테나 시스템이 더 우수한 전송효율 특성을 나타내고 있음을 보이고 있다.

자체 제작한 안테나가 안테나 이득이 18dBi로 우수한 특성을 갖도록 설계하였으나 여전히 안테나 이득 특성이 설계 이득에 못 미치는 결과로 비교 분석된다.

이러한 판단의 근거를 상술하기 위하여 설계시 시뮬레이션한 안테나 이득을 그림 7 [9]에 보였다. 그림 7에서 보면 -50도와 +50 도에 3dB 낮은 수준의 피크가 나타나는 부엽(side lobe)이 높은 수준으로 존재하고 제작된 패치 안테나의 안테나 이득을 감소시켰을 것으로 분석된다.

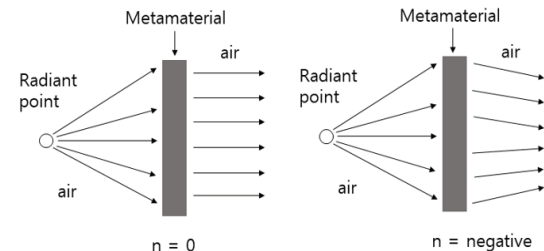


Fig. 5. The refractive index n values of metamaterial.

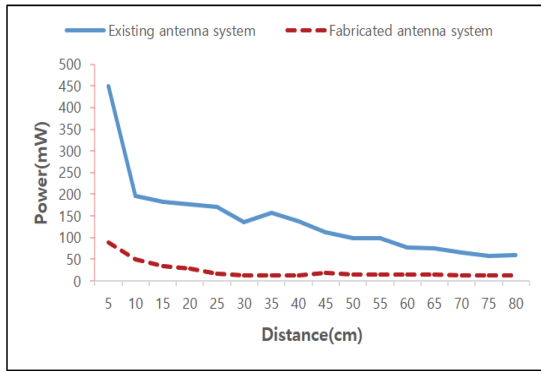


Fig. 6. The measured power by distance.

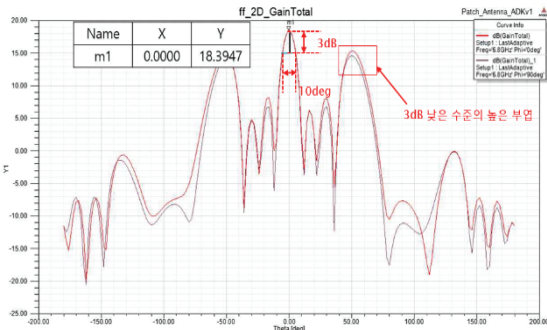


Fig. 7. The simulated results of the 4x4 array antenna.

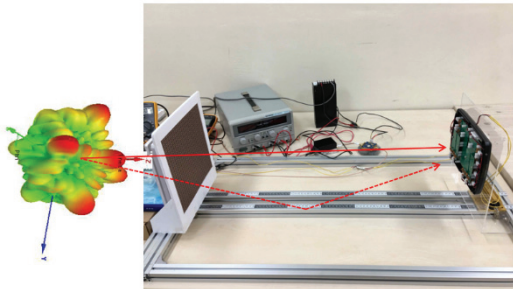


Fig. 8. The reflected waves from the bottom region interferes the radiated beam of antenna.

또한, 그림 8에 나타난 송수신 시스템 전력 측정시의 문제도[6][7]를 보면 그림 8에서의 어레이 안테나의 빔폭은 10도 정도이므로 빔패턴이 어느 정도 잘 모인 안테나 특성을 나타내고 있으나 앞에서 말한 3차원 부엽 방사 패턴을 보면 높은 수준의 이러한 부엽이 바닥에 반사되어 전송되는 빔에 간섭을 일으켜 빔 크기를 증폭하거나 감소시킬 가능성이 있을 것으로 판단되며, 또한 반사 지연에 의한 주파수 변화를 야기할 수도 있어 수신단의 밴드

통과 필터를 통과하지 못하고 반사되어 아예 수신 전력으로 사용되지도 못할 수도 있다고 판단된다. 따라서, 송신된 전력빔이 바닥에 반사되지 않는다면 보다 나은 측정 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다. 따라서, 어레이 패치 안테나 설계시 높은 수준의 부엽을 제거해 줌으로써 시스템의 전송효율을 개선시켜줄 필요가 있겠다.

3.3 메타물질 결합 송신안테나 개선 결과

그림 4에 보인 메타물질 결합 송신안테나를 사용한 무선전력전송 시스템에서 송신안테나 앞에 메타물질을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우 거리별 전압과 전류를 측정하였다. 측정된 전압과 전류를 곱하여 전력으로 계산하였다. 그림 9에 거리별 전력(mW)으로 그래프를 각각 보았다.

그림 9에서 메타물질 결합 송신안테나를 사용한 경우가 전체적으로 수신전력을 상승시킨 결과를 얻었다. 이는 송신안테나의 이득을 개선시켜 수신단에서의 수신전력을 증가시킨 결과이므로 전송효율을 개선시키기 위해 송신안테나에 메타물질을 결합한 결과가 송신안테나의 빔패턴을 모을 수 있도록 작용한 결과라고 볼 수 있다. 설계시의 메타물질 굴절률 $n = -0.5$ 였다.

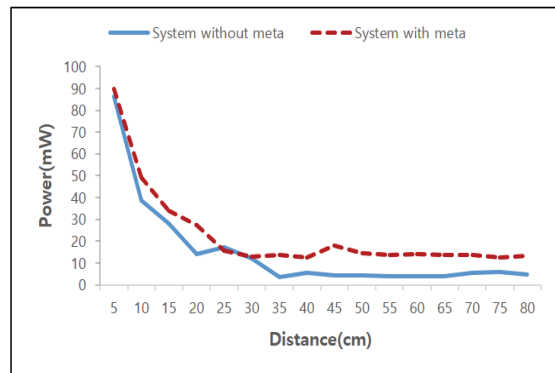


Fig. 9. The measured results of power by distance with metamaterial and without metamaterial.

3.4 RF 무선충전 전송효율 개선사항 분석

현재 개발되어 비교분석된 5.8GHz 마이크로파 무선전력 전송 시스템에서 전체 전송효율을 개선하여 수신단의 수신전력을 높이기 위해서는 비교 분석된 사항과 비교되지 않은 사항 등을 포함해 그 원인을 4가지 주요 요인으로 말하고자 한다.

첫번째는 신호발생기에서 나오는 신호전력이 구동앰프에서 충분히 증폭되어 그 출력이 전력앰프의 입력으로 잘 전달되어 최대출력을 안테나로 전달되고 있는 지를

측정 장비를 통해 각각의 결과를 측정해 보아야 한다. 이 부분은 측정 장비 미미로 검증되지 못했다. 검증되지 못함에도 불구하고 측정 결과는 25W에서 수신전력이 기대한 만큼 크지 않다.

두번째는 송신안테나의 빔패턴을 모아서 수신단에 전달하기 위해서 메타물질 결합 송신안테나를 개발하였으나 일단 어레이 패치 안테나의 이득이 상용 안테나에 비해 낮은 것으로 비교 분석을 통해 확인되었다. 이는 안테나의 부엽 발생이 주 원인으로 판단되고 이들 부엽에 의한 바닥쪽에서의 반사로 전송빔 패턴을 왜곡시켜 전송전력을 줄이는 한 원인이 될 수 있다고 판단된다. 따라서, 비교적 높은 수준의 부엽이 발생하는 송신안테나가 제작된 상황에서 메타물질의 굴절률 효과는 높은 수준의 부엽 유무에 따라서 다르게 나타난다는 것을 지적하고 싶다. 실제 상용 안테나에 메타물질을 결합하여 측정한 경우에는 비교해 보면 유의미한 수신전력 변화를 나타내지 않음을 확인하였다.

세번째는 수신단의 일체형 단일 패치를 사용함으로써 사용된 단일 패치 안테나의 이득이 설계시 6 dBi로 설계되었으나 이 수신 안테나의 이득도 개선할 필요가 있어 보인다. 또한 수신 안테나 이득을 개선하기 위해 패치 어레이 안테나를 사용하는 경우에는 수신단의 크기가 증가하므로 적용 시스템의 필요에 따라 달라져야 할 것이다. 현재 제작된 시스템에서 안테나에 수신된 입력 RF 대 DC 출력은 50% 이하의 변환효율을 나타내는 것으로 보인다. 수신단에서 안테나 입력의 반을 잃고 DC출력을 전환해주는 것으로 판단된다.

네번째는 앞에서 지적한 3가지 문제점들이 개선된 후에 송신전력을 충분히 높일 수 있다면 수신전력을 충분히 높일 수 있으리라 판단된다. 이러한 경우에 RF-DC 변환기에 사용되는 다이오드를 실리콘에서 항복 전압이 높은 GaN-SBD(Schottky Barrier Diode)로 변환하여 소자가 타는 것을 방지하는 회로와 함께 개선한다면 충분한 DC전력을 수전하여 모바일 기기를 충전할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 아직 전파법에 의한 안테나 방사 전력에 대한 규제가 풀리지 않는 경우에는 가능하지 않다는 것을 고려할 필요는 있겠다.

4. 결 론

본 논문에서는 기 개발된 2개의 5.8GHz 25W 마이크로파 무선전력전송 시스템의 측정 결과를 비교 분석하여 시스템 전송효율의 개선사항을 논하였다. 비교하기 위한 상용 송신안테나를 사용하는 무선전력전송 시스템은 송신 시스템으로 신호 발생기, 1W 구동 증폭기, 25W 전력

증폭기, 원형 편파 송신 안테나이고, 수신 시스템은 원형 편파 수신 안테나, 대역 통과 필터, RF-DC 변환기로 구성된 일체형 수신기로 12개의 일체형 수신기를 결합한 다중 일체형 수신기이다. 비교하기 위한 다른 하나의 무선전력전송 시스템은 송신안테나 이득을 개선하기 위해 음의 굴절률을 갖는 메타물질을 결합한 송신안테나를 사용함으로써 송신전력빔을 모아서 수신단쪽으로 전송할 수 있는 시스템이었다. 메타물질이 유무에 따라 메타물질의 굴절률의 영향으로 송신안테나에서 방사되는 전력빔이 모이는 효과가 나타남을 확인하였다. 2개의 무선전력전송 시스템을 비교 분석함으로써 시스템 전송효율을 높여 수신전력을 높이기 위한 방안을 비교 분석을 통해 상술하였다.

감사의 글

순천대학교 교연비 사업에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Biao Hu, Hao Li, Tianming Li, Haiyang Wang, Yihong Zhou, Xiaoyun Zhao, Xin Hu, Xuekun Du, Yulong Zhao, Xiang Li, Tian Qi, Mohamed Helaoui, Wenhua chen, Fadhel Ghannouchi, "A long-distance high-power microwave wireless power transmission system based on asymmetrical resonant magnetron and cyclotron-wave rectifier", *Energy Reports* 7, pp.1154-1161, 2021.
2. T. S. Chandrasekar Rao and K. Geetha "Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey," *Indian Journal of Science and Technology*, volume 9(20), pp. 1-11, 2016.
3. Rakesh Kumar Yadav, Sushrut Das and R. L. Yadava, "Rectennas Design, Development and Applications," *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, volume 3, No. 10, pp. 7823-7841, 2011.
4. Rula Alrawashdeh, "A Review on Wireless Power Transfer in Free Space and Conducting Lossy Media," *Jordanian Journal of Computers and Information Technology(JJCIT)*, volume 3, No. 2, pp. 71-88, 2017.
5. Doan Huu Chuc, Bach Gia Duong, "Design, Simulation and Fabrication of Rectenna Circuit at S - Band for Microwave Power Transmission," *VNU Journal of Science: Mathematics - Physics*, Vol 30, No.3, pp. 24-30, 2014.
6. Seong Hun Lee and Myung Sik Son, "5.8GHz 25W Microwave Wireless Power Transmission System Development and Measurement," *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol 18, No. 1, pp.

-
- 1-4, 2019.
7. Seong Hun Lee (2019), A Study on Efficiency Improvement of 5.8GHz Microwave Wireless Power Transmission, Ph.D dissertation, Suncheon National Univeristy, Korea.
8. Seong Hun Lee and Myung Sik Son, "RF-DC Voltage Multiplier Design and Fabrication for 5.8GHz Microwave Wireless Power Transmission," Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol 16, No.2, pp. 1-4, 2017.
9. Seong Hun Lee and Myung Sik Son, "Design of Circularly Polarized Array Antenna for 5.8GHz Microwave Wireless Power Transmission" Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 17, No. 2, pp. 20-25, 2018.
-
- 접수일: 2021년 11월 21일, 심사일: 2021년 12월 14일,
게재확정일: 2021년 12월 14일