

무선전력 전송효율 음영영역 제거와 최대효율 전송을 위한 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템

3D Scanning Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System to Eliminate Dead-Zones and Achieve Maximum Transfer Efficiency

김 정 수 · 이 규 식 · 김 남 윤* · 김 창 우

Jeong-Soo Kim · Gyu-Sik Lee · Nam-Yoon Kim* · Chang-Woo Kim

요 약

본 논문에서는 송신부 코일을 Pan-Tilt 모터를 사용한 3D 스캐닝을 통하여 전송효율 음영영역(dead-zone)이 제거된 최대 수신 전압을 갖는 영역(zone)을 짧은 시간 내에 정확하게 찾는 3D 스캐닝 MR-WPT(magnetic resonance wireless power transfer) 시스템을 제안한다. 이 시스템은 발진기, 전력 증폭기, MCU, PC, Pan-Tilt 모터, 송수신 코일, 정류기 그리고 송수신 통신부 회로로 구성된다. 이 시스템은 주기반 최대전송효율 탐색(zone-based maximal transmission efficiency searching process) 알고리즘을 적용하여 최대전송효율을 찾으며, 이때 찾은 전송효율 최대점은 Pan, Tilt 각도를 5°씩 나눠서 스캔하여 찾는 전체스캔(full scan)의 전송효율 최대점과 비교하여 측정시간은 11배 빠르고, 오차 또한 작은 것을 측정을 통해 확인되었다.

Abstract

This paper proposes a 3D scanning magnetic resonance wireless power transfer system to eliminate dead-zones and improve transmission efficiency. This system consists of an oscillator, power amplifier, microcontroller unit, personal computer, pan-tilt motor, transceiver coil, rectifier, and wireless communication units. This system provides the maximum voltage to the receiver within a short timeframe using the zone-based maximal transmission efficiency searching process algorithm. From the measurement results, it can be observed that the time to find the maximum transmission efficiency with this algorithm is 11 times faster than that of the full scan by 5° and that the position error of maximum transmission efficiency is less significant.

Key words: Magnetic Resonance, The Efficiency Dead-Zone, Coupling, Wireless Power Transfer System, Wireless Communication System

I. 서 론

최근 IoT의 기술이 점점 진보함에 따라 1인당 사용하

는 전자기기가 점점 늘어나고 있다. 1인당 사용하는 전자 기기 수가 점점 늘어남에 따라 전자기기들의 배터리를 편하게 관리할 수 있는 기술이 요구된다. 전자 제품들은

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학 ICT연구센터육성지원사업(IITP-2019-2016-0-00291) 한국연구재단의 기초 연구지원사업(No. 2019R1F1A1052728)으로 수행되었음.」

경희대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, KyeongHee University)

*대덕대학교 항공부서관과(Department of Aviation Engineering, DaeDuk University)

· Manuscript received October 30, 2019 ; Revised December 10, 2019 ; Accepted January 3, 2020. (ID No. 20191030-116)

· Corresponding Author: Chang-Woo Kim (e-mail: cwkim@khu.ac.kr)

교류 전원, 어댑터를 사용한 직류 전원 등 다양한 입력 전원을 필요로 하며, 대부분 유선 또는 배터리를 충전하거나 보조배터리를 사용하는 방식으로 전원을 공급하고 있다. 하지만 유선의 길이에 따른 장소와 이동의 제약, 케이블의 단선과 내구성으로 인한 전원 공급 제한, 감전과 화재 사고 위험, 복잡한 선들로 인한 미관상 문제가 있다. 최근 이러한 불편한 점을 제거하기 위해 무선전력전송에 관한 투자와 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서 사용된 무선전력전송 방식은 자기공명방식으로 마이크로파 방식과 비교하여 비방사형 자기장을 이용하기 때문에 전자파 장애가 적고, 자기 유도 방식에 비해 전력 전송 효율이 높고, 전송거리가 길다는 장점이 있다. 하지만 코일 크기에 비해 효율이 떨어지는 것과 송수신코일 간 특정 거리 이상 가까워지면 상호인덕턴스로 인한 효율 감소 그리고 송수신 코일 간 특정 각도에서 부정합으로 인하여 상호 인덕턴스가 급격히 감소하여 효율이 0 %로 되는 전송효율 음영영역(transmission efficiency dead-zone in wireless power transfer)이 생기는 문제점이 있다^{[1]~[3]}. 위 문제를 해결하기 위해 코일의 형태나 크기를 달리하여 전송효율을 높이려는 연구가 진행 중에 있으며, 상호인덕턴스 감소 문제를 해결하기 위해 수신 코일의 각도를 조정하거나, 코일을 직각으로 구성하는 방법 등이 있다^[4]. 본 논문에서는 전송효율 음영영역을 해결하고, 효율적인 전력 전달을 하는 시스템에 관한 연구를 진행하였다. 전송효율 음영영역과 제거 방법에 대하여 시뮬레이션과 측정을 통하여 분석하였으며, pan-tilt 모터를 통하여 송신 코일의 각도를 효율적으로 제어하는 알고리즘을 통하여 수신부의 위치가 바뀌었을 때 전력이 최대로 전송되는 지점을 지속적으로 찾아 전송효율 음영영역을 제거하는 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템을 연구 및 개발하였다.

II. 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템

2-1 전송효율 음영영역과 제거 방법

송신 코일과 수신 코일 간 특정 각도에서 부정합이 생긴다면 상호 인덕턴스가 감소하여 효율이 0 %로 되는 전송효율 음영영역이 생긴다. 그림 1은 송수신 코일 간 부정합에 따른 코일의 자속 변화와 전송효율 음영영역 제거

방법에 대한 개념도이다. 그림 2는 송수신 코일 간 거리가 부정합 거리에 따른 전송 효율 변화와 전송효율 음영영역 제거 그래프이다. 수신 코일이 D0에 위치할 때 결합되는 자속이 많아 효율이 높지만 D1을 거쳐 D2가 되었을 때 결합되는 자속이 줄어들게 되어 효율이 0 %에 가깝게 된다. 그리고 D3에 위치하게 되면 결합되는 자속이 다시 증가하여 효율이 증가하게 된다. D2에 수신 코일이 위치할 때 결합 계수가 감소하는 문제점을 해결하기 위해 본

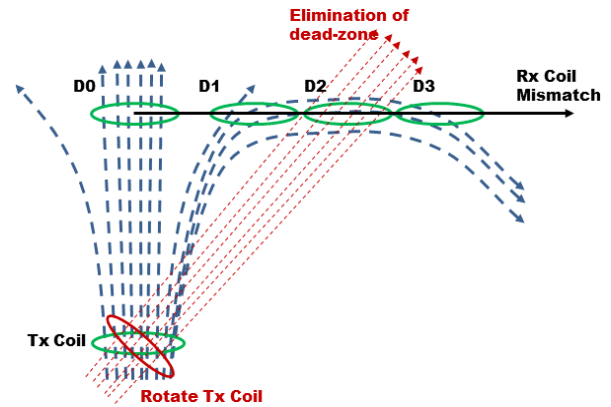


그림 1. 송수신 코일 간 부정합에 따른 자속 변화와 전송 효율 음영영역 제거 방법에 대한 개념도

Fig. 1. Conceptual diagram of the elimination method for the transmission efficiency dead-zone and magnetic flux variation according to Tx to Rx coil mismatch.

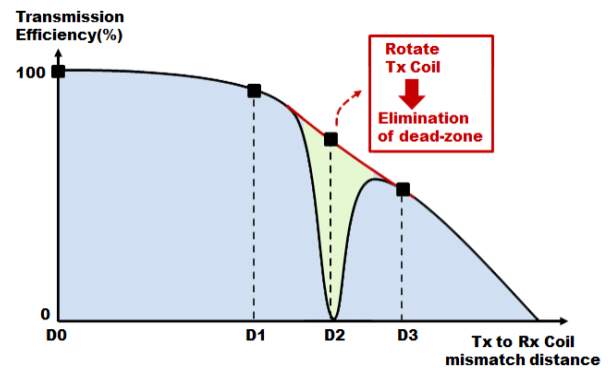


그림 2. 송수신 코일 간 부정합 거리에 따른 전송 효율 변화와 전송효율 음영영역 제거 과정 그래프

Fig. 2. Graph of the transmission efficiency variation according to Tx to Rx coil mismatch distortion and dead-zone elimination process.

논문에서는 송신 코일을 회전해서 결합되는 자속을 증가시켜 전송효율 음영영역을 제거하는 방법을 제안한다.

2-2 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템 구조

그림 3은 3D 스캐닝 MR-WPT(magnetic resonance wireless power transfer) 시스템 블록 다이어그램이다^[5]. 송신부(power transfer unit)의 회로는 전압 제어 발진기, 전력 증폭기 그리고 임피던스 정합 회로로 구성하였다. 송신 코일은 Pan-Tilt 모터와 함께 연결되어 있고, PC와 MCU를 통하여 모터의 움직임을 제어한다. 수신부(power receiving unit)에 전달된 RF 전력은 정류기를 거쳐 DC 전압으로 변환하고, DC-DC 컨버터를 통하여 최종적으로 사용할 수 있는 DC 전력으로 변환한다. 수신부에 연결된 모듈을 통하여 직류 전압을 측정한다. 측정된 결과를 Wi-Fi 통신으로 전송하여 PC에서 수신한 데이터를 확인한다.

그림 4는 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템의 제어 흐름도이다. Pan-Tilt 모터를 제어하여 송신 안테나의 각도를 제어하고, 수신부의 통신모듈에서 각도에 따른 수신 전압을 PC로 전송한다. 수신한 데이터에서 가장 높은 전압값을 찾아 전송효율 음영영역을 제거시키는 최적화된 송신 코일의 각도를 찾는다. 그 후 수신부의 위치가 바뀌어 수신 전압이 크게 줄어든다면 알고리즘을 통하여 최적화된 각도를 찾아 지속적인 전력 전송이 가능하게 한다. 그림 5는 제작한 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템 결합상태이다.

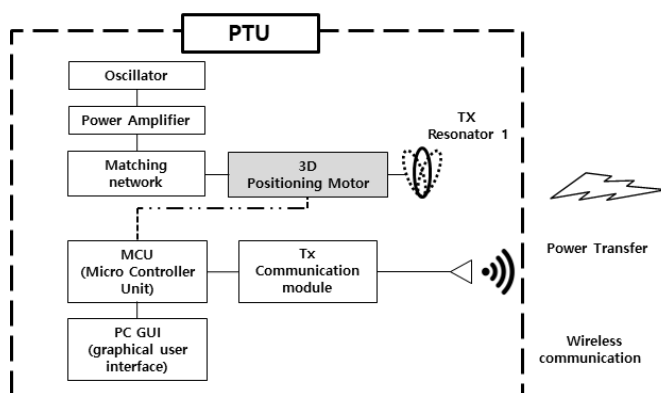


그림 3. 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템의 블록다이어그램
Fig. 3. Block diagram of the 3D scanning MR-WPT system.

2-3 존기반 최대전송효율 탐색 알고리즘

본 논문에서는 3D 스캐닝 무선 전력 전송시스템에서 전송 효율 음영 영역이 제거된 최대 전송 효율을 얻기 위

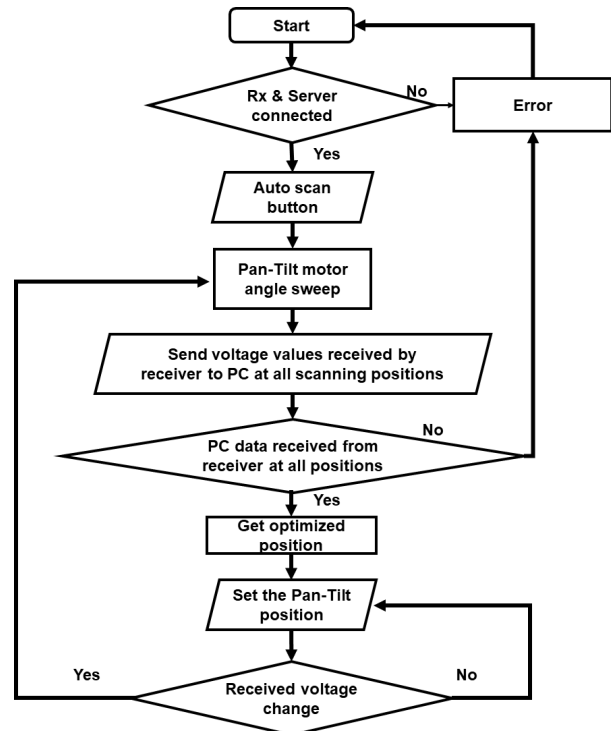


그림 4. 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템의 제어 흐름도
Fig. 4. Control flow chart of the 3D scanning MR-WPT system.

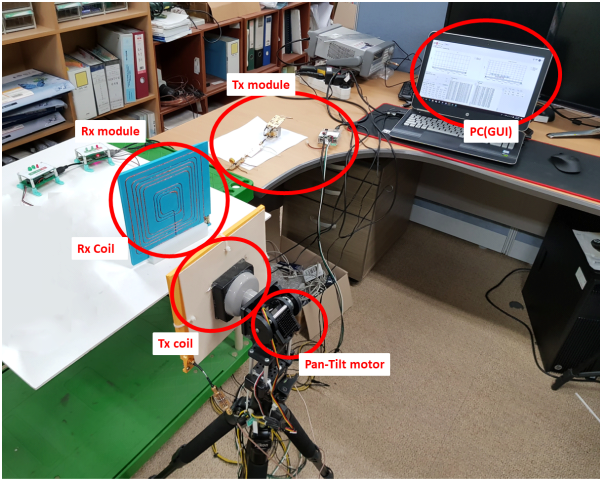


그림 5. 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템 사진
Fig. 5. Photograph of the 3D scanning MR-WPT system.

한 송신 코일 제어 알고리즘인 존기반 최대 효율 탐색 (zone-based maximal transmission efficiency searching process) 알고리즘을 제안한다. 이를 간단히 존기반 스캔(zone-based scan)이라 부른다. 그 개념도를 그림 6에 보이고 있으며, 알고리즘 step은 다음과 같다.

- Step 1. 먼저 4개의 존 (zone)을 스캔한 뒤 전압이 최대인 존을 찾는다.
- Step 2. 결정된 존에서 6개의 서브 존을 스캔한 뒤 step 1에서 찾은 존보다 전압이 더욱 높은 서브 존을

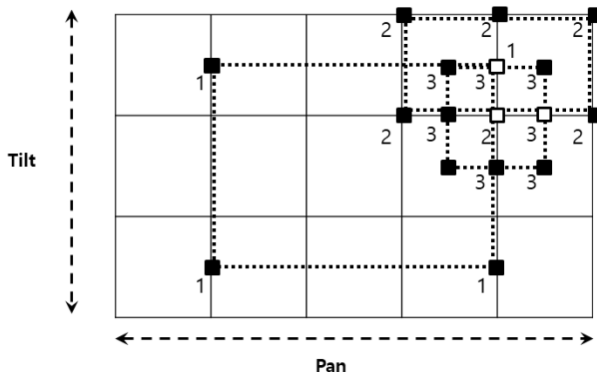


그림 6. 존기반 최대전송효율 탐색 알고리즘의 개념도
Fig. 6. Conceptual diagram of the zone-based maximal transmission efficiency search algorithm.

찾는다.

- Step 3. 마지막으로 step 2에서 찾은 서브 존 주변 8개의 존을 스캔한 뒤 step 2에서 구한 서브 존보다 전압이 높은 존을 찾고 스캔을 마치고 그 위치로 전력을 지속적으로 전송한다.

Pan과 Tilt의 각도 범위는 각각 $45^{\circ} \sim 120^{\circ}$ 와 $60^{\circ} \sim 105^{\circ}$ 라고 설정한 후 각도 분해능을 5° 로 설정한 각도를 모두 전체스캔을 한다면 총 198번을 스캔을 해야 한다. 존-기반 스캔을 한다면 횟수는 총 18번으로 전체를 스캔방식과 비교하여 스캔 시간이 11배 빨라졌으며, 정확도 또한 높은 것을 측정을 통하여 알 수 있다.

III. EM 시뮬레이션 및 측정 결과

3-1 HFSS 시뮬레이션 결과 및 측정 결과

전송효율 음영영역과 그 제거방법에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 7은 시뮬레이션에서 사용한 송수신 코일의 구조이다. 가로와 세로의 길이는 각각 172.5 mm이며, spiral 코일 구조를 가진다. 그림 8은 진행한 시뮬레이션의 환경이다. 송수신 코일 간 수직 거리를 15 cm로 설정하였다. 수신 코일을 수평으로 이동 시 송신 코일과 수신코일 간의 부정합이 나타나게 되는데, 수신 코일에 결합되는 자속이 줄어들어 효율이 감소된다. 이때 송신 코일을 회전시킨다면 결합되는 자속이 증가하여 효율이 감소되는 전송효율 음영영역을 제거할 수 있다. 그림 9는 시뮬레이션 결과이고, 그림 10은 실제 측정 결과이다. 송수신 코일간 거리를 15 cm로 설정하고, 부정합 거리가 특정 거리 이상일 때 효율이 급격하게 줄어들게 되는데, 이

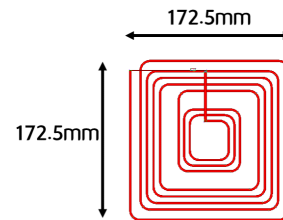
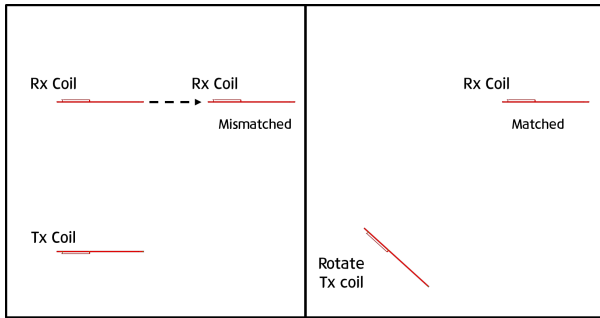


그림 7. 송수신 코일의 구조
Fig. 7. Structure of the Tx and Rx coil.



(a) 송수신코일 간 부정합
(a) Tx to Rx coil mismatch scheme
(b) 송신 코일의 회전을 통하여 부정합 제거
(b) Elimination of the mismatch through rotation of Tx coil

그림 8. 시뮬레이션 환경
Fig. 8. Simulation environment.

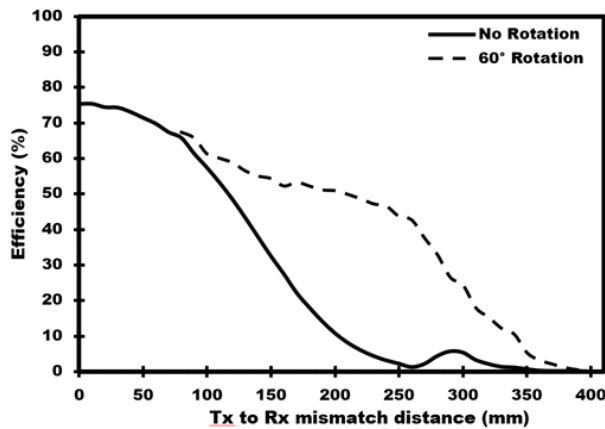


그림 9. 전송효율 음영영역과 제거 방법에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 9. HFSS simulation result of the dead-zone elimination method result.

때 송신코일의 각도를 60° 회전시켜 수신 코일에 결합되는 자속을 증가시켜 효율이 증가된 것을 확인할 수 있다.

3-2 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템 측정 결과

그림 11은 송수신 코일간의 수직 거리가 10 cm이고, 부정합 상태일 때 5° 전체 스캔 결과의 전압을 측정하여 MATLAB으로 동 전압에 대한 등고선도이다. 표 1은 그림 11 등고선도의 준기반 스캔 측정 데이터를 나타내고

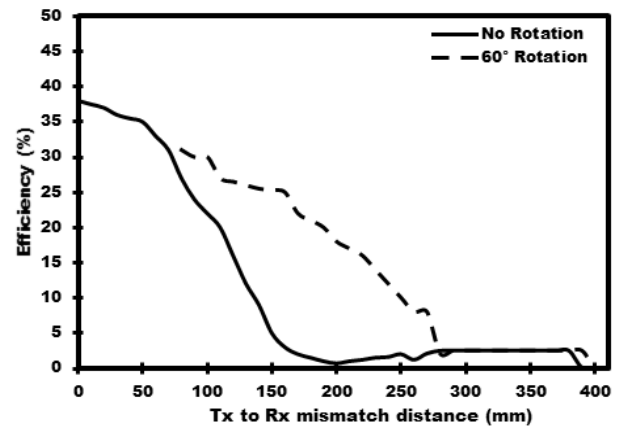


그림 10. 전송효율 음영영역과 제거 방법에 대한 실제 측정결과(송수신 코일 간 수직 거리 15 cm)
Fig. 10. Measured result of the dead-zone elimination method.

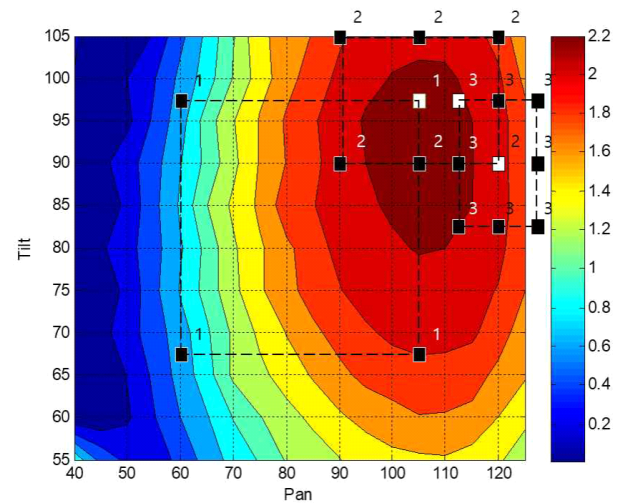


그림 11. 송수신 코일 배치에 따른 준기반 최대 전송 효율 탐색 알고리즘 측정 결과(송수신 코일 간 수직 거리 10 cm)
Fig. 11. Measured result of the zone-based maximal transmission efficiency search algorithm.

있다. 5° 전체 스캔 결과 전압이 최대인 구역과 최대 전압은 Pan: 105° , Tilt: 5° , 전압: 2.28 V이었다. 준기반 스캔 결과 전압이 최대인 구역과 최대전압은 Pan: 112° , Tilt: 90° , 전압: 2.28 V이었다. 그리고 15° 분해능으로 전체 스캔 측정 시 전압이 최대인 구역과 최대 전압은 Pan: 105° , Tilt:

표 1. 존기반 최대전송효율 탐색 알고리즘 실제 측정 결과표

Table 1. Measure result of the zone-based maximal transmission efficiency search algorithm.

Scan	Pan(°)	Tilt(°)	Voltage(V)	Efficiency(%)
1	60	67	0.75	5.62
2	60	97	0.82	6.72
3	105	97	2.3	52.9
4	105	67	2.09	43.68
5	90	90	2.21	48.84
6	105	90	2.25	50.63
7	120	90	2.09	43.68
8	90	105	2.04	41.62
9	105	105	2.18	47.52
10	120	105	1.88	35.34
11	112	105	2.2	48.4
12	112	82	2.27	51.53
13	120	82	2.15	46.23
14	128	82	1.76	30.98
15	128	90	1.72	29.58
16	128	98	1.58	24.96
17	120	98	2.1	44.1
18	112	98	2.28(maximum)	51.98

90°, 전압: 2.25 V로 측정되었다. 각도 분해능에 따라 스캔 정확도가 달라진다. 15° 전체 스캔을 할 시 5° 전체 스캔의 결과와 오차가 발생하였지만 존기반 스캔을 했을 경우 5° 전체 스캔했을 때의 전압과 같게 측정되었다.

본 논문에서 기록 데이터에서는 15° 전체 스캔 결과와 5° 전체 스캔 결과의 오차가 크지는 않지만 15° 전체 스캔을 했을 경우 오차가 10 % 이상 측정된 경우도 있었다. 존기반 스캔을 할 경우, 본 논문처럼 15° 전체 스캔 결과보다 정확도가 5° 전체 스캔 결과와의 오차가 1 % 이내로 정확도가 높은 것을 측정을 통하여 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Pan-Tilt 시스템에서 존기반 최대전송효율 탐색 알고리즘을 통하여 MR-WPT 시스템에서 나타나

는 전송효율 음영영역 현상을 효율적으로 제거할 수 있었고, 또한 수신 코일 위치에 따라 변할 수 있는 최대 전송 효율을 갖는 위치도 빠르게 찾을 수 있었다. 제작한 Pan-Tilt system을 이용하여 전체 스캔을 한다면 전송효율 음영영역 현상을 없앨 수 있다. 하지만 단순히 설정해 놓은 각도를 모두 스캔하게 된다면 각도 분해능에 따라 장·단점이 존재한다. 각도 분해능을 낮추게 되면 정확도는 올라가지만 스캔하는 시간이 오래 걸릴 것이고, 반대로 각도 분해능을 높이면 정확도는 내려가지만 스캔하는 시간을 줄일 수 있다.

Pan-Tilt 시스템에 존기반 스캔을 도입하여 위와 같은 단점을 해결하였다. 이를 통하여 찾은 최대점은 5° 전체 스캔과 비교하여 11배 빨라졌지만 오차가 작아 정확도가 높은 것을 측정을 통하여 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 3D 스캐닝 MR-WPT 시스템은 웨어러블 디바이스, 움직이는 IoT 센서, 생체 부착 의료 기기 등의 모바일 기기에 실시간으로 고효율 전력전송이 가능하므로 여러 형태의 모바일 융합 기기의 자유도를 높일 수 있는 응용 분야에 전력 공급 기반 기술로 자리매김할 수 있을 것이다.

References

- [1] D. Zhigang, J. A. A. Qahouq, "Modeling and investigation of magnetic resonance coupled wireless power transfer system with lateral misalignment," in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, Fort Worth, TX, Mar. 2014, pp. 1317-1322.
- [2] K. Fotopoulou, B. W. Flynn, "Wireless power transfer in loosely coupled links: Coil misalignment model," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 2, pp. 416-430, Feb. 2011.
- [3] H. Moon, C. Kim, "Analysis of the transmission efficiency valley of death in magnetic resonance wireless power transfer systems," in *Proceeding of the Korean Institute Communication Sciences Summer Conference*, 2016, pp. 14-15.
- [4] Z. Dang, J. A. Abu Qahouq, "Elimination method for the

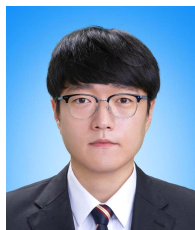
transmission efficiency valley of death in laterally misaligned wireless power transfer systems," in *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Charlotte, NC, Mar. 2015, pp. 1644-1649.

[5] J. S. Kim, C. W. Kim, "An optimal algorithm for effective

elimination for the dead zone of the transmission efficiency in a 3D scanning magnetic resonance wireless power transmission system," in *Information and Control Symposium*, Oct. 2017, vol. 2017, no. 10, pp. 305-306.

김 정 수 [경희대학교/석사 과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0968-6673>



2018년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 경희대학교 전자공학과 석사 과정
[주 관심분야] MMIC/RFSoc 설계, 무선전력전송 시스템 설계 등

김 남 윤 [대덕대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9752-1344>



2005년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학석사)
2012년 8월: 경희대학교 전자전파공학과 (공학박사)
2009년 9월~2014년 2월: 삼성종합기술원 FIT연구소 전문연구원
2014년 3월~현재: 대덕대학교 군사학부 (항공)교수

[주 관심분야] 무선전력전송 시스템 설계, 에너지 하베스팅, RF 시스템 설계, 무인비행장치(드론)시스템 설계

이 규 식 [경희대학교/석사 과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6421-4580>



2018년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)
2018년 3월~현재: 경희대학교 전자공학과 석사 과정
[주 관심분야] MMIC/RFSoc 설계, 무선전력전송 시스템 설계 등

김 창 우 [경희대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0837-3835>



1984년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 3월: 일본 Shizuoka 대학교 전자공학과 (공학박사)
1992년 4월~1996년 2월: (주) NEC 마이크로 일렉트로닉스연구소 주임연구원

1996년 3월~현재: 경희대학교 전자정보대학 교수

[주 관심분야] MMIC/RFSoc 설계, 초고주파 능동소자 모델링, IoT시스템 설계