

# 전력 전송거리 증가를 위한 구형 자속 집중 송신부 구조의 설계 및 해석

박광록<sup>1</sup>, 차화량<sup>1</sup>, 김래영<sup>†</sup>, 김태진<sup>2</sup>

## Spherical Flux Concentration Transmitter for Omnidirectional Wireless Power Transfer with Improved Power Transmission Distance

Kwang-Rock Park<sup>1</sup>, Hwa-Rang Cha<sup>1</sup>, Rae-Young Kim<sup>†</sup>, and Tae-Jin Kim<sup>2</sup>

### Abstract

In this study, we propose a spherical flux concentration structure for omnidirectional wireless power transfer. Omnidirectional wireless power transfer technology is a method that can transmit power to a transmitter located in an arbitrary position in a two-dimensional or three-dimensional space. However, to improve the power transfer distance in a wireless power transfer system, the diameter of the coil or the number of windings must increase, thereby increasing the size of the transmitter. The proposed transmitter structure adds a ferrite core inside the transmitter coil so that the magnetic flux generated by the transmitter is directed toward the position of the receiver. As a result, the flux linkage and the mutual inductance increase. By implementing the omnidirectional wireless power transfer system using the proposed structure, the power transfer distance can be improved by 65% compared with the conventional system without increasing the size of the transmitter. Simulation shows that the proposed spherical flux concentration structure increases the mutual inductance of the omnidirectional wireless power transmission system.

**Key words:** Wireless power transfer system, Omnidirectional wireless power transfer, Transmitter coil structure

### 1. 서 론

최근 수신부의 높은 위치 자유도와 이동성을 요구하는 웨어러블 기기 및 모바일 기기, 전기자동차 시장의 성장으로 무선 전력 전송에 대한 관심이 증가하고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 무선 전력 전송 기술은 전선 없이 전기에너지를 자기장의 형태로 부하에 전달하는 기술이다. 유선 전력 전송 기술과 비교하여 무선 전력 전송 기술의 가장 큰 장점은 수신부의 높은 위치 자유도에 있다<sup>[3],[4]</sup>.

무선 전력 전송을 구현하는 방법으로 평면 코일을 적

용한 구조 연구가 진행되었다. 평면 코일을 사용한 무선 전력 전송 방식은 동일 축상에 송신 코일과 수신 코일이 위치한다. 그러나 평면 코일 방식은 송신 코일과 수신 코일이 동일 축상에 위치하지 않는 오정렬 상황에서는 전력 전달 효율이 낮아지는 한계점이 있다<sup>[5]-[7]</sup>.

한편, 평면 코일의 한계를 극복하기 위해서 임의의 공간에 위치한 수신부로 전력 전송이 가능한 무방향성 무선 전력 전송 방법이 등장했다. K.O'brian은 세 개의 코일이 중심을 공유하고 직교하는 구조를 적용하여 무방향성 무선 전력 전송을 최초로 구현하였다<sup>[8]</sup>. 참고 문헌 [9]에서는 사발 형태로 코일을 권선하여 그 내부에 위치한 소형 전자 기기를 충전하는 무방향성 무선 충전용 송신부를 제안했다. 그러나 [8], [9]에서 제안한 방식은 송신부 내부에서만 무방향성이 구현되는 한계점을 지닌다.

이와 같이 송신부 내부에서만 무방향성 무선 전력 전송이 가능한 한계점을 극복하기 위한 연구들이 이루어졌다. 참고 문헌 [10]-[12]에서는 원형 코일 세 개가 중심을 공유하고 직교하는 송신부 구조를 사용하여 송신

Paper number: TKPE-2020-25-3-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical Bio-Engineering, Hanyang University  
Tel: +82-2-2220-0341 Fax: +82-2-2220-0570

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Engineering, HYPEC-EPECS Lab., Hanyang University

<sup>2</sup> Power Conversion & System for Renewable Energy Research Center, KERI

Manuscript received Dec. 26, 2019; revised Feb. 5, 2020; accepted Feb. 17, 2020

부 외부로 무방향성 무선 전력 전송을 구현하였다. 제한된 방식을 적용하면 송신부 외부에 임의의 공간에 위치한 수신부로 무선 전력 전송이 가능하다. 그러나 송신부의 구조적 특징으로 인하여 권선수에 제한이 있고, 권선수에 비하여 상호 인덕턴스가 낮은 한계점을 보유하고 있다.

상호 인덕턴스가 낮은 한계점을 극복하기 위해 송신 코일 내부에 코일 또는 코어를 추가하는 방식의 송신부 구조 연구가 진행되었다. 참고 문헌 [13]에서는 세 개의 코일이 중심을 공유하고 직교하는 형태를 적용하고, 그 내부에 크기가 작은 동일한 형태의 코일을 추가한 double 3D코일을 제안하였다. 제안한 방식을 사용하면 무방향성 무선 전력 전송 시스템의 상호 인덕턴스가 향상된다. 하지만 송신부의 구조적 특징으로 인하여 구조의 복잡성이 증가한다. 또한 추가된 코일의 개수만큼 송신부 간 상호 인덕턴스의 수가 증가하여 제어 및 시스템의 복잡성이 증가하는 단점이 있다.

참고 문헌 [14]는 막대 모양의 코어에 코일을 권선하고 이를 격자 형태로 배치하여 무방향성 무선 전력 전송용 송신부를 구현하였다. 하지만 무방향성 무선 전력 전송을 구현하기 위해서는 송신부의 부피가 크고, 수신부에도 송신부와 동일한 구조를 적용해야 하기 때문에 무선 전력 전송 시스템의 부피가 커지는 단점이 있다. 또한 제안한 구조는 z축 방향으로 자기장이 생성되지 않아서 완전한 무방향성을 무선 전력 전송을 구현했다고 보기 어렵다.

본 논문에서는 구형 자속 집중 구조를 제안한다. 제한된 구조는 송신부 내부에 페라이트 코어가 삽입된다. 수신부 방향으로 돌출된 코어의 구조적 특징으로 인하여 송신부와 수신부 간의 자속 쇄교량이 증가하고 높은 상호 인덕턴스를 갖는다. 그 결과 무선 전력 전송 시스템의 전력 전달 효율이 증가하고, 전력 전송 거리의 증가를 기대할 수 있다. 코일 권선수 선정과 코어의 단위 부피당 최대 효율 지점을 선정하여 이를 바탕으로 한 구형 자속 집중 송신부 구조 설계를 보여준다. FEA(Finite Element Analysis)를 통하여 제안한 송신부 구조의 동작 원리를 분석한다. 제안한 구형 자속 집중 송신부 구조를 갖는 100W급 무선 전력 시스템을 구축하고, 다양한 실험을 통해 성능 및 타당성을 검증한다.

## 2. 무방향성 무선 전력 전송 시스템

### 2.1 기본 원리

그림 1은 무방향성 무선 전력 전송을 위한 송신부 및 수신부를 보여준다. 송신부는 세 개의 원형 코일이 중심을 공유하고 직교하는 형태를 갖는다. 수신부는 송신부 코일과 동일한 권선수, 크기를 갖는 원형 코일로 구성되며, 송신부 주변의 임의의 공간에 위치한다.

무방향성 무선 전력 전송을 구현하기 위해서는 임의

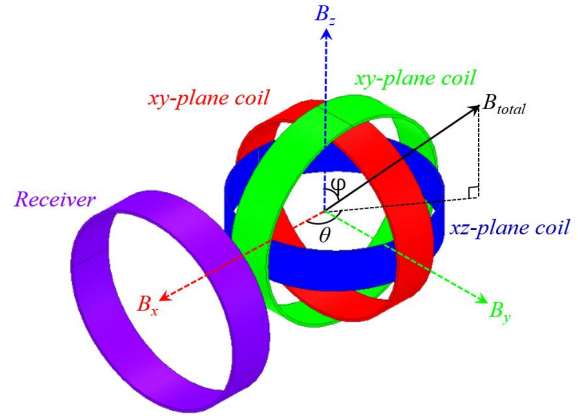


Fig. 1. Omnidirectional wireless power transfer system model in 3D.

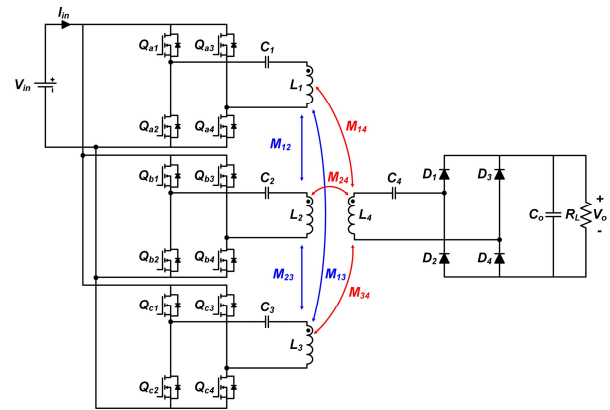


Fig. 2. Circuit of omnidirectional wireless power transfer system.

의 공간에 위치한 수신부 방향으로 자기장의 방향을 제어해야 한다. 송신부를 구성하는 세 개의 원형 코일에 주파수와 위상은 동일하지만 크기가 다른 전류  $i_x$ ,  $i_y$ ,  $i_z$ 를 인가하면, 세 코일에서는 크기가 다른 자기장  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ 가 생성된다. 각각의 코일에서 생성되는 자기장의 합성식은 다음과 같다<sup>[15]</sup>.

$$B_{total} = B_x + B_y + B_z \quad (1)$$

3차원 공간에서 자기장의 방향을 표시하기 위해 좌표계를 도입하였다.  $\varphi$ 는 자기장의 방향과 z축이 이루는 각도를 의미하고,  $\theta$ 는 자기장의 방향을 xy-평면에 정사영하였을 때 x축과 이루는 각도를 의미한다. 식 (1)을 통하여 송신부에서 생성되는 자기장  $B$ 의 방향은 세 개의 송신코일에서 생성되는 자기장의 크기에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다. 코일에서 생성되는 자기장의 크기는 코일에 흐르는 전류의 세기에 비례하여 변한다. 원형 코일에 인가되는 전류의 크기를 조절하여 코일에서 생성되는 자기장의 크기를 조절할 수 있고, 결과적으로 송신부에서 생성되는 자기장의 방향을 수신부 방향으로 제어할 수 있다.

그림 2는 무방향성 송신부 및 수신부를 적용한 무선 전력 전송 시스템을 나타낸다. 시스템은 크게 전원부, 공진 네트워크부, 정류부로 구성된다.

전원부는 입력전원  $V_{in}$ 에 병렬로 연결된 세 개의 풀브릿지 컨버터로 구성된다. 컨버터를 구성하는 스위치  $Q_{n1}$ ,  $Q_{n2}$ ,  $Q_{n3}$ ,  $Q_{n4}$ ( $n=a,b,c$ )는 스위칭 주파수  $\omega$ 로 동작한다. 여기서  $I_m$ 은 입력전류를 나타낸다.

공진 네트워크부는 송신코일  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ 와 수신코일  $L_4$ 에 보상 커패시터  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ 를 직렬로 연결한 S-S(Series-Series) 토폴로지를 사용한다. 여기서  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ 는 송신코일 간 상호 인덕턴스,  $M_{14}$ ,  $M_{24}$ ,  $M_{34}$ 는 송신부와 수신부 사이의 상호 인덕턴스를 의미하며,  $M_{14}$ ,  $M_{24}$ ,  $M_{34}$ 는 송신부와 수신부 사이의 거리 및 각도에 따라 변한다.

정류부는 정류기와 부하로 구성된다. 정류기는 다이오드  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ 와 평활 커패시터  $C_o$ 로 구성되며, 부하저항  $R_o$ 에 직류 전력을 공급하게 된다.

### 2.2 전력 전송 거리, 상호 인덕턴스, 효율의 관계

그림 3은 S-S토폴로지를 적용한 무선 전력 전송 시스템이다. 송신부를 구성하는 송신코일  $Coil-x$ ,  $Coil-y$ ,  $Coil-z$ 에는 교류 입력 전원  $V_{x-in}$ ,  $V_{y-in}$ ,  $V_{z-in}$ 이 인가되며, 보상 커패시터  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 가 직렬로 연결된다.  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ 는 송신 코일의 권선 저항을 의미한다. 수신부는 수신코일  $Coil-rx$ 와 보상 커패시터  $C_{rx}$ , 수신 코일의 권선 저항  $R_{rx}$ , 부하저항  $R_{load}$ 로 구성된다. 송신코일과 수신코일은 자기적으로 결합되어 있으며 상호 인덕턴스  $M_{14}$ 으로 표현된다.

본 논문에서는 송신코일의 최외각부터 수신코일의 중심까지의 거리를 전력 전송 거리  $D$ 로 정의한다.

그림 3에서 x축 송신코일  $Coil-x$ 에 흐르는 전류  $I_1$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$I_1 = \frac{V_{x-in}(R_{rx} + R_{load})}{\omega^2 M_{14}^2 + R_1(R_{rx} + R_{load})} \quad (2)$$

송신코일의 권선수를  $N_1$ , 수신코일의 권선수를  $N_4$ 로 정의하고 두 코일 간 쇠교 자속이  $\Phi_{14}$ 일 때, 두 코일 간의 상호 인덕턴스는 다음과 같다<sup>[16]</sup>.

$$M_{14} = \frac{N_1 \cdot N_4 \cdot \Phi_{14}}{I_1} \quad (3)$$

수신코일의 단면적이  $S_4$ 일 때, 이를 통과하는 자속의  $\Phi$ 수와 자속 밀도  $B$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\Phi_{14} = B \cdot S_4 \quad (4)$$

x축 송신코일  $Coil-x$ 의 중심과 수신코일  $Coil-rx$  중심 사이의 거리가  $x$ 일 때, 전력 전송 거리  $D$ 에서 수신

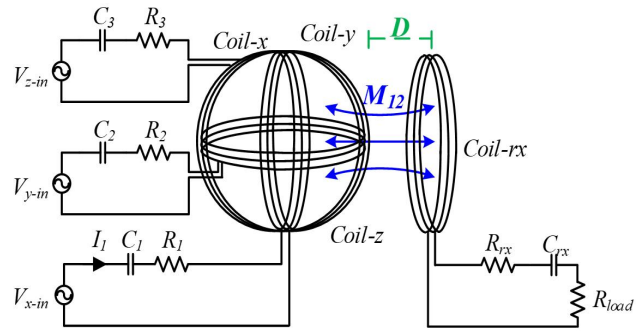


Fig. 3. Omnidirectional wireless power transfer system.

코일 중심의 자속밀도는 다음과 같다. 계산의 편의를 위해 송신코일  $Coil-x$ 와 수신코일  $Coil-rx$ 는 동일 축선 상에 위치한다고 가정한다.

$$B = \frac{\mu_0 r^2 N_1 I_1}{2} \left( \frac{1}{(r^2 + x)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(r^2 + (D-x)^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (5)$$

식 (3)~(5)를 사용하여 상호 인덕턴스와 전력 전송 거리  $D$ 의 관계식을 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서  $\mu_0$ 는 진공의 투자율을 의미한다.

$$M_{14} = \frac{N_1^2 N_4 S_4 \mu_0 r^2}{2} \left( \frac{1}{(r^3 + D^3)} + \frac{1}{r^3} \right) \quad (6)$$

S-S토폴로지를 적용한 무선 전력 전송 시스템의 효율식은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{R_{load}}{R_{rx} + R_{load} + R_1 \left( \frac{R_{rx} + R_{load}}{\omega M_{14}} \right)} \quad (7)$$

식 (7)을 통해서 상호 인덕턴스와 효율은 비례 관계임을 확인할 수 있다. 상호 인덕턴스는 시뮬레이션을 통해 쉽게 계산될 수 있으나 실제 상호 인덕턴스는 정밀하게 측정하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 상호 인덕턴스와 비례 관계에 있는 효율을 통해 전력 전송 거리의 변화에 따른 상호 인덕턴스의 경향을 파악한다.

## 3. 제안하는 송신부

### 3.1 송신부 구조

그림 4는 구형 자속 집중 구조를 적용하여 3차원 공간에서의 무방향성 무선 전력 전송용 송신부를 구현한 것이다. 코일은 반지름의 길이가 동일한 Helix 형태로 권선하며 xy-평면 코일, yz-평면 코일, zx-평면 코일 세 개가 중심을 공유하고 직교한다. 그림에서 nxy, nyz, nzx는 각 평면 코일의 양의 법선 방향을 나타낸다. 세 개의 송신 코일 내부에는 본 논문에서 제안하는 구조의

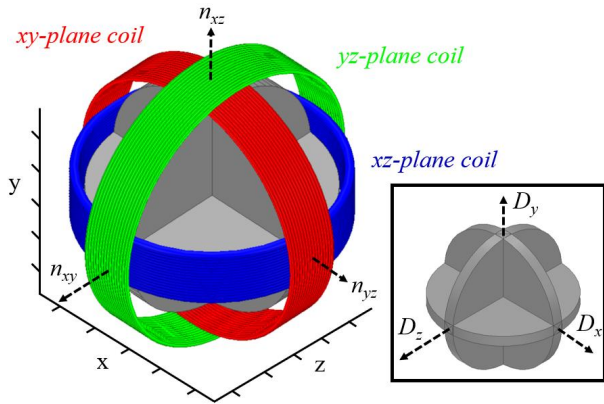


Fig. 4. Transmitter of omnidirectional wireless power transfer system using spherical flux concentration in 3D.

페라이트 코어가 삽입된다. 페라이트 코어의 중심과 송신 코일의 중심은 동일하고 페라이트 코어의 법선 벡터들과 송신 코일의 법선 벡터들이 서로 일치하도록 정렬된다.

### 3.2 동작 원리

그림 5는 FEA를 사용하여 구형 자속 집중 구조를 적용한 3차원 공간상의 무방향성 무선 전력 전송 송신부의 자기장 벡터를 분석한 결과다. 그림에서 화살표는 송신부에서 생성된 자속의 방향을 의미하고 자기장의 세기를 색깔로 구분하였다. 점선으로 표시된 화살표는 송신부에서 생성된 합성 자기장 방향을 나타내며 이를 세개의 시뮬레이션 결과는 동일한 스케일에서 분석이 진행되었다.

그림 5(a)는  $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$  방향으로 자기장을 생성하는 그림이다. 그림에서 표시된 방향으로 자기장을 형성하기 위해 세 개의 송신 코일에 인가되는 전류의 크기를 조절한다. xy-평면 코일에 전류를 인가하고 yz-평면 코일, zx-평면 코일에는 전류를 인가하지 않으면 xy-평면 코일에서만 x축 방향으로 생성된다.

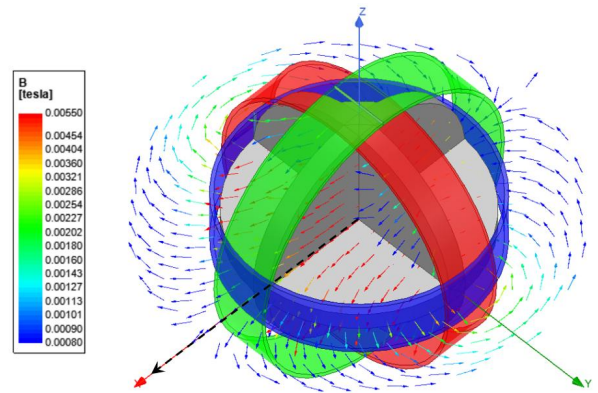
이때 생성된 자속은 공기보다 투자율이 낮은 송신부 내부의 코어로 집중되고, 수신부 방향으로 돌출된 코어의 구조적 특징으로 인해 x축 방향으로 방향성을 갖는 것을 그림을 통해서 확인할 수 있다.

위와 동일한 방법으로 그림 5(b)와 (c)를 통해서 송신부에서  $\varphi = 90^\circ, \theta = 45^\circ$  방향,  $\varphi = 45^\circ, \theta = 135^\circ$  방향으로 자기장을 생성하는 것을 확인할 수 있다.

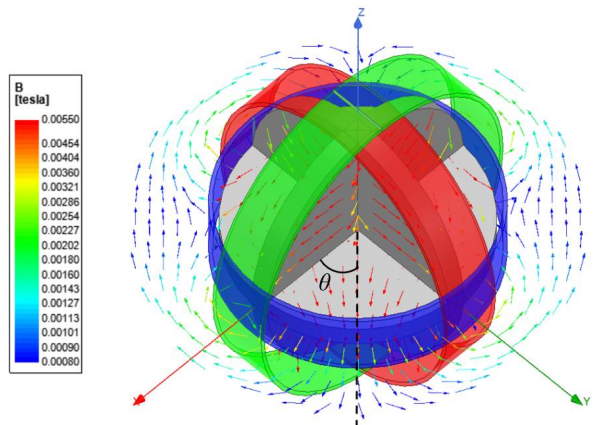
## 4. 제안하는 송신부 분석

### 4.1 자속 밀도 분석

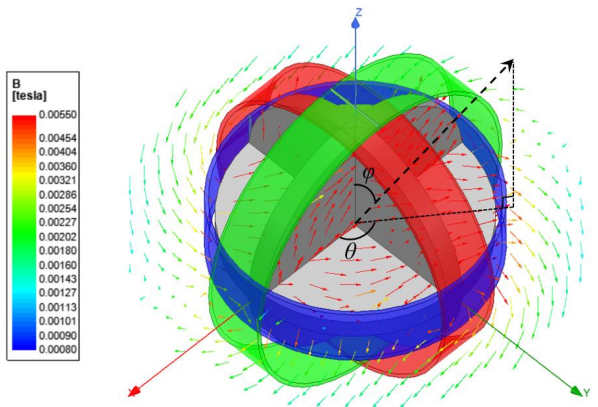
그림 6은 FEA 시뮬레이션을 사용하여 3차원 공간상에 놓인 송신부와 수신부 사이의 자속밀도 분석 결과로 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 그림 6(a)는 기존 송신부 구조를 적용한 경우이며 그림 6(b)는 제안한 송신부



(a) Magnetic vector direct to  $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$



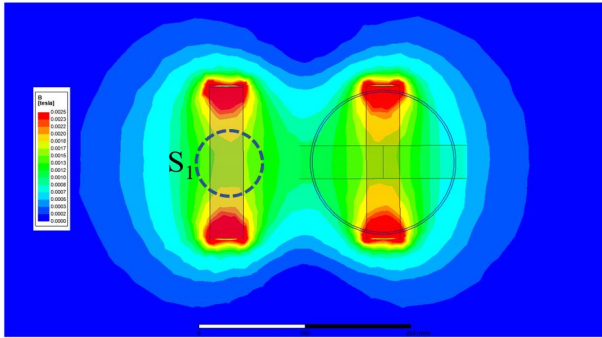
(b) Magnetic vector direct to  $\varphi = 90^\circ, \theta = 45^\circ$



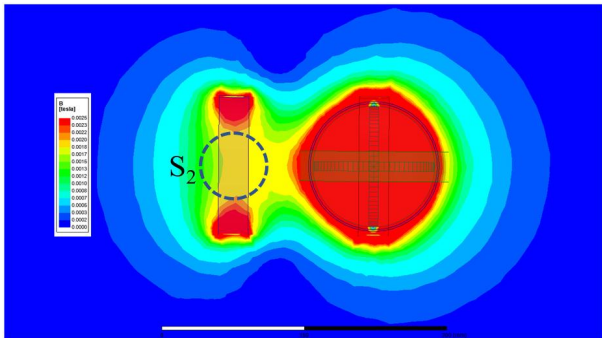
(c) Magnetic vector direct to  $\varphi = 45^\circ, \theta = 135^\circ$

Fig. 5. 3-D diagram of magnetic vector in transmitter using FEM simulation when magnetic vector direct to (a)  $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$ , (b)  $\varphi = 90^\circ, \theta = 45^\circ$ , (c)  $\varphi = 45^\circ, \theta = 135^\circ$ .

구조를 적용한 경우이다. 두 경우 전력 전송거리 및 스케일은 동일하며 수신부의 각도가  $\varphi = 0^\circ$ 다. 그림 6(a)의 수신부 중심부분 면적  $S_1$ 과 그림 6(b)의 면적  $S_2$ 에서의 자속 밀도를 비교해 보면 구형 자속 집중 구조를 적용했을 때 자속 밀도가 크게 나타남을 알 수 있다. 식 (3)~(4)에 의해 자속 밀도와 상호 인덕턴스는 비례관계에 있으므로 제안한 수신부에서 높은 상호 인덕턴스가 달성됨을 알 수 있다. 제안한 송신부의 상호 인덕턴스는



(a) Magnetic flux density of conventional WPT system



(b) Magnetic flux density of proposed WPT system

Fig. 6. Magnetic flux density based on FEA in (a) Conventional WPT system, (b) Proposed WPT system.

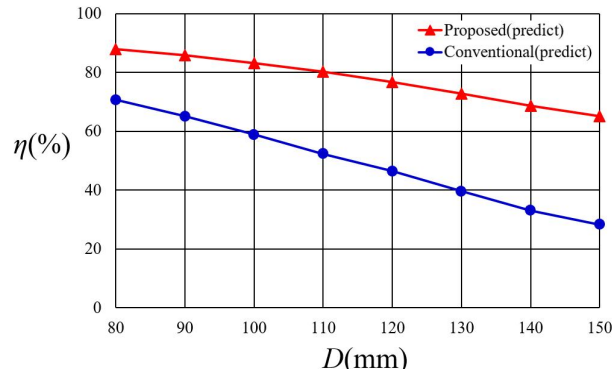


Fig. 7. Efficiency against power transmission distance based on simulation when receiver is located at  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$ .

5.713uH이고 기존 송신부의 상호 인덕턴스는 2.649uH이다. 제안한 송신부를 사용하여 상호 인덕턴스는 약 2.15 배 향상되었다.

#### 4.2 전력 전송 거리 증가 시뮬레이션

그림 7은 기존의 송신부 구조를 적용했을 때와 제안한 송신부 구조를 적용했을 때, 수신부의 각도가  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\theta = 45^\circ$  일 때의 전력 전송 거리 증가에 대한 시뮬레이션 효율 변화를 보여주고 있다. 이때 시뮬레이션 효율이란 FEA 상호 인덕턴스 해석 결과를 이용하여 자기 등가 회로를 구축한 후 회로 시뮬레이션을 통해 추정된 효율을 의미한다.

TABLE I  
SIMULATION PARAMETER OF OMNIDIRECTIONAL WTP SYSTEM

Parameter	Value [unit]
Input Voltage ( $V_{in}$ )	50 [V]
Resonant Frequency ( $f_o$ )	202 [kHz]
Number of turns ( $N_1, N_2, N_3, N_4$ )	16
Coil's Diameter ( $d_1, d_2, d_3, d_4$ )	150 [mm]
Coil's Resistance ( $R_1, R_2, R_3, R_{rx}$ )	0.08 [ohm]
Load Resistance ( $R_{load}$ )	5.8 [ohm]
Self Inductance of Conventional Transmitter ( $L_1, L_2, L_3$ )	57.4 [uH]
Self Inductance of Proposed Transmitter ( $L'_1, L'_2, L'_3$ )	90 [uH]
Self Inductance of Receiver ( $L_4$ )	57.4 [uH]
Primary Compensation Capacitor of Conventional system ( $C_1, C_2, C_3$ )	10.8 [nF]
Primary Compensation Capacitor of Proposed system ( $C_1, C_2, C_3$ )	7.0 [nF]
Secondary Compensation Capacitor ( $C_{rx}$ )	10.8 [nF]



Fig. 8. Prototype of spherical flux concentration transmitter. (a) Side view of transmitter, (b) Diagonal view of transmitter.

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 각도에 관계없이 모든 전력 전송 거리에서 제안한 송신부 구조가 높은 효율  $\eta$ 을 보이며 특히 D의 증가 시에도 보다 작은 효율 감소량을 보인다.

## 5. 실험

### 5.1 실험 세트

그림 8은 본 논문에서 제안하는 구형 자속 집중 구조를 적용한 송신부 프로토타입으로 (a)는 사선에서 바라본 모습과 (b)는 측면에서 바라본 모습을 보여준다. 제안하는 형태의 페라이트 코어가 송신부 중심에 삽입되는 것을 그림을 통해서 확인할 수 있다. 페라이트 코어

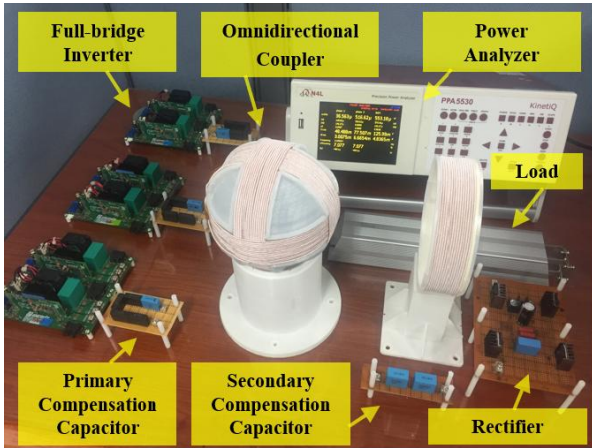


Fig. 9. Experimental setup for proposed omnidirectional WPT system.

의 상대 투자율은 3200이고 포화 자속은 520 mT이다. 그림 9는 제안한 송신부의 성능을 검증하기 위한 구형 자속 집중 송신부 구조를 적용한 무방향성 무선 전력 전송 시스템이다. 송신부를 구성하는 세 개의 코일에 교류 전원을 인가하기 위한 풀-브릿지 인버터 3개가 사용된다. 구형 자속 집중 송신부와 평면 코일 형태의 수신부가 사용되며, 각각 보상 커패시터가 직렬로 연결된다. 수신부에 유도된 교류 전류를 직류 전류로 변환하는 정류부와 부하 저항으로 시스템이 구성된다. 실험 파라미터는 시뮬레이션 파라미터와 동일하다.

5.2 실험

그림 10은 수신부의 위치가  $\varphi = 45^\circ, \theta = 45^\circ$  일 때 송신부를 구성하는 XY-평면 코일, YZ-평면 코일, ZX-평면 코일에 흐르는 전류 파형이다. 이때, 입력 전압은 50V, 출력 전압은 25V, 출력 전력은 100W이다. 수신부가 위치한 방향으로 자기장을 생성하기 위해 세 코일에 흐르는 전류의 주파수와 위상이 동일하며, 전류의 크기를 제어하였다.

그림 11은 수신부의 각도가  $\varphi = 90^\circ, \theta = 45^\circ$  일 때 전력 전송거리 D에 따른 시뮬레이션 및 실험 효율들을 보여준다. 이때, 입력 전압은 50V이고 합성 전류 벡터의 크기는 4A이다. 제안한 송신부 구조를 적용했을 때와 기존의 송신부 구조를 적용했을 때 모두 전력 전송거리 D가 증가할수록 효율  $\eta$ 가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 전력 전송거리 모든 구간에서 제안한 송신부 구조를 적용했을 때 효율이 높게 측정되었으며, 전력 전송거리 D가 증가할수록 두 효율 그래프의 차이가 커지는 결과를 얻었다.

6. 결 론

본 논문에서는 송신부의 크기 증가 없이 전력 전송거리 향상이 가능한 무방향성 무선 전력 전송용 구형

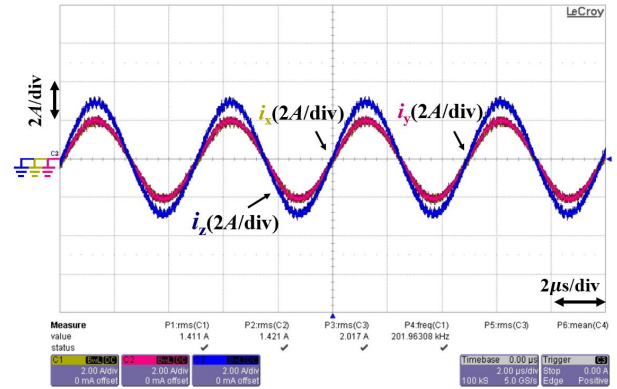


Fig. 10. Current of transmitter's coils.

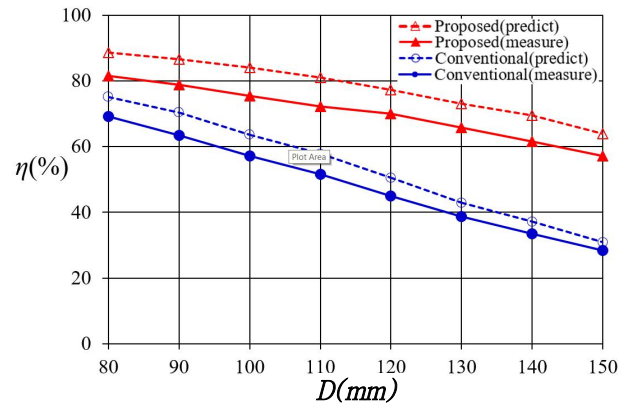


Fig. 11. Efficiency against power transmission distance when receiver is located at  $\varphi = 90^\circ, \theta = 45^\circ$ .

자속 집중 송신부 구조를 제안하였다. 제안한 송신부의 구형 방법과 송신부 코일 권선수의 최적화, 코어 설계를 위한 방법이 제시되었다. FEM 시뮬레이션을 통해 제안한 송신부 구조의 동작 원리와 상호 인덕턴스 증가 원리를 설명하였다. 구형 자속 집중 송신부 구조의 프로토타입을 제작하고, 이를 적용한 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 송신부 구조의 성능을 검증하였다.

본 연구는 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20171210201100)

References

[1] Y. Jang and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 50, No. 3, pp. 520-527, Jun. 2003.

[2] Y. Kaniya, Y. Daisho, K. Kobayashi, and T. Pontefract, "Development and performance evaluation of a non-contact rapid charging inductive power supply system for electric micro-bus," in *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion*

- Conf.*, pp. 1-6, Sep. 2011.
- [3] G. A. J. Elliott, G. A. Covic, D. Kacprzak, and J. T. Boys, "A new concept: Asymmetrical pick-ups for inductively coupled power transfer monorail systems," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 10, pp. 3389-3391, Oct. 2006.
- [4] S. Y. R. Hui and W. C. Ho, "A new generation of universal contactless battery charging platform for portable consumer electronic equipment," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 20, No. 3, pp. 620-627, May 2005.
- [5] M. Budhia, G. A. Covic, and J. T. Boys, "Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 11, pp. 3096-3108, 2011.
- [6] J. Zhang, X. Yuan, C. Wang, and Y. He, "Comparative analysis of two-coil and three-coil structures for wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 1, pp. 341-352, Nov. 2017.
- [7] W. Zhang, J. C. White, A. M. Abraham et al., "Loosely coupled transformer structure and interoperability study for EV wireless charging systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 11, pp. 6356-6367, 2015.
- [8] K. O'Brien, "Inductively coupled radio frequency power transmission system for wireless systems and devices," pp. 33-84, May 2006.
- [9] J. Feng, Q. Li, and F. C. Lee, "Omnidirectional wireless power transfer for portable devices," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) 2017 IEEE*, pp. 1675-1681, Mar. 2017.
- [10] C. Zhang, D. Lin, and S. Y. Hui, "Basic control principles of omnidirectional wireless power transfer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, No. 7, pp. 5215-5227, Jul. 2016.
- [11] Z. Dai, Z. Fang, H. Huang, Y. He, and J. Wang, "Selective omnidirectional magnetic resonant coupling wireless power transfer with multiple-receiver system," *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 19287-19294, Feb. 2018.
- [12] Z. Ye, Y. Sun, X. Liu, P. Wang, C. Tang, and H. Tian, "Power transfer efficiency analysis for omnidirectional wireless power transfer system using three-phase-shifted drive," *Energies* 2018, Vol. 11, No. 8, pp. 1-19, Nov. 2018.
- [13] W. Han, K. T. Chau, C. Jiang, W. Liu, and W. H. Lam, "Design and analysis of quasi-omnidirectional dynamic wireless power transfer for fly-and-charge," in *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 55, No. 7, pp. 1-9, Jul. 2019.
- [14] B. H. Choi, E. S. Lee, Y. H. Sohn et al., "Six degrees of freedom mobile inductive power transfer by crossed dipole Tx and Rx coils," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 4, pp. 3252-3272, Apr. 2016.
- [15] D. Lin, C. Zhang, and S. Y. R. Hui, "Mathematic analysis of omnidirectional wireless power transfer-part-II: Three-dimensional systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 32, No. 1, pp. 613-624, Jan. 2017.
- [16] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, pp. 234-243, 1989.



#### **박광록(朴光祿)**

1992년 8월 27일생. 2018년 순천향대 전기공학과 졸업. 2020년 한양대 전기공학과 졸업(석사).



#### **차화량(車華郎)**

1990년 7월 19일생. 2017년 한양대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석·박통합과정.



#### **김래영(金來瑛)**

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(공박). 1999년~2004년 효성 중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Senior Researcher. 2016년~2017년 미국 Virginia Tech CPES 방문교수. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 교수. 당 학회 국제이사.



#### **김태진(金泰鎭)**

1968년 8월 29일생. 1994년 부산대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1994년~1995년 일본 오사카대 연구원. 2010년 미국 Virginia Tech 방문연구원. 2013년~2016년 당 학회 논문지 편집위원. 1997년~현재 한국전기연구원 책임연구원.