

# 두 개의 송신코일을 갖는 위상 천이 자기 공진 무선 전력 전송 시스템

정재엽<sup>1</sup>, 이강현<sup>†</sup>

## Phase Shifted Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System with Two Transmit Coils

Jae-Yup Jung<sup>1</sup> and Kang-Hyun Yi<sup>†</sup>

### Abstract

This paper proposes a new magnetic resonant wireless power transfer system. Two transmitters are arranged to secure a range wider than the existing one-to-one resonance, thereby enhancing the practicality of the system. Two identical transmission units are arranged to strengthen the magnetic field and to subsequently increase the magnitude and distance of the power transmitted to the reception unit. A constant power can be maintained in a wide range through the phase control of different output powers according to the positions of the transmitting and receiving coils. A constant power can also be obtained by transmitting to the receiver. The experiment results show that the proposed method outperforms the conventional method.

**Key words:** Wireless power transfer, Magnetic resonance, Phase shift, Magnetic field

### 1. 서 론

최근 스마트폰이 기존의 플러그인 방식에서 무선 충전 방식으로 바뀌는 추세이다. 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer) 기술에 대한 관심과 함께 다양한 전자 제품에도 무선 전력 전송을 접목시키기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[1]-[5]</sup>. 상용화된 무선 충전 방식은 자기 유도 방식(Inductive Coupling)으로써 높은 전송 효율을 가지나, 전송거리가 짧아 충전 영역이 매우 제한적이며, 코일의 중심이 일치하지 않을 경우 효율이 급격하게 감소하므로 적용할 수 있는 분야가 한정되어 있다<sup>[6]</sup>. 자기 공진 방식(Magnetic Resonance)은 송·수신부의 주파수를 일치시킴으로써 공진 결합을 통한 무선으로 수미터까지 전력을 전달할 수 있다. 또한 방향성이 없으므로 충전 위치가 일치하지 않더라도 전력을 전송할 수 있다는 장점이 있다<sup>[1]-[4]</sup>.

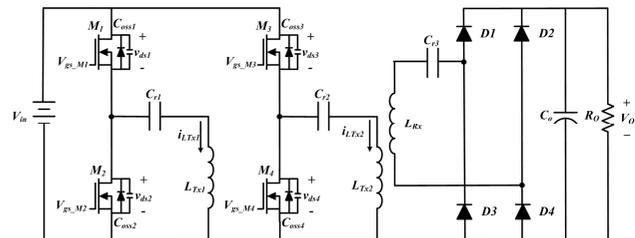


Fig. 1. Two-transmitter wireless power transfer circuit.

본 논문에서는 자기 공진 방식을 기반으로 여러 수신부에 필요한 다양한 소요 전력을 전송하여 효율을 높이는 것을 목적으로 한다. 기존의 전력제어 방식에는 동작 주파수를 제어함으로써 출력 전력을 제어하는 방식이 있다. 하지만 이와 같은 방식은 EMI(Electromagnetic Interference) 문제 해결이나, 안정성 규격을 만족하기가 쉽지 않다<sup>[6]</sup>.

본 연구에서는 하나의 송신코일이 아닌 2개의 송신코일을 갖고, 각각에 송신회로를 적용한 시스템을 제안한다. 두 개의 송신 코일에 각기 다른 전류가 발생하게 하여 서로의 자기장의 영향을 통해 증가된 전력 및 효율 개선을 얻고자 한다. 또한, 주파수 조절이 아닌 PWM 파형의 위상 제어를 통해 각 송신코일에 흐르는 전류량을 조절함으로써 주파수를 변경하지 않고, 출력 전력을

Paper number: TKPE-2018-23-4-9

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

<sup>†</sup> Corresponding author: khyi@daegu.ac.kr, School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu University  
Tel: +82-53-850-6652 Fax: +82-53-850-6619

<sup>1</sup> Dept. of Electronic Engineering, Daegu University  
Manuscript received Mar. 2, 2018; revised Mar. 17, 2018;  
accepted Apr. 6, 2018

TABLE I  
EXPERIMENTAL SPECIFICATIONS

$V_{in}$	100V	Coil	Litz Wire
$f_r$	140kHz	Coil Diameter	120mm
$T_X$		$R_X$	
$L_{Tx1}, L_{Tx2}$	101.65 $\mu$ H	$L_{Rx}$	113.96 $\mu$ H
$C_{r1}, C_{r2}$	14.85nF	$C_{r3}$	11.371nF

조정할 수 있다. 또한 두 개의 송신 코일로 인해, 전력이 전달되는 면적과 거리 증대 효과를 예상할 수 있다. 제안한 시스템의 이론적 원리와 동작 검증을 위하여 40W 실험 세트를 구현하여 성능을 검증하였다.

### 2. 제안하는 회로 시스템 및 원리

제안하는 시스템 그림 1과 같이 AC 전압을 만들기 위한 2개의 Half-bridge 토폴로지 및 송신코일을 이용한다. 수신부는 1개의 수신코일과 Full-bridge 정류기로 구성된다. 두 개의 Half-bridge에 위상차를 두면, 두 송신 회로의 전류에도 위상차가 발생한다. 만약 위상차가 없는 경우, 두 전류의 합으로 인해 발생하는 자기장이 수신 코일에 커플링 된다. 위상차가 발생하면 유기되는 자기장의 세기는 감소하며, 위치에 따라서도 유기되는 자기장의 세기가 변화하는 효과를 가질 수 있다. 이론적으로 살펴보면, 자기 공진 무선 전력 전송의 원리는 송신 코일에 전류가 흐르면 그 전류를 따라 주위에 자기장이 발생한다. Biot-Savart의 법칙에 준하여 원형 코일을 사용하였을 경우 전류가 흐를 때, 자계의 세기는 다음 식으로 나타낸다.

$$H = \frac{nI^2}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} [A/m] \quad (1)$$

위의 수식에서, n은 권선수, r은 반지름, l은 원형 중심에서의 거리이다. 그러므로 각 코일의 자계를  $H_1, H_2$ 라 가정하면 총 자계의 세기 H는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H = H_1 + H_2 = \frac{ni_{LTx1}r^2}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} + \frac{ni_{LTx2}r^2}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} = \frac{n2i_{LTx}r^2}{2(r^2 + l^2)^{3/2}} \quad (2)$$

위의 수식에서 보면 자계의 세기는 전류에 비례한다. 송신코일에서 수신코일로 전력을 전달할 시, 송신 측에서는 전류에 의해 자기장이 발생하고, 수신 측에서는 자기장에 의해서 전류가 흐를 수 있게 된다.

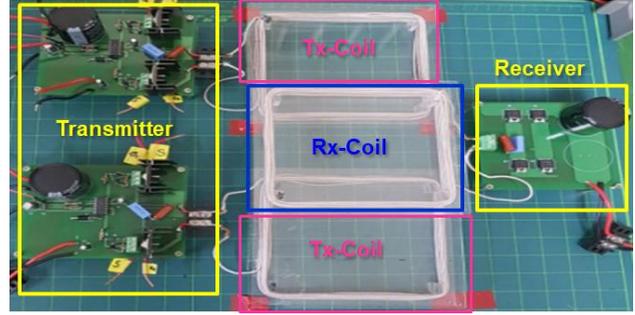


Fig. 2. Experimental set.

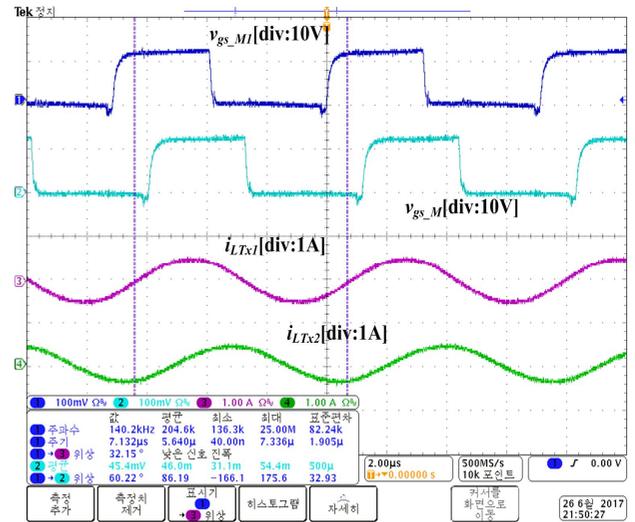


Fig. 3. Experimental waveform with phase 60 degree difference.

$$B = \mu_0 H = \frac{\varnothing}{S} \quad (3)$$

위의 수식에서, B는 자속밀도,  $\mu_0$ 는 투자율,  $\varnothing$ 는 자속, 그리고 S는 단위 면적이다. Ampere 법칙에서 증가된 자계의 세기에 대하여 단위 면적당 자계를 통과하는 자속이 증가하여 자속밀도 또한 비례한다. 그러므로 하나의 송신코일보다 2개의 송신코일일 경우 더 높은 전력을 전달할 수 있게 된다. 두 전류간의 위상차가 발생할 때, 각 코일에 흐르는 전류를  $i_{LTx1}, i_{LTx2}$ 이라고 하면 정현파로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{LTx1} = A \sin(\omega t), i_{LTx2} = A \sin(\omega t + \theta) \quad (4)$$

$M_1, M_2$ 는 위상을 고정하고,  $M_3, M_4$ 만을 위상 차이를 두면, 두 전류의 합성 진폭 값은 위상천이를 시도함에 따라 증가되거나 감소함을 알 수 있다. 그러므로 하나의 송신코일의 위상을 조절함으로써, 수신 측으로 보내는 전류의 합이 변화하고, 이는 자기장의 세기를 변화시킬 수 있다.

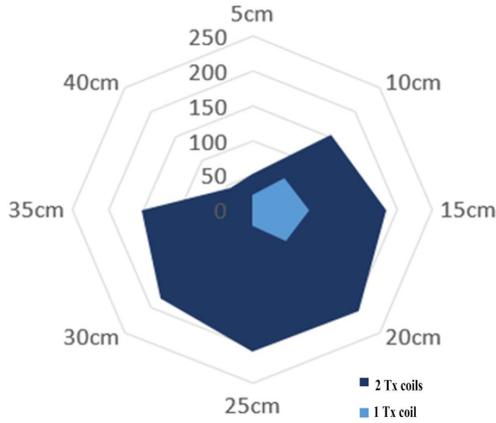


Fig. 4. Output power depends on transmission distance.

### 3. 실험 결과

동작 검증을 위하여 Table 1과 같은 실험 사양으로 실험을 수행하였다. 실험 세트 사진은 Fig. 2과 같다. 두 개의 Half bridge inverter와 송신 코일이 사용되었다. 두 개의 송신 회로에 60도 위상차를 두었을 때, 실험 파형은 그림 3과 같다. 예상한 바와 같이 60도 위상차를 두면, 두 송신 전류에도 위상차가 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 송신 코일 1과 수신 코일간의 결합 상태와 송신 코일 2와 수신 코일 간 결합 상태가 위치상 유사하여 전류차이는 크게 발생하지 않는다.

#### 3.1 1개 송신기와 2개 송신기의 출력전력 비교

송신코일을 정렬한 상태에서 수신코일을 좌에서 우로 5cm씩 평행이동을 하며 각 평행 이동된 위치마다 송·수신코일의 간격을 0cm에서 10cm까지 2cm마다 거리를 두고 실험을 하였으며, 2-송신코일의 경우 송신코일 간격을 0cm로 고정하여 배열 후 총 가로 길이는 30cm인 상태로 실험을 한 것이다. 그림 4의 차트에 측정된 최대 출력 전력의 분포를 나타내었다. 송신코일 2개를 나란히 배열할 경우, 1개일 때보다 자기장의 세기는 강해진다. 자기장의 세기는 전류에 비례하므로 수신코일 쪽에서 보면 전류의 양이 더 높아졌으므로 출력 전력이 커지게 된다. 즉, 2-송신코일에서 증가된 출력 전력 및 효율을 확인할 수 있다. 또한 송·수신 코일의 간격이 동일할 경우 2개일 때가 더 높은 출력을 가짐으로써 거리 또한 증대하는 효과를 가질 수 있다.

#### 3.2 위상천이를 통한 일정한 전력 제어

그림 5에는 2개의 송신코일 간격을 5cm로 띄우고, 송·수신코일의 거리를 수직으로 6cm에서 측정된 최대 전력을 그래프로 나타내었다. 수신코일의 평행이동 거리에 대하여 최대 55W, 최소 11.45W 범위 내로 출력이 측정된다. 2개의 송신부에서는 자기장에 의해서 유도전류를

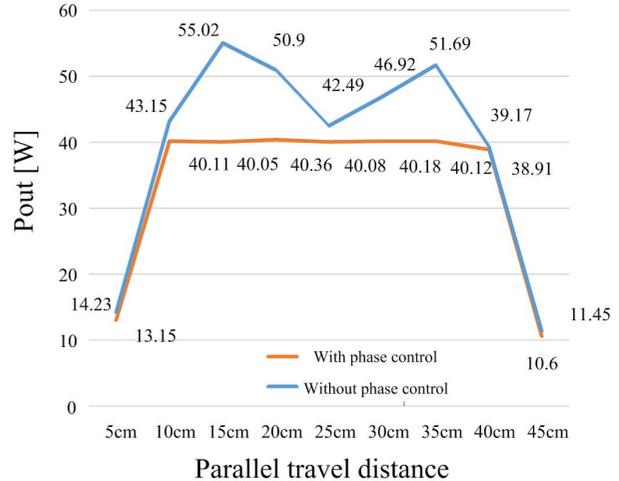


Fig. 5. 40W steady power according to parallel travel distance by a phase control.

전송하게 되는데, 이때 수신부 측에서는 주파수를 가진 2개의 전류파형이 서로 간섭을 일으키게 되어, 전류를 조절할 수 있게 된다. 그러므로 수신부 거리마다 다양한 출력 전력이 나오며 이는 위상 제어를 통해 수신코일로 전달되는 전류를 조절함으로써 각 거리마다 40W 일정한 전력을 획득할 수 있었다. 위치에 따라 전력을 조절하기 위한 위상차는 위상차가 없을 때 수신 되는 전력의 크기에 따라 변화한다. 그림 5에서 보면, 위상 제어가 없이 55W를 수신한 상태에서 40W 수신을 위해서는 두 송신 시스템의 위상차가 150도 발생한다. 반면 위상차 없이 42W를 수신하는 경우는 40W로 조절하기 위해서는 위상차가 약 35도 발생한다. 위상차를 두어 수신 전력을 조절하는 경우 효율 저하는 무효 전력 증가로 최대 3% 효율 저하를 실험적으로 확인하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 2개의 송신기가 가지는 효과에 대해서 분석하였다. 기존의 1:1 자기 공진과 같이 거리에 따른 최대 수신 가능한 출력 저하는 있지만 서로의 자기장 영향을 통하여 보다 높은 출력 전력을 얻을 수 있었다. 또한 위상 제어를 통하여 출력 전력 값의 범위 내에서 조절됨을 검증할 수 있었다. 최근 무선 충전의 적용 범위를 다양한 전자제품으로 넓히는 추세이다. 하나의 충전기로 다양한 제품에 적용하기 위해서는 서로 다른 정격 전력을 맞춰야 하므로 제안한 시스템이 무선 충전 시스템으로 적용 가능성이 예측된다.

이 논문은 2015년 한국연구재단 신진연구자 지원 사업에 의해 지원되었음. (과제번호: NRF-2015R1C1A1A02036699)

## References

- [1] M. Soljacic, A. Kurs, and A. Karalis, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Sci Express*, pp. 83-86, 2007.
- [2] R. Johari, J. V. Krogmeier, and D. J. Love, "Analysis and practical considerations in implementing multiple transmitters for wireless power transfer via coupled magnetic resonance," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 61, No. 4, pp. 1771-1783, Apr. 2014.
- [3] S. You, Y. Kim, and H. Ang, "Design and modeling platform of resonant wireless power transfer system," *Proceeding of The Korean Institute of Electrical Engineers Annual Conference*, pp. 3-4, Jul. 2015.
- [4] D. Ahn and S. Hong, "A transmitter or a receiver consisting of two strong coupled resonators for enhanced resonant coupling in wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 3, pp. 1193-1203, Mar. 2014.
- [5] K. Siddabattula, "Why not a wire? The case for wireless power," Jan. 18, 2018. Retrieved from <https://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/why-not-a-wire-the-case-for-wireless-power.html>,
- [6] T. Ahn, "Optimizing method for wireless charging with frequency control," *Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol. 50, No. 7, pp. 275-280, Jul. 2013.