

모바일 무선충전 효율 및 충전 자유도 개선을 위한 3차원 이중 송신 코일시스템

권기종, 권용성*
한동대학교 기계제어공학부

Three-Dimensional Magnetic Resonant Coil System with Double Transmitter Coil for Enhancement of Wireless Charging Efficiency and Charging Flexibility

Gi-Jong Gwon, Youngsung Kwon*
Department of Mechanical and Control Engineering, Handong Global University

요약 무선충전 기술은 사용자가 선 없이 충전할 수 있는 편리함의 이점으로 많은 모바일 전자기기의 필수요소로 자리 잡게 되었고, 지속적인 연구 개발에 의해 다양한 무선충전 시스템이 제안되고 있다. 대표적인 무선충전 시스템으로는 송수신 코일의 배치와 충전효율의 상관관계를 고려하여, 송수신 코일을 근거리 평면에 배치한 2D 평면 코일 시스템이 주로 사용되어왔다. 최근에는 평면으로 넓은 공간을 차지하는 2D 코일시스템에 높이구배를 주어, 공간을 효율적으로 사용하기 위한 3차원 코일시스템이 제안되고 있다. 하지만, 3차원 코일시스템은 2D 코일시스템에 비해 충전효율이 낮고, 특히 송수신 코일간의 거리가 멀어질수록 전력전송 효율이 급격하게 저하되는 경향이 있다. 본 논문에서는 기존 3차원 코일시스템의 단점인 낮은 충전효율과 충전자유도를 개선하기 위해 새로운 무선충전 시스템 설계를 제안한다. 3차원 형상으로 송신코일과 수신코일을 설계하였고, 이때 송신코일 내부에 독립된 송신코일을 추가로 구성한 이중 송신코일 구조를 제안하여 전송효율과 자유도를 개선할 수 있었다. 측정실험 결과, 107 kHz 동작주파수에서 송수신 코일의 거리가 8 mm일 때 제안한 시스템의 효율은 40.10 %로 기존 코일의 최대전송효율인 20.5 %에 비해 크게 증가했다. 본 논문에서 제안한 3차원 이중송수신 코일시스템은 실제 무선충전 시스템 설계 시 다양한 디자인의 무선충전 시스템 설계 및 충전효율 개선에 기여할 것으로 기대된다.

Abstract Wireless charging has been considered an essential part of recent mobile devices. Moreover, various wireless charging systems have emerged through many studies. Among the systems, in the 2D flat coil system, the transmitter coil and receiver coil are arranged horizontally as close as possible to improve the charging efficiency. Nowadays, the 3D coil system has been proposed by adding some slope to flat 2D coils to reduce the volume. On the other hand, the 3D coil system has a lower charging efficiency than the 2D system that decreases rapidly with increasing distance. This paper proposes a new system that improves the low efficiency and charging freedom, which are the drawbacks of the existing 3D systems. The proposed system was designed in three-dimensions, and another transmitter coil was added to the transmitter coil to improve the transmission efficiency and flexibility. The measurement showed that the charging efficiency of the proposed system was 40.10% when the distance between coils was 8 mm, which is 20.5 % improvement over the existing one. The proposed method can be applied when new wireless charging systems are designed and improve charging efficiency can be improved.

Keywords : Wireless Charging System, Wireless Power Transfer, Magnetic Resonant Coil System, Charging Efficiency, Charging Flexibility, Three-Dimension Coil.

*Corresponding Author : Youngsung Kwon(Handong Global Univ.)

email: youngsung.kwon@handong.edu

Received June 24, 2020

Revised July 21, 2020

Accepted September 4, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

모바일 전자기기로 대표되는 스마트폰의 첨단기술이 발전할수록 제품의 소형화와 경량화를 위해 배터리의 크기와 무게는 줄어들고 있지만, 오히려 스마트폰의 소모 전력은 증가하는 추세를 보인다[1]. 더불어 스마트폰의 기술발전과 함께 기기 사용량과 사용시간은 증가하였고 [2], 이에 따라 잦은 스마트폰의 충전이 필요해졌다. 더욱이 스마트폰 모델의 규격에 맞는 충전케이블이 있어야 충전할 수 있는 유선충전은 큰 불편함으로 작용하였고, 이에 대한 해결책으로 선 없이 충전 할 수 있는 무선충전 기술이 활발히 연구되어 2010년 이후 상용화되었다.

무선충전 기술은 19세기 니콜라 테슬라가 시작한 무선 전력전송 기술에 관한 연구를 시작으로 2007년 MIT에서 Soljacic M. 교수팀의 무선전력 전송연구로 이어졌다[3]. 이 연구 이후, 모바일 디바이스뿐만 아니라 전기차 동차를 위한 무선 전력전송 시스템이 제시되는 등 많은 연구가 진행되었다[4].

무선충전은 자기유도 방식과 방사형 방식, 그리고 자기공진 방식으로 분류되는데, 자기유도 방식과 방사형 방식은 효율이 낮고 인체에 유해한 전자기파가 발생하여 무선충전 기술에 사용되기 어렵다[5]. 반면, 자기공진 방식은 코일간의 공진현상을 이용하여 원거리 전력전송을 할 수 있는 장점이 있어 대부분의 무선충전 방식으로 채택되어 많은 연구가 진행되고 있다[6].

자기공진 방식 무선충전 시스템은 송수신 코일간의 배치와 코일의 형상 및 턴 수가 충전효율과 높은 상관관계를 가지며, 이는 결합계수(coupling coefficient)로 정의된다. 고효율의 무선충전 시스템을 설계하기 위해서 송수신 코일은 높은 결합계수를 나타내어야 하고, 이를 위해 다양한 송수신 코일 디자인이 제안되고 있다.

기존 2D 평면의 무선충전 시스템은 특정 이격거리에서 높은 충전효율을 보였지만, 송수신 코일의 중심이 일치해야하는 한계점이 존재했고[7], 이를 해결하기 위한 넓은 평면구조의 송수신코일은 무선충전 시스템의 부피가 커진다는 단점이 있다. 이러한 2D 평면코일 무선충전 시스템의 단점을 개선하기 위해 T.Hou 연구팀이 3차원 코일형상의 무선충전 시스템을 제안했으나, 낮은 충전효율(최대 충전 효율 20.5 %)과 송수신 코일간의 거리가 멀어짐에 따라 충전효율이 급격히 저하되는(충전자유도가 낮은) 경향을 보였다[8].

본 논문에서는 무선충전 시스템의 충전효율 및 충전자유도 향상을 위한 3차원 이중송신 코일시스템을 제안한

다. 제안한 시스템의 실효성을 확인하기 위해 ANSYS사의 전자기해석 시뮬레이터MAXWELL을 사용하여 3차원 코일의 인덕턴스(inductance) 값과 결합계수를 구했고, 전자회로 시뮬레이터 SIMPOLRER와 전력전자회로 시뮬레이터 PSIM(Power Electronics Simulation)을 이용하여 시스템회로를 구성 후 충전효율을 측정했다. 송수신 코일간의 거리가 가장 가까울 때(8 mm), SIMPLORER 사용결과 85.3 %, PSIM 사용결과 84.32 %의 시뮬레이션 최대 충전효율을 얻었고, 실제 측정실험에서 송수신 코일간의 거리가 8 mm 일 때 40.10 %, 18 mm 일 때 20.31 %의 충전 효율을 보였다. 이는 기존 무선충전 시스템과 달리 송수신코일 간의 거리가 늘어나더라도 충전 효율이 급감하지 않음을 나타낸다.

2. 3차원 이중송신 코일시스템의 설계 및 구현

2.1 설계이론 - 자기공진회로

자기공진 무선충전 시스템은 특정 주파수에서 송수신 코일간의 전력전송의 효율이 높아지는 공진현상을 이용한다. Fig. 1은 인덕터(inductor)와 커패시터(capacitor) 그리고 저항(resistor)으로 이루어진 공진회로로 다음의 Eq. (1)과 같은 공진 주파수를 갖는다.

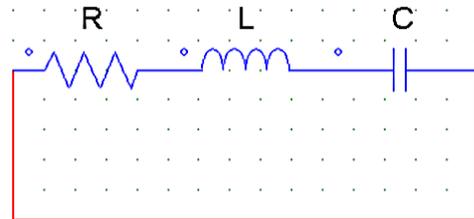


Fig. 1. A simple series RLC resonant circuit.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Where, L denotes inductance, C denotes capacitance.

공진현상을 이용하여 무선충전을 하기 위해서는 Fig. 2와 같이 두 개의 회로가 같은 공진주파수를 갖도록 설계되어야 한다.

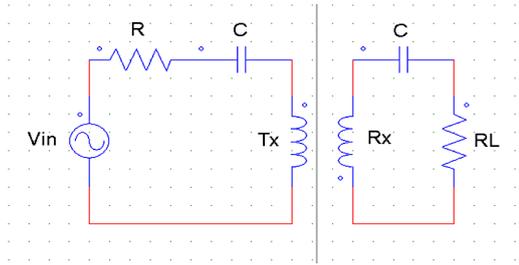


Fig. 2. An equivalent circuit of coupled resonator system. Tx denotes transmitter coil and Rx denotes receiver coil and RL denotes load resistor. When the two circuits have same resonant frequency, the coils are able to exchange energy.

송신코일과 수신코일은 유도된 자기장으로 결합되어 있으며, 두 코일의 거리간격과 코일의 특성에 따라 상호 인덕턴스(mutual inductance)와 자기인덕턴스(self inductance)값이 결정된다. 이때 3차원 코일의 상호인덕턴스는 노이만의 법칙을 이용해서 구할 수 있고[9], 자기인덕턴스는 T. Tominaka 의 방법으로 계산 할 수 있다[10].

또한, 두 값을 이용하여 결합계수를 정의할 수 있는데, 이는 두 코일의 결합된 정도를 나타내므로 값이 클수록 코일 간의 전력전송 효율이 높음을 의미한다. 이는 Eq. (2)에 나타냈다.

$$K = \frac{L_{TxRx}}{\sqrt{L_{Tx}L_{Rx}}} \quad (2)$$

Where, L_{TxRx} is mutual inductance between Transmitter coil and receiver coil, L_{Tx} is a self inductance of Transmitter coil, L_{Rx} is a self inductance of receiver coil.

2.2 3차원 이중송신 코일시스템 설계

2.2.1 이중송신 코일시스템

본 연구에서 제안하는 이중송신 코일시스템은 두 개의 송신 코일로 구성되어 있으며, 따라서 두 개의 공진주파수를 가질 수 있다. 회로의 특성을 고려하여 적절한 두 개의 공진주파수를 설정하면 송수신코일 사이에 상호 인덕턴스 및 커플링 계수가 개선되어, 충전효율을 높일 수 있다[11]. 본 논문에서는 최적의 공진주파수를 결정하기 위해 상용화된 무선충전 시스템의 동작주파수 범위(105

kHz ~ 210 kHz)내에서 시뮬레이션을 진행하였고, 시뮬레이션 결과 최대 충전효율을 나타내는 110 kHz 와 205 kHz를 공진주파수로 설정했다. 이때, 110 kHz는 외측 송신코일 회로와 수신코일 회로 사이의 공진주파수이고, 205 kHz는 내측 송신코일 회로와 수신코일 회로 사이의 공진주파수이다. 이는 Fig. 3에 나타냈다.

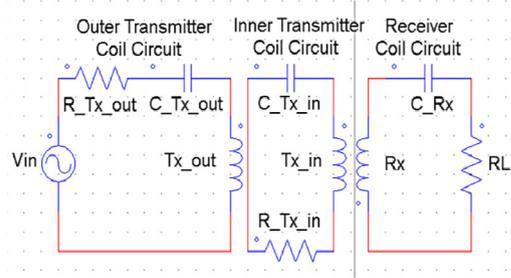


Fig. 3. An equivalent circuit of proposed double transmitter coil system. Tx_in denotes the inner transmitter coil and Tx_out denotes the outer transmitter coil and Rx denotes receiver coil. There are two resonant frequencies, between three circuits.

2.2.2 3차원 코일시스템

기존의 여러 연구에서는 원환형(toroidal) 3차원 코일 시스템이 제안되었지만[12], 큰 높이를 갖는 원환체의 구조적 특성으로 충전시스템의 부피가 커진다는 단점이 발생했다. 따라서 본 연구에서는 T. Hou 연구팀이 제안한 반구형(hemispherical) 3차원 코일을 설계하여 시스템의 부피를 소형화했다. 반구형 3차원 코일은 Eq. (3)의 스파이럴 커브를 반구(hemisphere)에 투영시켜 높이구배를 준 것으로 Fig. 4에 이를 나타냈다.

$$R_n = p_n - \frac{d\theta}{2\pi} \quad (3)$$

Where, n denotes index of the coil ; p_n denotes the largest radius of the spiral curve; d is the distance between each curve; $\frac{\theta}{2\pi}$ is the turn numbers;

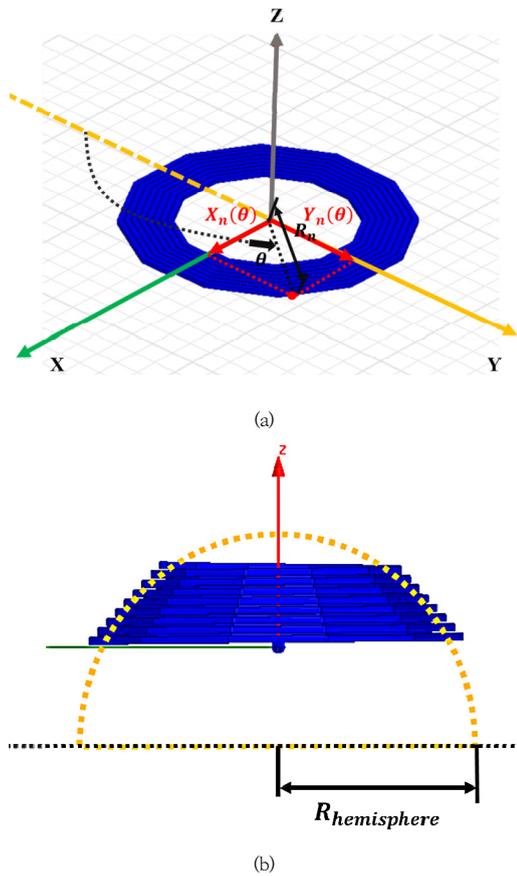


Fig. 4. A design process of 3D hemispherical coil. (a) A flat 2D coil structure (b) Hemispherical 3D coil structure. By projecting a 2D flat spiral coil to the hemisphere surface, the 3D coil system was designed.

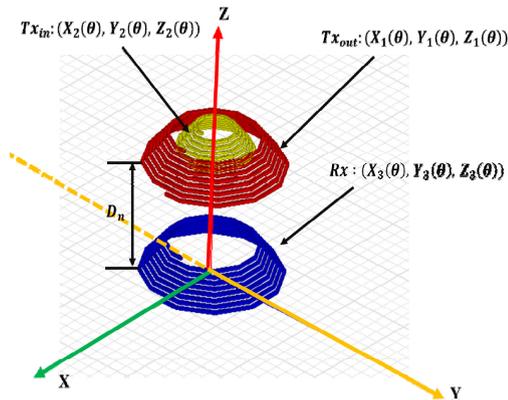


Fig. 5. A proposed 3D double transmitter coil system in cartesian coordinates. Tx_out, Tx_in and Rx coils are sequentially numbered as 1,2,3.

두 개의 송신코일과 하나의 수신코일을 앞서 정의한 반구형으로 모델링하였고, 이를 Fig. 5의 직각좌표공간에 각각 나타냈다. 또한, 모델링된 코일의 직교좌표는 Eq. (4)에 나타냈다.

$$\begin{aligned} X_n(\theta) &= R_n \cos(\theta) \\ Y_n(\theta) &= R_n \sin(\theta) \\ Z_n(\theta) &= \sqrt{(R_{hemisphere}^2 - R_n^2)} + D_n \end{aligned} \quad (4)$$

Where, n denotes index of the coil which is 1 is Tx_out, 2 is Tx_in, 3 is Rx; D_n denotes the vertical space of the coil along the Z axis; $R_{hemisphere}$ is the radius of hemisphere.

3. 충전효율 측정 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경 구축

제안된 이중송신 코일시스템의 실효성을 검증하기 위해 맥스웰 시뮬레이터를 사용하여 3차원 리츠(litz) 와이어 코일을 모델링했다. 코일의 단면적은 가로 0.525 mm, 세로 0.525 mm로 설정하였고, 내측 송신코일은 6 턴으로 설정하고 외측 송신코일과 수신코일은 각각 8턴으로 설정했다. 구체적인 코일시스템의 디자인은 Fig. 6에 나타냈다.

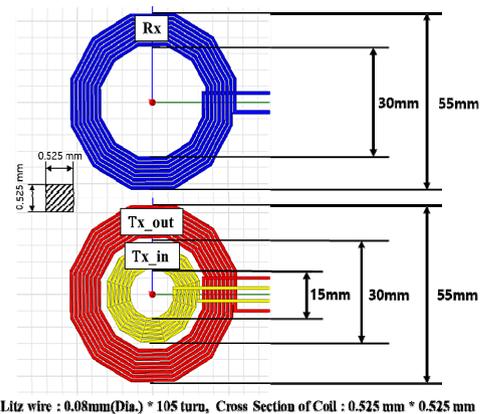


Fig. 6. A geometric setup of the proposed coil system. There are three coils which are Tx_in(Yellow Coil), Tx_out(Red Coil), Rx(Blue Coil).

다음으로 무선전력위원회(WPC: Wireless Power Consortium)에서 규정하는 Qi 표준입력인 110 kHz, 2 A을 모델링에 인가하여 시뮬레이션을 진행했다[13].

시뮬레이션은 수신코일과 송신코일 간의 거리를 실험 변수로 설정하여 거리에 따른 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스, 결합계수의 변화를 측정했다. Fig. 7.(a)와 같이 외측 송신코일과 수신코일 간의 최소 거리간격 8 mm로부터 최대 38 mm 까지 총 4 단계에 걸쳐 거리간격을 10 mm 씩 증가시키며 시뮬레이션을 진행했다. 이때 외측 송신코일과 내측 송신코일은 고정시키고, 수신코일의 위치를 변화시켰다. 시뮬레이션 결과 Fig. 7.(b)에서와 같이 3차원 코일 내부에서 가장 강한 자속벡터가 측정되는 것을 확인 할 수 있다.

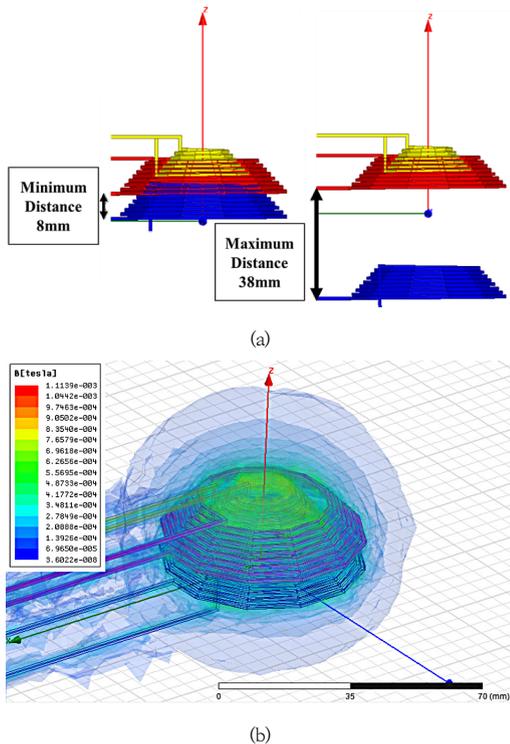


Fig. 7. A maxwell simulation setup and results
 (a) A distance set up between the coils. A four stages of distance step is set up to know the effect of spacing distance between coils (b) Measurement of magnetic flux vector B[tesla] inside the 3D coil system.

3.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 코일간의 거리에 따른 상호 인덕턴스와 결합계수를 구했고, Fig. 8에 이를 나타냈다. 무선전력위원회에서 규정하는 Qi 표준을 만족하는 상용 무선

충전 코일의 결합계수가 0.3 부터 0.6 사이의 값으로 설계되는 것을 고려했을 때[14], 이는 제안된 모델이 3차원 구조임에도 불구하고 높은 효율을 나타냄을 알 수 있다.

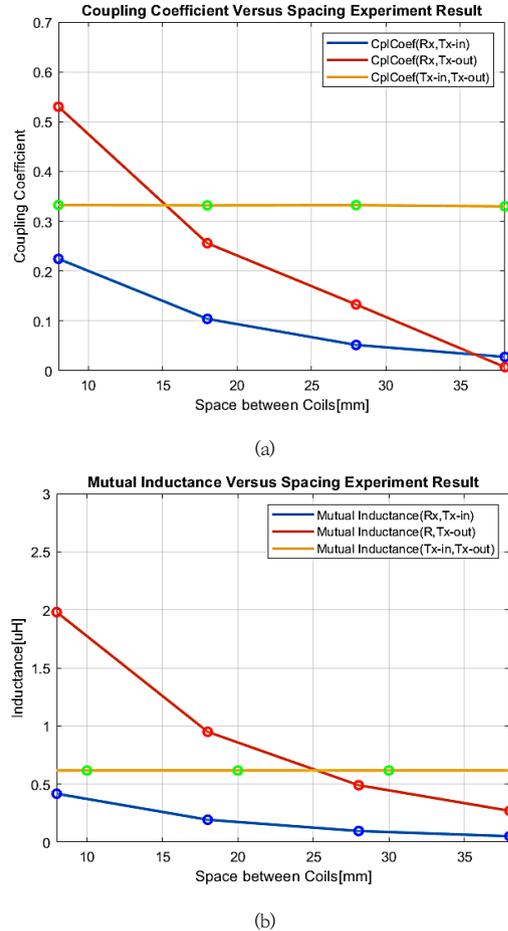


Fig. 8. A simulation results from MAXWELL.
 (a) Mutual inductance simulation results. (b) Coupling Coefficient simulation results. From the experimental results, mutual inductance and coupling coefficient are both declined with increasing distance. However, the results from inner transmitter coil(Tx_in) and outer transmitter coil(Tx_out) does not change because only the position of receiver(Rx) coil changes.

ANSYS사의 MAXWELL과 SIMPLORER의 프로그램 연동성을 이용하여 MAXWELL에서 디자인한 3차원 코일 모델을 포함한 실제 시스템회로를 Fig. 9.(a)에서 보는 바와 같이 SIMPLORER내에서 구성하였고, 이를 통해 충전효율 시뮬레이션을 진행했다. 또한 정확한 시뮬레이션 결과를 위해 전력전자 시뮬레이터 PSIM을 이용하여 동일한 시스템 회로를 구성 후 시뮬레이션을 진행했

고 두 결과를 비교했다. 구성된 시스템 회로는 Fig. 9.(b)에 나타냈고, 시스템 회로 구성에 사용된 수동소자는 Table 1에 나타냈다.

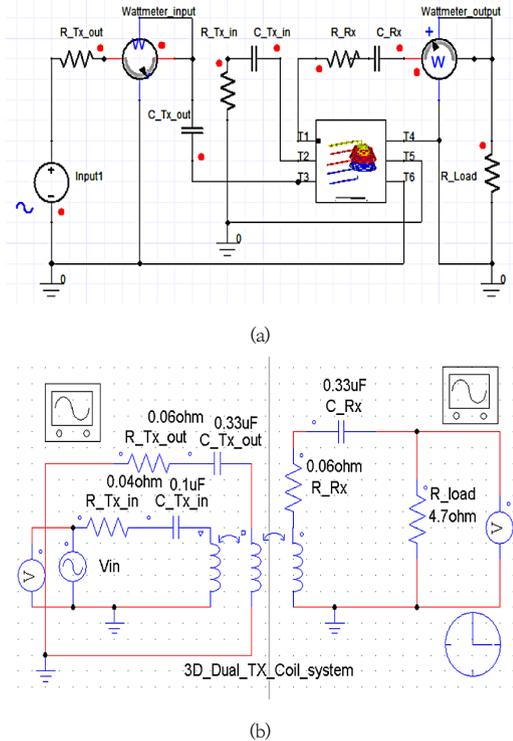


Fig. 9. An equivalent simulation circuit of 3D coil system
(a) A SIMPLORER simulation circuit. (b) A PSIM simulation circuit. R_load in the both circuits is 4.7 Ω .

Table 1. Measurement results of the proposed coil systems

	Tx_out	Tx_in	Rx
Measured resistance	0.06 [Ω]	0.045 [Ω]	0.06 [Ω]
Simulated resistance	0.06 [Ω]	0.04 [Ω]	0.06 [Ω]
Resistance simulation error	0 [%]	11.1 [%]	0 [%]
Measured self-inductance	6.3 [μH]	1.2 [μH]	6.3 [μH]
Simulated self-inductance	5.5 [μH]	0.9 [μH]	5.5 [μH]
Self-inductance Simulation error	12.6 [%]	25 [%]	12.6 [%]
Capacitance	0.33 [μF]	0.1 [μF]	0.33 [μF]

시뮬레이션 결과 송수신 코일의 거리가 가장 가까울 때(8 mm), SIMPLORER 사용결과 85.3 %, PSIM 사용결과 84.3 %의 충전 효율을 보였다. 그리고 코일사이의 거리가 가장 멀 때(38 mm), SIMPLORER 사용결과 30.74 %, PSIM 사용결과 21.7 %의 충전 효율을 보였다. 두 시뮬레이션 모두 입력주파수 110 kHz 근처인 107 kHz에서 가장 높은 효율을 보였고, 코일간의 늘어나는 거리에 따라 충전효율이 동일한 경향성을 보임을 확인했다. 자세한 결과는 Fig. 10에 나타냈다.

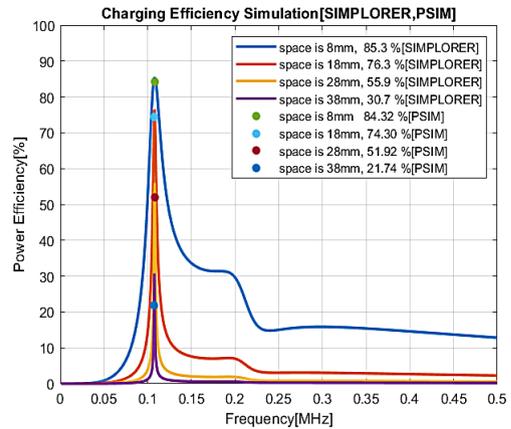


Fig. 10. A Charging efficiency simulation results from SIMPLORER and PSIM. There are two inflection point in the graph, which are 108 kHz and 205 kHz, at the resonant frequency of the circuit. High charging efficiency can be achieved at these two points.

4. 충전효율 측정 실험

4.1 실험 환경 구축

제안된 3차원 이중송신 코일시스템을 검증하기 위하여 시스템 회로를 구성하였고, DC 파워서플라이(power supply)와 함수발생기(function generator)를 사용하여 2 V와 110 kHz를 인가했다. 3차원 코일은 직경 0.08 mm의 구리선이 105번 꼬여져 있는 연선(stranded)형태의 리츠와이어를 사용하여 제작했고, 수신코일에 부하 저항 4.7 Ω 을 연결하여 출력전압을 측정했다. 또한 이중 송신 코일시스템의 유용성을 검증하기 위해 내부송신 코일을 제외한 단일송신 코일시스템의 실험도 진행했다. 실험은 송수신 코일간격이 8 mm, 18 mm, 28 mm, 38

mm일 때 이중송신 코일과 단일송신 코일 각각 네 번씩, 총 여덟 번 진행했다. 구성한 실험환경은 Fig. 11과 같다.

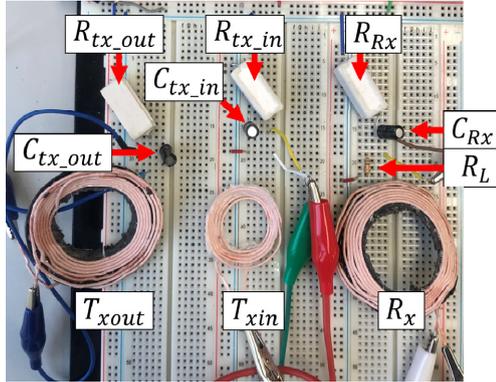


Fig. 11. A photo of experimental setup.

4.2 실험 결과

실험결과 본 논문에서 제안한 3차원 이중송신 코일시스템은 Fig. 12에서 보는 바와 같이 거리간격이 8 mm, 18 mm, 28 mm, 38 mm 일 때, 입력주파수 110 kHz 근처인 107 kHz에서 40.10 %, 20.31 %, 13.68 %, 5.56 %의 충전효율을 보였다. 이는 T. Hou 연구팀이 제안한 시스템의 충전효율인 20.5 %를 크게 개선한 수치이다. 기존의 모델은 송수신 코일 간의 거리가 5 mm 보다 커지면서 충전효율이 급감했지만, 제안된 시스템은 8 mm 이후로도 40.10 %의 충전효율을 유지하였으며, 충

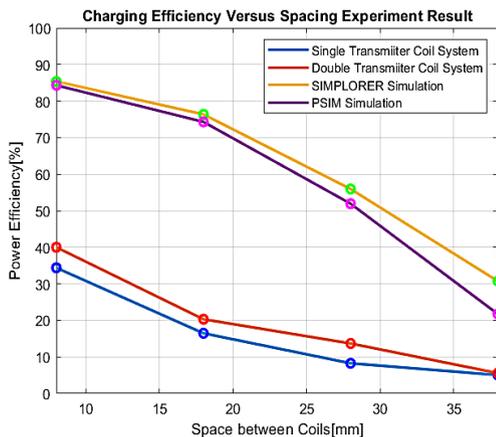


Fig. 12. A charging efficiency measurement results. Two simulation results, and two experiment results are plotted in the graph from the top. All of the results are measured at 107 kHz.

전효율의 급감 또한 발견되지 않았다. 또한 이중송신 코일시스템의 유용성을 검증하기 위해 비교 실험한 단일송신 코일 시스템의 낮은 충전효율과, 늘어난 거리에 따른 가파른 효율저하현상 관찰을 통해 이중송신 코일시스템을 통한 충전효율과 충전자유도 개선을 확인했다.

다만 MAXWELL과 PSIM 시뮬레이션 결과에 비해 측정된 충전효율이 저하되었는데, 이는 3차원 코일시스템 구조에 기인한 큰 자속 손실에도 불구하고 전자기차폐장치를 사용하지 않았기 때문으로 추정할 수 있다. 또한 인쇄회로기판(PCB: Printed Circuit Board)을 사용하지 않고 상용소자로 회로를 구성하여 각 시스템의 저항과 보드소자들이 효율저하에 영향을 끼친 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 기존의 3차원 무선충전 시스템의 낮은 충전효율과 충전자유도를 개선하기 위한 3차원 이중송신 코일시스템을 제안했다. 기존의 많은 공간을 차지하는 원환형 3차원 코일이 아닌 반구형 3차원 코일을 설계하여 공간을 효율적으로 사용할 수 있고, 이중송신 코일구조를 사용하여 코일간의 거리가 멀어짐에 따라 효율이 급감하는 단점을 개선시켰다. 또한, 단일송신 코일구조에 비해 이중송신 코일구조의 충전효율과 충전자유도가 높음을 확인하여 제안된 구조의 타당성을 확인했다. 측정실험을 통해 기존의 20.5 %로 낮았던 충전효율이 40.10 %로 크게 개선되었음을 검증하였고, 시뮬레이션 결과와 경향성이 일치함을 확인했다.

향후 성능개선을 위해서 전자기차폐장치와 인쇄회로기판에 시스템회로를 구성하여 시뮬레이션결과와 실제 측정실험 값의 차이를 줄이는 연구를 지속할 예정이다. 본 논문의 결과를 바탕으로 실제 제품 개발 시 무선충전 시스템의 효율 개선 및 다양한 디자인 설계에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] P. K. D. Pramanik et al., "Power Consumption Analysis, Measurement, Management, and Issues: A State-of-the-Art Review of Smartphone Battery and Energy Usage," *IEEE Access*, Vol.7, pp. 182113-182172, December 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2958684>

[2] K. E. Lee, S. H. Kim, T. Y. Ha, Y. M. Yoo, J. J. Han, "Dependency on smartphone use and its association with anxiety in Korea", *Public Health Reports*, Vol.131, Issue.3, pp.411-419, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1177/003335491613100307>

[3] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J.D. Joannopoulos, Peter Fisher, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, Vol.317, Issue 5834, pp.83-86, July 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1143254>

[4] S. Y. R. Hui, Wenxing Zhong, C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.29, No.9, pp.4500-4511, September 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2013.2249670>

[5] Longzhao Sun, Dianguang Ma, Houjun Tang, "A review of recent trends in wireless power transfer technology and its applications in electric vehicle wireless charging", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.91, pp.490-503, August 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.016>

[6] Surajit Barman, Ahmed Reza, Narendra Kumar, Md. Karim, Abu Munir, "Wireless powering by magnetic resonant coupling: Recent trends in wireless power transfer system and its applications", *Renewable and Sustainable energy reviews*, Vol.51, pp.1525-1552, November 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.031>

[7] Xuling Chen, Lu Chen, Weiwei Ye, Weipeng Zhang, "Three-coil Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer System with Adjustable-position Intermediate Coil for Stable Transmission Characteristics", *Journal of Power Electronics*, Vol.19, Issue.1, pp.211-219, January 2019.
DOI: <http://dx.doi.org/10.6113/JPE.2019.19.1.211>

[8] T. Hou, Y. Song, W. S. Elkhuizen, J. Jiang and J. M. P. Geraedts, "3D wireless power transfer based on 3D printed electronics", *In 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering*, IEEE, Munich, pp.499-505, August 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1109/COASE.2018.8560508>

[9] D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics, Pearson Cambridge University Press, 1999, p.599.

[10] T. Tominaka, "Self and mutual inductances of long coaxial helical conductors," *Superconductor Science and Technology*, Vol.21, No.1, November 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-2048/21/01/015011>

[11] B. H. Choi, J. H. Lee, "Design of asymmetrical relay resonators for maximum efficiency of wireless power transfer," *International Journal of Antennas and Propagation*, Vol.29, No.12, pp.907-914, December 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2018.29.12.907>

[12] Peter T. While, Larry K. Forbes, Stuart Crozier, "3D Gradient coil design-toroidal surfaces", *Journal of*

Magnetic Resonance, Vol.198, Issue.1, pp.31-40, May 2019.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmr.2009.01.006>

[13] Bill Johns, Designing a Qi-compliant Qi receiver coil for wireless power systems Part 1, Technical Report, Texas instruments Inc, Vol.1, USA, pp.8-14, 2012.

[14] E. Waffenschmidt, "Homogeneous magnetic coupling for free positioning in an inductive wireless power system," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol.3, No.1, pp.226-233, March 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2328867>

권기종(Gi-Jong Gwon)

[준회원]



- 2020년 8월 : 한동대학교 기계제어공학부 (공학사)

<관심분야>

무선전력전송, 리튬이온 배터리, 최적설계 등.

권용성(Youngsung Kwon)

[정회원]



- 2012년 8월 : University of Texas at Austin (공학석사)
- 2015년 8월 : University of Texas at Austin (공학박사)
- 2015년 10월 ~ 2018년 8월 : LG 전자 VC사업본부 선임연구원
- 2018년 9월 ~ 현재 : 한동대학교 기계제어공학부 조교수.

<관심분야>

전력변환, 전력계통 등.