

이중코일을 이용한 자기유도 무선충전 코일의 자유도 개선

Improved Degree of Freedom of Magnetic Induction Wireless Charging Coil Using Proposed Double Coil

최보희 · 남용현 · 정하봉 · 이정해

Bo-Hee Choi · Yong-Hyun Nam · Habong Chung · Jeong-Hae Lee

요 약

무선충전은 전선 없이 전자기기를 충전할 수 있다는 사용자의 편의적인 측면에 장점이 커 활발히 연구개발되고 널리 보급되었다. 하지만 무선충전패드에서 수신기의 중심이 어긋날 경우에 충전이 되지 않아 수신기의 중심을 잘 맞춰야 한다는 점은 사용자의 편의성이라는 무선충전의 효용성을 크게 저감시킨다. 본 논문은 이러한 무선충전의 한계를 극복하고자 수신기의 위치 자유도를 향상시키기 위한 코일 설계를 진행하였다. Tx 코일이 Rx 코일과 사이즈가 비슷할 때보다 외경 크기가 클 때 중심에서 효율은 다소 저하되었지만, 중심이 어긋날 경우의 효율이 개선되어 Rx 코일의 위치 자유도가 향상됨을 알 수 있었다. 이 때, Tx 코일에 내측 코일이 추가로 구성된 이중코일 구조를 제안하여 효율을 추가적으로 향상시킬 수 있었다. 자유도 개선 결과를 시뮬레이션과 측정을 통해 효율을 확인하였고, 경향성이 일치함을 볼 수 있었다. 측정 결과, 105~210 kHz 동작 주파수에서 송수신 코일의 전송거리 3 mm, 오정렬 15 mm일 때, 수신 코일에 전류가 1A 흐를 때 기준으로 기존 Tx 코일의 전송 효율은 37 %, 외경 크기를 키운 코일의 효율은 45 %, 내측 코일을 추가한 이중 코일은 47 %로 효율이 향상되었다.

Abstract

Wireless charging has been actively researched and popularized owing to the potential convenience of being able to charge electronic devices without wires for users. However, the receiver on the wireless charging pad is not charged when the center of the receiver is misaligned; thus, the center of the receiver must be adjusted well. This misalignment may greatly reduce the convenience of wireless charging. To overcome this limitation of wireless charging, a coil is designed to improve the positional freedom of the receiver. The positional freedom of the Rx coil is improved when the outer diameter of Tx coil is larger than when Rx and Tx coils are almost the same size. When the Tx coil has a larger outer diameter than that of the Rx coil, the efficiency at the center is somewhat lowered, but the efficiency is improved compared to when the center is out of order. In this paper, a double coil structure having an outer and an inner coil is proposed. The double coil structure further improves the efficiency, compared with one coil with the same outer size. The simulation and measurement results demonstrated that the tendency was consistent, and it was verified that the degree of freedom of the Rx coil is improved by adding the inner coil, while the size of the outer coil was the same. The measurement shows that the transmission efficiency of the conventional Tx coil is 37 %, the larger outer diameter coil is 45 %, and double coil is 47 % when

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2015R1A6A1A03031833)」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hong-ik University)

· Manuscript received July 13, 2018 ; Revised August 10, 2018 ; Accepted December 5, 2018. (ID No. 20180713-074)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

the distance of the Tx/Rx coil is 3 mm, the misalignment is 15 mm and current flowing in the Rx coil is 1 A at an operating frequency of 105 to 210 kHz.

Key words: Wireless Charging, Positional Freedom of The Receiver, Electromagnetic Inductive Coupling, Double Coil, Improve The Efficiency, Wireless Power Transfer(WPT)

I. 서 론

스마트폰 무선충전패드를 비롯한 자기유도형 무선충전은 이미 상용화되어 널리 보급되었으며, 응용분야가 무궁무진하여 현재에도 업계와 학계에서 활발히 연구개발되고 있다^{[1]~[3]}. 자기유도형 무선충전은 WPC(Wireless Power Consortium)에서 Qi 규격^[4]을 적용하고 있으며, 그 밖에 A4WP(The Alliance for Wireless Power)와 합병한 PMA(Power Matters Alliance)^[5]도 자기유도형 무선충전 규격을 제시하고 있다. 모바일 폰, 차량 등에 적용되는 무선충전 제품이 이러한 규격에 따라 상용화되어 있다.

이러한 무선충전은 사용자에게 전선이 없이 전자기기를 충전할 수 있는 편의성을 제공한다. 하지만 자기유도형 무선충전은 전송거리가 약 3 mm로 짧고, 수신기기의 위치 자유도가 제한된다. 전자기기를 무선충전패드의 정확한 위치에 올려놓아야만 충전이 되는 불편함은 무선충전의 목적인 편의성을 크게 저하시킨다. 이것은 송신코일과 수신코일의 배열(alignment)이 어긋나면 효율이 크게 떨어지는 기술적 한계에 따른 결과이다. 효율이 저하되면 발열로 인해 기기의 시스템에 있는 회로를 손상시키기 때문에 시스템에서 전력전송을 차단해 버린다. 만약 충전패드 위에서 배열이 어긋나게 위치하여도 어느 정도 충전이 된다면, 사용자의 편의성을 크게 향상시켜 무선충전 패드는 더욱 널리 보급될 것이다. 따라서 무선충전패드의 자유도 향상하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 자기유도방식은 거리 및 위치 자유도의 제한이 크지만 자기공명방식 무선전력전송은 전력전송 거리와 위치의 자유도 측면에서 좀더 장점을 가지며 많은 연구가 진행되고 있다^{[6][7]}.

본 논문에서는 무선충전패드의 자유도 향상을 위한 Tx 코일의 구조를 제안한다. 개선된 코일의 효율을 Ansys사의 Maxwell(저주파 해석 프로그램)을 이용하여 시뮬레이

션하였으며, 측정을 통해 이를 입증하였다. 코일의 저항을 낮추고 효율을 향상하기 위해 무선충전 코일에 Litz Wire가 주로 사용되는데, 이러한 Litz Wire를 신뢰성 있도록 시뮬레이션하기 위한 환경을 구축하였다. 또한 외측 코일과 내측 코일로 구성된 Two Coil을 제안하여 Tx 코일에 적용함으로써 Rx의 위치에 따른 자유도를 개선하였다.

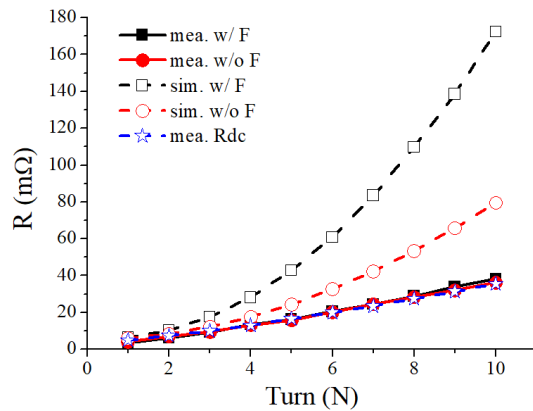
II. 시뮬레이션 신뢰성 검증 및 One Coil 효율

Litz Wire는 연선(Stranded Wire)이 꼬여져 있는 형태로, 단선(Solid Wire)에 비해 표피면적효과(Skin Depth Effect)와 근접효과(Proximity Effect)를 제거하여 교류(AC) 전류가 흐르는 전선의 단면적을 넓혀 저항을 낮춰주는 효과가 있다. 이러한 효과는 결국 무선전송의 효율과 직결되고, 따라서 무선충전 코일에는 Litz Wire가 주로 쓰이고 있다. 하지만 직경 0.08 mm 단선 105턴이 꼬여져 있는 형태의 Litz Wire로 구성된 코일을 시뮬레이션하기 위해 그 구조를 모델링하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 Litz Wire를 신뢰성 있게 시뮬레이션하기 위한 방법을 제시한다.

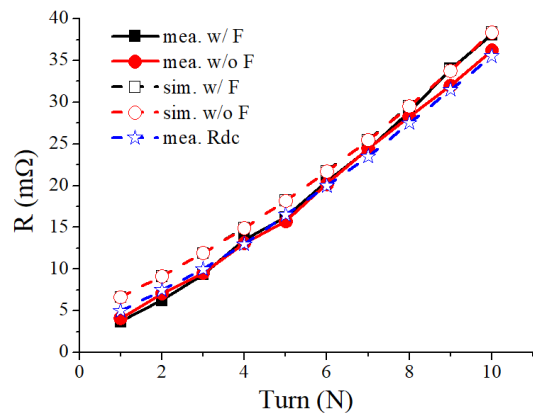
본 논문에서는 Ansys사의 저주파 해석 시뮬레이터 Maxwell 프로그램을 이용하여 Litz Wire의 시뮬레이션 환경을 구축하였다. Maxwell에는 전류 설정에 solid type과 stranded type 중 선택하는 기능이 있다. Solid type은 일반적인 단선(solid wire)의 시뮬레이션으로 표피면적효과와 근접효과가 나타나지만, stranded type으로 설정을 하면 이 두 가지 효과가 제거되어 단면적에 균일한 전류가 흐르도록 설정된다. 따라서 직경 0.08 mm인 단선이 105턴인 Litz wire일 때, 각각의 단선의 단면적 0.005 mm²을 105배 계산하여 총 단면적이 0.53 mm²인 solid wire를 모델링하여 stranded type으로 시뮬레이션하였다. 페라이트가 있을 때와 없을 때, 코일의 턴 수에 따라 측정값과 시뮬레이션 R값을 그림 1에 그래프로 도시하였다. Solid type으로 시뮬레이션

할 때는 R 값이 측정값과 차이가 크게 나지만, **stranded type**으로 시뮬레이션 결과 측정값과 잘 일치하여 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. Litz wire가 표피면적효과와 근접효과가 나타나지 않기 때문에, 페라이트 유무와 직류 저항(R_{DC}) 값이 크게 차이가 나지 않고 비슷한 것을 알 수 있다. L값은 시뮬레이션 전류 설정에 크게 차이를 보이지 않았다.

그림 2(a)와 그림 2(b)는 Rx 코일과 Tx 코일의 구조이며, 이는 스마트폰 무선충전용 코일에 적합하다. 그림 2(a)의 Rx 코일은 2층 구조이며 via를 통해 병렬 연결되어 있다. 그림 2(b)의 Tx 코일은 Qi 규격의 A11 코일을 적용하였



(a) Solid type 설정 시
(a) When setting solid type



(b) Stranded type 설정 시
(b) When setting stranded type

그림 1. 코일 턴수에 따른 R 값

Fig. 1. The resistance according to turns of the coil.

다. 각 코일에 적용된 페라이트의 사양은 표 1에 제시하였다. Qi 규격에서 A11 코일의 송수신 거리는 3 mm 이하이고, 실제 스마트폰과 무선충전패드도 그 정도의 거리를 가진다. 그림 2(c)와 같이 코일 간의 거리는 3 mm로 설정하였고, 스마트폰이 무선충전패드의 중심에서 벗어나 놓여지는 경우를 가정하여, 어긋나는 정도를 **distance**로 나타내었다.

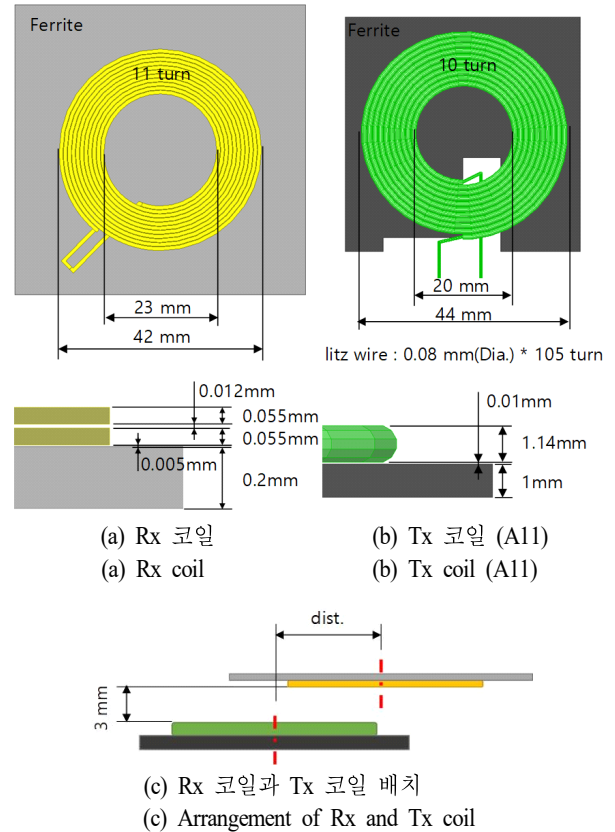


그림 2. 스마트폰 무선충전용 코일 구조

Fig. 2. The structure of the coil for smart phone wireless charging.

표 1. 페라이트 사양

Table 1. Specification of ferrite.

	Rx	Tx
Material	SN-065	PL-13
Permeability (H/m)	650	3200
Magnetic loss tangent	0.001	10^{-5}

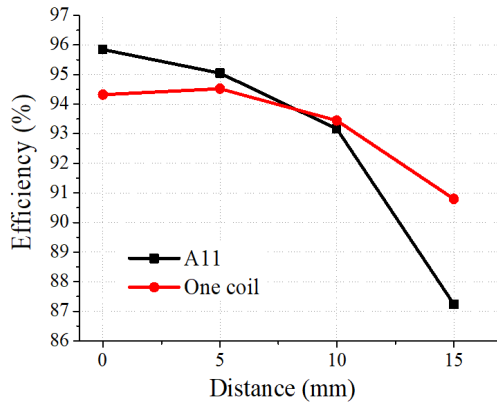


그림 3. 거리에 따른 효율 비교

Fig. 3. The efficiency according to distance.

송수신 코일 사이 거리가 가까울 때는 그림 2(a) 및 그림 2(b)와 같이 Rx와 Tx 코일의 크기가 비슷할 때 최대 효율을 가진다. 하지만 코일의 중심이 어긋날 때, 효율은 저하된다. Tx 코일의 외경 크기를 크게 한다면 코일 중심이 어긋날 때보다 효율이 개선될 것이다.

따라서 Tx가 그림 2(b)와 같이 A11일 때와 지름이 1 cm 더 큰 코일을 설계하여 효율을 비교하였다. 지름이 더 큰 코일은 A11과 같은 사양의 Litz wire를 사용하였고, 외경 54 mm, 7턴으로 하였으며, 편의상 이름을 ‘One coil’이라고 명하였다. Maxwell 시뮬레이션을 통해 L, M, R 값을 구했으며, Rx의 C값은 183 nF로 설정하여 코일의 공진점이 약 90 kHz이 되도록 하였다. Tx의 C 값은 400 nF로 본 논문의 코일 타입에 관계없이 고정되었으며, 공진점은 약 100 kHz이다.

거리에 따른 효율 비교를 그림 3에 나타내었다. 측면 거리가 0 mm와 5 mm일 때는 A11의 효율이 ‘One coil’보다 높지만, 10 mm, 15 mm로 측면 거리가 멀어짐에 따라 A11은 효율이 급격히 떨어지는 반면, ‘One coil’은 소폭 효율이 떨어져 위치의 자유도 측면에서는 코일 외경 크기가 큰 ‘One coil’이 유리함을 알 수 있다. 이 때, Rx의 load 값은 각각의 경우 최대 효율을 가지기 위한 최적값을 사용하였다.

이 결과는 송신코일과 수신코일 사이의 상호인덕턴스 (M)으로 설명할 수 있다. 코일이 중심 정렬일 때 A11의 M값은 11.9 μ H이지만, 외경의 크기가 큰 ‘One coil’의 M

값은 9.5 μ H으로 커플링양이 보다 적다. 하지만 코일의 측면 거리가 15 mm일 때, A11의 M값은 4.3 μ H인 반면, ‘One coil’의 M값은 5.2 μ H로 보다 크기 때문에 더 높은 효율을 가진다.

III. Two Coil 설계 및 자유도 개선

앞 장에서 Tx 코일의 외경의 크기가 Rx 코일보다 클 때, 중심에서의 효율은 다소 저하되지만 측면으로 이동하였을 때 효율은 개선되어 Rx 코일의 자유도가 향상됨을 알 수 있었다. 본 장에서는 외경이 크기가 커졌을 때, 즉, ‘One coil’과 동일한 크기의 외경에서 좀더 전력전송 효율을 향상시킬 수 있는 코일 구조를 제안한다.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 외측코일과 내측코일로 구성된 코일의 구조이다. 이를 ‘Two coil’이라고 명하였다. ‘Two coil’의 외측코일은 ‘One coil’과 똑같이 외경 54 mm, 7턴 구조이며, 내측에 동일 사양의 litz wire를 5턴 감은 코일이 추가로 구성된다. 내측 코일은 외측 코일과 분리되어 있으며, 156 nF의 커패시터가 직렬 연결되어 있다. 내측 코일의 공진주파수는 약 220 kHz이다. 외측 코일은 송신회로에 연결되어 있으므로, 본 논문 2장에 기재하였다시피 400 nF의 공진커패시터를 갖는다.

그림 5(a), 그림(b)는 ‘Two coil’과 내측 코일을 제거한 ‘One coil’, 그림 2(b) A11 coil의 시뮬레이션 효율을 비교한 그래프이다. 실제 스마트폰의 사용 환경을 고려하여, 스마트폰의 배터리 충전장 상태에 따라 Rx 코일의 load 값이 5~50 Ω 이라고 가정하고, 그에 따른 효율을 계산하

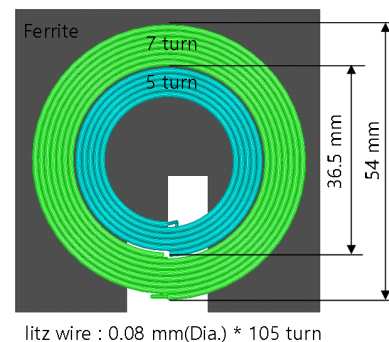
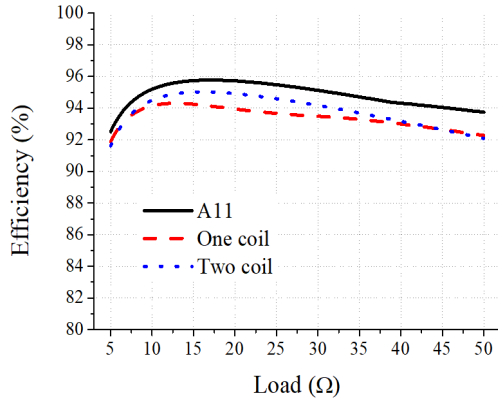
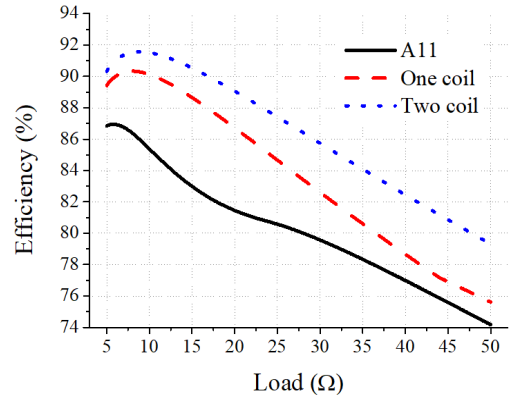


그림 4. Two coil의 구조

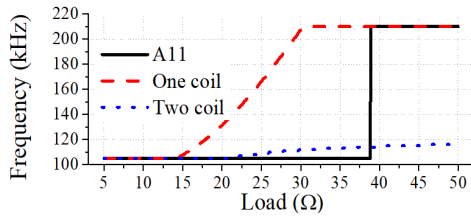
Fig. 4. Structure of two coil.



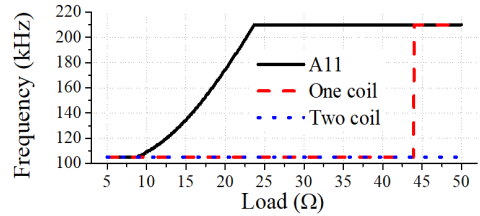
(a) Distance 0 mm일 때의 효율
(a) Efficiency when is distance 0 mm



(b) Distance 15 mm일 때의 효율
(b) Efficiency when is distance 15 mm



(c) Distance 0 mm일 때 동작주파수
(c) Operating frequency when is distance 0 mm



(d) Distance 15 mm일 때 동작주파수
(d) Operating frequency when is distance 15 mm

그림 5. 시뮬레이션 효율 및 동작주파수
Fig. 5. Simulation efficiency and operating frequency.

였다. Q_i 규격에서 A11 코일의 동작 주파수 범위가 105~210 kHz임을 고려하여, load에 따라 105~210 kHz 주파수 범위에서 최고 효율이 되는 주파수를 선정하여 그 때의 효율을 나타내고, 그 때 선정된 주파수를 그림 5(c) 및 그림 5(d)에 표기하였다. II 장의 결과와 마찬가지로, Rx 코일이 중심에 있을 때(0 mm)는 Rx 코일과 외경 크기가 비슷한 A11 코일의 효율이 가장 좋지만, 15 mm 옆으로 이동하여 위치하였을 때는 외경의 크기가 큰 ‘One coil’과 ‘Two coil’의 효율이 더 좋았다. 이 때, ‘Two coil’의 효율은 0 mm와 15 mm에서 모두 ‘One coil’보다 향상되어 ‘Two coil’이 ‘One coil’과 외경 크기가 동일한 조건에서도 전력 전송 효율을 더욱 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

세 가지 타입(A11, ‘One coil’, ‘Two coil’)의 효율 비교 결과는 송수신 코일 간의 커플링 계수로 설명할 수 있다. 송수신 코일의 거리가 가까울 때는 A11과 같이 송수신 코일의 외경이 비슷할 때 가장 큰 커플링 계수를 갖는다.

하지만 Rx 코일이 측면으로 이동함에 따라 Tx coil과의 커플링 계수는 작아지게 된다. ‘One coil’은 외경의 크기가 커져, Rx 코일과 거리가 가까운 0 mm에서는 커플링 계수가 A11에 비해 작지만, Rx 코일이 15 mm 이동하였을 때 A11에 비해 더 큰 커플링 계수를 가진다.

‘Two coil’은 내측 코일이 추가되어 0 mm와 15 mm일 때 ‘One coil’에서 부족한 커플링 계수를 보완해주는 역할을 한다. 외측 코일과 수신 코일 사이의 커플링 뿐 아니라, 내측 코일과 수신 코일 사이에 커플링이 형성된다. 내측 코일은 동작주파수보다 큰 220 kHz에서 공진점을 가지기 때문에 전류가 적게 흐르고, 내측 코일에서 소모되는 전력 손실을 최소화하면서, Rx 코일에 전력을 효율적으로 전송해 주기 위한 적절한 전류가 유지되게 된다. 즉, 내측 코일은 전력 소모는 적게 하면서, 수신 코일에 전력을 전송해 주기 위한 징검다리 역할을 한다고 볼 수 있다^[8].

내측 코일의 공진주파수는 직렬 연결된 커패시턴스로

결정되는데, 내측 코일의 공진주파수가 너무 높으면 ‘One coil’과 비교하여 효율 향상이 미비하고, 내측 코일의 공진주파수가 동작주파수만큼 낮아지게 되면 105~210 kHz의 동작주파수 중 높은 주파수 대역에서 내측 코일의 전력소모가 커지게 되어 효율이 급격히 저하되는 문제가 있다. 따라서 내측 코일의 커패시턴스를 최적화하는 것이 중요하다. 내측 코일의 커패시턴스 최적화는 시뮬레이션 효율 결과를 살펴 적정한 값으로 선정하였다.

IV. 측정 결과

그림 6은 효율 측정을 하기 위한 시스템 구성과 ‘Two coil’의 회로도이다. Function Generator, DC Power Supply, PCB board(Inverter)는 구형파를 형성하여 Tx 코일에 전력을 인가하여 준다. 이 때, PCB board (Inverter)는 풀브리지 인버터 회로를 PCB board에 제작하여 사용하였다. ‘Two coil’의 외측 코일은 C_{Tx1} , L_{Tx1} , R_{Tx1} 로 구성된 회로로 표현하였고, 내측 코일은 C_{Tx2} , L_{Tx2} , R_{Tx2} 로 구성되었으며, Rx 코일은 C_{Rx} , L_{Rx} , R_{Rx} 로 표현하였다. 각각의 코일 간에는 상호 인덕턴스 M_{12} , M_{23} , M_{13} 이 존재한다. Rx 코일에 전송된 전력은 정류회로를 통하여 DC로 변환되어 Load에 인가된다. 이 때, 정류회로는 브리지 정류회로를 PCB board에 제작하여 사용하였다.

DC Power Supply에서 입력하는 전압은 5 V이며, 105~210 kHz의 주파수 범위에서 Load에 5 V가 걸리도록 입력 주파수를 Function Generator에서 설정하여, 이 때의 효율을 측정하였다. Load의 전류는 200, 400, 600, 800, 1,000 mA로 설정하여 측정하였는데, Load에 걸리는 전압이 5 V이므로, 이는 load 값이 각각 25, 12.5, 8.33, 6.25, 5 Ω

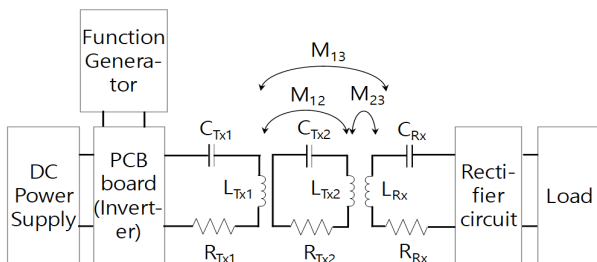


그림 6. 측정 시스템 및 회로도
Fig. 6. Measurement system and circuit.

임을 의미한다.

A11, ‘One coil’, ‘Two coil’을 Rx의 위치가 Tx 중심으로 부터 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm 측면 이동함에 따라 효율을 비교하여 그림 7 (a)~(d)에 나타내었다. 그리고 그 때의 동작주파수를 그림 7 (e)~(f)에 나타내었다. II 장과 III장의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로, Rx가 중심에 위치할 때, 즉, 0 mm와 5 mm에서는 A11의 효율이 가장 좋지만, 15 mm에서는 ‘One coil’과 ‘Two coil’의 효율이 A11보다 높게 측정되어 수신기의 위치 자유도가 개선됨을 알 수 있다. ‘Two coil’은 0~15 mm에서 ‘One coil’보다도 효율이 높게 측정되어 본 논문에서 제안하는 내측 코일을 포함하는 구조가 수신기의 자유도 향상과 효율 향상에 기여한다는 것을 입증하였다.

다만, 그림 3과 그림 5의 시뮬레이션 효율에 비해 그림 7의 측정효율이 크게 저하되었는데, 시뮬레이션 효율은 코일과 코일 간의 전송효율을 계산한 반면, 측정 효율은 코일의 전송효율뿐 아니라, 시스템 효율이 포함되었기 때문이다. 시스템 효율은 각 시스템의 접촉 저항, 선 저항, 보드(board)의 각 소자들의 저항 등이 효율에 영향을 끼친다.

V. 결 론

본 논문에서는 스마트폰 무선충전패드와 같이 자기유도형 무선충전에서 수신기의 자유도 개선을 위한 Tx 코일 설계 방안을 제안한다. 또한 Litz wire의 시뮬레이션 환경 구축 방안을 제시한다. Rx 코일과 외경 크기가 비슷한 Qi 규격의 A11 코일과 외경을 1 cm 더 키운 ‘One coil’의 시뮬레이션 효율을 비교하였다. Rx가 Tx의 중심에 위치할 때는 송수신 외경 크기가 비슷한 A11 코일이 효율이 좋지만, 중심에서 벗어났을 때는 A11는 효율이 급격히 저하되는 반면, 외경이 큰 ‘One coil’은 소폭으로 떨어져 수신기의 자유도가 개선됨을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 제안하는 ‘Two coil’은 ‘One coil’에 내측 코일이 추가된 구조인데, 중심으로부터 0 mm~15 mm 측면 이동한 경우에 모두 ‘One coil’ 보다 효율이 향상되어 동일한 외경 크기에서도 내측 코일을 추가함으로써 효율 및 수신기의 위치자유도가 향상됨을 알 수 있다. 또한 측정을 통해 이를 입증하였고, 시뮬레이션 결과와 경향성이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

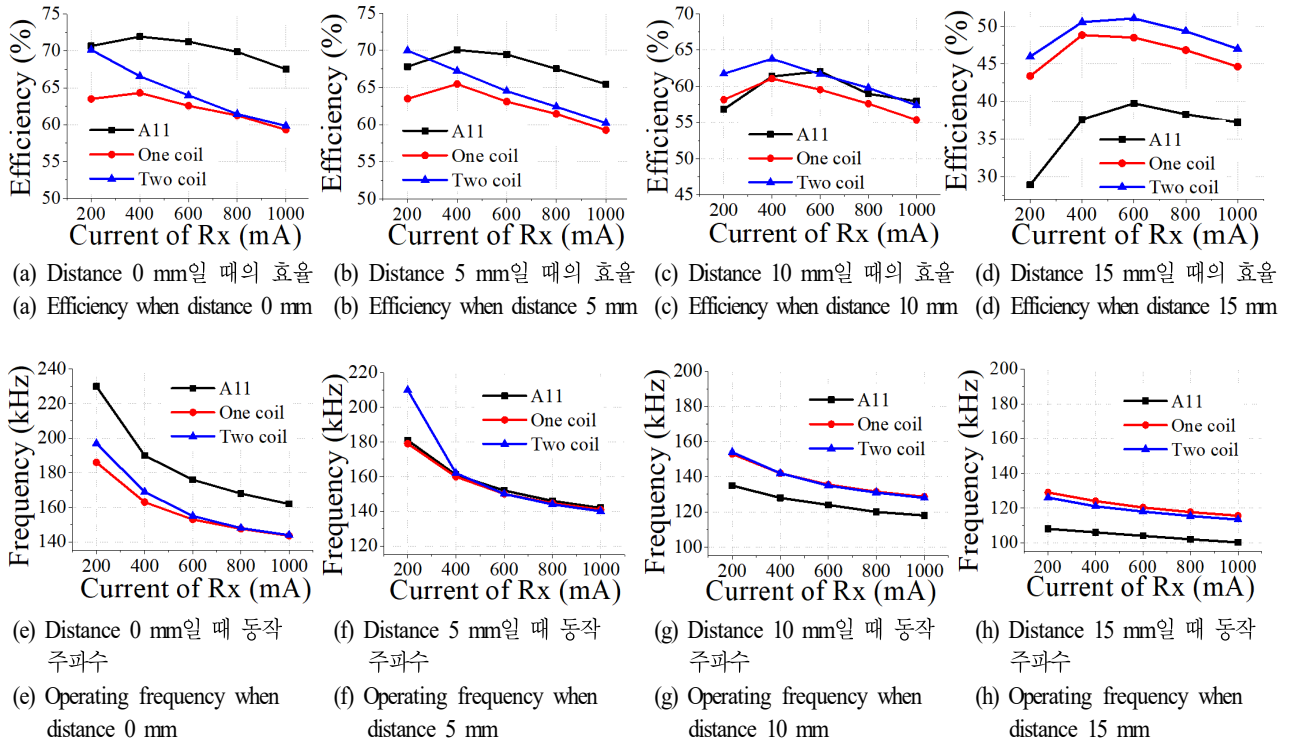


그림 7. 측정효율 및 동작주파수

Fig. 7. Measurement efficiency and operating frequency.

References

- [1] S. Y. Hui, "Planar wireless charging technology for portable electronic products and Qi," in *Proceedings of the IEEE*, Jun. 2013, vol. 101, no. 6, pp. 1290-1301.
- [2] 박남숙, 한택수, "차량용 휴대폰 거치 겸용 컵홀더 및 이를 이용한 무선 전력 공급 방법," Korea Patent 10-1665247-0000, 2016년 10월.
- [3] 강준석, 이승우, 홍익표, 조인귀, 김남, "상용 자기유도 방식 무선전력전송 시스템의 인체영향 분석," 한국전자학회논문지, 28(5), pp. 382-390, 2017년 5월.
- [4] Wirelesspower. Available: <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.
- [5] Airfuel. Available: <https://www.airfuel.org>.

- [6] B. H. Choi, B. C. Park, and J. H. Lee, "Near-field beam-forming loop array for selective wireless power transfer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 25, no. 11, pp. 748-750, Nov. 2015.
- [7] Y. C. Kim, B. H. Choi, and J. H. Lee, "Comparative study on the power transfer efficiency of magnetic resonance and radio frequency wireless power transmission," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 16, no. 4, pp. 232-234, Oct. 2016.
- [8] 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. 2016, p. 8247476, Mar. 2016.

최 보 희 [홍익대학교/박사과정]



2009년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2015년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2015년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 무선전력전송(Wireless Power

Transfer)

정 하 봉 [홍익대학교/교수]



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 미국 남가주대학(USC) 전기공학과 (공학석사)
1988년 6월: 미국 남가주대학(USC) 전기공학과 (공학박사)
1988년~1991년: 미국 뉴욕주립대(SUNY Buffalo) 전기공학과 조교수

1991년~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
[주 관심분야] 통신이론, 부호이론, 조합수학 및 시퀀스설계

남 용 현 [홍익대학교/석사과정]



2018년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2018년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선전력전송 (Wireless Power Transfer)

이 정 해 [홍익대학교/교수]



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
1996년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환연구원

1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor
1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
[주 관심분야] Metamaterial/metasurface 안테나 및 무선전력전송