

# 손실 저감을 위해 분할된 도체를 가지는 인쇄 회로 기판형 무선충전 코일

## Printed Circuit Board-Type Wireless Charging Coil with Split Conductors for Power Loss Reduction

신유준 · 박재형 · 김종훈\* · 권병기\*\* · 은희현\*\* · 최석민\*\* · 안승영

Yujun Shin · Jaehyoung Park · Jonghoon Kim\* · Byunggi Kwon\*\* ·  
Heehyun Eun\*\* · Seokmin Choi\*\* · Seungyoung Ahn

### 요 약

본 논문에서는 무선전력전송 시스템 코일의 저항성분에 의해 발생하는 전력손실을 저감하기 위하여 분할된 도체를 갖는 PCB형 코일구조를 제안하였다. 제안된 구조는 유한요소법 자기장 시뮬레이션을 이용하여 설계하였으며, 실제 제작된 코일의 측정을 통해 저감된 저항 값을 가진다는 것을 증명하였다. 또한, 무선전력전송 실험 수행을 통해, 같은 전력을 전송시켰을 때 기존의 구조보다 제안된 구조에서 코일에서 소모되는 전력이 감소한다는 것을 확인하였으며, 열 발생 또한 감소하는 것을 확인하였다. 이를 통해 무선전력전송 시스템의 효율이 증가하는 것을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, a printed circuit board(PCB)-type coil structure with split conductors is proposed to reduce the power loss caused by coil resistance. Simulated magnetic field measurement reveals that the proposed coil has reduced resistance. In addition, wireless power transfer experiments reveal that when the same power is transferred, the power consumption in the coil with the proposed structure is reduced compared with that having a conventional structure. Moreover, heat generation is also reduced in the coil with the proposed structure. Therefore, the new coil is confirmed to increase the efficiency of wireless power transfer system.

Key words: Wireless Power Transfer, PCB Type Coil, Ohmic Loss, Resistance

### I. 서 론

무선전력전송(wireless power transfer: WPT) 기술은 많은 관심을 받고 있으며, 다양한 분야에 적용되기 위한 연

구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 다양한 적용분야 중에서도 특히 드론, 유도무기와 같은 무인 이동체에 무선전력전송 시스템을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[3]</sup>. 한편, 높은 재현성과 제조 공정의 편리함으로 인해 무

「본 연구는 (주)LIG 넥스원의 "유도무기 적용을 위한 무선전력 전송기술 연구" 과제의 일환으로 진행되었습니다.」

한국과학기술원 조천식녹색교통대학원(Cho Chun Shik Graduate School for Green Transportation, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

\*이엠씨닥터스(주)(EMC Doctors)

\*\*주LIG 넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd., Korea)

· Manuscript received April 9, 2019 ; Revised May 2, 2019 ; Accepted September 20, 2109. (ID No. 20190409-036)

· Corresponding Author: Seungyoung Ahn (e-mail: sahn@kaist.ac.kr)

선전력전송 시스템의 코일로 인쇄 회로 기판(printed circuit board: PCB)형 코일을 적용하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[4]</sup>. 현재 사용되고 있는 PCB형 코일의 디자인 방식은 단층으로 설계하거나<sup>[4]</sup>, 다층으로 설계하는 등<sup>[5]</sup> 각 어플리케이션에 적합한 방식으로 설계되고 있다. 단층의 코일과 다층의 코일 모두 단일도선 방식의 PCB 형태를 채택하고 있다. 다층의 코일은 송신 및 수신 코일간의 상호 인덕턴스를 증가시켜 높은 효율을 가지는 장점을 가진다.

무선전력전송 시스템에서는 사용 주파수로 수십 kHz~수 MHz의 범위를 사용하게 되는데, 이는 도선의 표피효과와 근접효과를 증대시켜 코일의 저항 성분이 증가하게 된다<sup>[6]</sup>. 또한, 사용 주파수 증가에 따른 부정적인 영향들을 저감시키기 위하여 일반적인 도선에서는 다도체 방식인 Litz wire를 사용하지만, 일반적인 PCB 구조는 단일 도체를 가지기 때문에 주파수의 증가에 따른 도선의 저항 성분 증가를 저감시킬 수 없다. 특히 다층의 코일 구조에서는 인접한 층의 코일간의 근접효과가 심화되어 코일의 저항이 더욱 증가할 수 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 분할된 도체를 가지는 무선충전용 PCB형 코일을 제안하였다. 본 구조는 단일 도선의 방식인 PCB형 코일이 무선전력전송 시스템의 동작 주파수 대역에서의 저항 성분이 증가하는 단점을 극복하기 위하여 분할된 도체 방식의 코일 구조를 가진다. 제안된 PCB형 코일은 기존의 단일 도체 방식의 PCB 코일과 비교하면 인덕턴스 값은 3% 미만의 차이를 가지지만 저항은 10% 이상 저감되게 된다. 이로 인해 코일에서 발생하는 전력 손실이 저감되어 무선전력전송 전체의 효율이

증가하게 된다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장에서는 제안된 분할 도체를 가지는 PCB형 코일의 구조를 제안 및 분석하며, 3장에서는 계산, 시뮬레이션 및 측정을 통해 저감된 저항 성분을 확인하며, 4장에서는 개선된 무선전력전송 실험과 측정을 통해 코일의 전력 소모가 감소된 것을 확인하였다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일 구조

직사각형 도체를 가지는 PCB형 코일의 AC 저항은 식 (1)과 같이 구성된다.

$$R_{ac} = R_{cond} + R_{prox} \quad (1)$$

위 식에서  $R_{ac}$ 는 전체 AC 저항이며,  $R_{cond}$ 는 도체 내부의 영향에 의한 저항 성분이다. 이는 도체의 형상과 주파수에 의한 표피 효과를 고려한 저항 성분이다. 또한,  $R_{prox}$ 는 도체 외부 영향으로 인해 증가되는 저항 성분이다. 특히, 인접한 도체와의 상호 작용으로 인해 증가하는 근접 효과가 포함된다.

PCB형 사각 도선의 단위 길이당  $R_{cond}$ 과  $R_{prox}$ 는 아래 식 (2) 및 식 (3)과 같이 계산할 수 있다<sup>[7]</sup>. 또한 도선의 표피두께는 식 (4)와 같다.

$$R_{cond\,recu.l} = \frac{1}{wh\sigma} \Phi_{cond\,rec} \left( \frac{w}{\delta}, \frac{h}{\delta} \right) \quad (2)$$

$$R_{prox\,recu.l} = \frac{4\pi}{\sigma} \Phi_{prox\,rec} \left( \frac{w}{\delta}, \frac{h}{\delta} \right) \cdot H^2 \quad (3)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu}} \quad (4)$$

여기서,  $w$ 과  $h$ 는 PCB 도선의 너비와 높이이며,  $\sigma$ 는 도선의 도전율이며,  $H$ 는 코일의 도선에 단위 전류(1 A)를 흘렸을 때, 인접한 도선에 의해 발생된 자기장에 의해 해당 단위 길이 도선에 인가되는 자기장 세기이다. 또한,  $\Phi_{cond\,rec}$ 과  $\Phi_{prox\,rec}$ 는 주파수와 PCB 패턴의 너비와 높이를 변수로 가지는 함수이며, 식 (5) 및 식 (6)과 같다<sup>[6]</sup>.

$$\Phi_{cond}(x/y) = \text{Real} \left[ (j-1) \frac{x}{y} \frac{J_0((j-1)x/y)}{J_1((j-1)x/y)} \right] \quad (5)$$

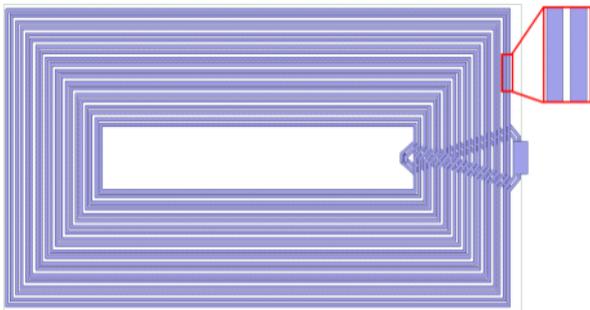


그림 1. 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일의 구조  
Fig. 1. Proposed PCB type coil with split conductors.

$$\Phi_{prox}(x/y) = Real \left[ \left( j \frac{r_0}{\delta} \right)^2 \frac{J_2((j-1)x/y)}{J_0((j-1)x/y)} \right] \quad (6)$$

여기서,  $J_n$ 은  $n$ 차 Bessel function이다.  $\rho$ 는 도선의 비저항이며,  $f$ 는 동작 주파수,  $\mu$ 는 도선의 투자율이다.

식 (2)~식 (4)에서 알 수 있듯이, 동작 주파수가 높아질수록 전류가 도선에서 흐르는 부분이 적어지게 되어 저항이 증가하게 된다. 한편, 저항 성분에 의해 도선에서 손실되는 전력은 도선에 흐르는 전류( $I$ )의 제곱과 도선의 저항 성분( $R$ )에 비례하며, 이는 식 (7)과 같다.

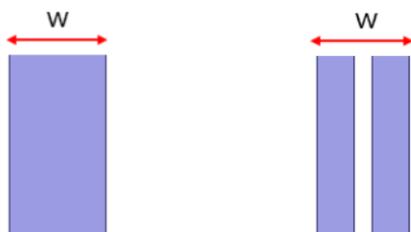
$$P_{loss} \propto I^2 R \quad (7)$$

도선에 흐르는 전류가 일정하다면 도선에서 손실되는 전력은 저항 성분에 비례한다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 분할된 도선을 가지는 PCB형 코일을 제안하였다. 코일은 총 4층으로 구성되며, 분할된 도체는 공정한 비교를 위하여 그림 2와 같이 도체의 총 너비는 유지하고, 그 안에서 도체를 분할하는 형식으로 설계되었다. 그 외에 코일의 회전수나 PCB 패턴의 높이 등은 모두 일정하게 유지하였다.

### III. 시뮬레이션 및 측정을 통한 기존 PCB 구조와 제안된 PCB 구조의 저항 값 비교

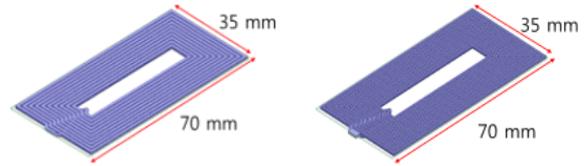
제안된 코일과 기존 단일 도선 코일을 그림 3과 같이 유한요소 자기장 시뮬레이션을 통해 디자인하였다<sup>[8]</sup>. 각 코일은 그림 2와 같이 도체가 분할되었다는 점을 제외하



(a) 단일 도선의 구조 (b) 제안된 분할 도체의 구조  
(a) Conventional single conductor (b) Proposed split conductor

그림 2. 도선의 총 너비는 일정하게 유지하고 분할된 도체와 기존 도체의 비교

Fig. 2. Comparison between proposed split conductor and conventional single conductor with same width.



(a) 단일 도선의 구조 (b) 분할된 도체의 구조  
(a) Conventional single conductor (b) Proposed split conductor

그림 3. 유한요소 자기장 시뮬레이션을 통해 디자인된 PCB형 코일 구조

Fig. 3. PCB type coil structure designed through finite element magnetic field simulation.

고는 동일한 설계사양을 가진다. 각 층의 도선의 회전수, 총 층수 그리고 총 코일의 회전수는 표 1과 같다. PCB형 코일은 총 4층으로 구성되었으며, 총 회전수는 40턴을 가진다. 또한, 시뮬레이션의 주파수는 무선전력전송의 목표 동작주파수인 100 kHz로 수행되었다.

식 (2) 및 식 (3)을 통해 계산된 저항값과 유한요소 해석 자기장 시뮬레이션을 통해 계산된 각 코일의 저항 값과 인덕턴스 값은 표 2와 같다. 표 2에서 알 수 있듯이, 제안된 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일의 경우 계산값과 시뮬레이션 값에서 모두 기존의 단일 도체를 가지는 코일보다 각각 12%, 25% 감소한 저항 값을 가지는 것을 알 수 있다. 한편, 시뮬레이션을 통해 구해진 코일의 인덕턴스의 경우 두 코일의 차이가 약 2% 미만으로 저항에 비해 미미한 차이를 가지는 것을 알 수 있다.

또한, 각 PCB형 코일에서의 도체 단면의 전류 분포를 확인하였는데, 이는 그림 4와 같다. 그림 4에서 알 수 있듯이 기존의 단일 도체의 구조에서 전류가 흐를 때는 도체의 양 끝단에 전류가 집중되어 흐른다는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 논문에서 제안한 분할된 도체를 가지는

표 1. 디자인된 코일의 층수 및 총 턴수

Table 1. The number of layers and total number of turns of designed coil.

Parameters	Value
The number of layers	4 layers
Turns per layer	10 turns
Total number of turns	40 turns

표 2. 수식을 통한 코일의 저항 값과 유한요소 자기장 시뮬레이션을 통해 계산된 저항 값 및 인덕턴스 값

Table 2. Calculated resistance and resistance and inductance simulated by finite element magnetic field simulation.

Parameters	Conventional PCB coil	Proposed PCB coil
Resistance (Calculated)	1.74 Ω	1.53 Ω
Resistance (Simulated)	2.47 Ω	1.84 Ω
Inductance (Simulated)	75.31 μH	76.38 μH

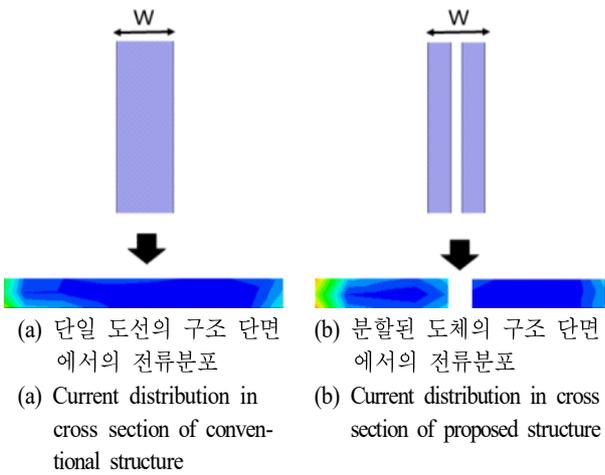
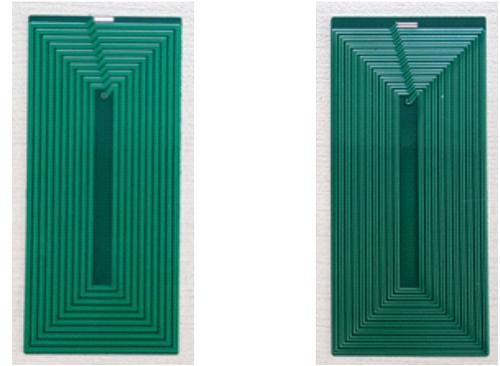


그림 4. PCB 도선의 구조에 따른 전류 분포  
Fig. 4. Current distribution according to the structure of PCB.

PCB형 코일에서는 각각 두 개의 도체의 양 끝단에 전류가 집중되어 기존의 코일보다 상대적으로 넓은 면적에서 전류가 흐르는 것을 확인하였다. 전류가 보다 넓게 분포한다는 것은 저항이 감소하는 것을 의미하며, 표 2에서 제안된 PCB형 코일에서 저항 값이 감소하는 이유를 설명해준다.

이를 실제 측정을 통해 검증하기 위하여 그림 5와 같이 실제로 PCB형 코일을 제작하였다. 제작된 코일들은 그림 3 및 표 1과 동일한 설계 사양을 가진다. 제작된 각 코일은 HIOKI사의 LCR 미터(3532-50)을 통해 무선전력전송 시스템의 동작주파수인 100 kHz에서의 저항 값, 인덕턴스 값, 그리고 상호 인덕턴스 값이 측정되었다. 측정된 결과는 표 3과 같다. 시뮬레이션 값인 표 2와 측정값인 표



(a) 단일 도선의 구조 (b) 분할된 도체의 구조  
(a) Conventional single conductor (b) Proposed split conductor

그림 5. 실제 제작된 PCB형 코일  
Fig. 5. Actually manufactured PCB type coils.

표 3. 실제 제작된 코일들을 통해 측정된 저항 값, 인덕턴스 값, 그리고 상호 인덕턴스 값

Table 3. Measured resistance, inductance and mutual inductance.

Parameters	Conventional PCB coil	Proposed PCB coil
Resistance	1.95 Ω	1.64 Ω
Inductance	62.1 μH	63 μH
Mutual inductance between two coils	30.1 μH	30.4 μH

3를 비교해 보면, 시뮬레이션 값과 측정값의 오차는 약 10~20 % 가량 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 하지만 실제 측정값에서 시뮬레이션 값보다 저항, 인덕턴스 모두 감소하는 경향성을 보였으며, 또한 시뮬레이션에서 예상되었듯이 측정값에서도 제안된 PCB형 코일에서 저항 값이 기존의 코일보다 감소한 것을 확인할 수 있었으므로 시뮬레이션을 통한 실제 코일의 예측은 타당하다고 판단할 수 있다. 표 3에서 알 수 있듯이 시뮬레이션과 마찬가지로 측정값에서도 제안된 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일구조에서 기존의 단일 도체를 가지는 PCB형 코일보다 약 15 % 저감된 저항값을 가지는 것을 알 수 있다. 또한, 측정된 인덕턴스 값과 각 PCB형 코일간의 상호 인덕턴스에서 두 코일에서 모두 3 % 이내의 차이를 가지게 저항의 감소에 비해 의미있는 차이를 가지지 못하였다.

한편, 두 개의 무선전력전송 시스템에서의 상호 인덕턴스( $M$ )가 같고, 동작 주파수( $\omega$ ), 부하 저항( $R_L$ ), 전력 전달 용량( $P_{transfer}$ )이 동일하다면, 두 시스템의 코일에 흐르는 전류는 동일하다는 것을 식 (8)을 통해 알 수 있다.

$$P_{transfer} = \frac{\omega^2 M^2}{R_L} I_1^2 \quad (8)$$

따라서, 각 코일에 흐르는 전류가 동일하다면, 식 (8)에 의하여 코일에서 소모되는 전력소모는 코일의 저항에 비례한다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션과 실제로 제작된 PCB형 코일들의 저항값 측정을 통하여 제안된 구조의 저항 값이 기존의 단일 도선을 가지는 PCB형 코일의 저항 값보다 저감된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 PCB형 코일로 구성된 무선전력전송 시스템은 기존의 시스템보다 더 낮은 전력손실을 갖는다는 것을 예상할 수 있다.

#### IV. 제안된 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일을 이용한 무선전력전송 실험

제안된 PCB형 코일을 송신 및 수신 코일로 사용한 실험과 기존의 PCB형 코일을 송신 및 수신 코일로 사용한 실험을 각각 나누어 수행하였다. 두 시스템에서 무선전력 전송으로 전력을 30 W 전달하는 시험을 수행하여 개선되는 전력과 코일에서 소모되는 전력을 측정을 통해 분석하였다. 또한, 5분간 동작시켜서 코일에서 발생하는 전력 손실을 코일 표면에 발생하는 열을 열화상 카메라로 측정하여 두 코일에서 비교하여 제안된 코일에서 실제로 전력 손실이 저감되었는지 알아보았다. 두 실험에 사용된 코일은 각각 표 3의 특성을 가진다. 실험을 위한 셋업은 그림 6과 같다.

실험에 사용된 설정은 표 4와 같다. 무선으로 전송된 전력은 30 W이며, 동작 주파수는 100 kHz를 사용하였다. 또한, 송수신 코일간 공극은 10 mm로 실험하였고, 각각의 보상회로의 커패시터 값은 각 코일과 100 kHz에서 공진을 이루도록 설정하여 실험을 진행하였다.

무선전력전송 시스템 각각의 실험의 측정 결과는 표 5와 같다.  $V_{inverter\_input}$ 은 인버터의 입력 직류 전압이며,  $I_{Tx}$ 와

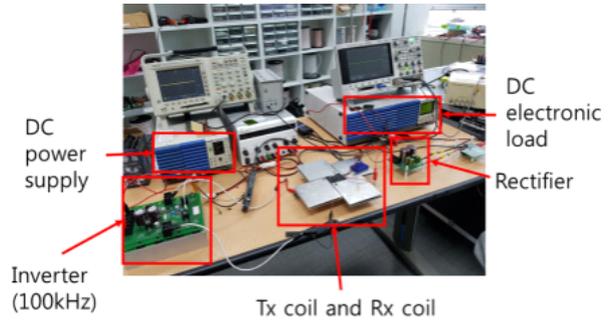


그림 6. 30 W급 무선전력전송 실험  
Fig. 6. Overview of 30 W class WPT experiment.

표 4. 무선전력전송 실험에 사용된 설정  
Table 4. Settings used for wireless power transfer experiments.

Parameters	Value
Transferred power	30 W
Operating frequency	100 kHz
Equivalent load	30 Ω
Air gap	10 mm
Compensation circuit capacitor values in conventional PCB coils	40.79 nF
Compensation circuit capacitor values in proposed PCB coils	40.21 nF

표 5. 30 W 무선전력전송 실험 결과  
Table 5. Results of 30 W class wireless power transfer experiment.

Parameters	Conventional PCB coil	Proposed PCB coil
$V_{inverter\_input}$ (DC)	27 V	26.6 V
$I_{Tx}$ (RMS)	1.65 A	1.59 A
$I_{Rx}$ (RMS)	1.14 A	1.13 A
$V_{load}$ (DC)	29.8 V	29.8 V
$I_{load}$ (DC)	0.99 A	0.99 A
$P_{in}$	38.6 W	37.2 W
$P_{out}$	29.7 W	29.7 W

$I_{Rx}$ 는 송신 및 수신 코일에 흐르는 각각의 전류값,  $V_{load}$ 와  $I_{load}$ 는 부하에 전달되는 전압 및 전류이다. 또한  $P_{in}$ 은 인

표 6. 송신 및 수신 코일에서 소모되는 전력과 무선전력전송 효율

Table 6. Power loss in each coil and wireless power transfer efficiency.

Parameters	Conventional PCB coil	Proposed PCB coil
$P_{loss\_Tx}$	4.9 W	4.04 W
$P_{loss\_Rx}$	2.53 W	2.06 W
Power transfer efficiency	76.9 %	79.8 %

버터의 입력 전력,  $P_{out}$ 은 부하에 전달되는 전력이다.

표 6은 식 (7)을 바탕으로 계산된 각 코일에서 소모된 전력과 무선전력전송의 시스템 효율을 나타낸다. 무선전력전송 시스템의 효율은 인버터의 입력전력 과부하의 출력전력의 비로 나타낸 값이다. 앞서 예상한 대로 제안된 PCB형 코일에서 기존의 코일보다 코일의 저항이 감소하였으므로 코일에서 소모되는 전력 또한 감소한 것을 알 수 있다. 이는 전류가 많이 흐르는 수신 코일에서 더욱 큰 차이로 나타났으며, 송신 코일의 경우 전력 소모가 약 17.6 % 감소한 것을 알 수 있다. 코일에서 전력소모가 감소하였으므로, 무선전력전송 시스템의 전체 효율도 약 3 % 증가한 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 각각 30 W의 전력을 5 분씩 전송한 뒤, 송신 코일 표면의 온도를 측정하였으며 그림 7이 결과를 보

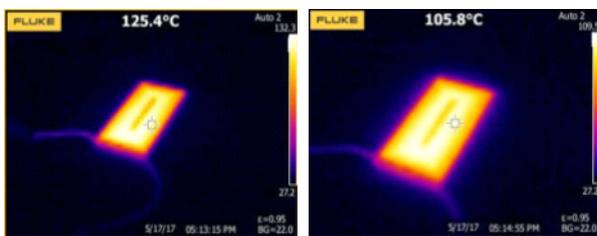
여준다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 같은 전류가 흘렀을 때 저항이 감소한 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일에서 발생한 열은 최대 105.8 °C로 기존의 단일도체 방식의 PCB형 코일에서 발생한 열인 125.4 °C보다 열이 감소한 것을 알 수 있었다. 이는 퍼센트로 따지면, 약 15.6 % 감소하였다. 이를 통해 제안된 코일에서 전력 소모가 감소한 것을 전력과 온도를 통해 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존의 단일도체를 가지는 PCB형 코일을 무선전력전송 시스템의 송신 및 수신 코일로 사용할 때, 주파수의 영향으로 코일의 저항 성분이 증가하여 전력 손실이 증가하는 것을 억제하기 위하여 분할된 도체를 가지는 PCB형 코일을 제안하였다. 제안된 PCB형 코일은 구조적인 형상은 기존의 단일 도체 방식의 코일과 동일하여 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 3 % 이내의 오차를 가진다. 반면, 도체를 분할하여 표피효과와 근접효과의 영향을 억제하였으므로 저항 성분은 약 15 % 감소된 것을 확인할 수 있었다. 무선전력전송 실험을 통하여 실제로 제안된 코일에서 기존의 코일보다 전력 소모가 약 17.6 % 감소한 것을 확인하였고, 코일의 발생 열 또한 15.6 % 감소하였다. 이를 통해 제안된 코일은 기존의 코일보다 낮은 손실을 가진다는 것이 증명되었다.

## References

- [1] J. Park, J. Kim, Y. Shin, B. Park, W. S. Kim, and S. J. Cheong, et al., "Toroidal shaped coils for a wireless power transfer system for an unmanned aerial vehicle," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 1, pp. 48-55, Jan. 2019.
- [2] S. Hwang, B. Lee, "Realization of optimum loads for maximum WPT efficiencies using multi-turn receiving coil," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 4, pp. 335-341, Apr. 2016.
- [3] Y. Shin, J. Park, J. Kim, B. Kwon, H. Eun, and S. Ahn, "Application of wireless power transmission technology



(a) 기존의 단일 도선의 구조  
(a) PCB coil with conventional single conductor

(b) 제안된 분할된 도체의 구조  
(b) PCB coil with proposed split conductor

그림 7. 5분간 30 W급 전력전송을 한 뒤 측정된 각 시스템의 송신 코일 표면의 온도

Fig. 7. After conducting 30 W class WPT for 5 minutes, the measured temperature of transmitting coil surface of each system.

to contactless umbilical connector of unmanned vehicle," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp. 713-722, Sep. 2017.

- [4] J. Wang, J. Li, S. L. Ho, W. Y. Chau, W. K. Lee, and W. N. Fu, et al., "Study and experimental verification of a rectangular printed-circuit-board wireless transfer system for low power devices," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3013-3016, Nov. 2012.
- [5] F. Gong, Y. Cong, Z. Wei, B. Yin, H. Chi, and X. Luan, "Analysis of the multi-layer printed spiral coil for wireless power transfer system used in medical implants," in

- 2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(APEMC)*, Shenzhen, 2016, pp. 460-462.
- [6] C. Carretero, J. Acero, and R. Alonso, "TM-TE decomposition of power losses in multi-stranded litz-wires used in electronic devices," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 123, pp. 83-103, Dec. 2012.
- [7] I. Lope, C. Carretero, J. Acero, R. Alonso, and J. Burdío, "AC power losses model for planar windings with rectangular cross-sectional conductors," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 1, pp. 23-28, Jan. 2014.
- [8] ANSYS. 2011. "ANSYS Maxwell." Available: <http://www.ansys.com>

신 유 준 [한국과학기술원/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1678-137X>



2016년 8월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)  
 2018년 8월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학석사)  
 2018년 8월~현재: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 박사과정  
 [주 관심분야] WPT 등

김 중 훈 [이엠씨닥터스(주)대표]

<https://orcid.org/0000-0001-7080-1557>



1995년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
 1998년 2월: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및전자공학과 (공학석사)  
 2003년 8월: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및전자공학과 (공학박사)  
 2003년 3월~2010년 9월: 삼성전자 메모리사업부 책임연구원  
 2010년 10월~2017년 2월: 한국과학기술원(KAIST) 미래자동차 학제전공 연구교수  
 2017년 3월~현재: 이엠씨닥터스(주) 대표  
 [주 관심분야] WPT, SI, PI, EMI/EMC/EMF, 전기자동차 등

박 재 형 [한국과학기술원/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2644-9151>



2014년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2016년 8월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학석사)  
 2016년 9월~현재: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 박사과정  
 [주 관심분야] WPT, EMC 등

권 병 기 [LIG 넥스원(주)수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6007-5758>



2006년 2월: 경북대학교 전기전자컴퓨터과 (공학사)  
 2016년 8월: 아주대학교 IT융합대학원 (공학석사)  
 2006년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 유도무기2연구소 수석연구원  
 [주 관심분야] RF 안테나, EMC, WPT 등

은 희 현 [LIG 넥스원(주)/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0800-4789>



2011년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
2013년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 유도무기2연구센터 선임연구원  
[주 관심분야] RF 안테나, EMC, WPT 등

안 승 영 [한국과학기술원/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0771-7050>



1998년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학사)  
2000년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)  
2005년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)  
2012년~현재: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 교수

[주 관심분야] WPT, SI, PI, EMI/EMC/EMF, 전기자동차 등

최 석 민 [LIG 넥스원(주)/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4974-0160>



2008년 2월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학 (공학사)  
2010년 2월: 건국대학교 항공우주정보시스템공학 (공학석사)  
2010년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 유도무기연구센터 선임연구원  
[주 관심분야] 유도탄 체계, 항공기 개념

설계, 감항인증 등