

## 상용 드론의 고전력 무선충전을 위한 광역 스테이션

## High-Power Wireless Power Transfer of Drones with Wide Charging Area

김태형 · 안옥현 · 박종인\* · 육종관

Tae-Hyung Kim · Wookhyun Ahn · Jong-In Park\* · Jong-Gwan Yook

## 요 약

대형 드론의 고전력 무선충전을 위한 광역 무선충전 스테이션을 연구하였다. 수신 코일의 전체 크기는  $420 \times 420 \times 10$  mm 이고, 드론의 다리 부분에 연결하였다. 송신 코일은 균일한 자기장 세기 및 높은 전송 효율 유지를 위하여, 서로 다른 모양을 갖는 코일 3개를 개별적으로 최적화한 후 직렬로 결합하였다. 송신 코일의 전체 크기는  $1,000 \times 1,000 \times 105$  mm이며, 케이스를 포함한 두께이다. 최종 설계된 송, 수신 코일의 품질 계수는 각각 120, 54이며, 수직 및 수평 이동에 따라 고효율 특성을 나타내었다. 코일 간 중심을 기준으로, 전송 효율은 수직 거리 50 mm에서 91 %, 300 mm에서 80 %가 나타났으며, 수신 코일이 충전 영역의 가장자리로 수평 이동했을 때에도 89.5 %로 고효율 특성이 나타났다. 전력 공급기, 송, 수신 모듈, 부하 등을 연결한 상태에서, 174.7 W의 전력을 입력하였을 때, 수신단에서 측정된 전력은 120.3 W로 시스템 효율 69 %이다. 더불어, 무선충전 시 발생하는 전자기파가 EMI 기준 이하로 측정되었다.

## Abstract

This study investigates high-power wireless power transfer(WPT) with a wide charging area for large drones. The overall size of the receiving coil(Rx-coil) connected to the leg of the drone on the bottom side is  $420 \times 420 \times 10$  mm. Transmitting coils(Tx-coils) of three different shapes are individually optimized and combined to achieve a uniform magnetic field intensity and high power transfer efficiency(PTE) retention rate. The overall dimension of the Tx-coil including the case thickness is  $1,000 \times 1,000 \times 105$  mm. The quality factors of the optimized Tx- and Rx-coils are 120 and 54, respectively, expressing a high PTE according to the transmission and misalignment distances. Based on the center between the coils, the PTE is 91 % and 80 % at a transmission distance of 50 mm and 300 mm, respectively. The PTE is 89.5 % when the Rx-coils are positioned at a misalignment distance of 285 mm, which indicates the edge of the Tx-coil in the charging area. The coils are connected to various equipment(e.g., signal source, Tx- and Rx-modules, load, etc.) to verify the WPT system. The system efficiency considering loss is 69 % because the input and output powers are 174.7 W and 120.3 W, respectively. In addition, an electromagnetic wave is measured below the electromagnetic interference standard.

Key words: Coil Design, Drone, High Efficiency, High Power, Wireless Power Transfer

## I. 서 론

드론(drone)의 등장에 따라 물품 수송, 산림 보호, 안전 진단, 해안 감시, 국토 조사, 통신망, 레저, 농업 지원, 군

연세대학교 전기전자공학과(Department of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

\*㈜파워리퍼블릭 (Power Republic Co., Ltd.)

· Manuscript received December 10, 2019 ; Revised December 12, 2019 ; Accepted February 26, 2020. (ID No. 20191210-132)

· Corresponding Author: Jong-Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

사 분야 등의 영역에서 사용될 목적으로, 드론 개발에 관한 연구는 전망이 매우 좋다<sup>[1]~[4]</sup>. 현재 군사 분야에서는 드론의 무력화를 위한 공격 및 방어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 짧은 비행시간을 보완하기 위하여 배터리 개발 및 충전 방식에도 많은 관심이 주목되고 있다<sup>[5]~[11]</sup>.

아울러, 드론이 여러 분야에 활용되려면, 장거리, 고도 비행을 하거나, 물품, 물 등 무거운 짐을 운반해야 하므로 배터리 소모가 상당하다. 이에 고전력 충전을 통하여 충전 시간 절감에 따른 빠른 복귀가 요구되는데, 배터리를 유선으로 충전할 경우 인력이 필요하거나, 시스템이 복잡하여 드론에 무선충전 시스템을 도입하는 추세이다. 드론은 배터리가 일정량 이상 소모되면, 무선충전 스테이션(station)으로 자동으로 회귀하여 배터리를 충전한 후, 다시 비행을 시작하도록 알고리즘이 설계되어 있다<sup>[6]~[8]</sup>. 드론은 GPS 오차, 바람의 영향, 장애물 등에 의하여, 무선충전 스테이션에 정확한 착륙하기가 어렵다. 불안정한 착륙은 충전 효율이 낮아, 드론의 배터리가 충전이 안 되거나, 충전 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 이에 드론이 무선충전 스테이션에 안착하기 위하여, 송, 수신 코일 및 스테이션의 구조를 변경하거나, 코일의 위치를 다양하게 함으로써 문제점을 극복하고 있다<sup>[6]~[12]</sup>. 하지만 이러한 연구는 단일 드론에 대한 무선충전이나, 특정 제품에 대해 최적화에 관한 연구로, 목적에 따라 다양한 크기를 갖는 드론에 적용하기 어렵다<sup>[11]</sup>.

본 논문에서는 대형 드론뿐만 아니라, 소형 드론의 다중 충전을 고려하여, 광역 무선충전 스테이션에 사용되는 코일 구조를 제안하였다. 코일에 사용되는 도선은 고전력(>50 W)에서 사용할 수 있도록 Litz wire를 사용하였으며, 균일한 자기장 세기를 통하여 충전 영역 내 일정한 수신 전력을 나타내었다<sup>[13]</sup>. 송신 코일 구조는 드론의 무선충전뿐만 아니라, 휴대폰, Tablet PCs와 같은 소형 이동기기를 위한 무선충전용 코일에도 적용할 수 있다.

## II. 무선충전 시스템

두 개의 코일을 사용하는 무선전력전송(wireless power transfer: WPT) 시스템의 등가 회로는 그림 1과 같다. 시스

템의 무선충전 효율(power transfer efficiency: PTE)은 송신(Tx-coil) 및 수신 코일(Rx-coil) 간 효율에 대부분 결정되므로, 고효율 특성을 나타내는 코일을 설계하는 것이 관건이다. 그림 1과 같이 코일은 도선의 재질 특성에 따른 저항 손실, 길이 및 감는 방식에 따른 인덕턴스 특성으로 표현할 수 있으며, 신호원으로부터 받은 전력을 송신 코일에 전달한다. 전송 효율은 두 코일 간 상호 결합도(coupling coefficient,  $k$ ), 품질계수( $Q$ -factor,  $Q_{TX}$ ,  $Q_{RX}$ )에 따라 효율이 정해지며, 식 (1)과 같이 정의할 수 있다<sup>[13][14]</sup>. 전송 효율에 따라 무선으로 수신 측에 전력을 전송하며, 이를 direct current (DC) 전력으로 변환하여 부하를 동작시킨다.

$$PTE(\eta) = \frac{k^2 Q_{TX} Q_{RX}}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_{TX} Q_{RX}})^2} \quad (1)$$

$$PTE(\eta) = |S_{21}|^2 \times 100 \quad (2)$$

측정과 시뮬레이션 결과를 쉽게 비교하기 위하여, 코일 간 전송 효율 식 (1)을 식 (2)와 같이  $S$ -parameter로 변환할 수 있다<sup>[13][14]</sup>. 본 논문에서의 전송 효율은 회로 시뮬레이션인 Advanced design circuit simulator v.2016을 이용하여 계산(post-processing)하였다. 이는 임피던스 정합 후 최댓값을 나타내며, 정합 회로(matching network) 및 전력 변환 회로(converter and inverter)의 손실은 반영되지 않았다. 실제 시스템에서 부하를 동작하기 위한 다양한 회로 및 모듈이 연결되면, 변환 손실 때문에 효율이 저하된다.

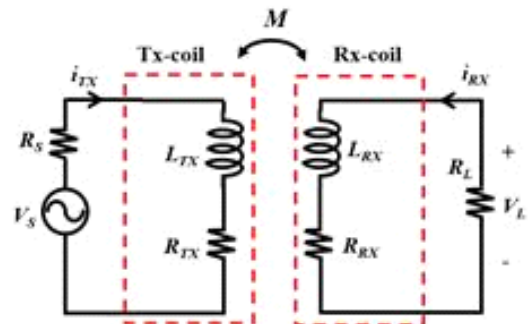


그림 1. 두 개의 코일을 이용한 무선충전 등가 회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of wireless power transfer system using two coils.

### III. 시뮬레이션 및 특성 분석

송신 코일은 드론을 충전하기 위하여 넓은 면적을 갖는 스테이션으로 설정하였으며, 무선 충전 거리를 좁힘으로써 전송 효율을 높이기 위해 수신 코일은 드론의 다리에 부착하였다. 바람의 영향, 장애물, GPS 오차와 같은 주변 영향에 따라 드론의 정확한 착륙이 어려우므로, 스테이션은 충전 영역 내 중앙 부분뿐만 아니라, 가장자리에 서도 높은 전송 효율 특성을 나타내야 한다. 더불어, 100 W 이상의 고전력을 충전하기 위하여, 도선의 종류 및 선택도 중요하다<sup>[15]</sup>. 도선은 표피 효과 및 근접 효과에 따른 손실을 줄일 수 있으며, 고전력 사용 시 코일의 온도 상승을 방지할 수 있는 고효율 제품인 Litz wire를 사용하였으며, 송, 수신 코일 별로 다르게 설정하였다. 송신 코일의 경우 0.3 mm×32 가닥, 수신 코일은 0.1 mm×150 가닥인 제품을 사용하였다. 송, 수신 코일의 모습은 그림 2에 나타내었다. 스테이션의 크기는 대형 드론을 충전하기 위하여 1,000×1,000 mm<sup>2</sup>의 정사각형 구조를 가지며, 드론에 장착되는 수신 코일의 크기는 420×420 mm<sup>2</sup>이다.

수신 코일을 시뮬레이션 및 제작하기에 앞서, 사각형 모양을 갖는 일반 코일의 인덕턴스를 계산하여 비교해 보았다. 일반 코일의 인덕턴스는 식 (3)과 같이 구할 수 있으며,  $N$ 은 감은 횟수,  $L$ 은 코일의 한 변의 길이,  $w$ 는 도선의 지름이며,  $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  H/m,  $\mu_r=1$  이다.

$$L_{sq} = N^2 \frac{2L\mu_0\mu_r}{\pi} \left[ \ln \frac{L}{w} - 0.77401 \right] \quad (3)$$

시뮬레이션에서는 여러 가닥이 밀집한 Litz wire를, 한 변의 길이가 1.2 mm인 동일 단면적을 갖는 정사각형 모양의 도선으로 변경하여 구조를 단순화하였고, 시뮬레이션 시간 또한 단축하였다. 시뮬레이션은 3차원 전자장 해석 프로그램(high frequency structure simulator v.15, HFSS)을 사용하였으며, 20 kHz에서 송, 수신 코일이 가장 높은 품질 계수가 되도록 최적화하였다. 아울러, 도선 간격은 0.2 mm이며, 총 감은 횟수는 16회이다. 수신 코일의 내부 공간을 최대한 확보하기 위하여, 그림 2(b)와 같이 감은 횟수가 4회일 때마다 한 층씩 올려 적층하였다. 수신 코일의 인덕턴스는 식 (3)을 이용한 경우 389  $\mu$ H, 시뮬레

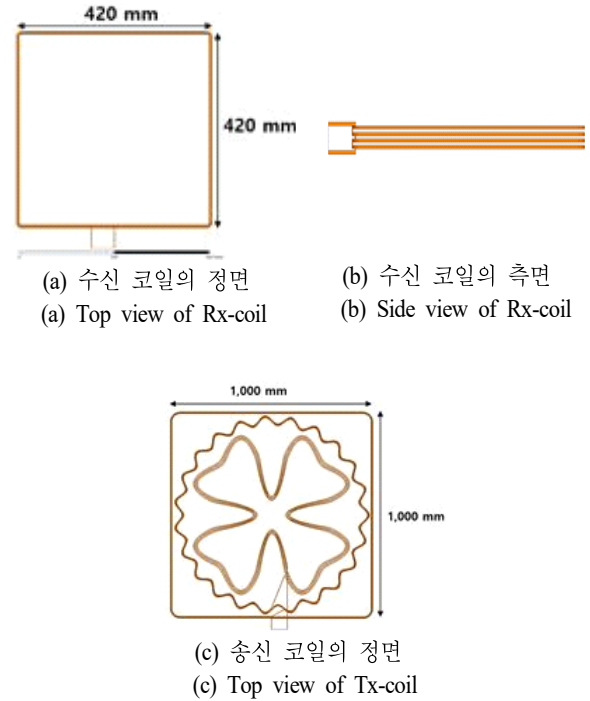


그림 2. 수신 및 송신 코일

Fig. 2. Receiving and transmitting coils.

이션은 384  $\mu$ H, 측정은 375  $\mu$ H로 모두 유사한 결과가 나타났다. 손실은 892 m $\Omega$ , 품질 계수( $Q$ -factor,  $Q_{RX}$ )는 54로 시뮬레이션되었다. 그림 2(c)는 근거리 내 일정한 전송 효율을 보장하기 위한 송신 코일의 기하학적 구조를 나타낸다. 수신 코일과 달리 송신 코일은 구조가 복잡하므로, 그림 3과 같이 세 부분으로 나누어 설계 및 최적화하였다. 코일의 총 감은 횟수는 12회이므로, 각 구조당 감은 횟수는 4회이며, 개별적으로 최적화한 후 결합하였다.

송신 코일도 구조 단순화를 위하여, Litz wire를 단면적이 같은 정사각형인 도선으로 등가화하였고, 도선의 한 변의 길이는 2 mm이다. 첫 번째로, 그림 3(a)와 같이 일반 코일(square-shaped coil)은 도선 간격을 조정하여 높은 품질 계수를 얻도록 최적화하였으며, 식 (3)과 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 코일의 인덕턴스는 73  $\mu$ H이고, 식 (3)의 계산 값은 70  $\mu$ H이며, 품질 계수는 51로 가장 높은 값을 나타내었다.

두 번째로, 그림 3(b)의 물결 모양을 갖는 코일(sinuous meander spiral coil) 설계이다. 최외곽 정사각형 모양 코일

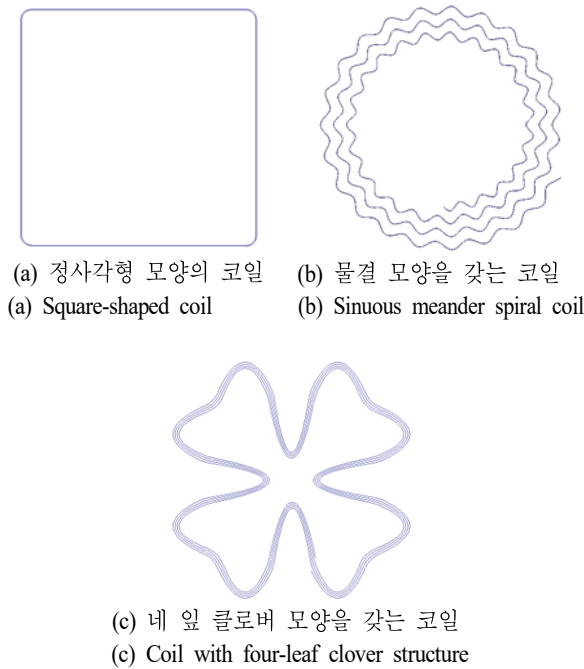


그림 3. 송신 코일의 구성  
Fig. 3. Composition of Tx-coil.

(square-shaped coil)의 전체 둘레와 같도록 물결 모양 코일의 최외곽 둘레는 3,860 mm로 설정하였으며, 해당 구조를 통하여 내부에 배치할 수 있도록 소형화하였다. 물결 모양의 코일은 식 (4), (5)를 통하여 설계할 수 있으며,  $R$ 은 반지름,  $p$ 는 도선 간격,  $a$ 는 물결 모양의 크기,  $n$ 은 물결 모양의 개수,  $\theta$ 는 각도이다.

$$x = (R + p\theta + a \sin(n\theta)) \cos\theta \quad (4)$$

$$y = (R + p\theta + a \sin(n\theta)) \sin\theta \quad (5)$$

물결 모양 코일의 최적화된 값은  $R=440$  mm,  $p=0.2$  mm,  $a=0.02$ ,  $n=23$ 이며, 도선 간격이 0.2 mm일 때, 코일의 품질 계수는 56, 인덕턴스는 58  $\mu\text{H}$ 로 가장 좋은 특성을 나타내었다.

세 번째로, 네 잎 클로버 모양을 갖는 코일(coil with four-leaf clover structure)의 모습을 그림 3(c)에서 확인할 수 있다. 기하학적 구조로 인하여 특정 함수를 사용하여 나타내기 어려우므로, 2차 방정식을 이용하여 3개의 곡선을 만들고, 이를 연결하여 그림 4와 같은 구조를 만들었

다. 그림에서 ①, ②, ③에 대한 방정식은 차례대로  $y_1 = C_1x^2$ ,  $y_2 = C_2x^2$ ,  $y_3 = C_3x^2$ 이며, 최적화된 값은 표 1에 정리하였다. 표 1에서  $C_{1S}$ 와  $C_{1E}$ 는 HFSS 내 2차 방정식  $y_1$ 의 시작 및 끝지점을 지정하기 위한 변수이며,  $C_{2S}$ ,  $C_{2E}$ ,  $C_{3S}$ ,  $C_{3E}$ 도 2차 함수  $y_2$ ,  $y_3$ 를 만들기 위함이다. 네 잎 클로버 모양을 갖는 코일의 최외곽 둘레는 다른 코일과 동일하게 3,860 mm이며, 시뮬레이션에서 크기를 0.143배 조정하여 물결 모양의 코일의 내부에 배치하였다. 해당 구조를 소형화하여 코일 내부에 배치할 수 있으며, 도선의 총 길이가 일반 코일보다 증가하기 때문에 코일의 인덕턴스는 증가하게 된다. 이에 따라 품질 계수 향상 및 송, 수신 코일 간 결합 계수를 증가시킬 수 있으며, 물결 및 네 잎 클로버 모양을 갖는 코일의 구조에 따라 자기장의 세기를 비교적 균일하게 발생시킬 수 있다. 도선 간격은 2 mm일 때, 고효율 특성이 나타났으며, 품질 계수는 56, 인덕턴스 43  $\mu\text{H}$ 이다. 서로 다른 모양을 갖는 3종 코일을 직렬로 결합하면, 최종 설계된 송신 코일은 그림 2(c)와 같다. 코일의 인덕턴스 및 손실의 시뮬레이션 결과는 각각 340  $\mu\text{H}$ , 357 m $\Omega$ 이며, 품질 계수( $Q$ -factor,  $Q_{TX}$ )는 120이다. 측정된

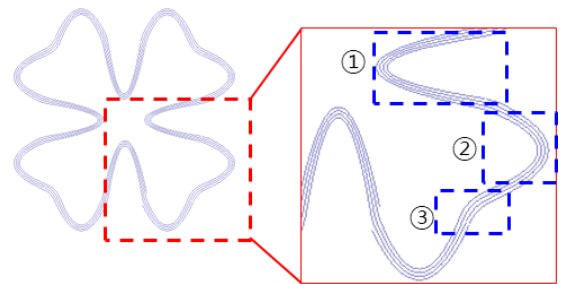


그림 4. 네 잎 클로버 모양을 갖는 코일의 설계 구성도  
Fig. 4. Design concept of coil with four-leaf clover structure.

표 1. 네 잎 클로버 모양을 갖는 코일을 설계하기 위한 변수 및 최적화된 값

Table 1. Optimized values of parameters for coil with four-leaf clover structure.

| Parameter | Value | Parameter | Value | Parameter | Value |
|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| $C_1$     | 5     | $C_2$     | 2.5   | $C_3$     | 1     |
| $C_{1S}$  | 0.5   | $C_{2S}$  | 0.5   | $C_{3S}$  | 0.2   |
| $C_{1E}$  | 0.5   | $C_{2E}$  | 0.5   | $C_{3E}$  | 0.2   |



인덕턴스는  $370 \mu\text{H}$ 로 유사한 값을 나타내며, 오차의 원인은 제작 시 도선의 구부림이 원만하지 못하여 발생하였다. 송, 수신 코일의 품질 계수는 50 이상 나타났으므로, 95 % 이상의 효율을 나타내어 근거리 및 장거리에서 높은 효율을 나타낼 수 있다<sup>[16]</sup>.

송신 코일에 174.7 W의 전력을 공급했을 때, 수직 거리 (transmission distance) 50 mm 지점에서의  $xy$ 평면 자기장 분포 및 세기는 그림 5와 같다. 코일의 중앙 부분뿐만 아니라, 가장자리에서도 세기가 강하게 나타나므로, 수신 코일의 위치가 비정렬이더라도 코일 간 결합 계수는 높게 나타난다. 따라서, 드론이 무선충전 스테이션의 중앙 부분에 정확히 착륙하지 않더라도, 높은 전송 효율(PTE)을 보장할 수 있음을 식 (1)에서 확인할 수 있다.

그림 6은 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 그림 6(b)와 같이 두 코일 간의 중심을 기준으로, 수직 거리 50 mm에서 우측으로 수평 이동(misalignment)하였을 때의 전송 효율을 살펴보았다. 그림 6(c), (d)에서 알 수 있듯이, 수평 이동 거리가 285 mm일 때는 수신 코일이 송신 코일의 충전 영역 내 가장자리에 위치하며, 수평 이동 거리가 300 mm인 경우, 충전 영역을 벗어나게 된다.

그림 7은 20 kHz에서 두 코일 간 수평 및 수직 이동 거리에 따른 전송 효율을 시뮬레이션한 결과로, 정합 회로, 정류기 등의 손실이 포함되어 있지 않다. 자기장의 세기가

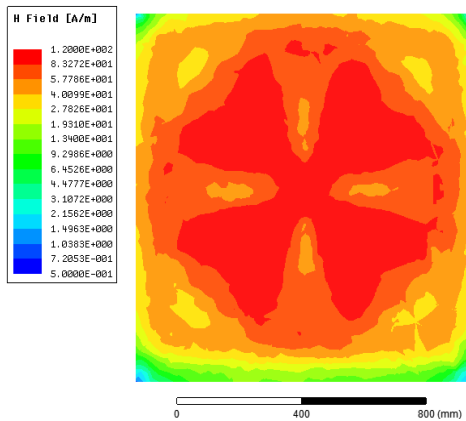


그림 5. 전송 거리 50 mm에서 송신 코일의 자기장 분포 및 세기( $xy$ 평면)

Fig. 5. Magnetic field distribution and intensity ( $xy$ -plane) of Tx-coil at transmission distance of 50 mm.

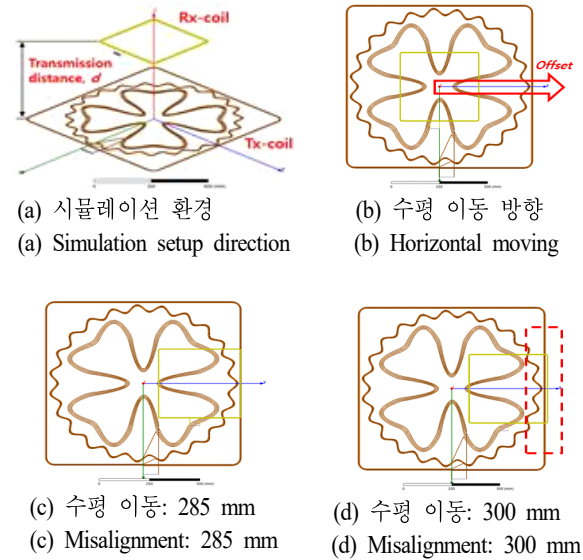
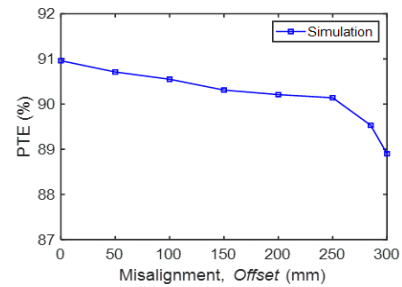
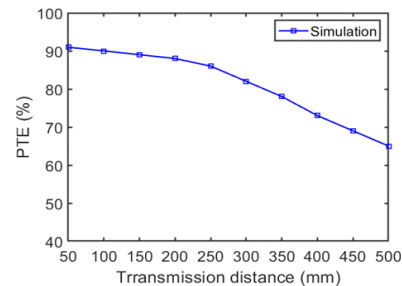


그림 6. 시뮬레이션 환경 및 수평 이동에 따른 수신 코일 위치

Fig. 6. Simulation setup and position of Rx-coil according to misalignment distance.



(a) 수평 이동 시 전송 효율 특성  
(a) PTE as a function of misalignment distance.



(b) 수직 이동 시 전송 효율 특성  
(b) PTE as a function of transmission distance.

그림 7. 송, 수신 코일 간 전송 효율

Fig. 7. PTE between the proposed Tx- and Rx-coils.

비교적 균일함에 따라 수신 코일이 수평 이동하더라도 높은 전송 효율 특성을 나타내고 있음을 그림 5, 7(a)에서 확인할 수 있다. 더불어, 송신 코일의 구조가 대칭이기 때문에 자기장의 분포 및 세기가 대칭적으로 균일하게 나타난다. 따라서, 수신 코일의 위치가 변경되더라도 결합 계수의 차이가 크지 않으므로, 동일한 수신 코일 2개가 다른 위치에 놓이더라도 비슷한 결합 계수가 나타난다. 결과적으로 유사한 수신 전력으로 분배되면서 다중 충전이 가능하다. 하지만, 수신 코일이 충전 영역을 벗어난 경우는 전송 효율이 급격히 낮아져 무선충전이 불가능함을 알 수 있다.

전송 효율 유지율은 식 (6)과 같이 정의하였으며, 수평 이동 거리가 0 mm, 285 mm일 때의 전송 효율을 계산하면, 98 %의 높은 유지율을 나타냈다. 그림 7(b)는 수신 코일은 송신 코일로부터 50~500 mm까지 수직 거리를 변화시켰을 때의 전송 효율이 그림 7(b)는 수신 코일은 송신 코일로부터 50~500 mm까지 수직 거리를 변화시켰을 때의 전송 효율이다. 수직 거리가 300 mm일 때의 전송 효율은 80 %의 고효율 특성으로, 정합 회로, 컨버터, 인버터 등의 손실을 고려하더라도 우수한 특성을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

$$PTE_{retention\ rate} = \frac{PTE(Lateral)}{PTE(Alignment)} \times 100 \quad (6)$$

#### IV. 제작 및 측정 결과

최종 설계한 송, 수신 코일을 제작한 모습은 그림 8과 같다. 무선충전 스테이션의 전체 크기는 1,000×1,000×105 mm<sup>3</sup>이며, 수신 코일은 420×420×10 mm<sup>3</sup> 크기를 갖는다. 송신 코일은 목재로 구성된 무선충전 스테이션에 매립되었으며, 수신 코일은 TAROT 제품의 드론(Model: PRD-100) 다리 부분에 부착하였다. 실제 측정 환경은 그림 9(a)에서 확인할 수 있으며, 무선충전 스테이션 내 송신 코일의 위치 및 크기를 그림 9(a), (b)에 각각 나타내었다. 그림 9(c)와 같이 두 코일 간 전송 거리가 시뮬레이션 환경과 같도록 50 mm로 설정하였으며, 이는 무선충전 스테이션 케이스 및 드론의 다리 받침대 케이스 두께를 포함한 거리이다.

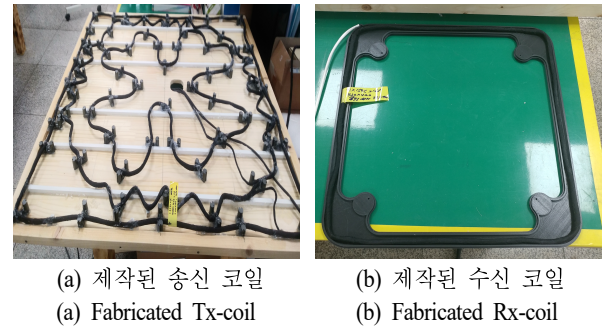


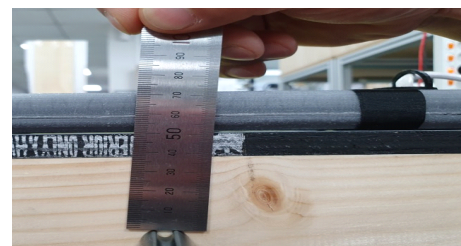
그림 8. 제작된 송, 수신 코일  
Fig. 8. Fabricated Tx/Rx-coils.



(a) 측정 환경  
(a) Measurement setup



(b) 송신 코일 크기  
(b) Dimension of Tx-coil



(c) 측정 거리  
(c) Transmission distance

그림 9. 광역 무선충전 시스템에 대한 측정 환경  
Fig. 9. Experimental conditions for WPT system with wide charging area.

송신 코일에 공급되는 전력은 대광전기 제품인 슬라이닥스(Model: 5KVA)를 이용하였고, 송, 수신 모듈은 효율이 각각 79 %, 91 %인 (주)파워 리퍼블릭 제품을 사용하였다. 모듈의 효율은 입력 전력 시 출력 전력의 비를 통하여 계산되었다.

입력 전력은 YOKOGAWA 제품의 Precision power analyzer (Model: WT300)을 통하여 174.7 W가 공급됨을 측정되었다. 수신 전력은 KIKUSUI 제품인 Electronic load (Model: PLZ1003WH)를 수신 모듈에 연결한 후, 4.92 A의 부하를 설정하여 수신되는 전력을 측정하였다. 수신 코일은 무선충전 스테이션 중앙에 배치하였다. 수신된 전류 및 전압은 각각 4.92 A, 24.5 V로, 120.5 W의 전력이 측정되었다. 입력 및 출력 전력의 비를 시스템 효율로 계산하면 69 %이다. 시스템 효율과 송, 수신 모듈 효율을 이용하여 역산하면, 코일의 효율은 96 %가 계산된다. 시뮬레이션 결과와 약간의 차이가 있는데, 이러한 원인은 Litz wire의 구조 단순화, 코일 제작상의 오차이다.

무선충전 스테이션의 일정한 전송 효율 특성을 살펴보

표 2. 수신 코일의 위치별 측정된 수신 전력  
Table 2. Received power with respect to location of Rx-coil.

| Location | Top left    | Top center    | Top right    |
|----------|-------------|---------------|--------------|
| Power    | 120.7 W     | 120.6 W       | 120.8 W      |
| Location | Left        | Center        | Right        |
| Power    | 120.5 W     | 120.5 W       | 120.5 W      |
| Location | Bottom left | Bottom center | Bottom right |
| Power    | 120.3 W     | 120.3 W       | 120.3 W      |

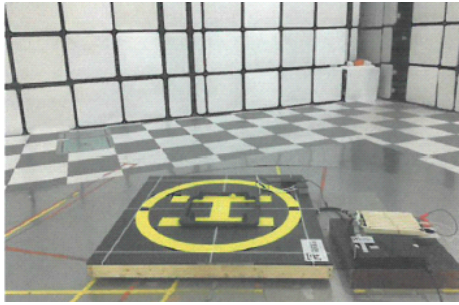
표 3. 드론 무선충전용 코일 설계에 관한 연구와 비교  
Table 3. Comparison with studies on coil design for WPT of drone.

| References | Tx-coil size (mm <sup>2</sup> ) | Rx-coil size (mm <sup>2</sup> ) | Transmission distance (mm) | Input power (W) | Output power (W) | PTE (Alignment) (%) | PTE (Lateral) (%) | Resonance frequency (kHz) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|-----------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|
| [8]        | 80×80                           | 80×80                           | 10                         | 144             | 72               | 95                  | 90                | 150                       |
| [9]        | 400×400                         | 200×200                         | 100                        | 68.7            | 62.5             | 91                  | 68                | 150                       |
| [10]       | 600×600                         | 200×200                         | 20                         | 215             | 195              | 91                  | 91                | 50                        |
| [11]       | 800×800                         | 200×200                         | 50                         | 27              | 24               | 89                  | 85                | 300                       |
| Proposed   | 1,000×1,000                     | 400×400                         | 50                         | 174.7           | 120.5            | 91                  | 90                | 20                        |

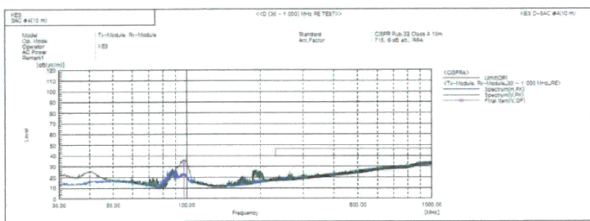
기 위하여 충전 영역을 격자무늬로 9분할한 후, 수신 코일의 위치별 측정된 전력을 표 2에 정리하였다. 수신 코일이 놓인 위치에 따라, 수신 전력은 120.3~120.8 W로 측정되어 변화율이 거의 없었다. 따라서, 드론이 다양한 주변 환경에 의해 무선충전 스테이션의 가장자리에 착륙하더라도, 중앙 부분에서 전력과 비슷한 전력을 수신할 수 있다. 더불어, 소형 드론의 여러 대가 착륙하더라도 같은 전력으로 동시에 공급할 수 있다.

제안한 송신 코일 구조에 대한 우수성을 검증하기 위하여, 드론 무선충전을 위한 코일 설계에 관한 연구들과 비교하여 표 3에 나타내었다<sup>[8]~[11]</sup>. 코일 간 정렬 상태일 때 높은 전송 효율을 나타내는 연구를 선별하였으며, 이러한 연구들은 단거리 무선충전이 목적이거나 코일의 크기가 작고 상대적으로 저전력 무선충전이므로 대형 드론을 충전하기에는 역부족이다<sup>[8]~[11]</sup>. 또한, 송신 코일 내 내부 코일이 없어 비정렬 상태에서 낮은 전송 효율 특성을 나타내거나, 알고리즘을 이용하여 높은 전송 효율을 보장하기 때문에, 이를 위한 추가적인 시스템이 필요한 단점이 있다<sup>[8], [9]</sup>. 한편, 제안된 코일은 고전력을 이용하여 대형 드론을 무선충전할 수 있으며, 착륙 오차에 의해 발생한 코일 간 비정렬 상태에서도 높은 전송 효율 특성을 나타낸다.

그림 10은 드론이 무선충전 스테이션에서 충전할 때, EMI 측정 환경 및 결과를 나타낸다. 주파수에 따라, 30~230 MHz: 30 dB  $\mu$ V/m(10 m), 230~1,000 MHz: 37 dB  $\mu$ V/m(10 m)의 기준이 있으며, 측정 결과는 해당 주파수 대역에서 기준값 이하로 나타났음을 그림 10(b)을 통하여 확인할 수 있다.



(a) EMI 측정 환경  
(a) EMI test setup



Final Result

| No. | Frequency [MHz] | (P) | Reading [dB(μV)] | c.f. [dB(1/m)] | Result [dB(μV/m)] | Limit [dB(μV/m)] | Margin [dB] | Height [cm] | Angle [deg] | Remark |
|-----|-----------------|-----|------------------|----------------|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| 1   | 97.525          | V   | 54.9             | -22.1          | 32.8              | 40.0             | 7.2         | 156.0       | 77.0        |        |

(b) 시험 결과  
(b) EMI test results

그림 10. 무선충전 스테이션 및 드론의 EMI 측정  
Fig. 10. EMI test for WPT station and drone.

## V. 결 론

대형 드론뿐만 아니라, 다중 무선충전을 위한 고전력 무선충전 광역 스테이션을 개발하였다. 수신 코일의 위치에 따른 수신 전력의 변화율을 낮게 하도록 송신 코일을 서로 다른 모양을 갖는 3종류의 코일을 개별적으로 최적화한 후, 이를 결합하여 최종 설계하였다. 수직 거리 50 mm에서, 수신 코일을 우측으로 0~285 mm 까지 수평 이동하였을 때, 전송 효율은 각각 91 %, 89.5 %로, 98 %의 높은 전송 효율 유지율을 나타내었다. 전력 공급기, 송, 수신 모듈, 부하를 연결하여, 174.7 W의 입력 전력을 송신 코일에 공급하였을 때, 측정된 전력은 120.5 W로 시스템 효율은 69 %이다. 아울러, 수신 코일의 위치가 충전 영역 내 어디에든 존재한다면, 120.3 W 이상의 전력을 수신할 수 있음을 측정을 통하여 검증하였다.

## References

- [1] T. H. Yoo, K. B. Jung, "Analysis of EMC technique for drone," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 1, pp. 26-32, Jan. 2017.
- [2] J. H. Choi, K. B. Kang, S. G. Sun, J. S. Lee, B. L. Cho, and K. T. Kim, et al., "Efficient detection of small unmanned aerial vehicles in cluttered environment," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 5, pp. 389-398, May 2019.
- [3] S. I. Kim, Y. H. Noh, J. Lee, J. Choi, and J. Yook, "Electromagnetic signature of a quadcopter drone and its relationship with coupling mechanisms," *IEEE ACCESS*, vol. 4, pp. 174764-174773, Nov. 2019.
- [4] S. Kim, J. Lee, J. S. Choi, and J. G. Yook, "Analysis of electromagnetic pulse coupling into electronic device considering wire and PCB resonance," in *the Proceedings of the 2018 International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP 2018)*, Busan, Oct. 2018, pp. 521-522.
- [5] K. W. Lee, B. S. Kim, M. J. Moon, J. H. Song, W. K. Lee, and Y. K. Song, et al., "Drone-based micro-SAR imaging system and performance analysis through error corrections," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 9, pp. 854-864, Sep. 2016.
- [6] T. Campi, S. Cruciani, G. Rodríguez, and M. Feliziani, "Coil design of a wireless power transfer charging system for a drone," in *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation(CEFC)*, Miami, FL, Nov. 2016.
- [7] T. Campi, S. Cruciani, M. Feliziani, and F. Maradei, "High efficiency and lightweight wireless charging system for drone batteries," in *2017 AEIT International Annual Conference*, Cagliari, 2017, pp. 1-6.
- [8] C. Song, H. Kim, Y. Kim, D. Kim, S. Jeong, and Y. Cho, et al., "EMI reduction methods in wireless power transfer system for drone electrical charger using tightly



- coupled three-phase resonant magnetic field," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 9, pp. 6839-6849, Sep. 2018.
- [9] T. Campi, F. Dionisi, S. Cruciani, V. De Santis, M. Feliziani, and F. Maradei, "Magnetic field levels in drones equipped with wireless power transfer technology," in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(APEMC)*, Shenzhen, Nov. 2016, pp. 544-547.
- [10] Y. Song, X. Sun, H. Wang, W. Dong and Y. Ji, "Design of charging coil for unmanned aerial vehicle-enabled wireless power transfer," in *2018 8th International Conference on Power and Energy Systems(ICPES)*, Colombo, Sri Lanka, Dec. 2018, pp. 268-272.
- [11] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, and M. Feliziani, "Wireless charging system integrated in a small unmanned aerial vehicle(UAV) with high tolerance to planar coil misalignment," in *2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC Sapporo/APEMC)*, Sapporo, Jun. 2019, pp. 601-604.
- [12] T. H. Kim, G. H. Yun, W. Y. Lee, and J. G. Yook, "Asymmetric coil structures for highly efficient wireless power transfer systems," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 7, pp. 3443-3451, Jul. 2018.
- [13] H. Hoang, F. Bien, *Maximizing Efficiency of Electromagnetic Resonance Wireless Power Transmission Systems with Adaptive Circuits*, Intechopen, 2012.
- [14] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [15] *Wireless Power Transmission using Technologies Other Than Radio Frequency Beam*, ITU-R 2303-2, Jun. 2017.
- [16] K. Hata, T. Imura, and Y. Hori, "Simplified measuring method of kQ product for wireless power transfer via magnetic resonance coupling based on input impedance measurement," in *IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Beijing, Oct. 2017, pp. 6974-6979.

김 태 형 [연세대학교/공학박사]

<https://orcid.org/0000-0001-7235-3866>



2013년 2월: 동양미래대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2020년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
[주 관심분야] WPT, RF System, Antenna

안 옥 현 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8728-9713>



2018년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)  
2018년 2월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 수치해석, 플라스마, FDTD

박 중 인 [(주)파워리퍼블릭/CTO]

<https://orcid.org/0000-0002-7063-7408>



1982년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1999년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)  
2006년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학박사)  
2018년 3월~현재: (주)파워리퍼블릭 CTO

[주 관심분야] ASIC, 신호처리, DSP, WPT

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수(공학박사)  
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수  
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF, 바이오/가스센서 등