THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2023 May.; 34(5), 385～398.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.5.385
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

상호운용성과 오정렬에 강인한 고효율 무선전력전송 드론 코일 구조

A High Efficiency Wireless Power Transfer Drone Coil Structure for Interoperability and Robust Misalignment

이성진 · 김동민 · 김수현* · 임준환* · 이정호* · 노엘조이* · 김동욱

Sungjin Lee · Dong-Min Kim · Suhyun Kim* · Junhwan Lim* · Jeongho Lee* · Joey Noel* · Dongwook Kim

요 약

본 연구에서는 드론에 자기유도방식의 무선전력전송 시스템을 적용한 상호운용성 및 오정렬에 강인한 고효율 무선전력전송 코일 구조를 제안하였다. 송신 코일은 수신부를 포함할 수 있는 크기의 helical 구조에 페라이트 플레이트를 적용하였고, 수신 코일은 가드형 타입의 코일로, 페라이트 시트를 적용하였다. 권선 방식에 따른 spiral 코일과 helical 코일을 비교/분석하기 위해서 Z축 방향의 자기장 벡터를 확인하였고, 서로 다른 형상의 드론에 대해 송/수신부의 페라이트 유무와 수신부의 페라이트 시트 부착 위치에 따른 상호 인덕턴스를 분석하여 무선전력전송에 적합한 모델을 제안하였다. 전자계 시뮬레이터 Ansys Electronics Maxwell을 통해 코일의 전기적 특성을 도출하고, 제작한 코일의 측정값을 비교/분석하여, 제안한 모델의 송/수신 코일 간 오정렬에 따른 상호 인덕턴스 변화를 분석하였고, 오정렬 오차에 따라 자기장 분포가 균등한 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, a high-efficiency wireless power transfer (WPT) coil that is robust against interoperability and misalignment was developed by applying an inductive power transfer system to a drone. The transmitting coil had a ferrite plate applied to a helical structure that included the receiving part. The receiving coil was a guard-type receiving part applied to the ferrite sheet. To analyze the spiral and helical coils according to the winding method, the z-axis magnetic field vector was analyzed. A suitable WPT model was developed for each drone by analyzing the mutual inductance based on whether the ferrite was attached to the transmitter or receiver and the ferrite sheet's location. The electrical characteristics of the coil were derived using Ansys Electronics Maxwell, and a comparative analysis was performed using the measured values of the fabricated coil. The mutual inductance change due to misalignment between the coils of the transmitter and receiver of the proposed model was analyzed. It was demonstrated that the magnetic field distribution was uniform according to the misalignment error.

Key words: Drone, Wireless Power Transfer (WPT), Misalignment, Helical Coil, Mutual Inductance

「이 연구는 2022년도 영남대학교학술 연구비(221A580041)의 지원과 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원 지원을 받아 수행된 연구임(20214000000010, 경북지역풍력에너지클러스터인재양성사업).」

영남대학교 미래자동차공학과(Department of Automotive Engineering, Yeungnam University)

*대구과학고등학교(Daegu Science High School)

· Manuscript received December 31, 2022 ; Revised January 31, 2023 ; Accepted March 15, 2023. (ID No. 20221231-113)

· Corresponding Author: Dongwook Kim (e-mail: dwkim@yu.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)는 사람이 탑승하지 않고 원격 및 인공지능을 기반으로 운용하는 비행기를 지칭하는 말로 통칭 드론을 의미한다. 드론은 산업용 및 상업용으로 다양한 분야에 적용되고 있다. 최근에는 드론에 자율 비행 시스템을 적용한 철도시설물 점검, 육상 및 해상풍력의 유지보수(operations and maintenance, O&M) 등 관리목적 및 유지보수의 사례가 증가하고 있다[1],[2]. 관리 면적이 넓고 사람이 접근하기 어려운 공간은 카메라로 촬영한 영상을 3차원으로 분석해 이상 유무를 판별하기 때문에 정확성 및 효율성에서 강점이 있다. 하지만 오랜 비행시간을 요구한다는 점에서 현재 드론의 배터리 용량은 비행시간에 상당한 제약을 준다. 대부분의 드론 동력원은 리튬폴리머(Li-Po) 배터리로, 비행시간이 완충 기준 수 분에서 수십 분으로 제한적이다. 따라서 주기적인 배터리 교체가 필요하지만, 기존 자율 비행 시스템은 배터리 충전과 배터리 교체 작업을 필요로 했기 때문에 완전한 자율 비행을 수행하기에는 한계가 있다.

무선전력전송(wireless power transfer, WPT) 시스템은 무선으로 전기에너지를 전송하는 기술로 전력전송 방법에 따라 자기유도, 자기공명, 전자기파 방식 등으로 나뉘며 이 중 자기유도 방식이 상용화가 가장 많이 되어있다[3]. 드론에 무선전력전송 시스템을 적용하면 유선 배터리 충전 또는 배터리 교체 인력을 대체할 수 있고, 무선충전 스테이션을 배치함으로써 비행시간 증가와 동시에 활동 범위를 넓힐 수 있기 때문에 기존 시스템 대비 완전한 자율 비행 시스템을 구축할 수 있다.

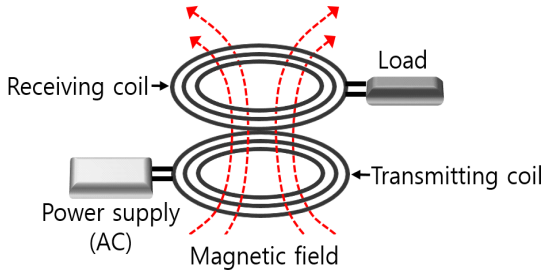
드론 무선전력전송과 관련된 연구 사례는 다양하며[4],[5], 특히 자기유도 방식에서는 코일 형상 설계에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다[6]~[8]. 무선전력전송 시스템에서 갖는 공통적인 한계점은 오정렬(misalignment)과 공극(airgap)의 변화로 인한 효율 저하이다. 오정렬은 송신 코일과 수신 코일 간에 배열의 변화를 의미하며, 드론이 착륙 시에 GPS 오차 또는 바람과 같은 외부요인으로 인해 불완전한 착륙을 할 때 발생한다. 공극은 송신 코일과 수신 코일 간의 거리를 의미하며, 드론은 기종별로 크기가 다르기 때문에 공극의 변화가 발생한다. 현재 연구된 논문들은 단일 드론에 대한 무선전력전송 시스템으로 이종(異種) 드론을 수용할 수 있는 시스템이 필요하다.

본 논문에서는 상호운용이 가능하며, 오정렬에 강인한 무선전력전송 송/수신 코일에 대하여 제안하였다. 송신 코일은 수신부를 포함할 수 있는 크기인 helical 구조를, 수신 코일은 프로펠러 보호 및 상해사고 예방을 위해 제작된 가드형 타입의 코일을 적용하였다. 또한, 송/수신 코일 간에 자기적 결합도를 높이기 위해서 강자성체의 한 종류인 페라이트를 사용하고, 송신부의 페라이트 유무와 수신부의 페라이트 시트 부착 위치에 따른 모델을 비교하여 무선전력전송 시스템에 적합한 모델을 제안하여, 제안한 모델을 기반으로 오정렬에 따른 상호 인덕턴스의 변화에 대해 시뮬레이션값과 측정값에 대한 분석을 수행하였다.

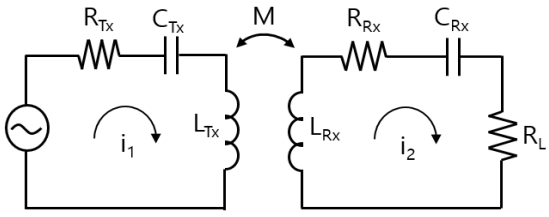
Ⅱ. 제안된 드론 무선전력전송 코일 구조

2-1 일반적인 무선전력전송 시스템

그림 1은 일반적인 무선전력전송 시스템의 개념도로, 교류 전원으로부터 생성된 시변-정현파 전류(i_1)가 송신



(a) 무선전력전송 시스템 개념도
(a) Conceptual image of WPT system



(b) 무선전력전송 시스템 등가회로
(b) Equivalent circuit of WPT system

그림 1. 일반적인 무선전력전송 시스템
Fig. 1. Concept of WPT system.

코일에 흐르게 되면 시변 자기장이 발생하게 되어 수신 코일로부터 발생된 유도 전압(induced voltage)을 부하에 공급하는 방식이다. 무선전력전송 시스템의 등가회로는 그림 1(b)와 같으며, 크게 송신부, 임피던스 매칭부, 수신부로 나뉜다. V_{in}은 입력단의 교류 전원, R_{Tx}와 R_{Rx}는 각각의 송/수신부의 등가 저항, C_{TX}와 C_{Rx}는 송/수신부의 보상 커패시터, L_{Tx}와 L_{Rx}는 송/수신 코일, R_L은 부하저항을 나타낸다. 전력전송효율(power transfer efficiency, PTE)은 그림 1(b)의 등가회로에서 키르히호프의 법칙을 이용하여 정의할 수 있으며[9],[10], LC공진 조건을 적용하면 전력전송효율의 수식은 식 (1)과 같다.

$$\eta(PTE)=\frac{P_{out}}{P_{in}}=\frac{R_L}{R_L+R_{Rx}+R_{Tx}\dfrac{(R_{Rx}+R_L)^2}{(M\omega)^2}} \tag{1}$$

식 (1)에서 η(%)는 P_{in}에 대한 P_{out}의 비로, P_{out}(W)은 부하 R_L(ohm)에 전달되는 전력을 의미하며, P_{in}(W)은 입력전력을 의미하고, M은 송/수신 코일간의 상호 인덕턴스를, ω는 무선전력전송에 사용되는 송신전류의 각주파수 ($\omega = 2\pi f$, f=주파수)를 의미한다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 전력전송효율은 전력전송의 주파수가 클수록, 송/수신 코일의 저항이 작을수록, 상호 인덕턴스가 높을수록 전력전송효율이 크다.

2-2 무선전력전송 시스템의 오정렬에 의한 한계점

그림 2는 무선전력전송 시스템에서 발생하는 오정렬에 대한 개념도로, 두 원형 코일 간의 오정렬과 공극 변동을 나타낸다. 오정렬 및 공극 변동이 생기게 되면 송신 코일에서 수신 코일로 쇄교하는 자기장의 양이 감소하게 되어, 누설자속이 증가하기 때문에 상호 인덕턴스가 감소하게 된다. 오정렬에 대한 오차와 공극이 크면 클수록 누설자속의 증가로 인해 상호 인덕턴스가 감소하기 때문에 식 (1)과 같이 전력전송의 효율 저하가 발생한다.

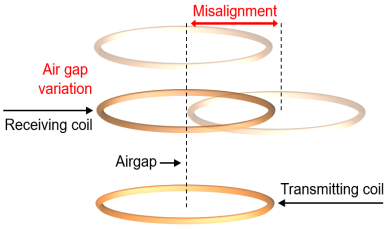


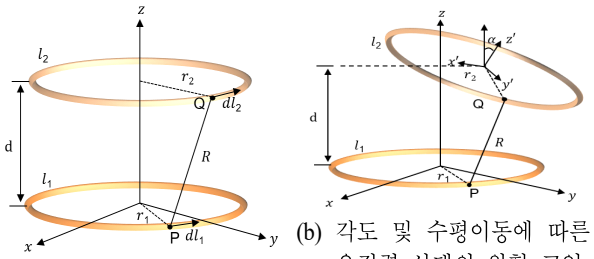
그림 2. 무선전력전송 시스템의 오정렬에 대한 정의
Fig. 2. Concept of misalignment in WPT system.

그림 3은 정렬 상태와 각도 및 수평 이동에 따른 오정렬 상태의 원형 코일이다. 그림 3(a)는 두 원형 코일 간에 상호 인덕턴스를 구하는 방법으로[11], 두 평면 코일 사이의 벡터 퍼텐셜을 이용한 상호 인덕턴스는 노이만(Neumann)의 방정식에 의해 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$M=\frac{\mu_0}{4\pi}\int_{l_1}\int_{l_2}\frac{\vec{dl}_1\cdot\vec{dl}_2}{R} \tag{2}$$

식 (2)에서 μ_0는 투자율(permeability), l_1과 l_2는 각 코일의 원형 폐회로를 의미하고, R은 두 원형 코일의 임의의 점 사이의 거리를 의미하며, dl_1과 dl_2는 한 지점에서의 접선 요소를 의미한다. 그림 3에 대하여, 식 (3)은 두 코일 간 정렬 상태에 대한 상호 인덕턴스의 수식이며, 식 (4)는 오정렬인 상태에 대한 상호 인덕턴스의 수식으로, 두 코일 사이의 거리가 멀어지면 상호 인덕턴스가 감소하는 것을 알 수 있다. 앞서 다루었던 식 (2)와 같이 상호 인덕턴스는 전력전송 효율과 비례하기 때문에 두 코일 간의 거리 증가는 상호 인덕턴스의 감소를 의미하며, 상호 인덕턴스의 감소는 효율 저하를 의미한다.

$$M=\frac{N_1N_2\mu_0}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{r_1r_2\cos(\theta-\phi)d\theta d\phi}{\sqrt{(r_1^2+r_2^2-2r_1r_2\cos(\theta-\phi)+d^2}} \tag{3}$$



(a) 정렬 상태의 원형 코일
(a) Circular coil with perfect alignment

(b) 각도 및 수평이동에 따른 오정렬 상태의 원형 코일
(b) Circular coil with lateral and angular misalignment

그림 3. 정렬 상태에 따른 원형 코일의 상대적 위치
Fig. 3. Relative position of circular coil.

$$M=\frac{N_1N_2\mu_0}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{r_1r_2\cos(\theta-\phi)d\theta d\phi}{\sqrt{(r_1\cos\theta-r_2\cos\phi)^2+(r_1\sin\theta-r_2\sin\phi\cos\alpha-c)^2+(r_2\sin\phi\sin\alpha-d)^2}} \quad (4)$$

2-3 제안된 송신 코일 및 수신 코일

제안된 송/수신 코일은 그림 4와 같으며, 오정렬 상태에서도 송/수신 코일 간에 전력전송 효율을 높이고자 수신부를 포함할 수 있는 크기의 송신 코일을 제안하였다. 또한, 수직 성분에 의한 오정렬, 즉 공극에 의한 변화가 있을 시에도 효율 감소가 발생하기 때문에, 이를 보완하고자 전력전송 효율을 유지하며, 다양한 크기의 드론을 수용할 수 있는 helical 구조의 송신 코일을 도입하였다[12].

드론에서 프로펠러의 보호대의 역할을 하는 가드(guard)는 프로펠러가 빠르게 회전하기 때문에 발생하는 상해사고 방지 및 충돌로 인한 프로펠러 파손을 보호하는 역할로 사용된다. 본 연구에서는 그림 5(a)와 같이 드론과 가드는 결합한 형태이며, 수신 코일은 그림 5(b)와 같이 가드의 홈에 배치하였다.

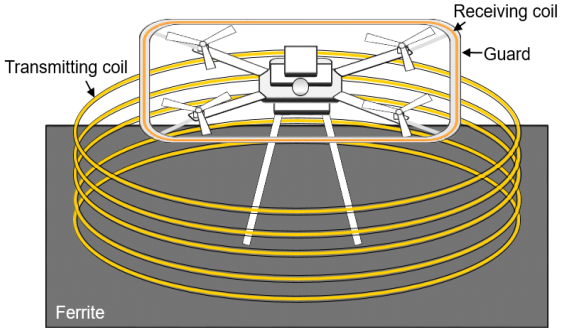
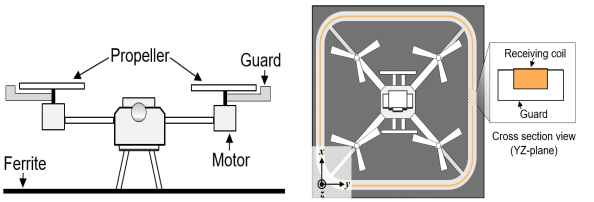


그림 4. 제안하는 드론 무선전력전송 코일
Fig. 4. Proposed drone WPT coil.



(a) 드론의 구조
(a) Structure of drone

(b) 가드형 수신 코일의 단면도
(b) Cross sectional view of guard type receiving coil

그림 5. 제안된 수신 코일을 포함한 드론의 개략도
Fig. 5. Schematic diagram of drone and guard coil.

2-4 자성체를 적용한 무선전력전송 코일

제안된 코일구조에서는 송/수신부에 상호 인덕턴스를 높여 전력전송 효율을 높이고자 자성체를 사용하였다. 자성체 중에서도 강하게 자화되는 자성체인 강자성체를 사용하여 투자율을 증가시키기 위해서 비투자율이 높은 페라이트를 사용하였고, 구체적으로 자속밀도, 자기장의 크기, 투자율에 대한 관계는 식 (5)로 표현될 수 있다.

$$B=\mu H\,(\mu=\mu_0\mu_r) \quad (5)$$

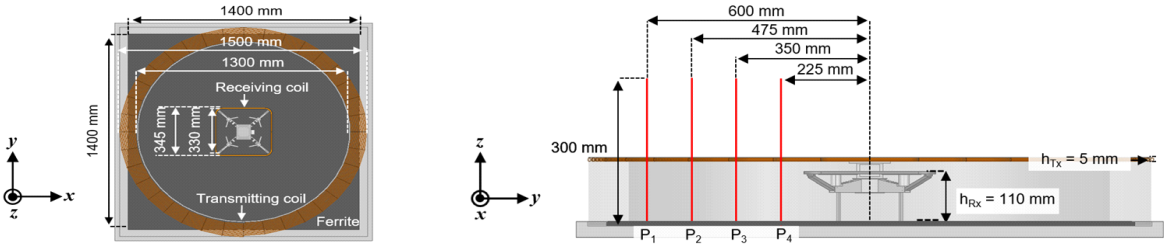
자속밀도(wb/m^2)는 투자율(N/A^2)에 자기장의 크기(H/m)를 곱한 값이다. 여기서 μ는 투자율로, 진공에서의 투자율(μ_0)과 비투자율(μ_r)의 곱으로 표현될 수 있으며, 식 (5)와 같이 비투자율이 크면 클수록 자화가 잘 되어 상호 인덕턴스가 증가한다[13]. 공기 중에서는 비투자율이 1에 근사하기 때문에, 페라이트의 무게를 고려하여 송신부에는 비투자율이 3,200인 페라이트 플레이트를, 수신부에는 투자율이 150인 페라이트 시트를 사용하였다.

Ⅲ. 시뮬레이션을 통한 분석

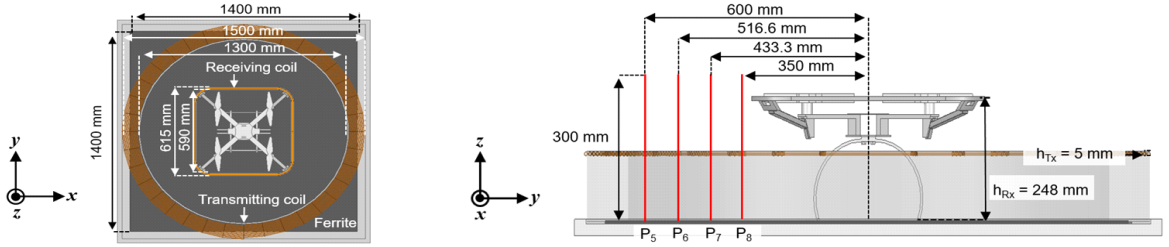
제안된 구조를 분석하기 위해 코일 모델링 및 전기적 특성 분석은 유한요소법을 기반으로 한 전자계 시뮬레이터 Ansys Electronics Maxwell을 이용하여 진행하였다. 시뮬레이션은 송신 코일에 해당하는 spiral/helical 구조의 상호운용 가능한 드론 무선전력전송에 대한 타당성 확인, Type-A 드론과 Type-B 드론에서의 송신부의 페라이트 유무와 수신부의 자성체 부착 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화, 그리고 오정렬 오차에 따른 상호 인덕턴스 분석 등으로 진행되었다.

3-1 시뮬레이션 환경

그림 6 및 그림 7은 송신 코일이 spiral 구조인 시뮬레

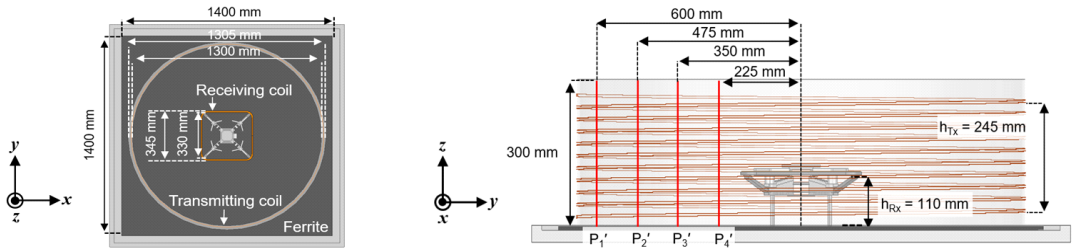


(a) Type-A 드론에 대한 시뮬레이션 환경
(a) Simulation setup for Type-A drone

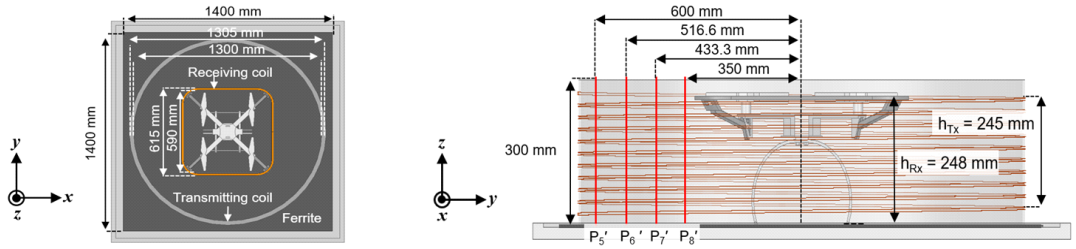


(b) Type-B 드론에 대한 시뮬레이션 환경
(b) Simulation setup for Type-B drone

그림 6. Spiral 구조의 송신 코일에 대한 시뮬레이션 환경
Fig. 6. Simulation setup for transmitting coil of spiral structure.



(a) Type-A 드론에 대한 시뮬레이션 환경
(a) Simulation setup for Type-A drone



(b) Type-B 드론에 대한 시뮬레이션 환경
(b) Simulation setup for Type-B drone

그림 7. Helical 구조의 송신 코일에 대한 시뮬레이션 환경
Fig. 7. Simulation setup for transmitting coil of helical structure.

이션 환경과 helical 구조인 시뮬레이션 환경이다. 공극 변화에 따른 spiral 코일과 helical 코일을 비교하기 위해서, 크기가 다른 두 타입의 드론에 대해 시뮬레이션을 진행하였다. Type-A 드론의 크기는 300×300×170 mm^3이고, Type-B 드론의 크기는 560×560×270 mm^3이다.

자기장 벡터의 크기는 상호 인덕턴스의 크기와 비례하는 만큼 공극 변화에 따른 Z축 방향 자기장 벡터의 크기를 분석하기 위해서 Type-A 드론과 Type-B 드론의 중심축으로부터 각각 225 mm, 350 mm 떨어진 위치에서부터 600 mm까지 P(polyline)를 모델링하여 4개의 구간을 각각 구분 지었다. Spiral 구조에서는 Type-A 드론과 Type-B 드론에 대해 P_1~P_4, P_1'~P_4', helical 구조에서는 Type-A 드론과 Type B 드론에 대해 P_5~P_8, P_5'~P_8'로 각각 125 mm/83.3 mm의 간격으로 나누었고, 바닥인 0 mm부터 높이가 300 mm인 위치까지의 polyline에 대한 Z축 방향 자기장 벡터의 크기를 확인하였다. 또한, spiral 코일과 helical 코일의 동등한 비교를 위해 코일의 직경은 5 mm인 도선, 권선 수는 10회, 두 코일의 내경은 1,300 mm, 평균 높이는 122.5 mm로 선정하였고, 사용되는 전류는 1 A, 주파수는 85 kHz 영역에서 시뮬레이션을 진행하였다.

수신부에 부착된 페라이트 시트 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화를 확인하기 위해 Type-A 드론과 Type-B 드론을 포함한 수신코일의 구조는 그림 8 및 그림 9와 같으며, 각 타입의 드론에서 수신부 페라이트 시트 부착 위치에 따라 Case 1부터 Case 4로 구분지었다. 본 시뮬레이션

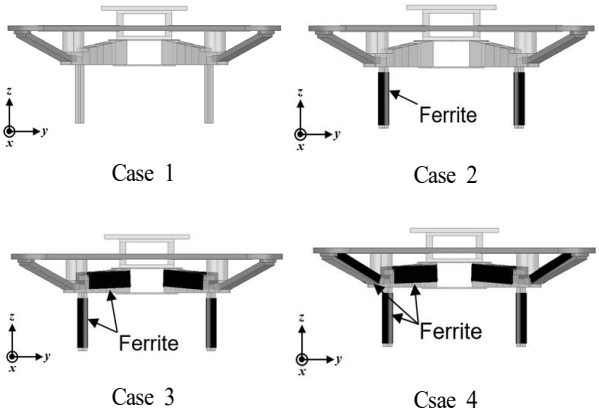


그림 8. Type-A 드론의 페라이트 시트 부착 위치
Fig. 8. The position of ferrite sheet of Type-A drone.

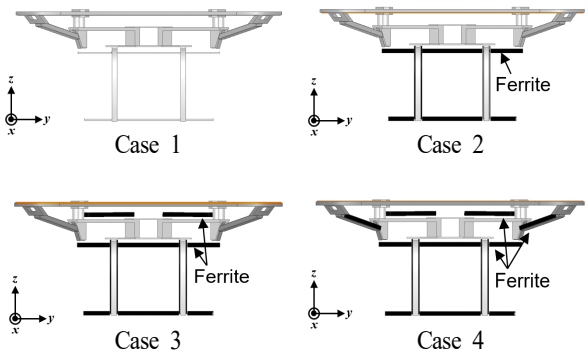


그림 9. Type-B 드론의 페라이트 시트 부착 위치
Fig. 9. The position of ferrite sheet of Type-B drone.

에서 모델링된 수신부 페라이트 시트의 특성은 비투자율이 150이고, 두께는 2 mm이다. Case 1은 대조군으로 페라이트 시트를 부착하지 않은 모델이며, Case 2는 드론의 하단부에 부착한 모델, Case 3은 드론의 하단부와 상단부에 부착한 모델, Case 4는 드론의 하단부와 상단부 그리고 드론과 가드 사이에 연결된 서포터에 페라이트 시트가 부착된 모델이다.

그림 10은 오정렬 오차에 따른 상호 인덕턴스 변화에 대한 시뮬레이션 환경이다. 드론의 중심축인 착륙 위치(landing pad)를 기준으로 cage 내에서 드론이 움직일 수 있는 Type-A 드론의 최대 반경($r_{1\ max}$)과 Type-B 드론의 최대 반경($r_{2\ max}$)은 각각 350 mm, 250 mm이다. 착륙 위치는

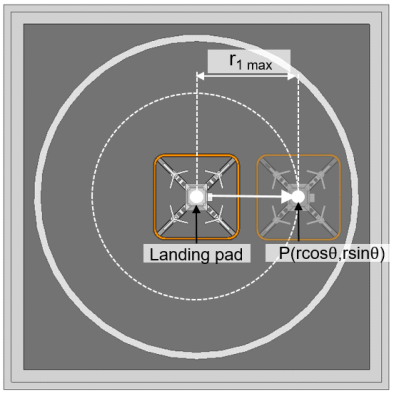


그림 10. 오정렬로 발생하는 상호 인덕턴스 변화에 대한 시뮬레이션 환경
Fig. 10. Simulation setup for mutual inductance change with respect to misalignment.

최대 반경 안의 임의의 점 P를 기준점으로부터의 거리, 각도로 위치로 표현하기 위해서 극좌표계를 도입하였다.

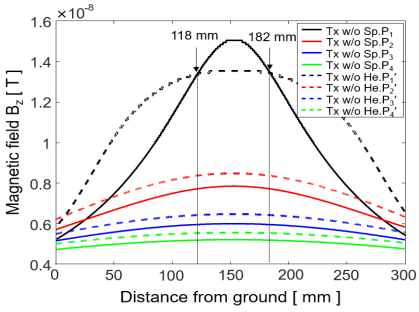
$$P(x,y) = P(r\cos\theta, r\sin\theta) \quad (6)$$

이때 r은 반경, θ는 임의의 각으로 r은 0 mm<r<rmax), θ는 0°<θ<360°로 설정하여 최대 반경의 단면적에 대한 상호 인덕턴스 분포를 확인하였다.

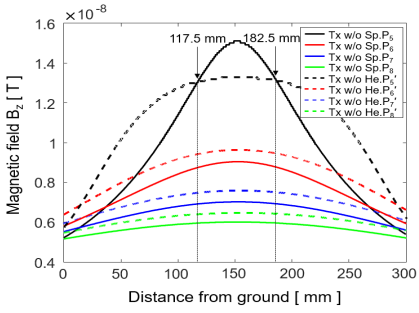
3-2 시뮬레이션 결과 분석

3-2-1 수직 방향에서의 Z축 자기장 변화

그림 11 및 그림 12는 송신부 페라이트 유무, spiral 코일과 helical 코일의 상호 인덕턴스 비교를 위한 Type-A

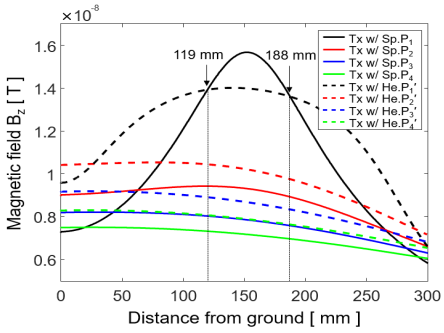


(a) Type-A 드론에 Z축 자기장 벡터
(a) Simulation results of Z-axis magnetic field vector for Type-A drone

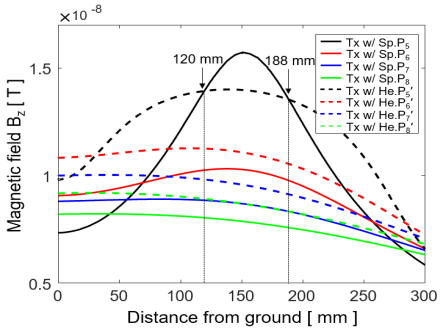


(b) Type-B 드론에 대한 Z축 자기장 벡터
(b) Simulation results of Z-axis magnetic field vector for Type-B drone

그림 11. Tx w/o spiral 코일과 Tx w/o helical 코일의 Z축 자기장 벡터 시뮬레이션 결과
Fig. 11. Simulation results of Z-axis magnetic filed vector of Tx w/o spiral coil and Tx w/o helical coil.



(a) Type-A 드론에 Z축 자기장 벡터
(a) Simulation results of Z-axis magnetic field vector for Type-A drone



(b) Type-B 드론에 대한 Z축 자기장 벡터
(b) Simulation results of Z-axis magnetic field vector for Type-B drone

그림 12. Tx w/ spiral 코일과 Tx w/ helical 코일의 Z축 자기장 벡터 시뮬레이션 결과
Fig. 12. Simulation results of Z-axis magnetic filed vector of Tx w/ spiral coil and Tx w/ helical coil.

드론과 Type-B 드론의 Z축 방향 자기장 벡터의 크기에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 11은 송신부에 페라이트가 없는 구조에 관한 결과, 그림 12는 송신부에 페라이트가 있는 구조에 관한 결과로, 송신부에 페라이트가 있을 때, 전반적으로 자기장의 크기가 증가한 것을 알 수 있으며, polyline의 중간점(=150 mm)을 기준으로 보았을 때, 자기장의 크기가 완만하게 떨어지는 것을 알 수 있다.

Type-A 드론과 Type-B 드론에서 송신 코일과 가장 근접한 측정영역인 P_1/P_1'을 기준으로 보았을 때 송신부에 페라이트가 없는 구조의 spiral 코일은 118 mm~182 mm/117.5 mm~182.5 mm에서 송신부에 페라이트가 있는 구조의 spiral 코일은 119 mm~188 mm/120mm~188 mm

에서 자기장의 세기가 가장 높게 나타났다. 그 외의 구간에 대해서는 helical 코일의 자기장의 세기가 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 spiral 코일 대비 helical 코일이 더 넓은 영역에 대해서 Z축 방향 자기장 벡터의 크기를 가진다는 의미이고, 이는 높은 상호 인덕턴스를 가지고 있음을 의미한다. 두 가지 드론의 자기장 세기의 패턴이나 크기도 유사한 것으로 보아, helical 구조가 spiral 구조와 비교해 높이 변화가 다양한 드론을 수용할 수 있음을 확인할 수 있다.

3-2-2 수신부 페라이트 부착 위치에 따른 시뮬레이션 결과

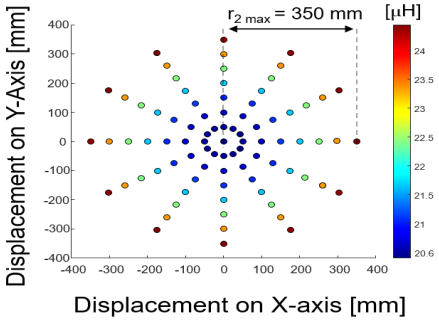
표 1은 시뮬레이션을 통한 Type-A 드론과 Type-B 드론의 송신부의 페라이트 유무와 수신부의 페라이트 시트 부착 위치에 따른 상호 인덕턴스 변화를 나타낸다. Type-A 드론과 Type-B 드론에 대해, 송/수신부에 페라이트를 부착하지 않은 모델과 가장 많이 부착한 모델의 상호 인덕턴스 증가율을 보았을 때 Type-A 드론과 Type-B 드론은 각각 50.58 %, 32.28 % 증가하였다.

3-2-3 오정렬에 따른 상호 인덕턴스 분석

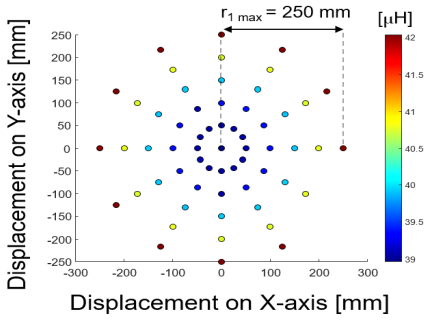
그림 13은 Type-A 드론과 Type-B 드론의 수신부 페라이트 부착 위치 분류된 제안하는 모델로 Case 4에 해당하는 모델이고, 송신부에 페라이트가 있는 구조의 Case 4로 오정렬 오차에 따른 상호 인덕턴스 분포도를 나타낸다. Type-A 드론과 Type-B 드론의 상호 인덕턴스는 중심에서는 각각 13.22 μH, 19.60 μH로 중심축에서 멀어질수록

표 1. 송/수신 코일 간의 상호 인덕턴스 시뮬레이션 결과
Table 1. Simulation results of mutual inductance.

Simulation results of mutual inductance					
Type	Tx Ferrite	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Type-A	w/o	13.22 μH	13.33 μH	13.41 μH	13.68 μH
	w/	19.60 μH	20.05 μH	20.29 μH	20.60 μH
Type-B	w/o	28.85 μH	29.11 μH	29.15 μH	29.21 μH
	w/	37.91 μH	38.47 μH	38.53 μH	38.64 μH



(a) Type-A 드론에 관한 결과
(a) Results of Type-A drone

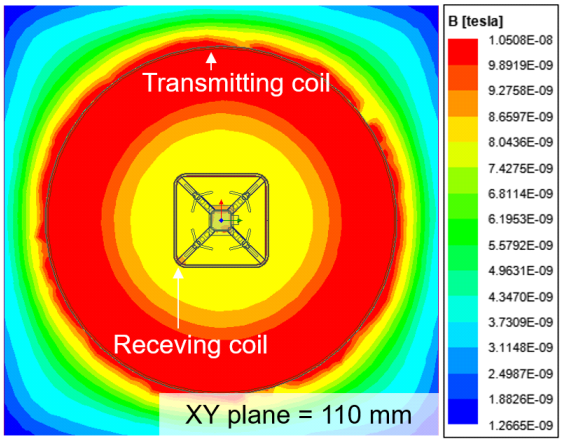


(b) Type-B 드론에 관한 결과
(b) Results of Type-B drone

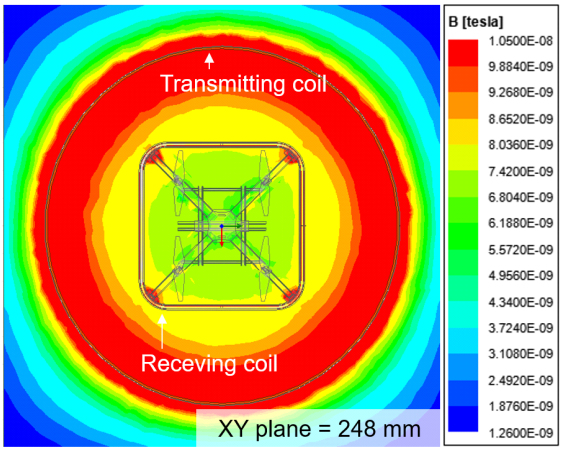
그림 13. Type-A 드론과 Type-B 드론의 제안하는 모델에 대한 상호 인덕턴스 분포
Fig. 13. Simulation results for mutual inductance variation with respect to misalignment.

자기장 발생 소스인 코일과 가까워지기 때문에 상호 인덕턴스가 증가하는 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 14는 Type-A 드론과 Type-B 드론의 Case 4에 해당하는 모델로 각각 지면으로부터 수신 코일의 높이만큼 떨어진 위치(Type-A 드론: 110 mm, Type-B 드론: 248 mm)에서 확인된 XY plane의 자기장 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 타입의 드론에서 제안하는 모델은 송신 코일이 수신 코일을 포함한 구조이며, 송신코일 내부 어느 영역에서라도 수신 코일과 높은 상호 인덕턴스를 유지할 수 있다. 이는 수신 코일의 오정렬에 대한 자유도가 높다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 수신 코일의 위치에 덜 민감하고[12], 효율적인 충전을 할 수 있는 구조라는 것을 뒷받침한다.



(a) Type-A 드론의 자기장 분포
(a) Magnetic field distribution of Type-A drone



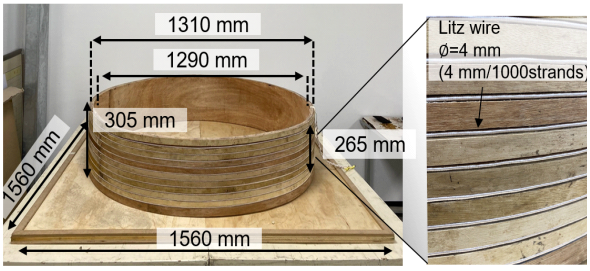
(b) Type-B 드론의 자기장 분포
(b) Magnetic field distribution of Type-B drone

그림 14. 제안하는 모델(Case 4)에 대한 자기장 분포
Fig. 14. Simulation results for the magnetic field distribution of the proposed model.

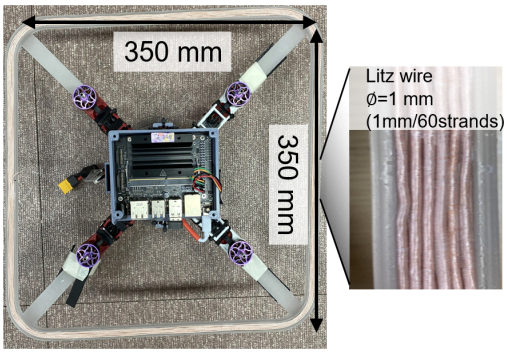
Ⅳ 실험을 통한 검증

4-1 제작된 송신 코일 및 수신 코일

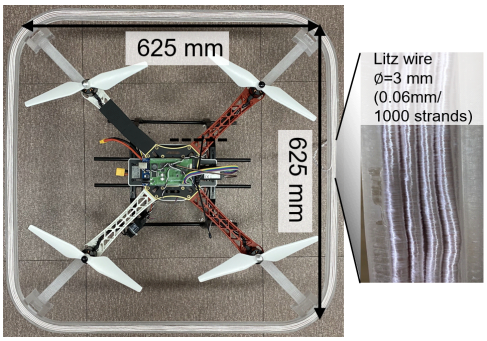
제안된 구조를 실험적으로도 검증하기 위해 송신부의 케이지는 그림 15(a)와 같이, 자기장의 영향을 받지 않는 소재인 목재를 이용하였고, helical 구조의 코일을 설계하기 위해 홈이 있는 형태의 구조물을 제작하였다. 수신부의 가드 또한 그림 15(b) 및 그림 15(c)와 같이, 자기장의



(a) 송신 코일
(a) Transmitting coil



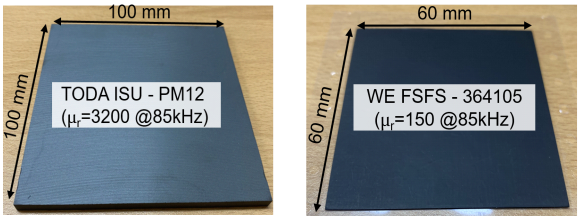
(b) Type-A 드론의 수신 코일
(b) Receiving coil of Type-A drone



(c) Type-B 드론의 수신 코일
(c) Receiving coil of Type-B drone

그림 15. 제작된 송/수신 코일
Fig. 15. Fabricated of transmitting/receiving coil.

영향을 받지 않는 ABS(acrylonitrile-butadiene-styrene)를 이용하여 3D 프린터로 제작하였다. 수신 코일은 제작된 가드의 크기를 고려하여 권선 수를 10턴으로 하였으며, 송신 코일과 수신 코일 모두 근접효과와 표피효과로 인한 저항 성분을 최소화하고자 리츠(Litz) 와이어를 이용하여 제작하였다[14].



(a) 송신부 페라이트 플레이트 (두께=5 mm) (b) 수신부 페라이트(두께 = 0.3 mm)

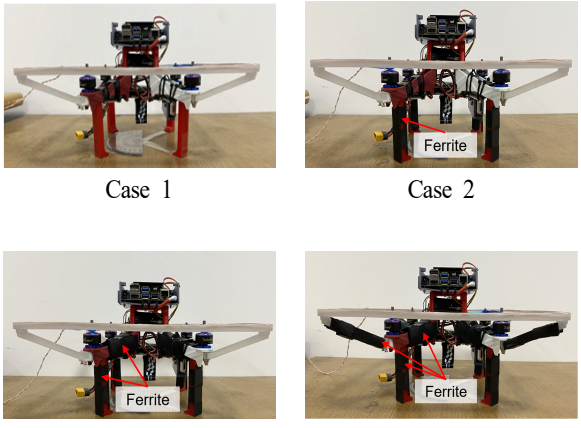
(a) Transmit part of ferrite (thickness=5 mm) (b) Receiving part of ferrite (thickness=0.3 mm)

그림 16. 송신 코일과 수신 코일에 사용된 페라이트

Fig. 16. Ferrite used in primary coil and secondary coil.

그림 16은 송신부와 수신부에 사용된 페라이트로, 송신부는 TODA ISU의 페라이트 플레이트(PM12, μ_r= 3,200@85kHz)를 사용하였고, 수신부는 드론에 탑재할 수 있는 중량을 고려하여 상대 투자율이 150인 Wurth Elektronik의 페라이트 시트(model: 364105, μ_r=150 @85 kHz)를 사용하였다.

그림 17 및 그림 18은 페라이트 시트 부착 위치에 따른 Type-A 드론과 Type-B 드론의 모델이다. 앞서 소개된 페라이트 시트를 부착 위치에 따라 커팅하여 총 4개의 페라이트 시트를 적층했다. 적층하는 과정에서 갈라진 페라이트의 결정들로 인해 총 두께는 약 2 mm로 측정되었다.

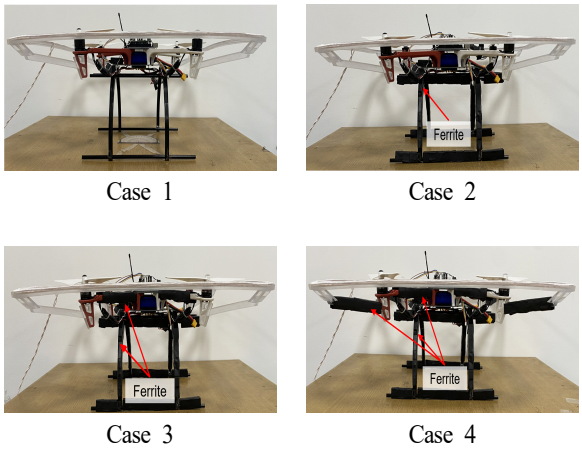


Case 1 Case 2

Case 3 Case 4

그림 17. 수신부 페라이트 시트 부착 위치에 따른 Type-A 드론 모델

Fig. 17. Type-A drone model according to the ferrite sheet attachment position of the receiving part.



Case 1 Case 2

Case 3 Case 4

그림 18. 수신부 페라이트 시트 부착 위치에 따른 Type-B 드론 모델

Fig. 18. Type-B drone model according to the ferrite sheet attachment position of the receiving part.

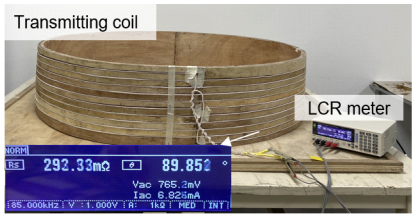
4-2 실험 측정 환경

그림 19는 제작된 송/수신 코일의 전기적 파라미터 측정을 위한 측정 환경이다. 송/수신 코일은 LCR 미터(HIOKI-IM523)를 사용하여 85 kHz 주파수에서 코일의 인덕턴스 및 저항을 측정하였고, 값들은 표 2에 수록하였다.

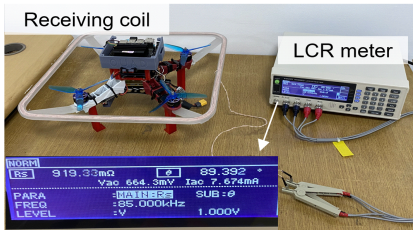
그림 20은 Type-A 드론과 Type-B 드론의 상호 인덕턴스를 측정하는 환경으로, 송신부 케이지 아래에 1,400× 1,400×5 mm^3의 영역만큼 페라이트를 배열하였고 Type-A 드론과 Type-B 드론의 수신부 페라이트 시트 부착 위치에 따른 모델들의 상호 인덕턴스를 측정하였다.

4-3 측정된 상호 인덕턴스값 분석

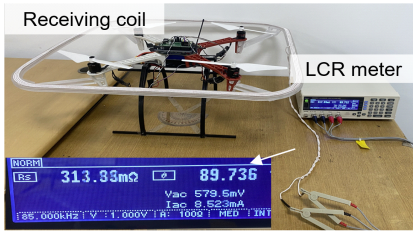
그림 21은 송신 코일의 페라이트 플레이트의 유무와 수신부의 페라이트 시트 부착 위치에 따른 Type-A 드론과 Type-B 드론 모델에 대한 상호 인덕턴스 시뮬레이션 값과 측정값을 보여주는 그래프이다. 먼저 송신부의 페라이트가 없을 때는 Type-A 드론과 Type-B 드론에 해당하는 Case 1의 측정값은 각각 12.84 μH, 28.04 μH로, 송신부에 페라이트 플레이트를 배열하면 각각 49.84 % 32.45 %씩 증가하고, 수신부에 페라이트 시트를 Case 4와 같이 부착하면 각각 3.01 %, 1.43 %씩 더 증가한다.



(a) 송신코일
(a) Transmitting coil



(b) Type-A 드론의 수신 코일
(b) Receiving coil of Type-A drone



(c) Type-B 드론의 수신 코일
(c) Receiving coil of Type-B drone

그림 19. 코일 저항 측정 환경
Fig. 19. Measurement setup for coil resistance.

표 2. 제작된 송/수신 코일의 전기적 특성
Table 2. Electrical characteristic of fabricated coils.

Parameters of designed coils @ 85 kHz				
Type of drone	L_{Tx}	L_{Rx}	R_{Tx}	R_{Rx}
Type-A drone	210.09 μH	163.52 μH	292.33 mΩ	919.33 mΩ
Type-B drone	210.14 μH	128.70 μH	292.33 mΩ	313.33 mΩ

따라서 제안하는 Case 4의 모델과 대조군 모델의 상호 인덕턴스를 비교했을 때 약 54.36 %, 34.34 % 증가하였고, 이를 코일 간의 전력전달 효율로 계산했을 때 약 3.28 %, 0.57 % 증가한 것을 확인하였다. 수행한 시뮬레이션값과 측정값의 오차가 4 % 이내인 것을 감안할 때, 실험적으로

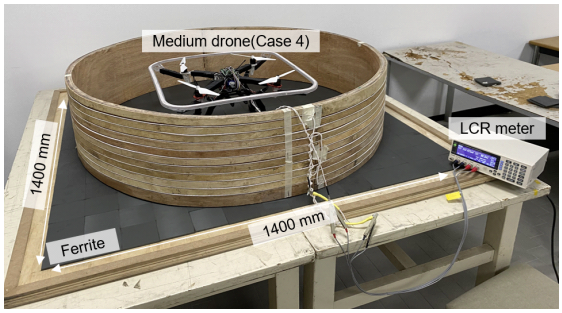


그림 20. 드론의 상호 인덕턴스 측정 환경
Fig. 20. Measurement environment of mutual inductance for drone.

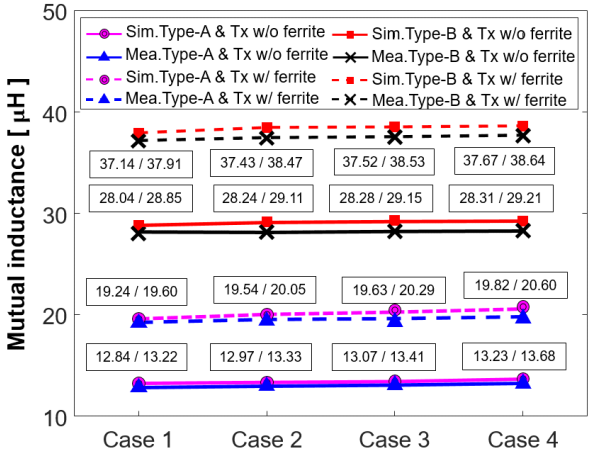


그림 21. 서로 다른 4가지 케이스에 따른 상호 인덕턴스 측정값과 시뮬레이션값 비교
Fig. 21. Comparison between measured and simulation results from four different case.

도 제안된 구조의 상호 인덕턴스 증대 효과와 효율을 검증할 수 있었다.

Ⅴ. 결 론

본 연구에서는 상호운용성과 오정렬에 강인한 드론 무선전력전송 코일을 제안하였다. 송신부 코일은 helical 구조, 수신부는 프로펠러 보호를 위한 가드를 제작하여 가드형 타입의 수신 코일을 배치했다. 송신부와 수신부의 전력전송 효율을 높이기 위해 송신부에는 페라이트 플레이트를, 수신부에는 페라이트 시트를 적용하였다. 송신부

코일의 권선 방향에 따른 spiral 코일과 helical 코일의 Z축 방향 자기장 벡터의 크기를 분석하여, 송신 코일에서 50 mm 떨어진 영역(P_1/P_1')을 기준으로 수직 방향에서는 helical 구조가 더 우세한 것을 확인하였다. Type-A 드론과 Type-B 드론의 자기장 세기와 패턴이 유사한 것으로 보아 helical 구조가 상호운용하기에 적합함을 보였다. 또한, 시뮬레이션과 실험을 통해 송/수신부의 페라이트 유무에 따른 상호 인덕턴스를 분석하여, 송/수신부에 페라이트가 없는 모델에 비해 송/수신부에 페라이트가 적용된 모델의 상호 인덕턴스가 각각 Type-A 드론에서 약 54 %, Type-B 드론에서 약 34 % 증가한 것을 확인하였다.

References

[1] F. Flammini, C. Pragliola, and G. Smarra, "Railway infrastructure monitoring by drones," in *2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Toulouse, Nov. 2016, pp. 1-6.

[2] H. M. Chung, S. Maharjan, Y. Zhang, F. Eliassen, and K. Strunz, "Placement and routing optimization for automated inspection with unmanned aerial vehicles: A study in offshore wind farm," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 17, no. 5, pp. 3032-3043, May 2021.

[3] Markets and Markets, "Wireless power transmission market by technology, implementation, receiver & transmitter application(smart phones, wearable electronics, electric vehicles, and& furniture), and region global trend & forecast to 2020," 2016. Available: https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wireless-power-market-168050212.html

[4] 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.

[5] C. Park, J. Park, Y. Shin, J. Kim, S. Huh, and D. Kim, et al., "Separated circular capacitive coupler for reducing cross-coupling capacitance in drone wireless power transfer system," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 68, no. 9, pp 3978-3985, Sep. 2020.

[6] 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.

[7] P. K. Chittoor, B. Chokkalingam, and L. Mihet-Popa, "A review on UAV wireless charging: Fundamentals, applications, charging techniques and standards," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 69235-69266, May 2021.

[8] J. P. K. Sampath, A. Alphones, and H. Shimasaki, "Coil design guidelines for high efficiency of wireless power transfer(WPT)," in *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, Nov. 2016, pp. 726-729.

[9] M. Dehghanian, A. Namadmalan, and M. Saradarzadeh, "Optimum design for series-series compensated inductive power transfer systems," in *2017 8th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference(PEDSTC)*, Mashhad, Feb. 2017, pp. 365-370.

[10] G. Wei, X. Jin, C. Wang, J. Feng, C. Zhu, and M. Matveevich, "An automatic coil design method with modified AC resistance evaluation for achieving maximum coil-coil efficiency in WPT systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 6, pp. 6114-6126, Jun. 2020.

[11] X. Zhang, H. Meng, B. Wei, S. Wang, and Q. Yang, "Mutual inductance calculation for coils with misalignment in wireless power transfer," *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 1041-1044, Mar. 2019.

[12] S. Lee, D. M. Kim, and D. Kim, "Analysis of drone wireless power transfer system according to array of transmitting coil," in *2022 KIEES Summer Conference*, Jeju, Aug. 2022.

[13] D. Wang, J. Zhang, S. Cui, Z. Bie, K. Song, and C. Zhu, et al., "Modern advances in magnetic materials of wireless power transfer systems: A review and new perspectives," *Nanomaterials(Basel)*, vol. 12, no. 20, p. 3662, Oct. 2022.

[14] C. R. Sullivan, "Optimal choice for number of strands in a litz-wire transformer winding," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no. 2, pp. 283-291, Mar. 1999.

이 성 진 [영남대학교/석사과정]

https://orcid.org/0000-0002-0498-9341

2022년 2월: 영남대학교 자동차기계공학과 (공학사)

2022년 3월~현재: 영남대학교 미래자동차공학과 석사과정

[주 관심분야] Adaptive WPT, Drone WPT 등

김 동 민 [영남대학교/석사과정]

https://orcid.org/0009-0001-6162-6934

2023년 2월: 영남대학교 미래자동차공학과 (공학사)

2023년 3월~현재: 영남대학교 미래자동차공학과 석사과정

[주 관심분야] Dynamic WPT, Ship WPT 등

김 수 현 [대구과학고등학교/고등학생]

https://orcid.org/0009-0006-0653-5251

2021년 3월~현재: 대구과학고등학교 재학중

[주 관심분야] WPT 등

임 준 환 [대구과학고등학교/고등학생]

https://orcid.org/0009-0008-9529-3796

2021년 3월~현재: 대구과학고등학교 재학중

[주 관심분야] WPT 등

이 정 호 [대구과학고등학교/고등학생]

https://orcid.org/0009-0000-6586-4350

2021년 3월~현재: 대구과학고등학교 재학중

[주 관심분야] WPT 등

노 엘 조 이 [대구과학고등학교/고등학생]

https://orcid.org/0009-0001-1361-9465

2021년 3월~현재: 대구과학고등학교 재학중

[주 관심분야] WPT 등

김 동 욱 [영남대학교/조교수]

https://orcid.org/0000-0002-9009-6928

2014년 2월: 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학석사)
2019년 8월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학박사)
2020년~현재: 영남대학교 미래자동차공학과 조교수

[주 관심분야] WPT, EMC/EMI, Microrobot, Electric Vehicle 등