

드론 무선 충전을 위한 고효율 송, 수신 코일 개발에 관한 연구

임종균*

A Study on The Development of High-Efficiency Transmitting and Receiving Coils For Wireless Charging of Drones

Jong-Gyun Lim*

요 약

본 연구에서는 드론을 무선으로 충전할 수 있는 고효율 무선 전력 전송 송, 수신 코일 개발에 대한 기술을 소개한다. 드론 스테이션은 드론의 배터리를 충전하기 위해 배터리를 분리 할 필요 없이 무선으로 배터리를 충전할 수 있는 기능을 지원한다. 드론의 배터리를 최단 시간 내에 충전하기 위해서는 무선 충전 효율이 높아야 한다. 드론 스테이션의 무선 충전 효율을 높이기 위해 고효율 송, 수신 코일 제작 방법과 성능 측정 방법을 제시하였다. 송, 수신 코일은 드론의 비행에 방해가 되지 않도록 드론의 크기와 무게를 고려하여 PCB 기판을 이용해 제작하였다. 송, 수신 코일 사이의 거리가 40mm 이상 떨어진 거리에서 88% 이상의 효율을 구현하였다.

ABSTRACT

In this paper, a technology for a high-efficiency wireless power transmission transmitting and receiving coil that can wirelessly charge a drone is introduced. The drone station implements the ability to charge the battery wirelessly without the need to remove the battery to charge the drone's battery. In order to charge the drone's battery in the shortest time, wireless charging efficiency must be high. In order to increase the wireless charging efficiency of the drone station, a method for manufacturing high-efficiency transmitting and receiving coils and a performance measurement method are presented. Transmitting and receiving coils were manufactured considering the size and weight of the drone so as not to interfere with the flight of the drone. Efficiency of 88% or more was realized at a distance of 40mm or more between the transmitting and receiving coils.

키워드

Wireless Power Transfer, Drone, Printed Circuit Board, Magnetic Resonance, Electromagnetic Wave
무선 전력 전송, 드론, 인쇄 회로 기판, 자기 공진, 전자기파

1. 서 론

드론 기술개발은 주로 군수용 수요에 의하여 진행

되어왔다[1-2]. 하지만 최근에는 다양한 산업 분야에
서 상업용 드론 수요가 빠르게 증가하고 있다. 대표적
인 드론 활용 사례로는 화재나 재난 현장을 감시하는

* 교신저자: 한국폴리텍대학 스마트전자과
• 접수 일 : 2021. 12. 28
• 수정완료일 : 2022. 02. 21
• 게재확정일 : 2022. 04. 17

• Received : Dec. 28, 2021, Revised : Feb. 21, 2022, Accepted : Apr. 17, 2022
• Corresponding Author : Jong-Gyun Lim
Dept. Smart Electronic Engineering, Korea Polytechnics,
Email : jglim@kopo.ac.kr

드론이다. 고성능 발열 감지 센서를 장착하여 초기 화재 상황을 감시하고 관리자에게 실시간으로 알려준다 [3-4]. 일반적으로 산불 화재 감시의 경우 드론 한 대가 감시해야 하는 면적이 매우 넓다. 이를 위해서는 드론이 장시간을 비행할 수 있도록 충분한 배터리 용량이 뒷받침되어야 한다. 하지만 완충된 배터리 한 개에 대한 드론 비행 시간은 수 분에서 수 십분 미만이다. 또한 감시 목적의 드론은 왕복 거리를 고려하여 비행을 운용해야 하므로 배터리 하나로 비행할 수 있는 거리는 매우 제한적이다.

드론 자체의 성능 개선을 제외하고, 드론의 활동 반경을 높일 수 있는 방법으로 비행 도중 드론의 배터리를 충전하는 방법이 있다. 하지만 비행 중의 드론을 무선으로 충전한 사례가 일부 보고되고 있지만, 실용화되기까지는 아직 더 많은 연구가 필요하다. 또다른 방법으로는 드론의 배터리 충전소 역할을 하는 드론 스테이션을 곳곳에 설치하여 운영하는 방법이었다 [5]. 드론 스테이션의 역할은 드론이 비행 중 배터리 충전이 필요한 상황이 발생될 경우 근처에 위치한 드론 스테이션에 자동으로 착륙하여 배터리를 충전하는 기능을 수행한다. 드론 스테이션이 원활히 운용되기 위해서는 드론의 배터리를 자동으로 충전할 수 있는 기술이 필요한데, 본 연구에서는 무선 충전 기술을 이용하여 드론을 자동으로 충전할 수 있는 기술을 위한 경량급 고효율 송, 수신 코일 제작 방법에 대해 소개하고자 한다.

II. 공진 코일 제작 및 분석

본 연구에서 사용된 드론은 SYMA 社 드론으로 500mAh Li-Po 배터리가 장착되어있다. 배터리 방전 상태에서 완충까지 대략 40분정도 소요되며, 한번의 충전으로 연속 비행 가능 시간은 약 7~8분 정도이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 드론에 장착할 수 있는 수신 코일의 크기는 최대 100mm이며, 지면과의 이격 거리는 약 40mm이다. 본 연구에서는 드론의 비행에 방해가 되지 않도록 수신 코일의 크기를 100mm 이하로 제한하였으며, 무게를 최소화 하기 위해 에나멜 전선이나 리츠와이어 형태 대신 PCB(Printed Circuit Board) 기판을 이용하여 수신 코일을 제작하였다.

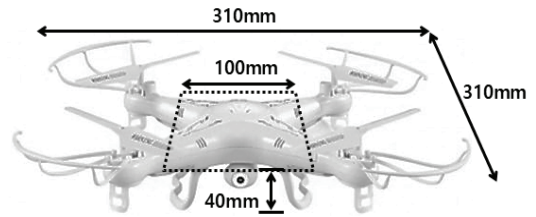


그림 1. 500mAh Li-Po 배터리 드론
Fig. 1 A drone using 500mAh Li-Po battery

2.1 공진 코일 설계

공진 코일의 등가회로는 그림 2와 같다. V_s , R_s , C_1 , L_1 , R_1 은 드론 스테이션에 위치될 전력 송신부 회로이며 L_2 , C_2 , R_2 , R_L 은 드론에 장착될 전력 수신부 회로이다. R_1 과 R_2 는 코일 내부 저항이며, k_{12} 는 두 코일간이 결합 계수(coupling coefficient, k)이다.

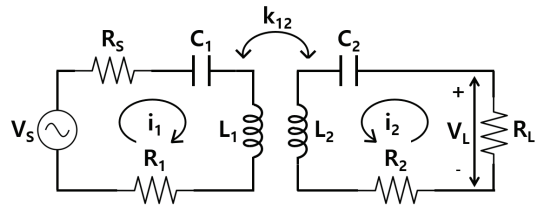


그림 2. 송, 수신 공진 코일 등가 회로
Fig. 2 Transmit and receive resonant coil equivalent circuit

결합계수와 상호 인덕턴스(mutual inductance, M)의 관계는 식 (1) 같다.

$$k_{12} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

송, 수신부의 임피던스는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$Z_1 = R_1 + R_s + sL_1 + \frac{1}{sC_1} \quad (2)$$

$$Z_2 = R_2 + R_L + sL_2 + \frac{1}{sC_2} \quad (3)$$

여기서 $s = j\omega$ 이며, 그림 2의 회로는 페로 방정식을 이용하여 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & sM \\ sM & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

송신부 전압 V_S 는 식 (5)와 같이 정의할 수 있다 [6].

$$V_S = i_1 \left(R_1 + R_s + sL_1 + \frac{1}{sC_1} \right) + i_2 sM \quad (5)$$

$$0 = i_2 \left(R_2 + R_L + sL_2 + \frac{1}{sC_2} \right) + i_1 sM \quad (6)$$

$$V_L = -i_2 R_L \quad (7)$$

$$= \left(\frac{V_S \cdot sM}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \right) R_L$$

PCB 기판을 이용한 공진 코일을 설계하기 위해서는 기판의 동판 두께(t_c)와 배선 폭(w), 간격(s) 등이 고려되어야 하며 이를 그림 3에 나타내었다.

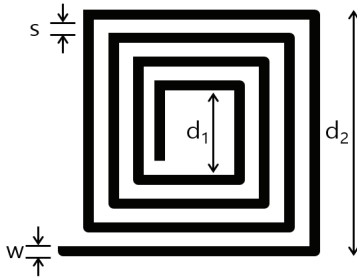


그림 3. PCB 코일 파라미터
Fig. 3 PCB coil parameters

PCB 기판을 이용한 공진 코일 설계 파라미터인 인덕턴스, 저항, 커패시터 값은 식 (8), 식 (11a), 식 (14)와 같다[7].

$$L = \frac{c_1 \mu n^2 d_{avg}}{2} \left[\ln \left(\frac{c_2}{\zeta} \right) + c_3 \zeta + c_4 \zeta^2 \right] \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{d_2 - d_1}{d_2 + d_1} \quad (9)$$

식 (8)의 ζ 는 코일의 내경과 외경의 차이에 따라 달라진다. 즉, $d_2 \gg d_1$ 이면 ζ 값은 커지게 되며, $d_2 \approx d_1$ 이면 ζ 값은 작아진다. 따라서 ζ 는 PCB 코일의 금속 패턴에 대한 밀집도 또는 형상과 연관되어 있다. $d_{avg} = (d_2 + d_1)/2$ 이며, c_1, c_2, c_3, c_4 에 대한 상수값은 코일의 패턴 형상에 따라 정해지며 표1과 같이 정의된다[7].

표 1. 인덕턴스 계산을 위한 상수값
Table 1. Constant value for calculating inductance

Layout	c_1	c_2	c_3	c_4
Square	1.27	2.07	0.18	0.13
Hexagonal	1.09	2.23	0.00	0.17
Octagonal	1.07	2.29	0.00	0.19
Circle	1.00	2.46	0.00	0.20

PCB 기판의 코일에 대한 기생 DC 저항값은 식 (10)과 같다[8].

$$R_{dc} = \rho_c \frac{4nd_2 - 4nw - (2n+1)^2(s+w)}{wt_c} \quad (10)$$

여기서 w 와 s 는 배선 폭과 간격에 대한 길이이며, n 은 턴 수, ρ_c 는 도체의 고유 저항 값이다.

높은 주파수에 대한 표피 효과를 고려한 코일의 내부 저항 값은 식 (11)과 같다.

$$R_{1,2} = R_{dc} \frac{tc}{\delta(1 - e^{-tc/\delta})} \quad (11a)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_c}{\pi \mu f}} \quad (11b)$$

여기서 δ 는 표피 깊이이며, μ 는 투자율이다. 고효율 공진 코일을 설계하기 위해서는 높은 Q-factor가 요구된다. Q-factor는 식 (12)와 같이 정의 된다.

$$Q_1 = \frac{wL_1}{R_1}, \quad Q_2 = \frac{wL_2}{R_2} \quad (12)$$

송신 코일의 Q-factor(Q_1)과 수신 코일의 Q-factor(Q_2)를 이용하여 송, 수신 코일의 전력 전송 효율(η)은 식 (13)과 같이 정의 된다.

$$\eta = \frac{k_{12}^2 Q_1 Q_2}{k_{12}^2 Q_1 Q_2 + 1} \frac{R_L}{R_2 + R_L} \quad (13)$$

기생 커패시턴스 값은 두 금속 패턴 사이의 값 C_{PC} 와 금속 패턴과 FR-4 기판과의 C_{PS} 값의 합으로 구성된다[8].

$$C_p = C_{pc} + C_{ps} = (\alpha \epsilon_{rc} + \beta \epsilon_{rs}) \epsilon_0 \frac{t_c}{s} l_g \quad (14)$$

ϵ_0 는 공기의 유전율이며, l_g 는 배선 간격의 길이, ϵ_{rc} 는 코팅체의 비유전율, ϵ_{rs} 는 기판의 비유전율이다. 일반적으로 FR-4 기판의 α 값과 β 값은 각각 0.9, 0.1이다. PCB 기판을 이용한 공진 코일의 공진 주파수는

식 (15)와 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}} \quad (15)$$

식 (8)에 의한 인덕턴스 값과 식 (14)의 기생 커패시턴스 값을 고려하여 식 (15)에 따라 공진 주파수를 ISM 밴드인 6.78MHz로 조정하였다[9].

2.2 제작 및 성능 측정

가로 100mm x 세로 100mm의 PCB 기판에 배선 폭(w)과 간격(s)은 고정시키고, 턴 수를 달리하여 PCB 코일을 제작하였다. 표 2와 같이 턴 수가 증가할수록 인덕턴스 값은 커진다. 거리에 따른 송, 수신 코일의 성능 변화를 측정하기 위해 그림 4와 같이 플라스틱 재질의 기구대에 장착하여 성능을 측정하였다. 플라스틱 기구대는 정확한 거리 측정과 측정 시 외부 영향을 최소화하기 위해 사용하였다.

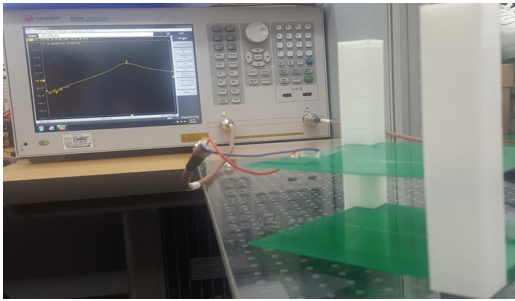


그림 4. 네트워크 분석기를 이용한 코일 성능 측정
Fig. 4 Coil performance measurement using a network analyzer

코일은 각각 동일한 PCB 코일로 성능을 측정하였다. 즉, 송신 코일과 수신 코일을 Type1//Type1, Type2//Type2의 방식으로 측정하였다. Type5, Type6의 코일의 경우 PCB 코일의 크기 및 거리에 비해 인덕턴스가 매우 높아 그림 5와 그림 6과 같이 Over-coupled가 관측되었다[10]. 효율은 각각 61.78%, 67.46%가 측정되었다. Type5와 Type6 코일의 이격거리를 50mm로 증가하여 Critically-coupled 상태의 값을 측정한 결과 83.88%, 85.81%가 측정되었다. 본 연구에서 제작된 전체 코일의 성능은 표 2와 그림 7과 같이 각각 50.41%, 57.76%, 72.25%, 75.69%로 측정되었으며, 인덕턴스 값이 증가할수록 효율이 증가함을

알 수 있었다.

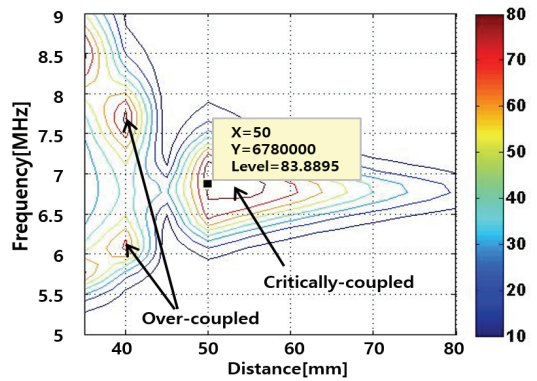


그림 5. Type5//Type5 코일의 S21 측정 결과
Fig. 5 S21 measurement result of Type5//Type5 coil

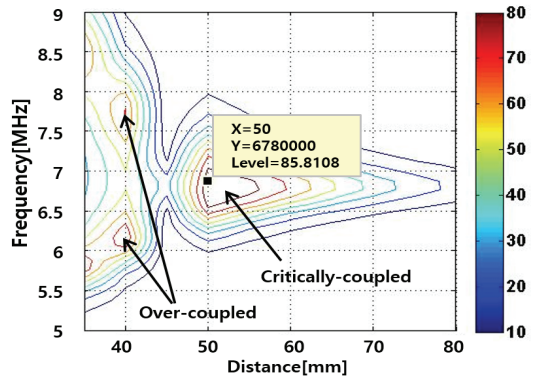


그림 6. Type6//Type6 코일의 S21 측정 결과
Fig. 6 S21 measurement result of Type6//Type6 coil

표 2. 턴 수에 따른 PCB 코일 특성
Table 2. PCB coil characteristics according to the number of turns

Coil	n	L[uH]	Efficiency[%]
Type1	7	3.36	50.41
Type2	8	5.51	57.76
Type3	9	6.82	72.25
Type4	10	7.41	75.69
Type5	15	52.30	61.78(83.88)
Type6	20	68.02	67.46(85.81)

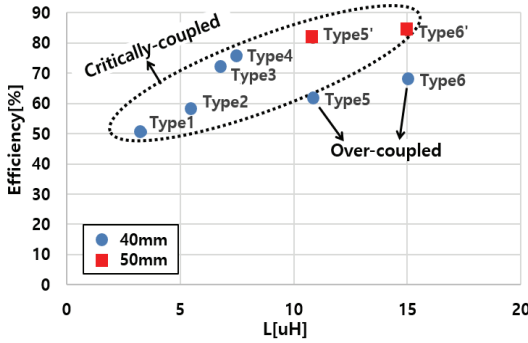


그림 7 제작된 PCB 코일 효율
Fig. 7 Efficiency of fabricated PCB coils

본 연구에서는 40mm 이격 거리에서 최적의 효율을 구현할 수 있는 코일을 제작하고자 한다. 표2에서 보는 바와 같이 40mm 거리에서 효율이 가장 높게 측정된 Type4 코일을 기본으로 하여 ζ 값을 변화시켜 40mm 거리에서 최적의 효율을 달성할 수 있는 코일 형상을 찾고자 하였다.

표 3. ζ 값에 따른 PCB 코일 특성
Table 3. PCB coil characteristics according to ζ value

Coil	ζ	L[uH]	Efficiency[%]
Type4	0.17	7.41	75.69
Type4-1	0.11	21.39	86.47
Type4-2	0.05	30.35	88.68

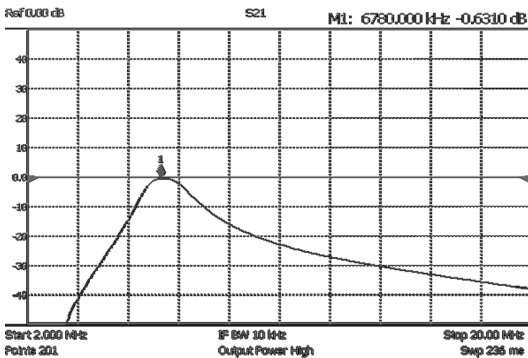


그림 8 Type4-1//Type4-1 코일의 S21 측정 결과
Fig. 8 S21 measurement result of Type4-1//Type4-1 coil

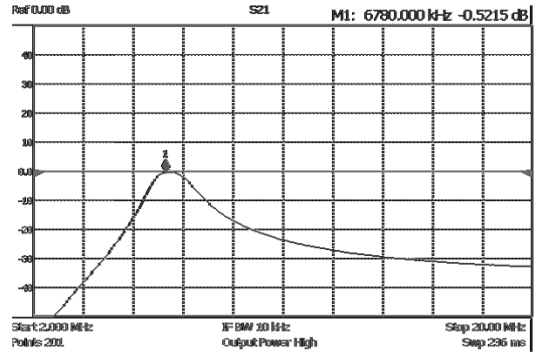


그림 9 Type4-2//Type4-2 코일의 S21 측정 결과
Fig. 9 S21 measurement result of Type4-2//Type4-2 coil

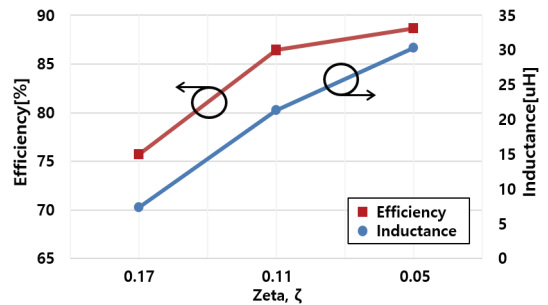


그림 10 ζ 값에 따른 PCB 코일 특성
Fig. 10 PCB coil characteristics according to ζ value

표 3과 같이 ζ 값을 감소시키어 인덕턴스를 증가시키어 코일의 성능을 측정하였다. 그림 8과 그림 9와 같이 S21은 각각 약 -0.63dB, -0.52dB가 측정되었다. 그림 10에서 보는 바와 같이 ζ 값을 조정하여 기존 대비 효율이 약 10.78%, 12.99% 향상된 것을 확인할 수 있었다. 송, 수신 코일의 형상 및 코일 파라미터 값에 따라 최대 효율 구간이 다르게 나타났으며, ζ 값이 낮을수록 상대적으로 높은 인덕턴스와 효율이 관측되었다.

V. 결론

본 연구에서는 드론 스테이션용 고효율 송, 수신 코일 제작 방법과 특성에 대해 분석하였다. 공진 코일

을 설계할 때에는 코일의 인덕턴스, 내부저항, Q-factor 값 뿐만 아니라 송, 수신 코일의 형상까지도 고려해야 한다. 추후 보다 다양한 송, 수신 코일의 크기와 형상에 대한 설계 방법에 대한 연구와 성능 개선 방법 관한 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

위 논문은 “2021년 가을철학술대회 우수논문”입니다.

References

[1] M. Jeong, "Performance analysis of drone-type base station on the mmwave according to radio resource management policy," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 917-926.

[2] K. Kim, S. Lee, and Y. Jang, "A study on the measurement of the beam pattern of array antenna for VHF radar using active beam pattern measurement device and drone," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 6, 2019, pp. 1031-1036.

[3] J. Choi, B. Kim, J. Yu, J. Choi, and S. Lee, "PID controled UAV monitoring system for fire-event detection," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 1, 2020, pp. 1-8.

[4] K. Nam and M. Jang, "A study on the exploration device of the disaster site using drones," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 579-586.

[5] 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, May 2021, pp. 69235-69266.

[6] J. Kim, M. Han, and H. Sohn, "Magnetic resonance-nased wireless power transmission through concrete structures," *Journal of electromagnetic engineering and science*, vol. 15, no. 2, Apr. 2015, pp. 104-110.

[7] S. S. Mohan, M. del M. Hershenson, S. P. Boyd,

and T. Lee, "Simple accurate expressions for planar spiral inductances," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 34, no. 10, Oct. 1999, pp. 1419-1424.

[8] U. Jow and M. Ghovanloo, "Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission," *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, vol. 1, no. 3, Sept. 2007, pp. 193-202.

[9] J. Lim and D. Lee, "A technology trend and analysis of electric vehicle wireless charging system," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 255-260.

[10] A. P. Sample, D. T. 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, Feb. 2011, pp. 544-554.

저자 소개

임종균(Jong-Gyun Lim)



2015년 건국대학교 대학원 전자 정보통신공학과 졸업(공학박사)
2019년 한국폴리텍대학 부산캠퍼스 스마트전자과 조교수

2020년 ~ 현재 한국전자통신학회 정회원
2019년 ~ 현재 산업기술교육훈련학회 정회원
※ 관심분야 : 무선통신시스템, 무선전력전송시스템