

## 무선 이동체의 비접촉 배꼽장치를 위한 무선전력전송 기술의 응용

### Application of Wireless Power Transmission Technology to Contactless Umbilical Connector of Unmanned Vehicle

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

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

#### 요 약

미래의 전장에서는 무인 이동체의 역할이 매우 중요할 것으로 예측된다. 최근 사용되는 무인 이동체는 충전과 관리를 위하여 유선의 충전선과 데이터 연결선을 가지고 있다. 하지만 편리성과 안정성을 위하여 무인 이동체의 무선 충전과 무선 데이터 전송을 이용한 무선 전력전달 시스템을 사용하는 것이 요구되어지고 있다. 이 논문에서, 우리는 이러한 요구를 만족시키기 위하여 무인 이동체에 적용 가능한 무선 충전 기술을 연구하였다. 자기장 유한 요소 시뮬레이션을 통해 무인 이동체의 크기와 무인 이동체에서 사용하는 전력을 고려한 송, 수신 코일의 설계를 하였다. 또한, 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최적의 코일을 제작하였고, 실험을 통하여 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였다.

#### Abstract

In the future battlefield, the role of the unmanned vehicle is very important. Currently, charging and management systems for unmanned vehicles are all wired. However, for convenience and stability, it is desirable that the charging of the unmanned vehicle uses wireless power transfer system. In this paper, we have studied the application of wireless power transfer system to the charging of unmanned vehicles. Considering the size of the unmanned vehicle and the required power, the transmission coil and the receiving coil are designed through the finite element analysis based magnetic field simulation. The coil was made according to the simulation results and the circuit simulation was performed through the measured parameter values. Finally, we show that wireless power transmission can be applied to unmanned mobile charging through actual experiments.

Key words: Wireless Power Transfer, Unmanned Vehicle, Efficiency

#### I. 서 론

현대와 미래 전장 환경은 유인 및 무인 무기를 이용한 우주 전장 환경으로 변화하고 있으며, 군사 무기 체계는

통신, 센서, 유도 항법 장비 등을 사용하여 사람의 손이 닿기 힘든 곳에서도 주어진 임무를 완수할 수 있는 무인 이동체의 필요성이 증가하고 있다. 무인이동체는 흔히 알고 있는 드론에서부터 인공위성, 미사일 등 사람이 탑승

「본 연구는 (주)LIG 넥스원의 "무인 이동체용 무선전력전송 장치 설계" 과제의 일환으로 진행되었습니다.」

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

\*이엠씨닥터스(주)(EMC Doctors)

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

· Manuscript received July, 17, 2017 ; Revised August, 16, 2017 ; Accepted August, 24, 2017. (ID No. 20170717-067)

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

하지 않고 움직일 수 있는 모든 장비에 해당된다. 이 무인 이동체 역시 첨단화 되면서 특히 정비 및 보수 역시 고도의 과학적 기술을 필요로 하게 되었다.

무인 이동체의 경우, 발사 이후의 통신, 센싱, 항법을 위하여 에너지 밀도가 높은 연료 전지를 사용하고 있고, 이 연료전지는 한번 연소 될 경우, 중간에 연소를 중단할 수 없다. 또한 무인 이동체 내의 다양한 시스템에서 전력을 필요로 한다. 이러한 연료전지를 포함한 무인 이동체 시스템은 불발이라는 최악의 사태를 피하고, 사고로부터 안전을 지키기 위하여 기본 10년이라는 수명을 설정하여 주기적으로 정비 및 충전과 전력을 공급하여 전시의 돌발적인 상황에서도 사용할 수 있는 안정성을 확보하여야 한다.

현재까지 사용하고 있는 무인 이동체의 보수 및 무인 이동체에 필요한 전력 공급 방식은 Fig. 1과 같은 방식으로 유선으로 사용되고 있다. 하지만 이 방식은 다음과 같은 세 가지 문제가 있다. 첫째, 매 보수 및 유선으로 전력을 공급할 때마다 많은 수의 직접 케이블을 연결하고 분해해야 하므로 정비 시간이 지연될 가능성이 있는 등 정비의 효율성이 낮다. 둘째, 많은 수의 케이블 연결 장치들은 반복적인 연결 및 분리에 의해 그 연결 부위가 마모되거나, 심하면 열화되어 무인 이동체의 성능에 영향을 줄 수 있어 무인 이동체의 성능에 치명적일 수 있다. 셋째, 무인 이동체의 발사 시 연결되어 있던 전력 공급 케이

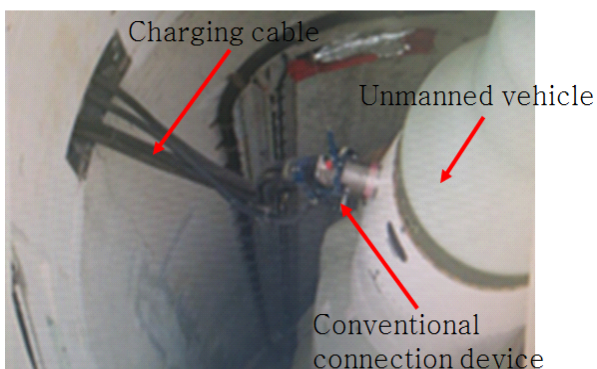


그림 1. 무인이동체를 충전하고 유지 및 보수하는 기존의 방식

Fig. 1. Conventional method of charging and repairing unmanned vehicle.

블 및 모듈은 분해되어 발사되는 것이 아니라, 케이블이 모두 연결된 상태로 발사되기 때문에 발사 시 발사체가 매번 파괴되는 단점을 가지고 있다.

한편, 현재 상용화된 무선전력전송 기술은 크게 전기 자동차나 철도의 수 kW 이상 급과 스마트폰 충전 등의 수십 W급으로 양분되어 있다. 본 논문에서 다루는 수백 W 급의 무선전력전송은 현재 다양한 분야에서 연구 중에 있다<sup>[1]</sup>. 다양한 전력전송용량의 무선 전력 전송에서의 전체적인 시스템은 비슷하지만, 전력전송용량에 따라 사용 주파수, 회로의 토폴로지, 보상회로의 커패시터 값 등이 달라지는 차이점이 있기 때문에 설계 시 고려해야 한다<sup>[2],[3]</sup>.

본 논문에서는 기존에 사용되어 왔던 유선 케이블을 이용한 무인 이동체의 전력 공급 방식의 여러 가지 단점을 보완할 수 있는 무선전력전송 기술을 무인 이동체에 맞게 응용하였고, 이 기술이 기존의 방식을 대체할 수 있음을 보였다. 무인 이동체의 무선전력전송 시스템은 Fig. 2와 같은 개념도로 표현될 수 있는데, 보수 및 전력 공급 시에 무선전력전송을 이용하여 궁극적으로 무인 이동체에 물리적으로 연결하는 케이블을 제거하여 유지, 보수 및 전력 공급의 효율성을 높이고, 무인 이동체가 발사되어도 발사체를 재활용할 수 있는 장점을 가지게 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 무인 이동체에 적용되는 무선전력전송을 소개하고, 실제 적용될 구조에 대해 설명한다. 3절에서는 실제 시스템의 구조를 유한요소법 해석 기반 자기장 시뮬레이션을 통해 제안한다. 4절에서는 제안된 무선전력전송 시스템을 실험을 통해 성

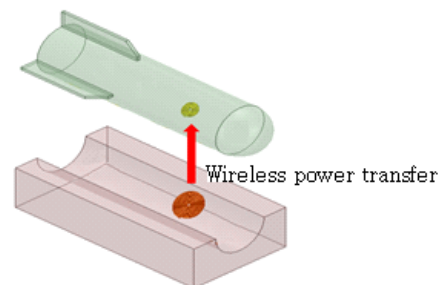


그림 2. 무선전력전송을 이용한 무인이동체의 충전 방식

Fig. 2. Concept of wireless power transfer system for unmanned vehicle.

능을 검증한 후 시뮬레이션 값과의 비교를 한 후, 5절에서 결론을 맺는다.

## II. 무인 이동체의 무선전력전송 시스템

본 논문에서 사용된 무인 이동체의 무선전력전송 시스템에서는 발사체에서 무인 이동체까지의 거리(공극)가 약 35~40 mm이다. 수 cm 이내의 무선전력전송 환경에서 높은 효율로 수백 W급 이상의 전력을 전송하기 위해서는 자기유도방식의 무선전력전송 기술을 이용하여야 한다.

### 2.1 무선전력전송 시스템의 기본 이론

무선전력전송의 개념도는 Fig. 3과 같은데, 무선전력전송을 위한 시스템은 교류전원(인버터), 급전 코일 및 집전 코일의 임피던스 매칭 회로, 집전 코일 및 집전 코일의 임

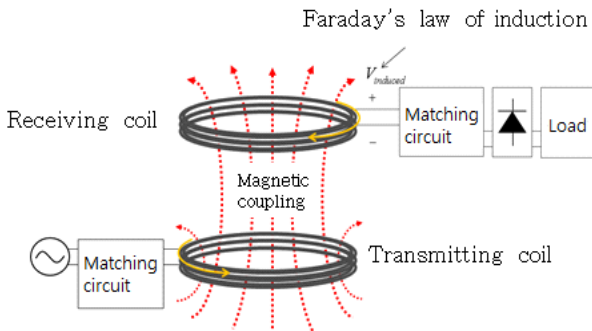


그림 3. 무선전력전송 시스템의 개념도  
Fig. 3. Concept of wireless power transfer system.

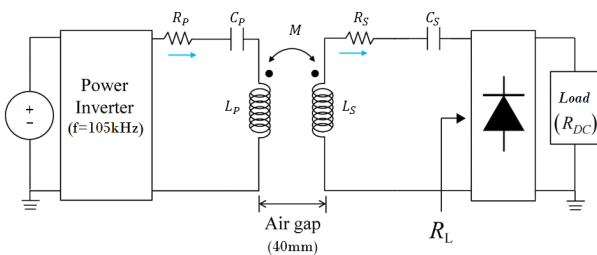


그림 4. 직렬공진 자기유도방식 무선전력전송 시스템의 등가회로<sup>[4]</sup>  
Fig. 4. An equivalent circuit of a series resonant wireless power transfer system<sup>[4]</sup>.

피던스 매칭 회로, 정류기 그리고 DC Load로 구성된다.

무선전력 전송에 필요한 교류 전원은 인버터를 통해 구형파 형태로 제공되며, 자기유도방식의 무선전력전송에서 사용되는 인버터의 스위칭 주파수는 수십 kHz~수백 kHz이다. 인버터의 스위칭 주파수는 동작 주파수라고도 할 수 있는데, 임피던스 매칭 회로의 커패시턴스 값을 결정하는 역할을 하게 된다.

급전 코일과 집전 코일은 무선전력전송 시스템에서 실제로 무선으로 전력이 전송되는 부분이다. 무선전력전송의 원리는 전자기 유도법칙인 패러데이 법칙으로, 급전 코일(1차 측)에 흐른 전류에 의해 발생된 자기장을 통해 집전 코일(2차 측) 양단에 기전력이 유도되는 발생하는 현상을 이용하는 것이다. 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$V_2 = j\omega MI_1 \quad (1)$$

여기서,  $V_2$ 는 집전코일의 유기되는 기전력의 페이저 형태,  $\omega$ 는 시스템의 동작 각주파수,  $M$ 는 급전코일과 집전 코일 간의 상호 인덕턴스,  $I_1$ 은 급전코일에 흐르는 전류의 페이저 형태이다. 임피던스 매칭 회로의 커패시턴스와 코일의 인덕턴스 성분에 의해 인버터의 구형파 전압이 정현파로 필터링 되어 정현파 정상상태에서 사용되는 페이저를 사용하여 표시하였다.

급전 코일의 임피던스 매칭 회로와 집전 코일의 임피던스 매칭 회로는 급전과 집전 회로의 임피던스를 최소로 하여 자기공진현상을 통해 선별적인 주파수(시스템의 동작주파수)에서 효율이 극대화 되도록 하는 역할을 한다. 급전, 집전 코일의 임피던스는 양의 값, 즉 유도기로 등가적으로 나타낼 수 있으므로, 임피던스 매칭 회로는 보통 커패시터를 사용하게 된다. 다양한 임피던스 매칭 방식이 있지만, 직렬 공진의 경우 임피던스 매칭회로와 각 코일의 임피던스의 합은 식 (2)와 같다<sup>[2],[3]</sup>.

$$Z = j\omega L_{coil} + \frac{1}{j\omega C_{matching}} + R_{para} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서,  $\omega$ 는 동작 각주파수이며,  $L_{coil}$ 은 급전 및 집전 코일의 인덕턴스 값,  $C_{matching}$ 은 임피던스 매칭 회로의 커패시턴스 값이며,  $R_{para}$ 는 코일, 커패시터, 도선의 기생 저항 값이다.

$$Z_{resonance} = R_{para} \quad (3)$$

코일과 매칭회로의 공진 주파수에서는 리액턴스 성분이 서로 상쇄되어 식 (3)과 같이 상대적으로 매우 작은 값인 기생 저항 값만이 남게 된다.

마지막으로 정류기는 집전 코일에 유도된 교류 전압, 전류를 직류로 전환시켜 주고, 직류 부하인 연료전지에 전력을 제공하게 된다. 정류기와 직류 부하 사이에는 전압 수준을 안정시키고, 원하는 전압으로 변환시켜 주기 위한 레귤레이터가 필요하지만, 본 논문에서 제안하는 구조는 급전 코일의 전류 수준을 모니터링하고, 이를 바탕으로 인버터의 입력 전압을 조절하여 식 (1)을 통해 정류기 앞단에 일정한 전압을 공급하여 전력회로의 불필요한 구성을 줄이게 된다.

송신부와 수신부 각각 코일과 보상 회로를 통해 공진 주파수가 인버터의 동작 주파수와 같을 경우, 무선 전력 전송 시스템에서의 효율은 식 (4)와 같다.

$$K \cong \frac{1}{1 + \frac{R_p R_L}{\omega^2 M^2}} \quad (4)$$

여기서,  $K$ 는 전체 효율이며,  $R_p$ 는 송신부의 등가저항,  $R_L$ 은 부하를 포함한 수신부의 등가저항,  $\omega$ 는 동작 각 주파수이며,  $M$ 은 송신 코일과 수신 코일 간의 상호 인덕턴스이다. 즉, 동작 주파수가 높을수록, 상호 인덕턴스가 클수록 효율이 높아지는 것을 알 수 있다.

## 2.2 무인 이동체 무선전력전송 시스템의 구성

무인 이동체를 위한 무선전력전송 시스템의 가상 구성은 Fig. 5와 같다. 교류 전원을 공급하기 위한 인버터는 냉각을 위해 송신 코일과 분리되어 있으며, 팬 등 냉각 시스템을 적용할 수 있다. 수신 코일 및 정류 회로는 무인 이동체에 직접 탑재되기 때문에, 소형화를 위해 함께 하우징되어 있는 것을 볼 수 있다. 무인 이동체의 본체는 보통 원기둥형이므로 그에 맞게 모델링되어 있는 것을 볼 수 있다.

무인 이동체 본체에 무선전력전송 시스템의 수신부와 정류회로가 체결되는 방식은 Fig. 6과 같다. 본체는 그 적용 기체에 따라 구성 성분이 다르지만, 폴리카보네이트

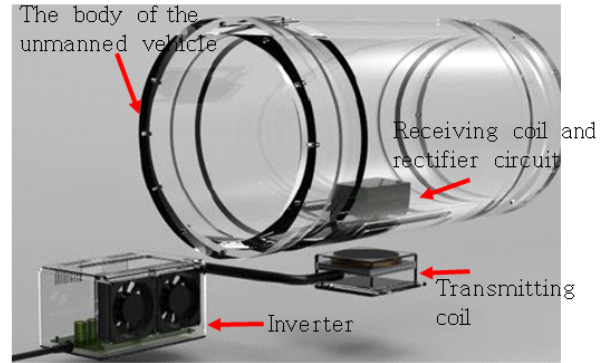


그림 5. 무인 이동체에 적용된 가상의 무선전력전송 시스템 구조도

Fig. 5. Configuration of wireless power transfer system for unmanned vehicle.

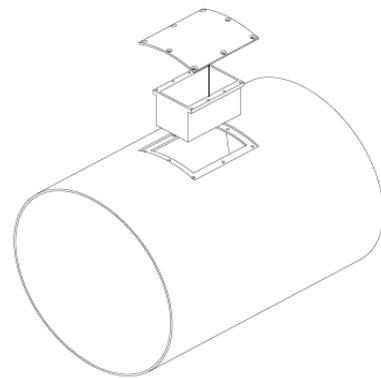


그림 6. 무선전력전송 시스템과 무인 이동체 간의 체결 방식

Fig. 6. Connection between wireless power transmission system and unmanned mobile body.

(polycarbonate) 재질의 윈도우를 사용하여 수신부의 원기둥 형태를 보존하며, 외부의 습기 등으로부터 수신코일 및 정류회로를 보호하는 방법을 사용한다.

고 투자율의 페라이트를 요철 형태로 설계하면 평면형 페라이트에 비해 자기저항이 낮아지게 된다. 따라서 페라이트는 코일의 기자력(magneto motive force)으로 인해 생성된 자기장이 자기저항이 낮은 페라이트를 따라 흐르면서 자속이 보다 집중적으로 흐르도록 성형해 주는 Shaped Magnetic Field In Resonance(SMFIR) 역할을 하게 된다<sup>[6]</sup>. SMFIR에 의해 형성된 자기장의 개념을 보여주는 그림은 Fig. 7과 같다<sup>[5]</sup>. 이로 인해 송신부에 흐르는 전류에 의해

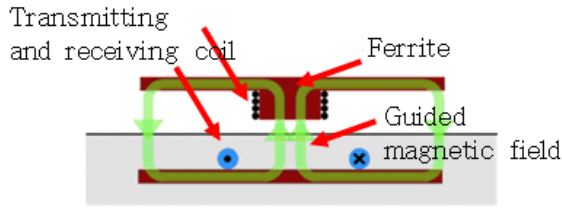


그림 7. 자성체를 이용한 자기장 성형 개략도<sup>[5]</sup>  
Fig. 7. A schematic of shaped magnetic field by using ferromagnet<sup>[5]</sup>.

생성된 자속이 보다 수신부에 잘 채워져 송신부에서 수신부로 전달되는 전력의 효율이 높아지며, 주변 환경에 자기장이 영향을 주는 EMI(Electro Magnetic Interference) 문제 또한 개선될 수 있다. 본 논문에서는 고 투자율의 페라이트를 요철 모양과 외각에 벽을 설계하여 송신 코일에서 발생한 자기장이 수신 코일에 보다 많이 채워지도록 하여 전력 전송의 효율을 높이도록 한다.

### Ⅲ. 무인 이동체 무선전력전송 시스템의 코일 디자인 시뮬레이션

무선전력전송 시스템의 수신 코일과 송신 코일을 설계하기 위해 유한요소법 해석 기반 자기장 시뮬레이션 프로그램<sup>[7]</sup>을 사용한다. 송신 코일과 수신 코일의 전체 시뮬레이션 모델은 Fig. 8과 같다.

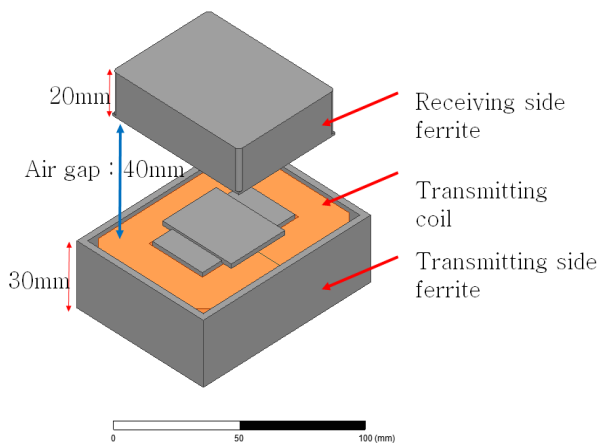


그림 8. 무선전력전송 시스템 모델  
Fig. 8. Overall view of wireless power transfer system.

공극은 40 mm이며, 효율을 극대화시키기 위해 SMFIR 기술을 적용할 수 있도록 고 투자율의 페라이트가 코일 가운데에 요철 모양으로 형성되어 있으며, 또한 코일을 감싸도록 페라이트로 벽을 위치시켜 송신부에서 수신부로 채워지는 자기장의 효율을 높이도록 하였다<sup>[6]</sup>. 실제 사용된 페라이트의 주파수에 대한 상대 투자율의 그래프는 Fig. 9와 같다.<sup>[8]</sup>

각 코일의 턴 수 및 송신부와 수신 부 사이의 공극을 Table 1에 명시하였다. 송신 코일과 수신 코일의 단면적은 Fig. 10 및 Fig. 11과 같으며, 송신 코일과 수신 코일은 길이 방향으로 교차되도록 설계하였다.

이상적인 상황에서 무선전력전송 시스템의 동작주파수는 공진주파수와 같으며, 동작주파수가 높을수록 식 (4)에서 볼 수 있듯이 시스템의 효율이 높아진다. 하지만 동작주파수가 높아질수록 인버터의 스위칭 손실과 페라이트의 손실이 높아지므로 시스템 전체 효율이 낮아질 수

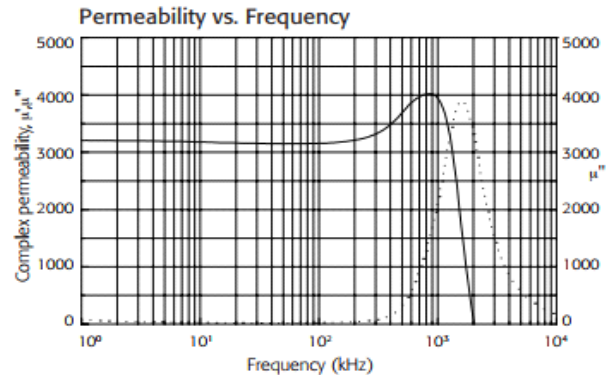


그림 9. 설계에 사용된 페라이트의 주파수에 대한 투자율의 그래프<sup>[8]</sup>

Fig. 9. Graph of permeability to frequency of ferrite used in design<sup>[8]</sup>.

표 1. 송, 수신 코일의 턴 수 및 사이의 거리 및 턴 수  
Table 1. The length of the air gap and the number of turns of the receiving coil and the transmitting coil.

Parameters	Value
Number of turns of Tx coil	25 turns
Number of turns of Rx coil	25 turns
Air gap	4 cm

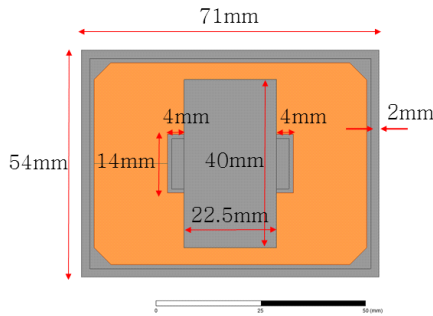


그림 10. 수신 코일의 구성도  
Fig. 10. Top view of the receiving coil.

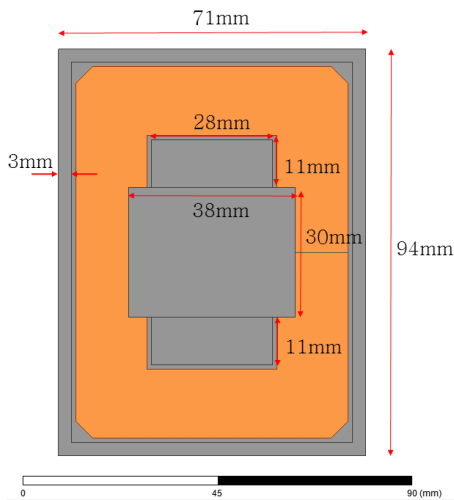


그림 11. 송신 코일의 구성도  
Fig. 11. Top view of the transmitting coil.

있다. 따라서 이번 무선전력전송 시스템에서는 무인 이동체에 탑재되는 다양한 통신회로의 간섭을 피하고, 효율이 높지만 인버터와 페라이트에서의 손실을 제한할 수 있는 주파수를 105 kHz로 설정하였다.

한편, 교류 전원의 동작주파수가 높기 때문에 교류 전류가 도선의 표피로만 흘러 교류 저항이 작아지는 표피 효과가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 유한요소법 해석 기반 자기장 시뮬레이션 프로그램 내에서 코일 내 도선을 리츠선(Litz wire)과 같이 이상적으로 표피효과의 영향을 받지 않도록 설정을 하여 시뮬레이션을 진행하였다<sup>[9]</sup>.

시뮬레이션 결과, 추출된 송신 코일과 수신 코일 사이

표 2. 송, 수신 코일의 전기적 특성 시뮬레이션 결과  
Table 2. Simulation results of self inductance and mutual inductance.

Parameters	Simulation result
Self inductance of the Tx coil	178.02 $\mu$ H
Self inductance of the Rx coil	167.92 $\mu$ H
Mutual inductance between the Tx coil and the Rx coil	10.35 $\mu$ H

표 3. 송, 수신 코일 제작에 사용된 리츠 선  
Table 3. The Litz wire used on the transmitting side and the receiving side.

Parameters	Value
Diameter of a single line of Litz wire used in Tx coil	0.1 mm
Total number of strands used in the Tx coil	500
Diameter of a single line of Litz wire used in Rx coil	0.12 mm
Total number of strands used in the Rx coil	300

의 상호 인덕턴스와 각각의 자기 인덕턴스는 Table 2와 같다.

#### IV. 코일 제작 결과 및 회로 시뮬레이션과 실제 무선전력전송 시스템 측정 결과의 비교

##### 4-1 제작된 코일과의 인덕턴스 값 비교

실제 코일을 제작하기 위하여 선재를 리츠선(Litz wire) 중에서 가닥마다의 굵기와 가닥수를 송신 코일과 수신 코일의 부피를 고려하여 결정하였다. 또한 페라이트 역시 앞서 설정하였던 105 kHz에서도 손실이 크지 않은 특성을 가진 모델로 설정하였다. 선정된 리츠 선(Litz wire)은 Table 3과 같다.

Table 1에서 송, 수신 코일 모두 25턴씩인데, 제한된 송신부와 수신부의 크기로 인해 송신 코일은 5턴씩 5층으로 감았고, 수신 코일 역시 5턴씩 5층을 감아 25턴을 가지게 된다. 실제 제작된 송, 수신 코일은 Fig. 12와 같다. Fig. 12의 코일에서 측정된 인덕턴스 값과 코일 자체의 저항 값은 Table 4와 같다.

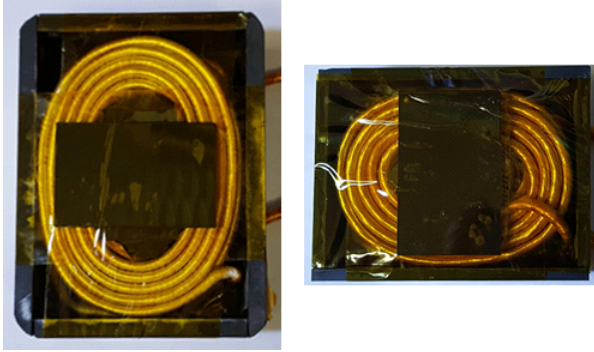


그림 12. 제작된 송신 코일(좌)과 수신 코일(우)  
Fig. 12. Actual figure of transmitting coil(left) and receiving coil(right).

표 4. 시뮬레이션, 측정을 통한 송, 수신 코일의 전기적 특성  
Table 4. Inductance and resistance value measured in actual model and comparison between actual model and simulation.

Parameter	Measured value	Simulation result	Error
Self inductance of the Tx coil	185.7 $\mu$ H	178.02 $\mu$ H	4.3 %
Parasitic resistance of the Tx coil	0.332 $\Omega$	—	—
Self inductance of the Rx coil	174.2 $\mu$ H	167.92 $\mu$ H	3.7 %
Parasitic resistance of the Rx coil	0.215 $\Omega$	—	—
Mutual inductance between the Tx coil and the Rx coil	9.13 $\mu$ H	10.35 $\mu$ H	11.8 %

#### 4-2 측정된 인덕턴스와 저항 값을 바탕으로 한 회로 시뮬레이션 결과

설계한 무선전력전송 시스템의 전체 효율을 알아보기 위하여 회로 시뮬레이션을 수행하였다. 송, 수신 코일의 보상 커패시터의 값을 정하고 다이오드 정류기와 평할 커패시터를 구성한 후 시뮬레이션을 진행하였다. 부하에 전달되는 전력과 전압의 목표는 각각 200 W, 30 V이다.

Fig. 13을 통해 알 수 있듯이, 시스템의 동작 주파수가 송신측 코일과 보상회로의 공진주파수보다 낮아지면 capa-

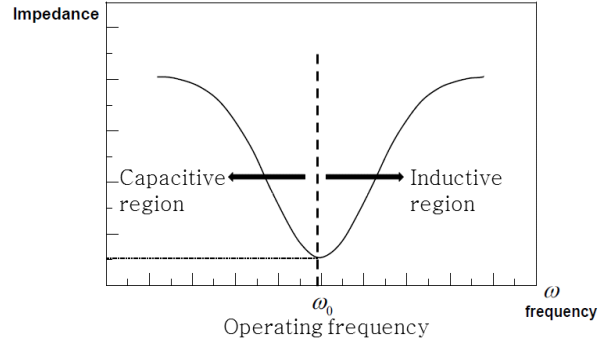


그림 13. 공진주파수와 동작주파수에 따른 임피던스 변화  
Fig. 13. Impedance change according to resonant frequency and operating frequency.

표 5. 측정된 송, 수신 코일 인덕턴스의 보상을 위한 커패시터

Table 5. Measured inductance value and calculated capacitor value of the compensation circuit.

Parameters	Value
Self inductance of the Tx coil(measured)	185.7 $\mu$ H
The capacitor of the Tx side compensation circuit (Resonance frequency : 103 kHz)	12.86 nF
Self inductance of the Rx coil(measured)	174.2 $\mu$ H
The capacitor of the Rx side compensation circuit (Resonance frequency : 105 kHz)	13.2 nF

citive region에서 동작하게 되어 송신측 시스템은 전하를 축적하게 되어 일정 전압을 유지하는 성질을 갖게 된다. 이때, 인버터의 스위칭이 일어나게 되어 capacitive region에 있어서 전압을 유지하고 있는 시스템 양단의 전압이 강제로 바뀌게 되어 시스템에 큰 무리로 작용하여 소손될 가능성이 있다. 이를 방지하여 시스템의 안정성을 높이기 위해 송신측의 코일과 보상회로는 103 kHz에 공진을 설정하고, 수신측 코일과 보상회로는 105 kHz를 공진주파수로 설정해서 커패시터 값을 정한다.

공진 주파수를 고려한 보상회로의 커패시터 크기는 Table 5와 같다. Table 5의 값을 바탕으로 Fig. 4와 같이 회로를 구성하여 시뮬레이션을 진행한 후의 입력과 출력 전력 및 효율은 Table 6과 같다.

시스템의 입력 전력은 인버터 앞단의 DC Power supply

표 6. 입, 출력 전력 및 무선전력전송 시스템의 효율 시뮬레이션 결과

Table 6. Simulated input, output power and the transfer efficiency of wireless power transfer system.

Parameters	Value
System input power	255 W
Power delivered to the Rx coil	212 W
Power delivered to the load	203 W
System overall efficiency	79.6 %

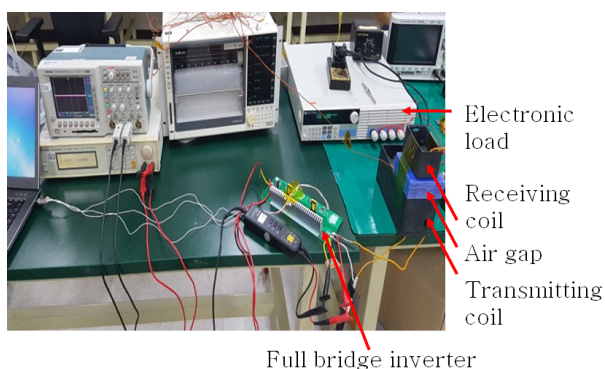


그림 14. 실험 구성도

Fig. 14. Overall setting of experiment.

에서 공급되는 전력이며, 수신부에 전달된 전력은 수신 코일 바로 뒷단에서 측정하였고, 부하에서 측정한 전력은 DC 전자로드에 표시된 값이다. 시스템 전체 효율은 시스템 입력 전력에 대한 부하에 전달된 전력의 비이다.

#### 4-3 제작된 코일을 이용한 실험 및 회로 시뮬레이션과의 비교

실험의 전체 구성은 Fig. 14와 같다. 수신 및 송신 코일을 감싸는 검은색 재질은 폴리카보네이트(polycarbonate)이다. 또한 공극은 자기장의 생선 및 쇠교에 영향을 끼치지 않는 아크릴로 구성하였다. Fig. 4와 같이 직류 전원을 교류 전원으로 바꾸어 주는 full bridge inverter를 실험에 사용하였으며, 동작 주파수는 105 kHz로 설정하였다. 회로 시뮬레이션과 마찬가지로 시스템의 안정성을 위해 송신 측 코일과 보상회로의 공진 주파수를 103 kHz로 설정하였으며 수신측 코일과 보상회로의 공진주파수는 105 kHz로

표 7. 계산된 커패시터 값과 실제로 사용된 커패시터 값  
Table 7. The capacitor value for the simulation and the actual capacitor value.

Parameters	Simulation result (Resonance frequency)	Actual value (Resonance frequency)
The capacitor of the Tx side compensation circuit	12.86 nF (103 kHz)	12.79 nF (103.26 kHz)
The capacitor of the Rx side compensation circuit	13.2 nF (105 kHz)	13.3 nF (104.56 kHz)

표 8. 시뮬레이션된 입, 출력 전력 및 효율과 측정을 통한 입, 출력 전력 및 효율의 비교

Table 8. Comparison of simulated and measured input, output power and transfer efficiency.

Parameters	Simulation Result	Measurement Result
System input power	255 W	287 W
Power delivered to the Rx coil	212 W	214.4 W
Power delivered to the load	203 W	205 W
System overall efficiency	79.6 %	71 %

설정하였다. 이에 따른 보상회로의 커패시터 값은 Table 7과 같다.

시뮬레이션과 마찬가지로 부하에 전달되는 전력은 200 W이고, 전압은 30 V를 목표로 하였다. 따라서 전자 부하의 저항 값은 4.5  $\Omega$ 으로 설정하여 실험을 진행하였다. 각 지점의 전류, 전압을 측정하여 계산된 입력 전력과 출력 전력과 효율은 Table 8과 같다.

시뮬레이션에 비해서 실제 측정에서 효율이 낮아진 이유는 우선 보상회로의 커패시터 값을 코일의 임피던스와 목표로 설정한 값에 정확히 맞추는 것이 실제 시스템에서는 다소 어려움이 있기 때문이다.

또한, 회로 시뮬레이션에서 설계한 인버터보다 실제 제작된 인버터의 효율이 낮아 시스템 전체 효율이 감소하였다.

## V. 결 론

본 논문에서는 미래 전장에서 사용될 수 있는 다양한 무인 이동체의 전력 공급 무선화 연구를 진행하였다. 먼

저, 기존에 연구된 다양한 무선전력전송 이론들을 토대로 무인 이동체의 크기와 필요 전력을 고려하여 가장 적합한 형태의 무선전력전송 시스템을 설계하였다. 이를 위해 유한요소법 해석 기반 자기장 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 코일을 설계하였고, 이를 바탕으로 직접 코일을 제작하였다. 직접 제작한 코일의 다양한 전기적 파라미터 값들을 측정하여 시뮬레이션과 비교하였고, 회로 시뮬레이션을 진행하였으며, 무선전력전송에 필요한 다양한 전력 회로들을 제작하여 실제 무인 이동체에 필요한 전력과 전압을 공급하여 효용성을 입증하였다.

### References

- [1] S.-M. Kim, I.-K. Cho, and H.-C. Choi, "Design and implementation of a 100 W receiver for wireless power transfer using coupled magnetic resonance", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 1, pp. 84-87, 2016.
- [2] C.-S. Wang, Oskar H. Stielau, and Grant A. Covic, "Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 52, no. 5, pp. 1308-1314, 2005.
- [3] W. Zhang, Chunting Chris Mi, "Compensation topologies of high-power wireless power transfer systems", *IEEE*

*Trans. Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 4768-4778, 2016.

- [4] J. Kim, J. Kim, S. Kong, I.-S. Suh, N. P. Suh, D.-H. Cho, J. Kim, and S. Ahn, "Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system", *Proceeding of the IEEE*, vol. 101, issue 6, pp. 1332-1342, 2013.
- [5] I.-S. Suh, "Application of SMFIR technology to future urban transportation", *J. Integr. Design Process Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 226-232, 2011.
- [6] J. Shin, S. Shin, Y. Kim, S. Ahn, S. Lee, G. Jung, S.-J. Jeon, and D.-H. Cho, "Design and implementation of shaped magnetic-resonance-based wireless power transfer system for roadway-powered moving electric vehicles", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 61, no. 3, pp. 1179-1192, 2014.
- [7] ANSYS Maxwell. 2011. [Online]. Available: <http://www.ansys.com>
- [8] Samwha ferrite PL-13 [Online]. Available: <http://www.samwha.com/electronics/product/>
- [9] M. Bartoli, N. Noferi, A. Ratti, and M. K. Kazimierczuk, "Modeling Litz-wire winding losses in high-frequency power inductors", *Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1690-1696, 1996.

### 신 유 준



2016년 8월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)  
2016년 9월~현재: 한국과학기술원 조천식  
녹색교통대학원 석사과정  
[주 관심분야] WPT 등

### 박 재 형



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

김 중 훈



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

은 희 현



2011년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2016년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 유도무기2연구센터 선임연구원  
 [주 관심분야] RF 안테나, EMC, WPT 등

권 병 기



2006년 2월: 경북대학교 전기전자컴퓨터과 (공학사)  
 2016년 8월: 아주대학교 IT융합대학원 (공학석사)  
 2006년 1월~현재: LIG 넥스원(주) 유도무기2연구센터 선임연구원  
 [주 관심분야] RF 안테나, EMC, WPT 등

안 승 영



1998년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학사)  
 2000년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)  
 2005년 2월: 한국과학기술원 전자공학과 (공학박사)  
 2011년 10월~현재: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 부교수  
 [주 관심분야] WPT, SI, PI, EMI/EMC/EMF, 전기자동차 등