

이형코일을 이용한 무선전력전송 시스템 송신 코일 최적화

Optimizing Transmitting Coil of Wireless Power Transmission System with Different Shape Coils

김영현 · 구경현*
인천대학교 전자공학과

Young Hyun Kim · Kyung Heon Koo

Department of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

[요 약]

본 논문에서는 6.78 MHz 자기공진방식 무선전력전송 송수신 코일을 최적화하고 이에 따른 시뮬레이션 및 측정 결과를 제시하였다. 전송 효율은 시스템 형태 및 코일 크기 등 다양한 요인에 따라 영향을 받게 되므로 자기 공진형 무선전력전송의 실용화에 있어 코일 구조를 각각 송신용 헬리컬 공진코일과 수신용 평판형 스파이럴 공진코일을 구성하여 부피의 문제점을 최소화하고 원통형 형태의 무선충전형태에 맞게 코일의 크기, 공진기 내의 코일과 코일 간의 거리 등을 결정하였으며, 전자계 시뮬레이션을 통해 이를 확인하였다. 860mm 지름 상판과 600mm 떨어진 기둥의 원통형 구조에 대하여 적용 가능한 무선전력전송 코일을 설계하여 특성을 시뮬레이션하고, 제작하여 특성을 측정하였다. 시뮬레이션 특성은 $|S_{21}|$ 이 -0.53 dB, 효율 88%, 측정 결과는 $|S_{21}|$ 이 -0.71 dB로 효율 85%를 나타내었다.

[Abstract]

In this paper, we optimize the wireless power transmission (WPT) coil, and then compare the EM simulation and measurement using magnetic coupling at 6.78 MHz. As transmission efficiency is affected by various factors such as the shape of the system, the size of the coils, the coil structure is proposed to consist of a helical resonant for transmission and a spiral resonant for reception. The size of the coil and the distance between the coils are determined to minimize the volume problem, and the shape of the coil are confirmed by EM simulation. A WPT system is designed with 860mm diameter top plate and cylindrical structure of column spaced 600mm apart, and the characteristics are simulated and measured. The simulation shows that $|S_{21}|$ is -0.53 dB with the efficiency of 88%, and the measurement result is that $|S_{21}|$ is -0.71 dB with the efficiency of 85%.

Key word : Wireless power transfer, Resonance, Helical coil, Planar Spiral coil.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.6.614>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 September 2017; Revised 10 October 2017

Accepted (Publication) 19 December 2017 (30 December 2017)

*Corresponding Author; Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-4766

E-mail: khkoo@inu.ac.kr

1. 서론

최근 각광을 받고 있는 무선 전력 전송은 근원을 따지면 100여 년 전 니콜라 테슬라(Nikola Tesla)에 의해 제안된 기술로 2007년 미국 MIT 대학의 마린 솔라치치(Marin Soljagic) 교수팀이 2 m 거리에서 무선으로 전등에 전원을 공급하는 연구를 발표하여 새롭게 주목을 받게 되었고 이후 무선으로 충전하거나 에너지를 공급하기 위한 다양한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다[1].

무선 전력 전송 시스템은 크게 전자기 방사 방식, 자기 유도 방식, 자기 공진 방식으로 분류할 수 있으며, 전자기 방사 방식은 전자파를 이용하여 수 m에서 수 km 이상까지 전력 전송이 가능하지만 경로손실에 따른 저 효율 문제가 발생한다. 자기 유도 방식은 코일에 전류가 흐르면 주변에 자계가 형성되고, 그 자계를 통해 전력 전송을 하는 것으로 가까운 거리에서 높은 효율로 전력 전송이 가능하나, 거리가 멀어질수록 효율이 급격하게 떨어져 전송거리가 수 cm 내외 밖에 되지 않는다. 최근의 모바일 기기에는 자기 유도 방식이 Qi 방식 표준화로 내장되어 사용하고 있다. 자기 공진 방식은 공진을 이용하는 무선전력전송으로 고유 주파수에서 강하게 공진하는 현상을 이용하여 무선으로 에너지를 전송하며 수 cm에서 수 m 전력전송이 가능하다 [2], [3].

자기 공진방식은 자기 유도방식 과 비교하여 기기간의 위치 자유도가 높은 전송 방식으로, 두 개의 같은 공진 주파수를 갖는 시스템은 결합되기 쉽지만, 공진주파수가 다른 시스템과는 공진 현상이 일어나지 않는 현상을 이용하여 방사 또는 흡수에 의한 손실을 최소화하여 근거리 장을 갖는 전자적 공진기를 설계하여 적정수준 효율을 보이는 무선 전력 전송 시스템을 구현할 수 있다[4].

본 논문에서는 주파수 6.78 MHz를 사용하여 공진체인 송신 코일과 수신 코일이 모두 동일한 헬리컬 구조인 형태와 모두 스파이럴 구조인 형태를 비교 분석하였으며, 또한 기둥을 가진 원형 테이블에 적용이 가능하도록 송신코일은 헬리컬 형태, 수신 코일은 스파이럴 형태를 갖는 이형코일 구조를 제안하여 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템 연구를 진행하였다[1], [5], [6].

논문의 구성은 다음과 같다. 3차원 전자계 해석 시뮬레이터를 이용하여 송수신 코일이 동일 모양을 갖는 두 가지 경우, 즉 헬리컬 코일인 구조와 평판 스파이럴 코일인 구조를 비교하여 전자계 해석 결과를 제시하였다. 시뮬레이션 데이터를 기초로 송신은 헬리컬 코일, 수신은 평판형 스파이럴 코일로 서로 다른 구조 코일간의 전자 결합을 해석하고 제작하여 측정된 특성을 제시하였으며 결론에서 추가 연구 분야를 언급하였다.

II. 자기공진방식 무선전력전송 시스템 설계

2-1 자기 공진방식 무선전력전송

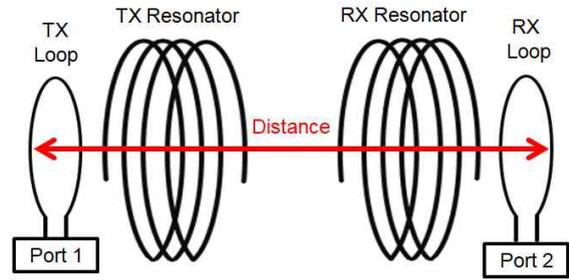


그림 1. 자기공진방식 무선전력전송 시스템 구성
Fig. 1. Block diagram of magnetic resonance wireless power transfer system.

무선 전력 전송 시스템은 그림 1과 같이 전기에너지를 특정한 송신 장치를 통하여 원하는 주파수 및 전력에 맞춰 변환 후 송신 코일을 통해 무선으로 전송하고 이를 수신 코일을 통해 전력을 수신하여 사용자가 원하는 기기에 적합한 전력으로 변화시켜 에너지를 공급하는 시스템을 의미한다.

자기 공진방식의 코일은 그림 1과 같이 4개의 코일 형태로 구성되어있으며, 코일은 각각 송신 단일 루프, 송신 공진 코일, 수신 공진 코일, 수신 단일 루프 로 구성되어 있다. 단일 루프 코일과 공진 코일 사이의 전력 전송은 자기 유도 방식으로 이뤄지며, 수신 및 공진 코일은 자기 공진 방식으로 에너지가 전달된다. 4코일 방식은 공진 코일로만 구성된 2코일 방식에 비해 Q-factor가 높아 전력 전송에 효율적이므로 본 논문에서는 4코일 형태를 이용하여 시스템을 제작하였다[1].

2-2 동일 코일 형태의 자기 공진방식 WPT 설계

본 논문에서는 사용빈도가 높은 전달거리 600 mm를 기준으로 가정하여 설계 시나리오를 구성하였으며, 송수신 공진 코일의 형태가 모두 헬리컬 코일인 경우와 부피를 줄일 수 있는 스파이럴 형태 코일의 경우를 비교하여 설계하였다.

자기공진방식 무선전력전송용 코일의 파라미터는 3차원 전자계 시뮬레이션(3D EM simulation)과 계산을 바탕으로 설계하였으며, 공진 코일의 공진 주파수는 6.78 MHz를 목표로 제작하였다. 또한 제작의 용이성을 고려하여 지름 2.9 mm 구리 도선을 사용하였다.

그림 2에는 헬리컬 코일을 설계 시 필요한 변수를 나타내었다. L-C 공진을 위한 헬리컬 코일의 주요 변수의 계산은 식 (1), (2) 와 같다[7], [8].

$$L = \frac{D^2 N^2}{0.45D + H} \quad [nH] \quad (1)$$

$$C = \frac{D\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1}\{(N-1)(p-d)/d\}} \quad [pF] \quad (2)$$

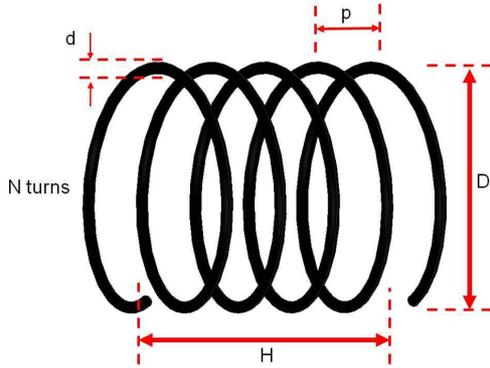


그림 2. 헬리컬 코일의 설계 변수
 Fig. 2. Design parameters of helical coil.

- Diameter(D) : 헬리컬 코일의 전체 반경, 단위 mm
- Height(H) : 헬리컬 코일의 전체 길이, 단위 mm
- Wire diameter(d) : 코일의 두께, 단위 mm
- Pitch(p) : 코일과 코일사이의 거리(도선간격), 단위 mm
- Number of turns(N) : 코일의 감은 횟수(턴 수)

공진 주파수 형성 및 목표로 하는 전력 전송 거리 확보를 위해 송신 및 수신 헬리컬 공진 코일은 지름 860 mm, 도선 간격은 25 mm 고정하고 턴 수 N을 조정하여 6.78 MHz에 공진하도록 설계 하였으며 전력 인가를 위한 송수신 코일의 지름은 670 mm의 단일 루프 형태로 하였다. 이는 대전력 무선전력 송수신을 위한 코일 모델을 가정하여, 충분한 전력 전송의 면적과 거리를 확보하기 위해 정한 크기이다.

표 1과 같이 턴 수 N을 조정한 헬리컬 공진 코일의 설계를 위한 수식의 결과를 그림3의 시뮬레이션 결과와 비교하여 최적의 턴 수를 찾고 확인하였다.

표 1. 헬리컬 공진코일의 수식 결과
 Table 1. Equation results of helix resonant coil.

D	d	p	N	H	L (uH)	C (pF)	f (MHz)
860	2.9	25	4.4	123	28.1	19.0	6.89
860	2.9	25	4.5	126	29.2	18.9	6.78
860	2.9	25	4.6	128	30.4	18.8	6.67

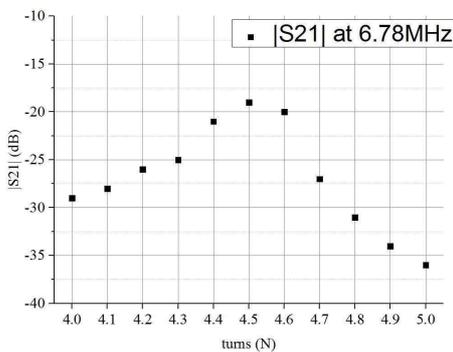


그림 3. 헬리컬 공진코일의 턴 수(N)의 변화에 따른 시뮬레이션
 Fig. 3. Simulation result according to the number of turns(N) of the helical resonance coil.

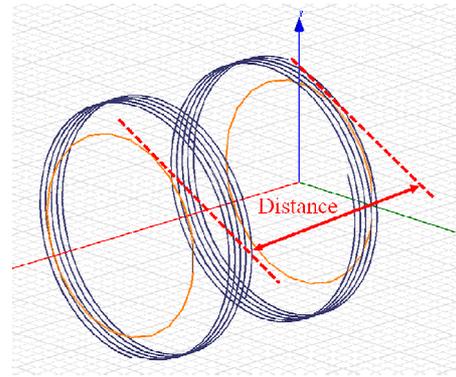


그림 4. 헬리컬 코일을 이용한 무선전력전송시스템 설계
 Fig. 4. Design of WPT system using two helical coils.

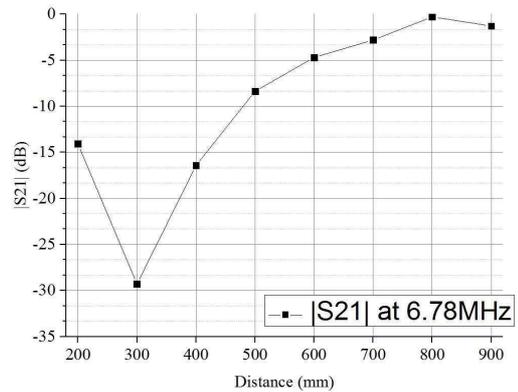


그림 5. 헬리컬 코일 무선전력전송시스템의 거리에 따른 특성 시뮬레이션
 Fig. 5. Simulation characteristics of helical coil WPT system with distance.

시뮬레이션 시나리오는 그림 4와 같이 송신 및 수신 공진 코일이 대칭으로 놓여 있으며, 각각의 송수신 루프코일을 기준으로 거리에 따른 S₂₁ 값을 시뮬레이션 하였으며, 부하임피던스는 50Ω으로 설정하였다.

3D 시뮬레이션 결과는 그림 5와 같으며 6.78 MHz에서 거리 800 mm일 때 |S₂₁|은 -0.29 dB로 93.5 % 효율을 나타내었다.

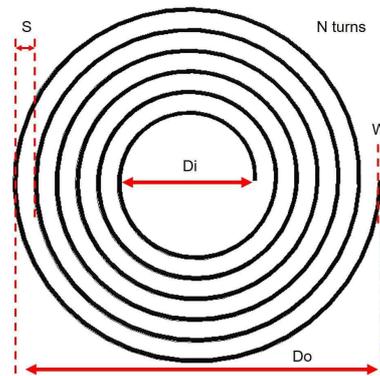


그림 6. 스파이럴 코일의 설계 변수
 Fig. 6. Design parameters of spiral coil.

부피가 큰 헬리컬 형태 코일의 단점을 보완하고자 송신 및 수신 코일 모두 스파이럴 형태로 구성하였으며, L-C공진을 위한 주요 변수의 계산은 식(3), (4), (5)와 같다[8], [9].

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} [\mu H] \quad , \quad c > 0.2a \quad (3)$$

$$a = \frac{D_i + c}{2} \quad (4)$$

$$c = (W + S) \times N \quad (5)$$

Inner diameter(Di):스파이럴코일의 최내각 전체 반경, 단위 in
 Outer diameter(Do):스파이럴코일의 최외각 전체 반경, 단위 in
 Wire diameter(W) : 스파이럴코일의 두께, 단위 in
 Turn spacing(S) : 코일과 코일사이의 거리, 단위 in
 Number of turn(N) : 코일의 감은 횟수

표 2. 스파이럴 공진코일의 수식 결과

Table 2. Equation results of spiral resonant coil.

Di (mm)	Do (mm)	W (mm)	S (mm)	N	L (uH)	C (pF)	f (MHz)
553	854	2.9	25	5.4	30.9	17.47	6.71
553	860	2.9	25	5.5	32.1	17.48	6.58
553	866	2.9	25	5.6	33.2	17.51	6.47

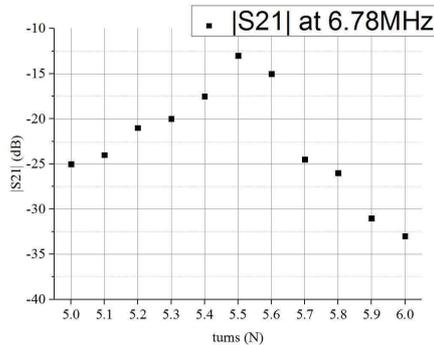


그림 7. 스파이럴 공진코일의 턴 수(N)의 변화에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation result according to the number of turns(N) of the spiral resonance coil.

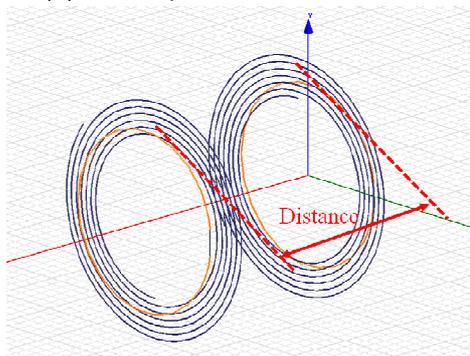


그림 8. 스파이럴 코일을 이용한 무선전력전송 시스템의 설계

Fig. 8. Design of WPT system using two spirial coil.

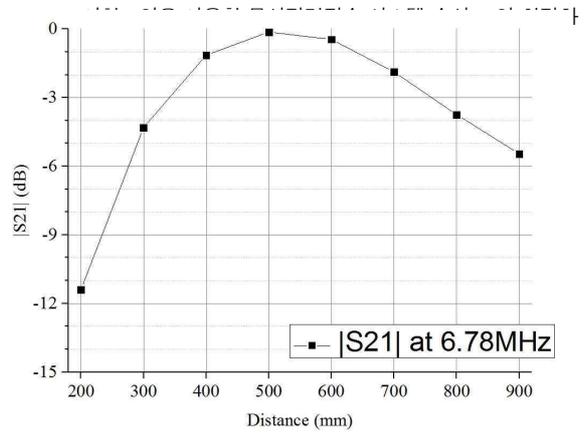


그림 9. 스파이럴 코일 무선전력전송시스템 특성 시뮬레이션

Fig. 9. Simulation characteristics of spiral coil WPT system.

공진 주파수 형성 및 기준이 되는 전력전송 거리를 헬리컬 코일 무선 전력 전송 시스템 과 동일하게 하기 위하여 송신 및 수신 공진 코일은 지름 860 mm, 도선 간격은 25 mm, 턴 수는 5.5의 스파이럴 형태로 구성하였으며, 전력 인가를 위한 송수신 코일은 지름 670 mm의 단일 루프 형태로 디자인 하였다.

표 2와 같이 턴 수 N을 조정 한 헬리컬 공진 코일의 설계를 위한 수식의 계산 결과를 그림7의 시뮬레이션 결과와 비교하여 최적의 턴 수를 찾고 확인하였다.

시뮬레이션 시나리오는 그림 8과 같이 송신 및 수신 공진 코일이 대칭으로 놓여 있으며, 각각의 루프코일을 기준으로 거리에 따른 S₂₁의 값을 시뮬레이션 하였으며, 부하임피던스는 50 Ω으로 설정하였다.

3D 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같으며 6.78 MHz에서 거리 500 mm일 때 |S₂₁|은 -0.13 dB로 97 % 효율을 나타내었다.

동일 지름 860 mm의 공진 코일에서 송·수신 간 거리에 대한 전송 특성을 비교 했을 때, 헬리컬 형태의 송수신 코일이 스파이럴 형태의 송·수신 코일보다 상대적으로 먼 거리에 전송 특성이 우수함을 보였다.

2-3 이형코일을 이용한 자기 공진방식 WPT 설계

헬리컬 형태 코일과 스파이럴 형태 코일을 적절히 활용하면 다양한 환경에서 적용 가능한 무선전력전송 시스템을 구상할 수 있으며, 전송 거리에 맞게 최적화가 가능하다.

이에 헬리컬 형태의 특성을 유지하면서 공간의 제약을 해결 하기 위해 송수신 코일의 형태가 다른 이형 구조를 제안하고 송신을 헬리컬의 형태, 수신은 스파이럴 형태로 구성하는 새로운 시스템을 제안하고 시뮬레이션을 진행하였다.

송신부는 860mm 헬리컬 공진 코일로 구성하고 수신부는 860mm 동일 크기의 스파이럴 공진코일로 구성하여 그림 10과 같이 설계하였으며, 전력 인가를 위한 송수신 코일은 지름 670 mm의 단일 루프 형태로 디자인 하였다.

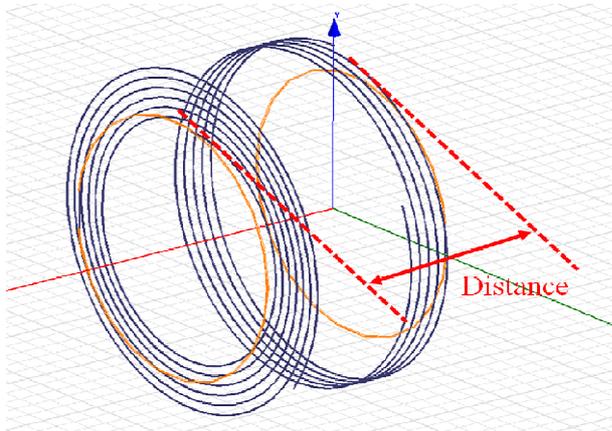


그림 10. 송신부 헬리컬 및 수신부 스파이럴 코일을 이용한 무선전력전송시스템의 설계

Fig. 10. Design of WPT system using helical Tx and spiral Rx coil.

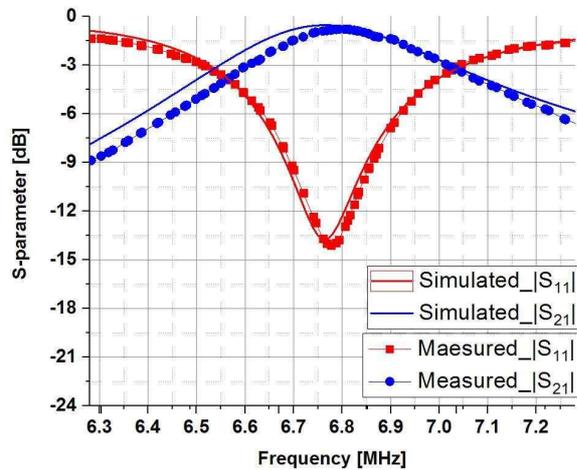


그림 11. 헬리컬 송신 공진코일과 스파이럴 수신 공진코일의 전송 특성 시뮬레이션 및 측정

Fig. 11. Simulation and measurement for transfer property using helical and spiral coils.

이때 6.78 MHz에서 최적의 시뮬레이션이 되도록 거리 600 mm를 기준으로 사용 도선의 지름 2.9 mm, 헬리컬 송신부는 25 mm의 도선 간격으로 각각의 송수신 공진 코일의 턴 수를 변수로 조정하여 최적화를 진행하였다. 그 결과 송신용 헬리컬 공진 코일은 5.5턴, 수신용 스파이럴 공진 코일은 4.8턴으로 결정하고 실제 제작하여 측정결과를 그림 11과 같이 비교하였다.

시뮬레이션 된 결과는 6.78 MHz에서 $|S_{21}|$ 이 -0.53 dB로 효율 88 %로 설계되었으며, 이 결과를 갖고 실제 제작하여 $|S_{21}|$ 이 -0.71 dB로 효율 85 %의 결과를 얻었다.

그림 12처럼 구리 코일과 아크릴 틀 등을 사용하여 시뮬레이션과 동일하게 형태를 구성하여 제작하였으며 무반사실에서 측정하였다.



그림 12. 송신부 헬리컬 및 수신부 스파이럴 코일을 이용한 무선전력전송시스템 측정

Fig. 12. Measurement of WPT system using helical Tx and spiral Rx coil.

표 3. 거리변화에 따른 헬리컬 송신 공진코일과 스파이럴 수신 공진코일의 전송 특성 측정결과

Table 3. Measurement results of transmission characteristics of helical transmitting resonant coil and spiral receiving resonant coil with distance variation.

거리 (mm)	500	600	700	800
$ S_{21} $ (dB)	-0.49	-0.71	-1.90	-4.13
효율 (%)	89.2	84.9	64.6	38.6

표 3은 제작한 헬리컬 송신 공진 코일과 스파이럴 수신 공진 코일의 무선전력전송시스템의 거리를 500 mm에서 800 mm까지 100mm 단위로 이동하여 측정된 결과이다. 500~600 mm 사이의 효율이 85 % 이상 유지하였다.

III. 결론

본 논문에서는 6.78 MHz 공진주파수를 갖는 무선전력전송 시스템에서 전력을 전달하는 시스템을 헬리컬 및 스파이럴 코일로 제작하고 동일 거리에서 최적화하여 성능을 비교하였다. 또한 송신 공진 코일은 헬리컬 형태로, 수신 공진 코일은 스파이럴 형태로 구성하고 시뮬레이션 및 제작하여 특성을 비교하였으며 최적의 구조를 설계하였다.

송수신에 동일한 지름을 갖는 헬리컬 형태의 공진기를 이용한 시스템이 동일 지름의 스파이럴 형태 공진기를 이용한 시스템과 비교하였다. 헬리컬 형태의 공진 코일을 이용한 시스템이 전달 특성은 유리하지만, 실제로는 구조체가 갖는 부피의 문제로 활용가능성이 떨어진다. 이에 이형코일 형태인 송신용 헬리컬 공진코일과 수신용 스파이럴 공진코일을 구성하여 부피의 문제점을 최소화하고 성능을 최적화하여 구성할 수 있으며 다양한 형태로 활용성이 높다.

본 논문에서 제작한 공진 코일은 전기자동차 충전용 대전력 송수신을 목표로 진행하였으며, 향후 전기자동차 무선충전 시 요구되는 구조적인 불일치의 효율변화와 최적의 실용적인 형태의 공진 코일에 관한 연구를 진행할 계획이다

