

# 무선전력전송의 송전 공진코일에서 발생하는 방전현상 연구

이기범\*

## Study on Discharge Phenomenon Occurring in Transmitting Resonance Coil of Wireless Power Transmission

Gi-Bum Lee \*

### 요약

본 논문에서는 4-코일 방식의 자기공진 무선전력전송 시스템을 구현하는 데 있어서, 송전 공진코일의 끝단에서 발생하는 선간 방전현상을 연구하였다. 자기공진 무선전력전송은 급전코일, 송전 공진코일, 수신 공진코일, 부하코일로 구성되어 있다. 여기서 송전 공진코일은 급전코일에서 발생한 자기장을 증폭하여 전방의 수신 공진코일로 전달하는 역할을 한다. 큰 전력을 전송하기 위하여 급전코일에 높은 전류를 흘려주면 송전 공진코일 끝단에 높은 전압이 유기되어 선간 방전현상이 일어나게 된다. 선간 방전현상은 송전기 케이스를 손상시키게 되고, 송전기를 사용할 수 없는 상태로 만든다. 따라서 이러한 선간 방전현상을 제거하기 위하여, 선간 방전을 일으키는 송전 공진코일에 유기되는 전압을 분석하고, 해결 방안을 제시하였다.

### ABSTRACT

In this paper, in implementing a 4-coil resonant wireless power transmission system, we studied the discharge phenomenon that occurs at the end of the transmitting resonance coil. Resonant wireless power transmission consists of a power supply coil, a transmitting resonance coil, a power receiving resonance coil, and a load coil. The transmitting resonance coil serves to amplify the magnetic field generated from the power supply coil and transmits it to the front receiving resonance coil. When a high current flows through the power supply coil in order to transmit large power, a high voltage is induced at the end of the transmitting resonance coil. It causes line-to-line discharge. Line-to-line discharge phenomenon damages the transmitter case and renders the transmitter unusable. Therefore, in order to eliminate this line-to-line discharge phenomenon, the voltage induced in the transmitting resonance coil that causes line-to-line discharge was analyzed and a solution was proposed.

### 키워드

Wireless Power Transmission, Resonant Frequency, Transmitter, Resonance Coil, Line-To-Line Discharge  
무선 전력 전송, 공진 주파수, 송전기, 공진 코일, 선간 방전

\* 교신저자 : 대전대학교 에너지공학부  
• 접수일 : 2024. 01. 04  
• 수정완료일 : 2024. 02. 22  
• 게재확정일 : 2024. 04. 12

• Received : Jan. 04, 2024, Revised : Feb. 22, 2024, Accepted : Feb. 12, 2024  
• Corresponding Author : Gi-Bum Lee  
Dept. of Energy Engineering, DAEJIN University,  
Email : gblee@daejin.ac.kr

## 1. 서 론

자기공진 방식의 무선전력전송을 구현하는데 있어, 2-코일 방식과 4-코일 방식으로 구분할 수 있다[1]. 2-코일 방식은 송전코일 앞단에 커패시터를 직렬 또는 병렬로 추가하여 LC 공진 현상을 이용하는 것이다. 2-코일 방식의 무선전력전송은 송전코일에 연결되는 직렬 또는 병렬 커패시터로 인하여 Q 값이 작아지게 되어 근거리 무선전력전송에 한계가 있으며, 주로 근접 무선충전에 활용되고 있다[2].

한편, 4-코일 방식의 무선전력전송은 급전코일, 송전 공진코일, 수신 공진코일, 부하코일로 구성되어 있다. 4-코일 방식의 무선전력전송은 2007년에 MIT에서 처음 발표하면서 주목을 받았으며[3], 송전 공진코일과 수신 공진코일의 공진주파수를 정확하게 일치시킴으로써 무선전력전송 거리를 보다 증대시킬 수 있는 특징을 가지고 있다[4].

본 논문에서는 4-코일 방식의 자기공진 무선전력전송을 구현하는데 있어서 큰 전력을 전송할 경우 송전 공진코일에서 발생하는 선간 방전현상에 대하여 분석하고, 해결 방안을 제시한 논문이다.

계되어야 한다[6].

### 2.2 4-코일 자기공진 무선전력전송 구조

4-코일 방식의 자기공진 무선전력전송은 그림 1과 같이 구성되어 있다. 여기서 송전 및 수신 공진코일은 이중 스파이럴 코일 구조를 가지고 있으며[7], 6.78 MHz의 공진주파수로 설계된다. 무선전력전송을 위하여 고주파 파워앰프는 고주파 대전력 신호를 발생하여, 급전코일로 보내주게 된다[8]. 급전코일은 강한 자기장을 발생시키게 되고, 발생한 자기장에 의해 송전 공진코일에 유도기전력이 발생하게 된다. 급전코일은 1회 감긴데 비하여 송전 공진코일은 14회 감겨있기 때문에 매우 높은 전압이 송전 공진코일에 유기되게 된다. 결과적으로 급전코일에서 발생한 자기장은 송전 공진코일에 의해 증폭되어 전방으로 전파하게 된다. 송전 공진코일에 의해 전파된 자기장은 수십 cm 떨어져 있는 수신 공진코일에 유기되며, 수신 공진코일에 유기된 자기장은 부하코일로 전달되게 된다. 부하코일로 유기된 유도기전력은 정류기로 전달되어 직류전압으로 정류한 후에 배터리를 충전시켜 활용하게 된다.

## II. 자기공진 무선전력전송 구조

### 2.1 4-코일 자기공진 무선전력전송 기술

자기공진 방식의 무선전력전송을 구성하는 유닛은 고주파 파워앰프, 정류기, 송전기와 수신기로 구분할 수 있다. 송전기는 급전코일과 송전 공진코일로 이루어져 있으며, 수신기는 수신 공진코일과 부하코일로 이루어져 있다. 무선전력전송 효율을 높이기 위하여 송전 공진코일과 수신 공진코일은 반드시 공진주파수 ( $f_0$ )가 일치하도록 설계되어야 한다[5].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \dots (1)$$

송전 공진코일과 수신 공진코일 간에 공진주파수를 맞추기 위하여 코일의 감는 횟수 및 코일 간의 간격을 조정한다. 또한, 무선전력전송 효율을 개선하기 위하여 급전코일과 송전 공진코일 간의 이격을 조정하여 공진주파수에서 전달계수( $S_{21}$ )가 최소가 되도록 설

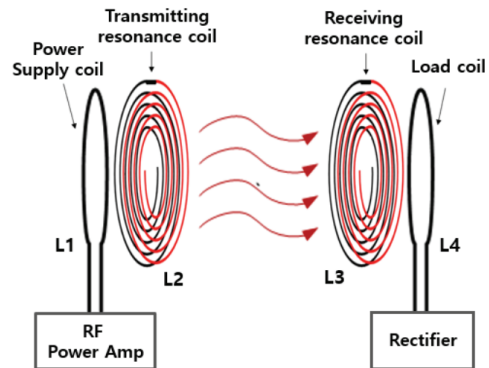


그림 1. 4-코일 방식의 자기공진 무선전력전송 구조  
Fig. 1 4-coil resonant wireless power transmission structure

### 2.3 송전기의 구조

송전기는 하나의 케이스에 급전코일( $L_1$ )과 송전 공진코일( $L_2$ )로 구성되어 있다. 급전코일은 직경 10 cm의 루프 안테나 구조를 하고 있으며, 송전 공진코일은 직경 20 cm의 이중 스파이럴 구조를 하고 있다. 급전코일과 송전 공진코일과 간격은 4 cm 떨어져 있다. 그림 2는 선간 방전현상을 제거하기 전에 만

들어진 송전 공진코일을 보여주고 있다.

송전 공진코일은 2중 스파이럴 코일 구조를 가지고 있으며, 재질은 전자파 장애를 최소화시키기 위하여 테프론을 사용하였다[9]. 송전 공진코일의 프레임 앞면과 뒷면에 얇은 깊이로 나선형 홈을 파고 구리선을 끼워 넣어서 만든다. 홈의 깊이는 직경 2 mm 구리선을 끼워질 수 있도록 뚫으며, 홈의 간격은 3 mm이다. 송전 공진코일 프레임의 두께는 10 mm이다.

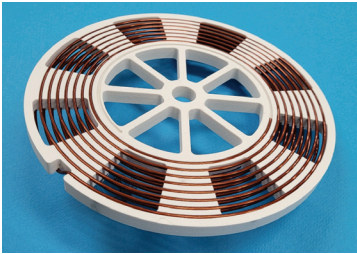


그림 2. 송전 공진코일  
Fig. 2 Transmitting resonance coil

송전 공진코일은 전면과 뒷면이 같은 나선형 구조이며, 내경부터 구리선을 감기 시작하여, 최외각에 도달해서는 커팅 홈을 통과하여, 뒷면으로 가서 같은 방향으로 감아 놓은 것이다. 이러한 구조를 2중 스파이럴 공진코일이라 하며, 공진코일의 부피를 줄일 수 있는 구조로 설계된 최적의 형태를 유지하고 있다.

여기서 6.78 MHz의 공진주파수를 맞추기 위해서는 송전 공진코일을 조금 길게 제작을 한 후에 내경의 코일 끝부분을 조금씩 절단하면서 공진코일의 인덕턴스 값을 줄여 나가게 된다. 결과적으로 공진코일의 인덕턴스 값이 바뀌게 되고 식 (1)에 따라서 공진주파수( $f_0$ )를 맞추게 된다.

그림 2는 개선되기 전에 이중 스파이럴 구조의 송전 공진코일을 보여주고 있으며, 송전 공진코일의 앞면의 시작과 뒷면의 끝단이 절단되어 나란히 홈에 끼워져 있다.

### III. 송전 공진코일에서 선간 방전현상 분석

#### 3.1 송전 공진코일 유도기전력 분석

자기공진 무선전력전송 시스템은 6.78 MHz의 공진

주파수는 갖는 송전 및 수신 공진코일을 사용하고 있다. 고주파 파워앰프는 6.78 MHz의 전력을 만들어서 송전기의 급전코일로 전달하게 된다[10]. 급전코일( $L_1$ )은 1회 감겨있으며, 송전 공진코일( $L_2$ )은 14회 감겨져 있다. 따라서 급전코일에서 만들어진 자기장은 송전 공진코일에서 높은 유도기전력으로 유기되게 된다.

그림 1에서 송전 공진코일( $L_2$ )에 유기되는 유도기전력( $e_2$ )는 식 (2)과 같이 표현할 수 있으며, 급전코일( $L_1$ )에 흐르는 전류( $i_1$ )와 급전코일과 송전 공진코일 사이의 상호인덕턴스( $M$ )에 의해 결정된다.

$$e_2 = M \frac{di_1}{dt} [V] \quad \dots (2)$$

송전 공진코일( $L_2$ )에 유기되는 유도기전력은 송전 공진코일의 끝단에서 발생하는 전위값을 계산할 수 있으며, 이는 6.78 MHz의 한주기 파장( $\lambda$ )과 송전 공진코일( $L_2$ ) 길이와 연관이 있다.

6.78 MHz 공진주파수에 대한 한주기 파장 길이는 식 (3)과 같다.

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 m}{f} = \frac{3 \times 10^8 m}{6.78 \times 10^6} = 44.3 m \quad \dots (3)$$

송전 공진코일에 사용되고 있는 이중 스파이럴 코일의 총 길이를 계산하기 위하여 스파이럴 코일의 두께와 코일과 코일 사이의 거리를 사용하여 스파이럴 코일의 외경( $D$ )을 구하고, 단면 스파이럴 코일 길이( $l_s$ )를 계산하면 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다[11].

$$D = d + (2 \times n \times (W + S)) \quad \dots (4)$$

$$l_s = \pi n (D + d) / 2 \quad \dots (5)$$

여기서,  $d$ : 코일 내경,  $D$ : 코일 외경,  $W$ : 스파이럴 코일 두께,  $S$ : 코일과 코일 사이의 거리,  $n$ : 코일 감은 횟수

송전 공진코일의 턴수( $n$ )는 7이고, 코일의 내경( $d$ )은 12 cm이다. 코일 굵기( $W$ )는 0.2 cm 이고, 코일과 코일 사이의 간격( $S$ )은 0.3 cm인 경우, 코일의 외경( $D$ )는 식 (4)에 의해 19 cm이다. 또한 스파이럴

코일의 길이( $l_d$ )는 식 (5)에 의해 3.41 m이다.

양면 스파이럴 코일의 총 길이( $l_T$ )는 단면 스파이럴 코일의 2배인 6.82 m이다. 따라서, 양면 스파이럴 코일의 총 길이와 한주기 파장 간의 비율은 식 (6)으로 계산 된다.

$$R_l = \frac{l_T}{\lambda} = \frac{6.82m}{44.3m} \times 100 = 15.4\% \quad \dots (6)$$

공진주파수 6.78 MHz의 주기는  $T=0.147 \mu\text{sec}$  이므로 이중 스파이럴 코일의 길이에 해당하는 시간은 식 (7)과 같이 된다.

$$P_{Tmc} = T \times 15.4\% = 22.6nsec \quad \dots (7)$$

무선전력전송 실험에 의하면, 송전 공진코일에서 선간 방전이 일어나는 현상을 관찰하기 위하여 급전코일( $L_1$ )에 흐르는 전류( $i_1$ )를 증가시켜 본 결과, 전류 실효값  $i_1 = 1.06A$ 에서 선간 방전이 일어나기 시작하였다. 이때 급전코일에 공급되는 교류 실효값은  $v_1 = 70.6V$ 였다.

송전 공진코일에 유기되는 전압을 계산하기 위하여 급전코일과 송전 공진코일 간의 상호 인덕턴스( $M$ )를 LCR 미터(HIOKI IM3536)로 측정하면  $56.7 \mu H$ 였다.

결과적으로 상호인덕턴스  $M=56.7 \mu H$ , 급전코일의 전류  $i_1 = 1.06A$ 을 식 (2)에 대입하면 식 (8)과 같은 결과를 얻는다.

$$e_2 = M \times \frac{di_1}{dt} = 56.7\mu H \times \frac{1.06A}{22.6nsec} = 2.7[kV] \quad \dots (8)$$

즉, 송전 공진코일의 끝단에서 선간 방전 현상이 일어날 때 유기되는 전압은 2.7 kV이다.

### 3.2 송전 공진코일 선간 임계전압 분석

송전 공진코일 끝단에서 발생하는 선간 방전현상의 원인을 분석하기 위하여, 전선에서 발생하는 코로나 방전 현상을 도입하였다. 그림 3은 전선에서 코로나 방전이 발생하는 전위경도에 대한 특성곡선을 보여주고 있다.

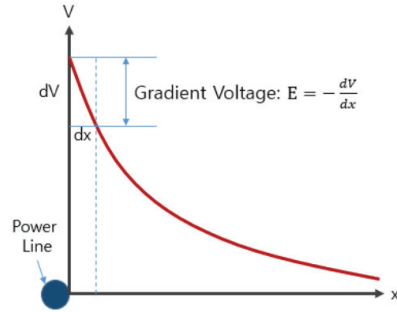


그림 3. 공간 방전 전위경도 특성곡선  
Fig. 3 Characteristic curve of space discharge gradient voltage

그림 3의 코로나 방전 현상에 의하면, 공간 절연파괴는 전선으로부터 이격 거리  $x=1\text{ cm}$ 를 기준으로 교류 21 kV, 직류 30 kV에서 파괴된다. 그러나 송전 공진코일의 선간 이격거리는 3 mm이므로 공간 절연 파괴되는 선간 임계전압은 아래와 같이 구해야 한다.

코로나 방전을 위한 선간 임계전압 계산식은 식 (9)와 같다[12].

$$E_0 = 24.3 \times m_0 m_1 \delta \log_{10} \frac{2D}{d} [kV] \quad \dots (9)$$

여기서,  $m_0$ : 전선표면계수,  $m_1$ : 기후에 관한 계수,  $\delta$ : 상대공기밀도 기압을  $b(\text{mmHg})$ 와 기온  $t^\circ\text{C}$

무선전력전송 실험 환경을 보면, 송전 공진코일로 사용한 구리선은 표면이 매끄럽고, 실험실 온도는 상온  $20^\circ\text{C}$ 의 맑은 날씨이며, 대기압인 760 기압에서 실험했기 때문에 임계전압( $E_0$ )은 아래와 같이 계산된다. 여기서 공진코일의 굵기는  $d=2\text{ mm}$ , 선간 간격은  $D=3\text{ mm}$ 이다.

$$E_0 = 24.3 \times 1 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.2 \times \log_{10} \frac{2 \times 0.3}{0.2} = 2.32 [kV] \quad \dots (10)$$

식 (10)의 결과는  $e_2 > E_0$ 이다. 따라서 송전 공진코일의 선간 간격이 3 mm이면, 임계전압 2.32 kV보다 송전 공진코일에 유기된 전압이 크므로 코로나 방전, 즉, 선간 방전현상이 일어난다.

### 3.3 선간 방전현상 분석 및 해법

송전 공진코일에서 선간 방전이 일어나는 유도 기전력( $e_2$ )을 계산한 결과 식 (8)과 같이 2.7 kV였다. 따라서 코로나 방전 임계전압인 2.32 kV보다 송전 공진코일에 유기된 전압이 높으므로 선간 방전현상이 발생한다.

이러한 선간 방전현상은 실험과정에서 관찰되었으며, 그림 4는 선간 방전현상에 의해 손상된 송전 공진코일을 보여주고 있다. 송전 공진코일 끝단에서 불꽃과 함께 방전현상이 일어났으며, 송전코일 프레임이 검게 타면서 녹아내린 것을 보여주고 있다.



그림 4. 선간 방전에 의해 손상된 송전 공진코일  
Fig. 4 Damaged transmitting resonance coil due to line-to-line discharge

한편, 선간 방전현상을 없애기 위하여 이중 스파이럴 코일의 끝단을 구부려서 1 cm 이격시키면 코로나 임계전압( $E_1$ )은 식 (11)과 같다.

$$E_1 = 24.3 \times 1 \times 1.0 \times 1.0 \times 0.2 \times \log_{10} \frac{2 \times 1}{0.2} = 4.86 [kV] \quad \dots (11)$$

식 (11)의 결과는  $e_2 < E_1$  이다. 송전 공진코일에 유기된 전압이 2.7 kV이므로 코로나 임계전압 4.86 kV 보다 작아져서 더 이상 선간 방전이 발생하지 않는다.

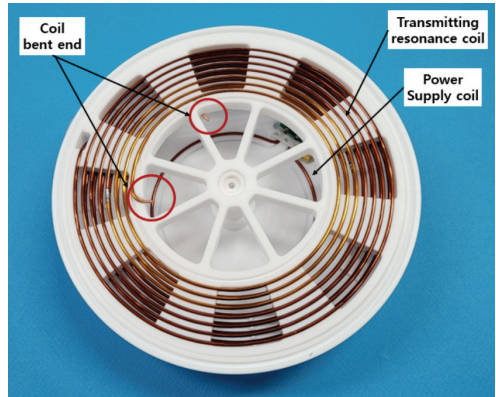


그림 5. 개선된 송전 공진코일  
Fig. 5 Improved transmitting resonance coil

그림 5는 개선된 송전 공진코일을 보여주고 있으며, 송전기 케이스에 조립된 상태를 보여주고 있다. 선간 방전을 해결하기 위하여 이중 스파이럴 코일의 양쪽 끝단을 그림 5의 적색 원과 같이 안쪽으로 구부렸으며, 인접한 구리선과 이격 거리를 1 cm로 넓혀서 선간 방전현상을 제거하였다.

## V. 결론 및 향후개선 방향

본 논문에서는 4-코일 방식의 자기공진 무선전력 전송에서 공진코일 끝단에 고전압이 유기되어 발생하는 선간 방전현상의 원인을 분석하였다.

송전 공진코일에 유기되는 전압은 급전코일과 송전 공진코일 간의 상호 인덕턴스에 의해 계산하였고, 공간 절연과파 현상에 의한 코로나 임계전압과 비교하여 공진코일 끝단에서 선간 방전현상이 발생하는 것을 비교 검증하였다. 결과적으로 선간 방전현상을 제거하기 위하여 공진코일 끝단을 1 cm 안쪽으로 꺾어서 인접한 선과 공진코일 끝단 사이의 간격을 넓혔다.

개선된 송전 공진코일은 대전력 무선전력전송에 필요한 송전 공진코일의 선간 간격을 보다 좁게 만들 수 있고, 공진코일의 크기를 작게 만들 수 있으며, 동일한 크기를 갖는 송전 공진코일로 보다 높은 전력을 전송할 수 있게 하였다.

## References

- [1] Yiming. Zhang, *Key Technologies of Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer*. Beijing, China, Springer, 2017.
- [2] Jong-Gyun Lim, "A study on the development of high-efficiency transmitting and receiving coils for wireless charging of drones," *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 2, 2022, pp. 213-218.
- [3] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science Magazine*, vol. 317, no. 5834, 2007, pp. 83-86.
- [4] Sung-Man Kim, Jae-Woo Shin, "Underwater Simultaneous Light Information and Power Transmission using a Laser Diode," *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 5, 2022, pp. 853-858.
- [5] Mssood Rehman<sup>1</sup>, Zuhairi Baharudin<sup>1</sup>, Perumal Nallagownden<sup>1</sup>, and Badar ul Islam<sup>1</sup>, "Design and Analysis of Resonant Wireless Power Transfer System," *MATEC Web of Conferences*, UTP Perak, UMP Pahang, Malaysia and VIT Tamil Nadu, India, 2018, pp. 1-13.
- [6] Alanson P. Sample, David T. Meyer, and Joshua R. Smith, "Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, Feb. 2010, pp. 544-554.
- [7] Gunbok Lee, Him-Chan Yun, GiBum Lee, and Wee Sang Park, "Design of a Double-Layer Spiral Resonator for Wireless Power Transfer," *International Symposium on Antennas and Propagation*, Jeju, Korea, 2011.
- [8] F. Mohammed Ali A. Al-Raie, "Design of Input Matching Networks for Class-E RF Power Amplifiers," *High Frequency Electronics*, 권, 호수 없습니다. 2011, pp. 40-48.
- [9] P. Jiang, J. Bian, "Low dielectric loss BST/PTFE composites for microwave applications," *Applied Ceramic Technology*, 권, 호수 없습니다. 2018, pp. 152-159.
- [10] Choong-Mo Youn, "Study on the Design of High Efficient Class-E Power Amplifier and Resonant Coils for High Efficient Wireless Power Transfer System," *Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 11, no. 10, 2016, pp. 935-940.
- [11] Jaehyun Park, Haeyoul Yang, and Chang-sun Kim, "Review for the Helical coil type and Spiral coil type in a mid range Wireless Power Transfer System," *KIEE Summer Conference*, Pyeongchang-gun, Korea, 2011, pp. 11-12.
- [12] Isuf Krasniqi, Vjollca Komoni, Avni Alidemaj, and Gazmend Kabashi, Kosovo, "Corona Losses Dependence from the Conductor Diameter," 권, 호수 없습니다. *Recent Researches in Power Systems and Systems Science*, 2011, pp. 112-117.

## 저자 소개



### 이기범(Gi-Bum Lee)

1984년 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1986년 광운대학교 전자공학과 졸업(공학석사)

2002년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업(공학박사)

2021년~현재 대전대학교 부교수

2018년~2021년 경북테크노파크 센터장

1996년~2018년 포항산업과학연구원 수석연구원

1987년~1996년 포스콘(현, POSCO DX) 과장

※ 관심분야 : 무선전력전송, 자동화 시스템