

무선전력전송을 위한 동축형 구조를 가지는 자기 공진 코일

손현창\*, 김진욱\*, 김도현\*, 김관호\*, 박영진\*

과학기술연합대학원대학교 (UST) & 한국전기연구원 (KERI)\*

Self-Resonant Coil with a Coaxial-like Capacitor for Wireless Power Transfer

Hyeon-Chang Son\*, JinWook Kim\*, Do-Hyeon Kim\*, Kwan-Ho Kim\*, and Young-Jin Park\*

University of Science & Technology (UST) and Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)\*

**Abstract** - 자기 공진(Magnetic resonance)을 이용한 무선전력전송을 위해 새로운 형태의 동축형 구조를 가지는 자기 공진 코일(Self-Resonant Coil)을 제안한다. 코일은 헬리컬 코일과 동축형 커패시터로 구성된다. 공진 주파수를 조정하기 위해 동축 구조는 병렬로 연결하고, 코일의 Q-factor를 높이기 위해 리츠 코일을 병렬로 연결하였다. 제안된 자기 공진 코일은 소형으로 제작이 가능하며, 우수한 전력전송 특성을 가진다.

$$L_{self} = \frac{4N^2r^2}{0.9r+H} \quad [\mu\text{H}] \quad (1)$$

$$C_{coax} = \frac{2\pi\epsilon h}{\ln(b/a)} \quad [\text{F}] \quad (2)$$

1. 서 론

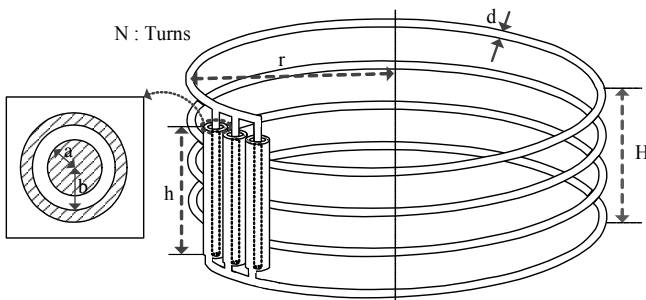
최근 자기 공진을 이용한 무선전력전송 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 방식의 무선전력전송에서 효율적인 전력 전송을 위해서는 자기 공진 코일의 설계가 매우 중요하다. 지금까지의 자기 공진 코일은 평판형 커패시터를 사용한 단일 루프 코일[1] 또는 오직 자기 커패시턴스(Self Capacitance)를 가지는 스파이럴, 헬리컬 코일이 주로 사용됐다[2]. 하지만, 실제 제작 측면에서 평행평판을 가지는 공진코일은 작게 제작할 수 없다. 별도의 커패시터가 없는 공진 코일은 공진 주파수를 원하는 값으로 조정하기 힘들고, 자기 커패시턴스(Self Capacitor)가 매우 작기 때문에 외부환경의 영향을 받아 공진주파수가 이동하여 전력전송 효율을 떨어뜨린다. 또한 일반적인 집중 커패시터 소자(Lumped Capacitor)를 사용하는 경우, Q-factor가 낮아서 공진 코일의 전력 전송 효율을 낮추고, 내압이 낮아 높은 전압을 견딜 수 없다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 동축형 구조를 가지는 자기 공진 코일을 제안한다. 동축형 커패시터는 공진 코일 구조 내에 작게 포함할 수 있고, 길이에 따라서 커패시턴스를 조절할 수 있어 공진 주파수 조절에 용이하다. 또한 집중 커패시터 소자(Lumped Capacitor)에 비해 높은 Q-factor를 가져서 공진 코일의 전력전달 성능에 영향을 주지 않고, 동축 구조 내 유전체의 종류에 따라 높은 내압을 견딜 수 있다. 동축 구조는 제작 시 상용 동축 케이블을 사용할 수 있어 제작 가격을 낮출 수 있다.

여기서 r, H, a, b, h는 미터 단위이고, ε는 동축 구조 내 유전체의 유전율이다.

그림 1과 같이, 동축형 커패시터는 헬리컬 코일의 높이에 맞춰서 코일 옆면으로 다수가 병렬로 연결한다. 이는 공간상 커패시터를 효율적으로 배치하여 크기를 줄일 수 있고, 커패시터를 병렬로 연결함으로써 공진 주파수를 조정할 수 있다. 또한 본 논문에서는 공진 코일의 전력전달 성능을 높이는 방법으로 도선을 병렬로 연결하였다. 이러한 특징들을 그림 2의 등가회로로 나타낼 수 있다.

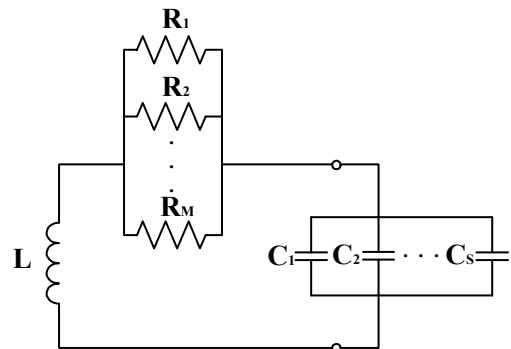
2. 본 론

2.1 동축형 구조를 가지는 공진 코일 구조



<그림 1> 동축형 구조를 가지는 헬리컬 공진 코일

그림 1은 제안한 공진 코일의 구조를 나타낸다. r은 헬리컬 코일의 반지름, H는 높이, d는 코일의 도선 두께, N은 턴수, h는 동축 구조의 길이, a는 동축 구조 내부 도체의 반지름, b는 외부 도체의 반지름이다. 공진 코일의 공진 주파수( $f_r$ )는 헬리컬 코일의 자기 인덕턴스( $L_{self}$ )와 자기 커패시턴스( $C_{self}$ )와 동축 구조의 커패시턴스( $C_{coax}$ )에 의해  $f_r = 1/(2\pi\sqrt{L(C_{self} + C_{coax})})$ 로 결정된다. 하지만, 헬리컬 코일의 자기 커패시턴스( $C_{self}$ )는 매우 작은 값이기 때문에, 공진 주파수는 헬리컬 코일의 자기 인덕턴스( $L_{self}$ )와 동축 구조의 커패시턴스( $C_{coax}$ )에 의해 주로 결정되며,  $L_{self}$ 와  $C_{coax}$ 는 다음과 같이 결정된다[3][4].



<그림 2> 병렬 구조를 가지는 공진 코일의 등가회로

그림 2는 도선과 커패시터가 병렬로 연결된 구조를 가지는 공진 코일의 등가회로이다. 이때 병렬 연결한 도선의 인덕턴스를 하나의 L로 표현한 것은 모든 도선의 전류가 동시에 같은 경로로 흐르기 때문에 전체 인덕턴스는 하나의 도선을 사용할 때와 다르지 않다. 등가회로에서  $R_{1,2,...,M}$ 은 각 도선의 저항이고,  $C_{1,2,...,S}$ 는 각 커패시터의 커패시턴스이다.

$$R_{total} = R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_M \quad (3)$$

$$C = \sum_{i=1}^S C_i \quad (4)$$

도선을 병렬로 연결하면 식 (3)과 같이 공진 코일의 저항이 낮아져 Q-factor를 높일 수 있다. 또 커패시터를 병렬로 연결하면 식 (4)와 같이 커패시턴스를 조절할 수 있어서 공진 주파수를 조절할 수 있다.

2.2 검 증

실험적으로 검증하기 위하여 두 종류의 공진 코일을 제작하였다. 공진 코일은 14 AWG인 리츠(Litz) 와이어를 사용하여 제작하였다. Type 1은 하나의 도선만을 사용하였고, Type 2는 두선의 코일을 병렬로 연결하여 헬리컬 코일을 제작하였다. 구조는  $d = 2.33 \text{ mm}$ ,  $H = 9 \text{ cm}$ ,  $r = 25.1 \text{ cm}$ ,  $N = 9$  이다. 측정을 위해 LCR미터 (Agilent 4285A)를 사용하였다. 또한 커패시터 구조가 없는 헬리컬 코일의 자기 커패시턴스(self capacitance)를 측정하기 위해 회로망 분석기 (Agilent 4395A)를 사용하였다. 측정된 전기적 변수는 표 1과 같다.

〈표 1〉 동축형 공진코일의 전기적 변수

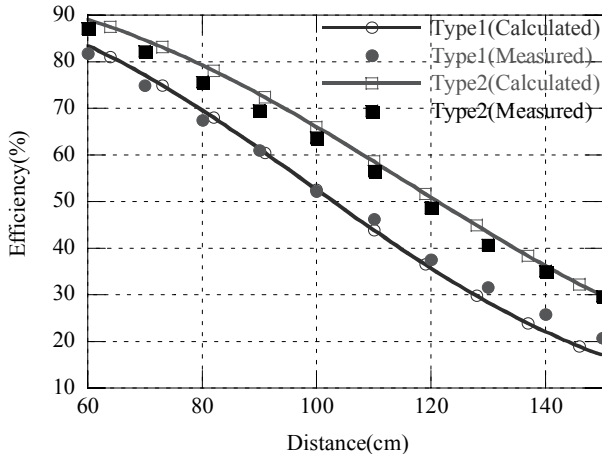
[참 고 문 헌]

형태	L ( $\mu\text{H}$ )	R ( $\Omega$ )	C(pF)		$f_r$ (MHz)	Q-값	
			Self	동축			
Type 1	Tx	69.28	1.54	12.13	169.74	1.4179	401.26
	Rx	69.00	1.56	12.47	170.50	1.4164	392.93
Type 2	Tx	69.70	1.00	10.72	169.74	1.4191	623.79
	Rx	69.80	0.99	10.17	170.50	1.4190	630.65

[1] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics*, Vol. 323, pp. 34-48, January 2008  
 [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science express*, Vol. 317, pp. 83-86, June 2007  
 [3] Harold A. Wheeler, "Simple Inductance Formulas For Radio Coils", *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 16, pp 1398-1400, Oct 1928  
 [4] David M. Pozar, "Microwave Engineering(3rd Ed.)", Wiley&Sons, p. 55, 2005  
 [5] <http://www.gigalane.com/>

식 (1)를 통해 계산한 Type 1, 2의 인덕턴스는 64.62  $\mu\text{H}$ 으로 4 ~ 5  $\mu\text{H}$ 의 차이가 있다. Type 1의 헬리컬 코일 경우, 사람의 몸이나 외부적인 물체가 공진 코일에 근접하게 되면, 자체 공진 주파수는 최대 210 kHz까지 변했다. 이러한 영향을 줄이고 목표 공진 주파수로 맞추기 위해 그림 1에서와 같이 동축 커패시터 구조를 제작하여 헬리컬 코일과 수직으로 연결하였다. 이때 동축 케이블은 기가레인(Gigalane)사의 MF141 케이블을 사용하였다[5]. 동축 케이블의 내압은 1900  $\text{V}_{\text{rms}}$ 이며, 구조는  $a = 0.46 \text{ mm}$ ,  $b = 1.47 \text{ mm}$ ,  $h = 8.5 \text{ cm}$ 이고, 내부 유전체는 테플론( $\epsilon_r = 2.08$ )이다. 목표 공진주파수 1.4 MHz를 위해 동일한 20개의 동축 커패시터를 병렬로 연결하였다. 측정값은 표1과 같다. 식(2)과 (4)를 통해 구한 169.32 pF과 거의 동일하다. 측정 결과 모든 공진 코일의 공진 주파수는 1.416 ~ 1.419 MHz로 목표 주파수와 거의 동일했다. 하지만, 두 종류 공진 코일의 다른 점은 Q-factor이다. 비교하면 Type 1보다 Type 2의 값이 약 1.6배 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 두 종류의 공진 코일의 성능 차이를 알아보기 위해, 회로망 분석기 (Agilent 4395A)를 사용하여 두 공진 코일 사이의 거리를 60 cm에서 10 cm 간격으로 150 cm까지 바꾸어 가며 투과계수 ( $S_{21}$ )를 측정하였다. 측정 시 Tx와 Rx 공진 코일 각각에 단일 원형 루프의 커플링 코일을 배치하고, 공진 코일과 단일 루프 커플링 코일 사이의 거리를 조정하여 최대전력전송이 되도록 임피던스 매칭을 해주었다[2]. 또한 측정된 효율과 이론적인 효율을 비교하기 위해 참고문헌[2]의 전송 효율 식을 사용하였다. 결과는 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 2가지 종류 공진 코일의 측정 효율과 이론적 효율의 비교

그림3에서 볼 수 있듯이, 측정된 효율은 이론값과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한, Type1에 비해서 Q값이 큰 Type2의 전력전송 효율이 더 좋다는 것을 볼 수 있다.

### 3. 결 론

제한된 동축 구조를 가지는 자기 공진 코일은 외부영향에 의한 공진 주파수의 변화를 줄일 수 있고, 원하는 공진 주파수로 조정할 수 있다. 또한 공진 코일의 내압을 높일 수 있고, 크기를 작게 제작할 수 있다. 특히, 여러 도선을 병렬로 연결함으로써 코일의 저항을 줄이고 공진 코일의 효율을 높일 수 있다. 제한된 자기 공진 코일은 자체 공진형 무선 전력전송 시스템의 설계에 있어서 현실적인 문제를 해결할 수 있을 것이다.