

# 자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구

## Study on Arrangement of Self-Resonant Coils in Wireless Power Transfer System Based on Magnetic Resonance

김진욱\* · 지현호\*\* · 최연규\*\*\* · 윤영현\*\*\* · 김관호\*\*\*\* · 박영진\*,\*\*\*\*

Jin-Wook Kim\* · Hyeon-Ho Ji\*\* · Yeon-Gyu Choi\*\*\* · Young-Hyun Yun\*\*\* ·  
Kwan-Ho Kim\*\*\*\* · Young-Jin Park\*,\*\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 따른 특성을 제시한다. 공진 코일에는 헬리컬 구조를 사용하였다. 공진 코일을 설계하기 위해 헬리컬 코일의 인덕턴스와 커패시턴스를 구하였다. 유한 요소법을 이용하여 설계된 공진 코일을 시뮬레이션 하였고, 송수전 공진 코일 간의 다양한 배열에 대한 특성을 해석하였다. 검증을 위하여 시제품을 제작하였고, 수직 및 평행 배열일 때의 효율을 측정하였다. 측정 결과, 평행 배열일 때는 50 %의 전달 효율을 얻을 수 있는 구간이 코일 지름의 2배 이내였고, 수직 배열일 때는 코일 지름의 1.5배 이내였다. 제작한 시제품은 평행 배열된 송수전 공진 코일이 40 cm 간격일 때 최대 84.25 %의 효율을 보였다.

### Abstract

In this paper, characteristics on arrangement of coils in the wireless power transfer system based on magnetic resonance is presented. A helical structure is used for a self-resonant coil. To design a proper self-resonant helical coil, its inductance and capacitance are obtained. Using the finite element method, the self-resonant coil designed is simulated and characteristics of wireless power transfer with various arrangement between Tx and Rx resonant coils is analyzed. For verification, a prototype of a wireless power transfer system based on magnetic resonance is fabricated and efficiency of different arrangement such as both vertical and parallel arrangements is measured. From the measurement, transmission efficiency of 50 % for parallel arrangement is obtained within twice the diameter of the coil while for the vertical arrangement it is measured within one and a half diameter of the coil. Maximum efficiency of 84.25 % is observed at the distance 40 cm from the resonant coil in the case of parallel arrangement.

Key words : Magnetic Resonance, Wireless Power Transmission(WPT), Helical Coil

### I. 서 론

1900년대 니콜라 테슬라는 전력의 무선 전송에

「본 연구를 위해 전자과 해석 툴 Ansoft HFSS를 지원해 주신 Ansoft Korea에 감사의 말씀을 드립니다.」

\*과학기술연합대학원대학교 전력정보통신공학과(Power Electrical Equipment Information and Comm., UST)

\*\*한양대학교 전자정보시스템공학과(Electronic and Information System Eng., Hanyang University)

\*\*\*한양대학교 전자 및 통신공학과(Comm. and Electronic Eng., Hanyang University)

\*\*\*\*한국전기연구원(KERI)

· 논문 번호 : 20100309-017

· 교신저자 : 박영진(e-mail : yjpark@keri.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 6월 7일

관해 고민을 하였고<sup>[1]</sup>, 그 이후로 많은 사람들에 의해 무선 전력 전송 기술이 연구되고 있다. 무선 전력 전송(Wireless Power Transmission: WPT)은 물리적인 도선을 사용하지 않고 전력을 전달할 수 있는 기술이다. 과거에는 이 무선 전력 전송 기술의 필요성을 실감하지 못했지만, 많은 휴대 전자 기기들을 사용하고 있는 현재에 이르러 그 필요성이 매우 많이 부각되고 있다.

현재까지 다양한 방식의 무선 전력 전송 기술이 소개되었다<sup>[2],[3]</sup>. 근거리에서 자기 유도 방식을 이용한 방식, 마이크로파 방식을 이용한 레테나 방식 등이 대표적이다. 또한, 최근에 기존 전자기 유도 방식 무선 전력 전송의 단점의 일부를 해결할 수 있는 새로운 방식인 자기 공명 방식이 제안되었다.

자기 공명 방식은 2007년 미국 MIT 대학의 Marin Soljačić 교수팀에 의해 증명된 무선 전력 전송 방식으로 마이크로파 방사 방식과 비교하여 비방사형 자기장을 이용하기 때문에 전자파 장애 문제가 적고, 전자기 유도 방식에 비해 전력 전달 효율이 높은 장점이 있다<sup>[4],[5]</sup>. 이러한 기술적 장점 때문에, 국내에서도 이 방식에 대해서 연구 결과가 활발히 수행되고 있다<sup>[3]</sup>.

자기 공명 방식은 그림 1과 같이, 공진 코일과 소스와 부하에 연결되는 코일들로 구성되어 있다. 이 중 전력 전달 시에 공진이 일어나는 송수전부의 공진 코일의 특성에 따라 전력 전달 효율 및 거리가 결정된다. 이 공진 코일의 특성 해석이 매우 중요하며, 여러 참고문헌에서 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 기술에 대하여 보고하였다. 참고문헌 [4]에서처럼, 자기 공명 코일을 이용한 무선 전력 전송은 다양한 특징을 가지고 있다. 특히, 자기 공명 코일간의 방향성에 대한 영향이 일반적인 전자기 유도 방식에 비해 적은 장점이 있다.

현재까지 보고된 문헌들에서는 자기 공진형 코일의 특성 및 전송 효율에 대한 보고가 많았고, 공진 코일에 대한 방향성에 대한 조사 결과는 극히 적다. 코일의 방향성에 관해 임피던스 개념으로 접근한 참고문헌 [6]이 있지만, 헬리컬 코일의 설계 방법이 나타나 있지 않고 공진 코일의 배열에 따른 필드 분포에 대한 내용이 없기 때문에 현상을 이해하기 힘들다. 본 논문에서는 공진 코일의 방향성에 대한 특성

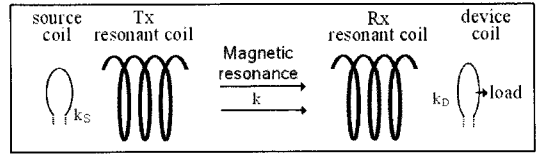


그림 1. 자기 공진 코일 사이의 자기 공명 커플링 방식 설명

Fig. 1. Illustration of magnetic resonant coupling between self-resonance coils.

을 전자파 해석 툴을 이용하여 분석하였다. 우선 자기 공명 코일로는 헬리컬 구조를 사용하였고, 코일의 설계를 위하여 코일의  $L, C, R$ 를 계산하였다. 또한, 코일의 방향성에 대한 3차원 전자파 해석을 위하여 Ansoft의 HFSS<sup>[7]</sup>를 사용하였다. 해석 결과를 활용하여, 수십 센티미터 이내에서 70 % 높은 효율을 갖는 전력 전송 시제품을 제작하여 시험하였다.

본문에서는 우선 헬리컬 코일의 설계 방법을 제시하며, 설계된 공진 코일을 통해 평행, 수직 배열일 때의 상호 인덕턴스 및 커플링 계수를 알아본다. 그리고 공진 코일이 평행, 수직 배열인 경우에 대해서 각각 시뮬레이션을 하고, 실제 시제품을 제작하여 공진 코일의 배열에 따른 특성을 제시한다.

## II. 본 론

그림 2는 자기 공명 무선 전력 전송 시스템의 등가회로를 나타낸 것이다. 송전부에는 소스, 매칭 회로, 소스 코일과 송전부 공진 코일로 이루어져 있다. 그리고 수전부는 수전부 공진 코일과 디바이스 코일, 정류 회로, 부하로 구성된다. 에너지 전송 방식은 매칭 회로를 통하여 입력되는 시변 전류는 소스 코일에 인가되고, 소스 코일은 송전부 공진 코일에 전자기 유도 방식으로 전력을 전달한다. 송전부 공진 코일은 자체 공진을 통해 전력을 저장하고 있다가 같은 공진 주파수를 가지는 수전부 공진 코일이 있을 경우 감쇄파 모드(evanescent wave mode)를 통해 에너지 전달 채널을 형성하여 수전부 공진 코일로 전력을 전달한다.

공진하는 두 물체 사이에 일어나는 현상은 coupled mode theory<sup>[8]</sup>를 이용해서 다음과 같이 선형 방정식으로 나타낼 수 있다. 시간 성분은  $e^{-i\omega t}$ 를 사용하였다.

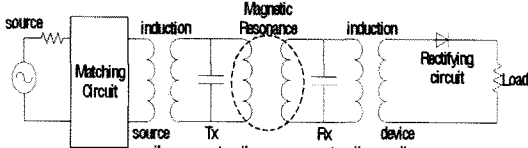


그림 2. 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 시스템 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of WPT based on magnetic resonance.

$$\frac{da_1}{dt} = -(i\omega_1 + \Gamma_1)a_1 + ix_{12}a_2 \quad (1-1)$$

$$\frac{da_2}{dt} = -(i\omega_2 + \Gamma_2)a_2 + ix_{21}a_1 \quad (1-2)$$

$a_1, a_2$ 는 각각 송전부 공진 코일과 수신부 공진 코일에서의 모드 크기를 나타내고,  $\Gamma_1, \Gamma_2$ 는 각 공진 코일의 감쇄 계수,  $\kappa$ 는 두 코일 사이의 커플링 계수를 나타낸다. 그리고  $\omega_1, \omega_2$ 는 각 공진 코일의 공진 주파수이다. 커플링이 생기면 공진 코일이 원래 가지고 있던 공진 주파수가 커플링 계수  $\kappa$ 에 의해 이동하게 되는데, 그 정도는 식 (2)와 같다<sup>[4]</sup>. 즉,  $\kappa$ 가 클 경우(예를 들면 간격이 좁을수록), 두 개의 공진 주파수가 생김을 알 수 있고, 거리가 멀어질수록 작아져 단일 공진 주파수처럼 동작하게 된다. 이러한 결과는 다음의 시뮬레이션 결과에서 보일 것이다.

$$\Delta\omega = 2\sqrt{(x^2 - \Gamma^2)} \quad (2)$$

두 공진 코일이 동일하고  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ 라고 가정하여 식 (1-1)과 식 (1-2)에서 방정식을 풀면, 식 (3-1)과 (3-2)와 같이 각 공진 코일에서의 모드를 구할 수 있다. 각 모드는 cos과 sin 형태로 나타나기 때문에 항상 한 쪽이 최대이면 다른 쪽이 최소가 되는 형태로 모드가 생성되어야 함을 알 수 있다.

$$a_1(t) = a_1(0)e^{-i\omega t} e^{-\Gamma t} \cos(xt) \quad (3-1)$$

$$a_2(t) = ia_1(0)e^{-i\omega t} e^{-\Gamma t} \sin(xt) \quad (3-2)$$

### 2-1 헬리컬 코일 설계

공진 코일을 설계하기 위해서는 코일이 가지는 인덕턴스와 커패시턴스가 필요하다. 본 논문에서는 수 MHz 정도의 저주파를 사용하기 때문에 코일의

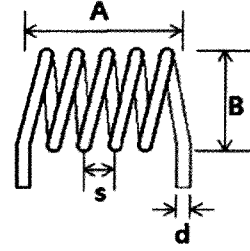


그림 3. 헬리컬 코일

Fig. 3. A helical coil.

인덕턴스와 커패시턴스는 주파수에 따라 변하지 않는다고 가정한다.

그림 3에는 일반적인 헬리컬 코일과 설계 시에 필요한 변수들을 나타내었다.  $A$ 는 헬리컬 코일의 높이,  $B$ 는 코일의 지름,  $d$ 는 코일을 이루는 도선의 두께,  $s$ 는 헬리컬 코일의 pitch를 나타낸다. 식 (4)~(7)에 헬리컬 코일에 대한 인덕턴스( $L$ )<sup>[9]</sup>, 커패시턴스( $C$ )<sup>[10]</sup>, 전도 저항( $R_0$ ), 방사 저항( $R_r$ )<sup>[3]</sup>을 나타내었다. 이 때  $l$ 은 도선의 전체 길이,  $c$ 는 진공에서의 빛의 속도,  $\sigma$ 는 도체의 도전율,  $\omega$ 는 각주파수,  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율,  $\epsilon_0$ 는 진공에서의 유전율,  $\epsilon_r$ 은 유전상수,  $r$ 은 코일의 반지름,  $n$ 은 감은 횟수를 나타낸다. 각 수치가 식 (4)와 식 (5)에서는 밀리미터(mm) 단위이고, 식 (6)과 식 (7)에서는 미터(m) 단위이다.

$$L(nH) = \frac{B^2 n^2}{0.45B + A} \quad (4)$$

$$C(pF) = \frac{B\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1} \left[ \frac{(n-1)(s-d)}{d} \right]} \quad (5)$$

$$R_0(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi d} \quad (6)$$

$$R_r(\Omega) = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left[ \frac{\pi}{12} n^2 \left( \frac{\omega r}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^2} \left( \frac{\omega A}{c} \right)^2 \right] \quad (7)$$

### 2-2 자기 공명 코일간의 상호 인덕턴스 및 커플링 계수

헬리컬 코일에서 평행 배열일 때와 수직 배열일 때의 상호 인덕턴스는 참고문헌 [11]을 통해 각각 식 (8), 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 각 공진 코일에서의 전류 분포는 일정하다고 가정하고, 헬리컬 코일을 단일 원형 루프가  $N$ 회 감긴 형태로 생각

한다.  $r$ 은 코일의 반지름,  $z$ 는 코일 사이의 간격,  $\rho$ 는 수직 배열에서  $\rho$  방향으로 벗어난 정도, 식 (10)의  $E$ 와 식 (11)의  $K$ 는 각각 타원 함수를 나타낸다<sup>[11]</sup>. 그리고 식 (12)의  $m$ 은 타원 함수의 변수를 말한다. 각 배열에서 커플링 계수는 식 (13)으로 구할 수 있다<sup>[4]</sup>.

$$M_{\parallel} = \frac{N^2 \mu r^4}{2(r^2 + z^2)^{3/2}} \quad (8)$$

$$M_{\perp} = \frac{N^2 \mu r^2}{2\rho} \left( \frac{m}{4r\rho} \right)^{1/2} \left( \frac{2-m}{2-2m} E(m) - K(m) \right) \quad (9)$$

$$K(m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\theta}{\sqrt{1-m\sin^2\theta}} \quad (10)$$

$$E(m) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-m\sin^2\theta} d\theta \quad (11)$$

$$m = \frac{4r\rho}{(r+\rho)^2 + z^2} \quad (12)$$

$$x = \frac{\omega M}{2\sqrt{L_1 L_2}} \quad (13)$$

### 2-3 평행 배열 시뮬레이션

표 1은 시뮬레이션에 사용한 헬리컬 공진 코일의 수치를 나타낸 것이다. 공진 코일에 전력을 인가하기 위해 소스 코일과 디바이스 코일을 각각 송수전부 공진 코일 근처에 위치시킨 후, 소스(디바이스) 코일에 50 Ω의 lumped port를 주었다. 시뮬레이션 시에 공진 코일에 급전을 하기 위한 소스 코일을 둔 것은 소스 코일에서 발생한 시변 자기장을 통해 송전부 공진 코일로 전류가 유도되면서 공진 코일의  $Q$  값은 그대로 유지하기 위함이다.

그림 4는 송수전 공진 코일이 평행 배열일 때(간격: 35 cm) 자기 공명 현상의 시뮬레이션 결과 중  $z$ -

방향으로의 자기장의 크기를 위상에 따라 나타낸 것이다. 그림에서처럼, 위상 변화에 따라서 송전부에서 수전부로 전력이 전달됨을 알 수 있다. 위상 변화는 포트에서 관찰된 값을 기준으로 하였다. 그림 4로부터 자기 공명형 무선 전력 전송 방식에 있어, 시간의 변화(위상 변화)에 따른 전력 전달 방식을 쉽게 이해할 수 있다. 즉, 송전부 공진 코일에서 여기된 전력은 거리가 멀리 떨어져 있어, 커플링 계수가 낮더라도 동일 공진 주파수를 갖는 수전부 공진 코일에 전달된다. 특히, 기존의 전자기 유도와 같이 수전 코일에 송전 코일의 자속 쇄교량이 극히 미약하지만, 감쇄파 모드의 강한 커플링으로 전력 전송 효율이 매우 높음을 알 수 있다. 또한, 설계된 공진 코일은 수전부 공진 코일이 아닌 곳에 전력 전달이 되지 않고, 다른 방향으로 모두 감쇄되어 전력이 방사되지 않음을 확인할 수 있다.

그림 4의 시뮬레이션에서 포트 1의 반사계수  $S_{11}$ 은 -10 dB이며, 투과계수  $S_{21}$ 은 -4 dB이다. 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 구한 헬리컬 코일의 공진 주파수는 12.13 MHz이며, 실제로 HFSS 시뮬레이션을 통해 구한 공진 주파수는 22 MHz였다. 표 1의 공진 코일은 커패시턴스를 구하는 식 (5)에서  $(n-1)(s-d)/d$  값이 1.4로 아주 작기 때문에 수식에 사용된  $\cosh$  역함수 값의 기울기가 크다. 따라서 이 차이는 코일의 pitch가 작기 때문에 도선 사이의 커패시턴스 값의 오차로 인한 것으로 생각된다. 만약 헬리컬 코일의 pitch가 더 커진다면 이 오차는 줄어들 수 있다.

송전부 공진 코일과 수전부 공진 코일 사이의 간격은 공진 코일의 중심에서 중심 사이의 간격이 평행 배열과 수직 배열일 때 모두 35 cm가 되도록 하였다. 이때 평행 배열에서 이론적인 커플링 계수는 7.5216e5, 식 (2)를 이용해 구한 기모드(odd mode) 주파수는 21.44 MHz, 우모드(even mode) 주파수는 22.56 MHz였다. 실제 시뮬레이션에서는 우모드, 기모드의 주파수가 차이가 크지 않아서 나타나지 않았다. 주파수 분리가 일어나지 않는 조건에서는 식 (3-1)과 식 (3-2)와 같이 모드가 형성되므로, 한 쪽이 최대일 때 다른 쪽이 최소가 되도록 필드가 형성된다.

### 2-4 수직 배열 시뮬레이션

그림 5는 송수전 공진 코일이 수직 배열일 때(간

표 1. 시뮬레이션에 사용한 코일의 수치  
Table 1. Dimension of coils for simulation.

	턴수	코일 지름	도선 두께	Pitch
헬리컬 공진 코일 (mm)	5	200	4	5.4
단일 원형 소스 코일(mm)	1	100	4	0

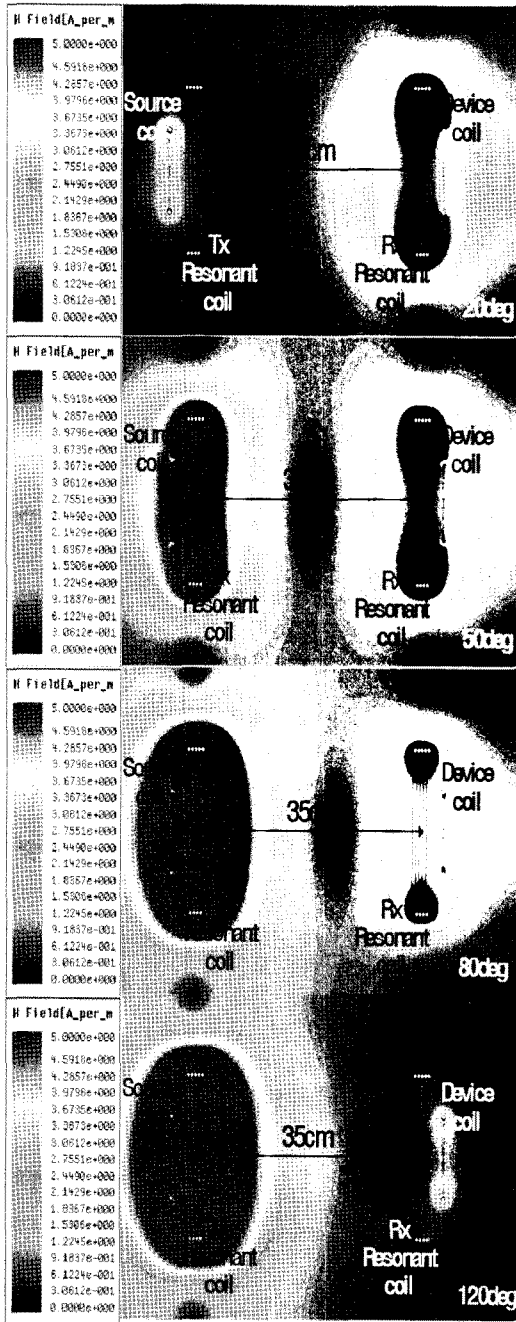


그림 4. 평행 배열에서의 자기 공명 현상 시뮬레이션  
 Fig. 4. Simulated result of magnetic resonance in parallel-arranged system.

격: 35 cm) 자기 공명 현상의 시뮬레이션 결과를 위 상에 따라 나타낸 것이다. 위상 변화에 따라 수직 배 열에서도 송전부에서 수전부로 전력이 전달되는 것 을 확인할 수 있다. 이때의 위상은 포트에서 본 위상

의 변화이다. 시뮬레이션에 사용한 코일은 그림 4와 같으나, 배열만 수직으로 한 것이다. 시뮬레이션 결 과,  $S_{11}$ 은  $-7$  dB,  $S_{21}$ 은  $-5.9$  dB이다. 평행 배열과 비 교하여 투과 계수가 작다. 이는 송전부와 수전부 공 진 코일 사이의 커플링 계수가  $4.5921e5$ 로 평행 배 열 일 때보다 작기 때문이다. 그리고 식 (9)를 이용하여 수직 배열에서 구한 이론적인 커플링 계수와 식 (2) 를 이용해 구한 기모드 주파수는  $21.48$  MHz, 우모드 주파수는  $22.52$  MHz로 두 모드 사이에 큰 차이는 없 었다. 수직 배열 또한 평행 배열과 마찬가지로 한 쪽 이 최대일 때 다른 쪽이 최소가 되는 형태로 필드가 형성되었다.

그림 4를 통해서 송수전부 사이가 평행 배열일 때 뿐만 아니라 수직 배열일 때에도 전력 전달이 가능 하다는 것을 알 수 있다. 기존의 전자기 유도 방식으 로는 송수전부 사이가  $90^\circ$ 인 경우, 전력 전달에 있어 효율이 아주 낮았다. 하지만 자기 공명 방식을 이용 하면 수직 배열에서도 효율적으로 전력 전달이 가능 함을 알 수 있다.

제시된 시뮬레이션 결과로부터, 공진 코일에 여 기 된 전력은 지향성 방사 안테나처럼 일정 방향으로 방사하지 않고, 동일 공진 주파수를 갖는 구조에만 전력 이 전달됨을 알 수 있다. 또한, 위상  $85^\circ$ 의 결 과에서처럼 송전부와 수전부 공진 코일 사이에 매우 작은 전력 전송 채널이 형성되며, 이 채널에서 두 공 진 코일 간에 매우 강한 커플링이 일어남을 알 수 있 다. 이러한 결과는 다수의 공진 코일이 평행 또는 수 직으로 배열되어 있을 경우에도 거리와 공진 코일의 특성에 따라 전력 전달이 이루어질 수 있음을 말 한다.

## 2.5 시제품 제작 및 측정

공진 코일의 방향성 특성을 시험하기 위해, 시뮬 레이션 결과와 헬리컬 코일의 설계 값들을 이용하여 실제 자기 공진 코일을 제작하였다. 그림 6(a)는 헬 리컬 공진 코일의 사진이고, 그림 6(b)는 실제 제작 한 코일의 사진과 이를 이용한 전력 전송 시제품의 사진이다. 그림에서 Tx는 송전부 공진 코일과 그 공 진 코일에 전력을 인가하는 소스 코일이 같이 있는 형태이다. 그리고 Rx는 수전부 공진 코일과 그 공진 코일로부터 전력을 수전하는 디바이스 코일로 이루

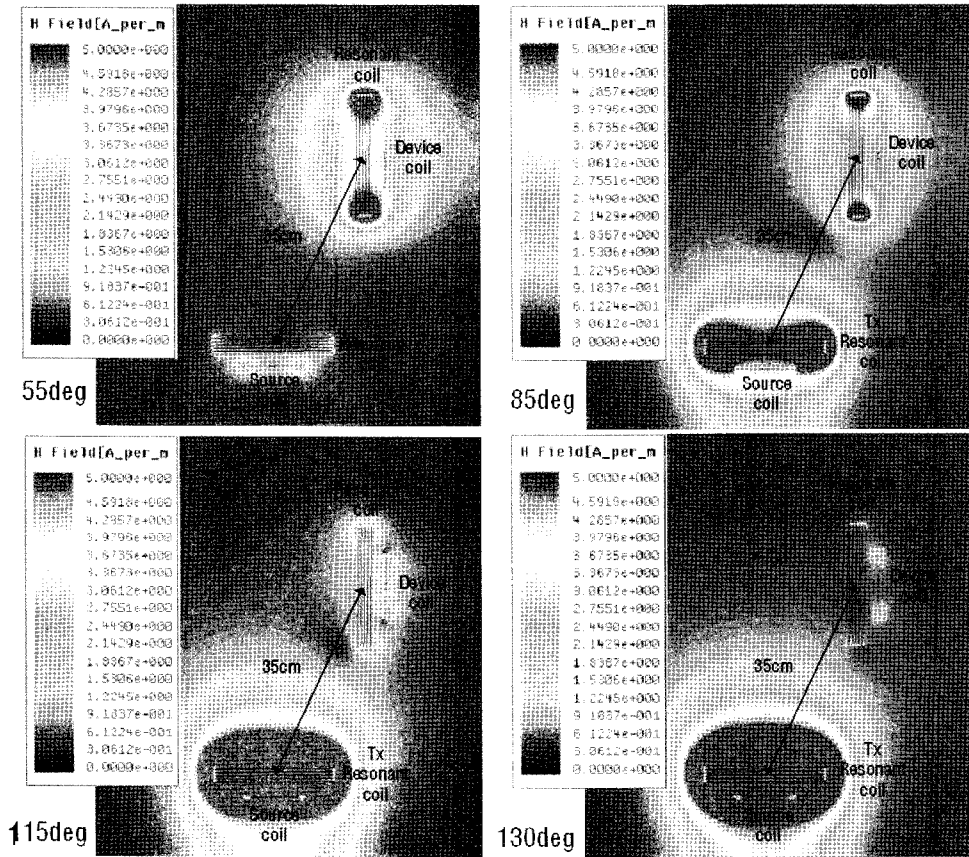
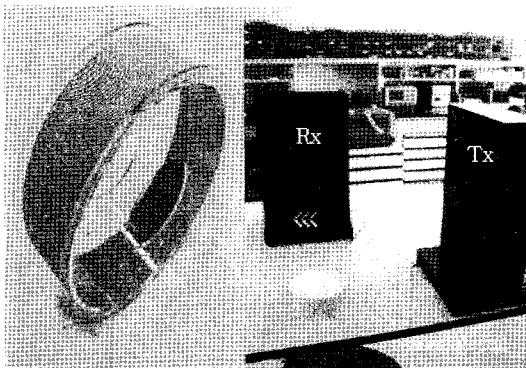


그림 5. 수직 배열 시뮬레이션

Fig. 5. Simulated results of perpendicular-arranged coils.



(a) 헬리컬 코일 (a) Helical coil  
(b) 동작 사진 (b) Proto-type WPT system

그림 6. 제작한 시제품

Fig. 6. Photograph of the fabricated proto-type WPT system.

어져 있다. 그림 6(b)는 송전부에 수직으로 두 공진 코일을 놓은 후 부하 LED가 점등되는 것을 보여주

는 사진이다. 코일은 1 mm 리츠 와이어를 사용하여 지름 26 cm, 높이 8 cm 인 아크릴 케이스에 78번 감아서 제작하였다. 이 때 수작업을 통해 헬리컬 코일을 제작하면 오차가 커지기 때문에 최대한 오차를 줄이고자 리츠 와이어를 사용하였다. 리츠 와이어는 미세 도선을 꼬아서 하나의 도선처럼 만든 형태로 발생하는 자기장 세기가 같은 굵기의 단일 도선보다 크고, 선의 형태가 유연하여 제작이 용이한 장점이 있다. 그리고 유연한 리츠 와이어를 지지하면서 헬리컬 모양으로 만들어줄 수 있도록 원통형 아크릴을 사용하였다.

표 2는 그림 6(a)의 헬리컬 코일의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스,  $Q$  factor, 공진 주파수 등을 측정된 결과이다. 저항은 도선의 도선율에 의한 전도 저항을 측정하였다. 이 때 코일의 방사 저항은 이론적인 계산 결과,  $20 \sim 30 \mu\Omega$  정도이기 때문에 무시하였다. 그리고 인덕턴스는 RLC 미터(EXTECH Instruments,

표 2. 그림 5의 헬리컬 코일의 측정 결과  
Table 2. Measured results of the helical coil.

		$R_0$ ( $\Omega$ )	$L$ (mH)	$C$ (pF)	$Q$	$f_r$ (kHz)
공진 코일	수식	2.42	2.088	17.44	4,529	834
송전부 공진 코일	측정	3.2	2.074	15	3,671	901.5
수전부 공진 코일	측정	3.2	2.074	15.3	3,638	893.5

LCR meter 380193)로 측정하였고, 커패시턴스는 공진 주파수로부터 계산하여 값을 나타내었다. 공진 주파수는 벡터 회로망 분석기를 사용하여 반사 계수를 측정 후 이 값의 허수 성분이 0이 되는 값을 추출하여 구하였다.  $Q$ 값은 실제 측정이 힘들어서 측정 한 저항과 인덕턴스, 공진 주파수로부터  $\omega L/R$ 로 계산한 값이다. 인덕턴스는 거의 동일한 값을 가졌지만, 커패시턴스가 2 pF 정도 차이가 있어, 결과적으로 수식으로 구한 공진 주파수와 실제 측정된 공진 주파수 사이에 70 kHz 정도의 차이가 있었다. 오차는 있지만 공진 코일의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스, 공진 주파수가 거의 일치함을 알 수 있다. 실제 제작에서는 표 2처럼 0.9 MHz 정도의 공진 주파수를 가지는 코일을 설계하여 사용하였다.

그림 6(b)는 제작된 공진 코일을 이용하여 제작한 무선 전력 전송 시제품이다. 부하로써 LED를 사용하였다. 입력은 Agilent 33250A 신호 발생기(max 500 mW)를 사용하였다. 그림에서처럼, 두 개의 수전부 공진 코일은 송전부 공진 코일에 수직이 되도록 배치하여 수직 배열일 때도 LED가 점등된 것을 알 수 있다.

그림 7은 제작한 시제품을 통해 송수전부의 간격에 따라 효율을 측정한 결과이다. 측정 결과, 40 cm 간격에서 최대 84.25 %의 효율을 보였고, 간격이 증가함에 따라 효율이 급격히 떨어지는 형태로 나타났다. 40 cm 이하에서는 식 (2)와 같이 공진 코일 사이의 커플링 계수가 증가되고, 이로 인해 최대 전력 전달이 이루어지는 공진 주파수가 이동하게 되어 고려하지 않았다. 40 cm 간격 이상에서 측정한 효율은 송수전부의 임피던스 매칭에 의한 값을 보상해 주어 순수하게 송전부 공진 코일에서 수전부 공진 코일로

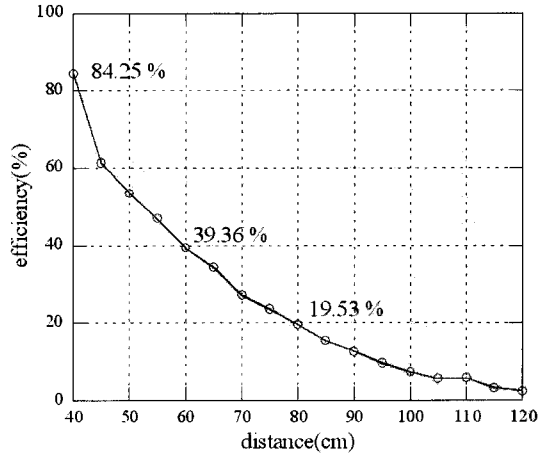
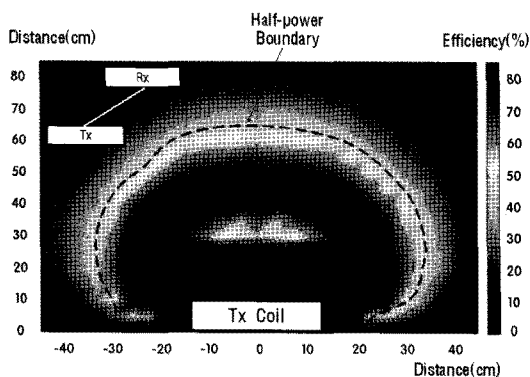


그림 7. 제작한 시제품의 효율 측정 결과  
Fig. 7. Efficiency measurement of proto-type WPT system.

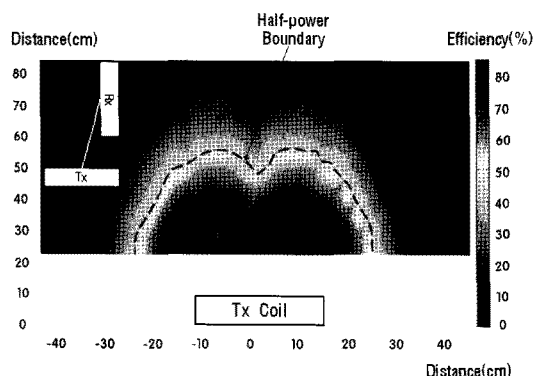
전달되는 양만 측정된 것이다. 수전부의 전력 측정에는 HP8563EC 스펙트럼 분석기를 사용하였다.

그림 8은 제작한 그림 6(a)의 공진 코일을 송수전부에 사용했을 경우에 50 %의 전력 전송 효율이 보이는 영역(3 dB Boundary)에서의 경계선을 나타낸 그림이다. 그림 8(a)는 송전부와 수전부를 평행하게 한 채 위치를 이동시키면서 효율을 측정한 결과이고, 그림 8(b)는 송전부와 수전부의 코일을 수직으로 한 채 위치를 이동시키면서 효율을 측정한 결과이다. 측정을 위해 5 cm씩 이동시키면서 수전부가 평행할 경우와 수직일 경우에 대해서 각각 스펙트럼 분석기를 통해 수전되는 전력량을 측정하는 방식으로 측정하였다. 송전부의 전력은 0 dBm으로 주고, 스펙트럼 분석기에서 측정되는 값을 통해 효율을 계산하였다.

실험 결과를 보면 어떤 크기의 송전부가 있을 경우, 송전부 코일이 가지는 3 dB boundary 이내에서는 어떤 방향으로 수전부가 위치해도 50 % 효율로 전력을 전달받을 수 있다. 송수전부가 서로 평행일 때는 코일 지름의 2배 이내에서 50 % 이상의 효율을 얻을 수 있었고, 수직일 때는 코일 지름의 1.5배 이내에서 50 % 이상의 효율을 얻을 수 있었다. 이러한 송수전 코일의 배열에 따른 영향이 적은 특징이 자기 공명 방식의 가장 큰 장점 중의 하나이다. 기존의 전자기 유도 방식의 경우 송수전 코일의 배열이 일치하지 않을 경우, 전력 전달 효율이 급격히 감소하



(a) 평행 배열  
(a) Parallel arrangement



(b) 수직 배열  
(b) Perpendicular arrangement

그림 8. 위치에 따른 효율 측정

Fig. 8. Results of efficiency measurement.

는 문제점이 있었다. 따라서 송수전부의 배열에 대한 장점을 이용하여 자기 공명 방식이 무선 전력 전송 응용 시스템 개발에 많은 활용이 가능할 것이라고 생각한다.

본 논문에서는 자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 코일의 배열에 따른 특성을 시뮬레이션 하였고, 실제 시제품을 제작하여 측정된 결과를 제시하였다. 공진 코일로 사용한 헬리컬 구조에 대해서 특정 공진 주파수를 갖도록 설계할 수 있는 수식을 제시하고, 실험에서 사용한 1 MHz 주파수 범위에서는 8% 오차 범위 이내에서 만족하는 결과를 얻었다. 그리고 제작한 시제품을 통해 전력 전달 효율을 측정된 결과, 평행 배열일 때는 코일 지름의 2배 이내에서, 수직 배열일 때는 코일 지름의 1.5배 이내에서 50%

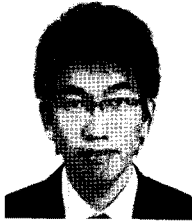
의 효율로 전력을 수전할 수 있었다. 제작한 시제품은 평행 배열일 때 40 cm 간격에서 최대 84.25%의 효율을 얻을 수 있었다. 이러한 자기 공명 무선 전력 전송은 전자기 유도 방식에 비해 공간의 제약을 덜 받을 수 있기 때문에 다양하게 활용할 수 있을 것으로 예측된다.

## 참고 문헌

- [1] Nikola Tesla, "Apparatus for transmitting electrical energy", *US patent* 1119732, 1914.
- [2] Hidetoshi Matsuki, *Frontier of Wireless Electric Power Transmission*, 세이모시 출판, 2009.
- [3] 대한전기학회 기획시리즈, "무선 전력 전송 기술의 동향 및 현황", *대한전기학회지*, 59(1), 2010년 1월.
- [4] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, vol. 317, Jul. 2007.
- [5] Aristeidis Karalis, J. D. Joannopoulos, and Marin Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer", *Annals of Physics*, vol. 323, 34, 2008.
- [6] Youndo Tak, Jongmin Park, and Sangwook Nam, "Mode-based analysis of resonant characteristics for near-field coupled small antennas", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009.
- [7] Ansoft, HFSS v.11.2.
- [8] Hermann A. Haus, Weiping Huang, "Coupled-mode theory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 10, Oct. 1991.
- [9] H. A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils", *Proc. IRE*, vol. 16, pp. 1398-1400; "Discussion", *Proc. IRE*, vol. 17, pp. 580-582, 1929.
- [10] Peter Vizmuller, *RF Design Guide: Systems, Circuits and Equations*, Artech House, 1995.
- [11] R. H. Good, "Elliptic integrals, the forgotten functions", *European Journal of Physics*, vol. 22, 2001.

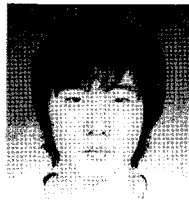


김진욱



2009년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)  
2009년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 전력정보통신공학과 석사과정  
[주 관심분야] 무선 전력 전송, mm wave 안테나

윤영현



2007년~현재: 한양대학교 전자 및 통신공학과 재학중  
[주 관심분야] 무선 전력 전송

지현호



2004년~현재: 한양대학교 전자정보시스템공학과 재학중  
[주 관심분야] 무선 전력 전송

김관호



1978년: 숭전대학교 전자공학과 (공학사)  
1980년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
2008년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
1980년~1983년: 한국전력공사  
1983년~현재: 한국전기연구원 전기정보망 연구센터 센터장  
[주 관심분야] 전파통신, 전력선통신 시스템, 무선에너지 전송, UWB 레이더 및 센서

최연규



2005년~현재: 한양대학교 전자 및 통신공학과 재학중  
[주 관심분야] 무선 전력 전송

박영진



1997년: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)  
1999년: 한국과학기술원 전기전자과 (공학석사)  
2002년: Universitaet Karlsruhe 전기전자과 (공학박사)  
2002년 11월~현재: 한국전기연구원 전기정보망연구센터  
2004년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 전력정보통신공학과 겸임교원  
[주 관심분야] Impulse UWB Image Radar, Impulse Radio Communication and Positioning, Automotive Radar, Digital Beam Forming(DBF), Wireless Power Transmission