

# 릴레이 코일을 포함한 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 분석 및 모델링

(Analysis and Modeling of Wireless Power Transfer Systems using Magnetically Coupled Resonator Scheme with Relay Coils)

박희수\* · 권민성 · 김민지 · 박현민 · 구현철\*\*

(Hee-Su Park · Min-Sung Kwon · Min-Ji Kim · Hyeon-Min Park · Hyun-Chul Ku)

## Abstract

In this paper, characteristics of wireless power transfer (WPT) systems using magnetically coupled resonance scheme with relay coils are investigated and modeled. Especially, asymmetric frequency splitting characteristics in over-coupled region of WPT with relays are measured and accurately modeled. Transmitter, receiver, and relay coils are modeled with R, L, C equivalent circuits. Using these circuit models and mutual inductances between coils, a WPT system is described with a linear matrix equation. For under-coupled region, a matrix is simplified considering only mutual inductances between adjacent coils. An analytical transfer characteristic of WPT system vs. distance is extracted using an inverse matrix that is acquired by Gauss elimination method for the simplified matrix. For over-coupled region, a matrix considering mutual inductances between non-adjacent coils is used to predict a frequency splitting characteristics accurately. A 6.3MHz WPT system with relay coils is implemented and measured. An accuracy of the model is investigated by comparing the output of the model with the measured results.

Key Words : Wireless Power Transfer(WPT), Magnetic Resonance, Relay, Frequency Splitting

---

\* 주저자 : 건국대학교 전자정보통신공학과  
\*\* 교신저자 : 건국대학교 전자공학부/전자정보통신공학과  
\* Main author : Department of Electronic,  
Information and Communication  
Engineering, Konkuk University  
\*\* Corresponding author : Department of Electronic  
Engineering, Konkuk University  
Tel : 02-2049-6118, Fax : 02-3437-5235  
E-mail : hcku@konkuk.ac.kr  
접수일자 : 2013년 10월 23일  
1차심사 : 2013년 10월 25일  
심사완료 : 2013년 11월 21일

## 1. 서 론

2007년 MIT 공대의 마린 솔라시치 연구팀에 의해 기존의 자기 유도 방식에 비해 원거리 무선 전력 전송(WPT: Wireless Power Transfer)이 가능한 자기 공명 방식[1]이 소개된 이후, 자기 공명 방식을 이용한 무선 전력 전송에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[2-9]. 최근 무선 전력 전송의 표준화 등의 필요성에 의해 무선충전연합(Alliance for Wireless Power :

A4WP)이 결성되었다. 세계 각국의 연구기관, 기업들이 참여하고 있다[3]. 향후 자기 공명 방식 무선 전력 전송의 적용분야가 다양화 될 것이다. 조명 분야의 경우 무선 전력 전송을 이용하면 전력선을 제거하여 미관상의 장점, 설치의 편의성, 다양한 조명 배치 가능성 등이 있어 무선 전력 전송 방식을 이용한 조명 설비가 향후 증가할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 향후 원거리의 조명에 무선으로 전력을 공급하기 위하여 릴레이를 사용하는 무선 전력 전송 시스템에 대하여 주파수 분할 특성, 전력 전송 특성을 분석하는 기법을 제시하고, 이를 실험적으로 검증한다.

무선 전력 전달시 공진이 일어나는 송·수신 코일의 특성에 따라 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 전송 효율 및 전달 거리가 결정되므로, 송·수신 코일의 특성 해석이 중요하다. 참고문헌 [2]에서는 소스 코일, 송신(TX) 코일, 수신(RX) 코일, 로드(부하) 코일로 구성된 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 각 코일을 R, L, C 직렬 연결된 등가 회로 모델로 간주하고, 각 코일 간의 상호 인덕턴스 값을 고려하여 전력 전달 특성을 분석하였다. 모의실험과 실측을 통하여 거리 또는 결합 계수 값에 따라 과 결합 / 임계 결합 / 부족 결합(Over / Critically / Under-Coupling)으로 나누고, 임계 결합 점 이후에는 거리에 따른 전송 전력이 급격히 줄어드는 것과 과 결합 영역에서는 주파수 분할 (Frequency Splitting)현상이 발생함을 보였다.

자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 경우 송신기와 수신기의 거리가 임계 결합 점을 지나는 경우 거리의 증가에 따라 전달되는 전력값 및 전송 효율이 급속히 감소한다. 이러한 거리적 한계를 극복하기 위해 높은 Quality Factor를 가지는 공진기를 설계하는 방법, 송·수신 코일의 크기를 크게 제작하는 방법, 송신 전력을 높이는 방법, 릴레이 코일을 추가하는 방법 등을 사용하였다[2-8].

지금까지 보고된 문헌들에서는 Coupled mode theory(CMT)[1] 또는 회로 이론을 통해 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템을 해석하였고, 릴레이 코일을 포함하는 방법을 사용하는 경우 과 결합 영역의 주파수 분할 현상에 대한 조사 결과는 미흡하였다. 또한 릴레이 코일의 개수가 증가 할수록 복잡한 해석이 필

요하다.

본 논문에서는 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템에서 릴레이 코일을 포함하여 임계 결합 지점의 전력 전달 거리를 확장하였고, 과 결합 영역에서 코일 개수와 거리에 따른 전력 전송 효율 및 주파수 분할 특성을 측정, 분석하여 이 값들을 예측하는 모델링 기법을 제시한다. 부족 결합 지점에서는 대각행렬 형태로 표현되는 선형 행렬식의 역행렬을 분석하여 해석적인 전달 함수를 도출하였다. 과 결합이 발생하는 지점에서 릴레이 코일이 포함되는 경우의 비인접 코일 간의 상호 인덕턴스의 영향이 주파수 분할에 미치는 영향을 분석하고, 주파수 분할을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모델링 기법을 제시한다. 릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템 시제품을 제작하고 특성을 측정, 분석하고 제시된 모델에 기반을 둔 예측값을 실측값과 비교하였다.

## 2. 릴레이 코일을 포함한 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템 및 해석

### 2.1 자기 공명방식 무선 전력 전송 시스템

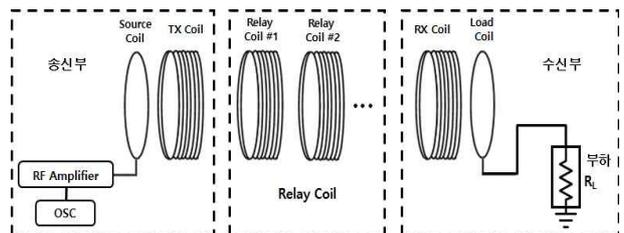


그림 1. 릴레이 코일을 포함하는 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템 구성도

Fig. 1. WPT system using magnetically coupled resonator scheme with relay coils

기본적인 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 송신부에는 전력 원과 직접 연결된 소스 코일, 소스 코일과 자기 유도 방식으로 연결되는 송신 코일로 구성되며, 수신부에는 수신 코일과 부하와 직접 연결된 로드 코일로 구성된다. 임계 결합되는 송신부와 수신부의 거리를 증가시키기 위하여 송신부와 수신부 사이

에 릴레이 코일을 배치할 수 있다. 이러한 시스템을 그림 1에 도시하였다. 송신부의 소스 코일에서 수신부의 로드 코일로 전력이 전송되면서 송·수신 코일과 릴레이 코일의 임피던스 매칭을 통해 전송 거리를 늘리는 구조이다. 소스 코일과 로드 코일은 송·수신 코일에 임피던스 영향을 덜 주기 위해 일반적인 변압기와 같이 구성된다. 송·수신 코일과 릴레이 코일은 동일한 헬리컬 코일 형태로 구성되며, 각 코일은 일직선상에 위치한다고 가정한다.

### 2.2 자기 공명 기반 WPT 시스템 모델링

그림 1에서 기술한 시스템을 해석하기 위하여 각 코일을 참고문헌 [2]에서 제시한 바와 같이 R, L, C 등가 회로로 모델링할 수 있다. 릴레이 코일을 포함하는 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로 모델을 도시하면 그림 2와 같다.

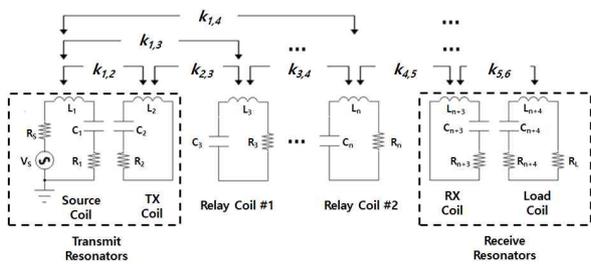


그림 2. 릴레이 코일을 포함하는 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 등가회로 모델  
Fig. 2. Equivalent circuit model of the WPT system using magnetically coupled resonator scheme with relay coils

송·수신기 사이에  $n$ 개의 릴레이 코일을 고려하는 경우 독립된 공진 회로의 개수는  $(n+4)$ 개 (송신부 - 2개, 릴레이 -  $n$ 개, 수신부 - 2개)가 된다. 그림 2에서와 같이 소스 코일부터 놓인 순서대로 공진 회로의 번호를 1번부터 붙여준다. 이 경우  $n+4$ 번째가 로드 코일이 되면, 3번째는 송신부 측에 인접한 첫 번째 릴레이 코일을 나타낸다. 각 주파수  $\omega$  신호에 대하여  $i$ 번째 공진 회로에 유기되는 전류 값의 Phasor값을  $I_i (i=1, \dots, n+4)$ 로 표현하는 경우, 그림 2의 선형 회로

는 키르히호프의 전압 법칙(KVL)을 적용하여 식 (1)과 같은 임피던스 행렬을 이용하여 표시할 수 있다.

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{V} \tag{1}$$

식 (1)에서 각 회로의 전류 값을 나타내는  $I$  벡터와  $V$  벡터는 다음과 같다.  $V_s$ 는 소스에 인가되는 전압을 나타낸다.

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n+3} \\ I_{n+4} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (1)에서 임피던스 행렬  $Z=\{z_{i,j}\}$ 의 대각 행렬 성분은 각 독립 공진 회로의 임피던스를 나타내는 값으로써 다음과 같이 정의된다.

$$z_{i,i} = \begin{cases} R_s + R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} & i = 1 \\ R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} & i \neq 1, n+4 \\ R_L + R_i + j\omega L_i + \frac{1}{j\omega C_i} & i = n+4 \end{cases} \tag{3}$$

비 대각 행렬의 성분 값  $z_{i,j} (i \neq j)$  값은  $j$ 번째 회로에 발생하는 전류  $I_j$ 와  $i, j$ 번째 코일 간의 상호 인덕턴스에 의해서  $i$ 번째 회로에 유기되는 전압 사이의 관계를 나타내는 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$z_{i,j} = j\omega k_{i,j} \sqrt{L_i L_j} \quad (i \neq j) \tag{4}$$

식 (4)에서  $k_{i,j}$ 는  $i$ 번째 코일과  $j$ 번째 코일의 결합 계수를 나타낸다. 부하에 인가되는 전압은 다음과 같다.

$$V_{Load} = I_{n+4} R_L \tag{5}$$

식 (5)에서  $I_{n+4}$  값은 식 (1)~(4)를 이용하여  $z_{i,j}$ 에 대한 함수와 소스 측 전압  $V_s$ 의 곱으로 표기된다. 이 경우  $V_{Load}/V_s = h(z_{i,j}) R_L$ 을 이 시스템의 전달 함수라고 부르기로 한다.

### 2.3 부속 결합 영역의 특성 모델링

두 코일 간의 거리가 멀어짐에 따라 결합 계수 값은 급격히 감소하게 된다. 따라서 일정 거리 이상이 되는 부속 결합 영역의 경우에는 행렬식을 간단하게 표현하기 위하여 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려하여 모델을 근사화 해 준다. 이 경우에 비 대각 행렬의 성분 값 중  $|i-j| > 1$ 인 경우는 0으로 간주하게 된다. 이 경우는 식 (1)의 행렬식을 가우스 소거법을 이용하여 전달 함수를 해석적으로 구할 수 있다.

참고문헌 [2]에서는 릴레이 코일이 없는 경우 ( $n=0$ )에 대하여 송·수신기 코일만의 결합 계수를 고려하여 전달 함수를 해석적으로 도출하고, 이를 분석 및 실험 결과와 비교하였다. 본 논문에서는 릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템에 대하여 모델을 도출한다. 먼저 인접 코일 간의 결합 계수가 비인접 코일 간의 결합 계수보다 훨씬 큰 경우에 대하여 전달 함수를 구해본다. 릴레이 코일이 하나인 경우를 고려하면 식 (1)은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & 0 & 0 & 0 \\ z_{1,2} & z_{2,2} & z_{2,3} & 0 & 0 \\ 0 & z_{2,3} & z_{3,3} & z_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & z_{3,4} & z_{4,4} & z_{4,5} \\ 0 & 0 & 0 & z_{4,5} & z_{5,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \frac{V_s}{D} \begin{bmatrix} \left( z_{2,2}z_{3,3}z_{4,4}z_{5,5} - z_{2,2}z_{3,3}z_{4,5}^2 - z_{2,2}z_{3,4}^2z_{5,5} - z_{2,3}^2z_{4,4}z_{5,5} + z_{2,3}^2z_{4,5}^2 \right) \\ -z_{1,2}(z_{3,3}z_{4,4}z_{5,5} - z_{3,3}z_{4,5}^2 - z_{3,4}^2z_{5,5}) \\ z_{1,2}z_{2,3}(z_{4,4}z_{5,5} - z_{4,5}^2) \\ -z_{1,2}z_{2,3}z_{3,4}z_{5,5} \\ z_{1,2}z_{2,3}z_{3,4}z_{4,5} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (6)에서 가우스 소거법을 이용하여 각 회로의 전류를 구하면 다음과 같다[10]. 식 (7)에서 D값은 다음과 같다.

$$D = \begin{pmatrix} z_{1,1}z_{2,2}z_{3,3}z_{4,4}z_{5,5} - (z_{1,1}z_{2,2}z_{3,3}z_{4,5}^2 + z_{1,1}z_{2,2}z_{3,4}^2z_{5,5} + z_{1,1}z_{2,3}^2z_{4,4}z_{5,5} + z_{1,2}^2z_{3,3}z_{4,4}z_{5,5}) \\ + (z_{1,1}z_{2,3}^2z_{4,5}^2 + z_{1,2}^2z_{3,3}z_{4,5}^2 + z_{1,2}^2z_{3,4}^2z_{5,5}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

이 경우 전달 함수는 다음과 같다.

$$\frac{V_{Load}}{V_s} = \frac{I_5 \cdot R_L}{V_s} = \frac{z_{1,2}z_{2,3}z_{3,4}z_{4,5}}{D} R_L \quad (9)$$

일반적으로  $n$ 개의 릴레이 코일을 가지는 경우, 식 (9)는 다음과 같이 일반화되어 표현된다.

$$\frac{V_{Load}}{V_s} = \frac{N}{D} R_L \quad (10)$$

여기서

$$D = \prod_{i=1}^{n+4} z_{i,i} - \sum_{k=1}^{n+3} \left( z_{k,k+1}^2 \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, k+1}}^{n+4} z_{i,i} \right) \quad (11)$$

$$+ \sum_{k=1}^{n+1} z_{k,k+1}^2 \left( \sum_{j=k+1}^{n+3} z_{j,j+1}^2 \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k, k+1 \\ i \neq j, j+1}}^{n+4} z_{i,i} \right)$$

$$N = \prod_{i=1}^{n+3} z_{i,i+1} \quad (12)$$

위 식에서  $\prod$  연산자는 정수의 매개변수  $i, j, k$ 의 순차적인 변화에 따른 곱을 나타내는 연산자이다. 식 (10)을 정리하면 다음과 같이 주파수에 대한 다항식의 분수의 형태로 표현할 수 있다.

$$\frac{V_{Load}}{V_s} = \frac{\beta \omega^{2(n+4)-1}}{\sum_{k=1}^{2(n+4)} \alpha_k \omega^k} \quad (13)$$

식 (13)에서  $\alpha_k, \beta$ 는 식 (11), (12)식에서의 임피던스를 식 (3), (4)에서 정의된 값을 넣어 주파수  $\omega$ 에 대하여 정리하였을 때의 계수 값으로서 코일의 R, L, C 값 및 결합 계수로부터 정해진다. 식 (13)에서 Pole 이 발생하는 지점에서 전달 함수의 값이 최대가 되며, 거리가 멀어져 코일 간의 결합 계수 값이 작아지는 경우는 식 (11)에서 우변의 첫 번째 항에 비해 두 번째, 세 번째 항의 영향을 무시할 수 있다. 이 경우 각 코일의 공진 주파수가 동일하다면 무선 전력 전송 시스템의 공진 주파수는 거리의 증가에 따라 코일의 공진 주파수와 동일한 값으로 수렴하게 된다.

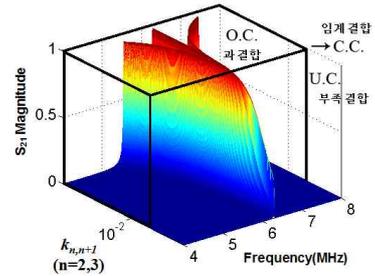
그림 3에서는 1개, 2개의 릴레이 코일을 포함하는

무선 전력 전송 시스템에 대하여 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려한 경우의 모의실험 결과를 도시하였다. 모의실험에 사용한 코일들은 표 2와 동일한 특성을 가진다.

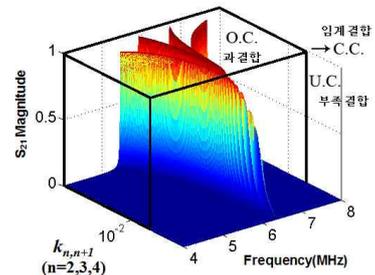
### 2.4 과 결합 영역의 특성 모델링

인접 코일 간의 결합 계수만을 고려한 상기 모델은 부족 결합 지점에서의 전달 특성을 정확히 예측할 수 있는 반면, 코일 간의 거리가 줄어들어 결합 계수가 커지는 영역인 과 결합 영역에서는 모델의 정확도가 떨어진다. 다수의 릴레이 코일을 포함하는 경우 코일 간의 거리가 가까워짐에 따라 인접 코일 간의 결합 계수 뿐만 아니라, 비인접 코일 간의 결합 계수가 전체 시스템의 특성에 영향을 끼치기 때문이다. 과 결합 영역에서는 최대 전력이 전달되는 공진 주파수가 각 코일 간의 영향에 의하여 변화하게 되며, 릴레이 코일을 포함하는 시스템의 경우의 주파수 분할은 송·수신 코일만 가지는 경우에 비해 더욱 복잡하다. 인접 코일만 고려한 모델에 기반을 둔 시뮬레이션 결과인 그림 3에서 릴레이 코일을 1개 가지는 경우의 과 결합 영역에서는 3개의 주파수 분할 지점을, 릴레이 코일을 2개 가지는 경우는 4개의 분할 지점을 보여준다. 실제 주파수 분할은 상당히 비슷한 현상을 보이지만, 릴레이 코일을 포함한 시스템의 정확한 주파수 분할 지점을 예측하기 위해서는 비인접 코일 간의 상호작용을 포함한 모델링이 필요하다. 식 (1)에서 정한 임피던스 행렬에서  $|i-j| > 1$ 인 경우에 대해서도 0이 아닌  $z_{i,j}$ 를 고려하여 준다. 코일 간의 거리를 고려하여 식 (14)와 같이 단계별 인접 / 비인접 상호 임피던스 행렬 모델을 이용한다. 비인접 코일 간의 결합 계수를 고려하는 경우에는 식 (14)의 임피던스 행렬에서 거리에 따라 순차적으로  $|i-j|=2, 3, \dots$ 인 경우의  $z_{i,j}$ 의 값을 0이 아닌 값으로 고려하여야 한다. 소스 코일과 송신 코일, 수신 코일과 로드 코일은 각각 바로 인접해 있는 것을 고려하여 식 (14)와 같이 단계별 임피던스를 고려하여 준다. 과 결합 영역에서 주파수 분할 모델링 시에 각 코일 간의 거리가 가까워짐에 따라 비인접 코일 상호 임

피던스의 단계를 올라가면서 시스템을 분석한다. 이 경우에는 부족 결합 영역에서와 같은 해석적인 전달 함수를 얻기는 힘들지만, 식 (14)의 행렬식을 이용하여 과 결합 영역의 전달 특성을 정확히 예측할 수 있다.



(a) 릴레이 코일 1개  
(a) 1 relay coil cases



(b) 릴레이 코일 2개  
(b) 2 relay coil cases

그림 3. 릴레이 코일을 포함하는 무선 전력 전송 시스템 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulated results of the WPT systems with relay coils

$$\begin{bmatrix} z_{1,1} & z_{1,2} & z_{1,3} & z_{1,4} & z_{1,5} \\ z_{2,1} & z_{2,2} & z_{2,3} & z_{2,4} & z_{2,5} \\ z_{3,1} & z_{3,2} & z_{3,3} & z_{3,4} & z_{3,5} \\ z_{4,1} & z_{4,2} & z_{4,3} & z_{4,4} & z_{4,5} \\ z_{5,1} & z_{5,2} & z_{5,3} & z_{5,4} & z_{5,5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

코일의 자기 임피던스
1단계 인접 코일 상호 임피던스
2단계 비인접 코일 상호 임피던스
3단계 비인접 코일 상호 임피던스

### 3. 릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템의 제작 및 측정

릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템의 특

성을 살펴보고, 상기 모델의 유효성을 확인하기 위해 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템을 제작하였다. 전송 코일은 1mm 굵기의 에나멜선을 사용하여 지름 260mm의 아크릴 케이스에 감아서 구현하였다. 송신 코일과 로드 코일은 루프 코일 형태로 제작하였다. 송신 코일, 수신 코일, 릴레이 코일은 헬리컬 코일 형태로 제작하였으며, 코일의 턴 수를 변경하여 공진 주파수를 조정하였다. 헬리컬 코일의 인덕턴스 값은 다음과 같은 수식으로 알려져 있다.

$$L = \frac{D^2 N^2}{0.45D + H} [nH] \quad (15)$$

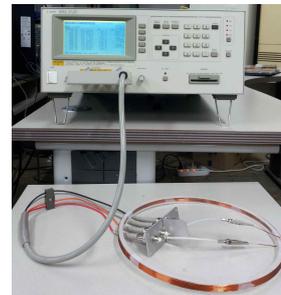
D는 코일의 반경, H는 코일의 높이, N은 코일의 감은 횟수이다. 6.3MHz 대역에서 공진이 발생하도록 코일을 설계 및 제작하였다. 이 경우 코일의 턴 수는 8번이었으며 43~44 $\mu$ H의 인덕턴스 값을 가졌다. 그림 4 (a)에서와 같이 LCR미터(Agilent 4285A)를 사용하여 제작한 코일의 인덕턴스를 측정하였다. 식 (15)의 경우는 9번의 턴 수일 때 43.8 $\mu$ H 가량이 되어 실제 제작시의 턴 수와 1턴이 차이가 나는 것을 확인하였다. 코일과 코일 사이의 간격, 코일의 두께 등에 따라 코일의 턴 수가 증가할수록 수식과 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 표 1에 정리하였다. 측정된 인덕턴스 값을 기준으로 공진을 위한 커패시턴스 값을 계산하였고, 커패시턴스를 코일에 추가하여 공진 주파수를 6.3MHz 대역으로 조절하였다.

표 1. 제작한 코일의 규격 및 인덕턴스 값  
Table 1. Specification of manufactured coils and inductances

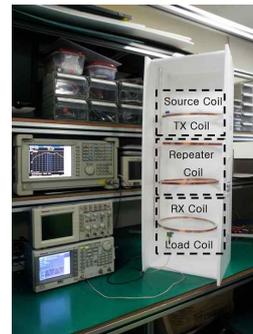
	D(mm)	H(mm)	N	L / 측정주파수
수식	260	8	8	34.6 $\mu$ H
수식	260	8	9	43.8 $\mu$ H
헬리컬 코일 측정	260	8	8	43.8 $\mu$ H / 100KHz
루프 코일 측정	260	1	1	1.25 $\mu$ H / 100KHz

제작된 코일을 신호 발생기(Tektronix AFG3021B)와 스펙트럼 분석기(Tektronix RSA2203A)를 사용하여 공진 주파수를 측정하였다. 그림 4 (b)에서와 같이 제작된 코일들을 배열하여 릴레이 코일을 포함하는 무선 전력 전송 시스템을 제작하였다.

표 2에서는 그림 4 (b)와 같이 제작된 무선 전력 전송 시스템의 송신부, 수신부, 릴레이부의 특성을 기술하였다. 제작한 코일은 동일한 공진 주파수를 가진다.



(a) 코일의 인덕턴스 측정  
(a) Inductance measurement of manufactured coils



(b) 제작한 무선 전력 전송 시스템  
(b) Manufactured WPT System

그림 4. 무선 전력 전송 시스템 실험 환경  
Fig. 4. Test environment of the WPT system

그림 5에서는 그림 4 (b)의 무선 전력 전송 시스템의 릴레이 코일의 개수와 송신부, 수신부의 거리를 변경하면서 측정된 결과와 모의실험 결과를 비교 도시하였다. 그림 5 (a)는 릴레이 코일을 포함하지 않은 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 주파수와 거리에 따른 수신 전력 결과이고, 그림 5 (b)와 그림 5 (c)는 릴레이 코일 1개와 2개를 포함한 자기 공명 방식 무선

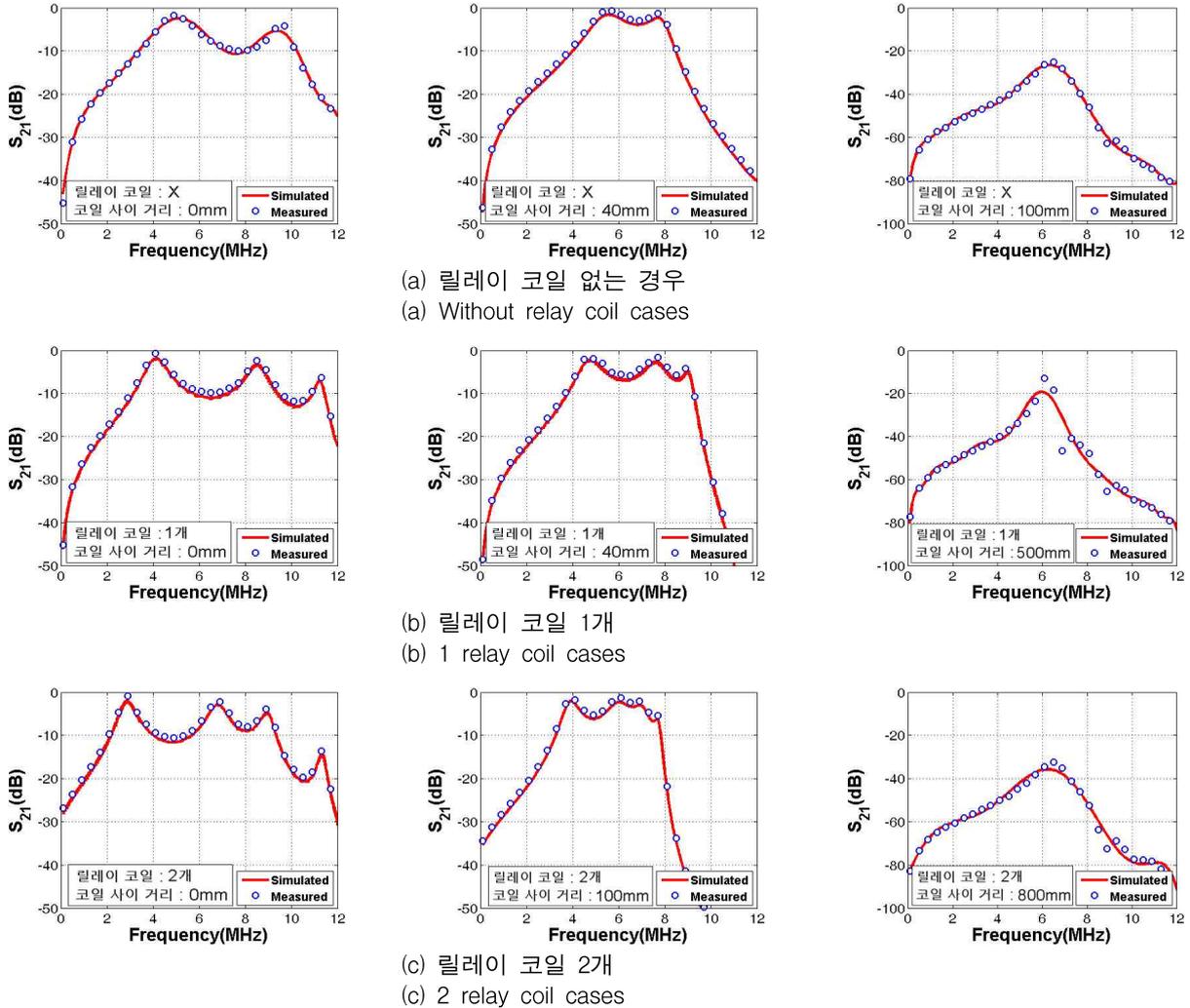
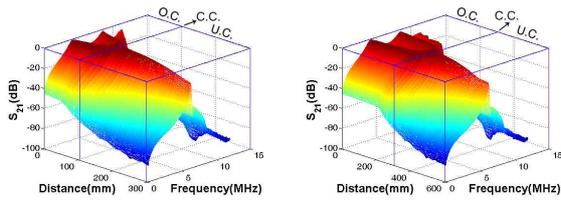


그림 5. 무선 전력 전송 시스템에서 릴레이 코일 개수와 거리에 따른 수신 전력값 비교  
Fig. 5. Comparison of magnitude of received signals depending on the number of relay coils and distances

전력 전송 시스템의 주파수와 거리에 따른 전력 전송 결과이다. 각 송신 코일, 릴레이 코일, 수신 코일 간에 등거리를 유지하였다. 근접 거리에서 전력 전송이 최대가 되는 주파수는 릴레이 개수가  $n$ 개 일 때  $(n+2)$ 개가 발생한다. 거리의 증가에 따라  $(n+2)$ 개의 주파수는 1개의 공진 주파수로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 실제 제작한 릴레이를 포함하는 무선 전력 전송 시스템을 측정하고, 모의실험 결과와 서로 일치하는 것을 확인하였다. 전송 거리와 주파수의 변화에 따

른 송신부와 수신부의 S21값을 벡터 회로망 분석기 (Agilent N9923A)로 측정하여 그림 6에서 주파수와 거리에 따른 3차원 그래프를 도시하였다. 과 결합 부분에서 공진 주파수 분할 현상이 발생하고, 부족 결합 부분에서는 거리가 멀어질수록 공진 주파수가 하나로 모이고, 전력 전송 값이 급격히 감소하는 현상을 확인하였다. 공진 주파수(6.3MHz 대역)에서 거리별 수신 신호의 효율을 릴레이 코일의 개수에 따라 그림 7에서 도시하였다. 송·수신기 간의 거리가 줄어들어 따라

과 결합 지점에서는 주파수 분할 현상에 의하여 6.3MHz대역에 대하여 효율이 급격히 감소하고, 릴레이 코일 개수가 늘어남에 따라 임계 결합 지점이 증가하였고, 임계 결합 부분 이후 효율이 다시 감소하였다.



(a) 릴레이 코일 1개 (a) 1 relay coil case  
(b) 릴레이 코일 2개 (b) 2 relay coil case

그림 6. 무선 전력 전송 시스템 측정 결과  
Fig. 6. Measured results of the WPT systems

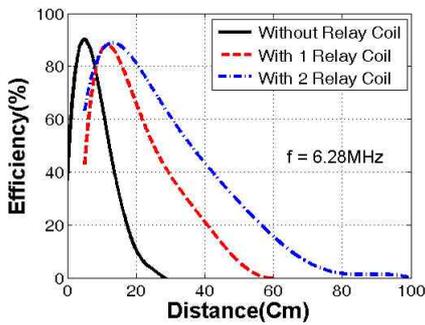


그림 7. 릴레이 개수에 따른 거리별 수신 전력 효율  
Fig. 7. Receiver power efficiency versus distance for several repeater cases

표 2. 무선 전력 전송 시스템 측정 소자 값  
Table 2. Measured element values of WPT system

Source coil		Repeater coil		RX coil	
Component	Value	Component	Value	Component	Value
L1	1.25uH	L3	44.02uH	L4	43.83uH
C1	513.8pF	C3	14.59pF	C4	14.65pF
R1	0.08Ω	R3	0.42Ω	R4	0.48Ω
Rs	50Ω	f0	6.28MHz	K4,5	0.9
TX coil		k2,3 & k3,4	0.0001 to 0.5	Load coil	
L2	43.77uH			L5	1.25uH
C2	14.67pF			C5	513.8pF
R2	0.49Ω			R5	0.11Ω
k1,2	0.9			RL	50Ω

#### 4. 측정 결과 및 모델링에 대한 분석

자기 공명 방식의 경우 거리에 따라 코일 간의 상호 인덕턴스의 결합 계수 값이 바뀌게 되어 부족, 임계, 과 결합 영역으로 나뉘게 된다. 임계 지점을 지나 거리가 증가하는 부족 결합 영역에서는 인접하는 코일 간의 결합 계수만을 고려하더라도 측정값을 정확히 예측할 수 있다.

본 논문에서는 릴레이 코일을 포함하는 경우에 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려하는 모델에 대하여 기존의 등가 회로 모델을 확장하고, 가우스 소거법을 사용하여 식 (10)~(12)에서 전달 함수에 대한 분석법을 제시하였다. 이 식은 그림 6에서 도시한 부족 결합 영역에서의 송·수신기 간에 측정된 전력 전송을 정확히 예측할 수 있었다. 반면 과 결합 영역에서는 식 (10)~(12)에서 제시한 인접 코일 간의 결합 계수를 고려한 모델은 다소 부정확하다. 그림 8에서는 릴레이 코일 1개, 2개의 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려한 모델과 식 (14)에 기반을 둔 비인접 코일 간의 결합 계수를 고려한 모델의 주파수 분할 현상의 예측을 비교하였다. 그림 3의 모의실험 결과와 그림 6의 실측 결과를 비교할 때, 부족 결합 영역에서의 모의실험값과 실측값은 거의 일치하지만, 과 결합 영역에서의 주파수 분할 패턴은 상이한 모습을 보인다.

그림 9에서 과 결합 영역의 주파수 분할 특성의 측정값을 확대하여 도시하였다. 그림 9에서와 같이 실측값의 경우, 과 결합 영역에서 (n+2)개의 공진 주파수 지점은 코일의 공진 주파수 6.3MHz를 기준으로 비대칭적인 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 코일 간의 거리가 줄어들어 따라 공진 주파수는 낮은 주파수와 높은 주파수로 나누어지며, 높은 주파수에서는 결합 계수가 커짐에 따라 다시 분할되며, 그 변화폭은 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려할 때는 예측하기 힘든 결과이다. 이 경우에는 식 (14)에서 제시한 단계별 비인접 코일 간의 성분을 고려하여 모델링을 수행하여야 한다. 식 (14)에 기반하여 비인접 코일의 성분을 고려하여 주파수 분할 특성을 모델링하면 그림 9와 같이 릴레이 코일을 포함한 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의

주파수 분할 특성을 정확히 모델링할 수 있다.

N개의 측정된 무선 전력 전송 시스템의 공진 주파수  $f_i (i=1,2,\dots,n)$ 에 대한 모델의 예측 값을  $\hat{f}_i$  라고 할 때, 공진 주파수 예측 오차 값을 식 (16)과 같이 정의한다.

$$f_{error} = \sum_{i=1}^N \left| \frac{\hat{f}_i}{f_i} - 1 \right| \quad (16)$$

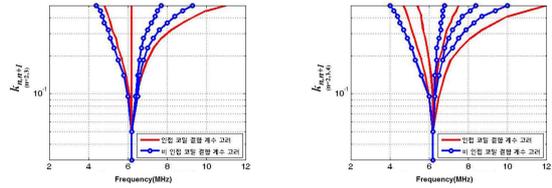
인접 및 비인접 코일 간의 결합 계수를 고려한 모델과 실제 데이터의 오차를 표 3에서 비교하였다. 그림 9와 같이 식 (14)에서 비인접 코일 간의 결합 계수를 추가로 고려한 모델을 이용하여 과 결합 영역에서 주파수 분할 특성을 보다 정확히 예측하였다.

표 3. 실제 데이터와 모델로부터 얻은 데이터 비교  
Table 3. Comparison between measured and simulation data

오차	릴레이 코일 1개인 경우	릴레이 코일 2개인 경우
인접 코일만 고려한 모델	7.47%	10.71%
인접, 비인접 코일을 고려한 모델	1.97%	2.2%

### 5. 결 론

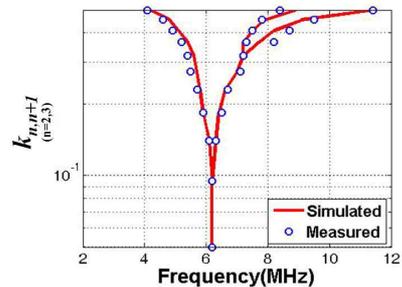
본 논문에서는 자기 공명 방식에서 전력 전송 거리를 확장시키기 위해 릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템의 전력 전달 특성 및 과 결합 영역에서 주파수 분할 특성을 측정하고, 이러한 특성을 예측, 분석하는 모델링 기법을 제시하였다. 릴레이 코일을 포함한 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템에서 각 코일을 R, L, C 직렬 연결된 등가 회로 모델을 사용하고, 인접 코일 간의 결합 계수만을 고려하는 경우에 대하여 가우스 소거법을 이용하여 송·수신 전압사이의 해석적 전달 함수를 도출하였다. 또한 과 결합 영역에서 주파수 분할의 패턴에 대한 실측값을 분석하고, 이러한 값을 정확히 예측할 수 있는 비인접 코일 간의 결합 계수를 단계별로 고려하는 향상된 모델에 대하여 제시하였다. 릴레이 코일을 포함한 6.3MHz대역 자



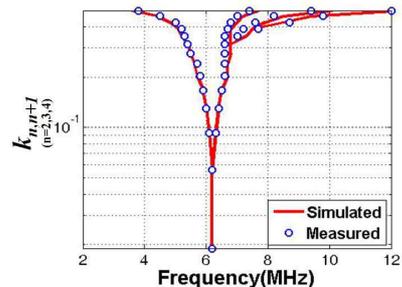
(a) 릴레이 코일 1개 (a) 1 relay coil case  
(b) 릴레이 코일 2개 (b) 2 relay coil case

그림 8. 인접 및 비인접 코일 간의 결합 계수를 고려한 시뮬레이션 결과

Fig. 8. Simulated results of the considering the coupling coefficient between adjacent and non-adjacent coils



(a) 릴레이 코일 1개 (a) 1 relay coil case



(b) 릴레이 코일 2개 (b) 2 relay coil case

그림 9. 릴레이 코일을 포함한 무선 전력 전송 시스템의 주파수 분할 시뮬레이션 및 측정 결과

Fig. 9. Simulated and measured results of the frequency splitting characteristics of WPT system with a repeater

기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템을 실측하고, 제한된 모델을 검증하였다. 본 연구는 무선 전력 전송을 이용한 원거리 조명 설비 등에 적용되는 릴레이 코일

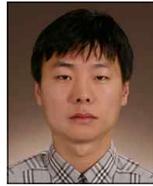
을 포함하는 자기 공명 방식 무선 전력 전송 시스템의 설계 및 분석에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국과학창의재단(대학생 창의융합형 연구과제 지원사업)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, *Science*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] A. Sample, D. Meyer, and J. Smith, Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [3] <http://www.a4wp.org/>
- [4] C. K. Lee, W. X. Zhong, and S. Y. R. Hui, Effects of magnetic coupling of nonadjacent resonators on wireless domino-resonator systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 4, pp. 1905-1916, Apr. 2012.
- [5] S. H. Cheon, Y. H. Kim, S. Y. Kang, M. L. Lee, and T. Y. Zyung, Wireless energy transfer system with multiple coils via couple magnetic resonances, *ETRI Journal*, vol. 34, no. 4, Aug. 2012.
- [6] Xiu Zhang, S. L. Ho, W. N. Fu, Quantitative design and analysis of relay resonators in wireless power transfer system, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4026-4029, Nov. 2012.
- [7] W. Zhong, C. Lee, and R. Hui, General analysis on the use of Tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 261-270, Jan. 2013.
- [8] D. J. Ahn and S. C. Hong, A Study on Magnetic Field Repeater in Wireless Power Transfer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 360-371, Jan. 2013.
- [9] Jeong-Heum Park, Study on the Effect of Resonant Coil Size and Load Resistance on the Transmission Efficiency of Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol.26, No.7, pp.45-51, 2012.
- [10] Sergio Pissanetzky, *Sparse Matrix Technology*, Academic Press, Inc., 1984.

### ◆ 저자소개 ◆



**박희수**(朴喜秀)

1982년 6월 3일생. 2012년 건국대학교 컴퓨터공학과 졸업. 현재 건국대학교 전자정보통신공학과 석사과정.



**권민성**(權珉成)

1989년 10월 2일생. 현재 건국대학교 전자공학부 학부과정.



**김민지**(金玟志)

1991년 9월 7일생. 현재 건국대학교 전자공학부 학부과정.



**박현민**(朴滋敏)

1991년 11월 21일생. 현재 건국대학교 전자공학부 학부과정.



**구현철**(具賢澈)

1972년 11월 24일생. 1995년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1997년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업(석사). 2003년 Dept. ECE, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA 졸업(박사). 1997년~1999년 KT 연구개발본부 전임 연구원. 2004~2005년 삼성전자 무선사업부 책임연구원. 현재 건국대학교 전자공학부 부교수.