

# 자기결합형 무선전력 시스템의 척도변환을 이용한 축소실험 방법 고찰

임희열, 정채호, 최성진  
울산대학교 전기공학부

## A Study on Downsized Experiment Methodology Using Scale Conversion for Inductive Power Transfer System

Hwi-yeol Im, Chae-Ho Jeong, Sung-Jin Choi  
School of Electrical Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

최근 무선전력분야에서도 고전력 시스템에 대한 적용 연구가 활발해지고 있다. 이러한 시스템 설계는 시뮬레이션 소프트웨어 프로그램으로 설계를 할 수는 있지만, 실험 검증을 위해서는 고전력 수전 설비 및 고가의 측정 설비가 필요하고, 하드웨어를 제작하려면 많은 시간과 비용이 필요하다. 본 논문은 척도변환을 이용하여 코일 형상을 포함한 하드웨어 구조는 최대한 유지하고 소자정격과 입력 전력을 축소하여 시스템 성능을 사전 평가하는 방법을 제안한다. 도출된 이론을 바탕으로 150W급 무선전력 전송 시스템을 대상으로 15W급으로 10 : 1 비로 축소 적용 가능함을 시뮬레이션 실험으로 검증한다.

### 1. 서론

무선전력분야의 연구가 최근 몇 년 동안 활발해지고 전기자동차와 기차와 같은 고전력 시스템에도 적용하려는 연구가 진행되고 있다. 하지만 실험 검증을 위해서는 고전력 수전 설비 및 고가의 측정 설비가 필요하고 자기 결합형 무선전력 시스템의 경우 사용되는 코일은 직경이 커질수록 코일형상으로 제작하는데 많은 시간과 비용이 소비된다.

한편 필터 설계에 사용되는 방법 중 하나인 척도 변환은 먼저 수동 또는 능동 필터 회로를 설계할 때, 1Ω, 1H 또는 1F 등의 소자들을 이용하여 필터회로를 구성한다. 이로 인해 차단 주파수  $\omega_c$ , 또는 중심주파수  $\omega_o$ 가 1 rad/s가 된다. 척도변환에는 크기 변환 계수  $k_m$ 과 주파수 변환 계수  $k_f$ 가 있으며, 우선  $\omega_c$ , 또는  $\omega_o$ 를 변환하기 위해  $L$ 과  $C$ 에  $1/k_f$ 를 곱한다. 그 후, 각 소자값을 현실적인 값으로 반영하기 위해  $R$ 과  $L$ 에는  $k_m$ 을 곱하고  $C$ 에는  $1/k_m$ 을 곱하여 원하는 필터 회로를 용이하게 설계할 수 있다. 이러한 원리에 착안하여 본 논문은 척도변환에 사용되는 크기 변환계수를 이용하여 크기를 축소하는 비율을  $n$ 으로 두고 코일의 면적과 반지름을  $1/n$ 배로 축소한 뒤 동작 주파수, 전압이득과 효율과 같은 성능 파라미터를 고정<sup>[1]</sup>하고 낮은 전력으로 실험하여 시스템 성능을 사전 평가 할 수 있는 방법을 제시한다.

특히 본 논문에서는 자기결합 무선전력 시스템의 공진구조 중 그림 1과 같은 직렬-직렬 보상구조에서 동작 주파수, 전압이득, 효율을 고정하기 위해 에너지링크 내부저항과 등가부하 저항비를 고려하여 축소 실험할 수 있는 방법을 제시한다.

표 1 무선전력전송 시스템의 회로 파라미터

Table 1 Circuit parameters for Inductive power transfer system

기호	설명
$L_1, L_2$	송수신부의 자기 인덕턴스
$C_1, C_2$	송수신부의 보상 커패시턴스
$R_1, R_2$	송수신부 에너지링크의 등가직렬저항
$R_s$	입력 전압원의 내부저항
$R_L$	등가부하저항
$k_1, k_2, k$	결합계수, $k_1$ 과 $k_2$ 의 기하 평균
$\omega, \omega_o$	동작 주파수, 공진 주파수
$Z_{o1}, Z_{o2}$	송수신부의 특성 임피던스 $Z_{o1} = (L_1/C_1)^{1/2}, Z_{o2} = (L_2/C_2)^{1/2}$
$Q_1, Q_2$	송수신부의 공진 양호도(Quality factor) $Q_1 = Z_{o1}/R_1, Q_2 = Z_{o2}/R_2$
$Q$	$Q_1$ 과 $Q_2$ 의 기하 평균

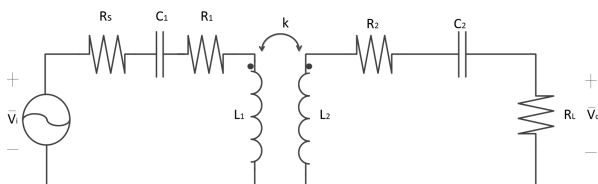


그림 1 자기결합 무선전력전송 교류등가회로 모델

Fig. 1 Equivalent AC circuit model of inductive power transfer

2장에서는 본 논문이 제안하는 축소 실험 방법, 3장에서는 FEMM과 LTspice를 함께 이용한 시뮬레이션 검증 결과를 소개한다.

## 2. 제안하는 축소 실험 방법

### 2.1 무선전력전송의 파라미터 종류

무선전력전송 시스템에서는 성능, 회로, 형상 파라미터가 있다. 전압이득, 효율은 시스템의 성능을 파악할 수 있기 때문에 성능 파라미터로 본다. 회로 파라미터는 회로 또는 회로 소자를 특징짓는 물리량의 값으로 표 1에 언급되어 있다. 형상 파라미터는 코일의 구조를 결정짓는 파라미터로 그림 2에서 반지름  $a$ 와 단면의 모서리 길이  $b$ 를 형상파라미터로 두었다.

### 2.2 회로파라미터와 성능파라미터의 관계

본 논문은 송신부 입력 전압원의 내부 저항과 커패시터의

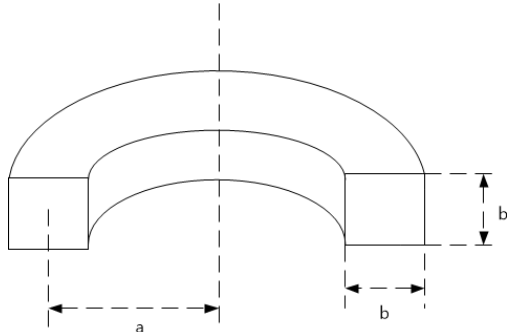
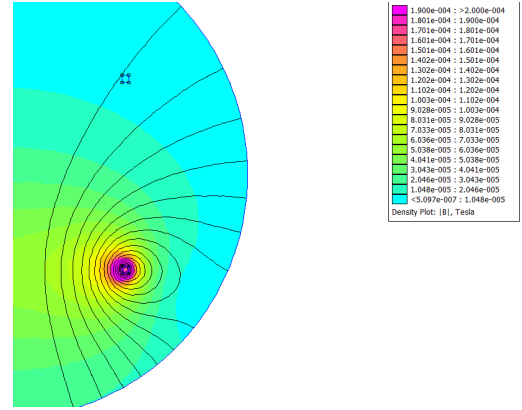


그림 2 단면이 정사각형인 원형 코일  
Fig. 2 Circular coil of square cross section



(a) 축소 대상 코일

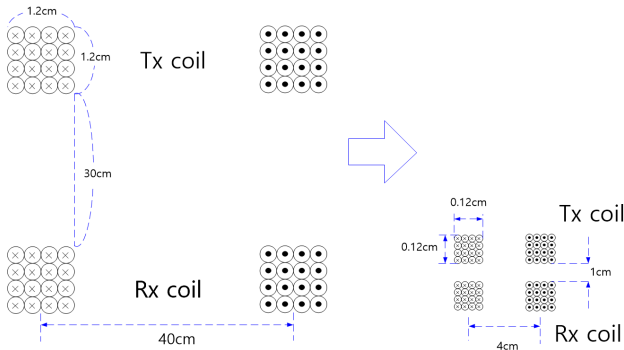
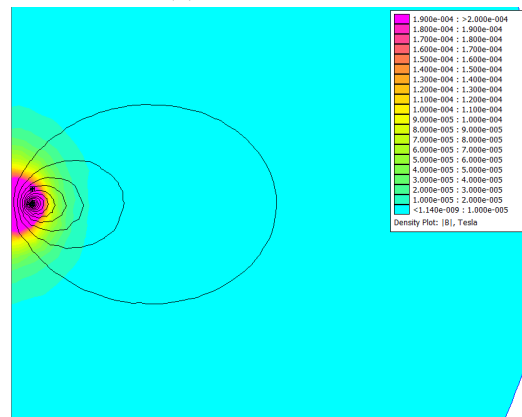


그림 3 축소 대상 코일(좌)과 축소된 코일(우)  
Figure. 3 Target coil(left), downsized coil(right)



(b) 축소 후 코일

그림 4 FEMM 시뮬레이션 결과  
Figure. 4 result of FEMM simulation

내부 저항은 무시할 수 있을 정도로 작고, 시스템의 동작 주파수는 회로의 공진 주파수  $\omega_0$ 와 같다고 가정한다. 그리고 에너지링크의 등가직렬 저항  $R_1$ 과  $R_2$ 이  $R$ 로 같다고 가정한다. 송수신부 각각 공진 양호도의 기하 평균  $Q$ , 공진기의 성능을 나타내는 공진기 성능지수 (Figure of Merit, FOM)와 수신부 부하저항 ( $R_L$ )과 수신부 공진기 내부저항 ( $R$ )의 비( $r_d$ )를 식 (1)과 같이 정한다.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R}, \quad FOM = kQ, \quad r_d = \frac{R_L}{R} \quad (1)$$

식 (1)로부터 전압이득과 전력전송효율, 출력을 각각 식 (2), 식(3), 식(4)으로 나타낼 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$M_{V,AC} = \frac{FOM r_d}{FOM^2 + (1 + r_d)} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{FOM^2 r_d}{(1 + r_d)^2 + FOM^2 (1 + r_d)} \quad (3)$$

$$P_o = \frac{1}{2} \frac{V_i^2}{R_L} \left[ \frac{FOM r_d}{(1 + r_d) + FOM^2} \right]^2 \quad (4)$$

식(2)-(4)으로부터 FOM과  $r_d$ 를 일정하게 유지하고 입력 전압의 크기와 등가 부하 저항을 변동시키면 전압이득과 전력전송 효율은 유지하고 출력을 변동시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

### 2.3 회로파라미터와 형상파라미터의 관계

그림 2에서 코일의 a와 b의 변화에 따라 자기인덕턴스와 내부저항이 달라진다. 코일의 인덕턴스는 근사적으로 식 (5)로 나

타낼 수 있고,  $\frac{b}{2a} < 0.2$ 를 만족할 때  $S$ 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. C와 D는 상수로 각각 0.84834, 0.2041이다.<sup>[2]</sup>

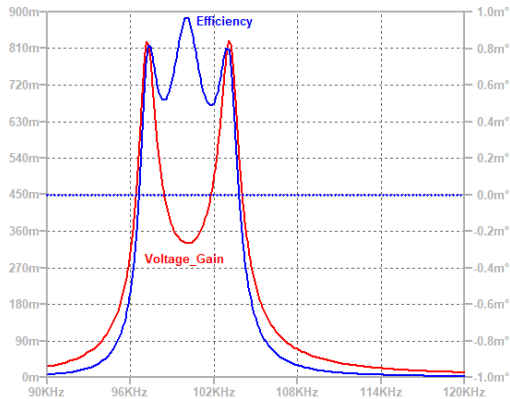
$$L = 0.1 a N^2 S \mu H \quad (5)$$

$$S = 4\pi \left[ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{6} \left( \frac{b}{2a} \right)^2 \right] \log_e \frac{8}{\left( \frac{b}{2a} \right)^2} - C + D \left( \frac{b}{2a} \right)^2 \right] \quad (6)$$

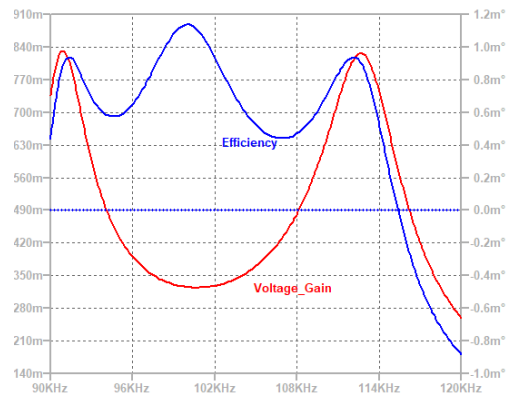
식 (6)에 의하면 a와 b를 같은 비율 1/n배로 축소할 경우  $L$ 이 1/n배로 축소한다는 것을 알 수 있다. 이를 검증하기 위해 FEMM 시뮬레이션 프로그램을 사용했다. 그림 3에서 왼쪽 코일이 축소 대상 코일이고 오른쪽 코일이 축소 후의 코일이다. 주파수를 100kHz로 가정하고 코일의 반지름 20cm, 단면 모서리의 길이 1.2cm, 두 코일간의 거리 30cm, 턴수 16이면 식 (5)에 의한  $L$ 은 0.238mH이고 시뮬레이션에 의한  $L$ 은 0.246mH로 3.40%의 오차가 있는 것을 확인하고  $R$ 은 352m $\Omega$ 이 결과로 나왔다. 한편 1/10배로 축소했을 경우 코일의 반지름 2cm, 단면 모서리의 길이 0.12cm, 두 코일간의 거리 1cm, 턴수 16이면 식(5)에 의한  $L$ 은 23.798 $\mu$ H이고 시뮬레이션에 의한  $L$ 은 22.866 $\mu$ H로 3.92%의 오차가 있고  $R$ 은 115m $\Omega$ 인 것을 확인했다. FEMM 시뮬레이션 결과, 그림 2의 반지름 a와 단면 모서리 길이 b를 1/10배로 축소한 결과  $L$ 은 1/10으로 줄어든 것을 확인하였다.

### 2.4 제안 방법론

시뮬레이션에 사용하는 코일은 그림 2와 같은 단면이 정사각형인 원형 코일이다. 그림 3과 같이 코일을 1/10배로 축소할



(a) 축소 대상의 전압이득과 전력전달효율



(b) 축소 후 전압이득과 전력전달효율

그림 5 LTSpice 시뮬레이션 결과

Figure. 5 result of LTSpice simulation

때, 코일의 자기인덕턴스와 내부등가저항이 변한다. 전압이득과 전력전송효율을 일정하게 유지하기 위해서는 식(1)의 FOM과  $r_d$ 를 일정하게 유지해야 한다. 축소 전의 자기인덕턴스, 코일의 내부저항을  $L, R$ 이라 하고 축소 후의 자기인덕턴스, 코일의 내부저항을  $L', R'$ 이라 할 때, 축소 전과 후의 공진양호도  $Q$ 와  $Q'$ 은 식 (7)이 된다.

$$Q = \frac{\omega_o L}{R}, Q' = \frac{\omega_o L'}{R'} \quad (7)$$

시스템의 성능을 유지하기 위해 식 (1)의 FOM을 일정하게 유지해야 하는데 동작주파수는 일정한 조건이므로 결합계수  $k$ 를 보상해줘야 한다. 2.3절에서 그림 2의 a, b를  $1/n$ 배 축소할 때  $L$ 과  $L'$ 의 비가 근사적으로  $n:1$ 이 되는 것을 확인했으며, 축소 전의 결합계수를  $k$ 라 하고 축소 후의 결합계수를  $k'$ 라 할 때,  $k'$ 은 식 (8)이 된다.

$$k' = kn \frac{R'}{R} \quad (8)$$

계산된 식 (8)의  $k'$ 를 이용하여 축소 후 두 코일간의 거리를 FEMM을 이용하여 설계한다.  $r_d$ 도 FOM과 같이 일정하게 유지하기 위해 축소 전과 후의 등가부하저항을  $R_L, R_L'$ 이라 할 때,  $R_L'$ 은 식(9)이 된다.

$$R_L' = R_L \frac{R'}{R} \quad (9)$$

$L$ 이  $L'$ 로 변할 때 공진주파수를 고정하기 위해서는  $C$ 를 보상해줘야 한다. 축소후의 보상 커패시턴스를  $C'$ 이라 할 때

$C'$ 은 식 (10)이 된다.

$$C' = nC \quad (10)$$

부하출력전력의 경우  $1/m$ 배로 줄이고 싶을 경우, 축소 전 입력전압을  $V_i$ 라 하고 축소 후의 입력 전압을  $V_i'$ 이라 정하면 식 (4)에 의해  $V_i'$ 는 식(11)이 된다.

$$V_i' = V_i \sqrt{\frac{1}{m} \frac{R_L'}{R_L}} \quad (11)$$

### 3. 시뮬레이션 검증

제안 방법의 검증을 위해  $FOM=9, r_d=30$ 를 만족하는 임의의 공진기 조합을 통한 회로 시뮬레이션을 시행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 LTSpice를 사용했다. 시뮬레이션에 적용된 동작 주파수는 100kHz이다. 회로 파라미터는 FEMM 시뮬레이션의 결과를 이용했다. 축소 대상 코일은 반지름 20cm, 단면 모서리의 길이 1.2cm, 두 코일간의 거리 30cm, 턴수 16로 자기 인덕턴스, 코일 등가직렬저항, 결합계수, 커패시턴스, 부하등가저항은 각각 246uH, 352mΩ, 0.061, 10.29nF, 6.16Ω이다. 시뮬레이션 결과 전압이득은 0.330, 효율은 0.887 입력전압이 95V일 때, 출력은 155.86W이 나왔다. 1/10배 축소 후 코일은 반지름 2cm, 단면 모서리의 길이 0.12cm, 두 코일간의 거리 1cm, 턴수 16일때 자기 인덕턴스, 코일 등가직렬저항, 결합계수, 커패시턴스, 부하등가저항은 각각 22.87uH, 115mΩ, 0.2186, 110.8nF, 2.01Ω이다. 시뮬레이션 결과 전압이득은 0.325, 효율은 0.888 입력전압이 18V일 때, 출력은 16.55W이 나왔다. 그림 5는 축소 전과 후의 전압이득과 전력전달효율을 나타낸다. 시뮬레이션 결과 FOM과  $r_d$ 를 최대한 유지한 채 각 소자의 파라미터를 조절하면 전압이득과 효율은 일정하게 유지하고 출력이 변하는 것을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 고전력 무선전력전송 시스템의 성능을 사전 평가 할 수 있는 축소 실험 방법론을 제시하였다. 이를 이용하면 시스템의 특성은 유지하고 하드웨어 크기를 줄일 수 있어 실험 검증에 필요한 시간과 비용을 줄일 수 있다. 본 방법은 150W급 무선전력 전송 시스템을 대상으로 15W급으로 10:1 비로 축소 적용 가능함을 시뮬레이션을 통해서 계산 검증되었다.

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2017R1A2B4005488)

### 참고 문헌

- [1] C.-H. Jeong, H.-S. Choi and S.-J. Choi, "FOM- $r_d$  plane: An Effective Design and Analysis Methodology for Resonant Energy Link in Inductive Power Transfer," 2017 IEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, 2017, pp. 4030-4034.
- [2] F. W. Grover, *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*, Van Nostrand, New York, 1946, pp. 94-113.