

## 무선 전력 전송용 고출력 주파수 가변 공진기 설계

## Design of a High Power Frequency Tuneable Resonator for Wireless Power Transfer

박재수 · 최재훈

Jaesu Park · Jaehoon Choi

## 요약

본 논문에서는 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 시스템을 위한 고출력 가변 공진기를 제안하였다. 공진 코일에는 스파이럴 구조를 사용하였으며, 공진 코일의 양 끝단에 고출력용 가변 트리머 커패시터를 연결하여 주파수 가변이 용이하도록 설계하였다. 3D 시뮬레이션 통과 등가 회로 모델링 기법을 이용하여 커패시터 용량 변화에 따른 공진 주파수 변화와 전달특성을 예측하였다. 무선 전력 전송 시제품을 제작하여 측정된 결과, 송/수신 코일이 160 mm의 거리로 이격되어 있을 때, 3.0~4.5 MHz 범위의 공진 주파수 가변이 용이하였으며, 50%이상의 전송 효율을 얻을 수 있었다.

## Abstract

In this paper, a high power tuneable resonator for a wireless power transfer system based on magnetic resonance is proposed. A spiral structure is used for a self-resonant coil and tuneable trimmer capacitors are added at the edges of resonant coils such that the frequency can be easily tuned. 3D simulation tools and equivalent circuit modeling method are used for predicting self-resonant frequency and scattering parameters according to the change of capacitor values. From the measurement of the prototype WPT system, the resonant frequency could be controlled from 3.0 MHz to 4.5 MHz and the transmission efficiency way over 50 % when the distance between transmitting coil and receiving coil was 160 mm.

Key words : Magnetic Resonance Coupling, Spiral Coil, Wireless Power Transfer(WPT), Tuneable Resonator

## I. 서론

스마트폰, 태블릿 PC, 노트북 등의 스마트 기기 및 전기 자동차의 충전 문제에 대한 불편함을 해소하기 위해 무선 전력 전송(wireless power transfer)에 대한 필요성이 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. 최근 수십 cm에서 수 m까지 전송이 가능한 자기 공명 방식에 대한 관심이 증가하고, 이에 대한 연구도 활발히 진행되고

있다. MIT에서 제안된 이 기술은 전송 거리가 수 cm 미만인 기존의 자기 유도 방식보다 먼 거리로 전력을 전송할 수 있어 미래 유망 기술로 대두되고 있다<sup>[2],[3]</sup>. 국내에서도 자기 공명 방식에서 고효율 전송을 위해 13.56 MHz나 1 MHz 대역의 특정 주파수에서 스파이럴 구조<sup>[4]</sup>나 헬리컬 구조<sup>[5]</sup> 설계에 대한 연구가 진행되었고, 두 구조를 결합한 구조<sup>[6]</sup>에 대한 연구도 이루어지고 있다. 또한, 효율을 최적화하기 위

한양대학교 전자컴퓨터통신공학부(Department of Electronics & Computer Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received February 13, 2013 ; Revised March 8, 2013 ; Accepted March 12, 2013. (ID No. 20130213-020)

· Corresponding Author : Jaehoon Choi (e-mail : choijh@hanyang.ac.kr)

해 주파수를 조정하거나, 임피던스 정합 기법을 사용하기도 하였다<sup>[7]</sup>. 무선 전력 전송을 위해서는 무선 주파수를 사용해야 하는데, 이 경우 타 시스템에의 간섭을 줄이고 인체에 영향을 주지 않도록 엄격하게 규제되고 있다. 자기 공명 방식에서 공진 코일 설계 시 특정 주파수에 정확히 맞춰 설계하기는 쉽지 않다. 본 논문에서는 향후 무선 전력 전송에서 많이 사용될 것으로 예상되는 3.39 MHz(13.56 MHz의 1/4 배수) 대역이 포함된 3.0~4.5 MHz 대역의 주파수를 선택적으로 사용할 수 있는 공진기 설계 방법을 제안하였다.

## II. 본 론

### 2.1 등가 모델 분석

그림 1은 제안된 가변 공진 코일의 등가 회로를 나타내었다. 자기 공명형 무선 전력 전송 기술은 네 개의 코일을 사용하여 구현하고 있다. 송신부와 수신부는 대칭 구조이며, 송/수신 코일의 등가회로는 각각  $R_1(=R_4)$ 과  $L_1(=L_4)$ 로 나타내었으며, 스파이럴 구조의 공진 코일은  $R_2(=R_3)$ ,  $L_2(=L_3)$ ,  $C_2(=C_3)$ 로 나타내었다.  $C_{va}(=C_{vb})$ 는 송/수신 공진 코일의 양 끝단에 추가된 가변형 트리머 커패시터로 용량은 150~300 pF 범위로 설계하였다.  $K_1(=K_3)$ 은 송신 코일 - 송신 공진 코일간의 결합 계수,  $K_2$ 는 송신 공진 코일 - 수신 공진 코일 간의 결합 계수를 나타낸다.

### 2.2 가변 공진 코일 설계 및 시뮬레이션

그림 2는 제안된 주파수 가변형 공진 코일 시스템의 구조이다. 박형화를 위해 스파이럴 형태의 공진

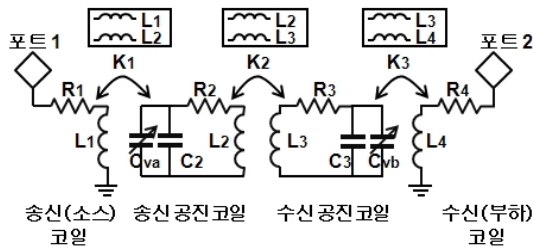


그림 1. 제안된 주파수 가변형 공진 코일 시스템의 등가회로

Fig. 1. The equivalent circuit of the proposed frequency-tunable resonant coil system.

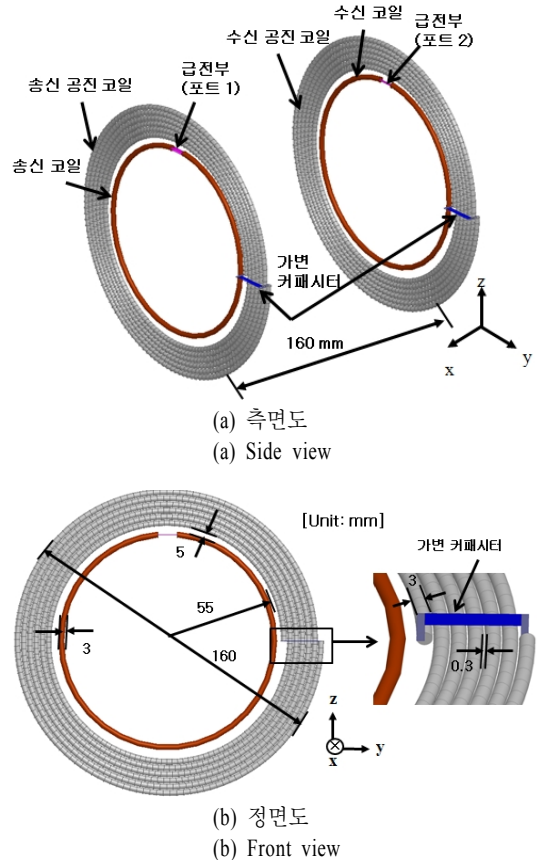


그림 2. 제안된 주파수 가변형 공진 코일 시스템의 구조

Fig. 2. The structure of the proposed frequency-tunable resonant coil system.

코일을 선택하였고, 상호 인덕턴스를 증가시키기 위해서 두 공진 코일 간의 형태와 크기를 동일하게 설계하였으며, 두 공진 코일 간 거리는 응용 제품과 효율 등을 고려하여 160 mm로 설정하였다. 송/수신 공진 코일의 최외각 지름은 160 mm, 턴수는 6회로 하였고, 공진 코일의 직경은 3.0 mm, 간격은 0.3 mm로 설정하였다.

송/수신 코일은 3.0 mm의 굵기를 갖는 지름 110 mm의 단일 원형 루프 형태로 구현하였다. 모든 재질은 구리로 설정하였으며, 시뮬레이션은 3차원 고주파 구조 해석 툴인 Ansys사의 HFSS를 사용하였다.

그림 3은 3D 시뮬레이션을 통한 주파수 가변 공진기의  $S_{21}$  특성을 나타내었다. 커패시턴스 값이 300 pF에서 150 pF으로 감소할수록 주파수는 3.2 MHz에서 4.5 MHz로 상승함을 보였으며, 전달계수( $S_{21}$ )는

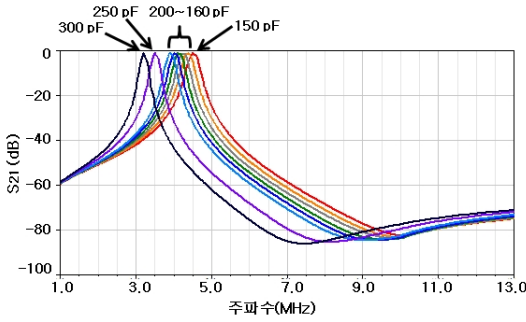


그림 3. 커패시터 용량값 변화에 따른  $S_{21}$  특성 시뮬레이션 결과

Fig. 3. The simulation result of  $S_{21}$  characteristic as the value of capacitor change.

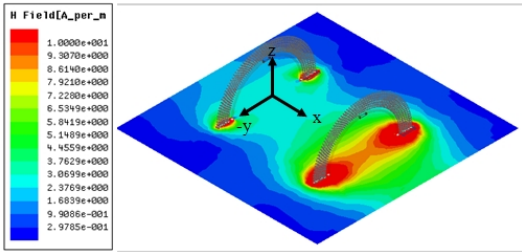
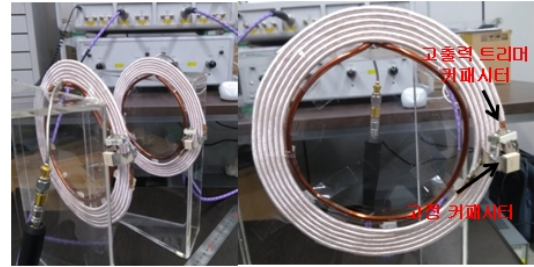


그림 4. 제안된 공진기의 자기 분포(@4.0 MHz)  
Fig. 4. H-field of the proposed resonator(@4.0 MHz).

대략  $-1.0$  dB 값을 가진다. Ansys사의 Q3D 툴을 사용하여 추출한 등가 회로의 용량 값들은  $4.0$  MHz 대역에서  $R_1=0.028 \Omega$ ,  $L_1=236$  nH,  $R_2=0.62 \Omega$ ,  $L_2=8,023$  nH,  $C_2=12$  pF,  $K_1=0.557$ ,  $K_3=0.034$ 이며, 공진 코일의 Q값은 대략 325이다. 표 1에 3D 시뮬레이션과 등가 회로 모델링을 통한 커패시턴스 용량값 변화에 따른 공진 주파수와  $S_{21}$  값을 정리하였다. 그림 4는 자기 공명 무선 전력 전송을 위해 제안된 공진기의 자기장의 크기를 나타냈다.  $4.0$  MHz의 공진 주파수를 기준으로 송신부 코일에 전력이 여기되고, 강한 자기 공명 커플링으로 동일한 공진 주파수에서 수신부 코일에 자계가 형성되어 전력이 전달됨을 확인할 수 있었다.

### III. 제작 및 측정 결과

그림 5는 제작된 주파수 가변형 공진 코일 시스템을 보여준다. 스파이럴 형태의 공진 코일은 리츠와이어(직경  $0.1$  mm,  $500$  가닥)를 사용하였으며, 공진 코



(a) 측면도 (b) 정면도  
(a) Side view (b) Front view

그림 5. 제작된 주파수 가변형 무선 전력 전송 시스템  
Fig. 5. The fabricated frequency tuneable wireless power transfer system.

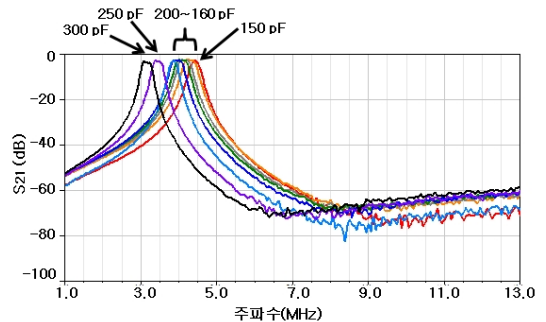


그림 6. 커패시터 용량값 변화에 따른  $S_{21}$  측정 결과  
Fig. 6. The measured  $S_{21}$  as the value of capacitor change.

일 양 끝단에 연결된 고출력 커패시터는 ATC사의 고정 커패시터( $150$  pF,  $250$  pF)와 Sprague-Goodman사의 GMA60500 트림머 커패시터를 사용하여  $1 \sim 50$  pF까지 단자간 거리를 조절하여 값을 가변하였다.

그림 6은 제작한 주파수 가변 공진기의  $S_{21}$  측정 결과이다. 송/수신 코일 종단에서  $160$  mm 이격되었을 때 커패시턴스 값이  $300$  pF에서  $150$  pF으로 감소할수록 주파수는  $3.08$  MHz에서  $4.44$  MHz로 상승함을 보였으며, 전달 계수( $S_{21}$ )는 대략  $-3.0 \sim -2.4$  dB 값을 가진다. 벡터 네트워크 분석기는 안리츠사의 VectorStar MN4690B를 사용하였다.

그림 7은  $150$  pF 커패시턴스 값에서의 3D 시뮬레이션, 측정, 등가 모델링의 결과 비교 그래프이다. 그림에서와 같이 공진 주파수는 모두  $4.4$  MHz 근처에 있으며,  $S_{21}$  값도 거의 일치함을 알 수 있다.

표 1은 커패시턴스 값에 따른 공진 주파수와  $S_{21}$ 의 3D 시뮬레이션, 측정, 등가 모델링 결과값을 정리

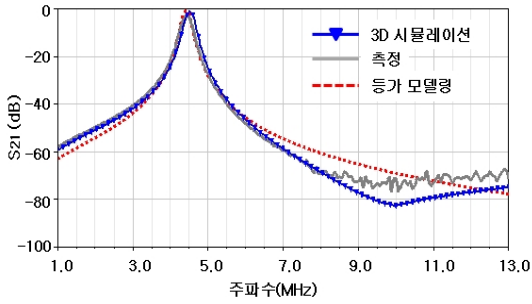


그림 7. 150 pF에서의 3D 시뮬레이션, 측정, 등가회로 모델링 결과값

Fig. 7. 3D simulation, measurement and equivalent circuit modeling results at 150 pF.

표 1. 다양한 커패시턴스 값에 따른 공진 주파수와 S<sub>21</sub>(dB) 비교

Table 1. The comparison of resonant frequencies and S<sub>21</sub> characteristics for various capacitance values.

Cva (pF)	공진 주파수(MHz)			S <sub>21</sub> (dB)		
	3D 해석	측정	등가 회로	3D 해석	측정	등가 회로
150	4.50	4.44	4.40	-0.98	-2.73	-0.89
160	4.39	4.26	4.30	-1.09	-2.39	-0.82
170	4.25	4.08	4.17	-1.34	-2.47	-0.80
180	4.11	4.01	4.06	-1.13	-2.40	-0.80
190	4.01	3.92	3.96	-1.07	-2.71	-0.81
200	3.90	3.86	3.87	-0.84	-2.96	-0.82
250	3.50	3.40	3.45	-0.83	-2.86	-0.93
300	3.20	3.08	3.17	-0.89	-3.01	-1.08

하였다. 커패시턴스 값이 내려갈수록 주파수가 상승하였고, 효율(S<sub>21</sub>)도 일정하게 유지할 수 있었다. 이를 통하여 동일한 코일 구조에서 최대 효율에 적합한 공진 주파수를 얻어 낼 수 있었다. 코일 제작상의 오차, 제작한 코일 내부 저항의 증가 및 시뮬레이션 상에서 커패시터의 Q 값을 고려하지 않아 측정 결과가 시뮬레이션 결과보다 효율이 낮은 것으로 사료되며, 서로 다른 Q값을 갖는 커패시터를 병렬 연결함에 따라 약간의 대역폭 차이도 발생하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 자기 공명 방식을 이용한 무선 전

력 전송 시스템에서 원하는 주파수를 선택하기 위해 주파수 가변 공진기를 설계하였고, 시제품 제작을 통하여 시뮬레이션 결과 값을 검증하였다. 공진 코일은 스파이럴 구조로 설계하였고, 주파수를 가변하기 위하여 공진 코일 양 끝단에 고효율 트리머 커패시터를 사용하였다. 제안된 가변 무선 전력 전송 시스템을 사용하여 송/수신 공진 코일이 160 mm 이격되었을 때, 3.0~4.5 MHz 대역의 주파수를 용이하게 가변할 수 있었으며, 50 % 이상의 전송효율을 얻을 수 있었다. 주파수 가변 무선 전력 전송 연구는 단순한 휴대 기기용 무선 충전뿐만 아니라 다양한 주파수를 사용한 멀티디바이스의 충전과 차량이나 TV와 같은 고효율용 제품, 로봇, 의료분야 등에 주파수 간섭의 영향 없이 다양하게 응용될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 장병준, "무선전력전송 기술 동향 및 주요 이슈", 정보통신산업진흥원, 중간기술동향 통권, no. 1455, pp. 1-10, 2010년.
- [2] 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, no. 5834, pp. 83-85, 2007.
- [3] Hermann A. Haus, Weiping Huang, "Coupled-mode theory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 10, Oct. 1991.
- [4] 박병철, 박재현, 이정해, "무선 전력 전송용 high-Q 스파이럴 영차 공진기", 한국전자과학회논문지, 23(3), pp. 343-354, 2012년 3월.
- [5] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 21(6), pp. 564-572, 2010년 6월.
- [6] 장요한, 권재순, 박재수, 최재훈, "무선 전력 전송용 고효율 공진기 설계", 한국전자과학회논문지, 22(9), pp. 820-826, 2011년 9월.
- [7] 이승규, Hoang Minh Hyu, 변영재, 김영수, "전기자동차를 위한 무선 전력 전송 시스템의 효율 증가", 한국자동차공학회 추계학술대회, pp. 39-45, 2011년 9월.