무선 전력 전송용 고효율 공진기 설계

Design of a High Efficiency Resonator for Wireless Power Transfer

장요한 · 권재순 · 박재수 · 최재훈

Yohan Jang · Jaesoon Kwon · Jaesu Park · Jaehoon Choi

요 약

본 논문에서는 자기 공명 방식의 무선 전력 전송 시스템에서 효율 향상 방안을 제시하였다. 공진 코일은 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 구조를 제안하였으며, 소스와 디바이스 코일은 단일 원형 루프 형태로 설계하였다. 측정 결과, 송수전 코일이 120 mm의 거리로 이격되어 있을 때 헬리컬과 스파이럴 구조를 결합한 공진기는 기존의 헬리컬 구조의 공진기보다 효율이 13 % 향상되는 결과를 보였다. 뿐만 아니라, 크기도 기존 공진기에 비해 33 % 소형화할 수 있었다.

Abstract

In this paper, an efficiency improvement method in the wireless power transfer system based on magnetic resonance is proposed. A combined helical-spiral structure is adopted for self-resonant coil and source and device coils are designed using circular loop structure. The proposed resonator utilizing combined helical-spiral structure yields 13 % efficiency improvement over that of an existing helical type resonator when the transmitting and receiving coils are separated by 120 mm. In addition, the size can be reduced by 33 % comparing to the previous resonator.

Key words : Magnetic Resonance Coupling, Wireless Power Transfer(WPT), Helical Coil, Spiral Coil, Litz Wire

I. 서 론

스마트폰 및 태블릿 PC, LCD, LED TV 등의 사용이 증가하면서 전자 제품은 일상 생활에서 많은 비중을 차지하게 되었으며, 그 수요도 기하급수적으로 증가하고 있는 상황이다. 이러한 전자 제품들의 전원 공급은 필수적이며, 교류 전원, 어댑터를 사용한 직류 전원 등 다양한 입력 전원들이 필요하며, 대부분 유선 또는 배터리를 충전하여 사용하는 방식으로 전원을 공급하고 있다. 배터리의 수명에 따른 교체와 전선의 길이에 따른 설치 장소와 이동의 제약을 초래한다. 이러한 불편함을 해소하기 위해 무선 전력 전송(wireless power transfer)에 대한 관심의 증가

와 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 방식의 무선 전력 전송 기술이 소개되고 있다. 근거리에서 자기 유도를 이용한 방식, 마이크로파 방사를 이용한 레테나 방식 등이 대표적이며, 자기 유도 방식의 경우 주목할 만한 연구 결과와 상용화가 이루어졌다. 그러나 대부분의 연구는 코일 크기보다 현저히 작은 매우 근접한 거리에 제한되어 있고, 수 미터 정도의 근거리에서 무선 전력 전송의 결과는 미비하다^{[1],[2]}. 최근에 기존 자기 유도 방식을 사용한 무선 전력 전송이 갖고 있는 단점의 일부를 해결한 새로운 방식인 자기 공명 방식이 제안되었다. 강하게 결합된 자기 공명 현상을 이용한 무선 전력 전송 기술은 2007년 MIT 대학의 마린솔라지치 교수팀이 대전력

「본 연구는 LG전자(주)의 무선전력전송 산학공동 연구 결과로 수행되었음.」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University)

· 논 문 번 호 : 20110527-05S

· 교 신 저 자 : 최재훈(e-mail : choijh@hanyang.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 9월 5일

무선 전력 전송을 시연하였다. 마이크로파 방사 방식과 비교하여 비방사형 자기장을 이용하기 때문에 전자파 장애 문제가 적고, 전자기 유도 방식에 비해 전력 전달 효율이 높은 장점이 있어 미래 유망 기술로 대두되고 있다^[3].

기존의 자기공명 현상을 이용한 무선 전력 전송용 공진 코일의 구조는 헬리컬이나 스파이럴 형태로 구현하여 S_{11} , S_{22} (송, 수신 안테나의 반사 계수)의 값에 비해 S_{21} (공진기의 무선 전력 전송 효율)의 값이 떨어지는 경향을 보인다. 무선 전력으로 배터리 충전시스템을 구현하기 위해서는 작은 크기의 공진 코일 시스템으로 높은 전송 효율을 달성해야 한다. 따라서 면적의 제한이 있는 스마트폰 등의 이동 통신 기기와 노트북, 태블릿 PC의 경우 전송 효율을 향상시키는 일은 매우 중요하다. 본 논문에서는 기존에 발표된 자기 공명 방식의 헬리컬 공진 코일 구조에 커플링이 가장 많이 발생하는 송, 수신 안테나 종단에 스파이럴 구조를 추가하여 기존의 헬리컬 공진기보다 강한 자기 커플링을 발생시켰고, 정전 용량이 증가하여 전력 전송 효율을 향상시킬 수 있었다.

II. 본 론

2.1 자기공명 방식의 원리 및 효율 분석

그림 1은 자기 공명 무선 전력 전송 시스템의 구조를 나타낸 것이다. 송전부 A, S는 루프 형태로 구성된 소스 코일과 소스 공진 코일, 수전부 D, B는 루프 형태의 디바이스 공진 코일과, 디바이스 코일로 구성되며, 고주파 전류로 인한 무선 전력 전송 효율을 높이기 위해 전도율(conductivity)이 높은 재료를 사용한 코일의 설계가 이루어져야 한다. 전력 전송 방식은 전원 시스템에 의해 전력이 구리나 기타 재

그림 1. 자기공명 방식의 공진기 구조^[3]

Fig. 1. Structure of the resonator based on magnetic resonance^[3].

료로 만든 소스 코일로 여기되며, 소스 공진 코일에 자기 유도 방식으로 전력을 전달한다. 송전부의 공진을 통해 전력을 저장하고 있다가 같은 공진 주파수를 가지는 수전부와 감쇄파 모드(evanescent wave mode)를 통해 에너지 전달 채널을 형성하여 수전부 공진 코일로 전력을 전달한다^[4]. 공진하는 두 물체 사이에 일어나는 현상은 결합 모드 이론(coupled mode theory)^[5]을 이용하여 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt}a_S(t) = -(i\omega_S + \Gamma_S)a_S(t) + i\kappa_{SS}a_S(t) + i\kappa_{SD}a_D(t) \quad (1-1)$$

$$\frac{d}{dt}a_D(t) = -(i\omega_D + \Gamma_D)a_D(t) + i\kappa_{DD}a_D(t) + i\kappa_{DS}a_S(t) \quad (1-2)$$

여기서 $a_S(t)$ 와 $a_D(t)$ 는 소스 공진 코일과 디바이스 공진 코일에서의 모드 함수를 나타낸다. Γ_S , Γ_D 는 각 공진 코일의 감쇄 계수, κ 는 두 코일 사이의 커플링 계수, κ_{SS} , κ_{DD} 는 외부 영향에 의한 커플링 계수, ω_S , ω_D 는 각 공진 코일의 공진 주파수를 나타낸다. 커플링이 생기면 공진 코일이 원래 가지고 있던 공진 주파수가 커플링 계수 κ 에 의해 변하게 되는데, 공진 주파수의 변화량은 다음과 같다.

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

두 공진 코일이 동일하고, $\omega_S = \omega_D = \omega_0$, $\kappa_{SS} = \kappa_{DD} \approx 0$, $\Gamma_S = \Gamma_D = \Gamma$ 그리고 $a_S(0) = 1$, $a_D(0) = 0$ 라고 가정하여 위 두 식에서 방정식을 풀면, 각 공진 코일에서의 모드를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$a_S(t) = e^{-j\omega t} e^{-\Gamma t} \cos(kt) \quad (3-1)$$

$$a_D(t) = j e^{-j\omega t} e^{-\Gamma t} \sin(kt) \quad (3-2)$$

자기 공명 현상을 통해서 전력이 소스 공진 코일에서 디바이스 공진 코일을 거쳐 load 코일로 전달될 때의 효율(η)을 결합 모드 이론을 이용하여 계산하면 아래 식과 같다^[3].

$$\eta = \frac{P_{work}}{P_{total}} \quad (4-1)$$

$$= \frac{2\Gamma_w |a_D|^2}{2\Gamma_s |a_S|^2 + 2(\Gamma_D + \Gamma_w) |a_D|^2} \quad (4-2)$$

$$= \frac{\frac{\Gamma_w}{\Gamma_D} \frac{k^2}{(\Gamma_S \Gamma_D)}}{\frac{(\Gamma_D + \Gamma_w)^2}{\Gamma_D^2} + \left(1 + \frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}\right) \frac{k^2}{(\Gamma_S \Gamma_D)}} \quad (4-3)$$

$$\therefore \eta = \frac{\frac{\Gamma_w}{\Gamma_D} \frac{k^2}{(\Gamma_S \Gamma_D)}}{\left(1 + \frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}\right)^2 + \left(1 + \frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}\right) \frac{k^2}{(\Gamma_S \Gamma_D)}} \quad (4-4)$$

식(4-4)에 주어진 효율(η)은 $\Delta\eta/\Delta\frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}=0$ 이 되는 $\frac{\Gamma_w}{\Gamma_D}$ 값에서 최대값을 가진다.

2-2 헬리컬 공진 코일 설계

그림 2는 일반적인 헬리컬 형태의 공진기의 구조이다. 구현된 공진 코일은 구리 재질의 리츠 와이어로 두 코일간의 커플링 계수를 높이기 위하여 상호 인덕턴스는 증가시키고, 자체 인덕턴스는 감소시켜야 한다. 상호 인덕턴스를 증가시키기 위해서 두 공진 코일간의 형태와 크기를 동일하게 설계하였다. 시뮬레이션에서는 제작에 사용된 리츠 와이어의 정확한 구현이 어렵기 때문에 공진 코일과 같은 굵기의 지름 4.8 mm를 가지는 구조로 모델링하였다. 공진 코일의 지름은 24 cm, 턴수는 6, 코일 간의 pitch는 1 mm로 설정하였으며, 소스(디바이스) 코일은 3.4 mm의 굵기를 갖는 지름 24 cm의 단일 원형 루프 형태로 구현하였다. 그림 2와 같이 송, 수전부 공진 코일

그림 2. 헬리컬 공진 코일을 사용한 공진기
Fig. 2. The resonator using helical resonant coil.

그림 3. 헬리컬 타입 공진기의 S-parameter 특성
Fig. 3. Simulated S-parameters of the resonator using helical resonant coil.

의 중심에서의 이격 거리를 260 mm로 설정하였다. 공진기를 설계하기 위하여 3차원 구조와 구조 해석 툴인 Ansys의 HFSS^[6]를 사용하여 전자기 해석을 하였다.

그림 3은 설계한 공진기의 투과 계수(전송 효율)와 반사 계수의 특성을 S-parameters로 나타내었다. 13.56 MHz에서 투과 계수(S_{21})는 -1.47 dB(71.2 %)이며, 반사 계수(S_{11})는 -5.8 dB이다. 자기 공명을 이용한 S-parameters 특성은 over coupled와 under coupled, critically coupled 모드로 나뉠 수 있다^[7]. 두 공진 코일의 커플링 계수가 주파수 분열(frequency slitting)이 시작되는 지점의 값보다 증가할 때 over coupled(두 개의 주파수가 공진 주파수를 중심으로 양쪽 방향으로 갈라지는 형태) 모드와 거리가 늘어남에 따라서 커플링 계수가 약해져 전송 효율이 감소하는 under coupled 모드, 하나의 공진 주파수에서 최대 효율을 가지는 critically coupled 모드로 구분된다. 공진기 제작 시 코일의 감는 오차와 기생 성분 값, 외부 환경 등에 의해 시뮬레이션 결과가 측정 결과보다 높은 효율을 나타냈다.

2-3 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진 코일 설계

그림 4는 2-2절에서 설계된 헬리컬 공진 코일을 이용한 공진기의 효율향상을 위하여 본 논문에서 제안하는 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진기 구조이다. 이전 헬리컬 형태의 공진 코일과 동일하게 지름은 24 cm, 헬리컬 구조의 턴수는 4, 스파이럴 구조의 턴수는 2로 설정하였으며, 소스(디바이스) 코일

그림 4. 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진 코일을 사용한 공진기

Fig. 4. The resonator using combined helical and spiral structure.

그림 5. 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진기의 S-parameters 특성

Fig. 5. Simulated S-parameters of the resonator using combined helical and spiral structure.

은 3.4 mm의 굵기를 갖는 지름 24 cm의 단일 원형 루프 형태로 구현하였다. 그림 4와 같이 송, 수신부 중심에서 이격 거리는, 2-2 헬리컬 공진 코일 간의 거리와 동일하게 260 mm로 설정하였다.

그림 5는 제안된 공진기의 투과 계수(전송 효율)와 반사 계수의 특성을 S-parameters로 나타내었다.

13.56 MHz에서 투과 계수(S_{21})는 -1.17 dB(76.3%)이며, 반사 계수(S_{11})는 -6.13 dB이다. 그림 3의 결과와 비교하면 제안된 공진기의 전송 효율과 반사 계수가 기존의 헬리컬 공진기에 비해 0.3 dB 향상됨을 확인할 수 있었다.

표 1. 각각의 공진 코일의 계산 결과

Table 1. Calculated results of each resonator.

	헬리컬 공진기	헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진기
$L_s, L_D (\mu H)$	14.1	13.3
Q	2,143	2,873
k	331×10^3	307×10^3
$M (\mu H)$	0.104	0.091
$\Gamma(S, D)$	20,814	16,279
Γ_ω	55,348	55,348
계산된 효율(%)	71.6	76.3
시뮬레이션 효율 (%)	71.2	76.3

Ansys Q3D Extractor^[8]를 사용하여 송수전부 코일의 인덕턴스 값과 저장값을 추출하여 표 1의 파라미터 값들을 식 (4-4)에 대입하여 계산한 결과, 표 1에 계산된 효율 71.6 %를 얻었다. 이 값은 시뮬레이션에 의해 구해진 효율 71.2 %와 거의 동일함을 확인할 수 있었다. 그러나 제안된 공진 코일 구조는 헬리컬과 스파이럴이 결합된 구조여서 기존의 공진 코일의 상호 인덕턴스를 구하는 식으로는 정확한 계산이 불가능하여, 시뮬레이션의 효율값을 계산된 효율값과 동일하게 설정하고, 이로부터 상호 인덕턴스를 계산하였다. 이 결과, 헬리컬 공진기에 비해 결합 계수(k)와 Q 값이 증가함을 확인할 수 있었다. 여기서 L_s, L_D 는 송, 수신 공진 코일의 인덕턴스이며, k 는 커플링계수, M 은 상호 인덕턴스, Γ 은 감쇠율을 나타

그림 6. 제안된 공진기의 자계 분포

Fig. 6. H-field of the proposed resonator.

낸다.

그림 6은 자기 공명으로 인한 무선 전력 전송을 자기장의 크기를 통하여 나타냈다. 송전부 코일에 전력이 여기되고, 강한 자기 공진 커플링으로 동일한 공진 주파수에서 수신부 코일에 자계가 형성되어 전력이 전달됨을 확인할 수 있었다.

III. 측정 결과

그림 7(a)와 7(b)는 제작된 공진 코일의 평면도와 측면도이다. 공진 코일을 통하여 전력을 전송할 경우, 코일에서의 전력 손실은 주로 내부 저항에 의한 것으로 이를 최소화하기 위해 AWG(American Wire Gauge) 11.5인 리츠 와이어를 사용하였다. 리츠 와이어는 동일한 직경의 단선에 비해 코일의 표면적이 크므로 공진 주파수에서 skin effect에 의한 손실을 감소시킬 수 있다. 또한, 선의 형태가 유연하여 헬리컬과 스파이럴 형태로 제작이 용이하며, 제작된 시제품은 리츠 와이어를 지지할 수 있는 원통형 아크

(a) 제안된 공진 코일 (b) 측면도
(a) The proposed resonant coil (b) Side view

(c) LED 램프 점등
(c) LED lighting test setup

그림 7. 제작한 시제품

Fig. 7. Photograph of the fabricated prototype WPT system.

그림 8. 제안된 공진기의 S-parameter 측정값

Fig. 8. Measured S-parameters of the proposed resonator.

를 사용하였다. 그림 7(c)는 제작된 시제품이다. 공진기의 수신부 디바이스 코일에 LED 램프(LG 전자, 7.5 W)를 부하로 사용하였다. 송전부 소스 코일에 연결되어 있는 RF 제너레이터에 5~10 W의 입력 전압을 인가하여 LED 램프의 점등을 확인하였고, 최대 50 cm까지 점등됨을 확인하였다.

그림 8은 제작한 공진기의 S-parameters와 기존의 헬리컬 공진기의 효율을 비교한 측정 결과이다. 송수전 코일 종단에서 120 mm 이격되었을 때 제안된 공진기의 투과 계수(S_{21})는 -1.54 dB(70 %), 헬리컬 구조 공진기의 투과 계수(S_{21})는 -2.1 dB(62 %)의 측정 결과를 얻었다. 또한, 제안된 공진기에서 좀 더 넓은 대역폭 특성을 얻었으며, 입출력 반사 계수(S_{11} , S_{22})는 -10 dB 이하의 값을 나타냈다. 시뮬레이션 결과로 얻어진 전송 효율(71.2 %, 76.3 %)과 비교하면 다소 낮은 전송 효율이 측정되었지만, 제작을 통한 효율증가를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션상의 리츠 와이어를 이용한 공진 코일 설계의 부정확성과 제작상의 오차, 제작한 코일 내부 저항의 증가로 측정 결과가 시뮬레이션 결과보다 낮은 효율을 나타냈다고 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 자기 공명 방식을 이용한 무선 전력 전송 시스템에서 코일의 구조에 따른 효율 개선 특성을 시뮬레이션과 시제품을 제작을 통하여 검증하였다. 제안된 공진기를 사용하여 송수전 공진 코

일이 120 mm 이격되었을 때 70%의 전송 효율을 얻을 수 있었다. 기존의 공진기보다 헬리컬과 스파이럴 형태가 결합된 공진 코일을 사용하여 약 13%의 전송 효율 개선과 33% 정도의 크기 감소가 가능하였다. 향후 정확한 시뮬레이션과 측정 결과를 얻기 위해 효율에 영향을 미치는 파라미터의 분석과 연구가 필요하다. 자기 공명 방식을 이용한 무선 전력 전송 연구는 휴대기기용 무선 충전뿐만 아니라 고효율용 전자 제품 및 차량의 무선 전원 공급 및 로봇, 의료 분야 등에 다양하게 적용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 이명래, 강승열, 김용해, 전상훈, 정태형, "무선전력전송(wireless power transfer) 기술의 개요", 대한전기학회, 전기의 세계, 59(1), pp. 34-43, 2010년 1월.
- [2] 장병준, "무선전력전송 기술 동향 및 주요 이슈", 정보통신산업진흥원, 주간기술동향, no. 1455, pp. 1-10, 2010년.
- [3] 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, pp. 83-85, Jul. 2007.
- [4] 김진욱, 지현호, 최연규, 윤영현, 김관호, 박영진, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 21(6), pp. 553-713, 2010년 6월.
- [5] Hermann A. Haus, Weiping Huang, "Coupled-mode theory", *Proceedings of the IEEE*, vol. 79, no. 10, Oct. 1991.
- [6] HFSS: *High Frequency Structure Simulator Based on the Finite Element Method*, v.13, Ansys Corporation.
- [7] Alanson P. Sample, David T. Meyer, Joshua R. Smith, and Member, IEEE, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 544-554, Feb, 2011.
- [8] *Q3D Extractor : Parasitic Extraction for High-Performance Electronic Design*, v. 10, Ansys Corporation.

장 요 한

2003년 8월: 광운대학교 제어계측공학과 (공학사)
2005년 7월: 영보엔지니어링 Bluetooth H/W 연구원
2005년 8월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] CMOS RFIC, 초고주파 능·수동소자 설계, 무선전력전송

권 재 순

2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2010년 3월~현재: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 무선 전력 전송, 안테나

박 재 수

1996년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
1998년 3월~현재: LG전자 생산기술원
2007년 8월~현재: 한양대학교 전자

통신컴퓨터 박사과정

[주 관심분야] EMC, SI/PI, 무선 전력 전송, RF High Power

최 재 훈

1980년: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1986년: 미국 Ohio State University
전기공학과 (공학석사)
1989년: 미국 Ohio State University
전기공학과 (공학박사)
1989년~1991년: 미국 Arizona State

University 연구교수

1991년~1995년: 한국통신위성사업단 연구팀장

1995년~현재: 한양대학교 융합전자공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 및 마이크로파 회로 설계, EMC