

논문 2014-51-1-7

# 메타구조 기반의 고효율 공진형 무선전력전송 시스템

(Resonant Wireless Power Transfer System with High Efficiency using Metamaterial Cover)

김형준\*, 서철헌\*\*

(Hyoungjun Kim and Chulhun Seo<sup>Ⓢ</sup>)

## 요약

본 논문에서는 공진형 무선전력전송 시스템의 효율 개선을 위해 메타구조 기반의 단위 셀 및 배열된 구조를 제안하였다. 자기장 집속을 위해 제로 굴절률 특성을 이용하였으며, 이를 구현하기 위해 유효 투자율의 실수가 0의 값을 갖도록 설계하였다. 제안된 단위 셀의 크기는 70 mm × 70 mm × 3.2 mm 이며, 동작 주파수는 13.56 MHz 이다. 또한, 배열된 구조의 크기는 400 mm × 400 mm × 3.2 mm 이며, 2-layer 구조로 이루어져 있다. 본 논문에서 제안한 공진형 무선전력전송 시스템의 효율은 송수신 공진기 사이의 거리가 100 mm ~ 400 mm에서 각각 94.8 %, 93.2 %, 91.4 %, 90.8 % 이며, 전체 거리에서 90 % 이상의 고효율 특성을 얻을 수 있었다.

## Abstract

In this paper, unit cell and arrayed cover for improving the transfer efficiency of resonant wireless power transfer system is proposed. We used the characteristic of zero refractive index for focusing a magnetic field between the transmitting resonator and receiving resonator. For zero refractive index, we designed the unit cell structure that have a negative value of effective permeability. The size of proposed unit cell based on metamaterial structure is 70 mm × 70 mm × 3.2 mm, operating frequency is 13.56 MHz. And, the size of arrayed cover is 400 mm × 400 mm × 3.2 mm, is consists of 2-layers. The transfer efficiency of the proposed wireless power transfer system are 94.8 %, 93.2 %, 91.4 %, 90.8 % at 100 mm, 200 mm, 300 mm and 400 mm (distance between transmitting and receiving resonator), respectively. And proposed WPT system has a transfer efficiency high than 90 % over the overall distances.

**Keywords :** Wireless power Transfer, metamaterial, resonant, high transfer efficiency, zero refractive index

## I. 서론

최근 수년 동안 최종전선 단을 제거하기 위한 무선전력전송 기술의 연구 및 개발에 관한 관심이 증가하고 있다<sup>[1]</sup>. TV, 휴대전화, 노트북 등과 같은 소형 전자기기에서부터 전기자동차와 같은 대전력 전자기기들에 전원을 공급하는 수많은 배터리와 콘센트에 연결된 수많은 전선들의 존재와 영킴 등은 단일의 편리한 충전 시스템 설계에 관한 관심을 유발시켰다. 이에 무선전력전송 시스템은 송수신 코일을 통해 무선으로 충전을 가능하게

\* 학생회원, \*\* 정회원, 송실대학교 정보통신전자공학부 (Department of Electronics Engineering, Soongsil University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: chulhun@ssu.ac.kr)

※ This work was supported by Basic Research Laboratories (BRL) through NRF grant funded by the MEST (No.2013056381).

※ This work was supported by the Human Resources Development program (No.20124010203160) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Knowledge Economy.

접수일자: 2013년9월13일, 수정완료: 2014년1월2일

할 수 있으며, 휴대무선장치들의 최종전선 단을 제거할 수 있다. 무선전력전송 방법은 크게 3가지로 나누어 질 수 있다<sup>[2]-[4]</sup>. 전자기파 방사 방식, 유도형 방식, 공진형 방식으로 나뉠 수 있으며, 각각 방식은 장단점을 가지고 있다. 전자기파 방사 방식은 원거리 전송에 가능하지만, 저효율 특성을 가지고 있으며, 유도형 방식은 고효율 전력전송이 가능하지만, 초근접 거리에서만 전송이 가능하다. 공진형 방식은 전자기파 방사 방식과 유도형 방식의 중간 단계로 중장거리에서 전력 전송이 가능하며 고효율 특성을 가질 수 있다. 무선전력전송 기술에서 가장 중요한 기술적 요소는 전송 가능 거리와 전송 효율 성능이다. 최근 이러한 전송 가능 거리와 전송 효율 특성을 개선시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이 중 Veselago에 의해 제안된 음의 굴절률을 갖는 물질을 가정한 후 Pendry에 의해 구현된 메타물질에 관한 연구가 활발해지고 있다<sup>[5]-[7]</sup>. 이러한 메타구조를 이용한 무선전력전송 기술은 송수신 공진기 사이에서 전달되는 자기장을 수신 공진기로 집중시킴으로써 전력 전송 거리 및 전송 효율을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 유효 유전율 또는 유효 투자율을 0으로 근사화 함으로써 굴절률을 0으로 근사화 시키고 이에 자기장을 집중시키는 제로 굴절률 특성을 갖는 메타구조 기반의 cover를 이용하여 무선전력전송 시스템의 전송 가능 거리 및 전송 효율을 개선하였다.

## II. 메타구조 기반의 단위 셀 및 배열

본 논문에서는 공진형 무선전력전송 시스템의 전송 거리 및 전송 효율을 개선하기 위해 제로 굴절률 특성을 갖는 메타구조를 제안하였다. Snell의 법칙에 의해 굴절률은 유전율과 투자율에 의해 정의된다. 제로 굴절률 특성을 얻기 위해 유효 유전율 또는 유효 투자율을 0으로 근사화하면 된다. 따라서 본 논문에서는 유효 투자율(실수)을 0으로 근사화 시켰으며, 이를 위해 SRR (Split Ring Resonator) 구조를 사용하였다. 본 논문에서 제안한 구조는 SRR 구조와 이를 연결하는 via 구조로 이루어져 있다. 사용된 기판은 Taconic 사의 CER-10 이며, 유전율은 10.2 이다. 단위 셀의 크기는 70 mm × 70 mm × 3.2 mm 이다.

이 구조의 유효 유전율 및 유효 투자율은 다음의 식 (1)-(3)에 의해 S-parameter 과 단위 셀의 배열 거리에

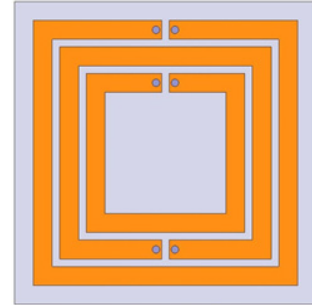


그림 1. 제안한 메타구조의 단위셀  
Fig. 1. Proposed unit cell of metamaterial structure.

따라 추출할 수 있다.

$$a = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left| \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right| \quad (1)$$

$$b = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{a}{b}, \quad \mu_{eff} = a \cdot b \quad (3)$$

식 (1)~(3)으로부터 추출한 유효 유전율과 유효 투자율의 실수 값 특성을 그림 2에 나타내었다. 동작주파수인 13.56 MHz 대역에서 각각 유효 유전율의 실수 값은 5.16, 유효 투자율의 실수 값은 -0.07이다.

그림 3은 제안한 단위 셀로 이루어진 배열 구조를 통해 송수신 공진기 앞에 배치되는 메타구조 기반의

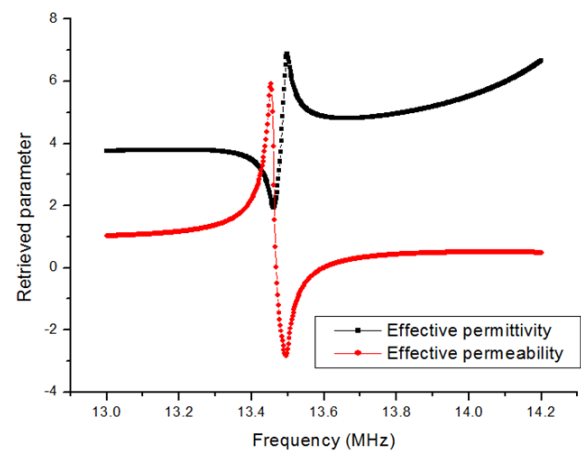


그림 2. 제안한 단위셀의 유효 유전율 및 유효 투자율  
Fig. 2. Effective permittivity and effective permeability of proposed unit cell.

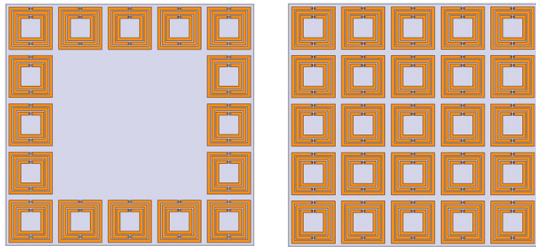


그림 3. 제안한 메타구조 기반의 커버  
Fig. 3. Proposed cover based on metamaterial structure.

cover를 보여주고 있다. 메타구조 cover는 총 2개로 이루어져 있으며, 5×5 형태의 배열 구조이며, 또 하나는 가운데가 비워있는 구조로 이루어져 있다. 이는 메타구조 기반의 cover의 성능을 최적화하기 위해 제안된 구조이다. 각각의 메타구조 기반의 cover는 기본 송수신 공진기의 앞에 위치하게 되며, 재료 굴절률 특성을 이용하여 원거리에서도 평탄한  $S_{21}$  특성 및 이에 따른 고른 형태의 고효율 특성을 얻을 수 있다.

### III. 무선전력전송 시스템 설계

기본 송수신 공진기의 구조를 그림 4에서 보여주고 있다. 전체 loop의 반지름은 100 mm 이며, copper의 두께는 3 mm, 원통의 지름은 30 mm로 이루어져 있다. 송수신 공진기 사이의 거리는 100 mm부터 400 mm로 설정하였다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 메타구조 기반의 무선 전력전송 시스템의 구조이다. 기본 송수신 공진기와 제안된 메타구조 기반의 cover로 이루어져 있다. 각각의 기본 송수신 공진기 아래 부분에는 공진주파수를 위해 L-C 임피던스 정합회로가 포함되어 있다.

그림 6은 송수신 공진기 사이의 거리가 100 mm에

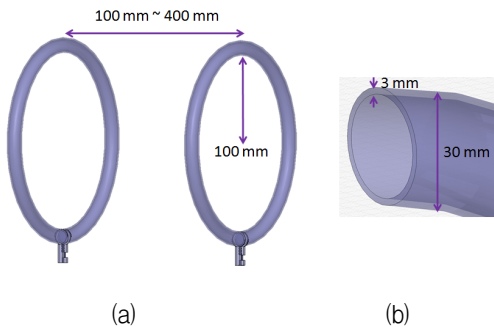


그림 4. 기본 송수신 공진기 (a) 전체, (b) 구리  
Fig. 4. Basic resonator structure (a) overall (b) copper.

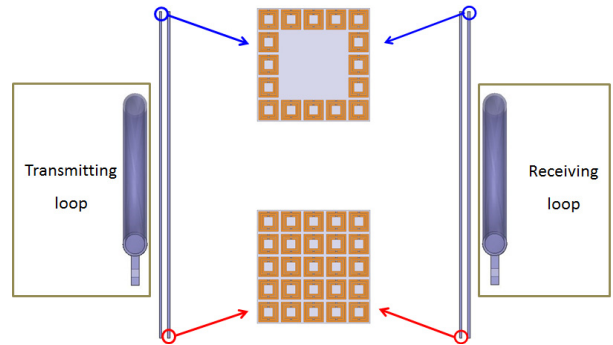


그림 5. 제안한 무선전력전송 구조  
Fig. 5. Proposed WPT structure.

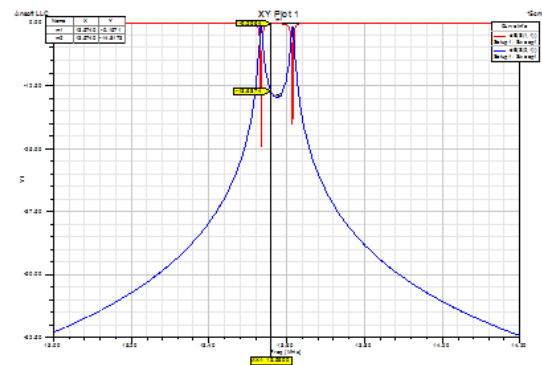


그림 6. 기본 무선전력전송 구조의 S-parameter (100 mm)  
Fig. 6. S-parameter for conventional WPT structure (100 mm).

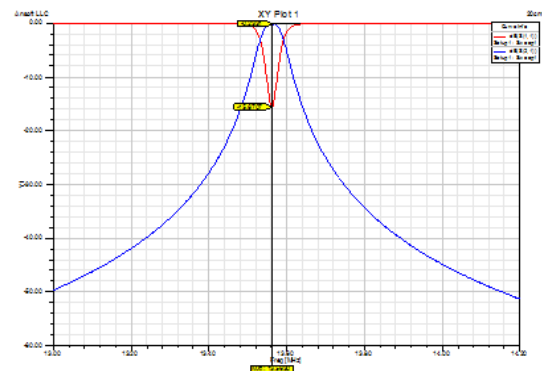


그림 7. 제안한 무선전력전송 구조의 S-parameter (100 mm)  
Fig. 7. S-parameter for proposed WPT structure (100 mm).

다른 기본 무선전력전송 시스템의 S-parameter ( $S_{21}$ ) 특성을 보여주고 있다. 설계 시 송수신 공진기간 거리는 400 mm에서 최적화 된 구조이므로 거리가 100 mm에서는 over-coupling으로 인한 split 현상이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

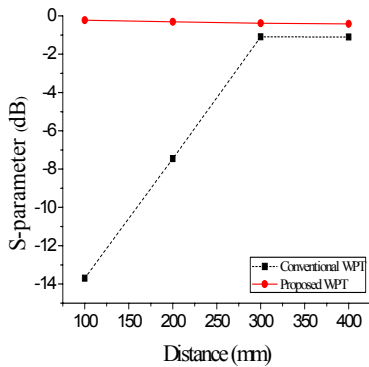


그림 8. 무선전력전송 구조의 S-parameter 특성 비교  
Fig. 8. Comparison of S-parameter for WPT structure.

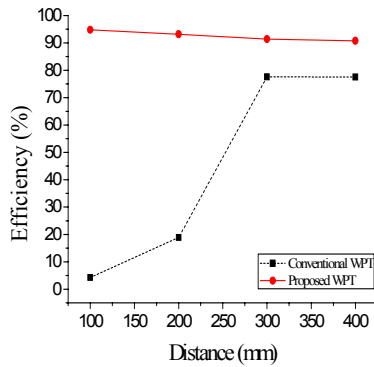


그림 9. 무선전력전송 구조의 효율 특성 비교  
Fig. 9. Comparison of efficiency for WPT structure.

그림 7에서 보여주는 것과 같이 제안된 무선전력전송 구조는 송수신간 거리가 가까워짐에도 불구하고  $S_{21}$  특성의 split 현상이 없음을 확인할 수 있다.

그림 8은 거리에 따른 기본 무선전력전송 시스템과 제안된 무선전력전송 시스템의 S-parameter ( $S_{21}$ ) 특성을 비교하여 보여주고 있다.

기본 송수신 구조에 비해 제안된 구조는 거리가 가까워짐에도 불구하고  $S_{21}$  특성의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 그림 9는 추출된 S-parameter로부터 계산된 효율 특성을 보여주고 있다. 위에서 언급한 것과 같이 송수신 공진기 사이의 거리가 가까워짐에도 split 현상이 발생하지 않기 때문에 100 mm에서 400 mm까지의 거리에서도 고효율 특성을 유지하고 있다.

표 1과 2는 기본 무선전력전송 구조와 제안한 무선전력전송 구조의 거리에 따른 S-parameter 특성과 효율 특성을 나타내었다.

표 1. 기본 무선전력전송 구조의 성능 결과

Table 1. Simulation result of conventional WPT structure.

	송수신간 거리			
	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
$S_{11}$ (dB)	-0.21	-0.95	-10.56	-6.93
$S_{21}$ (dB)	-13.69	-7.45	-1.13	-1.1
Efficiency (%)	4.3	18.9	77.4	77.6

표 2. 제안한 무선전력전송 구조의 성능 결과

Table 2. Simulation result of proposed WPT structure.

	송수신간 거리			
	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
$S_{11}$ (dB)	-15.67	-13.62	-12.1	-11.71
$S_{21}$ (dB)	-0.23	-0.31	-0.39	-0.42
Efficiency (%)	94.8	93.2	91.4	90.8

#### IV. 결 론

본 논문에서는 공진형 무선전력전송 시스템의 고효율 성능을 얻기 위해 메타구조 기반의 구조를 이용하였다. 송수신 공진기 사이의 자기장 집속을 위해 제로 굴절률 특성을 갖는 구조를 제안하였으며, 이를 구현하기 위해 SRR과 via를 이용한 단위 셀을 제안하였으며, 이 구조는 유효 투자율의 실수 값이 0인 특성을 갖게 된다. 또한, 배열 구조를 통하여 메타구조 기반의 cover을 제안하였다. 기존의 송수신 공진기에 제안한 메타구조 기반의 cover를 각각 송수신 공진기 앞에 배치함으로써 송수신 공진기 사이의 자기장 집속을 통하여 100 mm ~ 400 mm 거리에서도 90% 이상의 고효율 특성을 얻을 수 있었다.

#### REFERENCES

[1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", Science, vol. 317, Jul. 2007.

- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, No. 1, 34-48, Jan. 2008.
- [3] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, "Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 7, 1819-1825, Jul. 2009.
- [4] Xun Liu, S. Y. Hui, "Simulation Study and Experimental Verification of a Universal Contactless Battery Charging Platform With Localized Charging Features," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 6, 2202-2210, Nov. 2007.
- [5] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability," *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 10, 509-514, Jan. 1968.
- [6] G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, C. M. Soukoulis, and S. Linden, "Simultaneous negative phase and group velocity of light in a metamaterial," *Science*, Vol. 32, No. 5775, 892-894, 2006.
- [7] L. Markley, and G. V. Eleftheriades, "A negative-refractive-index metamaterial for incident plane waves of arbitrary polarization," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 6, 28-32, 2007.

---

— 저 자 소 개 —

---



김 형 준(학생회원)  
2005년 2월 숭실대학교 정보통신  
전자공학부 (공학사)  
2007년 2월 숭실대학교 정보통신  
공학과 (공학석사)  
2007년 3월~현재 숭실대학교  
정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 초고주파 회로 설계, RF Power Amplifier, RFIC, VCO, 무선전력전송>

서 철 헌(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
vol.31, no. 6 참조