

## 유전체에 삽입된 자기공진형 무선전력전송 공진기의 공진주파수 복원에 관한 연구

# Resonant Frequency Recovery of Resonator for Magnetic Resonant Wireless Power Transfer Inserted into Dielectric Material

강 석 현<sup>1</sup> · 정 창 원<sup>\*2</sup>

Seok Hyon Kang<sup>1</sup> · Chang Won Jung<sup>\*2</sup>

### 요 약

본 논문에서는 향후 인체 내장형 의료기기의 무선충전 및 지금까지는 발생하지 않은 다양한 유전체 내부로의 무선전력전송 시 유전체 매질의 전자기적 특성에 따른 효율 및 공진주파수 변화에 대한 공진기의 최적화 설계를 위해 공진기의 정전용량(capacitance)을 조정하는 방법과 공진기의 전후 표면에 공기층(air pocket) 설치 방법을 제안하였다. 본 연구결과는 추후 공진기를 둘러싼 다양한 유전체 환경에 대한 공진주파수의 설계 및 복원에 대한 기초 연구 자료로 활용될 수 있다.

### Abstract

The wireless charging of body-embedded medical instruments and wireless power transfer to various inside dielectric-materials is still a future technology that has not yet been achieved. This paper proposes methods for controlling the capacitance of the resonators and installing air pockets on the top and bottom sides of the resonators for optimal design, which considered efficiency and resonant frequency in accordance with the electromagnetic characteristics of the dielectric medium. In future, the results of this research will be utilized as the basic research data to design and restore resonant frequency of resonators embedded in various dielectric environments.

Key words: Magnetic Resonant Wireless Power Transfer, Resonator, Resonant Frequency, Frequency Recovery, Dielectric Material

## I. 서 론

자기장의 유도 또는 공진 방식의 자기결합을 통해 무선으로 전력전송이 가능한 무선전력전송 시스템은 기본적으로 다양한 전자기기의 충전이 가능하며, 추후 환자의

인체 내부에 삽입되는 심장박동기 등의 인체 내장형 의료기기 무선충전 분야에 적용 시 환자의 시술 횟수 감소, 의사의 시술 편리성 등을 증대시킬 수 있다. 이러한 인체 내장형 기기의 무선충전은 송수신 공진기가 밀착되어 있는 유도형 무선전력전송보다는 일정한 거리의 무선전력

「이 연구는 서울과학기술대학교 교내과제로 연구되었음」

경북대학교 첨단치과의료기기개발연구소(Advanced Dental Device Development Institute, Kyungpook National University)

\*서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원(Graduate School of Nano · IT · Design Fusion, Seoul National University of Science and Technology)

1: 책임연구원, 2: 교수

· Manuscript received September 21, 2018 ; Revised October 30, 2018 ; Accepted December 13, 2018. (ID No. 20180921-101)

· Corresponding Author: Chang Won Jung (e-mail: changwoj@seoultech.ac.kr)

이 가능한 공진형 무선전력전송이 적합하며, 이 때 무선 전력 수신기가 인체 내부(유전체)에 위치하여 외부로부터 전력이 무선 충전되며, 또한 추후 지금까지는 발생하지 않은 다양한 유전체 내부로의 무선전력전송 상황이 발생 가능하다고 판단된다<sup>[1][2]</sup>. 이러한 유전체 내부로의 무선 전력전송 응용분야는 자유공간 내 전송과 달리, 유전체 내부의 공진기는 유전체 매질의 전자기적 특성에 따라 효율 및 공진주파수가 변하며<sup>[3]</sup>, 이에 따른 동작 주파수에서의 임피던스 정합 최적화가 요구된다.

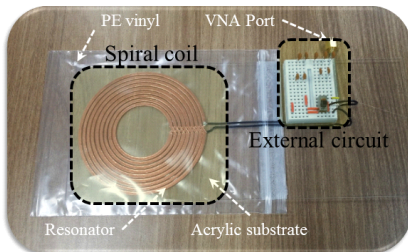
본 논문에서는 자기공진형 무선전력전송에서 유전체 내 삽입되어 있는 공진기의 공진주파수 변화에 따른 주파수 및 효율 최적화를 위해, 공진기의 정전용량(capacitance)을 조정하는 방법과 공진기의 전후 표면에 공기층(air pocket) 설치 방법을 제안하였으며, 사용된 유전체는 공기와 증류수이다. 본 논문의 실험 결과는 공진기를 둘러싼 다양한 유전체에 대한 공진주파수의 복원 연구의 기초자료로 활용될 수 있다.

## II. 유전체 삽입형 공진기

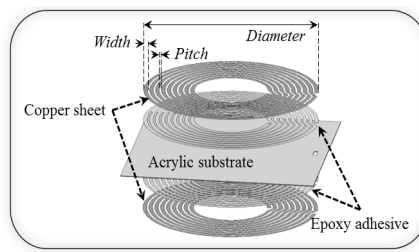
본 연구에서는 자기공진형 무선전력전송용 공진기의 주변 유전체 환경에 따른 효율 및 공진주파수(resonant frequency)를 복원하고 최적화하기 위해, 공진기의 정전용량을 조정하는 방법과 공진기의 전후 표면에 공기층(air pocket)을 설치하고, 그 두께를 조정하는 방법을 제안하였다. 일반적으로 공진기의 공진주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{coil} \times (C_{coil} + C_{external})}} \quad (1)$$

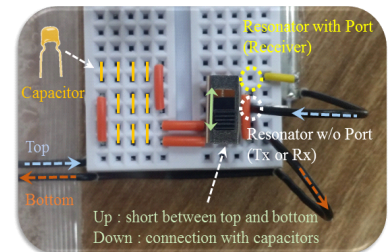
제안된 유전체 삽입형 자기공진 무선전력전송 공진기는 그림 1(a)와 같이 나선형 공진기와 유전체의 전기적 특성에 따른 변화를 보상하기 위한 외부 커패시터 회로로 구성되어 있다. 그림 1(b)에서처럼 나선형 공진기는 두께 35  $\mu\text{m}$ 의 전도성 시트(copper sheet)를 이용하여 아크릴( $\epsilon_r=2.62$ ,  $\tan\delta=0.01$ ) 기판의 전후면에 이중평면나선코일로 제작하였다. 이중평면나선코일은 최외각 지름(diameter)이 9 cm이며, 2 mm 넓이(width)로 1 mm 간격(pitch)을 유지하며, 중심 방향으로 9회 감겨 있다. 나선형 코일은 아크릴 기판을 중심으로 서로 반대 방향으로 감겨 있으며, 전후면의 나선형 패턴 외각의 끝부분은 모두 그림 1(c)와 같이, 외부 커패시터 회로(external circuit)에 연결되어 있다. 외부 회로는 커패시터가 병렬 연결되어 있으며, 공진기의 정전용량을 조정하여 공진주파수를 변화시키는 역할을 한다. 이때 정전용량 조정 방법은 외부 커패시터( $C_{external}$ )를 회로에 병렬(parallel)로 연결하여 공진기의 정전용량( $C_{coil}$ )을 조정하여 공진주파수( $f_0$ )를 변화시킨다. 회로의 컨트롤 스위치를 위로 하면 패턴의 전후면이 단락되며, 커패시터를 연결할 수 있고, 아래로 하면 단선이 된다. 유전체는 공기( $\epsilon_r=1.0005$ ); 유전체에 삽입되지 않은 경우와 증류수( $\epsilon_r=76.7$ ,  $\tan\delta=0.005$ ); 유전체에 삽입된 경우의 두 가지의 경우에 대하여 최적화하였다. 또한, 증류수에 삽입 시에 PE 비닐( $\epsilon_r=2.26$ ,  $\tan\delta=0.0002$ )을 이용하여 증류수와 공진기가 접촉되는 것을 보호하였다.



(a) 유전체 삽입형 공진기  
(a) Resonator embedded in dielectric material



(b) 나선형 공진기  
(b) Spiral resonator

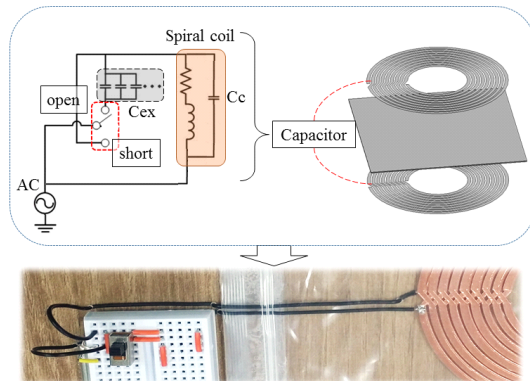


(c) 외부 컨트롤 회로부  
(c) External control circuitry

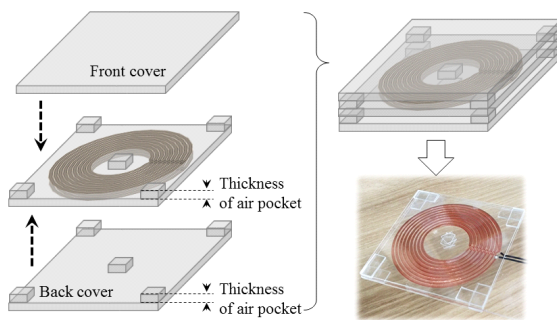
그림 1. 제안된 유전체 삽입형 자기공진형 무선전력전송 공진기의 구성

Fig. 1. The configuration of the proposed resonator for magnetic resonant wireless power transfer embedded in dielectric material.

공진기가 액상 유전체(liquid dielectric material)에 삽입될 때, 변화된 공진주파수를 복원하기 위해 그림 2와 같이 두 가지 방법을 제시하였다. 첫 번째 방법 공진기의 정전용량을 이용하는 방법으로, 그림 2(a)와 같이 이중평면 나선코일의 전후면의 겹(overlapping area)에 의한 정전용량과 외부 컨트롤 회로의 커패시터와 병렬연결을 통하여 공진주파수를 최적화할 수 있다. 두 번째 방법은 그림 2(b)와 같이 아크릴 박스를 이용하여, 공진기의 전후면에 공기층을 갖게 하는 것이다. 공진기가 액상 유전체 내에 삽입되면 주변 유전체 환경에 따라 전자기적 특성이 변화하므로, 설치된 공기층에 의해 공기층 내에서 공기 중에서의 전자기적 특성을 보이며, 공진주파수가 복원될 수



(a) 정전용량에 의한 최적화  
(a) Optimization by capacitance



(b) 공기층(air pocket)에 의한 최적화  
(b) Optimization by the air pocket

그림 2. 공진기 주변 유전체 환경변화에 따른 공진주파수 최적화 방법

Fig. 2. The optimization methods of resonant frequency according to variances of the dielectric environment.

있다. 제시된 해결책의 검증을 위해 공진기 및 측정 장치를 직접 제작하고, 공기와 다른 매질에서 변화된 공진주파수를 정전용량 이용 및 공기층 설치 방법으로 복원하여 측정 결과를 통해 비교 분석하였다.

공진주파수 측정 시, 그림 3에서처럼 공진기의 공진주파수를 측정하기 위해 액상의 유전체를 담을 수 있는 아크릴 수조( $W \times L \times H = 12 \times 8 \times 15$  cm)를 제작하였으며, 최외각 지름 11 cm, 넓이 0.5 cm의 원형루프공진기를 외부 양면에 설계하였다. 두 원형루프공진기는 회로망 분석기(Agilent E5701B)의 포트 1과 2에 각각 연결된다. 이때 공진기가 아크릴 수조 내에서 양쪽 공진기와 중심축에 위치하면 증계기(repeater)로써 동작하여 임의의 주파수에서 두 원형루프공진기 간의 투과계수  $S_{21}$ 이 높아지며, 이 주파수가 공진기의 최적화된 공진주파수가 된다.

### III. 측정 결과 및 분석

공기(air standard)와 증류수(distilled water) 두 매질에서 정전용량 및 공기층을 이용한 방법을 통해 공진기의 공진주파수를 네트워크 분석기로 측정하고, 그 결과를 비교 분석하였다. 두 경우 모두 공기 중에서 공진주파수가 6.24 MHz이며, 증류수(distilled water) 안에서 단락되었을 때 측정되었다. 그림 4(a)에서처럼, 정전용량 조정 방법을 이용하여 공기 중에서의 증류수에서의 공진주파수를 측정하였다. 공기 중에서 400 pF, 증류수에서는 4 pF가 외부 회로에 병렬 연결되었을 때 공진주파수가 6.74 MHz였으며, 증류수 중에서는 투과계수  $S_{21}$ 이 -15.18 dB에서 -33.24 dB로 감소하였다. 또한 그림 4(b)에서처럼, 공기층의 두께에 따른 공진주파수의 변화를 확인하기 위해, 두께 0 mm

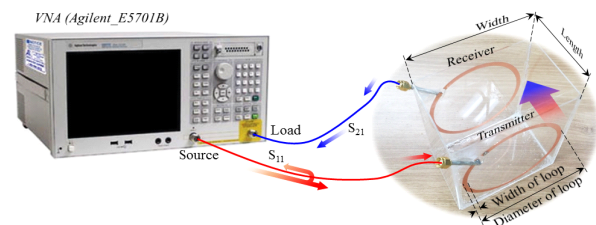


그림 3. 네트워크 분석기를 사용한 공진주파수 측정

Fig. 3. The measurement of the resonant frequency using the network analyzer.

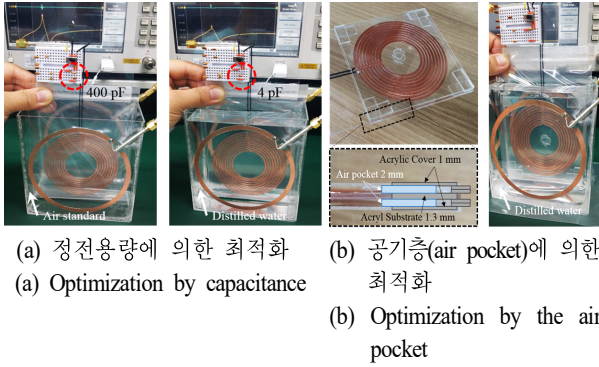


그림 4. 공진주파수 측정

Fig. 4. The measurement of resonant frequency.

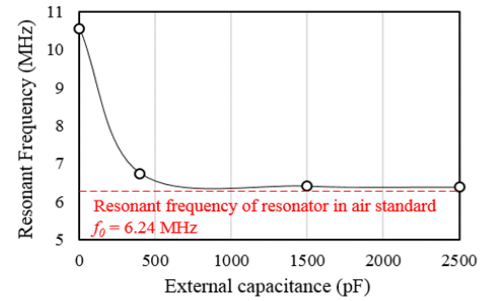
및 2 mm의 공기층을 공진기의 전후면 설치하고, 증류수 내에서 측정하였다. 두께 0 mm의 경우, 공진주파수가 4.21 MHz로 감소하였으며, 공기층 2 mm일 때, 공진주파수가 6.01 MHz까지 복원되었다. 그림 5의 공진주파수 복원 측정 결과, 정전용량 방법의 경우 약 700 pF 이상일 때 6.26 MHz로, 공기층의 경우 약 1.5 mm 이상일 때 6.01 MHz로 공진주파수가 수렴하였으며, 6.24 MHz까지 복원되지 않은 것은 실험 오차로 예상된다. 위의 두 가지 측정 결과에 서처럼 정전용량과 공기층 적용 방법을 통하여 유전체 내부 공진기의 동작 주파수 최적화가 가능함을 확인하였다.

#### IV. 결 론

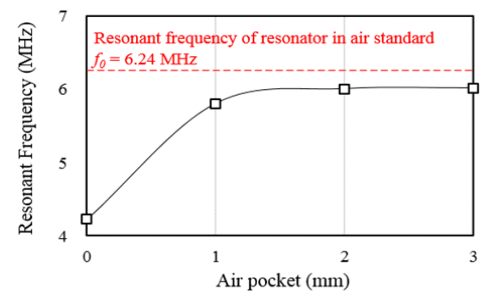
본 논문에서는 다양한 목적으로 유전체에 삽입되는 무선전력전송 공진기의 정전용량 및 공기층을 이용한 리액턴스 가변회로를 구성하고, 그 변화에 따라 증류수 내 공진기의 주파수 복원에 대한 실험을 진행하였다. 정전용량 방법의 경우 약 700 pF 이상일 때 6.26 MHz로, 공기층의 경우 약 1.5 mm 이상일 때 6.01 MHz로 공진주파수가 수렴하였으며, 추후 심장박동기 등과 같은 인체를 포함하는 유전체 삽입형 공진형 무선전력전송의 유전체 환경에 대한 공진주파수 복원의 기초 연구 자료로 활용될 수 있다.

#### References

[1] L. Feng, Y. Mao, and Y. Cheng, "An efficient and stable



(a) 정전용량에 의한 최적화  
(a) Optimization by capacitance



(b) 공기층(air pocket)에 의한 최적화  
(b) Optimization by the air pocket

그림 5. 증류수 내 공진기의 공진주파수 복원 측정 결과  
Fig. 5. The measurement results of the resonant frequency recovery of the resonator embedded in the distilled water.

power management circuit with high output energy for wireless powering capsule endoscopy," in *Solid State Circuits Conference, IEEE Asian Solid-State Circuits Conference 2011*, Jeju, Nov. 2011, pp. 229-232.

- [2] H. Kim, C. Seo, "Resonant wireless power transfer system with high efficiency using metamaterial cover," *Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 51, no. 1, pp. 47-51, Jan. 2014.
- [3] S. H. Kang, J. H. Choi, F. J. Harakiewicz, and C. W. Jung, "Magnetic resonant three-coil WPT system between off/in-body for remote energy harvest," *Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 9, pp. 741-743, Sep. 2016.