

재구성 슬릿 그라운드 공진기를 이용한 노트북용 자기공진형 무선전력전송

Magnetic Resonant Wireless Power Transfer Using Reconfigurable Slit Ground Resonator for Laptop Computer

강 석 현 · 정 창 원

Seok Hyon Kang · Chang Won Jung

요 약

본 논문에서는 자기공진형 무선전력전송의 실용화에 있어, 공진기 간 자기결합을 방해하는 그라운드 문제를 해결하기 위해 슬릿 구조를 설계하고, 커패시터를 연결하여 공진기로써의 성능을 기본적인 루프형의 수신 공진기와 비교하였다. 제안된 슬릿 그라운드 공진기(slit ground resonator)는 가로 31 cm, 세로 20.5 cm, 두께 35 μm 의 구리박판에 넓이 1 cm의 슬릿을 한 방향이 열린 십자 형태로 설계하였으며, 열린 방향 양단에 6.78 MHz에서 공진하도록 최적의 커패시터가 연결되어 공진기 역할이 가능하다. 수신 공진기는 스위치를 연결하여 열림형(open mode)과 닫힘형(short mode)일 때를 측정하고, 최고 전송효율을 표시하였다. 측정 결과, 수신 공진기가 루프 공진기일 때 가장 높은 전송효율을 보였다. 그러나 노트북 모델의 수신부에 그라운드를 삽입했을 때, 전송효율이 0 %에 가깝게 감소하였다. 반면, 슬릿 그라운드 공진기를 수신 공진기로 사용했을 때, 전송효율은 가장 높았던 루프 공진기의 67 % 회복하였다. 제안된 슬릿 그라운드 공진기는 슬릿을 통해 자기장을 통과시키며, 커패시터를 연결이 공진기로 동작하게 하여 주변 공진기 간 자기결합을 통해 전력을 전송해주는 역할을 수행한다.

Abstract

In this paper, slit ground resonator with slit and capacitor is proposed for practical use of magnetic resonant wireless power transfer(MR-WPT). And this paper presents the performance comparison of conventional loop resonator as Rx resonator to slit ground resonator. The proposed slit ground resonator with 31 cm width, 20.5 cm length, 35 μm thickness is designed the crossing slit 1 cm width with only opened edge. And an external capacitors were connected at the opened edge of slit ground resonator for resonating at 6.78 MHz. The transfer efficiencies of MR-WPT were measured at open and short mode, and then the highest transfer efficiencies of MR-WPT according to the Rx resonators were plotted. In result, the transfer efficiency of MR-WPT with loop resonator was the highest. However, when the ground was inserted in receiver part at the bottom of laptop model, the transfer efficiency was closed 0 %. The transfer efficiency recovered the transfer efficiency of 67 % using slit ground resonator. The magnetic field was penetrated through the slit and proposed slit ground resonator works as resonator in MR-WPT.

Key words: Magnetic Resonance, Wireless Power Transfer, Slit Ground Resonator, Transfer Efficiency, Practical Applications

「이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구과제로 수행되었음.」

서울과학기술대학교 나노·IT·디자인융합대학원(Graduate School of Nano·IT·Design Fusion, Seoul National University of Science and Technology)

· Manuscript received November 15, 2016 ; Revised December 13, 2016 ; Accepted December 30, 2016. (ID No. 20161115-119)

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

I. 서 론

최근 스마트폰, 노트북, 태블릿 PC 등 모바일 디바이스의 종류가 다양해지고, 사용 시간이 증가함에 따라 배터리 충전 시간 및 빈도가 증가하고 있으며^[1], 이에 따라 배터리 문제가 대두되고 있다. 일반적으로 유선으로 충전하는 경우, 모바일 디바이스의 이동 범위가 제한되는 불편함이 따르며, 이러한 문제를 해결하기 위해 무선전력전송(Wireless Power Transfer: WPT) 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[2]

무선전력전송에는 자기유도형(magnetic inductive)과 자기공진형(magnetic resonant)이 있다. 자기유도형은 접촉식으로써 자기유도 현상을 이용하여 급전공진기(source)가 부하공진기(load)의 전류를 형성시킨다. 전송효율(transfer efficiency)은 90 % 이상으로 높으나, 전송거리(transfer distance)가 수 cm 범위로 매우 짧다. 반면에 자기공진형은 급전공진기와 부하공진기 사이에 송신공진기(transmitter, Tx)와 수신공진기(Receiver, Rx)가 있으며, 각각 공진기가 형성하는 공진주파수(resonant frequency)에서 인접한 공진기와 자기결합(magnetic coupling)되어 전력이 전송된다. 자기공진형 무선전력전송(Magnetic Resonant Wireless Power Transfer: MR-WPT)은 전송거리가 제한적인 자기유도형의 단점을 극복하고, 전력 전송거리가 증가한다는 특징이 있다.

MR-WPT에는 시스템을 구성하는 공진기의 수에 따라 직접급전식(direct-fed)과 간접급전식(indirect-fed)으로 나뉜다. 직접급전식 MR-WPT는 급전공진기와 부하공진기로 구성된 것으로, 최고 전송효율이 근거리에서 형성된다. 반면에, 간접급전식 MR-WPT는 급전공진기와 부하공진기 사이에 송수신 공진기가 위치하게 되어, 최고 전송효율이 간접급전식 MR-WPT에 비해 비교적 원거리에서 형성된다. 간접급전식 MR-WPT는 2007년 MIT의 Marin Soljacic의 교수에 의해 연구된 이후 관련한 많은 연구들이 수행되었다^[3].

일반적으로 모바일 디바이스는 전자기판 등 그라운드(ground)가 필수적으로 포함되어 있다. MR-WPT는 그라운드가 설치되면 전송효율이 급격하게 감소한다. 이는 송신부와 수신부의 자기결합을 막기 때문이다. 대부분 선행

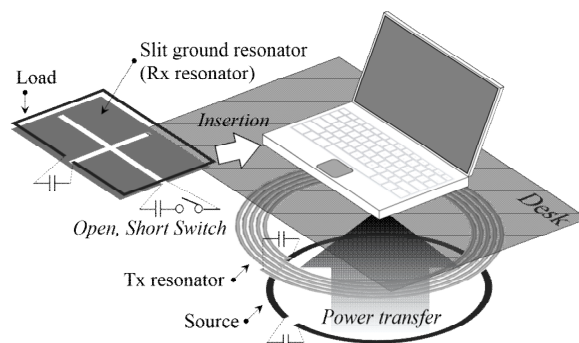


그림 1. 슬릿 그라운드 공진기를 적용한 MR-WPT
Fig. 1. MR-WPT using slit ground resonator.

연구에서는 공진기 간 전송효율을 향상시키기 위한 연구가 진행되고 있으며, 그라운드로 인한 문제는 고려되지 않았다.

본 연구에서는 자기공진형 무선전력전송을 실용화하는데 슬릿 그라운드 공진기(slit ground resonator)를 제안하고, 제작된 노트북 모델 본체의 아래에 적용하여 구성하였다(그림 1). 또한, 부하공진기와 같은 루프를 적용한 자기공진형 무선전력전송의 전송효율과 비교함으로써, 슬릿 그라운드 공진기를 통해 그라운드 문제를 해결할 수 있음을 확인하였다.

II. 자기공진형 무선전력전송 시스템 구성

2-1 이론적 배경

본 연구의 MR-WPT는 송신부와 수신부로 구성되어 있다. Fig. 1과 같이 송신부는 급전공진기와 송신공진기로 구성되어 있으며, 노트북 내부에 설치되는 수신부는 수신공진기와 부하공진기로 구성되어 있다. 수신공진기에는 열림형(open mode)과 닫힘형(short mode)을 구현할 수 있는 스위치가 연결되어 있다.

먼저 수신 공진기의 스위치가 단락(short)되었을 때, 수신공진기는 자기공진형 무선전력전송의 동작주파수와 동일한 공진주파수에서 동작하게 되어 4-resonator MR-WPT가 된다^[4]. 그림 2와 같이 RLC 등가회로로 표현할 수 있으며, 등가회로를 Kirchhoff의 전압법칙(KVL) 매트릭스(matrix)로 표현하면 다음과 같다.

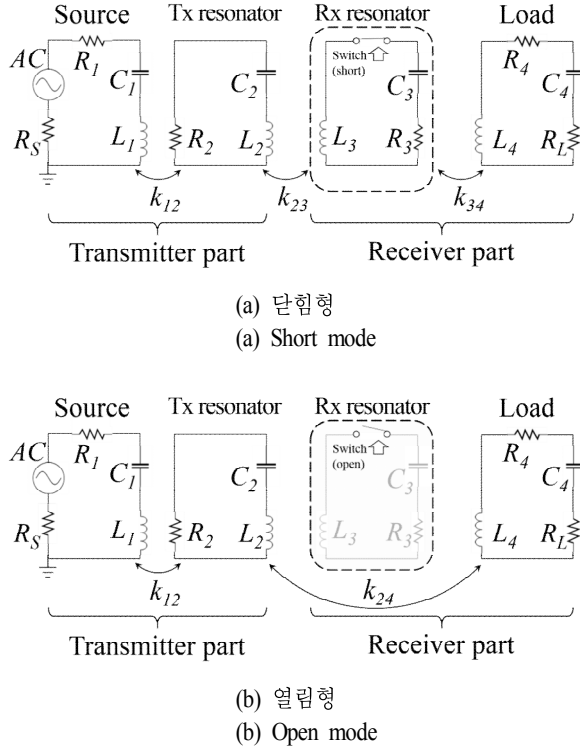


그림 2. 수신 공진기의 스위치 상태에 따른 MR-WPT의 등가회로

Fig. 2. Equivalent circuit of MR-WPT according to the state of switch.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + R_1 j\omega M_{12} & 0 & 0 \\ j\omega M_{12} & R_2 & j\omega M_{23} & 0 \\ 0 & j\omega M_{23} & R_3 & j\omega M_{34} \\ 0 & 0 & j\omega M_{34} & R_L + R_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

일반적으로 $R_i = Z_i$ 이지만, R_S 와 R_L 은 50 Ω 이므로 Z_i 과 Z_4 에는 각각 50 Ω 이 포함되어 있다. 또한, 각 공진기의 L 성분은 식 (2)에 의해 각 공진기 간의 자기결합인 상호유도용량을 결정한다.

$$M_{ij} = k_{ij} \sqrt{L_i L_j} \quad (i, j, \text{ resonator No.}) \quad (2)$$

이렇게 각 공진기 사이의 주요 자기결합인 M_{12} , M_{23} 과 M_{34} 를 형성하여 급전공진기에서 부하공진기까지 전력을 전송한다. 각 공진기는 동일한 공진주파수를 가지며, 전력을 전송하는 동작주파수를 형성한다. 등가회로(Equivalent circuit)로 표현한 Fig. 2와 같이, 공진주파수는 식 (3)

에 의해 각 공진기의 유도용량, L (inductance)과 정전용량, C (capacitance) 성분에 의해 결정된다.

$$f_{res.} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{Coil} C_{Coil}}} \quad (3)$$

전력전송 효율은 출력전압(output power)과 입력전압(input power)의 비로 나타낼 수 있다^[5].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_L^2 / (R_4 + R_L)}{V_S^2 / 4(R_1 + R_S)} = 4 \frac{I_4^2 (R_4 + R_L)}{I_1^2 (R_1 + R_S)} = |S_{21}|^2 \quad (4)$$

식 (4)에 대입될 I_1 과 I_4 는 식 (1)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I_1 = \frac{-V_S(Z_4 \omega^2 M_{23}^2 + Z_2 \omega^2 M_{34}^2 - Z_2 Z_3 Z_4)}{\omega^4 M_{12}^2 M_{34}^2 - \omega^2 Z_3 Z_4 M_{12}^2 - \omega^2 Z_1 Z_4 M_{23}^2 - \omega^2 Z_1 Z_2 M_{34}^2 + Z_1 Z_2 Z_3 Z_4} \quad (5)$$

$$I_4 = \frac{-V_S(j\omega^3 M_{12} M_{23} M_{34})}{\omega^4 M_{12}^2 M_{34}^2 - \omega^2 Z_3 Z_4 M_{12}^2 - \omega^2 Z_1 Z_4 M_{23}^2 - \omega^2 Z_1 Z_2 M_{34}^2 + Z_1 Z_2 Z_3 Z_4} \quad (6)$$

또한 수신 공진기의 스위치가 열림일 때, 수신 공진기의 공진주파수는 자기공진형 무선전력전송의 동작주파수와 다르다^[6]. 이러한 현상으로 인해 수신공진기를 제외하고 급전공진기와 송신공진기, 부하공진기 등 3개의 공진기로만 동작하는 3-resonator MR-WPT가 된다. 이를 KVL 매트릭스로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_S + R_1 j\omega M_{12} & 0 \\ j\omega M_{12} & R_2 & j\omega M_{24} \\ 0 & j\omega M_{24} & R_L + R_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

전력전송 효율은 식 (4)와 같으며, 급전공진기와 수신공진기의 전류는 다음 식 (8)과 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \frac{-V_S(-\omega^2 M_{12}^2 Z_1 Z_2)}{\omega^2 Z_4 M_{12}^2 + \omega^2 Z_1 M_{24}^2 + Z_1 Z_2 Z_4} \quad (8)$$

$$I_4 = \frac{-V_S(\omega^2 M_{12} M_{24})}{\omega^2 Z_4 M_{12}^2 + \omega^2 Z_1 M_{24}^2 + Z_1 Z_2 Z_4} \quad (9)$$

자기공진형 무선전력전송의 전송효율은 회로망 분석

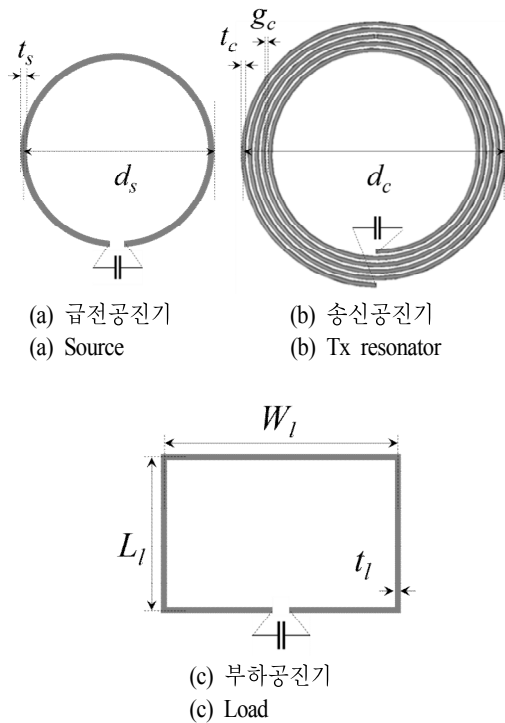


그림 3. MR-WPT를 구성하는 공진기
Fig. 3. Resonators in MR-WPT.

표 1. 공진기의 수치(Fig. 3)

Table 1. Dimension of resonators(Fig. 3).

Resonator Specifications	Source	Tx resonator	Load
Material	Copper pipe	Cooper pipe	Copper tape
Thickness	10 mm	10 mm	0.035 mm
Turns of coil	1	5	1
Resonant frequency	6.78 MHz	6.78 MHz	6.78 MHz
Dimension	40 cm	60 cm	30×20 cm

표 2. 공진기의 유도용량 및 정전용량(루프 및 코일)

Table 2. LC of resonators(Fig. 3).

Resonator Specifications	Source	Tx Resonator	Load
Inductance	955.33 μ H	55,103.71 μ H	0.05 μ H
Connected capacitance	0.58 pF	0.01 pF	9,600 pF

기(network analyzer)를 통해 얻은 S_{21} (transmission)을 얻게 되며, 식 (4)를 이용하여 전송효율을 계산하였다.

2-2 공진기의 종류

수신 공진기가 전송효율에 미치는 영향을 확인하기 위해, 동일한 급전 공진기, 송신 공진기, 부하 공진기를 사용하였다(그림 3). 급전공진기는 단면의 지름(t_s)이 10 mm인 동파이프의 지름(d_s) 40 cm의 원형 루프 형태이며, 주파수 6.78 MHz에서 공진하기 위해 커패시터를 직렬 연결하였다(그림 3(a), Table 1). 송신 공진기는 단면의 지름(t_c)이 10 mm인 동파이프로 5 mm의 간격(g_c)으로 지름(d_c)은 60 cm이며, 5회 감은 나선형 코일 형태이다(그림 3(b), Table 1). 감은 수가 증가할수록 공진주파수는 낮아진다. 부하 공진기는 수신 공진기와 함께 노트북 제품에 삽입 가능한 크기로 설계하였으며, 두께 0.035 mm의 동테이프를 이용하여 넓이 10 mm, 가로×세로 길이($W_l \times L_l$) 30×20 cm의 사각형 루프이다(그림 3(c), Table 1).

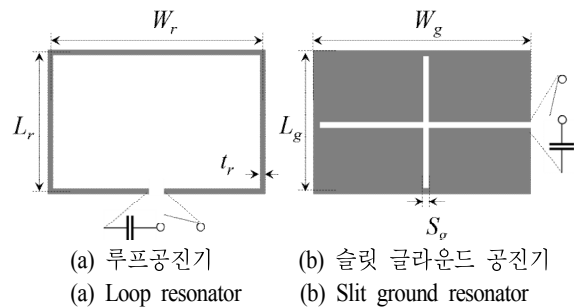


그림 4. 자기공진형 MR-WPT

Fig. 4. Rx resonators in MR-WPT.

표 3. 공진기의 수치(Fig. 4)

Table 3. Dimension of resonators(loop and coil).

Resonator Specifications	Loop	Slit GND resonator
Material	Copper	Copper
Thickness	0.035 mm	0.035 mm
Resonant frequency	6.78 MHz	6.78 MHz
Size(diameter)	30×20 cm	30×20 cm

표 4. 공진기의 유도용량 및 정전용량(루프 및 코일)

Table 4. LC of resonators(Fig. 4).

Resonator Specifications	Loop	Slit GND resonator
Inductance	0.05 μ H	0.25 μ H
Connected capacitance	9,600 pF	2,180 pF

MR-WPT를 위해서는 각 공진기가 공진주파수를 형성한다. 앞서 설명한 공진기의 공진주파수는 식 (1)에 의해 유도용량 L 과 정전용량 C 로 결정된다. 각 공진기의 인덕턴스와 커패시턴스는 Table 2에 정리되어 있다.

본 연구에서 수신 공진기는 슬릿 그라운드 공진기(slit ground resonator)와 루프 공진기 등 두 가지 종류가 사용되었다(그림 4). 루프 공진기는 부하 공진기와 동일한 규격이다. 수신 공진기는 부하 공진기와 함께 노트북에 삽입되므로 가로×세로 길이($W_r \times L_r$, $W_g \times L_g$)가 30×20 cm이다. 루프 공진기는 부하 공진기와 크기 및 연결된 정전용량이 동일하다(그림 4(a)). 슬릿 그라운드 공진기는 그라운드에 넓이가 10 mm인 십자형 슬릿(S_g)이 한 방향이 열린 형태로 설계되어 있으며(그림 4(b)), 열린 양 끝에 커패시터를 연결하여 공진주파수를 가지는 공진기로 동작한다(Table 2).

III. 전송효율 측정

본 연구는 수신공진기의 설계가 전송효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 그림 5와 같이 급전공진기, 송신공진기, 부하공진기 등으로 구성된 자기공진형 무선전력전송을 구성하고, 송신공진기와 부하공진기 사이에 슬릿 그라운드 공진기와 루프 공진기 등 두 가지 종류의 수신공진기를 각각 삽입하여 산란계수(S -parameter, scattering parameter)를 측정하였다. MR-WPT 구성 및 측정의 편의를 위하여 수직방향의 공진기 배열을 수평방향으로 정렬하였다. S_g 의 거리는 약 2 mm로써, 2 mm 두께의 아크릴판을 사용하여 전후면에 수신공진기와 부하공진기를 위치시켰다. 전송효율은 회로망 분석기(VNA: Vector Network Analyzer)를 사용하였으며, 투과계수 S_{21} 을 측정하였다(그림 6). 측정된 S_{21} 은 식 (4)에 의해 전송효율로 변환하였다. 전송거리는 송신공진기와 수신공진기 사이의 거리로 정의하였으며, 5 cm부터 50 cm까지 5 cm 간격으로 전송거리를 변화시키며 S_{21} 을 측정하였다. 일반적으로 간접급전방식 MR-WPT에서는 전송거리에서 따라 급전 공진기와 송신공진기 간 거리(S)를 조정에 따른 임피던스 매칭(impedance matching)을 통해 최대 전송효율을 보인다. 그러나 본 연구에서는 실용화를 위한 실제 상황에 맞춰 S_g 를 20

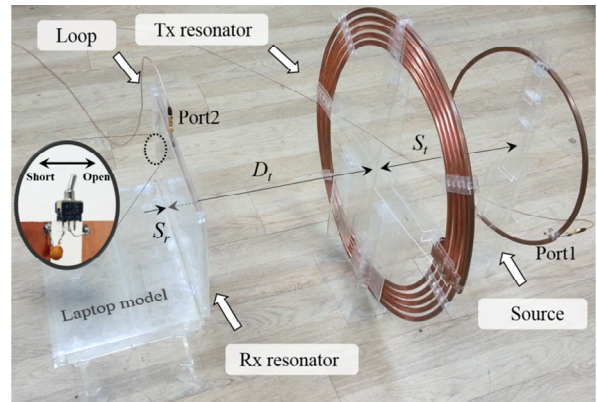


그림 5. 노트북용 MR-WPT 장치

Fig. 5. The equipment of MR-WPT for laptop computer.

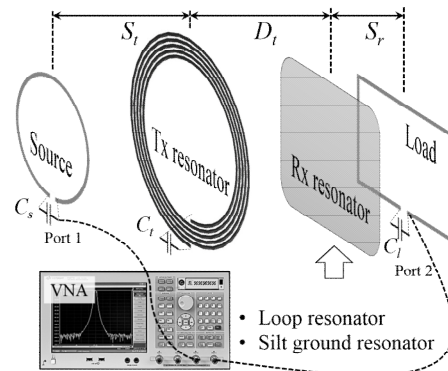


그림 6. VNA를 이용한 MR-WPT의 산란계수 측정

Fig. 6. The measurement of scattering parameter of MR-WPT using VNA.

cm로 고정하였다.

그림 7과 같이, 루프 공진기가 적용된 MR-WPT의 전송효율을 측정하고(그림 7(a)), 이 때 그라운드를 실제 모바일 기기 환경에 삽입하여 적용하였을 때의 전송효율 측정한다(그림 7(b)). 다음 본 연구에서 제안하는 슬릿 그라운드 공진기를 MR-WPT에 적용하여 전송효율 측정한다. 측정은 각 수신 공진기의 스위치를 이용한 열림형, 닫힘형 모두 측정한다(그림 7(c)).

IV. 측정 결과 및 분석

측정 결과, 공통적으로 수신 공진기가 스위치 열림형(open mode) 일 때, 비교적 근거리에서 높은 전송효율을

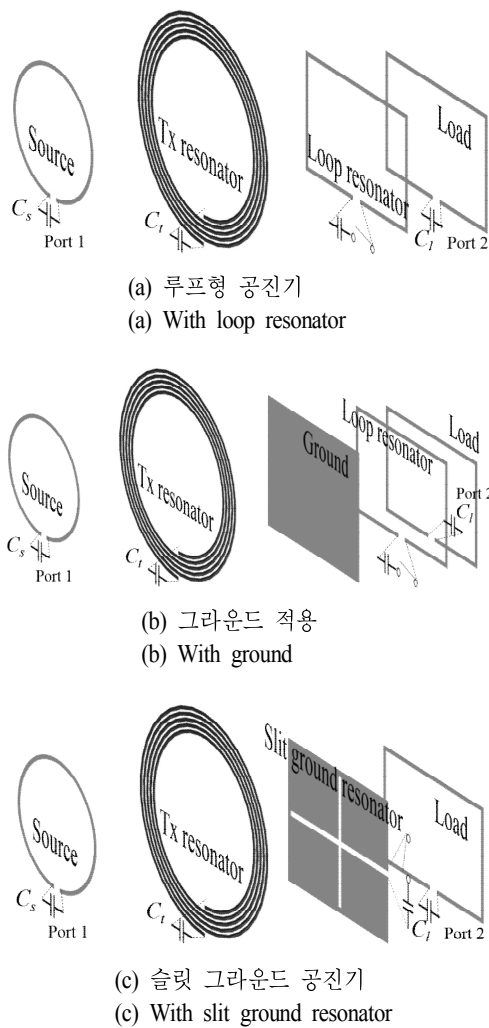
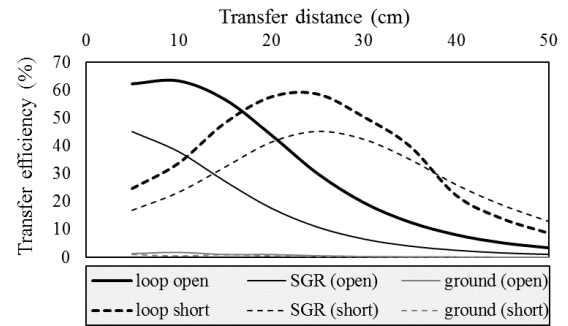


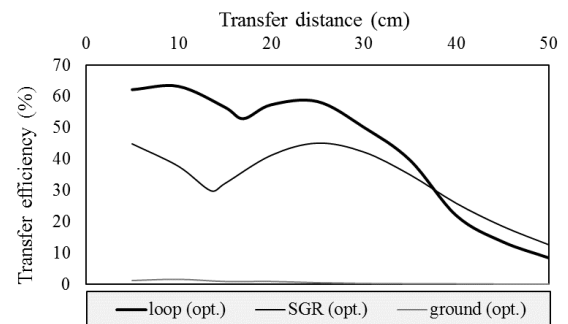
그림 7. 수신 공진기에 따라 측정된 자기공진형 무선전력전송
Fig. 7. The measured MR-WPT according to the receiver part.

보였으며, 스위치 닫힘형(short mode)일 때, 전송거리 약 20~30 cm에서 높은 전송효율을 보였다(그림 8(a)). 이러한 현상은 4-resonator MR-WPT와 3-resonator MR-WPT의 이론적인 분석으로 설명이 가능하다. MR-WPT 내의 공진기 수가 증가할수록 전송거리에 따른 최고 전송효율이 비교적 원거리에서 나타난다.

스위치 열림형(open mode) 수신 공진기가 루프 공진기 및 슬릿 그라운드 공진기일 때, MR-WPT는 3-resonator로 볼 수 있다. 그러나 수신 공진기가 루프형 공진기일



(a) 수신 공진기의 스위치 형태에 따른 전송효율
(a) Transfer efficiency according to the switch of Rx resonators



(b) 수신 공진기의 최적화에 따른 최고 전송효율
(b) The highest transfer efficiency according to the optimized Rx resonators

그림 8. 수신공진기에 따른 자기공진형 무선전력전송의 전송효율

Fig. 8. Transfer efficiency of MR-WPT according to the Rx resonator.

때, 전송효율이 비교적 높게 측정되었다. 이는 슬릿 그라운드 공진기의 제한적인 슬릿에 의해 자기결합이 약해졌기 때문이다.

그림 8(b)에서 보이는 바와 같이, 수신 공진기가 루프 공진기일 때 전송효율이 가장 높다. 그러나 송수신 공진기 사이에 그라운드를 위치시키면 전송효율은 거의 0 %에 가깝게 감소한다. 이와 같이 MR-WPT를 실제 제품에 적용하기 위해 슬릿 그라운드 공진기를 제한하였으며, 전송거리 약 30 cm까지 약 40 %로 유지하며, 전송효율이 향상되었다.

V. 결 론

본 연구는 자기공진형 무선전력전송(MR-WPT)의 실용

화를 위해 모바일 기기의 필수 부품인 그라운드가 자기 공진형 무선전력전송에 미치는 문제점을 살펴보고, 이에 대한 대책으로 슬릿 그라운드 공진기를 제안하였다. 이를 증명하기 위해 실제 노트북 모델을 제작하여 실제 모바일 기기와 동일한 조건에서 제안된 슬릿 그라운드 공진기의 실용성을 확인하였다. 측정 결과, 수신 공진기가 루프 공진기일 때 전송효율이 가장 높았으나, 수신부에 그라운드가 적용되었을 때 자기결합이 크게 감소되었다. 반면, 슬릿 그라운드 공진기는 슬릿을 통해 자기장을 통과시키며, 또한 공진기로써의 기능으로 주변 공진기와 자기결합을 형성하여 전력을 전송시키며, 전송효율을 회복시킨다. 제안된 슬릿 그라운드 공진기는 자기장을 통과시키며, 공진기로 동작하는 동시에 전자기파의 역할을 함으로써, MR-WPT의 실용화에 기술적 기여를 기대할 수 있다.

References

[1] Y. Huang, J. Wang, T. Sun, X. Xie, G. Li, Y. Gu, and Z. Wang, "An efficiency-enhanced wireless power transfer system with segmented transmitting coils for endoscopic capsule", in *Circuits and Systems(ISCAS), 2013 IEEE International Symposium on*, pp. 2279-2282, May 2013.

[2] B. C. Park, Y. H. Son, B. J. Jang, and J. H. Lee, "Realization of alignment-free WPT system", *The Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 14, no. 4, pp. 329-331, Dec. 2014.

[3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, vol. 317, no. 83, pp. 83-86, May 2007.

[4] G. B. Lee, W. S. Park, "Analysis and comparison for a 4-coil magnetic resonance wireless power transfer system", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 2, pp. 168-179, Feb. 2013.

[5] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Jan. 2011.

[6] J. S. Park, J. H. Choi, "Design of a high power frequency tunable resonator for wireless power transfer", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 3, pp. 352-355, Mar. 2013.

강 석 현



2010년 8월: 서울과학기술대학교 안경광학과 (이학사)
 2014년 2월: 서울과학기술대학교 안경광학과 (이학석사)
 2016년 8월~현재: 서울과학기술대학교 나노·IT·디자인융합대학원 박사과정
 [주 관심분야] Wireless Power Transfer 등

정 창 원



2001년 12월: University of Southern California 전자공학과 (공학석사)
 2005년 6월: University of California, Irvine 전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~2000년 5월: LG 정보통신 연구원
 2005년 11월~2008년 4월: 삼성종합기술원 전문연구원
 2008년 5월~현재: 서울과학기술대학교 나노·IT·디자인융합대학원 부교수
 [주 관심분야] Antenna, RF, EMI/EMC, RF-MEMS, Sensor