

논문 2017-54-4-3

# 소형 모바일 기기용 공진형 무선전력전송 시스템의 공진기 평면화 및 소형화에 따른 특성 연구

(Characteristic Study of Small-sized and Planer Resonator for  
Mobile Device in Magnetic Wireless Power Transfer)

이 훈 희\*, 정 창 원\*

(Hoon-Hee Lee and Chang-Won Jung<sup>Ⓒ</sup>)

## 요 약

본 논문은 모바일 기기(노트북, 핸드폰, 태블릿 PC 등)를 위한 공진형 무선전력전송 시스템(Magnetic Resonance - Wireless Power Transfer; MR-WPT)의 실용성을 높이기 위한 평면형 소형 공진기 설계 방법을 제안하였다. 제안된 소형 평면형 공진기는 네 개의 루프와 공진기를 사용하는 공진형 무선전력 시스템에 적용되며, 또한 무선전력 시스템은 송신기(Tx)와 수신기(Rx)가 동일한 루프와 공진기로 이루어졌다. 제안된 공진기는 나선형(Spiral) 코일의 형태로 소형 모바일 크기에 적합한 50 mm×50 mm의 크기 이내로 설계 되었으며, 나선형 공진기의 선 두께와 선간 갭(gap) 그리고 선의 길이를 달리하는 4종류의 나선형 공진기를 선정하였다. 또한 작은 공진기 부피에서 높은 인덕턴스와 캐패시턴스를 얻기 위해 공진기 기판 (아크릴  $\epsilon_r = 2.56$ ,  $\tan \delta = 0.008$ )의 양면을 모두 활용하였다. 또한 루프는 공진기 부피를 최소화하기 위해 공진기와 동일 평면상에 설계하였고, 이 또한 서로 다른 3가지의 크기를 사용하였다. 제안된 무선전력전송 시스템은 Tx와 Rx 두 개의 아크릴 기판에 제작되었으며, Tx와 Rx의 루프와 공진기는 구리시트로 만들어졌다. 제안된 12개의 조합 (공진기 4종 × 루프 3종)의 루프와 공진기에 대한 전력전송효율을 근 전송 거리 (1cm~5cm)상에서 시뮬레이션과 측정을 통해 산출하였다. 측정 결과 전력전송효율은 전송 거리 1~5 cm에 따라  $\approx 40\%$  그리고 최대  $\approx 70\%$  이며, 이때 공진주파수는 A4WP 표준 무선전력전송 주파수인  $\approx 6.78$  MHz를 유지한다. 제안된 부피에서 최소화된 평면형의 소형 공진기를 이용한 소형 모바일 기기의 공진형 무선전력 어플리케이션에 대한 가능성을 실험적으로 확인하였다.

## Abstract

In this paper, a Small-sized and planer resonator design of Magnetic Resonance - Wireless Power Transfer(MR-WPT) were proposed for practical applications of mobile devices, such as a laptop, a smart-phone and a tablet pc. The proposed MR-WPT system were based on four coil MR-WPT and designed as a transmitter part (Tx) and a receiver part (Rx) both are the same shape with the same loop and resonator. There are four different spiral coil type of resonators with variable of line length, width, gap and turns in 50mm×50mm size. The both of top and bottom side of substrate(acrylic;  $\epsilon_r = 2.56$ ,  $\tan \delta = 0.008$ ) were used to generate high inductance and capacitance in limited small volume. Loops were designed on the same plane of resonator to reduce their volume, and there are three different size. The proposed MR-WPT system were fabricated with two acrylic substrate plane of Tx and Rx each, the Rx and Tx loops and resonators were fabricated of copper sheets. There are 12 combinations of 3 loops and 4 resonators, each combination were measured to calculate transfer efficiency and resonance frequency in transfer distance from 1cm to 5cm. The measured results, the highest transfer efficiency was about 70%, and average transfer efficiency was 40%, on the resonance frequency was about 6.78 MHz, which is standard band by A4WP. We proposed small-sized and planer resonator of MR-WPT and showed possibility of mobile applications for small devices.

**Keywords:** MR-WPT, small-size, optimization, planar loop and resonator

\* 정희원 서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원

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

※ 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구과제로 수행되었음.

Ⓒ Corresponding Author (E-mail : changwonj@seoultech.ac.kr)

Received ; November 8, 2016 Revised ; December 8, 2016 Accepted ; February 28, 2017

## I. 서 론

배터리를 사용하는 전기 장치, 특히 스마트폰, 태블릿, 랩탑과 같은 모바일 기기<sup>[1]</sup>의 사용이 폭발적으로 대중화되면서 충전에 대한 관심이 커지고 있다. 또한 기기의 고성능을 위해 높은 전력을 요구하지만 휴대성을 위해 배터리의 크기를 줄이고자 하는 요구도 존재한다. 이와 같은 배경으로 무선충전기술의 연구가 활발히 진행 중이며 현재 유도형 무선전력전송기술은 상용화 단계에 있다. 공진형 무선전력전송기술<sup>[2-3]</sup>은 유도형 무선전력전송 기술 보다 전송거리가 길다는 이점을 갖고 있지만 전력전송 효율이 낮아서 이를 보완하기 위한 연구가 필요한 실정이다. 2012년 Alliance for Wireless Power (A4WP)가 설립되어 공진형 무선전력전송 시스템 기술을 선도하고 표준화를 추진하고 있다.

공진형 무선 전력시스템의 효율을 높이기 위한 연구가 시행되고 있으며, 각각 다른 다양한 크기의 무선전력전송 시스템이 제작되어 연구<sup>[4-8]</sup>되고 있다. 본 논문은, 4코일 MR-WPT를 기본으로 무선전력전송 시스템의 실용성을 높이고자 하였다. 따라서 시스템의 소형화를 위한 디자인과 최적화를 위한 것이다. 50mm×50mm 크기에 형태가 다른 4가지의 공진기가 있으며, 실용성을 위해 공진기와 같은 평면에 디자인된 3가지의 루프가 있다. 제안한 디자인의 공진기와 루프를 사용하여 무선전력 효율을 측정하였다.

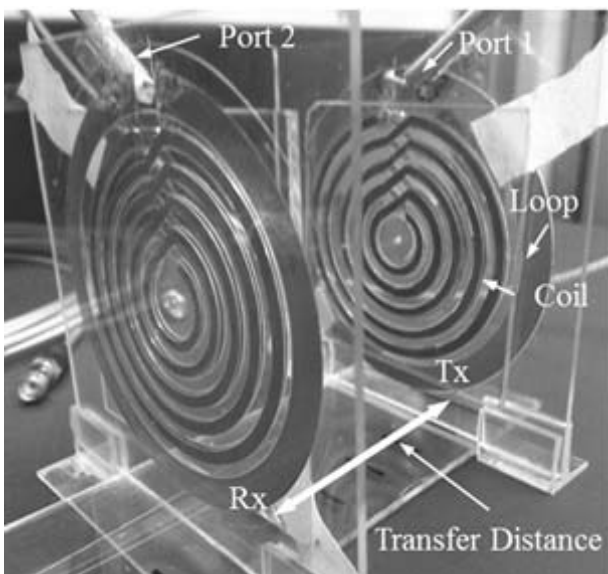


그림 1. 제안한 공진형 무선전력전송시스템  
Fig. 1. The proposed MR-WPT system.

## II. 평면형 소형 공진기 설계

### 1. 평면형 소형 공진기의 구조

그림 1의 제안된 무선전력전송 시스템은 Tx 부분 Source loop와 Tx coil 그리고 Rx 부분 Load loop와 Rx coil로 이루어져 있다. 디자인된 공진기와 루프는 아크릴 위에 구리 시트로 제작하여 부착되었다. 소형화의 목표는 모바일 사이즈에 적합한 50mm×50mm 이며 실용성을 높이기 위해 시스템을 그림 2(a)와 같이 Rx, Tx의 2개의 평면으로 디자인 하였다. 그림 2(b) 공진기는 아크릴판 앞뒤에 Via hole로 연결하였으며 이는 공진기의 인덕턴스와 캐패시터를 증가시키기 위함이다. 그림 3은 3개의 루프와 4개의 공진기를 보여주며 자세한 디자인 수치는 표 1에 제시하였다. 이때 그림 2 평면형 시스템의 루프와 공진기는 루프 L5와 공진기 R522를 기준으로 하였다.

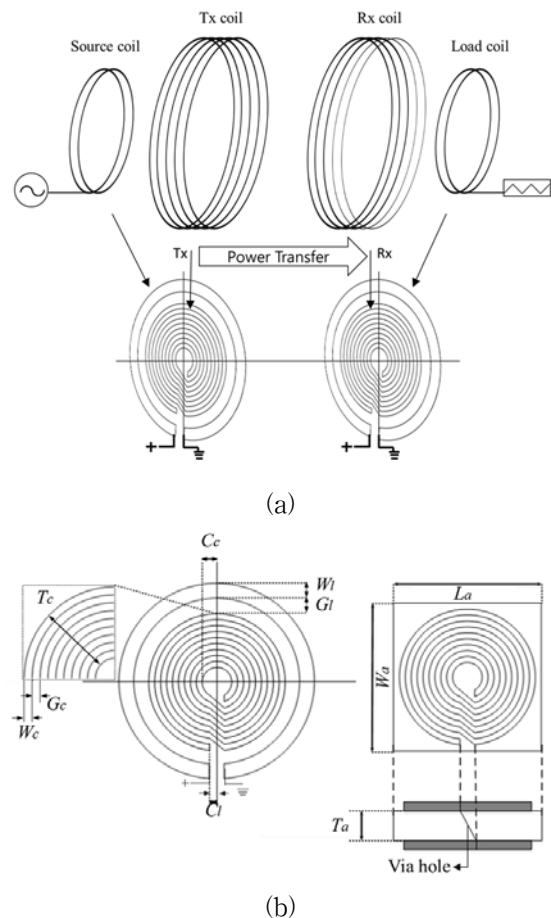


그림 2. 제안한 공진형 무선전력전송시스템 디자인 (a) 4 코일 시스템 평면화 (b) 루프와 공진기 개략도  
Fig. 2. The proposed MR-WPT system. (a) planer system design form four coil. (b) design of loops and resonators.

표 1. 제안한 루프와 공진기 디자인 수치  
Table1. Detentions of the proposed loops and coil resonators.

		Tc/Ta	Wi/Wc/Wa	Gi/Gc/La	Cc/Ci
Loop	L5	1 turns	5 mm	5 mm	2.5 mm
	L10			10 mm	
	L15			15 mm	
Coil	R522	5 turns	2 mm	2 mm	5 mm
	R521	5 turns	2 mm	1 mm	
	R512	5 turns	1 mm	2 mm	
	R1011	10 turns	1 mm	1 mm	
Acrylic		1.3 mm	50 mm	50 mm	-

2. 공진형 무선전력전송 시스템

제안된 MR-WPT는 그림 3의 수동소자로 이루어진 등가 회로와 같이 표현될 수 있으며, 각각의 루프와 코일을 Source, Tx coil, Rx coil, Load 순서로 1에서 4의 번호를 주었다. 12개의 루프와 공진기의 조합에 따라 다른 변수를 갖는다. 따라서 MR-WPT 등가회로는 다시 Kirchhoff's law(KVL) 매트릭스로 표현 가능하다. 이때 이웃하지 않는 커플링 M은 무시할 수 있을 정도로 작다.

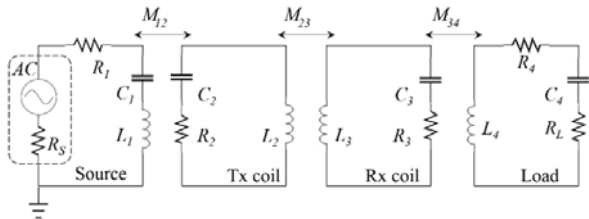


그림 3. 제안한 MR-WPT 등가 회로  
Fig. 3. The equivalent circuit of proposed MR-WPT system.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & 0 & 0 \\ j\omega M_{12} & Z_2 & j\omega M_{23} & 0 \\ 0 & j\omega M_{23} & Z_3 & j\omega M_{34} \\ 0 & 0 & j\omega M_{34} & Z_4 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 전류  $I_1$ 과  $I_4$ 는 각각 Source와 Load루프에서 생성된다.  $Z_i$  ( $i=1-4$ )은  $R_i$  ( $i=1-4$ )이며,  $Z_1, Z_4$ 는 각각  $50\Omega$  ( $R_S=R_L$ ) 을 포함한다.

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

식 (2)의  $\eta$ 와  $S_{21}$  는  $I_1$ 과  $I_4$  로 유도되었다.

III. 시뮬레이션 및 측정

1. 평면형 소형 공진기 시뮬레이션

제안한 공진형 무선전력전송시스템은 EM 시뮬레이션 툴을 사용하여 시뮬레이션 하였고, 또한 2-port Vector Network Analyzer를 사용하여 공진 주파수와 S-parameter를 측정하였다. 이 S-parameter를 통해 전력전송 효율을 산출한다. 한 개의 포트는 Tx; Souce loop에 연결되고 다른 하나는 Rx; Load loop에 연결되었으며 측정거리는 Tx부터 Rx까지 1cm~5cm로 하였다. 루프 3개와 공진기 4개의 조합으로 12개의 경우가 있으며 각 경우의 시뮬레이션과 측정을 통해 산출한 데이터를 비교하였다.

가. 필드 분포

그림 4는 가장 이상적인 결과를 보여준 루프 L5와 공진기 R1011를 사용한 MR-WPT 시스템의 EM 필드 분포를 보여준다. 이때 전송거리는 20mm 이며 전력전송 효율은 60%이다. 전력전송 송신부에서 수신부까지 활성화된 H-필드를 확인할 수 있다.

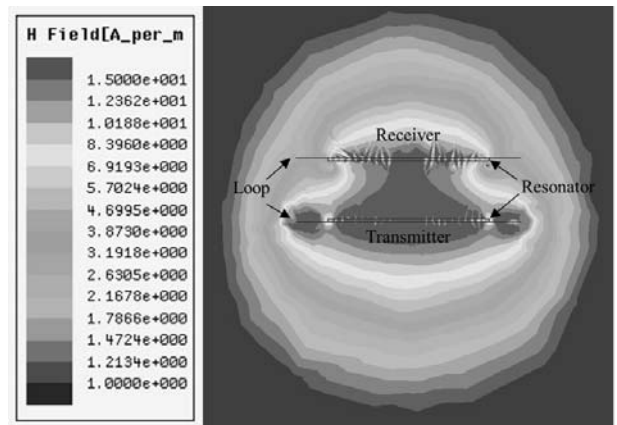


그림 4. 루프 L5 공진기 R1011 MR-WPT 시스템의 EM 필드 분포 (시뮬레이션 전송거리 = 20 mm, phase = 0 deg)

Fig. 4. The EM field distribution of L5 and R1011 MR-WPT system. (transfer distance = 20 mm, phase = 0 deg)

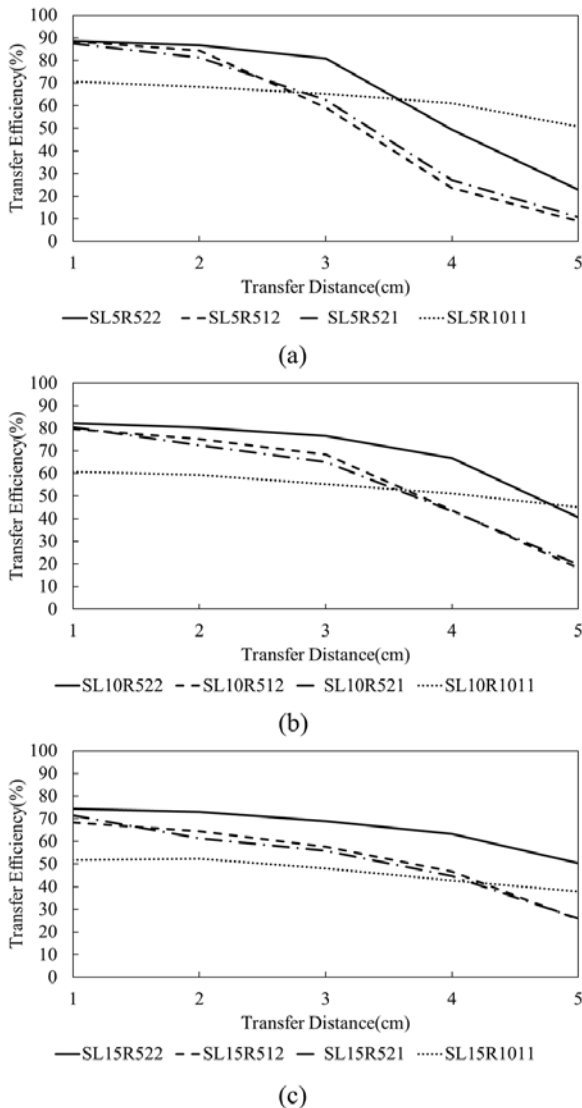


그림 5. 제안한 MR-WPT 시스템의 시뮬레이션 전력전송 효율 (a) 루프 L5 사용 (b) 루프 L10 사용 (c) 루프 L15 사용

Fig. 5. Transfer efficiency of the simulation result of the proposed MR-WPT. (a) used loop L5. (b) used loop L10. (c) used loop L15.

나. 전송 효율

그림 5는 각각 루프를 달리한 시뮬레이션의 전송 효율을 보여주고 있다. 루프를 비교하였을 때, 크기가 가장 작아서 공진기와 가장 가까운 루프 L5의 경우가 전력전송 효율이 가장 높았다. 공진기를 비교하였을 때, 최고 전력전송 효율은 공진기 R522가 1cm에 위치했을 때, 90%이며 측정 구간 전력전송 평균 최고 효율은 53%이다. 공진기 R521과 R512는 R522보다 약간 낮고 전반적으로 비슷한 효율을 가진다. R1011은 전반적으로 가장 낮은 효율을 가졌으나 거리에 따른 효율 감소가 가장 작았다.

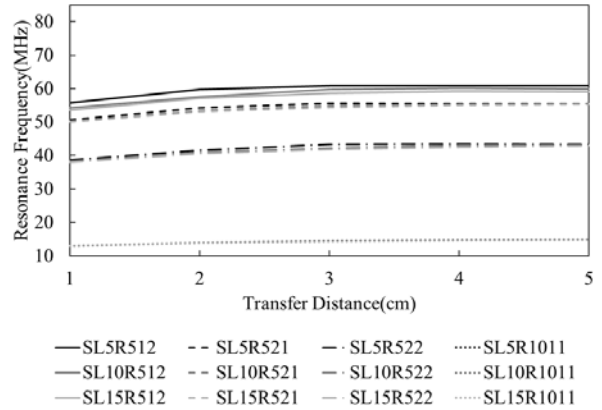


그림 6. 제안한 MR-WPT 시스템의 시뮬레이션 공진주파수  
Fig. 6. Resonance frequency of the simulation result of the proposed MR-WPT.

다. 공진 주파수

그림 6는 각 경우의 공진주파수를 나타낸 것이며 공진 주파수는 루프의 영향은 적게 받으나 공진기의 디자인에 따라 차이가 컸다. 무선전력전송 표준인 6.78 MHz에 가장 가까운 것은 공진기 R1011으로 13MHz에서 공진주파수를 갖는다. 이는 공진기 R1011이 다른 공진기에 비해 얇고 긴 나선형 코일의 디자인이기 때문에 높은 인덕턴스와 캐패시턴스를 가졌기 때문이다.

2. 평면형 소형 공진기 측정

가. 전송 효율

시뮬레이션과 마찬가지로, 그림 7은 각각 루프를 달리하여 측정된 전송효율을 보여주고 있다. 루프를 비교하였을 때, 시뮬레이션의 결과와 같은 경향을 보여주었다. 즉, 크기가 가장 작아서 공진기와 가장 가까운 루프 L5의 경우가 전력전송 효율이 가장 높았다. 하지만 전력전송효율은 시뮬레이션 결과에 비해 15% 정도 낮다. 시뮬레이션에서 전력전송 최고효율이 비슷하였던 공진기 R512와 R521 그리고 R522는 측정결과 R512와 R521이 R522와 전력전송효율의 차이가 크게 나타났다. 그러나 공진기 R1011은 시뮬레이션과 측정 결과가 가장 비슷한 것을 볼 수 있다. 최고 전력전송 효율은 공진기 R522가 1cm에 위치했을 때, 74%이었다. 측정 구간 전력전송 평균 최고 효율은 시뮬레이션과 다르게 공진기 R1011일 때이며, 이때의 전송 효율은 40%이다.

나. 공진 주파수

그림 8은 측정된 데이터를 바탕으로 각 경우의 공진 주파수를 나타낸 것이며 시뮬레이션의 경향과 같이 루

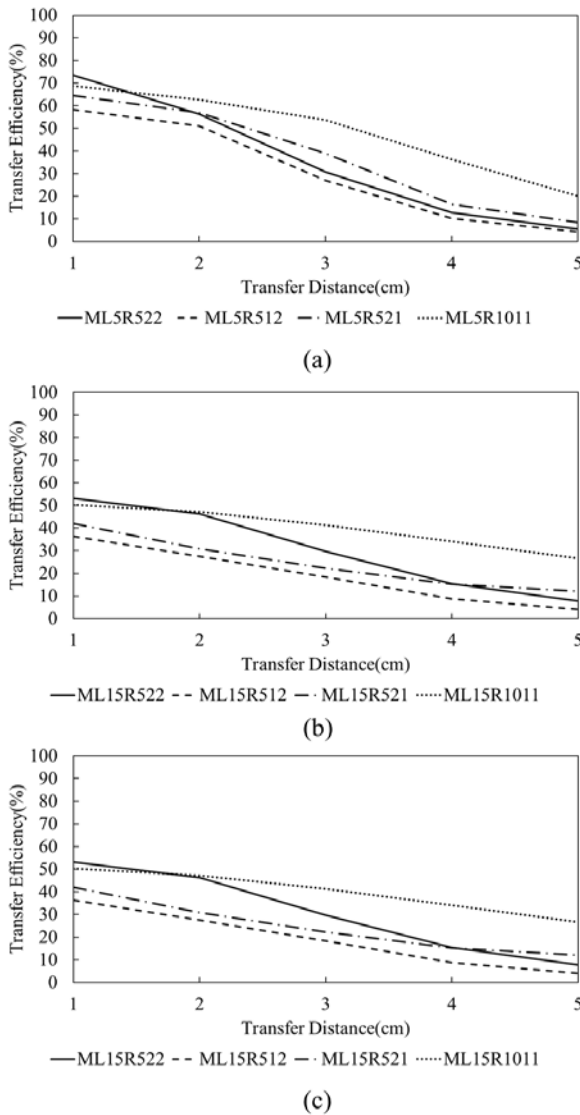


그림 7. 제안한 MR-WPT 시스템의 측정된 전력전송 효율 (a) 루프 L5 사용 (b) 루프 L10 사용 (c) 루프 L5 사용

Fig. 7. Transfer efficiency of the measured result of the proposed MR-WPT. (a) used loop L5. (b) used loop L10. (c) used loop L15.

프의 영향은 작고 공진기에 따라 공진주파수가 크게 변하였다. 다만 시뮬레이션 결과보다 공진기의 디자인에 따라 공진주파수가 크게 변한다. 공진기 R512가 가장 높은 공진주파수를 갖는 것은 디자인 된 공진기 중에서 가장 작은 캐패시턴스와 인덕턴스를 갖기 때문이며, R521, R522 그리고 R1011의 순서로 디자인의 크기와 인덕턴스, 캐패시턴스가 증가한 것으로, 공진 주파수가 낮아진 것을 볼 수 있다. 따라서 무선전력전송 표준인 6.78 MHz에 가장 가까운 것은 시뮬레이션 결과와 같은 공진기 R1011이며, 이때 공진주파수는 20 MHz이다. 이는 시뮬레이션 결과보다 10 MHz 높다. 공진기 R521과

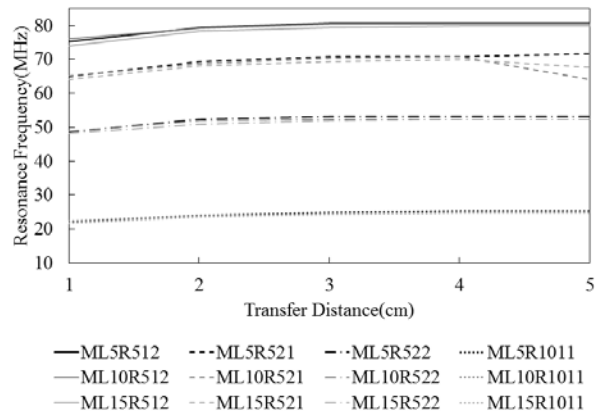


그림 8. 제안한 MR-WPT 시스템의 측정된 공진주파수  
 Fig. 8. Resonance frequency of the measured result of the proposed MR-WPT.

R522의 경우, 시뮬레이션과 측정 데이터가 20 MHz 이상 차이가 있었다. 공진기 R512의 경우는 R1011과 비슷한 10MHz정도 차이가 났는데 이를 바탕으로 얇은 디자인을 가진 공진기가 시뮬레이션과 가까운 측정 결과를 주는 것을 알 수 있었다.

#### IV. 결론

제안한 루프 3개와 공진기 4개의 조합으로 12개의 소형화된 디자인의 공진형 무선전력시스템의 시뮬레이션과 측정 데이터를 산출하여 비교하였다. 측정된 결과를 따르면 공진기와 가장 가까이 근접한 루프 L5가 루프의 크기가 크지만 공진기와 가장 멀리 있던 L15보다 높은 효율을 보였으며, 공진주파수에는 영향을 미치지 않았다. 공진기는 가장 얇고 긴 코일 패턴 디자인인 R1011가 다른 공진기보다 높은 효율을 보여 주었으며 공진주파수 또한 표준 주파수에 가장 근접하였다. 측정 결과 L5R1011 시스템이 1 cm~5 cm의 전송거리에서 평균적으로 40%의 전성효율을 얻었다. 또한 R1011은 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사하기 때문에 가장 신뢰도가 있다. 가장 큰 전력전송 효율을 보여준 조합은 루프 L5와 공진기 R522로 1cm에서 74%의 효과를 얻을 수 있었지만, 1cm에서 공진기 R1011과 R522의 차이는 미소하여 공진기 R1011의 디자인이 소형화에 적합하다. 또한 R1011의 공진주파수가 표준 주파수에 가깝다. 소형 모바일 기기(노트북, 핸드폰, 태블릿 PC)를 위한 공진형 무선전력전송 시스템의 실용성을 높이기 위해 제안된 부피에서 최소화된 평면형 소형 공진기를 제안하였고, 이를 활용할 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

## 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", Circuits and Systems(ISCAS), 2013 IEEE International Symposium on, pp. 2279-2282, May 2013.
- [2] T. P. Duong and J. Lee, "Experimental results of high-efficiency resonant coupling wireless power transfer using a variable coupling method", IEEE Trans. Microw. Wireless Compon. Lett, Vol. 21, no. 8, pp. 442-444, July 2011.
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljačić, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," Science, vol. 317, no. 83, pp. 83-86, July 2007.
- [4] A. Rajagopalan, A. K. RamRakhyani and D. Schurig, "Improving Power Transfer Efficiency of a Short-Range Telemetry System Using Compact Metamaterials", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, Vol. 62, no. 4, pp. 947-955, February 2014.
- [5] S. Iguchi, P. Yeon, H. Fuketa, K. Ishida, T. Sakurai and M. Takamiya, "Wireless Power Transfer With Zero-Phase-Difference Capacitance Control", IEEE Transactions On Circuits And Systems-I: Regular Papers, Vol. 62, no. 4, April 2015.
- [6] A. P. Sample, D. Meyer and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 58, no. 2, pp. 544-554, February 2011.
- [7] 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, January, 2014.
- [8] L. Feng, Y. Mao, and Y. Cheng, "An efficient and stable power management circuit with high output energy for wireless powering capsule endoscopy", in Solid State Circuits Conference (A-SSCC), 2011 IEEE Asian, pp 229-232, Jeju, Republic of Korea, November 2011.

## 저 자 소 개



이 훈 희(정회원)  
2015년 강릉원주대학교 전자공학과  
학사졸업.  
2015년~현재 서울과학기술대학교  
나노IT디자인융합대학원,  
나노IT융합공학전공학과  
석사재학.

<주관심분야: 초고주파, MR-WPT, 신호처리, 통신,  
마이크로 컨트롤러>



정 창 원(정회원)-교신저자  
1997년 광운대학교 전파공학과  
(공학사)  
2001년 University of Southern  
California 전자공학과  
(공학 석사)

2005년 University of California, Irvine 전자공학과  
(공학 박사)

1997년 1월~2000년 5월 LG 정보통신 연구원  
2005년~2008년 삼성종합기술원 전문연구원  
2008년~현재 서울과학기술대학교 나노IT디자인  
융합대학원 부교수

<주관심분야: Antenna, EMI/EMC, MR-WPT, RF  
Sensor, Transparent Electrode>