

## 부하 임피던스 변화를 고려한 복수 수신기 무선전력전송 구현

# Implementation of Wireless Power Transmission System for Multiple Receivers Considering Load Impedance Variation

김영현 · 박대길 · 구경현\*

인천대학교 전자공학과

Young Hyun Kim · Dae Kil Park · Kyung Heon Koo\*

Department of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 복수 수신기에 전력을 전송하기 위한 SIMO (single-input multiple-output) 자기공진방식 무선전력전송 시스템을 제안하고, 이에 따른 시뮬레이션 및 측정결과를 제시하였다. 지름 600 mm의 송신 단일루프 및 송신 헬리컬 공진 코일, 외경 900 mm 스파이럴 수신 공진 코일을 사용하고, 80x60 mm<sup>2</sup> 평판 사각 코일을 수신으로 활용하여 600mm 떨어진 테이블 형태 구조로 무선전력전송 시스템을 구성하였다. 최적의 특성을 위해 무선전력전송 코일을 설계하고 3차원 전자계해석 및 등가회로 해석 시뮬레이션을 진행하고 이를 제작하여 전송 특성을 측정하였다. 스파이럴 공진코일의 중심부에서 거리에 따른 효율변화를 해석하였으며, 구성한 시스템의 측정결과 수신기가 1개일 경우의 효율은 57%이며, 2개로 수신될 경우 각각 37%의 전송 효율을 나타내었다.

### [Abstract]

This paper proposes a single-input multiple-output (SIMO) self-resonant wireless power transmission system for transmitting power to multiple receivers and the characteristics are simulated and measured. A 600 mm diameter transmission single loop, a 600 mm diameter helical transmission resonant coil, an external diameter 900 mm planar spiral reception resonant coil, and an 80x60 mm<sup>2</sup> flat plate square coil as a receiver are used to form a wireless power transmission system 600 mm away with the table structure. For optimal characteristics, the wireless power transmission coils are designed by EM simulation and equivalent circuit analysis, and the characteristics are simulated and measured. The variation of the efficiency with distance from the center of the spiral resonant coil is analyzed and the measured efficiency is 57% for one receiver and for the two receivers, the efficiency is 37% for each receiver.

**Key word** : Wireless power transfer, Load Impedance, Helical coil, Planar Spiral coil.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.2.148>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 19 February 2018; Revised 2 March 2018

Accepted (Publication) 16 April 2018 (30 April 2018)

\*Corresponding Author; Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-4766

E-mail: khkoo@inu.ac.kr

## 1. 서론

무선전력전송은 유선 충전의 불편함을 해결하고 이를 통해 휴대용 무선기기 동작 시간 제한 문제를 해결하고자 주목받는 기술이다. 2007년 미국 MIT 대학의 마린 솔라치치(Marin Soljagic) 교수팀이 2 m 거리에서 무선으로 전동에 전원을 공급하여 기술의 혁신을 증명하였고, 이후 다양한 상황에서 고효율로 전력을 전송하기 위한 연구와 개발이 진행되고 있다[1].

전자기적 무선전력전송 시스템은 전자기 방사(radiation) 방식, 자기공진방식으로 분류할 수 있다. 방사 방식은 전자파로 수 m에서 수 km 이상까지 전력 전송이 가능하지만 전파경로 손실이 발생하며 이에 따른 효율 저하 문제가 있다. 자기공진방식은 전자기적 공진 특성을 이용하고 무선으로 에너지를 전송하며 일반적으로 수 cm에서 수 m 전력전송이 가능하다[2],[3].

자기공진방식은 공진 코일과 수신 코일 간 상대적 위치에 대한 자유도가 높은 전송 방식으로, 같은 공진 주파수를 갖는 시스템은 결합되어 전자기적 방사 또는 흡수에 의한 손실이 적고, 다수의 공진 코일 및 수신 코일을 설계하여 거리를 증대하거나 다양한 활용을 갖는 무선전력 시스템을 구현할 수 있다 [4].

본 논문에서는 공진 주파수 6.78 MHz를 갖는 공진 코일 및 복수의 수신 코일을 이용하여 무선전력 전송 특성을 확인하였다. 송수신 공진기는 서로 다른 형태와 크기를 가지고 있다.

본 논문에서는 송신 공진 코일 및 수신 코일을 해석적 수식 및 실험을 이용하여 물리적 크기 및 특성을 추정하였으며, 설계된 코일을 3차원 전자계 및 회로 해석 시뮬레이터를 이용하여 자기 결합에 따른 특성 변화를 예측하고 실측과 비교하였다.

제안하는 무선 전력 전송 시스템은 그림 1과 같다. 무선전력 전송은 특정한 공진 주파수를 갖는 전력을 송신 공진 코일과 수신 코일을 이용하여 전자기적으로 결합된 무선 경로를 통해 에너지를 공급하는 시스템이다.

제안된 방식의 코일은 그림 1과 같이 4 종류의 코일로 구성 되어있으며, 코일은 각각 송신 루프 코일, 송신 공진 코일, 수신 공진 코일, 수신 코일로 구성되어 있다. 송신 루프 코일과 송신 공진 코일 사이의 전력 전송은 자기유도로 이뤄지며, 송신 및 수신 공진 코일은 공진에 의해 에너지가 전달된다[5].

### 2-2 다른 형태의 공진 코일을 이용한 자기공진방식 WPT 설계

본 논문에서 제시하는 공진 코일은 L-C 공진을 기반으로 한다. 요구되는 전력 전송 공간 및 공진기의 물리적 크기에 따라 공진 주파수를 위한 설계를 진행하였다.

자기공진방식 무선전력전송용 코일의 파라미터는 공식을 이용한 물리적 크기 및 특성을 기반으로 3차원 전자계 시뮬레이션 (HFSS; high frequency structure simulation)으로 검증하여 설계하였으며, 공진 코일의 공진 주파수는 6.78 MHz를 목표로 제작하였다. 또한 공진 주파수에 적절한 저항 특성 및 실제 제작 고려하여 지름 2.9 mm 구리 도선으로 정하였다.

그림 2는 헬리컬 코일 설계에 필요한 변수를 나타낸다. L-C 공진을 위한 헬리컬 코일의 주요 변수의 계산은 식 (1), (2)와 같다 [6], [7]. 표 1은 턴 수 N을 조정된 헬리컬 형태의 송신 공진 코일 설계를 위한 파라미터 계산 결과이다.

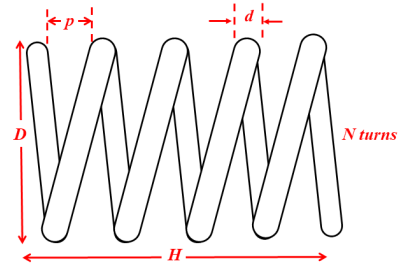


그림 2. 헬리컬 코일의 설계 변수  
Fig. 2. Design parameters of helical coil.

- Diameter(D) : 헬리컬 코일의 전체 반경, 단위 mm
- Height(H) : 헬리컬 코일의 전체 길이, 단위 mm
- Wire diameter(d) : 코일의 두께, 단위 mm
- Pitch(p) : 코일과 코일사이의 거리(도선간격), 단위 mm
- Number of turns(N) : 코일의 감은 횟수(턴 수)

표 1. 헬리컬 코일의 설계  
Table 1. Helix coil design.

D (mm)	d (mm)	p (mm)	N	H (mm)	L (uH)	C (pF)
600	2.9	20	7.5	171.75	48.84	12.08

## II. 자기공진방식 무선전력전송 시스템 설계

### 2-1 자기 공진방식 무선전력전송

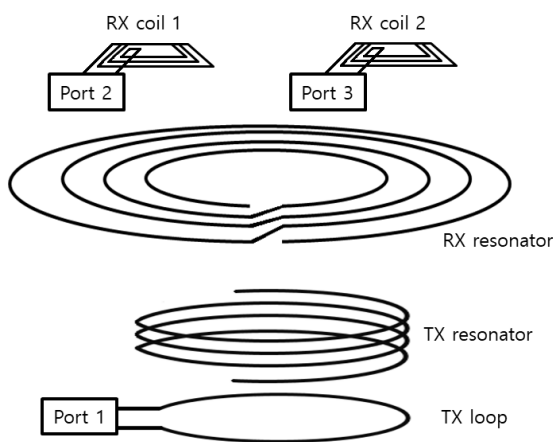


그림 1. 제안한 자기공진방식 무선전력전송 시스템 구성  
Fig. 1. Block diagram of proposed magnetic resonance wireless power transfer system.

$$L = \frac{D^2 N^2}{0.45D + H} \quad [nH] \quad (1)$$

$$C = \frac{D\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1}\{(N-1)(p-d)/d\}} \quad [pF] \quad (2)$$

송신 공진 코일로 사용하는 헬리컬 형태의 코일 지름은 600 mm, 도선 간격은 20 mm 이며, 턴 수 N을 조정하여 6.78 MHz에서 공진하도록 설계하였다. 전력을 인가하기 위한 송신 루프 코일의 지름은 600 mm의 단일 루프 형태다. 이는 대전력 무선전력 송수신을 위한 코일 크기를 가정하여, 충분한 전력 전송 면적과 거리를 확보하기 위해 정한 크기이다.

그림 3은 스파이럴 코일의 설계 변수를 나타낸다. 대전력 무선전력 전송 시스템에서 부피가 큰 헬리컬 형태 코일의 단점을 보완할 수 있다. L-C공진을 위한 주요 변수의 계산은 식(3), (4), (5)와 같다[7], [8]. 표 2는 턴 수 N을 조정된 스파이럴 형태의 수신 공진 코일 설계를 위한 파라미터 계산 결과이다.

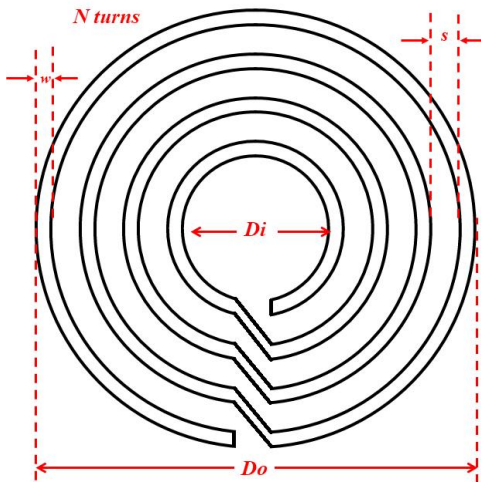


그림 3. 스파이럴 코일의 설계 변수  
Fig. 3. Design parameters of spiral coil.

Inner diameter(Di):스파이럴코일의 최내각 전체 반경,단위 in  
Outer diameter(Do):스파이럴코일의 최외각 전체 반경,단위 in  
Wire diameter(W) : 스파이럴코일의 두께, 단위 in  
Turn spacing(S) : 코일과 코일사이의 거리, 단위 in  
Number of turn(N) : 코일의 감은 횟수

표 2. 스파이럴 코일의 설계  
Table 2. Spiral coil design.

Di (mm)	Do (mm)	W (mm)	S (mm)	N	L (uH)
600	900	2.9	25	5	29.95

$$L = \frac{a^2 N^2}{8a + 11c} \quad [\mu H] \quad , \quad c > 0.2a \quad (3)$$

$$a = \frac{D_i + c}{2} \quad (4)$$

$$c = (W + S) \times N \quad (5)$$

수신 공진 코일로 사용하는 스파이럴 형태의 코일 내경 지름은 600 mm, 외경은 약 900mm, 도선 간격은 25 mm 이며, 턴 수 N을 조정하여 6.78 MHz에서 공진하도록 설계하였다. 송수신 공진 코일은 시스템을 구성하는 코일 중 상대적으로 인덕턴스가 크고, 자기 결합에 의한 상호 인덕턴스의 영향으로 공진 주파수가 천이 되는 현상이 발생한다. 또한 수신기의 특성에 따라서도 효율이 변한다. 따라서 각 코일의 상대적 위치에 따른 공진 주파수 보정이 필요하다.

그림 4는 평면 사각형 스파이럴 코일의 설계 변수를 나타낸다. 원형 코일에 비해 설계 변수 조정이 용이하고 작은 크기로 구현이 가능하여 수신 코일로 제작하였다. 다음 코일의 인덕턴스 계산은 식(6), (7) 과 같다[9]. 표 3은 턴 수 N을 조정된 평면 사각형 스파이럴 형태의 수신 코일의 설계를 위한 수식의 결과이다.

$$L = L_0 + M^+ - M^- \quad (6)$$

$$L_0 = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n$$

$$= 0.002l \times \left\{ \ln\left(\frac{2l}{W/2}\right) - 0.75 \right\} \quad [\mu H] \quad (7)$$

이때  $l = l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n$  [cm] 이다. 각 도선은 평행을 이루고 있으며, 전류의 방향에 따라 도체 간에 발생하는 상호 인덕턴스는 다음과 같다. 전류 방향이 같은 도선 간에 발생하는 상호 인덕턴스는  $M^+$ , 전류 방향이 다른 도선 간에 발생하는 상호 인덕턴스는  $M^-$  이다.

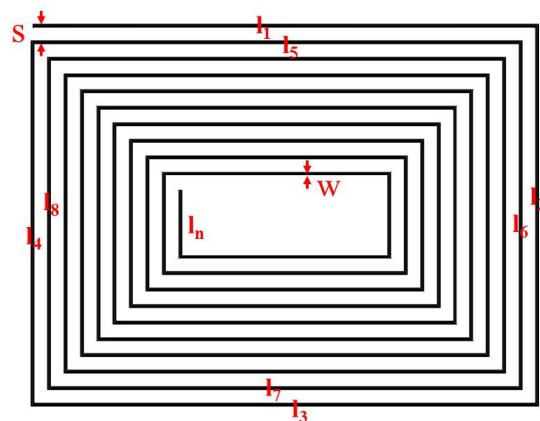


그림 4. 평면 사각형 스파이럴 코일의 설계 변수  
Fig. 4. Design parameters of flat-rectangular spiral coil.

표 3. 평면 사각형 스파이럴 코일의 설계

Table 3. Flat-rectangular spiral coil design.

l1 (cm)	l2 (cm)	W (cm)	S (cm)	N	L (uH)
8	6	0.06	0.2	10	5.7

$$\begin{aligned}
 M^+ = & 2(M_{1,5} + M_{1,9} + M_{1,13} + \dots) \\
 & + 2(M_{5,9} + M_{5,13} + M_{5,17} + \dots) \\
 & + 2(M_{3,7} + M_{3,11} + M_{3,15} + \dots) \\
 & + 2(M_{7,11} + M_{7,15} + M_{7,19} + \dots) \\
 & + 2(M_{2,6} + M_{2,10} + M_{2,14} + \dots) \\
 & + 2(M_{6,10} + M_{6,14} + M_{10,14} + \dots) \\
 & + 2(M_{4,8} + M_{4,12} + M_{4,16} + \dots) \\
 & + 2(M_{8,12} + M_{8,16} + M_{12,16} + \dots) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 M^- = & 2(M_{1,3} + M_{1,7} + M_{1,11} + \dots) \\
 & + 2(M_{5,3} + M_{5,7} + M_{5,11} + \dots) \\
 & + 2(M_{9,3} + M_{9,7} + M_{9,11} + \dots) \\
 & + 2(M_{13,15} + M_{13,11} + M_{13,7} + \dots) \\
 & + 2(M_{2,4} + M_{2,8} + M_{2,12} + \dots) \\
 & + 2(M_{6,4} + M_{6,8} + M_{6,12} + \dots) \\
 & + 2(M_{10,4} + M_{10,8} + M_{10,12} + \dots) \\
 & + 2(M_{14,4} + M_{14,8} + M_{14,12} + \dots) + \dots
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

이때 상호 인덕턴스는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$M_{i,j} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\vec{l}_i \cdot \vec{l}_j}{S_{i,j}} [H]
 \tag{10}$$

계산한 평면 사각형 스파이럴 코일은 매우 미소한 기생 커패시턴스를 가져 원하는 주파수에서 L-C 자기공진을 할 수 없다. 따라서 추가적인 집중 정수 소자 커패시턴스 100 pF를 직렬로 연결하여 원하는 공진주파수에서 공진하도록 조정하였다.

### 2-3 시뮬레이션 및 실험

형태가 다른 공진 코일 및 송, 수신 코일을 활용하면 다양한 환경 및 적용이 어려운 구조에 유연하게 적용 가능한 무선전력 전송 시스템을 구성할 수 있다. 이는 다양한 환경 및 구조적 영향을 고려한 변수를 고려해야 함을 의미하며, 따라서 송신 및 수신 공진 코일의 상대적 위치, 수신기의 개수에 따른 상호 인덕턴스 결합 및 입출력 임피던스의 변화를 예측한 최적화가 필요하다.

그림 5는 제안한 자기공진방식 무선전력전송 코일의 배치를 나타낸다. 공진 주파수의 천이를 일으키는 송·수신 공진 코일의 간격을 600 mm로 고정하고, 각 코일의 상대적 위치 변화에 따른 상호 인덕턴스를 시뮬레이션을 통해 추출하였다.

그림 6은 시뮬레이션과 측정을 통한 수신기의 수평 이동에 따른 효율을 보여준다. 수신 코일의 경우 자계 에너지가 집중되는 수신 공진 코일의 내경, 즉 원형 중심으로부터 300mm 떨어진 위치에 인접하도록 하여 최대 전력을 얻을 수 있도록 배치하였다.

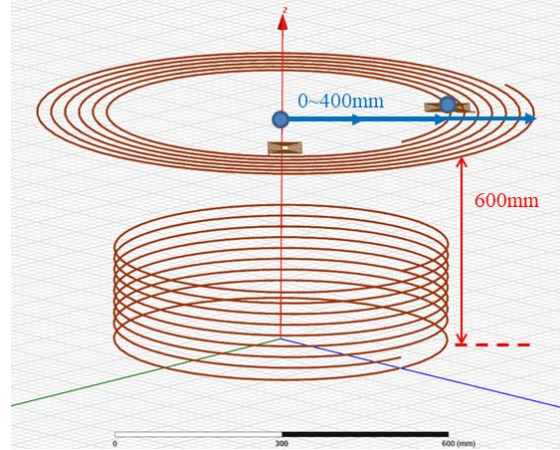


그림 5. 제안한 무선전력전송 시스템 코일 배치  
Fig. 5. Coil placement for the proposed WPT system.

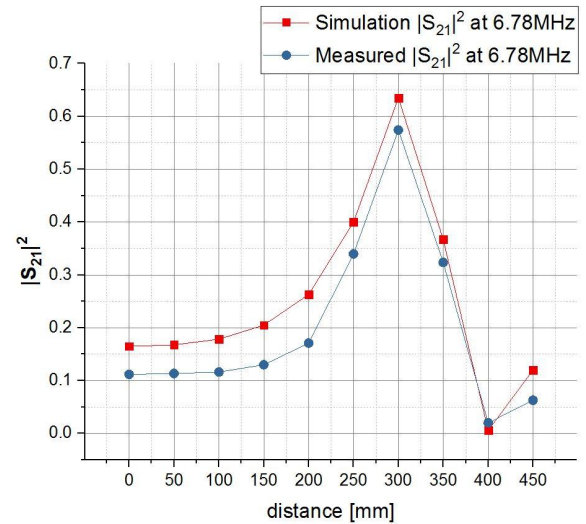


그림 6. 수신 코일 위치에 따른 효율 시뮬레이션 및 측정 결과  
Fig. 6. Efficiency simulation and measurement results according to receiving coil position.

그림 7은 계산 및 시뮬레이션을 통해 각 코일의 상대적 위치 변화에 따른 상호 인덕턴스를 가지고 등가회로에 적용하여 시뮬레이션 하였다. 공진 주파수는 송수신 공진 코일의 턴 수에 따라 변화하며, 등가회로에서는 이를 자기(self) 인덕턴스, 상호 인덕턴스, 기생 커패시턴스의 유기적인 변화로 표현할 수 있다.

그림 8은 시뮬레이션을 바탕으로 구성된 자기공진방식 무선 전력전송 시스템의 실험이며, 4-포트 네트워크 분석기(4-port network analyzer)를 사용하여 측정하였다. 실험은 한 개의 수신기의 효율이 가장 높은 중심에서 300mm 떨어진 A 지점에 수신기 한 개를 고정하여 측정하였으며 두 개의 수신기가 동시에 위치해 있을 경우는 A 지점에서 시계방향으로 45도 떨어진 B 지점에서 각각 50으로 측정하였다. 이때 중심으로부터 거리는 300mm로 동일하다.

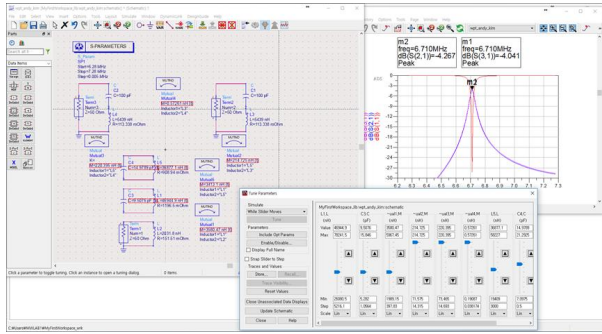


그림 7. 복수 수신기의 무선전력전송 시스템 등가회로 시뮬레이션  
 Fig. 7. Equivalent circuit simulation for WPT system with multiple receiving coils.

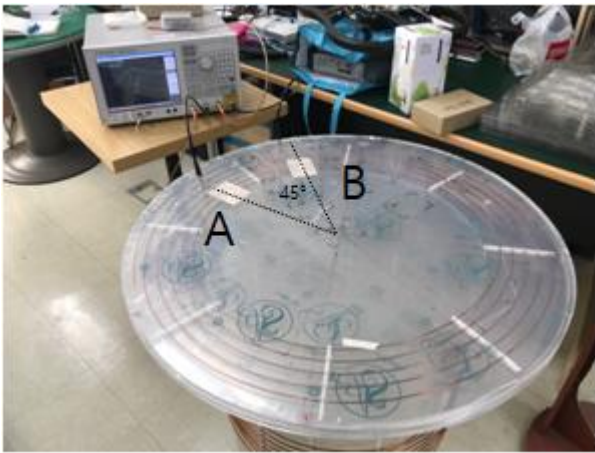


그림 8. 설계한 무선전력전송 시스템 측정  
 Fig. 8. Measurement of the designed WPT system.

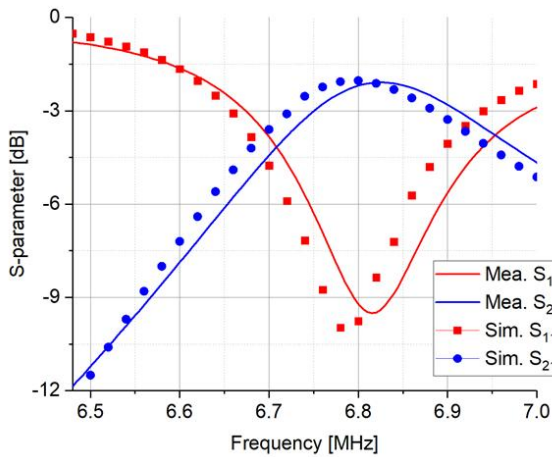


그림 9. 한 개 수신 코일의 무선전력전송 시스템 특성 시뮬레이션 및 측정  
 Fig. 9. Simulation and measurement of the WPT system properties with one receiving coil.

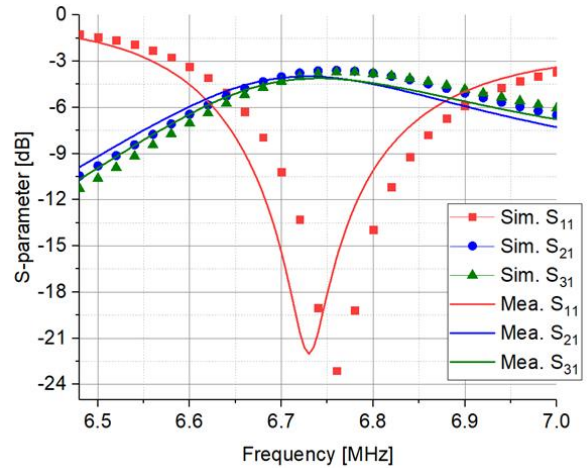


그림 10. 두 개 수신 코일이 위치한 경우의 무선전력전송 시스템 특성 시뮬레이션 및 측정  
 Fig. 10. Simulation and measurement of WPT system properties with two receiving coils.

표 4. 한 개 수신 코일의 무선전력전송 시스템 특성 측정 비교  
 Table 4. Simulation and measurement results of the WPT system properties with one receiving coil.

	Receiver A  S <sub>21</sub>   [dB]	Efficiency [%]	f <sub>0</sub> [MHz]
Mea.	-2.4	57	6.78
	-2.1	61	6.82
Sim.	-2.0	63	6.78

표 5. 두 개의 수신 코일의 무선전력전송 시스템 특성 측정 비교  
 Table 5. Simulation and measurement results of the WPT system properties with two receiving coils.

	Receiver A  S <sub>21</sub>   [dB]	Receiver B  S <sub>21</sub>   [dB]	Efficiency (A / B) [%]	f <sub>0</sub> (A / B) [MHz]
Mea.	-4.2	-4.3	38 / 37	6.78
	-4.0	-4.1	40 / 39	6.72 / 6.74
Sim.	-4.0	-4.3	39 / 37	6.78

그림 9와 그림 10은 수신 코일이 1개(A위치) 또는 2개(A, B 위치)가 위치했을 경우의 무선전력전송 특성을 시뮬레이션 하고 측정된 결과와 비교하였다. 수신 코일의 개수에 따라 공진 주파수의 천이와 효율 감소를 보였다. 1개의 수신 코일의 경우 57%, 2개의 수신 코일이 동시에 놓여있는 경우 각각 37%의 효율을 얻을 수 있는 것을 확인하였다.

### III. 결론

본 논문에서는 총 3종의 형태 및 크기가 다른 코일을 6.78 MHz 공진주파수를 갖도록 설계하여 무선전력전송 시스템을 구성하였다. 또한 한개 및 두개의 수신 코일이 있는 경우에 대하여 전력 전달 특성을 시뮬레이션으로 예측하고 측정 결과와 비

교하였다.

기존 동일한 형태 및 크기를 갖는 공진 코일을 이용한 자기공진 방식 무선전력전송 시스템과는 다른 비대칭형 구성으로 활용 가능성이 높은 테이블 형태의 시스템을 구성하였으며, 수신 공진 코일 위에 복수개의 작은 수신기에 전력 전달이 가능함을 확인하였고 중심부에서 거리에 따른 효율의 변화를 예측하고 측정하여 최적으로 전력이 전달되는 위치를 확인하였다.

## Acknowledgments

이 연구는 인천대학교 자체과제(2016-2270)에 의하여 수행된 결과의 논문입니다.

## References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly magnetic resonances," *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [2] S. M. Kim, J. I. Moon, I. K. Cho, J. H. Yoon, and W. J. Byun, "The technical trend and future direction of wireless power transmission," *Electronics and Telecommunications Trends*, Vol. 29, No. 3, pp. 98-106, June 2014.
- [3] D. U. Ryu, Y. H. Kim, and K. H. Koo, "Performance measurement of the wireless charging devices using electromagnetic induction techniques," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 19, No. 3, pp. 237-243, June 2015.
- [4] M. Fu, H. Yin and C. Ma, "Megahertz multiple-receiver wireless power transfer systems with power flow management and maximum efficiency point tracking," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 65, No. 11, pp. 4285-4293, Nov. 2017.
- [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," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [6] P. Vizmuller, *RF Design Guide: systems, circuits, and equations*. Norwood, MA: Artech House, 1995.
- [7] J. H. Park, H. Y. Yang, and C. S. Kim, "Review for the helical coil type and spiral coil type in a mid range wireless power transfer system," in *Proceeding of the KIEE Summer Conference 2011*, PyeongChang: Korea, pp. 11-12, July. 2011.
- [8] H. A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils," *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, Vol. 16, No. 10, pp. 1398-1400, Oct. 1928.
- [9] H. M. Greenhouse, "Design of planar rectangular microelectronic inductors," *IEEE Transactions on Parts, Hybrids, and Packaging*, Vol. 10, No. 2, pp.101-109, Jun 1974.



**김 영 현 (Young Hyun Kim)**

1994년 :인천대학교 전자공학과 (공학사)  
 1996년 :인천대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1996년 ~ 2000년 :대우고등기술연구원  
 2011년 ~ 현재 :(주)비엔알테크놀로지 대표  
 2015년 ~ 현재 :인천대학교 전자공학과 박사 과정  
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선전력전송, 무선 통신시스템 등



**박 대 길 (Dae Kil Park)**

2014년 :인천대학교 전자공학과 (공학사)  
 2016년 :인천대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2016년 ~ 현재 :인천대학교 전자공학과 대학원 박사 과정  
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선전력전송, 무선통신시스템 등



**구 경 현 (Kyung Heon Koo)**

1981년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1991년 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1998년 ~ 현재 : 한국항공학회 이사, 연구회 위원장, 학회장  
 1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수  
 ※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선통신 시스템, 차세대 항행시스템 등