

자기공진방식 무선전력전송 등가회로 추출 및 특성 분석

Performance Analysis and Equivalent Circuit Extraction for Magnetic Resonance Type Wireless Power Transfer

박대길·김영현·구경현*
인천대학교 전자공학과

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

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

[요 약]

본 논문에서는 6.78 MHz 에서 공진하는 대형 코일을 이용한 자기공진방식 무선전력전송 시나리오를 제시하고 3차원 전자계 시뮬레이션, 자기공진방식 무선전력전송 등가회로를 통한 특성을 비교하였다. 본 논문에서 제시한 자기공진방식의 무선전력전송 등가회로는 기존 등가회로에 추가적으로 코일 간에 발생하는 기생 커패시턴스를 고려하였다. 이를 바탕으로 제작한 자기공진방식 무선전력전송 코일을 측정하고 시뮬레이션 예측과 비교하였다. 비교 결과 전송 특성 및 공진 주파수 천이 정도를 예측할 수 있었다. 제시한 자기공진방식 무선전력전송 등가회로 특성과 측정치의 오차는 $\Delta|S_{11}|$ 이 최대 1.31 dB, $\Delta|S_{21}|$ 이 최대 1.36 dB로 유사하게 예측하였다.

[Abstract]

In this paper, we propose a magnetic resonant WPT(wireless power transfer) scenario using a large coil resonating at 6.78 MHz, and compare the characteristics through a three-dimensional electromagnetic field simulation and a magnetic resonant WPT equivalent circuit. The magnetic resonant WPT equivalent circuit proposed in this paper considers the parasitic capacitance generated between the coils in addition to the conventional equivalent circuit. Based on this analysis, we fabricated the magnetic resonant WPT coil and compared it with simulation prediction. As a result of comparison, the transfer characteristics and the resonance frequency shift can be predicted. Error proposed characteristics of equivalent circuit for the magnetic resonant WPT and the measured values are estimated to be $\Delta|S_{11}|=1.31$ dB and $\Delta|S_{21}|=1.21$ dB, respectively.

Key words : Wireless power transfer, Magnetic resonance, Helical coil, Parameter extract.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.4.371>



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 11 July 2016; Revised 16 August 2017
Accepted (Publication) 29 August 2017 (30 August 2017)

*Corresponding Author; Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-4766

E-mail: khkoo@inu.ac.kr

I. 서론

무선전력전송(WPT; wireless power transfer) 기술은 유선으로 공급하고 있는 전기에너지를 전자기장 형태로 변환하여 무선으로 전력을 전송하는 기술이다. 정보통신 기술의 급격한 발달에 따라 최근에는 1인 사용자가 다수의 휴대용 기기를 사용하는 것이 보편화 되었다. 반면, 휴대용 기기에 동작 유지를 위한 전력을 공급하는 배터리는 발전 속도가 상대적으로 느리다. 이러한 문제로 휴대용 기기의 장시간 동작을 가능하게 하는 기술의 필요성으로 무선전력전송에 대한 연구 개발이 더욱 활발해지고 있다. 무선전력전송 기술이 발전되면 자동으로 주위 환경과 상관없이 휴대용 기기 배터리의 잔여량에 따라 수시로 충전이 가능해지고, 배터리 사용 시간 제한에 따른 여러 문제를 해결할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

현재 시중에 출시된 무선전력전송기는 자기유도방식의 무선전력전송 기술을 이용해 개발되었으나, 송신기와 수신기 간에 1 cm 내외의 짧은 전송거리와 무선전력전송을 위한 코일의 정렬에 따라 기능 여부가 결정되기 때문에 개선 필요성이 크다. 이를 해결하기 위한 방법으로 자기유도에 비하여 코일의 정렬이 자유로운 자기공진방식에 대한 연구가 진행되어 왔다. 2006년 미국 MIT 마린솔라서치 교수팀이 자기공명에 관한 무선전력전송 이론을 발표하였고, 약 2 m 거리에서 전구를 켜는 시연을 하였다. 이 연구 발표를 시작으로 미래의 혁신적인 기술로서 무선전력전송의 자기공진방식이 각광받기 시작하였다.[1]

자기공진방식을 이용한 무선전력전송 기술은 코일의 공진을 이용하며, 일반적으로 공진코일은 설계된 각각의 공진 주파수에서만 효율적으로 전력 전송이 가능하다. 이러한 현상을 이용하면 송신기 및 수신기 간 1:1 혹은 1:N의 공진 코일을 이용한 에너지 중계로 전력 전송 거리를 증가시킬 수 있고, 특정 기기에 선택적인 전력 전송이 가능하다.[2]

본 논문에서는 등가회로 모델링 기법을 이용하여 Air Fuel Alliance(前 A4WP) 표준을 목표로 6.78 ± 0.03 MHz의 공진 주파수를 갖는 송수신 코일을 설계 제작하였다. 송수신 루프 사이의 1 m 거리에서 전송 특성을 예측하고 측정을 통해 결과를 비교하였다.

II. 자기공진방식 무선전력전송 시뮬레이션

2-1 자기공진방식 무선전력전송

일반적인 자기공진방식의 무선전력전송 시스템은 그림 1과 같이 신호 발생기를 통해 특정한 주파수를 갖는 신호를 만들고 이를 전력증폭기를 이용해 목표로 하는 송신 전력을 만들어낸다. 이후 증폭된 송신 전력은 송신 및 수신 코일의 공진현상을 통해 수신 측으로 전력을 전달한다.[3]

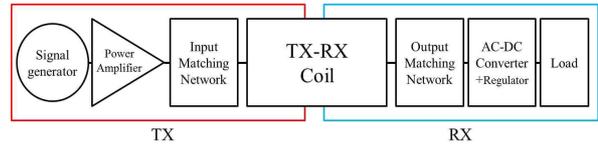


그림 1. 일반적인 무선전력전송 시스템 블록도.
Fig. 1. Block diagram of a typical WPT system.

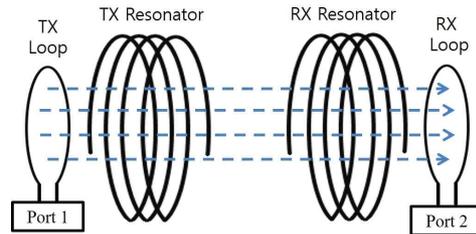


그림 2. 자기공진방식 무선전력전송 시스템.
Fig. 2. The concept of magnetic resonant WPT system.

선행 연구 되어온 자기공진방식 시스템은 그림 2와 같이 4개의 코일로 구성되어 있다. 시스템은 송신 단일코일, 송신 공진코일, 수신 공진코일, 수신 단일코일로 구성된다. 전력 전송은 송신 공진코일과 수신 공진코일의 LC 공진에 의해 이루어진다. 그림 2와 같은 시스템 구성은 송신코일에 전력을 직접 인가하여 수신코일로 전력을 받는 자기유도 방식에 비해 높은 Q-factor를 갖도록 제작하는 것이 가능하다.[4]

2-2 공진 코일 설계 및 시나리오 구성

자기공진방식 무선전력전송용 코일의 파라미터는 3차원 전자계 시뮬레이션(3D EM simulation)과 계산을 바탕으로 설계하였다. 공진코일의 공진 주파수는 6.78 MHz를 목표로 제작하였다. Skin effect에 의한 저항성 손실을 줄이고 제작 용이성을 고려하여 지름 2.9 mm 구리 도선을 사용하였다. LC 공진코일의 자기 인덕턴스는 공진코일의 물리적 크기 및 구조의 영향을 받는다. LC 공진을 위한 헬리컬 코일의 주요 변수의 계산은 다음과 같다.[5]

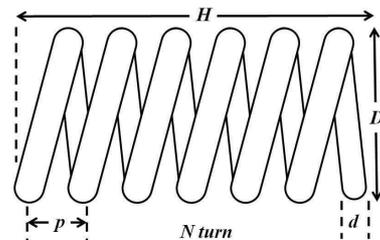


그림 3. 헬리컬 코일의 설계 변수.
Fig. 3. Design parameters of helical coil.

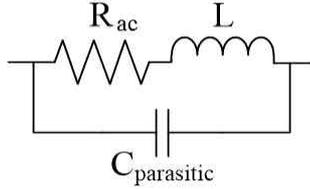


그림 4. 헬리컬 코일의 등가 회로.
Fig. 4. Equivalent Circuit of helical coil.

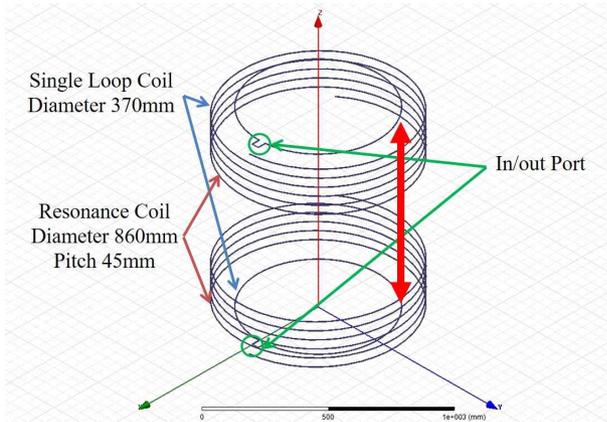


그림 5. 3차원 전자계 시뮬레이션을 위한 WPT 코일 구성.
Fig. 5. Setting of coils for WPT 3D EM simulation.

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

$$C_{parasitic} = \frac{D\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1} \left(\frac{(N-1)(p-d)}{d} \right)} \quad [pF] \quad (2)$$

$$R_{ac} = \frac{\rho \times l}{\pi r^2 - \pi \left(r - \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times f \times \mu_o \mu_r}} \right)^2} \quad [Ohm] \quad (3)$$

식 1-3의 길이 단위는 mm이다. 공진 주파수 형성 및 목표 전력전송 거리 확보를 위해 송신 및 수신 공진코일은 지름 860 mm, 도선 간격은 45 mm, 턴 수는 5.5의 헬리컬 형태, 전력 인가를 위한 수신 코일의 지름 670 mm의 단일 루프 형태로 디자인 하였다. 이는 대전력 무선전력 송수신을 위한 코일 모델을 가정하여, 충분한 전력 전송 거리를 확보하기 위해 정한 크기이다.

시뮬레이션 시나리오는 그림 5와 같이 송신 및 수신 코일이 대칭으로 놓여 있으며, 각각의 루프코일을 기준으로 간격을 1.0 m로 정하였다.

2-3 자기공진방식 무선전력전송 등가회로 분석

기존 자기공진방식의 무선전력전송 등가회로는 코일의 자기결합을 특징으로 대역 통과 필터로 표현되었다.[6]

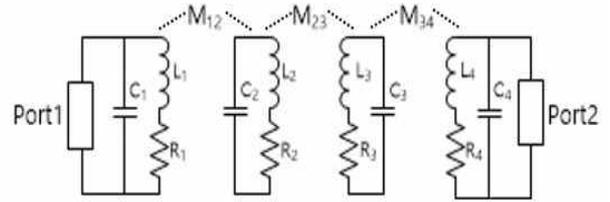


그림 6. 기존 자기공진방식 무선전력전송의 등가회로.
Fig. 6. A conventional equivalent circuit for WPT of magnetic resonance type.

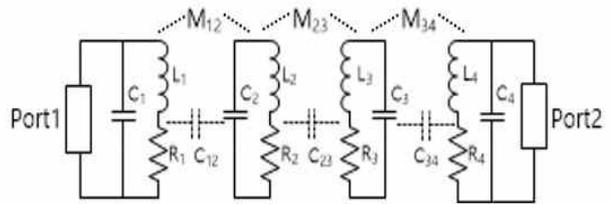


그림 7. 코일 사이에 발생한 기생 커패시턴스를 포함하는 자기공진방식 무선전력전송의 등가회로.
Fig. 7. A equivalent circuit including parasitic capacitance for WPT of magnetic resonance type.

그림 6은 기존 자기공진방식 무선전력전송의 등가회로이다. 주변 환경의 영향을 고려하지 않으며, 등가회로를 구성하는 파라미터 값이 작은 소형 송수신 코일의 해석에 적합하다.

그림 7은 각 코일 사이에 발생한 커패시턴스를 포함하고 있다. 대형 코일을 사용하는 무선전력전송의 경우 전력을 전달하는 단면적이 상대적으로 넓다. 따라서 사용되는 전력 인가, 수신 루프 코일 및 공진 코일 사이에 발생하는 기생 커패시턴스 성분을 무시할 수 없다.

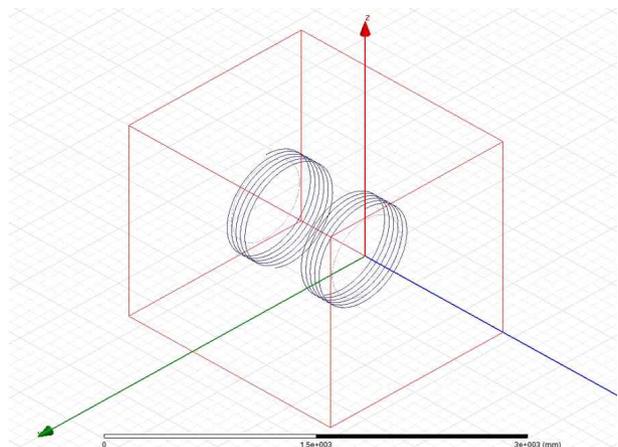


그림 8. 등가회로 구성을 위한 파라미터 추출 시뮬레이션.
Fig. 8. Simulation for equivalent circuit parameter extraction including parasitic capacitance for WPT of magnetic resonance type.

표 1. 구성 코일에 따른 파라미터 추출 (자기 R, L, C).

Table 1. Extraction of parameter values for each coil (self resistance, self inductance, self capacitance).

Solve @ 6.78 MHz	n=1	n=2	n=3	n=4
R_n [Ohm]	0.157	1.224	1.225	0.157
L_n [uH]	2.34	41.53	41.53	2.34
C_n [pF] (Calculation)	-	13.7	13.7	-

표 2. 구성 코일에 따른 파라미터 추출 (상호 인덕턴스).

Table 2. Extraction of parameter values for each coil (Mutual inductance).

Solve @ 6.78 MHz	n=1, m=2	n=2, m=3	n=3, m=4
$M_{m,n}=M_{n,m}$ [uH]	2.853	2.76	2.853

표 3. 각 코일 사이에 발생한 기생 커패시턴스 추출.

Table 3. Extraction of parasitic capacitance values between each coil.

Solve @ 6.78 MHz	n=1, m=2	n=2, m=3	n=3, m=4
$C_{m,n}=C_{n,m}$ [pF]	17.993	20.818	17.993

그림 8과 표 1은 일반적인 자기공진방식 무선전력전송 등가 회로에 필요한 파라미터 추출을 위한 시뮬레이션과 추출한 값을 나타낸다. 3차원 전자계 시뮬레이션의 해석 주파수는 목표로 하는 공진주파수 6.78 MHz로 무한 방사 공간을 가정하고 해석을 진행하였다.

표 2는 각각의 코일이 자기적으로 결합 되어있음을 나타내기 위한 상호 인덕턴스 추출하였다. 위와 같은 파라미터 구성의 자기공진방식 무선전력전송 등가회로는 비교적 작은 코일을 이용한 경우 각각 코일 사이에 발생한 기생 커패시턴스가 전체 시스템에 영향을 줄 만큼 유효한 값을 갖지 못해 해석하는데 큰 문제가 없다.

표 3은 코일 사이에 발생한 기생 커패시턴스 추출 값이다. 공진기의 크기가 클수록, 전송거리가 가까울수록 발생하는 기생 커패시턴스는 공진주파수 천이 및 전송 특성에 영향을 준다.

최종적으로 그림 9와 같이 자기공진방식 무선전력전송 등가회로를 구성하고, 앞선 시뮬레이션으로 얻어낸 파라미터를 적용하여 시나리오에 맞는 예측 값을 얻었다.

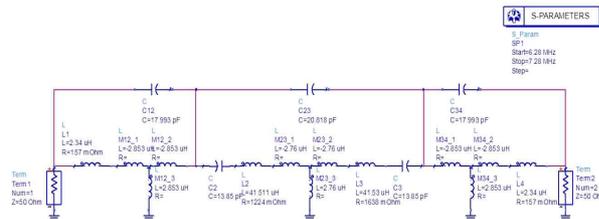


그림 9. 코일 간에 발생한 기생 커패시턴스를 고려한 자기공진방식 무선전력전송 등가회로 시뮬레이션.

Fig. 9. Simulation for equivalent circuit including parasitic capacitance for WPT of magnetic resonance type.

III. 자기공진방식 무선전력전송 실험 및 비교

제작한 자기공진방식 무선전력전송 측정 환경은 NIPA에서 제공하는 무반사 챔버를 이용하여 송수신 양측 루프코일을 기준으로 간격을 1.0m로 정하고 네트워크 분석기를 통해 전송 특성을 측정하였다.

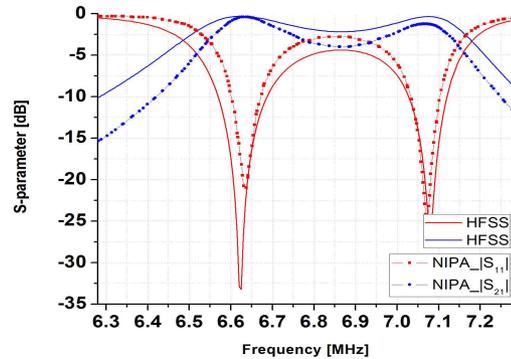


그림 10. 측정치와 3차원 전자계 시뮬레이션 결과 비교..

Fig. 10. Comparison measurement with 3D EM simulation.

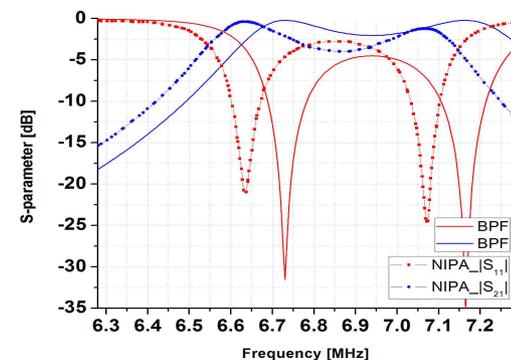


그림 11. 측정치와 기존 무선전력 전송 등가회로 결과 비교..

Fig. 11. Comparison measurement with conventional equivalent circuit for WPT.

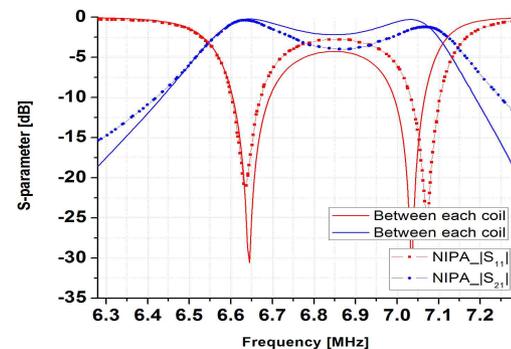


그림 12. 측정치와 기생 커패시턴스가 고려된 무선전력전송 등가회로 결과 비교.

Fig. 12. Comparison Measurement with Equivalent Circuit including Parasitic Capacitance for WPT.

표 4. 측정치와 각 시뮬레이션 특성 비교 (6.78±0.03 MHz).
Table 4. comparison measurement values with each simulation properties (6.78±0.03 MHz).

		6.75 [MHz]	6.765 [MHz]	6.78 [MHz]	6.795 [MHz]	6.81 [MHz]
Measurement & 3D EM simulation	△ S ₁₁ [dB]	1.426	1.486	1.526	1.548	1.559
	△ S ₂₁ [dB]	0.770	0.919	1.095	1.219	1.355
Measurement & Precedent .E.C	△ S ₁₁ [dB]	12.413	8.731	6.648	5.295	4.350
	△ S ₂₁ [dB]	1.933	2.105	2.243	2.289	2.318
Measurement & E.C with parasitic capacitor	△ S ₁₁ [dB]	1.172	1.202	1.239	1.274	1.310
	△ S ₂₁ [dB]	0.740	0.862	1.020	1.136	1.274

그림 11은 측정치와 3차원 전자계 시뮬레이션을 통해 얻은 전송 특성을 비교하였다. 3차원 시뮬레이션 특성과 측정치를 비교하였을 때 공진 코일 간에 과결합 특성에 차이가 있으며, 전반적인 전송 특성 및 효율을 알 수 있었다.

그림 12는 측정치와 기존 자기공진방식 무선전력전송 등가 회로를 통해 얻은 전송 특성을 비교하였다. 기존 등가회로 특성과 측정치를 비교하였을 때 전송 특성은 유사한 것으로 보인다. 공진주파수가 천이 이루어진 것을 알 수 있었다.

그림 13은 측정치와 구성 코일 사이에 발생한 기생 커패시턴스가 고려된 무선전력전송 등가회로를 통해 얻은 전송 특성을 비교하였다. 기생 커패시턴스가 고려된 등가 회로의 특성과 측정치를 비교하였을 때 3차원 전자계 시뮬레이션 특성과 유사하며, 전반적인 전송 특성 및 효율을 알 수 있었다.

표 4는 앞선 결과를 종합하여 6.78 ± 0.03 MHz 이내에서 측정치를 기준으로 각 시뮬레이션의 전송 특성 값을 비교하였다. 비교 결과 측정치를 기준으로 3차원 전자계 시뮬레이션과 코일 간에 발생한 기생 커패시턴스를 고려한 자기공진방식 무선전력전송 등가회로 시뮬레이션의 전송 특성간의 오차가 상대적으로 작았다. 3차원 전자계 시뮬레이션의 경우 해석 주파수 설정에 따른 오차가 발생할 수 있다.

IV. 결 론

최근 다양한 무선 디바이스의 보급 및 사용량이 급증함에 따라 무선전력전송 기술은 무선 디바이스의 짧은 배터리 타임을 보완하기 위한 수단으로 급부상 하게 되었다. 최근 자기유도방식의 충전기기를 통해 기술이 보급되었지만 짧은 전송거리로 유선 충전과 버금가는 불편함 때문에 보급이 늦춰지고 있다.

본 연구는 6.78 MHz에서 공진하는 대형 코일 제작을 가정하여, 거리 1 m의 전력 전송 거리에서 송수신 코일을 등가 회로로 변환하고 빠른 특성 확인을 위한 연구를 진행하였다. 3차원 전자계 시뮬레이션과 계산을 통해 송수신 코일의 파라미터를 얻

고 등가 회로를 구성하였다. 기존 자기결합으로 설명되는 자기공진방식 무선전력전송 등가회로에 추가적으로 환경에 따라 발생하는 기생 커패시턴스의 영향을 모델링하여 공진주파수 천이 및 전송 효율 특성 변화를 확인하였다. 전적으로 3차원 전자계 시뮬레이션에 의존하는 경우에 비해 빠르고 비교적 정확한 결과를 얻어 낼 수 있었다.

본 논문에서 제작한 공진 코일은 헬리컬 형태로 제작하여 부피와 코일의 단면적이 매우 크고 전기자동차와 같은 운송수단에 대전력 송수신을 시나리오로 진행하였다. 향후 공간적인 부분을 고려한 평면형 스파이럴 형태의 공진 코일을 이용하여 더욱 실용적인 형태의 공진 코일에 관한 연구를 진행할 계획이다.

Acknowledgments

이 연구는 인천대학교 자체과제(2015-1684)에 의하여 수행된 결과의 논문입니다.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, and J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly magnetic resonances," *Science*, Vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [2] Fu, M, Zhang, T, Ma, C and Zhu, X, "Efficiency and optimal loads analysis for multiple-receiver wireless power transfer systems", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 63.3, pp.801-812, 2015.
- [3] C. W. YANG, and C. L. YANG, "Analysis of inductive coupling coils for extending distances of efficient wireless power transmission," in *Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), 2013 IEEE MTT-S International. IEEE*, Singapore, pp. 1-3, 2013.
- [4] Y. Park, J. Kim and K. H. Kim, *Wireless Power Transfer-Principles and Engineering Explorations*, 1st. ed. Croatia : InTech, pp. 207- 226 , 2012
- [5] P. Vizmuller, *RF Design Guide*, London : Artech House, pp. 218 - 219, 1995.
- [6] I. Awai, and T, Ishizaki, "Transferred power and efficiency of a coupled-resonator WPT system," in *Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), IEEE MTT-S International, Japan*, pp. 105-108, 2012.

