

무선전력전송 송수신코일 거리에 따른 효율 및 임피던스 특성 해석

Characteristic Analysis of Efficiency and Impedance With WPT Transmitter and Receiver Coil Distance

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 드론 무선충전을 위해 지상 고정 무선전력전송 송신기에 착륙하는 드론과 같이, 고정 송신기와 상대적인 거리 및 코일 정렬이 변화하는 수신기에 적용하는 6.78 MHz 자기공진 무선전력전송 기술을 제안하였다. 송신 및 수신 코일간 상대 거리와 코일 면적 부정렬비 등에 따른 전력전달 특성을 연구하였다. 송수신 코일은 직접급전방식으로 60x80mm² 크기로 설계하고 상대거리 최대 50mm에서 수평방향 면적부정렬 상태를 가정하여 코일 중심축이 XY평면에서 각각 0-40mm 어긋날 때 특성을 유도하였다. 송수신 코일간 거리 및 면적부정렬비에 따라 3차원 전자계 시뮬레이션을 통한 전력전송특성을 유도하고 제작한 시스템 특성을 시뮬레이션과 비교하였다. 무선전력전송 송수신 코일간 시뮬레이션 특성과 측정치는 수직거리 최대 30mm, 50% 면적 부정렬 상태에서 -3dB 이상의 전달특성을 나타내었다. 본 연구를 통해 송수신기간의 상대거리 및 부정렬 상황에 따라 직접급전 방식에 따른 특성을 예측할 수 있었으며 직접급전 방식은 송수신 코일간 상대적 거리가 짧고 부정렬 면적비가 작아 결합계수가 큰 경우 유리함을 알 수 있었다.

[Abstract]

In this paper, we have proposed a magnetic resonant 6.78MHz WPT(wireless power transfer) technique which can be applied to a fixed transmitter and a receiver of varying relative distance and coil alignment, Power transmission characteristics are studied with the relative distance and misalignment ration of coil area between the transmitting and receiving coils. The coils are designed with the size of 60x80mm² by direct feeding method, and the characteristics are derived with the maximum relative distance of 50mm and horizontal area misalignment state of 0-40mm misalignment of coil center axis in the XY plane. The power transmission characteristics are compared between the 3D EM simulation and the measured data, and the power transmission shows larger than -3dB performance with the vertical distance of up to 30mm and 50% area misalignmmnt ratio. This work shows the transmission characteristics according to relative distance and misalignment state between the cols and that direct feeding has advantage for the short relative distance and small misalignment ratio.

Key words : Characteristic analysis, Distance change, Electromagnetic field, Impedance, Wireless power transfer.

<https://doi.org/10.12673/jant.2022.26.3.160>



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 May 2022; Revised 7 June 2022
Accepted (Publication) 28 June 2022 (30 June 2022)

*Corresponding Author; Kyung Heon Koo

Tel: +82-32-835-4766
E-mail: khkoo@inu.ac.kr

1. 서론

무선전력전송(WPT; wireless power transfer)은 유선으로 공급하던 전기에너지를 무선으로 전송하는 기술이다. 무선전력 전송은 전자계, 마이크로파, 음파 및 광파 등을 이용하여 무선으로 전력을 전송한다. 정보통신기술 발전에 따라 개인이 다양한 휴대 기기를 사용하고 있으며, 특히 드론과 같은 단독 동작 기기의 활동을 위한 전력 공급 배터리에 전력을 공급하여 장시간 동작을 가능하게 하는 기술 필요성으로 무선전력전송에 대한 연구 개발이 진행되어 왔다. 무선전력전송 기술이 발전되면 다양한 환경에서 휴대용 기기 배터리의 잔여량에 따라 수시로 충전이 가능해지고, 배터리 사용 시간 제한 등의 한계를 해결할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

전자계를 이용한 무선전력전송 기술은 크게 방사방식과 비방사방식으로 분류되는데 비방사방식은 자기유도와 자기공진 방식으로 나눌 수 있다. 기존에 보급된 자기유도방식의 무선전력전송기기는 송신기와 수신기 간격이 접촉식 또는 수 mm 내외의 짧은 전송거리와 전력전송 송수신 코일 정렬에 따라 특성 및 동작 여부가 결정되므로 개선이 필요하다. 이의 해결 방법으로 자기유도에 비교하여 송수신 코일의 정렬이 자유로운 자기공진방식에 대한 연구가 제안되었다 [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 증개로 전력 전송 거리를 증가시킬 수 있고, 특정 기기에 선택적인 전력 전송이 가능하다 [2].

본 논문에서는 등가회로 모델링 기법을 이용하여 자기공진 무선전력전송 표준 기관인 AFA(Air Fuel Alliance) 사양을 목표로 6.78 ± 0.03 MHz의 공진 주파수를 갖는 송수신 코일을 설계 제작하였다. 본 연구의 주 응용 예로 지상 WPT 송신기에 착륙하는 드론과 같이 고정된 송신기와 큰 상대위치 변화 및 중심축 어긋남(misalignment, 부정렬)을 갖는 수신기 간의 전력전달을 설정하였으며 전력전달 특성을 예측하고자 송수신 루프 사이의 거리 및 중심축 어긋남 상태에서 전송 특성을 시뮬레이션하고 측정을 통해 결과를 비교하였다.

일반적으로 코일간 부정렬 상태에서 무선전력전송 시스템의 수신 범위를 넓히기 위해서, 수신기 단면적에 대비하여 송신기의 단면적을 크게 하거나 다양한 크기와 모양의 다중 코일을 이용하였다 [3-5]. 이는 송신기 단면 위에 수신기가 어디에 위치하던 동일한 상호 인덕턴스 및 전송특성을 얻을 수 있는 장점이 있으나, 소형기기에 적용하기 위한 방법으로는 적합하지 않다. 기존에 전력 전송 효율을 유지하기 위해서, 목표 전송 거리에 적합하게 송신 코일의 크기와 모양을 조정하거나 [6], 임피던스 정합기를 사용한 연구가 있다 [7-8].

송수신 공진코일의 급전 방식에 따라 전송 효율이 변화하는데 크게 직접급전(direct feeding)과 루프급전(loop feeding) 방식으로

나눌 수 있다. 직접급전 방식은 송신과 수신을 위한 2개의 코일을 사용하며 송신 코일에 직접 전력을 급전하여 구조가 간단하다. 루프급전 방식은 급전과 전력수신을 위한 별도의 loop 코일과 공진 코일을 이용한다. Loop 코일 1개와 공진 코일 1개가 하나의 송신기 또는 수신기를 구성하여, 총 4개 코일을 사용한다. 무선전력전송 시스템을 구성하는 각각의 코일 간에 발생하는 상호 인덕턴스 값에 의해 전달특성 변화가 발생한다 [9].

II. 자기공진방식 무선전력전송 시뮬레이션

2-1 자기공진방식 무선전력전송

일반적인 무선전력전송 시스템은 그림 1과 같이 특정 주파수 신호를 전력증폭기를 이용해 목표 송신 전력으로 증폭하고 이 전력은 송신 및 수신 코일의 공진현상을 통해 수신 측으로 전력을 전달한다 [10].

기존 무선전력전송 시스템 해석 방법은 기본적으로 두 코일이 정렬된 상태에서 거리에 따른 결합계수를 구하여 등가회로를 구성한다 [11-12]. 이러한 경우를 확장하여 특정거리에서 수신코일이 측면으로 이동하거나 기울기에 의해 발생하는 부정렬 상태를 분석하는 방법도 있다 [13].

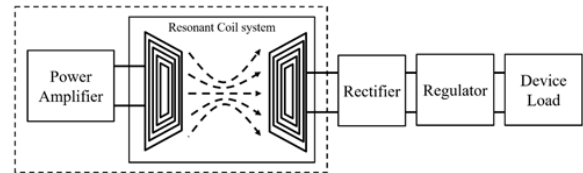


그림 1. 일반적인 무선전력전송 시스템 블록도.

Fig. 1. Block diagram of a typical WPT system.

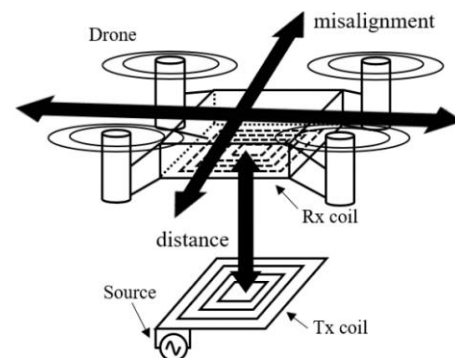


그림 2. 거리 변화 및 중심축 어긋남을 고려한 드론용 자기공진 무선전력전송 시스템.

Fig. 2. Magnetic resonant WPT system for drone with distance variation and center misalignment.

드론에 무선전력전송으로 배터리를 충전하는 경우 드론 착륙시 랜딩 기어 및 바람 영향으로 송신코일 중심에 정확한 착지가 용이하지 않다. 이러한 영향으로 송신 및 수신 코일 사이에 거리가 변화하거나 코일간 정렬 상태의 변동이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 송신 코일과 수신 코일이 직접 급전방식으로 동작하는 송수신 시스템을 설계하여 R, L, C 공진회로와 상호 인덕턴스의 등가회로로 모델링하여 결합계수를 이용하여 해석하였다.

2-2 직접급전방식 무선전력전송 시스템 해석

직접급전과 루프급전 두가지 급전 방식으로 구분할 수 있는데 이 중에서 직접급전 방식은 송신과 수신을 위한 2개의 코일을 사용하며 송신 코일에 직접 전력을 급전하므로 구조가 간단하다. 송신과 수신 코일간의 거리, 두 코일간 중심축 및 겹치는 면적의 변화 등에 의한 결합계수의 변화 및 전달특성 영향을 분석하였다. 송신 및 수신 코일은 동일한 형태를 갖도록 하였고 네트웍분석기로 그 특성을 측정하고자 입출력 임피던스는 50Ω으로 설계하였다.

자기공진방식 무선전력전송용 코일 파라미터는 3차원 전자계 시뮬레이션(3D EM simulation)을 바탕으로 설계하였다. 공진코일은 표피효과 (Skin effect)에 의한 저항성 손실을 줄이고 제작의 용이성을 고려하여 지름 0.6mm 구리 도선을 사용하였다. L-C 공진코일의 자기 인덕턴스는 코일의 물리적 크기 및 구조의 영향을 받는다.

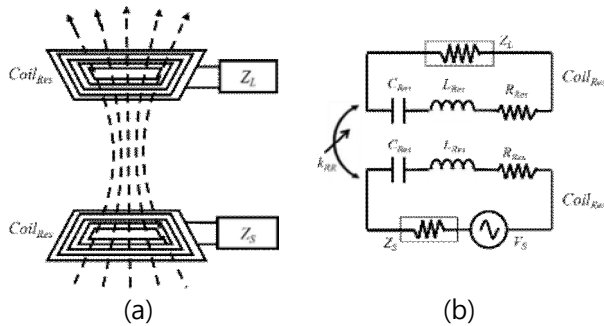


그림 3. 직접급전방식 자기공진 무선전력전송 시스템.
Fig. 3. Magnetic Resonant WPT system using direct feeding (a) configuration (b) equivalent circuit of Series Tx - Series Rx.

그림 3은 직접급전방식의 자기공진 무선전력전송 시스템의 모식도와 등가회로이다. 이 시스템의 공진주파수는 L-C 공진에 의해 결정되며, 직접급전 방식의 경우 공진 코일과 외부 연결 캐패시터(lumped C)가 직렬 혹은 병렬로 연결되어 구조가 단순하다. 등가회로는 송신 코일과 외부 캐패시터, 수신 코일과 외부 캐패시터의 연결 방식에 따라 SeriesTx - SeriesRx (SS),

SeriesTx - ParallelRx (SP), ParallelTx - SeriesRx(PS), ParallelTx - ParallelRx (PP) 로 나뉜다. 공진 구조에 따라 효율의 차이가 있으며 SS 또는 SP 연결방식의 효율이 좋다는 연구가 있다 [14]. 직접급전 방식의 공진 주파수는 등가 회로 해석에서 식 1로 나타낸다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{Res} \cdot C_{Res}}} \tag{1}$$

본 연구에서 설계한 드론충전용 송신 및 수신 공진 코일은 60*80mm² 면적을 갖는 평면 스파이럴(spiral) 형태의 코일로 0.6mm 도선을 2mm 간격으로 10번 감아서 만들었다. 목표 공진 주파수는 6.78MHz로 하였다.

2-3 거리 및 부정렬에 따른 결합계수 시뮬레이션

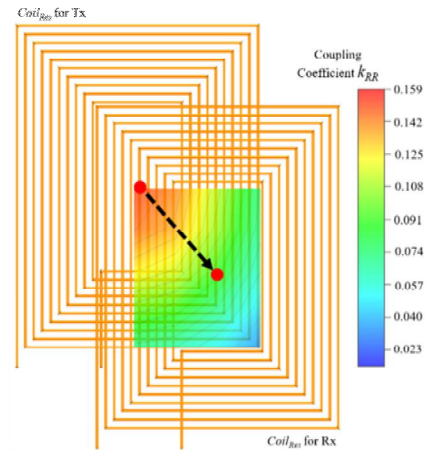


그림 4. 30mm 거리에서 수평으로 중심에서 최대 40mm 이동하는 경우의 결합계수 k_{RR} 시뮬레이션. 화살 방향 수신코일 중심점이 이동하는 경우의 결합계수 k_{RR} 제시함.
Fig. 4 Simulation for coupling coefficient k_{RR} according to misalignment at fixed vertical distance 30mm with horizontal misalignment up to 40mm from center alignment

두개의 공진 코일 간의 거리와 부정렬 상태에 따라 변하는 결합계수 k_{RR}를 3차원 전자계 시뮬레이터로 추출하였다. 수신 코일이 고정된 송신 코일에 대해 중심점이 정렬된 상태에서 수직으로 30mm에서 50mm 사이로 이동할 때, 또한 각각의 수직 거리에서 수신기를 수평 x, y 축으로 0에서 40mm 범위에서 이동하는 코일 면의 부정렬 상태를 가정하였다. 0~40mm 범위의 수평 이동은 수신코일이 송신코일과 겹치지 않고 벗어나는 면적에 의해 정의할 수 있는 부정렬상태비율 값이 0%에서 75%에 해당한다.

그림 4는 수직 거리가 z축으로 30mm 떨어진 수신코일이 수평 x, y 축으로 0~40mm 이동할 경우, 결합계수 변화를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 k_{RR} 은 0.159에서 0.029로 감소하는 것을 알 수 있다. 수직 거리 50mm에서 부정합 면적비가 0%에서 75% 까지 증가할 때 k_{RR} 은 0.068에서 0.023로 감소한다. 공간적 상대 위치 및 그 변화는 결합계수의 변화로 대응되며, 등가회로에 적용하여 전송 특성을 주파수 영역에서 분석하였다.

III. 자기공진방식 무선전력전송 실험 및 비교

제작한 자기공진방식 무선전력전송 측정은 송수신 양측 공진코일을 기준으로 간격을 변화시키며 네트워크 분석기를 통해 전송 특성을 측정하였다.

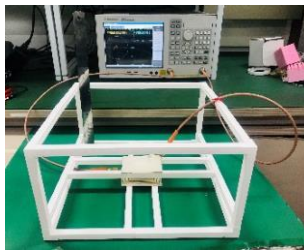


그림 5. X,Y,Z 위치 변화가 가능한 송수신 코일 특성측정 지그.
Fig. 5 Zig. for measuring the characteristics of Tx and Rx Coil with X,Y,Z position change

그림 5는 네트워크 분석기로 자기공진 무선전력전송 시스템을 측정하는 모습이다. 수신 코일을 드론에 부착하였을 경우, 결합 계수가 예상 가능한 위치에 호버링 상태를 장시간 유지하기 어렵기 때문에 마치 드론에 탑재된 수신 코일과 동일하게 x, y, z축으로 거리 및 부정합 상태 변화를 줄 수 있도록 측정 지그를 제작하여 송신 코일과 수신 코일을 배치한 상태에서 위치에 따른 산란계수를 측정하였다.

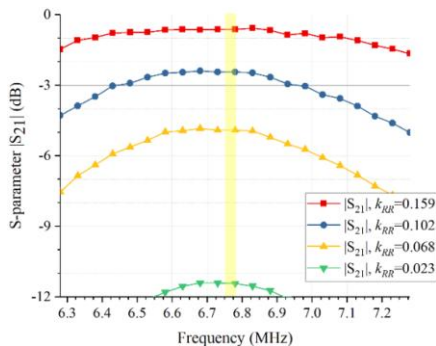


그림 6. 결합계수 k_{RR} 에 따른 직접급전 자기공진 무선전력전송 시스템의 전송 특성.
Fig. 6 Transmission characteristics of the MR-WPT system using direct feeding according to coupling coefficients k_{RR}

그림 6은 직접급전 방식의 전송특성을 결합계수 k_{RR} 에 따라 주파수 대역에서 측정한 결과이다. 측정된 $|S_{21}|$ 을 보면 계산된 공진주파수 6.78MHz 근방의 비교적 넓은 주파수대역에서 평탄한 전송 특성을 갖는다. 송수신 코일간 거리가 멀어지거나 부정합 면적비가 증가하면 결합계수 k_{RR} 가 감소함에 따라 6.78MHz에서 전달계수 $|S_{21}|$ 은 -0.62dB에서 -11.43dB까지 감소하였다.

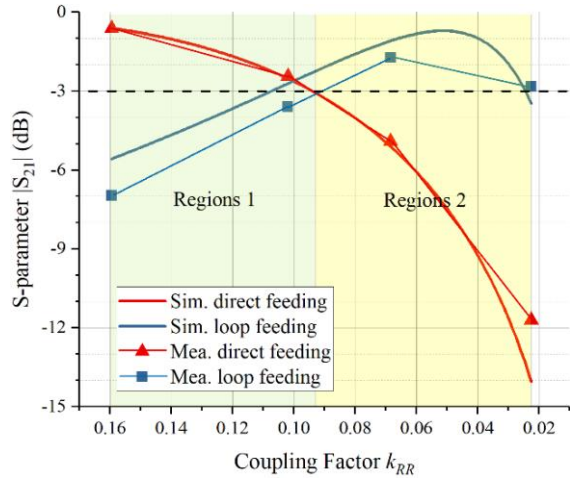


그림 7. 6.78MHz에서 결합계수 k_{RR} 변화에 따른 직접급전방식 시스템의 전송계수 $|S_{21}|$.
Fig. 7 Transmission coefficient $|S_{21}|$ by direct feeding with the change of coupling coefficient k_{RR} at 6.78MHz

그림 7은 결합계수 k_{RR} 의 변화에 따른 전달 특성을 보여준다. 직접급전 방식은 송신 및 수신 두 개의 코일이 큰 결합계수를 갖는 경우에 전달 특성이 좋다. 시뮬레이션에 의하면 결합계수 크기가 0.09 보다 크면 전달특성이 -3dB 이상이 되며(영역 1) 그 이하에서는 -3dB 이하로 급격히 감소한다(영역 2). 결합계수 0.09는 두 코일간 수직 거리가 30mm일 때 송신 코일과 수신 코일이 50% 부정합상태비율에 해당하며, 전달 계수는 -3dB를 갖는다. 수직거리 40mm에서는 전달계수 -3dB를 유지하기 위해서 거의 완벽한 정렬 상태를 유지하여야 한다. 직접급전방식에서는 강한 결합의 경우 공진주파수분할(resonant frequency split) 발생하지 않아 전송특성이 양호함을 알 수 있다. 결합계수가 약 0.09 이하일 경우에는 직접급전방식에 의해서는 -3dB 이하의 전송효율을 나타내므로 루프급전이나 중계코일 등을 이용하여 전송특성의 개선을 추구하여야 한다.

IV. 결 론

본 연구는 드론 장착 배터리의 무선충전을 위한 수신기용 코일과 같이 송신코일과 상대적으로 수직, 수평으로 거리 변화가 있고 또한 송수신 코일이 중심축이 일치되지 않는 부정렬 현상이

발생하는 경우에 적용하기 위한 무선전력전송 시스템을 설계하였다. 송수신 코일은 직접급전 방식을 사용하였으며 송수신 코일간 거리 및 코일간 부정렬상태비율의 변화로 계산하고 공진 주파수를 등가회로 해석으로 계산하였다. 설계된 시스템은 송수신 코일간 수직거리 30mm, 최대 50% 부정렬면적비율에서 -3dB 이상의 전력전달 특성을 얻을 수 있었으며, 결합계수 k_{RR} 가 0.159 일때 전달계수 $|S_{21}|$ 이 -0.62dB, k_{RR} 가 0.02일 때 $|S_{21}|$ 이 -11.62dB로 급감하였다.

본 연구를 통하여 송수신 코일간 거리 변화, 송수신 코일간 부정렬면적 비율 변화에 따라 전력전달 특성을 구할 수 있었으며 필요한 적용환경에 맞추어 송수신 코일 거리 및 정렬정확도 등의 사양 설정이 가능하게 된다. 향후 루프급전방식의 경우에 대하여 송수신코일간 거리 및 정렬정확도에 따른 전송특성을 비교 연구할 계획이다.

Acknowledgment

이 연구는 인천대학교 자체과제(2020-0302)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 coupled 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] S. Aldhaher, P. D. Mitcheson, J. M. Arteaga, G. Kkelis and D. C. Yates, "Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones," 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, pp. 336-340, 2017.

[4] Thuan Nguyen, V. Hyon Kang, S. and Won Jung, C, "Efficiency optimization of WPT system with a planar receiver for mobile applications," *Microwave Optical Technology Letter*, Vol. 58, pp.1817-1819, 2016.

[5] Hoon Hee L, Hyon Kang, S. and Won Jung, C. "MR-WPT with reconfigurable resonator and ground for laptop application," *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, Vol. 28, No. 3, pp. 269-271, 2018..

[6] Y. Park, J. Kim and K. H. Kim, *Wireless Power Transfer-Principles and Engineering Explorations*, 1st ed. Croatia:InTech, 2012.

[7] P. Vizmuller, *RF Design Guide*, London:Artech House, pp. 218-219, 1995.

[8] 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.

[9] I. Awai. "Design theory of wireless power transfer system based on magnetically coupled resonators," in 2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems. Honolulu, HI, pp. 1-4, 2010.

[10] 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.

[11] X. Y. Zhang, C. Xue and J. Lin, "Distance-insensitive wireless power transfer using mixed electric and magnetic coupling for frequency splitting suppression," *IEEE Trans Microwave Theory Technology*, Vol. 65, No. 11, pp.4307-4316, 2017.

[12] W. Zhou, S. Sandeep, P. Wu, P. Yang, W. Yu and S. Y. Huang, "A wideband strongly coupled magnetic resonance wireless power transfer system and its circuit analysis," *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, Vol. 28, No. 12, pp. 1152-1154, 2018.

[13] F. Liu, Y. Yang, D. Jiang, X. Ruan and X. Chen, "Modeling and optimization of magnetically coupled resonant wireless power transfer system with varying spatial scales," *IEEE Transaction Power Electronics*, Vol. 32, No.4, pp. 3240-3250, 2017.

[14] Y. H. Sohn, B. H. Choi, E. S. Lee, G. C. Lim, G. Cho and C. T. Rim, "General unified analyses of two-capacitor inductive power transfer systems: equivalence of current-source SS and SP compensations," *IEEE Transaction Power Electronics*, Vol. 30, No. 11, pp. 6030-6045, 2015.

박 대 길 (Dae Kil Park)



2014년 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
2019년 : 인천대학교 전자공학과 (공학박사)
2020년 : 한국기계전기전자시험연구원
※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선전력전송, 무선통신시스템 등

김 영 현 (Young Hyun Kim)



1994년 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 ~ 2000년 : 대우고등기술연구원
2011년 ~ 현재 : (주)비앤알테크놀로지 대표
2019년 : 인천대학교 전자공학과 (공학박사)
※관심분야 : RF 회로 및 모듈설계, 무선전력전송, 무선 통신시스템 등

구 경 현 (Kyung Heon Koo)



1981년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1998년 ~ 현재 : 한국향행학회 연구회 위원장, 상임이사, 학회장
1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : RF 회로 및 모듈, 무선통신 시스템, 차세대 향행시스템 등

1983년 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1999년 ~ 2000년 : UC San Diego 방문학자