

자기 공진형 무선전력전송 시스템의 효율 향상을 위한 변압기 적용 시스템 모델 분석

(Analysis of the Magnetic Resonance Wireless Power Transmission System with Transformer
for Improving the System Transmission Efficiency)

황종홍* · 이창진* · 고광철†

(Jong-Hong Hwang · Chang-Jin Lee · Kwang-Cheol Ko)

Abstract

As the mobile devices develop, the contact type wireless power transmission technologies face its limitation, and there are demands for convenient charging systems. Under the demands, non-contacting wireless power transmission system has been studied using magnetic resonance. Magnetic resonance type system uses four coils to transmit electrical power further. However, the 4-coil system has disadvantages in its size of transmission/receiving coils and difficulties in impedance matching. To improve the 4-coil system, 2-coil wireless power transmission system with transformers is proposed and analyzed. The existence of the transformers at the transmission part and the receiving part make the impedance matching between the system and the load comfortably and make the 2-coil system transmit power further. Circuit simulation is used to analyze the power transmission coefficient of the proposed 2-coil system with the 4-coil system. It can be seen through the simulation that the 2-coil wireless power transmission system with the transformers has analogous power transmission coefficient to that of the 4-coil wireless power transmission system. As a result, the wireless power transmission system can be made into a smaller size by using transformers in the 2-coil wireless power transmission system.

Key Words : Wireless Power Transfer, Magnetic Resonance Modeling, Inductive link, Q-factor

1. 서 론

현재 무선전력전송의 시장은 해마다 다양한 제품들을 출시하며 그 규모가 꾸준히 증가하고 있다. 특히 각종 조명기기, 전기자동차 그리고 휴대용 기기에서 강점을 가지며, 이와 관련된 많은 어플리케이션 제품에 사용하고 있다[1-2]. 이와 같이 무선전력전송은

† Corresponding Author : Professor, Dept. of
Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
* Dept. of Electrical Eng., Hanyang Univ., Korea
Tel : 02-2220-0348, Fax : 02-2220-1886
E-mail : kwang@hanyang.ac.kr
Received : 2018. 9. 2. / Revised : 2018. 10. 15.
Accepted : 2018. 12. 10.

실생활에 자리 잡고 있지만, 대부분의 기기가 접촉식 무선전력전송을 이용하고 있다. 접촉식 무선전력전송은 정확한 위치에 수신부가 위치해야 하므로 공간이 제약되는 단점을 가지고 있다. 따라서 편리한 무선전력전송을 위해 비 접촉식 무선전력전송 연구가 많이 진행되고 있다[3].

비 접촉식 무선전력전송은 자기 공진 방식으로 2-코일, 3-코일, 4-코일의 방식이 있으며, 긴 전송거리를 위해 더 많은 코일을 사용하기도 한다[4].

2-코일 방식은 가장 기본적인 방식으로 시스템의 해석과 구성이 쉬운 장점이 있지만, 전원부와 부하부의 임피던스에 의하여 그 특성이 정해지며 전송거리가 짧다. 이러한 단점으로 4-코일 방식이 자기 공진 방식의 대표적인 형태가 되어가고 있다. 4-코일 방식은 각각 Source coil, T_x coil, R_x coil, Load coil로 구성되어 있다[5-6]. Source coil과 Load coil은 각각 연결된 전원 저항과 부하 저항에 의해 높은 임피던스를 가지게 되어 낮은 Q-factor를 나타내지만, 실질적으로 에너지를 전송하는 T_x coil과 R_x coil은 코일의 작은 내부저항만 가지고 있으므로 높은 Q-factor가 나타난다. 임피던스가 낮을수록 Q-factor는 증가하고 Q-factor가 높을수록 전송거리가 증가하기 때문에, 4개의 코일은 Q-factor를 높이기 위해 코일 인덕턴스를 상쇄하기 위한 커패시터를 직렬로 연결하는 구조를 가지고 있다. 따라서 높은 Q-factor를 사용하여 2-코일에 비해 더 긴 전송거리를 확보함으로써 비 접촉식 무선전력전송에 사용되고 있다. 하지만 4개의 코일을 사용해야 하므로 임피던스 매칭의 어려움과 전송 거리에 비해 부피가 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 소형화를 위해 4개의 코일을 사용하였던 방식에서 두 개의 코일과 두 개의 변압기를 사용하는 2-코일 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 변압기의 권선비를 이용하여 송신부와 T_x coil 그리고 R_x coil과 수신부를 매칭함으로써 기존의 방식에 비해 손쉬운 매칭을 할 수 있게 되었다. 그리고 이를 통하여 T_x coil과 R_x coil은 높은 Q-factor를 사용하여 전송거리를 확보하고, Source coil과 Load coil은 변압기로 대체함으로써 4개의 코일을 2개의 코일로 사용

하여 소형화가 가능할 것으로 판단된다.

제안한 시스템의 특성을 확인하기 위해 전력전자분야에 사용되는 회로 시뮬레이터를 사용하여 기존의 4-코일 방식의 무선전력전송 시스템과 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템을 모델링을 하였다 [7]. 결합계수의 변동에 따라 부하에 인가되는 전압을 토대로 산란 매개 변수(Scattering parameter)인 S_{21} 를 계산하였으며, 이를 토대로 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템이 4-코일 무선전력전송 시스템보다 높은 전력전달계수를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 변압기를 적용한 2-코일 방식을 사용하면 전력전송효율의 증가와 소형화가 가능하기 때문에 무선전력전송 장치의 편의성을 더욱 증진할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 자기 공진형 무선전력전송의 개요

4-코일 무선전력전송 시스템은 네 개의 코일을 사용하는 무선전력전송 방식으로 동일한 주파수로 T_x coil과 R_x coil을 공진 시키는 전력전송 방법이다. 그림 1에서는 자기 공진형 무선전력전송의 등가회로를 보이고 있다. 송신부는 Source coil과 T_x coil로 이루어져 있고, 수신부는 R_x coil과 Load coil로 이루어져 있다. Source coil과 Load coil은 각각 인덕턴스 L_1, L_4 로 구성되어 있으며, 전원과 부하의 임피던스 매칭을 위해 커패시터 C_1, C_4 가 직렬로 연결되어 있다. 그리

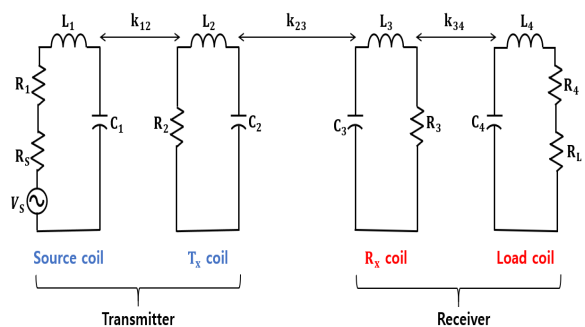


Fig. 1. Equivalent circuit of 4-coil magnetic resonance wireless power transmission system

고 전원 저항과 부하 저항 R_s, R_L 과 코일의 내부저항인 R_1, R_4 이 연결되어 있다.

다음으로 T_x coil과 R_x coil은 각각 L_2 와 C_2 그리고 R_x coil은 L_3 와 C_3 로 구성되어 있으며, 두 코일은 같은 주파수로 공진이 되도록 설계되어 있다. 그리고 코일의 내부 저항인 R_2, R_3 이 연결되어 있다.

T_x coil과 R_x coil의 공진 주파수는 식 (1)과 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_n C_n}} \quad (1)$$

그림 1의 회로에서 n번째 코일에 흐르는 전류를 I_n 그리고 입력 전압을 V_s 라고 정하고, 테브난 등가회로로 표현하면 식 (2)와 같은 행렬식으로 나타난다.

$$\begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{12} & 0 & 0 \\ j\omega M_{12} & Z_2 & -j\omega M_{23} & 0 \\ 0 & -j\omega M_{23} & Z_3 & j\omega M_{34} \\ 0 & 0 & j\omega M_{34} & Z_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위의 식에서 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 는 각 코일의 임피던스를 나타내며, 이는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Z_1 = R_s + R_1 + j\omega L_1 - j/\omega C_1 \quad (3)$$

$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 - j/\omega C_2$$

$$Z_3 = R_3 + j\omega L_3 - j/\omega C_3$$

$$Z_4 = R_L + R_4 + j\omega L_4 - j/\omega C_4$$

또한 M_{12}, M_{23}, M_{34} 는 각 코일과 코일 사이의 상호 인덕턴스이며, 식 (4)로 표현된다.

$$M_{nm} = k_{nm} \sqrt{L_n L_m} \quad (4)$$

서로 인접하지 않은 코일의 상호 인덕턴스 M_{13}, M_{14}, M_{24} 가 존재하지만, 전력전송효율에 미치는 영향이 매우 미미하여 무시하였다[8].

시스템의 전달특성 확인을 위하여 산란 매개 변수인 S_{21} 을 사용하였고, 이는 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (2)로 부터 입력전압과 부하전압의 비인 전달

함수로 유도할 수 있다[9].

$$S_{21} = 2 \left| \frac{V_L}{V_s} \right| \sqrt{\frac{R_s}{R_L}} \quad (5)$$

식 (5)의 제곱을 통해 부하에 전달되는 전력과 전압원의 최대 전력비(Power gain)를 나타내는 $|S_{21}|^2$ 을 얻을 수 있으며, 이는 시스템의 효율을 확인할 수 있는 수치로 사용된다.

자기 공진 코일의 Q-factor는 공진 주파수에서 자기장이 효율적으로 발생하는 것에 대한 지표로 공진 주파수에서 얼마만큼 에너지가 집중되어 있는지 나타낸다. 따라서 공진이 일어나는 송수신 코일 사이의 거리가 멀어져 결합계수가 감소하더라도, Q-factor를 증가시키면 전송거리를 확보할 수 있다. 하지만 Q-factor가 높아지는 만큼 결합계수에 대해 민감하게 작용하게 되므로, 전달되는 에너지의 양이 급변하게 된다. Q-factor의 값은 식 (6)을 통하여 구할 수 있다.

$$Q_n = \frac{\omega_n L_n}{R_n}, \quad \omega_n = \frac{1}{\sqrt{L_n C_n}} \quad (6)$$

4-코일 자기 공진형 무선전력전송은 중계코일인 T_x coil과 R_x coil의 낮은 내부 저항으로 높은 Q-factor를 가지고 있기 때문에, 2-코일을 사용한 무선전력전송 보다 상대적으로 더 먼 거리에 에너지를 전달할 수 있다.

$$k_{critical} = \sqrt{k_{12}^2 Q_1 + \frac{1}{Q_2}} \sqrt{k_{34}^2 Q_4 + \frac{1}{Q_3}} \quad (7)$$

$$|S_{21}| = \sqrt{\frac{k_{21}^2 Q_1 Q_2}{k_{21}^2 Q_1 Q_2 + 1}} \sqrt{\frac{k_{34}^2 Q_3 Q_4}{k_{34}^2 Q_3 Q_4 + 1}} \quad (8)$$

자기 공진 무선 전력 전송 시스템은 주파수 분할 현상(Frequency splitting)으로 인하여 과결합(Overcouple)과 미결합(Undercouple)상태가 나타난다. 과결합 상태에서는 코일의 거리에 무관하게 전력 전송이 진행되고 미결합 상태에서는 전송거리가 멀어짐에 따라서 빠르게 전송 효율이 감소한다. 따라서 목

적에 맞는 임계 결합점($k_{critical}$)의 설정이 필요하며 식 (7)으로 구할 수 있으며, $k_{critical}$ 에서의 S_{21} 의 값은 식 (8)을 사용하여 구할 수 있다[10].

3. 변압기를 적용한 2-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템

4-코일 무선전력전송 시스템은 높은 Q-factor를 사용하여 전송거리를 확보를 하지만 임피던스 매칭의 어려움과 전송거리에 비해 부피가 크다는 단점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서 기존의 4-코일 무선전력전송 시스템에서 Source coil과 Load coil 대신에 변압기를 적용한 새로운 2-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템 회로는 그림 2와 같다. 변압기의 특성을 이용하여 4-코일 무선전력전송에서 Source coil과 Load coil을 변압기로 대체하고, 각각 T_x coil과 R_x coil에 연결하였다.

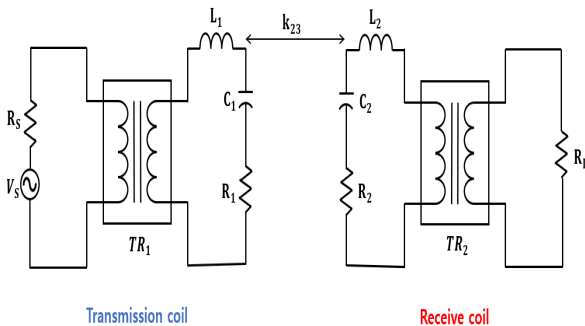


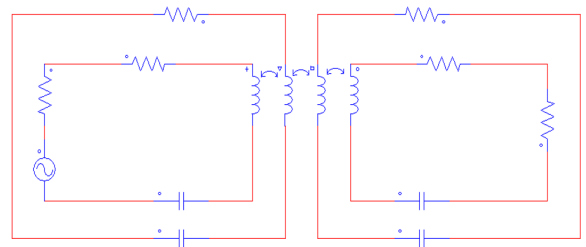
Fig. 2. Equivalent circuit of 2-coil magnetic resonance wireless power transmission system applying transformer

임피던스 매칭을 위해 각각의 코일의 임피던스, 그리고 T_x coil과 R_x coil 사이의 상호 인덕턴스를 고려하여 임피던스를 계산하였으며, 이를 토대로 변압기의 권선비를 사용하여 매칭을 하였다. 따라서 높은 Q-factor가진 T_x coil과 R_x coil이 만들어지며, 이는 4-코일 무선전력전송 T_x coil과 R_x coil의 역할을 하게 된다.

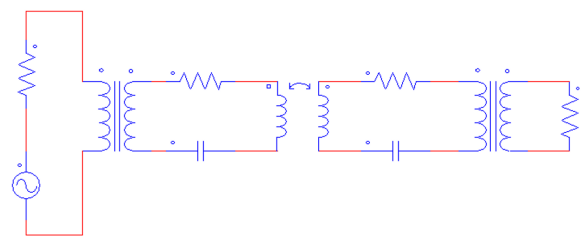
4. 무선전력전송 회로 모델

4.1 무선전력전송 회로 모델의 구성

본 논문에서는 회로 시뮬레이터를 사용하여 그림 3과 같이 4-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템과 변압기를 적용한 2-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템을 모델링하였다. 4-코일을 사용한 무선전력전송 시스템은 Coupled inductor(4 branches) 소자를 이용하여 4개의 인덕터로 구성하였으며, 4개의 커패시터와 각 인덕터의 내부 저항 4개와 전원 저항과 부하 저항을 직렬 연결하였다.



(a) circuit of 4-coil magnetic resonance wireless power transmission system



(b) circuit of 2-coil magnetic resonance wireless power transmission system applying transformer

Fig. 3. Modeling circuit of each wireless power transmission system

변압기를 적용한 2-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템은 Coupled inductor (2 branches) 소자를 이용하여 2개의 인덕터로 구성하였으며, 2개의 커패시터와 각 인덕터의 내부 저항 2개와 전원 저항과 부하 저항을 직렬 연결하였다.

Ideal transformer 소자를 사용하여 변압기를 구성하였으며, 변압기의 권선비는 전원 저항, T_x coil과

R_x coil, 그리고 T_x coil과 R_x coil의 사이의 상호 인덕턴스를 고려하여 계산하였다. 결합계수를 0에서 0.5까지 0.01씩 변경 시키면서 전원 전압과 부하에 인가된 전압을 시뮬레이션하여 $|S_{21}|$ 을 계산하였다. 비교를 위해 T_x coil과 R_x coil의 인덕턴스 및 두 코일 사이의 상호 인덕턴스는 동일한 값을 두 시스템에 적용하였다.

Table 1. Value of circuit elements used in 4-coil magnetic resonance wireless power transmission system

구분	Source coil	T_x coil	R_x coil	Load coil
L[μ H]	75	343	343	75
C[nF]	93.82	20.51	20.51	93.82
R[Ω]	0.25	1	1	0.25

Table 2. Value of circuit elements and turn-ratio used in 2-coil magnetic resonance wireless power transmission system applying transformer

구분	T_x coil	R_x coil
L[μ H]	343	343
C[nF]	20.51	20.51
R[Ω]	1	1
Turn-ratio	0.386	2.593

4-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 시뮬레이션에 사용된 설계사항은 표 1 같으며, 변압기를 사용한 2-코일 무선전력전송시스템의 소자의 값과 이상적인 변압기의 권수비는 표 2에 명시하였다. 그리고 시뮬레이션에 사용한 전원 주파수는 60kHz를 사용하였다.

4.2 무선전력전송 회로 모델의 결과

그림 4를 통하여 4-코일 무선전력전송과 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템의 $|S_{21}|$ 의 그래프를 볼 수 있다. 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템도 4-코일 자기 공진형 무선 전력 전송의 특징

인 미결합 영역과 과결합 영역이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 임계 결합계수 0.06을 기준으로 양쪽 영역에 형성되는 것을 확인할 수 있다. 변압기를 적용한 시스템의 $|S_{21}|$ 의 값은 0.879이며, 4-코일의 시스템의 $|S_{21}|$ 의 값인 0.863 보다 약간 높은 것으로 나타났다.

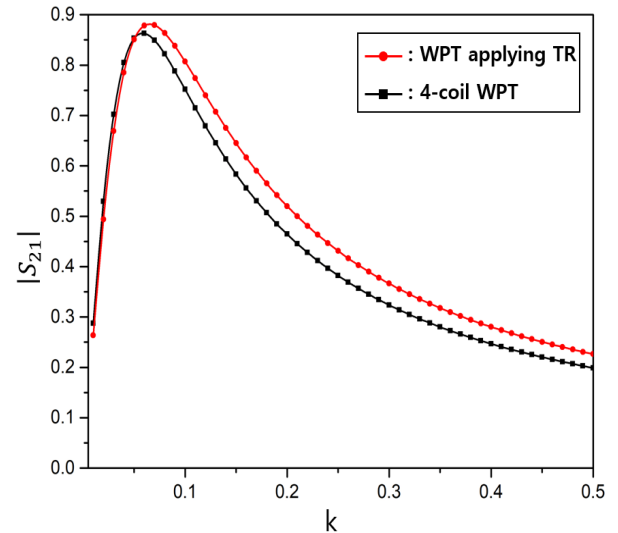


Fig. 4. $|S_{21}|$ graph of 4-coil Wireless Power Transfer system and 2-coil Wireless Power Transfer system applying transformer

또한 과결합 영역에서도 고르게 높은 분포를 보이고 있으나 미결합 영역에서는 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 따라서 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송시스템의 가능성을 나타내고 있다.

5. 결론 및 고찰

본 논문에서 무선전력전송 시스템의 소형화를 위하여 변압기를 적용한 2-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템은 기존의 4-코일 자기 공진형 무선전력 시스템의 Source coil과 Load coil를 변압기로 대체하였으며, 전원부와 T_x coil 그리고 R_x coil 부하부를 연결하고 변압기의 권선비를 이용하여 임피던스 매칭을 하였다. 이를 통하여 T_x coil과 R_x coil의 Q-factor를 높은 상태로 유지하면서 2개의 코일을 사용하여 무선전력전송 시스템을 구축할

수 있다. 그리고 이 시스템의 특성 확인을 위해 기존의 4-코일 무선전력전송 시스템과 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템의 모델링을 회로 시뮬레이터를 사용하여 비교하였다. 그 결과 변압기를 적용한 2-코일 시스템의 $|S_{21}|$ 이 더 높게 나타났으며, 자기 공진형 무선전력전송의 특징인 주파수 분할 현상(Frequency splitting)을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 4-코일 자기 공진형 무선전력전송 시스템을 대체하여 변압기를 적용한 2-코일 무선전력전송 시스템으로 소형화 및 임피던스 매칭의 편리성을 가지고 있다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 이상적인 변압기를 사용하였지만, 전력전자의 회로 분리 소자를 사용한 자기 공진형 무선전력전송 시스템의 연구를 통하여 시스템의 소형화에 한 걸음 더 다가갈 것으로 판단된다.

References

[1] Seong-Min Kim, In-Kui Cho and Hyun-Chul Choi, "Design and Implementation of a 100W Receiver for Wireless Power Transfer Using Coupled Magnetic Resonance," The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 27, No. 1, pp. 84~87, Jan, 2016.

[2] Young-Sang Song, Woon-Ki Han, Jin-Soo Jung, Hyun-Sung Lim and Sung-Koo Cho, "A Study on Installation of Monitoring System of Wireless Power Transmission System," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 29, No. 4, pp. 47~53, Apr, 2015.

[3] C.-J. Chen, T.-H. Chu, C.-L. Lin et al., "A study of loosely coupled coils for wireless power transfer", IEEE Trans. Circuits Syst. II: Express Briefs, vol. 57, no. 7, pp. 536-540, 2010.

[4] M. Kiani, U. M. Jow and M. Ghovanloo, "Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission," in IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, vol. 5, no. 6, pp. 579-591, Dec. 2011.

[5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, Vol.317, No.6, pp.83-86 July, 2007.

[6] Jeong-Heum Park, "A Study on the Efficiency of LED Lighting Applied by Direct AC Power Using Magnetic Resonance Wireless Power Transfer System," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.27, No.10, pp.15-20, 2013.

[7] Jong-Hong Hwang, Chang-Jin Lee and Kwang-Cheol Ko, "Circuit Modeling and Comparative Experiments of 60KHz Magnetic Resonant Wireless Power Transmission System,"

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 31, No. 8, pp. 79-83, 2017.

- [8] 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 Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 2, pp. 544-554, 2011.
- [9] O. Wing, Classical Circuit Theory, Springer, pp. 131-162, 2008.
- [10] Gunbok Lee and Wee Sang 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, 2013.

Biography



Jong-Hong Hwang

He received the B.S. degree in the department of nuclear engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1988, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2015, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the department of electrical Engineering. In 2015, he joined the HDC, Hyundai Development Company, where he is currently a electrical team manager.



Chang-Jin Lee

He received the B.S. degree in the department of electrophysics from Hallym University, ChunCheon, Korea, in 2015, and the M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea, in 2017, where he is currently pursuing the Ph.D degree with the Department of Electrical Engineering.



Kwang-Cheol Ko

He received the B.S. degree in electrical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea, in 1982, and the M.S. and Ph.D. degrees from Tokyo Institute of Technology (TITech), Tokyo, Japan, in 1986 and 1989, respectively. From 1990 to 1995, he has been an assistant professor at the department of electrical engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, Korea. In 1995, he joined the faculty in the department of electrical engineering, Hanyang University, where he is currently a Professor. His research interests include pulsed power technologies and their applications.