

3-코일과 4-코일 기반의 무선 전력 전송 사이의 성능 비교

이 기 송*, 최 현 호^o

Performance Comparison between Three-Coil and Four-Coil Based Wireless Power Transfer

Kisong Lee*, Hyun-Ho Choi^o

요 약

본 논문에서는 등가 회로 모델을 이용하여 3-코일과 4-코일 기반의 무선 전력 전송 시스템을 수학적으로 모델링하고 각 시스템의 전력 전송 효율을 도출하였다. 나선 형태의 유도 코일 및 공진 코일을 제작하고, 다양한 환경에서 벡터 네트워크 분석기를 이용한 효율 측정을 통해 분석의 정확성을 검증하였다. 또한, 두 시스템의 성능 비교를 통해 각각의 시스템이 더 좋은 성능을 보이는 조건이 존재함을 확인하였으며, 이를 통해 추가적인 공진 코일의 효과적인 사용법을 제시하였다. 예를 들어 공진 코일 사이의 거리가 멀거나 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리가 짧을수록 4-코일 기반의 시스템이 더 높은 성능을 보이며, 반대의 경우에는 3-코일 기반의 시스템이 더 높은 성능을 보인다.

Key Words : Wireless power transfer, Magnetic resonance, Efficiency, Equivalent circuit model, Performance comparison

ABSTRACT

In this paper, we formulate three-coil and four-coil wireless power transfer systems mathematically using an equivalent circuit model, and derive a power transfer efficiency for each system. We fabricate inductive and resonant coils with spiral shape, and verify the accuracy of our analysis via efficiency measurements using a vector network analyzer under a variety of environments. Through the comparison of the performance of the two systems, we also confirm that there is a condition where each system shows better performance, which provides the effective use for the additional resonant coil. For example, the four-coil system achieves higher power transfer efficiency than the three-coil system if the distance between resonant coils is longer or the distance between inductive and resonant coils is shorter. Otherwise, the three-coil system outperforms the four-coil system.

※ 이 성과는 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B6003297).

• First Author : Dongguk University, Department of Information and Communication Engineering, kisonglee@dongguk.edu, 정희원

o Corresponding Author : Hankyong National University, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 202007-166-A-RN, Received July 26, 2020; Revised August 25, 2020; Accepted August 31, 2020

I. 서론

디바이스의 충전을 위한 전원선을 영구적으로 없앨 수 있다는 장점으로 인해 무선 전력 전송 (Wireless Power Transfer, WPT) 기술은 전기차, 의료장비, 휴대용 기기 등 다양한 분야에 적용되고 있다^[1]. 2007년 MIT 연구진이 자기 공진(Magnetic resonance)을 이용하여 2m의 거리에서 60 Watt의 전력을 전송하여 전구를 켤 수 있음을 보인 이후로, 자기 공진을 이용한 WPT 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[2]-[9]}. 특히 송신 코일과 수신 코일 사이에 추가적인 공진 코일을 등간격으로 배치함으로써 전력 전달 거리 및 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있음을 보였다^[3-5]. 뿐만 아니라 최근에는 3-코일 (Three-Coil, 3C) 시스템에서 중앙에 위치한 공진 코일을 송신 코일이나 수신 코일 중 한 곳으로 가깝게 배치하는 것이 효율에 미치는 영향을 분석하였다^[6-7]. MIT의 연구 결과^[2]에서 영감을 받아, 작은 크기의 유도 송수신 코일 근처에 높은 품질 계수(Quality factor)를 갖는 공진 코일을 배치하는 4-코일 (Four-Coil, 4C) 시스템에 대한 연구도 활발하다^{[8][9]}. [8]에서는 4C 시스템에서의 주파수 스플리팅 (Frequency splitting) 현상을 분석하고, 이를 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. [9]에서는 4C 시스템의 성능을 향상시키기 위한 최적의 소스 저항, 부하 저항, 유도 결합 계수 (Coupling coefficient) 등을 도출하였다. 추가적인 공진 코일의 사용은 WPT 성능을 향상시킬 수도 있지만, 동시에 상당한 경제적 비용을 발생시킨다. 그러므로 이에 대한 효율적인 사용 방안에 대한 제시가 필요하다.

본 논문에서는 3C와 4C 시스템의 성능 비교를 통해 추가적인 공진 코일의 효과적인 사용을 위한 지침을 제시하고자 한다. 먼저 등가 회로 모델(Equivalent circuit model)을 이용하여 각각의 시스템을 수학적으로 모델링하고, 이를 기반으로 전력 전송 효율(Power transfer efficiency)을 도출하였다. 유도 코일과 공진 코일을 제작하고, 다양한 환경에서 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA)를 이용한 성능 측정을 통해 분석 결과의 정확성을 검증하였다. 또한, 두 시스템 사이의 성능 비교를 통해 각각의 시스템이 더 우수한 성능을 보이는 조건이 존재함을 확인하였으며, 해당 조건에 따라 두 시스템을 적응적으로 사용하는 것이 WPT 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

II. 3-코일 시스템

그림 1은 유도 송신 코일 (Inductive Transmitter, Tx), 공진 수신 코일 (Resonant Receiver, Rx), Tx 근처에 배치한 중앙의 공진 코일(Intermediate Resonant Coil, i-RC)로 이루어진 3C 시스템의 공진기 모델을 보여준다. 각 코일의 외부 반경, 턴 수, 턴 사이의 간격은 각각 α_i , τ_i , ρ_i 로 표시된다. 여기서 아래첨자 $i \in \{t, 1, r\}$ 이며, t는 Tx, 1은 i-RC, r는 Rx를 의미한다. 그림 2는 3C 시스템의 등가회로 모델을 보여준다. Tx는 전원 공급을 위한 전압 V_s 가 연결되어 있으며, Rx에는 전력을 소비하는 부하 저항 R_L 이 연결되어 있다. 각각의 코일은 내부 저항 r_i 과 자기 인덕턴스 L_i 를 가지고 있다. 일반적으로 유도 코일은 공진 코일에 비해 작은 r_i 와 L_i 값을 갖는다^[8]. 또한, 모든 코일에는 캐패시턴스 C_i 가 연결되어 다음과 같이 동일한 주파수에서 공진을 발생시킨다.

$$\omega_o = 2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}, \quad i \in \{t, 1, r\}. \quad (1)$$

코일 i 와 j 간의 자기 유도 세기는 상호 인덕턴스 M_{ij} 로 표현할 수 있다. Kirchhoff's voltage law (KVL)에 의해 다음과 같은 관계식을 세울 수 있다.

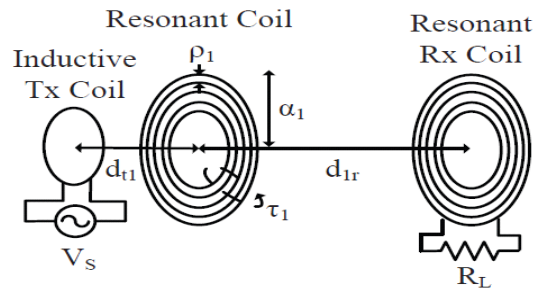


그림 1. 3-코일 시스템의 공진기 모델
Fig. 1. Resonator model of a three-coil system

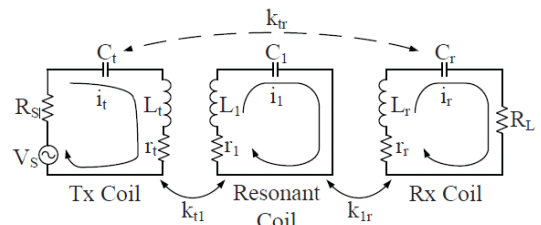


그림 2. 3-코일 시스템의 등가 회로 모델
Fig. 2. Equivalent circuit model of a three-coil system

$$\begin{aligned} V_S &= Z_i i_t + j\omega M_{11} i_1 + j\omega M_{tr} i_r, \\ 0 &= j\omega M_{11} i_t + Z_1 i_1 + j\omega M_{1r} i_r, \\ 0 &= j\omega M_{tr} i_t + j\omega M_{1r} i_1 + Z_r i_r. \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 $Z_i = R_S + r_t + j\omega L_t + 1/j\omega C_t$, $Z_1 = r_1 + j\omega L_1 + 1/j\omega C_1$, $Z_r = R_L + r_r + j\omega L_r + 1/j\omega C_r$ 은 각 코일의 입력 임피던스를 나타낸다. 근접하지 않은 코일 사이의 상호 인덕턴스는 충분히 작다고 가정하면^{[4],[9]}, $M_{tr} \approx 0$, 각 코일의 유도 전류의 크기는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} |i_t| &= \frac{V_S}{Z_i + \frac{\omega^2 M_{11}^2 Z_r}{Z_1 Z_r + \omega^2 M_{1r}^2}}, \\ |i_1| &= \frac{\omega M_{11} Z_r}{Z_1 Z_r + \omega^2 M_{1r}^2} \cdot |i_t|, \\ |i_r| &= \frac{\omega^2 M_{11} M_{1r}}{Z_1 Z_r + \omega^2 M_{1r}^2} \cdot |i_t|. \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)를 이용하여 등가적인 S21 파라미터는 다음과 같이 표현 가능하다^[10].

$$\begin{aligned} S_{21} &= 2 \frac{V_L}{V_S} \sqrt{\frac{R_S}{R_L}} \\ &= \frac{2\omega^2 M_{11} M_{1r} \sqrt{R_S R_L}}{Z_1 Z_r + \omega^2 M_{1r}^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $V_L = |i_r| \cdot R_L$ 은 Rx의 부하저항에 걸린 전압이다. S21 파라미터는 Tx에서 Rx로 전달되는 전압 이득을 나타내므로, S21의 제곱 값은 일반적으로 전력 전달 효율을 보여주는 지표로 사용 한다^[3,8]. 공진 주파수에서는 입력 임피던스의 리액턴스 값이 다음과 같이 0이 되므로, $j\omega L_t + 1/j\omega C_t = 0$, 3C 시스템의 효율은 다음과 같이 표현할 수 있다.

III. 4-코일 시스템

그림 3과 4는 유도 Tx와 유도 Rx 사이에 2개의 i-RC가 존재하는 4C 시스템의 공진기 및 등가회로 모델을 보여준다. 기본적인 파라미터는 3C 시스템과 같으며, 아래첨자 1, 2는 각각 Tx와 Rx 근처의 i-RC를 의미한다.

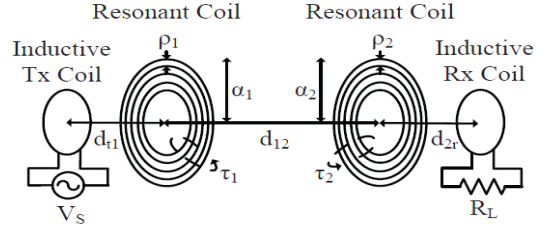


그림 3. 4-코일 시스템의 공진기 모델
Fig. 3. Resonator model of a four-coil system

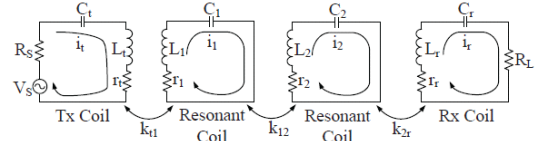


그림 4. 4-코일 시스템의 등가회로 모델
Fig. 4. Equivalent circuit model of a four-coil system

3C 시스템에서처럼 KVL을 이용하면 다음과 같은 관계식을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} V_S &= Z_i i_t + j\omega M_{11} i_1 + j\omega M_{12} i_2 + j\omega M_{tr} i_r, \\ 0 &= j\omega M_{11} i_t + Z_1 i_1 + j\omega M_{12} i_2 + j\omega M_{1r} i_r, \\ 0 &= j\omega M_{12} i_1 + Z_2 i_2 + j\omega M_{2r} i_r, \\ 0 &= j\omega M_{tr} i_t + j\omega M_{1r} i_1 + j\omega M_{2r} i_2 + Z_r i_r. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 $Z_2 = r_2 + j\omega L_2 + 1/j\omega C_2$ 는 Rx 근처 i-RC의 입력 임피던스를 나타낸다. 인접하지 않은 코일 사이의 상호 인덕턴스를 무시하며 $M_{tr} \approx M_{12} \approx M_{1r} \approx 0$, 각 코일의 유도 전류의 크기는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} |i_t| &= \frac{V_S}{Z_i + \frac{\omega^2 M_{11}^2 (Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2)}{Z_1 Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2 Z_1 + \omega^2 M_{12}^2 Z_r}}, \\ |i_1| &= \frac{\omega M_{11} (Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2)}{Z_1 Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2 Z_1 + \omega^2 M_{12}^2 Z_r} \cdot |i_t|, \\ |i_2| &= \frac{\omega^2 M_{11} M_{12} Z_r}{Z_1 Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2 Z_1 + \omega^2 M_{12}^2 Z_r} \cdot |i_t|, \\ |i_r| &= \frac{\omega^3 M_{11} M_{12} M_{2r}}{Z_1 Z_2 Z_r + \omega^2 M_{2r}^2 Z_r} \cdot |i_t|. \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)를 이용하여, 공진 주파수에서 4C 시스템의 효율은 식 (8)와 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_{3C} = |S_{21}|^2 = \frac{4\omega_0^4 M_{11}^2 M_{1r}^2 R_S R_L}{[(R_S + r_t)(R_L + r_r)r_1 + \omega_0^2 M_{1r}^2 (R_S + r_t) + \omega_0^2 M_{11}^2 (R_L + r_r)]^2}. \quad (8)$$

IV. 실험 결과

그림 5는 3C 시스템의 실험 설정 예시를 보여주며, 각 코일은 나선 (spiral) 형태로 제작하였다. 실험에 사용된 유도 코일은 $\alpha_i = 10\text{ cm}$, $\tau_i = 1$, $L_i = 0.71\mu\text{H}$, $C_i = 776\mu\text{F}$, $r_i = 0.2\Omega$ 의 파라미터 값을 갖으며, 공진 코일은 $\alpha_r = 15\text{ cm}$, $\tau_r = 3$, $\rho_r = 0.5\text{ cm}$, $L_r = 7.35\mu\text{H}$, $C_r = 75\mu\text{F}$, $r_r = 1.8\Omega$ 의 파라미터 값을 갖는다. 또한, $V_S = 10\text{ V}$, $R_S = R_L = 50\Omega$, $f_0 = 6.78\text{ MHz}$ 이다. 이러한 실험 환경에서 VNA를 이용하여 S21 파라미터 값을 측정하여 분석 값과 비교하였다. 공진 코일 사이의 거리는 3C 시스템의 경우 i-RC와 Rx 사이의 거리이며, 4C 시스템의 경우 두 i-RC 사이의 거리이다. 반면 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리는 3C 시스템의 경우 Tx와 i-RC 사이의 거리이며, 4C 시스템의 경우 Tx와 첫 번째 i-RC 사이의 거리 및 두 번째 i-RC와 Rx 사이의 거리이다.

그림 6은 공진 코일 사이의 거리(d_{res})에 대한 전력 전송 효율을 보여준다. 본 결과에서 d_{res} 는 3C 시스템의 경우 d_{r1} 이며, 4C 시스템의 경우 d_{r2} 이다. 여기서 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리는 5cm로 고정하였다. 3C와 4C 시스템 각각 $d_{res} = 20\text{ cm}$, $d_{res} = 35\text{ cm}$ 일 때 최대의 효율을 보인다. 이보다 먼 거리에서는 자기 유도의 세기가 약해져 효율이 감소한다. 반면 최적의 d_{res} 보다 짧은 거리에서도 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이론적으로 코일 사이의 거리가 가까워질수록 많은 양의 전력이 전달되지만, 근거리에서 임피던스가 틀어지는 경우에는 전달되는 전력보다 반사되는 전력이 더 많아져 오히려 효율은 떨어지게 되는 현상이 발생하는데, 이를 주파수 스플리팅이라 한다⁸⁾. 즉, 3C와 4C 시스템 모두 주파수 스플리팅으로 인해 근거리에서 오히려 효율이 떨어지게 된다. 또한, $d_{res} < 30\text{ cm}$ 인 구간에서는 3C 시스템의 효율이 더 높고, $d_{res} \geq 30\text{ cm}$ 인 구간에서는 4C 시스템의 효율이 더 높음을 확인할 수 있다.

그림 7은 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리(d_{ir})에 대한 전력 전송 효율을 보여준다. 본 결과에서 d_{ir} 는 3C 시스템의 경우 d_{i1} 이며, 4C 시스템의 경우 d_{i1} 과 d_{i2} 이다. 여기서 공진 코일 사이의 거리는 30cm로

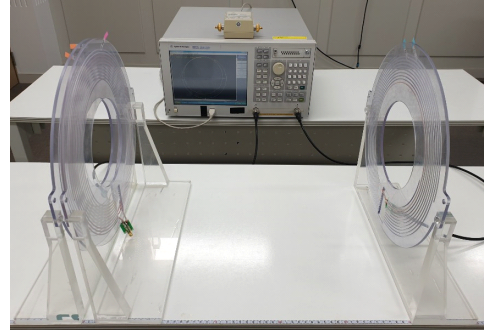


그림 5. 3-코일 시스템의 실험 설정 예시
Fig. 5. Example of experiment setup for a three-coil system

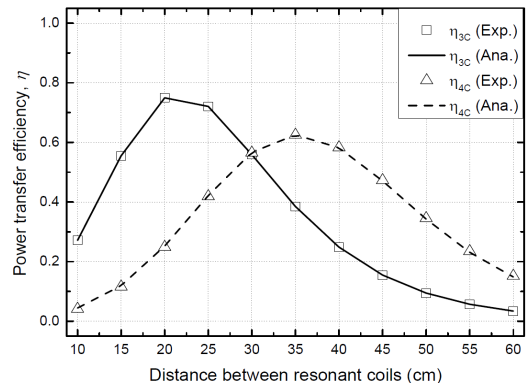


그림 6. 전력 전송 효율 vs. 공진 코일 사이의 거리
Fig. 6. Power transfer efficiency vs. distance between resonant coils

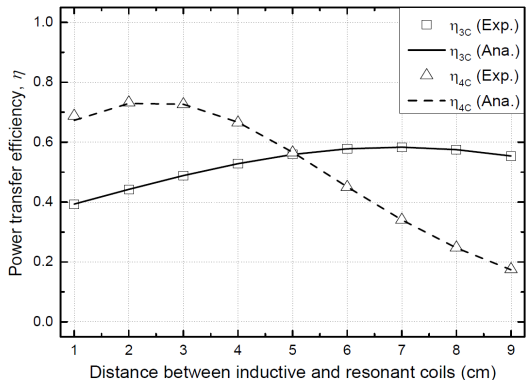


그림 7. 전력 전송 효율 vs. 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리
Fig. 7. Power transfer efficiency vs. distance between inductive and resonant coils

$$\eta_{4c} = |S_{21}|^2 = \frac{4\omega_o^6 M_{11}^2 M_{12}^2 M_{2r}^2 R_S R_L}{[(R_S + r_t)(R_L + r_r)r_1 r_2 + \omega_o^2 M_{2r}^2 (R_S + r_t)r_1 + \omega_o^2 M_{11}^2 (R_L + r_r)r_2 + \omega_o^2 M_{12}^2 (R_S + r_t)(R_L + r_r) + \omega_o^4 M_{11}^2 M_{2r}^2]^2} \quad (8)$$

고정하였다. 3C 시스템의 경우 $d_{ir} = 7\text{cm}$, 4C 시스템의 경우 $d_{ir} = 2\text{cm}$ 의, 두 시스템 모두 최대 효율을 달성하는 최적의 유도 코일과 공진 코일 사이의 거리가 존재함을 확인할 수 있다. 또한, $d_{ir} = 5\text{cm}$ 를 기준으로 그보다 짧은 거리에서는 4C 시스템이, 그보다 먼 거리에서는 3C 시스템이 더 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 6과 7은 각각의 시스템이 더 우수한 성능을 보이는 조건이 존재함을 보여준다. 그러므로 조건에 따라 3C 시스템과 4C 시스템을 적응적으로 사용함으로써 WPT의 효율을 개선할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 두 그림 모두 실험값(Exp.)과 분석값(Ana.)이 잘 일치하는 결과를 보이므로 이를 통해 분석의 정확성도 검증할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 3C와 4C 기반의 WPT 시스템의 성능 비교를 통해 추가적인 공진 코일의 효율적인 사용 방법을 제시하였다. 수학적 모델링을 통해 각 시스템의 전력 전송 효율을 수식적으로 도출하고, 제작한 코일을 이용한 다양한 환경에서의 실험을 통해 분석의 정확성을 검증하였다. 실험 결과는 유도 코일과 공진 코일의 배치에 따라 각 시스템의 성능이 역전될 수 있음을 확인하였다. 그러므로 본 연구 결과는 코일의 배치 조건에 따라 두 시스템을 적응적으로 사용함으로써, 추가적인 공진 코일의 효율적인 활용 여부를 결정할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] S. Y. R. Hui, W. X. Zhong, and C. K. Lee, "A critical review of recent progress in mid-range wireless power transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500-4511, Sep. 2014.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Sci. Express*, vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [3] J. Lee, K. Lee, and D.-H. Cho, "Stability improvement of transmission efficiency based on a relay resonator in a wireless power transfer system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 5, pp. 3297-3300, May 2017.
- [4] J. W. Kim, H. C. Son, K. H. Kim, and Y. J. Park, "Efficiency analysis of magnetic resonance wireless power transfer with intermediate resonant coil," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 389-392, 2011.
- [5] J. Lee and K. Lee, "Optimal number of relays for maximizing the efficiency of wireless power transfer system," *J. KICS*, vol. 44, no. 1, pp. 61-64, Jan. 2019.
- [6] D. Ahn and S. Hong, "A study on magnetic field repeater in wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 1, pp. 360-371, Jan. 2013.
- [7] W. X. Zhong, C. Zhang, X. Liu, and S. Y. R. Hui, "A methodology for making a three-coil wireless power transfer system more energy efficient than a two-coil counterpart for extended transfer distance," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 933-942, Feb. 2015.
- [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, Feb. 2011.
- [9] Y. Zhang, Z. Zhao, and T. Lu, "Quantitative analysis of system efficiency and output power of four-coil resonant wireless power transfer," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 3, no. 1, pp. 184-190, Mar. 2015.
- [10] R. Mongia, *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*, Norwood, MA, USA: Artech House, 2007.

이 기 송 (Kisong Lee)



2013년 8월 : KAIST 전기 및
전자공학과 박사

2013년 9월~2015년 2월 : ETRI
융합기술연구소 연구원

2015년 3월~2017년 8월 : 군산
대학교 정보통신공학과 조
교수

2017년 9월~2020년 2월 : 충북대학교 정보통신공학
부 부교수

2020년 3월~현재 : 동국대학교 정보통신공학과 부교수
<관심분야> 이동통신, 무선전력전송, 차세대 융합통신
[ORCID:0000-0001-8206-4558]

최 현 호 (Hyun-Ho Choi)



2001년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 졸업

2003년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 석사

2007년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과 박사

2007년 3월~2011년 2월 : 삼성
종합기술원 전문연구원

2011년 3월~현재 : 국립한경대학교 ICT로봇기계공학
부 ICT로봇공학전공 교수

<관심분야> 이동통신시스템, 매체접속제어, 분산 네
트워크, 저전력 통신, 무선전력전송, 생체모방 알
고리즘

[ORCID:0000-0002-6785-2596]