

염도에 따른 수중 무선전력전송 시스템 특성 및 등가모델 연구

A Study on Characteristics and Equivalent Circuit Model of Underwater Wireless Power Transfer System by Salinity

이 정 건 · 강 원 실* · 구 현 철**

Jeong-Geon Lee · Wonshil Kang* · Hyunchul Ku**

요 약

본 논문에서는 수중 환경에서 자기공진기반 무선전력전송 특성을 분석하고, 수중 무선전력전송에 적합한 등가모델을 제시한다. 제안하는 수중 무선전력전송 등가모델은 자유공간 무선전력전송 T 등가모델을 확장하여 매질에 따른 전자기장 감쇠를 반영한 저항, 공진주파수 변화 및 상호인덕턴스 변화를 반영한 커패시터 및 인덕터를 포함한다. 전송매질인 물의 염도에 따른 S 파라미터를 기반으로 제안한 등가모델의 변수를 추출하는 방법을 제시하였다. 제안하는 모델을 검증하기 위하여 6.78 MHz 수중 무선전력전송 시스템을 구축하고, 모델의 전력전송효율 계산 값과 측정값을 비교하였으며, 그 결과 제안하는 모델은 평균 3 % 이내 오차로 특성변화를 예측함을 확인하였다.

Abstract

In this study, we analyze the characteristics of wireless power transfer(WPT) based on magnetic resonance in an underwater environment and propose an equivalent model suitable for underwater WPT. The proposed underwater WPT equivalent model is constructed by expanding the free-space WPT T-model reflecting characteristics change according to media. Considering the water salinity, we propose a method to extract the parameters of the proposed model based on the S parameters. To verify the proposed model, a 6.78-MHz underwater WPT system was constructed and compared with the predicted power transfer efficiency of the model. As a result, it was confirmed that the proposed model predicts the variation of characteristics with an average error of less than 3 %.

Key words: Wireless Power Transfer, Underwater, Equivalent Circuit Model, Salinity

I. 서 론

무선전력전송에서 자기공진 방식은 자기유도 방식에 비하여 더 먼 거리를 높은 효율로 전송할 수 있다. 이러한

장점으로 자기공진 무선전력전송은 센서 네트워크, IoT 등 여러 분야에 적용될 수 있다^[1]. 최근 인체 삽입형 의료 기기^[2], 수중 IoT^[3,4] 등 전송매질이 공기 중이 아닌 다른 매질에서 자기공진형 무선전력전송 기술을 적용하고자

†이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구(선도연구센터) 사업입(NRF-2017R1A5A1015596),

‡이 논문은 2018년도 산업통상자원부의 "창의산업융합 특성화 인제 양성사업"의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 N0000717).‡

건국대학교 스마트ICT융합학과(Dept. of Smart ICT Convergence, Konkuk University)

*건국대학교 차세대무선전원센터(Emerging Wireless Power Research Center, Konkuk University)

**건국대학교 전기전자공학부(Electrical and Electronic Engineering, Konkuk University)

· Manuscript received May 24, 2018 ; Revised July 26, 2018 ; Accepted November 6, 2018. (ID No. 20180524-059)

· Corresponding Author: Hyunchul Ku (e-mail: hcku@konkuk.ac.kr)

하는 연구가 진행 중이다.

무선전력전송은 전자기장을 이용하여 전력을 전송하기에 전자기장이 전개되는 전송 매질의 특성인 유전율, 투자율, 전도도 등의 변화에 따라 전력전송 효율이 크게 달라진다. 수중의 염도 증가에 따라 매질의 전도도가 증가하여 전력손실이 증가된다. 또한 유전율의 증가함에 따라 송수신 코일의 공진 주파수가 낮아지므로 전력 전송 효율이 변화된다. 따라서 인체 내 또는 수중 환경에서 무선전력전송을 적용하기 위해 수중환경에서 무선전력전송 특성 분석 및 회로, 시스템 설계를 위한 등가모델 연구가 필요하다.

본 논문에서는 염도의 변화에 따른 특성 변화를 반영할 수 있는 수중 무선전력전송 등가모델 및 모델 변수값을 구하는 방법을 제시하였다. 6.78 MHz 자기공진형 무선전력전송 시스템을 구축하고, 물의 염도 변화에 따른 수중 환경에서 무선전력전송 S 파라미터 및 전력전송효율 특성을 측정하였다. 제안하는 등가모델의 예측값과 측정값을 비교하여 제안하는 모델의 유효성을 검증하였다.

II. 매질의 특성을 반영한 무선전력전송 등가모델

자유공간에서의 직렬공진기로 구성된 자기공진형 무선전력전송 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다^[1].

그림 1의 시스템을 상호인덕턴스를 포함한 T-네트워크를 사용하여 등가모델로 나타내면 그림 2와 같다.

여기서 Z_{01} 은 소스 임피던스, Z_{02} 는 부하 임피던스, C_1, C_2 는 자기공진을 위한 송신부와 수신부의 직렬 커패시턴스, L_1, L_2 는 송신코일과 수신코일의 자기 인덕턴스, R_1, R_2 는 송신코일과 수신코일의 기생저항, M 은 송신코일과 수신코일 사이의 상호인덕턴스를 나타낸다. 노이

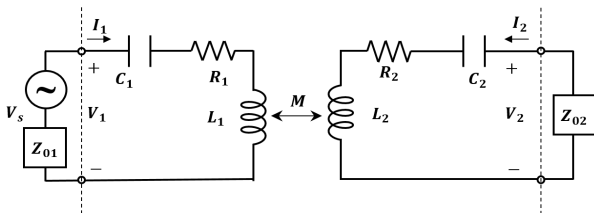


그림 1. 자유공간 자기공진 무선전력전송 시스템
Fig. 1. Magnetic resonance WPT system in free space.

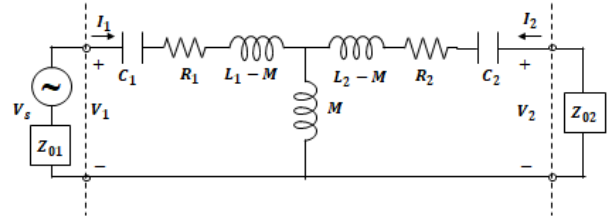


그림 2. 자유공간 자기공진형 무선전력전송 T형 등가모델
Fig. 2. T-type equivalent circuit model of magnetic resonance WPT in free space.

만 공식을 활용하면 상호인덕턴스 M 은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$M = \frac{N_1 N_2 \mu_0}{4\pi} \oint_{P_1} \oint_{P_2} \frac{d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2}{R} \tag{1}$$

μ_0 는 자유공간의 투자율, N_1, N_2 는 송신코일과 수신코일의 권선 수, P_1, P_2 , $d\vec{l}_1, d\vec{l}_2$ 는 송신코일과 수신코일의 폐곡선 경로 및 경로에서의 단위벡터, R 은 송신코일과 수신코일 사이의 거리이다.

그림 1의 무선전력전송 시스템에서 S_{21} 은 다음과 같다.

$$S_{21} = \frac{2Z_{21}\sqrt{Z_{01}Z_{02}}}{(Z_{11} + Z_{01})(Z_{22} + Z_{02}) - Z_{12}Z_{21}} \tag{2}$$

여기서

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1} = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \tag{3}$$

$$Z_{22} = \frac{V_2}{I_2} = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 \tag{4}$$

$$Z_{12} = Z_{21} = j\omega M \tag{5}$$

전력전송효율 η_{21} 은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{21} = |S_{21}|^2 \times 100\% \tag{6}$$

그림 2의 등가모델에서 상호인덕턴스 M 이 0에서 $\sqrt{L_1 L_2}$ 값으로 변할 때의 S_{11} 의 변화를 살펴보면 그림 3과 같다.

그림 3에서 실선 궤적은 2~30 MHz의 주파수에 따른 S_{11} 의 궤적, 마커는 공진주파수인 6.78 MHz에서의 상호

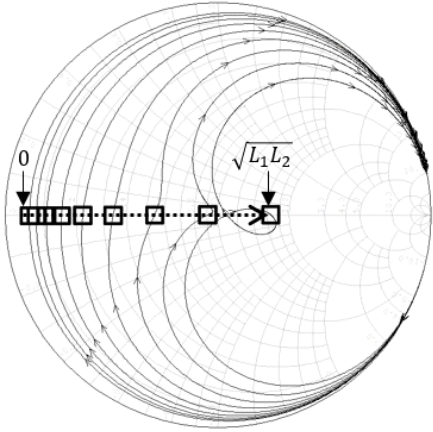


그림 3. 상호인덕턴스에 따른 S₁₁ 모의실험
Fig. 3. Simulation of S₁₁ according to mutual inductance.

인덕턴스 M 의 변화에 따른 S₁₁이다. 공진주파수에서 상호 인덕턴스 M 을 변화하면 S₁₁의 실수부만이 변하며, 전력 전송 효율이 변화한다. 매질이 자유공간이나 공기 중에서는 그림 2와 같은 등가모델로 무선전력전송 시스템을 나타낼 수 있지만, 매질이 물인 경우 기존 등가모델에 한계가 발생한다.

수중에서는 상호인덕턴스 M 이 자유공간과 달라지며, 전도성에 의한 전자기장 감쇠가 일어나 무선전력전송 효율이 저하되고, 공진주파수의 틀어짐이 발생한다. 이런 매질에 따른 변화를 고려하여 그림 4와 같은 등가모델을 제안한다. 그림 4의 수중 무선전력전송 등가모델은 세 개의 T_1, T_2, T_3 영역으로 나누어지는데, 상호인덕턴스 M 으로만 구성되는 자유공간 모델과 달리 매질의 특성을 반영할 수 있도록 구성하였다. T_2 영역은 수중 무선전력전송시 상호인덕턴스의 변화를 반영할 수 있는 L_m , 공진주파수의 변화를 반영할 수 있는 C_m , 무선전력전송 효율

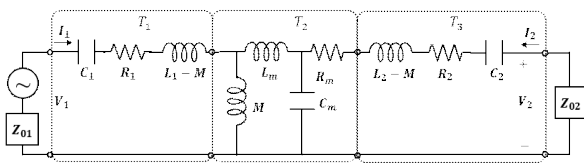


그림 4. 제안하는 수중 무선전력전송 등가모델
Fig. 4. Proposed equivalent circuit model of underwater magnetic resonance WPT.

감소를 반영할 수 있는 R_m 으로 구성된다. 이러한 T_2 영역의 추가를 통해 전송매질이 자유공간이 아닌 수중에서 거리에 따른 무선전력전송 특성 및 효율을 예측할 수 있다. 제안하는 수중무선전력전송 등가모델의 T_n 영역의 ABCD 파라미터를 계산하면 다음과 같다.

$$T_n = \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} \quad n = 1, 2, 3 \quad (7)$$

여기서

$$a_n = 1, \quad c_n = 0, \quad d_n = 1 \quad (n = 1, 3) \quad (8)$$

$$b_n = R_n + jw[L_n - M] - \frac{j}{wC_n} \quad (n = 1, 3) \quad (9)$$

$$a_2 = 1 - w^2 C_m L_m \quad (10)$$

$$b_2 = R_m a_2 + jwL_m \quad (11)$$

$$c_2 = jwC_m \left[\frac{L_m}{M} + 1 \right] - \frac{j}{Mw} \quad (12)$$

$$d_2 = \frac{L_m}{M} + R_m [c_2 - 1] \quad (13)$$

위 식(7)을 활용하여 시스템의 전달함수 $T_{(s)}$ 및 S₁₁, S₂₁을 계산하면 다음과 같다.

$$T_{(s)} = T_1 T_2 T_3 = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$T_{11} = a_1 a_2 + b_1 c_2, \quad T_{21} = c_2 + a_2 c_1 \quad (15)$$

$$T_{12} = a_1 b_2 + b_1 d_2 + b_3 [a_1 a_2 + b_1 c_2] \quad (16)$$

$$T_{22} = d_2 + b_2 c_1 + b_3 [c_2 + a_2 c_1] \quad (17)$$

$$S_{11} = \frac{T_{11} + T_{12}/Z_0 - Z_0 T_{21} - T_{22}}{T_{11} + T_{12}/Z_0 + Z_0 T_{21} + T_{22}} \quad (18)$$

$$S_{21} = \frac{2}{T_{11} + T_{12}/Z_0 + Z_0 T_{21} + T_{22}} \quad (19)$$

제안하는 수중 무선전력전송 등가모델에서 L_m, C_m, R_m 값을 선정하기 위하여 L_m, C_m 값이 코일간의 거리 d 에 대

해 다음과 같이 가정한다.

$$L_m = L_d \times d(m) \tag{20}$$

$$C_m = \frac{C_d}{d(m)} \tag{21}$$

L_d, C_d 는 코일 간의 거리 d 에 따른 L_m, C_m 의 계수이며, 전송매질인 물의 염도에 따라 값이 달라진다. L_m, C_m, R_m 을 도출하기 위하여 측정된 수중 무선전력전송 시스템의 S_{11}, S_{21} 과 식 (18), 식 (19)를 이용하여 계산한 등가모델의 S_{11} 과 S_{21} 을 비교한다. 먼저 S_{11} 의 측정값과 계산값의 오차가 최소가 되는 L_m, C_m 을 선정한다. 이후 S_{21} 의 측정값과 계산값의 오차가 최소가 될 수 있는 R_m 값을 선정하였다. 이렇게 선정한 L_m, C_m, R_m 으로 염도에 따른 L_d, C_d, R_m 값을 선정하였다.

III. 모델 변수 추출 및 검증

제안한 등가모델을 유도하고, 그 타당성을 검토하기 위하여 그림 5와 같이 실험환경을 구성하였다. 벡터 네트워크 분석기(VNA)에 송수신코일과 공진회로를 연결하여 S 파라미터를 측정한다. X-Y plotter에 수신코일을 연결하여 송신코일과 수신코일 사이의 거리 d 를 제어한다. 수중 무선전력전송을 위해 두께가 1 cm인 35 cm×23.5 cm×20 cm의 아크릴 박스에 물을 채우고 송신코일은 외벽에 고정하고, 수신코일은 X-Y plotter에 연결하여 매질 안에 위치시킨다.

그림 6은 제안한 등가모델의 타당성을 검증하기 위한 측정 환경 및 실험사진이다. 측정에 사용한 VNA는 Agilent사의 FieldFox N9923A모델이다. 측정에 사용한 에나멜선으로 제작한 송수신 코일의 파라미터 및 등가모델 파라미터는 표 1과 같다. 송수신 코일간의 간격을 10 mm에서 50 mm까지 5 mm 간격으로 변경하며, S 파라미터를 VNA로 2 MHz에서 30 MHz까지 측정한다. 매질이 공기 중일 때의 S파라미터를 측정 후, 측정값을 기준 값으로 설정하여 식 (1)로 구한 상호인덕턴스와 자유공간에서의 무선전력전송 등가모델을 이용하여 이론값과 실측값의 차이를 확인한다. 이후 매질을 물로 변경하고 소금을 추가하여 특정 염도($Sa[\%]$: 물 1리터당 소금 g)의 물에서 코일의 거리에 따른 S 파라미터를 측정한다. 이렇게 측정된 S 파라미터를 이용하여 제안하는 수중무선전력전송 등가모델의 L_m, C_m, R_m 을 선정한다.

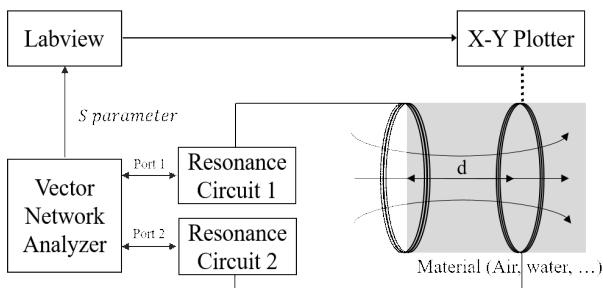


그림 5. 실험 블록 다이어그램
Fig. 5. Block diagram of experiment.

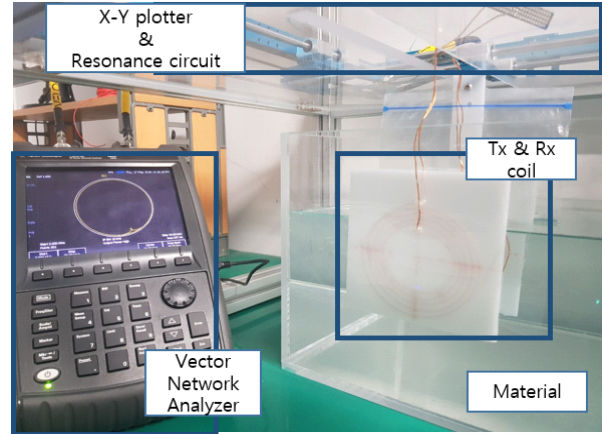


그림 6. 실험 환경
Fig. 6. Measurement environment.

제안한 등가모델을 유도하고, 그 타당성을 검토하기 위하여 그림 5와 같이 실험환경을 구성하였다. 벡터 네트워크 분석기(VNA)에 송수신코일과 공진회로를 연결하여 S 파라미터를 측정한다. X-Y plotter에 수신코일을 연결하여 송신코일과 수신코일 사이의 거리 d 를 제어한다. 수중 무선전력전송을 위해 두께가 1 cm인 35 cm×23.5 cm×20 cm의 아크릴 박스에 물을 채우고 송신코일은 외벽에 고정하고, 수신코일은 X-Y plotter에 연결하여 매질 안에 위치시킨다.

표 1. 무선전력전송 코일 및 회로 파라미터
Table 1. Parameters of WPT coil and circuit.

Parameters	Values	Parameters	Values
Coil outer dia.	5.5 cm	$L_1(\mu H)$	$2.96 \mu H$
Coil inner dia.	3 cm	$L_2(\mu H)$	$2.82 \mu H$
Coil spacing	0.5 cm	$C_1(pF)$	196 pF
Coil thickness	0.45ϕ	$C_2(pF)$	202 pF
f_0	6.78 MHz	$R_1(\Omega)$	0.94 Ω
Turn (#)	5	$R_2(0.94 \Omega)$	0.94 Ω
Q_1	21.34	Q_2	22.49

측정된 S_{11} , S_{21} 과 식 (18), 식 (19)를 이용하여 계산한 S_{11} , S_{21} 의 비교를 통하여 L_d , C_d , R_m 을 결정한다. 염도 변화에 따른 특성을 수식으로 표현하기 위해 L_d , C_d , R_m 을 물의 염도 S_a 에 대한 1차 식으로 가정하고 L_d , C_d , R_m 을 구하면 다음 식 (22)~식 (24)와 같다.

$$L_d = 10S_a + 60 \text{ (}\mu\text{H/m)} \quad (22)$$

$$C_d = 0.2S_a + 0.8 \text{ (pF}\cdot\text{m)} \quad (23)$$

$$R_m = 2.5S_a + 10 \text{ (}\Omega) \quad (24)$$

표 1의 파라미터, 식 (6)~식 (24)를 이용하여 염도에 따른 거리별 수중무선전력전송 모의실험을 진행하였다. 본 논문에서는 National Instrument(NI)의 AWR 프로그램과 ANSYS의 HFSS를 활용하여 모의실험을 진행하였다.

매질별 거리에 따른 S_{11} 은 그림 7, 전력전송효율은 그림 8에서 모의실험값 및 측정값을 비교하였다. 제안하는 수중 무선전력전송 등가모델은 그림 7과 같이 매질별 거리에 따른 임피던스 변화 경향을 예측할 수 있다. 제안한

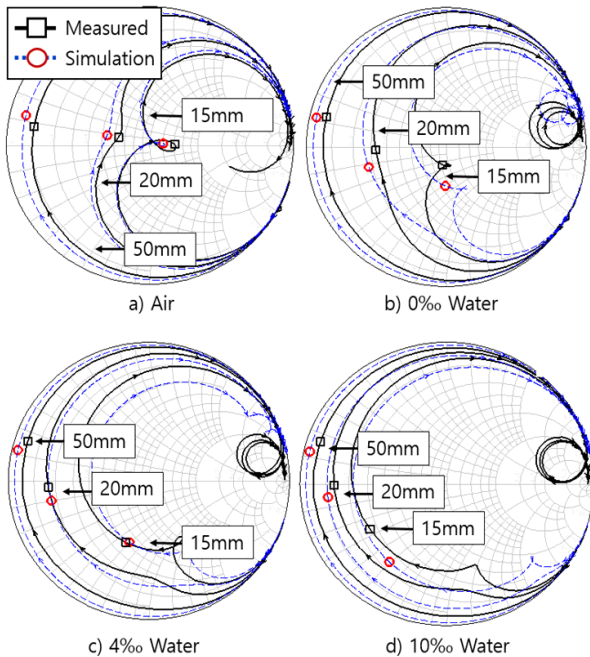


그림 7. 매질별 거리에 따른 S_{11} 모의실험값 및 측정값
Fig. 7. Simulated and measured S_{11} by transfer medium and distance between coils.

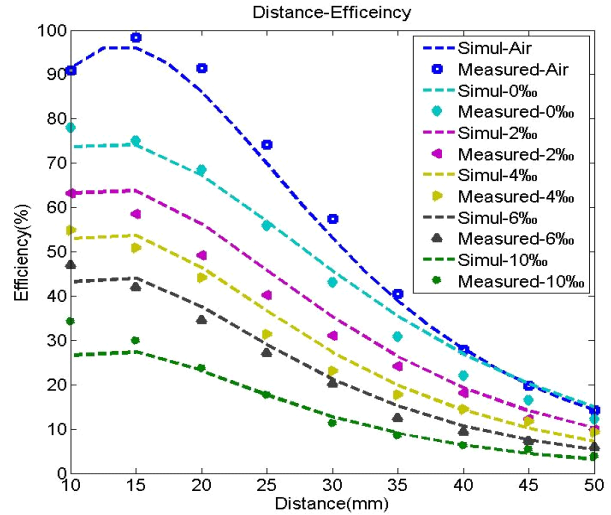


그림 8. 매질별 거리에 따른 무선전력전송 효율 모의실험값 및 측정값
Fig. 8. Simulated and measured power transfer efficiency by transfer medium and distance between coils.

수중 무선전력전송 등가모델을 이용한 전송효율의 모의실험과 실측값의 비교는 그림 8과 같고, 평균 약 3%의 오차를 가진다.

제안 등가모델은 염도와 거리 변화에 따른 통합적인 모델로 구성되어 있어서 상대적으로 효율변화가 많은 지점에서 실측과 모의실험 값의 오차가 발생하였다. 복잡도를 증가시킨 모델을 적용할 경우, 오차를 줄일 수 있으나, 본 논문에서는 최대한 간결한 모델에서 전송효율과 임피던스를 비교적 정확히 예측하는 방법을 제안하고자 하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전송매질이 자유공간이 아닌 수중무선 전력전송시스템에서 기존 등가회로를 수정하여 매질의 상태에 따른 특성을 반영할 수 있는 수중 무선전력전송 등가모델을 제안하고, 이를 실측값과 비교하여 타당성을 검증하였다. 제안한 등가모델과 측정결과를 비교해 봤을 때, S_{11} 이 모의실험 값과 측정값이 비교적 일치함을 확인하였다. 거리별 전력전송효율의 관점에서 제안하는 등가회로를 활용한 모의실험 값과 측정값은 평균적으로 약 3%, 최대 약 8%의 오차를 지님을 확인하였다. 본 논문의 결

과는 수중 무선전력전송 시스템에서 물의 염도와 송수신 기간 거리에 따른 무선전력전송 시스템 특성 연구 및 수중 무선전력전송을 위한 회로 및 시스템 설계에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

[1] Y. Huang, J. Wang, T. Sun, X. Xie, G. Li, and Y. Gu, et al., "An efficiency-enhanced wireless power transfer system with segmented transmitting coils for endoscopic capsule," in *2013 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS2013)*, Beijing, May 2013, pp. 2279-2282.

[2] A. I. Al-Kalbani, M. R. Yuce, and J. Redouté, "A bio-

safety comparison between capacitive and inductive coupling in biomedical implants," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1168-1171, Jun. 2014.

[3] F. Gonçalves, C. Duarte, and L. M. Pessoa, "A novel circuit topology for underwater wireless power transfer," in *2016 International Conference on Systems Informatics Modelling and Simulation(SIMS)*, Riga, Jun. 2016, pp. 181-186.

[4] J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, "The challenges of building mobile underwater wireless networks for aquatic applications" in *IEEE Network*, vol. 20, no. 3, pp. 12-18, May.-Jun. 2006.

이 정 건 [건국대학교/공학석사]



2016년 8월: 아주대학교 기계공학과 (공학사)
 2018년 8월: 건국대학교 스마트ICT융합학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 무선전력전송 등

구 현 철 [건국대학교/교수]



1995년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 2003년 12월: Georgia Institute of Technology 전기전자 및 컴퓨터공학부 (공학박사)
 2005년 3월~현재: 건국대학교 전기전자공학부 교수
 [주 관심분야] RF Power Amplifier, RF Front-End 설계, 무선전력전송 등

강 원 실 [차세대무선전원센터/책임연구원]



2008년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
 2018년 8월: 건국대학교 전자정보통신공학 (공학박사)
 2018년 9월~현재: 차세대무선전원센터 책임연구원
 [주 관심분야] Digital RF, 비선형 시스템 해석 및 선형화, 원격 계측 시스템, 무선전력전송, 통신시스템 등