

금속 차폐 공간 내 무선 전력 전송을 이용한 맨체스터 코드 전송

Transmission of Manchester Code Using Wireless Power Transmission in a Metal Shielded Space

황태영^{1*} · 정하늘¹ · 김장훈² · 박병호³ · 최원¹

¹(주)빅텍

²(주)코리아디펜스인더스트리

³(주)국방기술진흥연구소

Tae-young Hwang^{1*} · Ha-neul Jung¹ · Jang-hoon Kim² · Byung-ho Park³ · Won Choi¹

¹Victek, Incheon, 21984, Korea

²Korea Defence Industry, Sejong, 30101, Korea

³Korea Research Institute for defense Technology Planning and Advancement, Gyeongsangnam-do, 52852, Korea

[요 약]

본 논문은 금속으로 차폐된 공간 내부에서 무선 전력 전송(WPT, wireless power transfer)이 가능하도록 송신부와 수신부를 등가 모델링하여 시뮬레이션을 통해 모의하고, 실험을 통해 그 결과를 검증하였다. 이를 통해 금속으로 차폐된 공간에서 무선 전력 전송 시스템의 전력 전달 효율(PTE, power transfer efficiency)에 미치는 다양한 영향 요소를 면밀히 분석하였으며, 분석된 요소를 기반으로 무선 전력 전송 시스템의 전력 전달 효율을 개선하기 위한 구체적이고 효과적인 방법을 제시한다. 또한, 금속 차폐 공간 내에서 수신 코일을 통한 무선 전력 전송으로 데이터 전송을 가능하게 하여 맨체스터 코드 정보를 수신하는 실험이 검증되었다. 이를 통해 금속 차폐 공간 내에서 효율적인 무선 전력 전송 시스템의 가능성을 제시하고자 한다.

[Abstract]

This paper simulates through simulation by modeling the transmitter and receiver equivalently to enable wireless power transfer (WPT) within a metal-shielded space, and verifies the results through experiments. Through this, various influencing factors on the power transfer efficiency (PTE) of the wireless power transmission system in a metal-shielded space have been closely analyzed, and a concrete and effective method for improving the power transfer efficiency of the wireless power transmission system is suggested based on the analyzed factors. In addition, the experiment of receiving Manchester code information by enabling data transmission through wireless power transmission through the receiving coil within the metal shielding space has been verified. Through this, we would like to present the possibility of an efficient wireless power transmission system within the metal shielding space.

Key word : WPT(Wireless power transfer), PTE(Power transfer efficiency), Metal shielded space, Manchester code.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.5.713>



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 27 September 2024; Revised 25 October 2024

Accepted (Publication) 29 October 2024 (31 October 2024)

*Corresponding Author; Hwang Tae Young

Tel: *** - **** - ****

E-mail: hty@victek.co.kr

1. 서론

무선 전력 전송은 1897년 니콜라 테슬라에 의해 처음 연구 되어 현재까지 연구가 이어지고 있다. 현재, 대중적으로 사용 되고 있는 기술은 스마트폰의 배터리를 무선충전으로 사용하는 만큼 기술의 실용화가 많이 이루어졌다[1]. 무선 전력 전송 방식은 자기장, RF(radio Frequency) 그리고 레이저(적외선)를 통한 3가지 형태로 나타났다. 각각의 방식에는 거리와 에너지(전력) 그리고 전달 효율에 의해 trade-off 관계가 있다 [2].

본 논문에서는 무선 전송을 방해하는 금속 차폐를 통해 손실이 적은 에너지 전달을 위하여 kHz 낮은 주파수를 사용한다. 그러므로 적외선 대역 사용으로 인해 상대적으로 높은 주파수를 사용하는 레이저 방식은 제외하였다. 또한 단거리(3 cm 이내)로 에너지를 전송하기 위해 수십 m 내외의 전송 거리를 가진 RF 방식도 제외되어 결국, 자기장 방식을 도입하였다[3]. 자기장 방식은 자기 유도와 자기 공명 방법이 있으며, 자기 유도는 수 밀리미터 내외라는 너무 짧은 거리로 인해 제외되었다. 무선 통신 분야에서 데이터의 신뢰성과 정확성은 매우 중요한 요소이므로 본 논문에서는 데이터 전송 시험 시 맨체스터 코드 방식을 사용한다. 맨체스터 코드는 디지털 통신에서 사용되는 이진 코드의 한 형태로 이진 신호를 전송하는 방식 중 하나이다. 해당 방식은 데이터를 신호의 중심위치를 변경하여 전송하는 방식으로 동작한다. rising edge와 falling edge의 중심위치 변화로 표현하여 신호를 식별하고, 데이터를 전송하는데 사용된다[4].

본 논문에서는 자기 공명 방식을 통해 금속 차폐된 공간을 통하여 에너지 전달 방법을 제시하였다. 주변 환경에 의한 간섭 및 신호 감쇄 상황을 고려하여 동기화와 오류검출 기능이 좋은 맨체스터 코드를 이용한 무선 전력 통신 실험을 통하여 확인하였다. 또한, 데이터에 대한 신뢰성과 정확성을 평가한다.

II. 금속 차폐

2-1. 금속 차폐에 따른 전력 손실

무선전력전송 시스템 사이에 장애물(매질)의 유무는 전력 전달 효율(PTE)에 영향을 미친다. PTE가 작아지는 이유는 에너지가 지나가는 통로에 장애물 매질 특성(도전율, 투자율, 면적, 두께)의 따라 에너지 투과율에 영향을 미쳐 손실이 나타난다. 이를 대표하는 물리현상이 침투 깊이(skin Depth)와 와전류(eddy current) 손실 그리고 히스테리시스 손실이 있다.

논문[2]에서는 공심코어와 솔레노이드 코일 방식으로 가정용 AC(alternating current) 전원인 50 Hz 주파수에서 1 mm 두께의 금속 차폐(STS304)를 10 cm 거리에서 무선 전력 전송 실험에 성공하였다.

표 1. 매질 (STS304) 특성

Table 1. Characteristics of medium.

index	STS304
conductivity (σ) [$S \cdot m$]	1.389E+06
resistivity (ρ) [$ohm \cdot m$]	1/ σ
relative permeability (μ_r)	1.0048
air permeability(μ) [H/m]	1.247E-06
permeability (μ) [H/m]	$\mu_0 \cdot \mu_r$

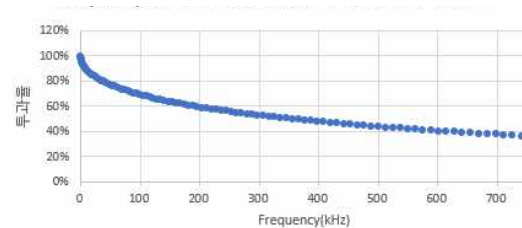


그림 1. 주파수 변화에 따른 투과율(0~700kHz)

Fig. 1. Transmittance according to frequency change (0~700kHz)

본 연구는 협소한 공간에서 금속 벽으로 둘러싸인 공간으로 단거리(3 mm 이내)에서 수행하며, 오실레이터와 전원공급기를 이용하여 전압 및 주파수 수치를 변경하며, 무선 전력 전송 시 효율이 가장 높은 값을 추출한다.

1) 침투 깊이(skin depth)

침투 깊이(δ)는 매질 표면에서 전류밀도 또는 전기장 등의 크기가 $1/e$ (37%)까지 떨어지는 깊이를 말한다[5]. 아래 수식은 침투깊이의 유도식이다[6].

$$\frac{E(\delta)}{E(0)} = e^{-1} = e^{-\alpha z} \Big|_{z=\delta} \Rightarrow \delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (1)$$

고정된 매질 두께를 투과하기 위한 도전율에 따른 주파수(f)를 수식 (1)을 통해 아래 수식 (2)로 표현할 수 있다.

$$f = \frac{\rho x^2}{\pi \mu_0 \mu_r \delta^2} \quad [Hz] \quad (2)$$

수식 (2)를 통해 그림 3과 같이 f (frequency) 변화에 따른 투과율 그래프이다. 주파수가 낮을수록 투과율이 개선된다.

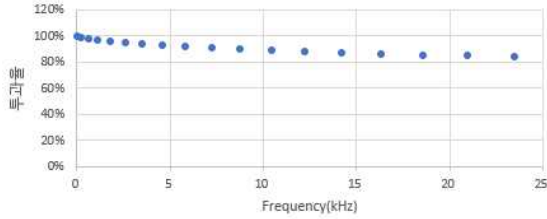


그림 2. 25kHz 이하 주파수에 따른 투과율(0~25kHz)
 Fig. 2. Transmittance according to frequency change (0~25kHz).

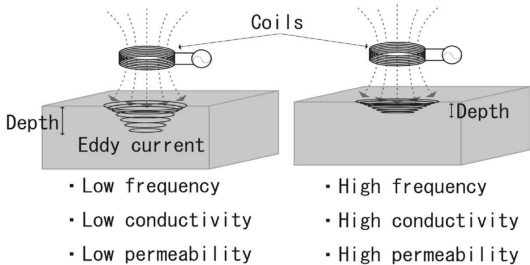


그림 3. 와전류 손실[5]
 Fig. 3. Eddy current loss.

그림 1과 그림 2는 sts304 0.5t 조건으로 주파수별 투과율에 대한 그래프이며, 25 kHz 이하 주파수에서 약 83% 이상 투과율을 보여준다. 해당 결과를 통해 주파수가 낮을수록 투과율이 높아지는 것을 확인할 수 있다.

2) 와전류(eddy current)

와전류는 임의에 폐속선으로 자속이 투과할 때 전류가 유도되는 현상을 말한다. 이때 발생한 유도 현상만큼 매질에서 에너지를 손실이 발생하는데, 매질의 물질 상수(A)와 무선 전력 전송 시스템 전송 부의 최대 자속 밀도(B_m), 물질의 침투 깊이(δ)에 영향을 받아 아래 수식 (3)과 같이 표현된다.

$$p_e = A\sigma f^2 B_m^2 \delta^2 \quad [W/m^3] \quad (3)$$

에너지 손실은 주파수(f) 제곱에 비례하고 매질의 부피에 비례하는 것을 볼 수 있다.

3) 히스테리시스 손실

히스테리시스 손실은 매질에 자기력(H) 영향에 의해 자속 밀도(ΔB) 포화 상태를 겪으면 자기력을 줄여도 잔류자기에 의해 원래 상태로 복귀하지 못해 나타나는 손실을 말한다. 복귀하지 못한 잔류자기가 손실된 에너지이다. 수식 (4)는 히스테리시스 손실 수식이며, 그림 4에서 자기력을 증가시켜도 자속 밀도가 더는 증가하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이것을 “자기 포화 현상”이라고 말한다[6].

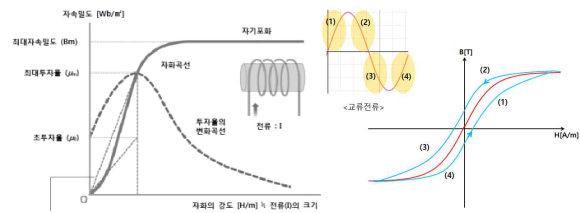


그림 4. 자속 밀도 포화 현상 및 히스테리시스 곡선[6]
 Fig. 4. Flux density saturation phenomenon and hysteresis curve.

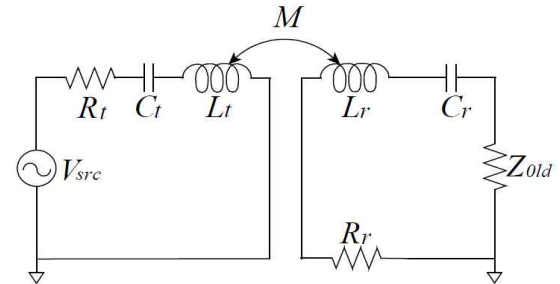


그림 5. 무선 전력 전송 시스템 등가회로[2]
 Fig. 5. Equivalent circuit of wireless power transmission system.

$$P_h = V_{volume} \oint \vec{H} dB \propto f \times B^n \quad (4)$$

또한, 수식 (4)를 통해 히스테리시스 손실은 주파수(f)와 자속 밀도(Bⁿ)에 따라 비례하는 것을 확인할 수 있다. 와전류 손실과 히스테리시스 손실 사이에는 특정 주파수 기준으로 작은 주파수를 사용할 때는 히스테리시스 손실이 크다.

III. 무선 전력 전송 시스템

3-1. 전력 전달 효율(PTE)

무선 전력 전송 시스템의 등가회로는 그림 5와 같다. 등가회로의 전력 전달 효율(PTE, η)은 송신 전력(P_t)과 수신전력(P_r)의 비율로 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_r}{P_t} = \frac{I_r^2 Z_r}{V_{src} I_t} \quad (5)$$

각 전력을 구하기 위한 요소들의 값을 찾는 방법은 키로히호프 전압 법칙(KVL; Kirchhoff's voltage law,)을 통해 수식 6과 같은 행렬로 원하는 요소의 값을 획득할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{src} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_t & jwM \\ jwM & Z_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_t \\ I_r \end{bmatrix} \tag{6}$$

또한, 무선 전력 전송 시스템은 송신 코일과 수신 코일 사이에 품질계수(Q_t , Q_r)와 결합계수(k)라는 물리적인 현상이 존재한다. 이를 수식 7과 같이 표현할 수 있다.

$$k^2 = \frac{M}{L_t L_r}, Q_t = \frac{wL_t}{R_t}, Q_r = \frac{wL_r}{R_r} \tag{7}$$

수식 (6)과 수식 (7) 그리고 송신 회로 및 수신 회로의 리액턴스(X_t , X_r) 값을 자기 공명을 통해 상쇄시키면 시뮬레이션할 수 있는 수식 (8)을 얻는다[2].

$$\eta = \frac{k^2 Q_t Q_R}{(1+r_R)(1+r_R+k^2 Q_t Q_r)} \tag{8}$$

여기서 수신부 임피던스 비율(r_R)은 $r_R = Z_{old} / R_r$ 으로 부하(Z_{old})에 대한 수신 회로의 기생 저항(R_r) 비율이다.

3-2. 최대전력 전송 조건(P_{MAX} , 임피던스 매칭)

무선 전력 전송 시스템의 전력 회로 전체에서 저항 성분(임피던스)이 작을수록 공급 전력을 수신부에서 손실 없이 받을 수 있다. 따라서 회로 내의 공진을 활용해 저항 성분(임피던스) 최소화 필요하다.

$$P_{MAX} = I^2 Z_r = \left(\frac{V_{src}}{2Z_r} \right)^2 \times Z_r \tag{9}$$

그러나 무선 전력 전송 시스템에서는 송신부의 출력 임피던스($Z_{11} = Z_t$)가 수신부의 입력 임피던스($Z_{22} = Z_r$) 보다 작게 설정하는 튜닝을 통해 최적의 전력전달 효율을 찾는 과정이 필요하다. 송신부의 출력 임피던스(Z_{11})가 작으면, 전류 드라이브 능력이 좋아져서 강한 자기장을 형성할 수 있는 장점이 있다. 그러나 많은 전류 흐름에 발열을 통한 연 손실 또한 발생한다. 수신부의 입력 임피던스(Z_{22})가 크면, 작은 전류라도 왜곡 없는 전압 신호를 얻는 장점이 있지만, 전류의 흐름을 방해하는 임피던스가 높아 전력 전달량이 적어진다. 이처럼 임피던스 매칭에 따른 전력 전달 효율에 대한 trade-off 관계가 형성된다.

IV. 실험

표 2. 시뮬레이션 구성요소 수치

Table 2. Simulation component figures.

index	transmission	receive
resonant frequency (kHz)	25	25
parasitic register [<i>ohm</i>]	1.522	1.522
capacitance (nF)	236	236
Inductance [μ H]	172.42	172.42
quality coefficient	17.8	17.8

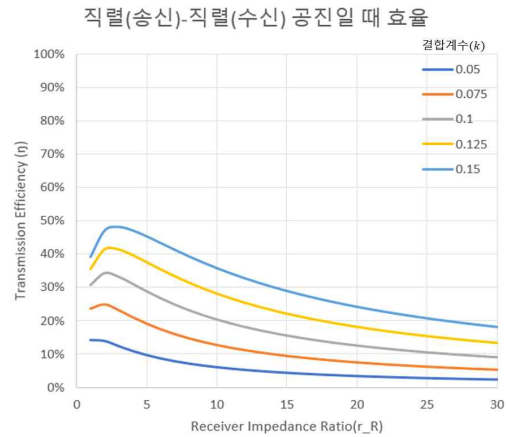


그림 6. 무선 전력 전송 전달효율 시뮬레이션

Fig. 6. Simulation of wireless power transmission transfer efficiency.

4-1. 시뮬레이션

수식 (8)을 이용한 무선 전력 전송 시스템 시뮬레이션을 표 2 를 통해 확인하면 그림 6과 같다. 그림 6은 수신부 임피던스 비율과 결합계수(k) 값에 따라 전력전달 효율을 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있다. 여기서 결합계수(k) 범위는 0에서부터 1까지를 갖지만, 금속 차폐 공간이라는 실험 환경을 고려하면 결합계수(k)는 낮을 수밖에 없다. 또한, 수신부 임피던스 비율에 따른 전력 전달 효율(η)의 최고점이 나타난다.

하지만 해당 시뮬레이션은 차폐 공간이라는 조건은 반영하였으나, 자기장의 형상이나 세기가 어떻게 이루어지는지 확인하지 못했다. 다만 금속 매질(sts304)에 따른 침투 깊이와 와전류 및 히스테리시스 손실이 더해지면 전력 전달 효율이 더 낮아질 것으로 예측할 수 있다.

4-2. 실험 구성

수신부의 안테나 역할을 하는 코일을 금속(sts304) 차폐 0.5t(mm) 케이스로 제작하는 과정은 그림 7과 같다. 이때 구리 테이프를 활용하여 케이스와 덮개 사이 공간을 차폐하였다.

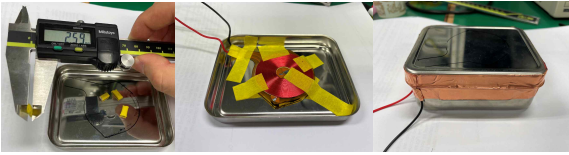


그림 7. 금속 차폐 실험구성
Fig. 7. Test setup of metal shielding.

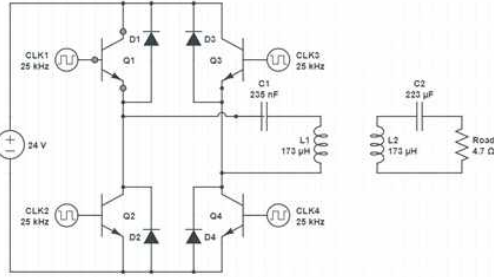


그림 8. 무선 전력 전송 기본 회로
Fig. 8. Wireless power transmission basic circuit.

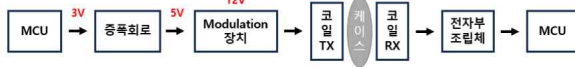


그림 9 무선 전력 전송 시험 구성도
Fig. 9. Wireless power transmission test setup

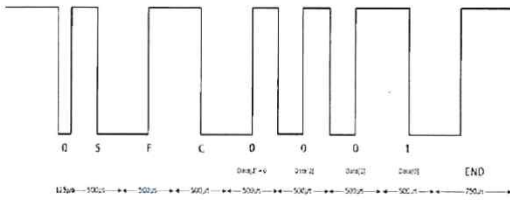


그림 10. 맨체스터코드 타이밍도
Fig. 10. Timing diagram of Manchester code.

무선 전력 전송 및 데이터전송 실험을 위하여 그림 8과 같이 송, 수신부 무선 전력 기본 회로를 구성하였다.

실험 구성은 그림 9와 같이 구성하였으며, 맨체스터 코드를 구현하기 위해 ST사의 stm32f0 discovery 보드를 이용한다. 현재 시험에서 사용하는 gatedriver의 필요 입력전압이 5 V이므로 증폭회로를 이용하여 데이터 신호를 driver에 전달한다. 전자부 조립체를 통해 MCU(micro controller unit)가 인지할 수 있는 신호로 변환하여 데이터의 일치성을 확인한다. 그림 12는 실험에 사용한 맨체스터 코드의 송신 파형이다.

그림 11과 같이 최종 실험 설정을 완료한 후 무선 전력 전송 시스템의 송신부와 수신부 회로의 요소들을 표3과 같이 측정하였다. 송신부 코일과 수신부 금속 차폐 case 사이의 간격은 4 mm이며, 금속 차폐 내부의 수신 코일과의 간격은 75 mm이다.

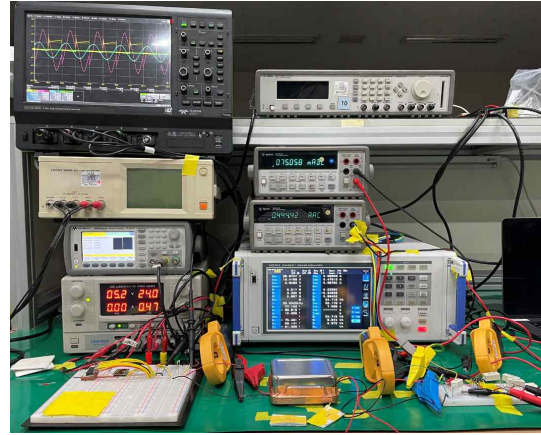


그림 11. 무선 전력 전송 실험구성
Fig. 11. Test setup of Wireless power transmission.

표 3. 무선 전력 통신 시험결과
Table 3. Wireless power communication test results.

index	transmission (Power supply)				coil		receive(res)		efficiency (%)
	F(kHz)	V	I	W	V	V	I	W	
non case	25	24.00	0.70	16.80	39.70	4.80	0.60	2.88	17.14
non case	25	12.00	0.27	3.36	18.00	3.07	0.33	1.01	30.15
case	25	24.00	0.58	13.92	16.25	1.70	0.20	0.33	2.41
case	25	12.00	0.53	6.36	6.30	1.40	0.15	0.21	3.30



그림 12. 수신 코일 및 비교기 입출력 측정
Fig. 12. Receiver coil and comparator input/output measurement.

실험 조건은 총 4가지였으며, 차폐 case 장착 여부와 송신 전압값을 다르게 하여 진행하였다. 차폐 case 미장착 및 송신 전압이 12v일 때 가장 효율이 높았으며, 수식 (5)와 같이 전압이 높을수록 효율이 떨어지는 것을 확인하였다. 또한, case 미장착 경우를 보았을 때 금속 매질에 따른 에너지 손실과 더불어 송신부와 수신부 시스템, 코일 구조 등 추가적 에너지 손실이 발생한 것을 확인하였다.

그림 12는 25 kHz에 맞춰 수신 코일에서 송신한 맨체스터 코드가 전달되는 것을 볼 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 금속으로 차폐된 구조의 조건에서 에너지 전달 가능하도록 금속 매질(st304)에 대한 침투깊이, 와전류, 그리고 히스테리시스와 전달 효율을 분석하였다. 주파수에 따른 금속매질의 투과율을 분석하고 25 kHz의 무선 전력 전송 주파수를 사용하여 에너지 전달과 맨체스터 형태의 데이터 전송이 실험을 통해 확인하였다. 이번 시험에서는 주파수 25 kHz, 송수신 코일의 간격 75 mm, 전압 12v로 조건 시 최대 효율을 확인했다. 다만 시뮬레이션 결과보다 낮은 효율이 확인되었으며, case를 장착한 경우에는 80% 이하로 감소하는 것을 관찰하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 무선 전력 전송 회로의 기생 저항 분석을 통해 에너지 손실과 송수신 회로의 각각 품질 계수 향상 시 전력 손실률을 최소화할 수 있을 것이다.

Acknowledgments

이 논문은 2021년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.20-307-F00-013-001, 다중 살포 통제 기술 개발).

References

- [1] S. H. Lee, Wireless power transfer using core or coreless, Master's thesis, Pusan university, Republic of Korea, 2013. Retrieved from <http://www.dcollection.net/handler/pusan/000000088994>.
- [2] M. Yamakawa, Y. Mizuno, J. Ishida, K. Komurasaki, H. Koizumi, "Wireless power transmission into a space enclosed by metal walls using magnetic resonance coupling," *Scientific Research*, Vol. 5 No. 1, pp. 19-24, Jan. 2014. DOI : <https://www.scrip.org/journal/paperinformation?paperid=42376>.
- [3] KOR. Innopolis foundation, Wireless charging technology market , 2017. Retrieved from <http://www.nhlbi.nih.gov/health.pdf>.
- [4] Technical description of information and communication terms. Manchester code [Internet]. Available: <http://www.ktword.co.kr/test/view/view.php?no=1807>
- [5] Information and Communication Technology Terminology Explanation, Skin effect, Skin depth, Available : <http://www.ktword.co.kr/test/view/view.php?nav=2&no=1511&sh=%ED%91%9C%ED%94%BC%ED%9A%A8%EA%B3%BC>
- [6] Genzino warehouse. What is the Magnetic Hysteresis?, Available : <https://www.yyxx.tistory.com/126?category=1105110>.



황 태 영 (Tae-Young Hwang)

2021년 2월 : 백석대학교 전자제어학과 (공학사)
2015년 3월 ~ 현재 : (주)빅텍 기술연구소 주임연구원
※ 관심분야 : 무선 전력 통신, 센서제어, 신호처리, 시스템 통합



정 하 늘 (Ha-Neul Jung)

2015년 2월 : 국립공주대학교 물리학과 (공학사)
2015년 3월 ~ 현재 : (주)빅텍 기술연구소 책임연구원
※ 관심분야 : 무선 전력 통신, 신호처리, 시스템 통합



김 장 훈 (Jang-Hoon Kim)

2020년 8월 : 국립공주대학교 전자공학과 공학사
2021년 2월 ~ 현재 : (주)코리아디펜스 인더스트리 연구소 연구원
※ 관심분야 : 무선 전력 통신, 센서제어, 시스템 통합



박 병 호 (Byung-Ho Park)

2014년 2월 : 서강대학교 기계공학과 (공학사)
2016년 2월 : 서강대학교 대학원 기계공학 (공학석사)
2016년 8월 ~ 2020년 12월 : 국방기술품질원 연구원
2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 연구원
※ 관심분야 : 기계공학, 국방기술기획



최 원 (Won Choi)

2001년 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)

2004년 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)

2014년 : 인천대학교 전자공학과 (공학박사)

2004년 ~ 현재: (주)빅텍 기술연구소 팀장

※ 관심분야 : RF 회로 및 모듈 설계, 무선통신 시스템, 전자전 시스템 등