

## 유도성 커플러를 이용한 지하공동구의 상태감시시스템

주우진 · 김현식\*

### Implementation of condition monitoring system in underground utility tunnels using inductive coupler

Woo-Jin Ju · Hyun-Sik Kim\*

Matron Corp., 678, Gapo-dong, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea

#### 요 약

지하공동구의 화재 발생 빈도는 다른 화재에 비하여 낮은 편이나 화재로 인한 피해는 경제적 손실 뿐만 아니라 사회운영 마비로 사회적 손실을 초래할 수 있다. 이에 본 논문은 지하공동구 내 설치된 누설 동축케이블을 이용하여 지하공동구의 상태감시시스템 구축에 대한 실증 시험 결과를 제시한다. 이를 위해 지하공동구에 설치된 누설 동축케이블에 삽입손실 특성이  $-6 \pm 2$  dB인 유도성 커플러와 200 Mbps급 전력선 통신 모듈을 연결하여 실증 시험한 결과, 500 m까지 IP 카메라의 송/수신을 확인하였다. 따라서 데이터 전송을 위한 통신선로의 추가 설치 없이도 지하공동구 내 설치된 누설 동축케이블을 이용하여 지하공동구에 상태감시시스템 구축이 가능할 것으로 판단된다.

#### ABSTRACT

The incidence of fire in underground utility tunnel is lower than other fires, but the damage caused by fire can cause social loss due to social management paralysis as well as economic loss. Hereupon, this paper presents the results of an empirical test on the construction of the underground utility tunnel condition monitoring system using the leakage coaxial cable installed in the underground utility tunnel. For this reason, a verification test was conducted by connecting a inductive coupler 200 Mbps power line communication modem with insertion loss characteristics of  $-6 \pm 2$  dB to the installed the leakage coaxial cable installed in the underground utility tunnel. As a result, We confirmed sending/receiving of IP cameras up to 500 m. Therefore, it is judged that it is possible to construct a condition monitoring system for underground utility tunnel by using the leakage coaxial cables installed in the underground utility tunnels without installing additional communication lines for data transmission.

**키워드** : 비접촉 방식, 상태감시, 유도성 커플러, 지하공동구, 화상 시스템

**Key word** : Condition monitoring, Inductive coupler, Non-Contact, Underground utility tunnel, Video system

Received 04 July 2017, Revised 17 July 2017, Accepted 01 August 2017

\* Corresponding Author hyun-Sik Kim(E-mail:matron@matron.kr, Tel:+82-55-232-5941)  
Matron Corp., 678, Gapo-dong, Masanhappo-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, Korea

Open Access <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.8.1597>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

지하공동구는 2종 이상의 시설물을 공동으로 수용, 공급하는 시설로서 종전 분산 설치된 시설물들을 하나의 공간에 응집시켜 운영 및 관리가 용이하게 함은 물론 도시 미관 향상에 긍정적 영향을 미치므로 사회 기반 시설물 구축 시 도입하고 있으며, 개체수도 증가하고 있다[1]. 서울시 등의 국내 주요 도시는 지역적 팽창에 따라 도로망 체계가 급격하게 발전하였고 도시민이 안락하고 풍요로운 생활을 영위하도록 전력, 통신, 상수도, 하수도, 냉난방관로, 가스관등이 무분별하게 매설되었으며, 비효율적으로 개별 관리되고 있다[2]. 이에 지하공동구의 증가는 화재 위험성이 높아질 수 있는 위험성을 내포하고 있으며, 공간적 특성상 교통마비, 전력마비, 통신마비 등 사회적, 경제적인 피해를 초래할 수 있는 특수화재로 확대될 수 있다[3]. 이에 지중선로 기기에 대한 자동화율이 증가함에 따라 지중선로 기기 중 자동화 되지 않은 기기에 대한 감시 방안이 증대되고 있으며[4], 도시 팽창과 신도시 개발로 도로, 전기, 상수도 등의 7대 지하시설물의 안전에 대한 관심이 대두되고 있다. 특히 기존 인력에 의존하여 운영하는 방식은 실시간으로 긴박하게 발생하는 사건 사고에 적절히 대처하기 어려울 뿐만 아니라, 공동구내부에 화재 발생이나 가스 유출 사고 발생 시 접근조차 불가능하며 사고에 대한 상황 파악이나 대처가 어렵다.

그러므로 지중선로의 유지, 보수 작업은 전체 산업 보호와 불의의 재난을 방지하기 위한 중요한 업무 중 하나로 원격 감시의 필요성이 날로 증대되고 있다[5].

현재는 광케이블과 같이 통신 전용선로를 구축하여 상태감시시스템을 구축하여 이용하고 있으나, 상당한 설치 비용과 시간이 필요하다. 그러나 누설 동축케이블과 같은 기존에 설치되어 있는 선로를 이용한 통신 시스템 구축은 전무한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 지하 공동구 내 설치되어 운용 중에 있는 누설 동축케이블에 비접촉식 방식을 이용하여, 통신 선로의 설계와 구축에 필요한 시간과 비용이 추가로 발생되지 않게 하기 위한 유도성 커플러를 개발하고 실시간으로 배전자동화실 또는 사령실에서 지중 선로의 상태를 감시할 수 있는 지중 선로 상태 감시 시스템 구축에 대한 실증 시험 결과를 제시한다.

## II. 본 론

### 2.1. 유도성 커플러

유도성 커플러(Inductive Coupler Unit)는 광대역 주파수 영역의 통신신호를 전력선에 결합시킬 수 있는 장치로 전력선 통신 시스템에서는 핵심 소자로 다양한 전력선에서도 물리적인 접촉이 필요 없이 단순 클램핑(clamping) 작업으로 설치된다[5]. 따라서 유도성 커플러는 신호전송특성과 전기적 안정성이 우수하고 설치가 용이하며, 용량성(Capacitive) 커플러에 비해 제조 단가가 낮기 때문에 응용성이 높다. 또한 유도성 커플러에 내장되는 자기코어는 대전류에서 자기 포화(saturation)되지 않고 낮은 삽입손실(insertion loss,  $S_{21}$ ) 특성으로 통신 주파수에서 안정적인 전자기적 특성을 발휘해야 한다. 따라서 자기 코어는 대전류에 의해 포화되어 자기적 특성을 상실하므로 최대자속밀도( $B_m$ )가 높으면서 자기이력곡선(hysteresis curve)의 기울기가 낮은 재료를 사용하고, 절단면 사이에 에어갭(air-gap)을 적용하여 포화 전류를 증가시킬 수 있다[6]. 따라서 유도성 커플러의 자기 코어는 에어갭을 갖는 “cut-core”라고 불린다. 그림 1은 토로이달형 cut-core 코어의 측면을 나타낸 것이다.

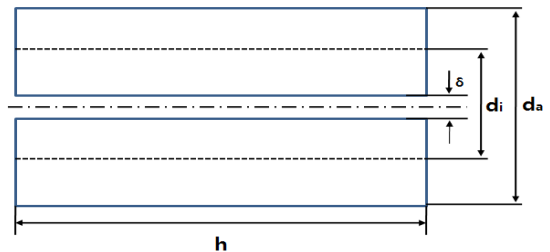


Fig. 1 Toroidal shaped cut-core

여기서  $d_a$ 는 외경,  $d_i$ 는 내경,  $h$ 는 높이,  $\delta$ 는 에어갭이다. 여기서 에어갭은 cut-core의 양쪽에 있어야 한다. 이러한 치수들을 사용해서 단면도  $A_{Fe}$ 에 대한 공식이 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_{Fe} &= \frac{1}{2} \eta_{Fe} \cdot (d_a - d_i) \cdot h \\
 \ell_{Fe} &= \frac{1}{2} \pi \cdot (d_a + d_i) \\
 V_{Fe} &= A_{Fe} \cdot \ell_{Fe}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $\eta_{Fe}$ 는 자기재료의 충전율이다. 이 값은 금속합금에 대해서는 0.8이고, 페라이트에 대해서는 1이다. 코어의 유효 투자율  $\mu_c$ 는 에어갭에 의해 감소되며 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\mu_c = 1 / (1/\mu + 2 \cdot \delta/\ell_{Fe}) \quad (2)$$

여기서 유효 투자율  $\mu_c$ 는 주로  $\delta/\ell_{Fe}$ 의 비로 결정된다. 즉, 다른 자기 소재들의 유효 투자율 사이에는 극히 작다. 흐르는 전류 I와 요구되는 인덕턴스 L에 의한 코어 안에서 자기 에너지 W는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$W = V_{Fe} \cdot \int H \cdot dB \quad (3)$$

또한 W에 대한 다른 식은:

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot V_{Fe} \cdot B^2 / (\mu_c \cdot \mu_0) \quad (4)$$

따라서 요구되는 코어 재료의 체적  $V_{Fe}$ 는 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$V_{Fe} = L \cdot I^2 \cdot \mu_c \cdot \mu_0 / B^2 \quad (5)$$

요구되는 코어 재료의 체적은 자속밀도 B의 제공에 의존함에 따라 포화자속밀도  $B_s$ 가 높은 자기재료의 사용은 그 만큼 유도성 커플러에서 요구되는 코어의 크기를 감소시킬 수 있다[7]. 그림 2는 유도성 커플러의 자심재료 구조와 주요 변수를 나타내었으며, ID(inner diameter)와 OD(outer diameter)는 자심재료의 내경과 외경을 H는 높이를 나타낸다.  $l_e$ 와  $A_e$ 는 자심재료의 유효길이와 유효단면적을 나타낸다.

자기 코어의 공진주파수 이상의 주파수에서는 자기 코어의 기능을 상실하여 커플러가 통신 능력을 급격하게 저하시킬 수 있으므로, 공진주파수가 통신 주파수 대역 이후에 위치할 수 있도록 자기 코어의 형상 설계가 이루어져야 한다. 이러한 특성들은 재료에 따라서 상반 관계에 있기 때문에 요구되는 사양에 따라 적

절한 제어가 필요하다.

이에 유도성 커플러가 최소의 삽입손실 특성을 발휘하기 위해서는 신호 출력부의 권선 조건 및 커플러의 구성기술이 확립되어야 한다[8]. 따라서 본 논문에서는 표 1에 나타난 사양을 만족시키는 유도성 커플러를 개발하기 위해 권선수에 따른 삽입손실을 측정함으로써 최적의 삽입손실 특성을 지니는 유도성 커플러를 제작하였다.

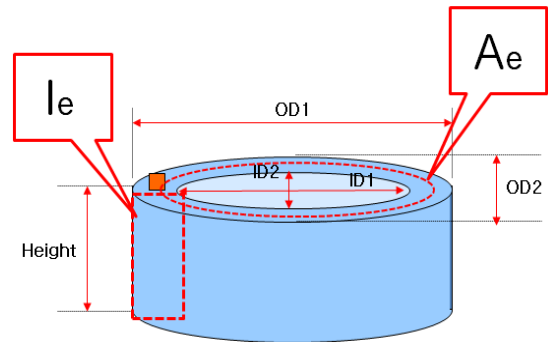


Fig. 2 The structure and major parameters of a magnetic core material for an inductive coupler

Table. 1 The specifications of an inductive coupler

Property	Unit	Specification
Operating frequency range	MHz	1.7 ~ 30
Attenuation in the frequency range	dB	-6 ± 2
ID x OD x H	mm	34x73x80

### III. 시스템 제작 및 성능 평가

#### 3.1. 유도성 커플러 설계 및 제작

모의해석을 통해 자심재료의 내경 및 외경 그리고 높이에 따른 자속변화를 확인함으로써, 자심의 최적의 형상 설계를 수행하였으며, 전자계 시뮬레이션의 결과를 그림 3에 나타내었다. 자속의 누설은 자기특성 저하를 나타냄과 동시에 자기포화가 일어나는 최대 전류량이 증가하게 되는데 목표로 하는 사용 전류에서 포화되지 않고 최대의 자기적 특성을 나타내도록 자심 재료의 설계가 필요하다.

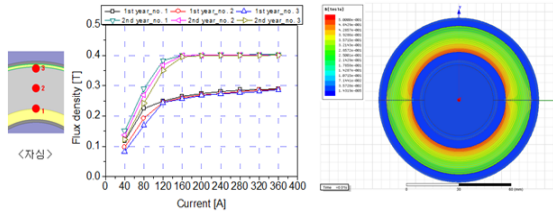


Fig. 3 Electromagnetic field simulation analysis example

유도형 커플러는 1차 코일과 2차 코일의 전기기계결합도에 따라 주파수 특성이 좌우될 수 있으며, 결합도를 최대화하여 신호전송 특성을 최대화할 필요가 있다. 전력구 내 누설 동축케이블용 유도성 커플러는 권선 조건에 따라 주파수에 따른 삽입 손실 특성이 달라진다. 즉 권선수가 증가할수록 저주파 대역의 손실은 감소하고, 고주파대역의 손실은 증가하게 되므로 전력구 내에 사용할 모델의 이용 주파수 대역에 적합한 출력 권선 구조를 선택하고 구성 방법을 최적화 하였다. 그림 4와 같이 제작된 유도성 커플러의 삽입손실은 1 MHz 이하의 주파수 영역에서 크게 나타났다. 그러나 전력선 통신 모델의 사용 주파수 대역인 1.7 ~ 30 MHz 이므로 유도성 커플러의 권선수 1 ~ 4 turn까지의 삽입 손실을 확인한 결과 권선수 3 turn까지  $-6 \pm 2$  dB를 만족하였으며, 권선수 1 turn에서 가장 작은  $-3 \pm 2$  dB의 삽입손실을 나타내었다.

따라서 그림 5는 이상의 시험 결과를 바탕으로 권선수를 1 turn으로 하여 제작된 유도성 커플러의 실제 모습을 나타내었다. 그림에서와 같이 유도성 커플러는 누설 동축케이블의 변경없이 체결이 용이하도록 분리형으로 제작되었다.

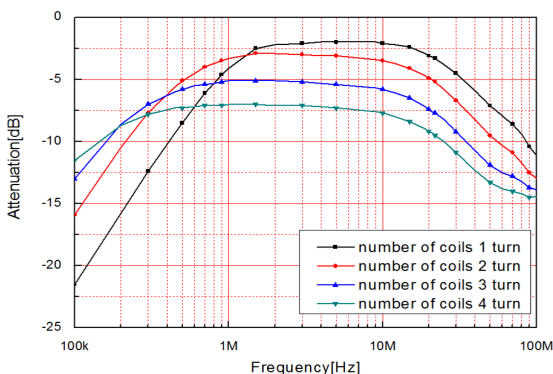


Fig. 4 Attenuation of inductive coupler winding

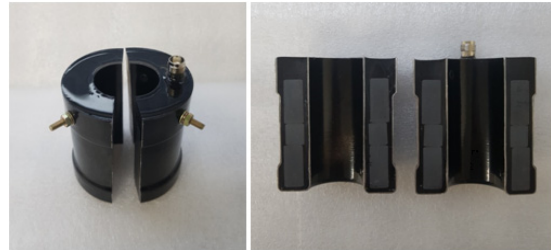


Fig. 5 The manufactured of inductive coupler

### 3.2. 상태감시시스템 설계

지하공동구에 설치되어 있는 누설 동축케이블을 이용한 통신 시스템은 설치된 동축케이블의 변경없이 구축해야하므로 그림 6에서와 같이 제작된 유도성 커플러를 이용하여 설치하고, 200 Mbps급 전력선 통신 모델과 IP 카메라를 이용하여 시스템을 설계하였다.

개발된 유도성 커플러와 전력선 통신용 모델을 사용하여, 창원시 성산구에 있는 OO변전소 내의 지하 공동구에 설치되어 있는 누설 동축 케이블의 거리에 따른 통신 속도 및 IP 카메라 영상 송/수신 확인 시험을 수행 하였다. 통신 거리는 300, 500 m로 그림 6과 같이 지중선로의 서버 측에는 배터리, 인버터, PC, IP카메라와 전력선 통신 모델을 이용하여 구축하였다.

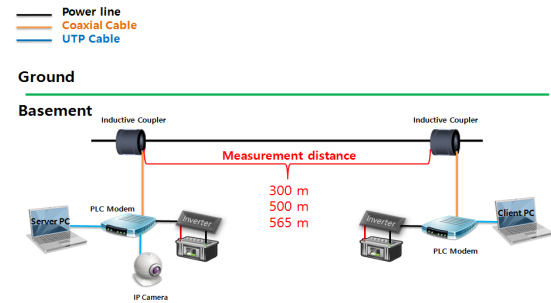


Fig. 6 Communication test configuration using leakage coaxial cables installed in underground utility tunnel



Fig. 7 Actual internal and demonstration test of underground utility tunnel

또한 클라이언트 측으로 IP카메라의 영상 및 통신 신호를 전달할 수 있도록 카메라와 모뎀을 구성하였다. 그림 7에는 지하공동구의 내부와 화상 전송 시험 모습을 나타내었다.

통신 속도 측정은 데이터 통신 네트워크 속도 측정에 사용되는 상용 소프트웨어인 Iperf 프로그램을 이용하였다. 그림 8은 300 m에서의 통신 속도를 나타낸 것으로 평균 9 Mbps이상의 높은 통신 속도를 나타내었다. 그러나 통신 거리가 증가함에 따라 그림 9에서와 같이 500 m에서는 통신 속도는 0.4 Mbps로 감소하였다.

```
[136] 10.0-15.0 sec 5.70 MBytes 9.57 Mbits/sec
[136] 15.0-20.0 sec 5.70 MBytes 9.56 Mbits/sec
[136] 20.0-25.0 sec 5.68 MBytes 9.53 Mbits/sec
[136] 25.0-30.0 sec 5.66 MBytes 9.49 Mbits/sec
[136] 30.0-35.0 sec 5.57 MBytes 9.35 Mbits/sec
[136] 35.0-40.0 sec 5.66 MBytes 9.49 Mbits/sec
[136] 40.0-45.0 sec 5.63 MBytes 9.45 Mbits/sec
[136] 45.0-50.0 sec 5.71 MBytes 9.58 Mbits/sec
[136] 50.0-55.0 sec 6.66 MBytes 11.2 Mbits/sec
[136] 55.0-60.0 sec 6.64 MBytes 11.1 Mbits/sec
[136] 0.0-60.2 sec 70.3 MBytes 9.79 Mbits/sec
```

Fig. 8 Measurement result of communication speed from communication distance 300m on the underground utility tunnels

```
[236] local 10.7.2.100 port 50214 connected with 10.7.2.50 port 5001
[ ID] Interval Transfer Bandwidth
[236] 0.0- 5.0 sec 0.44 MBytes 0.73 Mbits/sec
[236] 5.0-10.0 sec 0.15 MBytes 0.25 Mbits/sec
[236] 10.0-15.0 sec 0.27 MBytes 0.46 Mbits/sec
[236] 15.0-20.0 sec 0.13 MBytes 0.22 Mbits/sec
[236] 20.0-25.0 sec 0.24 MBytes 0.41 Mbits/sec
[236] 25.0-30.0 sec 0.38 MBytes 0.63 Mbits/sec
[236] 30.0-35.0 sec 0.26 MBytes 0.43 Mbits/sec
[236] 35.0-40.0 sec 0.22 MBytes 0.37 Mbits/sec
[236] 40.0-45.0 sec 0.14 MBytes 0.24 Mbits/sec
```

Fig. 9 Measurement result of communication speed from communication distance 500m on the underground utility tunnels



Fig. 10 Measurement result of communication signal from communication distance 500m on the underground utility tunnels

그림 10에서와 같이 500 m에서 스펙트럼 분석 결과 통신 신호가 약하게 감지되었다. 이는 통신 거리가 증가에 따른 통신 속도의 감소한다는 것을 알 수 있다.

IP 카메라의 영상 송/수신 확인은 IP 카메라의 소프트웨어를 활용하였으며, 확인된 영상 화면을 그림 11에 나타내었다.

시험 결과, 표 2와 같이 지하 공동구 내 설치된 누설 동축 케이블의 거리 300 m에서 TCP/IP 전송 속도는 약 9.5 Mbps로 확인할 수 있었으며, 서버 측에 연결된 IP카메라의 영상 송수신 확인 결과 실시간으로 영상을 확인할 수 있었다. 그러나 IP 카메라의 영상 송수신 확인 결과, 실시간으로 영상을 확인할 수 있었다.

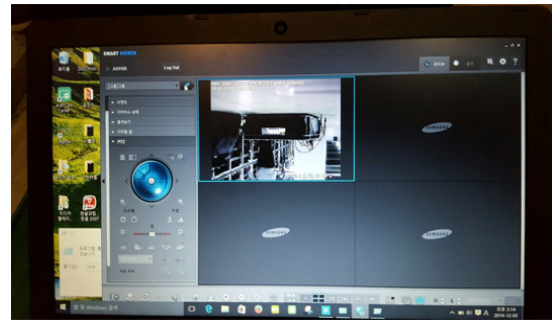


Fig. 11 Utilization on the underground line As a result of video transmission/reception confirmation of the IP camera

Table. 2 Demonstration test result

Communication Distance	300	500
Video Screen		
Transfer Speed	9.5 Mbps	0.4 Mbps

#### IV. 결론

본 연구에서는 지하 공동구 내 누설 동축 케이블을 이용한 비접촉 방식의 상태감시 시스템 구축에 대한 방안을 제시하였다. 이를 위하여 지하 공동구 내 설치되어 있는 누설 동축 케이블을 통신 선로로 활용하고, 데이터 통신 기기 간의 비접촉 방식의 통신을 위한 유도



성 커플러를 개발하였다. 개발된 유도성 커플러를 활용하여 시험한 결과, 비접촉 방식의 시스템은 300 m의 거리에서 9.5 Mbps 이상의 전송 속도를 제공하고 IP 카메라의 영상을 실시간으로 송/수신할 수 있었다. 또한 500 m의 거리에서 0.4 Mbps로 전송속도가 급격히 감소하였으나, IP 카메라의 영상을 실시간으로 송/수신할 수 있었다. 따라서 제시된 유도성 커플러를 이용한 비접촉 방식의 통신 시스템은 선로의 추가 설치 없이도 지하 공동구 내 통신 네트워크를 구축할 수 있는 효과적인 방안인 것으로 판단된다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Technology Innovation Porogram or Industrial Strategic Technology Development Program(10058015, The Development of Safety Management System of Welding-work Site in Shipyards Using Legacy-Line Communication of High Power) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea)

### REFERENCES

[1] N. C. Seong, J. H. Kim, and D. W. Yoon, "An Analysis of Relative humidity distribution as air flow rate variation in the

Underground utility pipe tunnel using CFD," *Proceedings of KIAEBS, Fall 2015 Academic Presentation Competition*, pp. 125-126, 2015.  
[2] S. W. Lee, Y. J. Sim, and G. T. Na, "A fundamental study on the development of feasibility assessment system for utility tunnel by urban patterns," *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, vol. 19, no. 1, pp. 11-27, Jan. 2017.  
[3] S. K. Kim, Y. S. Lee, D. E. Kim, W. S. Lim, and C. H. Lee, "Fire Detection Signal Processing Method Using Optical Fiber Linear Detector and the Development of an Optical Signal Processing Test Module," *Fire Science and Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 27-34, Apr. 2016.  
[4] G. Y. Jung, Y. H. Oh, and W. S. Song, "The study on Remote Monitoring System for Fault Indicator used in underground Distribution Line," *Proceedings of the KIEE Conference* pp. 667-669. 2005.  
[5] J. A. Kang, T. H. Kim, Y. S. Oh, and H. S. Choi, "Monitoring Method Using CCTV in Common Duct," *The Korean Association of Geographic Information Studies*, vol. 14, no. 4, pp. 1-12, Dec. 2011.  
[6] H. S. Kim, and K. R. Sohn, "Channel characteristics of multi-path power line using a contactless inductive coupling unit," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 40, no. 9, pp. 799-804, Nov. 2016.  
[7] W. B. Byun, B. S. Park, and T. Y. Lee, "Characteristics of inductive coupler for PLC(Power Line Communication)," *Proceedings of the KIEE Conference* pp. 1921-1923, 2005.  
[8] H. S. Kim, D. C. Lee, M. H. Kim, G. Lee, Y. W. Oh, and B. H. Min, "Study on Design and Application of an Inductive Coupler for Power Transmission Lin," *Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, vol. 23, no.3, pp. 234-239, March 2010.



주우진(Woo-Jin Ju)

2016년 2월: 경남대학교 정보통신공학과 (공학학사)  
2016년 3월 ~ 현재: (주)매트론, 연구원  
※관심분야 : 광대역 전력선 통신



**김현식(Hyun-Sik Kim)**

1998년 8월: 경남대학교 대학원 재료공학과(공학박사)  
1995년 3월 ~ 2000년 3월: 한국전기연구원, 선임연구원  
2000년 4월 ~ 현재: (주)매트론, 대표이사  
※관심분야: 광대역 전력선 통신, 나노 자성 재료