

스마트 FEMS를 위한 VLC기반 인버터 원격제어 연구

A Study on Remote Control of Inverter Based on VLC for SMART FEMS

이 정 훈* · 이 승 연* · 최 상 열** · 이 종 주*** · 김 형 오†

(Jung-Hoon Lee · Seung-Youn Lee · Sang-Yule Choi · Jong-Joo Lee · Hyung-O Kim)

Abstract - There is a high demand for energy efficiency improvement of factories that make up a large part of national electric energy. Therefore, research on smart FEMS technology for monitoring, analyzing and controlling energy consumption patterns is under way, but there is still a lack of research on detailed element technology for communication and control inside the factory. In this paper, we proposed OFDM VLC system based on MODBUS protocol for communication between gateways, sensors, and devices to implement smart FEMS in indoor factory environment. Assuming a conveyor belt load control, we validated the proposed system by simulating the inverter motor control and checking the performance.

Key Words : FEMS, Energy management, Channel, LED, Lighting communication

1. 서 론

2015년 파리 기후협약으로 인하여 세계적으로 온실가스 배출을 줄이고 에너지를 효율적으로 사용하기 위한 노력을 기울이고 있다. 독일은 Industrie4.0을 통해서 ICT와의 연동을 통해서 공정을 최적화하고 있고, 일본은 정부 주도로 에너지 합리화 사용 보조금을 지급하고, 중국은 '중국제조 2025'을 통하여 스마트 공장을 실현해가고 있다. 우리나라는 에너지의 사용이 필수적인 제조업 기반의 수출을 통해서 경제를 성장시키고 있으며 국가 전체 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있어, 에너지를 체계적으로 관리하는 스마트 FEMS(Factory Energy Management System)에 대한 연구 및 적용이 요구된다[1].

스마트 FEMS는 스마트 공장(Smart Factory)의 에너지관리부분에 해당하는 내용이며, 그림 1과 같이 공장의 조명, 공조기, 펌프, 컨베이어벨트 등 전력부하의 이용패턴을 분석하고 최적의 효율을 달성할 수 있도록 공장의 부하에 센서를 부착하여 구동 정보를 수집하고 로컬서버에서 정보를 취합하며 FEMS 서버에서 정보를 분석하여 공장의 부하 제어를 수행한다.

이 과정을 수행하기 스마트 FEMS의 요소기술인 센싱, 모니터링, 부하 패턴분석, 서버시스템, 제어, 통신 모두 중요하지만, 다

양한 현장의 통신 및 제어 기술은 스마트 FEMS 적용 측면에서 매우 중요한 항목이다. 공장 건물 외부에서 서버로의 데이터 전송은 광통신을 통해서 처리할 수 있으나, 공장 건물 내부의 다양한 부하에 유선으로 통신채널을 연결하여 구성하기에는 공장의 내부 환경을 인위적으로 제한하는 형태가 되므로 무리가 있다. 따라서 공장 내부에서 신뢰성있는 통신을 위해서 무선통신 방식을 고려해야 한다. 최근 널리 사용되고 있고 주목받고 있는 근거리 무선통신 방식은 표 1과 같이 무선랜(WiFi), 블루투스4.0(Bluetooth Low Energy), LoRa(Long Range), NB-IoT(Narrow Band IoT) 등이 있다. WiFi는 IEEE802.11 규격을 기반으로 하고 있고, 가정과 사람들이 모이는 공공장소에서 많이 사용된다. BLE는 주로 기기간 제어정보를 송수신하는 용도로 사용하고, LoRa는 장거리에서 데이터 송수신이 가능하여 단독으로 사용하는 IoT에 적용이 가능하고, NB-IoT는 3GPP 계열의 통신방식으로 ISM(Industry Science Medical) 주파수가 아닌 이동통신에서 사용하는 주파수 내에서 안정적으로 데이터 사용이 가능하다. VLC(Visible Light Communication)는 가시광을 이용하여 정현파 또

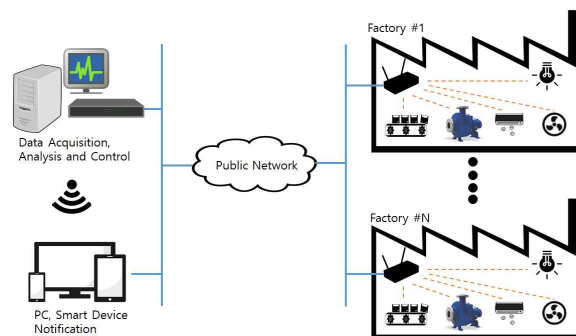


그림 1 스마트 FEMS 시스템

Fig. 1 Smart FEMS system

† Corresponding Author : Dept. of Automation, Korea Polytechnic I, Korea.

E-mail: hokim@kopo.ac.kr

* Dept. of Electrical Information Control, Dong Seoul University, Korea.

** Dept. of mechatronics, Induk University, Korea.

***Smart Power Grid Research Center, Advanced Power Grid Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute, Korea

Received : September 10, 2018; Accepted : September 19, 2018

표 1 근거리 무선 통신 방식간 비교

Table 1 Comparison between short-range wireless communication methods

	VLC	WiFi	BLE	LoRa	NB-IoT
Standardization	IEEE 802.15.7r1	IEEE 802.11	Bluetooth v4.0	LoRa Alliance	3GPP Rel.13
Bandwidth	400~800THz	20~100MHz	2MHz	125~500kHz	200kHz
Modulation	IMDD / OFDM	BPSK, 256QAM	GFSK	Chirp Spread Spectrum	QPSK, 16QAM
Band	Visible light	ISM	ISM	Unlicensed band	Licensed band
Characteristic	Indoor, High Data rate	Indoor, High Data rate	Device to Device Connection	Outdoor, Low Data rate	Outdoor, Low Data rate

는 구형과의 형태로 데이터를 전송하는 통신 방식이다. 실내조명 등 기존의 인프라를 이용 가능하여 저비용으로 설치가 가능하고 인체나 정밀기기에 영향이 적어 첨단기기가 설치된 스마트 공장에서 타 전자장치에 영향을 미치지 않고도 무선화가 가능한 장점이 있다. 또한 통신범위를 쉽게 알 수 있고, 차단하기 쉬우며 보이는 빛의 범위 내에서 다양한 디바이스와 통신이 가능하다 [2][3][4]. 무엇보다도 공장 내부의 조명이 LED로 변경되어 에너지 효율을 높이고 있으므로, 별도의 통신 채널을 사용하지 않고 LED(Light Emitting Diode)를 사용하는 것이 그 의미가 크다고 할 수 있다.

본 연구에서는 저탄소 친환경 소자인 LED조명을 이용하여 통신 기능을 수행하는 VLC를 소개하며 산업현장에서 많이 사용되고 있는 모드버스(MODBUS) 프로토콜을 VLC에 적용하여 인버터 제어가 가능한지 여부를 시뮬레이션을 통해서 분석하기 위하여 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 공장 실내 현장에서의 스마트 FEMS 구성을 알아보고, 3장에서 모드버스 프로토콜을 설명하고, 4장에서 VLC 통신의 채널 및 데이터 전송방식에 대해서 제안하고, 5장에서 모의실험을 통해서 제안한 결과를 확인하며, 6장에서 결론으로 마무리하러 한다.

2. VLC 기반 공장 실내 현장의 스마트 FEMS 구성

VLC 기반 실내 공장 현장에서의 스마트 FEMS 구성은 그림 2와 같다. 게이트웨이가 서버와 공장내부 센서 및 기기와의 연결을 위해서 공장내부 조명위치에 설치되며, LED조명을 통해서 센서 및 기기와 통신한다. LED 조명은 벽을 넘어서 전달될 수 없으므로, LED 게이트웨이는 실내 가시광이 미치는 영역마다 설치되어야 한다. 각 기기 및 센서와 게이트웨이가 연동하기 위해서 모드버스 프로토콜을 사용하고 물리층으로 LED 램프의 빛 신호를 사용한다.

공장 내부의 제어대상 부하는 환기팬, 컨베이어벨트, 공조기, 조명등이 있다. 스마트 FEMS 시스템은 공장내부 습도 및 먼지 센서의 측정값을 기반으로 유동적으로 환기팬을 조절, 생산라인의 제품품목 및 불량률에 따라 컨베이어벨트의 속도 조절, 온도 센서 측정값을 기반으로 공조기의 유동적 운전, 작업자가 활동 중일 때만 조명을 켜는 등의 제어를 수행한다.

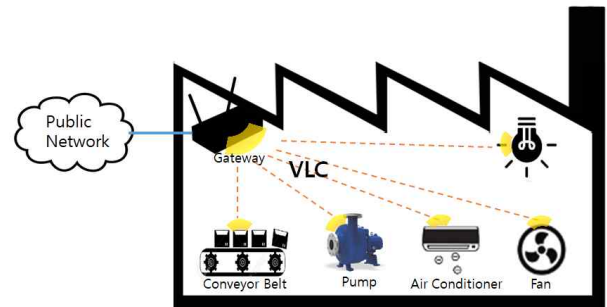


그림 2 VLC 기반 공장 실내의 스마트 FEMS 시스템

Fig. 2 Smart FEMS system in indoor base on VLC

3. MODBUS 프로토콜

모드버스는 제조설비, 센서, 기기 등을 제어할 수 있도록 1997년 Modicon(현 Schneider Electric)에서 개발한 시리얼통신 프로토콜이다. 약 240개의 장비들을 서로 연결하여, 온·습도, 장비상태 등의 센싱 데이터를 서버로 전송하고 기기들을 제어할 수 있고, SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 시스템에서도 모니터링 서버와 RTU (Remote Terminal Unit)를 연결하기 위해 적용되기도 하였다. 또한 자동화설비 제어에 널리 사용되는 PLC(Programmable Logic Controller)와 연동하여 그 유용함이 입증되었다. Schneider Electric에서는 모드버스 프로토콜을 공개하여 일반적으로 사용할 수 있도록 하였으며, 2004년 4월부터 프로토콜의 기능 개선과 추가구현 작업을 MODBUS Organization (<http://www.modbus.org/>)을 통하여 수행하여 왔다[5].

모드버스는 그림 3에서 보는 바와 같이 마스터 디바이스에서 슬레이브 디바이스에게 Query Message를 보내고 슬레이브 디바이스에서 응답하는 방법으로 통신을 수행한다. Query Message와 Response Message의 메시지프레임은 표 2, 표 3에서 보는 바와 같이 Address, Function, Data, Error check로 구성되는 4개의 메시지필드로 구성된다[6].

Address는 데이터를 전달하고자하는 기기 또는 센서의 목적지 주소를 의미하고, Function은 해당 기기에서 세팅, 동작 또는 값을 읽어오는 등의 미리 정해진 명령을 채우고, Data는 Function과 관련하여 세팅 값, 어드레스 주소 등 추가적인 정보를 제공할

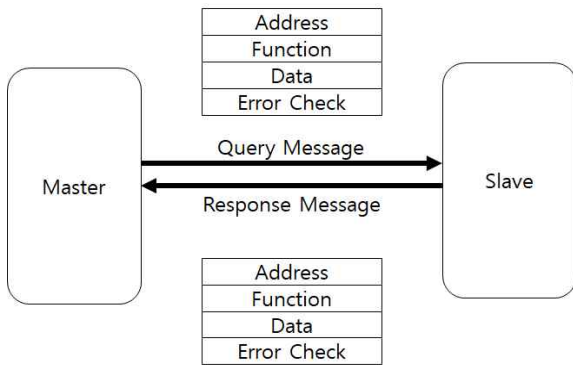


그림 3 MODBUS-RTU 통신메시지 프레임

Fig. 3 MODBUS-RTU Comm. Message Frame

표 2 MODBUS Query 메시지 프레임

Table 2 MODBUS Query Message Frame

Field	Size	Contents
Address	8bit	Station Number(0~247)
Function	8bit	Function Code to slave
Data	n×8bit	Data will be filled with Function related Code
Error Check	16bit	Error Checks

표 3 MODBUS response 메시지 프레임

Table 3 MODBUS response message frame

Field	Size	Contents
Address	8bit	Slave station number
Function	8bit	Requested function code (0x80 ; Error Occurred)
Data	n×8bit	Data will be filled with function related Code
Error Check	16bit	Error Checks

필요가 있을 때 제공하며, Error check는 전체 프레임의 에러 유무를 판단하기 위해서 계산된 값을 넣는다. 스마트 FEMS 용도로 사용될 경우 주로 마스터에서 센서의 값을 읽어오는 명령을 슬레이브에 내리고, 해당 값을 슬레이브로부터 회신받으며 이후 제어를 위한 명령을 슬레이브에 전달하는 순서로 통신이 진행된다.

마스터의 Query Message가 슬레이브에 제대로 수신되었을 경우, 슬레이브는 Response Message의 Function Code 필드에 마스터가 송신한 Query Message의 Function Code를 복사하고, 이상 수신 했을 경우 Query Message의 Function Code에 “80h”의 값을 채워서 회신한다. 마스터는 Response Message의 Function Code 또는 일정시간동안 회신이 없을 경우에 통신 에러로 판단한다. 그리고 슬레이브는 Query Message 수신 후 3.5바이트에

해당하는 시간 이상동안 Message가 수신되지 않는 것을 확인한 후에 Response Message를 전송한다.

4. VLC 통신

4.1 VLC 통신채널

실내에서의 LED를 이용한 VLC 통신은 게이트웨이와 부하 기기 또는 센서 간의 정보교환을 위한 통로이며, 빛을 이용하여 데이터를 전송한다. 실내 게이트웨이 송수신기는 그림 2에서 보는 바와 같이 주로 천정에 위치한 조명을 이용하지만 경우에 따라서 위치 변경이 가능하다.

통신채널의 특성은 주로 감쇠성분과 다중경로 페이딩의 시간 지연의 영향을 수치화한다. 천정에서 전송되는 송신되는 빛은 부하에 직접 전달되는 것과 실내의 벽에 반사되어 도달하는 것으로 구분되며, 송신부를 $L(t)$, 수신부를 $R(t)$, 채널을 $h(t)$, 컨벌루션 수식을 *, 잡음을 n 이라하면 식 (1)과 같이 표현된다. 채널 $h(t)$ 는 j 번째 감쇠 변수를 e_j , 시간 지연을 τ_j 라 하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[7].

$$R(t) = eL(t) * h(t) + n \quad (1)$$

$$h(t) = \sum_{j=1}^z e_j \delta(t - \tau_j) \quad (2)$$

다중경로에 의한 특성은 식 (3)의 평균초과지연(Mean Excess Delay, $\bar{\tau}$), 식 (4)의 rms(root mean square) 지연확산(σ_τ)으로 나타내며, 평균초과지연은 지연시간에 수신신호 가중치를 적용한 것이고, rms 지연확산은 신호가 얼마나 퍼져 있는가를 나타내는 지표이다[7].

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_j e_j^2 \tau_j}{\sum_j e_j^2} = \frac{\sum_j P(\tau_j) \tau_j}{\sum_j P(\tau_j)} \quad (3)$$

$$\sigma_\tau = \sqrt{\bar{\tau}^2 - (\bar{\tau})^2} \quad (4)$$

공장 실내 영역에서의 빛에 의한 통신이므로 지연확산에 의한 영향이 크지 않음을 고려하여 본 논문에서는 감쇠에 의한 부분만 고려하도록 한다.

4.2 OFDM기반 VLC 통신 시스템

공장 환경에서는 VLC를 센싱 및 제어정보를 전달하는 통신수단 뿐만 아니라 고속의 데이터를 전송하는 통신채널로 사용할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 그림 4와 같은 OFDM 기반의 LED 통신 시스템을 제안한다.

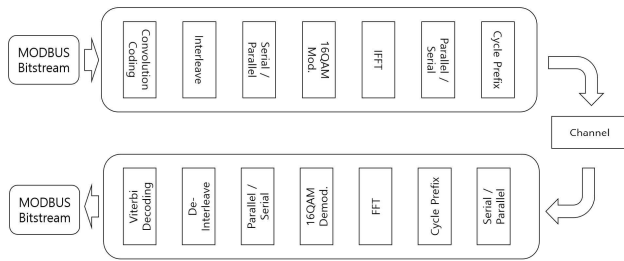


그림 4 OFDM기반 VLC 통신 시스템
Fig. 4 VLC Comm. System based on OFDM

송신단은 모드버스 데이터 비트를 컨볼루션 채널코딩, 인터리빙, S/P(Serial to parallel)처리 후 16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)으로 변조하고 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 수행한다. CP를 추가하고 전송되는 OFDM 신호의 n 번째 샘플링 수식은 식 (5)와 같다. N 은 부반송파 개수, X_k 는 IFFT로 입력되는 데이터를 의미한다.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j2\pi nk/N} \quad (5)$$

수신단에서는 송신과정에서 거친 역순으로 복호를 진행한다. S/P(Serial to Parallel), CP제거, FFT를 거친 후 복원한 X_k 는 식 (6)과 같다.

$$X_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} x_m \exp\left(\frac{-j2\pi km}{N}\right) \quad (6)$$

이후 16QAM 복조, P/S(Parallel to Serial) 변환, 디인터리빙, 비터비 디코딩을 통해서 모드버스 데이터를 복호한다.

5. 모의실험 및 성능분석

공장 실내의 제어대상 중에서 인버터를 이용한 컨베이어벨트를 속도제어 하는 것을 모드버스 프로토콜을 이용하여 VLC 통신 기반으로 모의실험하고 성능분석을 하였다.

5.1 인버터 모드버스 프로토콜

시뮬레이션에서 대상으로 하는 인버터는 생산현장에서 널리 활용되고, RS-485, PROFIBUS, PROFINET, 이더넷 등 다양한 통신 인터페이스를 제공 미츠비사의 FR-E700으로 선정했다. 시뮬레이션에 사용될 모드버스 제어 데이터는 표 4의 정회전 요청 메시지 프레임, 표 5의 회전주파수 설정 메시지 프레임으로써 해당 데이터를 연속해서 전송하는 것으로 설정하였다.

모드버스 메시지는 비트스트림 형태를 가지게 되며 이를 그래프로 표시하면 그림 5와 같다. 앞의 64비트는 정회전을 의미하고

표 4 인버터 정회전 메시지 프레임

Table 4 Inverter Message Frame for Fwd. Rotation

01	06	00	08	00	02	89	C9
Slave station No	Function code	Start address		Forward rotation		Error check	

표 5 인버터 회전주파수 50Hz 메시지 프레임

Table 5 Inverter Message Frame with 50Hz

01	06	00	0D	13	88	15	5F
Slave station No	Function code	Start address		Forward rotation		Error check	

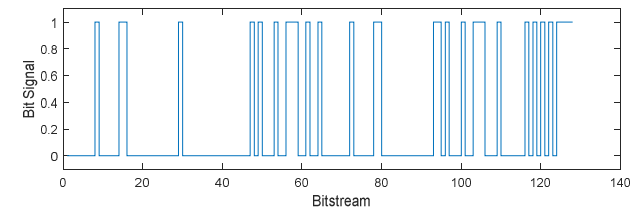


그림 5 MODBUS-RTU 통신메시지 비트 스트림
Fig. 5 MODBUS-RTU Comm. Message Bit Stream

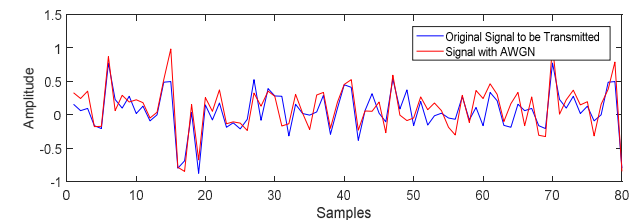


그림 6 OFDM 신호와 AWGN적용 신호 비교
Fig. 6 Comparison between OFDM Signal and AWGN

후반 64비트는 50Hz 동작을 의미한다.

5.2 VLC 통신 시뮬레이션

스마트 FEMS 환경에서 모니터링 및 제어의 가능성을 확인하기 위해서 5.1에서 도출한 모드버스 프레임을 이용하여 OFDM 기반 LED 통신 시뮬레이션을 매트랩을 이용하여 수행하였다. OFDM기반 VLC통신 시스템의 구성은 64개 서브캐리어, 컨볼루션 코딩과 비터비 디코딩, 96비트의 프레임 크기, 전체 프레임은 100개, 16QAM 모듈레이션 16비트 사이클 프리픽스를 사용하였다.

그림 4와 같이 OFDM Modulation을 거친 신호는 그림 6의

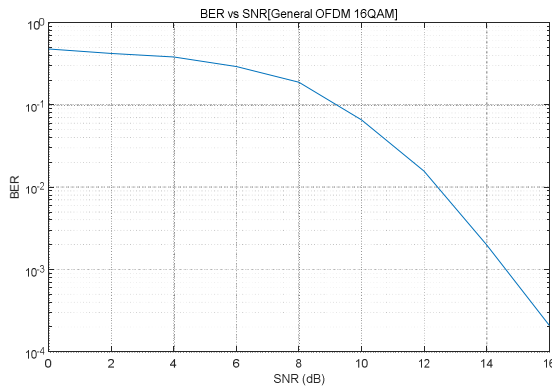


그림 7 일반 16QAM OFDM 시스템의 BER
Fig. 7 BER of General OFDM with 16QAM

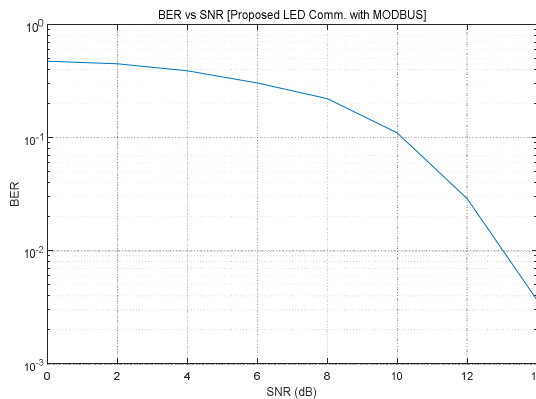


그림 8 Proposed LED통신 시스템의 BER
Fig. 8 BER of Proposed LED Comm

파랑색 실선과 같으며, 여기에 AWGN(Additive white Gaussian noise)을 적용한 신호는 붉은색 신호와 같다. 이때 SNR(Signal to Noise Ratio)은 4dB로 적용하였다.

제안 시스템과 유사한 16QAM과 OFDM 송수신기를 AWGN 환경에서 BER(Bit Error Rate)성능을 시뮬레이션한 이상적인 결과는 그림 7과 같으며 SNR 14dB에서 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 BER로 수렴하였다.

또한 제안하는 OFDM기반 VLC 통신 시스템에 모드버스 메시지를 적용하여 AWGN 환경에서 BER 성능평가를 한 결과 그래프는 그림 8과 같으며, SNR 14dB에서 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 의 BER로 수렴하였다. 두 결과를 비교하면 매우 유사한 성능을 보였으며, 제안하는 OFDM기반 VLC 통신 시스템의 성능이 비교적 안정적인 것을 확인할 수 있었고 공장 자동화에 많이 사용되고 있는 모드버스 통신 프로토콜이 적용하기에 적합한 것을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 실내 공장 환경에서 스마트 FEMS를 적용할 수 있도록 게이트웨이와 센서, 기기간의 통신을 모드버스 프로토콜 기반의 OFDM VLC 방식으로 제안하였다. 컨베이어벨트 운전을 가정하고 인버터 제어의 예를 실제로 모의 실험하여 성능확인을 함으로써 제안한 시스템의 유효성을 입증하였다. 본 논문이 VLC를 이용한 스마트 FEMS 및 공장(Factory) 분야 연구의 중요한 초석이 될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 동서울대학교 산학협력단 부설 연구지원센터의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Sun Kyung Huh, "Current Status and Implications of Energy Efficiency in Domestic and Foreign Manufacturing Industries Using FEMS", *KIET Report*, pp. 38-41, Sep. 2017.
- [2] Dongwan Kim, Sung-Pill Choi, Jong-Wook Kim, Byoungkwon Park, "A Study on the Wireless Communication Technology for Smart Factory", *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp. 930-931, June 2017.
- [3] Cha Jae Sang, "IEEE 802.15.7r1 OWC TG Standardization Status and forecast", *Telecommunication Technology Association*, https://www.tta.or.kr/data/weekly_view.jsp?news_id=4770.
- [4] Jang Young min, "Current status of IEEE 802.15.7r1 OWC Standardization", http://vlca.net/site/wp/wp-content/uploads/2016/01/2015_10_26_YeongMinJangICEVLC2015C.pdf.
- [5] Youngmin Kim, "Remote system monitoring and data visualization built with ubuntu", <http://system-monitoring.readthedocs.io/en/latest/modbus.html>.
- [6] Mitsubishi Electric, "Servo AMP Technical Note (MODBUS-RTU Communication)", [http://www.famotech.com/Board/data_data/MR-J4-A-RJ\(Modbus\).pdf](http://www.famotech.com/Board/data_data/MR-J4-A-RJ(Modbus).pdf).
- [7] Jung Hoon Lee, "A Study on VLC Channel Modeling under Indirectness Light", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol. 38C, No. 8, pp. 706-712, August 2013.

저 자 소 개



이 정 훈 (Jung-Hoon Lee)

2001년 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 석사. 2012년 : 서울과학기술대학교 IT정책 전문대학원 박사. 2015년~현재 : 동서울대학교 전기정보제어학과 교수.

〈관심분야〉 배전설비제어, 디지털통신, 무선통신, LED-IT 응용기술, 차세대 이동통신기술



이 승 연 (Seung-Youn Lee)

2001년 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 석사. 2006년 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 박사. 2006년~2007년 : Georgia Institute of Technology Post. Doc. 2008년~현재 : 동서울대학교 전기정보제어학과 교수

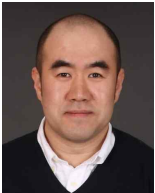
〈관심분야〉 전기기기, 차세대 이동통신기술



최 상 열 (Sang-Yule Choi)

1998년 : 성균관대학교 전기공학과 석사. 2002년 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 박사. 2004년~현재 : 인덕대학교 메카트로닉스공학과 부교수

〈관심분야〉 머신러닝, 직접부하제어, 자동화 시스템



이 종 주 (Jong-Joo Lee)

2001년 : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 석사. 2001년~2004년 새터정보통신(주) 개발팀장. 2005년~2007년 성균관대학교 정보통신융합신기능성소재및공정연구소 연구원. 2008년 성균관대학교 정보통신공학부 대학원 정보통신공학부(공학박사). 2008년~현재 한국전기연구원 차세대전력망연구본부 스마트전력망연구센터 선임연구원

〈관심분야〉 : 전력계통 신호처리 및 실시간 시뮬레이션, 임베디드 시스템



김 형 오 (Hyung-O Kim)

2003년 2월 : 전남대학교 일반대학원 석사.

2016년 2월 : 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원 박사. 2016년 12월 ~현재 : 한국폴리텍 I 대학 성남캠퍼스 자동화시스템과 교수

〈관심분야〉 자동 제어, 영상 처리, 머신러닝