

논문 2019-14-06

산업용 필드버스 기반의 안전 펜스 시스템 개발 및 성능 평가

(Implementation and Performance Evaluation of Safety Fence System Based on Industrial Fieldbus)

이 승 용, 임 선*
(Seung-Yong Lee, Sun Lim)

Abstract : Recently, the importance of industrial fieldbus has been highlighted since the emergence of Industry 4.0. In particular, the Ethernet-based fieldbus protocol is actively used in automation systems. This paper proposes a safety fence system based on EtherCAT, a type of Ethernet-based fieldbus, to measure external loads. In order to measure the external loads, a force sensor was connected to an EtherCAT slave that transmits the sensor data to an EtherCAT master in real-time. The master ultimately controls the angle of the safety fence when it detects danger based on the given data. In the future, more efficient safety fence system will be developed by using a HMI system to communicate with the EtherCAT master to manage safety and by employing multiple sensors to increase the accuracy of the fence system.

Keywords : EtherCAT, Fence monitoring, Open-Source, Industrial fieldbus

1. 서 론

최근의 산업용 필드버스는 Industry 4.0의 주요 기술로 각광받고 있으며 새로운 요소기술들이 활발히 개발되고 있다. 그 사례로 과거의 자동화 공정에서 많이 사용되던 Profibus, CAN, CC-Link 등에서 최근에는 TSN (Time Sensitive Networking), 실시간 기반의 WRAN, 무선 네트워크 기반의 I/O 등으로 기술영역이 확장되고 있다. 그 중 표준 이더넷 기반의 산업용 필드버스 기술은 과거 필드버스의

*Corresponding Author (sunishot@keti.re.kr)

Received: Aug. 13 2018, Revised: Oct. 8 2018,

Accepted: Dec. 18 2018.

S.Y. Lee, S. Lim: Korea Electronics Technology Institute

※ 본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2018년도 문화기술 연구개발 지원 사업으로 수행되었음.

※ 본 연구는 2018년 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (블레이드 신뢰성 확보를 위한 on-site 비파괴 검사 자동화 기술개발 -20173010024950)

낮은 대역폭과 시스템 구축비용 등의 문제를 해결하여 자동화 공정의 핵심 네트워크로 자리 잡아 왔다. 특히 이더넷 기반 산업용 필드버스는 100Mbps 이상의 높은 대역폭과 표준 이더넷 프로토콜이나 케이블을 그대로 재사용하기 때문에 시스템 확장성과 유연성을 높일 수 있었다. 대표적인 이더넷 기반의 산업용 필드버스인 EtherCAT [1]은 다른 필드버스와 비교하였을 때 Minimum Cycle Time과 지터 측면에서 높은 성능을 보임을 확인되었다. 특히, EtherCAT에서 제공하는 DC (Distributed Clock) 기술은 추후 본 논문에서 개발한 시스템과 같이 수십 개의 EtherCAT Slave를 제어할 때 높은 동기성능으로 제어가 가능하기 때문에 필드버스 시장에서 높은 점유율을 유지하고 있다.

일반적인 펜스는 공연장과 행사장같이 실내외 장소에서 효율적인 안전 관리를 위해 사용된다. 그러나 기존의 펜스는 별도의 하드웨어나 소프트웨어 없이 기구적으로 제작되어왔다. 최근에는 이러한 펜스에 압력 센서, 카메라 등을 부착하여 외부의 침을 감지하거나 주기적으로 펜스에 작용되는 외력을 측정하는 제품들이 개발하고 연구되어 왔다 [2-4]. 그러나 기존 제품들은 저속의 시리얼 통신으로 개

발되어 효과적인 모니터링 기능을 제공하지 못하고 있다.

본 논문에서는 이를 개선하기 위해 산업용 임베디드 보드 및 산업용 필드버스를 적용한 새로운 안전펜스 시스템을 제안한다. 이를 통해 펜스에 작용되는 외부 하중을 실시간으로 인식하고 이를 관리자에게 효과적으로 모니터링을 할 수 있는 네트워크를 개발하여 관리의 효율성을 증가시킬 수 있는 통합 펜스 시스템을 개발할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 산업용 필드버스와 관련된 연구배경을 서술한다. 3장에서는 본 논문에서 제시하는 안전 펜스 시스템의 기술개발에 대하여 제시한다. 4장에서는 이와 관련된 성능 평가를 진행 후 5장에서 본 논문을 마친다.

II. 연구 배경

최근의 산업용 필드버스와 관련된 연구는 Industry 4.0 흐름에 따라 이를 어떻게 만족시킬 수 있는지를 기준으로 진행되어 오고 있다 [5, 6]. 1990년대의 산업용 필드버스는 특정 제조사마다 별도의 케이블이나 프로토콜 등 각기 다른 사양으로 인해 주로 제조업 회사들에 의해 개발되어 왔으며 그 중 PROFIBUS DP, Modbus, CC-Link, CAN 등이 현재까지 높은 점유율을 유지하고 있다. 그러나 2000년대 들어 IoT (Internet of Things), CPS (Cyber Physical System) 등의 새로운 ICT 트렌드가 등장하면서 새로운 필드버스에 대한 요구사항이 증가하게 되었다. 이 중 표준 이더넷을 기반으로 하는 산업용 필드버스 기술들이 개발되어왔으며 대표적으로 POWERLINK, PROFINET, EtherCAT, Ethernet/IP [5] 등이 있다. 이런 필드버스의 공통점은 이더넷 표준을 수정하여 개발하였기 때문에 100Mbps 이상의 대역폭과 케이블의 공용화, 프로토콜의 표준화 등의 성능이 많이 개선되어 왔다. 특히 최근 공장 자동화 시스템이나 분산시스템에서는 실시간 이더넷 기반의 필드버스 적용이 활발히 이루어지고 있으며 그와 관련된 비교 성능 평가 연구가 진행되어 왔다 [6].

최근에는 IIoT (Industrial IoT)이나 Industrial 4.0이 화두가 되면서 표준 무선 통신 기술에 실시간성을 만족시킬 수 있는 기술 [7]과 MES, SCADA를 지원하기 위한 미들웨어 솔루션들이 연구 개발되고 있다. 그 중 OPC UA (Open Platform Communication Unified Architecture)는 과거 디바이스 간의 통신이나 디바이스와 사용자의 통신을

위해 개발된 OPC (OLE for Process Control)에서 표준화된 기술로 최근 4차 산업혁명과 공장자동화와 함께 부각되는 사양으로 다양하게 연구되고 있다. 이러한 표준 기반 프로토콜을 활용하여 스마트 공장뿐만 아니라 스마트 그리드 시스템에 대해서도 적용 [8]하여 확장성을 확인하였으며 내부적으로 OPC UA가 제공되고 있는 서비스 [9]와 사용자에게 의해 설정된 프로토콜이나 보안 옵션 등에 따른 상세한 성능평가 [10] 또한 연구되어 왔다.

위에서 제시한 이더넷 기반의 산업용 프로토콜 중 EtherCAT과 POWERLINK는 가장 빠르게 성장하는 프로토콜이다. 그 중 EtherCAT은 MCT (Minimum Cycle Time)와 지터를 고려하였을 때 더 높은 성능을 보임을 확인하였다. [1] 지터의 정의는 다음과 같다. 실시간 통신은 정해진 매 주기마다 송수신이 반복되는데 이때 시작이 예상되는 시점과 실제 실행 시점과의 차이를 의미하며 일반적으로 지터가 낮을수록 복잡한 모션이나 다축 제어가 가능함을 의미하게 된다. EtherCAT은 On-the-fly라는 개념을 적용하여 많은 EtherCAT Slave를 통신하는데 있어 낮은 오버헤드를 가져 높은 MCT 성능을 가질 수 있다. 또한 다른 필드버스와 다르게 Slave 간의 시간 동기화 기법인 DC (Distributed Clock)기술을 적용하여 낮은 지터 특성을 보인다 [11].

본 논문에서는 문화 공연장이나 행사장에서 설치되는 펜스에 산업용 필드버스를 적용한 안전 펜스 시스템을 제안한다. 안전 펜스 시스템은 외부 하중을 검출하기 위한 센서와 이를 통합 시스템에서 모니터링을 하기 위해 산업용 필드버스를 기반으로 통신하도록 설계하였다. 기존의 펜스는 외부 하중에 대한 인식이 불가능하므로 외부 관리 인력이 현장 곳곳에 배치되어 관리 및 감독되어 왔다. 이에 따라 펜스에 작용되는 하중을 감지하고 통합적으로 관리할 수 있는 제어 시스템을 개발하여 관리의 효율성과 최소의 인원으로 대규모 공연장을 관리할 수 있는 장점을 가질 수 있다.

III. 안전 펜스 시스템

1. 안전 펜스 시스템의 구현

안전 펜스 시스템의 전체 구조는 그림1과 같다. 안전 펜스 시스템은 사용자 모니터링 PC와 연결되는 주 임베디드 제어기인 GMC (General Motion Controller)와 보조 임베디드 제어기인 DSP (Digital Signal Processor)로 구성된다. 이와 같이 이중 제

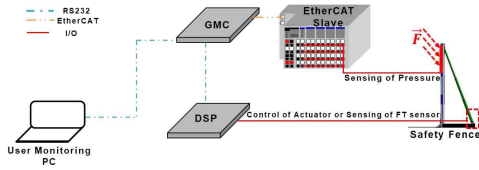


그림 1. 안전 펜스 시스템
Fig. 1 Safety Fence System

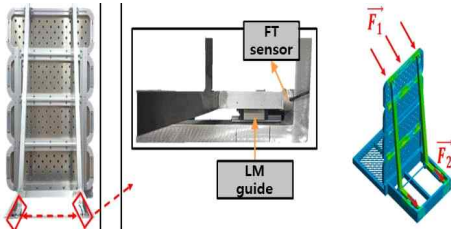


그림 2. ISM가 적용된 안전 펜스 시스템
Fig. 2 Safety Fence System with ISM

어기 구조로 시스템을 구현하여 주 제어기의 시스템 오버헤드와 하드웨어의 복잡성을 낮출 수 있다.

안전 펜스 시스템의 GMC 임베디드 제어기는 안전 펜스에 내제된 하중 센서를 이용하여 외부 하중을 감지하며 이를 직접 방식의 센싱인 DSM (Direct Sensing Mode)이라 정의한다. DSM 방식은 중간 단계 없이 직관적으로 하중을 감지하므로 외부 하중 작용 위치, 크기를 정확하게 판단할 수 있다.

시스템의 보조 제어기 역할을 하는 DSP는 안전 펜스의 정확한 하중 검출을 위한 보조적인 기능을 담당한다. 예를 들어 펜스 지지대의 액추에이터의 홀 센서나 FT (Force Torque)센서를 이용하여 펜스에 작용되는 하중을 간접적으로 감지할 수 있으며, 이를 간접 방식의 센싱인 ISM (Indirect Sensing Mode)이라 정의한다. 그림2는 FT 센서를 이용한 ISM의 한 예를 나타내며 실제 이와 관련한 실험 결과는 4장에서 제시하고 있다.

2. 오픈 소스 기반의 안전 펜스 시스템

본 논문의 주 제어기 시스템을 개발하기 위해 본 저자는 오픈 소스를 이용한 제어기를 개발하였다. 오픈 시스템이란 다른 시스템과의 재사용이 용이하고 전체 시스템이 유연하게 개발될 수 있는 시스템으로 정의할 수 있다. 최근의 오픈 소스의 제어 시스템은 활발히 이용되고 있으며 본 논문에서는 범용 소프트웨어를 이용하여 GMC 시스템을 개발하였다. 첫 번째로 범용 리눅스를 이용하여 GMC 운

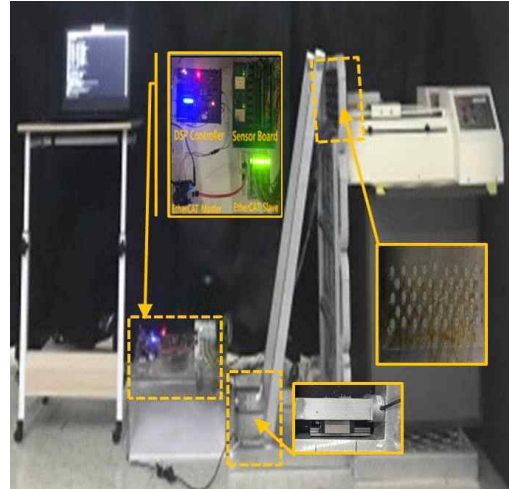


그림 3. DSM과 ISM 적용된 안전 펜스 시스템
Fig. 3 Safety Fence System with DSM and ISM

영체제 이식 후 Xenomai RTOS [12]를 이용하여 실시간 제어가 가능하도록 확장하였다. 범용 리눅스는 기본적으로 Best-effort 방식의 태스크 스케줄링으로 처리되므로 실시간 성능을 만족시킬 수 없다. Xenomai RTOS는 Adeos 마이크로 커널이 별도로 구현되어 있어 리눅스 커널의 간섭 없이 실시간 태스크를 별도로 제어할 수 있어 높은 실시간 성능을 보임을 확인되었다 [13, 14]. 두 번째로 DSM 방식을 구현하기 위해 산업용 필드버스의 하나인 EtherCAT 프로토콜을 채택하였다. EtherCAT은 이더넷 기반의 산업용 필드버스 중 하나로 1us이하의 높은 정밀도로 제어가 가능한 특징이 있다. 또한 여러 토폴로지 형태로 제어 시스템 구성이 가능하며 최대 65,535개의 디바이스 노드 개수와 100m까지의 물리적 거리까지 허용할 수 있는 확장성을 제공하고 있다. 본 논문에서는 이를 구현하기 위해 IgH EtherCAT Master Stack [15] 오픈 소스를 사용하였다. IgH Stack은 기존의 OSI 7 Layer를 수정한 Layer 계층을 사용하여 높은 실시간 성능을 만족할 수 있는 실시간 통신을 가능하게 한다. GMC의 cpsw 이더넷 드라이버를 수정하여 IgH Stack을 사용할 수 있게 수정하였다.

그림1과 같이 본 논문에서는 안전펜스의 DSM 방식을 구현하기 위해 EtherCAT 필드버스를 사용한다. 본 논문에서 개발된 안전펜스의 상단의 크기는 가로 100cm 및 세로 50cm이며 약 40개의 센서가 부착된다. 그렇기 때문에 수십 개의 안전펜스가 설치될 경우에는 대량의 센서 데이터가 수집되

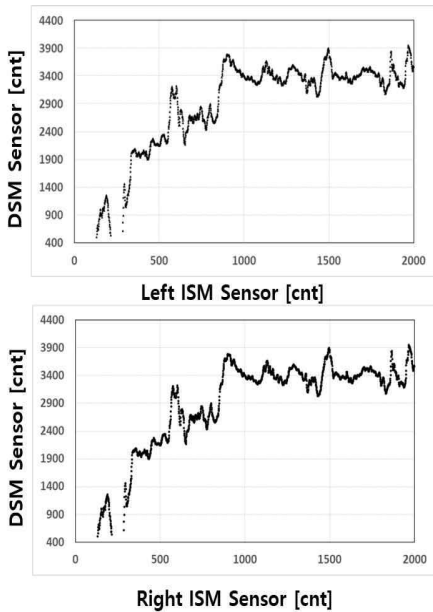


그림 4. DSM과 ISM 실험 결과

Fig. 4 Experiment Result of DSM and ISM

어야 하기 때문에 고속의 실시간 필드버스가 필요함을 알 수 있다. 만약 이를 무선 통신이나 저속의 필드버스를 사용한 경우 실시간으로 모니터링 하기에는 한계가 있어 안전 문제에 취약할 수 있다.

III. 성능평가

본 절에서는 3장에서 제시한 안전 펜스 시스템의 EtherCAT 정밀도를 측정하며, DSM과 ISM 사이의 연관성 분석 그리고 DSM과 액추에이터 사이의 하중 감쇄 효과 등을 분석한다. 실험을 위한 환경은 다음과 같다. 주 제어기는 TI社의 BeagleBoneBlack 상용 임베디드 보드에 Linux 3.10.37과 Xenomai 2.6.3 RTOS를 이식하였다. 또한 IgH EtherCAT Master Stack은 1.5.2 Version의 소스를 사용하였다. 보조 제어기는 TI社의 TMS320F28335 테스트 보드를 사용하였다.

1. DSM과 ISM 성능 평가

그림3은 FlexiForce™ A401 센서와 ROBOTUS FT센서를 이용하여 DSM과 ISM를 적용한 안전 펜스 시스템의 구현 사례를 나타낸다. A401 하중 인식 센서가 내제된 펜스 상단에는 가압기에 의해 외력이 집적 작용하며 이는 펜스 하단에 장착된 LM

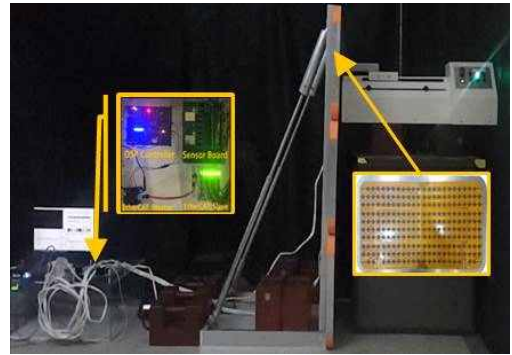


그림 5. 유연한 구조가 적용된 안전 펜스 시스템

Fig. 5 Safety Fence System with Flexible Construction

가이드에 의해 간접적으로 FT 센서에 가압된 힘을 측정할 수 있다. 이에 대한 DSM과 ISM의 상관관계 실험 결과는 그림4와 같다. 그림4를 보면 약 1000cnt 까지는 직접 센서 및 간접 센서가 서로 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이는 직접 센서를 대체하여 간접 센서를 사용하여도 무방함을 의미한다. 또한 직접 센서가 인식하지 못하는 하중이 작용하여도 간접 센서에서는 인식됨을 알 수 있다. 압력 센서인 경우, 일반적으로 인식할 수 있는 외력이 100N 넘기 위해서는 별도의 센서 보드를 제작하여야 하기 때문에 FT 센서를 사용하여 이를 쉽게 대체할 수 있다.

2. 유연한 구조의 안전 펜스 시스템 성능 평가

그림5는 펜스의 외부 허용 하중을 높이기 위한 유연한 구조를 갖는 안전 펜스 시스템의 구현 사례를 나타낸다. 4.1장의 실험을 개선하기 위해 2장 실험에서는 MFS (Micro Force Sensor)를 사용하였다. MFS는 기존 A401센서에 비해 하중 감지 해상도 (Resolution)이나 외부 온도도, 센서 수명 등의 장점이 가진 센서이다.

유연한 구조의 정의란, 펜스에 작용되는 외부 하중이 일정 임계치에 도달하면 안전 펜스의 각도를 조절하여 작용되는 하중의 크기를 줄이는 방식을 말한다. 이를 통해 기구적으로만 가지는 허용 하중의 크기를 좀 더 향상시키는 장점을 가질 수 있다. 실제 이를 실험을 통해 증명하였으며 결과는 그림6과 같다. 실험 그래프 x축은 10msec 시간이며 y축은 현재 압력이다. 그림6의 위 그래프는 좌측 MFS에 의해 측정된 평균 하중이며 아래 그래프는 우측 MFS에 의해 측정된 평균 하중이다. 두 그래프 모

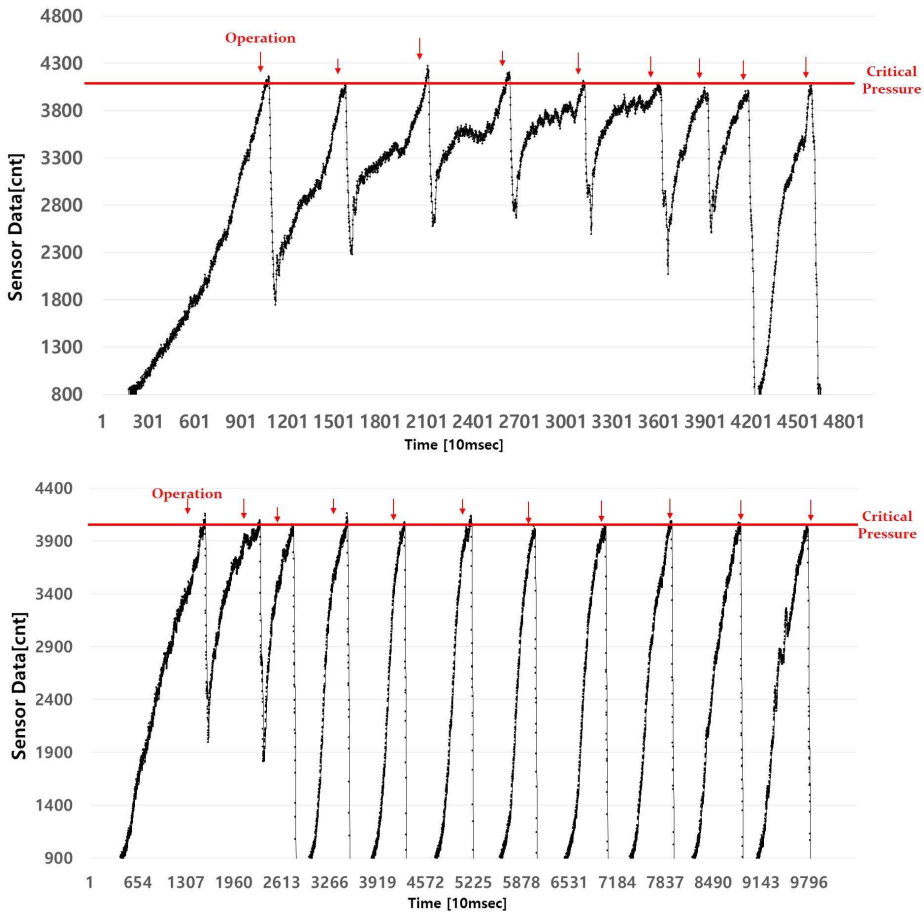


그림 6. 유연한 펜스 구조 실험 결과

Fig. 6 Experiment Result of Flexible Fence construction

두 작용된 하중이 증가하다가 임계치 값에 도달하면 펜스의 기울기를 제어하여 펜스에 작용된 하중을 감소가 됨을 보인다. 이를 통해 안전 펜스의 허용하중을 더욱 높일 수 있으며 유기적으로 펜스의 기울기를 조절하여 안전 효과도 함께 가질 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 외부 하중을 감지하기 위해 산업용 필드버스를 적용한 안전 펜스 시스템을 제안한다. 이러한 기술 개발을 통해 관리의 효율성을 개선할 수 있으며 또한 행사장과 공연장에서의 안전성을 높일 수 있다. 안전 펜스 시스템의 주제어기와 보조 제어기는 상용 임베디드 보드를 이용하여 개

발하였으며 실시간 운영체제, EtherCAT 모두 오픈소스 기반으로 개발하여 시스템 개방성을 높일 수 있었다. 펜스 시스템의 주 제어기는 펜스 정면에 부착된 센서를 통해 하중을 직접 감지하며 보조 제어기는 FT센서나 액추에이터를 통해 간접적으로 감지할 수 있다. 본 논문의 4장에서는 이러한 이중 구조에 대한 성능평가를 진행하였으며 유연한 구조에 대한 효율성 또한 확인하였다.

추후 연구로는 여러 펜스 기구를 제작하여 DSM과 ISM방식의 상관관계, DSM과 유연한 구조에 대한 상관관계를 분석할 것이다. 또한 다섯 개 이상의 펜스를 연결하였을 때 외부 하중 조건에 대해 다양하게 분석할 것이며 특히, EtherCAT Slave가 증가함에 따라 변화하는 산업용 네트워크 성능에 대해 연구 예정이다.

References

- [1] L. Seno, S. Vitturi, C. Zunino, "Real Time Ethernet Networks Evaluation Using Performance Indicators," Proceedings of IEEE Emerging Technologies & Factory Automation, pp. 1-8, 2009.
- [2] "MOJO fence," Available on : <https://www.mojobarriers.com/>
- [3] Seok-Jun Yun, Hiesik Kim, Yong-Cheol Lee, "Implementation of Intrusion Monitoring System to Operate Optimum by Using Electronic Security Fence of Friction Electricity Sensor," Proceedings of International Coastal Symposium, pp. 85-87, 2015.
- [4] G. Wittenburg, K. Terflath, F. Villafuerte, T. Naumowicz, H. Ritter, J. Schiller, "Fence Monitoring - experimental Evaluation of a Use Case for Wireless Sensor Networks," Proceedings of European Conference on Wireless Sensor Networks, pp. 163-178, 2007.
- [5] M. Wollschlaeger, T. Sauter, J. Jasperneite, "The Future of Industrial Communication: Automation Networks in the Era of the Internet of Things and Industry 4.0," Journal of IEEE Industrial Electronics Magazine, Vol. 11, No. 1, pp. 17-27, 2017.
- [6] J. Jasperneite, M. Schumacher, K. Weber, "Limits of Increasing the Performance of Industrial Ethernet Protocols," Proceedings of IEEE Emerging Technologies and Factory Automation, pp. 17-24, 2007.
- [7] J. Kjellsson, A.E. Vallestas, R. Steigmann, D. Dzung, "Integration of a Wireless I/O Interface for PROFIBUS and PROFINET for Factory Automation," Journal of IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 10, pp. 4279-4287, 2009.
- [8] S. Lehnhoff, S. Rohjans, M. Uslar, W.Mahnke, "OPC Unified Architecture: A Service-oriented Architecture for Smart grids," Proceedings of IEEE Press the First International Workshop on Software Engineering Challenges for the Smart Grid. pp. 1-7, 2012.
- [9] A. Girbea, C. Suciuc, S. Nechifor, F. Sisak, "Design and Implementation of a Service-oriented Architecture for the Optimization of Industrial Applications," Journal of IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 1, pp. 185-196, 2014.
- [10] S. Cavalieri, F. Chiacchio, "Analysis of OPC UA Performances," Journal of Computer Standards & Interfaces, Vol. 36, No. 1, pp. 165-177, 2013.
- [11] G. Cena, I.C. Bertolotti, S. Scanzio, A. Valenzano, C. Zunino, "Evaluation of EtherCAT Distributed Clock Performance," Journal of IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 8, No. 1, pp. 20-29, 2012.
- [12] Xenomai, "Home Page of Xenomai," Available Online: <https://www.xenomai.org>
- [13] J.H. Kho, B.W. Choi, "Real-time Performance of Real-time Mechanisms for RtaI and Xenomai in Various Running Conditions," Journal of Control and Automation, Vol. 6, No. 1, pp. 235-246, 2013.
- [14] M.D. Marieska, A.I. Kistijantoro, M. Subir, "Analysis and Benchmarking Performance of Real Time Patch Linux and Xenomai in Serving a Real Time Application," Proceedings of IEEE Electrical Engineering and Informatics, pp. 1-6, 2011.
- [15] IgH, "IgH EtherCAT Master for Linux", Available On : <http://www.etherlab.org/en/ethercat/>

Seung-Yong Lee (이 승 용)

He is received B.E. and M.S. degrees in Mechanical and Information Engineering from University of Seoul, Korea in 2014 and 2016, respectively. He is currently researcher in Korea Electronics Technology Institute in korea. His research interests include motion control system, open-source embedded system and real-time system.
Email: michalen2006@keti.re.kr

Sun Lim (임 선)

He is received B.E. , M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Korea University, Korea in 2002, 2005 and 2015, respectively. He is currently seniro researcher in Korea Electronics Technology Institute in korea. His research interests include motion control system, open-source embedded system, non-linear control theory and ultrasonic flaw detecting test.
Email: sunishot@keti.re.kr