

실시간 제어 시스템을 위한 IEEE 802.15.4e 기반의 산업용 무선 네트워크 구현

이원희*, 유명식^o

Implementation of Industrial Wireless Network Based on IEEE 802.15.4e for Real-Time Control System

Wonhee Lee*, Myungsik Yoo^o

요약

본 논문에서는 산업 환경에서 운용되는 실시간 시스템을 제어하기 위한 산업용 무선 네트워크를 구현하여 성능 평가를 하고자한다. 이를 위해 EtherCAT 유선 기술과 IEEE 802.15.4e 무선 기술이 혼합된 형태의 산업용 네트워크 구조를 제안하고, 성능 평가를 위한 실시간 시스템의 참조 모델로써 역진자 시스템을 고려하였다. 구현된 산업용 무선 네트워크의 성능평가를 통해 엄격한 요구조건하에서 동작하는 실시간 시스템에 적용 가능하다는 것을 확인하였다.

Key Words : Industrial Networks, Fieldbus, IEEE 802.15.4e, EtherCAT, Real-Time

ABSTRACT

This paper presents the implementation of industrial wireless network for real-time control system and the performance evaluation on the implemented system. We propose the hybrid network architecture of wired EtherCAT and wireless 802.15.4e. For performance evaluation, we use the reference model of inverse pendulum system. Through the performance evaluation on our testbed system, it is verified that our proposed system can be applied to industrial real-time control system.

I. 서론

현재 대부분의 산업 환경에서는 제품의 생산비 감소와 생산 소요 시간 단축, 인력 절감 등의 이유로 산업 자동화 시스템을 도입하고 있다. 이러한 산업 자동화 기술은 통신 기술과 결합되어 최근 몇 년간 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 그림 1은 산업 자동화 시스템의 계층 구조를 도시한 모습이다. 이러한 산업 자동

화 시스템은 다수 기기들로 구성되며, 이를 이용하여 작업(Job)을 수행하기 위해서는 다수 기기를 관장하는 네트워크를 적용해야 한다. 이러한 산업용 자동화기기 사이의 네트워크를 산업용 네트워크라 한다.^[1]

그림 1과 같은 구조의 산업 환경에서 필드 레벨의 기기들은 하나의 공통된 링크를 통해 분산된 형태의 구성으로 데이터를 교환한다. 이러한 산업 자동화 시스템의 데이터 교환은 한 개 슈퍼프레임을 주기적으

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구임 (No. 2012R1A1A2 042995)

• First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, zsed50@ssu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, myoo@ssu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2014-04-141, Received April 25, 2014; Revised April 30, 2014; Accepted April 30, 2014

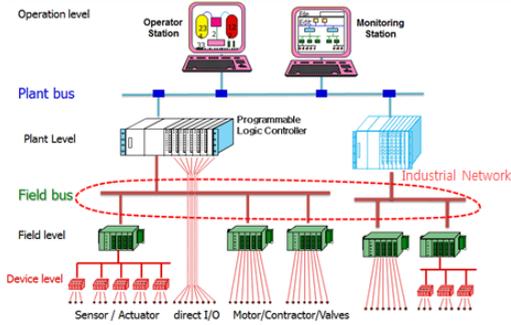


그림 1. 산업 자동화 시스템의 계층 구조
Fig. 1. The hierarchy of the industrial automation system

로 각 기기들에게 송신함으로써 이루어진다.^[2] 뿐만 아니라 비상 상황 시 발생하는 비주기적 긴급 데이터와 네트워크를 유지 관리하기 위한 메시지 데이터 등도 교환된다. 따라서 각각의 데이터에 대해 스케줄링 또는 유효시간이 보장되도록 하는 방법이 반드시 제공되어야 한다.^[3] 이와 같은 제약으로 인해 지금까지 대부분의 산업용 네트워크는 유선 기반으로 개발되고 발전되어 왔다. 하지만 근래에 무선 통신 기술의 비약적인 발전으로 인해 무선 네트워크의 성능과 신뢰성이 향상되고 무선 기기들의 가격이 저렴해지면서 무선 통신 기술이 산업 환경에서 적용될 수 있는 유망한 솔루션으로 각광을 받고 있다.^[4]

이에 본 논문에서는 실시간 측면의 장점을 지닌 EtherCAT^[5] 유선 기술과 기기 확장성 측면의 장점을 지닌 IEEE 802.15.4e^[6] 무선 기술이 혼합된 형태의 산업용 무선 네트워크를 구현하고, 구현된 네트워크의 성능 평가를 위하여 실시간 제어 시스템의 대표 모델로서 역진자 시스템을 선정하여 산업용 무선 네트워크 기술이 엄격한 요구조건을 갖는 실시간 시스템로의 적용 가능성 검증을 목표로 한다.

II. 제안하는 산업용 무선 시스템 구조

2.1 제안하는 산업용 무선 네트워크 구조

본 절에서는 무선 통신 환경을 고려한 산업용 실시간 제어 시스템의 보상 및 운용 기술 개발을 위해서 안정성 측면의 장점을 지닌 기존의 유선 산업용 네트워크와 확장성 및 유지/보수 용이성 측면의 장점을 지닌 무선 통신 기술을 융합한 형태의 산업용 무선 네트워크를 제안하고, 이를 구현하기 위한 세부 기술들의 방법론을 제시하고 이를 구현한다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 산업용 무선 네트워크 기반의 산업용 실시간 시스템 구조로서, 상용 산

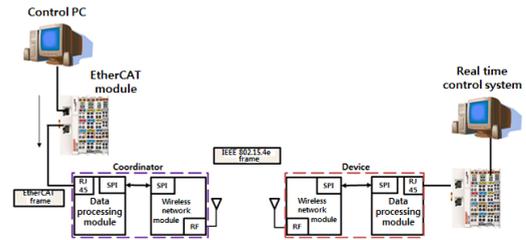


그림 2. 제안하는 산업용 무선 네트워크 구조
Fig. 2. The proposed structure of the industrial wireless network

업용 네트워크 기술 중 가장 좋은 성능을 보이는 EtherCAT과 IEEE 802.15.4e 기반의 무선 통신 기술이 융합된 형태를 보인다. 구성요소로 제어 PC, EtherCAT 모듈, 코디네이터(Coordinator), 디바이스(Device), 실시간 제어 시스템으로 구성된다. 특히 코디네이터와 디바이스는 데이터 처리 모듈과 무선 통신 모듈로 구성되는 구조를 보인다.

먼저 제어 PC의 경우 종단이 되는 실시간 제어 시스템 제어를 위한 데이터 프레임 전송과 케환된 센싱 정보를 확인하여 모니터링 및 보상하는 기능을 담당한다. EtherCAT 모듈의 경우 랜 케이블을 통한 다음 노드로의 인터페이스 역할과 시리얼 포트에 연결된 실시간 제어 시스템과의 통신 인터페이스 및 분산된 EtherCAT 모듈의 동기화 기능을 담당한다. 또한 코디네이터와 디바이스로 정의된 두 개 노드는 IEEE 802.15.4e 기반의 모듈이며, 코디네이터는 랜 케이블을 통하여 수신 받은 EtherCAT 데이터를 IEEE 802.15.4e 기반의 패킷으로 저장하여, 디바이스 노드로 전송하는 기능을 담당한다. 또한 디바이스는 코디네이터로부터 수신 받은 패킷 내에 데이터 형태로 입력되어있는 EtherCAT 프레임을 출력하여 EtherCAT 모듈로 송신하는 기능을 수행한다. 마지막으로 실시간 제어 시스템은 EtherCAT 프레임 내에 제어 데이터를 수신하여 구동 및 센싱을 한다.

2.2 산업용 무선 네트워크 구현을 위한 고려사항

제안하는 산업용 무선 네트워크 구조는 유/무선이 융합된 형태를 보인다. 이에 구현을 위한 고려해야 할 사항이 크게 3개 부분이 있으며, 이를 보다 자세히 살펴보면 다음과 같다.

2.2.1 비경쟁 구간만으로 구성된 슈퍼프레임 구조

본 논문에서 고려하는 산업용 무선 네트워크 구조에서 무선 구간의 데이터 전송은 비콘(Beacon), 경쟁 구간, 비경쟁 구간의 순으로 데이터를 전송한다. 이는

코디네이터 노드가 비콘을 생성하여 연결된 디바이스와 동기화 및 GTS 할당, 관리를 수행한다. 비콘 프레임임을 통한 초기화 수행이 끝나면 바로 CAP 구간(경쟁 구간)을 통해 통신을 하게 되는데, 이때 CAP 구간의 매체접근 방식이 CSMA/CA 방식을 이용한다. 이로 인해 CAP 구간을 통해 통신하는 다른 디바이스가 있을 경우 바로 데이터 송신을 하지 못하고 대기하는 Backoff_delay가 발생하기 때문에 실시간성을 요구하는 산업용 실시간 제어 시스템에 적합하지 못하다. 그러므로 CAP 구간을 제외한 보장된 통신 채널을 확보할 수 있는 CFP 구간만으로 이루어진 슈퍼프레임 설계가 요구된다.

2.2.2 EtherCAT 프레임 분할 및 재조합

현재 제안하는 네트워크 구조는 EtherCAT 데이터 프레임을 통해 최종 목표인 실시간 제어 시스템을 제어하고 노드 사이는 무선 구간으로 연결된 형태이다. 즉, EtherCAT 데이터 프레임이 무선 구간인 각 노드 사이를 통과하기 위해서는 EtherCAT 데이터 프레임이 IEEE 802.15.4e 슈퍼프레임 내의 데이터 Payload에 저장되어야 한다. 하지만 EtherCAT 데이터 프레임은 일정하지 않은 크기를 가지기 때문에 IEEE 802.15.4e의 데이터 Payload의 크기보다 클 수 있으므로 전체 시스템 운용이 불가능할 수 있다.

2.2.3 유/무선 기술 사이의 전송속도 차이

제안 산업용 무선 네트워크를 구현하기 위해서 선정한 유선 기술인 EtherCAT의 최대 전송속도는 100Mbps이고, 무선 기술인 IEEE 802.15.4e의 최대 전송속도는 250Kbps이다. 이에 서로 다른 전송속도 차이로 인해서 제어 PC에서 송신하는 EtherCAT 프레임이 무선통신모듈의 버퍼에 저장되는 수가 무선 구간의 슈퍼프레임을 통해 EtherCAT 프레임을 처리하는 수보다 많기 때문에 EtherCAT 프레임이 손실될 확률이 매우 높다. 그러므로 서로 다른 전송속도 차이를 극복하는 것은 매우 중요하다.

2.3 산업용 무선 네트워크 구현

산업용 무선 네트워크 구현을 위하여 앞서 설명한 세 가지 고려사항에 대한 방법론을 제시하고, 산업용 무선 네트워크를 구현 한다.

그림 3은 제안하는 산업용 무선 네트워크 시스템의 형태이다. 이를 구현하기 위한 방법은 다음과 같다.

2.3.1 IEEE 802.15.4 GTS 슈퍼프레임 설계

앞서 요구사항에서 설명하였듯이 실시간 운용을 위

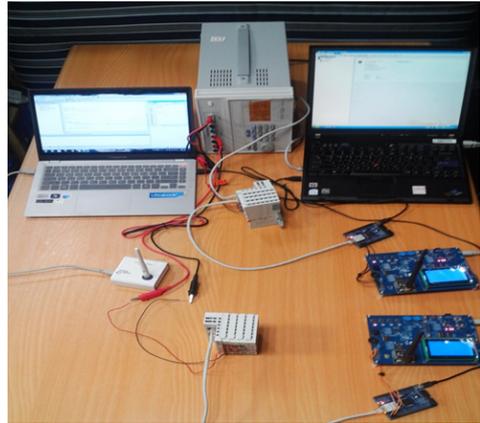


그림 3. 산업용 무선 네트워크 구성
Fig. 3. Configuration of Wireless Industrial Networks

해서는 IEEE 802.15.4e 슈퍼프레임의 구조를 보장된 슬롯만으로 구성해야 한다. 이를 위해서는 슈퍼프레임의 CAP의 길이 조절과 GTS를 할당해야 한다. 이때 연결된 디바이스와 초기설정을 하는 Beacon 프레임을 통해서 수행하게 된다. 특히 Beacon 프레임 내 Final CAP 슬롯 필드를 이용하여 CAP 구간의 길이를 조절할 수 있다.

2.3.2 데이터 분할/재조합 알고리즘

유/무선이 융합된 형태의 산업용 무선 네트워크를 구현하기 위해서는 무선 기술로 고려한 IEEE 802.15.4e 슈퍼프레임 내 최대 데이터 Payload를 고려하여 EtherCAT 데이터 프레임의 분할 여부를 결정해야 한다. 이를 위해서 비트 단위의 통신을 하는 ARM Cortex-M4 기반의 데이터 처리 모듈을 선정하였다. IEEE 802.15.4e의 데이터 Payload 최대 크기인 832bit(104byte)를 기준으로 EtherCAT 데이터 프레임과의 비교를 통해서 분할 여부를 결정하고, EtherCAT 데이터 프레임을 분할해야 할 경우 데이터 재조합 판단을 위한 분할 인식 비트를 추가하여 SPI(Serial Peripheral Interface)로 연결된 무선 통신 모듈로 송신한다. 데이터 재조합의 경우 IEEE 802.15.4e로부터 수신한 데이터의 크기가 832bit 이상일 경우 분할된 프레임 조각으로 판단하며 재조합을 시작한다. 이때, 분할 인식 비트는 제거하여 재조합을 수행하고, 분할 인식 비트 값이 '0'이 될 때까지 재조합을 진행한다.

2.3.3 EtherCAT 프레임 주기 조정

유/무선이 융합된 형태의 산업용 무선 네트워크를 제안하였기 때문에 서로 다른 전송 속도 차이를 극복

해야 한다. 이는 EtherCAT 시스템을 관장하는 소프트웨어인 TwinCAT을 통해서 해결 가능하다. TwinCAT은 EtherCAT 모듈의 입출력 제어 및 유지보수를 할 수 있는 기능을 수행 및 제어하는 소프트웨어이다. 특히 마스터 노드와 슬레이브 노드의 입출력제어, 네트워크 동작 정의 및 순서 제어, 주기적인 프레임 전송을 통한 실시간 데이터 모니터링을 기능을 수행한다. 특히, 주기적인 프레임 전송 시 EtherCAT 데이터 프레임에 대한 주기를 조절할 수 있으며, 이를 통해 이 기종간의 전송속도 문제를 해결할 수 있다. 이때, 다음 장에서 설명 되듯이 성능 평가를 위한 산업용 실시간 제어 시스템 모델인 역진자 시스템의 정상 동작을 위한 제약시간이 60ms 이내인 것을 고려하여 주기를 조정된 결과 47ms 이하일 경우 EtherCAT 데이터 프레임의 손실이 일어나는 것을 확인하였다.

III. 성능 평가

이번 절에서는 구현한 제안 산업용 무선 네트워크를 이용하여 산업용 실시간 제어 시스템에 적용하여 성능 평가 및 분석을 수행한다. 이에 산업용 실시간 제어 시스템에 대표 모델로서 역진자 시스템을 고려하였다.

3.1 성능 평가 환경

성능 평가 환경 및 파라미터는 역진자 시스템의 대표 참고 문서에 따라 구성하였다.^[7] 그림 4는 시스템 모델을 도시한 모습이다.

시스템 모델의 $r(k)$ 는 기준 입력값 '1'이며 $y(k)$ 는 역진자 시스템의 상태 값이고 $e(k)$ 는 reference input 값과 역진자 시스템의 상태 값의 비교에 의한 오차 값을 의미한다. $u(k)$ 는 PD 제어를 통한 제어 PC의 출력 값이다. 위와 같은 값의 도출을 위한 식으로 제 2 뉴턴 법칙 기반의 동역학 방정식을 이용하여 도출할 수 있다^[7]. 수식 (1)은 역진자 시스템 모델의 수식 도출을 위한 식이다.

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^2 - \frac{(M+m)mgl}{q}s - \frac{bmg}{q}} \quad (1)$$

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{7.407s}{s^3 + 0.26s^2 - 36.296s - 7.26}$$

수식 (1)은 실제 구현 시스템에서 사용하는 연속적

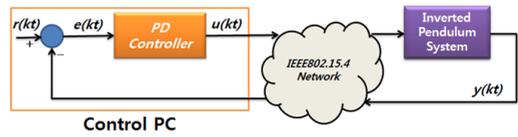


그림 4. 시스템 모델
Fig. 4. System Model

함수이며, 이를 50ms의 샘플링 타임을 고려하여 모델링 하기위한 Discrete 형태로 변환하면 수식 (2)와 같은 식을 도출할 수 있다.

$$u(k) = u(k-1) + (K_p + 0.05K_d)e(k) - K_p e(k-1)$$

$$y(k) = 0.4916y(k-3) + 0.3752y(k-2) + 0.1577y(k-1) + 0.0029u(k-1) + 0.0029u(k)$$

수식 (2)를 도출하기 위한 파라미터는 표 1과 같다.

앞서 도출한 수식을 기반으로 요구 제약시간에 대한 역진자 시스템의 안정성을 확인하기 위하여 제어 PC로부터 송신하는 주기의 변화를 주며 실험을 수행하였다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이, 제안하는 산업용 무선 네트워크가 50ms의 주기로 데이터를 송수신할

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameter

M	mass of the cart	0.3 kg
m	mass of the pendulum	0.2 kg
b	friction of the cart	0.1 N/m/sec
l	length of the pendulum	0.2 m
i	inertia of the pendulum	0,006 kg.m ²
f	force applied to the cart	kg.m/s ²
g	gravity	9.8m/s ²
Θ	vertical pendulum angle	in degree

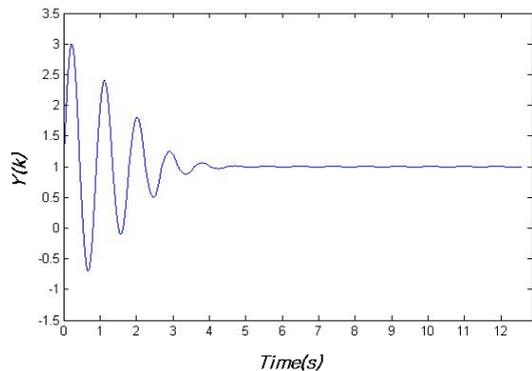


그림 5. 주기 50ms일 때 역진자 시스템의 상태 안정도
Fig. 5. Stability of the state of the inverted pendulum system (cycle time = 50ms)

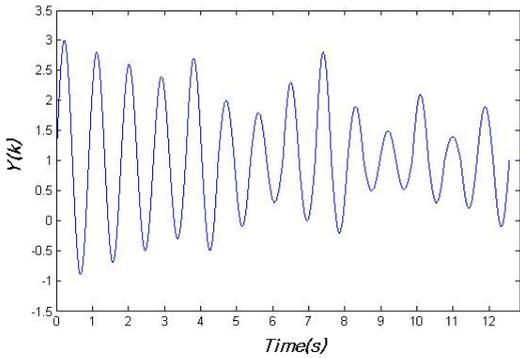


그림 6. 주기 80ms일 때 역진자 시스템의 상태 안정도
Fig. 6. Stability of the state of the inverted pendulum system (cycle time = 80ms)

경우 역진자 시스템이 안정 상태를 유지하는데 4.2s의 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 그림 6은 80ms의 주기로 데이터를 송수신할 경우이며, 역진자 시스템이 안정 상태를 유지하지 못하는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문은 엄격한 요구조건을 지닌 실시간 시스템을 제어하기 위한 네트워크로써 유무선이 혼합된 형태의 산업용 무선 네트워크 구조를 제안하고 이를 구현하였다. 구현된 산업용 무선 네트워크의 성능을 평가하기 위하여 실시간 시스템의 대표 모델인 역진자 시스템을 고려하였으며, 제안된 산업용 무선 네트워크를 이용하여 실시간 시스템으로의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

References

- [1] O. Gwon, H. Kim, and D. Kim, *Industrial field bus network*, Seongandang, 2004.
- [2] J. Kim, Y. Jeon, and H. Park, "Sampling time-based adaptive beacon interval and superframe duration control in IEEE 802.15.4," *J. KICS*, vol. 32, no. 1, pp. 75-82, 2007.
- [3] R. Patzke, "Fieldbus basics," *Computer standards & interfaces*, Elsevier Science, vol. 19, no. 5/6, pp. 275-293, Oct. 1998.
- [4] D. Kim, "Analyze the status of the wireless communication technology for industrial networks," *Monthly Electronic Components*

Mag., Techworld, pp. 2369-2375, Apr. 2003.

- [5] EtherCAT Technology group, "EtherCAT - The ethernet fieldbus," 2009.
- [6] H.-K. Kim, H. Wu, and D.-J. Lee, "Performance analysis and re-transmission method of DSME-GTS transmission error in IEEE 802.15.4e CAP," *J. KICS*, pp. 1016-1017, 2011.
- [7] M. Hasan, C. Saha, Md. M. Rahman, Md. R. I. Sarker, and S. K. Aditya, "Balancing of an Inverted Pendulum Using PD Controller," *Dhaka Univ. J. Science*, vol. 60, no. 1, pp. 115-120, Jan. 2012.

이 원 희 (Wonhee Lee)



2010년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2011년 9월~2014년 3월: 정보통신공학석사
<관심분야> Wired/Wireless Networks Control System

유 명 식 (Myungsik Yoo)



1989년 2월: 고려대학교전자 공학박사
1991년 2월: 고려대학교전자 공학석사
2000년 6월: SUNY at Buffalo Dept. of EE 박사
2000년 9월~현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> Optical Network, OBS, EPON, QoS, Wireless MAC Protocol, MANET, RFID/ USN, CR, Visible Light Communication