

IEC 61800 기반 파워 드라이버 시스템을 위한 EtherCAT 슬레이브 모듈 구현

Implementation of EtherCAT Slave Module for IEC 61800-based Power Driver System

김 만 호, 박 지 훈, 이 석, 이 경 창*
(Man Ho Kim¹, Jee Hun Park¹, Suk Lee¹, and Kyung Chang Lee²)

¹Pusan National University

²Pukyong National University

Abstract: Industrial network, often referred to as fieldbus, becomes an indispensable component for intelligent manufacturing systems. Thus, in order to satisfy the real-time requirements of field devices such as sensors, actuators, and controllers, numerous fieldbus protocols have been developed. But, the application of fieldbus has been limited due to the high cost of hardware and the difficulty in interfacing with multi-vendor products. As an alternative to fieldbus, the Ethernet (IEEE 802.3) technology is being adapted to the industrial environment. However, the crucial technical obstacle of Ethernet is its non-deterministic behavior that cannot satisfy the real-time requirements. Recently, the EtherCAT protocol becomes a very promising alternative for real-time industrial application due to the elimination of uncertainties in Ethernet. This paper focuses on the implementation of the IEC 61800 based real-time EtherCAT network for multi-axis smart driver. To demonstrate the feasibility of the implemented EtherCAT slave module, its synchronization performance is evaluated on the experimental EtherCAT testbed with a single axis smart driver.

Keywords: manufacturing system, manufacturing robot, smart driver, fieldbus, EtherCAT, IEC 61800

I. 서론

산업용 네트워크 시스템(industry network system)은 산업 현장에서 요구되는 다양한 요구사항을 만족하기 위하여 끊임 없는 발전을 거듭하고 있다[1,2]. 1970년대 GM에 의해 개발되어 생산 자동화 네트워크의 발전을 이끌었던 MAP에서부터 1999년 말 Profibus, Fieldbus Foundation, WorldFIP 등과 같은 6개의 프로토콜을 포함하는 IEC 61158 필드버스가 국제 표준으로 제정되었다[3]. 이후 CAN (Controller Area Network)을 기반으로 하는 DeviceNet, CANopen과 같은 프로토콜이 개발되었으며, 2000년대 이후 인터넷의 보급과 발전으로 인해 Ethernet을 기반으로 하는 ProfiNet, EtherNet/IP, EtherCAT과 같은 프로토콜도 표준으로 제정되어 산업용 네트워크로 사용되고 있다[4]. 또한, PLC (Programmable Logic Control) 공정에 적합한 CC-Link, CAN 기반의 DeviceNet 및 CANopen, 모션제어 어플리케이션을 위한 통신 인터페이스인 SERCOS 등 다양한 산업용 네트워크가 개발 및 발전해 왔다[5,6].

하지만 산업 현장의 생산 기술이 급속도로 발전함에 따라 보다 효율적이고 신뢰성 높은 결과를 얻기 위한 산업용 네트워크의 요구사항은 지속적으로 증가하고 복잡해지고 있다[7,8]. 생산량을 증가시키기 위해 더욱 높은 수준의 지능화가 자동화 시스템에 요구되면서, 필드 장치의 성능 향상과 함께

사용되는 필드 장치의 수도 급속히 증가되고 있다. 또한, 산업용 네트워크를 이용한 공장자동화 시스템에서의 액추에이터와 센서 레벨이 점차 디지털 신호 전송형태로 교체됨에 따라 다양한 마이크로프로세서를 이용한 지능형 스마트 액추에이터로의 통합의 필요성이 증가하고 있다[9].

최근에 공장설비, 공정제어 설비, 빌딩자동화, 인프라 부문에서 사용되는 산업용 통신 네트워크에 Ethernet을 기반으로 하는 통신 프로토콜 시스템을 적용하는 사례가 급격히 증가하고 있다[10]. 특히, 생산 자동화 시스템의 필요에 의해 개발된 산업용 Ethernet 기술이 공정 자동화, 전력 IT, 모션 분야 등 전 산업 분야로 적용이 확산되고 있다. 국외에서는 산업용 Ethernet 기술은 시장의 선점을 위하여 Ethernet/IP, ProfiNet, EtherCAT 등이 IEC에서 표준화 작업이 진행 중이다. 특히, 전 이중(full duplex) 방식의 EtherCAT 프로토콜은 실시간(real time) 산업용 네트워크로서 매우 많은 관심을 받고 있다. 왜냐하면, EtherCAT 프로토콜은 완전하게 공개된 개방형 기술을 제공하고 표준 Ethernet 프레임을 사용하여 호환성이 뛰어나기 때문이다[14,15]. 또한, 기존의 필드버스와 비교하여 저가의 NIC (Network Interface Card)를 이용하여 상대적으로 낮은 비용으로 구현할 수 있다는 장점을 가진다[15,16].

본 논문에서는 기존의 산업용 프로토콜과 비교하여 높은 실시간 전송 특성을 장점으로 가지는 EtherCAT 프로토콜의 슬레이브 모듈을 구현하는 방법을 제안한다. 특히, 제안하는 EtherCAT 슬레이브 모듈은 지능형 스마트 드라이버 표준인 IEC 61800를 기준으로 설계하여 네트워크에 상관없이 산업용 생산 시스템 및 로봇의 다축 모터 표준 드라이버로 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한, IEC 61800 표준을 기준

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 9. 8., 수정: 2010. 11. 23., 채택확정: 2011. 1. 10.

김만호, 박지훈, 이석: 부산대학교 기계공학부

(kmh@pnu.edu/network@pnu.edu/slee@pnu.edu)

이경창: 부경대학교 제어계측공학과(gclee@pknu.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력 양성사업으로 수행된 연구결과임.

으로 작성되기 때문에 동일한 표준을 기준으로 제작된 모터와 호환이 가능하다는 장점을 가진다. 마지막으로, 제한한 IEC 61800 기반 EtherCAT 슬레이브 모듈을 이용하여 EtherCAT 네트워크를 구현하고 동기화 전송 특성을 평가하여 성능을 검증한다.

본 논문은 총 V 장으로 구성되어 있다. II 장에서는 EtherCAT 프로토콜과 IEC 61800 표준에 대해서 설명한다. III 장에서는 IEC 61800 기반의 EtherCAT 슬레이브 모듈 설계 방법에 대해서 설명하고 IV 장에서는 구현한 EtherCAT 슬레이브 모듈의 성능 평가 결과를 보여준다. 마지막으로 V 장에서 요약과 결론을 제시한다.

II. EtherCAT 프로토콜 및 IEC 61800 개요

1. EtherCAT 프로토콜 개요

EtherCAT 프로토콜은 2002년에 독일 BeckHoff사에서 개발된 이후 2003년 11월에 EtherCAT technology group을 결성해서 기술을 공개한 개방형 산업용 Ethernet 기술이다. 또한, IEC 규격(IEC/PAS 62407)과 ISO 규격(ISO15745-4)으로 인증된 국제표준 프로토콜로 뛰어난 동기화 특성과 함께 제한된 토폴로지에 의존하지 않는 성능을 가진다[11,12]. 특히, EtherCAT 프로토콜은 뛰어난 Ethernet 호환성, 간단한 디바이스에서도 구현이 가능한 인터넷 기술, Ethernet에서 제공하는 대역폭을 최대한 활용할 수 있는 특성과 낮은 비용으로 뛰어난 실시간 특성을 구현할 수 있다는 장점을 가지고 있다. EtherCAT 프로토콜은 100Mbps 이상의 통신 속도를 제공하며 256개의 분산 디지털 I/O에 약 11 μ s의 업데이트 속도를 지원한다.

EtherCAT 프로토콜의 전송 방법은 브로드캐스트(broadcast) 방식으로 마스터에서 데이터 프레임 전송한다. 마스터와 연결된 각각의 슬레이브는 데이터 프레임을 수신 받아 해석 및 처리하고 다음 슬레이브로 전송을 한다. 즉, EtherCAT 프로토콜에서 각각의 슬레이브는 데이터 프레임이 슬레이브 모듈을 통과하는 동안 해당 모듈에 전달된 데이터를 읽어 데이터를 수신하고 전송할 데이터가 있으면 해당되는 텔레그램이 통과하는 동안 입력할 데이터를 해당되는 텔레그램에 삽입하여 전송한다. 여기서, 해당되는 슬레이브 모듈에서 지연되는 시간은 겨우 몇 ns만이 소요된다[13].

EtherCAT 마스터는 일반적으로 PC에서 사용하는 NIC를 사용하여 구성할 수 있으며, NDIS (Network Driver Interface Specification) 인터페이스를 이용하여 하부계층과 통신할 수 있다. NDIS 구조는 물리 계층과 데이터링크 계층, 그리고 응용 계층만을 가지고 있으며, 응용계층에서 생성된 메시지가 2계층에 해당하는 데이터링크 계층으로 직접 접근이 가능하다. 또한, packet 단위의 데이터 송수신을 직접적으로 제어하는 것도 가능하다. EtherCAT 슬레이브 모듈은 BeckHoff사에서 제공하는 EtherCAT 컨트롤러(controller)와 이를 제어하는

MCU로 구성된다. EtherCAT 컨트롤러를 이용하면 SPI 또는 bus 방식을 통해 다양한 MCU와 직접 연결하여 EtherCAT 슬레이브 모듈을 구현할 수 있다

EtherCAT 프로토콜의 데이터 프레임은 스위칭 허브를 통하여 일반 Ethernet과 혼용하여 사용할 수 있는 UDP (User Datagram Protocol) 타입과 실시간 특성을 보장하기 위한 EtherCAT 전용 프레임 타입이 있다. 그림 1은 EtherCAT 프로토콜의 전용 데이터 프레임의 구조를 나타내고 있다. 그림에서 데이터 프레임은 주소 정보를 포함하는 Ethernet 헤더(header), EtherCAT 정보를 포함하는 ECAT, EtherCAT 데이터를 포함하는 EtherCAT 텔레그램(telegram)으로 구성된다. Ethernet 헤더는 프레임의 시작을 의미하는 Pre (Preamble), 목적지 주소를 의미하는 DA (Destination Address), 출발지 주소를 의미하는 SA (Source Address)와 프레임의 타입을 결정하는 type으로 구성된다. ECAT의 frame HDR은 EtherCAT 프레임의 길이와 프로토콜 타입을 의미한다. 슬레이브 모듈이 데이터를 기입하는 EtherCAT 텔레그램은 EtherCAT 명령에 따라 필요한 지침과 주소를 기입하는 EtherCAT HDR, 필요한 데이터를 기입하는 data와 슬레이브모듈의 데이터 작성 유무를 표시하는 WKC로 구성된다. 마지막으로, FCS는 EtherCAT 프레임의 에러를 확인하는 기능을 수행한다.

EtherCAT 프로토콜은 라인, 스타, 트리 토폴로지를 지원하며 브로드캐스트 방식으로 스위치나 허브의 개수에 제한이 없이 어떤 토폴로지에도 적용이 가능하다. 특히, 라인과 트리 토폴로지의 조합을 시스템의 배선에 활용하면 각각의 디바이스들은 배선 선택의 유연성이 증가된다. 일반적으로, EtherCAT 프로토콜은 고속 Ethernet(100Base Tx 내장형 네트워크 서버)으로 각각의 디바이스 간의 배선의 길이는 최대 100m까지 가능하다.

2. IEC 61800 표준

IEC 61800 표준은 고속 전기 파워 드라이버(electrical power driver) 시스템의 공통적인 규격을 정의하고 있다. 특히, IEC 61800-7 표준은 제어 시스템과 파워 드라이버 시스템 사이의 일반적인 표준 인터페이스를 정의하고 있다. IEC 61800-7 표준은 표준 접속 기능(access function)과 드라이버 프로파일과 통신 표준 규격에 사용되는 데이터에 대한 규격을 정의하고 있다. IEC 61800-7 표준은 일반 함수와 개체(object)에 적합한 드라이버 프로파일과 다른 통신 인터페이스와 적절하게 매칭되는 것을 목적으로 한다. 특히, 드라이버의 구현에 대한 구체적인 지식이 없어도, 모션 제어의 일반적인 사항을 쉽게 구현할 수 있도록 하고 있다.

IEC 61800 표준은 인터페이스를 정의한 IEC 61800-7-1, 프로파일 기준을 정의한 IEC 61800-7-200과 네트워크 기술에 프로파일을 매칭하는 방법의 정의한 IEC 61800-7-300으로 구성된다. IEC 61800-7-1은 CiA 402, CIP 모션, PROFIdrive,

Ethernet Header				ECAT	EtherCAT Telegram			EtherCAT Telegram			Enet
Pre	DA	SA	Type	Frame HDR	EtherCAT HDR	Data	WKC	EtherCAT HDR	Data	WKC	FCS
(8)	(6)	(6)	(2)	(2)	(10)	(34....1488)	(2)	(10)	(34....1444)	(2)	(4)

그림 1. EtherCAT 프레임 구조.

Fig. 1. The EtherCAT frame structure.

SERCOS 등과 같은 프로토콜에 대한 일반적인 PDS (Power Driver System) 인터페이스를 정의하고 있다. 또한, IEC 61800-7-201 표준은 파워 드라이버 시스템을 위한 버스에 독립적인 CiA 402 디바이스 프로파일을 정의하고 있다. 그 뿐만 아니라 IEC 61800-7-201은 구성, 조정, 식별 및 네트워크 관리 개체의 실시간 제어 개체의 정의를 포함하고 있다. IEC 61800-7-301은 EtherCAT 네트워크와 CiA402 드라이버 프로파일을 매칭시키는 기능을 정의한다. 특히, PDO (Process Data Object) 통신 및 매칭 변수도 정의되어 있다.

III. IEC 61800 기반 파워 드라이버 시스템을 위한 EtherCAT 슬레이브 모듈 설계

그림 2는 IEC 61800 기반의 파워 드라이버 시스템을 위한 EtherCAT 슬레이브 모듈의 구조를 나타내고 있다. EtherCAT 네트워크는 로봇 제어기와 다수의 파워 드라이버 시스템으로 구성하였다. EtherCAT 네트워크에서, 로봇 제어기는 EtherCAT 마스터 모듈로 구성하고 다수의 파워 드라이버는 EtherCAT 슬레이브 모듈과 연결하여 구성하였다.

EtherCAT 네트워크에서 로봇 제어기는 EtherCAT 마스터 S/W와 일반 NIC 카드를 가지고 있는 일반 PC를 사용하였다. 로봇 제어기는 산업용 로봇 시스템의 운동 역학 분석을 이용하여 서보 드라이버의 속도를 계산하고 속도 제어 정보를 생성하는 기능을 수행한다. 로봇 제어기에서 생성된 속도 제어 정보는 EtherCAT 네트워크를 통해서 주기적으로 EtherCAT 슬레이브 모듈에 전송된다. 로봇 제어기 마스터와 파워 드라이버 슬레이브 모듈 사이의 정보 교환은 사전에 정의된 데이터 객체 지표와 전송할 데이터로 구성된 프레임에 통하여 수행된다. 정의된 프레임의 데이터 객체 지표는 IEC 61800-7-301에 정의되어 있다.

파워 드라이버 시스템은 제어 정보와 상태 정보를 보내기

위하여 EtherCAT 슬레이브 제어기, EtherCAT 슬레이브 MCU와 서보 모터 드라이버 MCU로 구성되어 있다. 그림 2에서 로봇 제어기와 EtherCAT 슬레이브 모듈의 제어를 위한 데이터 교환은 EtherCAT 슬레이브 제어기(ESC, EtherCAT Slaver Controller)를 통하여 수행된다. 로봇 제어기로부터 정보가 수신되면 ESC는 SPI (Serial Peripheral Interface)를 이용하여 파워 드라이버 시스템의 MCU에 수신된 정보를 전달한다. 동일한 방법으로 드라이버 MCU에서 피드백 되는 정보도 SPI를 이용하여 로봇 제어기까지 전달한다. 파워 드라이버 시스템에서 ESC가 로봇 제어기로부터 속도 제어 정보를 수신하면 EtherCAT 슬레이브 모듈은 자신이 가지고 있는 현재의 속도 제어 정보를 자신에게 해당되는 EtherCAT telegram에 넣어서 전송하게 된다.

그림 3(a)은 구현된 파워 드라이버 시스템의 EtherCAT 슬레이브 모듈을 나타내고 있다. EtherCAT 슬레이브 모듈의 물리 계층은 EtherCAT 네트워크와 연결을 위한 2개의 RJ45 커넥터와 Ethernet transceiver로 구성하였다. 또한, EtherCAT의 MAC (Medium Access Control)과 물리계층을 연결하기 위한 인터페이스 방식은 MII (Media Independent Interface) 방식을 이용하여 2개의 포트(port 0, 1)를 구성하였다. ESC (EtherCAT Slaver Controller)는 Beckhoff사의 ET1100을 사용하였다. ESC는 EtherCAT의 MAC과 DLL에 해당하는 부분으로써 EtherCAT frame의 encoding과 decoding을 담당하며 슬레이브 모듈의 FMMU (Fieldbus Memory Management Unit)를 바탕으로 필요한 데이터를 노드 컨트롤러에 전달하는 기능을 담당한다. 내부에 AutoForwarder를 통하여 EtherCAT 슬레이브 모듈의 port 0를 통해 들어오는 EtherCAT telegram을 다음 포트에 전달하며 이때 필요한 데이터를 실시간으로 교환하게 된다. 그림 3(b)는 그림 3의 EtherCAT 슬레이브 모듈의 도면을 나타내고 있다.

본 논문에서 사용한 인터페이스 방식으로는 Ethernet

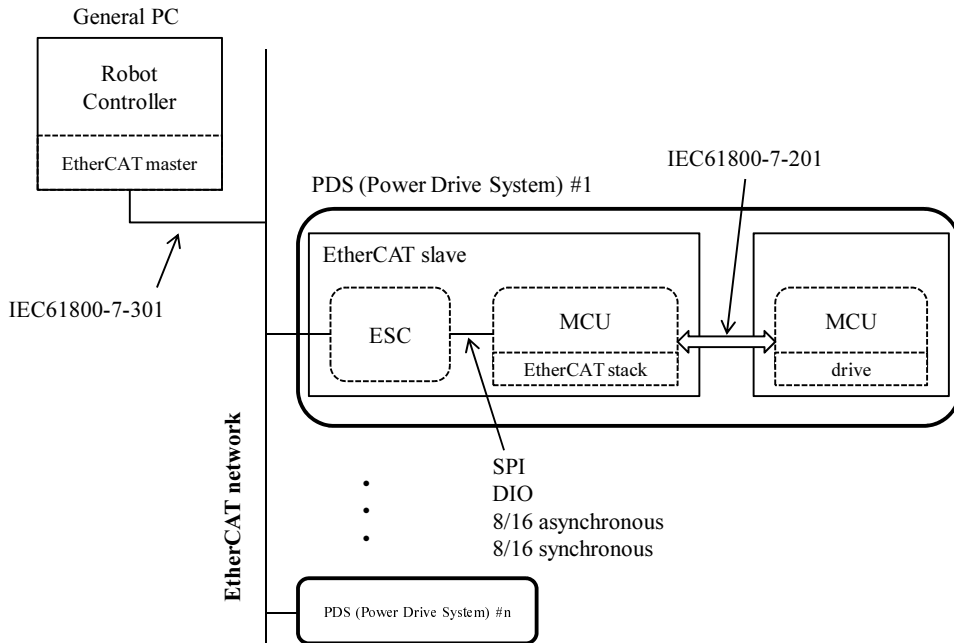
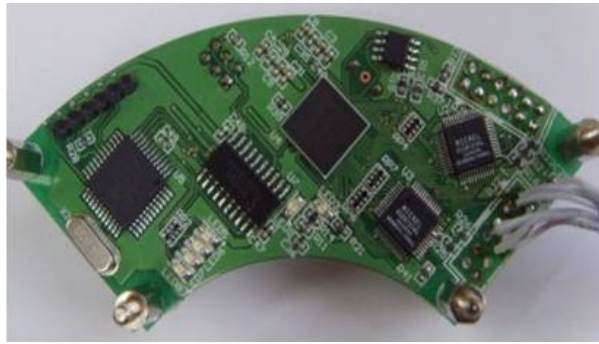
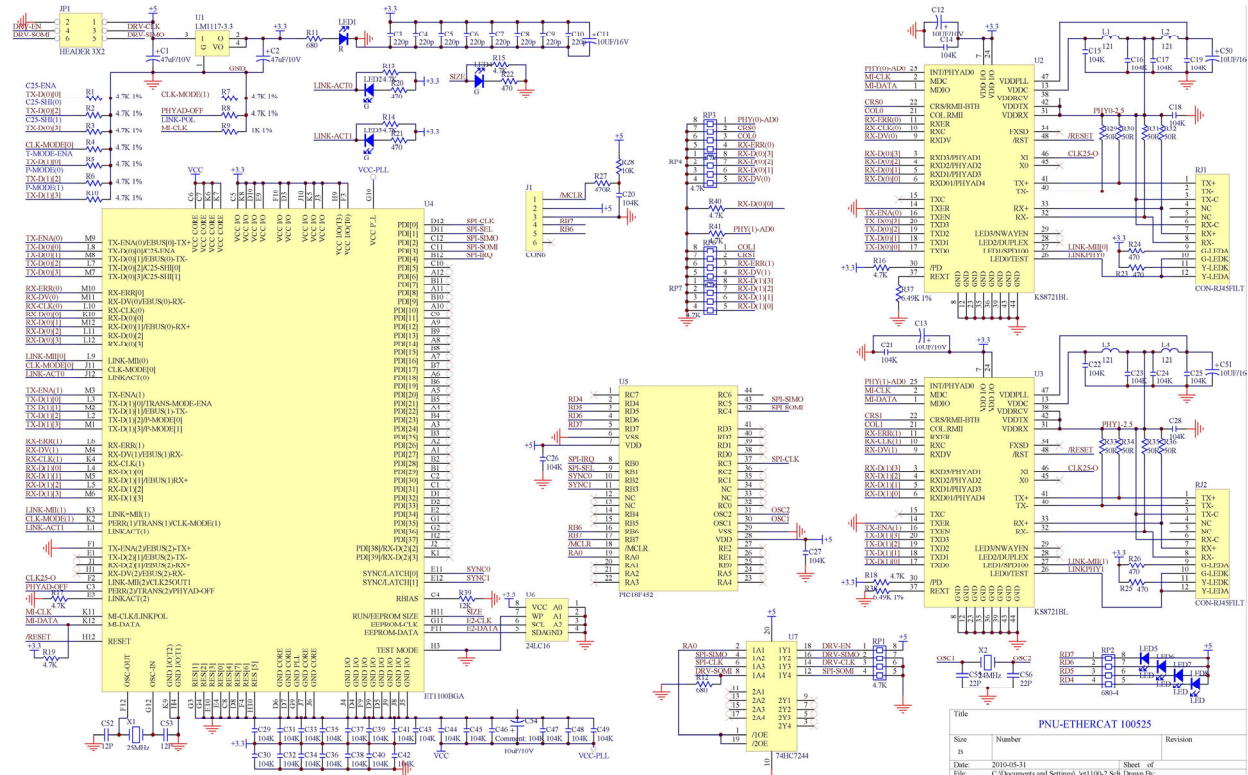


그림 2. 다축 스마트 드라이버를 위한 EtherCAT 슬레이브 구조.
Fig. 2. The EtherCAT slaver structure for multi-axis servo driver.



(a) Picture of the EtherCAT slave module.



(b) Schematic diagram of the EtherCAT slave module.

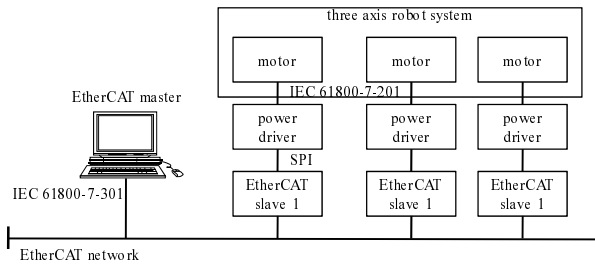
그림 3. EtherCAT 슬레이브 모듈.
Fig. 3. EtherCAT slaver module.

transceiver와 ESC 사이에는 MII 방식을 사용하였고, MCU ESC 및 모터 드라이버와는 SPI 방식으로 연결하였다. EtherCAT 슬레이브 모듈 제어기는 Microchip사의 PIC18F452를 사용하였다. EtherCAT 슬레이브 모듈에서 external connector를 통하여 외부의 센서 및 액추에이터와 SPI를 이용하여 연결할 수 있도록 구성하였다. PIC18F452에서 SPI 통신은 RC5/SDO(신호 출력), RC4/SDI(신호 입력)와 RC3/SCK(신호 클럭)의 세 개의 신호 선으로 구성한다. SPI 통신 설정을 위해서 MSSP status register와 MSSP control register의 설정을 통하여 SPI 통신을 수행한다. SPI bus transceiver는 MCU의 SPI 통신을 멀티드롭(multi-drop) 방식으로 구성하기 위하여 삽입하였다. 노드 컨트롤러는 SPI 마스터로써 동작하게 되고 ESC와 외부에 장착되는 센서 또는 액추에이터는 각각 SPI 슬레이브로써 동작하게 되는데 이때 하나의 SPI 회선을 통하여 각각의 슬레이브를 동시에 연결할 수 없으므로 해당 트랜시버를 이용

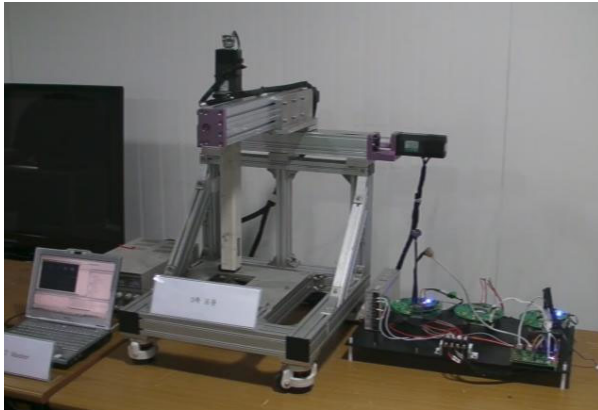
하여 회선을 분리하였다. EtherCAT 슬레이브 모듈과 파워 드라이버 사이는 IEC 61800-7-201 표준에 따라 구현하였으며, 통신 방법은 SPI를 사용하여 구현하였다.

IV. EtherCAT 슬레이브 모듈 성능 평가

본 절에서는 파워 드라이버 시스템을 위한 EtherCAT 슬레이브 모듈의 실시간(real time) 전송 성능을 평가하기 위하여 그림 4와 같은 다축 기반의 스마트 드라이버를 포함하는 산업용 로봇 시스템을 구성하였다. 성능 평가를 위한 산업용 로봇 시스템은 그림 4(a)와 같이 3축 제어를 위한 로봇과 3개의 EtherCAT 슬레이브 모듈, 3개의 파워 드라이버 및 모터로 구성되어 있다. 특히, 산업용 로봇의 3축 제어를 위하여 마스터는 노트북으로 평가를 수행하였다. 그림 4(b)는 성능 평가를 위해 실제로 구축한 3축 산업용 로봇 시스템을 나타내고 있다. 그림의 오른쪽에 있는 적층형 구조로 되어 있는 3개의



(a) Schematic diagram of the experimental testbed.



(b) Implementation details for the experimental testbed.

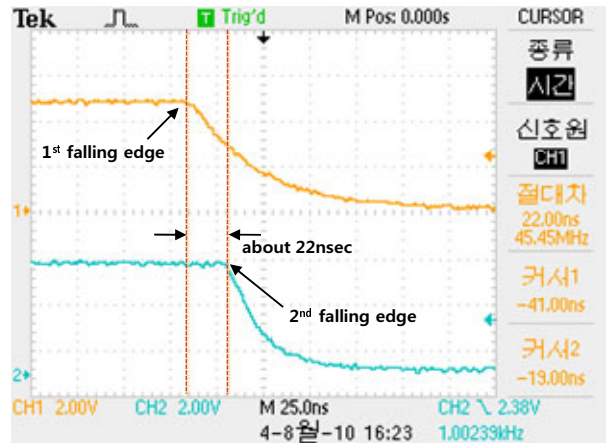
그림 4. EtherCAT 슬레이브 모듈 성능 평가 실험 모델.

Fig. 4. Experimental testbed of performance evaluation of the EtherCAT slaver module.

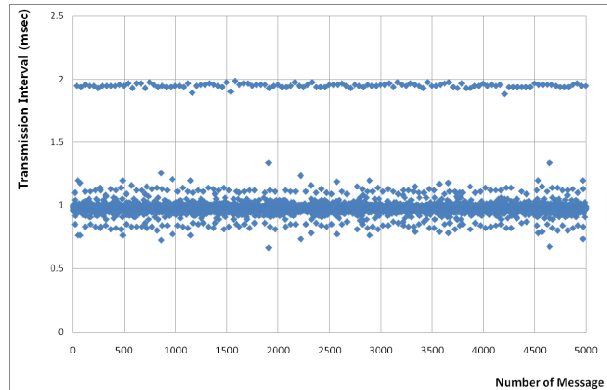
원반형 PCB 기판은 EtherCAT 슬레이브 모듈, 파워 드라이버이며, 중간에는 3축 제어가 가능한 산업용 로봇을 모사한 테스트베드이며, 왼쪽에는 EtherCAT 마스터 모듈 기능을 수행하는 노트북이다. 성능 평가를 위한 EtherCAT 슬레이브 모듈은 EtherCAT MAC과 DLL (Data Link Layer)가 ASIC으로 구현되어 있는 ET1100을 사용하였다. ET 1100이 하나의 Ethernet 포트로 정보를 수신 받으면, 다른 Ethernet 포트를 통하여 현재의 EtherCAT telegram에 현재의 정보를 auto forwarding 함수를 이용하여 기입한다.

그림 5(a)는 다축 파워 드라이버 시스템을 위하여 제한한 EtherCAT 슬레이브 모듈의 동기화 성능을 평가한 결과를 나타내고 있다. 동기화 성능을 평가하기 위하여, 실험용 테스트베드에 3축 스마트 EtherCAT 슬레이브 모듈이 연결되어 있다. 실험에 사용된 EtherCAT 슬레이브 모듈은 모두 10m UTP 케이블을 사용하였다. 동기화 성능을 평가하기 위하여 EtherCAT 슬레이브 모듈이 정보를 수신하면, EtherCAT 슬레이브 모듈의 I/O 신호를 변경시키고 그 신호를 2채널 오실로스코프로 측정하였다. 그림에서 EtherCAT 슬레이브 모듈간의 시간 차이는 약 22.2ns를 보임을 확인하였다.

그림 5(b)는 MCU와 PC의 성능을 고려하여 1ms 메시지 발생 주기에서 제한한 EtherCAT 슬레이브 모듈의 시간 주기를 나타내고 있다. 실험은 EtherCAT 마스터 모듈에서 1ms 주기로 47byte 메시지 오천 개를 EtherCAT 슬레이브 모듈로 전송하고 전송된 메시지의 주기를 측정하는 방법으로 수행하였다. 실험에서 전송 주기는 EtherCAT 마스터 모듈에서 전송된 메시지가 EtherCAT 슬레이브 모듈에 수신될 때 메시지 패킷



(a) Performance of synchronization.



(b) Transmission interval.

그림 5. EtherCAT 슬레이브 모듈 성능 평가 결과.

Fig. 5. Performance evaluation result of the EtherCAT slaver module.

의 스텝핑 타임을 계산하여 측정하였다. 구현된 EtherCAT 슬레이브 모듈의 평균 전송 주기는 대부분 1.00ms의 값을 가진다. 그림에서 몇몇의 경우에는 1.00ms 이외의 전송 주기를 가지는 것은 EtherCAT 슬레이브 모듈에 사용된 OS가 실시간을 보장하지 못하는 Window OS가 EtherCAT 슬레이브 모듈에서 스케줄링 된 태스크를 제시간에 처리하지 못하기 때문이다.

실험 결과에서 보여주듯이 EtherCAT 슬레이브 모듈의 동기화 지연은 1ms 내외의 실시간 특성을 고려할 때 무시할 만큼 작은 값이기 때문에 빠른 응답 성능이 필요한 제어 신호의 피드백이 하나의 사이클에 처리가 될 수 있음을 확인하였다[17].

IV. 결론

본 논문은 높은 실시간 전송 특성을 가지는 EtherCAT 프로토콜의 슬레이브 모듈을 구현하는 방법을 제안하였다. 특히, 제안하는 EtherCAT 슬레이브 모듈은 스마트 드라이버 표준인 IEC 61800를 기준으로 설계하였다. IEC 61800 표준을 이용한 파워 드라이버 시스템 설계는 산업용 생산 시스템 및 로봇의 다축 모터 드라이버로 활용할 수 있다는 장점을 가질 수 있다. 마지막으로, 제한한 EtherCAT 슬레이브 모듈을 이용하여 EtherCAT 네트워크를 구현하고 동기화 전송 특성을 평

가하여 성능을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 실시간 전송을 요구하는 다축 파워 드라이버 시스템에 EtherCAT 프로토콜이 적합함을 확인하였다. 특히, 실시간 전송과 동기화 성능 평가를 통하여 제안된 EtherCAT 프로토콜의 적용 가능성을 검증하였다.

둘째, IEC 61800 표준을 적용한 파워 드라이버 시스템 설계를 통하여 기존의 드라이버를 대신하여 국제 표준을 이용한 파워 드라이버 설계 방법을 제안하였다. 특히, 파워 드라이버 시스템을 EtherCAT 프로토콜과 연계하여 슬레이브 모듈로 개발함으로써 통신 기능을 가지는 파워 드라이버 시스템의 설계의 가능성을 확인하였다.

하지만 본 논문은 PC 기반 EtherCAT 마스터 모듈과 소수의 EtherCAT 슬레이브 모듈을 이용하여 실험실 수준의 평가를 수행하여 그 적용 가능성을 평가하였다. 따라서, 산업용 로봇으로의 적용 가능성을 보다 구체적으로 평가하기 위하여 실시간 고속 통신이 필요한 실제 로봇 제어 환경에서의 EtherCAT 프로토콜의 성능 평가가 필요하다. 특히, 생산 자동화 라인에서 발생될 수 있는 고장을 방지하기 위한 EtherCAT 프로토콜의 결함 허용 방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한, Window CE 를 지원하는 EtherCAT 마스터 모듈을 제작하여 다양한 실험 환경에서 동기화 및 실시간 성능을 평가하는 연구가 필요하다. 마지막으로, EtherCAT 슬레이브 모듈의 동기화 및 실시간 특성을 판단하기 위하여 다른 통신 프로토콜과의 비교 결과를 비교하는 연구도 필요하다.

참고문헌

- [1] S. M. Song and S. H. Hong, "A scheduling method of periodic data in the Foundation fieldbus and experimental evaluation," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 167-174, 2005.
- [2] M. G. Song and Y. Y. Choo, "Performance analysis of sensor network real-time traffic for factory automation in intranet environment," *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 11, no. 7, pp. 1007-1015, 2008.
- [3] IEC 61158-4, Digital data communications for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems-part 4: data link protocol specification, 1999.
- [4] J. P. Thomesse, "Fieldbus technology in industrial automation," *IEEE proceedings*, vol. 93, no. 6, pp. 1073-1101, 2005.
- [5] H. S. Park and W. H. Kwon, "Industrial network and application," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 4-18, 1996.
- [6] K. C. Lee and S. Lee, "Real-time transmission properties of industrial switched Ethernet with cascade structure," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, vol. 10, no. 8, pp. 718-725, 2004.
- [7] A. Willig, "Polling-based MAC protocols for improving real-time performance in a wireless PROFIBUS," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 50, no. 4, pp. 806-817, Aug. 2003.
- [8] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus-DP," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 50, no. 4, pp. 784-

792, Aug. 2003.

- [9] Y. K. Bae, J. H. Park, K. C. Lee, and S. Lee, "Design of EtherCAT slave module for multi-axis smart driver," *2010 Korea Society for Precision Engineering Spring Conference*, pp. 69-70, 2010.
- [10] K. C. Lee, S. Lee, and M. H. Lee, "Worst-case communication delay of real-time industrial switched Ethernet with multiple levels," *IEEE Transactions of Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1669-1676, 2006.
- [11] Y. S. Moon, G. S. Lee, D. J. Seo, and Y. C. Bae, "The development of motor controller based on network using optic-EtherCAT," *Journal of Korea Multimedia Society*, vol. 14, no. 5, pp. 467-472, 2008.
- [12] G. Beckmann, EtherCAT communication specification, version 1.0, EtherCAT technology group, 2004.
- [13] J. H. Park, Y. K. Bae, K. C. Lee, and S. Lee, "Design of EtherCAT network for high speed synchronous control of industrial manufacturing robots," *2009 Korea Automation Control Conference*, pp. 949-951, 2009.
- [14] G. Cena, I. C. Bertolotti, A. Valenzano, and C. Zunino, "A high-performance CAN-like arbitration scheme for EtherCAT," *IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pp. 1-8, 2009.
- [15] J. C. Lee, S. J. Cho, Y. H. Jeon, and J. W. Jeon, "Dynamic drift compensation for the distributed clock in EtherCAT," *2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, pp. 1872-1876, 2009.
- [16] Y. S. Moon, N. Y. Ko, E. J. Kim, and Y. C. Bae, "Network module design based on photonic-EtherCAT for robot drive," *International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 824-829, 2008.
- [17] K. C. Lee, M. H. Kim, S. Lee, and H. H. Lee, "IEEE 1451 based smart module for in-vehicle networking systems of intelligent vehicles," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1150-1158, 2004.



김만호

1977년 4월 16일생. 2001년 동아대학교 기계공학부 졸업. 2002년 부산대학교 지능기계공학과 석사. 2008년 동 대학원 박사. 2006년~2010년 대구경북과학기술원(DGIST) 공공원천기술연구센터 연구원. 2010년~현재 부산대학교 기계공학연구정보센터 전임 연구원. 관심분야는 차량용 네트워크 시스템, 임베디드 시스템, 결함 허용을 위한 중복 시스템, 고령운전자 행동 분석 및 운전 부하 분석.



박지훈

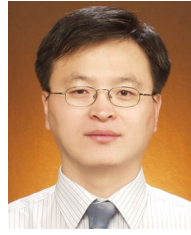
1981년 2월 8일생. 2004년 부산대학교 기계공학부 졸업. 2004년~현재 부산대학교 대학원 지능기계공학과 석박사통합과정 재학중. 관심분야는 네트워크 기반 분산시스템, CAN, FlexRay 기반 차량용 네트워크, Embedded 제어 시스템.



이 석

1961년 12월 11일생. 1984년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1985년 펜실바니아 주립대학교 석사. 1990년 동 대학원 박사. 1990년~1993년 신시내티 대학교 기계공학과 조교수. 1993년~현재 부산대학교 기계공학부 교수. 관심분야는

산업용 네트워크, 차량용 네트워크, 홈 네트워크, 센서 네트워크.



이 경 창

1971년 5월 1일생. 1996년 부산대학교 생산기계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2003년 동 대학원 박사. 1998년~2003년 기계공학연구정보센터 전임 연구원. 2003년~2005년 울산대학교 네트워크기반 자동화 연구센터 전임연구원.

2005년~현재 부경대학교 제어계측공학과 조교수. 관심분야는 산업용 네트워크, 차량용 네트워크, 홈 네트워크, 센서 네트워크.