

광 EtherCAT을 이용한 네트워크 기반 모터 제어기 개발

The Development of Motor Controller based on Network using Optic-EtherCAT

문용선, 이광석, 서동진, 배영철*

(Yong Seon Moon, Gwangseok Lee, DongJin Seo, and Youngchul Bae)

Abstract : In this paper, we design, implement and apply network physical layer to 100 BaseFx optical cable interface module based on industrial ethernet protocol which is physical layer of EtherCAT that has ensure its open standard ethernet compatibility which having been provided with real time of control in network of intelligent service robot, can be process numerous data to sensor and motor control system. Through BLDC motor control performance tests, we try to propose suitability as internal network of intelligent service robot and automation system.

Keywords : Optic EtherCAT, BLDC motor control, network base control, modular robot

I. 서론

자동화 시스템과 지능형 서비스 로봇의 눈부신 발전에 힘입어 자동화 및 로봇 시스템에서 구동 기술의 핵심인 모터제어 기술에 대한 큰 발전이 계속 진행되어 왔다. 산업 현장의 자동화 시스템의 경우 많은 모터가 유기적 협조하여 동작하도록 요구되고 있으며, 지능형 서비스 로봇의 경우 인간과 상호작용을 통하여 주변상황을 인식한 후 주행/조작함으로써 인간에게 필요한 서비스를 제공하게 된다. 자동화 시스템 및 로봇에서 사용하는 모터의 수는 자동화 및 로봇 시스템이 복잡해지고 사용자의 요구가 늘어남에 따라 계속 증가하는 추세이다. 이에 따라, 최근에 IT 기술의 발전과 더불어 모터 제어 시스템과 네트워크 기술을 융합한 네트워크 기반 모터 제어시스템에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 대표적인 사례로 CANOpen[1], SERCOS[2], Profibus[3] 등을 들 수 있다. 일반적으로 제작 용이성 및 유지 보수의 편리성 때문에 모듈화 로봇에 대한 관심이 많으며, 휴머노이드 로봇 모듈화를 위해서는 적어도 20개 이상의 모터가 사용되는 것으로 알려져 있다.

자동화 시스템 및 로봇의 경우, 제한된 공간에 센서, 모터, 모터 구동기 그리고 로봇 및 자동화 제어기 등의 전기적인 연결이 필요하며 이로 인하여 배선의 복잡성이 나타나며 이는 자동화 시스템 및 로봇의 설계에서부터 생산, 유지보수 측면에서 매우 불리한 요소로 작용하게 된다.

이러한 문제점들은 로봇, 자동화 설비에 대한 중앙집중식 제어 시스템 및 운전석 주위에 배선이 집중된 자동차에서도 동일하게 나타나고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하

기 위해 공장 자동화 시스템의 경우 모든 자동화 설비를 하나의 버스에 연결하여 제어하는 필드버스 시스템을 도입하여 중앙집중식 제어의 문제점을 해결하려고 노력했지만 제어의 실시간성, 폐쇄적인 네트워크 구조, 낮은 전송속도 등에 대한 문제는 여전히 해결하지 못한 문제로 남아있으며[4] 이러한 문제점은 지능형 로봇의 네트워크에 동일한 문제점으로 남아있다.

본 논문에서는 지능형 서비스 로봇 및 자동화 시스템의 네트워크에서 실시간 제어를 보장하면서 대량의 데이터를 처리할 수 있는 개방형 표준 이더넷 호환성을 가지고 있는 산업용 이더넷 프로토콜인 EtherCAT[5]을 기반으로 네트워크의 물리 계층을 100BaseFx인 광케이블 인터페이스 모듈을 설계, 구현하고 BLDC 모터 제어 시스템에 적용하여 자동화 시스템 및 지능형 서비스 로봇 시스템의 내부 네트워크로서의 적합성을 제시하고자 한다.

II. 광 EtherCAT 기반 센서/액츄에이터 네트워크

1. EtherCAT 프로토콜

EtherCAT 프로토콜은 독일의 BeckHoff에서 개발한 후 2003년 11월에 EtherCAT Technology Group을 결성하여 기술을 공개한 개방형 산업용 이더넷 기술로 IEC규격(IEC/PAS 62407)과 ISO 규격(ISO 15745-4)으로 인증된 국제표준 프로토콜로 뛰어난 동기화 특성과 함께 제한된 토폴로지에 의존하지 않는 성능을 가진다[5]. 2003년 이후 ETC (EtherCAT Technology Group)에서 어플리케이션 시리즈를 계속해서 개발하고 있고 다양한 컨트롤러와 운영체제 상에서 구현된 검증된 제어용 네트워크이다. 마스터와 슬레이브, 슬레이브 간 및 마스터 간의 통신을 지원하며, 국제안전표준인 IEC 61508에 따라 개발된 프로토콜로서 자동화 네트워크에서의 안전 구현이 용이하다.

EtherCAT의 성능은 100Mbps 이상의 통신 속도와 256개의 분산 디지털 I/O에 약 $11\mu s$, 1000개의 분산 디지털 I/O에 약 $30\mu s$, 그리고 200개 아날로그 I/O에 $50\mu s$ 등과 같은 업데이트 속도를 가지며, 터미널 블록, 디지털 I/O 모듈화

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 11. 1., 채택확정 : 2007. 12. 10.

문용선, 이광석 : 순천대학교 정보통신공학부

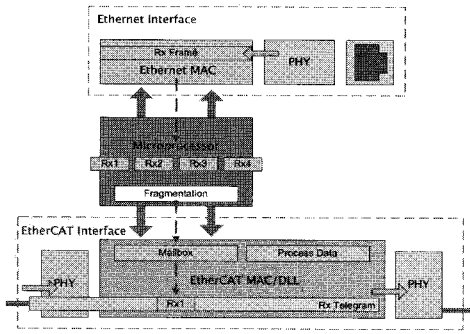
(moon@sunchon.ac.kr/a7stone@naver.com)

서동진 : 레드윈테크놀로지(주) 로봇연구소(commidi@gmail.com)

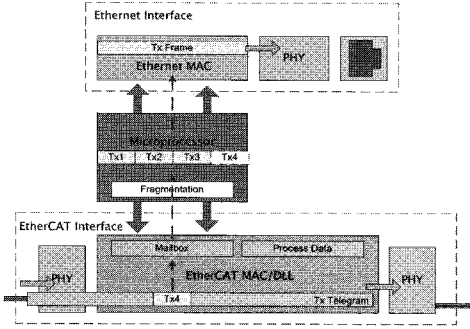
배영철 : 전남대학교 공학대학 전기·전자통신·컴퓨터공학부

(ycbae@chonnam.ac.kr)

* This research was supported by the "GRRC" project of Gyeonggi Provincial Government, Republic of Korea.



(a) Data frame transmission



(b) Data frame receive

그림 1. EtherCAT 데이터 프레임의 송신 및 수신.

Fig. 1. Transmit/receive of EtherCAT data frame.

디바이스의 각각의 I/O 블록사이의 데이터 전송은 모듈내부의 데이터이동을 최대 1Gbps/s의 전송속도와 약 1.5ns의 지연 시간 성능을 가진다.

EtherCAT의 데이터 전송은 이더넷의 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) 방식이 아닌 Broad Cast 방식으로 마스터에서 데이터 프레임을 전송하면, 마스터와 연결된 모든 슬레이브에서 수신 받아 해석 및 처리를 하는데, EtherCAT에서 슬레이브는 데이터 프레임이 슬레이브 노드를 통과하는 동안 해당 노드에 전달된 데이터를 읽어 데이터를 수신하고 전송할 데이터가 있을 경우 텔레그램이 통과하는 동안 입력한 데이터를 텔레그램에 삽입하여 전송하게 된다. 이때 해당 노드에서 지연되는 시간은 겨우 몇 ns만이 소요된다. 그림 1은 EtherCAT 프로토콜에서 수신데이터를 이더넷을 통해 전송하는 방식과 이더넷 프로토콜을 통해 수신된 데이터를 EtherCAT 프로토콜로 전송하는 방식을 보여준다.

그림 1(a)의 EtherCAT 데이터 프레임 송신은 경우 이더넷 네트워크의 데이터는 프레임 단위로 이더넷 인터페이스의 물리계층(PHY)과 이더넷 MAC를 통해 수신되며, 수신된 데이터 프레임은 마이크로프로세서를 통해 1~n 개의 데이터로 쪼개진다. 1~n개의 데이터를 EtherCAT 인터페이스의 EtherCAT MAC/DLL를 통해 개별적으로 프레임을 구성하고 물리계층을 통해 순서대로 EtherCAT 프로토콜로 전송된다. 그림 1(b)의 EtherCAT의 데이터 프레임 수신은 EtherCAT 인터페이스의 물리계층과 EtherCAT MAC/DLL를 통해 데이터 프레임을 수신 받은 후 마이크로프로세서로 전송된다.

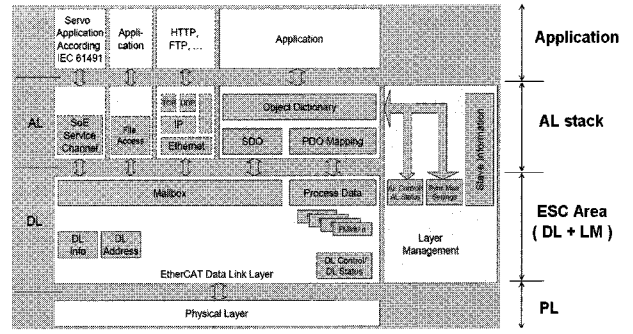


그림 2. EtherCAT 프로토콜 계층 구조.

Fig. 2. Hierarchy structure of EtherCAT protocol.

마이크로프로세서는 이더넷 프로토콜 상으로 전송하기위한 데이터 프레임의 크기를 미리 정의 하고 있다가, 버퍼가 다 채워질 때 까지 데이터를 수신 받는다. EtherCAT 인터페이스를 통해 n 개의 데이터를 수신 받아 데이터 프레임을 다 채우면, 이를 한꺼번에 이더넷 인터페이스를 통해 이더넷 프로토콜로 전송한다.

EtherCAT의 계층 구조는 그림 2와 같은 ISO/IEC 7498 표준규격을 사용한 개방 시스템 상호작용(open system interaction)을 사용하는 자동화 시스템의 통신 구조를 따르고 있으며, OSI 7계층 구조에서 7계층인 응용계층, 2계층인 데이터 링크 계층, 그리고 1계층인 물리 계층으로 구성하고 있다.

2. 광 EtherCAT

자동화 시스템 및 지능형 서비스 로봇은 다양한 서비스를 제공하기 때문에 제어 네트워크의 변경이 쉬워야한다. 또한 자동화 시스템 및 로봇 플랫폼의 크기가 제한되어있고 이들 시스템 내부에서 사용하는 많은 모듈에 따른 센서 및 액츄에이터의 개수는 시스템들의 기능이 많으면 많을수록 늘어나 고속의 제어 데이터 전송속도와 각 모듈과 모듈사이, 모듈내부의 액츄에이터와 액츄에이터 사이의 실시간 제어와 모듈 단위의 데이터 전송을 중재하는 기능 등의 기술적 요건 등을 충족할 만한 네트워크 프로토콜이 필요하다. 시스템의 모듈 상태 이상 및 고장이 발생할 경우 이를 처리하기 위해서는 기존의 라우터 및 허브가 필요한 상위 프로세서 네트워크와 하위 센서/액츄에이터 네트워크로의 분할된 네트워크 구조가 아닌 단일 네트워크를 이용한 상/하위 수직 통합 및 수평 통합으로 상황에 따른 보다 신속한 처리를 수행할 수 있는 네트워크 기반이 필요로 한다.

EtherCAT은 100Mbps 이상의 통신 속도를 보장하며, 제어시스템 내부의 각 모듈들이 네트워크를 중심으로 독립적으로 모듈화 되어있어 새로운 모듈의 확장이 쉽고, 분산 클럭(DC; Distributed Clock)을 지원함으로써 수많은 모듈들의 동기화(synchronization)를 이룰 수 있어 실시간 제어 기능을 가지고 있다. EtherCAT 네트워크는 액츄에이터 제어에 있어서 고속의 데이터를 전송하게 됨으로서 상위 제어기단에서 액츄에이터의 위치, 속도, 토크 제어가 이루어지는 방식인 네트워크 기반 소프트 액츄에이터 제어가 가능하대[6,7]. 네트워크기반 소프트 액츄에이터 제어란 기존의 액츄에이

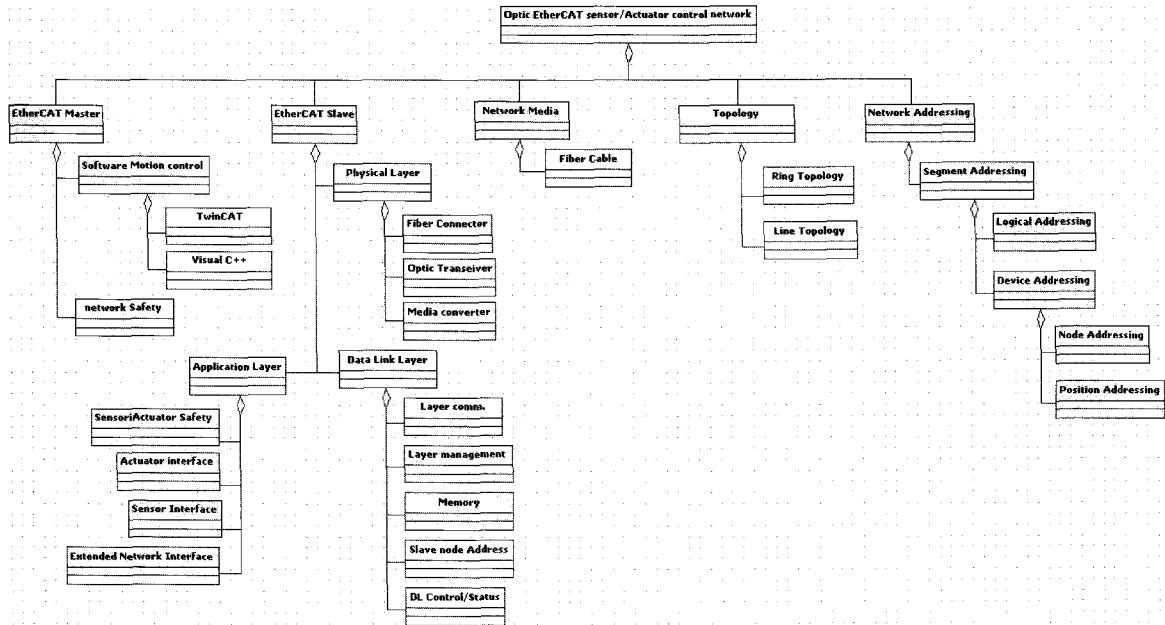


그림 3. 지능형 서비스 로봇 네트워크 구조

Fig. 3. Network structure of intelligent service robot.

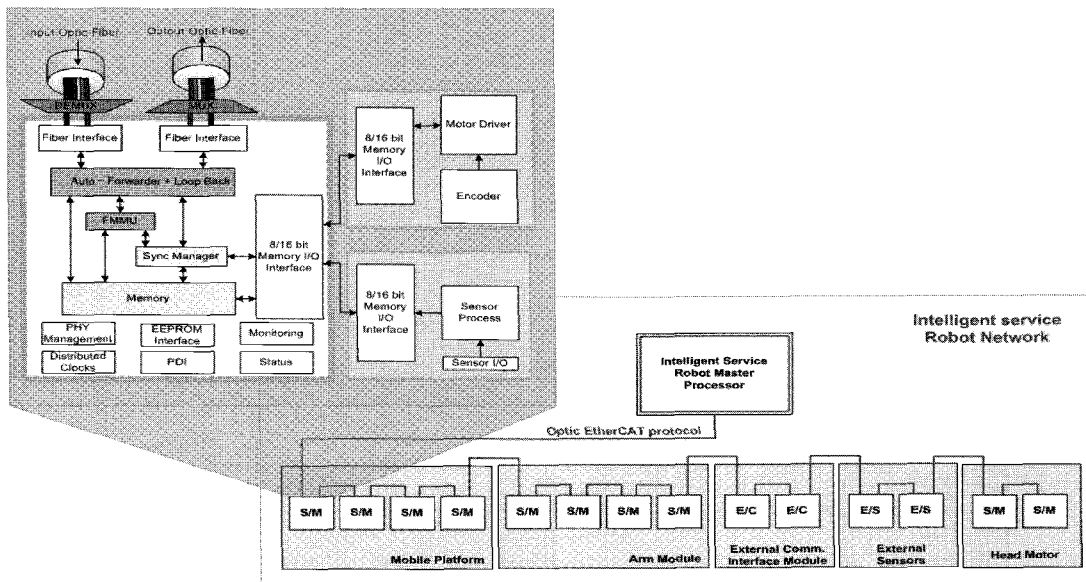


그림 4. 광 EtherCAT기반 센서/액추에이터 모듈 구성도

Fig. 4. Structure of Optic-EtherCAT based sensor/actuator module.

터 제어방식과 같이 하드웨어 레벨(액추에이터 드라이버)에서 액추에이터 제어가 이루어지는 것이 아니라 고속의 네트워크를 중심으로 상위 제어기 단에서 액추에이터의 제어가 이루어지도록 하는 것을 의미한다. 이 기법의 장점은 액추에이터 드라이버 단의 기능이 상위제어 단으로 이전함으로써 그 기능이 대폭 줄어들어 액추에이터 드라이버의 크기의 감소와 경량화가 가능하며, 하드웨어의 크기가 줄어들게 되어 센서/액추에이터 컴포넌트의 모듈화가 쉬우며, 여러 어플리케이션에 응용이 가능하게 되어 액추에이터의 재사용성을 높일 수 있다.

자동화 시스템 및 로봇 시스템에서의 제어 네트워크의

특성상 고속의 데이터 전송뿐만 아니라 데이터 전송 할 때 높은 신뢰도와 외부 잡음에 강한 네트워크를 필요로 하며, 이는 네트워크의 물리계층을 기존의 전지식 케이블 대신하여 광케이블 사용함으로써 대체가 가능하다. 그림 1은 제어용 네트워크에서 사용하는 케이블의 종류에 따른 손실 및 전송속도를 표시한 것으로 기존의 전기선 케이블은 전송속도에서 어느 정도 한계를 가지고 있으나 광케이블은 이러한 한계가 없기 때문에 모듈 개수의 증가에 따른 통신 트래픽을 발생시키지 않는다. 그리고 전기선 케이블이 가지는 문제점인 외부의 전자기장의 영향을 받지 않으며 데이터를 전송 할 때 손실은 1Gbit당 1비트로서 매우 높은 신뢰도를

제공한다.

이와 같이, 고속의 데이터 전송이 가능하며, 실시간 제어 및 뛰어난 동기화 특성을 가지는 EtherCAT을 기반으로 하고 데이터 전송에 있어서 신뢰성이 높은 광케이블을 사용하는 지능형 서비스 로봇의 제어 네트워크를 구성 사례를 정하여 클래스 다이어그램으로 표현하면 그림 3과 같다.

3. 센서/액추에이터 네트워크 모듈

고속 데이터 전송이 가능하며, 실시간 제어 및 뛰어난 동기화 특성을 가지는 EtherCAT을 기반으로 하고 데이터 전송에 있어서 신뢰성이 높은 광케이블을 사용하여 지능형 서비스 로봇의 네트워크로 구성하기 위해서는 로봇 내부의 각 모듈에서 광 EtherCAT과 인터페이스를 위한 장치가 필요로 하게 되는데, 이러한 인터페이스 장치를 그림 4와 같은 광 EtherCAT기반 센서/액추에이터 네트워크 인터페이스 모듈을 구현한다.

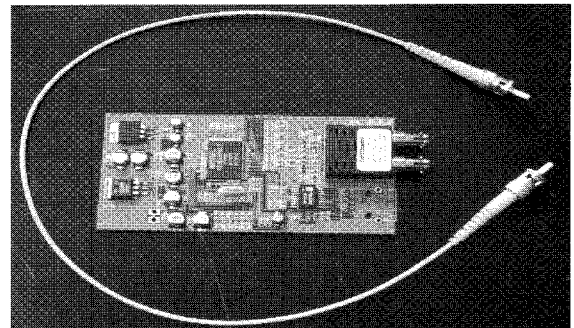
그림 4에서 지능형 서비스 로봇의 머리(head), 팔(arm), 이동(mobile), 외부 통신(external communication), 외부 센서(external sensor)등의 컴포넌트들과 각 컴포넌트 내부의 M/S (motor/sensor), S(sensor), C(communication)와 같은 모듈들이 단지 한 가닥의 광케이블로 연결된 네트워크 구조를 보여 주고 있다. 이들 모듈 사이의 광 EtherCAT기반의 센서/액추에이터 네트워크연결을 위한 인터페이스 모듈의 구조는 광케이블을 위한 물리계층과 센서/액추에이터로 구성된 응용계층 그리고 물리 계층과 응용계층간의 통신연결하고 EtherCAT 통신의 동기화 및 물리계층등의 통신 제어를 위한 데이터 링크 계층으로 구성되어 있다.

III. 광 EtherCAT 기반 BLDC 모터 제어 네트워크 모듈 구현 및 성능 평가

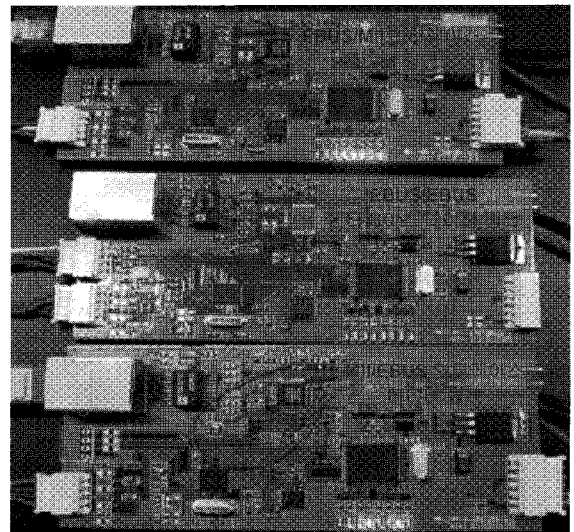
1. 모듈 구현

모듈로봇 모터제어 시스템을 개발하기 위해 광케이블, 광 트랜시버, 미디어 컨트롤러를 사용하여 EtherCAT 슬레이브 제어기(Slave Controller)의 MII 인터페이스와 연결하고 EtherCAT 프로토콜의 물리계층에서 전기신호를 광 신호로 광 신호를 전기신호로 인터페이스 가능하도록 설계하고 이를 구현하였다. EtherCAT 프로토콜의 데이터 링크 계층에 해당하는 EtherCAT 슬레이브 제어기는 100BaseT/Tx 방식의 이더넷 인터페이스 MII(Media In-dependant Interface)를 지원하는데, MII 인터페이스는 MAC(Media Control)와 물리 계

층 간의 상호 연결을 제공하며 이는 송신과 수신방향에 대해 4비트의 병렬 데이터를 송수신하게 된다. 이러한 이유로 빛/전기 신호 전환이 가능한 미디어 컨트롤러를 MII 인터페이스에 4비트의 병렬 데이터를 송수신에 맞게 하드웨어를 구성하면 EtherCAT 프로토콜의 물리계층을 광통신으로 전송할 수 있게 된다. 실제 하드웨어로 구현된 광 EtherCAT 기반 모터 제어 네트워크 모듈을 그림 5에 나타내었다.



(a) Optic-EtherCAT Physical layer



(b) Optic-EtherCAT data link layer

그림 5. 광 EtherCAT기반 모터제어 네트워크 모듈 물리 및 데이터 링크계층 구현.

Fig. 5. Implementation of physical and data link layer of motor control network based on optic EtherCATAccess.

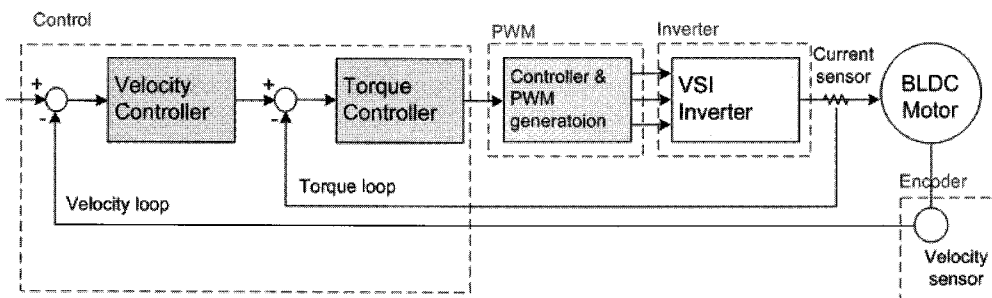


그림 6. BLDC 속도제어 블록 다이어그램.

Fig. 6. Block diagram of BLDC speed control.

2. BLDC 속도 및 전류 제어

광 EtherCAT기반 센서/액츄에이터 네트워크 모듈의 응용 계층은 BLDC 액츄에이터 드라이버로 ET1200의 SPI 인터페이스를 사용하여 광 EtherCAT의 데이터 링크 계층과의 인터페이스하여 BLDC 액츄에이터를 구동하고 액츄에이터의 센서 데이터를 수신하여 BLDC의 속도제어와 토크제어를 실행하도록 하였다. 그림 6은 BLDC 액츄에이터의 속도 제어 블록 다이어그램을 보여준다.

그림 6에서 제어 블록은 PIC 마이크로프로세서를 이용하고 PWM 블록은 PWM 블록 드라이버 소자인 IR2131을 사용하였다. 인버터 블록은 FET 소자인 VSI 3상 인버터로 BLDC 모터 드라이버를 구현하였으며 PIC 마이크로프로세서에서SPI 인터페이스로 데이터 링크 계층과의 통신을 연결하여 광 EtherCAT를 적용한 BLDC 모터의 속도 제어를 수행하였다. 그림 7에 광 EtherCAT 기반 BLDC 모터 제어 시스템 구현을 위한 실험 장치를 나타내었다.

그림 8는 BLDC 모터의 속도 및 전류 제어를 위해 사용할 디지털 PID 제어기를 나타낸다. 그림 8의 블록 다이어그램을 이용하여 BLDC 모터의 P, PI, PID 제어를 수행하였다. 제어입력 속도(target speed) 1000 rpm, 비례제어(P) 이득 0.09의 값을 가지고 PID 제어기의 비례(P) 이득만을 적용한 후의 BLDC 모터의 속도 응답을 관찰하였을 때 그 결과는 그림 9와 같다.

입력 속도 1000 rpm, P 이득 0.06, I 이득 0.05의 값을 가

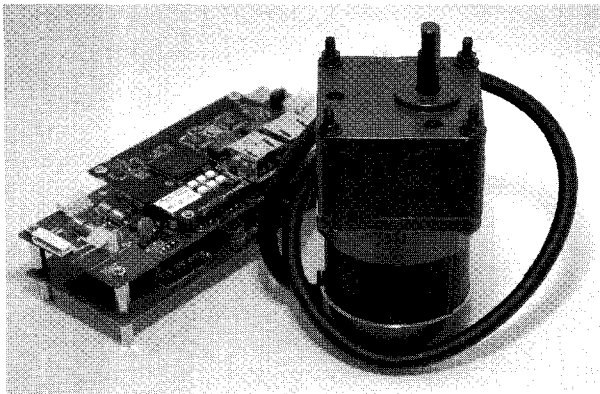


그림 7. 광 EtherCAT기반 BLDC 모터 제어 시스템 구현.
Fig. 7. Implement of BLDC motor control system based on Optic-EtherCAT.

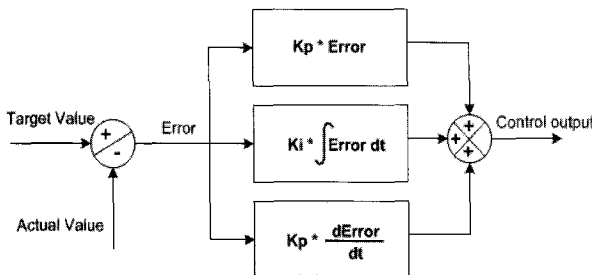


그림 8. 속도 및 전류 PID 제어기 구조.
Fig. 8. Speed and current PID controller structure.

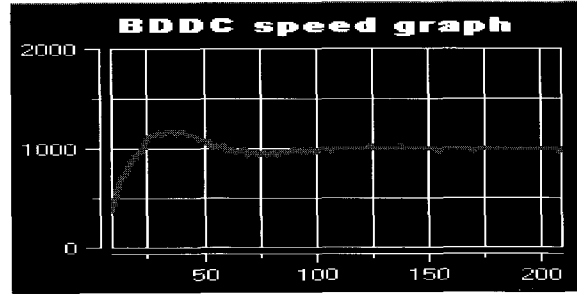


그림 9. P 이득 적용 후 모터 속도 응답.
Fig. 9. Motor speed response after applied P gain.

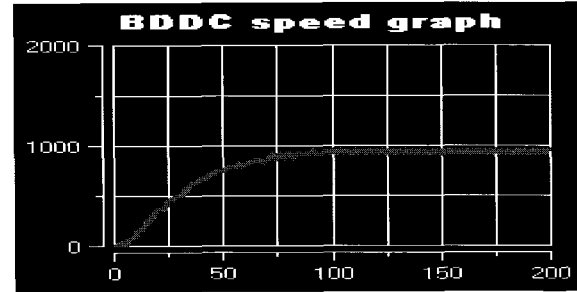


그림 10. PI 이득 적용 후 모터 속도 응답.
Fig. 10. Motor speed response after applied PI gain.

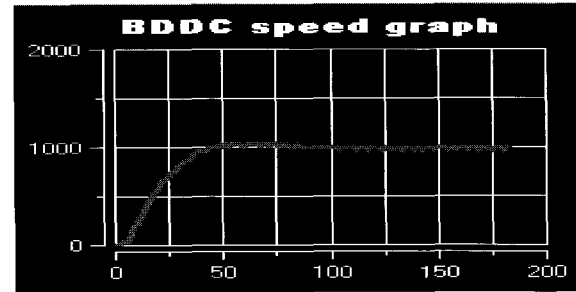


그림 11. PID 이득 적용 후 모터 속도 응답.
Fig. 11. Motor speed response after applied PID gain.

지고 PI 이득을 적용한 후 BLDC 모터의 속도 응답을 관찰하였을 때 그 결과는 그림 10과 같다.

입력 속도 1000 rpm, P 이득 0.04, I 이득 0.03, D 이득 0.02의 값을 가지고 PID 제어를 적용하였을 때 BLDC 모터의 속도 응답은 그림 11과 같다.

IV. 결론

자동화 시스템 및 지능형 서비스 로봇을 위한 센서/액츄에이터 제어 네트워크를 구축을 위해 제어의 실시간성이 보장되면서 대용량의 데이터 전송과 표준 이더넷 호환이 가능한 산업용 이더넷 프로토콜인 EtherCAT의 물리 계층을 광 케이블로 구현하여 실제로 모듈화된 자동화 시스템 및 지능형 서비스 로봇을 위한 네트워크로서의 적합성을 위한 시험을 BLDC 모터를 대상으로 P, PI, PID 제어를 수행함으로써 그 가능성을 확인하였다. 이 시험 결과 로봇 및 자동화 시스템에서 복잡한 배선 문제를 쉽게 해결할 수 있을 것으로

기대되며 보다 강건한 시스템 구축이 과제로 남는다.

참고문헌

[1] CiA, "DS V4.0.2: CANopen application layer and communication profile," *CAN in Automation*, 2006.

[2] IEC, "CEI/IEC61491 Second edition : Sercos Specification," *International standard*, 2002.

[3] PNO, "PROFIBUS Specification," *according to the European Standard*, EN 50170 vol. 2, 1998.

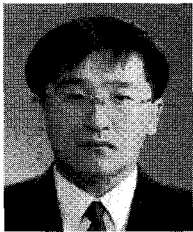
[4] Digital data communication for measurement and control-Fieldbus for use in industrial control systems.

IEC 61158 Ed.3 CDV, Type 8, 2001.

[5] G. Beckmann, "EtherCAT Communication Specification, Version 1.0," EtherCAT Technology Group, 2004.

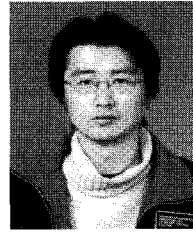
[6] 문용선, 이영필, 서동진, 이성호, 배영철, "EtherCAT를 이용한 소프트 모터 제어기 개발에 관한 연구," *퍼지 및 지능 시스템학회 논문지*, 제 17 권 제 6 호, pp. 826-831, 2007.

[7] 문용선, 이광석, 서동진, 이성호, 배영철, "모듈 로봇 구현을 위한 네트워크 기반 모터 제어 드라이버 개발," *제 7 권 제 7 호*, pp. 887-892, 2007.



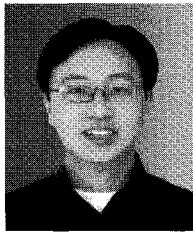
문 용 선

1983년 조선대학교 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석·박사. 1992년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수. 관심분야는 산업통신망 및 로봇.



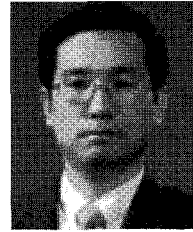
이 광 석

2006년 순천대학교 전자공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 석사 재학. 관심분야는 로봇 제어, 모터 제어, 산업용통신망.



서 동 진

2000년 조선대학교 제어계측공학과 졸업. 2002년 동 대학원 석사. 2004년 미국 카네기 멜론 대학 로보틱스연구소 교환 연구원. 2006년 동 대학원 박사. 2006년 (주)한국에센 연구원. 2007년~현재 (주)레드윈 테크놀로지 부설로봇 연구소 책임연구원. 관심분야는 충돌회피, 위치추정, 로봇 시뮬레이션, 패스플래닝, 다중로봇 동작조정.



배 영 철

1984년 광운대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학원 박사. 1986년~1991년 한국전력공사. 1991년~1997년 한국과학기술정보연구원. 1997년~2006년 여수대학교 교수. 2006년~현재 전남대학교 공학대학 전기·전자통신·컴퓨터 공학부 교수. 관심분야는 로봇 제어, 카오스 제어 및 동기화, 비선형 제어.