

# RTOS기반 LinuxCNC에서 EtherCAT 통신이 적용된 3축 CNC 제어 시스템 개발

## Development of RTOS Based LinuxCNC 3-axis Control System with EhterCAT Communication

강유수<sup>a</sup>, 유경석<sup>a</sup>, 태병희<sup>a</sup>, 최인휴<sup>b</sup>, 이정완<sup>a</sup>, 서영호<sup>a</sup>, 김병희<sup>a\*</sup>

Y.S.Kang.<sup>a</sup>, G.S.Yu.<sup>a</sup>, B.H.Tae.<sup>a</sup>, I.H.Choi.<sup>b</sup>, J.W.Lee.<sup>a</sup>, Y.H.Seo.<sup>a</sup> and B.H.Kim.<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup> Dept. of Advanced Mechanical Engineering(Mechatronics Engineering) Kangwon National University, 1 Gangwondaehakgil, 24341, Gangwon-do Chuncheon-si

<sup>b</sup> Dept. of CNC BIZ CSCAM, #509, Biz center-dong, SKn Techno Park, 124, Sagimakgol-ro, Jungwon-gu, Seongnam-si

Received 31 August 2020; Revised 13 October 2020; Accepted 14 October 2020

### Abstract

In this paper, we proposed a PC-based CNC control system using EtherCAT-based servo drive and I/O device. The default communication of LinuxCNC is a parallel port, and data processing with high bandwidth is impossible. However, it is possible to apply various bandwidth devices through the application of EtherCAT, one of the industrial Ethernet communications with high bandwidth. Therefore, the hardware control method of LinuxCNC was applied through EtherCAT communication from the existing parallel port. Finally, through HAL configuration, I/O device operation check and 3-axis motion control proved the LinuxCNC system with EtherCAT.

*Keywords: RTOS, LinuxCNC, EtherCAT, 3-axis, I/O*

## 1. 서론

공작기계용 CNC 제어시스템은 크게 폐쇄형 제어시스템과 개방형 제어시스템으로 구성된다. 폐쇄형 제어시스템의 경우 제조사의 하드웨어 및 소프트웨어의 변경은 제한적으로 이루어진다<sup>[1]</sup>. 반면 개방형 제어시스템의 경우 PC 기반의 제어시스템을 구성할 수 있다. 개방형 제어시스템은 사용자의 요구 사항에 맞는 시스템 구성이 용이하고, 하드웨어 및 소프트웨어 구성 시 제한적이지 않다<sup>[2]</sup>.

최근 공작기계의 경우 IoT(Internet of Things) 기술의 발달로 인해 센서와 인터넷의 융합을 통한 시스템 모니터링 및 센서 데이터 기반 실시간 가공 성능을 향상시키는 연구들의 수행이 요구되고 있다<sup>[3]</sup>. 하지만 대부분의 하드웨어와 기존에 사용된 폐쇄형 제어시스템의 경우 서로 다른 통신 인터페이스를 채택하고 있어 새로운 기술을

적용하기는 쉽지 않다. 개방형 제어시스템 중 LinuxCNC의 경우 오픈소스 기반의 공작기계용 CNC 제어시스템으로, 많은 연구자들이 사용하고 있는 CNC 소프트웨어이다. LinuxCNC는 하드웨어-소프트웨어 간 디폴트 통신 인터페이스로 패러럴 포트를 적용하고 있다. 하지만 CAN(Controller Area Network)과 같은 높은 대역폭의 버스를 요구하는 경우, 디폴트 통신의 패러럴 포트로 시스템을 구성하는 것은 한계가 있다. 따라서 패러럴 포트 기반 통신에 단점을 보완하기 위해 넓은 대역폭을 가진 산업용 Ethernet 기반 EtherCAT 통신을 LinuxCNC에 적용한다면 높은 대역폭을 요구하는 센서모듈과 서보드라이브를 동시에 제어할 수 있다<sup>[4, 5]</sup>.

이에 본 연구에서는 LinuxCNC에서 EtherCAT 통신 인터페이스를 적용하여 I/O 장비와 3개의 서보드라이브가 적용된 테스트 베드를 구축하고, I/O 장비와 서보드라이브의 구동을 통한 제안된 시스템을 검증하였다.

\* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6374

fax: +82-33-259-5551

E-mail address: kbh@kangwon.ac.kr (Byeong Hee Kim).

## 2. 본 론

### 2.1 LinuxCNC 시스템 구성

Fig. 1 은 본 연구에서 제안한 EtherCAT 통신 인터페이스 기반 LinuxCNC 3축 제어시스템의 모식도를 나타낸다. LinuxCNC에 사용되는 메인 컴퓨터의 경우 Intel Core i7의 멀티 코어 CPU를 사용하였다. LinuxCNC의 경우 최대 9축의 제어가 가능하기 때문에, I/O 장치들 또한 무수히 많이 사용될 수 있다. 이를 위해 I/O 장치는 모듈방식으로 확장이 가능한 백호프(Beckhoff) 사의 EtherCAT 통신 기반 장비를 사용하였다. 서보드라이브의 경우 CANOpen 통신 프로토콜이 적용된 델타일렉트로닉스(Delta Electronics)사의 서보드라이브를 사용하여 시스템을 구성하였으며, 해당 장비들의 통신 주기는 1 ms로 실시간 통신을 수행하도록 시스템을 구성하였다.

### 2.2 RTOS 기반 EtherCAT 통신이 적용된 LinuxCNC 아키텍처

Fig. 2 는 RTOS 기반 EtherCAT 통신이 적용된 LinuxCNC 시스템 아키텍처를 나타낸다. 일반 OS(Operating System)의 경우 소프트웨어간 우선순위는 OS에서 우선순위를 임의로 결정한다. RTOS(Real-Time OS)는 사용자가 임의로 소프트웨어 우선순위를 결정할 수 있게 한다. LinuxCNC의 경우 서보드라이브의 모션제어를 위해 1 ms 통신 주기를 충족하는 실시간성을 보장받아야 한다. 이를 위해 일반 Linux OS에 RTOS를 적용하여 LinuxCNC와 EtherCAT 소프트웨어의 실시간성을 보장받는다. Fig. 2에 나타난 LinuxCNC 아키텍처의 주요 모듈은 EMCGUI, EMCTASK, EMC MOT, EMCIO, Hardware Abstraction Layer(HAL)로 구성돼 있다. EMCGUI는 시스템의 텍스트 및 그래픽 기반의 사용자 인터페이스로 구성되고, EMCTASK는 RS-274 NGC G-code를 해석하며, EMC MOT는 모션관련된 선형보간(Interpolation)을 담당하며, EMCIO는 I/O 장비들의

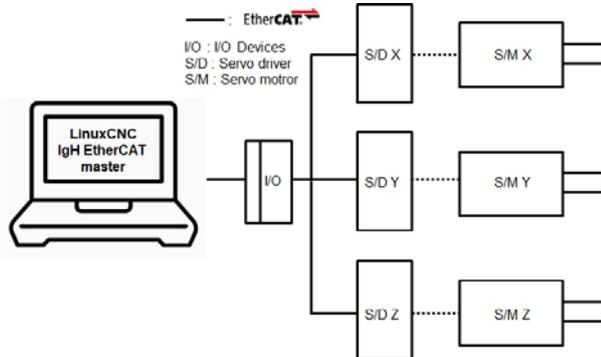


Fig. 1 Schematic of LinuxCNC 3-axis control system with EtherCAT communication

상태를 담당한다. HAL의 경우 연결된 하드웨어와 LinuxCNC의 연결을 위한 핀 정보를 나타낸다<sup>6)</sup>.

Fig.2에 나타난 IgH EtherCAT Master는 Linux에서 EtherCAT을 사용하기 위한 소프트웨어이다. LinuxCNC에 EtherCAT 통신을 적용하기 위해선 LinuxCNC에 구성된 EMC MOT, EMCIO 모듈과 EtherCAT master 부분의 연동을 통하여 LinuxCNC에서 EtherCAT 통신기반의 하드웨어를 사용할 수 있게 된다<sup>7)</sup>.

### 2.3 RTOS 기반 EtherCAT 통신이 적용된 LinuxCNC 시스템 구현

LinuxCNC의 설치에 LinuxCNC 홈페이지에서 제공된 최신버전의 ISO 파일을 사용한다<sup>8)</sup>. LinuxCNC의 버전은 2.7.14버전이며 Linux의 경우 데비안 7버전이며 적용된 Linux 커널의 경우 RTAI 기반 3.4.9버전의 커널이 적용되었다.

제공된 LinuxCNC 설치 후 EtherCAT HAL 드라이버를 이용하기 위해서는 EhterCatDriver - linuxCNC Wiki 문서의 내용을 기반으로 적용하여야 한다<sup>9)</sup>. 제공된 내용을 바탕으로 EtherCAT HAL 드라이버 설치를 수행 후 IgH EtherCAT master의 환경설정을 수행한다. 이때 NIC(Network Interface Card)의 드라이브 구동 방식과 MAC(Media Access Control) 주소의 설정을 진행하여야 한다. NIC 드라이브 구동과 MAC 주소 설정이 완료된 후 EtherCAT master의 작동여부를 확인하여야 한다. EtherCAT master 작동 여부는 사용될 EtehrCAT slaves 장비들을 연결한 후 터미널 환경에서 다음의 명령어를 기입 후 확인 할 수 있다.

```
# sudo ethercat master
# sudo ethercat slaves
```

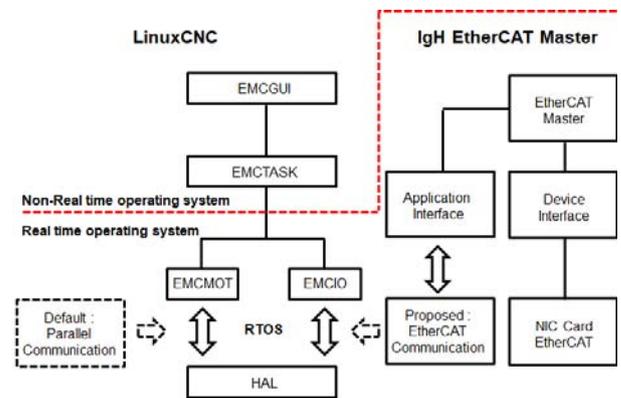


Fig. 2 Schematic diagram RTOS based LinuxCNC system architecture with EtherCAT communication

Fig. 3은 상기 명령어를 기입했을 때 확인할 수 있는 상태창이다. 여기서 명령어 중 sudo는 Super user do의 약자로 유닉스 계열의 운영 체제에서 슈퍼유저로서 프로그램을 구동할 수 있도록 권한을 주는 명령어이다. ethercat master 명령어는 IgH EtherCAT master의 현재 상태를 나타내주는 명령어이고, ethercat slaves는 현재 EtherCAT master에 연결된 EtherCAT slaves 장치의 정보를 확인하고자 할 때 사용하는 명령어이다. Fig. 3(a)의 경우 ethercat master라는 명령어를 기입했을 때 확인할 수 있는 정보창이며, 나타난 정보는 다음과 같다. Phase 는 EtherCAT master의 현재 상태 나타내며, Active는 EtherCAT master의 구동 상태를 나타내고, NIC의 MAC 주소 및 데이터 전송 현황 등을 확인 할 수 있다. Fig. 3(b)는 ethercat slaves라는 명령어를 기입하였을 때 확인할 수 있는 정보창이며, 해당 명령어를 통해 현재 EtherCAT slaves 상태 정보와 연결된, 장비 정보를 확인할 수 있다.

### 2.4 EtherCAT 통신기반 LinuxCNC 3축 테스트베드 구축

2.3절까지의 내용은 LinuxCNC 시스템 아키텍처 와 EtherCAT 그리고 LinuxCNC에서 EtherCAT을 사용하기 위한 설정에 관하여 기술하였다. 본 절에서는 앞에서 적용된 내용을 바탕으로 EtherCAT 통신이 적용된 LinuxCNC에서 3축 테스트 베드 구축에 관하여 기술한다.

LinuxCNC EtherCAT HAL드라이버의 설치가 끝난 후 LinuxCNC EtherCAT에 관련된 예제 파일을 활용하여 시스템을 구축하였다. 예제파일의 위치는 /usr/share/linuxcnc-ethercat/example/swm-fm45a 의 예제를 참고하여 시스템을 구축하였다.

구성된 시스템에 사용된 NIC는 Intel 82574L gigabit 모델을 사용하였고, 서보드라이버는 CIA402 기반의 통신 프로토콜이 적용된 델타일렉트로닉스사의 ASDA A2 0221-E 모델을 사용하였으며, 서보 모터는 브레이크 타입 모터(ECMA-C10602FS) 1개와 일반 모터 (ECMA-C1060ES) 2개 총 3개의 모터를 사용하였다.

I/O 장치는 EtherCAT 통신이 적용된 모듈방식의 I/O 장비를 사용하였고, EtherCAT coupler는 EK1100, Digital Input/Output 장비는 EL1002, EL2008, EL1008을 사용하여 시스템을 구성하였다.

Fig. 4는 상기 명시된 하드웨어를 바탕으로 구성한 RTAI 기반 LinuxCNC EtherCAT 통신 3축 제어시스템 테스트 베드를 나타낸다. 전원 노이즈 제거를 위하여 전원 노이즈 제거 필터로 구성된 전장 박스 구성을 통한 해당 테스트 베드의 안전성을 확보하였다.

### 2.5 EtherCAT 통신기반 LinuxCNC 3축 테스트베드 I/O구동

본 절에서는 EtherCAT 통신 기반 LinuxCNC 3축 테스트 베드 구동과 관련하여 I/O 테스트를 진행한다. Fig.5는 연결된 I/O 장치와

LinuxCNC의 입·출력 결과를 나타낸다. I/O 장치는 EtherCAT 통신으로 Main PC와 연결되어 있으며, LinuxCNC의 EMCIO 부분과 HAL 부분과 연동이 되어있다. I/O 장치와 LinuxCNC의 EtherCAT 기반 통신 확인은 LinuxCNC HAL configuration을 통하여 간단히 확인하였다. HAL configuration은 LinuxCNC에 구성된 HAL pin들의 정보를 제공하며, I/O 장치와 LinuxCNC와 맵핑된 HAL pin의 ON/OFF 신호를 통하여 EtherCAT 통신 여부를 확인 할 수 있다.

```

터미널 - kang@kan
파일(F) 편집(E) 보기(V) 터미널(T) 이동(G) 도움말(H)
kang@kang: ~$ ethercat master
Master0
Phase: Operation
Active: yes
Slaves: 9
Ethernet devices:
Main: 00:01:05:3a:f5:5c (attached)
Link: UP
Tx frames: 17914
Tx bytes: 2783929
Rx frames: 17913
Rx bytes: 2783680
Tx errors: 0
Tx frame rate [1/s]: 1001 836 251
Tx rate [KByte/s]: 202.8 139.2 38.2
Rx frame rate [1/s]: 1001 836 251
Rx rate [KByte/s]: 202.8 139.2 38.2
    
```

(a)

```

터미널 - kang@kan
파일(F) 편집(E) 보기(V) 터미널(T) 이동(G) 도움말(H)
kang@kang: ~$ ethercat slaves
0 0:0 OP + EK1100 EtherCAT-Koppler (2A E-Bus)
1 0:1 OP + EL1008 8K. Dig. Eingang 24V, 3ms
2 0:2 OP + EL1008 8K. Dig. Eingang 24V, 3ms
3 0:3 OP + EL2008 8K. Dig. Ausgang 24V, 0.5A
4 0:4 OP + EL2008 8K. Dig. Ausgang 24V, 0.5A
5 0:5 OP + EL2008 8K. Dig. Ausgang 24V, 0.5A
6 0:6 OP + ASDA-A2-E
7 0:7 OP + ASDA-A2-E
8 0:8 OP + ASDA-A2-E
    
```

(b)

Fig. 3 Status of IgH EtherCAT master and slaves :  
(a) command of ethercat master (b) command of ethercat slaves

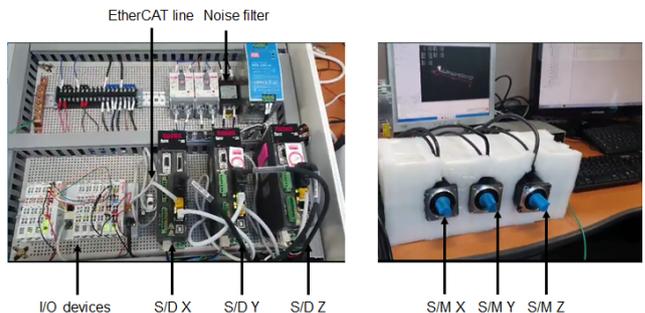


Fig. 4 Real image of RTOS based LinuxCNC 3-axis control test-bed with EtherCAT communication

Fig. 5(a)는 맵핑된 Voltage 신호와 Limit switch가 작동하지 않는 상태이다. 사진에는 붉은색으로 표시된 I/O 장치의 LED가 점등되지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이는 해당 Pin에 전원을 OFF 시킨 결과이다. 따라서 HAL configuration에서도 맵핑된 Voltage 신호와 x, y, z-neg-lim-in 스위치의 점등표시 또한 OFF로 표시됨을 확인 할 수 있다.

Fig. 5(b)는 맵핑된 Voltage 신호와 Limit switch가 작동하는 상태이다. 그 결과 붉은색으로 표시된 I/O 장치의 LED는 점등됨을 확인하였고, 해당 Pin에 전원이 ON 상태가 됨을 확인하였다. 따라서 간단한 I/O 입출력 테스트를 통한 EtherCAT 통신기반 I/O 제어가 가능함을 확인하였다.

### 2.6 EtherCAT 통신기반 LinuxCNC 3축 테스트베드 3축 구동

본 절에서는 EtherCAT 통신 기반 LinuxCNC 3축 테스트 베드 구동과 관련하여 X, Y, Z 축 모터의 모션 구동에 대한 테스트를 진행

한다. Fig. 6은 X, Y, Z 축 모션 구동 결과를 나타낸다. 모션 구동은 직선이송으로 5 mm/rev을 이송시킨 결과를 보여준다. Fig. 6(a) X축에 대한 시퀀셜 사진을 나타낸다. 0초, 20초, 30초, 40초 일 때 X축의 모션 변화는 우측으로 이동됨을 확인할 수 있었다. 또한 해당 시간에 피드백 된 X, Y, Z 각도를 표시하였다. Fig.6(b)는 X, Y, Z축의 1초 간격의 위치 데이터를 그래프로 표시하였다. 데이터 측정 결과 5 mm 이송 명령 시 1 회전 이송됨을 확인하였다.

### 3. 결론

본 연구는 오픈소스 기반의 공작기계용 CNC 제어시스템 테스트베드 구축을 위한 기본연구를 진행하였다. 페러럴 포트 통신 인터페이스 기반의 LinuxCNC를 산업용 Ethernet 인 EtherCAT 통신 인터페이스로 변경 및 적용하였다. 또한 LinuxCNC HAL 드라이버를 EtherCAT 통신이 가능하도록 적용하였다. I/O 장치들의 경우 EtherCAT 통신이 적용됨을 HAL configuration을 통하여 확인하였고, 서보드라이브의 제어 또한 EtherCAT 통신을 적용하여 구동됨

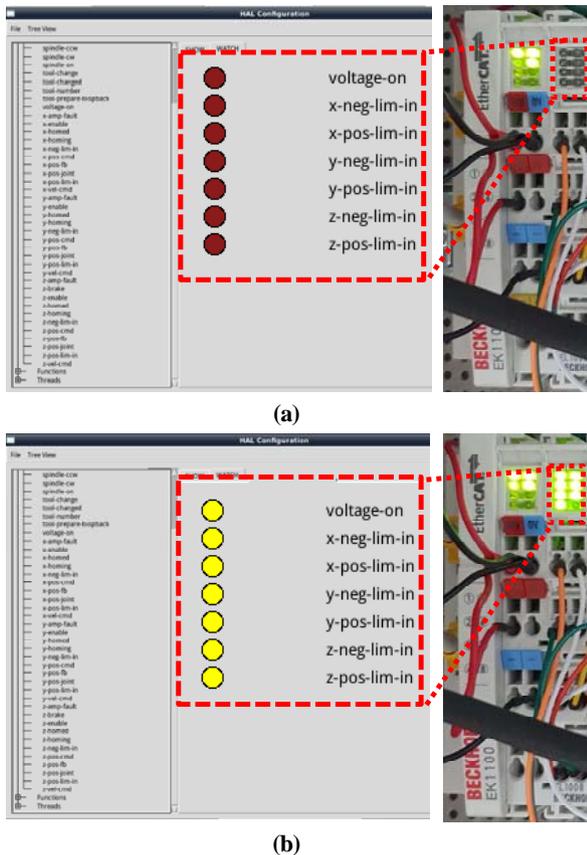


Fig. 5 LinuxCNC I/O devices test via EtherCAT communication : (a) voltage, limit switch OFF (b) voltage, limit switch ON

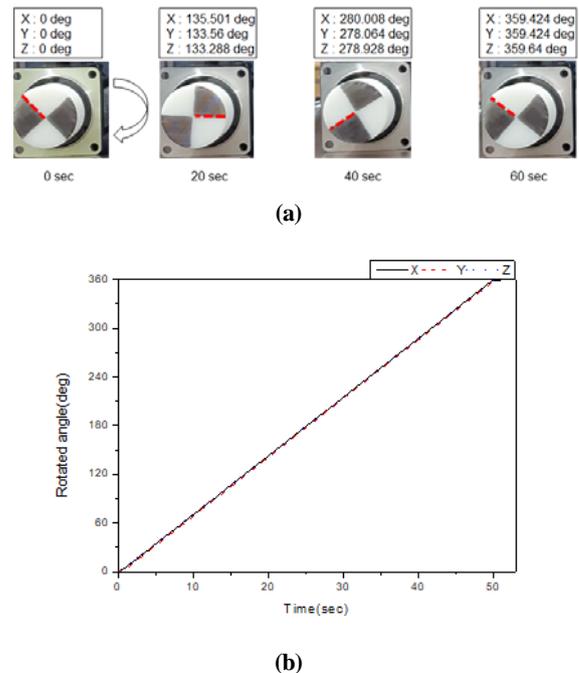


Fig. 6. Results of LinuxCNC 3-axis operation test via EtherCAT : (a) sequential pictures of x - axis (b) X, Y, Z axis position

을 확인하였다. 향후 계획으로 구축된 테스트 베드를 기반으로 개방된 제어 시스템을 갖는 공작기계용 스마트 CNC 제어 시스템 개발을 목표로 연구를 수행 할 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P00002092, 2020년 산업혁신인재성장지원사업)

## References

- [1] HASCOET, J.Y., RAUCH, M., 2016, Enabling advanced cnc programming with opennc controllers for hsm machines tools, High Speed Machining. 2: 1-14.
- [2] PRITSCHOW, G., Altintas, Y., Jovane, F., Koren, Y., Mitsubishi, M., Takata, S., and Yamazaki, K., 2001, Open controller architecture—past, present and future, CIRP Annals. 50.2: 463-470.
- [3] Paprocki, M., Wawrzak, A., Erwiński, K., Karwowski, K., and Kłosowiak, M., 2017, PC-based CNC machine control system with LinuxCNC software, Measurement Automation Monitoring. 63.
- [4] Erwinski, K., Paprocki, M., Grzesiak, L. M., Karwowski, K., and Wawrzak, A., 2012, Application of ethernet powerlink for communication in a linux rtaI open cnc system, IEEE Transactions on Industrial Electronics. 60.2: 628-636.
- [5] Park, S. M., An, C. J., Kim, H., Yi, H. C., & Choi, J. Y., 2015, Implementation of RTAI Open CNC System based on EtherCAT Network, Institute of Control, Robotics and Systems. 21.10: 977-981.
- [6] IgH EtherCAT Master, 2017, IgH EtherCAT Master 1.5.2 Documentation, IgH EtherCAT Master.
- [7] LinuxCNC, 2020, LinuxCNC V2.7.15-21, LinuxCNC.org.
- [8] LinuxCNC, n.d., <<https://linuxcnc.org/downloads/>>.
- [9] LinuxCNC EtherCAT wiki, n.d., <<http://wiki.linuxcnc.org/cgi-bin/wiki.pl?EtherCatDriver>>.