

이기종 CNC 간 인터페이스를 고려한 오픈소스 CNC 기반 공작물 자동 공급장치 제어기 개발

권순환^a, 김범수^a, 이수빈^a, 박대유^b, 박용재^a, 김병희^{a,*}

Development of an Open-Source CNC-Based Controller for Automatic Workpiece Changer Considering Heterogeneous CNC Interfaces

Soonhwan Kwon^a, Beomsu Kim^a, Suvin Lee^a, Dae-Yu Park^b, Yong-Jai Park^a, Byeonghee Kim^{a,*}

^a Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University

^b System S/W R&D Center, HWACHEON Machine Tool Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	13	January	2025
Revised	3	March	2025
Accepted	4	March	2025

Keywords:

Open-source CNC
Heterogeneous CNC
Automatic workpiece changer
EtherCAT communication

ABSTRACT

This paper presents the development of an open-source, CNC-based control system for efficiently managing an Automatic Workpiece Changer (AWC). To overcome the limitations of flexibility and scalability in conventional commercial CNC systems, LinuxCNC was adopted as the open-source CNC platform. An EtherCAT-based communication system was designed to enable real-time data exchange between the controller and hardware. Additionally, a Python-based integration approach was implemented to facilitate seamless data exchange with machining CNC systems. A user-customized GUI was developed using Qt Designer for effective control and monitoring. The performance of the developed system was validated through experiments conducted on AWC hardware components.

1. 서론

공작물 자동 공급장치(automatic workpiece changer, AWC)는 제조 공정에서 공작물 교체를 자동화하여 작업자의 개입을 최소화하고, 공정의 일관성 및 작업 안전성을 높이는 핵심 장치로 자리 잡고 있다. 이러한 자동화 시스템은 제조 공정의 효율성을 극대화하며, 현대 제조 산업에서 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. AWC를 제어하기 위해서는 정밀한 동작과 데이터 교환을 보장하는 CNC(computerized numerical control) 시스템이 필요하다.

기존 연구에서는 AWC의 설계 및 제어 기법에 대한 다양한 접

근이 이루어졌다. Assawarungsri et al.^[1,2]는 자동 공작물 교환 시스템의 설계를 위한 체계적인 방법론을 제시하였으며, Kandra et al.^[3]는 공작물 클램핑 시스템의 개량을 연구하였다. 또한, Liao et al.^[4]는 자동 팔레트 교환 시스템의 지속 가능한 스케줄링을 다루었다. 하지만 이러한 연구들은 AWC의 설계 및 운영 방식에 초점을 맞추었으며, CNC 시스템의 확장성이나 오픈소스 CNC 기반의 유연한 제어 기법을 다루지는 않았다. 따라서, AWC와 CNC의 연계를 보다 유연하게 구현할 수 있는 오픈소스 CNC 기반 연구가 필요하다.

기존 상용 CNC는 공작기계 제어를 위한 다양한 고급 기능을 제공하며, 제조사로부터 제어기의 안정성과 전문적인 기술지원 등

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

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

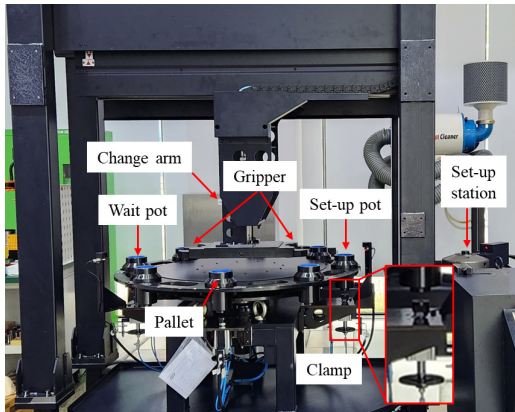


Fig. 1 Structure and components of the AWC system

을 보장받을 수 있다. 하지만 상용 CNC는 제조사 고유의 폐쇄적인 아키텍처와 통신 프로토콜을 사용하기 때문에 유연성과 확장성이 제한되고, 도입 비용이 많이 들어 공작기계 보조 장치인 AWC 제어기로 적합하지 않다^[5,6]. 반면, LinuxCNC는 개방형 구조를 제공하여 사용자 맞춤형 제어 알고리즘 및 통신 프로토콜을 자유롭게 설계할 수 있다.

AWC의 효율적인 동작을 위해서는 가공용 CNC와의 원활한 데이터 교환이 필수적이다^[7,8]. AWC는 공작물의 공급과 배출 과정에서 가공용 CNC와의 작업 상태를 공유하고, 동기화된 공정 흐름을 유지해야 한다. 따라서 본 연구에서는 LinuxCNC와 EtherCAT 통신을 기반으로 한 AWC 제어기를 개발하고 상용 CNC와 Linux CNC 간 인터페이스 시스템을 개발하는 것을 목표로 한다. 상용 CNC는 화낙(Fanuc)사의 Fanuc 31i-B 모델을 선정하여 연구를 수행하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2절에서는 본 연구에서 사용된 AWC의 하드웨어 구조 및 공작물 관리 메커니즘에 대해 설명한다. 제 3절에서는 LinuxCNC와 AWC 하드웨어 간 EtherCAT 기반 통신 시스템을 설명한다. 제 4절에서는 AWC 제어 알고리즘을 LinuxCNC에 탑재하는 방법에 대해 설명한다. 제 5절에서는 개발된 제어 알고리즘 테스트 결과를 보여주고, 제 6절에서는 결론을 기술한다.

2. AWC 하드웨어 구조 및 공작물 관리 메커니즘

AWC는 공작물의 이동, 저장 및 관리를 수행하기 위해 설계된 하드웨어 구성 요소들로 이루어져 있다. 다양한 구조의 AWC가 개발되어 사용 중이며, Fig. 1은 본 연구에서 사용한 (주)화천기공의 AWC 구조를 나타낸다. 매거진(magazine)은 공작물을 보관하는 공간으로 가공 전/후의 공작물이 보관된다. 공작물은 매거진의 팔레트(pallet)에 고정되어 보관된다. 셋업 스테이션(set-up station)

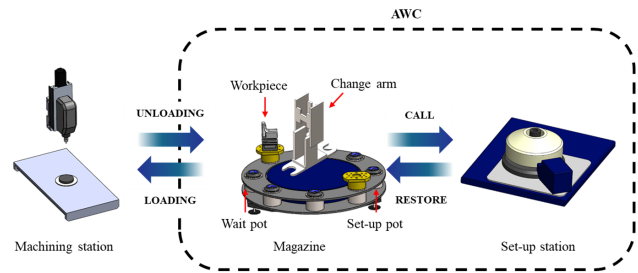


Fig. 2 Diagram of the workpiece management process in the AWC system

은 작업자가 가공할 공작물을 매거진에 저장하기 위해 올려두거나 가공이 완료된 공작물을 확인하고 제거할 수 있는 공간이다. 교체 암(change arm)은 가공 스테이션(machining station), 매거진, 셋업 스테이션 간 공작물 이동을 담당한다. 교체 암에 부착된 양방향 그리퍼(gripper)를 사용하여 공작물을 잡고 이동시킨다. 대기 포트(wait pot)와 셋업 포트(set-up pot)는 공작물 이동 시 해당 팔레트가 위치하는 지점이다. 셋업 스테이션과 대기 포트 및 셋업 포트에는 클램프(clamp)가 설치되어 있으며, 공작물을 고정하거나 해제하는 역할을 수행한다.

Fig. 2는 AWC의 공작물 관리 과정을 도식화한 것이고, Fig. 3은 이를 순서도를 나타낸 것이다. 각 과정에 대한 설명은 다음과 같다.

- 공작물 로딩(loading): 매거진에 저장된 가공 대기 중인 공작물을 가공 스테이션으로 전달하는 과정
- 공작물 언로딩(unloading): 가공이 완료된 공작물을 가공 스테이션에서 매거진으로 복귀시키는 과정
- 공작물 호출(call): 매거진에 보관 중인 공작물을 셋업 스테이션으로 옮기는 과정
- 공작물 저장(restore): 작업자가 셋업 스테이션에 올려둔 공작물을 매거진에 보관하기 위해 옮기는 과정

각 과정에서 공작물의 이동은 교체 암을 통해 이루어지며, 옮겨진 공작물은 해당 위치에 설치된 클램프에 의해 고정된다.

3. LinuxCNC-하드웨어 간 통신 시스템 구축

AWC 하드웨어를 구동시키기 위해서는 2축 서보시스템과 I/O 장치가 필요하다. 2축 서보시스템은 매거진의 회전과 교체 암의 X축 방향 이동을 담당하고, I/O 장치는 공압 시스템의 On/Off 제어 및 AWC 상태 모니터링을 담당한다. 공압 시스템은 교체 암의 Y축 방향 이동(상/하)과 클램프 구동에 사용된다. 본 연구에서는 LinuxCNC와 EtherCAT 통신을 사용하여 2축 서보시스템과 I/O 장치를 제어한다.

오픈소스 기반의 LinuxCNC는 비용 효율적이면서도 높은 유

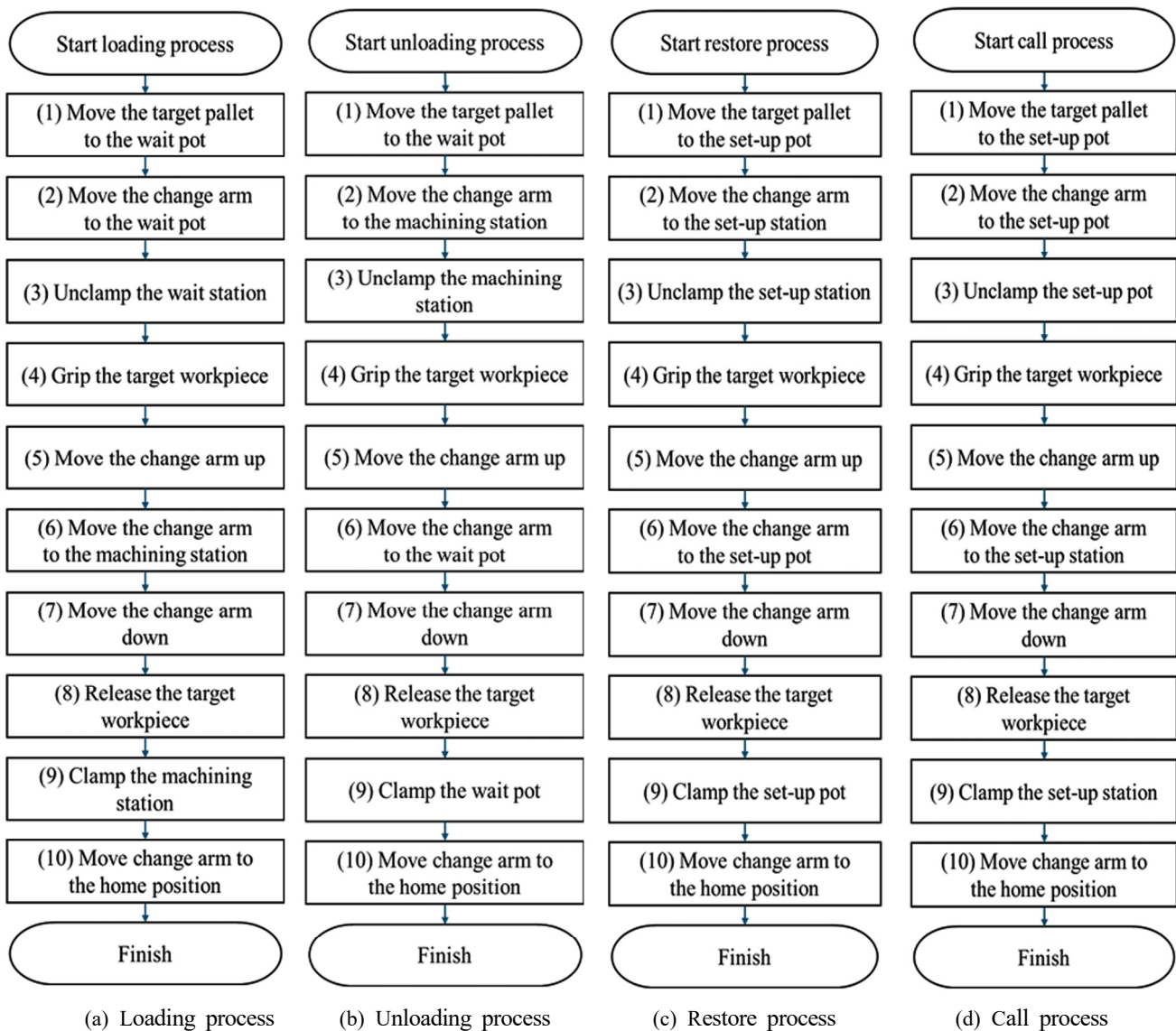


Fig. 3 Flowchart of the workpiece management process in the AWC system

연성을 갖춘 CNC 제어 솔루션을 제공한다. Linux 환경에서 구동되는 LinuxCNC는 사용자가 제어 알고리즘, 통신 프로토콜, 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface, GUI) 등을 자유롭게 설계하고 구현할 수 있어, 특정 제조 환경에 최적화된 맞춤형 시스템을 개발할 수 있다. 이를 통해 AWC 제어기의 개발 비용을 절감하면서도 우수한 성능과 확장성을 동시에 확보할 수 있다^[9,10].

EtherCAT은 고속 실시간 이더넷 통신 프로토콜로, 낮은 지연 시간과 높은 데이터 처리 속도를 제공하여 AWC의 정밀한 모션 제어 시스템에 적합하다^[11]. 또한, EtherCAT을 기반으로 한 네트워크 확장이 용이하여 향후 추가적인 센서 및 구동기 연결이 가능하다. EtherCAT 응용 계층의 데이터 교환은 CANOpen 프로토콜을 기반으로 하며, EtherCAT 프레임を使用한다. CIA301 표준에 정의

된 CANOpen 애플리케이션 계층은 object dictionary(OBD)를 중심으로 구현된다. OBD는 네트워크의 장치 간 교환되는 모든 통신 매개 변수 및 프로세스 데이터를 포함하는 구조다^[12].

LinuxCNC에서 EtherCAT을 사용하려면 EtherCAT master와 LinuxCNC-EtherCAT HAL driver(LCEC module)가 필요하다. EtherCAT master는 각 통신 주기마다 슬레이브 장치로부터 데이터를 수집하고 명령을 전달하여 실시간 데이터 교환이 이루어지도록 한다. 또한, 모든 슬레이브 장치의 동기화를 유지하는 등 슬레이브를 관리하는 역할을 한다. LCEC module은 LinuxCNC에서 정의된 HAL 핀을 EtherCAT 슬레이브 장치의 OBD와 매핑(mapping)한다. 또한, HAL 핀의 값을 EtherCAT master로 전달하여 매핑된 슬레이브 장치로 전송하고, EtherCAT master로부터 수신한 데이터를 HAL 핀에 업데이트하는 등 LinuxCNC-Ether

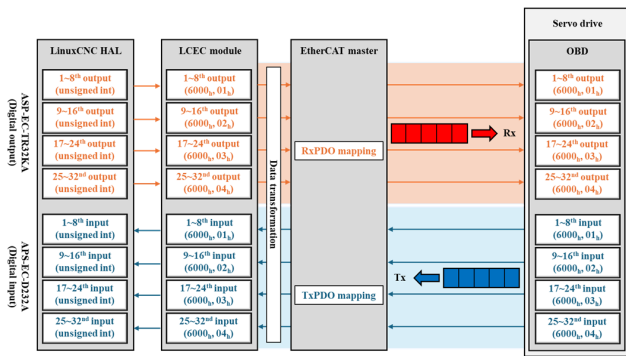


Fig. 4 Custom LCEC module enabling real-time data exchange through HAL-OBD mapping

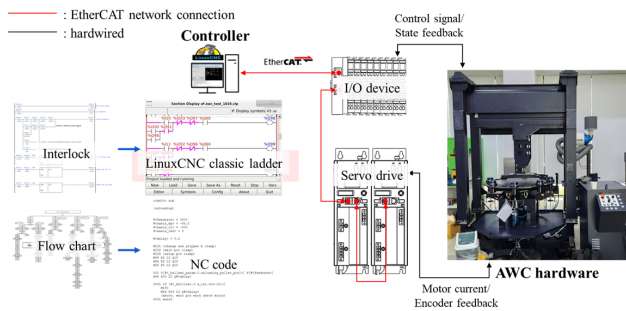


Fig. 5 Overall control system architecture of the AWC

CAT 네트워크 간 실시간 데이터 교환을 관리한다.

본 연구에서는 서보드라이브로 Delta사의 ASD-A3-E 모델을 사용하였다. 기존 GitHub에서 제공하는 LCEC 모듈은 ASD-A2-E 모델에 대한 지원만 포함하고 있어, 이를 ASD-A3-E 모델에 적용하기 위해 장치 식별자인 Product ID와 엔코더(encoder)의 회전당 펄스 수를 ASD-A3-E 모델에 맞게 수정하여 설치하였다. I/O 장치로는 LS Mecapion사의 APS-EC-D232A(Digital input)와 ASP-EC-TR32KA(Digital output) 모델을 사용하였다. 그러나 해당 모델에 대한 LCEC 모듈은 GitHub에서 지원하지 않으므로, Fig. 4와 같이 LinuxCNC의 HAL 핀과 각 장치의 OBD를 매핑하여 실시간 데이터 교환이 가능하도록 해당 모델의 LCEC 모듈을 개발하여 적용하였다.

4. LinuxCNC 기반 AWC 제어 시스템 구축

4.1 PLC와 NC 코드 기반 AWC 제어 시스템

AWC의 복잡한 제어 요구사항을 충족하기 위해 LinuxCNC에서 제공하는 PLC(programmable logic controller) 기능인 Classic Ladder와 NC 코드를 병행하여 사용하였다. Fig. 5는 전체적인 제어 시스템 구성도를 나타낸다.

앞서 설명한 공작물 관리 과정을 구현하기 위한 NC 코드를 작성

하였다. G 코드를 사용하여 매거진과 교체 암을 구동시켰고, I/O 장치를 제어하는 사용자 정의 M 코드를 사용하여 공압 시스템을 구동시켰다.

Classic Ladder는 NC코드 실행 조건 관리와 AWC 시스템의 안전 인터록(interlock) 설정을 담당한다. 공작물 이동 시작 조건이 충족되면 Classic Ladder에서 NC 코드를 트리거하여 해당하는 과정을 실행한다. 이때, 안전 인터록을 통해 공작물 이동 중 다른 장치가 동작하지 않도록 제어하여 안전을 보장한다. 또한, I/O 장치를 통해 수집된 디지털 신호를 기반으로 시스템 상태를 모니터링하고, 문제 상황이 감지되면 NC 코드 실행이 중단되도록 한다.

4.2 시스템 오류 처리 및 기록

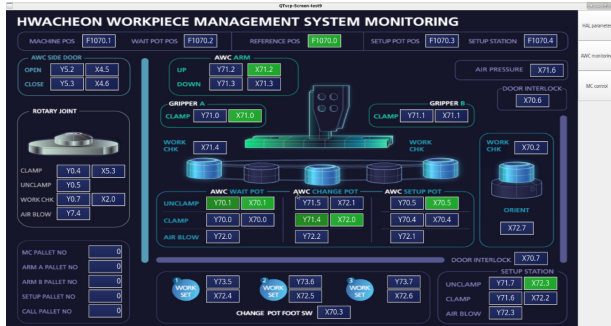
AWC 시스템의 안정성과 신뢰성 확보를 위해 I/O 장치를 통해 시스템 상태를 실시간으로 모니터링하고, 문제 상황이 감지되면 즉시 대응할 수 있는 오류 처리 기능을 구현하였다. Classic Ladder와 NC 코드를 통해 I/O 장치에서 수집된 데이터를 기반으로 조건을 설정하였으며, 특정 오류 조건이 충족되면 오류 메시지를 출력하고 AWC 구동이 정지하도록 NC 코드를 설계하였다. 또한, 출력된 오류 메시지를 로그 파일에 기록하는 Python 스크립트를 작성하고 이를 LinuxCNC와 통합 실행되도록 설정하였다.

4.3 Qt Designer 기반 AWC 제어 및 모니터링 GUI

Qt Designer를 사용하여 AWC 제어 및 모니터링을 위한 GUI를 구현하였다. Qt Designer를 사용하면 GUI를 설계할 수 있으며, 생성된 GUI는 Python 핸들러를 통해 LinuxCNC와 연동될 수 있다. 본 연구에서는 AWC의 하드웨어와 적합한 맞춤형 GUI 개발이 목표이므로, (주)화천기공의 AWC 모니터링 및 제어용 GUI를 모사하여 설계하였다. LinuxCNC와의 원활한 연동을 위해 Qt Designer 설치 후 LinuxCNC 관련 위젯(widget)을 플러그인(plugin)하여 사용하였다. GUI는 Fig. 6과 같이 AWC 제어를 위한 두 개의 페이지로 구성하였다. 첫 번째 페이지(Fig. 6(a))는 기본적인 AWC 제어를 위한 비상 정지(emergency stop), 머신 온(machine on), 홈 위치 설정(homing), 조그 모드(jog mode), NC 코드 로드 등의 기능을 포함한다. 두 번째 페이지(Fig. 6(b))는 AWC 각 구성 요소들의 상태를 모니터링할 수 있도록 설계하였다. 공압 상태, 각 공작물 위치, 클램프/언클램프 상태 등을 시각적으로 표시한다. 이와 함께 AWC 각 구성 요소들을 제어할 수 있는 인터페이스를 제공하여 작업 상황에 맞게 AWC의 동작을 제어할 수 있도록 하였다.



(a) Basic controls: emergency stop, machine on, homing, jog mode, NC loading



(b) Status monitoring: pneumatic status, positions, and manual controls

Fig. 6 GUI for AWC control and monitoring

4.4 이기종 CNC와의 인터페이스 시스템

일반적으로 제조현장에서 가공용 CNC는 주로 정밀 가공에 최적화된 상용 CNC가 사용되며, 상용 CNC를 개발하는 대부분 선진사는 CNC 시스템이 외부 애플리케이션(application)과 상호작용할 수 있도록 지원하는 API(application programming interface)를 제공한다^[13]. 따라서 이러한 API와 LinuxCNC의 개방성을 활용하면 상용 CNC와 LinuxCNC 간의 데이터 교환 및 협업을 가능하게 하는 인터페이스 시스템을 구축할 수 있다.

본 연구에서는 Fanuc CNC와 LinuxCNC 간의 인터페이스 시스템을 구축하였다. Fanuc CNC는 Focas Library라는 API를 제공하며, 이를 통해 Fanuc CNC와 Linux 기반의 PC 간 데이터 교환 및 통신을 할 수 있다. Focas Library가 C언어 기반으로 설계된 반면, LinuxCNC의 HAL 핀은 Python 기반으로 접근할 수 있다. 따라서 Python에서 C 라이브러리를 호출하여 Focas Library와 연동하는 방식을 적용하였다.

Python 프로그램은 Focas Library의 함수를 호출하여 Fanuc CNC의 데이터를 읽어들이고, 이를 처리하여 HAL 핀에 전달함으로써 LinuxCNC가 해당 데이터를 제어에 활용할 수 있도록 하였다. 반대로, LinuxCNC의 데이터를 Fanuc CNC로 전달하는 과정 또한 구현하여 양방향 실시간 데이터 교환 시스템을 구축하였다.

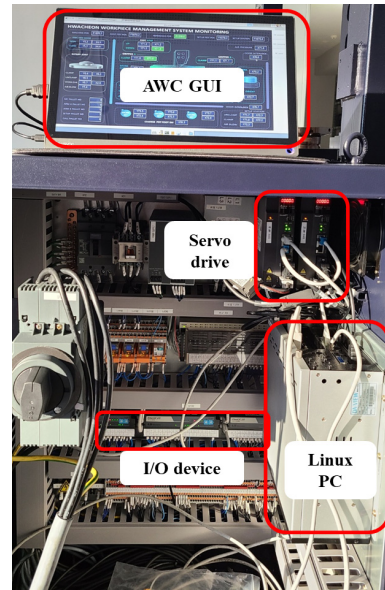


Fig. 7 Electrical box configuration for the AWC control system

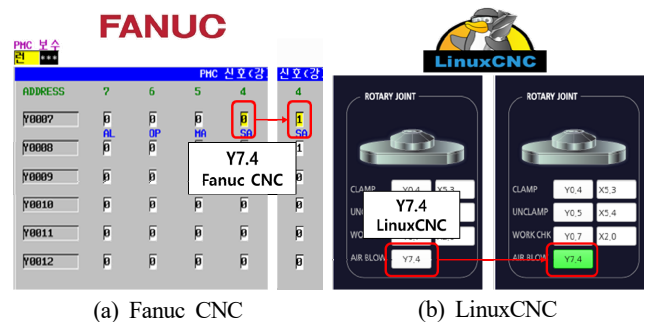
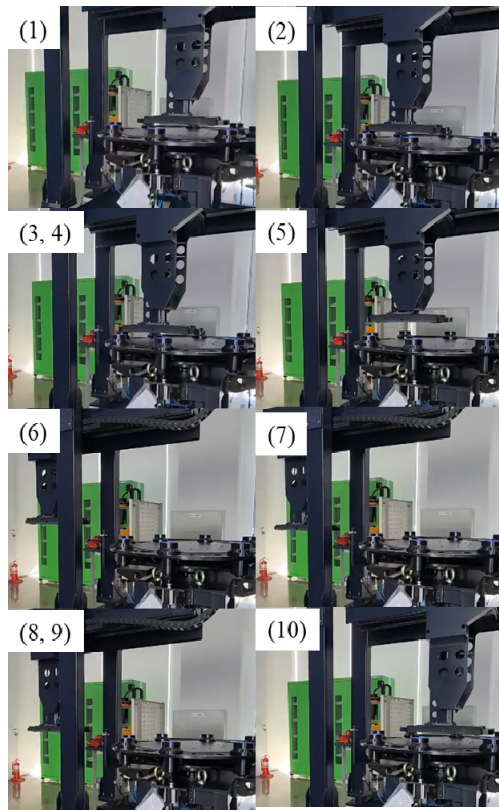


Fig. 8 Test results of real-time data exchange between Fanuc CNC and LinuxCNC

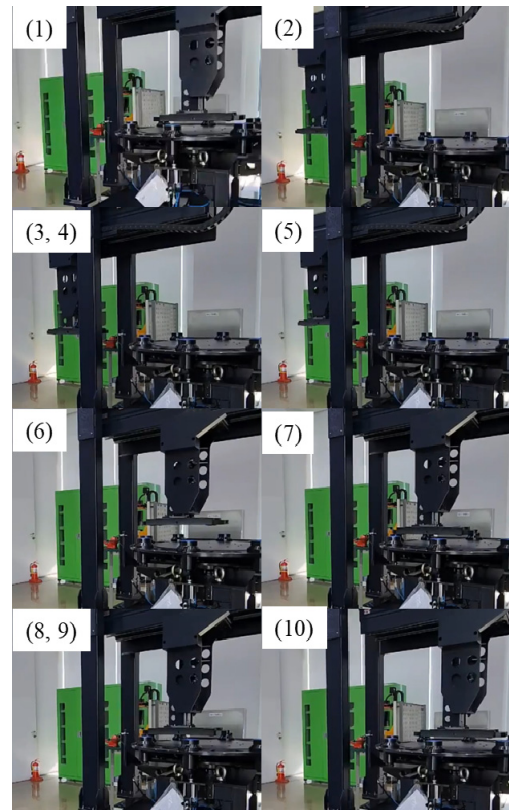
5. AWC 구동 테스트

5.1 실험 세팅

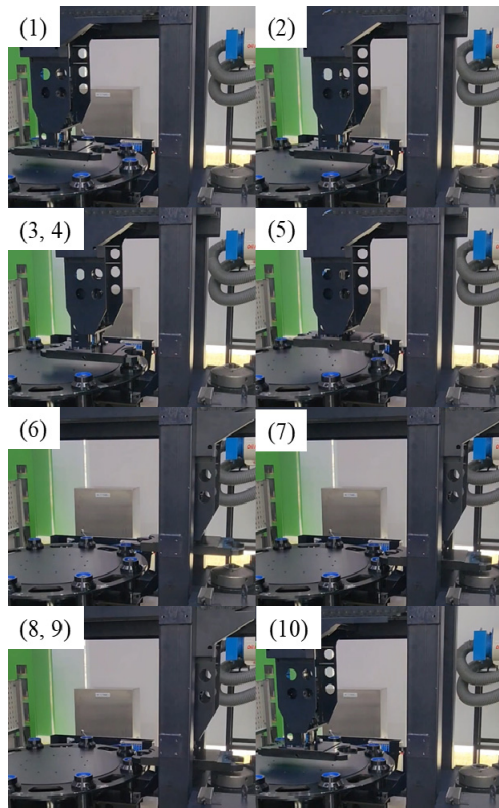
본 연구에서 개발된 AWC 제어가 정상적으로 작동하는지 확인하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 7은 실험에서 사용된 전장박스 구성을 보여준다. 실험에서 CNC는 LinuxCNC 2.8.3을, EtherCAT master는 Igh EtherCAT master 1.5.2 버전을 사용하였다. OS는 Debian 10, real-time kernel은 Preempt RT 4.9를 사용하였고, CPU는 i5(intel, 9세대)를 사용하였다. 서보 드라이브는 ASD-A3-1521-E(Delta, 1.5 kW)를, 서보 모터는 ECMC-EW 1315RSO(Delta, 1.5 kW)를 사용하였다. I/O 장치는 APS-ES-D232A(LS Mecapion, Digital input)와 ASP-EC-TR32KA(LS Mecapion, Digital output)를 사용하였다. EtherCAT 기반 제어 주기는 속도 제어에 적합한 1 kHz로 설정하였다^[14]. 실험에서 가공 스테이션은 장착되지 않은 상태로 진행하였다.



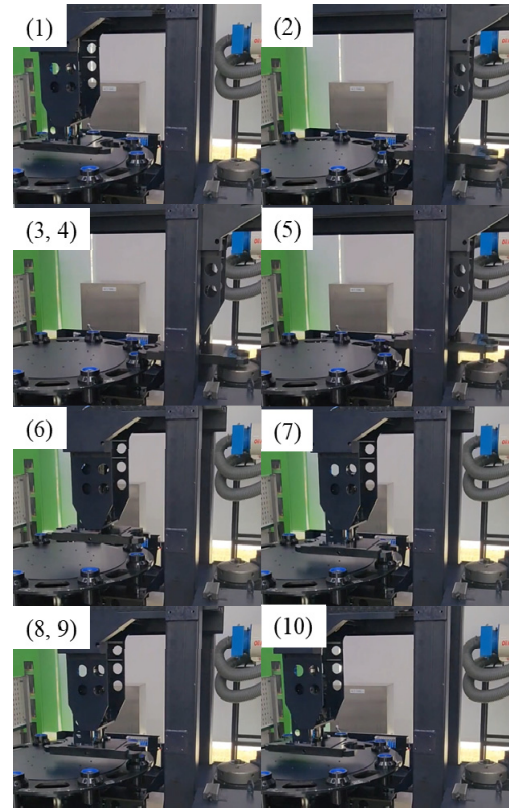
(a) Loading process



(b) Unloading process



(c) Restore process



(d) Call process

Fig. 9 AWC operation test result. The numbers assigned to each step correspond to the steps in the flowchart in Fig. 3

5.2 실험 내용

제어기 검증을 위해 두 가지 실험을 수행하였다. 첫 번째 실험은 Fanuc CNC와 LinuxCNC 간의 이기종 CNC 인터페이스 테스트를 통해 두 시스템 간의 신호 전달 및 호환성을 확인하는 것이다. 두 번째 실험은 LinuxCNC-서보드라이브 간 통신주기가 확보되는지 확인하는 것이다. 마지막 세 번째 실험은 공작물 관리의 주요 과정인 공작물 로딩, 언로딩, 저장, 호출의 네 가지 과정에 대한 구동 테스트를 통해 제어기의 기능을 평가하는 것이다.

5.3 실험 결과

Fig. 8은 첫 번째 실험 결과로, Fanuc CNC에서 특정 파라미터를 트리거(trigger) 하였을 때 그에 대응하는 LinuxCNC의 파라미터도 트리거 된 것을 보여준다. 이때 두 제어기 간 데이터 전송 속도는 50 ms이다.

두 번째 실험은 EtherCAT 기반 속도 지령 주기 검증이다. LinuxCNC에서 EtherCAT 통신을 통해 서보드라이브에 속도 지령을 1 kHz로 전달할 때 제어 주기가 안정적으로 유지되는지를 확인하는 실험을 수행하였다. 실험에서는 LinuxCNC에서 서보드라이브로 0과 1을 1 ms 주기로 반복하여 속도 지령을 전달하였으며, 서보드라이브에서 전달받은 지령을 16 kHz로 샘플링하여 측정하였다. 서보드라이브에서의 데이터 측정은 Delta사에서 제공하는 전용 프로그램인 ASDA_SOFT_V6.5.0.0를 사용하였다. 총 20초 동안 320,000개 데이터를 수집한 결과, 측정값에서 0이 16개, 15가 16개씩 반복되는 패턴이 확인되었다. 이는 1 kHz의 속도 지령이 정확히 유지됨을 의미하며, EtherCAT을 통한 실시간 속도 제어가 신뢰성 있게 수행됨을 검증하였다.

Fig. 9는 세 번째 실험에 대한 결과로, Fanuc CNC에서 Linux CNC로 로딩, 언로딩, 저장, 호출 지령을 전달하였을 때 AWC가 어떻게 움직이는지 순서대로 보여준다. 그림에서 각 숫자는 Fig. 3 순서도의 숫자에 대응된다. 테스트 결과 설계된 순서도에 맞게 AWC가 작동함을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

Fanuc CNC와 LinuxCNC 간의 데이터 전송 테스트 결과, 두 시스템 간 신호 전달 및 명령 실행이 정상적으로 이루어졌다. 실험 환경에서 50 ms로 설정한 데이터 전송 속도가 안정적으로 확보되어 실시간 데이터 교환 요구를 만족시켰으며, 이기종 CNC 시스템 간의 호환성을 입증하였다. 또한 EtherCAT 기반 속도 지령 주기 검증을 통해 모션 제어가 안정적으로 수행됨을 확인하였고, 개발된 AWC 제어기는 공작물 로딩, 언로딩, 호출, 저장의 모든 과정에서 설계된 순서도에 따라 정확하고 안정적으로 작동하였다. 이는

제어기가 요구되는 기능적 사양을 성공적으로 충족함을 의미한다.

실험을 통해 개발된 제어기의 성능과 안정성을 확인하였으며, 이를 기반으로 공작물 자동 공급 시스템의 실질적 활용 가능성을 평가할 수 있었다. 특히, 이기종 CNC 시스템 간의 원활한 통합이 가능하다는 점은 다양한 산업 환경에서의 적용성을 높이는 중요한 결과이다.

향후 이기종 CNC 시스템 간의 인터페이스를 확장하여 더 많은 CNC 플랫폼과의 호환성을 확보하여 다양한 CNC 시스템과의 호환성을 확보할 필요가 있다. 또한, HMI를 개선하고 개발된 제어 시스템을 실제 산업 현장에 적용할 수 있도록 본 연구의 결과를 더욱 발전시킬 필요가 있다.

후 기

이 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가지원(P0020616, 2022년 산업혁신인재성장지원사업)과 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT, 20012834)의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Assawarungsri, T., Sakulyungyuencharoen, N., Janthong, N., 2018, A Systematic Approach to Design Automatic Workpiece Changer of CNC Machining Center, In 2018 Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT), 1-5, <https://doi.org/10.1109/ESIT.2018.8665163>.
- [2] Assawarungsri, T., Janthong, N., 2018, Applying the Axiomatic Design with Design Constraint to Redesign of Automatic Work-piece Changer, In 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 1741-1745, <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607395>.
- [3] Kandra, M., Císar, M., Kuric, I., 2019, Modification of Clamping System Designated for Automatic Workpiece Exchange, Manuf. Technol., 19:3 414-418, <https://doi.org/10.21062/ujep/306.2019/a/1213-2489/MT/19/3/414>.
- [4] Liao, Q., Yang, J., Zhou, Y., 2019, Sustainable Scheduling of an Automatic Pallet Changer System by Multi-Objective Evolutionary Algorithm with First Piece Inspection, Sustainability, 11:5 1498, <https://doi.org/10.3390/su11051498>.
- [5] Cao, S. K., Yang, S. W., Chen, X. S., Wang, G. C., Song, W. W., 2011, Milling Machine Design Based on Open CNC System, Applied Mechanics and Materials, 52-54 887-872, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.887>.

- [6] Khanna, A., Kumar, A., Bhatnagar, A., Tyagi, R., Srivastava, S., 2013, Low-cost Production CNC System, In 2013 7th international conference on intelligent systems and control (ISCO), 523-528, <https://doi.org/10.1109/ISCO.2013.6481210>.
- [7] Song, K. H., Jeong, H. J., Lee, D. Y., Kim, B. H., 2020, Package Software Configuration and Cloud-based Service System for Building a Smart Factory in the Root Industry, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 29:4 323-330, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.4.323>.
- [8] Yoon, J. S., Nam, S. H., Baek, J. Y., Kwon, K. E., Lee, D. H., Lee, S. W., 2013, Process Management Systems for Integrated Real-time Shop Operations in Heterogeneous Multi-cell based Flexible Manufacturing Environment, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 22:2 281-286, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.2.281>.
- [9] Alvares, A. J., Toquica, J. S., Lima, E. J., Bomfim, M. H. S., 2017, Retrofitting of ASEA IRB2-S6 Industrial Robot using Numeric Control Technologies based on LinuxCNC and MACH3-MatLab, In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2148-2153, <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2017.8324737>.
- [10] Paprocki, M., Wawrzak, A., Erwiński, K., Karwowski, K., Kłosowiak, M., 2017, PC-based CNC Machine Control System with LinuxCNC Software, Measurement Automation Monitoring, 63:1 15-19.
- [11] Hsieh, M. F., Yao, W. S., Chiang, C. R., 2007, Modeling and Synchronous Control of a Single-Axis Stage Driven by Dual Mechanically-Coupled Parallel Ball Screws, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 34 933-943, <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1135-4>.
- [12] Staroveški, T., Brezak, D., Udiljak, T., 2013, LinuxCNC - The Enhanced Machine Controller: Application and an Overview, Tehnicki vjesnik/Technical Gazette 20:6 1103-1110.
- [13] Yoon, J. S., 2022, Development of an Integrated Operation Management System for Multi-Vendors' CNC Machine Tools Based on Standardized Interfaces to Support Smart Manufacturing, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 31:3 169-176, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.3.169>.
- [14] Wang, T., An, Z., Wang, K., Zhang, X., 2023, Integrated Position and Speed Control for Rail Transit Doors Based on Speed-Current Loop, IEEE Transactions on Industry Applications, 59:4 4651-4661, <https://doi.org/10.1109/TIA.2023.3271966>.



Soonhwan Kwon

Ph. D. Candidate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Precision Control of Feed Drive System.
E-mail: shkwn129@gmail.com



Beomsu Kim

Master Candidate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Micro Electro Mechanical Systems.
E-mail: krumil@kangwon.ac.kr



Suvin Lee

Master Candidate in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Digital Twin and Computer Vision.
E-mail: binee0630@kangwon.ac.kr



Dae-Yu Park

Director of Software R&D Center of Hwacheon Machine Tool Co., Ltd.. His research interest is Machine Tool Control and Operation System.
E-mail: dyp@hwacheon.com



Yong-Jai Park

Associate Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Soft Robotics and Bio-inspired Robot, Novel Mechanisms.
E-mail: yjpark@kangwon.ac.kr



Byeonghee Kim

Professor in the Department of Smart Health Science and Technology, Kangwon National University. His research interest is Micro and Nano System Design and Precision Control of Machine Tools.
E-mail: kbh@kangwon.ac.kr