

# 제어시스템 강좌의 온라인 수업 효율향상을 위한 교육환경 개발

## Development of Educational Environment to Improve Efficiency of Online Education on Control Systems

이 영 삼\*<sup>1</sup>, 주 도 윤<sup>1</sup>, 최 창 규<sup>1</sup>

(Young Sam Lee<sup>1\*</sup>, Doyoon Ju<sup>1</sup>, and Changkyu Choi<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University

**Abstract:** In recent years, lectures on control systems have focused on hands-on experience using actual control equipment than before. However, the online education triggered compulsorily by the Covid-19 pandemic poses has restricted the construction of an education environment for hands-on experience. In this study, we proposed an economical and compact experimental environment for control education that enables hands-on experience even through online education. To this end, we utilized a light weight rapid control prototyping (LW-RCP), which is a lab-built RCP environment, and the environment was constructed using 3D printing. In the proposed environment, LW-RCP enabled students to focus on the learning and application of related control concepts, without the inconvenience of manual C-coding and the possibility of debugging errors. In addition, the proposed control equipment, which was manufactured using 3D printing, is an inexpensive equipment with a sufficiently small size that can be placed on a desk. Owing to the low cost and small size of the proposed environment, each student can have his/her own experimental equipment, which will enable a hands-on experience even through online education. Online education is expected to expand more and more in the future as it exhibits various advantages and potentials from traditional face-to-face classes. The proposed educational environment is expected to play a meaningful role in satisfying the demands of hands-on experience for control-related lectures.

**Keywords:** Online education, Rapid control prototyping, 3D printing, Hands-on experience, Education environment

### I. 서론

2020년 3월에 세계적 범유행(pandemic)으로 이어진 Covid-19로 인해 전세계는 강제적인 재택 온라인 수업의 시대를 맞게 되었다. 인터넷 인프라가 잘 구축되어 있는 대한민국은 다른 열악한 환경의 국가에 비해 상대적으로 우수한 온라인 교육 환경을 가졌지만 처음 경험하는 전면적 온라인 교육의 세상에서는 모든 나라가 많은 시행착오를 겪게 되었다. 이론 위주의 강의만으로도 교육성공을 달성할 수 있는 유형의 강좌의 경우 재택 온라인 수업이 대면수업을 어느 정도 대체할 수 있겠지만, 실험과 실습, 또는 직접체험(hands-on experience)을 포함하는 유형의 강좌는 온라인 수업이 많은 한계를 드러내었다. 강의자들이 서둘러서 각자만의 방식으로 수업효과를 향상시키기 위한 방법들을 도입해 보았지만 예고 없이 시작된 온라인 수업에 강의자들과 학생들이 모두 신속히 적응하는 것은 무리였다.

전통적으로 제어시스템과 관련된 강좌들은 이론 위주의 강의가 주를 이루어 왔다. Matlab 등의 software를 사용한

simulation은 이론 위주의 강의를 보완하는 용도로 활용되었다. 하지만 Drone, 로봇, 자율주행차 등과 같이 제어이론과 구현기술이 모두 필요한 첨단 공학 시스템들이 점점 일상화되어가는 상황을 고려한다면, 이론 뿐 아니라 제어장치를 직접 다루고 제어해보는 체험방식의 교육이 점점 더 많이 필요해지고 있다. 이러한 상황을 반영해 학생들이 체험해 볼 수 있는 제어교육 장치들은 이미 시장에 나와 있고 좋은 교과과정과 같이 제공되고 있다. 하지만 제어장치의 가격대가 매우 높아 학과에서 3~4 대 정도만을 구비해 학생들에게 시연을 보여주거나 조를 편성해 장치를 다루어보도록 하는 형식의 운용이 보편적이다. 대면수업의 경우 장치를 직접 보면서 동작을 확인하고, 조별로 제어기 설계 등을 수행할 수 있기 때문에 이러한 제한적 운용도 나름의 의미를 가진다. 하지만 Covid-19이 범유행된 이후로 그러한 제한적 운용조차도 어려워졌기 때문에 제어시스템 관련 강좌에 있어 직접 체험 방식의 강의진행은 매우 힘들어졌다.

이 논문에서는 재택 온라인 수업이라는 새로운 유형의 교육에서도 제어시스템과 관련된 수업들이 효율적이고 내

\*Corresponding Author

Manuscript received November 10, 2021; revised November 12, 2021; accepted November 12, 2021

이영삼: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 교수(lys@inha.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-0665-1464)

주도윤: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 대학원생(seiko.kr@gmail.com, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-7011-6779)

최창규: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 대학원생(chad1206@gmail.com, ORCID<sup>®</sup> 0000-0001-6857-9141)

※ 본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단에서 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1F1A1061965).

실 있게 진행될 수 있게 도움을 주는 교육환경을 제안하고자 한다. 제안되는 교육환경은 연구실에서 개발한 LW-RCP와 3D printing 기술을 이용하여 제작한 제어장치로 구성된다. 효율적인 제어기 설계 방법으로써 RCP(Rapid Control Prototyping)는 메카트로닉스[1,2], 자동차[3], 모션제어[4] 등의 다양한 분야에서 사용되어 왔다. dSpace[5]나 Quanser Consulting[6]과 같은 회사에서 판매하는 상용 RCP 장비가 매우 고가인 것에 비해 LW-RCP는 연구실에서 개발되어 상용의 RCP 장비들과 대등한 성능을 가짐에도 상대적으로 경제적인 비용으로 구성이 가능하다. DC 모터와 도립진자는 제어시스템의 교육에서 가장 자주 사용되는 시스템 중 하나이다. DC 모터의 경우 제어와 관련된 모든 교재에서 모델링 및 제어 방법을 다루고 있으며 도립진자는 비선형의 불안정한 특성을 가지므로 제어를 통해 안정화시켰을 경우 제어기술의 효능을 크게 느낄 수 있는 시스템이다. 본 연구에서는 3D printing 기술을 이용하여 매우 작고 경제적으로 구성가능한 회전형 도립진자 구조를 제안하고, DC 모터를 책상위에 손쉽게 거치할 수 있는 고정 장치의 구조를 제시한다. 제안되는 교육환경은 소형의 제어장치와 경제적 비용으로 구성 가능한 RCP 환경을 특징으로 하므로 1인당 1대씩의 장치 제공이 가능하여 재택 온라인 방식의 수업에서도 학생들이 직접 제어기 설계 및 제어 실험들을 수행해 볼 수 있도록 높은 학습 효율을 경험할 수 있다.

## II. 3D printing을 이용한 제어장치의 구성

이 절에서는 2가지 제어장치인 DC 모터와 회전형 도립진자를 재택 온라인 교육환경에서 사용하기 적합하도록 작고, 경제적으로 구축할 수 있는 방법을 제안한다. 저가 구매가 가능한 구성품들은 구매하여 사용하고, 저가 구매가 불가능한 구성품과 제작이 가능한 구성품들은 3D printing 기술을 이용하여 제작하도록 한다.

### 1. DC 모터

DC 모터는 폐루프 제어(closed-loop control)를 학습할 수 있도록 encoder가 결합되어 있되 구매비용이 높지 않은 Pololu 사의 금속 기어 모터(그림 1참조)를 채택한다. 이 모터는 64 CPR(Counts per revolution)의 해상도를 갖는 encoder가 장착되어 있어 제어 시스템 관련 교재에서 다루는 모델링, 파라미터 추정, 속도제어, 위치제어 등의 실험을 모두 수행해 볼 수 있으며 크기가 작지 않아 책상위에 올려놓고 실험하기에 적당하다.



그림 1. Pololu 사의 금속 기어 모터.

Fig. 1. A metal gear motor from Pololu.

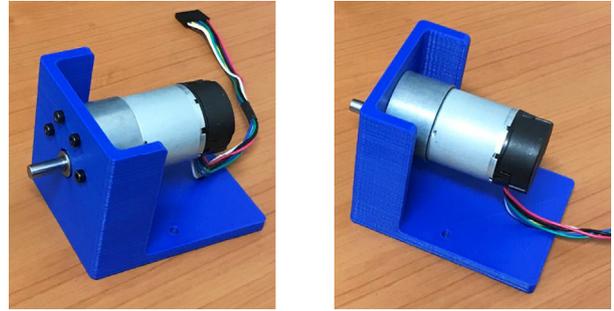


그림 2. 3D printing을 통해 출력된 고정 장치에 고정된 DC 모터.

Fig. 2. A DC motor fixed to the 3D-printed fixture

DC 모터를 이용한 제어실험을 수행할 때에는 기동시 발생하는 반작용 토크로 인해 모터가 움직이기 때문에 책상 위에서 안정적으로 실험을 수행하기 위해 모터를 고정할 수 있는 장치가 필요하다. 본 논문에서는 견고함을 유지할 수 있도록 ‘C’ 구조의 형태를 가지며 별다른 추가 조립이 필요하지 않게끔 일체형으로 된 3D printing 기반의 고정장치를 제안한다. 그림 2는 제안된 고정 장치를 3D printer를 이용하여 출력한 후 모터와 결합한 모습을 보여준다. 제안된 고정 장치는 평평한 바닥구조를 통해 모터 기동시 발생하는 반작용 토크를 충분히 견딜 수 있으며 더불어 원통형태의 모터몸체가 굴러다니지 않고 책상위에 안정적으로 배치되도록 돕는다.

### 2. 회전형 도립진자

제어 시스템 관련 강좌에서 가장 많이 인용되는 시스템 중의 하나는 도립진자(inverted pendulum)이다. 시스템이 갖는 비선형 동특성과 불안정성, 그리고 비최소위상 특성등 제어를 어렵게 하는 여러 가지 요소들이 혼재되어 있어 페루프 제어를 이용한 안정화를 통해 제어기술의 효용성을 효과적으로 보여줄 수 있는 시스템이기 때문이다. 교육적 요소 이외에도 도립진자는 그 자체로 상당한 난이도를 갖는 제어대상 시스템이다. 2단 도립진자와 3단 도립진자의 스윙업제어(swing-up control)가 2007년과 2013년에야 비로소 해결된 것은 도립진자가 갖는 제어 난이도를 잘 보여준다고 할 수 있다[7,8]. 최근에는 이론적 접근을 통한 도립진자 제어의 어려움을 강화학습을 적용하여 극복하고자 하는 접근법도 시도되고 있다[9]. 대표적인 유형의 도립진자에는 직선형 도립진자와 회전형 도립진자가 있다. 직선형 도립진자의 경우 비교적 긴 rail을 필요로 해 책상위에 간단하게 올려놓고 실험하기에는 무리가 있다. 이런 이유로 본 논문에서는 회전형 도립진자를 제안하는 온라인 교육환경에서 사용하는 제어장치로 포함시킨다. 비록 회전형 도립진자가 직선형 도립진자에 비해 작은 공간을 차지한다고는 하지만 상용의 회전형 도립진자 장치들도 크기가 작지 않아 좁은 책상위에 올려놓고 실험하기는 곤란하다. 또한 수강학생들의 집으로 택배를 통해 장치를 배송해야 하는 경우 장치의 크기로 인해 문제가 발생한다. 물론 상용의 회전형 도립진자 장치들은 구매 비용 자체가 매우 높기 때문에 1인당 1대씩의 장치를 제공하는 상황 자체가 불가능하다.

그림 3은 회전형 도립진자의 추상화된 개념도이다. 회전

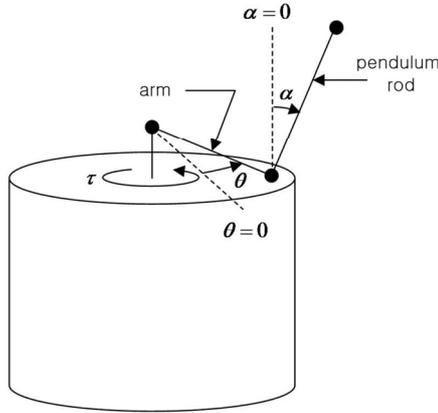


그림 3. 회전형 도립진자의 개념도.  
Fig. 3. The conceptual diagram of a rotary inverted pendulum.

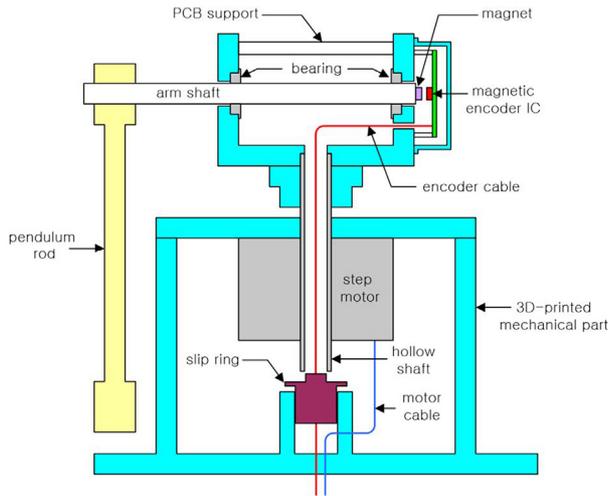


그림 4. 제안되는 회전형 도립진자의 구조 개념도.  
Fig. 4. The structural conceptual diagram of the proposed rotary inverted pendulum.

회전형 도립진자는 arm을 회전시키기 위한 1개의 모터, arm과 진자봉의 회전각을 측정하기 위한 2개의 encoder가 필요하다. 그리고 무한히 회전할 수 있는 구조를 갖기 위해서는 slip ring을 사용해야 한다. 하지만 이런 구성부품을 모두 사용해서 도립진자를 설계하려면 소형 설계가 곤란하고 부품 구매 비용이 증가한다. 이런 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 스텝모터를 사용하여 개루프(open-loop)로 arm을 제어하는 방식을 취함으로써 arm의 회전각 측정에 필요한 encoder를 사용하지 않아도 되도록 설계한다. 그리고 중공축(hollow shaft) 형태의 회전축을 갖는 스텝모터를 사용함으로써 진자봉의 회전각 정보를 전달하는 cable을 손쉽게 slip ring과 연결할 수 있도록 하는 구조를 제안한다. 그림 4는 이러한 설계의도를 반영하여 제안된 회전형 도립진자의 구조 개념도이다. 기구부를 3D printing을 이용하여 출력함으로써 기구부 제작에 소요되는 비용과 시간을 크게 낮춘다. 진자봉의 회전각  $\theta$ 를 측정하기 위한 encoder는 magnetic encoder를 사용함으로써 센서부를 간결하게 구성하고 제작 비용을 낮추도록 한다. 스텝모터는 개루프로 제어되지만 위



그림 5. 제작된 회전형 도립진자와 축구공을 이용한 크기 비교.  
Fig. 5. Size comparison of the built rotary inverted pendulum and a soccer ball.

표 1. 제안된 회전형 도립진자 구성 부품, 구매처, 비용요약.  
Table 1. Summary of parts, where to buy, and cost.

부품명	구매처	비용 (원)
베어링 (2개)	Naver	2,000
arm shaft	Misumi Korea	10,000
중공축 step motor	Aliexpress	40,000
encoder용 magnet	Aliexpress	400
magnetic encoder ID	Device mart	15,000
slip ring	Device mart	10,000

치 지령이 진자봉의 회전각 정보를 이용하여 생성되므로 스텝모터가 탈조나지 않는 한 전체 시스템은 페루프로 동작한다.

그림 5는 제안하는 구조의 도립진자를 실제 제작한 사진이다. 축구공을 이용하여 크기를 가늠해 볼 수 있다. 도립진자의 높이는 17 cm, 몸체의 폭은 7 cm로 작은 크기를 갖는다. 바닥면은 진자가 흔들릴 때 발생하는 반작용 토크를 견딜 수 있게끔 몸체의 폭보다 좀 더 넓게 설계되었다.

표 1은 제안되는 도립진자의 구성부품과 구매처, 그리고 구매비용을 요약한 것이다. 기구부는 3D printing을 이용하여 자체적으로 출력하고 진자봉도 자체적으로 제작한다. 상용으로 판매되는 도립진자 장치의 가격이 수백만원에 달하는 것을 고려했을 때 제안되는 도립진자 제어장치는 매우 경제적인 비용으로 제작이 가능하며 학과의 지원을 받으면 수십여대를 제작하여 개인별 제공이 가능해 재택 온라인 수업의 방식에서도 학생들이 직접 제어기 설계 및 제어 실험 등의 과정을 직접 수행해 볼 수 있다.

### III. LW-RCP를 이용한 제어환경의 구성

제안된 제어장치를 이용한 제어기 설계 및 제어 실험 수행을 수행하기 위해서는 마이크로컨트롤러를 이용하여 모터 드라이버를 구동할 수 있어야 한다. 하지만 이를 위해 마이크로컨트롤러를 사용하는 법을 학생들에게 교육시키고 오류없는 제어 알고리즘을 C언어로 작성하게 하는 것은 그 자체가 한 학기 이상의 기간을 필요로 할 만큼 큰 주제이므로 제어시스템에 대한 교육이라는 본연의 주제에서 벗어난다. 본 논문에서는 연구실에서 개발한 LW-RCP [10,11]을

이용하여 학생들에게 실시간 제어기 구현에 필요한 일련의 과정을 손쉽게 구성하고 경험할 수 있도록 한다. LW-RCP는 hardware interface를 담당하는 LW-RCP 하드웨어 장치와 Simulink에서 사용하는 library block으로 구성된다. 제어기 설계자는 LW-RCP library에서 제공되는 block을 이용하여 하드웨어 접근을 담당하는 블럭기반 알고리즘을 구성하고, Simulink에서 기본적으로 제공되는 block을 이용하여 제어 연산과 관련된 부분의 알고리즘을 구성한다. LW-RCP 하드웨어 장치와 LW-RCP library block을 이용하여 구성된 Simulink 모델은 그림 6과 같은 방식을 통해 상호작용한다. sensor data의 측정이나 control data를 출력 peripheral에 적용하는 것과 같이 hardware interface가 필요한 부분은 LW-RCP 장치가 담당하고 Simulink 기반의 제어 알고리즘은 제어연산을 담당하는 구조이다. Simulink가 동작하는 PC와 LW-RCP 하드웨어 장치와의 통신은 High-speed USB 통신을 통해 이루어지며 최고 2 KHz까지의 샘플링 주파수를 지원한다.

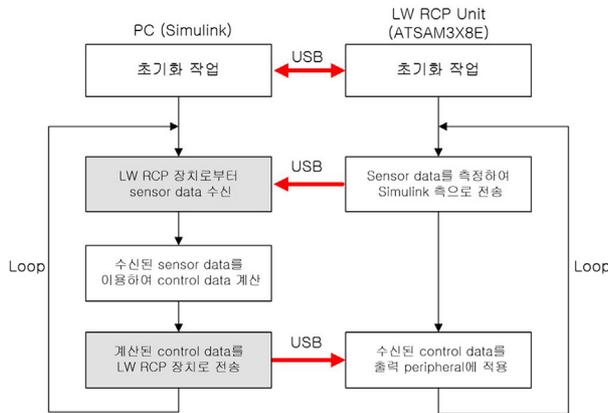


그림 6. LW-RCP의 동작방식.  
Fig. 6. The flow chart of LW-RCP operation.

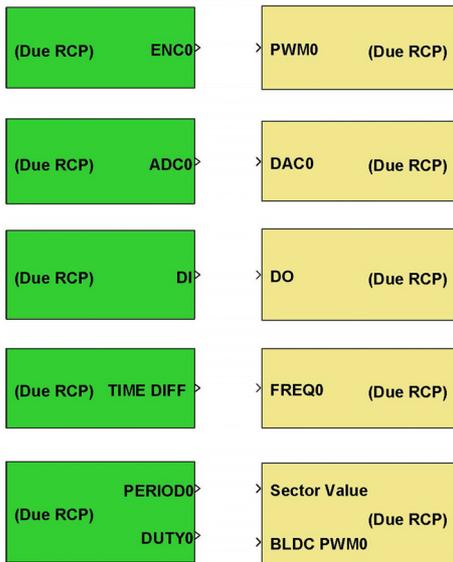


그림 7. LW-RCP에서 제공되는 library block.  
Fig. 7. Library blocks supported by LW-RCP.

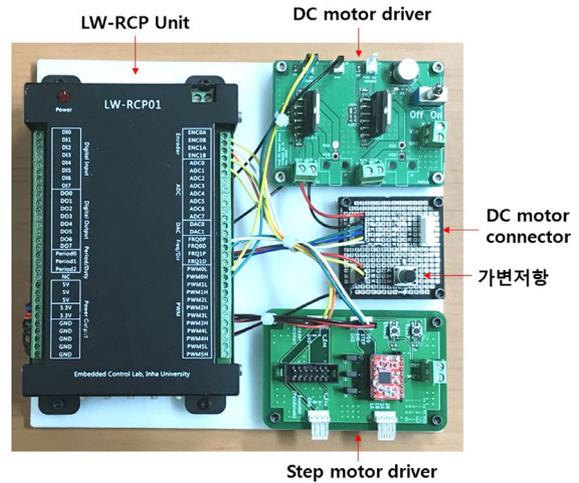


그림 8. LW-RCP 장치와 모터 driver로 구성된 제어보드.  
Fig. 8. The control board with an LW-RCP unit and motor drivers.

그림 7은 LW-RCP에서 제공하는 library block들을 보여 준다. 학생들은 sensor data의 측정이나 출력 peripheral의 구동과 같이 하드웨어 접근이 필요한 경우 제공되는 library block을 이용하여 손쉽게 필요한 기능들을 구현할 수 있다. 따라서 LW-RCP를 이용한 제어알고리즘의 구현은 Simulink를 이용한 block 편집 방식의 알고리즘 구현이 되므로 학생들이 마이크로컨트롤러를 제어하기 위한 code를 작성하고 지루한 debugging 작업으로 시간을 낭비할 필요가 없게 된다. 제안되는 교육환경에서 사용하는 제어장치인 DC 모터와 도립진자를 제어하기 위해서는 LW-RCP library block 중 Encoder (ENC), PWM (PWM), Frequency generation block (FREQ)을 주로 사용하게 된다.

그림 8은 DC 모터와 도립진자를 제어할 때 필요한 LW-RCP 하드웨어 장치와 모터 driver를 하나의 보드에 모아 결선해 놓은 제어보드이다. 학생들은 제어하고자 하는 제어장치의 결선 connector를 제어보드에 연결하기만 하면 제어실험에 필요한 하드웨어 준비는 모두 끝나게 된다. 제어보드에는 가변저항이 포함되어 있어 사용자는 아날로그 전압 형태로 지령값을 생성할 수 있고 LW-RCP의 ADC block을 이용하여 디지털로 변환된 값을 받아들일 수 있다. DC 모터의 속도 제어와 같은 문제에 있어서 기준입력 (reference) 정보를 생성할 때 사용할 수 있다.

#### IV. 제어실험 사례

제안되는 교육환경을 통해 DC 모터와 도립진자를 이용한 다양한 실험을 수행해 볼 수 있다. 여기서는 DC 모터와 도립진자에 대해 각각 하나의 실험 주제의 사례를 통해 어떻게 제안하는 교육환경이 활용될 수 있는지를 살펴본다.

##### 1. DC 모터 속도제어 실험

그림 9는 DC 모터의 속도 제어 실험을 수행하기 위해 제어보드와 DC 모터를 연결한 상태를 보여준다. 3D printing을 통해 제작한 DC 모터 고정장치가 안정적으로 모터를 고정하고 있는 것을 볼 수 있다. 제어보드와 DC 모터를 모두 포함한 실험 환경이 A4 용지 한 장 위에 올라갈

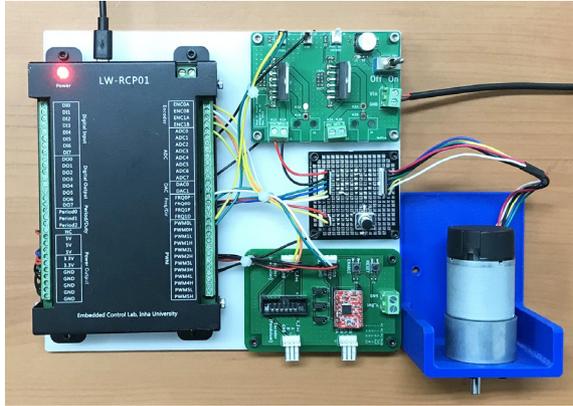


그림 9. DC 모터와 제어보드의 연결.

Fig. 9. Connection of a DC motor to the control board.

만큼 작은 공간만 차지하고 있어 학생들이 집에서 실험하는 데에도 전혀 무리가 없다.

그림 10은 LW-RCP library block을 이용하여 구성된 DC 모터의 PI 속도 제어 block diagram을 보여준다. 그림에서  $w^*$ 는 모터의 각속도 기준입력으로써 가변저항의 전압을 AD 변환한 후  $-1000 \text{ rad/sec} \leq w^* \leq 1000 \text{ rad/sec}$ 의 범위를 갖도록 처리하는 과정을 보여준다.  $u$ 는 PI 속도제어기에서 생성한 제어량으로 DC 모터에 인가되는 단자전압에 해당된다. DC motor라고 이름 붙은 subsystem의 내부 구성은 마우스를 더블클릭 함으로써 볼 수 있는데 여기서는 편의상 같은 그림에서 볼 수 있도록 나타내었다. 화살표가 가리키는 박스 내부의 block 구성이 DC motor의 내부 block 구성이다. 그림에서 볼 수 있듯이 학생들은 encoder로부터 각변위를 측정하는 연산과 모터를 구동하기 위해 PWM을 생성하기 위해 필요한 하드웨어 작업을 그림 10의 Simulink

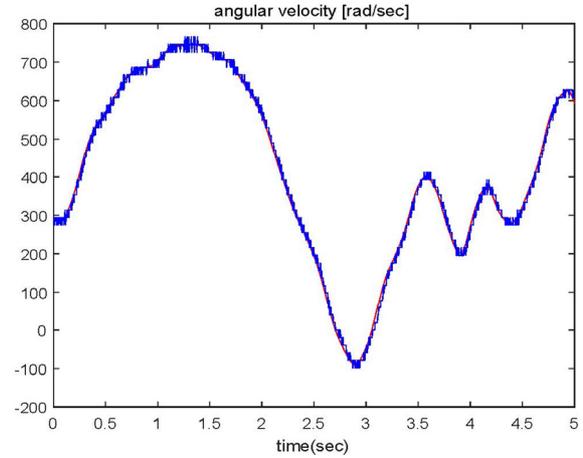


그림 11. DC 모터 속도 제어 실험결과.

Fig. 11. Experimental result of velocity control of the DC motor.

model에서처럼 LW-RCP에서 제공하는 library block을 활용하여 처리할 수 있기 때문에 제어 알고리즘의 구현이라는 본연의 목적에만 집중할 수 있게 된다.

제어 실험을 수행하는 도중 발생하는 실험결과는 Simulink의 scope block을 이용하여 실시간으로 확인할 수 있으며 실험 종료 후 결과를 분석하고자 할 때에는 Simulink의 To Workspace block을 이용하여 data를 workspace로 저장하는 방식으로 수행할 수 있다. 그림 11은 그림 10에 포함된 To Workspace block인 true\_time과 simout에 저장된 data를 이용하여 복원한 속도제어 실험결과이다. 그림에서 빨간색 선은 속도 기준입력, 파란색은 실제 모터의 회전속도이다. 실제 속도가 기준입력을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 속도에 잡음이 있는 것은 encoder의 정량화로 인한 잡음(quantization noise)으로 모의실험이 아니라 실제 실험을 통해서만 확인

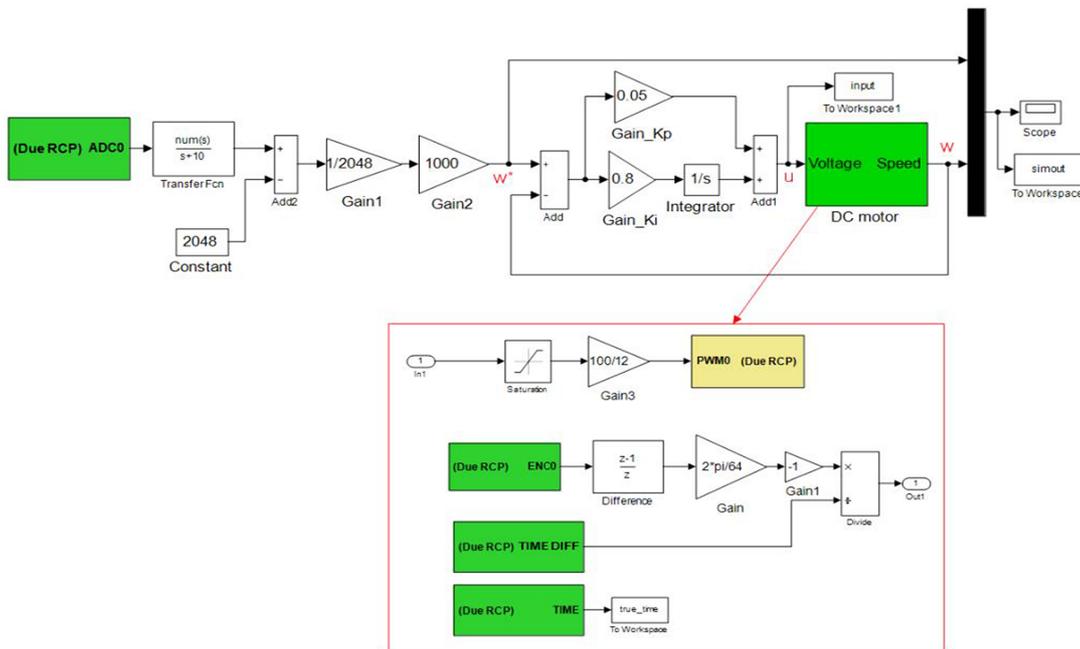


그림 10. DC 모터 속도제어 block diagram.

Fig. 10. The block diagram for velocity control of a DC motor.

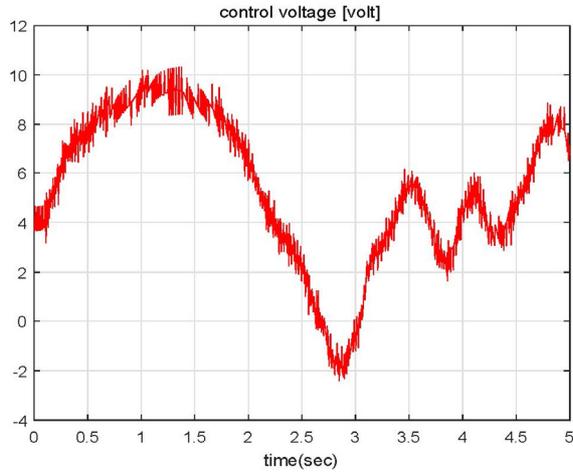


그림 12. DC 모터 인가전압의 파형.

Fig. 12. Waveform of voltage input to the DC motor.

할 수 있는 현상이다. 그림 12는 To Workspace block인 input에 저장된 data를 이용하여 복원한 DC 모터 인가전압의 파형이다. 정량화 잡음을 갖는 속도 값을 바탕으로 PI 제어연산을 수행해 모터의 인가전압을 생성해 냈으므로 인가전압의 파형도 평활하지 않고 잡음이 섞인 파형을 갖는 것을 살펴볼 수 있다.

## 2. 도립진자의 Swing-up 제어 실험

제안된 교육환경을 통해 도립진자에 대해서도 다양한 제어 실험을 수행해 볼 수 있다. 여기서는 회전형 도립진자의 swing-up 제어와 관한 제어실험을 LW-RCP를 이용하여 수행하는 방법을 다루어보기로 한다. 그림 13은 회전형 도립진자와 제어보드를 서로 연결한 모습을 보여준다. 도립진자의 encoder cable과 스텝모터 cable을 모터 드라이버위의 connector와 연결하면 제어실험을 위한 결선과정은 완료된다.

swing-up 제어를 위해서는 [12]의 결과를 활용하기로 한다. 회전형 도립진자의 운동방정식은 arm의 회전 각가속도  $\ddot{\theta}$ 를 제어 입력  $u$ 로 볼 경우 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= \sin \alpha + \frac{mgl \sin \alpha}{I_p} - \frac{mrl \cos \alpha}{I_p} u \\ \ddot{\theta} &= u \end{aligned} \quad (1)$$



그림 13. 회전형 도립진자와 제어보드의 연결.

Fig. 13. Connection of the rotary inverted pendulum to the control board.

여기서  $m$ 은 진자봉의 질량,  $l$ 은 진자봉의 회전축으로부터 무게중심까지의 길이,  $I_p$ 는 진자봉의 회전축에 대한 관성모멘트이다. 제안된 회전형 도립진자의  $m$ ,  $l$ ,  $I_p$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m &= 0.138 \text{ [Kg]}, l = 5.5 \times 10^{-2} \text{ [m]}, \\ I_p &= 8.9 \times 10^{-4} \text{ [Kg} \cdot \text{m}^2] \end{aligned} \quad (2)$$

[12]의 결과를 이용하면 swing-up 제어를 위한 arm의 각가속도  $u$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u = \frac{u_a |\Sigma| + \Xi}{\Sigma} \quad (3)$$

여기서  $\Sigma$ 와  $\Xi$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Sigma &= \text{sgn}(E_p) \cos \alpha \dot{\alpha} - 2\lambda \dot{\theta} \\ \Xi &= \text{sgn}(E_p) \left( \frac{I_p}{mrl} \right) \sin \alpha \cos \alpha \dot{\alpha}^2 + 2\gamma \dot{\theta} \end{aligned} \quad (4)$$

$E_p$ 는 진자봉의 역학적 에너지로써 다음과 같다.

$$E_p = \frac{1}{2} I_p \dot{\alpha}^2 + mgl(\cos \alpha - 1) \quad (5)$$

$u_a$ ,  $\lambda$ ,  $\gamma$ 는 설계변수로서 모두 양의 값을 갖는다. 여기서는  $u_a = 14$ ,  $\lambda = \gamma = 0.3$ 을 사용하기로 한다. 스텝모터의 경우 탈조가 발생하지 않을 경우 정확한 각속도 제어가 가능하다. 식 (3)에 의해 생성된 각가속도를 적분하여 각속도에 대한 지령치를 생성한 후 이 값을 추종하도록 함으로써 필요한 각가속도  $u$ 를 생성할 수 있다.

그림 14는 회전형 도립진자의 swing-up 제어 수행을 위한 block diagram을 보여준다. Mini rotary inverted pendulum이라 이름 붙은 subsystem의 내부 구성은 마우스를 더블클릭 함으로써 볼 수 있는데 여기서는 편의상 같은 그림에서 볼 수 있도록 화살표가 가리키는 박스 내부에 block 구성을 나타내었다. [12]에서 제안된 알고리즘은 mini\_rotpend\_swingup이라는 이름의 block을 통해 구현하였다. Stateflow와 같은 기능을 이용하여 구현가능하며 여기서는 S-function을 이용하여 구현하였다. 실험결과는 scope block을 이용하여 실시간 확인 가능하며 실험 종료 후에는 To workspace block을 통해 저장한 data를 이용하여 분석을 수행할 수 있다. 그림 15는 저장된 data를 이용하여 복원한 실험 결과를 보여준다. 그림을 통해 도립진자가 여러번의 swing을 거쳐 도립상태로 전환해 가는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 역시 To workspace block을 통해 저장한 arm의 각가속도 data를 복원한 파형을 보여준다. LW-RCP 환경을 이용할 경우 이처럼 손쉽게 data를 취득하여 파형을 그려보고 이를 통해 현상에 대한 분석을 수행해 볼 수 있다.

살펴본 바와 같이 제안되는 교육환경을 이용하면 도립진자와 같은 난이도 있는 비선형 시스템에 대해서도 다양한 제어 실험을 큰 시행착오 없이 수행해 볼 수 있어 학생들로 하여금 직접 경험을 통한 학습 효과를 극대화할 수 있는 장점이 있다.

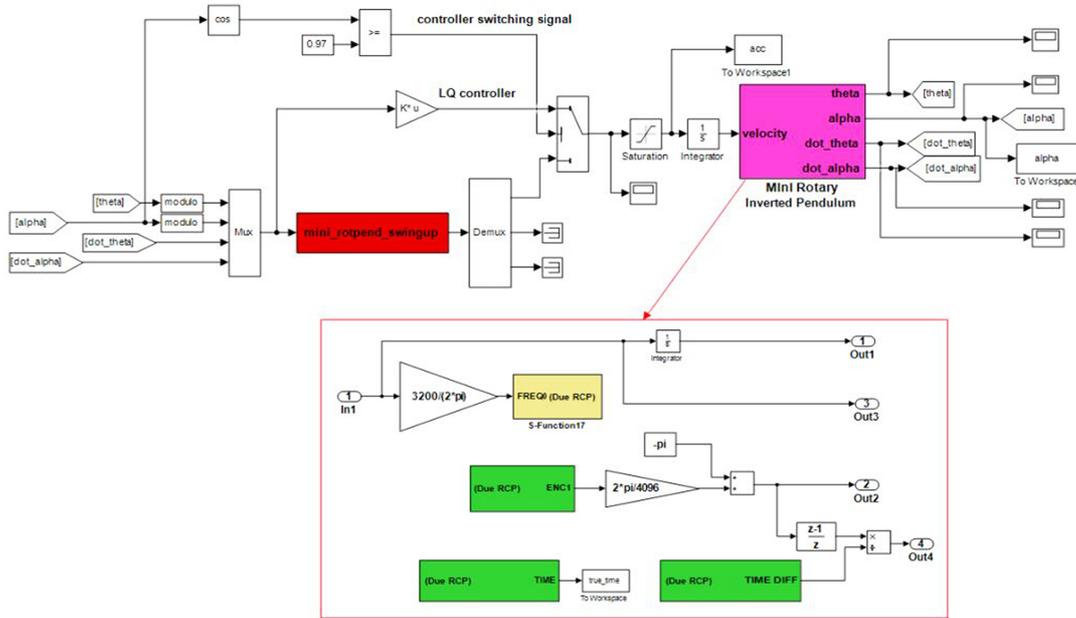


그림 14. 회전형 도립진자 swing-up 제어 block diagram.  
 Fig. 14. Block diagram of swing-up control of the rotary inverted pendulum.

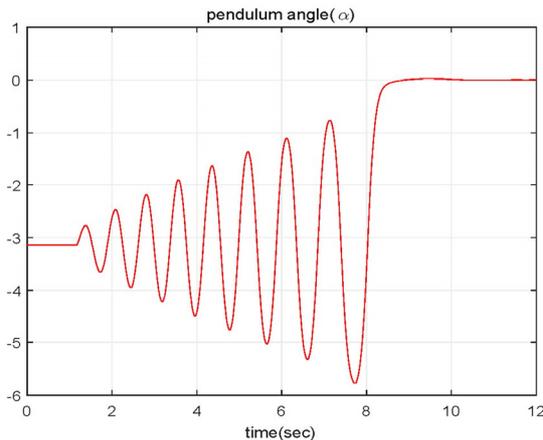


그림 15. 도립진자 swing-up 제어 실험 결과 : 진자각( $\alpha$ ).  
 Fig. 15. Experimental result of swing-up control : pendulum angle.

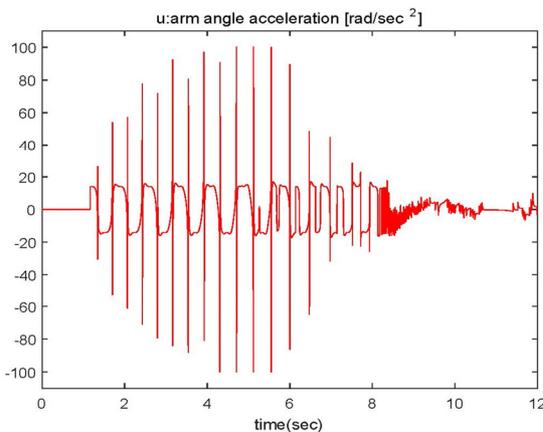


그림 16. 도립진자 swing-up 제어 실험 결과 : arm의 각 가속도.  
 Fig. 16. Experimental result of swing-up control : angular acceleration of the arm.

V. 결론

이 논문에서는 Covid-19로 촉발된 재택 온라인 수업에서도 만족스러운 수업효과를 기대할 수 있는 제어시스템 교육을 지원하는 교육환경을 제안하였다. 제안하는 교육환경은 경제적이면서도 소형의 크기를 갖도록 설계되어 학생 1인당 1대씩의 장치를 제공할 수 있도록 제안되었다. 최근 각광받는 3D printing 기술을 접목하여 제어장치들을 작고 경제적인 비용으로 제작이 가능하도록 하였다. 또한 연구실에서 개발한 LW-RCP 환경을 접목하여 제어기 구현 과정에서 학생들이 겪어야 하는 불필요한 시행착오 과정을 최소화하였다. 제안되는 교육환경은 최근 교육현장에서 많이 강조되는 직접경험(hands-on experience)을 통한 학습효과를 온라인 교육 환경 하에서도 극대화할 수 있는 장점을 가진다. 온라인 수업은 대면수업에 비해 장점과 단점을 가진다. 제안된 교육환경은 온라인 수업의 장점을 유지하면서도 단점으로 지적되는 제한적인 직접경험 문제를 해소할 수 있어 향후 온라인 수업의 교육 효율 향상에 크게 기여할 수 있을 것으로 생각된다. 좀 더 다양한 제어장치들을 제안되는 교육환경과 접목할 수 있도록 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

REFERENCES

[1] M. Deppe, M. Zanella, M. Robrecht, and W. Hardt, "Rapid prototyping of real-time control laws for complex mechatronic systems : A case study," *Journal of Systems and Software*, vol. 70, no. 3, pp. 263-274, 2004.  
 [2] R. Isermann, "Innovative products with embedded control," *Control Engineering Practice*, vol. 16, no. 1, pp. 14-29, 2008.  
 [3] W. Lee, M. Shin, and M. Sunwoo, "Target-identical rapid control prototyping platform for model-based engine con-

- trol,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, vol. 218, no. 7, pp. 755-765, 2004.
- [4] D. Hercog and K. Jezernik, “Rapid control prototyping using Matlab/Simulink and a DSP-based motor controller,” *International Journal of Engineering Education*, vol. 21, no. 3, pp. 1-9, 2005.
- [5] www.dspace.com
- [6] www.quanser.com
- [7] K. Graichen, M. Treuer, and M. Zeitz, “Swing-up of the double pendulum on a cart by feedforward and feedback control with experimental validation,” *Automatica*, vol. 43, pp. 63-71, 2007.
- [8] T. Glück, A. Eder, and A. Kugi, “Swing-up control of a triple pendulum on a cart with experimental validation,” *Automatica*, vol. 49, pp. 801-808, 2013.
- [9] D. W. Kim and H. J. Park, “Swing-up Control of a Reaction Wheel Pendulum Using the Actor-Critic Algorithm,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 27, no. 10, pp. 745-753, 2021.
- [10] Y. S. Lee, B. Jo, and S. Han, “A light-weight rapid control prototyping system based on open source hardware,” *IEEE Access*, vol. 5, no. 1, pp. 11118-11130, 2017.
- [11] J. Park, H. Bang, and Y. S. Lee, “A study on the implementation of a ball and plate system using LW-RCP and machine vision based on Odroid,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 26, no. 4, pp. 213-221, 2020.
- [12] Y. S. Lee, J. J. Oh, S. Y. Shim, H. Lim, and J. H. Seo, “Swing-up control for a rotary inverted pendulum with restricted rotation range,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 6, pp. 548-553, 2008.

## 이 영 삼

제어·로봇·시스템학회 논문지, 제 15권 제 4호 참조.



## 주 도 윤

2021년 군산대학교 미래형자동차공학과 졸업. 2021년~현재 인하대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 임베디드 시스템, 메카트로닉스, 최적제어.



## 최 창 규

2021년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2021년~현재 인하대학교 대학원 전기컴퓨터공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 최적제어, 로봇공학, 예측제어.