

논문 2012-50-5-31

# 산업용 밸브 액추에이터 비례제어 컨트롤러 개발

(Development of Proportional Valve Actuator Controller for Industrial Site)

박한영\*, 김진영\*\*, 안성수\*\*\*, 강준희\*\*

(Han Young Park, Jin Young Kim, Sung Soo Ahn, and Joonhee Kang<sup>©</sup>)

## 요약

본 연구에서는 전기식 밸브 액추에이터의 개폐 정도를 입력신호에 비례하여 제어하기 위한 PCU (Proportional Control Unit), CPT (Current Position Transmitter)와 액추에이터의 회전위치를 측정하는 Rotary Absolute Optical Encoder를 설계 및 제작하였고, DAQ 하드웨어와 LabView를 사용한 테스트 시스템을 설계하여 성능시험을 하였다. PCU는 1-5V, 0-5V, 0-10V, 2-10V 전압 신호와 4-20mA의 전류신호를 일정한 범위의 0.5-2.5V 전압신호로 변환하도록 설계하였다. CPT는 MCU의 PWM 신호를 입력받아 밸브의 개폐 정도를 4-20mA의 전류신호로 출력 하도록 하였다. Infrared LED와 Infrared Transistor를 사용하여 20bit Optical Encoder를 개발하였으며, Main Board와 Serial 통신을 하도록 설계하였다. DAQ 하드웨어와 Labview를 통한 테스트 결과 PCU는  $\pm 0.003V$ , CPT는  $\pm 0.01mA$ 의 오차범위 내에서 작동하여 산업용 밸브 액추에이터가 안정적으로 작동하는 것을 관찰하였으며, Encoder는  $11.25^\circ$ 의 분해능을 갖고, 최대 32,768 회의 모터회전수 범위까지 측정할 수 있도록 하였다.

## Abstract

To proportionally control the electronic valve position of the actuator, we designed and fabricated PCU, CPT, and rotary absolute optical encoder for the detection of absolute angular position in the actuator. We also designed and constructed the test system by using DAQ hardware and Labview. We designed PCU to convert 1-5 V, 0-5 V, 0-10 V, 2-10 V voltage signals and 4-20 mA current signals to the voltage signals in the common 0.5-2.5 V range. We designed CPT to output 4-20 mA current signals corresponding to the valve positions based on the PWM signal input from the MCU. We also designed 20 bit optical encoder by using infrared LED and infrared transistor and made the serial communication with the main board possible. When we tested PCU and CPT with DAQ hardware and Labview software, they operated correctly with the small errors within  $\pm 0.003 V$  and  $\pm 0.01 mA$ , respectively, showing that our actuator has the excellent performance to employ as the industrial proportional-valve-actuator. The resolution of the encoder was  $11.25^\circ$  and the maximum revolution to detect was 32,768.

**Keywords :** Valve actuator, Controller, AC motor

## I. 서론

오늘날 산업의 급격한 발전으로 인하여 제어 시스템은 필수적인 요소가 되었으며, 특히 기간 시설, 플랜트,

지하시설물, 고층빌딩 등에서는 가스, 수도를 공급하는 자동화 시스템을 운영하고 있다. 산업기간 시설에 장치된 유체를 배송하는 펌핑 시스템은 매우 안정적으로 동작해야 한다. 펌핑 시스템에 문제가 발생할 경우에는 플랜트 등의 기간시설 및 건물에서 심각한 장애를 초래할 뿐만 아니라 운전 중단 사태가 발생할 수 있으며, 이러한 경우 막대한 경제적 손실이 야기될 수 있다. 따라서 펌핑 시스템에서의 안정적인 제어를 위하여 신뢰할 수 있는 밸브 액추에이터의 개발이 중요하게 되었다.

일반적인 산업용 액추에이터는 단순 On/Off 제어용으로 많이 사용된다. 최근 들어서는 단순 On/Off 방식이 아닌 비례제어 기능이 탑재된 멀티턴 방식의 액추에

\* 학생회원, \*\* 정회원, 인천대학교 물리학과  
(Dept. of Physics, Incheon National University)  
\*\*\* 정회원, 명지전문대학 정보통신과  
(Dept. of Information Communication, Myongji College)  
※ 이 논문은 인천대학교 2012년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.  
© Corresponding Author(E-mail:jhkang@incheon.ac.kr)  
접수일자: 2012년12월10일, 수정완료일: 2013년4월25일

이터의 수요가 급증하고 있다. 멀티턴 방식은 On/Off를 위해 액추에이터가 회전을 많이 함으로써 밸브제어의 폭을 가변적으로 수행할 수 있는 장점이 있다. 멀티턴 기능을 수행하기 위해서는 액추에이터의 기계적 구조도 복잡해 질뿐만 아니라 정밀한 비례제어기능과 지능형 기능을 갖춘 컨트롤러가 필수적이다.

본 연구에서는 기존의 On/Off 제어방식의 액추에이터 컨트롤러와 달리 밸브의 개폐 정도를 입력신호에 비례하여 제어할 수 있도록 PCU (Proportional Control Unit), CPT (Current Position Transmitter)를 설계하였고, 기존의 On/Off 제어방식의 액추에이터 컨트롤러는 액추에이터의 위치를 측정하지 않고 액추에이터의 On/Off만 감지하면 되었지만 액추에이터의 위치를 비례적으로 제어하기 위해서는 액추에이터의 위치를 실시간 측정하는 엔코더가 필요하다. 또한 컨트롤러가 꺼져 있는 상태에서 사용자가 수동으로 작동하였을 경우에도 액추에이터의 위치변화를 측정할 수 있어야한다. 따라서 Infrared LED와 Infrared Transistor, Gray code disk를 이용하여 액추에이터의 절대적 회전위치를 측정하고, 전원이 없는 상태에서 액추에이터가 회전해도 액추에이터의 위치를 파악할 수 있도록 Rotary Absolute Optical Encoder를 설계 및 제작하였다. DAQ 하드웨어와 Labview를 이용한 테스트 시스템을 설계하여 테스트 하였으며, 설계한 비례제어 컨트롤러는 산업용 시스템에 탑재할 수 있도록 개발하였다.

II. 멀티턴 비례제어 액추에이터 컨트롤러 개발

1. 하드웨어 구성

그림 1은 멀티턴 액추에이터 컨트롤러의 하드웨어 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 주요 구성요소로는 제어 기능을 수행하기 위한 MCU, 3상 AC 모터 제어를 위한 전원회로 및 제어 회로부, 외부 제어 신호를 수신하고 송신하기 위한 회로부, 위치파악을 위한 Encoder로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 액추에이터의 비례 제어를 위한 PCU, CPT와 Encoder를 설계 하였다.

2. PCU & CPT 회로 설계

PCU(Proportional Control Unit)는 외부에서 입력되는 제어신호를 MCU로 전달하는 기능을 수행한다. 일반적으로 4-20mA 전류를 가장 많이 사용한다. 그 이외에도 전압신호를 사용 하는 경우가 발생하는데, 2-10V, 0-10V, 1-5V, 0-5V의 수신신호를 사용하여 제어가 가

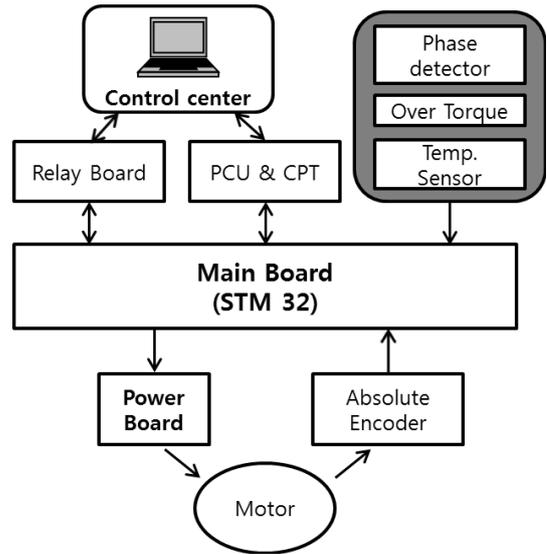


그림 1. 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 1. System block diagram.

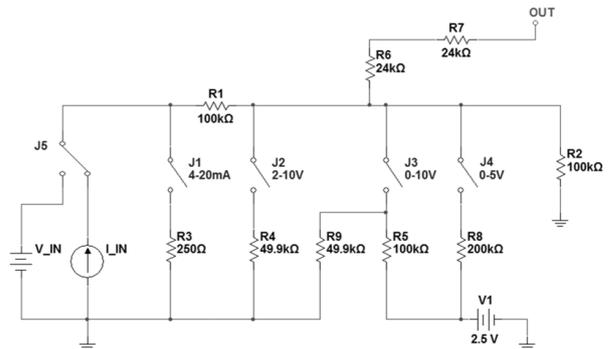


그림 2. PCU 회로도  
Fig. 2. PCU schematic diagram.

표 1. PCU 스위치의 개폐조건  
Table 1. ON/OFF conditions of PCU switches.

INPUT	J1	J2	J3	J4
4-20mA	ON	OFF	OFF	OFF
2-10V	OFF	ON	OFF	OFF
0-10V	OFF	OFF	ON	OFF
0-5V	OFF	OFF	OFF	ON
1-5V	OFF	OFF	OFF	OFF

능하도록 PCU 회로를 구성하였다. 그림 2는 PCU의 기본 회로도를 나타내고 있다.<sup>[1~3]</sup>

왼쪽 하단의 V\_IN, L\_IN 은 외부 입력신호를 나타내며, 상단의 OUT포트는 MCU로 입력되는 출력신호로 스위치 J1-J4의 선택에 따라 입력신호를 구별할 수 있도록 하였다. PCU에 입력되는 신호는 스위치를 선택하여 연결되는 회로에 의해 항상 0.5-2.5V의 일정한 전압

신호로 변환되어 MCU로 출력되도록 하였다. 제어신호에 따른 스위치의 개폐는 표 1에 보인 바와 같다.

산업현장에서는 원격제어실에서 밸브의 개폐정도(0-100%)를 제어하기 위하여 4-20mA의 전류신호 또는 전압신호를 액추에이터에 전송한다. PCU는 위의 신호를 MCU에서 인식할 수 있도록 일정 범위(0.5-2.5V)의 전압신호로 변환하는 기능을 수행한다. MCU는 입력된 신호를 분석하고, 입력신호에서 주어진 만큼 밸브가 개폐 되도록 3상 AC모터를 구동한다.

CPT(Current Position Transmitter)는 밸브의 위치를 실시간으로 출력하여 알려준다. 출력신호는 산업현장의 원격제어실에서 수신하여 밸브의 동작상태, 위치를 확인 할 수 있게 한다. 산업현장의 대부분의 기존 장비들은 4-20mA의 전류신호를 사용하기 때문에 본 연구에서 제작한 CPT는 밸브의 위치(0-100%)를 4-20mA의 전류신호로 출력하도록 설계하여 제작하였다.

그림 3은 CPT의 회로도를 나타낸다. 좌측 상단의 입력포트에는 MCU에서 출력되는 PWM(Pulse width modulation) 신호가 입력된다. Encoder나 가변저항으로 측정된 신호로부터 MCU는 밸브의 위치를 계산하고, 이 밸브의 위치는 PWM 신호로 CPT에 보내지게 된다. 이 신호를 Photocoupler 와 Schmitt Trigger를 사용하여 구형파로 변환하고, Low Pass Filter를 사용하여 전압신호로 변환한다. PWM 신호를 조절하여 이 전압신호가 1-5V 가 되도록 하였다. 변환된 1-5V 전압신호는 Voltage to Current Converter를 통해 4-20mA 전류신호로 변환하고, 외부로 출력되도록 하였다.<sup>[4-5]</sup>

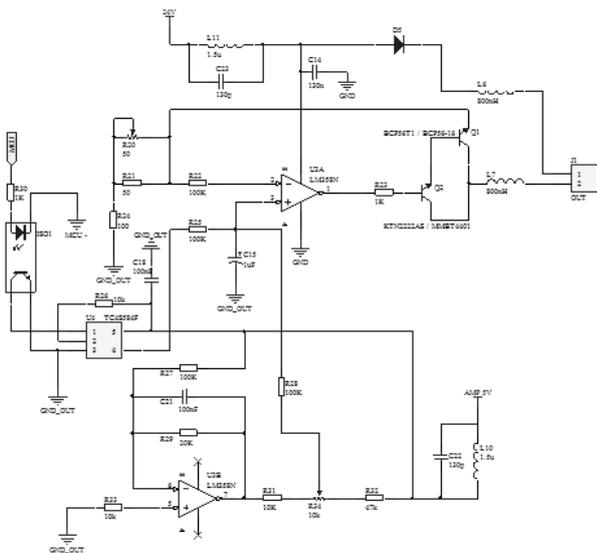


그림 3. CPT 회로도  
Fig. 3. CPT schematic diagram.

### 3. Encoder 설계

Encoder를 사용하여 모터의 회전량 및 회전 위치를 측정하였다. 일반적인 Servomotor Motor는 전용 드라이버 회로와 Encoder를 내장하고 있어 회전수를 컨트롤 할 수 있지만, 산업용 AC Induction Motor는 부가적인 회로를 구성하지 않고 사용한다. AC Induction Motor의 회전축에 Encoder를 부착하였으며, Infrared LED와 Infrared Transistor, Gray code disk를 이용하여 모터의 절대적 회전위치를 측정하고, 전원이 없는 상태에서 회전해도 엔코더의 회전축이 같이 회전하여 전원이 다시 인가되었을 때 바로 모터의 회전위치를 측정할 수 있도록 Rotary Absolute Optical Encoder를 설계하였다. Incremental Encoder는 절대적인 위치는 측정하지 못하고, 상대적인 변화를 측정하며, 전원이 제거되면 그 위치를 잃게 된다.<sup>[6]</sup> 하지만 Absolute Encoder 방식을 적용하여 외부 전원공급 여부와 상관없이 액추에이터가 동작을 시작 할 경우에는 Encoder를 통해 즉시 절대적인 위치정보를 수신할 수 있도록 구성하여 안정성을 확보하였다. 광학식 Absolute Encoder의 경우에는 절대적 위치정보 수집이 가능한 장점이 있지만 홀센서와 메모리로 구성된 Encoder에 비해 부피가 크고 기계적 구성이 복잡한 단점이 있으나, 본 연구에서는 산업용에서 사용하기 위한 안정성에 초점을 맞추었다.

그림 4는 Encoder 기능을 수행하기 위한 회로도를 나타낸다. 좌측은 적외선 LED(IRED)와 Phototransistor(Photo TR)로 IRED의 빛이 Encoder 디스크의 슬릿을 통과하여 Photo TR에 수신된다. Photo TR을 Common Emitter 회로로 구성하여 빛이 수신되면 '0', 차단되면 '1'의 신호가 출력된다.

Photo TR의 출력신호는 Schmitt Trigger를 이용하여

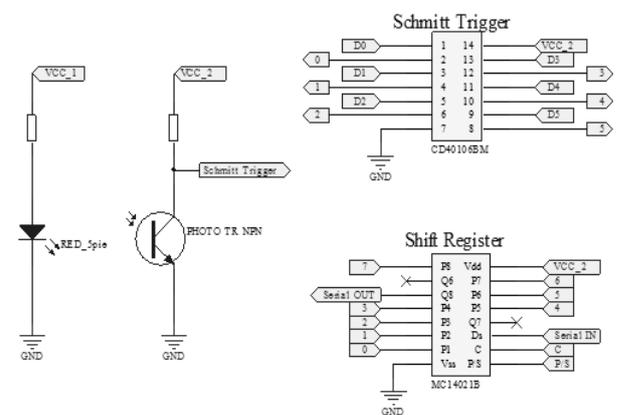


그림 4. Encoder 회로도  
Fig. 4. Encoder schematic diagram.

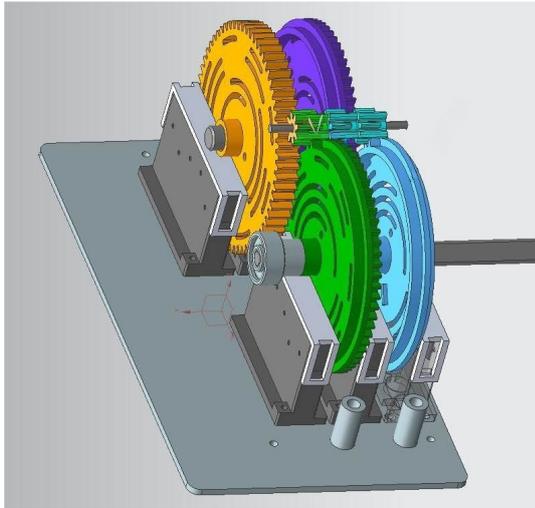


그림 5. 하드웨어 3D 모델  
Fig. 5. 3D Model of Encoder Hardware.

여 반전된 구형파로 변환하고, Shift Register를 이용하여 Serial Data로 변환하여 MCU에 출력한다. 본 연구에서는 Optical Encoder를 총 20bit로 설계하여 절대적인 위치정보를 측정할 수 있도록 디자인 하였다.

그림 5는 Encoder의 내부에 대한 스케치로 디스크 디자인을 나타낸다. 각 디스크는 5bit Gray code로 설계 하였고, 총 4개의 디스크를 사용하여 20bit 까지 측정이 가능하도록 하였다. 이 Encoder는 전원이 차단되더라도 절대적인 위치정보를 전원이 공급되는 순간 바로 인식할 수 있는 장점이 있다. 일반적인 Incremental Encoder의 경우는 전원이 제거될 경우에 절대적 위치 정보를 기억하기 위해서는 마지막 위치를 저장할 수 있는 메모리를 추가적으로 구성 하여야 한다. 산업용으로 적용하기 위해서는 열악한 환경 및 전원공급의 문제가 발생하더라도 절대적인 위치정보를 잃어버리지 않는 것이 매우 중요하며, 이를 위해 본 연구에서는 Absolute Optical Encoder를 개발하여 액추에이터에 적용하였다.

### III. 제작 및 성능시험

#### 1. PCU & CPT

PCU와 CPT 유닛을 제작한 사진을 그림 6에 나타내었다. IN± 포트에 입력된 외부 제어신호는 스위치의 모드 선택에 의하여 일정 전압 신호로 변환되며, OP-AMP를 이용한 버퍼 회로를 통해 OUT1 포트에 출력된다. 이 신호는 MCU에 입력되고, 입력신호에 비례하여 모터를 동작하게 된다.

모터의 위치는 Encoder의 신호를 MCU가 계산하여

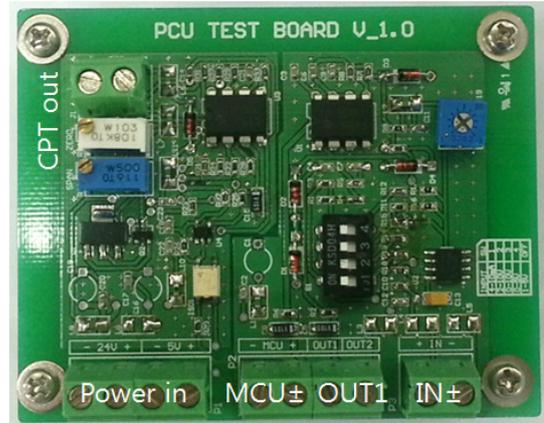


그림 6. 제작된 PCU의 PCB Board  
Fig. 6. PCB Board of PCU.

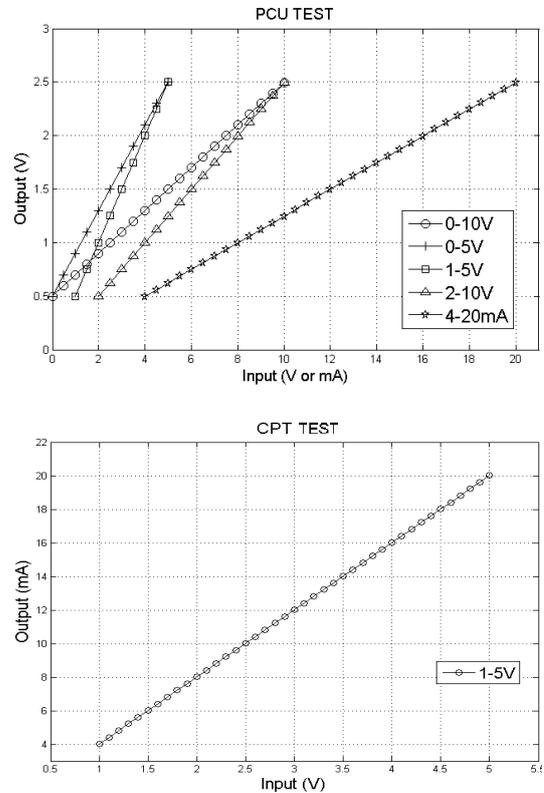


그림 7. PCU와 CPT 테스트 결과  
Fig. 7. Results for PCU and CPT tests.

파악한다. 이 위치를 외부에 4-20mA의 전류신호로 출력하기 위하여 MCU± 포트에 PWM 신호를 입력하고, PWM 신호는 RC 필터에 의하여 DC 전압신호로 변환된다. 이 때, 변환된 DC 전압신호가 1-5V의 전압신호가 되도록 PWM 신호를 조절한다. 1-5V의 전압신호는 Voltage to Current Converter 회로를 지나 외부로 4-20mA의 전류신호가 출력된다.

PCU Board의 테스트는 NI의 DAQ 하드웨어와 LabView 프로그램을 통하여 실시하였다. PCU 테스트

에서는 DAQ를 사용하여 설정된 전압신호를 출력하도록 하였고, 이 신호는 PCU에 입력된다. 또, PCU의 출력신호를 DAQ를 통하여 측정하였다.

LabView로 설계한 테스트 프로그램과 DAQ 시스템을 사용하여 얻은 테스트 결과를 그림 7의 그래프에 나타내었다. 상단의 그래프는 PCU 회로에 각각 다른 범위의 신호를 입력 했을 때, MCU로 출력되는 신호를 나타낸다. 다른 종류의 신호가 0.5-2.5V의 일정한 범위의 전압신호로 변환되는 것을 나타내고 있다.

하단의 그래프는 CPT회로의 테스트 결과로 밸브의 위치가 0-100%일 때 MCU의 출력 PWM 신호가 필터를 통하여 1-5V의 전압신호로 CPT 회로에 입력되므로, PCU 테스트와 동일한 프로그램과 장비로 1-5V 전압신호를 CPT 회로에 입력하고, 출력신호를 검출하여 그래프로 나타내었다. 1-5V 전압신호가 입력되면 4-20mA의 전류신호가 출력되는 것을 나타낸다.

1-5V와 4-20mA의 신호를 밸브의 0-100%로 나타내면, 밸브 위치 1%는 각각 0.04V, 0.16mA로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 제작한 PCU와 CPT는 각각  $\pm 0.003V$ ,  $\pm 0.01mA$ 의 오차 범위 내에서 작동하는 것을 알 수 있었는데 이 값은 밸브위치 1% 값보다 훨씬 작은 것을 알 수 있다. 실제 산업현장에서는 밸브의 위치 제어를 1% 단위로 제어하므로 본 연구에서 제작한 PCU와 CPT는 실제 산업현장에 적용하기에 충분한 성능을 갖고 있다.

## 2. Encoder

Encoder의 PCB 디자인을 그림 8에 나타내었다. Encoder에는 총 10개의 IRED와 20개의 Photo TR을 사용하여 회전축의 위치를 20bit 까지 측정할 수 있도록 설계하였다. Photo TR에 수신된 빛은 전압신호로 변환되며, Schmitt Trigger로 구형파를 얻는다. 구형파의 신호는 Shift Register를 이용하여 Serial Data로 변

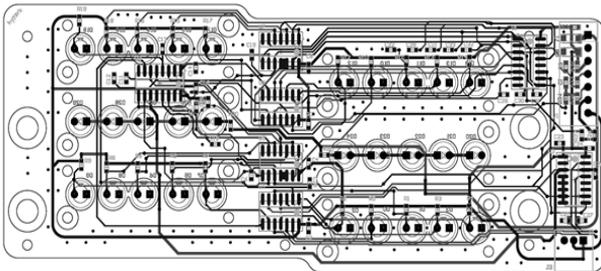


그림 8. Encoder PCB Layout  
Fig. 8. PCB Layout.

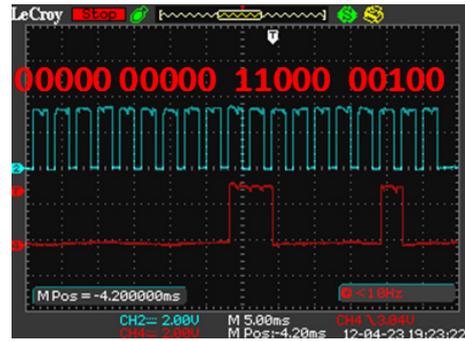


그림 9. 클럭신호(위), Encoder의 출력신호(아래)  
Fig. 9. Clock signal(Top), Encoder output signal(Bottom).

표 2. Encoder 출력신호의 변환  
Table 2. Conversion of Encoder output signal.

기어번호	4	3	2	1
gray code	00000	00000	11000	00100
binary code	00000	00000	10000	00111
hex code	0X00	0X00	0X10	0X07

환하여 MCU에 출력되게 된다. 본 연구의 모든 PCB 디자인은 Altium Designer 소프트웨어를 사용하여 설계하였다.

그림 9는 회전축의 회전위치를 Encoder가 측정하여 MCU로 출력하는 Serial Data를 오실로스코프로 측정한 것이다. 위의 신호는 MCU에서 Shift Register로 출력하는 Clock 신호로 이 신호에 의해 Shift Register가 Serial Data를 MCU로 출력한다.

표 2는 그림 9의 Gray code 신호를 MCU에서 변환한 값을 나타내었다. MCU에서는 Gray code 신호를 hex code로 변환하여 회전축의 위치를 계산한다. Encoder를 구성하는 각각의 디스크는 전단에 위치한 디스크가 한 번 회전할 때, 1 씩 증가한다. 1 번 디스크는  $360^\circ$ 를 5bit로 분해하므로  $360^\circ / 2^5 = 11.25^\circ$  회전할 때, 1 씩 증가하게 된다. 그림 9과 표 2의 데이터는 회전축이 최초 시작점(모든 디스크의 값이 0인 지점)에서 16 회 회전하고  $78.75^\circ$  회전한 상태를 보여준다.<sup>[7]</sup>

## IV. 결 론

기존의 On/Off 제어방식의 액추에이터 컨트롤러와 달리 액추에이터의 개폐 정도를 입력신호에 비례하여 제어하기 위한 PCU(Proportional Control Unit), CPT(Current Position Transmitter)와 액추에이터의 회전위치를 측정하는 Rotary Absolute Optical Encoder를

설계 및 제작하고, DAQ 하드웨어와 LabView를 사용한 테스트 시스템을 구성하여 시험하였다. PCU와 CPT는 각각  $\pm 0.003V$ 와  $\pm 0.01mA$ 의 오차범위 내에서 작동하였으며 이는 밸브 위치에 있어서 0.07%와 0.06%의 오차범위를 나타낸다. 산업현장에서는 최소 1% 단위로 제어하기 때문에 본 연구에서 제작한 PCU와 CPT는 산업현장에 적용하기에 충분한 성능을 보여주었다.

기존의 On/Off 제어방식의 액추에이터 컨트롤러는 액추에이터의 위치를 측정하지 않고 액추에이터의 On/Off만 감지하면 되었지만 액추에이터의 위치를 비례적으로 제어하기 위해서는 액추에이터의 위치를 실시간 측정하는 엔코더가 필요하다. 또한 전원 없이 사용자가 수동으로 작동하였을 경우에도 액추에이터의 위치 변화를 측정할 수 있어야한다. 때문에 Infrared LED와 Infrared Transistor를 이용하여 20bit Optical Encoder를 설계 하였으며, 11.25°의 분해능을 갖고, 최대 32,768회까지 측정할 수 있었다.

### 참고 문헌

- [1] 권태황, 고재욱, 채용운, 이재천, "FPGA 응용 비례 밸브 컨트롤러 보드 설계", *한국자동차공학회*, 2010년
- [2] 정규홍, "지능형 대용량 비례유량제어밸브 서보컨트롤러 설계", *유공압시스템학회논문집 Vol 3*, 1-7쪽, 2011년 9월
- [3] 고재욱, 권태황, 신행봉. "비례제어밸브용 디지털 앰프·컨트롤러에 대한 연구", *유공압시스템학회지* 제8권 제1호, 19-25쪽, 2011년 3월
- [4] W. R. Kolk, "Pulse Width Modulation", *Control Engineering*, pp.52-54, 1975
- [5] 김훈, 김희준, 정원섭, "Pulse Width Modulation Circuits Using CMOS OTAs", *대한전자공학회*, 48-60쪽, 2006년 11월
- [6] 최대식, 손영익, 김갑일. "증분형 엔코더를 이용한 DC 모터의 속도 추정 비교 실험", *대한전기학회*, 2012년
- [7] Massimo Gottardi, Lorenzo Gonzo, Stefano Gregori, Valentino Liberali, Andrea Simoni, Guido Torelli. "An Integrated CMOS Front-End for Optical Absolute Rotary Encoders", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2003.

### 저 자 소 개



**박 한 영**(학생회원)  
 2010년 인천대학교 물리학과 학사 졸업.  
 2011년~현재 인천대학교 물리학과 석사 과정.  
 <주관심분야: Actuator controller, Sensor System>



**김 진 영**(정회원)  
 1998년 인천대학교 물리학과 학사 졸업.  
 2000년 인천대학교 물리학과 석사 졸업.  
 2006년 인천대학교 물리학과 박사 졸업.  
 2005년~2007년 (주)키스컴 연구개발 팀장  
 2007년~현재 아이.에이치.에스 연구소장  
 <주관심분야 : RFID, RTLS, Sensor 응용>



**안 성 수**(정회원)  
 1987년 한양대학교 전자공학과 학사 졸업.  
 1990년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업.  
 2001년 한양대학교 전자공학과 박사 졸업.  
 1990년~1997년 국방과학연구소 연구원  
 2002년~현재 명지전문대학 정보통신과 교수  
 <주관심분야 : 스마트 안테나, DSP신호처리, 이동통신>



**강 준 희**(정회원)-교신저자  
 1977년 서울대학교 물리교육과 학사 졸업.  
 1979년 한국과학원 물리학과 석사 졸업.  
 1987년 Univ. Of Minnesota 물리학과 박사 졸업.  
 1987년~1989년 Argonne National Laboratory (Post doc.)  
 1989년~1994년 Westinghouse Research Center (Senior Scientist)  
 1994년~현재 인천대학교 물리학과 교수  
 <주관심분야 : RFID, USN, MEMS, Sensor>