

VHDL을 이용한 구동 시간 설정 밸브 전동 액추에이터 제어 장치 개발에 관한 연구

강대국, *최영규

A Study on the Development of Electric Actuator Control Device for Driving Time Setting Valve Using VHDL

Dae-Guk Kang, *Young-Gyu Choi

요약 전동 액추에이터는 사용자의 명령 입력 신호(열림/닫힘/정지)를 받아 액추에이터 내부의 각종 센서(밸브의 위치, 회전력, 모터의 상태 등)들의 상태를 확인하고 모터를 정/역 제어하여 밸브를 개폐하고 액추에이터(밸브)의 현재 상태를 출력하는 장치로 댐, 발전소, 상하수도 시설, 송유관 시설 등 다양한 분야에서 사용하는 장치이다. 전동 액추에이터가 발전소 등에 설치되어 가동 중 문제가 발생할 경우 경제적으로 큰 손실이 발생할 수 있으므로 시스템의 신뢰성이 매우 중요하다. 본 연구에서는 전동 액추에이터의 안전성을 높이기 위해 소프트웨어적으로 발생할 수 있는 신뢰성 문제를 하드웨어적으로 ON/OFF 시간 설정이 가능한 전동 액추에이터 컨트롤 장치 개발을 진행하였다. 또한 전동 액추에이터 제어 장치 개발 환경은 Xilinx 사의 Spartan7 FPGA와 Altium 툴을 활용하여 개발하였다.

Abstract The electric actuator receives the user's command input signal (open/closed/stop), checks the status of various sensors (valve position, rotational force, motor status, etc.) in the actuator, and controls the motor forward/reverse to open and close the valve. It is a device that outputs the current state of an actuator (valve) and is used in various fields such as dams, power plants, water and sewage facilities, and oil pipeline facilities. If an electric actuator is installed in a power plant and a problem occurs during operation, it can cause a large economic loss, so system reliability is very important. In this study, in order to increase the safety of the electric actuator, the development of an electric actuator control device capable of setting the ON/OFF time in hardware was conducted to solve the reliability problem that may occur in software. In addition, the electric actuator control device development environment was developed using Xilinx's Spartan7 FPGA and Altium tool.

Key Words : Actuator, motor forward, motor reverse, FPGA, Xilinx Spartan7 , Altium

1. 서론

밸브 구동용 액추에이터는 밸브에 설치되어 각종 유체나 기체의 흐름을 제어하기 위한 장치로써 구동 방식에 따라 전동식, 유압식, 공압식 등으로 구분되며, 회전방식에 따라 부분회전(Quarter Turn)과 다회전

(Multi Turn)으로 나눌 수 있다. 전동 액추에이터는 모터 구동원을 전기로 사용하는 방식으로 각종 센서와 명령 입력신호(열림/닫힘/정지)를 받아 모터를 정/역 제어하고 액추에이터의 현재 상태를 출력하는 장치이다. 전동 액추에이터는 댐, 발전소, 상하수도 시설, 송유관 시설 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한

This was supported by Korea National University of Transportation in 2019

*Corresponding Author : Department of Computer Engineering, Korea National University of Transportation(ygchoi@ut.ac.kr)

Received October 24, 2020

Revised October 28, 2020

Accepted October 28, 2020

시설에 적용되는 액추에이터의 작동에 문제가 발생할 경우 경제적으로 큰 손실 및 피해가 발생할 수 있으므로 액추에이터의 동작 신뢰성이 매우 중요하다. 본 논문에서는 전동 액추에이터를 Xilinx사의 Spartan7 FPGA를 활용하여 밸브 ON/OFF 시간의 설정과 각종 센서의 명령 입력신호(열림/닫힘/정지)를 받아 모터를 정/역 제어하고 액추에이터의 현재 상태를 출력하도록 하드웨어적으로 밸브 제어 장치를 개발하였다.

2. 본론

2.1 시스템 및 회로 구성

2.1.1 FPGA 개발 보드

본 논문에서 개발한 구동 시간 설정 밸브 전동 액추에이터는 Xilinx사의 Spartan-7 계열의 FPGA인 xc7s15-ftgb196 보드를 제어보드에 직접 실장하여 센서와 인터페이스 할 수 있도록 VHDL언어로 개발을 하였다.[1] FPGA 보드는 50Mhz의 외부 클럭과 외부 인터페이스를 위한 2개의 50p 헤더를 가지고 있다. 전동 액추에이터 제어보드 PCB 설계는 Altium 툴을 활용하여 그림 2와 같이 설계하였다.

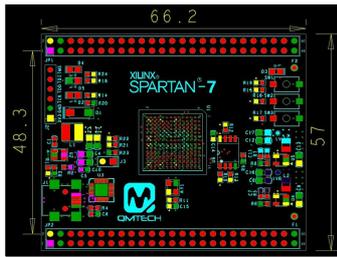
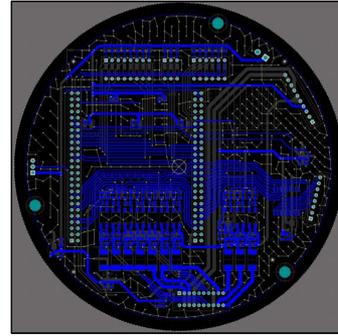


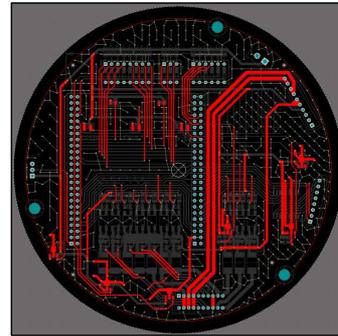
그림 1. Spartan7 개발 보드
Fig. 1. Spartan7 development board

2.1.2 제어 장치 회로 구성

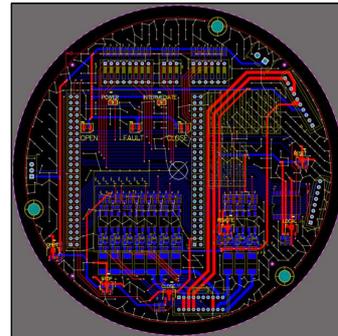
전동 액추에이터 제어 장치는 밸브 ON/OFF 시간 설정할 수 있는 타이머 기능 설정 회로와 현재 상태를 표시하는 LED 표시 회로가 있으며 모터의 움직임을 제어하기 위한 제어신호 입력회로, 모터의 위치를 판별하고 각 상태를 분기해주는 상태 신호 입력회로를 설계하였다. 밸브 전동 액추에이터 제어를 위한 OPEN,



a) 제어보드 전면
a) Control board Front, Rear



b) 제어보드 후면
b) Control board Rear



c) 제어보드 전체
c) Control board all the way

그림 2. 제어보드 PCB ARTWORK
Fig. 2. Control board PCB ARTWORK

CLOSE, STOP, LOCAL 스위치는 HALL SENSOR를 사용하여 그림 4와 같이 회로를 설계하였다. 액추에이터 제어부의 전면조작부와 내부 제어 보드와는 완전 분리된 형태로 노이즈 및 습도로부터 제어회로를 보호하기 위해 내부 HALL SENSOR와 외부 컨트롤 판넬에서 자석을 사용하여 스위치 동작을 할 수 있도록 설계

를 하였다.[2]

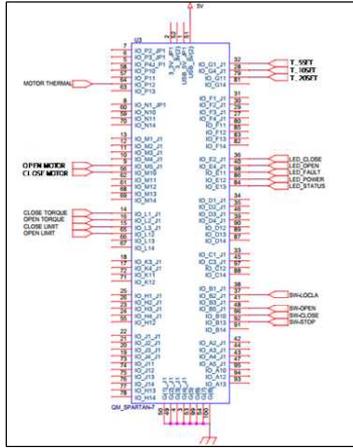


그림 3. 컨트롤러와의 인터페이스
Fig. 3. Interface with controller

구동 시간 설정 밸브 전동 액추에이터 제어장치는 기본적으로 그림 4와 같은 제어신호 입력 회로에서 운전 스위치가 LOCAL로 위치할 경우 그림 20의 액추에이터 전면 조작부의 푸시 버튼(OPEN, CLOSE, STOP)을 눌러 HALL 센서를 통해 입력을 인식하며 액추에이터 동작을 위한 입력 신호는 외부에서 발생하는 전기적인 노이즈로부터 내부 회로 보호 및 오동작을 방지하기 위하여 그림 4와 같이 HALL 센서를 사용함으로 내/외부 회로가 전기적으로 완전히 절연되도록 하였다.

액추에이터의 현재 상태를 표시하기 위한 5개의 LED는 각 상태에 따라 점멸하거나 점등되어 있으며 OPEN, CLOSE, FAULT, STATUS, POWER로 상태에 따른 상세한 과정은 표 1과 같다.

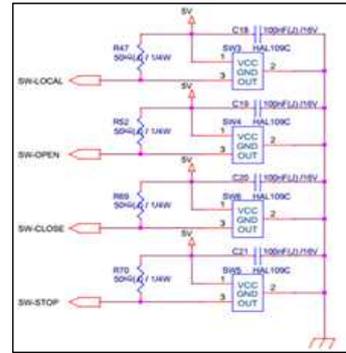


그림 4. 제어신호 입력 회로
Fig. 4. Control signal input circuit

표 1. LED 표시 설명
Table 1. LED indication description

LED	COLOR	BLINK	ON
POWER	WHITE	-	Power supply
INTERMEDIATE	BLUE	-	Intermediate improvement
OPEN	RED	OPENING	Full open
FAULT	YELLOW	Motor thermal (ERROR)	Torque generation
CLOSE	GREEN	CLOSING	Full close

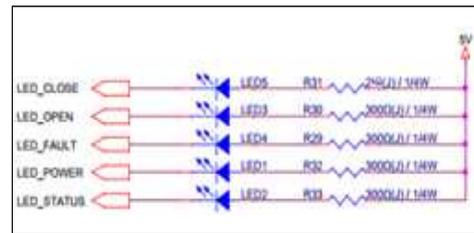


그림 5. LED 표시 회로
Fig. 5. LED indication circuit

각 스위치의 입력신호에 따라 제어 보드는 상태를 분기하여 표 1과 같이 상태를 그림 5의 LED 표시 회로에 출력을 할 수 있도록 하였다.

구동 시간 설정 전동 액추에이터의 상태신호 입력 회로는 열림 리미트 스위치, 닫힘 리미트 스위치, 열림 토크 스위치, 닫힘 토크 스위치, 모터 과열 스위치로 구성되어 있다.

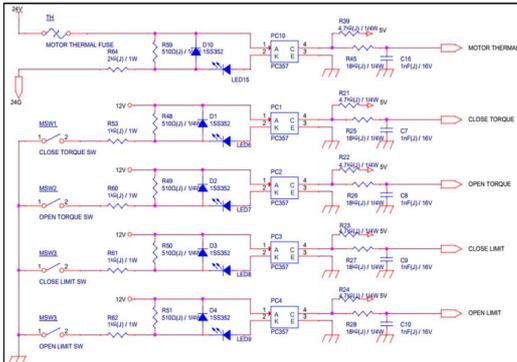


그림 6. 상태신호 입력 회로
Fig. 6. Status signal input circuit

토크 스위치를 사용하여 모터 구동시 밸브 정지 위치를 벗어나게 되면 밸브 회전 축이 레버를 눌러 자동으로 밸브 정지시키도록 하였다. 모터 과열 스위치는 모터 내부에 있는 바이메탈이 접점이 되어있는 경우 정상 동작하고, 바이메탈이 설정 온도인 130도 이상이 되면 접점이 분리되어 안전 사고를 방지할 수 있도록 하였다. 또한 상태 신호 입력회로에서는 그림 6과 같이 액추에이터 주변 센서 및 구동전압 24V와 12V를 FPGA 구동 및 신호 전압을 5V로 공급할 수 있도록 포토커플러를 사용하여 개발하였다.

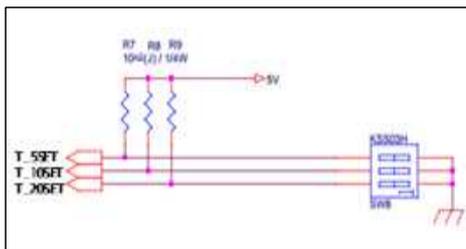


그림 7. 타이머 기능 설정 회로
Fig. 7. Timer function setting circuit

밸브 ON/OFF 시간 설정 회로는 컨트롤러 보드의 그림 7과 같이 DIP 스위치를 사용하여 밸브를 5분, 10분, 20분으로 ON/OFF 할 수 있도록 하였다. 타이머 시간이 설정되어있는 경우 모터를 동작시키는 입력 회로에는 영향을 주지 않아 상시 제어가 가능하고, 타이머 기능설정시 밸브가 열린 상태에 있는 경우 설정 시간이 종료되면 자동으로 밸브 잠금 상태로 모터를 구동할 수 있도록 구현하였다.

2.2 시스템 구현 및 실험 결과

2.2.1 시스템 구현

그림 8은 VHDL로 구현한 입출력 인터페이스이며 버튼을 누르거나 스위치의 입력으로 신호를 받으면 입력 값에 따라 설계된 로직 내부의 'led_flag'와 'motor_flag'가 분기하고 분기된 상태에 따라 LED와 모터로 출력을 내보낸다. 예를 들어 OPEN 버튼인 'local_open'를 눌러 입력이 들어오는 경우 상태가 'opening'이 되어 'led_flag'와 'motor_flag'에 신호를 보내고 각 플래그는 검출된 상태를 인식하여 출력을 내보낸다. 'opening' 명령 상태에서는 적색 LED 'led_open'을 깜빡이도록 하여 밸브가 열리는 중임을 알리고, 청색 LED 'led_status'에 신호를 내보내 안전 상 밸브가 열리고 있는 상태를 알려줄수 있도록 하였고 시뮬레이션 파형은 그림 11과 같다.[3][4][5][6]

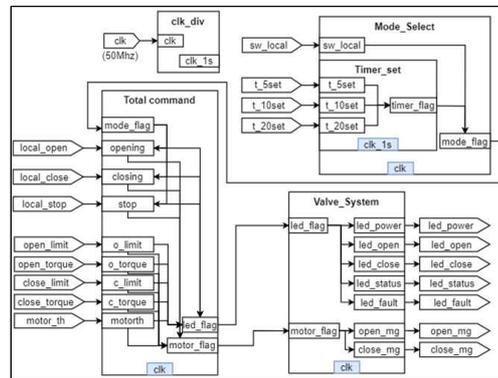


그림 8. 입출력 인터페이스
Fig. 8. Input-Output interface

그림 8의 입출력 인터페이스에서 'clk_div'는 FPGA 개발보드의 50Mhz의 외부 클럭을 분주하여 1Hz, 즉 1초를 만들기 위한 모듈이며 타이머 기능을 정확하게 수행하기 위해 구현되었으며 분주된 'clk_1s'는 타이머 설정에 따라 다운 카운트되어 시간을 측정할 수 있도록 하였다.

밸브 시스템 알고리즘은 그림 9와 같이 현재의 액추에이터 상태를 검출하고 동작 명령을 실행하는 단계에서 초기 상태가 대기 모드로 모든 버튼이 대기 상태에 있으며 조작버튼의 입력 순서에 따라 분기되는 동작은 실시간으로 이루어진다. 예를 들어 밸브가 열리는 동작

수행 중에 정지 명령 신호 입력이 들어오면 안전을 위해 바로 밸브를 정지할 수 있도록 하고 그 반대로 밸브가 닫히는 동작 수행 중에 밸브를 여는 명령 신호 입력이 들어오면 밸브가 다시 열리는 방향으로 동작할 수 있도록 제어신호와 상태신호를 실시간으로 검출하여 사용자가 빠르게 상황 대처할 수 있도록 개발을 진행하였다.

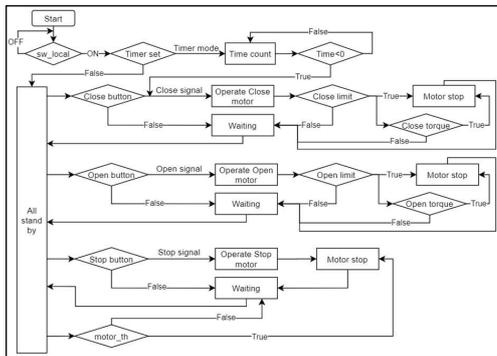


그림 9. 밸브 시스템 알고리즘
Fig. 9. Valve system algorithm

모터 구동을 위한 'open_mg', 'close_mg'를 제외하고 모든 입력과 출력은 'LOW' 신호를 통해 동작하며 이에 따른 파형을 확인하기 위한 시뮬레이션 및 동작 과정은 그림 10,11,12와 같다.



a) 열림 중
a) Opening



b) 완전 열림
b) Full open

그림 10. 열림 LED 상태
Fig. 10. Open LED status

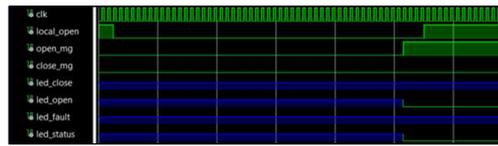


그림 11. 열림 입력
Fig. 11. Open input

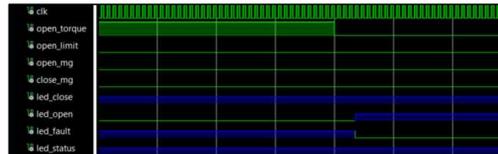


그림 12. 열림 리미트, 토크 스위치 입력
Fig. 12. Open limit, torque switch input

그림 11과 같이 푸시 버튼(OPEN, CLOSE, STOP)은 채터링 방지를 위해 버튼을 누를 때 'clk'이 50회 이상 'HIGH'가 들어오면 명령을 인식하도록 하였다. OPEN 버튼 'local_open' 스위치가 눌러 'LOW'가 입력된 경우 열림 방향으로의 모터 구동을 위한 'open_mg'에 'HIGH'가 출력되어 밸브가 열린다. 밸브가 열리는 중에는 그림 10 a)와 같이 적색 LED 'led_open'이 깜박임과 동시에 청색 LED 'led_status'가 켜지고 밸브가 열림 리미트 스위치 'open_limit'에 위치하여 'LOW'를 입력하면 밸브가 완전히 열리게 된다. 이때 'open_mg'에 'LOW'를 출력하여 모터를 멈추며 그림 10 b)와 같이 청색 LED 'led_status'는 꺼지고 적색 LED 'led_open'만 켜지게 되어 열림 상태가 된다. 만약 모터가 오동작하여 밸브가 열림 방향으로 더 돌게 되면 열림 토크 스위치 'open_torque'에 'LOW' 입력이 들어오고 다시 'open_mg'에 'LOW'를 출력하고 모터를 정지한 후 오류를 알려주는 황색 LED 'led_fault'만 켜지도록 하였다.

정지 상태는 밸브가 열리고/ 닫히는 중 모두에 활용되며 그림 14와 같이 STOP 버튼 'local_stop'에 'LOW'가 입력되면 동작한다.



그림 13. 정지 LED 상태
Fig. 13. Stop LED status

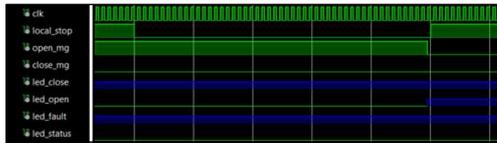


그림 14. 멈춤 입력
Fig. 14. Stop input

모터 구동을 위한 'open_mg'와 'close_mg'에 'LOW'를 출력하여 모터를 정지시키고 그림 13과 같이 청색 LED 'led_status'만을 점등하여 밸브가 중간에 정지하고 있음을 나타내고 그림 14는 밸브가 열리는 중 정지에 있을 경우의 파형이다.



a) 닫힘 중
a) Closing



b) 완전 닫힘
b) Full close

그림 15. 닫힘 LED 상태
Fig. 15. Close LED status

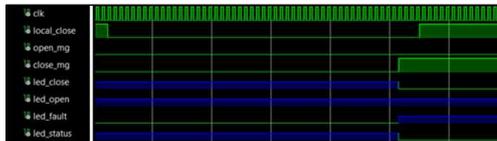


그림 16. 닫힘 입력
Fig. 16. Close input

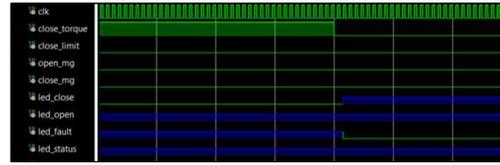


그림 17. 닫힘 리미트, 토크 스위치 입력
Fig. 17. Close limit, torque switch input

그림 16과 같이 CLOSE 버튼을 푸시하여 'local_close' 스위치에 'LOW' 신호가 입력되면 닫힘 방향으로 모터를 구동하기 위해 'close_mg'에 'HIGH'가 출력되며 밸브가 닫히는 동안 그림 15 a)와 같이 녹색 LED 'led_close'가 깜박이고 청색 LED 'led_status'가 켜지게 된다. 그림 17과 같이 밸브 닫힘 리미트 스위치인 'close_limit'에 위치하여 'LOW'가 입력되어 밸브가 완전히 닫히면 'close_mg'에 'LOW'를 출력하여 모터를 멈추고 그림 15 b)와 같이 녹색 LED 'led_close'만을 켜 후 닫힘 상태가 된다. 만약 모터가 더 구동되어 닫힘 토크 스위치 'close_torque'에 'LOW' 입력이 들어오면 다시 모터를 멈추고 그림 18과 같이 황색 LED 'led_fault'만을 켜고 오류를 알려준다.



그림 18. 밸브 오류 LED 상태
Fig. 18. Valve error LED status

그림 19는 모터 과열이 감지되었을 경우의 파형을 보여준다. 모터 과열을 감지하는 'motor_th'에 'LOW' 입력이 되면 모터 구동을 위한 출력인 'open_mg'와 'close_mg' 모두에 'LOW'를 출력하여 모터를 멈추고 황색 LED 'led_fault'를 켜서 그림 18과 같이 문제가 발생했음을 경보하도록 하였다.

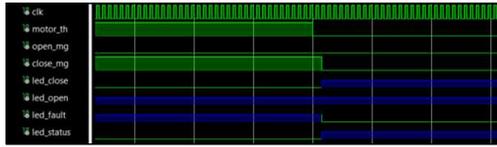
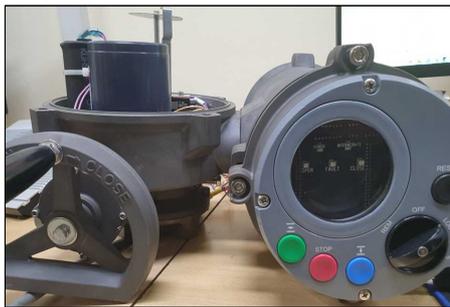


그림 19. 모터 과열 감지 입력
Fig. 19. Motor over temperature detection input



a) 액추에이터 제어보드
a) Actuator control board



b) 액추에이터 외관
b) Actuator appearance

그림 20. 밸브 전동 액추에이터 개발 장치
Fig. 20. Valve electric actuator development device

2.2.2 실험 결과

본 연구에서 개발한 액추에이터는 국내에는 안전 검증기준이 없기 때문에 유럽표준안을 근거로 한 Class A On-Off 타입으로 완전 개방 위치에서 완전 폐쇄 위치로 또는 그 반대로 밸브를 구동해야 한다. 유럽표준안의 정격 토크 범위가 101~700Nm에서 10,000번의 On/Off 동작을 하도록 되어 있다.[7]

그림 21의 밸브 자동 On/Off 테스트를 위한 파형은 구동이 시작되면 밸브가 닫혀있는 상태에서 'open_mg'에 'HIGH'를 출력하여 밸브의 모터를

열림 방향으로 구동한다. 이때 열림 리미트 스위치가 눌러 'open_limit'에 'LOW'가 입력되며 'close_mg'에 'HIGH'를 출력하여 밸브의 모터를 다시 닫힘 방향으로 구동한다. 닫힘 리미트 스위치가 눌러 'close_limit'에 'LOW'가 입력되면 'open_mg'에 'HIGH'를 출력하여 밸브의 모터를 열림 방향으로 다시 구동하여 위의 과정을 반복 수행할 수 있도록 하였다.



그림 21. 밸브 자동 On/Off 파형
Fig. 21. Valve Auto On/Off Waveform

본 연구에서 개발된 액추에이터 정격토크는 200Nm로 유럽표준안에 따라 10,000번에 On/Off 진행을 위해 그림 21과 같이 시뮬레이션 파형을 입력하여 일주일 동안 실험을 진행한 결과 어려 없이 안정적으로 동작함을 검증하였다.

3. 결론

본 논문에서는 댐, 발전소, 상하수도 시설, 송유관 시설 등 다양한 분야에서 사용되는 밸브 전동 액추에이터가 종종 소프트웨어적으로 MCU에서 발생하는 오동작으로 밸브가 파손되는 경우 경제적으로 큰 손실이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Xilinx 사의 Spartan-7을 FPGA를 활용하여 VHDL로 하드웨어적으로 제어 할 수 있도록 밸브 전동 액추에이터 제어 장치를 그림 20과 같이 개발하였으며, 밸브 전동 액추에이터에 ON/OFF 시간 설정이 가능하도록 개발함으로써 기존의 시스템과 달리 안정성을 높일 수 있도록 개발하였다. 향후 과제로는 와이파이 모듈을 통해 서버와 연동하고 사용자가 모바일 상에서 다수의 밸브 전동 액추에이터 제어 및 실시간 모니터링 제어 시스템을 개발하고자 한다.

REFERENCES

[1] XILINX : "7 Series FPGAs Data Sheet", Spart

- an-7 FPGA Feature Summary. DS180 (v2.6) February 27, 2018.
- [2] MICRONAS : "HaL1xy Hall-Effect Switch IC Family", April 8, 2009, DSH000150_001EN. First release of the data sheet.
- [3] D. J. Smith, "Hdl chip design, A practical guide for designing, synthesizing and simulating asics and fpgas using vhdl or verilog", Doone publications, pp. 195-213, January, 1996.
- [4] S. H. Park, "VHDL basic and utilization", Gre enpress, pp. 180-193, October, 1998.
- [5] D. I. Han, "VHDL programming bible", Saeng neung, pp. 399-407, August, 2011.
- [6] Y. J. Woo, J. S. Ha, "VHDL design using viva do", Inipro, pp. 98-111, May, 2018.
- [7] EN 15714-2, "Industrial valves - Actuators - Part 2: Electric actuators for industrial valve s", 2011

저자약력

강 대 국 (Dae-Guk Kang)



- 2019. 한국교통대학교 컴퓨터공학과 졸업
- 2020. 한국교통대학교 컴퓨터공학과 대학원 석사 2학기

〈관심분야〉 Embedded System & ASIC Design

최 영 규 (Young-Gyu Choi)



- 1992.5~2020.10 현재 한국교통대학교 컴퓨터공학과 교수

〈관심분야〉 Embedded System & ASIC Design