논문 2025-1-6 http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2025.03.06

디지털 가상 실험용 I2C 슬레이브 모듈 설계 및 구현

기장근*†

Design and Implementation of I2C Slave Module for Digital Virtual Experiments

Jang-Geun Ki*†

요 약

시간, 거리, 위치 등의 제약사항이 없는 온라인 학습이 공학교육에 적용되어 소기의 교육성과를 달성하기 위해서는 무엇보다도 오프라인 학습환경에서의 실험 실습을 대체할 수 있는 온라인 가상 실험 소프트웨어의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 전자공학 분야의 필수 과목인 디지털 회로 설계, 마이크로프로세서 응용 등의 교과목에서 사용 가능한 디지털 가상 실험 소프트웨어 개발 연구의 일환으로, 마이크로프로세서간 또는 주변 디바이스와의 I2C 통신 기능을 제공하는 슬레이브 모듈을 개발하고, 시뮬레이션을 통한 기능 검증을 수행하였다. 개발된 I2C 슬레이브 모듈은 대부분의 기존 디지털 회로 시뮬레이션 소프트웨어들과는 달리 객체 지향형 이벤트 전달 구동 방식에 의해 디바이스들 간에 데이터를 전달하도록 구현되었다. 개발된 모듈은 wired-OR 방식으로 연결된 마이크로컨트롤러들 사이에 I2C 프로토콜을 이용해 데이터를 송수신하도록 회로를 구성하고 실험함으로써 정상적으로 동작함을 확인하였다. 본 논문에서 개발된 I2C 슬레이브 모듈은 기존 디지털 가상 실험 소프트웨어의 통신 기능을 확장 시킴으로써 앞으로 실질적인 디지털 회로 시뮬레이터로서의 활용도가 크게 높아질 것으로 기대된다.

Abstract

In order for online learning without restrictions such as time, distance, and location to be applied to engineering education and to achieve the desired educational goals, it is essential to develop online virtual experimental software that can replace experimental practice in offline learning environments above all else. In this paper, as part of a study on the development of digital virtual experimental software that can be used in subjects such as digital circuit design and microprocessor application, which are essential subjects in the field of electronic engineering, a slave module that provides I2C communication function between microprocessors or peripheral devices was developed and functional verification was performed through simulation. Unlike most existing digital circuit simulation software, the developed I2C slave module is implemented to transfer data between devices by an object-oriented event-driven method. It was confirmed that the developed module operates normally by configuring and experimenting with circuits to transmit and receive data using the I2C protocol between microcontrollers connected by a wired-OR method. The I2C slave module developed in this paper is expected to greatly increase its utilization as a practical digital circuit simulator in the future by expanding the communication function of the existing digital virtual experiment software.

한글키워드 : 디지털 가상 실험, 공학교육, I2C 통신, wired-OR 결선, 마이크로컨트롤러 모델링

keywords : digital virtual experiment, engineering education, I2C communication, wired-OR connection, micor-controller modeling

* 공주대학교 전기전자제어공학부
† 교신저자: 기장근(email: kjg@kongju.ac.kr)

접수일자: 2025.02.15. 심사완료: 2025.03.10.
게재확정: 2025.03.20.

www.kci.go.kr

1. 서 론

최근 대학 등의 고등 교육에 영향을 미치는 기술 동향을 살펴보면 학습에 인공지능을 도입하고, 인터넷을 통한 온라인 교육 및 학습이 활성화 되고 있으며, 가상현실/증강현실 등의 기술이 교육에 활발히 활용되고 있는 추세이다[1]. 이중 온라인 교육 및 학습은 인터넷을 통해 이루어지는 학습의 한 형태로서[2], 시간이나 거리, 위치 등의 제약에 상관없이 학생들에게 학습 기회를 부여해 줄 수 있다. 특히 최근의 학생들은 어렸을 때부터 디지털 기술을 활용한 지식 습득에 익숙해져 있으며, 2000년 전후로 태어난 소위 Z세대 학생들은 스마트폰을 비롯한 IT 기술과 SNS를 활용하는 인터넷 문화에 매우 익숙하고 인터넷 플랫폼을 자유롭게 사용한다. 이러한 디지털 세대 학생들이 고등 교육에 진입하는 시점에 우리 일상생활에 커다란 영향을 미쳤던 COVID-19 팬데믹 사건은 온라인 교육 및 학습의 폭발적인 수요 확대를 야기하였다. COVID-19의 영향이 미미해진 현시점에서도 온라인 학습에 대한 관심과 수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 온라인 학습의 장점과 기존 대면 형태 오프라인 학습의 장점을 합친 하이브리드 교육 형태로 발전해 나가고 있다[3-6]. 이러한 하이브리드 교육이 공학 분야 교육에서도 성공적으로 학습 목표를 달성할 수 있으려면 오프라인 학습환경에서의 실험 실습을 대체할 수 있는 온라인 가상 실험 소프트웨어의 개발이 선행되어야 한다.

본 논문에서는 전자공학 분야에서 필수적으로 학습되어야 할 디지털 회로 설계 및 마이크로프로세서 응용 등의 교과목들에서 사용 가능한 디지털 가상 실험 소프트웨어 개발 연구의 일환으로 선행 연구되었던 디지털 3-상태 모델링 기법을 적용하여, 마이크로프로세서와 주변 디바이스간 I2C 통신 기능을 제공하는 슬레이브 모듈을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 모듈의 기능을 검증하였다.

본 논문의 구성을 살펴보면, 먼저 1장 서론에 이어 2장에서 I2C 통신 프로토콜 기능 모듈 설계에 관해 기술한다. 3장에서는 설계된 I2C 슬레이브 기능 모듈의 구현 및 시뮬레이션을 통한 검증을 수행하고, 4장에서 결론 및 기대효과와 앞으로의 추가 연구 방향에 대해 기술한다.

II. I2C 슬레이브 모듈 설계

2.1 오픈 컬렉터형 출력과 3-상태 모델링

마이크로프로세서와 주변장치들간에 정보를 주고 받기 위해 많이 사용되는 프로토콜에는 RS-232를 비롯해 SPI, I2C 등이 있다. 본 연구의 선행 연구로 가상 실험 소프트웨어를 위한 RS-232와 SPI 통신 모듈 등을 개발[7]한 바 있으며, 본 연구에서는 wired-OR 연결을 지원하는 I2C 통신 슬레이브 모듈을 개발하고자 한다. 본 논문에서 개발하는 I2C 통신 슬레이브 모듈은 기존 대부분의 디지털 회로 시뮬레이션 소프트웨어들[8-10]과는 달리 객체 지향형 이벤트 전달 방식에 의해 디바이스들간에 데이터를 전달하도록 구현되었다.

I2C(Inter-Integrated Circuit) 프로토콜[11]에서 사용되는 SCL 클럭 선과 SDA 데이터 선은 풀업저항을 사용해 연결해야 되는 오픈 컬렉터형 출력단자에 연결되어야 한다.

본 연구에서는 선행 연구로 수행된 참고문헌[12]에서 제시된 3-상태[13] 모델링 기법을 적용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 오픈 컬렉터형 출력단자에 연결된 입력단자에서 입력값을 계산하는 알고리즘은 표 1에 나타낸 것과 같이 동작한다.

www.kci.go.kr

표 1. 오픈 컬렉터형 출력단자에 연결된 입력단자의 입력값 계산 알고리즘
Table 1. Algorithm for Calculating Input Values of Input Terminals Connected to Open Collector-Type Output Terminals

inval = 2;
for each outpin
  if (inval==0)
  if (outpin==1)
  ERR occured;
  else if (inval==1)
  if (output==0)
  ERR occured;
  else if (inval==2)
  inval = outpin;
	inval outpin -> inval
	0 - 0 -> 0
	0 - 1 -> ERR(noise)
	0 - 2 -> 0
	1 - 0 -> ERR(noise)
	1 - 1 -> 1
	1 - 2 -> 1
	2 - 0 -> 0
	2 - 1 -> 1
	2 - 2 -> 2

2.2 I2C 통신 프로토콜 동작

I2C(Inter-Integrated Circuit)는 SCL 직렬 클럭 선과 SDA 직렬 데이터 선의 2개 선을 사용하는 직렬 통신 프로토콜이며, SCL/SDA 버스 선상에 복수 개의 컨트롤러(통신의 마스터 역할)와 복수 개의 타겟 디바이스(통신의 슬레이브 역할)가 연결 될 수 있다. 각 컨트롤러는 버스상에 연결되어 있는 각각이 고유한 주소를 갖는 여러 타겟 디바이스들과 바이트 단위의 패킷을 주고 받을 수 있다. 이러한 I2C 통신 프로토콜은 1982년에 Phillips 반도체 회사에 의해 제안되었으며, SDA와 SCL의 단지 2개 선만을 이용해 여러 디바이스들과 통신 할 수 있는 단순 구조로 인해 여러 응용에서 널리 사용되고 있다.

I2C 프로토콜에서 사용되는 SCL 클럭 선은 주로 컨트롤러 디바이스에 의해 제어되며, 이 클럭 신호에 동기되어 타겟 디바이스와의 데이터가 SDA 데이터 선을 통해 송수신된다. I2C 프로토콜은 반이중(half-duplex) 전송방식으로 동작한다. 즉, 컨트롤러 디바이스가 통신을 시작하고 중단하는 기능을 가지고 있으며 SDA 버스선으로 원하는 타겟 디바이스 주소를 송신함으로써 특정 타켓 디바이스와 데이터를 주고 받을 수 있는데, 어느 특정 순간에는 컨트롤러 또는 하나의 타겟 디바이스 만이 SDA 데이터 버스에 값을 실어 송신할 수 있다. SCL과 SDA 선상에 연결되는 모든 디바이스들은 오픈 컬렉터형 단자를 이용해 접속되며, 따라서 공통전압 공급을 위한 풀업저항이 버스선에 연결되어야 한다.

I2C 통신은 컨트롤러 디바이스의 START 조건에 의해 시작되고, STOP 조건에 의해 종료된다. START 조건은 SDA 선을 low로 설정한 후 이어서 SCL 선을 low로 설정 함으로써 만들어진다. 컨트롤러가 통신을 완료한 후에는 SCL 버스선과의 연결을 끊어 high 상태로 만들고 다음에 SDA도 high로 만들어 STOP 조건을 만들어준다. START 조건과 STOP 조건 사이에 데이터 비트들이 송수신되는 타이밍을 살펴보면 그림 1에 나타낸 것과 같이 SCL 선상의 클럭신호 상승 모서리와 하강 모서리 사이에서 SDA 데이터 값이 변하지 않아야 하며, 만일 변하게 되면 START/STOP 조건으로 오인되어 오류가 발생하게 된다. 따라서 SDA 선상의 데이터 비트값은 SCL 클럭 상승 모서리 이전에 값이 설정되어야 하고, SCL 클럭 하강 모서리 이후에 값이 해제되어야 한다.

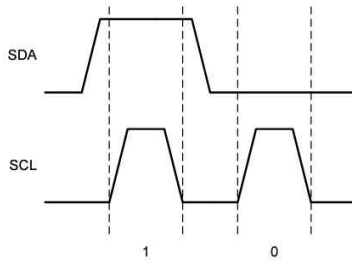

그림 1. START, STOP 조건 사이의 데이터 비트 송수신 타이밍
Fig. 1. Data bit timing between START and STOP condition

컨트롤러는 START 조건 다음에 타겟 디바이스의 주소 프레임을 송신하고 다음에 데이터 프레임 교환이 이루어지며, 각 프레임의 끝에는 프

www.kci.go.kr

레임 수신에 대한 ACK 응답 비트가 보내진다.

기본적인 주소 프레임은 7비트의 주소값(0000xxx와 1111xxx 번지 대역은 예약된 주소 영역으로 타겟 디바이스 주소로 사용할 수 없음)과 R/W 1비트로 구성되는데, R/W=1은 컨트롤러가 타겟 디바이스로부터 데이터를 수신하길 원한다는 뜻이 되고, R/W=0은 컨트롤러가 타겟으로 데이터를 송신하겠다는 뜻이 된다. 주소 프레임 8비트 이후에 9번째 비트 ACK는 active-low 신호로, 타겟이 컨트롤러에게 주소를 잘 수신했다는 응답 비트 값으로 타겟이 SDA=0 으로 설정해준다.

주소 프레임 송신 후에는 데이터 프레임들이 바이트 단위로 보내지는데, 각 데이터 바이트 뒤에는 1비트의 ACK 비트가 보내진다.

통신의 종료는 컨트롤러의 STOP 조건(SCL이 high로 해제된 후, SDA가 high로 해제됨)에 따라 이루어진다.

2.3 I2C 슬레이브 모듈 모델링

본 논문에서 설계된 I2C 슬레이브 모듈의 동작 타이밍도는 그림 2와 같다. I2C 모듈이 슬레이브 모드로 동작하기 위해서는 SCL과 SDA 핀을 입력으로 동작하도록 설정해 주어야 하며, 슬레이브가 데이터를 송신해야 할 경우 SDA 핀의 입력 설정 여부에 상관없이 데이터를 내보낼 수 있다.

슬레이브는 마스터가 보낸 주소가 자신의 주소와 일치하거나, 주소 일치 후 데이터를 수신하면 하드웨어적으로 ACK(active-low 신호임) 펄스를 생성해 자동으로 응답 해주고, SSPSR 자리 이동 레지스터의 내용을 SSPBUF 버퍼 레지스터로 옮겨준다. 만일 바이트 수신 시 SSPSTAT 상태 레지스터의 BF(Buffer Full) 비트가 1 이거나 SSPCON 제어 레지스터의 SSPOV 오버플로우 비트가 1 인 경우에는 ACK가 생성되지 않으며, SSPSR 레지스터 내용 또한 SSPBUF 레지스터로 옮겨지지 않는다. 그러나 PIR1 레지스터의 SSPIF 인터럽트 플래그 비트는 바이트 수신시 BF나 SSPOV 여부에 상관없이 1로 세트된다. BF 플래그 비트는 SSPBUF 레지스터를 읽으면 하드웨어적으로 클리어되나, SSPOV 비트는 소프트웨어적으로 지워야 한다.

I2C 슬레이브 모듈이 인에이블 되면 start 조건(SCL=1인 상태에서 SDA가 1에서 0으로 천이)을 기다린다. start 조건이 감지되면 SCL 클럭의 상승 모서리 시점마다 SDA 값을 샘플링해서 SSPSR 레지스터에 저장하게 된다. 따라서 8번째

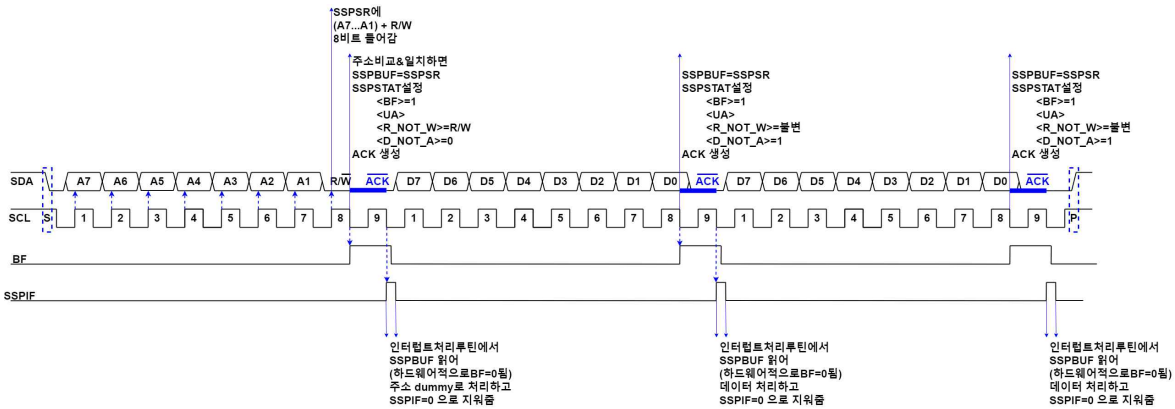

그림 2. I2C 동작 타이밍도
Fig. 2. Timing diagram for I2C operatoin

www.kci.go.kr

클럭 상승 모서리 시점에 7개의 주소비트와 1개의 r/w 비트값이 SSPSR 레지스터에 들어있게 되며, 8번째 클럭 하강 모서리 시점에 SSPSR<7:1> 주소값과 SSPADD 레지스터를 비교하여 주소가 일치하면 SSPSR 내용을 SSPBUF 레지스터로 옮기고, BF=1로 설정하고, ACK 펄스를 발생시킨다. 9번째 SCL 클럭 하강 모서리에서 SSPIF 인터럽트 플래그 비트를 1로 세트 한다.

3. 실험 및 기능 검증

본 장에서는 앞 장에서 설계한 I2C 모델링에 따라 구현한 I2C 슬레이브 모듈의 기능 검증을 위한 실험에 관해 기술한다.

그림 3에 I2C 슬레이브 모듈의 기능 검증을 위한 예제 회로를 나타내었다. 회로에서 좌측의 마이크로컨트롤러는 I2C 통신의 마스터 역할을 수

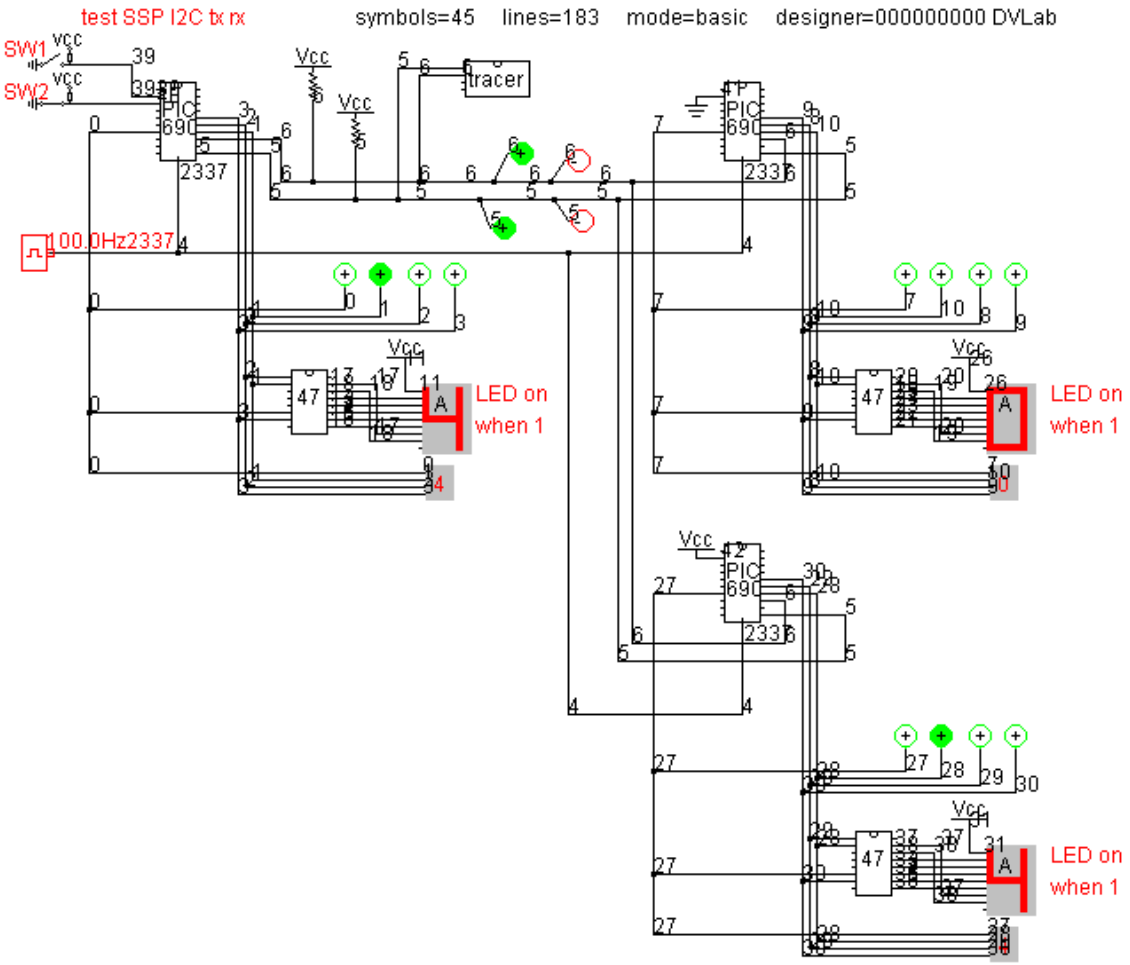

그림 3. I2C 모듈 기능 검증을 위한 예제 회로도
Fig. 3. Example circuit diagram for I2C module functional verification

www.kci.go.kr

행하고, 우측의 2개 마이크로컨트롤러는 슬레이브 역할을 수행한다. 각 컨트롤러에는 7447 디코더를 통해 7세그먼트들이 연결되어 있는데, 마스터가 슬레이브에 쓰기 모드로 동작하는 경우에 마스터는 송신하는 값을 7세그먼트에 표시하고 슬레이브들은 수신하는 값을 7세그먼트에 표시하도록 프로그램이 구성되어 있다. 그림 4와 그림 5에는 마스터와 슬레이브에서 실행되는 프로그램 코드를 흐름도로 나타내었으며, 마스터 프로그램은 bit-banging 형태의 프로그램으로 작성되었다.

그림 3의 회로에서 좌측 상단 마스터 마이크로컨트롤러는 풀업저항 구조를 갖는 2개의 스위치에 연결되어 있는데, 위쪽 스위치 SW1은 우측의 슬레이브 마이크로컨트롤러 2개 중 어느 슬레이브와 통신할지를 선택하기 위해 사용하고, 아래쪽 스위치 SW2는 선택된 슬레이브로 데이터를 송신할지 아니면 슬레이브로부터 데이터를 수신할지를 선택하기 위해 사용한다.

그림 3에서 스위치 SW1은 열려있는 상태로 풀업저항에 의해 Vcc 값이 마스터 컨트롤러에 입력되어 우측 슬레이브 2개 중 아래쪽 슬레이브와 통신한다. 스위치 SW2는 닫혀있는 상태로 접지가 마스터에 인가되게 되어 마스터는 슬레이브에 쓰기 동작을 수행한다. 따라서 그림 3의 상태에서 보면 마스터가 보낸 데이터 값 4를 우측 하단의 슬레이브가 수신하고 있음을 7세그먼트 값을 통해 확인해 볼 수 있다. 실제로 회로가 구동중에 스위치 SW1과 SW2를 실시간으로 조작하여 마스터가 지정된 해당 슬레이브와 쓰기 또는 읽기 동작을 정상적으로 수행함을 시뮬레이션을 통해 확인함으로써 본 논문에서 구현된 I2C 슬레이브 모듈의 기능을 검증하였다.

따라서 본 논문에서 개발된 I2C 모듈을 포함하고 있는 마이크로컨트롤러와 I2C 통신을 지원하는 다양한 센서들을 연결한 회로를 구성하면 마이크로컨트롤러 응용회로 설계 및 실험실습을 가상실험을 통해 효율적으로 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

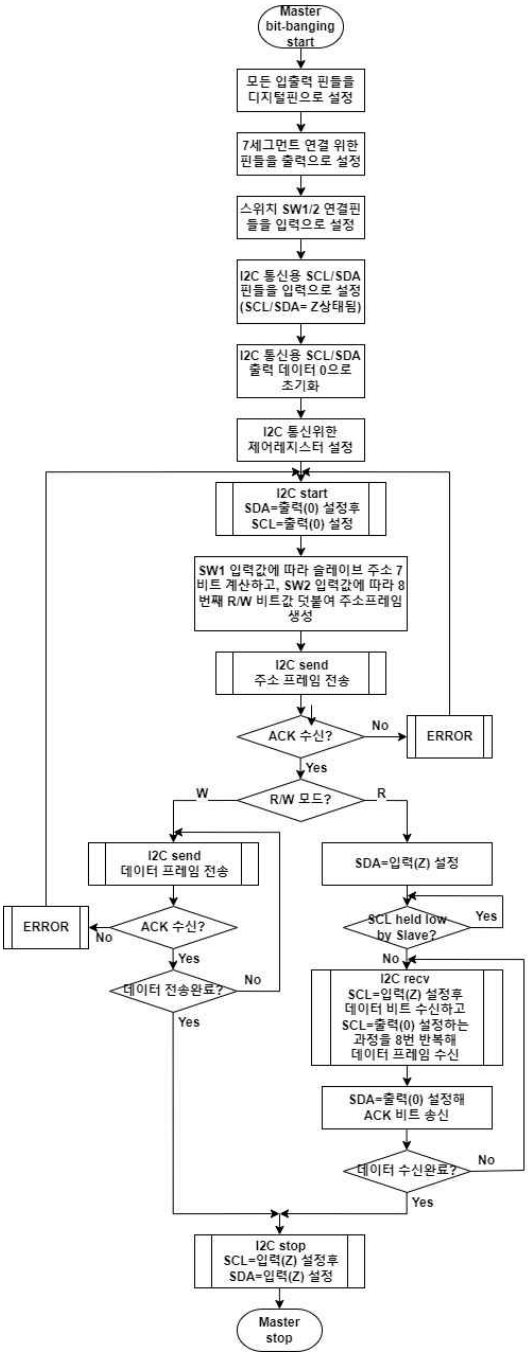

그림 4. 마스터 프로그램 흐름도
Fig. 4. Master program flowchart

www.kci.go.kr

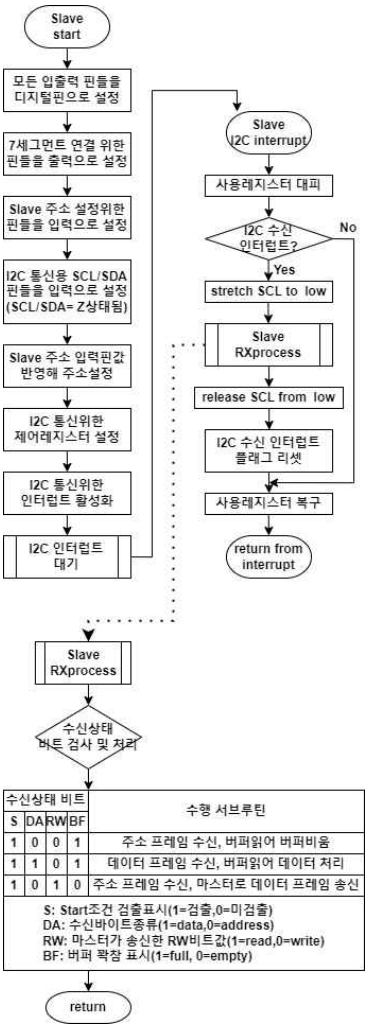

그림 5. 슬레이브 프로그램 흐름도
Fig. 5. Slave program flowchart

4. 결 론

최근 시간, 거리, 위치 등의 제약사항 없이 인터넷을 이용해 활발히 이루어지고 있는 온라인 학습이 공학교육에 적용되어 소기의 교육성과를 달성하기 위해서는 무엇보다도 오프라인 학습환경에서의 실험 실습을 대체할 수 있는 온라인 가상 실험 소프트웨어의 개발이 반드시 선행되어야 한다.

본 논문에서는 전자공학 분야에서 필수적으로 학습되어야 할 디지털 회로 설계 및 마이크로프로세서 응용 등의 교과목들에서 사용 가능한 디지털 가상 실험 소프트웨어 개발 연구의 일환으로 마이크로프로세서와 주변 디바이스간 I2C 통신 기능을 제공하는 슬레이브 모듈을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 모듈의 기능을 검증하였다. 개발된 I2C 슬레이브 모듈은 대부분의 기존 디지털 회로 시뮬레이션 소프트웨어들과는 달리 객체지향형 이벤트 전달 구동 방식에 의해 디바이스들 간에 데이터를 전달하도록 구현되었다. 개발된 모듈은 wired-OR 방식으로 연결된 마이크로컨트롤러간에 I2C 프로토콜을 이용해 데이터를 송수신하도록 회로를 구성하고 실험함으로써 정상적으로 동작함을 확인하였다.

본 논문에서 개발된 오픈 컬렉터 단자 지원 I2C 슬레이브 모듈은 선행 연구로 개발된 RS-232 모듈, SPI 모듈 등과 함께 기존 디지털 가상 실험 소프트웨어의 통신 기능을 크게 확장시킴으로써 주변 장치들과 다양한 프로토콜을 사용해 데이터 송수신이 가능한 실질적인 디지털 회로 시뮬레이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Sylvie Beatrice, The Future of Higher Education: Trends and Innovations, Research Output Journal of Education, 3(3), pp.41-44, Aug. 2024, https://www.researchgate.net/publication/383553486_The_Future_of_Higher_Education_Trends_and_Innovations

[2] Mabel C.P.O. Okojie, Tinukwa C. Boulder, Handbook of Research on Adult Learning in Higher Education, p.344, Information

www.kci.go.kr

Science Reference/IGI Global, ISBN : 9781799813064
[3] Imed Bouchrika, “11 Top Trends in Higher Education: 2024 Data, Insights & Predictions”, Dec. 10, 2024, https://research.com/education/trends-in-higher-education
[4] Rania Salama, Tina Hinton, “Online higher education: current landscape and future trends”, Journal of Further and Higher Education, Vol. 47, Issue 7, 2023, DOI: https://doi.org/10.1080/0309877X.2023.2200136
[5] Ma, S., “Online Learning Issues, Challenges, and Trends in Higher Education: An Instructional Design Perspective Beyond Pandemic”, Journal of Applied Instructional Design, DOI: https://doi.org/10.59668/1269.15701
[6] Imed Bouchrika, “10 Online Education Trends: 2024 Predictions, Reports & Data”, Dec. 10, 2024, https://research.com/education/online-education-trends
[7] Jang Geun Ki, “Implementation of SPI Serial Communication Module for Virtual Experiments”, Journal of Software Assessment and Valuation, 20(2), pp.47-52, June. 2024, ISSN 2092-8114, DOI : http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2024.06.06
[8] Microchip, MPLAB X IDE, 2024, https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/mplab-x-ide
[9] Proteus Virtual System Modeling(VSM) Circuit Simulation Software, 2024, https://www.labcenter.com/simulation/
[10] Intel, Quartus Prime Design Software, 2024, https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/development-tools/quartus-prime.html
[11] Texas Instruments, A Basic Guide to I2C, 2024, https://www.ti.com/lit/pdf/sbaa565
[12] Jang Geun Ki, “Tri-state Logic Device Modeling for an Event-Driven Simulator”, Journal of Software Assessment and Valuation, 20(4), pp,155-161, Dec. 2024, ISSN 2092-8114, DOI : http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2024.12.16
[13] Anil K. Maini, Digital Electronics : Principles, Devices and Applications, John Wiley & Sons, Ltd., 2007, ISBN: 978-0-470-03214-5, https://rpitst.com/img/ebook/1711078110_8540dacff1b77dd19399.pdf

저 자 소 개

기장근(Jang-Geun Ki)

1986.2 고려대학교 전자공학과 졸업
1988.2 고려대학교 전자공학과 석사
1992.2 고려대학교 전자공학과 박사
2002.6-2003.6, 2010.6-2011.8, 2016.8-2017.8 Univ. of Arizona 방문교수
1992.3-현재 : 공주대학교 공과대학 전기전자제어공학부 교수
<주관심분야>통신프로토콜,이동통신시스템

www.kci.go.kr