

# Cortex-M 계열 프로세서를 이용한 가시광 통신의 VPPM 구현

## Implementation of Variable Pulse Position Modulation Using a Cortex-M Processor for Visible Light Communication

김 준 영, 김 지 수, 박 상 흥, 이 원 창\*  
(Jun-Young Kim<sup>1</sup>, Ji-Su Kim<sup>1</sup>, Sang-Hong Park<sup>1</sup>, and Won-Chang Lee<sup>1\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Pukyong National University

**Abstract:** Visible light communication (VLC) is a short range optical communication technology using light emitting diodes. In this paper, we implement variable pulse position modulation (VPPM) defined in the IEEE 802.15.7 standard with a Cortex-M processor, which is a new modulation scheme for VLC providing a dimming control mechanism for flicker-free optical communication. The synchronization procedure between the transmitter and receiver is not defined clearly in the VPPM standard. In order to synchronize the transmitter and receiver easily, two overhead bits are used including one start bit and one stop bit modulated by on-off keying (OOK). Experimental results under various environmental conditions show that the proposed VPPM can support a seamless 100 Kbps data rate with 10 levels in the dimming control.

**Keywords:** visible light communication, variable pulse position modulation, Cortex-M, dimming control, on-off keying

### I. 서론

광원으로서는 LED는 기존의 조명인 백열, 형광등보다 수명이 길며 높은 에너지 효율과 다양한 색 구현이 가능하다는 장점이 있다. 이는 최근 세계적 추세인 친환경, 에너지 절감과 부합하여 기존 조명을 대체하는 차세대 조명으로 주목받고 있다[1]. LED는 광원으로서의 장점뿐만 아니라 디지털 제어가 용이하고, 수 ns에 이르는 빠른 스위칭 속도를 갖는 장점이 있으며, 이를 이용하여 LED에 통신 기능을 부가한 가시광 통신이 LED 융합 IT 기술로 주목받고 있다[2-6].

가시광 통신은 380nm ~ 780nm의 가시광 영역 파장을 이용한 단거리 무선 통신기술로서 가시광 영역의 빛은 사람의 눈으로 인지할 수 없는 속도로 빠르게 깜빡인다. 가시광 통신은 6GHz 이하의 전통적인 RF (Radio Frequency) 통신과 비교하여 주파수 할당의 문제가 없어 호환성이 좋고, 늘어나는 LED 조명 인프라를 이용할 수 있는 이점이 있다. 또한, 벽을 통과하지 못하고 가시적인 영역의 링크 내에서 통신이 가능하다는 점은 높은 보안성을 제공한다.

이와 같은 LED 가시광 통신의 통신 기능과 더불어 조명의 기능을 훼손하지 않기 위해서는 광원의 최대 밝기를 낼 수 있어야 하며, 광원의 밝기를 조절하여도 통신 성능에 영향을 주지 않아야 한다. 그리고 광원의 깜빡임이 느껴지지

않아야 한다[7]. 이러한 기능들을 수용하고 조광 제어와 통신을 동시에 지원하기 위하여 제안된 가시광 통신 표준이 VPPM으로서 조광 제어를 위해서는 PWM을 사용하고 데이터 전송을 위해서는 2-PPM을 사용하는 복합적인 통신 알고리즘이며[8], 이에 대한 표준은 IEEE 802.15.7에 정의되어 있다[9,10].

본 논문에서는 조명으로서의 요구사항을 충족하는 가시광 통신 변조 방법인 VPPM의 송수신 모듈을 32-bit 마이크로컨트롤러인 Cortex-M 계열 프로세서에서 구현한 내용과 그 성능을 테스트한 결과를 제시하였다.

### II. 조광 제어가 가능한 가시광 통신 모듈

#### 1. 시스템 구성

가시광 통신 모듈은 송신부와 수신부로 구성되고, 각각의 모듈은 그림 1과 같은 블록으로 이루어져 있다.

송신 모듈의 하드웨어는 MCU(STM32F407VGT, ST Microelectronics 社), LED 드라이버(FDS9435A, Fairchild Semiconductor 社), LED(XM-L2, Cree 社)로 구성된다. MCU

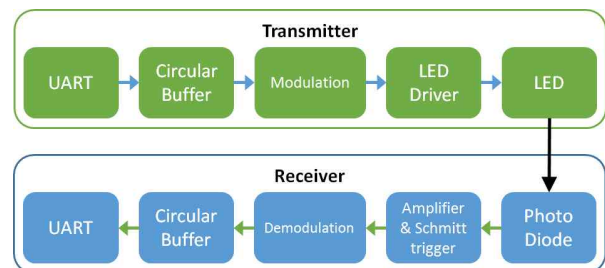


그림 1. 시스템 블록도.

Fig. 1. Systems block diagram.

\* Corresponding Author

Manuscript received October 16, 2014 / revised October 31, 2014 / accepted November 1, 2014

김준영, 김지수, 박상흥, 이원창. 부경대학교 전자공학과  
(junyoung8934@nate.com/jisu891114@hotmail.com/radar@pknu.ac.kr/wlee@pknu.ac.kr)

※ 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

는 Cortex-M4 아키텍처로 168MHz의 클럭으로 동작하고, LED는 단일 광원으로 최대 전력 10 W, 최대 광속 1052 lm의 사양을 가진다. 송신 모듈을 통해 전송할 데이터는 MCU의 UART를 통해 입력받고 원형 버퍼에 담긴다. 버퍼에 담겨있는 데이터는 순차적으로 MCU의 변조부를 거쳐 조광 제어가 가능한 신호로 변조되고 LED 드라이버로 출력된다. LED 드라이버는 P채널 MOSFET으로 MCU로부터 출력된 신호에 맞게 LED를 스위칭 한다.

수신 모듈의 하드웨어는 MCU, PD (Photo Diode), 증폭기 (OPA380, Texas Instruments 社), 슈미트 트리거(SN74LS14, Texas Instruments 社)로 구성된다. 수신 모듈의 MCU는 송신 모듈과 동일하고, PD(OSD-15E, Centronic 社)는 가시광 스펙트럼의 550nm 파장에 가장 민감하게 반응한다. 수신 모듈의 PD로부터 감지된 신호는 증폭기의 전류-전압 변환 회로를 거쳐 TTL 레벨의 전압으로 변환, 증폭하고 슈미트 트리거를 거쳐 파형을 다듬는다. 가공된 신호는 MCU의 복조부를 거쳐 유효 데이터로 복구하고 원형 버퍼에 담긴다. 버퍼에 담겨있는 데이터는 순차적으로 MCU의 UART를 통해 출력한다.

## 2. 송신 신호의 생성

송신 모듈로 입력된 데이터는 MCU의 변조부에서 LED의 조명역할을 충족할 수 있는 신호로 변조된다. 신호는 LED의 조광 제어뿐 아니라 송신할 연속된 데이터의 패턴에 따른 LED의 깜빡임 현상이 발생하지 않도록 변조되어야 하며, 이를 위한 변조 방법이 IEEE 802.15.7에 VPPM으로 정의되어 있다.

그림 2에 PPM (Pulse Position Modulation), PWM (Pulse Width Modulation), VPPM 형태의 신호가 나타나 있다. PPM은 시간축 상에서 펄스의 위치를 입력 신호에 따라 변화시키는 변조 방식이다. 2-PPM은 1개의 메시지 bit 주기  $T_s$ 에서  $T_s/2$  너비의 펄스 위치가 입력 값에 따라 가변적이다. 이는 광원의 깜빡임 제거에 효과적이다. PWM은  $T_s$ 내에서 펄스의 너비를 가변하여 진폭의 평균을 조절할 수 있다.

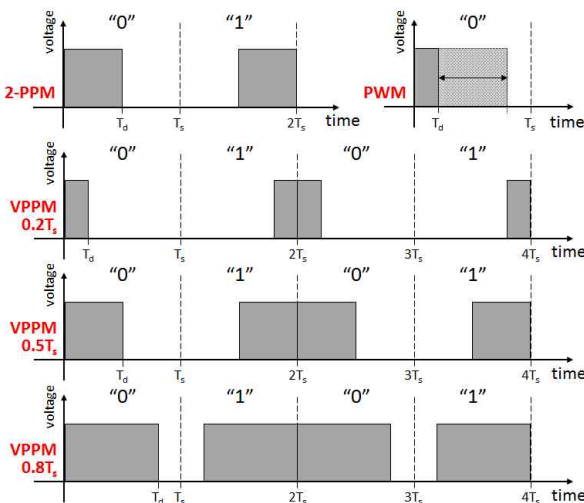


그림 2. 2-PPM, PWM, VPPM의 예.

Fig. 2. Examples of 2-PPM, PWM and VPPM.

VPPM은 2-PPM과 PWM이 복합된 형태로, 입력 신호의 값에 따라  $T_s$ 내에서 2-PPM과 동일하게 펄스가 위치하고, 펄스의 너비는 설정한 디밍 레벨(dimming level)에 맞춰 PWM의 형태로 가변함으로써 광원의 깜빡임 현상을 억제할 수 있으며 조광제어 또한 가능하다. VPPM 신호의 1 bit 주기 내의 펄스 너비  $T_d$ 는 식 (1)과 같다.  $D_r$ 은 디밍 해상도(dimming resolution),  $D_l$ 은 디밍 레벨을 나타낸다.

$$T_d = (T_s / D_r) \times D_l \quad (1)$$

그림 2에 서로 다른 펄스폭을 갖는 VPPM 신호를 예로 들었으며, 각 신호의 펄스폭  $T_d$ 는  $0.2T_s$ ,  $0.5T_s$ ,  $0.8T_s$ 가 되며 디밍 해상도를 10이라 가정했을 때 각각의 디밍 레벨은 2, 5, 8이 된다.  $0.5T_s$  펄스폭의 VPPM 신호는 2-PPM 신호와 동일한 형태이다.

송신 모듈에서 출력하는 프레임의 형태는 그림 3과 같다. 1 byte의 사용자 데이터는 1개의 스타트 비트(start bit)와 1개의 스톱 비트(stop bit)로 프레임을 구성한다. 이때 오버헤드 비트(overhead bit)인 스타트 비트와 스톱 비트는 OOK 변조를 하게 되고, 사용자 데이터는 VPPM을 이용한다. 가시광 통신의 전송률에 의해 결정된 1개의 메시지 비트 주기  $T_s$ 에 대해 스타트 비트는 low 신호 레벨, 스톱 비트는 high 신호 레벨을 가진다. VPPM에서 송수신 간의 동기를 맞추는 방법이 명확히 정의되어 있지 않아 본 논문에서는 오버헤드 비트를 사용하였으며, 이를 OOK 변조함으로써 수신 모듈에서 수신 신호의 동기를 쉽게 맞출 수 있게 되었다.

사용자 데이터의 VPPM에는 디밍 클럭(dimming clock)이 이용된다. 디밍 클럭의 주기는  $T_s/D_r$ 이다. 그림 3에서 디밍 클럭 주기는 디밍 해상도가 10으로 설정되어  $0.1T_s$ 가 된다. 사용자 데이터의 펄스 생성은  $T_s$  내에서 펄스의 시작과 끝이 위치하는 4가지 조건 판단을 통해 이루어진다. 변조할 데이터의 논리 값과 설정된 디밍 레벨에 따라 펄스의 시작점과 끝점은 스타트 에지(start edge), 프론트 에지(front edge), 센터 에지(center edge), 리어 에지(rear edge)중에 놓일 수 있다. 각 에지는 디밍 클럭에 동기가 되어 생성되고 스타트 에지는  $T_s$ 의 시작점, 센터 에지는  $T_s/2$ , 프론트 에지는 스타트 에지와 센터 에지의 사이, 리어 에지는

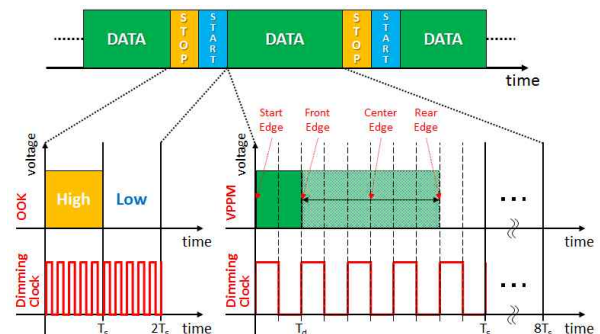


그림 3. 송신 신호의 생성.

Fig. 3. Generation of transmission signal.



그림 4. 수신 신호의 데이터 복구.  
Fig. 4. Recovery of received signal.

센터 에지와 다음 스타트 에지의 사이에 위치한다. 생성된 송신 프레임의 디밍률은 식 (2)와 같으며, 프레임 내의 8개의 VPPM 데이터 비트와 2개의 OOK 오버헤드 비트에 대한 펄스 폭의 평균으로 구할 수 있다.

$$\text{dimming ratio}(\%) = \frac{8(D_t/D_r) + 1}{10} \times 100 \quad (2)$$

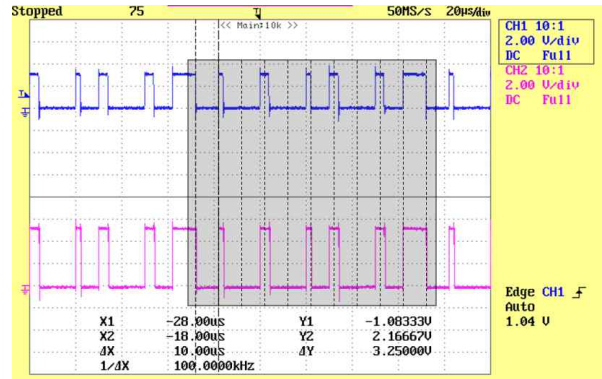
3. 수신 신호의 데이터 복구

수신 모듈에서의 데이터 복구는 그림 4와 같이 샘플링 클럭(sampling clock)과 주기 클럭(period clock)을 이용하여 이루어진다. 그림 4의 ①에서 수신 신호의 프레임 중 스타트 비트는 MCU의 GPIO 핀에 연결된 포토다이오드의 하강 에지 트리거(edge trigger)로 감지한다. 그림 4의 ②에서 하강 에지가 감지되어 인터럽트(interrupt)가 발생하게 되면  $T_s$ 의 주기 클럭과  $T_s$ (샘플링 횟수+1) 주기의 샘플링 클럭을 생성하고 샘플링 클럭에 맞춰 샘플링 한다. 샘플링된 값이 모두 Low 신호 레벨이면 스타트 비트로 판단하고 ①에서 생성한 주기 클럭은 유효하여 지속한다. 그림 4의 ③에서 이후 주기 클럭에 맞춰 각 데이터 비트의 초기 신호 레벨을 읽는다. 그림 4의 ④에서 주기  $T_s$  내에 에지 트리거로 감지된 펄스의 시작 또는 끝 신호 레벨과 ③에서 읽은 값을 비교한다. ③과 ④에서 읽은 값이 서로 다르고 ④에서 읽은 값이 low면 해당 주기의 데이터 값은 '0', high면 '1'이 된다. 그림 4의 ⑤에서 8개의 bit에 대해 ③, ④를 수행한 후 현재 프레임의 1 byte 값을 결정짓는다.

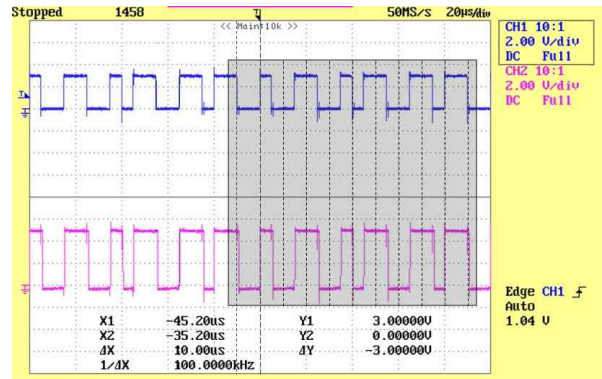
III. 실험 및 결과

구현된 송수신 모듈은 테스트 베드를 구성하여 전송 성능을 실험하였다. 테스트 베드는 2x2x2m(가로x세로x높이) 크기의 공간에 9개의 LED를 일정한 간격으로 배치하였다. 송수신 모듈 사이의 거리는 생활공간의 천장을 가정하여 2m로 한다. 9개의 LED는 한 개의 송신 모듈에 연결되어 있는데 각각 독립적인 원형 버퍼를 가지고 서로 다른 데이터를 전송한다.

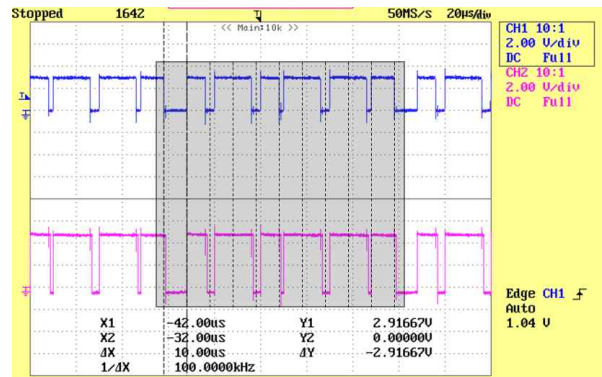
그림 5는 서로 다른 디밍 레벨에 따른 송신 모듈의 LED와 수신 모듈의 PD에서 증폭기를 거친 후 측정된 신호이



(a) Dimming level : 2.



(b) Dimming level : 5.



(c) Dimming level : 8.

그림 5. 디밍 레벨에 따른 실험 결과.

Fig. 5. Experimental results according to dimming level.

다. 각 그림의 상단 신호는 송신 신호이고 하단 신호는 수신 신호이다. 오실로스코프 가로 한 칸의 시간 간격은 20us/div로 1개의 메시지 비트 주기  $T_s$ 는 10us로 측정되고 100kbps의 전송률을 확인할 수 있다. 디밍 해상도를 10, 디밍 레벨을 2, 5, 8로 설정하였을 각 메시지 비트의 펄스폭은 2 us, 5 us 8 us로 측정되었고 오버헤드 비트는  $T_s$ 와 같은 10us로 측정되었다. 송신 모듈에서 전송한 데이터는 01011010<sub>(2)</sub>으로 수신 모듈에서 정상적으로 수신함을 확인할 수 있다.

표 1은 서로 다른 디밍 레벨에 따라 계산된 디밍률과 측정된 LED의 소비 전류와 조도를 나타낸다. 디밍률은 식 (2)에 의해 계산되고 송수신 간의 동기를 위해 사용된 오버헤

표 1. 디밍 레벨에 따른 LED 데이터.

Table 1. Data of LED according to dimming level.

$D_i$	$D_r$	디밍률(%)	소비 전류(A)	조도(lux)
2	10	26	0.24	3100
5	10	50	0.61	6700
8	10	74	1.23	12300

드 비트로 인해 설정된 디밍 레벨과 일치하지 않는다. LED의 소비 전류와 조도는 디밍률에 비례하여 측정됨을 확인할 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 Cortex-M 계열 프로세서를 이용하여 조광 제어가 가능하고 깜빡임을 억제한 가시광 통신 기법인 VPPM의 송수신 모듈을 구현하고 그 성능을 검증하였다. 구현된 송수신 모듈은 최대 100kbps의 데이터 전송률과 10 단계의 조광 제어 기능을 지원하며 주변장치를 이용하여 다른 시스템과의 확장이 가능하다. 그리고 현재 실내위치인식 연구에 관한 연구가 많은 주목을 받고 있으므로 개발된 송수신 모듈을 이동로봇에 적용하여 가시광 통신을 이용한 이동로봇 실내위치인식 시스템 구현할 예정이다.

#### REFERENCES

- [1] N. B. Soni and P. Devendra, "The transition to LED illumination: a case study on energy conservation," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 4, no. 11, pp. 1083-1087, Nov. 2008.
- [2] H. D. Moon, S. S. Lee, J. H. Yoo, S. J. Lee, and S. Y. Jung, "Technical trends of visible light communication systems based on LED," *Journal of Photonic Science and Technology (in Korean)*, vol. 1, no. 1, pp. 10-17, Dec. 2011.
- [3] Y. J. Han and T. H. Park, "Localization of a mobile robot using multiple ceiling lights," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 4, pp. 379-384, Apr. 2013.
- [4] S. I. Hong and C. H. Lin, "An efficient hybrid LED street lighting management system design using stand-alone solar photovoltaic," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 20, no. 9, pp. 984-993, Sep. 2014.
- [5] J. Armstrong, Y. A. Sekercioglu, and A. Neild, "Visible light positioning: a roadmap for international standardization," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 68-73, Dec. 2013.
- [6] A. Sevincer, A. Bhattarai, M. Bilgi, M. Yuksel, and N. Pala, "LIGHTNETS: smart lighting and mobile optical wireless networks - a survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1620-1641, Fourth Quarter, 2013.
- [7] G. John, E. Hany, and D. C. Thomas, "Impact of light-

ing requirements on VLC systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 34-41, Dec. 2013.

- [8] K. Lee and H. Park, "Modulations for visible light communications with dimming control," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 16, pp. 1136-1138, Aug. 2011.
- [9] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, "IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support," *IEEE Communication Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 72-82, Mar. 2012.
- [10] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks -Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light, Sep. 2011.



김 준 영

2014년 부경대학교 전자공학과 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전자공학과 석사과정. 관심분야는 지능제어 시스템, 임베디드 시스템.



김 지 수

2009년~현재 부경대학교 전자공학과 학부과정. 관심분야는 영상처리 시스템, 임베디드 시스템.



박 상 홍

2004년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전자전기공학 석사. 2010년 동 대학원 전자전기공학 박사. 2010년~현재 부경대학교 전자공학과 부교수. 관심분야는 레이더 표적인식, 레이더 영상



이 원 향

1983년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학 석사. 1992년 포항공과대학교 전자전기공학 박사. 1993년~현재 부경대학교 전자공학과 교수. 관심분야는 로봇틱스, 임베디드 시스템.