

## 바이트반전 전송방식을 이용한 플리커 방지 가시광통신시스템

이성호<sup>+</sup>

### Flicker-Free Visible Light Communication System Using Byte-Inverted Transmission

Seong-Ho Lee<sup>+</sup>

#### Abstract

In this paper, we newly developed a byte-inverted transmission method for flicker-free visible light communication (VLC). The VLC transmitter sends original data in the former half period of the clock, and inverted data and in the latter half period of the clock. The VLC receiver receives the original data in the in the former half period of the clock. In this system, we used 480Hz clock that was generated from the 60Hz power line. The average optical power of the LED array in the transmitter is constant, thus flicker-free, in the observation time longer than the period of the clock that is about 2ms. This period is shorter than the maximum flickering time period (MFTP) of 5ms that is generally considered to be safe. This configuration is very useful in constructing indoor wireless sensor networks using LED light because it is flicker-free and does not require additional transmission channel for clock transmission.

**Keywords:** Visible light communication (VLC), byte-inverted transmission, flicker-free, LED light, power line.

#### 1. 서 론

최근에 들어 다양한 구조의 고효율 가시광 발광다이오드 (light emitting diode; LED)가 개발되고 보급되면서 기존의 조명시설을 빠른 속도로 대체해가고 있으며 실내조명, 가로등 조명, 자동차조명, 전광판 조명 등 다양한 조명시설에 그 활용이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. LED는 기존의 형광등이나 백열등에 비하여 전력변환 효율이 높고, 접촉에 의한 기계적 충격에 강하며, 발광단면의 크기가 작아 다양한 구조의 LED 배열을 쉽게 만들 수 있어 사용하기에 매우 편리한 장점을 가지고 있다. 또한 주입전류를 제어하여 조명의 세기를 쉽게 조절할 수 있으며, 기존의 형광등이나 백열등에 비하여 빛의 밝기를 변화시킬 수 있는 변조속도가 현저히 높다. 이러한 장점을 이용하여 한 개의 LED 램프를 조명과 통신에 동시에 사용할 수 있는 가시광통신(visible light communication; VLC) 기술이 꾸준히 발전하고 있다[1-4]. 가시광통신은 일반적으로 동일한 광원을 사용

하여 조명과 무선통신을 결합 수 있도록 고안된 기술로서, 조명광이 도달하는 가시거리의 구간에서 LED와 포토다이오드를 사용하여 쉽게 무선전송 시스템을 구축할 수 있다.

이러한 가시광통신은 조명과 통신을 결합하는 장점이 있지만, 조명과 통신 기능이 서로 다르므로 이들이 서로 영향을 주지 않도록 안정된 시스템을 설계하는 것이 매우 중요하다. 데이터 전송을 위하여 LED를 직접 기저대역(base band)의 신호로 변조하는 경우, 데이터의 전송과정에서 평균전력이 변화하면 깜박거림(flicker) 현상이 발생하여 조명상태가 불안정해 질 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서, Manchester code 또는 pulse position modulation (PPM) 방식을 이용하여 LED를 변조하거나[5-6], 데이터의 전송률에 비하여 현저히 높은 캐리어 주파수를 사용하여 amplitude shift keying(ASK) 또는 frequency shift keying (FSK) 변조함으로써 LED 출력광의 평균전력을 일정하게 만들어 플리커를 방지하는 전송방식이 많이 사용되고 있다[7]. 기저대역에서 Manchester code 또는 PPM 전송방식을 사용하는 경우에는 데이터의 변조와 복조과정에 필요한 클럭이 송신부와 수신부에서 동기상태를 이루어야 하므로 이를 전송하기 위한 별도의 통신채널이 필요하다. ASK 또는 FSK 변조방식을 사용하는 경우에는 데이터에 비하여 현저히 높은 주파수에 해당하는 캐리어 주파수 발생을 위하여 별도의 발진기와 필터 및 복조회로가 필요하다.

본 논문에서는 기저대역을 사용하는 가시광통신 시스템에서 LED의 평균 광전력이 일정한 상태를 이루어 플리커를 방지할 수 있는 바이트반전 전송방식을 새로이 고안하여 실험하였다.

서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 (Department of Electronics and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology) 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea  
<sup>+</sup>Corresponding author: shlee@seoultech.ac.kr  
(Received: Oct. 23, 2017, Revised: Nov. 20, 2017, Accepted: Nov. 24, 2017)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 방식에서는 220V 전력선의 60Hz 주파수를 사용하여 480Hz의 구형파 클럭을 발생하고, 매주기마다 클럭이 high 상태인 반주기 동안에는 원신호(original signal)의 1 byte 를 전송하고, 클럭이 low 상태인 나머지 반주기 동안에는 원신호를 반전하여 전송함으로써 데이터의 형태에 관계없이 항상 LED의 평균 광전력을 일정하게 유지하였다.

가시광통신에서 플리커를 방지하기 위해서는 광원의 밝기 변화를 나타내는 주기인 maximum flickering time period (MFTP)가 일반적으로 5 ms (200Hz)보다 짧아야 한다[5]. 본 논문의 바이트반전 전송방식에서는 MFTP가 480 Hz 주파수의 역수인 2.08 ms에 해당하며, 이 값은 5 ms보다 짧아서 플리커가 없는 안정된 LED 조명상태를 유지하였다. 이 구조에서는 120 Hz 전력선이 존재하는 장소에서 모두 동일한 클럭을 발생시킬 수 있기 때문에 송신부와 수신부 사이에 동기된 별도의 클럭전송을 위한 통신채널이 필요하지 않아 시스템의 구성이 매우 간단하다. 또한 바이트 반전 전송방식으로 인하여 데이터 전송과정에 LED의 조명이 항상 일정하게 유지되므로 플리커가 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. LED조명을 이용하여 실내의 근거리에서 무선 센서 네트워크를 구축하고자 하는 경우에 이러한 바이트 반전 전송방식을 사용하면 항상 안정된 조명상태를 유지할 수 있어서 이에 대한 활용성이 높다.

## 2. 바이트 반전전송 시스템 구성

### 2.1 바이트 반전 전송방식

바이트반전 전송방식을 사용하는 송신부에서 LED전류원에 인가되는 전압파형을 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1(a)는 바이트 반전 전송에 사용되는 클럭파형을 나타낸다. 클럭파형의 반주기( $T/2$ )는 high level, 나머지 반주기( $T/2$ )는 low level 상태를 가진다. Fig. 1(b)는 송신부에서 전송하고자 하는 데이터의 파형을 나타내며, 본 그림에서는 편의상 1개의 문자 "Q"에 대한 UART 신호를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 1(c)는 송신부의 LED에 인가되는 데이터 신호로서 클럭이 high 상태인 전반기 반주기( $T/2$ )에는 원신호(original signal)를 전송하고, 클럭이 low level 상태인 후반기 반주기( $T/2$ )에는 반전된 신호(inverted signal)가 전송된다. 클럭 후반기 반주기에 전송되는 반전신호는 원신호를 구성하는 각 비트의 high와 low 상태를 반전시킨 상태로서 LED의 평균 광전력을 일정하게 만들어 주기 위하여 부가되어 전송된다.

이러한 전송과정에서 LED의 평균방사전력을 계산하면 다음과 같다. 클럭이 high 상태인 반주기 동안 원신호가 전송될 때 발생하는 LED에서 방출하는 빛 에너지는

$$W_1 = P_0 \left\{ \tau_b \sum_{i=0}^9 D_i + (\tau_1 + \tau_2) D_k \right\} \quad (1)$$

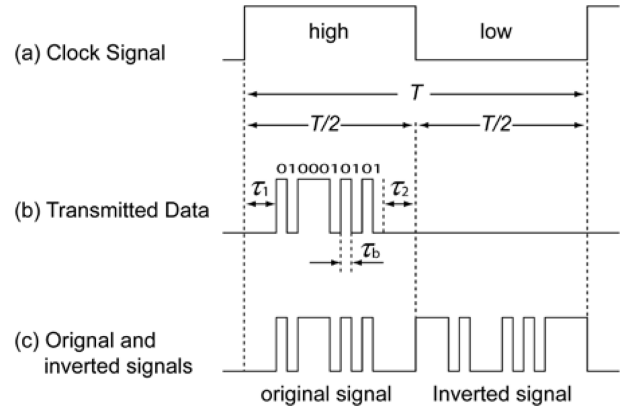


Fig. 1. Waveforms in byte-inverted transmission.

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $W_1$ 은 클럭의 반주기( $T/2$ )에 포함된 빛 에너지이며,  $P_0$ 는 광전력의 진폭,  $D_i$ 는 원신호의 데이터에 포함된 각 비트의 상태로서,  $i$  번째의 데이터 비트가 high 일 때는  $D_i=1$ , low 일 때는  $D_i=0$  를 나타낸다. UART방식으로 데이터를 전송하는 경우에는 1 바이트 데이터가 8비트이며, 데이터의 앞에 start bit 1개, 데이터 뒤에 stop bit 1개가 추가되어 총 10개의 비트가 전송된다.  $\tau_b$ 는 1비트가 차지하는 비트시간이며,  $\tau_1$ 은 클럭의 상승에지(rising edge)로부터 데이터가 시작되기 전까지의 여유시간이며,  $\tau_2$ 는 데이터가 종료된 시점부터 클럭의 하강에지(falling edge)까지의 여유시간을 나타낸다.  $D_k$ 는 반주기 내에서 데이터가 없는 여유시간에 high 또는 low level의 상태를 나타내며, 원신호가 전송되는 반주기 동안에는  $D_k=0$ , 반전신호가 보내지는 반주기 동안에는  $D_k=1$  이 된다. 클럭이 low level 상태인 후반기 반주기 동안 발생하는 LED의 빛 에너지는

$$W_2 = P_0 \left\{ \tau_b \sum_{i=0}^9 \bar{D}_i + (\tau_1 + \tau_2) \bar{D}_k \right\} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서  $W_2$ 는 클럭의 후반기 반주기 동안 LED에서 방출한 빛 에너지이며,  $\bar{D}_i$ 와  $\bar{D}_k$ 는 각각  $D_i$ 와  $D_k$ 가 반전된 상태를 나타낸다. 식(1)과 (2)를 사용하여, 클럭의 한 주기( $T$ ) 동안 발생한 LED의 평균 광전력을 계산하면

$$\begin{aligned} P_{avg} &= (W_1 + W_2) / T \\ &= \frac{P_0}{T} \left\{ \tau_b \sum_{i=0}^9 (D_i + \bar{D}_i) + (\tau_1 + \tau_2) (D_k + \bar{D}_k) \right\} \\ &= \frac{P_0}{T} \left\{ \tau_b \sum_{i=0}^9 \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (\tau_1 + \tau_2) \right\} \\ &= \frac{P_0}{2T} \left\{ 10 \times \tau_b + (\tau_1 + \tau_2) \right\} = \frac{P_0}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

이 되어 데이터의 비트상태에 관계없이 평균전력이 항상  $P_0/2$ 로 일정한 상태를 유지하게 된다.

### 2.2 클럭 발생기

바이트 반전 전송에 사용하기 위한 클럭 발생기의 회로는 Fig. 2와 같다.

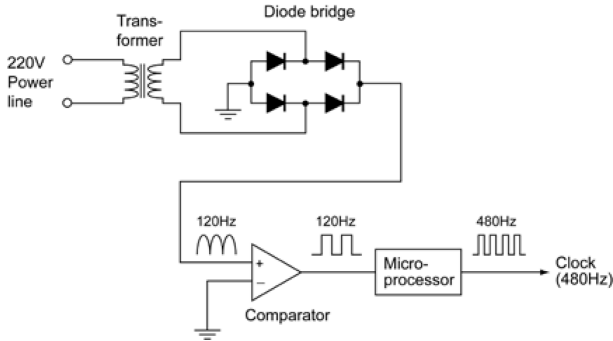


Fig. 2. Clock generator circuit.

전력선의 220 V 60 Hz 전압은 트랜스를 통하여 피크간 전압이 약 20 Vpp 인 AC 전압으로 변환된 후, 다이오드 브리지를 통과하면서 전파정류 (full-wave rectified)되어 120 Hz의 AC전압으로 바뀌게 된다. 이 전압을 비교기 (comparator)에 입력단에 인가하면 120 Hz의 펄스를 생성하고, 마이크로프로세서에서는 이 펄스를 입력 받아 상승에지(rising edge)를 기준하여 한 개의 펄스 당 4주기의 구형파를 발생한다. 그 결과 마이크로프로세서의 출력신호는 전력선주파수에 동기된 480 Hz의 클럭을 생성하였다. 이와 같이 전력선을 이용한 클럭발생기를 사용하면 전력선이 공급되는 모든 지점에서 동기된 클럭을 생성한다. 따라서 송수신부 사이에 별도로 클럭을 전송할 필요가 없어서 시스템이 간단해지는 장점이 있다. 실험에서 클럭발생기에 사용한 다이오드브리지는 1N4007다이오드 4개를 사용하여 제작하였으며, 비교기(comparator)로는 OPA228 연산증폭기, 마이크로프로세서는 Atmega8을 사용하였다.

### 2.3 송신부 구성

실험에서 바이트반전 전송방식에 사용한 가시광 송신기의 구조는 Fig. 3과 같다.

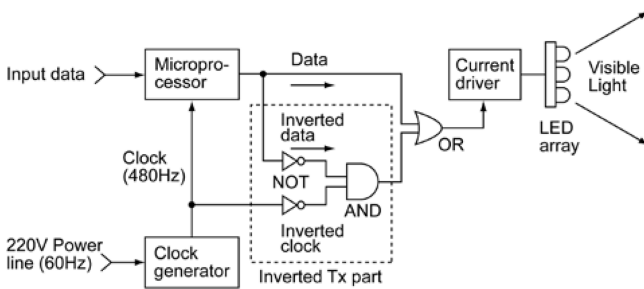


Fig. 3. VLC transmitter for byte- inverted transmission.

가시광 송신기는 마이크로프로세서, 클럭발생기, LED구동용 전류원, LED array, 그리고 NOT, AND, OR gate를 사용한 신호반전회로로 이루어진다. 전송하기 위한 입력데이터가 마이크로프로세서의 입력단자에 가해지면, 마이크로프로세서는 480Hz 클럭의 상승에지에서 입력데이터를 읽어 들이고, 클럭의 High 상태에 해당하는 반주기와 low 상태에 해당하는 반주기 동안 각각 동일한 데이터를 출력한다. 클럭의 low 상태에서 전송되는 반전 신호는 NOT gate를 통하여 생성된다. 이와 동시에 클럭 신호도 NOT gate를 통하여 반전되어 low상태의 클럭전압이 high로 바뀌게 된다. 이 상태에서 반전된 데이터와 반전된 클럭을 AND gate에 가하면 AND gate의 출력신호는 클럭의 후반 반주기 동안에 반전된 신호가 생성된다.

Fig. 3에서 점선으로 표기된 블록은 반전전송을 위한 부가회로를 나타낸다. 클럭의 전반 반주기에서 발생한 원신호와 후반 반주기에서 발생한 반전신호를 OR gate에 입력하여 두 신호를 합하면 클럭의 전반 반주기에서는 원신호를 전송하고 후반 반주기에서는 반전된 신호를 전송하는 송신부가 완성된다. 송신부에서 사용한 마이크로프로세서는 Atmega8이었으며, NOT gate는 74LS04, AND gate는 74LS11, OR gate는 74LS32를 사용하였다. LED를 구동하기 위한 전류원으로는 IRF540 FET를 사용하였으며, 광원으로는 백색광의 1W LED 6개를 사용하여 2×3 배열 구조를 가지는 LED array로 제작하여 사용하였다.

### 2.4 수신부 구성

실험에서 바이트반전 전송에 사용한 가시광 수신기의 구조는 Fig. 4와 같다.

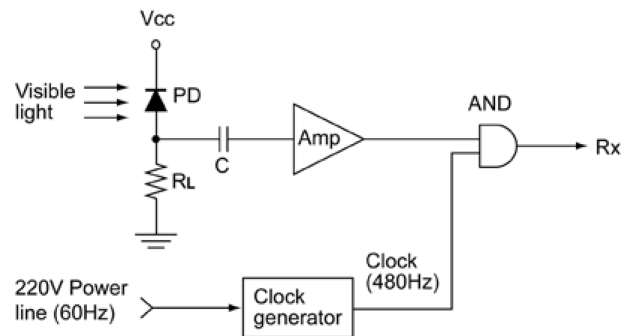


Fig. 4. VLC receiver for byte-inverted transmission.

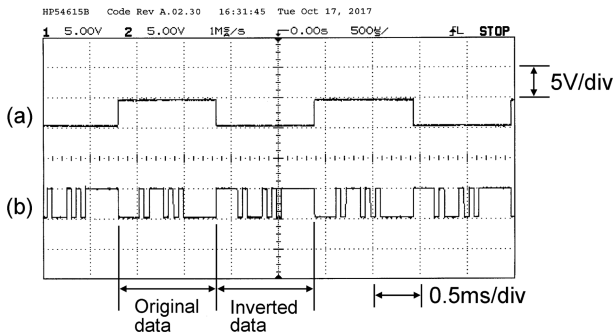
가시광 수신기는 포토다이오드(photodiode; PD)와 부하 저항, 증폭기, 클럭발생기, 그리고 AND gate로 이루어진다. 포토다이오드에서 수신한 신호광을 받아 생성된 신호전압과 클럭발생기의 출력을 AND 하면, 480 Hz 클럭이 high 상태에 있는 반주기 동안 수신된 원신호만 출력되고, 클럭이 low상태에 있는 반주기 동안 수신된 반전신호는 차단된다. 실험에서 가시광 수신기에 사용한 포토다이오드는 PIN photodiode S6968, 부하저항

$R_L$ 은 1 k $\Omega$ , 증폭기는 OPA228을 사용하여 전압증폭률이 100이 되도록 제작하였으며, AND gate는 74LS11을 사용하였다.

### 3. 바이트반전 전송실험

#### 3.1 단일문자 전송 실험

바이트반전 전송방식에서 신호의 전송과정을 확인하기 위하여 송신부와 수신부를 실험테이블 위에 설치하고 데이터를 전송하였다. 송신부와 수신부 사이의 거리는 약2m 이었으며, 데이터 발생을 위하여 마이크로프로세서를 사용하였다. 문자1개가 클럭의 반주기 안에 들도록 일반적인 UART 속도 (9.6kbps)의 2배인 19.2 kbps데이터율로 문자 “Q”를 클럭의 매주기마다 발생하여 VLC송신부에 인가하였다. Fig. 5는 오실로스코프를 사용하여 송신부에서 관측한 전압파형을 나타낸다.

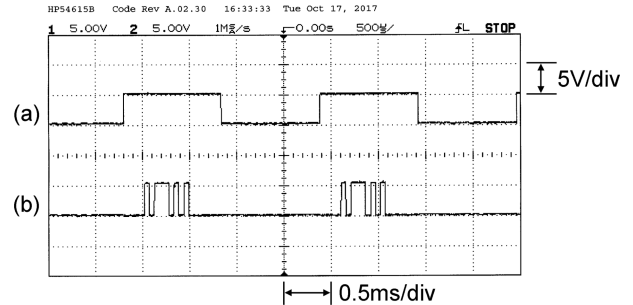


**Fig. 5.** Voltage waveforms observed in the transmitter.  
 (a) 480 Hz clock from the clock generator.  
 (b) Signal waveform applied to the LED driver.

Fig. 5(a)는 클럭발생기로부터 송신부에 전달되는 480 Hz 클럭파형을 나타낸다. Fig. 5(b)는 송신부의 LED driver에 가해지는 전압으로서 클럭의 high 상태인 반주기 동안에는 문자 “Q”가 전송되고, 클럭의 low 상태인 나머지 반주기 동안에는 문자 “Q”의 반전상태의 신호가 전송되고 있다. 문자 “Q”는 “01010001”의 8비트로 구성되며, 이 신호가 UART방식으로 전송될 때는 least significant bit (LSB)가 앞서는 방식으로 전송되므로 비트열은 “10001010”가 된다. 여기에서 문자의 시작을 알리는 start bit “0”가 문자의 앞부분에, 문자의 종료를 알리는 stop bit “1”가 문자의 뒷부분에 각각 추가된다. 따라서 1개의 문자 “Q”가 전송될 때의 전체 비트열은 “0100010101”이 되어 총 10비트가 된다.

UART에서 비트 “0”에는 high (H) 전압, “1”은 low (L) 전압이 할당되므로 이 신호에 대한 전압은 “HLHHHLHLHL”의 순서로 전송된다. 이 상태는 Fig. 5(a)의 클럭파형이 high 상태인 반주기 동안 Fig. 5(b)에서 전송되는 파형(original)에 해당한다. Fig. 5(b)에서 클럭파형이 low 상태인 반주기 동안에는 문자 “Q”의 비트열이 반전된 상태(inverted)로 전송되고 있음을 볼

수 있다. Fig. 5(b)의 신호에 따라 변조된 LED의 광출력은 자유공간으로 방사되고, 수신부에서 신호광을 검출하였다. Fig. 6는 수신부에서 관측한 전압파형을 나타낸다.

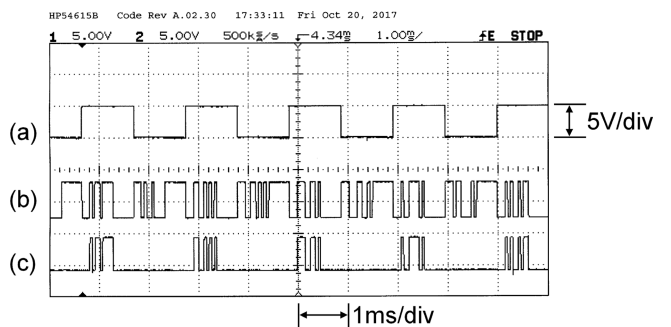


**Fig. 6.** Voltage waveforms observed in the receiver.  
 (a) 480Hz clock from the clock generator.  
 (b) Receiver output signal.

Fig. 6(a)는 클럭발생기로부터 수신부에 전달되는 480Hz 클럭파형을 나타낸다. Fig. 6(b)는 클럭파형과 포토다이오드 전압이 AND gate를 통과한 후 검출된 신호를 나타낸다. 여기에서는 송신부에서 클럭의 매 주기마다 보낸 원신호와 반전신호 중에서 클럭이 high 상태에 있는 동안 전송된 원신호인 문자 “Q”만 출력되고, 클럭이 low 상태에 전송된 반전신호는 차단되었음을 볼 수 있다. 이와 같이 송신부에서 1개의 문자를 바이트반전 전송 방식으로 보낼 때 송신부와 수신부에서 발생하는 신호파형을 관측하였다.

#### 3.2 문자열 연속전송 실험

입력신호가 연속되는 문자열인 경우 송신부와 수신부의 전송과정을 관측하였다. Fig. 7은 바이트 반전방식을 사용하여 송신부에서 문자열 “\tVLC-test\r\n”을 연속적으로 전송할 때 송신부와 수신부에서 관측한 파형을 나타낸다.



**Fig. 7.** Transmitted and received signal waveforms.  
 (a) 480Hz clock from the clock generator.  
 (b) Signal waveforms applied to the LED driver.  
 (c) Receiver output signal.

Fig. 7(a)는 클럭발생기의 480Hz 클럭으로서 앞의 Fig. 5(a) 및 Fig. 6(a)와 동일한 파형을 나타낸다. Fig. 7(b)는 송신부에서 클럭의 한 주기마다 한 글자씩 차례로 문자열 “\tVLC-test\r\n”가 연속 전송되는 과정에서 앞부분의 5개의 문자“\tVLC-”가 오실로스코프에 보이는 상태를 나타낸다. 클럭의 한 주기 내에서 클럭 전압이 high 상태인 반주기 동안에는 각 문자의 원신호가 전송되고, 클럭 전압이 low 상태인 나머지 반주기 동안에는 각 문자의 반전된 신호가 전송되고 있다. Fig. 7(c)는 수신부의 출력신호로서 포토다이오드 전압과 클럭 전압을 AND 함으로써 얻어진 수신파형을 나타낸다.

이와 같이 수신된 전압이 나타내는 문자열을 확인해보기 위하여 수신부 출력신호를 컴퓨터의 UART 수신단자에 연결하고 모니터에 표시되는 문자를 관찰하였다. Fig. 8은 모니터 상에 표시되는 문자열을 나타낸다.

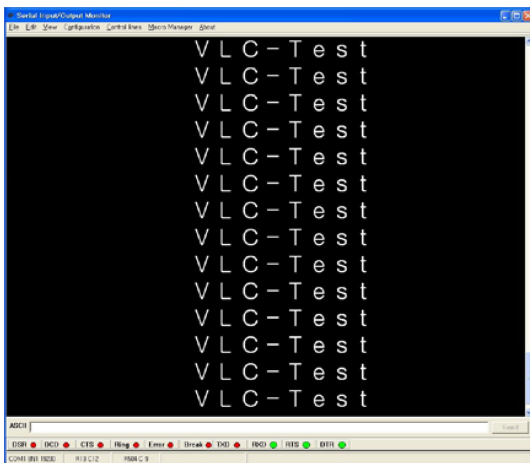


Fig. 8. Characters displayed on a monitor.

송신부에서 보낸 문자열 “\tVLC-test\r\n”중에서 “\t”(horizontal tab), “\r”(carriage return), “\n”(line feed)는 화면상에 문자열의 위치를 지정하는 특수문자이므로 모니터에 나타나지 않고 “VLC-test”만 표기되고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9는 실험에서 사용한

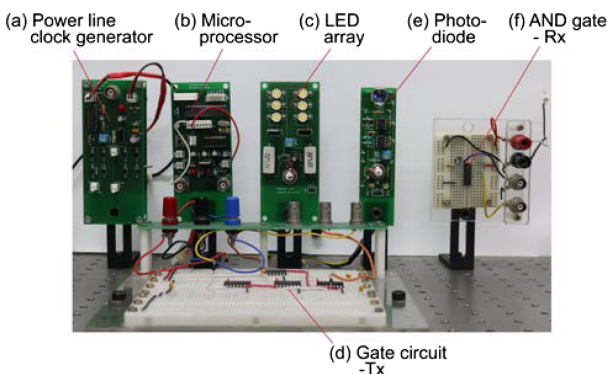


Fig. 9. Circuits used in experiments.

회로를 나타낸다.

Fig. 9(a)는 전력선으로부터 480Hz 클럭을 생성하는 회로, Fig. 9(b)는 송신부에서 사용한 마이크로프로세서 회로, Fig. 9(c)는 송신부의 LED array, Fig. 9(d)는 송신부에서 반전신호를 생성하기 위하여 사용한 게이트 회로를 나타낸다.

Fig. 9(e)는 포토다이오드회로, Fig. 9(f)는 수신부에서 사용한 게이트 회로이다.

이와 같이 60Hz전력선으로부터 발생한 480Hz의 클럭을 사용하여 송신 데이터를 각 바이트 별로 반전시켜서 부가 전송하면 LED의 평균전력이 항상 일정하게 유지되어 플리커가 발생하지 않으므로 통신상태가 조명에 영향을 주지 않고 안정된 조명상태를 유지할 수 있다. 이러한 전송방식에서는 송·수신부의 구성이 매우 간단하고 플리커가 없는 안정된 LED조명을 쉽게 구현할 수 있기 때문에 다양한 센서 데이터를 전송하기 위한 근거리 무선통신 링크를 구축할 때 이러한 방식을 사용하면 매우 편리하다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 바이트 반전 전송방식을 이용하여 플리커를 방지하는 가시광통신시스템을 구현하였다. 송신부에서는 전력선으로부터 생성한 480 Hz 클럭을 이용하여 클럭신호가 high 상태인 반 주기동안에는 원신호에 해당하는 문자를 전송하고 low 상태인 반 주기동안에는 원신호를 반전하여 전송함으로써 LED의 평균 광전력이 항상 일정하게 만들어 플리커가 없는 조명상태를 유지하였다. 수신부에서는 전력선으로부터 발생한 480 Hz 클럭을 사용하여 클럭신호가 high상태인 시간 동안에 수신된 데이터만 검출함으로써 원신호를 수신하였다. 실험에서는 바이트 반전 전송과정에서 송신부와 수신부에서 나타나는 전압파형을 관측하였다.

일반적으로 가시광통신시스템에서 플리커를 방지하기 위해서는 maximum flickering time period (MFTP)가 5 ms 보다 짧아야 한다[5]. 본 논문의 바이트반전 전송방식에서는 MFTP가 480Hz의 클럭 주파수의 역수에 해당하는 약 2 ms로서 5 ms보다 짧기 때문에 플리커가 발생하지 않아 안정된 조명상태를 유지한다. 또한 이러한 구조를 사용하면 클럭 전송을 위한 별도의 채널이 필요하지 않아 시스템 구성이 매우 간단해지는 장점이 있다. 실 내에서 LED조명을 이용하여 무선 센서네트워크를 구현하고자 하는 경우에 이러한 전송방식을 이용하면 통신과 조명이 서로 영향을 주지 않는 가시광통신 시스템을 쉽게 구축할 수 있다.

#### REFERENCES

[1] T. Komine and M. Nakagawa, “Fundamental analysis for

- visible-light communication system using LED lights”, *IEEE Trans. Consumer Electron.*, Vol. 50, No. 1, pp. 100-107, 2004.
- [2] Y. K. Cheong, X. W. Ng, and W. Y. Chung, “Hazardless biomedical sensing data transmission using VLC”, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 13, No. 9, pp. 3347-3348, 2013.
- [3] S. H. Lee, “A passive transponder for visible light identification using a solar cell”, *IEEE Sensors Journal*, Vol.15, No.10, pp.5398-5403, 2015.
- [4] Z. Yu, R. J. Baxley, and G. T. Zhou, “Peak-to-average power ratio and illumination-to-communication efficiency considerations in visible light OFDM systems”, *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 5397-5401, Vancouver, BC, 2013.
- [5] S. Rajagopal, R. D. Roberts, and S. K. Lim, “IEEE 802.15.7 Visible Light Communication: Modulation Schemes and Dimming Support”, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 50, No.3, pp.72-82, 2012.
- [6] X. Ma, K. J. Lee, and K. S. Lee, “Appropriate modulation scheme for visible light communication systems considering illumination”, *Electronics letters*, Vol. 48 No.18, pp.1137-1139, 2012.
- [7] C. Yao, Z. Guo, G. Long, and H. Zhang, “Performance Comparison among ASK, FSK and DPSK in Visible Light Communication”, *Optics and Photonics Journal*, Vol. 6, pp.150-154, 2016.