

LED를 광송수신 소자로 사용한 수동형 가시광 트랜스폰더

이성호⁺

A Passive Visible Light Transponder Using an LED for an Optical Transceiver

Seong-Ho Lee⁺

Abstract

In this paper, we introduce a passive transponder in which an LED is used for both a light transmitter and a receiver, and a solar cell is used for supplying power to the all devices in the transponder. The LED in the transponder operates as a photodetector in the receiving mode, and acts as a light source in the transmitting mode. The current responsivity of the LED detector was measured to be in the order of 10^{-4} A/W, and the receiving bandwidth with a load resistance of 10 k Ω was about 10 to 30 kHz. Using the LED for an optical transceiver in a VLID transponder, the detection range was about 70 cm when the transponder was illuminated by the visible light from a 3 \times 3 LED array in a reader.

Keywords: LED, Solar cell, Passive transponder, Visible light identification, LED detector

1. 서 론

가시광 LED(light emitting diode)는 기존의 조명시설에 비하여 크기가 작고 수명이 길며 높은 효율을 가지고 있어서 기존의 조명시설을 점차 대체해가고 있는 추세이다. 또한 기존의 형광등이나 백열등과 달리 가시광 LED는 육안의 인식범위보다 높은 주파수에서 변조가 가능하므로 하나의 광원을 이용하여 조명과 통신을 겸하는 가시광통신(VLC: visible light communication)에서 광원으로 많이 사용되고 있다[1,2]. 가시광 LED를 이용할 수 있는 주요 활용분야에 가시광인식(VLID: visible light identification)이 있다[3,4]. VLID는 2개의 가시광 송수신장치가 서로 마주 바라보고 있는 구조에 해당하며, 이 중에서 하나가 리더로 사용되면 다른 하나는 트랜스폰더(transponder)가 된다. 리더로부터 트랜스폰더로 문의신호광(interrogating light)을 방사하면, 트랜스폰더는 문의신호를 인식한 후 자신의 고유한 데이터로 변조된 응답신호광(responding light)을 발생하여 리더 쪽으로 방사한다.

리더와 트랜스폰더 사이의 이러한 신호교환 과정은 기존의 무선인식(radio frequency identification; RFID)과 유사하지만, 신호전송을 위한 캐리어로서 RF주파수대신에 가시광을 사용한다. 이러한 VLID에서 트랜스폰더가 외부의 전력공급이 없이 단독으로 동작하는 수동형인 경우에는 이 트랜스폰더를 관리대상 물체에 영구히 부착하고, 필요할 때마다 리더의 신호광을 트랜스폰더에 비추어 가시거리 내에서 그 물체의 관련정보를 무선으로 자동 인식할 수 있기 때문에 VLID의 활용성을 높일 수 있다.

본 논문에서는 리더의 신호광을 받아 자체적으로 전류를 생성하는 수동형 트랜스폰더를 솔라셀과 LED를 사용하여 구현하였다. 리더의 신호광을 수신하는 동안 솔라셀은 리더의 신호광을 받아 트랜스폰더 내부의 소자에 필요한 전력을 공급하고, LED는 리더의 신호광을 받아 리더의 문의신호를 수신하는 광검출기로서 동작한다. 반면에 트랜스폰더가 응답하는 동안에는 이 LED가 광원으로 동작한다. 이것은 최근에 LED가 광검출소자로 사용될 수 있음[5]을 이용하여 수동형 트랜스폰더의 구성에 새로이 적용한 구조이다. 이 구조에서는 별도의 광검출장치가 필요하지 않아 솔라셀을 이용한 수동형 트랜스폰더의 구조가 더욱 간단해지는 이점이 있다.

본 논문을 기존의 참고문헌 4 및 5의 내용과 비교하면 다음과 같다. 본 논문의 구조는 외부의 전원을 공급받는 VLC시스템에서 단일의 LED를 사용하여 단순히 송수신을 겸하는 구조[5]와 달리, 외부 전원이 없이 자체적으로 전류를 생성하여 동작하는 수동형 VLID트랜스폰더에서 구성소자의 개수와 소모전류를 줄이는 효과는 물론, 수 mA에 해당하는 솔라셀의 미약한 공급전류 범위에서도 리더와의 정상적 교신이 이루어짐을 확인

서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과(Department of Electronics and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology) 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea
⁺Corresponding author: shlee@seoultech.ac.kr
(Received : Apr. 29, 2015, Revised : Jun. 8, 2015, Accepted : Jul. 21, 2015)

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.

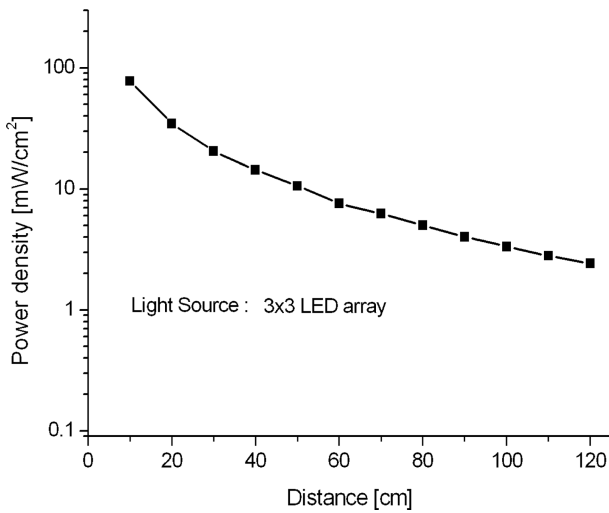


Fig. 3. Optical power density from a 3x3 LED array.

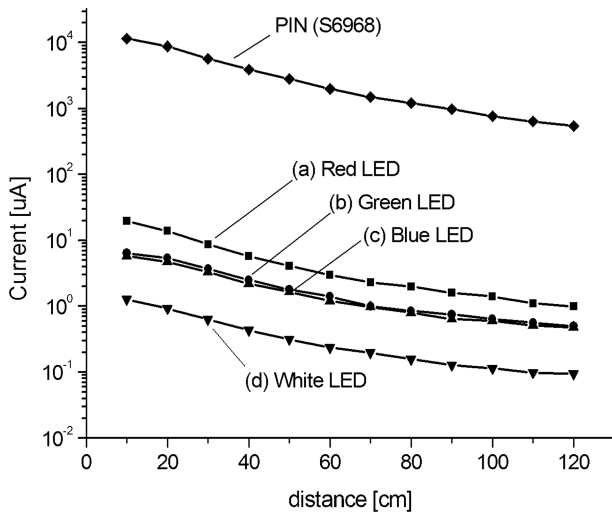


Fig. 4. Photocurrents in LEDs and a PIN photodiode.

광전류를 측정하였다. LED array로부터의 광전력밀도를 측정하기 위하여 사용한 계측기는 ILX Lightwave사의 OMM-6810B이다. LED array의 표면으로부터 수직방향으로 방출되는 광전력 밀도를 측정한 결과는 Fig. 3과 같다.

이와 같은 크기의 광전력밀도가 존재하는 공간에 수신용 LED를 설치하고 거리를 증가하면서 LED의 광전류를 측정하였다. 수신용으로 사용한 LED는 Helio사의 1W red, green, blue, white의 4가지 종류를 사용하였다. Fig. 4는 각각의 LED에서 발생한 광전류를 측정한 결과이다.

Fig. 4에서는 수신용 LED에서 발생하는 광전류가 기존의 PIN 포토다이오드에 비하여 어느 정도 되는지 비교해보기 위하여 약 0.5(A/W)의 전류응답도를 가지는 silicon PIN 포토다이오드(Hamamatsu S6968)의 광전류를 그래프에 함께 표기하였다. 수신용 LED의 전류를 측정할 결과 red, green, blue, white의 전류는 각각 S6968의 1.5×10^{-3} , 0.7×10^{-3} , 0.6×10^{-3} , 0.1×10^{-3} 배 정도

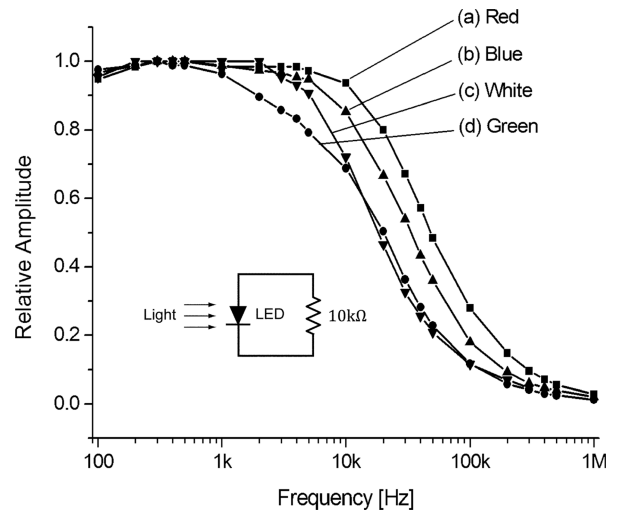


Fig. 5. AC response of LEDs.

의 크기를 보였다. 이와 같이 LED를 광검출기로 사용할 경우에는 기존의 PIN포토다이오드에 비하여 전류응답도가 매우 낮으므로 트랜스폰더 회로를 구성할 때 검출전압을 높여주기 위하여 10 kΩ의 큰 부하저항을 연결하여 사용하였다.

3.2 LED의 수신대역폭 측정

LED를 광검출기로 사용할 때 수신대역폭을 측정하기 위하여 red, green, blue, white LED에 각각 부하저항 10 kΩ을 연결하여 수신회로를 구성하였다. 변조대역폭이 약 2 MHz인 별도의 백색광 LED를 광원으로 사용하여 변조주파수를 높여가면서 수신용 LED의 검출전압을 기록하였다. 측정결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 곡선 (a), (b), (c), (d)는 각각 red, blue, white, green LED의 수신특성을 나타낸다. 여기에서는 최대 검출전압을 1로 정규화하여 표기하였다. 부하저항 R=10 kΩ에서 각 LED의 3 dB 수신대역폭은 (a) red 30 kHz, (b) blue 20 kHz, (c) white 10 kHz (d) green 10 kHz 정도로 측정되었다.

본 실험에서 사용한 LED중에서 red LED의 수신대역폭이 30 kHz로 제일 넓었으며, 이 red LED를 사용하여 트랜스폰더의 수신회로를 구성하였다.

3.3 LED를 사용한 광검출기의 구성

LED를 수광소자로 사용하여 광검출기를 구성할 때 이에 대한 수신회로와 등가회로는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 LED에 바이어스전압을 가하지 않은 상태이다.

Fig. 6에서 (a)는 LED 양단에 부하저항을 연결한 광검출기 회로이며, (b)는 이에 대한 등가회로를 나타낸다. 여기에서 C는 LED의 캐퍼시턴스이며, R_L은 부하저항을 나타낸다. 이와 같은 LED 광검출기의 과도응답을 살펴보기 위하여 10kHz반복주파

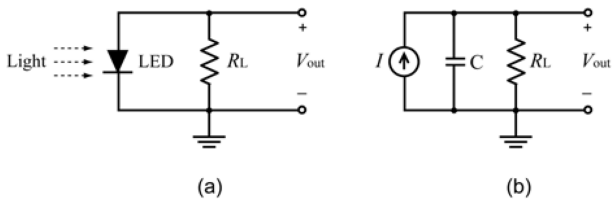


Fig. 6. LED detector circuit.
(a) Circuit configuration (b) Equivalent circuit

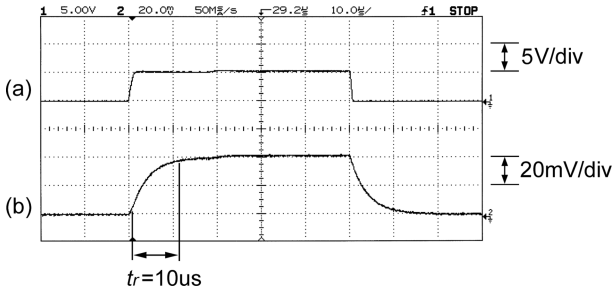


Fig. 7. Transient response.
PIN photodiode (b) LED detector

수를 가지는 구형펄스의 신호광을 발생하고 LED광검출기의 수신 과정을 관찰하였다. 오실로스코프를 사용하여 관측한 수신파형은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7(a)는 신호광의 펄스형태를 확인하기 위하여 수신 대역폭이 약 10 MHz인 별도의 PIN포토다이오드를 사용하여 검출한 파형이다. 여기에서 발생한 약 0.6 us의 짧은 상승시간은 광원을 구동하는 전류원에서 발생한 것이다. Fig. 7(b)는 LED 광검출기를 사용하여 수신한 전압파형을 나타낸다. LED광검출기에서 부하저항 $R_L=10\text{ kW}$ 을 사용하였으며, LED양단 캐퍼시턴스는 약 $C=450\text{ pF}$ 로 측정되었다. LED의 캐퍼시턴스를 측정하는 데에 사용한 계측기는 HP4285A LCR meter이었다. 광원으로부터 약 50 cm거리에 LED광검출기가 위치할 때 LED에서 발생한 전류진폭은 $I=4\mu\text{A}$ 로 측정 되었다. 이 상태에서 검출전압을 계산하면

$$V = I \times R_L = (4 \times 10^{-6}) \times (10 \times 10^3) = 40(\text{mV}) \quad (1)$$

이며, 이 값은 Fig. 7(b)에서 관측한 전압의 진폭과 일치하였다. LED 광검출기의 응답파형에서 10-90% 상승하는 데에 소요되는 상승시간(rise time) [6]은

$$t_{r,LED} = 2.19R_L C = 2.19 \times (10 \times 10^3) \times (450 \times 10^{-12}) \cong 10\mu\text{s} \quad (2)$$

로 계산되며, 이 값은 Fig. 7(b)에서 관측한 상승시간과 거의 일치하였다. 이와 같은 LED광검출기를 사용할 경우, 트랜스폰더에 설치한 마이크로프로세서 ATtiny24의 입력단자에서 디지털 부호 high과 low 를 구분하기 위한 경계인 약 1.8 V의 진폭을 얻기 위해서는 약 50배 이상의 전압이득을 가진 증폭기가 필요하다. 실험에서는 op-amp LM2904를 사용하여 전압이득이

약 100인 증폭기를 구성하였으며, 증폭기의 상승시간은 $t_{r,amp}^a \approx 40\mu\text{s}$ 이었다. 증폭기를 포함한 수신부 전체에서 발생하는 총 상승시간은

$$t_{r,total} = \sqrt{t_{r,LED}^2 + t_{r,amp}^2} = \sqrt{10^2 + 40^2} \cong 41.2\mu\text{s} \quad (3)$$

이었다. 실험에서는 NRZ(non-return-to-zero)의 ASCII 코드로 변조된 신호광을 수신할 경우, 1비트구간(time slot)이 수신부 전체의 상승시간의 약 2배 이상이 되면 수신상태가 양호하였다. 따라서 본 실험의 LED검출기의 경우, 82 us 이상의 time slot, 또는 약 12 kbps 이하의 NRZ 데이터를 사용하면 정상적으로 잘 수신할 수 있었다. 이러한 특성을 가진 LED광검출기를 사용하여 트랜스폰더의 송·수신 회로를 구성하고, 리더와 트랜스폰더 사이의 신호교환과정을 실험하였다.

4. VLID 전송실험

리더와 트랜스폰더 사이의 신호교환 과정을 확인하기 위하여 Fig. 8과 같이 실험장치를 구성하였다.

Fig. 8에서 왼쪽 블록은 리더이고 오른쪽 블록은 트랜스폰더에 해당한다. 트랜스폰더의 구조는 앞에서 보인 Fig. 1과 동일하다. 리더로부터 트랜스폰더로 진행되는 문의신호의 진행경로는 실선의 화살표로 표기하였으며, 트랜스폰더로부터 리더 쪽으로 진행되는 응답신호는 점선의 화살표로 표기하였다.

리더의 마이크로프로세서에서는 NRZ 4.8 kbps의 데이터율로 문의신호 (interrogating signal)를 발생하였다. 이 문의신호는 전류 구동장치를 통하여 LED array의 출력광을 변조하였으며 이 빛은 트랜스폰더의 솔라셀과 LED에 입사하였다. 솔라셀에서 발생한 전류는 트랜스폰더에 설치된 증폭기, 마이크로프로세서, FET를 구동하는 전원으로 사용되었다. 이와 동시에 트랜스폰더의 LED에서는 리더의 문의 신호를 검출하여 전류를 생성하고, 부하저항R에 신호전압이 발생하였다. 이 검출전압은 증폭기를 통과한 후 마이크로 프로세서의 인터럽트 단자에 가하여졌다. 여기에서 사용한 트랜스폰더용 LED로는 앞의 Fig. 4에서 보는 바와 같이 red, green, blue, white 중에서 상대적으로 응답도가 높은 red LED를 사용하였다. 마이크로프로세서에서는 문의 신호를 인식하고 응답신호(responding signal)를 발생하였다. 응답신호는 100 kHz의 캐리어 주파수를 사용하여 9.6 kbps의 데이

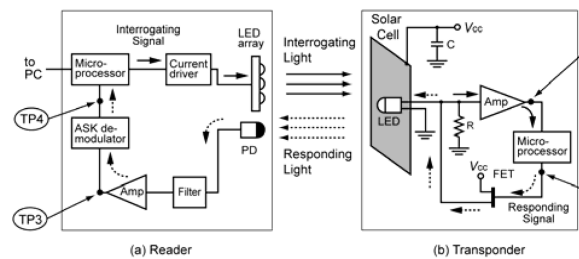


Fig. 8. Experimental setup for a VLID system.

터울로 변조된 ASK(amplitude shift keying)신호를 사용하였다. 이 응답신호는 FET의 gate에 가해지고 FET의 소스에 연결된 LED에 전류가 공급되어 응답 신호광을 발생하였다. 응답신호광은 리더쪽으로 방사되고 리더에서는 트랜스폰더의 응답신호를 검출하였다.

리더와 트랜스폰더에서 사용한 주요 소자는 다음과 같다. 리더회로에서는 광원으로 Helio사의 1W White LED 9개로 구성된 3x3 LED array를 사용하였으며, 광검출기는 포토트랜지스터 ST1MLA, 마이크로프로세서는 Atmega8을 사용하였다. 트랜스폰더 회로에서 사용한 솔라셀은 11 cmx16.5 cm 크기를 가진 M165110-9V, 수신용 LED는 Helio사의 1W Red LED, 증폭기는 LM2904, FET는 NTD110N02R, 마이크로프로세서는 ATtiny 24A를 사용하였다.

4.1 Transponder 수신 및 응답파형

리더의 마이크로프로세서에서는 문의신호로서 4.8kbps의 데이터율로 문자 “Q” 해당하는 ASCII 코드를 발생하여 리더의 LED array를 변조하였다. LED광검출기에서는 부하저항 10 kΩ, 증폭기의 전압이득이 100일 때 마이크로 프로세서 입력단에서 데이터의 high과 low 상태를 구분하기 위한 임계전압이 약 1.8 V 이었다. 입력신호의 전압진폭이 이 값보다 높게 하기 위하여 리더의 신호광을 수신할 때 LED광검출기의 전류가 약 2 uA 이상이 필요하였다. 앞의 Fig. 4의 곡선(a) red LED의 전류에서 보는 바와 같이 2 uA 이상의 광전류가 발생하는 거리는 약 70 cm 이내의 범위에 해당하였다. 따라서 리더로부터 약 70 cm 거리에 트랜스폰더를 설치하고 수신신호와 응답신호를 관측하였다.

Fig. 9는 오실로스코프를 사용하여 관측한 전압파형을 나타낸다.

Fig. 9 (a)의 파형은 LED의 검출전압이 증폭된 상태로서 Fig. 8의 측정점 (TP1)에서 관측된 전압이다. LED는 송신과 수신을 겸하는 상태로서, Fig. 9 (a)에서 앞부분의 “Receive”로 표기된 구간은 리더의 문의신호를 수신하는 동안에 나타나는 LED전압이며, 뒷부분의 “Transmit”로 표기된 구간은 트랜스폰더가 응답신호를 보낼 때 LED 양단에 걸리는 전압을 나타낸다. Receive

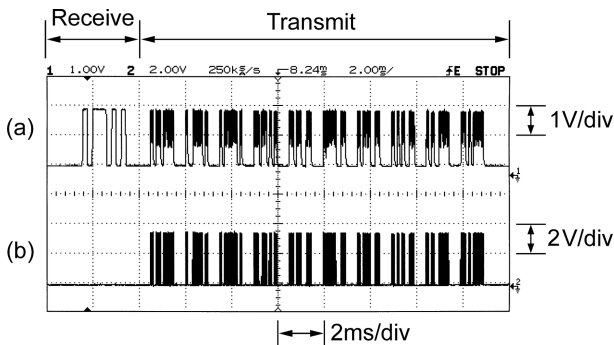


Fig. 9. Voltage waveforms observed in a transponder. (a) LED voltage (b) Responding signal

기간 동안 수신된 신호는 문자 “Q”를 나타낸다. 문자 “Q”의 ASCII 코드는 “01010001”로서 UART 전송규칙에 따라 LSB 부터 MSB 순서로 전송하면 비트열이 역순이 되어 “10001010”가 되고, 비트열 앞에 start bit “0”를 추가하면 “010001010”가 된다. 이 상태에서 H(high) 전압은 “0”, L(low) 전압은 “1”로 지정되고 그 결과 전압파형은 “HLHHHLHLH”가 되어 Fig. 9 (a)에서 Receive 구간의 파형과 같다.

VLID시스템을 톨게이트에서 통행차량 인식용으로 사용하는 경우를 가정하여, 트랜스폰더의 응답신호로서 문자열 “\tCAR2015\CR\n”를 9.6 kbps의 데이터율로 발생하였다. Fig. 9(b)의 파형은 트랜스폰더의 마이크로 프로세서에서 발생한 응답신호로서 Fig. 8의 측정점 (TP2)에서 관측된 전압이다. 이 응답신호에서 “0(high)”의 상태에서는 100 kHz의 구형파 신호가 존재하고 “1(low)”의 상태에서는 0V의 전압을 유지하는 ASK 신호를 사용하였다. 여기에서 “0”의 상태에 해당하는 100 kHz의 구형파 신호는 ASK변조에서 사인과 100kHz 대신에 사용한 캐리어 신호이다. 이와 같은 구형파와 캐리어를 사용한 ASK변조파는 별도의 외부 발진기를 사용하지 않고 마이크로프로세서 내부에서 곧바로 생성이 가능하므로 변조 회로의 구성이 간단해지는 이점이 있다.

4.2 Reader 수신 및 복구파형

트랜스폰더로부터 발생한 응답신호가 리더에서 인식되는 과정을 확인하기 위하여 리더에서의 검출전압을 관측하였다. Fig. 10은 오실로스코프를 사용하여 관측한 리더의 전압파형을 나타낸다.

Fig. 10(a)는 리더의 포토트랜지스터 전압이 100 kHz의 대역통과 필터와 증폭기를 통과한 후에 나타난 전압으로서 Fig. 8의 (TP3) 지점에서 관측한 전압이다. 이 파형은 트랜스폰더에서 발생한 ASK 응답신호광이 리더에서 검출되는 상태이며, 트랜스폰더에서 솔라셀과 병렬 연결된 캐퍼시터 C에서 방전함에 따라 트랜스폰더의 전원전압이 약간 감소하게 되고 그 결과 응답신호의 진폭이 약간 감소하는 현상이 나타난 것이다. Fig. 10(b)는 리더에서 수신된 ASK 신호가 ASK복조기를 통과한 후에 나타난 파형으로서 Fig. 8의 (TP4)지점에서 관측한 전압이다. ASK

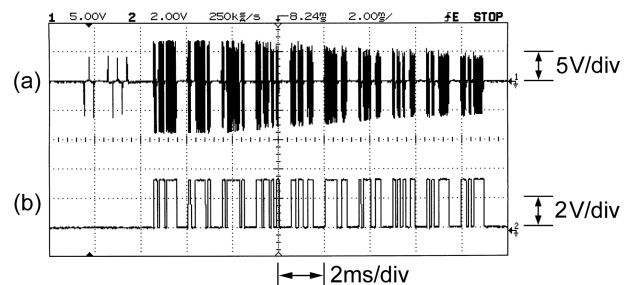


Fig. 10. Voltage waveforms observed in a reader. (a) Received ASK waveform (b) Recovered ASCII code (“\t CAR2015 \CR\n”)

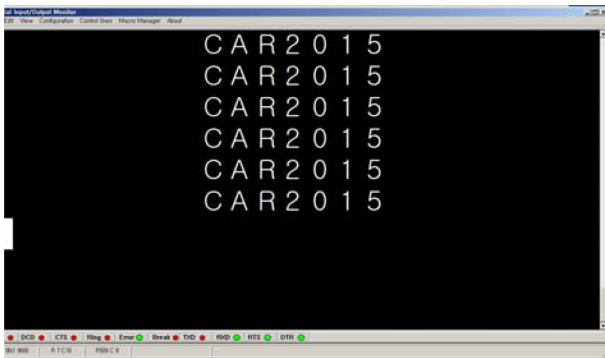


Fig. 11. Characters displayed on a monitor.

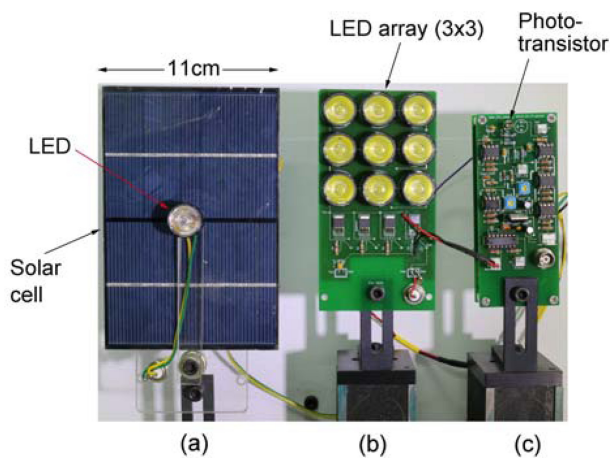


Fig. 12. Circuits used in VLID experiments.
 (a) The solar cell and the LED in a transponder
 (b) The LED array in a reader
 (c) Reader circuit and a phototransistor

복조기는 다이오드와 envelope detector 를 사용하여 구성하였다[7]. 이 전압은 트랜스폰더에서 보낸 문자열 “\tCAR2015\CR\n”에 해당하는 ASCII 코드를 나타낸다.

이 복구 신호를 PC의 직렬단자에 연결하고 모니터에 나타난 문자열을 관찰하였다. Fig. 11은 모니터에 나타난 문자열을 나타낸다.

트랜스폰더의 응답신호 중에서 “\t” (tab), “\CR” (carriage return), “\n”(line feed) 는 화면상에서 문자열의 위치를 조정하기 위하여 사용된 것이며, 이를 제외한 문자열 “CAR2015”가 화면상에 정상적으로 디스플레이 되었다. 이와 같이 리더와 트랜스폰더 사이의 교신상태는 약 70 cm 거리 내에서 정상적으로 유지되었다.

이 거리에서 발생한 솔라셀의 전류는 약 8 mA이었으며, 이중에서 약 6 mA 는 마이크로프로세서에서 소모되고, op-amp와 LED 에서 각각 1mA 정도를 소모하였다. Fig. 12는 실험에서 사용한 리더와 트랜스폰더 회로의 외관을 나타낸다.

Fig. 12에서 (a)는 트랜스폰더에서 사용된 솔라셀과 LED를 나타낸다. (b)는 리더의 광원으로 사용된 3×3 LED array이며, (c)는 리더에서 사용된 포토트랜지스터와 ASK복조회로를 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 솔라셀을 이용한 수동형 트랜스폰더의 회로에서 광검출기를 사용하지 않고 한 개의 LED를 사용하여 송신과 수신을 겸하게 함으로써 광검출기를 절약할 수 있는 간단한 구조의 트랜스폰더를 개발하였다. 먼저 LED의 수신특성을 알아보기 위하여 입사광에 대한 전류응답도와 수신대역폭을 차례로 측정하였으며, 이 LED를 사용하여 LED 광검출기를 구성하고 트랜스폰더에 장착하여 리더와의 송·수신상태를 실험적으로 확인하였다. 실험결과 리더와 트랜스폰더 사이의 거리 약 70 cm 범위 내에서 교신이 정상적으로 유지되었다. 이와 같은 구조의 트랜스폰더에서는 솔라셀을 사용하여 전원을 자체적으로 공급하며 별도의 광검출기가 필요하지 않아 트랜스폰더의 회로 구성이 매우 간단해지는 이점이 있다.

최근에 들어 반도체 기술의 발전과 함께 고출력의 LED가 개발·생산되어 이에 대한 사용이 증가하면서 기존의 조명을 대체하고 있는 추세이다. 이러한 LED 조명에 센서기능을 추가하여 부가가치를 높이기 위한 연구는 매우 중요하다. 본 논문의 가시광 인식장치는 비접촉식 광센서(optical sensor)의 일종으로서 LED조명을 이용하여 출입관리, 차량관리, 주차장 관리, 물품관리 등 무선인식 기능을 겸할 수 있는 편리한 구조이며, 빛을 전송매체로 사용하기 때문에 기존의 RF주파수와 상호간섭을 일으키지 않아 안전하고 사용이 편리한 장점을 가지고 있다. 이와 같이 가시광 인식장치는 LED조명의 가치를 부가적으로 높일 수 있기 때문에 앞으로 LED조명의 사용량이 증가함에 따라 그의 활용분야도 많아져 잠재적 기술수요가 매우 높은 센서 분야라고 할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

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] Xuanbing Qiu, Jilin Wei, Jinhong Li, Chuanliang Li, and Chao Wei, “A novel identification system based on visible light communication,” *Proc. Wireless and Optical Communication Conf.*, pp. 649-652, Chongqing, China, 2013.

- [4] Seong-Ho Lee, "A passive transponder for visible light identification using a solar cell," *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol. 23, No. 4, pp. 238-244, 2014.
- [5] K. Suzuki, K. Ashahi, and A. Watanabe, "Basic study on receiving light signal by LED for bidirectional visible light communications", *Electronics and Communications in Japan*, Vol. 98, No. 2, pp. 1-9, 2015.
- [6] J. C. Palais, *Fiber Optic Communications*, 5th ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, p. 230, 2005.
- [7] F. Yuan, "Design techniques for ASK demodulators of passive wireless microsystems: a state-of-the-art review," *Analog Integr. Circ. Sig. Process*, Vol. 63, No. 1, pp. 33-45, 2010.