

플렉시블 솔라셀을 이용한 전 방위 가시광 수신기

이성호⁺

An Omnidirectional Receiver for Visible Light Communication Using a Flexible Solar Cell

Seong-Ho Lee⁺

Abstract

In this paper, we newly developed an omnidirectional receiver for visible light communication (VLC). The omnidirectional receiver was composed of a flexible solar cell attached on a cylindrical surface with its axis in vertical direction. The solar cell surface was symmetrical and showed an almost uniform receiving pattern in a horizontal plane. The maximum difference in a receiving pattern was within 7% of its peak value in a horizontal plane. This configuration is very easy to fabricate and useful in constructing wireless sensor networks in which one receiver needs to detect multiple LED signals in different directions.

Keywords: Omnidirectional receiver, flexible solar cell, visible light communication (VLC), receiving pattern, LED.

1. 서 론

최근에 들어 반도체 기술의 혁신적인 발전으로 고효율의 가시광 발광다이오드(light emitting diode; LED)가 다량으로 보급되면서 기존의 형광등이나 백열등과 같은 조명시설을 빠른 속도로 대체해가고 있다. LED는 수명이 길고 전력변환 효율이 높은 장점을 가지고 있으며, 발광표면이 작아 여러 개의 LED를 사용하여 선형배열, 평면배열, 원형배열 등 조명광의 구조를 다양하게 설계·제작할 수 있어서 사용하기에 매우 편리하다. LED는 이러한 장점 이외에도 기존의 조명에 비하여 빠른 속도로 변조가 가능하기 때문에 한 개의 조명광을 사용하여 조명과 통신을 겸하는 가시광통신(visible light communication; VLC)의 광원으로 많이 활용되고 있다[1-4]. 가시광통신 시스템에서 LED를 송신부의 광원으로 사용하고 포토다이오드 또는 포토트랜지스터를 수신부의 광검출기로 사용하면 송·수신 링크를 쉽게 구성할 수 있다. 발광소자인 LED는 일반적으로 발광표면의 수직 방향으로 최대의 빛을 방출하며, 부착된 렌즈의 종류에 따라 발

광패턴의 형태가 달라진다. 수광소자인 포토다이오드는 일반적으로 수광표면과 수직방향으로 최대의 수광감도를 가지며, 부착된 렌즈의 형태에 따라 수광패턴이 달라지고, 수광표면의 반대쪽은 일반적으로 금속이나 플라스틱 등으로 차폐되어 있다.

이와 같이 LED와 포토다이오드를 사용하여 가시광통신 시스템을 구축하는 경우, 여러 개의 서로 다른 방향으로부터 입사하는 신호광을 한 개의 광검출기로 수신해야 하는 경우가 있다. 이러한 환경에서는 여러 개의 포토다이오드를 사용하여 포토다이오드 배열을 구성함으로써 다수의 신호광을 동시에 수신할 수 있다[5]. 그러나 이와 같이 포토다이오드 배열을 만들어 가시광 수신부를 구성하는 경우에는 제작과정과 소요부품의 증가로 인하여 수신부의 구성이 비교적 어려워지는 문제를 안고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 쉽게 해결하고자 플렉시블 솔라셀을 이용한 전방위 (omnidirectional) 가시광수신기를 제작하여 실험하였다. 솔라셀은 본래 태양광의 빛 에너지를 전기적 에너지로 변환하기 위하여 개발된 반도체 소자이다[6]. 솔라셀도 광검출기와 유사하게 반도체의 PN접합으로 이루어진 소자이며, 가시광 신호를 수신하기 위한 광검출기로 이용할 수 있다[4]. 최근에 개발 시판되고 있는 플렉시블 솔라셀은 사용자가 임의의 형태로 굽혀서 사용할 수 있도록 얇은 구조로 만들어진 솔라셀이다. 이러한 장점을 살려서 본 논문에서는 플렉시블 솔라셀의 수광표면을 원통형의 아크릴 측면에 부착하여, 수광 표면이 원통축을 기준하여 대칭형이 되도록 구성함으로써 여러 방향으로부터 입사하는 가시광 신호를 한 개의 수신기로 검출할 수 있는 전방위수신기를 개발하였다. 이 구조는 전방향으로부터 입사하는 가시광을 수신하는 데에 필요한 원통형 수광표면을 굽

서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 (Department of Electronics and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology) 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea
⁺Corresponding author: shlee@seoultech.ac.kr
(Received: Apr. 5, 2017, Revised: May 18, 2017, Accepted: May 22, 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.

힘이 가능한 플렉시블 솔라셀을 이용하여 사용자가 언제라도 간편하게 전방위 광검출기를 구성하고 이를 가시광통신에 활용할 수 있는 방법을 새로이 제공한다.

이러한 전 방위 수신기를 사용하면 여러 방향에 위치한 서로 다른 광원으로부터 입사하는 가시광 신호를 한 개의 수신기로 검출할 수 있기 때문에 포토다이오드 배열 구조에 비하여 제작 과정이 매우 간편해지는 이점이 있다. 실내에서 가시광통신을 이용하여 근거리 센서 전송용 무선 네트워크를 구축하는 경우에 이와 같은 전방위 수신기를 사용하면 여러 개의 서로 다른 LED로부터 전송된 신호를 한 개의 수신기로 쉽게 검출할 수 있기 때문에 $N \times 1$ 접속 점이 필요한 전송구간에서 핵심적인 수광 소자로 많이 활용할 수 있다.

2. 전방위 가시광 수신기의 구조 및 특성

2.1 전 방위 가시광 수신기 구조

본 논문에서 제작한 전 방위 가시광 수신기의 구조는 Fig. 1과 같다. 전 방위 수신기는 플렉시블 솔라셀을 원통형 플라스틱의 측면에 부착하여 원통형 수광표면을 가지는 구조로 제작하였다. 실험에서 사용한 플렉시블 솔라셀은 엘레파츠사의 MPT6-75를 사용하였다. 원통형 구조물은 아크릴을 사용하여 직경 4 cm, 높이 1.5 cm 크기로 제작하였다. 솔라셀 표면이 원통형 구조물의 측면에 일치하도록 가로 세로 약 12.6 cm×1.5 cm 크기의 사각형으로 자른 후에, 원통형 아크릴의 측면에 부착하였다. 플렉시블 솔라셀에서 신호광을 수신하고, 솔라셀의 양단에 나타나는 검출전압을 증폭함으로써 가시광 수신기를 구성하였다. 여기에서는 솔라셀이 포토다이오드의 역할을 하므로 부하저항 R_L 을 솔라셀과 직렬로 연결하여 사용하였다. 증폭기는 ON semiconductor사의 MC33272연산증폭기를 사용하였다. 솔라셀이 부착된 원통

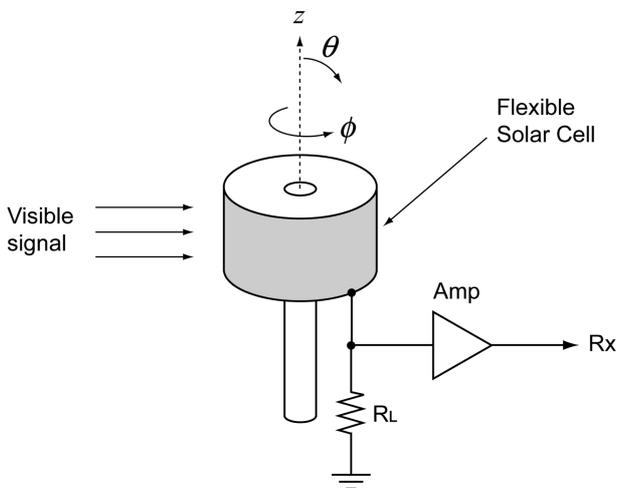


Fig. 1. Configuration of an omnidirectional receiver.

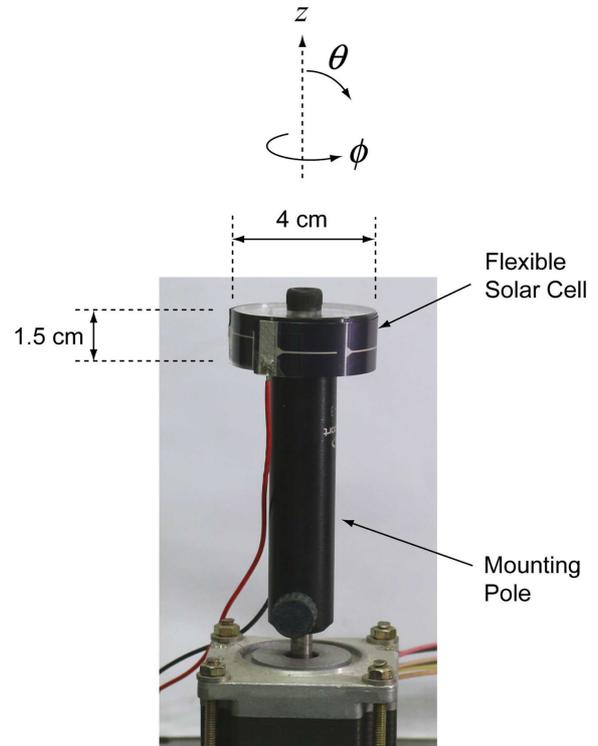


Fig. 2. An omnidirectional receiver used in experiments.

의 축 방향을 z방향으로 설정하고, 축을 기준으로 회전방향을 ϕ -방향으로 설정한 경우, 수신기는 원통형 구조의 측면에서 빛을 수신하기 때문에 ϕ -방향으로는 수광 면적의 변화가 없다. 따라서 ϕ -방향으로는 균일한 수광 특성을 가지게 되어 전 방위 수신기로 동작한다. 이 수신기를 지지대에 부착할 수 있도록 원통형 아크릴의 중심부를 통과하여 홀을 만들고 금속의 지지대에 나사로 고정하였다.

실험에서 제작한 전 방위 수신기의 외관은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 플렉시블 솔라셀을 이용한 전방위 수신기를 금속의 지지대 (mounting pole) 에 부착하고, ϕ -방향으로 회전하면서 응답특성의 변화를 측정해보기 위하여 지지대를 스텝모터의 축에 고정하였다. 실험에서 제작한 전방위 수신기의 수광 패턴과 수신대역폭을 각각 측정하였다.

2.2 수광 패턴 측정

전 방위 수신기의 수광 패턴을 측정하기 위하여, 수신기로부터 약 1 m 거리에 LED array를 설치하여 광원으로 사용하고, 수신기에 부착된 스텝모터를 회전하면서 수신기의 검출전압을 연속적으로 기록하였다. ϕ -방향으로 수광 패턴을 측정한 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3은 원통 축을 기준으로 회전방향인 $\phi=0\sim 360^\circ$ 의 구간에서 검출된 전압을 최대값 1로 정규화하여 표기한 그래프이다. 이 그래프에서 보는 바와 같이 모든 방향에서 거의 균일한

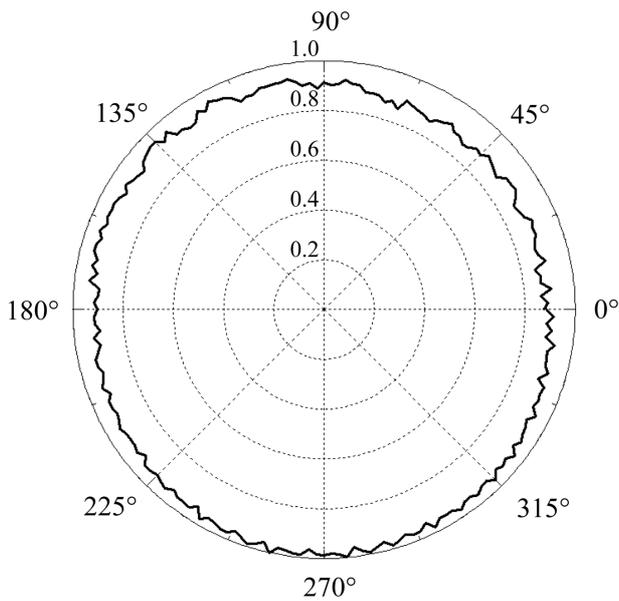


Fig. 3. Receiving pattern in ϕ -direction.

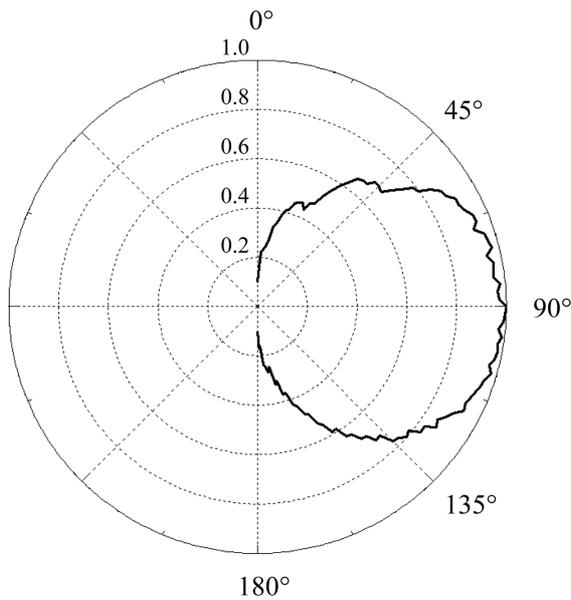


Fig. 4. Receiving pattern in θ -direction.

수광 패턴을 보였다. $\phi=90^\circ$ 방향에 비하여 $\phi=270^\circ$ 방향에서 약 7% 정도의 미약한 증가가 발생한 것은 수신기의 지지대를 스텝 모터의 회전축에 고정하는 과정에서 발생한 미소의 기울임 현상 때문이다. 이와 같이 원통형의 수광 표면을 가진 수신기는 ϕ -방향으로 전 방위 수신특성을 가지고 있음을 확인하였다. Fig. 4는 수신기를 수직방향, 즉 $\theta=0^\circ\sim 180^\circ$ 사이에서 측정한 수광 패턴을 나타낸다.

θ -방향으로는 평면형태의 수광 표면을 가지는 기존의 포토다이오드와 유사한 모양을 보였다. 수신기의 수광 표면과 수직 방향, 즉 $\theta=90^\circ$ 방향에서 검출전압이 최대가 되며, $\theta=0^\circ$ 와 $\theta=180^\circ$ 에 접근할수록 검출전압이 0으로 줄어드는 특성을 보였다.

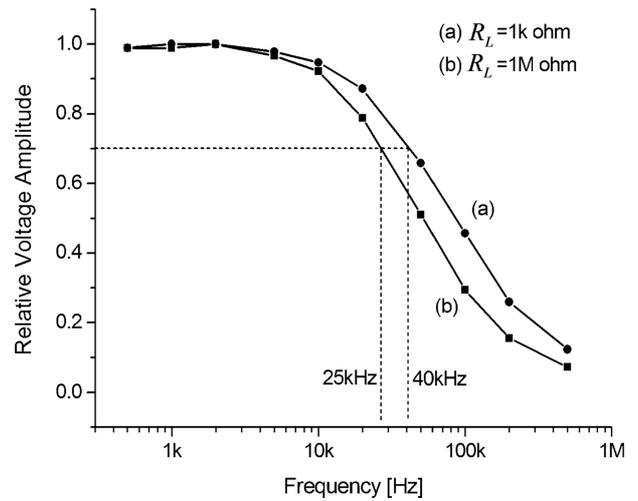


Fig. 5. AC bandwidth of a flexible solar cell.

2.3 AC 수신 대역폭 측정

실험에서 제작한 전 방위 수신기의 AC응답특성을 측정하기 위하여, 수신기로부터 약 1 m 거리에 LED array를 설치하여 광원으로 사용하였다. LED의 주입전류를 정현파로 변조한 상태에서 변조주파수를 높여가면서 검출전압의 진폭변화를 측정하였다. 검출전압의 최대값을 1로 정규화한 상태에서 기록된 AC 응답특성은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5(a)와 (b)는 솔라셀에 연결된 부하저항 (R_L)이 각각 (a) 1 k Ω , (b) 1 M Ω 일 때의 응답특성을 나타낸다. 솔라셀의 검출전압은 일반적인 PIN 포토다이오드와 유사하게 부하저항이 클수록 수신대역폭이 감소하는 경향을 보였다. AC응답특성곡선에서 진폭이 $1/\sqrt{2} \approx 0.7$ 배로 줄어드는 지점이 3dB수신대역폭을 나타낸다. 실험에서 제작한 수신기의 대역폭은 부하저항이 $R_L=1$ k Ω 에서 약 $f_{3dB}=40$ kHz이었으며, 부하저항 $R_L=1$ M Ω 에서는 약 $f_{3dB}=25$ kHz로 측정되었다.

3. 데이터 전송 실험

실험에서 제작한 전 방위 수신기를 사용하여 데이터 전송을 실시하면서 송신파형과 수신파형을 관측하였다.

3.1 실험장치의 구성

플렉시블 솔라셀을 사용하여 제작한 전방위 수신기를 VLC전송시스템에 활용해보기 위하여 실험실의 중앙 부근에 수신부를 설치하고, 서로 반대방향으로부터 2개의 LED신호광이 입사하는 상태에서 수신파형을 관측하였다. 실험장치의 구조는 Fig. 6와 같다.

Fig. 6에서 가시광 송신부1 (Tx1) 과 송신부2 (Tx2) 를 전 방

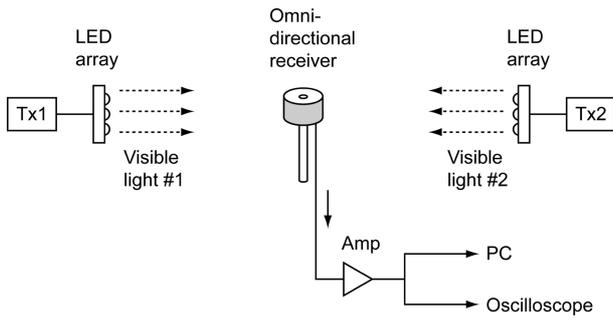


Fig. 6. Experimental setup.

위 수신기로부터 서로 반대방향으로 각각 약 1.5 m 떨어진 위치에 설치하였다. 2개의 송신부는 동일한 구조를 가지며 광원으로는 LED array를 사용하였다. 2개의 송신부에서 각각 보내는 데이터는 독립적이며, 각 송신부에서 발생한 신호광은 서로 반대방향에서 수신기로 입사하였다. Tx1과 Tx2의 전송데이터는 시분할(time division) 하여 전송하였으며, 시분할 전송을 위한 동기펄스는 220 V전력선의 주파수를 사용하여 생성하였다. 전방위 수신기에서 검출된 전압을 증폭한 후 컴퓨터에 전달하여 모니터에 나타난 문자열을 관찰하였으며, 이와 동시에 수신전압을 오실로스코프에 연결하여 수신파형을 관측하였다.

3.2 가시광 송신부의 구조

실험에 사용한 가시광 송신부의 구조는 Fig. 7와 같다.

Fig. 7에서 송신부 회로는 펄스발생기 (pulse generator), 마이크로프로세서, FET, 그리고 LED array로 구성되어 있다. 펄스발생기는 220 V의 전력선을 사용하여 120 Hz의 반복주파수를 가지는 동기펄스를 생성하고 이를 마이크로프로세서의 인터럽트 단자에 공급하였다. 마이크로프로세서는 이 동기펄스를 기준하여 전송할 데이터를 생성하고 UART단자를 통하여 신호전압을 출력하였다. 이 신호전압을 FET의 게이트(G)에 인가함으로써 FET의 소스전류를 변조하였다. 신호전압에 따라 변조된 FET 전류는 LED array에 공급되어 가시광을 발생하였으며, 자유공간을 통하여 수신기 쪽으로 방사되었다. 광원으로 사용한 LED

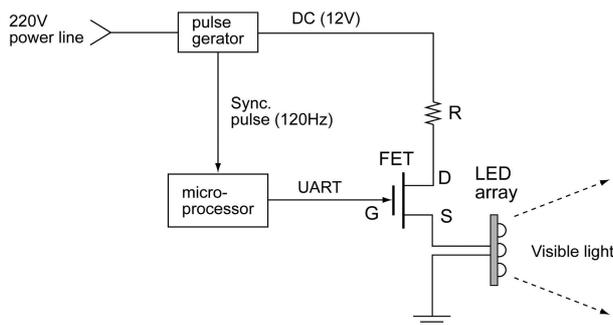


Fig. 7. VLC transmitter circuit.

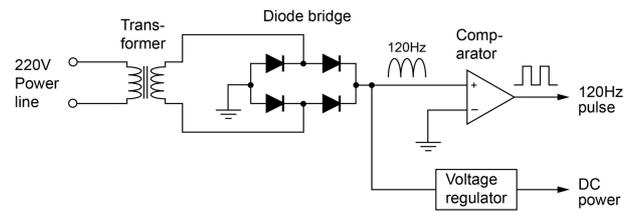


Fig. 8. Pulse generator circuit.

array는 Helio사의 1W white LED 9개를 사용하여 3×3평면 배열 구조로 제작하였으며, 마이크로프로세서는 Atmel사의 Atmega8, FET는 international rectifier사의 IRF540을 사용하였다.

Fig. 7의 송신부 회로에 포함된 펄스발생기의 내부회로를 좀 더 자세하게 표현하면 Fig. 8과 같다.

전력선에 공급되는 220 V 60 Hz 전압은 트랜스를 통하여 피크전압이 약 20 Vpp 인 AC 전압으로 변환되고, 다이오드브리지에서 전파정류(full wave rectified)되어 120Hz의 AC전압으로 바뀌게 된다. 이 전압은 비교기 (comparator)를 통과하면서 120 Hz의 반복주파수를 가지는 동기펄스를 생성하였다. 이 동기펄스는 송신부의 마이크로프로세서에 공급되어 시분할 전송을 위한 동기펄스로 사용되었다. 이와 동시에 다이오드브리지의 출력전압은 전압조정기(voltage regulator)을 통과하면서 DC전압을 생성하여 송신부에 사용하는 모든 디바이스의 전원전압으로 사용하였다.

따라서 각 송신부에 포함된 펄스발생기는 시분할 전송을 위한 동기펄스와 송신부회로 전체를 구동하기 위한 DC전원을 동시에 생성하는 기능을 가진다. 이와 같이 전력선을 이용한 펄스발생기를 사용하면 전력선이 공급되는 모든 지점에서 동일한 펄스를 사용하므로 각 송신부와 수신부에서 별도의 동기용 클럭이 필요하지 않아 VLC 시스템의 구성이 매우 편리해지는 장점이 있다.

3.3 송수신 신호의 관측

펄스발생기에서 생성되는 동기펄스의 반복주파수는 전력선주파수의 2배인 120Hz이며, 주기는 약 8.3 ms이고, 펄스폭은 1 ms로 정하여 사용하였다. 이 동기펄스 주기를 2등분하여 Tx1과 Tx2의 전송시간으로 할당하였다. 전방위 수신기를 기준하여 서로 반대방향으로 약 1.5 m의 거리에 2개의 송신부Tx1과 Tx2를 서로 마주보는 방향으로 설치하였다. 이 상태에서 2개의 신호광은 전방위 수신기에 서로 반대방향으로 입사하였다. Tx1과 Tx2에 각각 데이터를 전송하면서 전방위 수신기에서 검출된 파형을 오실로스코프로 관측하였다. Fig. 9는 전력선으로부터 발생한 동기펄스와 2개의 송신부에서 발생한 전송데이터의 전압파형을 관측한 것이다.

Fig. 9(a)는 전력선 주파수를 이용한 동기펄스를 나타낸다. 송신부 Tx1과 Tx2는 동기펄스의 하강 에지를 기준하여 각각 0

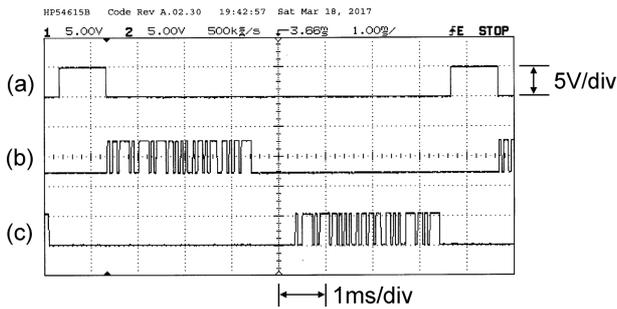


Fig. 9. Voltage waveforms in transmitters.

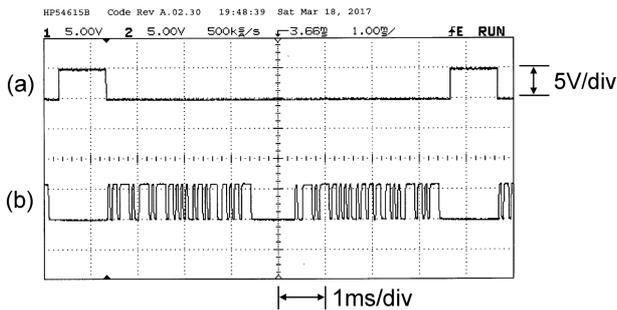


Fig. 10. Voltage waveforms in the receiver.

ms, 4 ms 지점에서 송신데이터를 발생하였다. 송신부Tx1과 Tx2에서 전송데이터율은 모두 19.2kbps의 속도를 사용하였다. Fig. 9(b)는 Tx1의 전송데이터로서 “\t CH-1 \t”에 대한 ASCII 코드의 전압 파형을 나타낸다. Fig. 9(c)는 Tx2의 전송데이터로서 “CH-2 \r\n”에 대한 전압파형을 나타낸다. 전송문자 중에서 “\t”는 “horizontal tab”, “\r”은 “carriage return”, “\n”은 “line feed”를 나타내는 특수 문자이다. Fig. 10은 플렉시블 솔라셀을 이용한 전방위 수신기에서 검출된 전압 파형을 나타낸다.

Fig. 10(a)는 Fig. 9(a) 파형과 동일한 동기펄스를 나타내며, 수신파형의 검출 시간을 확인해보기 위하여 수신파형과 함께 관측한 것이다. Fig. 10(b)는 전 방위 수신기의 검출전압으로서 Tx1과 Tx2의 데이터가 동기펄스의 하강 에지를 기준하여 각각 0ms와 4ms지점부터 시간이 구분되어 수신되었다. 이와 같이 Fig. 9(b), (c)에서 보인 2개의 송신파형은 Fig. 10 (b)의 수신파형에서 각각 시분할되어 한 개의 수신기로 수신됨을 볼 수 있다.

이와 같이 전방위 수신부를 사용하면 서로 반대방향으로 입사하는 2개의 신호광을 한 개의 수신기로 검출하는 데에 활용할 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 검출된 수신전압을 컴퓨터의 직렬단자에 연결하고 컴퓨터의 모니터에 나타나는 문자열을 관찰하였다. Fig. 11은 모니터상에 디스플레이 되는 문자열을 나타낸다.

Fig. 11에서 보는 바와 같이 송신부Tx1과 Tx2에서 각각 전송한 데이터 중에서 문자열“CH-1”과 “CH-2”가 정상적으로 잘 표기되고 있음을 볼 수 있다. 송신부에서 보낸 문자 중에서 특수문자 “\t”, “\r”, “\n”은 모니터상에 나타나는 문자열의 위치를

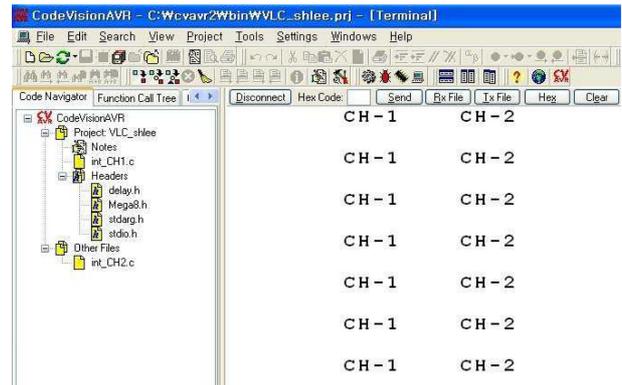


Fig. 11. Displayed data on a monitor.

조정하기 위하여 별도로 사용한 특수문자이므로 모니터상에는 나타나지 않는다.

이와 같이 임의의 방향으로 굽힘이 가능한 플렉시블 솔라셀을 사용하면 전방위 검출이 가능한 가시광 수신기를 쉽게 구현할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이러한 구조를 이용하면 서로 다른 방향으로부터 입사하는 여러 개의 신호광을 한 개의 광검출기로 쉽게 수신할 수 있기 때문에, 다중 신호를 수신하기 위한 근거리 무선 센서 네트워크를 구축하는 데에 많이 활용될 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 플렉시블 솔라셀을 이용하여 전방위 가시광 수신기를 제작하였다. 플렉시블 솔라셀은 가시광을 수신할 수 있는 특성과 사용자가 임의로 굽혀서 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 살려서 솔라셀의 표면을 원통형으로 구성하였으며, 수광패턴과 수신대역폭을 각각 측정하였다. 수광패턴은 원통축과 수직인 ϕ -방향으로는 거의 균일한 수광패턴을 보였으며, θ -방향으로는 기존의 포토다이오드와 유사하게 표면과 수직 방향으로 최대의 수광패턴을 보였다. 수신대역폭은 부하저항 1 k Ω 에서 약 40kHz를 유지하였으며, 부하저항이 클수록 수신대역폭이 감소하는 경향을 보였다.

전방위 수신기의 활용성을 실험해보기 위하여 서로 반대방향으로 입사하는 2개의 신호광을 사용하여 수신상태를 관측하였다. 각각의 신호광에 대한 검출전압의 진폭은 거의 균일한 상태를 보였으며, 서로 반대방향에서 입사하는 신호광을 한 개의 광검출기로 수신할 수 있음을 실험적으로 확인하였다. 이러한 수신기구조는 가시광을 사용하여 근거리 무선 센서 네트워크를 구성하는 경우에, 여러 방향에서 입사하는 가시광 신호를 한 개의 광검출기로 수신할 수 있는 무선접속 점의 구현에 많이 활용될 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] 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.
- [4] 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.
- [5] S. H. Lee, "A wireless optical detector using angle diversity," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Eng. and Science*, Vol. 14, No. 3, pp. 239-243, 2003.
- [6] C. Julian Chen, *Physics of Solar Energy*, Wiley, pp.177-208, 2011.