

조명용 LED와 솔라 셀을 이용한 실내 무선광 통신

Indoor Wireless Optical Communication Using a Lighting LED and a Solar Cell

이 성 호

Seong-Ho Lee

요 약

본 논문에서는 조명용 LED와 솔라 셀을 사용하여 실내 무선광 통신이 가능함을 보인다. 조명용 LED를 광원으로 사용하면 조명과 신호의 송신을 겸할 수 있으며, 솔라 셀을 수광 소자로 이용하면 조명광을 수신하여 에너지를 축적하는 동시에 신호를 검출할 수 있기 때문에 별도의 통신 시설을 설치하지 않고 전송이 가능하여 매우 편리하다. 실험에서는 조명용 LED와 솔라 셀을 사용하여 9.6 kbps 속도로 무선광 데이터 전송을 실시하였다.

Abstract

In this paper, we demonstrate that indoor wireless optical communication is possible with an LED and a solar cell. A lighting LED is used for lighting and signal transmission. A solar cell is used for collecting light energy and signal detection. This scheme is very useful because transmission is possible without any additional communication systems. In experiments, wireless optical communication was carried out at a data rate of 9.6 kbps using a lighting LED and a solar cell.

Key words : Lighting LED, Solar Cell, Optical Transmitter, Optical Receiver, Wireless Optical Communication

I. 서 론

최근에 들어 반도체 기술의 발전으로 인하여 발광 다이오드(LED: Light Emitting Diode)가 통신용 광원은 물론 조명 시설로 그 활용 범위가 넓어지고 있다. 현재 사용되고 있는 조명용 LED의 파장은 주로 약 400~700 nm 부근의 가시광선 영역에 해당하며, 소모 전력은 수 W 정도가 일반적이다. 솔라 셀은 photovoltaic region에서 동작하는 PN 접합으로써 빛 에너지를 전류로 바꾸어 주는 장치이다. 이러한 솔라 셀을 실내의 벽면에 설치하면 조명 에너지의 일부를 수광하여 수 V 크기의 전압과 수백 mA 정도의 전류를 쉽게 생성할 수 있다.

본 논문에서는 최근에 조명용으로 많이 사용하고 있는 가시광선 LED와 솔라 셀을 사용하여 실내의 무선광 통신에 활용할 수 있음을 보인다. 무선광 통신은 비교적 거리가 짧은 가시거리 구간이나 실내에서 신호광을 자유공간으로 방사하고 광검출기로 수신하여 데이터를 전송하는 무선 통신 방식으로서 RF 무선통신 주파수와 상호 간섭이 적고, 가시거리 구간에서만 직접 전송이 되므로 보안성이 높으며, 송수신부의 구성이 간단하여 저렴한 비용으로 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다^{[1],[2]}.

이러한 무선광 통신에서 조명용 LED를 광원으로 사용하면 실내의 조명과 신호광의 송신이 동시에 가능하며, 솔라 셀을 광검출기로 사용하면 조명광을

서울산업대학교 전자정보공학과(Department of Electronic & Information Engineering, Seoul National University of Technology)

· 논문 번호 : 20091120-139

· 교신저자 : 이성호(e-mail : shlee@snut.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 1월 6일

수신하여 에너지를 축적하는 동시에 신호광을 검출할 수 있기 때문에 별도의 통신 시설을 설치하지 않고도 전송이 가능하여 사용하기에 매우 편리하다.

기존의 적외선을 이용한 실내 무선광 통신과 비교할 때, 적외선 영역에서는 고속의 레이저 다이오드나 LED가 많이 개발되어 있어 수십 MHz 이상의 고속통신이 쉽게 가능하지만, 적외선은 가시광선이 아니므로 조명을 겸할 수 없다. 그러나 조명용 LED를 사용하면 수십 kHz 정도의 저속으로 통신 속도가 제한되지만, 가시광선을 방출하므로 조명을 겸할 수 있는 장점이 있다.

실내에서 무선광 통신을 구축하는 경우에는 광원으로 사용하는 LED의 출력광 이외에 주변에 설치된 조명 시설로부터의 빛 때문에 수신부에서 간섭이 발생할 수 있다. 이러한 잡음광의 간섭이 심한 환경에서는 잡음을 줄일 수 있는 방안도 함께 고려하여야 한다^{[3]~[6]}. 잡음광의 간섭을 줄이기 위하여 신호광과 잡음광의 특성 중에서 파장, 편파 혹은 공간적 분포의 차이 등을 이용할 수 있지만, 조명용 LED의 파장은 다른 형광등이나 백열등과 같이 가시광선에 해당하며, 편파도 다른 조명광처럼 불규칙하므로 광필터나 편광기를 사용하여 잡음광을 소거하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 수신부에 고역 통과 필터와 리미터 회로를 구성하여 잡음광의 영향을 감소하였다.

실험에서는 LED와 솔라 셀의 대역폭을 먼저 측정하고, 솔라 셀을 광검출기로 사용할 경우에 LED로부터의 거리에 따른 검출 전압의 변화에 대하여 시뮬레이션과 실측을 실시한 후, 마이크로프로세서와 PC간에 무선광 통신 링크를 구성하고 데이터를 전송하는 순서로 실험을 진행하였다.

II. LED와 솔라 셀의 대역폭 측정

조명용 LED와 솔라 셀을 이용한 무선광 통신을 실험하기 위한 구성도는 그림 1과 같다.

송신부에서는 LED에 주입되는 전류를 변조하여 LED의 출력광을 자유공간으로 방사하고, 수신부에서는 솔라 셀을 사용하여 빛을 검출하여 신호를 수신한다. 무선광 통신 링크를 구성하기 전에 LED와 솔라 셀을 사용하면 어느 정도의 전송 속도가 가능한

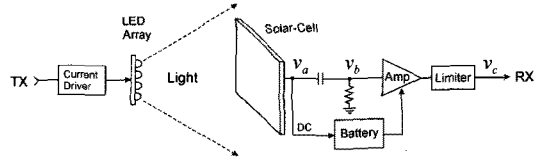


그림 1. 실험 구성도
Fig. 1. Experimental setup.

지 알아보기 위하여 먼저 조명용 LED의 변조 대역폭과 솔라 셀의 수신 대역폭을 차례로 측정하였다.

실험에 사용한 LED는 Seoul Semiconductor사의 WS2182이며, 스펙트럼의 중심 파장이 600 nm이고, 약 400~700 nm 정도의 범위에서 빛을 발생한다. LED 방사 패턴의 반전력 빔 폭은 130° 정도이고, 소모전력은 2 W이다. LED의 변조 대역폭을 측정하기 위하여 LED에 DC 전류 약 100 mA를 가하여 동작점을 정한 후, 진폭 50 mA의 AC 전류를 부가하고 주파수에 따라 수신되는 파형의 진폭 변화를 관찰하여 기록하였다. LED의 변조 대역폭을 측정하기 위하여 사용한 광검출기는 Si APD이며, 이 검출기의 수신 대역폭은 약 10 MHz로서 LED에 비하여 훨씬 높은 대역폭을 가지고 있다. LED의 변조 대역폭을 측정한 결과는 그림 2(a)와 같으며, 3 dB 변조 대역폭은 약 150 kHz로 측정되었다.

실험에 사용한 솔라 셀은 United Solar System사의 Si 솔라 셀 US-3이며, 개방 전압이 12 V, 단락 전류가 400 mA이고, 표면적의 크기는 12 cm×14 cm=168 cm²이다. 솔라 셀은 빛에너지를 전기적 에너지로 바꾸어 전원으로 사용하기 위한 소자이며, 솔라 셀도 포토다이오드와 그 기본 구조가 유사한 반도체 접합으로서 수광 면적이 넓은 광검출기로 간주할 수 있다. 광검출기로 많이 사용되고 있는 포토다이오드와 비교할 때, 포토다이오드는 photoconductive region에서 동작하며, 수광 면적이 수 mm² 이하로 매우 좁아 응답 속도가 빠른 반면, 솔라 셀은 photovoltaic region에서 동작하며 표면적이 수십 cm² 이상으로 넓고 포토다이오드에 비하여 응답 속도가 느리다.

솔라 셀의 수신 대역폭을 측정하기 위하여 변조 대역폭이 약 50 MHz인 통신용 광원을 사용하여 일정한 진폭의 AC 출력광을 생성하고 주파수를 변화하면서 검출 전압의 진폭 변화를 관측하였다. 측정

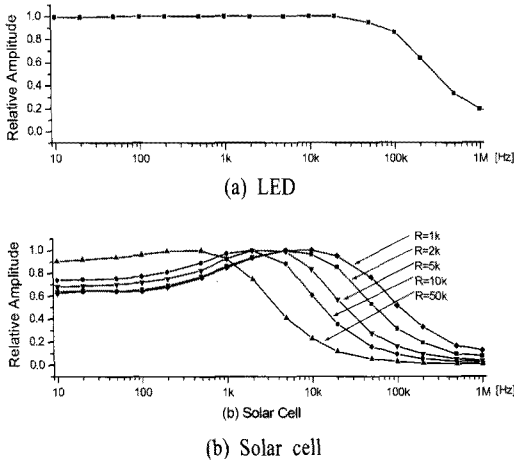


그림 2. LED와 솔라 셀의 대역폭
Fig. 2. Bandwidths of an LED and a solar cell.

결과, 솔라 셀의 수신 대역폭은 양단에 연결된 부하 저항의 크기에 따라 달라지며, 그림 2(b)는 부하 저항을 파라미터로 하여 측정한 솔라 셀의 수신 대역폭을 나타낸다. 솔라 셀도 포토다이오드의 특성과 유사하게 부하 저항이 클수록 대역폭이 줄어드는 특성을 가지고 있으며, 부하 저항 5 kΩ에서 수신 대역폭이 약 10 kHz 정도가 됨을 확인하였다.

III. 전송 거리에 따른 솔라 셀의 검출 전압 변화

LED를 광원으로 사용하고, 솔라 셀을 광검출기로 이용할 경우, 거리에 따른 검출 전압의 변화를 예측하기 위하여 이러한 관계를 수식적으로 표현하였다. LED의 최대 방사강도가 P_0 이고, 최대 방사 방향을 기준한 관측 각도를 θ 라고 할 때, LED의 방사 패턴은 일반적으로 $P(\theta) = P_0 \cos \theta$ 에 가까운 분포를 가진다^[7].

그림 3과 같이 LED 1개가 좌표계의 원점($x'=0, y'=0, z'=0$)에 놓여 있고, LED의 최대 방사 방향을 z' 축으로 정하고, LED로부터 $z'=d$ 만큼의 거리에 사각형의 솔라 셀이 z' 축과 수직하게 설치되어 있다고 할 때, 솔라 셀에서 검출되는 전압 $v(d)$ 를 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(d) = \rho R_L \int_S P(\theta) d\Omega = \rho R_L P_0 \int_S \cos \theta d\Omega$$

$$= V_0 \int_S \cos \theta \times \frac{dS(\hat{z}' \cdot \hat{r})}{r^2}$$

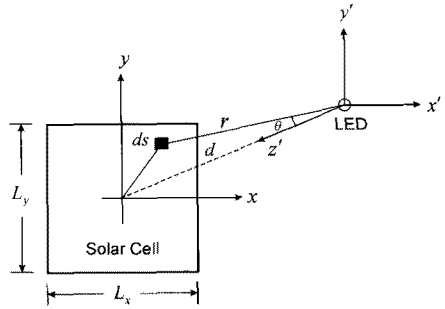


그림 3. LED와 솔라 셀의 위치
Fig. 3. Position of an LED and a solar cell.

$$= V_0 \int_S \cos \theta \times \cos \theta \frac{dS}{r^2} = V_0 \int_S \cos^2 \theta \frac{dS}{r^2}$$

$$= V_0 \int_{x=-L_x/2}^{+L_x/2} \int_{y=-L_y/2}^{+L_y/2} \left(\frac{d}{r}\right)^2 \times \frac{dx dy}{r^2}$$

$$= V_0 \int_{x=-L_x/2}^{+L_x/2} \int_{y=-L_y/2}^{+L_y/2} \frac{d^2}{(x^2 + y^2 + d^2)^2} dx dy \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 솔라 셀의 응답도, R_L 은 솔라 셀에 연결된 부하 저항, $P(\theta)$ 는 LED의 방사 패턴, P_0 는 LED의 최대 방사 강도, S 는 솔라 셀의 표면을 나타내며, $V_0 = \rho R_L P_0$ 로 표기하였다.

각도 θ 는 LED로부터 솔라 셀 표면상의 미소 면적 $dS = dx dy$ 까지의 거리 r 과 거리 d 사이에 이루는 각도이며, 입체각 $d\Omega = \frac{dS(\hat{z}' \cdot \hat{r})}{r^2} = \cos \theta \frac{dS}{r^2} = \cos \theta \frac{dx dy}{r^2}$ 는 솔라 셀 표면상의 미소 면적 dS 가 LED의 위치인 좌표계의 원점을 기준하여 차지하는 입체각을 나타낸다. \hat{z}' 은 솔라 셀 표면에 수직 방향의 단위 벡터로서 z' 이 증가하는 방향과 같고, \hat{r} 은 거리 r 이 증가하는 방향의 단위 벡터, 그리고 L_x, L_y 는 각각 솔라 셀의 가로와 세로의 길이를 나타낸다.

일반적으로 LED를 조명용으로 사용하는 경우에는 여러 개의 LED를 배열하여 조도를 높인다. $M \times N$ 개의 LED를 사용하여 간격이 a 이고, x' 축 방향으로 M 개, y' 축 방향으로 N 개의 배열로 구성된 LED-array의 평면이 z' 축과 수직인 경우, LED-array에 의한 출력 전압 $v(d)$ 는 위의 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$v(d) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N V_0 \int_{x=-L_x/2}^{+L_x/2} \int_{y=-L_y/2}^{+L_y/2} \frac{d^2}{[(x-ma)^2 + (y-na)^2 + d^2]^2} dx dy \quad (2)$$

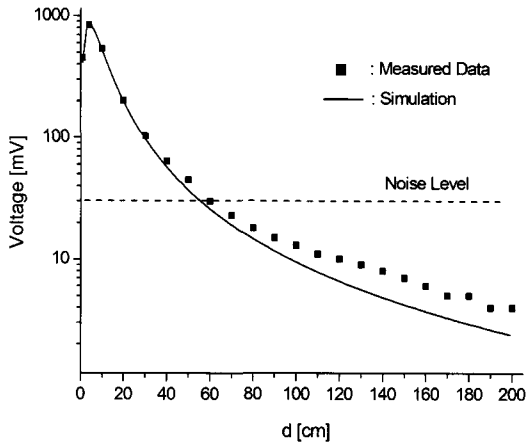


그림 4. 거리에 따른 솔라 셀 전압의 변화
Fig. 4. Voltage variation of a solar cell with distance.

실험에서는 4개의 LED를 사용하여 사각형 모양의 평면상에 $M=2, N=2$ 이 되도록 배열을 구성하였으며, LED 간의 간격 $a=3$ cm이고, LED-array의 중심이 $(x'=0, y'=0, z'=0)$ 에 놓이도록 설치하였다. 바이어스 전류 100 mA인 상태에서 5 kHz의 주파수로 진폭 50 mA의 사인파 전류로 강도 변조하였을 때, LED-array로부터의 거리 z 에 따른 솔라 셀의 검출 전압의 변화를 측정하였다. 여기에 사용된 솔라 셀의 크기는 12 cm×14 cm이며, 측정된 전압은 솔라 셀에 연결된 부하 저항 1.5 kΩ에 걸리는 AC 전압을 기록한 것이다.

그림 4에서 (■) 부호는 측정값이며, 실선의 곡선은 앞의 식 (2)을 사용하여 plotting한 결과를 나타낸다. 측정 전압의 최대값은 $d=4$ cm 부근에서 발생하였으며, 그 크기는 약 840 mV로 측정되었다. 측정치의 최대값을 수식 (2)의 최대값에 대입하여 plotting하면 그림 4에서 실선으로 표현된 곡선과 같다. 솔라 셀의 위치가 LED-array로부터 멀어짐에 따라 솔라 셀의 검출 전압이 감소하는 경향은 측정값과 시뮬레이션에서 유사한 모양을 보이고 있다. 솔라 셀의 위치가 원거리로부터 LED-array 쪽으로 근접함에 따라 검출 전압이 점점 증가하다가 약 4 cm 거리에서 최대값을 가지며, 이보다 더 근접하게 되면 다시 감소하는 특성을 보인다.

그 이유는 솔라 셀의 면적이 LED-array의 면적보다 크기 때문에 솔라 셀 표면이 LED-array에 다가갈수록 LED로부터 솔라 셀의 가장자리 부근으로 입사

하는 빛의 경사각 θ 가 거의 90도에 근접하게 되므로 솔라 셀의 미소면적 dS 가 LED의 위치를 기준하여 차지하는 입체각 $d\Omega$ 가 줄어들어 미소면적 dS 가 수광하는 전력이 감소하며, 이와 동시에 LED의 방사 강도는 $\cos \theta$ 에 비례하므로 각도 θ 가 증가할수록 빛의 강도가 줄어들기 때문이다.

그림 4에 표기된 점선은 실험실의 천정에 설치된 형광등의 빛으로부터 발생하는 120 Hz의 잡음 전압의 진폭이며, 약 30 mV 정도가 검출되었다. 이러한 환경에서는 그림 4에서 보는 바와 같이 약 60 cm 이상의 먼 거리에서는 LED로부터의 신호 전압이 형광등의 잡음 전압보다 작아져 곧바로 수신하기 어렵기 때문에, 이러한 경우에는 LED의 수를 증가시켜 신호광의 세기를 높여주거나, 수신부가 설치된 지점에서 잡음 전압을 줄일 수 있는 방안을 마련하여야 한다. 그런데 LED의 신호광과 형광등으로부터의 잡음광이 모두 가시광선에 해당하므로 광필터를 사용하여 잡음광을 소거하기가 매우 어려우며, 솔라 셀의 넓이가 12 cm×14 cm 정도로 크므로 수신부에 렌즈를 사용하여 신호광의 강도를 높이기도 어려운 상태이다.

본 실험에서는 약 0.1 μ F의 캐퍼시터와 1.5 kΩ의 저항을 사용하여 약 1 kHz의 차단 주파수를 가지는 고역 통과 필터를 구성하고 솔라 셀의 출력단에 연결하여 형광등의 120 Hz 잡음 전압을 감소시켰다. 이와 같이 솔라 셀에 고역 통과 필터가 연결된 상태에서 LED의 입력단으로부터 수신부의 증폭기 출력단 사이의 전송 대역폭을 측정하였다. 측정된 결과는 그림 5와 같다.

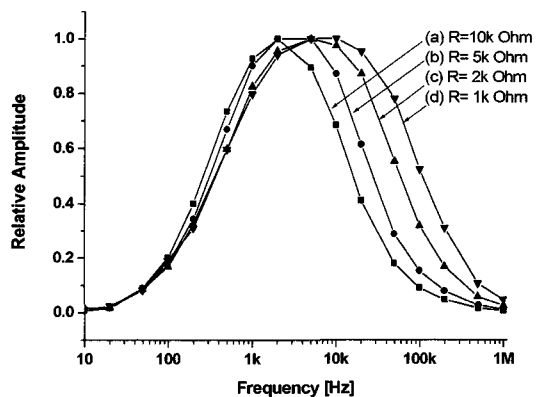


그림 5. LED와 솔라 셀 사이의 전송 대역
Fig. 5. Bandwidth from an LED to a solar cell.

통과 대역의 하한 주파수는 약 1 kHz이며, 이것은 형광등 잡음의 간섭을 줄이기 위하여 고역 통과 필터를 사용하기 때문에 발생한 것이다. 통과 대역의 상한 주파수는 솔라 셀의 수신 대역폭에 의하여 제한되며, 이 값은 그림에서 보는 바와 같이 솔라 셀의 부하 저항이 커질수록 상한 주파수가 감소한다. 그림 5에서 보는 바와 같이 광원으로 LED를 사용하고 솔라 셀을 광검출소자로 사용할 경우, 부하 저항이 약 1~5 kΩ 정도이면, 대략 10 kHz 정도까지는 전송이 가능할 것으로 예측되었다.

IV. LED와 솔라 셀을 이용한 무선광 전송 실험

LED와 솔라 셀을 이용하여 데이터를 전송하는 실험을 실시하기 위하여 앞에서 보인 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 송신부에서는 마이크로프로세서를 사용하여 9.6 kbps의 전송 속도로 데이터를 생성하여 전류원을 변조하였으며, 백색광을 발생하는 조명용 LED 4개를 직렬로 연결하여 2×2 구조의 배열을 만들고 LED의 출력광을 자유공간으로 방사하였다.

LED로부터 약 1.5 m의 거리에 솔라 셀을 설치하여 빛을 수신하였다. 솔라 셀을 이용하여 신호광을 수신하는 경우, 부하 저항이 클수록 검출 전압은 증가하고, 수신 대역폭은 감소하므로, 9.6 kbps로 전송하는 데에 적절한 저항 1~5 kΩ 중에서 1.5 kΩ을 선택하여 솔라 셀에 연결하였다. 솔라 셀은 LED로부터 출력된 신호광과 주변의 형광등으로부터 발생한 실내의 조명광을 흡수하여 전류를 생성한다. 이 전류는 DC와 AC가 혼합된 맥류 형태이며, 이 중에서 DC 전류는 충전용 배터리에 충전되어 수신부에서 사용하는 증폭기를 구동하는 데에 이용된다.

솔라 셀에서 생성된 전류성분 중에서 AC 신호는 고역 통과 필터(HPF)를 통과하여 증폭된 후에 리미터 회로를 통과하면서 송신부에서 전송된 디지털 부호가 다시 생성된다.

솔라 셀을 사용하여 정상적으로 신호광이 검출되는 과정을 확인하기 위하여 앞의 그림 1의 실험구성도에서 수신부에 v_a , v_b , v_c 로 표시된 노드의 전압을 관측하였다. 그림 6은 송신부에서 문자 "F"자 (110011001)에 해당하는 NRZ(Non-Return-to-Zero)의

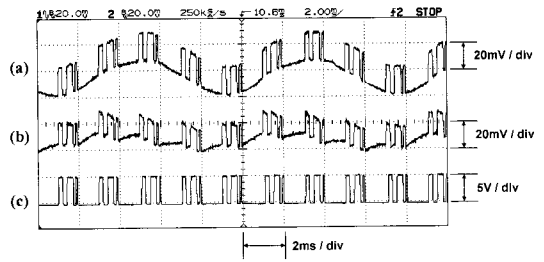


그림 6. 오실로스코프 관측 파형
Fig. 6. Waveforms observed on an oscilloscope.

디지털 부호를 전송할 때, 솔라 셀에서 수신된 신호 파형을 오실로스코프로 관측한 것이다.

그림 6에서 파형(a)는 전압 v_a 의 AC 전압을 나타내며, LED에서 방사된 디지털 파형과 형광등의 잡음 전압이 혼합되어 있는 상태이다. 디지털 파형에 해당하는 신호 전압의 진폭이 약 20 mV 정도이며, 120 Hz의 사인파 형태를 가진 잡음 전압의 진폭이 약 30 mV 정도로 잡음이 매우 심하게 섞여 있는 상태이다.

그림 6의 파형(b)는 120 Hz의 잡음 신호를 줄이기 위하여 $C=0.1 \mu\text{F}$ 의 커패시터를 통과한 후에 검출된 전압 v_b 를 나타낸다. 이 커패시터와 솔라 셀에 연결된 부하 저항 $R=1.5 \text{ k}\Omega$ 은 약 1 kHz의 하한 주파수를 가지는 고역 통과 필터의 역할을 담당한다. 이 파형에서 보는 바와 같이 120 Hz의 잡음광의 진폭이 약 10 mV 정도로 감소하고, 신호 전압의 진폭은 약 18 mV 정도를 유지하여 전압 v_a 에 비하여 전압 v_b 에서 개선된 신호대 잡음비는

$$\begin{aligned} \Delta SNR &= SNR_b - SNR_a \\ &= 20 \times \log(S/M)_b - 20 \times \log(S/M)_a \\ &= 20 \log(18/10) - 20 \log(20/30) \\ &\approx 5.1 - (-3.5) = 8.6 \text{ (dB)} \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 이와 같이 120 Hz의 잡음이 많이 줄어들었으나, 약 10 mV 정도의 잡음이 아직 남아 있으며, 신호 전압에서도 DC 부근 주파 성분이 함께 줄어들기 때문에 디지털 부호를 나타내는 파형의 상단 부분에 경사가 발생하여 파형이 왜곡된 상태를 보이고 있다. 이러한 상태로 곧바로 수신하면 에러가 발생할 수 있다.

그림 6의 파형(c)는 수신부의 최종 출력 전압인 v_o 를 나타내며, 위의 파형(b)로부터 송신부의 디지털 파형을 복구하기 위하여 대역폭 약 30 kHz이고 전압증폭률이 약 250인 증폭기를 통과한 후에, 0 V 이하의 전압과 5 V 이상의 전압을 클리핑(clipping)하여 출력 전압을 생성하였다. 여기에 사용된 증폭기는 단일 극성(+)의 전압으로 동작하는 연산증폭기 LM324를 사용하여 제작하였으며, 솔라 셀에 연결된 축전기의 출력 전압 +6 V의 단일 극성의 전압으로 구동되므로, 하한 전압인 0 V 이하는 자연적으로 클리핑되고, 상한 전압인 +5 V는 증폭기 출력단에 다이오드를 사용하여 클리핑하였다. 이 신호를 PC로 수신한 결과, 송신부에서 출력된 문자와 동일하게 잘 수신됨을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 조명용 LED와 솔라 셀을 이용하여 실내 무선광 통신 실험을 실시하였다. 먼저 조명용 LED와 솔라 셀의 대역폭을 각각 측정하고, LED와 솔라 셀 사이의 거리에 따른 검출 전압의 변화를 시뮬레이션하고 측정하였다. 또한 4개의 LED로 구성된 LED-array를 광원으로 사용하고 솔라 셀을 광검출기로 사용하여 무선광 링크를 구성한 후 9.6 kbps의 데이터 전송 실험을 실시하였다.

이와 같은 구조는 LED와 솔라 셀의 대역폭 제한으로 인하여 수십 kHz 정도의 낮은 주파수로 제한되지만, 조명용 LED를 사용하면 조명 시설과 무선광 송신을 결합할 수 있고, 솔라 셀을 사용하면 주변의 조명광과 LED 수신광을 이용하여 전원을 생성함과 동시에 신호광을 수신할 수 있는 장점이 있다. 따라서 LED와 솔라 셀이 설치된 환경에서 수십 kHz 이하의 음성이나 데이터 전송이 필요한 경우에는 별도의 통신 시설을 설치하지 않고도 전송 채널을 확보할 수 있으므로 매우 편리한 무선광 통신 방식이라고 할

수 있다.

이 구조는 가시광선을 전송 매체로 사용하므로 조명광이 직접 닿는 범위로 신호의 수신에 제한된다. 활용 분야로는 LED 조명 시설이 설치된 대형 전시장 등에서 부스별 안내 방송을 실시하는 경우 인접된 지점의 신호에 간섭 없이 해당 부스에 있는 고객의 휴대용 검출기로 수신할 수 있으며, 그 외에도 실내에 설치된 여러 가지 전자 장치의 제어 신호나 PC간 데이터 전송 등에 쉽게 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Joseph M. Kahn, John R. Barry, "Wireless infrared communications", *Proc. IEEE*, 85(2), pp. 265-298, 1997.
- [2] M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. O'Brien, and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-a review", *Optical and Quantum Electronics*, pp. 349-378, 1997.
- [3] 이성호, "무선광연결에서 편광판을 이용한 광잡음 감소", *한국전자과학기술논문지*, 11(3), pp. 365-371, 2000년 4월.
- [4] 이성호, "빔 분할기를 이용한 무선광 차동검출기", *한국전자과학기술논문지*, 15(1), pp. 96-102, 2004년 1월.
- [5] Seong-Ho Lee, "Reducing the effects of ambient noise light in an indoor optical wireless system using polarizers", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 40, no. 3, pp. 228-231, Feb. 2004.
- [6] 이성호, "무선광 시스템에서 광섬유커플러를 이용한 잡음광의 영향 감소", *한국전자과학기술논문지*, 16(5), pp. 494-500, 2005년 5월.
- [7] Joseph C. Palais, *Fiber Optic Communications*, 4th Ed., p. 150, 1998.

이 성 호



1980년 2월: 한국항공대학교 전자
공학과 (공학사)

1989년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 (공학석사)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 (공학박사)

1995년 3월~현재: 서울산업대학교

전자정보공학과 정교수

[주 관심분야] 광통신, RFID, 안테나