

솔라 셀을 이용한 무선광 인식 장치

A Wireless Optical Identification System Using Solar Cells

이 성 호

Seong-Ho Lee

요 약

본 논문에서는 무선광 인식 장치를 새로이 제안하고 실험하였다. 무선광 인식 장치는 리더와 트랜스폰더로 구성되며, 이들은 동일한 구조로서 조명용 LED의 빛을 전송 매체로 사용하고 솔라 셀로 수신하여 서로 정보를 교환한다. 솔라 셀은 수광 표면이 넓고 평면이어서 렌즈를 사용한 광학적 정렬이 필요하지 않기 때문에 구조가 간단하고 사용이 편리하며, 관리 대상 물체의 표면에 부착하기가 용이하다. 또한 무선광 인식 장치는 빛을 전송 매체로 사용하기 때문에 RF 주파수와와의 간섭이 없어 안정하다. 실험에서는 솔라 셀을 사용하여 거리가 약 1 m에서 트랜스폰더의 정보를 자동으로 인식하는 무선광 인식 장치를 구현하였다.

Abstract

In this paper, we newly propose a wireless optical identification system and carried out experiments. A wireless optical identification system consists of a reader and a transponder. The configuration of a reader is the same as that of a transponder, which uses LED light as transmission media and detects the signal light with a solar cell. Optical alignment with a lens is not required because the absorption area of a solar cell is wide and flat, and it is very easy to attach a solar cell on the surface of an object. As the light wavelength does not interfere with radio frequency, a wireless optical identification system shows stable operation. In experiments, we realized a wireless optical identification system that automatically identifies the transponder data at a distance of 1 m using solar cells.

Key words : Wireless Optical Identification, Lighting LED, Solar Cell, Reader, Transponder

I. 서 론

무선광은 광원으로부터 발생한 빛을 자유공간으로 방사하고, 광검출기를 사용하여 직접 빛을 수신하여 정보를 전달하는 방법으로서, 광원으로는 발광 다이오드(Light Emitting Diode: LED)나 레이저 다이오드(laser diode), 그리고 광검출기로는 PIN 포토다이오드나 APD가 주로 사용된다^{[1]-[3]}. 빛도 전자기파의 일종이며 자유공간에서 정보를 전달할 수 있는 전송 매체이므로, 광원과 광검출기를 사용하면 무선 인식 장치를 만들 수 있다. 본 논문에서는 무선광 인식 장

치(wireless optical identification system)를 새로이 제안하고 실험한다. 무선광 인식 장치는 관리자가 사용하는 리더(reader)와 관리대상 물체에 부착한 트랜스폰더(transponder)로 구성되며, 리더에서 트랜스폰더 쪽으로 문의 신호를 보내면 트랜스폰더는 그 빛을 수신하여 자신이 보유한 데이터를 리더 쪽으로 보내어 응답하는 구조로서 리더와 트랜스폰더 사이에서 신호의 교환 과정은 무선 인식 장치(Radio Frequency Identification: RFID)와 유사하다고 볼 수 있다.

실험에서는 리더와 트랜스폰더의 수광 소자로 솔라 셀(solar cell)을 사용하였다. 솔라 셀은 넓은 수광면

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

· 논문 번호 : 20100216-006

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

· 수정완료일자 : 2010년 4월 5일

적을 가지는 PN 접합으로써 태양광과 같은 빛에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 데에 주로 사용되며, 현재 많이 사용되고 있는 실리콘 솔라 셀의 경우 반응과장이 가시광선과 적외선 파장에 걸쳐 넓게 분포한다. 무선광 인식 장치의 수광 소자로 솔라 셀 이외에도 포토다이오드를 사용하여 쉽게 시스템을 구성할 수 있다. 그러나 포토다이오드는 응답 속도를 높이기 위하여 표면적이 보통 수 mm^2 이내로 매우 작기 때문에, 무선광 인식 장치의 수광 소자로 사용하기 위해서는 렌즈를 사용하여 빛을 집속해야 하고, 수광 표면에 초점이 잘 형성되도록 광학적 정렬 작업이 필요하다. 또한 트랜스폰더가 부착된 물체가 이동하는 경우에는 초점이 수광 표면으로부터 벗어나게 되어 트랜스폰더가 반응하지 않아 불안정해질 수 있으며, 렌즈를 부착하는 경우 물체의 표면에 돌출되어 사용하기에 어려운 점이 있다. 포토다이오드 대신에 고전압 전원 모듈을 부착한 APD를 사용하면 이러한 문제를 개선할 수 있지만 비용이 상대적으로 높아지는 부담이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 솔라 셀을 수광 소자로 사용하여 무선광 인식 장치를 구성하였다. 솔라 셀은 수광 면적이 수 cm^2 이상으로 크기 때문에 수광 표면에 빛을 집속하기 위하여 렌즈를 사용한 광학적 정렬 작업을 할 필요가 없으며, 대략적으로 신호광의 빔이 존재하는 영역에 놓이면 쉽게 반응하므로 사용에 특별한 주의를 요하지 않는다. 또한 수광 표면이 평면이어서 물체의 표면에 부착하는 경우 돌출 부분이 없이 매끄럽게 부착할 수 있고, 가격이 저렴하여 무선광 인식 장치의 수광 소자로 사용하기에 매우 적절하다.

실리콘 솔라 셀은 가시광선과 적외선에 걸쳐 넓은 파장영역에서 반응하므로 무선광 인식 장치의 발광 소자로 적외선이나 가시광선의 LED를 모두 사용할 수 있으며, 가시광선을 방출하는 조명용 LED를 광원으로 사용하면, 조명과 통신을 겸할 수 있는 장점이 있다. 조명용 LED를 자동차의 조명시설로 사용하는 경우에 자동차의 데이터를 자동 관리하기 위한 인식 시스템의 개발에 쉽게 적용할 수 있는 가능성을 고려하여, 본 논문에서는 조명용 LED를 무선광 인식 장치의 광원으로 채택하여 실험하였다. 무선광 인식 장치의 실험을 위하여 먼저 LED의 방사

패턴과 솔라 셀의 검출 전압을 차례로 측정하고, 최대 인식 거리를 계산하며, 이어서 동작 실험을 실시하는 순서로 진행하였다.

II. 무선광 인식 장치의 구조

솔라 셀과 조명용 LED를 이용한 무선광 인식 장치의 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 왼쪽의 점선 부분은 관리자의 컴퓨터로 연결된 리더를 나타내며, 오른쪽 부분은 인식하고자 하는 대상 물체에 부착되는 트랜스폰더에 해당한다.

트랜스폰더와 리더 회로는 동일한 구조를 가지며, 수광용 소자인 솔라 셀과 발광용 소자인 LED, 그리고 수신 신호를 처리하고, 출력 신호를 생성하기 위한 구동 회로로 이루어져 있다. 트랜스폰더와 리더는 서로 마주 바라보고 있으며, 리더로부터 트랜스폰더 쪽으로 문의 신호에 해당하는 빛이 방사되면, 트랜스폰더는 자신에 대한 문의임을 인식하고, 자신이 보유하고 있는 정보를 리더 쪽으로 다시 방사하여 응답함으로써 자동 인식 작용이 완료된다. 신호의 진행 과정을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 트랜스폰더의 세부 구조를 나타내면 그림 2와 같다.

리더로부터 문의 신호가 발생하여 트랜스폰더의 솔라 셀 표면에 입사하면 수신광의 세기에 비례한 출력 전압이 솔라 셀의 부하 저항에 발생한다. 솔라 셀의 출력 전압은 증폭되어 마이크로프로세서의 UART(직렬 통신 포트)의 RX(수신) 단자에 전달된

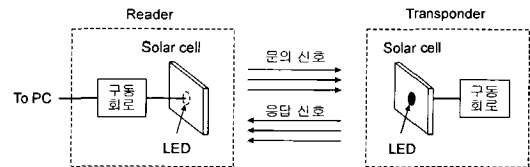


그림 1. 무선광 인식 장치의 구조
Fig. 1. Wireless optical identification system.

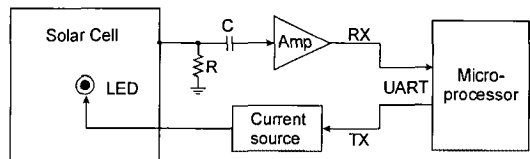


그림 2. 트랜스폰더 회로
Fig. 2. Transponder circuit.

다. 마이크로프로세서는 수신 신호를 읽어서 자신에게 문의 신호가 도달했음을 인식하고, 자신이 보유하고 있는 관련 정보, 즉 응답 신호를 UART의 TX (송신) 단자에 내보낸다. 이 신호가 전류원에 가해져 LED의 구동 전류를 변화시키면 응답 신호에 비례한 출력광이 LED에서 방사되어 리더쪽으로 전달된다. 리더의 솔라 셀에서는 트랜스폰더의 LED로부터 방출된 응답 신호를 검출하여 관리자의 컴퓨터로 데이터를 전달함으로써 1사이클에 해당하는 문의 신호와 응답 신호의 교환이 종료된다.

III. 최대 인식 거리

3-1 LED의 방사 패턴 측정

조명용 LED와 솔라 셀을 사용하여 구성된 무선광 인식 장치가 어느 정도의 거리까지 정상적으로 동작하는지 알아보기 위하여 LED의 방사 패턴과 솔라 셀의 검출 전압을 차례로 측정하였다. 실험에서 사용한 LED의 중심파장은 600 nm이고, 약 400~700 nm 정도의 파장대역에서 빛을 발생하며, 소모 전력은 2 W, 3 dB 변조대역폭은 약 150 kHz이다. 발광 표면이 평면인 표면 방출 LED의 경우에는 방사 패턴이 $\cos\theta$ 에 근접하지만^[4], 실험에 사용한 LED는 발광표면에 반구형의 플라스틱 렌즈가 접착된 구조이므로 평면형 LED의 방사 패턴과 달라진다.

실험에 사용한 LED의 방사 패턴을 측정하기 위하여 LED를 스텝 모터의 회전축에 부착하여 규칙적으로 360도 회전시키면서, 약 1 m 정도의 거리에 광검출기를 설치하고, LED의 회전각도에 따른 강도(intensity)의 변화를 검출하여 기록하였다. LED 전방의 최대 방사 방향을 z축으로 정하고, 각도 θ 에 따라 측정된 LED의 방사 패턴은 그림 3과 같다.

그림 3의 방사 패턴에서 빛의 강도를 나타내는 간격은 linear scale이며, 최대값이 1로 정규화된 것이다. 이 방사 패턴에서 각도 θ 에 따른 강도의 변화를 보면 약간의 굴곡이 존재하지만, 거의 $P(\theta) = P_0 \cos^3\theta$ 에 가까운 변화를 보였다. 여기에서 P_0 는 z축 방향으로의 최대 방사 강도를 나타낸다.

3-2 솔라 셀 검출 전압의 변화

앞의 3-1절에서 소개한 LED를 광원으로 사용하

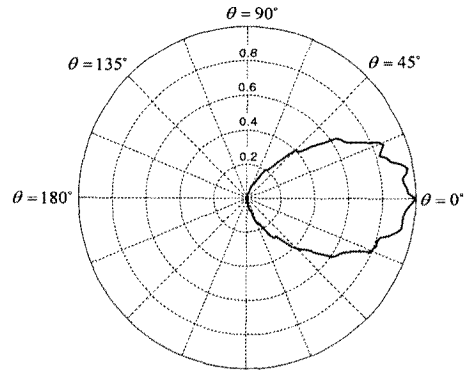


그림 3. LED의 방사 패턴
Fig. 3. The radiation pattern of an LED.

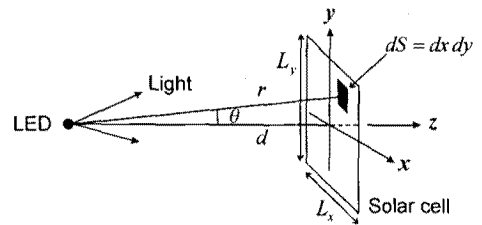


그림 4. LED와 솔라 셀의 위치
Fig. 4. Positions of an LED and a solar cell.

고, 솔라 셀을 광검출기로 사용하여 무선광 인식 장치를 구성하는 경우에 LED로부터 솔라 셀 사이의 직선거리에 따른 검출 전압의 변화를 살펴보면 다음과 같다. 그림 4는 LED의 위치를 좌표계의 원점으로 정하고, LED 전방의 최대 방사 방향을 z축으로 정할 때, $z = d$ 인 위치에 솔라 셀 표면이 z축과 수직으로 놓여 있는 구조를 나타낸다.

LED의 출력광이 솔라 셀에 입사하면 흡수된 광전력에 비례한 전류가 생성되고, 이 전류에 의하여 솔라 셀 양단에 연결된 부하 저항에 전압이 발생한다. 이 전압은 앞의 그림 2에 보인 바와 같이 부하 저항에 연결된 증폭기를 통과하면서 전압이 증폭된다. 이 때 증폭기의 출력 전압 v_{out} 을 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 v_{out} &= \rho R_L G \int_S P(\theta) d\Omega = \rho R_L G \int_S P_0 \cos^3\theta d\Omega \\
 &= V_0 \int_S \cos^3\theta \times \frac{dS(\hat{z} \cdot \hat{r})}{r^2} = V_0 \int_S \cos^3\theta \times \cos\theta \frac{dS}{r^2} \\
 &= V_0 \int_S \cos^4\theta \frac{dS}{r^2} = V_0 \int_{x=-L_x/2}^{+L_x/2} \int_{y=-L_y/2}^{+L_y/2} \left(\frac{d}{r}\right)^4 \times \frac{dx dy}{r^2} \\
 &= V_0 \int_{x=-L_x/2}^{+L_x/2} \int_{y=-L_y/2}^{+L_y/2} \frac{d^4}{(x^2 + y^2 + d^2)^3} dx dy \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기에서, $P(\theta) = P_0 \cos^3 \theta$ 는 앞의 3-1절에서 측정 한 LED의 방사 패턴 함수이고 P_0 는 z축 방향으로 LED의 최대 방사 강도를 나타낸다. 그리고 ρ 는 솔라 셀의 응답도, R_L 은 솔라 셀에 연결된 부하 저항, G 은 증폭기의 전압 이득, S 는 솔라 셀의 표면을 나타내며, $V_0 = \rho R_L G P_0$ 로 표기하였다. 각도 θ 는 LED로부터 솔라 셀 표면상의 미소면적 $dS = dx dy$ 까지의 거리 r 과 z축 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 미소면적 dS 가 LED의 위치인 좌표계의 원점을 기준하여 차지하는 입체각을 나타낸다. \hat{z} 은 z축 방향의 단위 벡터, \hat{r} 은 거리 r 이 증가하는 방향의 단위 벡터, 그리고 L_x, L_y 는 각각 솔라 셀의 가로와 세로의 길이를 나타낸다.

그림 5는 마이크로프로세서의 UART 단자의 전송 데이터율과 같은 9,600 bps 속도로 15 Vpp의 구형파 전압을 사용하여 LED를 강도 변조하였을 때, 사각형의 표면을 가진 솔라 셀의 가로 길이 L_x 와 세로 길이 L_y 를 파라미터로 하여, 거리 d 와 증폭기의 출력 전압 v_{out} 의 관계를 나타낸 것이다.

그림 5에서 실선으로 표기된 곡선 (a)~(e)는 각각 솔라 셀의 크기가 각각 (a) $L_x=L_y=2$ cm, (b) $L_x=L_y=4$ cm, (c) $L_x=L_y=6$ cm, (d) $L_x=L_y=8$ cm, (e) $L_x=10$ cm, $L_y=12$ cm일 때 앞의 식 (1)을 사용하여 plotting한 그래프이며, 부호(■)는 실험을 통하여 얻은 측정값을 나타낸다. 실험에서 솔라 셀의 응

답도는 약 0.4 mA/W, 증폭기의 전압 이득은 약 100이며, 부하 저항 $R_L=4$ k Ω 이다. 수광면적이 서로 다른 여러 개의 솔라 셀에 대한 출력 전압을 측정하기 위하여 실제 크기가 10×12 cm인 솔라 셀의 표면에 불투명체의 차광막을 부착하고, 차광막의 중앙에 곡선 (a)~(e)에 표기된 가로 세로의 크기와 같은 정사각형의 슬롯을 만들어 측정하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 LED로부터 솔라 셀 사이의 거리 d 가 증가할수록 검출 전압의 크기는 감소하며, 거리가 일정할 때 솔라 셀의 수광면적이 클수록 검출 전압은 증가함을 볼 수 있다. 이러한 변화는 솔라 셀의 수광 표면이 LED를 기준하여 차지하는 입체각의 크기에 따라 달라지기 때문에 발생하는 현상이다.

실험에서 사용한 솔라 셀의 출력 전압은 약 20 V에서 포화 현상을 보이며, 이 값은 100 W 형광등이 약 30 cm 정도로 근접할 때에 해당하는 전압이다. 솔라 셀로부터 형광등의 거리가 1 m 이상이면 솔라 셀의 응답도에 변화가 거의 없어 상수로 간주할 수 있다. 그림 5에서는 주변의 잡음광의 영향을 배제하고 거리에 따른 신호광의 검출 전압만을 나타낸 것이다.

3-3 최대 인식 거리

무선광 인식 장치의 최대 인식 거리는 리더와 트랜스폰더에 설치된 마이크로프로세서의 UART 입력 단에서 디지털 부호를 정상적으로 인식할 수 있는 범위로 정할 수 있다. UART의 수신단에서 디지털 부호가 “1”의 상태로 인식되는 임계전압이 약 2 V이므로, 솔라 셀로부터 증폭기를 통과한 후의 검출 전압이 이 값과 같아질 때, 즉 $v_{out} = v_t = 2$ V가 되는 지점까지의 거리 d 가 이 시스템의 최대 인식 거리가 된다. 앞의 그림 5에서는 곡선 (a)~(e)의 솔라 셀에 대한 최대 인식 거리(detection range)가 그래프의 하부 좌측에 표시되어 있다. 솔라 셀의 크기와 최대 인식 거리 사이의 관계를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 앞의 식 (1)을 사용하여 최대 인식 거리의 변화를 연속적으로 나타내면 그림 6과 같다.

그림 6에서 솔라 셀은 가로와 세로의 길이가 동일한 정사각형으로 간주하고, 한 변의 길이를 L_x 로 표기하였다. 그림 6에서 실선으로 표기된 곡선은 식

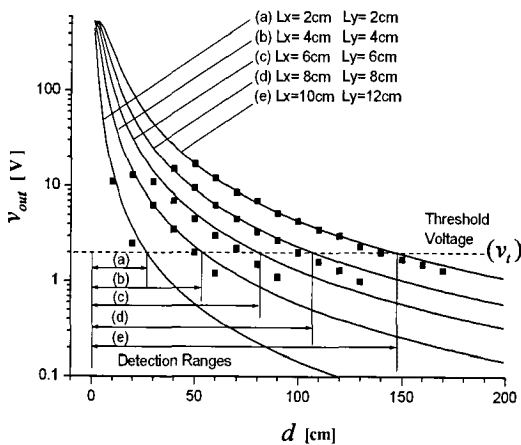


그림 5. 거리에 따른 검출 전압의 변화
Fig. 5. Detected voltage variation with distance.

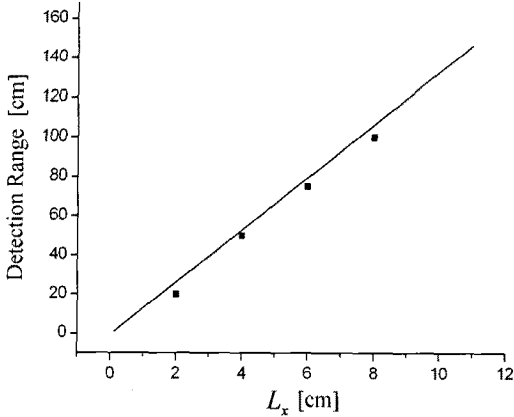


그림 6. 솔라 셀의 크기와 최대 인식 거리의 관계
Fig. 6. The relation between solar cell size and detection range.

(1)을 사용하여 검출 전압이 마이크로프로세서의 UART 임계전압에 해당하는 2 V와 같아지는 거리 d 를 계산하여 plotting한 것이며, 부호(■)는 실험에서 측정된 결과를 나타낸다. 이 그림에서 보면 실험에서 사용한 무선광 인식 장치의 최대 인식 거리가 솔라 셀 한 번의 길이에 거의 선형적으로 비례함을 알 수 있으며, 솔라 셀 한 번의 길이가 8 cm 정도인 경우에 인식 거리가 약 1 m 정도가 됨을 알 수 있다. 본 실험에서 솔라 셀에 연결하여 사용한 증폭기는 gain-bandwidth product가 약 1 MHz인 비교적 저가의 연산증폭기를 사용하여 마이크로프로세서의 UART 전송 속도 9.6 kbps에 적합하도록 대역폭 10 kHz에서 전압 이득이 약 100이 되도록 회로를 구성하였다. Gain-bandwidth가 더 높은 증폭기를 사용하여 전압 이득을 높이면 최대 인식 거리는 증폭기 이득에 비례하여 증가할 수 있다.

IV. 동작 실험

리더와 트랜스폰더 사이에 정보의 교류가 정상적으로 발생하는지 확인하기 위하여 앞의 그림 1과 같이 무선광 인식 장치를 구성하여 실험하였다. 실험에 사용한 LED는 앞의 3-1절에서 소개된 조명용 LED 이고, 솔라 셀의 크기는 가로 세로의 길이가 10×12 cm이다. 솔라 셀의 부하 저항은 4 kΩ, 증폭기의 전압 이득은 약 100이며, 이러한 상태에서 3 dB 수신 대역폭은 약 10 kHz 정도로 측정되었다. 실험에 사

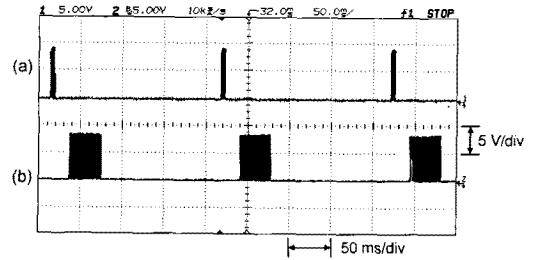


그림 7. 오실로스코프로 관측한 신호파형
Fig. 7. Signal waveforms observed on an oscilloscope.

용한 마이크로프로세서는 Atmel사의 Atmega32를 사용하였으며, UART 포트를 통한 송수신 프로그램은 CodeVision compiler를 사용하여 작성하였다.

그림 7은 리더와 트랜스폰더 사이의 거리가 약 1 m일 때, 9.6 kbps 전송 속도로 문의 신호와 응답 신호가 교환되는 상태에서 리더와 트랜스폰더의 솔라 셀에 연결된 증폭기의 출력 신호를 오실로스코프로 관측한 파형이다.

그림 7의 파형(a)는 리더로부터 트랜스폰더 쪽으로 문의 신호를 보내는 상태를 나타내는 디지털 부호로서 본 실험에서는 편의상 문자 "Q"을 200 ms 주기로 전송하였다. 파형(b)는 트랜스폰더로부터 리더 쪽으로 보내는 응답 신호로서, 본 실험에서는 편의상 "Optical ID test OK"라는 문장을 전송하도록 프로그램하였다.

그림 8은 솔라 셀과 조명용 LED를 사용하여 실험실에서 제작한 무선광 인식 장치의 외관을 나타낸다. 이러한 무선광 인식 장치를 자동차 관리 시스템

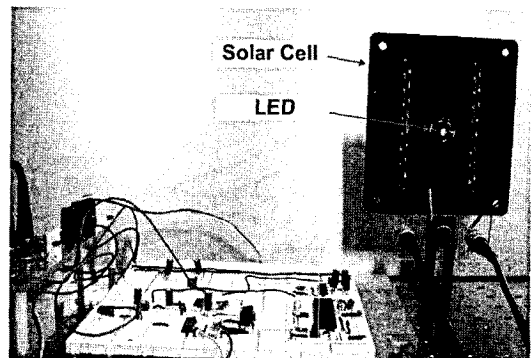


그림 8. 실험에서 제작된 무선광 인식 장치
Fig. 8. A wireless optical identification system fabricated in experiment.

으로 사용하는 경우에는 자동차의 차폭등이나 방향 지시등과 같은 보조등이 설치되어 있는 위치에 LED와 솔라 셀을 부착하고 차량 내부에 회로를 구성하여 트랜스폰더를 구성할 수 있다. 리더는 자동차가 출입하는 통로 측면에 설치하면 된다. 이와 같은 무선광 인식 장치에서 트랜스폰더의 응답 신호로는 자동차에 장착된 부품 목록, 자동차 시험 검사 기록, 유지보수 내역, 차량 등록 현황, 요금 관리 등에 필요한 여러 가지 주요 자료를 사용하면 편리하다.

V. 결 론

본 논문에서는 조명용 LED와 솔라 셀을 사용하여 무선광 인식 장치의 구조를 제안하고 최대인식 거리를 계산하였으며, 동작 실험을 실시하였다. 솔라 셀은 수광면적이 수 cm^2 이상으로 넓어서 빛을 집속하기 위한 별도의 부가장치나 노력이 필요하지 않으며, 수광 표면이 평면이어서 물체의 표면에 견고한 상태로 쉽게 부착할 수 있기 때문에 트랜스폰더의 수광 소자로 사용하기에 편리하다. 실험에서는 솔라 셀을 사용하여 거리가 약 1 m에서 트랜스폰더의 정보를 자동으로 인식하는 무선광 인식 장치를 제작하여 실용적으로 활용할 수 있음을 보였다.

무선 인식 장치(RFID)와 비교할 때, RFID에서는 태그(tag)의 안테나가 도체면 가까이 부착된 경우, 도체상의 유도 전류의 발생으로 인하여 신호의 감지가 어려워지는 경우가 발생하지만^[5], 무선광 인식 장치에서는 도체면에 트랜스폰더를 부착하여도 이러한 현상이 발생하지 않는다. 또한 동일한 RF 주파수를 가지는 두 개의 RFID가 서로 근접한 경우에는 서로간의 주파수 간섭에 의한 오동작이 발생할 수 있으나, 무선광에서는 빛의 파장이 RF 대역의 파장에 비해서 현저히 짧아 직진성이 강하기 때문에 빔이 존재하는 좁은 영역으로 신호 전송이 제한된다.

따라서 신호광이 서로 중첩되지 않는 경우에는 인접 시스템 간에 간섭에 의한 오동작이 발생하지 않으며, 다른 RF 주파수와와의 간섭도 발생하지 않아 매우 안정하다. 약 1 m 정도의 인식 거리를 기준으로 가격을 비교하는 경우에 무선광 인식 장치가 UHF 대역의 RFID에 비하여 1/100 이하 정도로 매우 저렴하다. 반면에 무선광 인식 장치는 가시거리에서만 신호전송이 가능하기 때문에 유전체 내부에 트랜스폰더를 설치하여 사용하기 어려운 제한이 있다.

무선광 인식 장치의 적절한 활용 분야로는, 고속도로 통행 요금 자동 관리, 주차장 요금 관리, 자동차 생산 및 수리 장소에서 부품 교체 및 유지보수에 관한 이력 관리, 자동차 시험검사 결과 기록 관리 등 주요 데이터를 자동화하기 위한 인식 시스템의 개발에 쉽게 적용할 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] 이성호, "무선광 연결에서 솔라 셀을 이용한 잠음광 소거", 한국천자과학기술논문지, 14(4), pp. 336-342, 2003년 4월.
- [3] 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.
- [4] Joseph C. Palais, *Fiber Optic Communications*, 4th Ed. p. 150, 1998.
- [5] 이성호, 서정형, "금속 표면 부착용 RFID 코일 제작", 한국전자과학기술논문지, 19(7), pp. 754-760, 2008년 7월.

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 교수

[주 관심분야] 광통신, RFID, 안테나