

LED 실내조명을 이용한 광무선 원격제어

손경락* · 손창우¹

(원고접수일 : 2012년 5월 31일, 원고수정일 : 2012년 10월 16일, 심사완료일 : 2012년 10월 16일)

Optical Wireless Remote Control Using Indoor LED Lightings

Kyung-Rak Sohn* · Chang-Woo Sohn¹

요약 : 현재 LED 조명을 이용한 실내 광무선 통신 기술은 상당히 폭 넓게 연구되고 있다. 각 가정에 설치된 전력선 인프라를 조명통신에 접목할 경우 홈 네트워크의 광대역 접속에 대한 요구를 충족시킬 수 있는 매우 유용한 방법으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 LED를 실내조명과 원격제어를 위한 통신용의 두 가지 조건을 만족시키는 시스템을 설계하고, 광무선제어 성능을 검증하기 위하여 모형차를 제작하여 통신조건을 만족시키는 적절한 조도를 제시하였다. 간이 테스트베드를 이용하여 동작실험을 성공적으로 수행하였다. 가시권에서만 통신할 수 있는 제한에도 불구하고 제안된 기술은 원격제어 시스템이 필요한 전자파 장애지역에서 광무선 통신 기술을 적용하는 새로운 응용영역을 개척할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 광무선 통신, LED, 조도, 시야각, 무선제어

Abstract: At present, indoor optical wireless communications using LED lightings has been widely studied. The combination of this technology to the low voltage powerline grid installed in each home makes an efficient method for fulfilling the premise of broadband access for home networking. In this paper, white LEDs were used for both illumination and remote-control, so that information can be broadcast within a room for control the optical wireless systems. We implemented a model car to evaluate the performance of optical wireless remote-control. The requirement for levels of illumination suitable for communication were investigated and applied to design the test-bed. In spite of limitation of line-of-sight communications, it will open up new applications to the optical wireless remote control system in an electromagnetic interference region.

Key words: Optical wireless communications, LEDs, Illuminance, View angle, wireless control

1. 서 론

광무선 통신시스템은 적외선 파장에서 가시광선과 자외선 파장영역의 범위를 가지는 광파에 의존하여 오디오 및 디지털 정보를 무선으로 전달하는 기술이다[1, 2]. 기존의 전자파 통신과 비교하면 다음과 같은 장점이 있다. 넓은 파장영역을 사용하면서도 전파관리국의 허가를 받을 필요가 없으며 주파수 이용료도 지불할 필요가 없다. LED의 특성상

소비전력이 적고 소형으로 시스템을 구성할 수 있으며, 전파방해(jamming)에 강하고 데이터 전송속도가 빠른 특징을 가지고 있다.

지금까지 LED 조명을 기반으로 한 다양한 형태의 융합기술이 연구되어져 왔다. 한국전자통신연구원은 삼성전자 등과 공동으로 가시광 무선통신 PHY/MAC 국제표준을 진행하였으며, 2011년 8월 이와 관련한 IEEE 802.15.7(TG7)을 세계 최초로

* 교신저자(한국해양대학교 전자통신공학과, E-mail: krsohn@hhu.ac.kr, Tel: 051-410-4312)

¹ 한국해양대학교 전자통신공학과, E-mail: scw0208@naver.com, Tel: 051-410-4908)

표준화하였다[3]. 이것은 2020년 300조 규모의 LED 시장에서 LED 시스템 조명관련 주도권을 확보할 것으로 평가받고 있다. 2011년 TED 강연에서 에든버러 대학의 Hass 교수는 부반송파 인덱스 변조 직교분할다중화(Subcarrier-index modulation orthogonal frequency division multiplexing: SIM OFDM)기법을 이용하여[4] 상용화된 조명용 LED로 고품질 동영상을 끊어짐 없이 연속적으로 전송할 수 있음을 시연하였다[5]. LED 조명의 통신 융합 기술은 무인 이동체를 원격 제어하는 분야에도 이용할 수 있다. 삼성전자는 대형건물 내에서 LED 조명에 기반한 위치인식기술을 개발하였고, 이를 적용한 로봇으로 LED 조명의 식별자를 이용하여 특정지점을 자율적으로 찾아가는 프로토타입을 시연하였다. 2010년 미국의 MIT에서는 6개의 LED 광원과 1개의 애버런치 광다이오드를 이용한 광무선 통신으로 6축의 수중 추진체를 작동하는 실험을 수행하였다[6]. 송신단과 수신단의 거리를 10 m로 하고 수중 추진체를 깊이 1 m의 풀장에 위치시킨 상태에서 600 kbps 데이터 전송을 성공적으로 수행하였음을 발표하였다.

본 연구에서는 전자파장애로 인한 오작동이 우려되는 특정시설물 또는 추가적인 무선통신 인프라를 필요로 하는 실내, 지하구조물 등에서 실내 LED 조명만으로 원격제어가 가능한 광무선 시스템 개발을 시도하였다. 사용한 파워 LED의 거리에 대한 조도를 측정하였으며, 이를 근거로 광무선 통신이 가능한 LED 조명의 최소 조도를 확보하는 구조를 제안하였다. 모형차를 제작하여 주어진 조건하에서 완벽하게 조정됨을 보였다.

2. 시스템 설계 및 제작

Figure 1은 실내 LED 조명기반 제어시스템의 기본 구성도이다. 모든 LED는 조명의 역할을 위하여 전력선으로 연결되어 있다. 통신기능을 부가하기 위하여 전력선 모뎀을 이용하게 되면 데이터 통신은 서버에서 관리할 수 있다. 각각의 LED 조명에도 통신 인터페이스 기능을 담당하기 위한 회로가 장착되어야 한다. 통신기능이 부가된 LED 조명은 실내에 설치 시 조명간의 간격(D)을 결정하는 것은

끊어짐 없는 연속 통신을 보장하기 위하여 매우 중요한 파라미터이다. **Figure 1**에서 조명으로부터 H 만큼 떨어진 위치에 광무선 통신으로 제어되는 이동체가 있다면 통신을 위한 초소한의 조도가 보장되어야 한다. 두 조명의 시야각 (Viewing angle)이 겹치는 가장자리에서의 조도는 반드시 확인해야만 한다.

Figure 2는 LED의 시야각에 의해 형성되는 통신 채널링크를 보여준다. 모형차의 이동에 따라 수신광 전력 변동이 발생하므로 반 시야각 θ 에 따른 LED 출력광 전력(P_t)과 광 검출기의 수신광 전력(P_r)과의 관계를 고려하면 식 (1)로 표현할 수 있다 [7].

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{(n+1)\cos^n\theta}{2\pi} \left(\frac{\cos\theta}{H} \right) A_{\text{det}} \left(\frac{n_c}{\sin\theta} \right) \quad (1)$$

여기서 n 은 전송빔의 램버시안 (Lambertian) 차수로 $n = \frac{\log(0.5)}{\log(\cos\theta)}$ 이며, A_{det} 는 수신기의 수신면적, n_c 는 수신기에 장착된 콜리메이터의 굴절률이다. 수광 효율을 높이기 위해서는 다수개의 광 검출기 (Photodiode: PD)를 사용하여 수신면적을 넓히고 굴절률이 높은 콜리메이터를 사용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

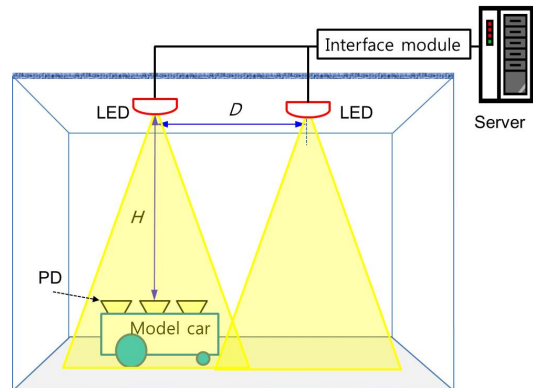


Figure 1: Schematic of an indoor LED lighting communication system. D is the distance between adjacent LED lightings and H is the height from the LED to the model car.

본 연구에서 반 시야각이 $\sim 55^\circ$ 인 백색 파워 LED (PP00W-8L61- star 1W, Photron)를 사용하였다. **Figure 3**은 40 cm 거리에서 콜리메이터 (ACL-002

P7용, SEKONIX)의 장착 유무에 따라 LED 광량 분포가 어떻게 나타나는지 보여주는 사진이다. LED에 콜리메이터를 장착하지 않은 경우 (Figure 3 (a)) 비교적 넓은 범위에서 고른 광량분포를 보이는 반면, 콜리메이터를 장착하면 (Figure 3(b)) 집광효과로 인하여 특정영역으로 빔이 집중한다.

Figure 4는 Figure 3의 상태에서 시야각의 함수로 측정된 조도값을 비교한 그래프이다. LED에 콜리메이터를 사용하지 않은 경우 측정 시야각 범위내에서 60 lux 내외의 비교적 약하지만 고른 광전력 분포를 보여준다. LED에 콜리메이터를 부착하면 중심에서는 3500 lux에 달하는 높은 조도를 보이지만 시야각이 커질수록 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 조명을 위해서는 300-400 lux의 고른 조도분포를 보이는 것이 바람직하지만

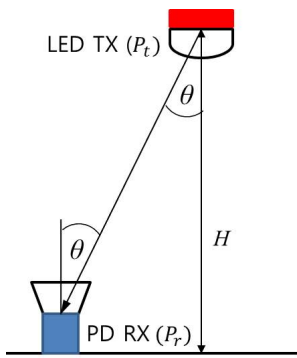


Figure 2: Single channel link. θ represents the link field of view-half angle.

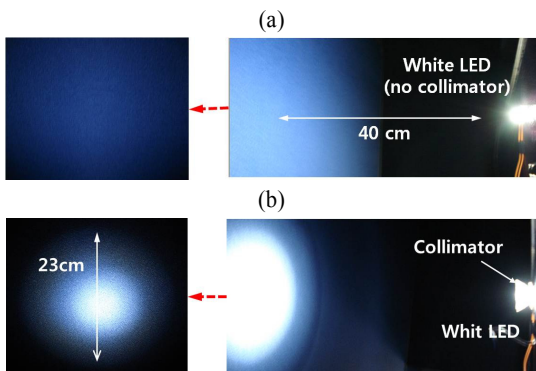


Figure 3: Photograph of distribution pattern of lightwave (a) without and (b) with collimator.

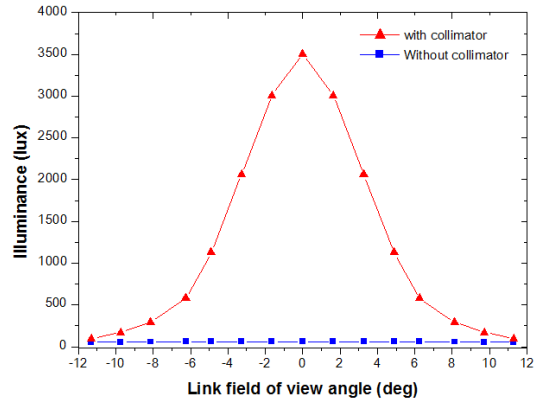


Figure 4: Measured illuminant intensities as a function of a link field of view angle

통신을 위해서는 광 검출기의 작동을 위한 최소광량과 주위의 광 노이즈 영향을 극복하기 위한 링크버짓(budget)을 고려해야 한다. 본 실험에서는 실내의 기존 조명이 켜진 상태를 실험조건으로 두었을 때 LED의 조도가 최소 500 lux를 보장할 수 있어야 끊어짐이 없는 통신이 가능하다고 가정하였다. 그러므로 최저조도를 보장하는 시야각을 기준으로 LED 설치간격을 정하였다.

Figure 5는 설계된 시스템의 블록도를 보여준다. 무선제어 모형차의 모터제어를 위한 프로그램이 탑재된 PC의 직렬포트를 통하여 제어명령이 디지털 신호로 전송되면 LED 구동회로에서 LED를 스위칭하고 변조된 광신호가 자유공간으로 전달된다. Figure 3과 같이 콜리메이터를 LED에 장착할 경우 LED 개수만큼 콜리메이터를 부착해야하는 문제가 생길뿐 아니라, 극부적인 강한 조도로 인하여 조명의 기능이 불가능해진다. 시스템의 효율성과 경제적인 면을 고려하여 모형차의 광 검출기에 콜리메이터를 부착하였다. 모형차의 수신부는 광전변환효율을 높이기 위하여 6개의 광검출기(SFH213, OSRAM)을 병렬연결 하였다. 수광 소자에서 광전 변환된 신호는 트랜스임피던스 증폭기와 비교기를 통과하면서 디지털 신호로 복원되고 MCU의 직렬 포트로 제어신호가 전달된다. MCU에서는 명령된 제어신호에 따라 모형차의 모터를 구동하여 전후 좌우로 움직이게 한다.

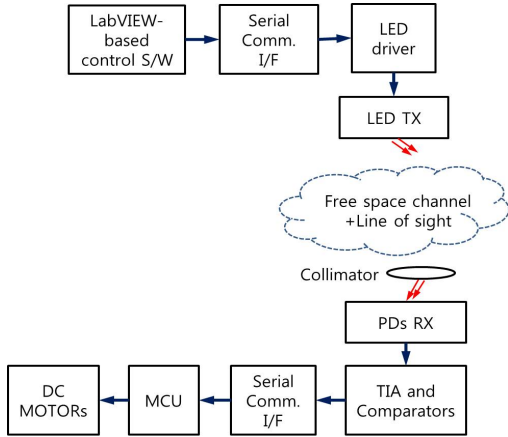


Figure 5: System block diagram

3. 실험결과 및 고찰

Figure 6은 LabVIEW로 구현한 모형차 제어 프로그램의 프론트 패널과 블록 다이어그램을 보여 준다. 직렬통신 프로그램에 사용되는 VISA 함수를 이용하여 포트를 제어하고 명령신호를 송수신한다. 4개의 컴퓨터 키보드로 두 개 모터의 전·후진 동작을 제어할 수 있도록 프로그램 되어져 있다. 데이터 전송속도는 최대 115.2 kbps까지 설정이 가능하다. 그러므로 LED의 변조 주파수 특성과 이에 대한 광 검출기의 응답특성을 확인할 필요가 있다.

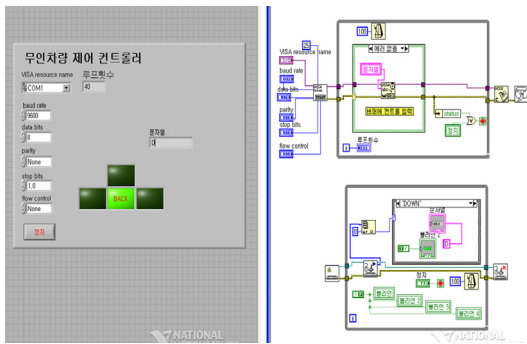


Figure 6: LabVIEW-based control software showing the front panel and block diagram.

Figure 7은 1 MHz로 변조된 LED 신호에 대한 광 검출기의 응답특성이다. 함수발생기의 구형파를 사용하여 LED를 직접 변조한 후 50 cm 떨어진 위치에 설치된 실리콘 기반 PIN 구조 광 검출기인

SFH213으로 입사시킨다. 광전 변환된 신호를 고속 증폭기로 증폭한 후 오실로스코프로 응답파형을 측정하였다. 응답 지연시간은 0.12 us, 신호 상승시간과 하강시간은 각각 0.2 us 정도이다. SFH213의 스위칭 시간은 5 ns로서 주파수 대역폭은 200 MHz이므로 시스템 사양을 충분히 만족한다. 출력 신호 파형이 다소 왜곡되었지만 비교기를 통과하게 되면 입력신호파형이 거의 완벽하게 복조된다.

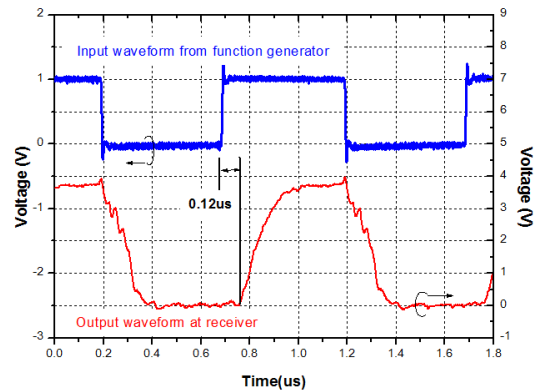


Figure 7: Waveform of received signal propagated through in air at modulation frequency of 1MHz at distance of 50 cm (above: modulation waveform, below: received waveform)

Figure 8은 제작된 광무선 모형차의 사진이다. LED 조명의 조도를 통신을 위하여 인위적으로 변경하지 않고 집광기를 설치한 것과 비슷한 효과를 얻기 위하여 광 검출기에 콜리메이터를 부착하였다. 식 (1)에서 보듯이 광전 효율은 수신기의 수광면적에 비례하므로 제작된 모형차의 상단면에 6개의 광 검출기를 병렬연결하고 그 상부에 콜리메이터를 설치하였다.

Figure 9는 천장에 설치될 LED 조명간의 거리와 통신을 위한 조도 분포를 전산 모의한 결과이다. Figure 4의 실험결과를 바탕으로 LED 간의 거리를 Figure 9 (a)와 같이 100 mm로 하였다. (b)는 조명에서 10 cm 떨어진 위치에서의 조도분포, (c)는 35 cm 위치에서 계산한 조도분포를 보여준다. 여러 개의 LED에 의한 광선이 결합하여 중앙 부분에 가장 높은 조도를 보이며 가장자리로 갈수록 감소한다. (c)

에서 모형차까지의 높이가 35 cm 일 경우 통신 불량 이 예상되는 60 lux 이하의 조도를 보이는 곳은 모서리와 가장자리 10 cm 부근이다. Figure 8과 같이 모형차의 길이가 16 cm 임을 고려할 때 직경이 5 cm 인 콜리메이트가 장착된 광 검출기를 3개씩 2줄로 배열한 구조가 타당함을 알 수 있다.

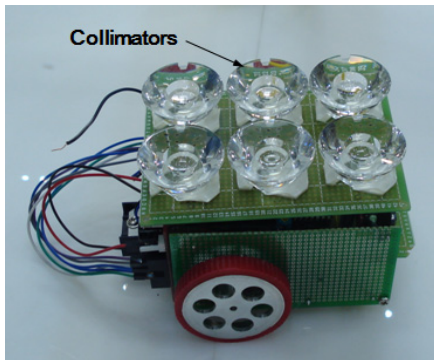


Figure 8: Fabricated optical wireless model car

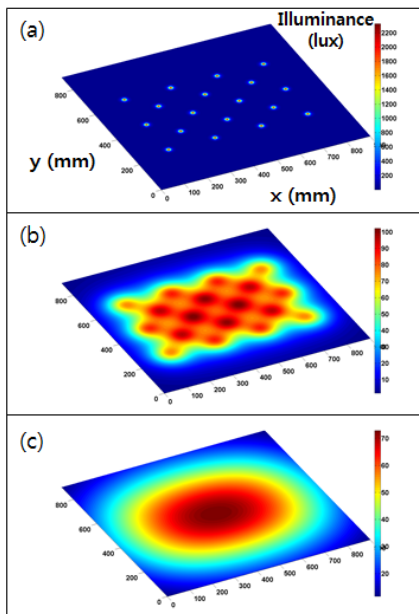


Figure 9: Illuminance distribution of the power LEDs installed on the ceiling. H is (a) 1 cm, (b) 10 cm, and (c) 35 cm

Figure 10은 LED를 이용한 광 무선으로 모형차를 제어하기 위한 실험장치도이다. 45 cm 높이의

아크릴 판을 이용하여 모형공간을 만들고, 상단에 10 cm 간격으로 LED를 설치하였다. 제어신호가 인가되지 않을 경우 LED는 조명의 역할을 할 수 있게 항상 켜져 있도록 설계되었고, 제어신호가 인가되어 모형차를 원격 조정할 경우 115.2 kbps로 변조된 신호가 LED를 스위칭 시키므로 깜박임을 전혀 느끼지 못한다. 통상적으로 LED의 스위칭 속도가 200 Hz 이상이면 빛의 깜박임을 사람의 눈으로는 느끼기 힘든 것으로 알려져 있다.

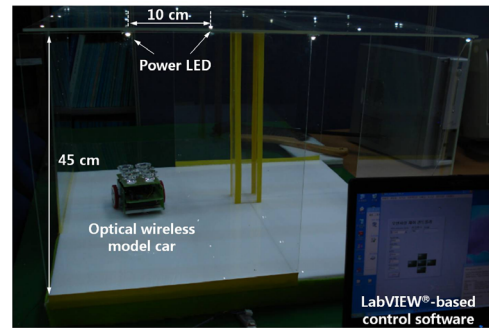


Figure 10: Experimental setup

Figure 11은 LabVIEW 프로그램에서 모형차로 ‘전진’ 신호를 보냈을 때 천장에 설치된 LED에 전달된 변조 파형과, 이 신호가 모형차의 광 검출기에 도달하여 증폭된 후의 신호파형을 비교한 것이다. 60 lux 정도의 LED 조도에서는 렌즈를 사용하지 않으면 통신이 불가능하다. 그러나 6개의 병렬 연결된 광 검출기로 수신면적을 6배로 확대하고 콜리메이터로 집광함으로써 안정적인 통신이 가능함을 확인하였다.

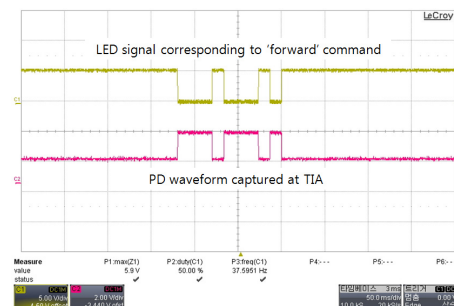


Figure 11: Signal waveforms captured at LED and PD

4. 결 론

본 논문에서는 실내 LED 조명을 이용하여 임의의 시스템을 광무선 통신으로 원격 제어할 수 있는 방법을 제안하였다. 통신을 위한 최소한의 광량을 확보하기 위하여 시야각에 대한 조도를 측정하였으며 이를 LED 설치 간격을 결정하는 근거로 활용하였다. LED로부터 40cm 떨어진 60 lux 조도 하에서 115.2kbps 보오율로 전송되는 제어신호를 기반으로 모형차를 안정적으로 구동하기 위하여 콜리메이트를 장착한 6개의 병렬 연결된 광 검출기 구조를 제안하였다. 시스템은 매우 성공적으로 작동되었다. 본 연구의 결과를 바탕으로 지하시설물 또는 대형선박, 해양플랜트에서 전자과장애 없이 제어통신을 할 수 있는 응용기술을 개발하여 적용할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] K. R. Sohn, C. W. Sohn and S. H. Kim, "A study on the white LED-based underwater and surface-to-underwater optical wireless communication systems," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 309-314, 2012 (in Korean).
- [2] Y. J. Kim and K. R. Sohn, "A study on the frequency modulation-based audio transmission system for short-range underwater optical wireless communications," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 166-171, 2012 (in Korean).
- [3] <http://www.ieee802.org/15/pub/TG7.html>; Accessed 20 May 2012.
- [4] M. Z. Afgani, H. Hass, H. Elgala et al., "Visible light communication using OFDM," *Proceedings of the 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, 2006.
- [5] http://www.ted.com/talks/lang/en/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb.html; Accessed 20 May 2012.
- [6] M. Doniec, C. Detweiler, I. Vasilescu, et al., "Using optical communication for remote underwater robot operation," *Proceedings of the IEEE International Conference on IRS*, pp. 4017-4022, Taiwan, 2010.
- [7] D. O'Brien, H. L. Mihn, G. Faulkner et al., "High data-rate infra-red optical wireless communications: implementation challenges," *Proceedings of the IEEE Globecom 2010 Workshop on Optical Wireless Communications*, pp. 1072-1076, Florida, 2010.