

조명용 고효율 백색 LED와 프레넬 렌즈를 이용한 가시광 통신 성능연구

김민수¹ · 손경락[†]

(Received August 22, 2014 ; Revised December 26, 2014 ; Accepted December 26, 2014)

Performance Investigation of Visible Light Communication Using Super Bright White LED and Fresnel Lens

Min-Soo Kim¹ · Kyung-Rak Sohn[†]

요약: 백색 발광 다이오드는 조명과 통신이 동시에 가능하여 많은 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 고효율 백색 LED와 저가형 광 다이오드, 프레넬 렌즈로 구성된 가시광 통신의 특성을 연구하였다. LED 구동회로는 고전력 MOSFET과 MOSFET 전용 구동칩을 사용하여 LED가 고속으로 온오프 되게 스위칭 하였다. 사용한 LED의 대역폭은 8 MHz로 측정되었다. 그러나 실내 조명환경을 고려한 500 lx 조도 하에서 통신 속도는 PIN 광 다이오드인 SFH213의 낮은 스펙트럼 감도와 낮은 신호전력으로 인해 1 Mbps까지만 가능하였다. 시스템 대역폭을 확장하기 위하여 프레넬 렌즈를 적용한 경우 수신단의 PIN 광 다이오드에 LED의 집광된 광 전력이 입사되도록 하여 LED의 대역폭까지 변조될 수 있었다. 프레넬 렌즈에 의한 신호대 잡음비는 40 dB 이상 향상되었다.

주제어: 가시광 통신, 발광 다이오드, 프레넬 렌즈, 광 다이오드

Abstract: White light-emitting diode (WLED) is growing interest in using both illumination and communications. This paper reports visible light communication (VLC) composed of a super bright white light-emitting diode, low cost commercial photo-diode and a Fresnel lens. LED driver is consisted of the power MOSFET and MOSFET driver that switches the LED on and off. The modulation bandwidth of the LED used was determined to be 8 MHz. However, it was possible to communicate up to 1 Mbps under illumination of 500 lx because of the weak signal power and a low spectral sensitivity of the SHF213 as a PIN photodiode. In order to enhance the system bandwidth, the LED light was focused on the PIN photodiode by use of the Fresnel lens. As a result of that, visible light link was operated up to modulation bandwidth of the LED. The signal to noise ratio can be improved by 40 dB using an optical concentration at the receiver.

Keywords: Visible light communication, White light-emitting diode, Fresnel lens, PIN photodiode

1. 서론

발광 다이오드 (Light-emitting diode: LED)는 반도체 재료 및 공정기술의 발전으로 저가격화가 실현되어 각종 전자기기 및 디스플레이용 기기, 교통신호등, 실내의 조명등 등으로 광범위하게 활용되고 있다[1]. 실내 조명등의 경우 기존의 백열등과 형광등은 에너지 소비효율이 우수한 LED 조명으로 대체가 가속화되는 추세이다. 이에 편승하여 2000년 중반 이후부터 가시광 영역의 LED를 이용한 광무선 통신에 관한 연구가 본격화되어 현재까지 상당한 기술적인 진전과 응용분야에 대한 의미 있는 결과를 제시하고 있다 [2][3].

조명용 LED의 스펙트럼은 파장이 주로 400-700 nm 영역인 가시광 영역에 분포하고 있으며 종류에 따라 피크 파장은 달라질 수 있다. 이는 전자파보다 훨씬 넓은 400 THz 정도의 잠재적인 통신대역폭을 제공하므로 기존 무선통신의 가용 주파수 제한과 좁은 대역폭 문제를 해결할 수 있는 대안으로 주목받고 있다[4]-[6].

그러나 조명용 백색 LED는 제한된 변조 대역폭과 거리에 따라 조도가 지수 함수적으로 감쇠하는 단점이 있다. 또한 고효율 LED의 경우 높은 구동 전류가 필요하므로 파워 MOSFET을 이용하여 변조할 필요가 있다. 이때 고속 변조에 의한 전류 주입 시 순간적인 과전압이 LED에 걸리는

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8888-1241>): Department of Electronics and Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: Krsohn@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4312

¹ Department of Electronics and Communications Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: mskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4908

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.

문제가 발생한다. 2010년 미국 MIT의 H. Brundage는 1 A의 구동전류가 요구되는 7개의 Titan LED를 직렬 연결하여 MOSFET으로 스위칭 하였고, 전류제한 저항을 조절하여 1Mbps 데이터 전송에 오류가 없음을 보였으며 3Mbps 까지 통신이 가능함을 제시하였다[7].

본 연구에서는 MOSFET 스위칭 시 발생하는 과도응답에 의한 순간적인 높은 피크 전압을 억제하여 보다 안정적으로 3 W급 백색 LED를 변조할 수 있는 회로를 구현하였다. 수신단의 경우에도 저가형 PIN 광다이오드 1 개로 수광부를 구성하였다. 에버런치 광 다이오드(Avalanche photo-diode: APD)를 이용할 경우 PIN 광 다이오드의 수십 배 이상에 해당하는 내부이득으로 인해 수신 성능을 훨씬 개선할 수 있지만 소자가 고가이고 매우 높은 역 전압을 요구하므로 휴대용 가시광 통신 단말기에는 적용하기 어렵다. 실내 조명의 권장 조도 범위 내에서 저가형 PIN 광다이오드의 대역폭을 개선할 수 있는 방법으로 프레넬(Fresnel) 렌즈를 적용하였다[8]. 프레넬 렌즈를 사용하지 않은 경우 200 lx 조도 하에서 MOSFET에 의한 LED의 직접변조로 500 kbps, 500 lx 에서는 1 Mbps 까지 데이터 통신이 가능하지만, 동일 조건하에서 프레넬 렌즈로 수신광을 집광하면 8 Mbps 까지 안정적으로 데이터 통신이 가능함을 보였다.

2. 시스템 설계

2.1 송신부 설계

Figure 1은 n 채널 MOSFET(SUP40N10, Vishay Siliconix 사)을 이용하여 3W 백색 LED(P4 STAR U2 White, 서울반도체)를 변조할 수 있는 송신부의 회로도이다. 본 연구에서는 MOSFET 구동을 위해서 40 ns의 빠른 스위칭 시간을 가지는 MOSFET 드라이브인 TC4427(1.5 A 출력전류, Microchip사)을 사용하였다. 10V DC 전압원의 전류가 전류 제한저항 R2를 통해 LED로 주입되며 MOSFET의 스위칭에 의해 LED는 점멸된다.

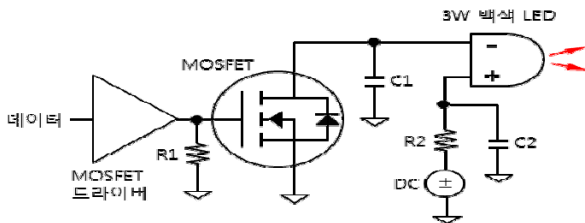


Figure 1: Schematic of the transmitter with MOSFET

Table 1: System parameters of transmitter

파라미터	값
LED 종류 (서울반도체)	P4 STAR U2 White
LED 구동전류	600 mA
LED 시야각 (FWHM)	127 °
바이패스 커패시터	C1=C2=330 pF
전류제한저항	R2=8.2 Ω, 5 W

Figure 2는 1 MHz 구형파 입력 신호에 응답하는 MOSFET의 드레인 전압을 측정한 파형이다. 상부 파형은 기존 연구결과[7]를 바탕으로 R2를 8.2 Ω 산화금속피막저항으로 구현한 경우이다. 이때 LED의 기생 커패시턴스와 저항 R2의 기생 인덕턴스와 커패시턴스로 인한 LC 공진회로가 형성되어 공진에 의한 과도응답으로 피크 전압이 22 V까지 나타남으로 추가적인 개선이 필요하다. 이를 위하여 저항 R2와 LED 다음에 각각 330 pF의 바이패스 커패시터 C1과 C2를 추가하여 고주파 영역을 필터링한 결과 Figure 2의 하부 파형과 같이 피크 드레인 전압이 15 V 이하로 줄었다. 송신부 소자에 대한 상세 파라미터 값은 Table 1에 나타내었다.

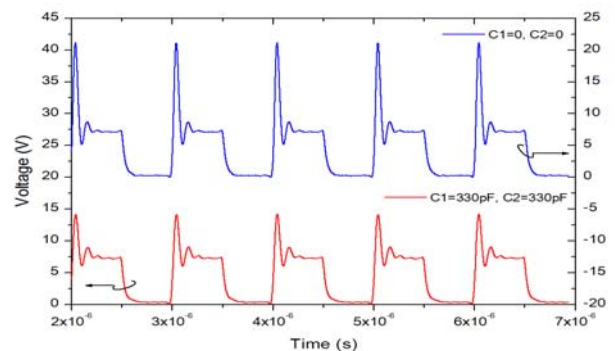
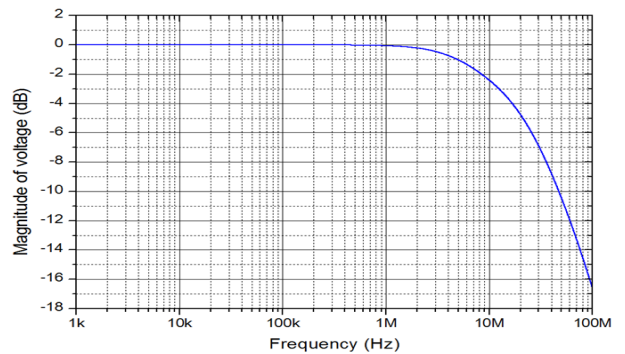
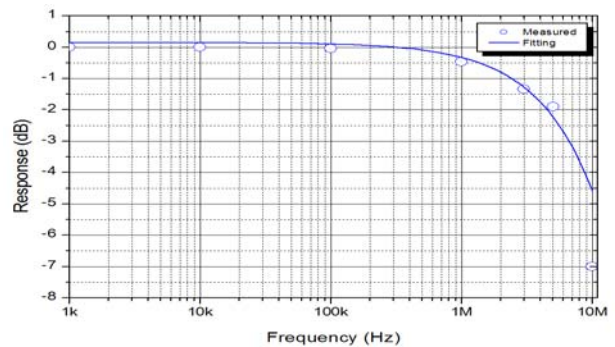


Figure 2: Drain voltage of the MOSFET in Figure 1



(a)



(b)

Figure 3 : (a) Calculated system frequency response of the LED driving circuit in Figure 1 and (b) measured electro-optical electrical channel response.

직접변조에 의한 LED의 온/오프 스위칭 속도는 MOSFET의 스위칭 특성과 LED의 응답시간에 의해 좌우된다. 먼저 제안된 회로의 주파수 응답특성을 P-Spice로 계산한 결과는 Figure 3 (a)와 같다. 1 MHz 입력신호까지 출력신호의 세기는 일정한 크기를 유지하지만 10 MHz 부근에서는 -3 dB 이하로 떨어지고 있다. Figure 3 (b)는 회로의 변조 주파수에 대한 백색 LED의 출력 광 전력의 변화를 측정된 결과로 8 MHz 부근에서 반치 전력을 보인다. 이 결과로부터 제안된 가시광 통신 시스템의 송신 대역폭은 8 MHz 부근으로 제한됨을 알 수 있다.

2.2 수신부 설계

Figure 4는 수신부의 개략도이며 시스템 파라미터 값은 Table 2에 나타내었다. 수광 소자로는 저가형 PIN 광 다이오드인 SFH213 (OSRAM) 1개를 사용하였는데 20V 역방향 바이어스 전압 하에서 스위칭 시간은 5 ns로 매우 빠른 응답특성을 보인다. 트랜스임피던스 증폭기는 이득이 1인 대역폭이 500 MHz인 OPA656 (Texas Instruments)을 이용하였으며 광대역 증폭기의 이득으로 $R_f=5.6 \text{ k}\Omega$ 저항을 연결하였다. 증폭된 신호의 오버슈터(overshoot)를 억제하기 위한 케환 커패시터 C_f 는 1pF 이다.

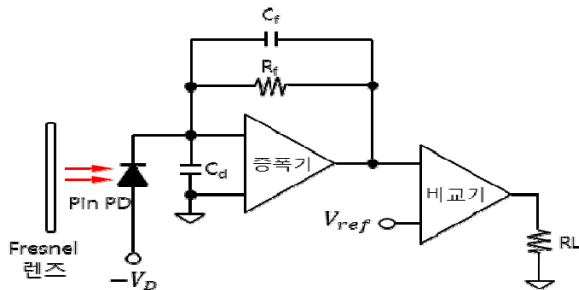


Figure 4: Receiver circuit with a Fresnel lens

Table 2: System parameters of receiver

파라미터	값
트랜스임피던스 이득	5.6 kΩ
광 검출기 수광 면적	1 mm ²
스펙트럼 감도	0.62 A/W @870 nm

PIN 광 다이오드 전단에는 Figure 5 (a)와 같이 양의 초점거리를 가지는 프레넬 렌즈를 설치하여 집광 전력에 의한 통신성능을 시험하였다. 백색 LED로부터 1.5 m 떨어진 거리에서 조도는 200 lx 정도이지만 Figure 5 (b)와 같이 지름 16 cm, 초점거리 6.5 cm 인 프레넬 렌즈를 사용한 경우 집광으로 인해 5000 lx 정도로 조도가 올라간다. LED 조명에 의한 조도가 낮아 신호전력이 미약할 경우 신호 대 잡음비를 높여 고속 데이터 통신 채널을 유지하기 위한 방법으로 프레넬 렌즈를 이용할 수 있다.

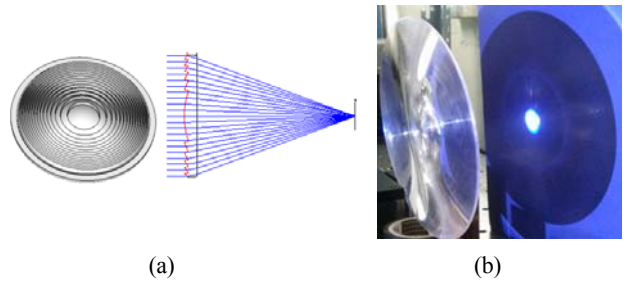


Figure 5: (a) Positive focal length Fresnel lens used as a collector, (b) Photograph of Fresnel lens used in this experiment

3. 실험결과 및 고찰

Figure 6은 본 연구에 사용한 3W 백색 LED(광속 110 lm, 색온도 6000 K)의 거리에 따른 조도를 측정된 결과이다. 조도는 LED에서 방사하는 빛의 세기를 조도계(HD450, EXTECH, USA)를 이용하여 측정하였다. 람베르트 방사를 하는 LED의 조도는 거리의 제곱에 반비례하므로 북미조명학회(Illuminating Engineering Society of North America)에서 권장하는 실내 조도를 유지하기 위해서는 수십 개 또는 그 이상의 LED가 요구된다[9].

북미 조명학회의 권고안에 따르면 창고, 주택, 건물 로비, 화장실 등은 150 lx, 단순한 작업을 위한 사무실, 수업 등을 위해서는 250 lx, 일반적인 사무실, 컴퓨터 작업, 독서실, 전시관, 실험실 등은 500 lx의 조도가 권장된다[10]. 먼저 500 lx 조도 하에서 1 개의 PIN 광다이오드로 수신 가능한 데이터율을 측정하였다. 이때 수신부에는 추가적인 집광부가 없는 조건이다. Figure 7은 1 MHz의 변조 주파수에 대한 가시광 통신의 성능을 측정된 아이 다이어그램(eye diagram)이다. 아이(eye)의 가장자리 영역은 시간에 따라 에지 위치가 변화하는 랜덤 지터(jitter)에 의해 일정 부분은 닫혀 있음을 볼 수 있다. 이는 신호에 잡음이 많이 있음을 의미한다. 2 MHz의 변조 주파수에 대한 아이 다이어그램에서는 아이가 완전히 닫혀있다. 그러므로 조명용 백색 LED를 이용한 광 강도 변조에서는 광원으로부터 일정거리를 벗어나거나 장애물에 의한 감쇠요인이 발생하여 수신단에서의 조도가 500 lx 영역이라면 통신 속도가 1Mbps 로 제한됨을 알 수 있다.

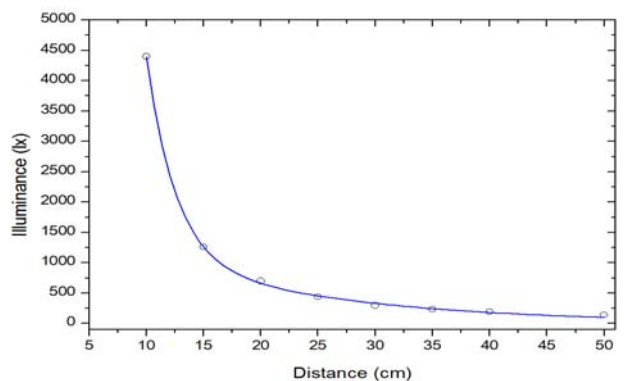


Figure 6: Illuminance vs. distance.

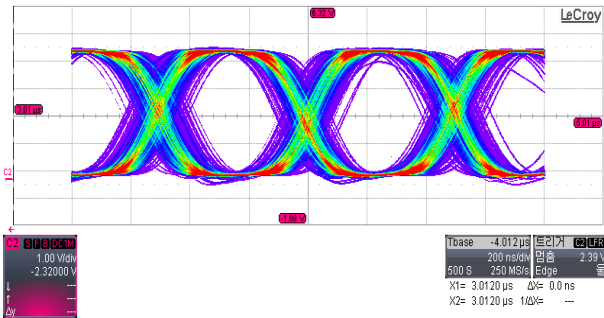


Figure 7: Eye diagram for 500 lx illuminance and 1 MHz modulation frequency (200ns/div) when the receiver has no Fresnel lens

Figure 8은 입력 변조 주파수에 대하여 아이 다이어그램의 아이가 완전히 열려 지터 발생이 최소가 되는 조도를 측정된 결과를 보여준다. 즉 Figure 3 (b)의 결과로부터 얻어진 주파수에 해당하는 조도 값을 그려놓은 것이다. LED에 대한 바이어스 전압 없이 직접 변조에 의해 1 Mbps의 안정적인 통신을 위해서는 700 lx가 요구된다. 또한 조도와 변조 주파수가 선형적 비례관계에 있음을 이용하면 8 MHz의 시스템 주파수 응답은 5000 lx 정도의 조도가 요구됨을 알 수 있다.

Figure 8의 결과로부터 가시광통신에서 데이터 전송률을 높일 수 있는 방법은 수광 소자에 수집되는 광량을 높이는 것이다. 단순 작업장 또는 일반 강의실에서 요구되는 조도인 200 lx 위치에 수신기를 설치시키고, Figure 5 (b)와 같이 프레넬 렌즈lens의 초점 위치에 PIN 광 다이오드를 위치시켰다. 집광된 빛의 조도는 ~5000 lx에 달하였다. Figure 9 (a)는 7 MHz 입력 변조 주파수에 대한 수신단의 파형이다. 아이가 완전히 열린 상태이며 지터가 거의 발생하지 않음을 보여준다. 이는 Figure 3 (b)의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. LED를 8 MHz로 변조한 경우 수신파형은 Figure 9 (b)와 같다. Figure 9 (a)와 비교하여 열린 아이의 크기가 줄어들고 지터의 발생을 확인할 수 있다.

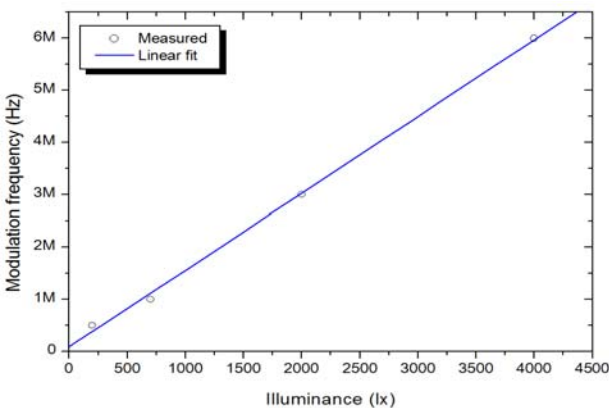
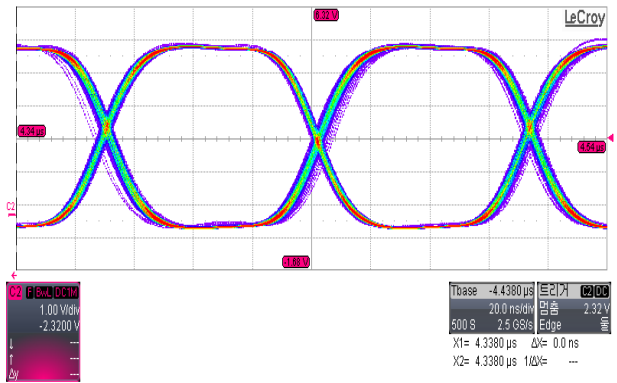
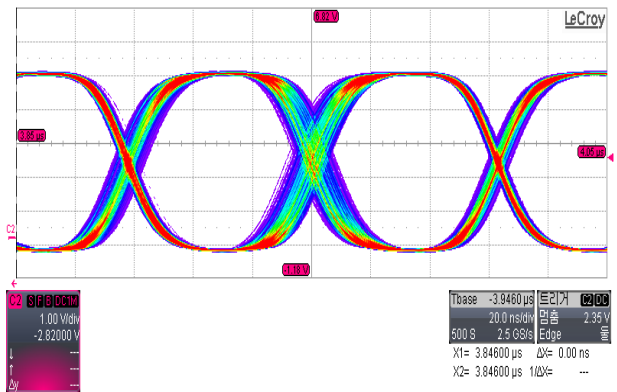


Figure 8: Modulation frequency vs. illuminance



(a)



(b)

Figure 9: Eye diagram of (a) 7 MHz and (b) 8 MHz modulation frequency with Fresnel lens under 200 lx illumination (20 ns/div)

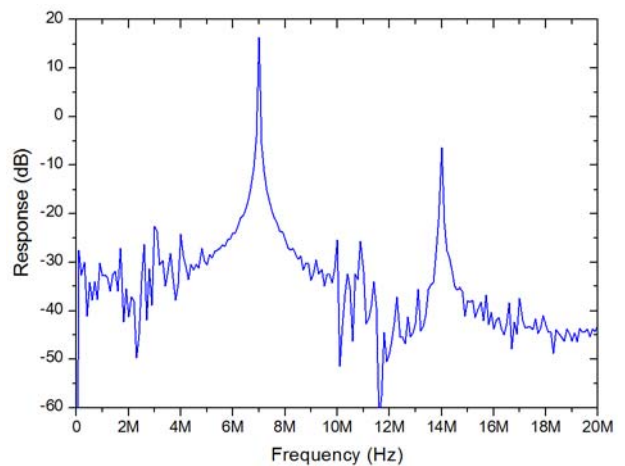


Figure 10: FFT of Figure 9 (a)

Figure 10은 7 MHz 주파수 응답에 대한 신호대 잡음비 (signal to noise ratio; SNR)를 보기 위하여 Figure 9 (a)를 고속푸리에 변환(fast fourier transform: FFT)한 스펙트럼을 보여준다. 200 lx 조도 하에서 프레넬 렌즈를 이용함으로써 40 dB 이상의 신호 대 잡음비를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 조명용 고출력 LED를 MOSFET으로 구동하여 가시광통신을 할 수 있는 시스템을 제안하였다. 사용한 LED의 변조 대역폭은 8 MHz 정도로 측정되었지만 500 lx 조도 하에서 저가형PIN 광 다이오드인 SFH213 1개로 수신 가능한 변조 주파수는 1 MHz 까지였다. 동일 시스템에서 변조 대역폭을 확장하기 위하여 지름 16 cm 크기의 아크릴 재질로 만든 프레넬 렌즈를 수신기 전단에 설치하여 집광조도를 5000 lx 부근까지 맞추고 수신 성능을 측정한 결과 8 MHz 까지 변조신호 복원이 가능하였다. 이는 LED 조명의 조도가 낮은 곳에서도 프레넬 렌즈의 집광을 이용하여 고속 가시광 통신이 가능함을 의미한다. 특히 수중 가시광 통신 응용에서는 수질에 의한 광 감쇠를 어느 정도 보상할 수 있는 수단으로 프레넬 렌즈를 고려할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국해양대학교 LINC 사업단의 산학공동연구 과제 지원으로 수행된 결과입니다.

References

- [1] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 14, pp. 1243-1245, 2008.
- [2] H. Shin, S. Park, K. Lee, D. Jung, Y. Lee, S. Song, and J. Park, "Investigation of visible light communication transceiver performance for short-range wireless data interfaces," *Proceedings of the International Conference on Networking and Services*, vol. 1, no. 1, pp. 213-216, 2011.
- [3] L. Grobe, A. Paraskevopoulos, J. Hilt, D. Schulz, F. Lassak, F. Hartlieb, C. Kottke, V. Jungnickel, and K-D. Langer, "High-speed visible light communication systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 12, pp. 60-66, 2013.
- [4] K. D. Langer, J. Vucic, C. Kottle, L. Fernandez, K. Habel, A. Paraskevopoulos, M. Wendl, and Veselin Markov, "Exploring the potentials of optical-wireless communication using white LEDs," *Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks*, Tu. D5.2, 2011.
- [5] K. R. Sohn and M. S. Kim, "LED transceivers with beehive-shaped reflector for visible light communication," *Journal of the Korean Society of Marine*

- Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 169-174, 2014.
- [6] K. R. Sohn, "A study on the short-range underwater communication using visible LEDs," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 425-430, 2013 (in Korean).
- [7] H. Brundage, *Designing a wireless underwater optical communication system*, Master of science in mechanical engineering, Master Dissertation, Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA, 2010.
- [8] S. M. Kim and S. M. Kim, "Wireless visible light communication technology using optical beam-forming," *Journal of Optical Engineering*, vol. 52, no. 10, pp. 1-6, 2013.
- [9] K. R. Sohn, "Performance analysis of the visible light communication in seawater channel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 37, no. 5, pp. 527-532, 2013 (in Korean).
- [10] The Illuminating Engineering Society of North America, <http://www.iesrms.org/>, Accessed January 24, 2015.