조명 및 무선통신이 동시에 가능한 가시광 송수신기에 관한 연구

정회원 송 석 수*, 공 영 식**, 박 진 우***

Investigation of visible light communication transceiver applicable to both of illumination and wireless communication

Seoksu Song*, Youngsik Kong**, Jinwoo Park*** *Regular Members*

요 약

본 연구는 조명 및 무선통신이 동시에 가능한 가시광 송수신기에 대해 가시광 통신 본연의 가시성, 무선 통신의 사용 편의성 그리고 고속의 통신 속도를 고려해 edge-emitting laser diode와 silicon photo diode를 기반으로한 고속 가시광 무선 송수신기를 구현하였다. 제안된 가시광 무선 송수신기는 120Mbit/s의 고속에서 양방향 전송이 가능하도록 설계되었으며 이때 발생하는 누화(crosstalk)를 방지하기 위한 방법으로 shielding 방식을 적용해 가시광 송수신기의 성능을 실험적으로 측정 분석하였다. 또 수신기의 시야각 확대를 위한 방법으로는 새로운 구조의 광학적 antenna를 적용해 광학적 antenna가 없는 두 개의 송수신기 사이의 전송링크 특성과 광학적 antenna를 사용한 두 개의 송수신기 사이의 전송링크 특성을 2차원 평면상에서 전송거리, 적용범위 그리고 기울임 정도를 변화시켜 실험과 시뮬레이션을 통해 그 성능을 비교 분석하였다.

Key Words : 가시광통신(Visible Light Communication), 양방향 통신(Full Duplex Mode), 누화(Crosstalk)

ABSTRACT

We investigated the performance of a visible light communication (VLC) transceiver applicable to both of illumination and wireless communication. we considered the visibility of VLC, the easy connection for wireless communication and high-speed transmission and implemented VLC transceiver based on edge-emitting laser diode and silicon photodiode. The proposed VLC transceiver is designated to operate in a full duplex mode at high speed of 120 Mbit/s. The shielding method that is employed as a means to reduce the light cross coupling effect inside the VLC transceiver is proposed and its performance is experimentally measured. We also applied optical antenna to have the larger angle of field of view (FOV) to novel structure of VLC transceiver and examined and analyzed their bit error rate performance, photometric result with respect to the transmission distance, the coverage range and the tilt degree as transmission link characteristic between two transceivers without optical antenna and with optical antenna.

Ⅰ. 서 론

오늘날 다양한 통신기술들이 대용량 데이터 정보를 고속으로 처리하기 위하여 진보되어왔다. 그중에

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(澁袁) [10040037, 쌍방향 정보교환기반 복합공간용 인텔리 전트 IT조명 시스템 기술 개발] 연구 사업의 일환으로 수행하였음.
* 한국조명연구원 (sssong@kilt.re.kr), ** 한국조명연구원 (kiltceo@kilt.re.kr), *** 고려대학교 (jwpark@korea.ac.kr)
논문번호 : KICS2011-08-362, 접수일자 : 2011년 8월 22일, 최종논문접수일자 : 2012년 4월 18일

서 최근 조명과 무선통신을 결합한 가시광 통신에 대한 연구가 많은 주목을 끌고 있으며 특히, 가시광 무선 통신이 가능한 송수신기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 가시광 통신은 눈에 보이는 가시광 대역의 광 신호를 근거리 무선 통신에 이용하는 기술로서 조명에 사용되는 빛을 이용하여 정보를 전송-교환하는 기술이다. 이러한 가시광 통신은 언제 어디서나 이용 가능한 무선 통신의 보조적인 역할을 수행할 수 있는 기술로 RF에 기초한 무선 통신 기술과 비교하여 많은 장점들을 가지고 있다 [1, 2]; (1) 가시광 통신은 조명과 통신의 기능을 동시에 수행할 수 있기 때문에 기존에 조명을 위해 사용되던 전력선 인프라 구조를 추가 비용 없이 무선 통신에 활용할 수 있다는 장점을 가지고 있다, (2) 기존 RF 기반의 무선 통신이 한정된 주파수 자원에 따른 희소성 때문에 사용시 허가를 받아야 하는 반면, 가시광 통신은 주파수 허가를 받을 필요가 없으며, 이미 다른 용도로 사용되고 있는 ISM(Industrial Scientific and Medical radio bands)대역과의 간섭도 없어 실질적으로 사용할 수 있는 주파수 대역폭에 제한이 없다. (3) 가시광 통신은 빛의 특성 때문에 통신을 할 때 사람의 눈에 보이는 빛의 영역 안에서만 통신이 이루어지고 그 외의 영역에서는 통신이 이루어지지 않는다. 특히, 빛의 가시성은 데이터 전송의 흐름을 사용자가 눈으로 직접 확인할 수 있도록 해주기 때문에 사용자외의 다른 누군가가 전송되는 신호를 가로채기가 어려워 보안이 매우 뛰어난 특징을 가지고 있다. (4) 가시광 통신은 통신 매체로 빛을 사용하기 때문에 전자파가 나오지 않아 인체에 무해하며 전자파에 의한 오작동 발생 시 심각한 문제를 일으킬 우려가 있는 병원이나 비행기 등에 응용될 수 있다. 이러한 무선 가시광 통신은 앞에서 열거한 장점들을 기반으로 조명과 통신을 동시에 수행할 수 있는 조명 통신 융합 시스템, 자동차등(전조등, 후미등 포함) 및 신호등을 이용한 지능형 교통정보 시스템, 조명시스템을 활용한 위치 정보 시스템, ID-Tag를 활용한 물품정보서비스 시스템, 휴대용 전자기기간의 통신이 가능한 Peripheral 통신 시스템 그리고 홈네트워크 및 유비쿼터스 시스템에 응용되어 활발히 연구가 진행되고 있다[3-9]. 현재, 가시광 무선 통신 기술은 WPAN (Wireless Personal Area Network)의 한 기술로 우리나라 주도로 2011년 7월 IEEE 802.15.7 국제 표준으로 확정 되었으며 정부의 LED 조명 확산 정책에 따라 이를 인프라로 활용하는 무선 가시광 통신 기술에 대한 발전이 더욱 가속화될 전망이다[10]. 이에 본 논문에서는 무선 가시광 통신의 이슈인 채널 효율성에 초점을 맞추어 조명 및 무선통신이 동시에 가능한 가시광 무선 송수신기를 설계하였다. 그리고 설계된 가시광 무선 송수신 장치의 우수성을 실험과 시뮬레이션을 통하여 입증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장 서론에서는 가시광 통신의 개념 및 특성과 응용분야에 대하여 설명하고 2장 제안방법에서는 가시광 무선 통신 시스템에서 고속 양방향 전송 시 발생되는 누화문제를 해결하기 위한 shielding 방법과 수신기의 좁은 시야각 문제를 해결할 수 있는 광학적 antenna를 적용한 새로운 구조의 가시광 무선 송수신기에 대해 설명한다. 그리고 3장 성능평가에서는 shielding 방법과 광학적 antenna를 적용한 가시광 무선 송수신기의 성능을 실험과 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하고 그 우수성을 입증하였으며 마지막 4장에서는 제안된 가시광 무선 송수신 장치의 특성을 요약하고 앞으로의 연구 방향에 대하여 설명함으로써 조명과 IT가 융합된 미래 가시광 통신 연구의 초석을 다지는 역할을 하도록 하였다.

Ⅱ. 제안방법

이 논문에서는 가시광 무선 통신의 채널 효율성을 증가시키기 위해 양방향 전송 방법을 선택하였

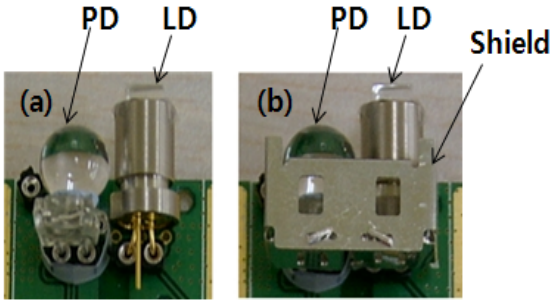


그림 1. 가시광 송수신기의 그림들 (a) Shield를 사용하지 않은 경우 (b) Shield를 사용한 경우
Fig. 1. Pictures of VLC transceivers (a) without a shield (b) with a shield

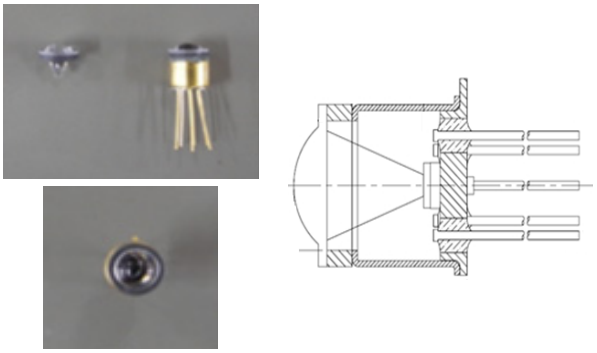
으며 Bluetooth, Infrared data association (IrDA). Ultra Wideband (UWB)와 WiFi와 같은 RF를 기초로 하는 무선통신 기술들에 대해 경쟁력을 갖도록 하기 위해 120 Mbit/s의 고속에서 통신이 가능하도록 송수신기를 설계하였다. 현재 시중에 상품화되어 제공되고 있는 LED 칩의 기술 수준으로는 white

LED가 가장 높은 출력 파워를 가지고 있으나 약 10 Mbit/s의 변조 한계를 가지고 있으며 플라스틱 광섬유 통신을 위해 사용되는 RCLED(resonant-cavity LEDs)도 가시광 대역의 출력 파장과 넓은 변조 대역폭을 가지고 있으나 출력 파워가 약 0.5 mW로 낮아 충분한 가시성을 제공하지 못하는 한계를 가지고 있다[11]. 따라서 충분한 세기와 넓은 변조 대역폭을 제공해 주기 위해 edge emitting LD를 기초로 가시광 송수신기를 제작하였으며 laser source에 적용된 나안보호(eye safety) 규정을 피하기 위해 광 확산기(optical diffuser)를 레이저 출력단에 연결하여 빛을 분산시키는 방법을 사용하였다[12].

사용된 Edge emitted LD의 중심 파장은 635 nm이고 FWHM (full width half maximum)의 스펙트럼 폭은 약 5 nm이다. 최대 광 출력 세기는 5 mW로 충분한 가시성을 확보할 수 있으며 구동회로에 의한 변조와 분산을 위한 확산기를 사용한 결과 약 1～2 mW의 출력을 갖게 되었다. 또, 사용된 red edge emitted LD의 beam 발산(divergence)은 확산기와 조준 렌즈(collimation lens)를 사용하여 발산이 10^0도 미만이 되도록 설계 하였고 beam spot은 일반적인 사무공간에서 최대 1.2m의 거리에서 가시성을 가지며 on-off keying modulation 방법을 적용하도록 하였다.

특히, 이 논문에서 설계한 가시광 무선 송수신기는 양방향 전송시 전송 링크의 성능에 크게 제한을 주는 누화를 해결하기 위하여 shielding 방법을 적용하였다. 누화는 서로 다른 통신 선로상의 신호가 전기적 결합에 의해 다른 통신 회선에 영향을 주는 현상으로서 이 논문에서는 전기적 누화와 광학적 누화로 나눠서 고려하였다. 전기적 누화는 송수신 모듈의 송신기 부분과 수신기 부분의 전원 및 ground를 분리하여 inductor(bead)로 연결함으로써 송신기와 수신기 사이의 영향을 최소화 시켰으며 또한 패키지에 electric shield를 적용하여 전자기파에 의한 누화를 차단하였다. 광학적 누화는 송신기에서 출력된 광이 자신의 수신기로 입력되는 현상으로서 이러한 광학적 누화를 제거하기 위해 송신기에서 수신기로 자신의 빛이 들어가는 경로를 광학적으로 차단하였다. 그림1은 이러한 누화를 고려하여 전송링크의 성능을 개선한 가시광 무선 송수신기에 대한 그림을 나타내고 있다.

가시광 무선 통신 시스템의 전송 성능을 개선하기 위해 가시광 수신기에 필요한 또 다른 특성은 넓은 집광 면적과 커다란 시야각(the angle of field of view)을 갖는 것이다. 일반적으로 가시광 송수신기를 제작할 때에는 수신기의 집광 면적이 작을 경우 쉬운 정렬을 갖기 위해 송신광이 넓은 확산각을 가져야 하지만 동일한 송신기의 출력을 가정할 때에는 확산각이 크게 되면 단위 면적당 수신 광 세기가 작아져서 전송거리 혹은 전송 속도가 떨어지게 된다. 이와는 반대로, 집광 면적이 넓은 경우에는 송신광이 좁은 확산각을 갖더라도 링크 정렬이 쉬우며 좁은 확산각을 통해 긴 통신 거리와 높은 전송 속도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 따라서 가시광 무선 통신 시스템에 적용할 가시광 무선 수신기는 하드웨어적으로 제한된 집광 면적을 가지고 있으며 점차 소형화된 패키지의 송수신기를 필요로 하는 추세이기 때문에 동일한 확산각을 갖는 송신광을 가정할 때 가장 효율적으로 적용하기 위해 시야각이 커다란 수신기를 필요로 한다. 특히, 가시광 통신 시스템에서 가장 큰 단점으로 지적되고 있는 부분이 송신기와 수신기가 통신할 때 수신기의 시야각이 매우 좁아서 송신기와 수신기간의 각도가 약간만 틀어져도 전송거리가 크게 줄어드는 한계를 가지고 있다. 이 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 가시광 수신기보다 시야각과 집광효율을 모두 높인 특수한 구조의 광학적 antenna 수신기를 제작하였으며 그림 2는 적용된 광학적 antenna의 그림과 설계도를 보여주고 있다. 이 논문에서 설명된 광학적 antenna 구조의 가시광 무선 수신기는 약 $\pm 10^o$의 커다란 시야각을 가지며 수신기의 내부 표면을 코팅함으로써 들어오는



(a) (b)

그림 2. 양방향 가시광 통신을 위해 설계된 광학적 안테나의 (a) 그림과 (b) 도면
Fig. 1. Pictures and drawing of the designed optical antenna

빛이 전반사 (full reflection)되어 한 곳에 집중 될 수 있는 구조로 설계 되었다. 이와 관련된 송수신기의 성능은 제 3장 성능평가에서 자세히 설명되고 있다.

Ⅲ. 성능평가

그림3은 가시광통신 송수신기의 전송 링크 특성을 분석하기 위한 실험 구성도이다. 가시광통신 송수신기의 전송 링크 특성을 분석하기 위해 송수신기1을 PPG(pulse pattern generator)1에 연결하였으며 PPG1은 120 Mbit/s에서 2^7-1의 PRBS (pseudorandom binary sequence) 신호를 발생시키도록 하였다. 다른 송수신기2는 BER(bit error rate) 측정을 위하여 ED(error detector)와 연결하여 송수신기1과 송수신기2가 서로 마주보고 위치하도록 구성하였다. 측정 방법은 송신기 모듈을 고정한 상태에서 수신 모듈의 위치를 전송거리, 적용범위 그리고 기울임 정도를 변화시켜가며 BER을 측정하여 그 성능을 비교 분석하였다.

먼저, 누화가 가시광 송수신기의 전송링크에 미치는 영향을 분석하기 위해 가시광 송수신기가 단방향 전송 일 때와 양방향 전송 일 때의 링크 특성을 실험을 통해 비교 분석 하였다. 그림4는 가시광

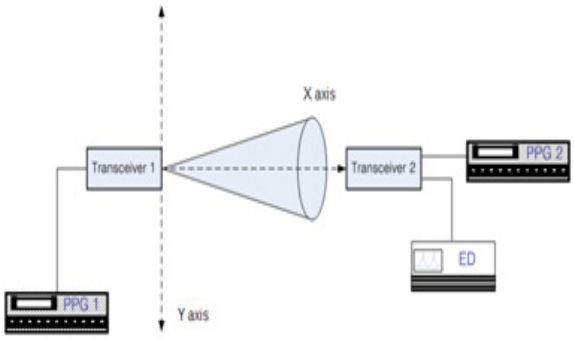


그림 3. 양방향 가시광 통신 성능 테스트를 위한 실험 구성도
Fig. 3. Experimental setup for performance measurements

송수신기의 (a) 단방향 전송링크 특성과 (b) 양방향 전송링크 특성을 나타낸 그림으로 거리는 송신측 송수신기의 끝 부분과 수신측 송수신기 사이의 거리를 5cm부터 130cm 까지 5cm 단위로 증가시켰으며 각각의 거리에 대해 중심을 기준으로 2cm 씩 좌우로 -10cm부터 +10cm까지 이동시켜가며 BER을 측정하여 전송 가능한 범위를 확인하였다. 그림4

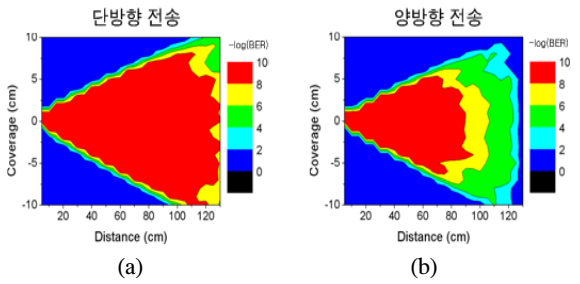


그림 4. 120 Mbit/s에서의 가시광 통신 송수신기의 (a) 단방향 전송링크 특성과 (b) 양방향 전송링크 특성
Fig. 4. The BER performance of a transceiver at 120 Mbit/s over the visible link as a function of transmission distance and coverage (a) simplex mode without cross coupling light (b) full duplex mode with cross coupling light

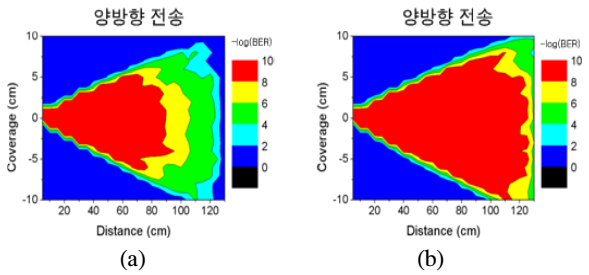
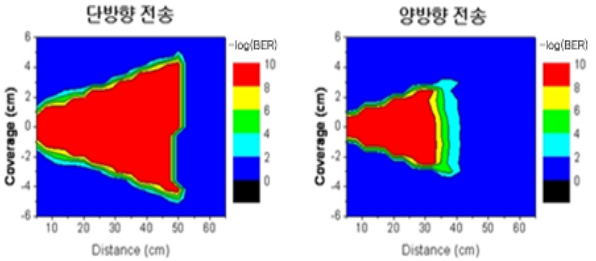


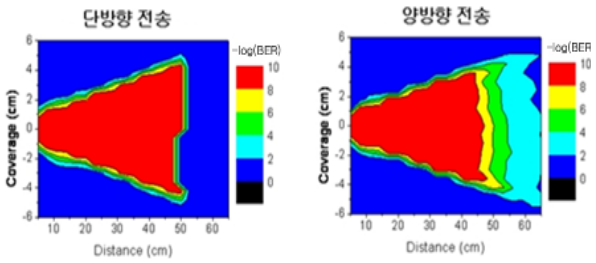
그림 5. 양방향 전송모드에서 metal shield를 (a) 사용하지 않았을 경우와 (b) 사용한 경우의 가시광 송수신기의 전송링크 특성
Fig. 5. The BER performance of a transceiver (a) without a shield (b) with a shield in the presence of cross coupling light

의 (a)는 누화가 없는 가시광 통신 시스템이 약 110cm의 거리와 약 17.5cm의 적용범위 내에서 10^{-8}보다 훨씬 더 낮은 BER을 제공할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 그림4의 (b)는 누화를 갖는 가시광통신 시스템에서 통신을 안정적으로 사용하기 위해서는 거리와 적용범위가 각각 약 70cm와 11cm 내에서 이루어져야 한다는 사실을 확인할 수 있다. 그림5는 가시광 무선 송수신기에 shielding 방법을 적용한 그림으로 누화를 갖는 양방향 가시광 통신 시스템에서 (a) metal shield를 사용하지 않았을 때와 (b) metal shield를 사용했을 때의 가시광통신 송수신기의 전송링크 특성을 보여주고 있다.

양방향 전송시 metal shield를 사용한 경우의 시스템이 metal shield를 사용하지 않은 경우에 비해 전송거리와 적용범위가 각각 100cm와 15cm로 증가되어 BER 성능이 크게 개선된 것을 확인할 수 있다.



(a) Optical antenna를 사용한 경우



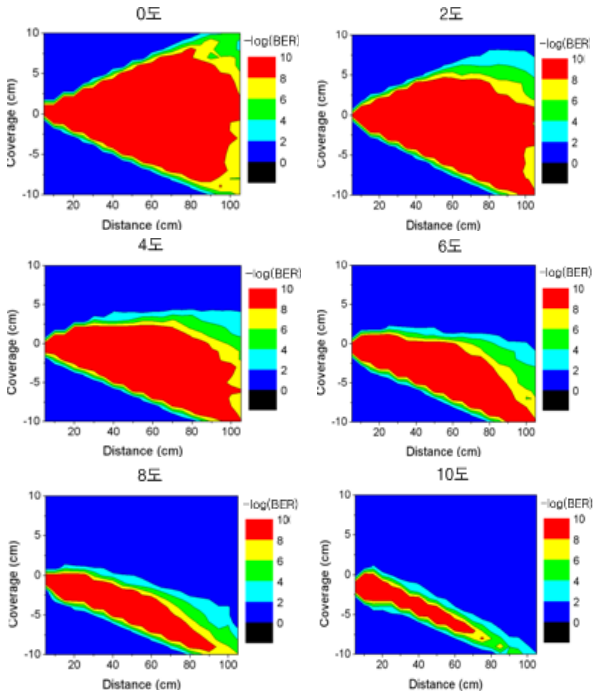
(b) Optical antenna와 metal shield를 사용한 경우

그림 6. 단방향/양방향 전송에서 (a) optical antenna를 사용한 경우 (b)optical antenna와 metal shield를 사용한 경우의 가시광 송수신기 전송링크 특성
Fig. 6. The BER performance of a transceiver (a) with a optical antenna (b) with a shield and optical antenna in the simplex and duplex mode

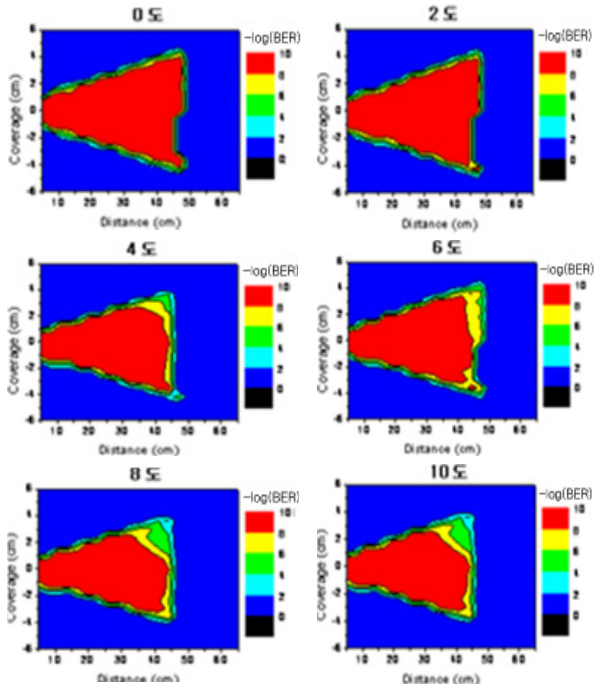
그림6은 Optical antenna와 metal shield를 적용한 경우에 누화에 따른 송신기와 수신기간의 전송링크 특성을 보여주고 있다. 단방향 전송 시에는 약 50cm의 전송거리를 가지며 metal shield에 의한 성능 개선이 없다. 반면에 양방향 전송시에는 metal shield에 의한 성능 개선이 뚜렷하여 약 45cm의 전송 거리 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림7은 Optical antenna 구조를 적용한 경우에 기울임 각도에 따른 가시광 송수신기의 전송링크 특성을 보여 주고 있다. 그림7의 모든 측정은 송신기 수신기 누화가 존재하는 양방향 전송 상태에서 진행되었다. Optical antenna 구조를 적용한 경우에는 약 45cm의 전송거리를 가지고 있으며 약 +/- 10도의 기울어짐에도 불구하고 전송링크의 성능이 크게 열화 되지 않는 것을 알 수 있다.

다음은 가시광 송수신기의 배광 특성을 시뮬레이션 tool을 활용하여 분석한 결과들이다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 시뮬레이션 tool인 SolidWorks를 사용하여 광학 설계한 송신기(transmitter), ball lens type 수신기, optical antenna 수신기이다. 분석은 시뮬레이션 tool인 OptisWorks를 활용하여 수행하였으며 실험 구성도는 그림3과 같이 송신기와 수신기가 50cm의 거리를 두고 기울임 각도를 0도로 했



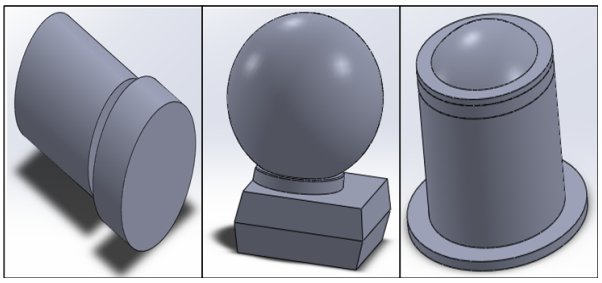
(a) Optical antenna를 적용하지 않은 경우



(b) Optical antenna를 적용한 경우

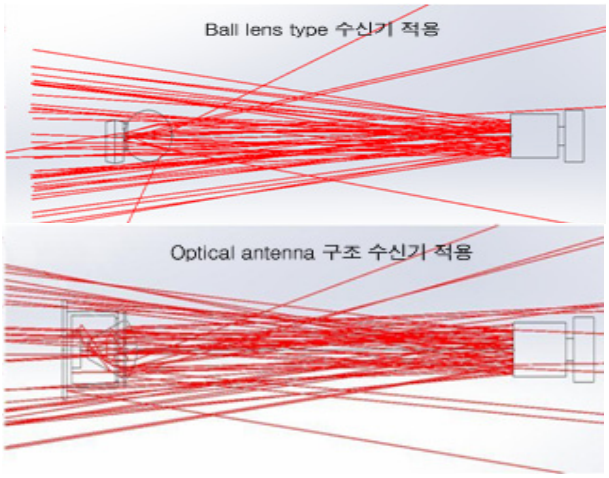
그림 7. Optical antenna를 (a) 적용하지 않은 경우와 (b) 적용한 경우의 기울임 각도에 따른 가시광 송수신기의 전송링크 특성
Fig. 7. The BER performance of transceiver at 0 and 10 degree tilt (a) with a ball lens (b) with an optical antenna

을 경우와 10도로 했을 경우로 구분하여 배광 특성을 분석하였다. 사용된 송신기의 출력 파워는 3mW

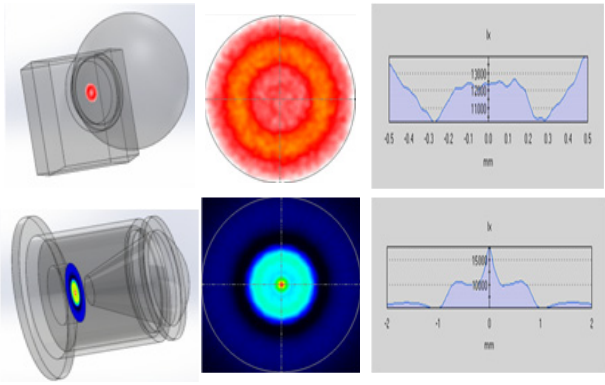


(a) (b) (c)

그림 8. 모델링된 송신기와 수신기의 구조 (a) 송신기 (b) Ball lens type 수신기 (c) optical antenna 수신기
Fig. 8. Pictures of the designed (a) transmitter (b) ball lens type receiver (c) optical antenna receiver

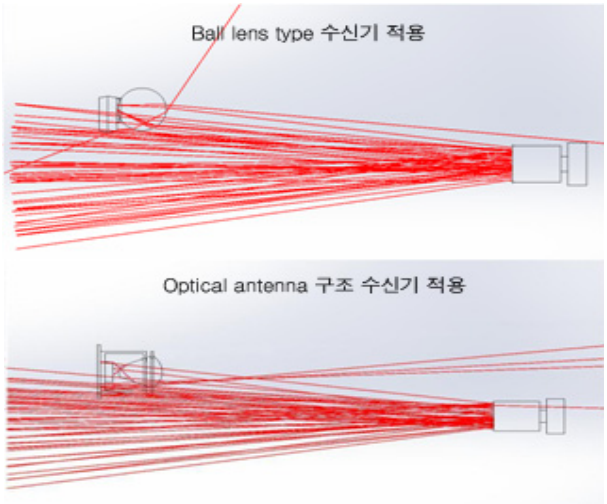


(a)

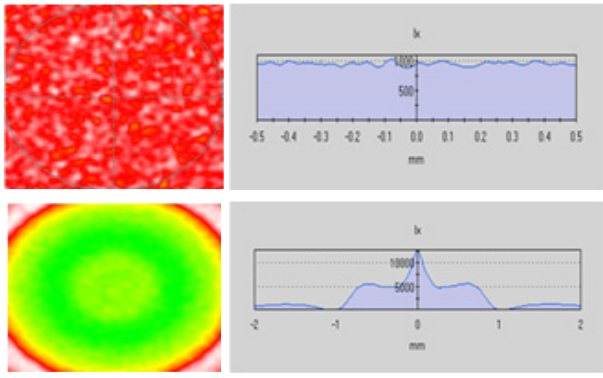


(b) (c)

그림 9. 0도 일때 (a) 송신기와 수신기의 배광 (b) Ball lens type 수신기와 optical antenna 수신기의 detector top 표면 section (c) horizontal section의 광량
Fig. 9. Pictures of (a) photometric result at 0 degree tilt (b) detector top surface section of ball lens type and optical antenna receiver (c) amount of light of horizontal section



(a)



(b) (c)

그림 10. 10도 일때 (a) 송신기와 수신기의 배광 (b) Ball lens type 수신기와 optical antenna 수신기의 detector top 표면 section (c) horizontal section 광량
Fig. 10. Pictures of (a) photometric result at 10 degree tilt (b) detector top surface section of ball lens type and optical antenna receiver (c) amount of light of horizontal section

이고 중심 파장은 635nm이며 FWHM의 스펙트럼 폭은 약 5nm를 갖도록 하였다. 기울임 각도를 0도로 하였을 때의 송수신기의 배광 특성은 그림 9(a)와 같으며 각 수신기의 detector top표면에 수신된 광량의 모습과 에너지 분포는 각각 그림 9(b)와 9(c)에 나타냈다. 그림 9(c)에서 측정된 photometric 결과는 ball lens type 수신기와 optical antenna 수신기가 각각 평균 3872 lx와 4001 lx로 성능의 차이가 별로 크지 않은데 비하여 기울임 각도를 10도로 하여 측정한 그림 10의 결과에서는 ball lens type 수신기가 평균 788 lx를 optical antenna 수신기에서는 평균 1651 lx를 나타내어 optical antenna 수신기를 사용할 경우 ball lens type 수신기에 비해

시야각과 집광 효율이 크게 개선될 수 있다는 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

이 논문에서는 조명 및 무선통신이 동시에 가능한 가시광 무선 송수신기에 대한 연구가 수행되었으며 제안된 가시광 송수신기는 가시광 통신 본연의 특성인 가시성, 편의성, 보안성 그리고 다른 RF 기반의 무선통신 기술들과의 경쟁력을 고려하여 120 Mbit/s에서 고속 양방향 전송이 가능하도록 edge-emitting laser diode와 silicon photo diode를 기초로 설계되었다. 그리고 적용된 무선 가시광 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위해 전송성능을 크게 제한하는 요소인 누화의 원인을 분석하고 이를 최소화하기 위한 방법으로 shielding 방법을 적용해 그 성능을 실험적으로 증명하였다. 또, 가시광 통신 시스템에서 가장 큰 단점으로 지적되고 있는 좁은 시야각 문제를 해결하기 위해서 커다란 시야각과 집광 효율이 좋은 새로운 구조의 광학적 안테나를 적용하여 개선된 성능의 특성을 전송거리, 적용범위 그리고 기울임 정도를 변화시키면서 BER과 빛의 배광 특성을 측정 분석하였다. 제안된 송수신기는 가시광 무선 통신 시스템에 응용 가능한 좋은 성능의 송수신기 특성을 보여주고 있으나 LED의 출력 파워 및 고속 통신을 위한 변조대역폭의 한계로 조명용 LED가 아닌 LD기반의 가시광 통신 시스템에 적용되었다. 따라서 앞으로는 고출력과 넓은 변조대역폭을 갖는 조명용 LED를 이용하여 보다 다양한 측면에서의 성능개선을 위한 가시광 무선 송수신기에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] D. Porcino, and W. Hirt, "Ultra- wideband radio technology potential and challenges ahead," IEEE communications Magazine, vol. 41, pp. 66-74, 2003.

[2] C. D. Knutson, and J. M. Brown, "IrDA principles and protocols Salem," UT: MCL, press, pp. 3-10, 2004.

[3] A. M. Street, P. N. Stavrinou, D. C. Obrien, and D. J. Edwards, "Indoor optical wireless systems-A review," Opt. Quantum Electron., vol. 29, pp.349-378, 1997.

[4] Y. Tanaka, T. Komine, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Indoor visible light data transmission system utilizing white LED lights," IEICE Trans. Commun., vol. E86-B, no. 8, pp. 2440-2454, Aug. 2003.

[5] T. Komine and M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible- light communication system using LED lights," IEEE Trans. Consumer Electron. vol. 50, pp. 100-107, 2004.

[6] 강태규, 이권형, 김대호, 임상규, "LED 조명을 이용한 유비쿼터스 가시광 무선통신 서비스," 한국 인터넷 정보학회, 제 10권, 1호, pp. 85-91, 3월, 2009년.

[7] M. Akanegawa Y. Tanaka, and M. Nakagawa, "Basic Study on Traffic Information System Using LED Traffic Lights," IEEE Transactions on ITS, vol. 2, no. 4, pp.197-203, 2001.

[8] Mitsuhiro Wada, Tomohiro Yendo, Toshiaki Fujii and Masayuki Tanimoto, "Road-to-Vehicle Communication Using LED Traffic Light," Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings. IEEE, pp. 601-606, 2005.

[9] Tae-Gyu Kang, "A vehicle applications on visible light communications," IEEE 802.15 VLC SG, 2008.

[10] 강태규, "가시광 무선통신 표준 기술 동향," TTA Journal, no. 113, pp. 85-90, 2007.

[11] S.-B. Pa rk, D. K. Jung, H. S. Shin, D. J. Shin, Y. -J. Hyun, K. Lee, and Y. J. Oh, "Information Broadcasting System based on Visible Light Signboard," Proc. Wireless and Optical Communications 2007, pp. 311-313, 2007.

[12] D. J. T. Heatley, D. R. Wisely, I. Neild, and P. Cochrane, "Optical wireless: The story so far," IEEE Communications Magazine, vol. 36, pp.72-82, 1998.

송 석 수 (Seoksu Song) 정회원

2001년 8월 명지대학교 전자공학과 학사
2003년 8월 고려대학교 전자-컴퓨터 공학과 석사
2011년 8월 고려대학교 전자-컴퓨터 공학과 박사
2011년 8월~현재 한국조명연구원 주임연구원
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신공학, 가시광통신공학, LED 조명 기술

공 영 식 (Youngsik Kong) 정회원

1986년 2월 경희대학교 전자공학과 석사
1993년 2월 고려대학교 전자통신공학과 석사
2003년 7월 KAIST 최고컨설턴트 수료
2011년 8월~현재 한국조명연구원 제 5대 원장
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신공학, LED 조명 기술

박 진 우 (Jinwoo Park) 정회원

1979년 고려대학교 전자공학과 학사
1983년 클렘슨대학교 전자공학과 석사
1987년 버지니아 주립대학교 전기및컴퓨터공학과 박사
1988년 3월~1989년 2월 명지대학교 전자공학과 교수
1989년 3월~현재 고려대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 무선통신공학, 광통신공학, 광통신망