creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000256602

2011年 11月

석사학위 논문

가시광 무선통신을 위한 PWM 디밍기반 NRZ 신호전송방식 연구

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

조 은 별

가시광 무선통신을 위한 PWM 디밍기반 NRZ 신호전송방식 연구

PWM Dimming based NRZ Signaling for Visible Light Communication

2012년 2월 24일

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

조 은 별

가시광 무선통신을 위한 PWM 디밍기반 NRZ 신호전송방식 연구

지도교수 이 충 규

이 논문을 전자공학 석사학위신청논문으로 제출함

2011년 11월

조선대학교 대학원

전 자 공 학 과

조 은 별

조은별의 석사학위논문을 인준함

위원장　조선대학교 교　수　김 정 화　(인)

위　원　조선대학교 교　수　박 광 채　(인)

위　원　조선대학교 조교수　이 충 규　(인)

2011년　11월

조선대학교 대학원

목 차

제1장 서 론 ····· 1
제1절 가시광 통신기술 동향 ····· 2
1. 가시광 통신기술 연구 동향 ····· 2
2. 가시광 무선통신 표준화 동향 ····· 3
3. 가시광 무선통신 변복조 기술 동향 ····· 4
제2절 연구범위 및 연구내용 ····· 6

제2장 NRZ-OOK와 PWM의 정의 및 기본이론 ····· 7
제1절 NRZ-OOK (Non Return to Zero - On/Off Keying) 의 정의 ····· 7
제2절 PWM (Pulse Width Modulation) 의 정의 ····· 8
제3절 신호생성과 복원을 위한 프로그래밍 언어 ····· 9

제3장 디밍조절 NRZ 신호전송 시스템 ····· 11
제1절 시스템 실험 셋업 ····· 11
제2절 실험 구성요소 ····· 12
1. 광원 ····· 12
2. 수광소자 ····· 12
3. DAQ (Data Acquisition) 보드 ····· 14
제3절 신호의 생성 및 송신 ····· 16
제4절 신호의 수신 및 복원 ····· 24

제4장 실험결과 및 분석 ····· 28
제1절 10 [cm] 거리 송·수신시 실험결과 및 분석 ····· 29
제2절 20 [cm] 거리 송·수신시 실험결과 및 분석 ····· 36

제3절 수신 신호의 Eye diagram ····· 42
제4절 PWM 신호의 펄스 폭 증가에 따른 밝기비교 ····· 44

제5장 결론 ····· 45

참고문헌 ····· 46

도 목 차

그림 2.1.1 NRZ 코딩의 종류 ····· 7
그림 2.2.1 duty cycle의 변화에 따른 PWM Waveform ····· 9
그림 2.3.1 LabVIEW의 프런트패널과 블록다이어그램 화면 ····· 10
그림 3.1.1 시스템 실험 셋업의 블록다이어그램 ····· 12
그림 3.2.1.1 실험에 사용된 LED ····· 13
그림 3.2.2.1 실험에 사용된 PD ····· 13
그림 3.2.2.2 실험에 사용된 PD의 Responsivity ····· 14
그림 3.2.3.1 PCI-6229와 연결된 커넥터 블록 ····· 15
그림 3.2.3.2 커넥터 블록과 케이블의 결합 ····· 15
그림 3.3.1 변조신호 생성 다이어그램 ····· 16
그림 3.3.2 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호 ····· 17
그림 3.3.3 LabVIEW로 설계한 변조신호 알고리즘 ····· 19
그림 3.3.4 PWM 신호 설계 알고리즘 ····· 20
그림 3.3.5 LabVIEW로 만들어진 PWM Waveform ····· 20
그림 3.3.6 PRBS 패턴을 가지는 NRZ-OOK 신호 ····· 22
그림 3.3.7 PWM과 NRZ-OOK의 변조신호 ····· 22
그림 3.3.8 변조신호와 NRZ-OOK 신호 ····· 22
그림 3.3.9 송신부 블록다이어그램 ····· 23
그림 3.4.1 수신부 블록다이어그램 ····· 24
그림 3.4.2 수신된 변조신호 ····· 25
그림 3.4.3 PWM 신호의 On 구간 복원신호 ····· 25
그림 3.4.4 PWM 부분을 제거한 PWM 신호의 Off 구간 신호 ····· 26
그림 3.4.5 미분함수를 거친 PWM 신호의 Off 구간 신호 ····· 26
그림 3.4.6 완성된 복원신호 ····· 27

그림 4.1.1 송신기 PRBS 패턴을 가지는 NRZ-OOK 신호 ····· 29
그림 4.1.2 송신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%]) ····· 29
그림 4.1.3 송신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%]) 와
NRZ-OOK 신호 ····· 29
그림 4.1.4 수신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 31
그림 4.1.5 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 31
그림 4.1.6 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%]) ····· 32
그림 4.1.7 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%]) 와
NRZ-OOK 신호 ····· 32
그림 4.1.8 수신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 33
그림 4.1.9 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 33
그림 4.1.10 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%]) ····· 34
그림 4.1.11 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%]) 와
NRZ-OOK 신호 ····· 34
그림 4.1.12 수신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 35
그림 4.1.13 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm] ····· 35
그림 4.2.1 송신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%]) ····· 36
그림 4.2.2 송신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%])와
NRZ-OOK 신호 ····· 36
그림 4.2.3 수신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 20 [cm]) ····· 37
그림 4.2.4 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 37
그림 4.2.5 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%]) ····· 38
그림 4.2.6 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%])와

NRZ-OOK 신호 ····· 38
그림 4.2.7 수신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 20 [cm]) ····· 39
그림 4.2.8 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 39
그림 4.2.9 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%]) ····· 40
그림 4.2.10 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%])와
NRZ-OOK 신호 ····· 40
그림 4.2.11 수신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%], 거리 : 20 [cm]) ····· 41
그림 4.2.12 수신된 변조신호와 복원신호
(duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 41
그림 4.3.1 수신된 신호의 Eye diagram
(duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 42
그림 4.3.2 수신된 신호의 Eye diagram
(duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm]) ····· 42
그림 4.3.3 수신된 신호의 Eye diagram
(duty cycle : 50 [%], 거리 : 20 [cm]) ····· 43
그림 4.3.4 수신된 신호의 Eye diagram
(duty cycle : 70 [%], 거리 : 20 [cm]) ····· 43
그림 4.4.1 PWM 신호의 펄스폭 변화에 따른 LED 밝기변화 ····· 44

표 목 차

표 4.1 실험 조건표 ····· 28

ABSTRACT

PWM Dimming based NRZ Signaling for Visible Light Communication

Eun Byeol Cho
Advisor : Prof. Lee Chung Ghiu, Ph. D.
Department of Electronic Engineering,
Graduate School of Chosun University

Recently, the visible light communication is being developed for some potential applications in the field of indoor communication system and intelligent transportation system covering vehicle to vehicle / road to vehicle communication, information display, and home networking.

Illumination industry incorporating LED is growing up rapidly. It is expected that the market relating to the visible light communication will also grow up with LED development. And application technologies such as visible light communication using LED have been researched in the world.

The objective of this study is to propose and experimentally demonstrate a signaling scheme using NRZ coding for visible light communication.

The signal format is based on PWM for dimming control and NRZ-OOK signals. The signal waveform is generated using LabVIEW for experiments. The signal format increases slot utilization since the signaling scheme utilizes the off-state of the PWM dimming period. Thereby, the data rate can be increased compared with the case without data pulses during the off-state of the PWM period, at the cost of dimming level. The proposed technique is simple and effective in providing the data transmission with the dimming simultaneously.

제1장 서론

빛은 파장에 따라서 다른 이름을 가지고 있다. 자외선은 파장이 10[nm]에서 400[nm]사이의 영역에 해당하는 영역을 이르는 빛으로 우리 눈에 보이지는 않지만 세균을 죽이는 살균효과를 가지고 있으면서 피부에 오래 노출시키면 피부암을 유발하는 특성을 지니고 있다. 병원에서 흔히 찍는 X-ray는 파장이 1[nm]근처 대역의 빛으로 역시 우리 눈에 보이지 않으며 방사선의 영역에 해당한다. 적외선은 파장이 700[nm]에서 1000[nm]인 대역의 빛으로 온열효과와 살균 및 소독효과를 가지고 있으며 통신용 광원으로도 쓰이고 있다 [1][2]. 자외선과 적외선 사이의 파장인 400[nm]에서 700[nm]사이의 영역의 빛을 가시광이라 한다. 가시광은 우리의 눈이 인식하는 빛의 파장대역으로서 눈으로 사물을 볼 수 있도록 한다.

최근에는 이러한 가시광 대역의 빛을 방출하는 조명용 LED 제조기술의 발전으로 산업의 다양한 분야에서 조명용 LED응용 제품이 상용화되고 있다. LED는 백열등과 형광등을 포함하는 기존 조명과 달리 소비전력대비 밝기가 우수하고 수명이 길다는 장점 뿐만 아니라, 방향성 광원으로써 원하는 색상을 원하는 곳으로 선택조명을 할 수 있다는 점에서 차세대 조명용 광원으로 큰 각광을 받고 있다. 대표적인 응용 사례로 휴대폰을 비롯하여 노트북, TV의 디스플레이 백라이트용 조명과 자동차용 조명등이 있고, 교통 신호등의 경우 광원이 기존의 백열전구에서 거의 대부분이 LED로 교체되고 있다. 이렇게 조명용 LED는 그 응용 범위가 점차 확대되고 있는 추세에 있으므로 이러한 LED를 활용한 통신기술은 가까운 미래에 매우 유망한 기술 분야로 예측되고 있다 [3-6]. 구체적인 예로 Machine to Machine 통신, 주파수 무간섭, ITS 안전을 위한 자동차간 통신, 자동차와 신호등간 통신, 자동차와 가로등간 통신, 전자광고판 통신광고 서비스, LBS 측위, 빛 센서 통신 등 다양한 융합 서비스가 창출될 것으로 전망된다.

가시광 무선통신 기술은 그 물리적 특성으로 인해 보안성이 뛰어나며, 정부로부터 주파수 규제를 받지 않는 누구나 쉽게 이용할 수 있는 전파자원이다. 이와 같은 장점 때문에 빛을 이용한 실내용 가시광 무선통신 기술이 연구되고 있지만, 아직은 시스템 모델링, 통신링크, 송수신기모듈, 변조 형식 등의 분야에서 기초적인 수준의 연구가 대부분이어서 실제 생활에 적용하기 위해서는 아직 많은 연구가 필요한 단계이다 [7-12].

이를 위해 본 논문은 PWM 디밍 신호에 기반하여 NRZ data를 디밍과 동시에 송신할 수 있는 신호형태를 제안한 방식과, 이를 실험적으로 검증하는 기술적 내용을 담고 있다.

제1절 가시광 통신 기술 동향

1. 가시광 통신기술 연구동향

유럽은 새로운 단거리 고속 무선 접속 기술로서 연구 개발을 진행하였으나, 2008년부터 유럽연합 경쟁력혁신 정책지원사업의 일환으로 근거리 무선 광통신 기술 개발이 학계 및 산업계에서 진행될 예정이다. 옥스퍼드 대학에서는 적외선 대역의 무선 광통신을 위한 연구를 수행하여 왔으나 [11], 최근 백색 LED 조명을 이용한 가시 광통신의 전송 대역폭 향상을 위하여 다중 Resonant equalization 기법에 관한 연구 개발을 수행하였다 [8].

WWRF (world wireless research forum) 은 단거리 무선통신 기술에 대한 기술 논의 및 협력을 추진하고 있으며, 2007년부터 Oxford대학, 삼성전자, 프랑스 텔레콤, 지멘스가 공동으로 가시광 무선통신기술의 시장전망 및 기술개발 로드맵을 제출하였다. WWRF를 통해 2008년 상반기부터 차량 간통신기술에 대한 white paper에 관한 작업을 진행하고 있다.

미국은 홈 네트워크 분야의 새로운 고속 무선 접속 기술로서 연구 개발을 진행하고 있다. Pennsylvania 주립대에서는 홈 네트워크 상에서 댁내 멀티미디어 기기들에게 데이터 및 음성, 영상 서비스를 제공하기 위한 고속 광대역 접속 기반으로서 전력선통신과 결합된 가시광통신 시스템을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 1 Gbps]에 이르는 광대역폭을 제공할 수 있음을 보였다. Boston 대학을 중심으로 하여, Rensselaer Polytechnic Institute, New Mexico 대학 등은 Smart Lighting Engineering Research Center (ERC) 를 설립하여 National Science Foundation (NSF) 로부터 5년 이상의 연구비를 수주하였다.

일본은 2004년부터 관련된 산학연 단체들이 VLCC (Visible Light Communication Consortium) 라는 단체를 구성하여 가시광 통신 기술의 연구 개발, 조명용 LED의 가시광 통신 적용방안과 가시광 통신의 실생활 응용 방안에 관한 연구를 수행하고 있다. 또한 일본 국내 표준안 제정을 위하여 단체 표준안을 단계적으로 추진하고 있다. 총무성은 2006년 11월 NTT 연구소와 오키전기공업, NEC

등 민간기업과 공동으로 가시광 통신 기술의 5년 내 실용화를 목표로 연구 개발 추진 계획을 공표하였다. 게이오 대학에서는 1999년부터 조명용 LED를 이용한 가시광 통신기술을 연구하기 시작하였으며, 가시광 통신을 ITS에 적용하는 방안, 백색 LED Array와 Image Sensor를 이용한 데이터 전송 다중화 기법, 네트워크 접속을 위해 전력선 통신을 가시광 통신과 결합하는 방안 등의 다양한 기술들에 대한 연구 개발을 진행하고 있으며, 일본 내 가시광 통신 기술의 연구 개발을 선도하고 있다 [13-16].

NEC와 시미즈 건설에서는 2006년 3월에 조명용 LED로 구현된 전시관용 조명과 교통 신호등을 이용하여 가시광 Tag-ID를 4.8[Kbps]로 전송하여 상품 정보, 음식점 메뉴 정보, 보행자 위치 인식 및 네비게이션 정보를 전달하는 응용 방안을 구현하고 시현한 바 있으며, 기술 개발을 진행하고 있다.

삼성전자는 미래 기술에 대한 선행 연구 및 국내외 표준화 선도의 일환으로 TTA 표준화 위원회에서 활발히 활동하고 있으며, 핵심기술에 대한 자체 연구개발을 추진하고 있다. 2006년 상반기부터 휴대 단말기 및 멀티미디어 기기 간의 Point-to-point 거리 통신 분야와 옥내외 LED 전광판 및 상업용 LED 조명을 이용한 정보 방송 분야, 실외 LED 조명을 이용한 근거리 LAN 분야의 가시광통신 기술을 연구 개발하고 있으며 기술력을 확보하고 있다. 보다 고속의 데이터를 Point-to-point 및 Point - to-multipoint 방식으로 통신할 수 있는 기술 개발을 추진하고 있으며, Oxford 대학 O'Brien 교수 연구팀과 공동연구를 수행하고 있다 [9].

한국광기술원 (KOPTI) 은 2004년부터 조명용 고휘도 LED를 사용한 통신시스템의 가능성을 실험적으로 검증해 왔다. 2005년 중반부터 산업자원부 신기술 실용화 개발 사업을 통해 가시광 무선통신 관련 연구를 수행하였고, 현재 통신성능을 높이는 연구를 수행하고 있다.

2. 가시광 무선통신 표준화 동향

IEEE 802.15의 표준화 동향을 살펴보면 IEEE802 LMSC (LAN/MAN Standards Committee) 의 802.15에서 Study Group (SG-VLC) 을 구성하여 국제 표준화에 큰 관심을 두고 있다. 한국의 삼성전자, ETRI를 중심으로, 유럽의 Siemens, Oxford Univ.가 적극적으로 참여하고 있다. 유럽 및 일본의 표준화 동향을 살펴보면 WWRF의 WG5는 단거리 무선통신기술 (Short Range Wireless Communication

Technology) 에 대한 기술 논의 및 협력을 추진하는 분과로서 다양한 차세대 무선 접속 기술 중의 하나로 가시광 통신 기술을 검토하고 있으며, 옥스퍼드 대학, 삼성전자, 프랑스 텔레콤과 지멘스가 공동으로 가시광통신 기술의 killer application과 시장 전망, 기술 개발 로드맵 등에 대해 분석 및 정리하는 White Paper 작성을 진행하고 있다. VLCC는 게이오 대학 주도하에 가시광통신 기반 기술과 시스템, 소자, 통신 서비스에 관련된 산학연 단체들의 모임으로 설립되었으며, 기술 교류와 활성화, 시스템의 개발 및 시연, 인지도 확산과 일본 국내 표준화를 목적으로 활동하고 있다. 게이오 대학, NTT DoCoMo, KDDI, Matsushita, NEC, Sony,Toshiba, Toyota Gosei 등 산학연 단체들이 VLCC에 가입하여 활동하고 있다.

3. 가시광 무선통신 변복조 기술 동향

최근까지의 변복조 기술 연구는 가시광 무선통신을 목표로 하여 수행되지 않고, 적외선 무선통신 또는 일반적 광무선 통신을 목표로 대부분 수행되었으며, 2008년에 이르러 조명용 LED를 이용한 시스템에 대한 변복조 기술에 관한 연구가 발표되기 시작하였다.

영국 Northumbria 대학의 Z. Ghassemlooy 연구팀은 실내용 광무선 통신시스템에 적합한 변조신호를 개발해왔는데, On/Off Keying (OOK) [17], Pulse-Position Modulation (PPM) [18], and Dual Header Pulse Interval Modulation (DH-PIM) [19] 등에 관한 연구결과를 발표하였다.

영국 Leeds 대학의 K. K. Wong 연구팀은 다중경로분산 (Multipath dispersion)과 인공적인 광간섭(Light interference) 이 존재하는 환경의 비지향성 가시성 (Non-directed LOS) 링크에 대해서 OOK, 2-PPM and SIK 변조방식에 대한 성능을 분석하고 시뮬레이션으로 검증하여 발표하였다 [20].

일본 Keio 대학의 M. Nakagawa 연구팀은 2006년 전력선통신 (PLC : Power Line Communication) 시스템과 가시광무선통신 (VLC) 시스템의 집적시스템에서 Narrowband OFDM의 통신성능을 계산한 연구결과를 발표하였다 [21].

미국의 Oakland 대학의 Q. Liu 연구팀은 2004년 IEEE Globecom 2004에서

turbulent atmospheric channel을 통한 subcarrier PSK intensity 변조된 광무선 통신시스템에 관한 연구결과를 발표하였다.

일본 Tokyo 대학의 T. Ohtsuki 연구팀은 2004년 IEEE Globecom 2004에서 광무선 통신시스템의 데이터 전송률을 증가시키기 위한 Multiple-Input Multiple-Output 기술에 대한 연구결과를 발표하였다 [22]. 특히, Zero Forcing (ZF) 방법을 사용하여 다른 광신호원에서 송신된 간섭신호를 제거하는 방식을 사용하였다.

일본 Tokyo 대학의 T. Ohtsuki 교수는 Turbo-coded Atmospheric Optical Subcarrier Phase-Shift Keying (PSK) 시스템과 Turbo-coded Atmospheric Optical Pulse Position Modulation (PPM) 시스템을 제안하고, BER 성능을 비교하였다 [23].

일본 Tokyo 대학의 T. Ohtsuki 교수는 2003년 IEEE Communications Magazine에 광무선 통신에서의 Multiple - Subcarrier Modulation (MSM) 기술에 대해 발표하였다. 특히, Subcarrier Signal Point Sequences (SSPS) 를 이용한 MSM 광통신 시스템에 대한 설명을 포함하고 있다 [24].

스페인 Malaga 대학의 J.M. Garrido-Balsells 연구팀은 2006년 Electronics Letters에 데이터율에 적응하는 무선광통신 시스템을 위한 가변 Weight Multiple-PPM 기술에 관한 연구를 수행하였다 [25].

네덜란드 Philips Research의 J-P. M. G. Linnartz 연구팀은 2008년 ICC에 고출력 LED 시스템에 있어 각 LED램프의 조명을 감지하여 조절할 수 있도록 정보를 PPM 방식으로 코드화하여 전송하는 Code-Time Division Multiple Access - Pulse Position Modulation (CTDMA-PPM) 지능형 조명제어시스템을 발표하였다 [7].

미국 Indiana 주립대학의 X. Li 교수는 Proceedings of 2008 IAJC-IJME 에서 시뮬링크에 기반한 QAM 통신시스템에 관한 연구결과를 발표하였다.

제2절 연구범위 및 연구내용

조명용 LED를 이용하여 조명과 통신이 동시에 가능한 새로운 변조방식을 설계하였다. 기존의 변조 방식에는 하나의 PWM (Pusle Width Modulation) 신호의 주기에 한 개의 비트를 실어서 통신을 하였지만 본 연구에서는 하나의 PWM 신호의 주기에 10개의 비트를 실어서 통신을 하였다 [26]. 기존 방식이 PPM (Pulse Position Modulation) 을 기반으로 하는 데이터 통신을 했던 반면, 본 연구에서는 NRZ-OOK (None Return to Zero - On/Off Keying) 기반으로 하는 변조방식을 채택하였다. 이는 PPM기반의 방식보다 덜 복잡하고 구현하기 쉬우며 따라서 저렴한 비용으로부터 기인한다.

변조방식을 위한 알고리즘 구현은 LabVIEW 프로그래밍 언어를 이용하여 설계하였다. 조명을 위한 PWM 신호 알고리즘과 데이터 통신을 위한 NRZ-OOK 신호를 독립적으로 설계하여 조명을 위한 밝기조절 시에 데이터 통신에 영향을 미치지 않게 하며, 데이터 통신 중에는 밝기레벨에 변화를 주지 않게 설계하는 것에 중점을 두었다.

실제 신호의 물리적인 출력에 있어서는 DAQ (Data Acquisition) 보드를 사용하여 다양한 변조방식 테스트에 따른 송신기와 수신기의 요구사항의 변화에 대한 충족조건에 능동적으로 대처하게 하였다. 이러한 DAQ 보드는 LabVIEW가 설치되어 있는 PC와 연결되어 있어서 LabVIEW에 의해 생성된 변조신호가 DAQ 보드를 통해서 실시간으로 물리적인 전기신호로 변환되어 송신기로부터 수신기까지 전송되는 통신 과정을 원활하게 하였다.

본 연구는 데이터 신호를 포함하는 NRZ-OOK 신호와 밝기조절을 하는 PWM 신호를 생성하여 합성하고 이렇게 해서 만들어진 변조신호를 LED driving circuit으로 보내서 데이터 신호를 빛으로 전송하는 동시에 LED의 밝기조절을 하는 송신부와 빛을 수광하여 그로부터 데이터 신호를 복원하는 수신부를 제작함과 실험 수행, 결과 도출에 그 연구의 범위를 정한다. 본 논문의 연구결과는 European Conference on Networks and Optical Communications Conference on Optical Cabling and Infrastructure 에 제출되어 2011년 7월 20일 발표되었다 [27].

제2장 NRZ-OOK와 PWM의 정의 및 기본이론

제1절 NRZ-OOK (Non Return to Zero - On/Off Keying) 의 정의

NRZ-OOK는 None return to zero - On/Off keying 의 줄임말로써 None return to zero는 디지털 라인코딩 방식 중 비영복귀, 즉 0으로 다시 돌아가지 않는 코딩 방식을 뜻한다. On Off Keying은 전기적인 두 가지 상태를 뜻하는 표현으로써 On은 특정 전압 레벨을 가진 상태를 뜻하며 Off는 0[V]의 상태를 뜻한다. 이렇게 2가지의 상태로만 표현되는 라인코딩 방식 중에서 비영복귀 방식인 NRZ-OOK 방식이 사용되었다.

본 논문에서는 Unipolar NRZ 방식이 사용되었는데 이는 양의 전압은 비트1을 나타내고 0[V]는 비트0을 나타낸다. 비트1인 상태는 전압이 high 상태 즉 LED가 On이 된 상태를, 비트0인 상태는 전압이 Low 상태 즉 LED가 Off가 된 상태를 의미한다.

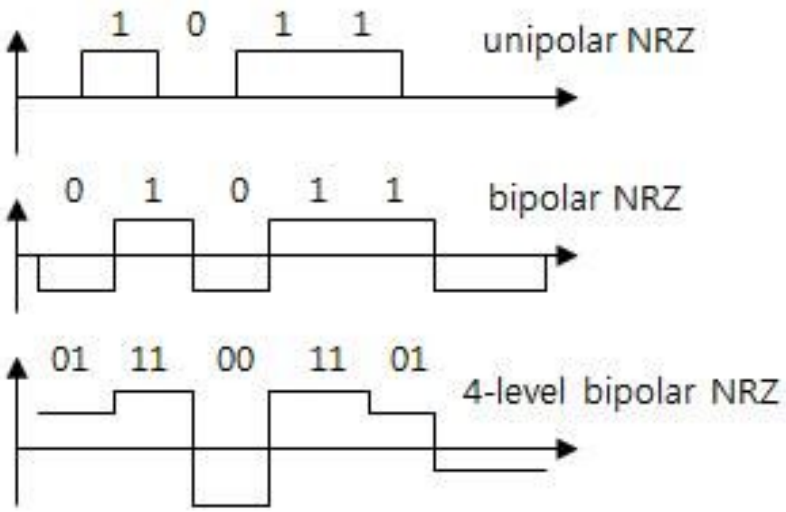

그림 2.1.1 NRZ 코딩의 종류

LED는 +전압에만 전류를 흐르게 하여 빛을 발광한다. 반면에 전기가 들어오지 않던 −전압이 들어오던 모두 전류가 흐르지 않으므로 빛을 발광하지 않는다. 그림 2.1.1에서 보다시피 NRZ 방식에는 여러 가지 방식이 있는데 −전압을 사용하는 다른 NRZ 방식과 달리 Unipolar NRZ 방식은 −전압을 사용하지 않아 −전압을 출력하기 위한 전위차 생성의 과정이 필요하지 않는다.

본 논문에서 NRZ-OOK 신호는 PRBS 패턴으로 생성하였다. PRBS는 Pseudo Random Binary Sequece의 줄임말로써 의사랜덤이진열이라고 하는데 랜덤이 아닌 고정적이고 순환적인 비트열을 거의 랜덤 수열에 가까운 통계적 특성이 보이도록 만든, 의사적으로 랜덤하게 만들어진 패턴을 갖는 비트열을 뜻한다 [28].

제2절 PWM (Pulse Width Modulation) 의 정의

LED의 빛의 밝기를 조절하는 방식으로 constant current control 방식과 PWM 방식이 있다. 근본원리에서는 비슷하지만 근소한 차이점이 있는데, constant current control 방식은 전류레벨이 변하더라도 끊임없이 공급하는 것에 초점을 맞추고 있고 PWM 방식은 고정된 전류 레벨에 중점을 두고 있다.

constant current control 방식은 밝기 조절을 전류의 높낮이 즉, 0[mA]부터 IF (작동전류)까지 전류레벨을 변화시켜서 밝기를 조절한다. PWM 방식은 전류를 IF까지 인가시키고 On/Off 시간을 조절하여 밝기를 제어한다. LED에 IF 레벨의 펄스를 인가시켜 LED가 켜있는 시간 (On Time) 을 1[%]부터 99 [%]까지 변화시켜 밝기를 조절하게 된다.

PWM 신호의 밝기 조절 방식이 그림 2.2.1에 나타나 있다. 위로부터 LED가 켜있는 시간인 duty cycle (주기점유율) 이 30[%], 60[%], 90[%]이다. 30[%]는 한 펄스 주기의 시작점을 기준으로 주기의 30[%]에 해당하는 시간동안만 IF 전류레벨을 유지하고 나머지 70[%] 시간동안에는 꺼져있는 상태이다. 마찬가지로 60[%]는 각 펄스 주기의 60[%] 시간동안에만 켜있고 40[%] 시간동안은 꺼져있다. 90[%]도 마찬가지이다. 90[%] 시간동안 켜있고, 10[%] 시간동안에 LED는 꺼져 있는 상태이다. 이렇게 LED가 켜있는 시간을 조절함으로 LED에 흐르는 평균 전류량을 제어하여 밝기를 원하는 정도로 변화시킬 수 있다.

인간의 눈은 1초에 16번 이상 변화하는 움직임에 대해서는 잔상효과를 일으키게 된다. 영화가 1초에 25에서 30프레임이 되는 것도 이러한 인간의 눈의 잔상효과를

이용하여 필름의 움직임이 자연스럽게 보이도록 하기 위한 것이다. PWM은 통상적으로 100[Hz]정도의 주파수를 이용한다. 이는 너무 낮은 주파수로 PWM신호를 만들 경우 우리 눈이 깜박임을 느낄 수 있기 때문이다.

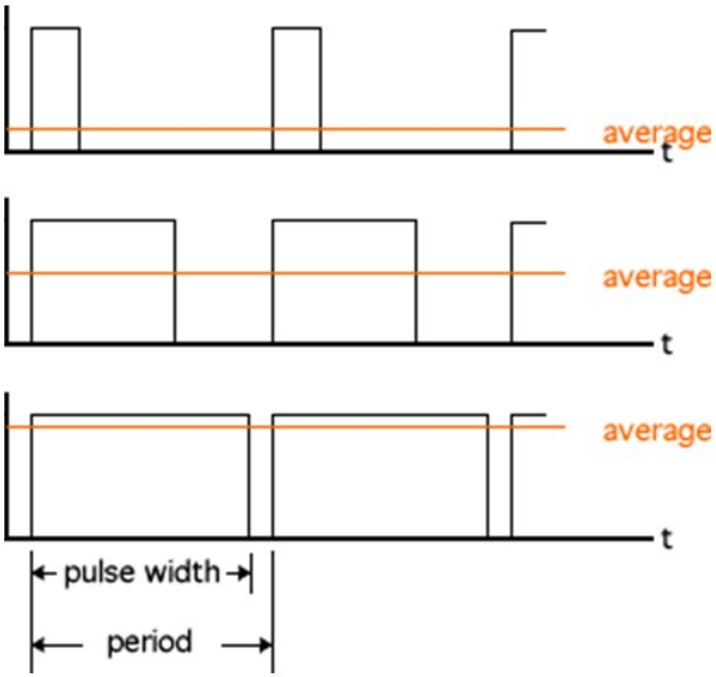

그림 2.2.1 duty cycle의 변화에 따른 PWM Waveform

제3절 신호생성과 복원을 위한 프로그래밍 언어

LabVIEW는 직관적인 그래픽 아이콘 및 흐름 차트를 연상시키는 와이어를 사용하여 고급 측정, 테스트 및 컨트롤 시스템을 개발하기 위해 사용되어지는 그래픽 프로그래밍 환경이다. 수 천 개의 하드웨어 디바이스들의 동시 컨트롤이 가능하며, 고급 분석 및 데이터 시각화를 위한 라이브러리들이 제공되어 산업의 여러 분야에서 수많은 엔지니어들이 사용하고 있다. 특히 LabVIEW 플랫폼은 여러 운영 시스템에서 확장가능하며, 1986년에 처음 출시가 되었다. 지금도 LabVIEW는 그래픽 사용자 언어로써, 컴퓨터를 통한 DAQ 및 각종 장비의 제어등과 같은 부분과 더불어서 사용자 정의의 리포트 출력까지 많은 부분에 있어서, 사용자가 원하는 그대로 저장 및 제어 컨트롤을 할 수 있는 프로그램이다.

실험에 쓰인 LabVIEW는 8.5 버전이며 NRZ-OOK 신호, PWM 신호를 만들기 위한 알고리즘과 이 신호들을 합성하여 변조신호를 만드는 알고리즘, 수신된 신호에서 PWM 신호를 제거하고 NRZ-OOK 신호를 복원하는 알고리즘을 설계하는데 사용되었다.

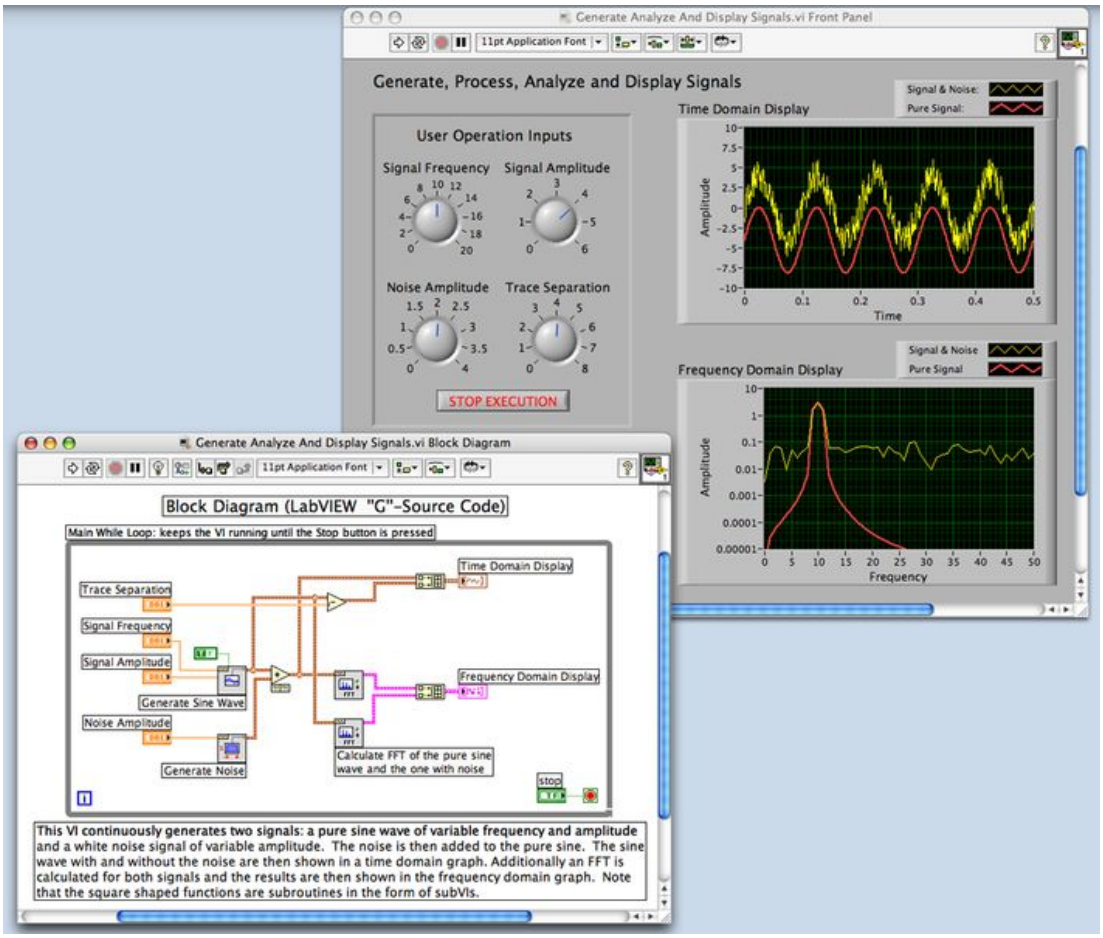

그림 2.3.1 LabVIEW의 프런트패널과 블록다이어그램 화면

제3장 디밍조절 NRZ 신호전송 시스템

PC에서 만들어진 신호는 디지털 이진 신호이다. 이 신호는 LED에서 발광되는 광신호로 변환되기 위해 DAQ 보드를 거쳐 LED를 구동시키기에 적합한 레벨의 전기신호로 변환되어야 한다. 마찬가지로 수광소자가 광 신호를 수광하여 출력하는 전기신호는 PC에서 처리하기 위한 디지털 이진 신호로 변환되어야 한다. 이와 같이 신호의 흐름은 디지털 이진 신호에서 전기신호로 변환되고 다시 광 신호로 바뀌어 진다. 광 신호는 수광되어 전기신호로 변환되고 이는 다시 디지털 이진신호로 변환된다.

따라서 본 장에서는 이러한 신호 흐름의 이해를 돕기 위하여 디밍 조절 NRZ 신호전송 시스템에 대한 실험 셋업과 구성요소, 그리고 신호의 생성 및 전송과 신호의 수신 및 복원에 대해서 설명한다.

제1절 시스템 실험 셋업

PC에서 LabVIEW를 통하여 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호가 더해진 변조 신호가 생성된다. 이 신호는 DAQ 보드에서 전기신호로 출력되어 LED 송신기로 보내어지고 LED를 통하여 가시광 형태로 방사된다. 수신부에서는 방사된 가시광이 PD (Photo Detector) 를 통하여 수광된다. PD는 수광된 광 신호를 전기신호로 출력하고 이 전기신호는 복조와 복원을 위하여 DAQ 보드로 전송된다.

그림 3.1.1 에서 송신부와 수신부의 전체적인 다이어그램을 나타내고 있다. 신호의 흐름은 왼쪽 상단 신호생성부로부터 LED 송신기, PD 수신부를 거쳐 오른쪽 하단 DAQ 보드 신호 복원부로 흐른다.

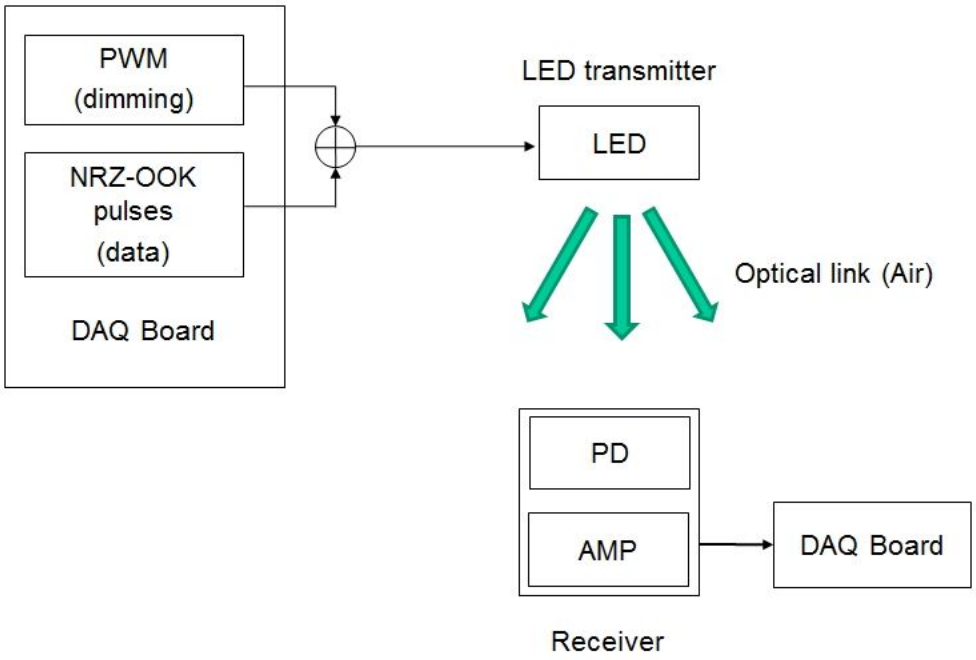

그림 3.1.1 시스템 실험 셋업의 블록다이어그램

제2절 실험 구성요소

1. 광원

본 실험에서 쓰인 LED는 Super flux LED (Brightech사) 로 시중에서 판매되는 조명용 LED중 한 종류이다. 파장은 620 ~ 660 [nm] 대역이며, Forward Voltage는 1.8 ~ 2.5 [V]이다. IF는 20 ~ 100 [mA]이고 Luminous intensity는 200 ~ 4000 [mcd]이다. 소비전력은 20 [mW] (최대소비전력 = 250 [mW]) 이며, 그림 3.2.1.1에서와 같이 LED는 620 ~ 660 [nm] 파장 대역인 붉은색의 빛을 발광한다.

2. 수광소자

수광소자로 사용된 Photo Detector는 실리콘으로 만들어진 Thor Labs사의 FDS1010 Si PIN Photodiode이다. Photodiode는 만드는데 사용되는 물질에 따라서 파장대역이 달라지는데 게르마늄으로 만들어진 Photodiode는 대략 800 ~ 1700 [nm]의 파장 대역에서 반응하고 인듐 갈륨 비소화물이 쓰인 Photodiode는 800 ~ 2600 [nm]의 파장대역에서 반응한다. 실리콘이 쓰인 소자는 190 ~ 1100 [nm]으로 가시

광 파장대역인 400 ~ 700 [nm]을 포함한다.

실험에 쓰인 PD는 400 ~ 1100 [nm]의 파장 대역에 대해서 그림 3.2.2.1 의 Responsivity를 보이고 있으며, 9.7 [mm] × 9.7 [mm]의 수광 면적을 가지고 있고, Rise/Fall time은 45 [ns]이며 Bandwidth는 8 [MHz]이다.

그림 3.2.1.1 실험에 사용된 LED

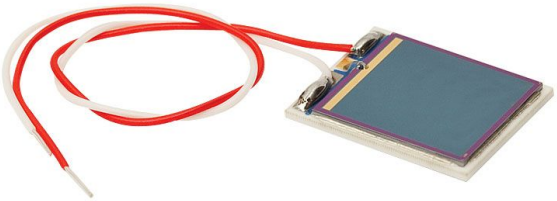

그림 3.2.2.1 실험에 사용된 PD

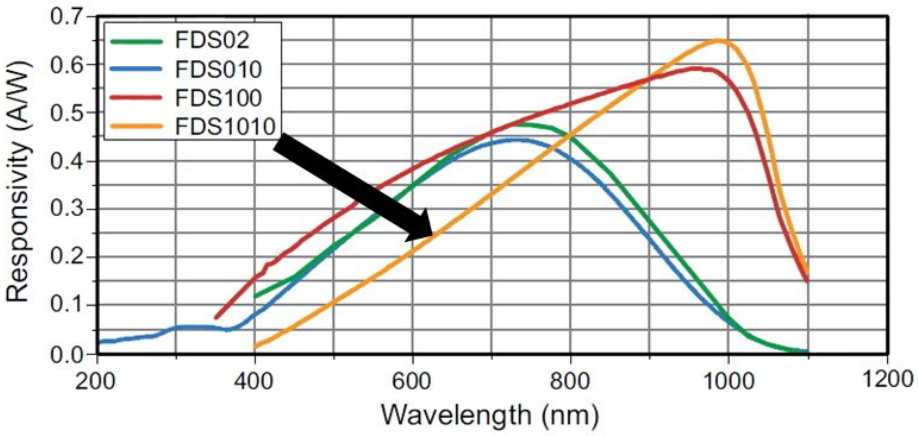

그림 3.2.2.2 실험에 사용된 PD의 Responsivity

3. DAQ (Data Acquisition) 보드

PC에서 프로그래밍을 통해 만든 신호를 LED를 구동시키기 위한 전기신호로 만드는 역할을 DAQ 보드가 수행한다. National Instruments사에서 제작된 PCI-6229는 16비트 해상도, -10 ~ +10[V]의 입력 전압 범위와 250[kS/s]의 샘플 속도를 갖는 32개 채널의 아날로그 입력과 16비트 해상도, -10 ~ +10[V]의 출력 전압 범위와 833[kS/s]의 샘플 속도를 갖는 4개의 아날로그 출력을 갖고 있는 DAQ 장비이다. 여기에 물리적인 신호원이 접촉되어지는 커넥터 블록을 연결하여 DAQ 보드를 이루게 된다.

PCI-6229는 PCI 카드 형태로 PC의 메인보드에 있는 PCI슬롯에 장착되며, PC에서 생성된 디지털 이진 신호와 물리적인 전기신호의 변환을 수행한다. 실제적인 물리적 접점으로의 접촉은 PCI-6229에 연결되는 커넥터 블록을 통하여 이루어진다. 커넥터 블록에 있는 소켓은 볼트 너트와 같은 형식으로 우측방향으로 회전 시 조여지게 되고 좌측방향으로 회전 시 풀어지게 되는데 너트와 바닥 사이에 케이블이나 프로브의 단자를 삽입하고 조여서 커넥터 블록과 결합하게 된다.

그림 3.2.3.1은 PC에 장착되지 않은 PCI-6229와 커넥터 블록의 연결 모습이다. PCI-6229에는 68핀 소켓이 2개 부착되어 있으며 커넥터 블록 2개가 PCI-6229 소켓과 결합된다. 그림 3.2.3.에 커넥터 블록과 케이블의 결합이 사진으로 나타나있다. 커넥터 블록은 이와 같이 Data Acquisition 과정에서 일련의 신호흐름이 납땜과정 없이도 신뢰성 있는 결합을 통해 진행되도록 중간 인터페이스 역할을 한다.

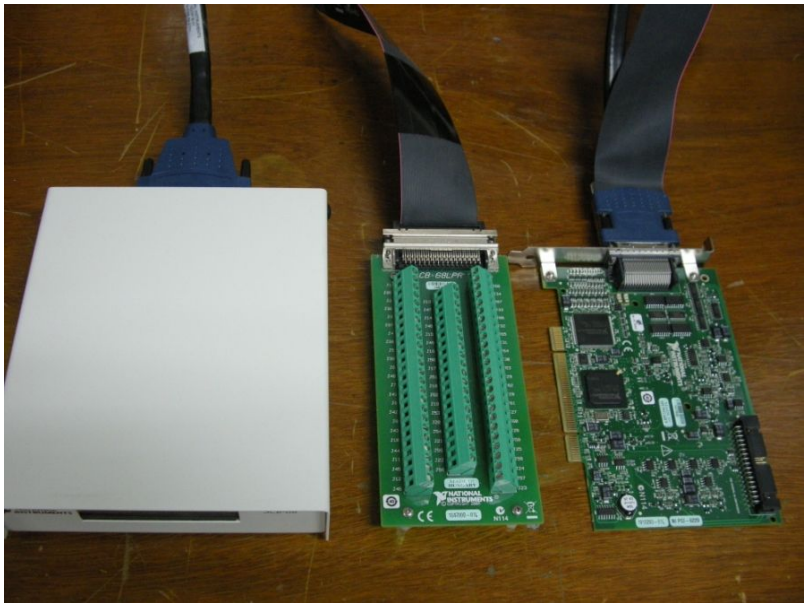

그림 3.2.3.1 PCI-6229와 연결된 커넥터 블록

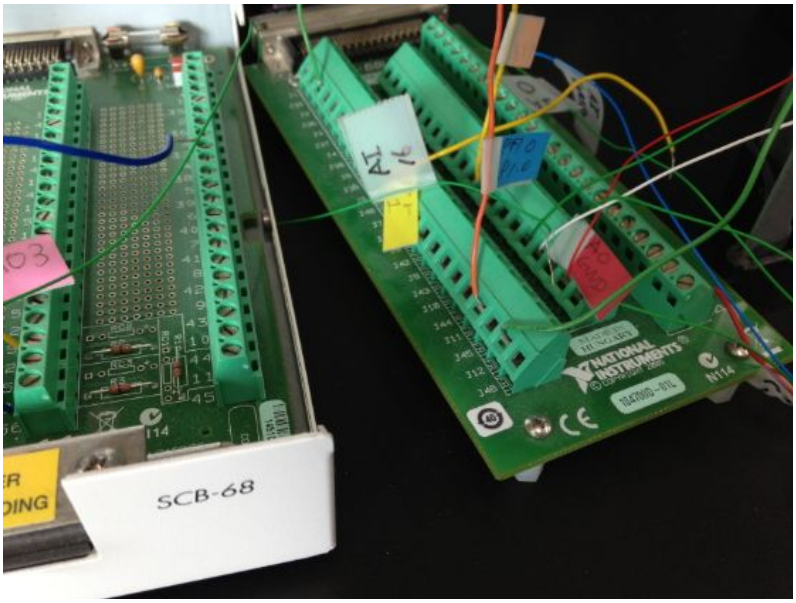

그림 3.2.3.2 커넥터 블록과 케이블의 결합

제3절 신호의 생성 및 전송

기존의 PPM 사용 신호방식에서는 하나의 PWM 신호의 주기에 하나의 PPM 신호, 즉 1개의 비트가 전송되므로 데이터 전송율이 PWM 신호의 주파수에 의존하는 경향을 보였다. 또한 PWM 신호의 주기에서 펄스가 On이 되는 구간에서만 데이터를 전송했기 때문에 전송 효율성이 다소 떨어졌다. 본 연구에서 수행하는 방식은 PWM 신호가 On이 되는 구간과 Off가 되는 구간 모두에서 데이터를 전송하므로 데이터 전송율이 보다 높고 이를 위해 PWM 신호의 주파수를 높이지 않아도 되며, PPM 방식에 비해서 데이터 신호의 복원과정이 복잡하지 않고 구현하기 쉽다는 장점을 가지고 있다.

LED의 밝기 조절을 결정하는 PWM 신호와 데이터를 전송하는 NRZ-OOK 신호는 LED를 구동시키기 위하여 하나의 신호로 합성되는 변조작업을 거친다. 이에 대한 다이어그램이 그림 3.3.1에 나타나 있다. 1 0 1 1 0 1 0 1 0 0 데이터를 가지고 있는 NRZ-OOK 신호와 밝기 조절을 하는 PWM 신호 (duty cycle : 70 [%]) 를 더할 경우 나타나는 변조신호는 그림 3.3.2와 같다. PWM 신호 한 주기에 NRZ-OOK 신호는 10개의 비트가 들어가 하나의 특정 주기에 포함되어 있는데 변조된 신호를 보면 총 4개의 전압레벨이 있다. 이것은 2가지 상태를 가지고 있는 2개의 신호가 더해져서 나온 경우의 수에 따른 전압레벨이다. PWM 신호가 On 상태일 때 NRZ-OOK 신호가 High 상태로 더해진 경우와 Low 상태로 더해진 경우, PWM 신호가 Off 상태일 때 NRZ-OOK 신호가 High 상태로 더해진 경우와 Low 상태로 더해진 경우 이렇게 4가지의 전압레벨이 생성된다.

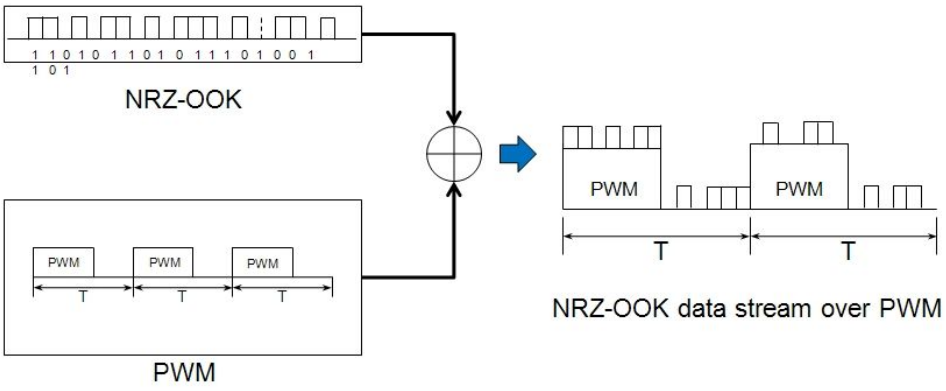

그림 3.3.1 변조신호 생성 다이어그램

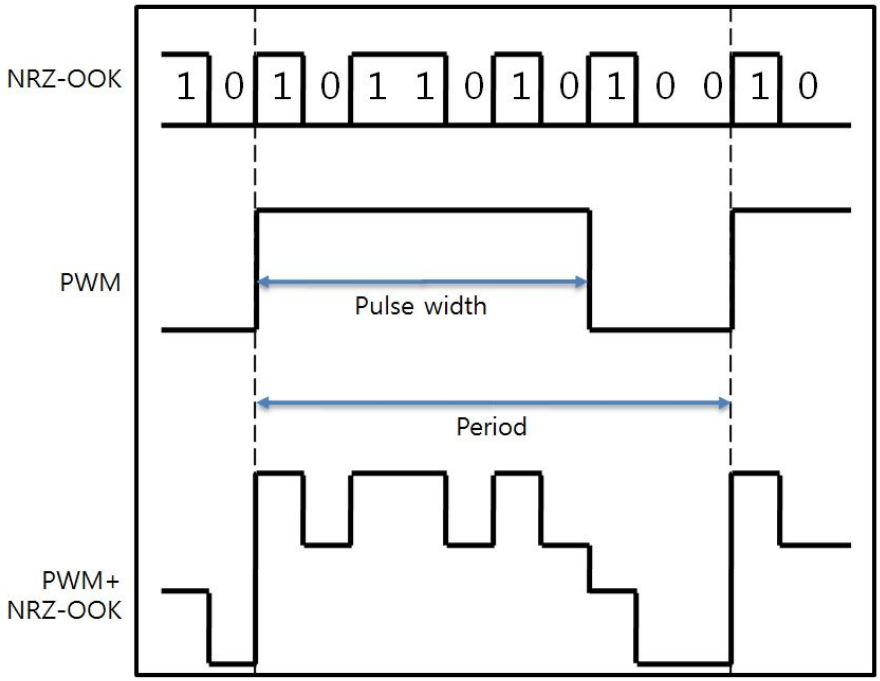

그림 3.3.2 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호

LabVIEW 내에서 변조신호 생성을 위하여 PWM 신호를 만드는 알고리즘과 NRZ-OOK 신호를 만드는 알고리즘을 각기 다른 VI (Virtual Instrument) 파일에 설계한다. 그리고 두 VI 파일을 Sub VI 파일로 만들어서 하나의 새로운 VI 파일에 모두 불러들여 +함수로 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호를 합성한다. 불러들인 Sub VI 파일들의 값 지정창을 생성시켜서 최종 VI 파일에서 Sub VI 파일들의 값 변경을 컨트롤 할 수 있게 설정한다. 그림 3.3.3는 Sub VI 파일들을 불러들여 연결시킨 최종 VI 파일을 보여주고 있다. “8bit PRBS (Pseudo - Random Binary Sequence)” VI 파일은 PRBS 패턴을 갖는 NRZ-OOK 신호를 발생시키는 알고리즘을 포함한다. PRBS 패턴은 LabVIEW에 있는 X-OR (Exclusive-OR) 와 While loop의 시프트 레지스터를 사용하여 설계하였다. 그리고 이 패턴은 LED를 구동시키기 위한 Unipolar NRZ형태의 OOK 신호로 만들기 위하여 비교함수를 사용하였다.

“PWM” VI는 PWM 신호를 생성하는 알고리즘을 갖는 VI이고 주파수와 duty cycle을 컨트롤하는 값 지정창을 따로 생성해서 최종 VI에서 값을 새로 설정해도

Sub VI의 값도 같이 설정되도록 설계하였다.

그림 3.3.4에 PWM 신호를 만들기 위해 설계한 LabVIEW 블록다이어그램 코딩이 나타나 있다. PWM 신호를 만들기 위하여 LabVIEW의 여러 함수 중 사각 웨이브폼 함수를 사용하였는데 각 조절값으로 PWM 신호의 파라미터들을 조절 할 수 있다. 사각 웨이브폼 함수는 진폭 값을 2[V] 주었을 경우 0을 기준으로 −2 ~ +2[V]의 전압레벨을 가진 신호를 생성한다. LED를 구동시키기 위해서는 음의 전압이 필요 없으므로 0 ~ +4[V]의 전압레벨을 출력하기 위하여 offset으로 2[V]를 입력한다. Phase는 PWM과 더해지는 NRZ-OOK신호와 위상을 동기화시켜주는 역할을 한다. PWM f는 PWM의 주파수 설정 파라미터로써 본 실험에서는 1[kHz]의 주파수로 설정하였다. duty cycle은 LED의 켜있는 시간과 꺼져 있는 시간을 조절하는 값이다. LED가 켜있는 시간에 해당하는 High 상태의 주기 점유율을 조절한다.

그림 3.3.5는 LabVIEW로 만들어진 PWM 신호이다. duty cycle은 30[%]이고, 진폭은 0 ~ +4[V]이다. 위상은 −18[°]이고 주기는 1[ms], 즉 주파수는 1[kHz]이다.

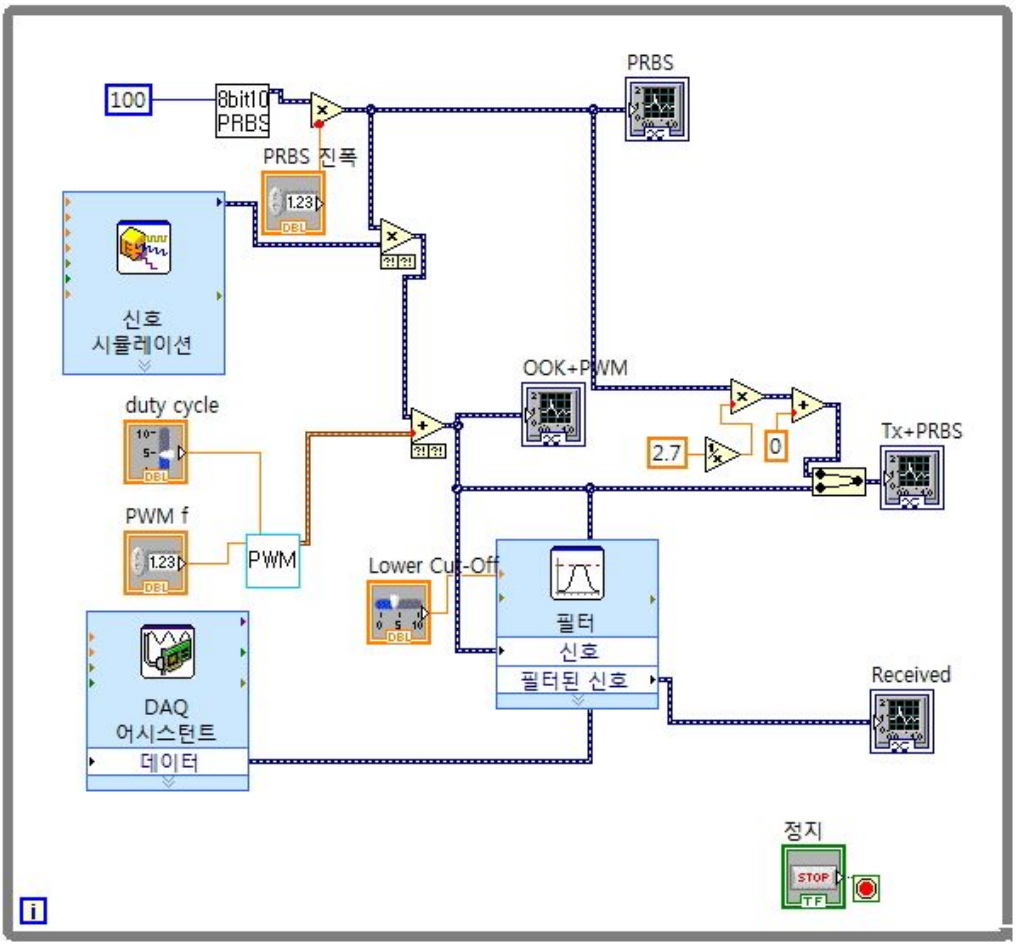

그림 3.3.3 LabVIEW로 설계한 변조신호 알고리즘

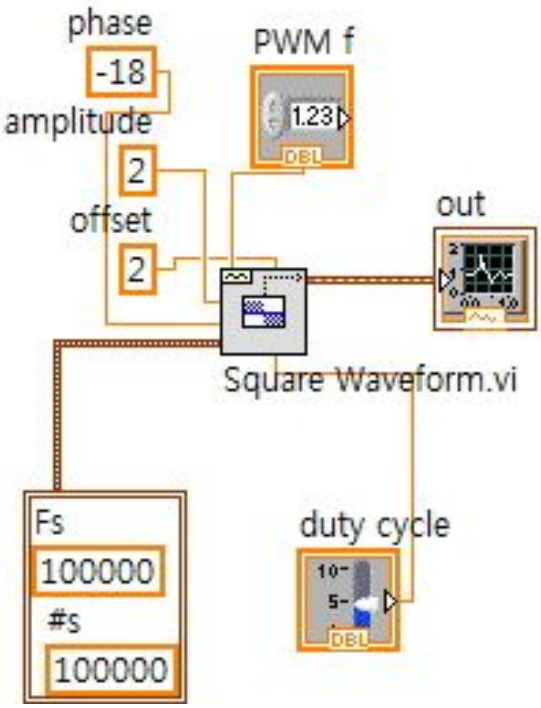

그림 3.3.4 PWM 신호 설계 알고리즘

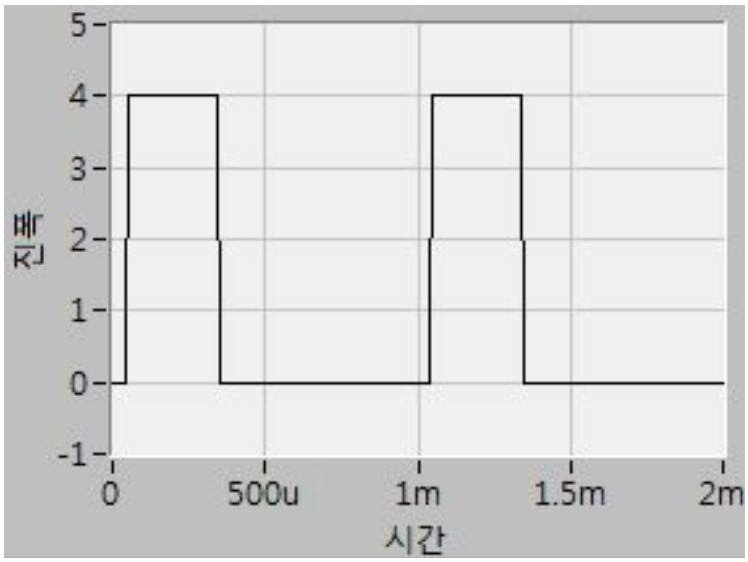

그림 3.3.5 LabVIEW로 만들어진 PWM Waveform

그림 3.3.6은 PRBS 패턴을 가지는 NRZ-OOK 신호이다. PWM 신호와 위상동기화를 위해서 첫 번째 비트가 18[°] 정도 위상이 이동되어있는 것을 확인 할 수 있다. 신호의 진폭은 2.7[V]이다. 변조신호의 특성상 PWM 신호가 On인 구간은 전압레벨이 +4[V]이므로 NRZ-OOK 신호가 Low 상태가 와도 LED의 불은 켜져 수신기가 밝기레벨에 따른 비트1과 비트0을 충분히 구분할 수 있다. 하지만 PWM 신호가 Off인 구간은 0[V] 이므로 이 부분에 걸쳐 있는 High 상태의 NRZ-OOK 신호의 진폭은 반드시 LED 구동전압인 2.2[V]보다 높아야 한다. 만약 NRZ-OOK 신호의 진폭을 1[V]로 했을 경우 비트0을 나타내는 O[V]에서 LED는 당연히 발광하지 않을 것이며, 비트1을 나타내는 1[V] 에서도 LED는 빛을 내지 않는다. 결과적으로 PWM 신호 Off 구간에서는 모두 비트0으로 인식이 된다. 그러한 이유로 NRZ-OOK 신호의 진폭은 2.7[V]로 설정하였다.

PWM 신호와 NRZ-OOK 신호를 합성한 변조신호는 그림 3.3.7과 같다. 앞에서 설명한 바와 같이 4가지 전압레벨이 나타나 있다. 가장 높은 전압은 PWM 신호의 On 구간 (4[V]) 에 NRZ-OOK 신호가 High 상태인 구간 (2.7[V]) 이 더해진 6.7[V]이고 그 다음은 PWM 신호의 On 구간 (4[V]) 에 NRZ-OOK 신호가 Low 상태인 구간 (0[V]) 이 더해진 4[V]이다. 세 번째 레벨은 PWM 신호의 Off 구간 (0V) 에 NRZ-OOK 신호가 High 상태인 구간 (2.7V) 이 더해진 2.7[V]이며 마지막은 PWM 신호의 Off 구간 (0[V]) 에 NRZ-OOK 신호가 Low 상태인 구간 (0[V]) 이 더해진 0[V]이다.

그림 3.3.8은 비트0인 구간과 비트1인 구간의 식별을 용이하게 하기 위하여 변조신호와 NRZ-OOK 신호를 겹쳐서 나타낸 그래프이다. PWM 신호는 1[kHz] 주파수에 4[V]의 진폭을 가지고 있으며 30[%]의 duty cycle을 나타내고 있다.

변조과정을 통해 만들어진 신호는 “DAQ 어시스턴트”함수에서 아날로그 전기신호로 변환하기 위한 샘플링 작업을 거치고 DAQ 보드로 물리적인 전기신호로 변환되어 출력된다.

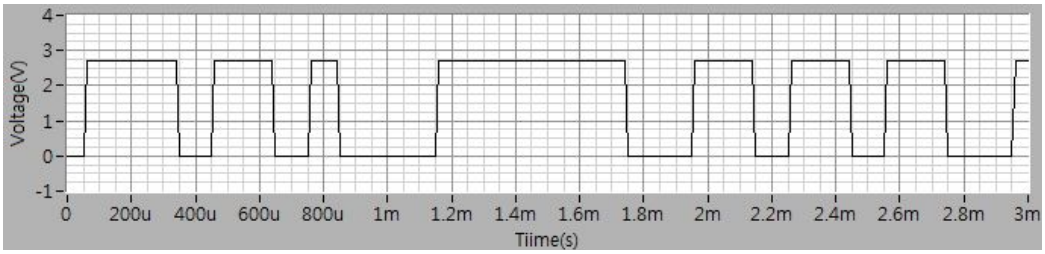

그림 3.3.6 PRBS 패턴을 가지는 NRZ-OOK 신호

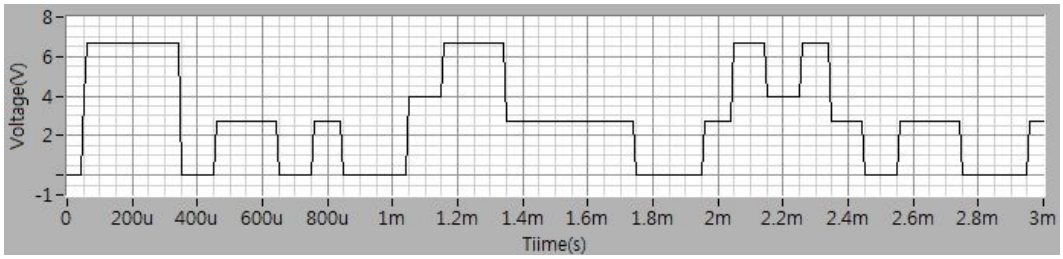

그림 3.3.7 PWM과 NRZ-OOK의 변조신호

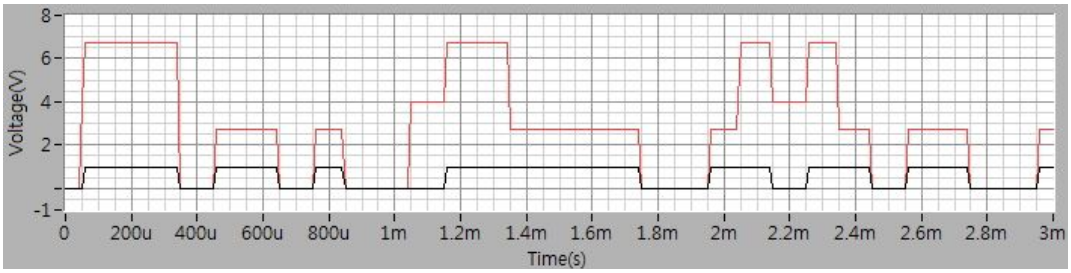

그림 3.3.8 변조신호와 NRZ-OOK 신호

변조과정을 통해 만들어진 신호는 PCI-6229로 보내진다. PCI-6229는 LabVIEW에서 받은 디지털 이진 신호를 전기신호로 출력하기 위하여 아날로그 출력 단자를 사용한다. 신호는 초당 833,000 번의 샘플링으로 출력되는 직류신호들의 연속으로 이루어져 있는데, 1.2[ns] 시간동안 지속되는 직류신호들은 원래 신호의 각 샘플링 시간에 해당하는 전압레벨을 나타내어 전체적으로 봤을 때 원래 신호와 거의 같은 형태로 출력되어 진다. 이 신호는 아날로그 전기신호이다.

그림 3.3.8 은 송신부 블록다이어그램을 나타낸 것이다. PC와 연결되어져 있는 PCI-6229는 생성된 아날로그 전기신호를 커넥터 블록으로 출력하는데 커넥터 블록은 물리적으로 신호를 입출력하는 중간 인터페이스 역할을 수행한다. 커넥터 블록의 여러 단자 중에서 아날로그 출력에 해당되는 AO (Analog Out) 단자와 LED Driving Circuit이 점퍼선을 통하여 연결된다. LED Driving Circuit은 500옴의 저항과 Super Flux LED로 이루어져 있다. 500옴 저항은 LED로 입력되는 전류의 과입력을 방지하고 LED 드라이브 전압을 선형적으로 조절할 수 있는 역할을 한다. 커넥터 블록에서는 총 2개의 소켓이 LED Driving Circuit과 연결되어진다. AO단자는 점퍼선을 통하여 500옴 저항에 연결되고 이는 다시 LED의 Anode로 이어진다. 커넥터 블록의 AO GND (Ground) 단자는 점퍼선을 통해 LED의 Cathod로 연결되어 LED Driving Circuit을 완성한다.

오른쪽으로부터 PC에서 만들어진 디지털 이진 신호는 PCI-6229를 거쳐 전기신호로 변환된 후 커넥터 블록을 통해 출력되어 LED를 구동시키며 이는 전기신호가 LED의 광신호로 변환되었음을 의미한다.

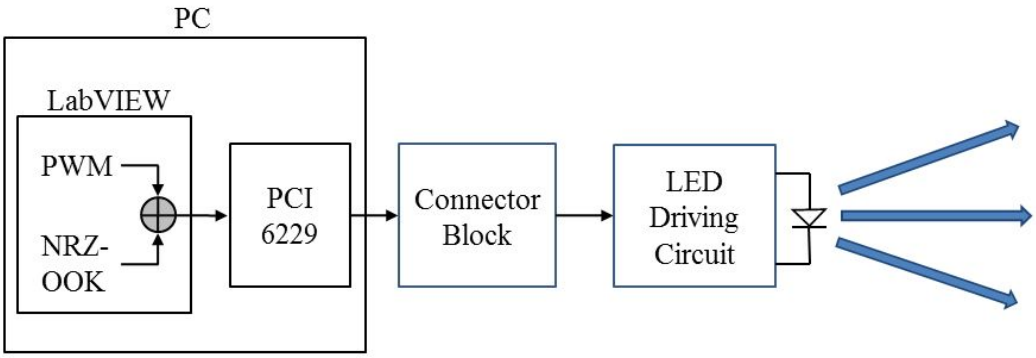

그림 3.3.9 송신부 블록다이어그램

제4절 신호의 수신 및 복원

수신부는 PD (Photo Detector), Signal Amplifier, 커넥터 블록, PCI-6229, PC로 구성되어 있다.

송신기에서 방사된 가시광은 Si PIN Photodiode FDS1010으로 수광된다. FDS1010은 자체적으로 TIA (Transimpedance Amplifier) 를 가지고 있어서 수광되는 가시광의 세기에 따라 출력되는 전류의 세기가 변화된다. FDS1010을 통하여 광·전 변환된 전기신호는 Signal Ampifier를 거쳐서 증폭되어지는데 여기서는 741 OPamp가 Signal Amplifier로 사용되어졌다. 수신부의 전체적인 블록다이어그램이 그림 3.4.1에 나타나 있다.

Signal Amplifier로 증폭되어진 전기신호는 커넥터 블록의 AI (Analog In) 단자와 AI GND (Ground) 단자를 통해서 커넥터 블록으로 입력되어진다. PCI-6229는 커넥터 블록으로부터 받은 전기신호는 PC상에서 디지털 처리작업을 하기 위해 초당 250,000번의 샘플링을 통해 디지털 이진 신호로 변환된다.

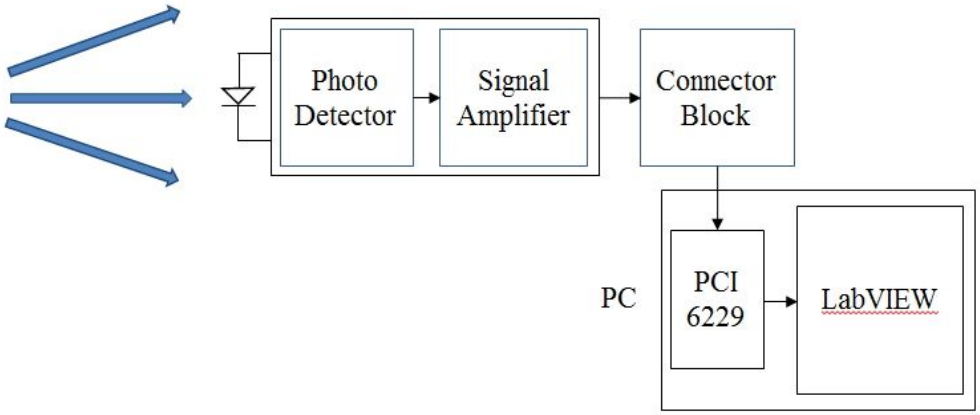

그림 3.4.1 수신부 블록다이어그램

그림 3.4.2는 수신기에서 받은 최초의 신호를 나타내는 그래프이다. 신호는 수신부 내에서 신호 검출을 비롯한 전기신호의 디지털 이진 신호 변환 등의 작업으로 인해 시정수가 증가하여 저역통과필터를 거친 형태를 보이고 있다. 송신부의 각이진 모서리가 Rise time, Fall time의 증가로 완만한 경사를 가진 형태로 변하였다.

수신신호는 총 4가지 전압레벨에서 PWM 신호의 전압레벨을 기준으로 PWM 신

호 On구간의 NRZ-OOK 신호와 PWM 신호 Off구간의 NRZ-OOK 신호로 분리된다. 그림 3.4.3는 PWM On구간의 NRZ-OOK 신호가 비교함수를 거쳐서 원래의 모습으로 복원된 그래프이다.

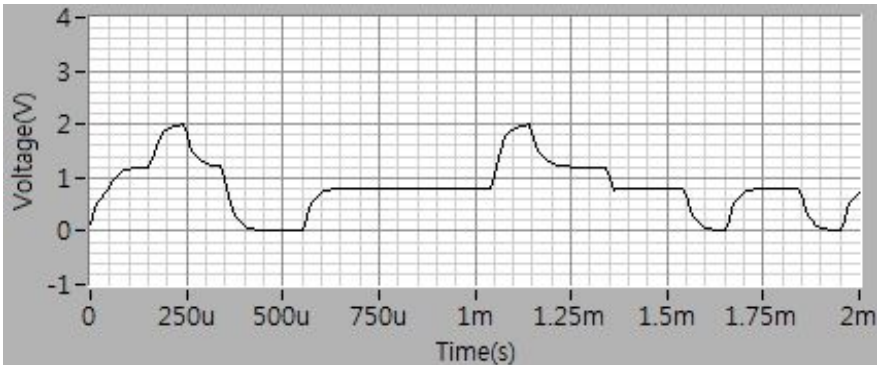

그림 3.4.2 수신된 변조신호

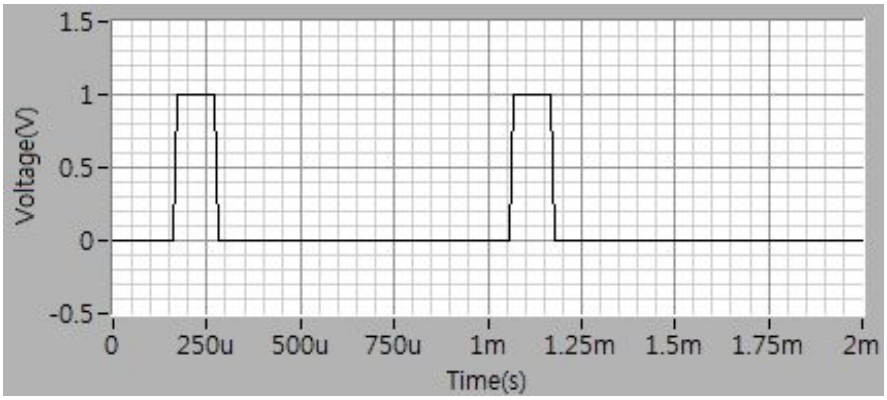

그림 3.4.3 PWM 신호의 On 구간 복원신호

PWM 신호 Off구간의 신호는 먼저 PWM 신호 부분을 NRZ-OOK 신호 전압 레벨보다 미세하게 높은 전압을 기준으로 “기준값보다 작으면 1 출력” 비교함수를 거쳐서 수신신호와 곱셈처리를 한다. 곱셈처리를 거친 신호는 PWM Off 구간에서 PWM 신호가 제거되고 그림 3.4.4처럼 NRZ-OOK 신호만 남게 된다.

남아있는 신호는 불완전하게 제거된 PWM 신호의 잔류 성분도 포함하고 있다. 이 부분을 제거하기 위한 작업으로 미분함수가 사용된다. PWM 신호의 잘린 부분은 그 경사가 크므로 미분함수를 거칠 경우 그림 3.4.5처럼 완만한 NRZ-OOK 신

호에 비해 비교적 매우 높고 날카로운 진폭 성분을 가진다. 비교함수를 거쳐서 높은 진폭 성분에 해당하는 구간만 0 곱셈을 하여 PWM 신호의 잔류 성분을 제거하게 된다.

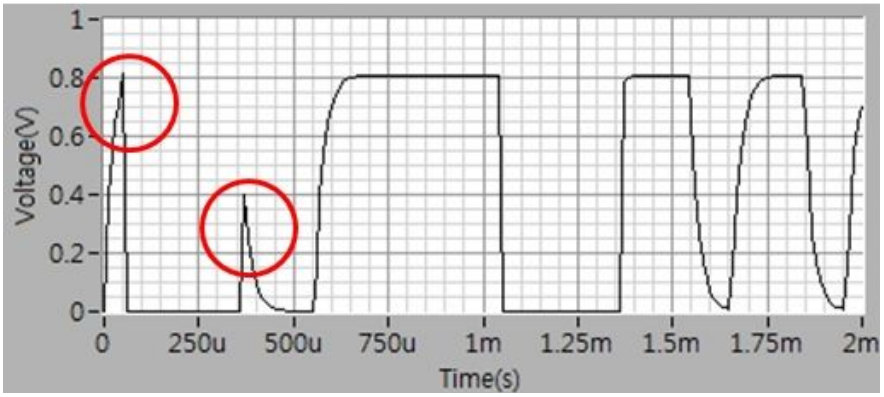

그림 3.4.4 PWM 부분을 제거한 PWM 신호의 Off 구간 신호

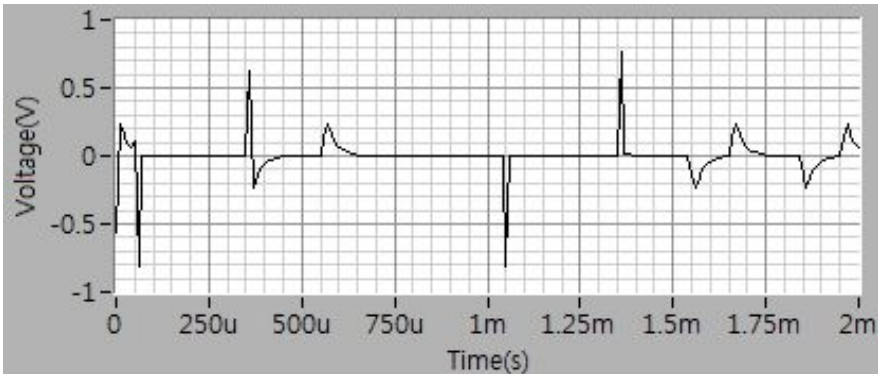

그림 3.4.5 미분함수를 거친 PWM 신호의 Off 구간 신호

남아있는 NRZ-OOK 신호를 깨끗하게 복원시키기 위하여 진폭의 중간 값을 기준점으로 하는 “기준값보다 크면 1 출력” 비교함수로 신호를 통과시켜 PWM Off 구간의 NRZ-OOK 신호를 복원한다. 복원되어진 PWM On 구간의 NRZ-OOK 신호와 PWM Off 구간의 NRZ-OOK 신호를 합하여 그림 3.4.6와 같은 복원신호를 완성한다.

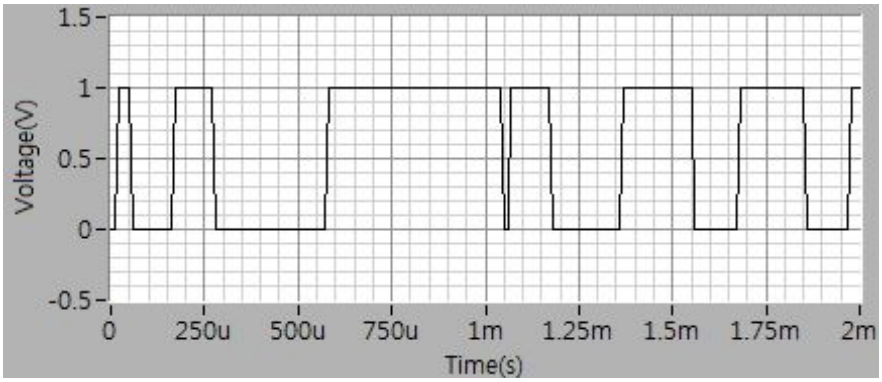

그림 3.4.6 완성된 복원신호

제4장 실험결과 및 분석

본 논문에서 제안하는 신호전송방식의 실험을 위해 표 4.1 실험 조건표와 같이 실험 조건을 설정하였다. 송신부에는 620 ~ 660 [nm]의 파장 대역, 200 ~ 400 [mcd]의 Luminous intensity를 가지는 LED 1기를 사용하였으며, 수신부에는 400 ~ 1100 [nm] 의 파장 대역, 45 [ns] 의 Rise/Fall time과 8 [MHz]의 대역폭을 가지는 PD 1기를 사용하였다. PWM 신호는 1 [kHz] 주파수, 즉 1 [ms]의 주기를 가지며 NRZ-OOK 신호는 PWM 신호보다 10배 높은 10 [kHz] (주기 0.1 [ms]) 주파수를 가진다. 이는 PWM 신호의 10 [%] duty cycle 에 해당된다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 30 [cm] 이상이었을 시에 수신신호의 전압레벨이 LabVIEW로 복원 처리하는데 어려울 정도로 낮은 값을 나타내므로, 그보다 짧은 거리 중 거리의 증가에 따른 수신신호의 변화를 관찰하기에 적당한 거리인 10 [cm]와 20 [cm]로 설정하였다. 또한 렌즈도 미사용하였다. 이는 기존에 발표되었던 PPM 신호와 PWM 신호를 이용한 조명용 가시광 무선 통신 신호전송방식에서 적용되었던 조건과 동일한 것으로 동일 조건하에 신호전송 속도가 증가되었다는 것을 입증하고자 함이다 [27].

LED	**Peak wavelength**	**620~660 [nm]**
	Center luminous intensity	**200~4000 [mcd]**
PD	**Spectral response**	**400 ~ 1100 [nm]**
	Rise/Fall Time	**45 [ns]**
	Bandwidth	**8 [MHz]**
PWM period	**1 [ms]**	
NRZ-OOK pulse width (data)	**0.1 [ms] (10 [%] duty cycle of PWM)**	
Transmission distance	**10 [cm], 20 [cm]**	
Lens	**Not used**	

표 4.1 실험 조건표

제1절 10[cm] 거리 송·수신시 실험결과 및 분석

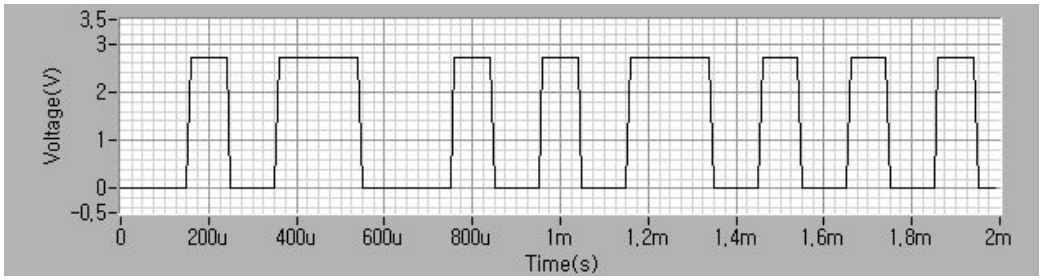

그림 4.1.1 PRBS 패턴을 가지는 NRZ-OOK 신호

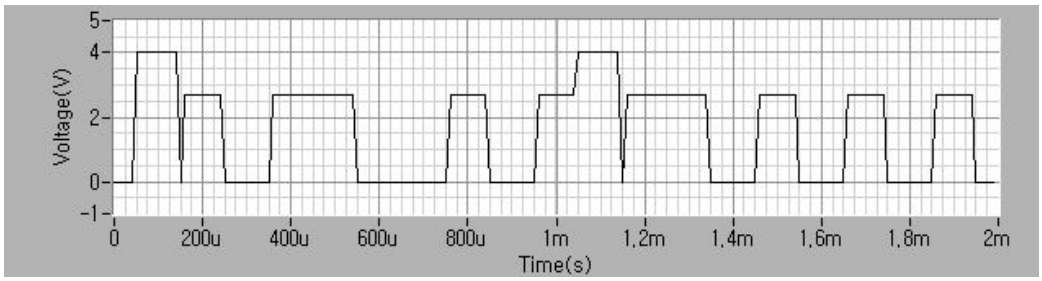

그림 4.1.2 송신된 변조신호 (duty cycle : 10[%])

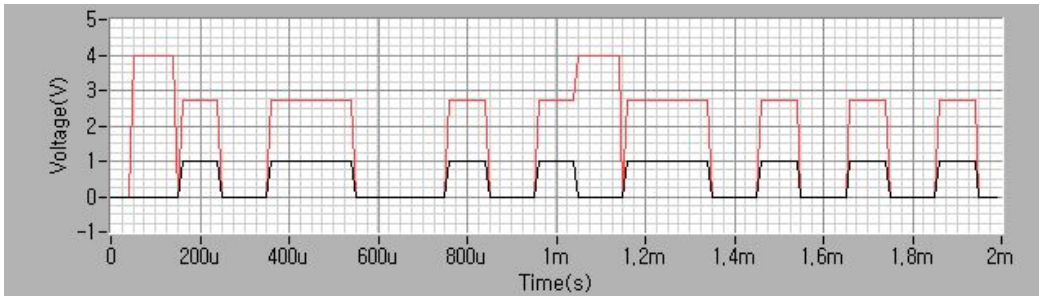

그림 4.1.3 송신된 변조신호 (duty cycle : 10[%]) 와 NRZ-OOK 신호

그림 4.1.1은 송신기에서 전송하는 NRZ-OOK 신호이다. 0 1 0 1 1 0 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 의 디지털 데이터가 NRZ-OOK 신호로 나타나있다.

그림 4.1.2는 PWM 신호의 duty cycle (주기점유율) 이 10[%]일 때의 신호와 NRZ-OOK 신호를 합성한 변조신호이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 4[V]이다.

PWM 신호가 On이 되는 구간에는 NRZ-OOK 신호가 모두 비트0 이므로 4[V]가 가장 높은 전압레벨이 된다. 첫 번째 비트는 변조신호만 놓고 봤을 때 가장 높은 전압레벨을 보이고 있어서 비트1이라고 생각할 수 있지만 단지 PWM 신호만 On이 되어 있고 NRZ-OOK 신호는 Low상태 즉 비트0인 구간이다. 그림 4.1.3은 비트0과 비트1의 구분이 용이하게 변조신호와 NRZ-OOK 신호를 겹쳐놓은 그래프이다.

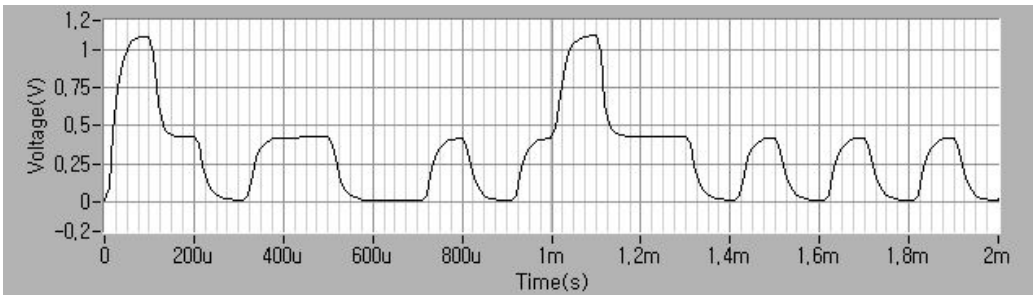

그림 4.1.4 수신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm])

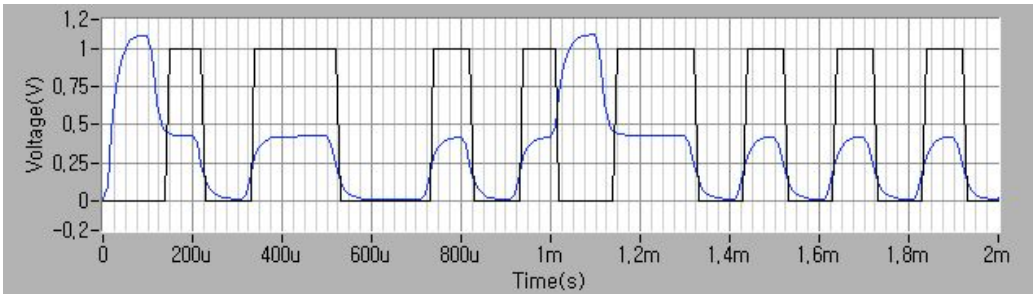

그림 4.1.5 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm])

그림 4.1.4는 10 [%]의 펄스폭을 갖는 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호를 10 [cm] 거리 뒤의 수신기로 수신한 신호를 나타내는 그래프이다. 수신기로부터 수신된 신호는 송신기의 신호와 달리 모서리 부분이 완만한 경사를 가지고 있는 모습이다. 이는 수신부 내에서 신호 검출을 비롯한 전기신호의 디지털 이진 신호 변환 등의 작업으로 인해 시정수가 증가한 결과 Rise time과 Fall time이 늘어나 저역통과필터를 거친 형태를 가지기 때문이다. 또한 감쇠효과로 송신기의 전압레벨에 비하여 훨씬 줄어든 1.1 [V] (최대) 전압레벨을 볼 수 있다.

그림 4.1.5은 수신기의 출력 신호와 이 신호가 복조, 복원 과정을 거쳐서 나온 복원 신호를 겹쳐놓은 그래프이다.

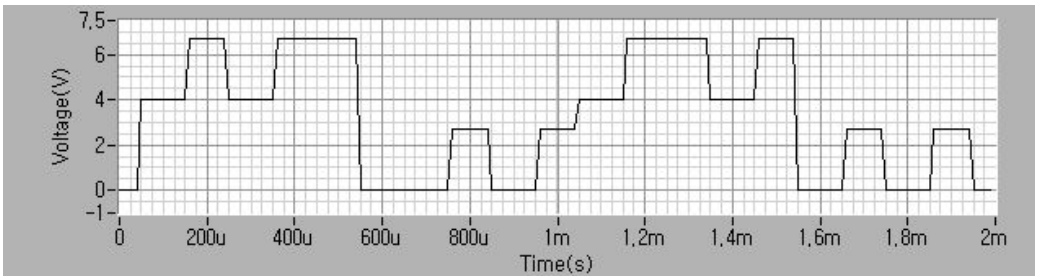

그림 4.1.6 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%])

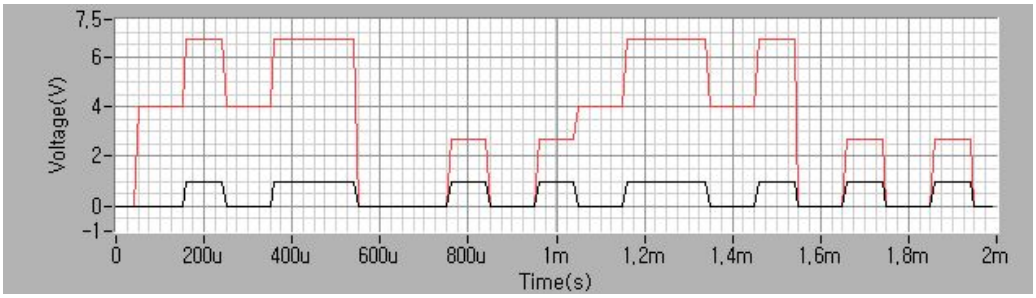

그림 4.1.7 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%]) 와 NRZ-OOK 신호

그림 4.1.6은 50 [%] 펄스 폭을 갖는 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호이다. 한 주기에서 PWM 신호는 LED가 켜있는 On 시간과 꺼져 있는 Off 시간이 동일하다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이다. 4개 전압레벨이 모두 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.1.7은 비트 0과 비트 1의 구분이 용이하게 변조신호와 NRZ-OOK 신호를 겹쳐놓은 그래프이다.

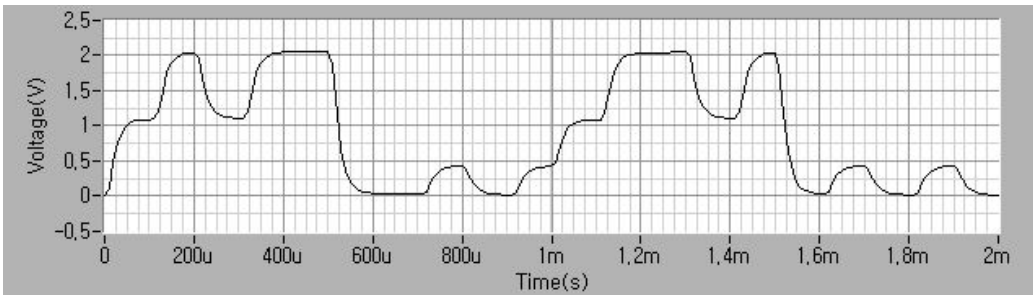

그림 4.1.8 수신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm])

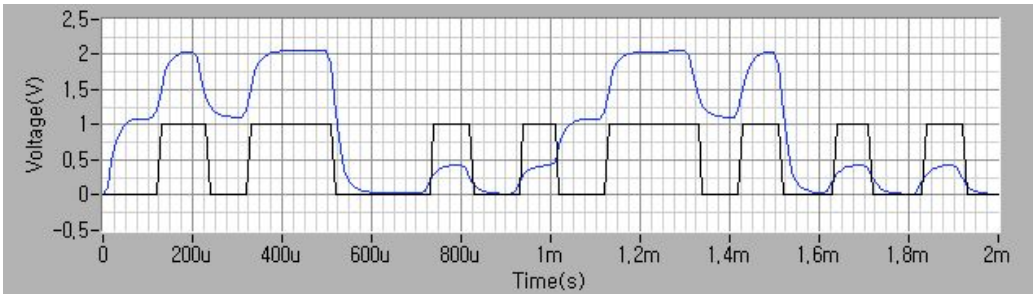

그림 4.1.9 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm])

그림 4.1.8은 송신기로부터 10 [cm] 떨어진 수신기로 수신한 신호를 나타내는 그래프이다. 마찬가지로 수신신호의 모서리는 저역통과필터 효과와 감쇠효과로 Rise time과 fall time이 늘어나 모서리의 각이 둥그스름하게 변하였으며 전압레벨도 송신기보다 감소되었다. 다만 10 [%] 펄스폭 PWM 신호였을 때보다 수신신호의 전압레벨이 약간 증가하였는데 이는 duty cycle이 늘어남으로써 수신기에 수신된 전체적인 광 수신 전력이 증가함으로 전압레벨이 증가한 것이다.

그림 4.1.9는 복조와 복원 과정을 거쳐서 NRZ-OOK 신호만을 추출해낸 신호와 수신신호를 겹쳐서 나타낸 것이다.

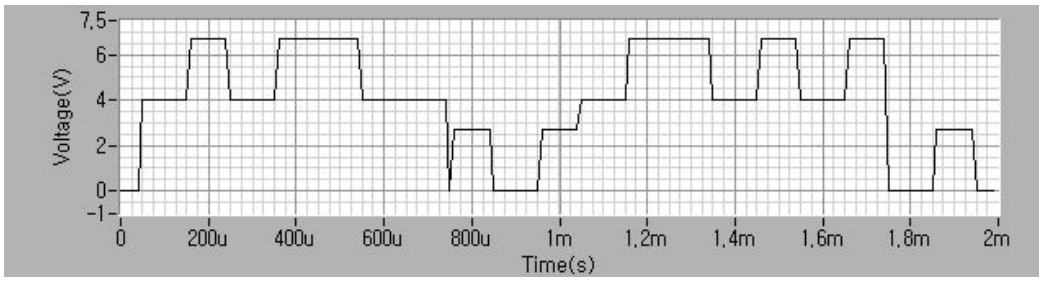

그림 4.1.10 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%])

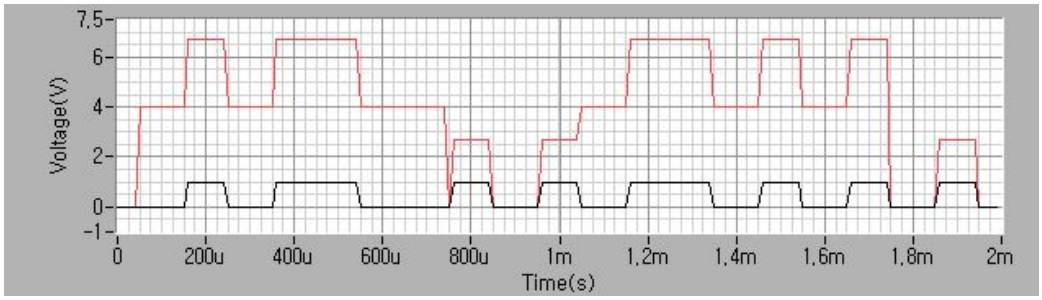

그림 4.1.11 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%]) 와 NRZ-OOK 신호

그림 4.1.10은 70 [%] 펄스폭을 갖는 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호이다. 한 주기에서 PWM 신호는 LED가 켜있는 On 시간이 70 [%], 꺼져 있는 Off 시간은 30 [%]이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이다. 4개 전압레벨이 모두 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.1.11은 비트 0과 비트 1의 구분이 용이하게 변조신호와 NRZ-OOK 신호를 겹쳐놓은 그래프이다.

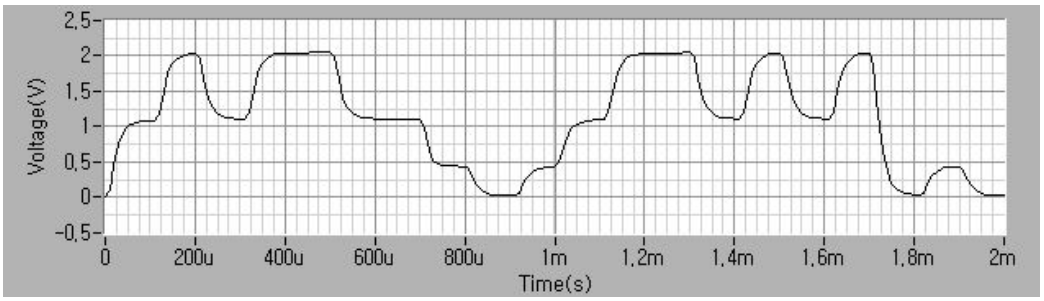

그림 4.1.12 수신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm])

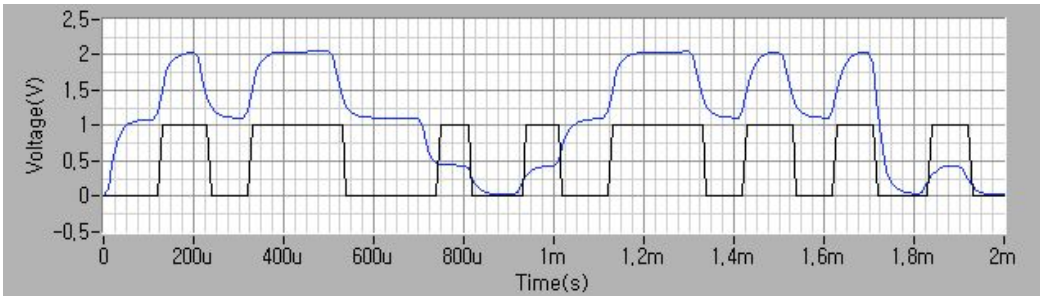

그림 4.1.13 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm])

그림 4.1.12와 그림 4.1.13은 duty cycle 70 [%]인 PWM 신호를 10 [cm] 거리에서 떨어진 수신기로 수신한 수신신호와 복원신호이다.

제2절 20[cm] 거리 송·수신시 실험결과 및 분석

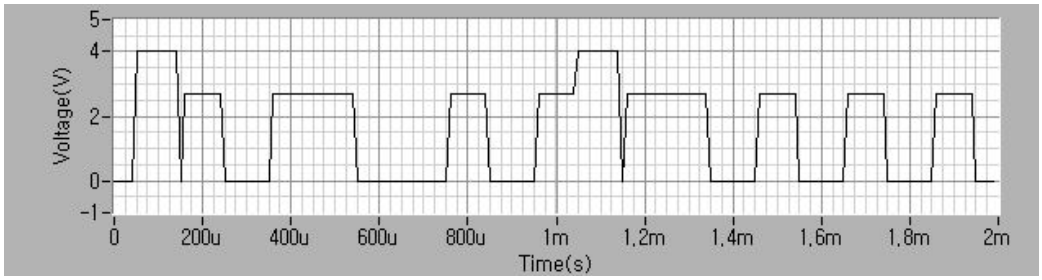

그림 4.2.1 송신된 변조신호 (duty cycle : 10[%])

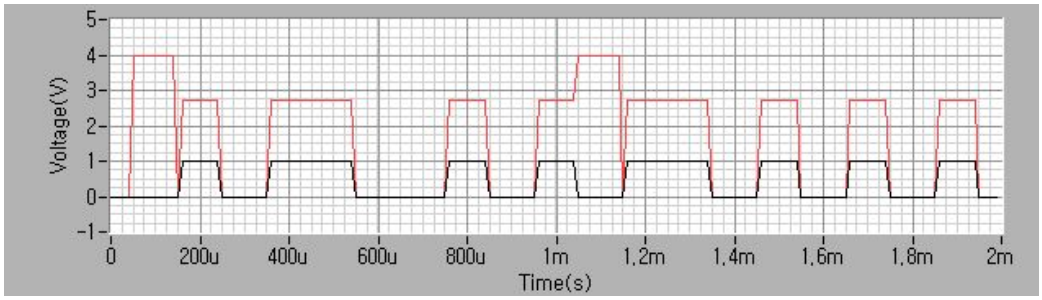

그림 4.2.2 송신된 변조신호 (duty cycle : 10[%])와 NRZ-OOK 신호

그림 4.2.1과 그림 4.2.2는 10[cm] 거리일 때의 송신기와 같은 조건의 변조신호를 나타내는 그림이다. PWM 신호의 duty cycle (주기점유율) 이 10[%]이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 4[V]이고 PWM 신호 주파수는 1[kHz], NRZ-OOK 신호의 주파수는 10[kHz] (T=0.1ms) 이다.

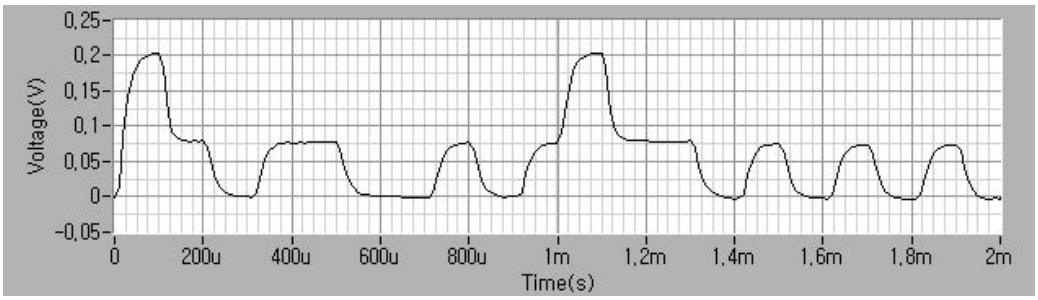

그림 4.2.3 수신된 변조신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 20 [cm])

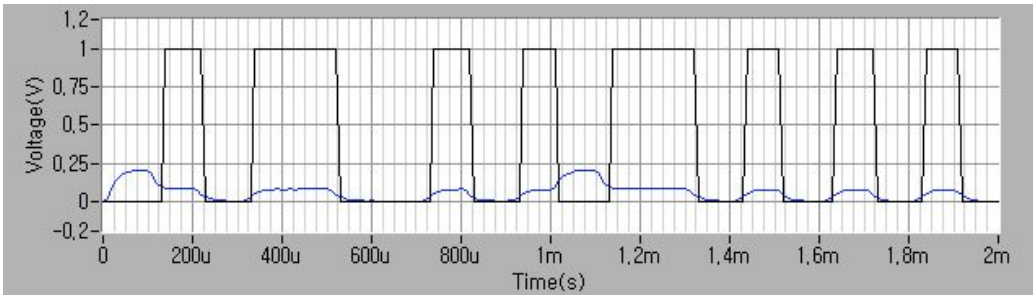

그림 4.2.4 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 10 [%], 거리 : 10 [cm])

그림 4.2.3과 그림 4.2.4는 수신된 변조신호와 복원신호를 나타내는 그림이다. 송신기로부터 20 [cm] 거리를 떨어져서 수신한 수신 신호는 10 [cm] 일 때와 비슷한 신호 모양을 나타내었다. 저역통과필터 효과로 신호의 모서리 부분이 완만한 경사로 변하였으며, 감쇠효과로 전압레벨이 감소하였다. 거리가 두 배 멀어져서 전압레벨은 10 [cm] 때보다 훨씬 작은 0.2 [V] (최대값) 을 기록하였다. 그림 4.2.4에서 보는 바와 같이 수신신호의 크기는 약해졌지만 복조와 복원 과정을 거쳐서 복원신호는 1 [V] 전압레벨로 복원되었다.

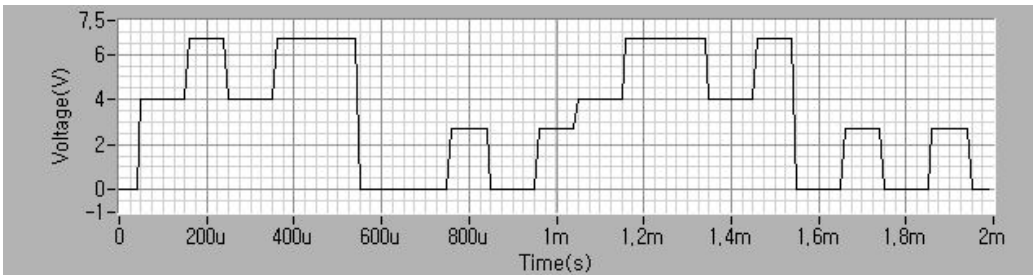

그림 4.2.5 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%])

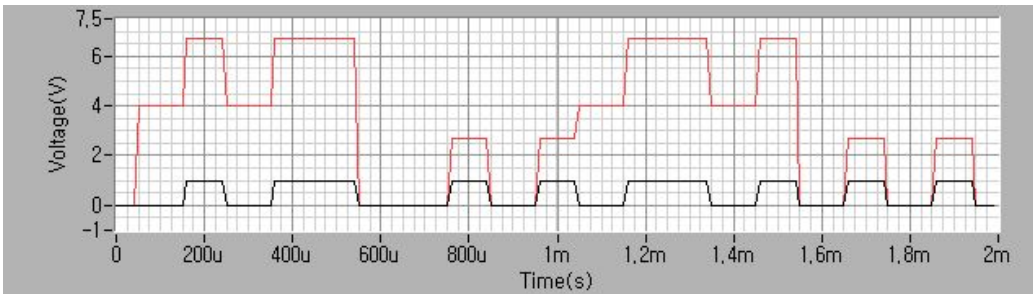

그림 4.2.6 송신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%])와 NRZ-OOK 신호

그림 4.2.5과 그림 4.2.6는 10 [cm] 거리일 때의 송신기와 같은 조건의 변조신호를 나타내는 그림이다. PWM 신호의 duty cycle (주기점유율) 이 50 [%]이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이고 PWM 신호 주파수는 1 [kHz], NRZ-OOK 신호의 주파수는 10 [kHz] (T = 0.1 [ms]) 이다. 한 주기에서 PWM 신호는 LED가 켜 있는 On시간과 꺼져 있는 Off시간이 동일하다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이다. 4개 전압레벨이 모두 있는 것을 확인할 수 있다.

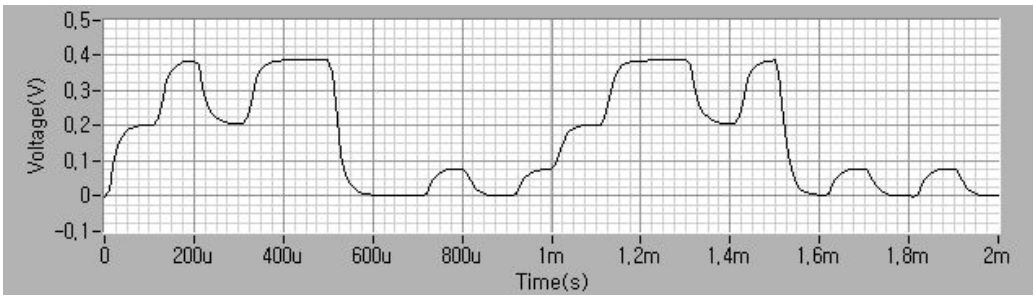

그림 4.2.7 수신된 변조신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 20 [cm])

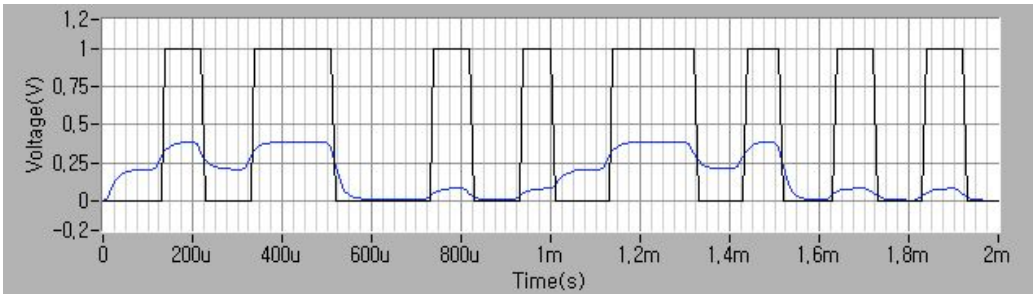

그림 4.2.8 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm])

송신기로부터 20 [cm] 거리를 떨어져서 수신한 수신 신호를 나타낸 그래프가 그림 4.2.7에 나타나 있다. 저역통과필터 효과로 인하여 신호의 모서리 부분의 경사가 완만해졌으며, 감쇠효과로 전압레벨이 감소하였다. 거리가 두 배 멀어져서 전압레벨은 10 [cm] 때보다 훨씬 작은 0.4 [V] (최대값) 을 기록하였다. 10 [%]보다 조금 증가된 수신신호 전압레벨을 관찰할 수 있는데 이는 duty cycle이 늘어남으로써 수신기에 수신된 전체적인 광 수신 전력이 증가함으로 전압레벨이 증가한 것이다.

그림 4.2.8은 복조와 복원 과정을 거쳐서 NRZ-OOK 신호만을 추출해낸 신호와 수신신호를 겹쳐서 표시한 것이다.

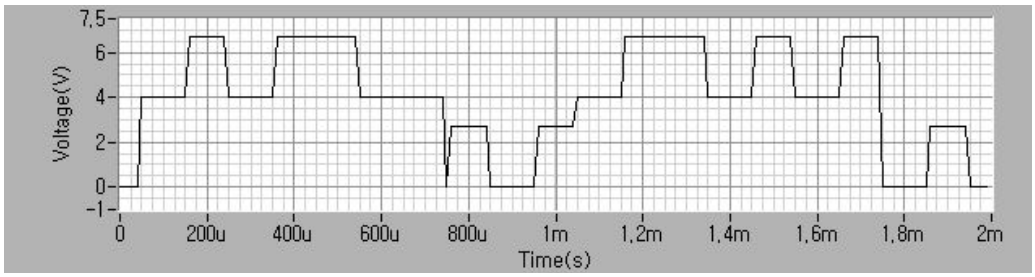

그림 4.2.9 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%])

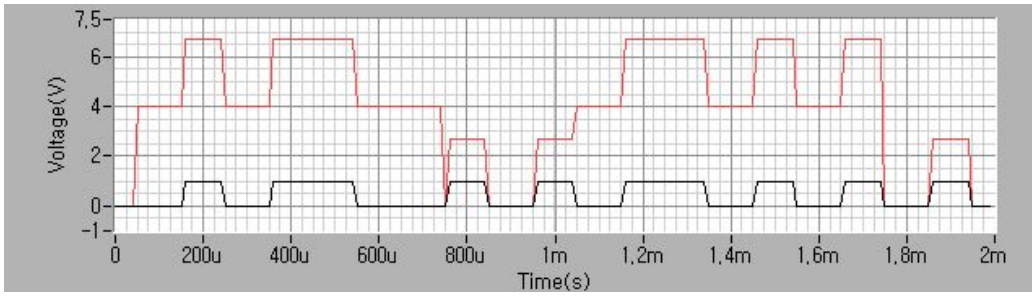

그림 4.2.10 송신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%])와 NRZ-OOK 신호

그림 4.2.9는 duty cycle (주기점유율) 이 70 [%]인 PWM 신호와 NRZ-OOK 신호의 변조신호이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이고 PWM 신호 주파수는 1 [kHz], NRZ-OOK 신호의 주파수는 10 [kHz] (T=0.1ms)이다. 한 주기에서 PWM 신호는 LED가 켜있는 On 시간이 70 [%], 꺼져 있는 Off 시간은 30 [%]이다. 전압레벨은 가장 높은 부분이 6.7 [V]이다. 4개 전압레벨이 모두 있는 것을 확인할 수 있다.

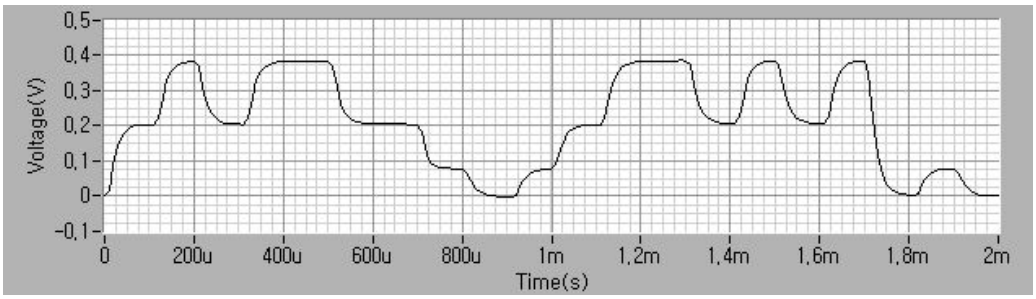

그림 4.2.11 수신된 변조신호 (duty cycle : 70 [%], 거리 : 20 [cm])

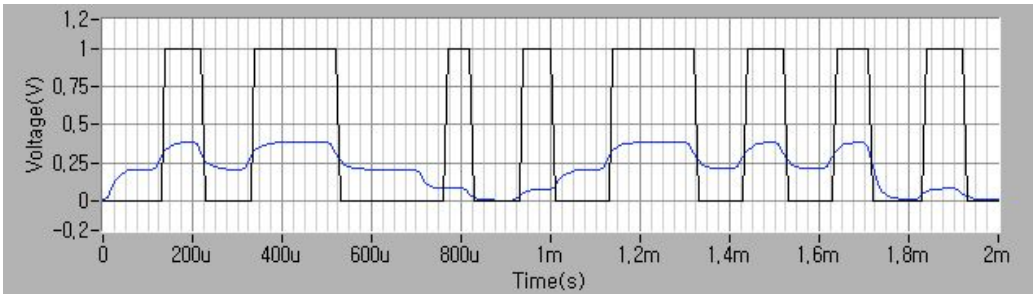

그림 4.2.12 수신된 변조신호와 복원신호 (duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm])

그림 4.2.11은 송신기와 20 [cm] 거리를 두고 수신한 수신신호이다. 마찬가지로 저역통과필터 효과로 인하여 수신신호의 모서리의 경사가 완만하게 변하였다.

지금까지의 실험결과 그래프를 통하여 PWM 신호의 duty cycle 변화에도 NRZ-OOK 신호전송에는 영향이 미치지 않았으며 원래신호대로 복원이 되었음을 알 수 있다. 밝기조절이 데이터 통신에 영향을 미치지 않았음을 확인하였다.

제3절 수신 신호의 Eye diagram

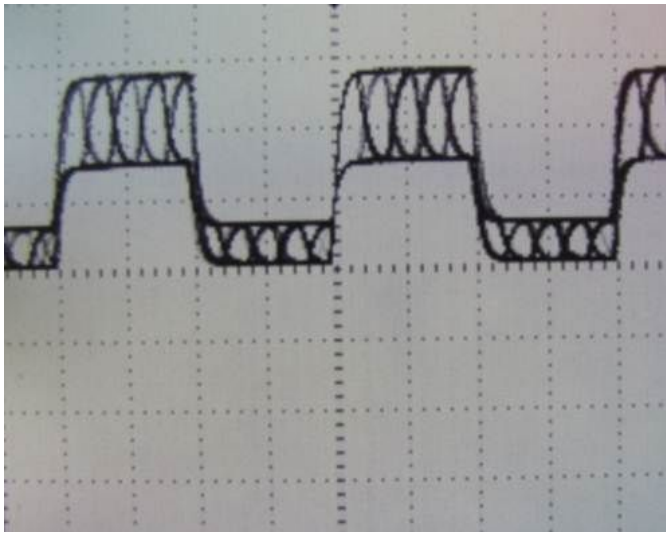

그림 4.3.1 수신된 신호의 Eye diagram (duty cycle : 50 [%], 거리 : 10 [cm])

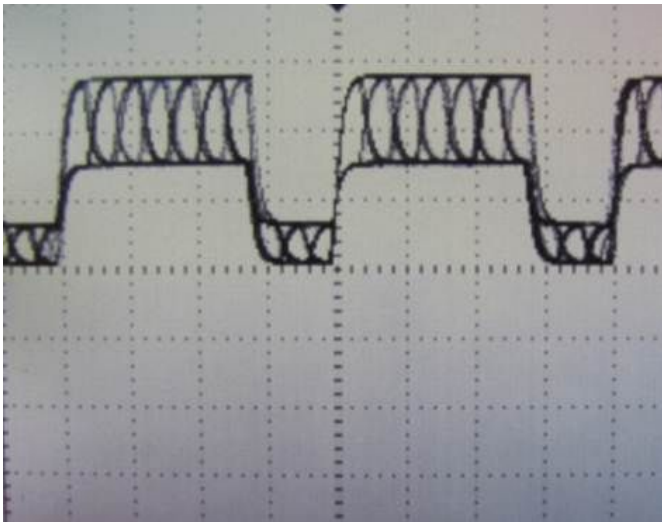

그림 4.3.2 수신된 신호의 Eye diagram (duty cycle : 70 [%], 거리 : 10 [cm])

Eye diagram 은 신호의 일정한 구간의 길이를 잘라서 연속적으로 겹쳐서 붙인 형태의 다이어그램을 뜻한다. 그림 4.3.1과 그림 4.3.2는 10 [cm] 거리일 때의 수신 신호의 Eye diagram이다. PRBS 패턴의 NRZ-OOK 신호가 겹쳐져서 각 비트의 모

양을 나타내고 있다. 저역통과필터 효과로 인하여 NRZ-OOK 신호의 각 비트가 각진 사각형태가 아닌 둥그스름한 마름모꼴 형태를 하고 있음을 확인할 수 있다.

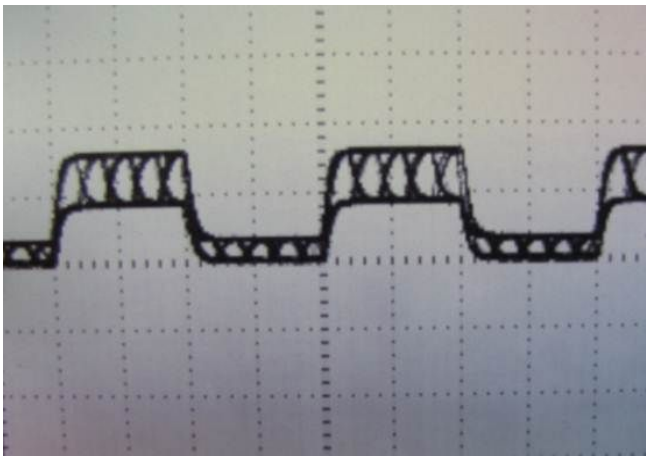

그림 4.3.3 수신된 신호의 Eye diagram (duty cycle : 50 [%], 거리 : 20 [cm])

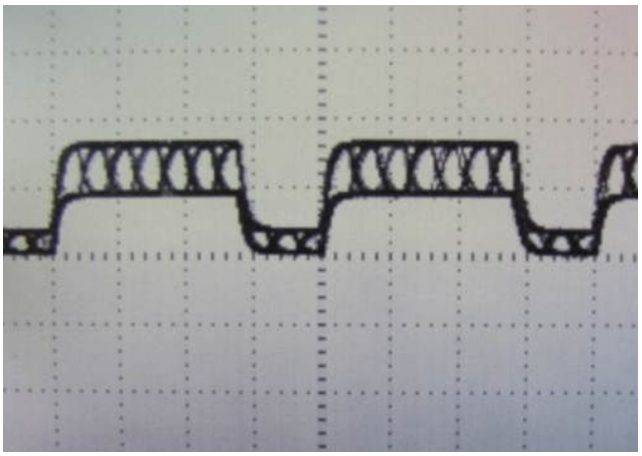

그림 4.3.4 수신된 신호의 Eye diagram (duty cycle : 70 [%], 거리 : 20 [cm])

그림 4.3.3과 그림 4.3.4는 20 [cm] 거리일 때의 수신신호의 Eye diagram이다. 10 [cm] 일 때와 마찬가지로 PRBS 신호가 겹쳐져서 각 비트의 모양을 나타내고 있다. 또한 저역통과필터 효과로 인하여 각 비트의 모서리가 둥그스름한 것을 확인할 수 있는데 다른 점은 거리의 증가로 인하여 신호의 크기가 더욱 감소하였다는 것이다.

제4절 PWM신호의 펄스 폭 증가에 따른 밝기비교

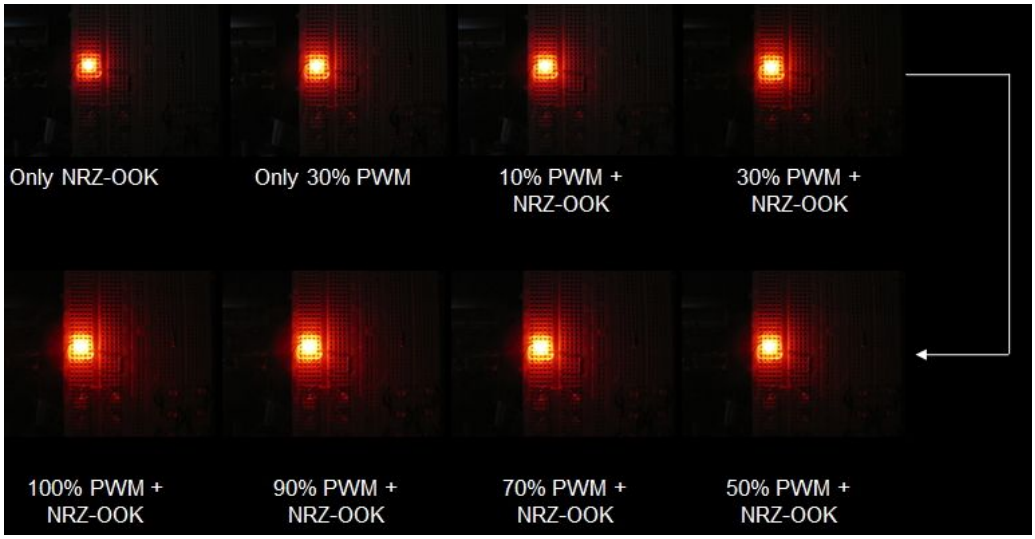

그림 4.4.1 PWM 신호의 펄스폭 변화에 따른 LED 밝기변화

그림 4.4.1은 PWM 신호의 변화에 따른 밝기 변화를 나타낸 사진이다. 왼쪽 상단이 가장 약한 밝기 레벨의 신호이다. PWM 신호는 모두 Off이고 NRZ-OOK 신호만이 LED를 통해서 빛으로 전송된다. 그 오른쪽 신호는 NRZ-OOK 신호 없이 30 [%] 펄스폭인 PWM 신호의 밝기이다. 그 다음 오른쪽부터 시계 방향으로 NRZ-OOK 신호를 포함하면서 PWM 신호의 duty cycle을 변화시킨 사진들이다. 하단의 신호부터는 밝기의 변화가 뚜렷하게 구별되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이는 카메라 촬영 시 노출 값이 자동으로 설정되어 이미지가 촬영되기 때문에 실제 선형적인 밝기 변화가 사진 상으로는 표현이 안 된 것이다. 밝기의 뚜렷한 변화를 측정하기 위해서는 luminous intensity를 측정하여 수치화하기 위한 접근이 필요하다.

제5장 결론

LED는 그 뛰어난 특성과 수명으로 인하여 차세대 광원으로 각광받고 있다. 그에 따른 조명용 LED의 연구개발도 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있는 중이다. 이미 우리의 실생활에서 활용영역을 서서히 넓혀가고 있는 LED는 통신과 조명을 동시에 충족하는 중요한 융합분야의 핵심소자로써 자리 잡고 있다.

그에 따라서 본 논문에서는 데이터 통신과 조명을 위한 밝기 조절을 동시에 하기 위한 신호를 생성하고 조명용 LED 와 포토디텍터를 이용한 송·수신 장치를 제작하여 데이터 신호의 통신과 복원, LED 조명의 밝기 조절을 위한 신호전송방식에 관한 실험을 하였다. 거리 10[cm], 20[cm]와 밝기 레벨 10[%], 50[%], 70[%]에 따라서 실험을 수행한 결과, 거리와 밝기 레벨에 무관하게 데이터 신호의 전송과 복원에 성공하였다. 다만 거리에 따른 수신신호의 세기가 20[cm] 일 때가 10[cm] 일 때에 비하여 2배 이상 줄어들어 복원 알고리즘 설계에 보다 정밀한 수치 적용이 필요하였다. 이는 4가지의 전압레벨을 가지고 있는 전송신호의 특성상 2가지의 전압레벨을 가지고 있는 신호에 비하여 잡음여유도 측면에서 보다 떨어지는 특성 때문이다.

본 연구를 통한 실험적 검증 결과는 가시광 LED를 응용하여 통신과 조명이라는 목표에 이르되 서로 간에 영향을 주지 않으면서 목적을 달성시키는 가시광 무선통신기술 발전에 기여함으로서 우리 생활에서 쓰이는 조명용 LED 가시광 통신의 활용에 도움을 줄 수 있을 것이다.

향후 연구과제로, 본 신호전송방식의 성능과 효율의 정확한 측정을 위하여 비트오율 측정과 조명 밝기 수치화의 필요성이 요구된다. 그리고 20[cm] 보다 먼 거리에서도 신호의 전송과 복원이 가능하도록 변조와 복원 알고리즘의 정밀성과 정확도 향상을 위한 접근이 요구되며, 데이터 전송율의 향상을 위하여 데이터 신호의 라인코딩 방법의 다양화, 보다 높은 주파수의 데이터 신호 전송, 그리고 그에 따른 복원신호의 복원도를 높이기 위한 프리, 포스트 이퀄라이징 등의 연구가 필요할 것으로 사료된다.

[참고문헌]

[1] S. Jivkova, M. Kavehrad, "Indoor wireless infrared local access, multi-spot diffusing with computer generated holographic beam-splitters," *Proc. IEEE ICC*, vol. 1, pp. 604-608, 1999.

[2] J. M. Kahn, J. R. Barry, "Wireless Infrared Communications," *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, 1997.

[3] T. Nagira, T. Yamazato, M. Katayama, T. Yendo, T. Fujii, and H. Okada, "Improved decoding methods for visible light commmunication system for ITS using LED array and high-speed camera," *Vehicular Technology Conference (VTC) 2010*, Taipei, Taiwan, 2010.

[4] S.-B. Park, 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," *Wireless and Optical Communications 2007*, Montreal, Canada, 2007.

[5] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a White LED," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 24, pp. 3512-3518, 2010.

[6] H. Sugiyama, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Brightness control methods for illumination and visible-light communication systems," *Proc. the third International Conference on Wireless and Mobile Comm. (ICWMC 2007)*, pp. 78, 2007.

[7] J-P M.G. Linnartz, L. Feri, H. Yang, S. B. Colak, T.C.W. Schenk, "Communications and Sensing of Illumination Contributions in a Power LED

Lighting System," *ICC 2008*, pp. 5396-5400, 2008.

[8] H. L. Minh, D. C. O'Brien, G. F. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, "80 Mbit/s visible light communications using pre-equalized white LED," *Proc. European conference on Optical communications (ECOC)*, Brussels, Belgium, pp. 5-223/224, 2008.

[9] H. L. Minh, D. C. O'Brien, G. F. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple-resonant equalization," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 14, pp. 1243-1245, 2008

[10] H. L. Minh, D. C. O'Brien, G. F. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. Won "100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized White LED," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 15, pp. 1063-1065, 2009.

[11] D. C. O'Brien et. al, "Integrated transceivers for optical wireless communications," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 11, pp. 173-183, 2005.

[12] K. Fan, T. Komine, Y. Tanaka, M. Nakagawa, "The Effect of Reflection on Indoor Visible-Light Communication System utilizing White LEDs," *The 5th Int. Symp. on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2002)*, pp. 611-615, 2002.

[13] T. Komine and M. Nakagawa, "Integrated System of White LED Visible-Light Communication and Power-Line Communication," *IEEE Trans. on Consumer Electron.*, vol. 49, No. 1, pp. 71-79, 2003.

[14] T. Komine, M. Nakagawa, "Fundamental analysis for visible-light

communication system using LED lights," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 50, pp. 100-107, 2004.

[15] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, "A Study of Shadowing on Indoor Visible - Light Wireless Communication Utilizing Plural White LED Lightings," *Wireless Personal Communications*, vol. 34, pp. 211-225, 2005.

[16] J. H. Lee, T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, "LED Panel Lighting Communication with Delay Feedback Control For High Data Rate Down link Transmission," *The 9th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (WMSCI 2005)*, 2005.

[17] R. J. Dickenson, and Z. Ghassemlooy, "Bit error rate performance of 166Mb/s OOK diffuse indoor IR link employing wavelets and neural networks," *IEE Electronics Letters*, vol. 40, pp. 753-755, 2004.

[18] Z. Ghassemlooy and R V Wickramasinghe, "Optical fiber transmission of a broadband sub-carrier multiplexed signal using PPM techniques," *IEEE Tran. on Consumer Electron.*, vol. 44, pp 99-107, 1998.

[19] N. M. Aldibbiat, Z. Ghassemlooy and R. McLaughlin, "Indoor optical wireless systems employing dual header pulse interval modulation (DH-PIM)," *International Journal Communication Systems*, 18, pp. 285-306, 2005.

[20] K. K. Wong, T. O'Farrell, M. Kiatweerasakul, "The performance of optical wireless OOK, 2-PPM and spread spectrum under the effects of multipath dispersion and artificial light interference," *International Journal of Communication System*, 13, pp. 551-576, 2000.

[21] T. Komine, S. Haruyama, M. Nakagawa, "Performance Evaluation of

Narrow band OFDM on Integrated System of Power Line Communication and Visible Light Wireless Communication," *International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2006*, 16-18 Jan. 2006.

[22] D. Takase, T. Ohtsuki, "Optical Wireless MIMO Communications," *IEEE Globecom 2004*, pp. 928- 932, 2004.

[23] T. Ohtsuki, "Turbo-Coded Atmospheric Optical Communication Systems," *ICC 2002*, pp. 2938-2942, 2002.

[24] T. Ohtsuki, "Multiple-Subcarrier Modulation in Optical Wireless Communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 41, no. 3, pp. 74-79, 2003.

[25] J. M. Garrido-Balsells, A. Garcia-Zambrana, A. Puerta-Notario, "Variable weight MPPM technique for rate-adaptive optical wireless communications," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 1, 2006.

[26] J.-H. Choi, E.-B. Cho, T.-G. Kang, and C. G. Lee, "Pulse width modulation based signal format for visible light communications," *Technical Digest of 15th Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2010)*, Sapporo, Japan, pp. 276-277, 2010.

[27] E.-B. Cho, J.-H. Choi, C.-S. Park, M.-S. Kang, S.-J. Shin, Z. Ghassemlooy, and C. G. Lee, "NRZ-OOK Signaling with LED Dimming for Visible Light Communication Link," *European Conference on Networks and Optical Communications Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOCOC&I 2011)*, Newcastle, UK, pp. 32-35, 2011

[28] F. J. MacWilliams, Neil J. A. Sloane, "Pseudo-Random Sequences and

Arrays," *Proceeding of the IEEE*, vol. 64, no. 12, pp. 1715-1729, 1976.