

사용자 친화적 시스템 구성을 위한 LED 보드 최적화 설계

박주안* · 한창우* · 유희상* · 이봉주**

LED Board Optimization Design for User-Friendly System Configuration

Ju-An Park* · Chang-Woo Han* · Hui-Sang Yoo* · Boong-Joo Lee**

요 약

본 논문은 MCU와 LED 드라이버를 활용한 감마 보정, 논 플리커, 구동 소음 제거 등의 개선 방안을 적용하여 LED 시스템의 사용자 친화적 시스템을 구성하는 데 초점을 맞추고 있다. 실험 결과, LED 드라이버의 22kHz PWM 모드는 가청 주파수 바깥 영역에서 소음이 발생하여 사용자는 실질적으로 소음을 인지할 수 없었으며, 정상 동작 구간인 지연율 5% 이내의 풀업 저항 값은 3kHz PWM 모드 시 1kΩ ~ 10kΩ 이며, 22kHz PWM 모드는 1kΩ ~ 2kΩ 로 확인되었다. 또한, 감마 보정을 통해 비선형적인 인간의 시각 시스템에 맞게 최적화하여 정확한 대비와 명암을 표현할 수 있으며, 결과적으로 기존의 LED 시스템보다 더 자연스럽게 정확한 표현이 가능한 LED 시스템의 개발과 사용자의 시각적인 경험을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

This paper focuses on configuring a user-friendly system of LED systems by applying improvement measures such as gamma correction, non-flicker, and driving noise removal using MCUs and LED drivers. As a result of the experiment, the 22kHz PWM mode of the LED driver generated noise outside the audible frequency range, making it practically imperceptible to users. The appropriate pull-up resistor values within the normal operating delay ratio of 5% were found to be 1kΩ to 10kΩ for the 3kHz PWM mode and 1kΩ to 2kΩ for the 22kHz PWM mode. In addition, gamma correction can be optimized for nonlinear human visual systems to express accurate contrast and as a result, it is expected to develop an LED system that can be expressed more naturally and accurately than conventional LED systems and improve users' visual experience.

키워드

Audio Frequency, Flicker, Gamma Correction, LED Driver, User-friendly system
가청 주파수, 플리커, 감마 보정, LED 드라이버, 사용자 친화적 시스템

1. 서 론

현대 조명 시스템에서 LED(Light-Emitting

Diode)는 저전력, 긴 수명, 환경 친화성 및 다양한 색상 선택 가능성 등의 이점으로 인해 널리 사용되고 있으며 현재 LED 형광등, LED 전광판, 백라이트, LED

* 남서울대학교 전자공학과(teslawpt13@gmail.com, skae7789@naver.com, huisagn4207@naver.com)

** 교신저자 : 남서울대학교 전자공학과

• 접수일 : 2023. 07. 24

• 수정완료일 : 2023. 09. 02

• 게재확정일 : 2023. 10. 17

• Received : Jul. 24, 2023, Revised : Sep. 02, 2023, Accepted : Oct. 17, 2023

• Corresponding Author :Boong-Joo Lee

Dept. of Electronic Engineering, Namseoul University,

Email : bjlee@nsu.ac.kr

디스플레이 등 LED가 삽입된 광출력 기기가 많이 보급되어 있다[1-3]. 특히 산업통상자원부가 2027년까지 형광 램프를 LED 조명으로 전환한다고 밝혀 10년간 ('24~'33) 기존 형광램프가 약 1,300만 개의 LED 조명으로 교체될 것으로 예상되며, 그만큼 광출력 기기에서 LED의 중요성은 크게 대두되고 있다[4-5]. 이에 따라 LED를 보다 더 효과적으로 구동해야 할 필요가 생겼으며, 그중 LED 드라이버를 활용한 회로 설계가 현재 활발히 진행 중이다[6]. LED 드라이버를 활용한 설계는 소형화와 함께 전력 소모를 최소화하고 동시에 원하는 광출력을 달성하는 것을 목표로 하여 에너지 절약과 LED 시스템의 성능 향상을 기대할 수 있으며, 이때 사용 조건에 부합하는 최적화 설계가 함께 고려되어야 한다[7]. 이와 더불어 LED를 활용한 광출력 기기는 단순히 정량적인 밝기만을 제공하던 시대와는 차별화되어, 더 본질적인 측면에 접근하여 인간의 감성과 건강을 고려한 조명 계획 수립이 필요하다[8-9]. 이에 따라 LED 조명 시스템에 대한 사용자 친화적인 설계 및 제어 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 사용자의 요구와 환경 측면을 모두 고려한 LED 조명 시스템의 개발을 위한 노력이 이어지고 있다[10].

일반적인 LED 조명 시스템의 경우, LED 조명의 플리커 현상이 눈에 민감하게 작용하여 두통, 시력 저하와 같은 증상을 유발할 수 있음을 확인하였다[11]. 또한, LED 드라이버의 PWM 구동 주파수가 20Hz에서 20kHz 사이인 경우, 해당 주파수 범위는 가청 주파수 영역에 속하므로 소음을 발생시킬 수 있다[12]. 그리고 선형 밝기 조절 시스템의 경우 빛 밝기가 변할 때 부드럽게 느껴지지 않고 단절되어 보이는 현상 (posterization)에 의해 불편함을 겪을 수도 있다[13].

본 논문은 LED 조명의 플리커 현상, LED 드라이버의 구동 소음 문제 및 밝기 변화 시 단절 현상을 개선하여 일반적인 LED 조명 시스템을 사용자 친화적 시스템으로 최적화하기 위해 연구되었으며, 이를 통해 LED 조명 시스템의 사용자 경험 개선을 목표로 한다.

II. 이론 배경

2.1 플리커 현상

플리커 현상은 디스플레이 또는 조명에서 빛의 밝

기가 계속 변하면서 깜빡이는 현상을 뜻하며, 인지 여부에 따라 가시 플리커와 비가시 플리커로 구분된다. 가시 플리커는 조명이 100Hz 미만의 주파수로 구동될 때를 의미하며, 비가시 플리커는 비교적 더 빠른 주파수인 100~200Hz로 구동하여, 이는 사람의 눈으로 직접 인식할 수 없다[14].

본 연구에서 사용되는 LED 드라이버는 IS31 FL3236A 모델이며, 3kHz와 22kHz의 두 가지 PWM 모드를 지원한다. 이러한 주파수 범위에서는 일반적으로 플리커 현상이 발생하지 않는다고 보고되고 있다.

2.2 감마 보정

인간의 시각 시스템은 빛의 밝기에 대해 비선형적으로 반응한다. 낮은 밝기 영역에서는 밝기의 작은 변화에도 민감하게 반응하고, 높은 밝기 영역에서는 큰 밝기의 변화에 상대적으로 둔감하게 반응한다. 이러한 인간의 시각 특성을 반영하기 위해 보통 디스플레이 장치는 감마 보정(Gamma Correction)을 적용한다.

감마 보정은 베버의 법칙에 기반하며 비선형 전달 함수를 사용하여 부호화하는 과정을 거친다. 식(1)은 감마 값에 따른 감마 커브가 형성됨을 나타낸다[15].

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma} \quad \dots (1)$$

식 (1)의 V_{out} 은 보정된 출력값을 나타내며, V_{in} 은 입력 값을 나타낸다.

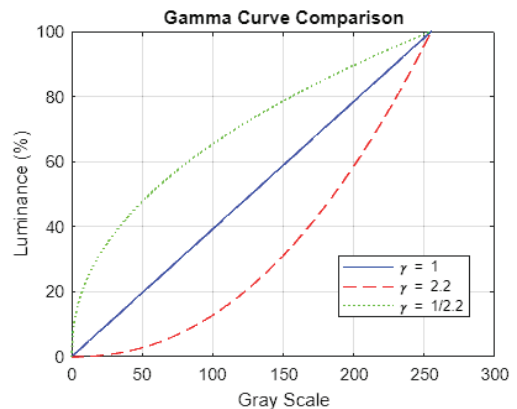


그림 1. 감마 커브 그래프
Fig. 1 Gamma Curve Graph

그림 1은 감마 값이 1보다 작으면 감마 커브가 위로 볼록한 형태를 가지며, 낮은 밝기 영역에서 민감한 변화를 보여준다. 감마값이 1보다 크면 감마 커브는 아래로 볼록한 형태를 가지며, 높은 밝기 영역에서 대비가 강조된다. 따라서, 감마 보정은 디스플레이 장치의 광출력 특성을 보다 자연스럽게, 정확한 표현을 가능하게 하며, 이를 통해 사용자 친화적 시스템을 구성 수 있을 것으로 기대된다.

III. 설계

3.1 LED 구동 회로 설계

LED 구동 회로는 그림 2와 같다. 그림 2의 Signal은 LED 드라이버인 IS31FL3236A의 각 출력 핀의 신호를 의미한다.

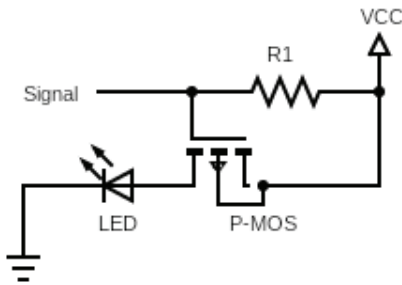


그림 2. LED 구동 회로도
Fig. 2 LED Driving Circuit Diagram

각 출력 핀의 출력 전류는 LED의 요구 전류량에 대비하여 현저히 낮으므로, 모스펫을 통해 제어하는 형태로 구현하였으며, 이는 P형 모스펫에 LED가 직결된 형태이다. 또한 풀업 저항(R1)이 연결되어 LED 드라이버 출력 핀의 신호가 없을 때 P형 모스펫을 Off 상태로 하여, 오작동을 방지한다.

3.2 LED 구동 방식

LED 구동 알고리즘은 그림 3과 같다. ESP8266은 마스터, LED 드라이버는 Slave로서 I2C 통신으로 LED를 각각 제어한다. 다음으로 LED 드라이버에서 P형 모스펫으로 신호를 전달하여 직결된 LED를 구동하는 형태이다.

해당 회로의 LED 드라이버인 IS31FL3236A는

3kHz와 22kHz의 두 가지 PWM 모드를 지원하며, 256 레벨의 PWM Step, 최대 36개의 개별 LED 제어가 가능하다.

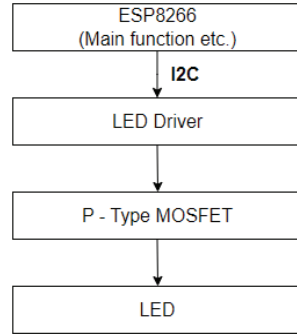


그림 3. LED 구동 방식
Fig. 3 LED Driving Method

3.3 전원 회로 및 메인 회로설계

그림 4와 같이 메인 회로의 ESP8266은 사용자의 입력 정보를 처리하여 LED 제어 신호를 생성하고 I2C 통신으로 정보를 전달, IS31FL3236 LED 드라이버를 통해 36채널의 P형 모스펫을 통해 LED를 각각 제어하도록 직접 구성 및 설계하였다.

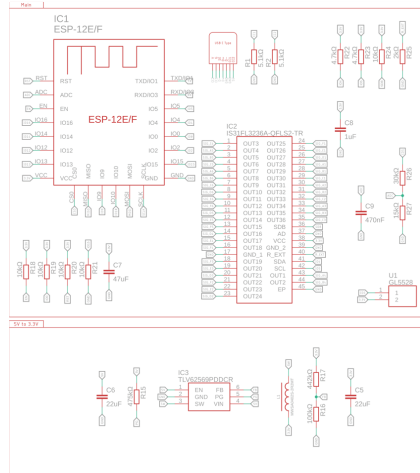


그림 4. 메인 회로(위) 및 전원 회로(아래)
Fig. 4 Main Circuit (Top) and Power Circuit (Bottom)

전원부의 경우 5V를 3.2V로 변환하기 위해 스위칭 레귤레이터 IC를 활용하여 강압 회로를 구성하였다.

3.4 LED 구동 회로 설계

그림 5와 같이 LED 구동 회로를 직접 구성 및 설계하였으며, LED는 36개의 셀, 각각의 셀의 LED가 병렬로 구성되어 있다.

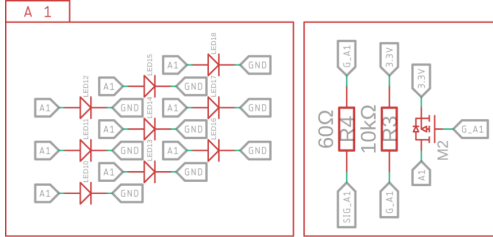


그림 5. 제작된 LED 구동 회로
Fig. 5 Assembled LED Driving Circuit

3.5 실제 제작된 LED 보드

그림 6은 최종적으로 MCU인 ESP8266 및 IS31FL3236 LED 드라이버 등 각각의 소자들을 약 105mm*105mm 크기의 PCB에 구현하였으며, 전면은 LED 셀 및 전원 회로와 후면은 전원 커넥터 및 ESP 모듈, LED 드라이버로 직접 구성 및 설계하였다.

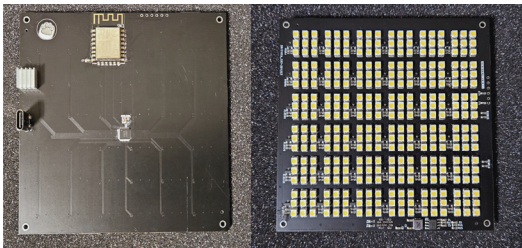


그림 6. LED 보드
Fig. 6 LED Board

IV. 실험

4.1 구동 소음 비교 실험

본 실험에서는 LED 드라이버의 3kHz와 22kHz PWM 모드에서 발생하는 소음을 측정하였다. 측정 방식은 동일한 마이크를 사용하여 실험을 진행하였으며, 마이크의 느린 응답속도로 인해 소음을 측정하지 못하는 현상을 배제하기 위해 PWM Duty 비율을 High cycle과 Low cycle의 비율이 같은 50%로 설정하여 실험을 진행하였다. 표 1은 유휴 상태와 3kHz PWM 모드에서 측정된 데이터를 기록한 것이다.

표 1을 살펴보면, 3kHz PWM 모드에서의 원 주파수를 포함하여 해당 주파수의 배수에 해당하는 고조파 성분이 생성됨을 확인할 수 있다[16]. 이러한 고조파는 비 정현파로 나타나며, 기본파 성분과 함께 가청 주파수 대역 내에 소음을 유발할 수 있다.

표 1. 3kHz 모드 PWM 50% Duty 구동 소음 측정
Table 1. Noise Measurement of 3kHz Mode PWM with 50% Duty Cycle Drive

Frequency Band [kHz]	Noise [dB]	
	3kHz	Idle State
3	-51	-56
6	-35	-54
9	-40	-59
12	-38	-58
15	-34	-56
18	-42	-54
21	-25	-43

또한, 22kHz PWM 모드로 구동시 해당 주파수 대역에서의 소음은 -21dB로 측정되었으며, 유휴상태는 -50dB로 측정되었다. 22kHz PWM 모드에서의 해당 원 주파수를 포함한 고조파 성분들이 모두 가청 주파수 바깥 영역에 위치하여 실질적인 소음이 발생하지 않음을 알 수 있다. 따라서, 3kHz PWM 모드에서의 고조파 특성으로 인해 가청 주파수 대역에서 소음이 발생한다고 결론지을 수 있으며, 구동 주파수 대역으로는 가청 주파수 범위 내에서 소음이 발생하지 않는 22kHz PWM 모드로 선정하였다.

4.2 풀업 저항 선정 실험

LED 제어 모스펫의 오동작 방지용 풀업 저항 선정을 위해 다음과 같은 실험을 진행하였다. 하나의 모스펫을 선정하여 풀업 저항 변화에 따라 게이트 입력 파형을 측정하였고, 이때 PWM 모드는 3kHz와 22kHz로 나누어 실험을 진행하였다. PWM의 Duty 비율은 50%로 설정하였으며 풀업 저항의 값은 총 5가지로 x(연결 안 함), 1kΩ, 2kΩ, 5kΩ, 10kΩ을 사용하였다. 게이트 저항은 0Ω으로 설정하였으며, P형 모스펫 게이트 입력 파형을 오실로스코프로 파형을 측정하였다.

PWM의 스위칭 타이밍과 실제 모스펫 게이트 파형 간의 딜레이 비율을 지연율로 정의하였으며, 3kHz와 22kHz PWM 모드의 각 풀업 저항 값에 따른 지연율은 표 2와 같다.

표 2. PWM 모드의 풀업 저항에 따른 지연율
Table 2. Delay Ratio Depending on the Pull-up Resistor of PWM Mode

Pull-up Resistor	x	1kΩ	2kΩ	5kΩ	10kΩ
3kHz	Abnormal	0%	0%	2.7%	4%
22kHz	Abnormal	2%	4%	10%	20%

위 실험을 통해 얻은 결론으로 먼저, 풀업 저항을 연결하지 않았을 경우 밝기 조절 기능이 제대로 동작하지 않았으며, 게이트 파형도 근소한 변화만 나타났다. 따라서, 정상적인 동작을 위해 풀업 저항이 필요하다는 것을 확인하였다. 또한, 풀업 저항의 적절한 선택을 통해 지연율을 조절하고 출력의 변화를 제어하여 LED 제어 모스펫의 정상 동작을 보장할 수 있음을 확인하였다.

다음으로, 풀업 저항의 값이 클수록 밝기가 증가하는 경향을 보였으나 PWM Duty 비율에 따른 밝기 값의 구현 정확성이 떨어졌다. 특히, PWM 모드가 22kHz 일 때에는 이러한 현상이 더욱 두드러지게 나타났다. 또한, PWM 모드가 3kHz 일 때의 게이트 입력 파형은 지연율이 낮은 반면, 22kHz 일 때의 게이트 입력 파형은 지연율이 상대적으로 높아 파형이 다소 뭉개지는 현상이 나타났다. 이는 구동 주파수가 높아짐에 따른 모스펫의 Qg(게이트 전하량)의 영향이라고 해석되며, 구동 회로의 싱크 전류와 소스 전류도 영향을 미친다고 해석된다.

결론적으로 풀업 저항은 정상 동작에 필수적임을 확인하였으며, 정상 동작 구간인 5% 이내의 지연율을 갖는 LED 보드를 설계하고자 할 때 풀업 저항값으로 각각 3kHz PWM 모드 시 1kΩ ~ 10kΩ, 22kHz PWM 모드 시 1kΩ ~ 2kΩ 사이의 값을 선택하는 것이 적합하다는 사실을 확인하였다.

4.3 감마 보정 실험

본 실험에서는 각각의 감마 값에 따른 PWM Step

값과 측정 조도 값을 비교하여 감마 보정의 결과를 확인하였다. 실험 시 LED 보드에서 출력 가능한 가장 낮은 광출력을 조도계에 인가하였을 때, 폭이 35mm 인 파이프를 통과하여 조도계에서 인식이 가능한 길이로 산출하였으며, 이는 240mm로 확인되었다.

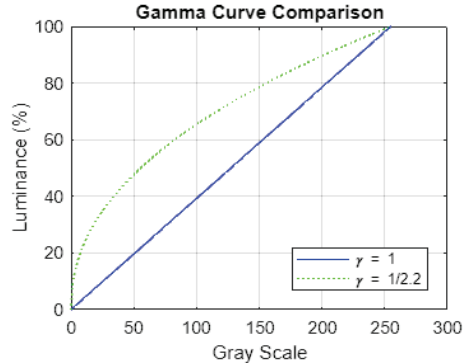


그림 7. 입력 PWM 그래프
Fig. 7 Input PWM Graph

그림 7의 Gray Scale은 8비트 해상도인 출력 PWM 값을 의미하며 설정 밝기인 Luminance 값을 기준으로 하여 각 감마 값에 따른 Gray Scale을 계산하여 도시하였다.

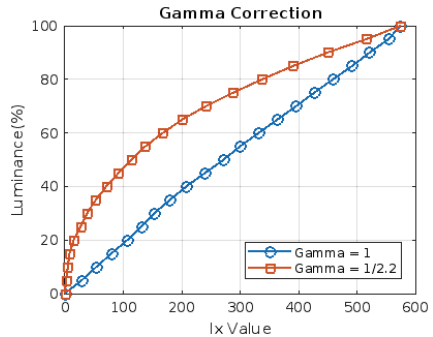


그림 8. 출력 조도 그래프
Fig. 8 Output Illuminance Graph

그림 8은 설정 밝기에 따른 Gray Scale 값에 역수를 취한 PWM Duty 비율 값을 P형 제어 모스펫에 인가하였다. 따라서 각 감마 값에 따른 선형 광출력 특성과 비선형 광출력의 특성을 확인할 수 있으며, 이를 통해 미리 계산한 감마 커브 그래프와 실제 측정된 감마 커브 그래프가 유사한 추이를 보이는지 확인

할 수 있었다.

실험 결과를 통해 LED 보드의 설정 밝기에 비선형 부호화를 적용했을 때 조도계의 측정 밝기가 그에 맞게 비선형적으로 바뀌며, 이를 통해 인간의 시각 시스템에 맞게 최적화하여 정확한 대비와 명암을 표현할 수 있다는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 연구에서는 LED 시스템의 사용자 친화적 시스템 구성을 위해 MCU와 LED 드라이버를 활용한 플리커 개선, 감마 보정, 구동 소음 제거 등의 개선 방안을 적용하여 실질적으로 사용자 친화적인 LED 시스템을 설계하는 방법에 대해 연구하였다.

실험 결과, 두 PWM 모드는 플리커 현상이 없었으나, 3kHz PWM 모드의 구동 소음은 가청 주파수 대역에서 소음을 유발하였다. 따라서 구동 주파수는 가청 주파수 대역에서 소음이 발생하지 않는 22kHz PWM 모드로 설정하였다. 풀업 저항의 값은 밝기의 정확성에 영향을 미치며, 정상 동작 구간인 지연율 5% 이내의 값은 3kHz PWM 모드 시 1kΩ ~ 10kΩ이며, 22kHz PWM 모드는 1kΩ ~ 2kΩ의 풀업 저항값으로 확인하였다. 다음으로 감마 보정을 통해 인간의 시각 특성에 맞게 LED의 광출력을 조절할 수 있음을 그래프를 통해 확인하였다.

이는 기존의 일반적인 LED 시스템과 비교하여, 플리커 현상을 개선하여 사용자의 눈 피로를 줄이고, 감마 보정을 통해, 더 자연스럽고 부드러운 밝기 조절을 구현하였으며, LED 구동 소음을 제거하여 조용하고 편안한 환경을 제공한다[9-11]. 따라서 일반적인 LED 시스템에 위와 같은 기술적 보완 방안을 적용하여 사용자 경험 개선과 건강에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

향후에는 비방 사형 LED 조명 시스템과 같이 사용자 친화적인 부분과 효율 측면을 함께 고려한 LED 조명 시스템을 개발하고자 한다.

References

[1] K. Shin, Y. Kim, H. Kim, J. Kim, K. Kim, and S.

Song, "Investigation on the use of lightings in Residential, commercial and industrial sectors & analysis of LED lighting penetration rate," *Korean Society of Lighting and Electrical Installation Engineers*, pp. 105-106, Mokop, South Korea, May 2014,

- [2] K. Hwang, "A study on Method for Effective application of lighting system in roads through expanding LED lighting System," Master's Thesis, *Hanyang University College of Engineering Graduate School*, 2015.
- [3] K. Lee and M. Jang "Design of Compensation Circuits for LED Fault in Constant Current Driving," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 17, no. 1, 2022, pp. 71-76.
- [4] D. Kwon and S. Kim, "Experimental Demonstration of Micro LED-to-LED Visible Light Communications," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 219-226.
- [5] I. Park, "Fluorescent Lamps Transition to Light-Emitting Diodes (LEDs) until 2027," *Report*, Feb, 2023.
- [6] S. Han, "Status and Outlook of LED Driver Technology in the LED Field," *J. of electrical world*, no. 391, 2009. pp. 36-39.
- [7] S. Lee, H. Shin, and S. Cho, "LED Driver Design with Power Optimum Control Function," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, vol. 60, no. 4, 2011, pp. 253-256.
- [8] M. You, S. Hong, and A. Choi, "A Preliminary Study on the Lighting Design of Hospitals for LED Lighting Application," *J. of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 25, no. 12, 2011, pp. 11-10.
- [9] H. Park, "Human-friendly and smart LED emotional lighting," *J. of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 60, no. 6, 2011, pp. 19-24.
- [10] E. Lee, "The Emotional Response to Lighting Hue Focusing on Relaxation and Attention," *J.*

of the Korean Society of Design, vol. 25, no. 2, 2012, pp. 27-40.

- [11] M. Heo, J. Ko, and C. Kim, "A Study on the Condition of LED Lights Flicker," *J. of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, vol. 29, no. 11, 2016, pp. 729-735.
- [12] H. Kang, "Switching Noise Improvement of Inverter Dehumidifier Using Equal Randomization for Random PWM Technique," Master's Thesis, *Chungbuk National University Graduate School*, 2018.
- [13] Y. Kim, "Design of Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor with Gamma Correction Function," Master's Thesis, *Dongguk University Graduate School*, 2019.
- [14] M. Heo, "A study on the condition of the LED lights flicker," Master's Thesis, *Kwangwoon University Graduate School*, 2016.
- [15] H. Lee, "Local Histogram Equalization Algorithm based on Sub-blocked image for Gamma Correction," Master's Thesis, *Korea University Graduate School of Engineering*, 2008.
- [16] D. Beak, "Effect of Harmonic Generation and Countermeasures," *J. of the Korean Institute of Fire Science and Engineering*, vol. 29, no. 6, 2015, pp. 91-97.



유희상(Hui-Sang Yoo)

2018년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중
 ※ 주 관심분야 : 전자회로, 디스플레이



이봉주(Boong-Joo Lee)

1996년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1998년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

2003년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)
 전) LG전자 디지털디스플레이 연구소 선임연구원
 전) 남서울대학교 전자공학과 학과장
 전) University of Utah(USA), 방문교수
 현) 남서울대학교 전자공학과 교수
 현) 남서울대학교 연구지원센터장
 ※ 관심분야: 유기/무기 전자소자, 차세대 디스플레이

저자 소개



박주안(Ju-An Park)

2017년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중
 ※ 주 관심분야 : 디지털 논리 회로, 회로 설계, 마이크로 프로세서



한창우(Chang-Woo Han)

2018년 3월~ 남서울대학교 전자공학과 4학년 재학 중
 ※ 주 관심분야 : 전자회로, 디스플레이

