Journal of KIIT. Vol. 16, No. 2, pp. 39-46, Feb. 28, 2018. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571 39
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2018.16.2.39

태양광 조명시스템을 위한 태양광-LED 디밍 제어시스템 설계 및 구현

조형만*[1], 김세준*[2], 최준영**

Design and Implementation of Sunlight-LED Dimming Control System for Sunlight Illuminating System

Hyung-Man Cho*[1], Se-Jun Kim*[2], and Joon-Young Choi**

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “사업화연계기술개발사업”의 지원을 받아 수행된 연구결과임(N0002290, 2016)

요 약

본 논문에서는 태양광 조명시스템에서 LED의 조도를 제어함으로써 실내로 출력되는 조명의 밝기를 일정하게 유지할 수 있는 태양광-LED 디밍 제어시스템을 개발한다. 광센서로 측정된 태양광의 세기에 따라 LED에 입력되는 전류의 크기를 조절하여 LED의 조도를 제어함으로써 태양광과 LED의 총 조도를 일정하게 유지한다. LED 디밍 제어 방식으로 일정한 출력 파장을 유지하는 장점이 있는 펄스 폭 변조(PWM) 방식을 채택한다. PWM 듀티비와 발생전류 사이의 비선형성을 보상하여 요구되는 LED 조도를 나타내는 지령 전압과 출력되는 LED 구동전류의 관계를 선형화함으로써 태양광 세기의 변화에도 실내의 밝기를 일정하게 제어한다. 태양광 직접 조명 장치를 이용한 실험을 통해 개발된 디밍 제어시스템의 성능을 검증한다.

Abstract

We develop a sunlight-LED dimming control system to maintain a consistent lighting brightness indoors by controlling LED dimming in a sunlight illuminating system. Adjusting the input current to LED according to the sunlight intensity measured by a light sensor, the intensity of LED is effectively controlled and the total intensity combining both the sunlight and LED is consistently maintained. We employ the PWM method for the LED dimming control that has an advantage of maintaining constant output wavelength. Compensating the inevitable non-linearity between PWM duty ratio and generated current and establishing a linear relation between the reference voltage representing the required LED intensity and LED driving current, the indoor brightness is constantly maintained even under the variation of sunlight intensity. By performing experiments using the sunlight illuminating system, we verify the performance of the developed dimming control system.

Keywords
dimming control, sunlight illuminating system, light emitting diodes, pulse width modulation

* 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과
- ORCID[1]: https://orcid.org/0000-0001-9411-1238
- ORCID[2]: https://orcid.org/0000-0003-0434-9421
** 부산대학교 전자공학과 정교수(교신저자)
- ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5160-3739

· Received: Jan. 03, 2018, Revised: Feb. 10, 2018, Accepted: Feb. 13, 2018
· Corresponding Author: Joon-Young Choi
Dept. of Electronic Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea,
Tel.: +82-51-510-3978, Email: jyc@pusan.ac.kr

Ⅰ. 서 론

지난 수십 년간 가장 보편적인 조명으로서 형광등이 사용되었지만 짧은 수명, 높은 전력 소모량 그리고 수은 공해라는 단점을 극복하지 못하였다[1]. 또한 산업 성장과 급격히 증가하는 인구로 인해 다양한 에너지 절약 대책이 발표되고 실행되었다. 우리나라의 경우 건물에너지 소비량이 국가 에너지 소비의 1/4로 연간 25조원에 이르고 있기 때문에 스마트 건물에너지 관리시스템을 통해 에너지를 절감하려는 요구가 점차 높아지는 추세이다.

조명 부문에서의 에너지 절약은 확실한 효과를 달성할 수 있으며 더 나아가, 미국 연방에너지관리프로그램(FEMP)은 효율적인 조명 솔루션 13가지 중에서 자연광과 LED를 접목시킨 태양광-LED 조명시스템을 6번째로 등록하였다. 한편 지난 몇 년간 전체 조명시장에서 LED는 놀라운 성장률을 보여준다. LED 기술의 발전으로 LED의 효율이 높아짐에 따라 점진적으로 전통적인 조명 방식은 LED로 전환될 것으로 전망된다[1].

태양 에너지는 일반적으로 태양광 발전, 태양열 발전 그리고 태양열 이용으로 에너지 측면에서 열이나 전기에너지로 활용 한다면 태양광 채광의 경우에는 에너지 측면과 더불어 생리활성 효과 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 생리활성은 인간생활 향상에 도움을 주는 다양한 기능, 교육 및 생산 효율향상, 질병 치료 및 예방기능, 살균 소독 탈취 기능, 심리적 안정 등이 될 것이다[2].

본 논문에서는 태양광-LED 복합 조명에서 필요한 태양광-LED 디밍(Dimming) 제어시스템을 개발한다. 핵심기능은 광센서를 이용한 태양광 세기 측정 정보에 따라 LED 조도를 제어하여 태양광-LED 복합 조명이 항상 일정한 밝기를 유지하도록 하는 것이다. [3]에서 제안된 기존의 기술은 태양광 세기 측정 시 넓은 범위에서 간접적으로 측정하나 본 논문에서는 실내로 태양광을 전달하는 광섬유에 직접 광센서를 부착하여 더욱 정확한 태양광 세기를 측정하여 정밀한 실내 조도 제어가 가능하다.

또한 LED 조도 제어의 선형성 뿐 아니라 일정한 파장의 출력을 확보할 수 있도록 펄스 폭 변조 방식을 채택하여 적용한다[4]. 측정된 태양광 세기에 따라 필요한 LED의 조도를 얻기 위하여 PWM 듀티비를 계산하고 전류 레귤레이터에 입력하여 발생한 전류로 LED를 구동한다. 또한 정밀한 조도 제어를 위하여 전류 레귤레이터의 입출력 비선형 특성을 보상하는 알고리즘을 적용한다. 태양광 추적 장치, 집광부, 전송부로 구성되는 태양광 직접 조명장치를 이용한 실험을 통해 개발된 디밍 제어시스템의 성능을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 개발된 시스템을 적용할 태양 조명시스템에 대해 기술하고 3장에서는 개발된 디밍 제어시스템의 하드웨어와 알고리즘에 대해 기술한다. 4장에서는 태양광 직접 조명 장치를 이용한 실험결과에 대하여 기술하며 5장에서는 본 논문의 결론을 기술한다.

Ⅱ. 태양 조명시스템

태양 조명시스템은 햇빛을 직접 실내로 조사하는 태양광 직접 조명 장치로서 빛을 필요로 하는 건물 내부로 태양광을 전달하여 이를 조명으로 활용하는 장치로 정의할 수 있다[2]. 태양 직사광은 조명으로서 활용가능 하며, 맑은 날 약 90~100 루멘 방사속을 가지며 이것은 약 100,000~120,000 럭스를 나타낸다[1]. 비록 햇빛은 낮 시간에만 조명으로 사용할 수 있지만, 많은 양의 에너지를 절약할 수 있는 방법이며, 특히 태양광과 LED를 결합한 시스템에서는 이러한 단점을 보완한다.

본 논문에서 구현하고자 하는 태양광-LED 조명 시스템의 구조는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

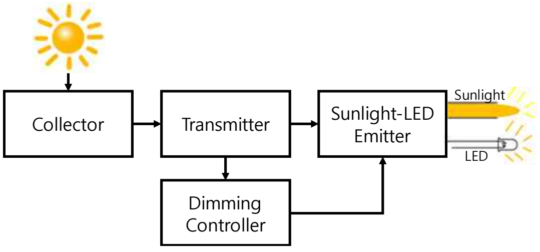


그림 1. 태양광-LED 조명시스템 구조
Fig. 1. Structure of sunlight-LED illumination system

채광부는 태양을 추적하여 효과적으로 태양광을 수집하고, 전송부는 수집된 광을 방광부로 전송하고, 방광부는 LED와 전송된 태양광을 조명으로 조사한다. 디밍 제어부는 태양광의 세기를 측정하여 LED의 조도를 조절한다.

채광부는 태양의 움직임에 관계없이 고정되어 있는 고정형(Passive)과 태양의 움직임을 추적하여 집광을 극대화하는 추적형(Active)으로 나눌 수 있다. 추적형 채광부는 구동 방식에 따라 방향각 종속형과 경사각 종속형 구동 방식으로 구분한다.

경사각 종속형 구동 방식의 경우 방향각 구동 및 경사각 구동의 범위가 상대적으로 제한되고 경사 및 방향축 회전각이 태양 위치의 방위각 및 고도각과 다른 좌표계 상에 위치하게 되어 태양위치에 대한 별도의 계산과정이 필요하지만, 방향각 종속형 구동 방식에 비해 설치비용이 저렴하고 유지보수가 용이하다. 태양광 추적 장치를 이용한 응용분야의 특성상 보다 저렴한 제작 단가로 동작의 안정성 및 신뢰성이 확보되어야 하므로 본 논문에서는 추적형 2축식 경사각 종속형 태양광 추적 장치를 사용한다[5][6].

광전송부는 채광된 빛을 필요로 하는 곳으로 전송한다. 일반적으로 고정형 채광기는 덕트, 튜브 또는 파이프 전송기가 사용되며, 반사형 채광기는 별도의 전송장치 없이 빈 공간을 활용하며, 본 논문에서는 렌즈형 채광기와 광섬유가 사용된다[7].

방광부는 산란형과 전구형으로 나눌 수 있으며 산란형은 덕트 또는 파이프형 전송기에 적용된다. 본 논문에서는 그림 2와 같은 전구형 방광부를 사용하며 중앙에는 태양광을 전송하여 실내로 방광하는 태양방광 소자가 장착되어 있고 그 주변에는 일정한 조도를 유지하기 위해 LED 소자를 추가로 장착한다.

태양광은 계절, 시각, 기상상태에 따라 변화하기 때문에 태양광을 이용한 조명시스템은 일정한 성능 유지가 필요하다. 태양광 조명시스템의 성능 유지를 위해 본 논문에서는 LED 디밍 제어시스템을 추가로 적용하는 방법을 제안한다.

III. 태양광-LED 디밍 제어시스템 설계

기존의 LED 디밍 제어 방법에는 실내 밝기를 광센서가 감지하는 구조로 오작동 발생 우려가 존재한다[3]. 본 논문에서는 광센서, 제어부, LED를 일체형으로 개발하여 설치비용과 시간을 절감하고 그림 3과 같이 추적 장치로부터 전송되는 태양광을 광섬유에서 직접 측정하여 오작동이 발생하지 않도록 설계하였다.

LED 디밍 제어 방법에는 펄스 폭 변조(PWM), 주파수변조(FM), 아날로그 제어 방법이 있으며, 아날로그 제어 방법은 순방향 고출력 LED 전류를 조정하는 방법으로 전 범위에서 선형 밝기 조절이 가능하나 순방향 전류를 변화시킴으로써 파장의 변화가 존재한다[4]. 본 논문에서는 LED 디밍 제어 방식으로 일정한 출력 파장을 유지하는 장점이 있는 펄스 폭 변조 방식을 채택한다.

PWM 디밍 제어는 고출력 LED에 흐르는 구형파 형태의 전류 듀티비를 가변하여 제어하는 방식을 사용한다[8]. LED 디밍 제어 시 인간의 눈이 깜빡임(Flickering)을 감지하지 못하도록 300Hz 이상의 주파수에서 동작한다[9].

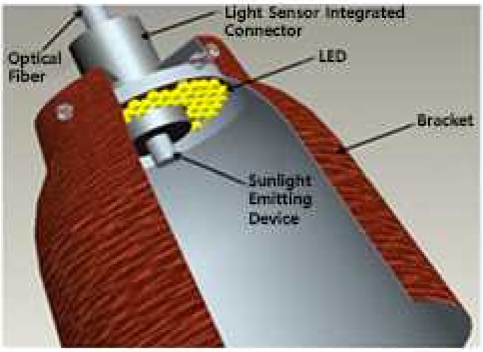


그림 2. 전구형 방광기
Fig. 2. Bulb type light emitting module

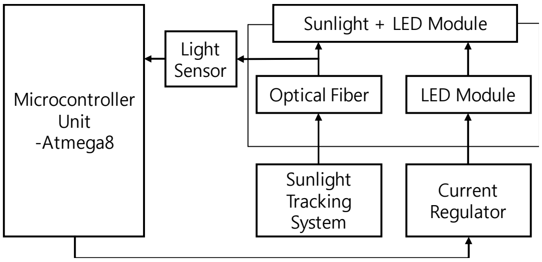


그림 3. 태양광-LED 디밍 제어시스템 구조
Fig. 3. Structure of sunlight-LED dimming control system

PWM 듀티비를 입력으로 받아 전류를 발생시키는 전류 레귤레이터의 특성 때문에 PWM 듀티비와 발생전류 사이에 비선형성이 필연적으로 존재하고 이를 보상하는 것이 필요하다. 이를 위해 요구되는 LED 조도를 나타내는 지령 전압과 출력되는 LED 구동전류의 관계를 선형화함으로써 태양광 세기의 변화에도 실내의 밝기를 일정하게 제어한다.

3.1 디밍 제어 하드웨어

디밍 제어 시스템의 하드웨어 구조는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 광센서는 전구형 방광부 광섬유에 직접 부착하는 형태로 태양광의 세기를 측정하며 빛 에너지를 전기 에너지로 변환하는 광섬유 포토다이오드 감지기 MFOD3100을 사용하였다. 광센서 출력 신호처리 및 PWM 출력을 위해 8KBytes 온칩 Programmable Flash 메모리를 지원하는 Atmel 社의 Atmega8 8-bit Atmel MCU(Microcontroller Unit)를 사용하였다. MCU로부터 PWM 제어 입력을 받아 LED로 전류를 인가하기 위한 전류 레귤레이터는 ADDtek 社 AMC7140을 사용하였으며, 입력전압 5~50V, 출력전압 최대 75V 범위에서 최대 700mA까지 가변해서 사용할 수 있는 정전류 LED 드라이버이다.

3.2 디밍 제어 알고리즘

태양광-LED 조명시스템에서 LED의 조도는 태양광의 세기에 따라 조정되며 방광부의 총 밝기는 일정하게 유지되어야 한다. 본 논문에서는 태양광 센서로 부터 들어오는 전압 값에 따라 LED의 조도를 선형적으로 제어하고자 한다. 디밍 제어시스템 알고리즘의 기본 동작 흐름은 그림 5와 같다.

광센서로부터 측정된 태양광의 세기는 아날로그 전압으로 디밍 제어부 하드웨어의 MCU에 전달되며 전달된 전압은 ADC에서 디지털 전압으로 변환된다. 전체 측정 범위를 20구간으로 나누어 각 구간별 LED의 PWM 듀티비 0%에서 100%까지의 제어를 LED의 조도 0%에서 100%까지 선형적으로 계산한다.

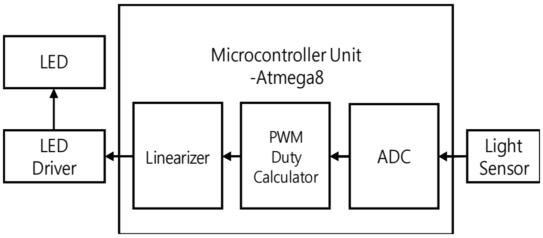


그림 4. 디밍 제어부 하드웨어 구조
Fig. 4. Structure of dimming control hardware

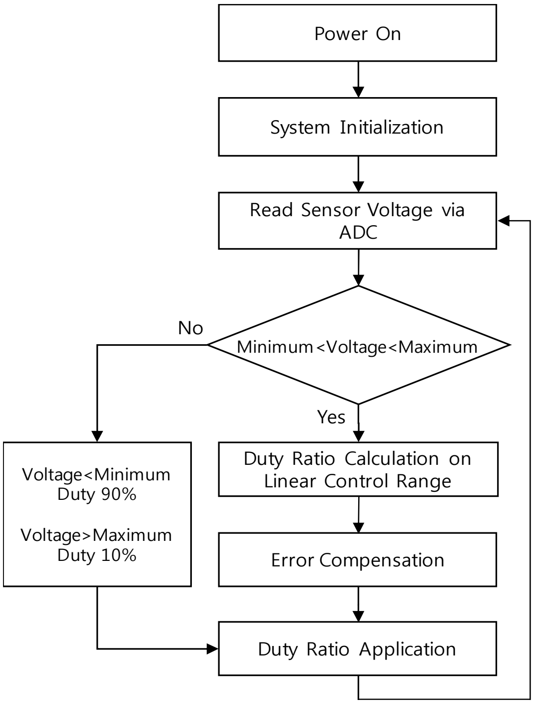


그림 5. 디밍 제어 알고리즘
Fig. 5. Dimming control algorithm

광센서로부터 전달된 신호를 ADC에서 0~3.3V의 전압 값으로 변환하며 태양광의 세기가 약한 0~0.5V 구간에서는 LED가 최대의 조도를 출력하도록 제어해야 하나 소자의 발열을 방지하기 위해 듀티비를 90%로 제한한다. 반대로 전압 값이 2.6V보다 큰 구간에서는 LED가 최소의 조도를 출력하도록 제어해야 하나 인가되는 전류가 너무 낮을 때 LED가 불안정하게 켜지기 때문에 듀티비를 10%로 조정한다.

태양광의 세기에 반비례하여 PWM 듀티비가 결정되고, 결정된 듀티비에 비례하여 LED의 조도가

조절된다. 계산된 듀티비에 따라 선형적으로 LED의 조도가 조절되어야 하지만 PWM 듀티비를 입력으로 받아 LED 전류를 발생시키는 전류 레귤레이터의 특성 때문에 필연적으로 존재하는 PWM 듀티비와 발생전류 사이의 비선형성을 보상해 주어야한다.

이를 위하여 광센서 전압 v_l 과 전류 레귤레이터의 출력전류 i_r 사이의 관계를 최저전압 및 최대전압을 제외한 구간에서 다음과 같이 선형 부분과 비선형부분의 합으로 구성되는 모델 식으로 나타낸다.

$$i_r = av_l + e(v_l) \tag{1}$$

위식에서 선형 비례 상수 a는 음수가 되고 $e(v_l)$은 v_l에 따라 값이 변하는 알려지지 않은 비선형 함수로서 전류 오차를 나타낸다.

디밍 제어시스템의 기본 동작 알고리즘에서 최저전압 및 최대전압을 제외한 구간에서 LED로 인가되는 전류의 선형제어를 위해 기존에 계산된 듀티비를 오차 보정을 통해 새로운 듀티비로 계산한다. ADC로부터 들어오는 전압에 따라 전류를 측정하는 보정 실험을 통해 각 전압레벨 구간별 전류 오차를 여러 번 측정하고 각 전압레벨 구간별 전류 오차의 평균값을 계산한다. 계산된 전류 오차의 평균값은 다시 듀티비로 환산하여 오차 보정 전 계산된 듀티비에 보정 값으로 사용하여 보정된 최종 제어 듀티비를 얻을 수 있다. MCU에서 오차가 보정된 듀티비는 그림 4의 디밍 제어부 하드웨어에서 전류 레귤레이터를 거쳐 최종적으로 LED에 전류로 인가된다.

Ⅳ. PWM 듀티비 보정 실험 및 결과

실험환경은 그림 6과 같이 태양광 직접 조명 장치에 전류측정기를 부착하여 구성하였다. 전구형 방광기에 전류측정기를 부착하여 태양광의 세기에 따라 MCU로부터 PWM 듀티비 입력을 받은 전류 레귤레이터의 출력 전류가 선형성을 보이는지 실험하였다.

그림 7은 요구되는 LED 조도를 나타내는 전압 값에 따른 전류 측정 실험 결과이다.

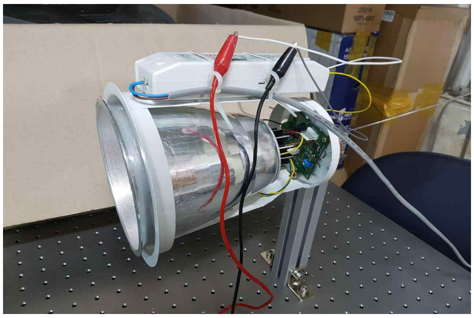


그림 6. PWM 듀티비 보정 실험 구성
Fig. 6. Setup for PWM duty ratio compensation experiment

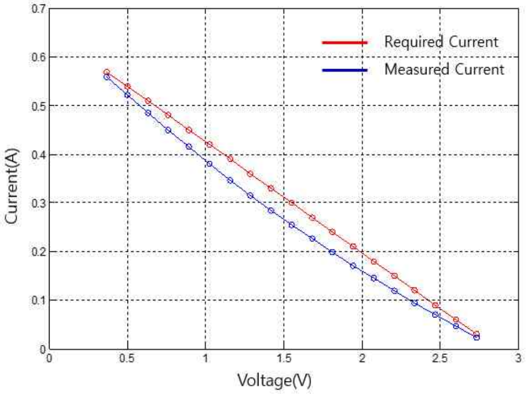


그림 7. 요구되는 LED 조도를 나타내는 전압 값에 따른 전류 측정 실험 결과
Fig. 7. Experimental results of current measurement according to voltage value indicating required LED illuminance

그림 7에서 나타난 바와 같이 ADC로부터 전달된 전압 값에 따라 전류가 선형적으로 출력되지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 전류 레귤레이터에서 MCU로부터 받은 PWM 듀티비에 따라 선형적으로 전류를 출력하지 못한 결과이다. 실험 결과에서 전압 값에 따른 듀티비의 오프셋 보정이 필요함을 알 수 있다.

그림 7의 광센서 전압과 출력 전류의 사이의 관계는 식 (1)과 같은 모델 식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$i_r = -0.2287v_l + 0.6544 + e(v_l) \tag{2}$$

위식에서 선형 비례상수와 상수항은 그림 7의 필요전류를 나타내는 선형식으로부터 구할 수 있다.

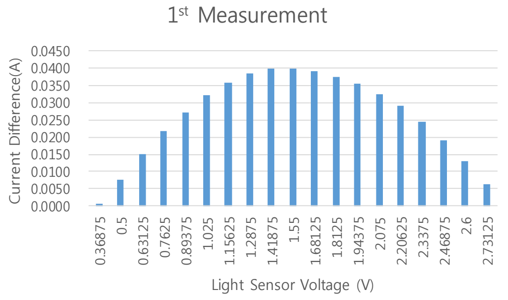


그림 8. 보정실험 1차측정
Fig. 8. First measurement for compensation experiment

그림 8은 오프셋 보정을 위한 1차 측정 결과를 나타내고 전류차이는 식 (2)의 전류오차 $e(v_l)$에 해당한다. 이러한 전류 오차를 보정하기 위하여 각 광센서 전압에서 $\Delta v_l = e(v_l) \div 0.2287$의 추가 전압 값이 필요하며 이 추가전압은 듀티비를 추가로 증가시켜 얻을 수 있다. 실제 알고리즘 구현에서는 신뢰성 있는 전류 오차를 얻기 위하여 3차례 실험을 통한 평균 전류 오차를 이용하였고 자세한 실험 값은 표 1에 정리하였다.

표 1. 보정실험 측정결과
Table. 1. Result for compensation experiment

Light Sensor Voltage v_l (V)	Required Current i_r (A)	Measured Current Average (A)	Duty Ratio (%)	Corrected Duty Ratio (%)
0.369	0.570	0.564	95	97.5
0.500	0.540	0.527	90	93.1
0.631	0.510	0.490	85	88.8
0.763	0.480	0.454	80	84.5
0.894	0.450	0.419	75	80.3
1.025	0.420	0.384	70	76
1.156	0.390	0.350	65	71.6
1.288	0.360	0.318	60	67
1.419	0.330	0.287	55	62.4
1.550	0.300	0.258	50	57.5
1.681	0.270	0.229	45	52.5
1.813	0.240	0.201	40	47.3
1.944	0.210	0.173	35	42
2.075	0.180	0.146	30	36.5
2.206	0.150	0.120	25	30.9
2.338	0.120	0.095	20	25.1
2.469	0.090	0.070	15	19
2.600	0.060	0.047	10	12.9
2.731	0.030	0.023	5	6.4

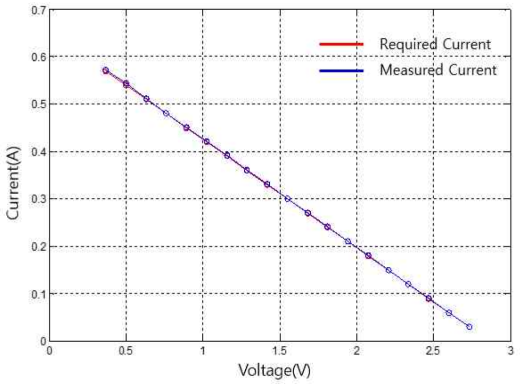


그림 9. 요구되는 LED 조도를 나타내는 전압 값에 따른 전류 측정 실험 결과
Fig. 9. Experimental results of current measurement according to voltage value indicating required LED illuminance

보정실험에서 측정한 값을 바탕으로 필요전류와 측정전류의 차이를 MCU에서 계산된 제어 값에 오프셋 보정을 적용한다. 오프셋 보정은 그림 5의 오차 보정 단계에서 수행한다. 보정 후 듀티비가 적용된 보정실험 결과를 보여주는 그림 9의 그래프에서는 보정 전 필요전류와 측정전류 간 오차 평균 0.0312A와 비교하여 필요전류와 측정전류 간 오차가 평균 0.0012A로 크게 개선되었다. 이러한 결과로부터 선형화 알고리즘이 적절히 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 태양광-LED 디밍 제어시스템의 설계와 태양광 직접 조명 장치를 이용한 실험을 통하여 디밍 제어시스템의 성능 검증을 수행하였다. 광센서로 측정되는 태양광의 세기의 변화에 따라 선형적으로 LED의 조도를 적절히 제어하여 태양광-LED 통합 조명의 조도를 일정하게 유지하였다. 실험 결과는 보정 전후 필요전류와 측정전류 간 오차 평균이 0.0312A에서 0.0012A로 크게 개선된 것을 나타내고 있다.

제안된 디밍 제어 알고리즘은 태양광을 실내조명으로 이용할 때 발생할 수 있는 일정한 조도 출력 문제를 해결할 수 있다. 따라서 본 논문의 연구 결과는 태양광 조명 활용 가능성을 개선하여 이용률

을 증가시키고 태양광 조명으로 확실한 에너지 절감 효과와 더 나아가 도심의 일조권 침해 해소와 지하 공간의 활용 방안을 제시할 수 있다.

본 논문에서 사용한 PWM LED 디밍 제어 방식은 듀티비 0~10% 영역에서는 사용할 수 없는 제약이 있으므로, 향후에는 저 레벨 듀티비 영역에서 사용할 수 있는 아날로그 방식과 PWM 디밍 제어 방식을 결합한 하이브리드 방식의 LED 제어 시스템을 적용하여 태양광-LED 디밍 제어 시스템을 개발할 계획이다.

References

[1] Chih-Hsuan Tsuei and Wen-Shing Sun, "Simulating the Illuminance and Efficiency of Sunlight/LED Hybrid Illuminating System used in Indoor Lighting Design", Optics Express Vol. 16, No. 23, pp. 18692-18701, Sep. 2008.

[2] Sun-Ho Kim and Byung Cheol Kim, "Solar Daylighting System", Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 25, No. 10, pp. 33-40, Oct. 2008.

[3] Hak-Geun Jeong, Soo-Bin Han, and Cheol-Yong Jang, "Energy Efficient LED Lighting Design to utilize the Sun Light", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 31, No. 2, pp. 31-36, Apr. 2011.

[4] Doo-hyun Kim, Jae-ho Choi, and Beom-joon Cho, "A Design and Implementation of Circuit for Efficient Power LED Dimming Control", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering Vol. 18, No. 9: 2280-288, Sep. 2014.

[5] Hyoung-Woo Kim and Joon-Young Choi, "Development of Low-Cost Solar Tracking Embedded Systems for Sun Light Systems", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 1, pp. 19-26, Jan. 2016.

[6] Bongseog Jang and Sung-Gi Kwon, "Applying ZigBee to Sun Tracker System Development," The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 8, No. 12, pp. 173-79, Dec. 2010.

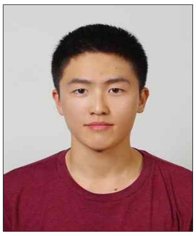
[7] Se-Jun Kim, Hyoung-Woo Kim, Byung-Han Shin, Haeng-Sub Wi, KiGon Nam, and Joon-Young Choi, "Development of Bluetooth based Control System for Performance Improvement of Sunlight Tracker", The Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 9, pp. 19-26, Sep. 2016.

[8] Prathyusha Narra and Donald S. Zinger, "An Effective LED Dimming Approach", Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, Vol. 3, pp. 1671-1676, Oct. 2004.

[9] Anshul Gulati, "Modulation Techniques for LED dimming", AN49262, Document No. 001-49262 Rev., Oct. 2008.

저자소개

조 형 만 (Hyung-Man Cho)



2017년 : 부산대학교 전자공학과(공학사)

2018년 2월 현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정

관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템

김 세 준 (Se-Jun Kim)

2016년 : 부산대학교 전자공학과(공학사)

2018년 2월 현재 : 부산대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정

관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템

최 준 영 (Joon-Young Choi)

1994년 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학사)
1996년 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2002년 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학박사)
2005년 3월 ~ 현재 : 부산대학교
전자공학과 교수
관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템