조명용 디지털 LED 파워플랫폼 개발

박상현, 박진식, 김형석, 문건우, 윤명중
KAIST

Development of Digital LED Platform for Illumination

Sang-Hyun Park, Jin-sik Park, Hyoung-Suk Kim, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn
KAIST

Abstract

LED (Light Emitting Diode) 조명 기술이 친환경 조명 기술로 떠오르고 있다. LED는 기존의 백열등, 형광등 조명에 비해 에너지 효율이 좋아, 최근 우리나라에서도 가로등, 신호 등을 LED 조명으로 교체하고 있다. 뿐만 아니라 건물의 외장이나 전시회 등에 사용되는 LED 시스템의 경우, 가격적인 측면보다 성능적인 측면이 더 중요시 되고 있으며, 이러한 고급조명용 LED 시스템에는 색을 관리 및 제어해주는 장치 즉, MCU의 탑재가 일반적이다. 본 논문에서는 LED를 이용한 조명용 백색광원의 색좌표 및 색온도 제어가 가능한 디지털 파워플랫폼을 개발하고 그 성능을 측정하였다.

1. 서 론

LED 조명 기술이 기존의 조명 기술들을 빠르게 대체하고 있다. LED는 기존의 백열등, 형광등 조명에 비해 에너지 효율이 좋으며, 긴 수명시간을 가지고, 오염 물질이나 유해 가스 배출이 없는 친환경 기술이다. 또한 색재현율이 매우 높고 색온도 및 휘도를 세부적으로 조절할 수 있는 장점을 가지기 때문에 이를 이용한 최첨단 조명 기술이 연구, 개발되는 추세이다. 이중 한 분야인 감성 조명은 사람의 심리 상태에 따라 주변 조명의 색온도와 휘도를 변화시키면서 환경과 공간을 변화시킬 수 있는 조명 기술을 말한다. 이러한 감성조명을 포함한 고급 조명용 LED 시스템에는 단순히 조명을 켜거나 꺼주는 일반적인 제어를 넘어서 색을 혼합하고 또한 관리하는 기법이 필요하다. 일반적으로 색을 나타내는 방법은 CIE1931 좌표계를 이용한다. 단색 LED는 좁은 범위의 스펙트럼 분포를 가지고 있으며, 그에 따라 CIE1931 좌표계 상에서 고유한 좌표를 갖는다. 이러한 단색 LED를 적절하게 혼합하면 CIE1931 좌표계 안의 다양한 색들을 만들어 낼 수 있고, 백색광원 역시 쉽게 만들어 낼 수 있다. 하지만 이렇게 만들어진 광원은 연속된 스펙트럼 분포를 가지고 있지 않는다. 백색광원에서 스펙트럼이 중요한 이유는 백색광원은 조명으로 쓰이며, 이런 조명은 디스플레이와 달리 반사광이 중요하기 때문이다. 물체에 빛이 반사될 경우, 물체가 가지고 있는 고유의 색을 반사하게 된다. 즉, 물체의 색깔이 광원 스펙트럼상에서 없을 경우, 물체의 색깔은 왜곡되어 보이게 된다. 자연광이나 기존의 조명용 광원은 연속 스펙트럼을 가지기 때문에 이런 현상이 적다. 이를 색재현율이 좋다고 표현한다. LED용 조명의 경우, 이점을 보완하기 위해서, 여러 색깔의 광원을 섞어 흰색 조명을 형성하거나, 형광체를 이용한 LED를 많이 사용하여, 스펙트럼의 빈곳을 채워 조명을 제작한다. 본 논문에서는 CIE1931 좌표계에서 제시하는 표준광원에 대한 색온도 제어와 높은 색재현율을 가지는 색 구성을 찾아내고, 이를 위한 LED 파워 플랫폼을 개발하였으며 성능을 측정하였다.

2. LED 파워플랫폼

2.1 LED 드라이버 구성

파워단은 MCU에 의해서 스위칭 신호를 받아 LED 모듈에 전류를 공급해 구동시키는 역할을 하며, 부스트 컨버터를 사용하여 구현되었다. 본 논문에서 백색광원을 만들기 위하여 사용된 LED의 색상을 5가지이며, 각각의 색상들은 각기 다른 밝기로 제어되어야 한다. 따라서 5채널의 부스트 컨버터를 하나의 MCU를 이용하여 제어한다. LED 모듈은 1W 사양의 LED들을 각 채널별로 직렬 연결한 구조이다. 기본적인 색 혼합을 위하여 Red, Green, Blue 색상의 LED가 사용되었으며, 백색 광원으로 조합할 시에 기준 색온도 조건에서 높은 연색 지수를 만족하기 위해 Amber와 White 색상의 LED가 함께 사용되었다.

2.2 LED 구동 방법

LED를 구동하는 방법으로는 전압 제어와 전류 제어가 존재한다. 전압 제어 방법의 경우, LED에 인가되는 전압이 일정하더라도 LED 제품간의 편차 또는 온도에 따른 특성 변화에 의해 원하는 전류 범위를 갖게 만들기는 쉽지 않다. 또한 LED의 광량이 전류와 거의 비례하기 때문에 전류 제어를 사용하는 것이 유리하다. 그림은 본 논문에서 사용한 전류 제어 부스트 컨버터이다. 각 채널에 전류 제어 부스트 컨버터가 사용되었다.

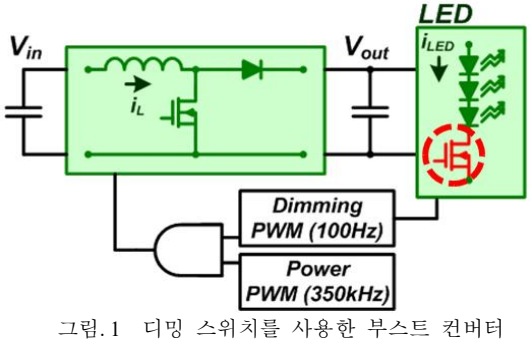

그림. 1 디밍 스위치를 사용한 부스트 컨버터

색제어를 필요로 하는 LED 조명시스템에서 정확한 디밍(dimming)은 중요한 제어 요소이다. 디밍 제어는 크게 아날로그 디밍과 디지털 디밍으로 나눌 수 있다. 두 방식 모두 LED의 광량을 제어할 수 있지만, 아날로그 디밍의 경우 LED 소자에 흐르는 전류의 크기를 제어하는 방법으로, 대부분의 경우 LED 전류와 밝기 사이에 완벽한 선형관계가 성립하지 않기 때문에 본 논문에서는 디지털 디밍을 사용한다. 따라서 전류의 크기를 고정한 채로 LED의 on/off를 결정하는 디밍 시비율을 조절한다. 디지털 디밍의 동특성을 확보하기 위해서 LED 모듈에 MCU에의해 제어되는 스위치를 추가하여 구현하였으며, 이는 그림 1과 같다.

2.3 색좌표 제어

전체 광원의 색좌표 제어는 5개 색상의 LED가 각각 원하는 광속을 내도록 만드는데 그 목적이 있다. 색온도 제어 역시 큰 범주에서 보았을 때 색좌표 제어의 하나라고 할 수 있다. 색좌표 제어를 위해서 CIExyY 좌표계를 사용한다. 총 n개의 단색 광원을 조합하는 경우, 각 광원의 색좌표(x, y)와 광속(Y)는 각각 (x_1, y_1, Y_1), (x_2, y_2, Y_2), … ,(x_n, y_n, Y_n)으로 가정하자. 각각의 광원들의 색좌표와 혼합한 결과 색좌표의 관계식은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{x_{mixed}}{y_{mixed}} \\ 1 \\ \frac{1-x_{mixed}-y_{mixed}}{y_{mixed}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_1}{y_1} & \frac{x_2}{y_2} & \frac{x_3}{y_3} & \cdots & \frac{x_n}{y_n} \\ 1 & 1 & 1 & & 1 \\ \frac{1-x_1-y_1}{y_1} & \frac{1-x_2-y_2}{y_2} & \frac{1-x_3-y_3}{y_3} & & \frac{1-x_n-y_n}{y_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

단색 광원 n개를 조합한 경우, (x_{mixed}, y_{mixed})의 색좌표를 가지는 1lm의 광원이 구현된다. 각 단일 광원의 색좌표(x,y)는 LED에 따라 다르기 때문에 측정에 따라 정해지는 수치이며, LED 드라이버 시스템에서는 각각의 색상의 LED의 광속(Y)를 제어하게 된다. 이를 위해서 LED가 켜고 꺼지는 디밍 시비율(dimming duty)를 제어해 주어야 한다. 디밍 시비율과 광도 사이에는 직접적인 수식관계가 없기 때문에 각 색상의 LED에 대하여 실험으로부터 관계를 측정해야 한다. 정전류 제어되고 있는 LED 모듈에 대해서 디밍 시비율과 광속은 선형적인 관계를 보인다.

2.3 연색 지수

조명용 LED 광원에서는 색재현율 또한 중요한 요소가 되며, 이를 수치화 한 것이 연색지수(Color Rendering Index, CRI)이다. 높은 연색지수를 얻기 위해서는 가시영역에서 넓은 스펙트럼 분포를 보여야 한다. 하지만 각 색온도 또는 색좌표에 대해서 높은 연색 지수를 가지는 조합을 실시간으로 계산하기는 무리이기 때문에 시뮬레이션을 통해 일정 수준의 연색 지수를 만족하는 색온도별 각 LED의 디밍 시비율을 계산하여 이를 제어용 MCU내에 look-up 테이블로 구현하였다. 시뮬레이션은 원하는 색온도를 구현하는 R-G-B-A-W 광속의 여러 조합에 대해서 각 LED의 스펙트럼 데이터와 표준광원과의 차이로부터 연색지수를 계산하여 이루어진다. 넓은 스펙트럼 분포를 이루기 위해서는 여러 색을 섞을수록 유리하다. 하지만 이것은 에너지 효율 면에서는 불리해지기 때문에 최소한의 색을 이용하여 높은 연색 지수를 확보하는 것이 중요하다. 시뮬레이션을 통해 기본적인 R-G-B의 색상에 Amber와 White를 추가하여 90이상의 연색지수 갖는 조합을 확보했다.

3. 실험결과

R-G-B-A-W의 5종류의 단색 LED를 이용하여 최고 600lm의 광속을 내는 백색광원을 위한 프로토타입 LED 모듈을 제작하여 실험하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 각 색의 혼합비율을 토대로 (R, G, B, A, W) LED의 개수는 (6, 8, 6, 10, 20)개이다. 각 색온도별 실험결과는 표 1과 2와 같다. 표준 색온도에 대하여 색온도 제어가 이루어짐과 동시에 약 90이상의 연색 지수를 확보할 수 있었다.

표 1. 색온도 제어 실험 결과

CCT		목표 색좌표	측정된 색좌표	색온도	광속 (lm)
A(2856K)	X	0.4476	0.4332	3141	505.1
	Y	0.4074	0.4119		
B(4874K)	X	0.3484	0.3412	5154	510.7
	Y	0.3516	0.3542		
D55(5503K)	X	0.3324	0.3260	5771	513.2
	Y	0.3474	0.3499		
C(6774K)	X	0.3101	0.3101	6723	527.7
	Y	0.3162	0.3206		
D75(7504K)	X	0.2990	0.2994	7398	530.5
	Y	0.3149	0.3198		

표 2. 색온도별 연색 지수 및 광효율

CCT	시뮬레이션		실제 측정	
	연색지수	광효율 (lm/W)	연색 지수	광효율(lm/W)
A(2856K)	90.027	41.3394	87.73	22.77305703
B(4874K)	95.6186	34.8697	92.06	20.79513816
D55(5503K)	95.2695	33.9417	90.73	20.4975931
C(6774K)	94.2283	29.0911	91.93	19.73017268
D75(7504K)	93.3839	28.9676	90.02	19.69012498

4. 결 론

본 논문에서는 색온도 제어가 가능한 조명용 LED 모듈을 위한 파워플랫폼에 관한 내용을 다루었다. 색좌표 및 색온도를 제어는 각 LED의 광속을 제어하여 이루어질 수 있으며, 연색 지수를 확보하기 위해서는 각 단색 LED의 스펙트럼을 측정하여, 여러 색을 혼합한 경우의 스펙트럼과 표준 광원과의 차이를 토대로 시뮬레이션을 통해 각 LED의 광속을 산출할 수 있다. 이를 MCU내의 look-up 테이블로 구현하여 실험을 수행하였다.

참 고 문 헌

[1] G.H. Kim, S.B. Song, W.Y. Cheon, and J.H. Kim, "Color Temperature Control of Led Floodlight Using RGB Light Color Mixing Theory", 한국조명 전기설비학회, 2007 춘계학술대회 논문집, pp. 85-88, 2007, May.

[2] K. Lim , J. C. Lee , G. Panotopoulos and R. Helbing "Illumination and color management in solid state lighting", Proc. IEEE Ind. Appl. Conf., p.2616 , 2006

[3] H. Broeck , G. Sauerlander and M. Vendt "Power driver topologies and control schemes for LEDs", Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. (APEC), p.1319 , 2007.