

Simple-Inverse Matching 혼색기법을 이용한 100[W] 무대조명 개발

(Development of 100[W] Border Light using Color Mixing Technique by Simple-Inverse Matching Method)

윤진식* · 송상빈 · 임영철 · 박정옥** · 홍진표**

(Jin-Sik Youn · Sang-Bin Song · Young-Cheol Lim · Jung-Wook Park · Jin-Pyo Hong)

Abstract

For the development of 100[W] stage lighting, quantitative and uniform color mixing that applied through color adopted Simple-Inverse matching so that color mixing can be possible along Black Body Locus. R,G,B(Red, Green, Blue) LED(Light Emitting Diode) arrangement through LED package character analysis, LED module, and the characteristic of device were considered for uniform color mixing. A distance changeable optical device was built to assure high uniformity and high diffusion of not only the middle of diffusion side but also the border side. Also, we developed the control power circuit that can expand up to 6 channels which are possible for quantitative color mixing, and the high uniformity and high quantified border light for color mixing control and the verification of color mixing characteristics by composing GUI(Graphical user interface) including color mixing simulator. By presenting the experimental results of light color control, we proved the usefulness of our developed border light and the proposed color mixing method.

Key Words : Border Light, Simple-Inverse Matching, Color Mixing, R,G,B LED, Color Temperature, Black Body Locus

* 주저자 : 광주테크노파크 지역산업평가단
Tel : 062-602-7388, Fax : 062-602-7390
E-mail : jsyoun@gjtp.or.kr
** 교신저자 : 한국광기술원 반도체조명연구센터
Tel : 062-605-9379, Fax : 062-605-9359
E-mail : vzo@kopti.re.kr, jphong@kopti.re.kr
접수일자 : 2010년 10월 22일
1차심사 : 2010년 11월 11일
2차심사 : 2010년 11월 18일
심사완료 : 2010년 12월 13일

1. 서 론

1.1 연구의 배경

LED는 에너지절감과 친환경적 특징을 바탕으로 빠른 속도로 조명산업의 여러 분야에 적용되고 있으며, 이러한 장점을 살려 최근 들어 실내, 도로, 경관, 사인

조명 등에 중점적인 LED 제품의 개발, 응용 및 출시를 하고 있으나 무대조명에 대한 연구는 혼색의 어려움 때문에 상대적으로 미진한 상태이다. 공연장에서의 조명시스템은 배우들이 관객에게 공연의 전체적 장르별 분위기 및 의미를 시각적으로 전달함으로써 공연의 가치를 높이는데 필수요소이다[1]. LED에서 조사되는 빛은 LED 모듈내 각각의 위치에 따라 광선의 진행 경로에 따라 색혼합이 불균일하므로, LED 조명을 무대조명으로 활용하기 위해서는 균일한 혼색을 위한 광학 기구 설계가 중요하다[2]. 디지털 방송시대를 맞이하여 LED를 적용한 무대조명을 기반으로 정량적이고 균일한 색제어를 통해 공연/방송 등에 사용되는 조명의 고품질화가 필요하고 이를 위해서 정량화되고 고균일도를 재현할 수 있는 LED 무대조명 개발이 필요하다.

1.2 연구의 목적 및 방법

기존 경사렌즈를 사용한 R,G,B LED 전구 색혼합 특성을 향상하기 위한 기술이 제안되었는데, LED 배열 및 개수, 그리고 경사렌즈로 구성된 광학 기구설계 기법에 대한 혼색을 달성하기 위한 연구가 수행되었다[2]. 주위온도에 따른 LED 센서등의 색온도 제어 기술에서는 냉백색(cool white), 온백색(warm white) LED를 활용하여 흑체계적상의 상관색온도 따라 백색광을 재현하기 위한 방법을 제안하였다[3]. 실내극장의 표준화 무대조명시스템 설계 설비 개선 방안 기술동향 보고서는 무대조명의 형태, 보더라이트의 용도 및 무대조명에서 빛의 필요성에 대해 제안되어 있다[4]. 이러한 기존 연구는 기구적인 설계 기술을 적용한 혼색이나 색채 평면에서 균일한 색에 대한 재현을 확보하기 보다는 개별 LED의 색 제어를 통해 색을 표현하는 형태의 연구가 주로 진행되었다. 그러나 무대조명 특히, 보더라이트는 무대조명이 갖추어야 하는 고연색성/고균일성/정량화를 위한 기술적 접근이 필요하고, 선형화된 색공간에서 색 특성 및 제어에 대한 접근이 필요하며, 제어 정보와 혼색 광특성에 대한 상관관계 및 오차에 대한 분석도 필요하다.

본 연구에서는 R,G,B의 색제어 파라미터와 광색 변화의 상관관계를 측정하여 디밍정보를 생성하고 이를 기반으로 simple-inverse matching을 통한 색 제어 변수를 추정하여 샘플링 오차 범주 내에서 색을 제어하는 방법을 제안하고 이에 적합한 균일 혼색이 가능한 형태의 LED 무대조명 기구 설계를 제안하였다.

본 논문에서 1장은 LED 무대조명의 필요성 및 기존 연구에 대한 설명을 하였고, 2장에서는 균일한 혼색을 제어하기 위한 알고리즘과 LED 무대조명 설계 방법에 대해 설명하였으며, 3장에서는 제안된 알고리즘 및 무대조명 기구의 특성 등 실험 및 시뮬레이션을 기반으로 결과에 대해 제시하였다. 4장에서는 제안된 방법 및 기술에 대한 결론과 향후 연구방향에 대해 언급하였다.

2. Simple-Inverse matching을 적용하여 균일한 혼색제어를 위한 무대조명 설계

2.1 개별 R,G,B LED 선정 및 LED 모듈설계

R,G,B LED의 선정기준은 100[W]급 무대조명용 보더라이트 제작을 위해 1[W]급 고효율 LED를 적용하였다. 표 1처럼 백색광 구현 및 기구적으로 콤팩트한 구조를 형성하기 위해 광각(120도 이상)의 고용량/소형 패키지를 선정하였고, 패키지의 방열/전기 특성 중에서 기구적인 특성과 연계하여 환경 변화에 안정적인 형태의 조건만 고려하였으며, 방열 설계를 위한 설계 허용 온도는 방열기구 접합부 온도 기준으로 50[°C]로 설정하여 온도에 따른 광속을 설계 기준으로 선정하였다. 적용된 LED는 최대 허용 전류를 350[mA]까지 사용 가능한 형태의 개별 패키지를 선정하였다. 특히 R,G,B 각 개별 패키지는 열에 대한 민감도가 다르기 때문에 3in1 or 4in1 같은 멀티칩 패키지보다 개별 패키지를 적용함으로써 각 패키지가 동작하는 동안 열에 의한 상호영향을 최소화 되도록 선정되었다.

표 1. 적용한 R,G,B LED 1[W] 패키지의 특성[5]
Table 1. Characteristics of applied R,G,B LED 1[W] package

Color	Flux [lm]	IF [mA]	Viewing Angle[θ°]	VF [V]	λ[nm]
RED	30	350	160	2.9	627
GREEN	90	350	160	3.15	530
BLUE	23.5	350	160	3.15	470

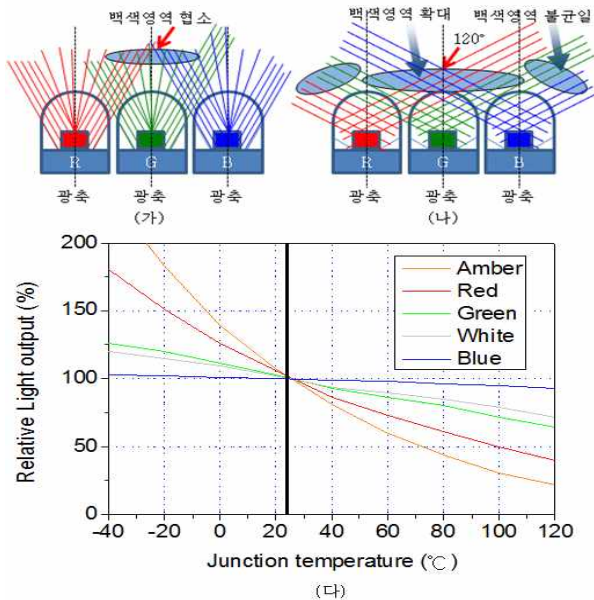


그림 1. LED 패키지의 발산각에 따른 혼색영역 비교 (협각(가), 광각(나)) 및 열에 대한 각 패키지 민감도(다)

Fig. 1. Comparison of color mixing range by LED package viewing angle(included angle(가), wide angle(나) and sensitivity of each package to heat(다)

혼색을 위해서는 LED 모듈 구성에서 R,G,B LED 패키지의 기구적 배치에 따라 혼색을 위한 광학기구의 설계 파라미터를 다르게 설정해야 하고 이 기구설계 특성을 LED 모듈 설계시 반영해야 한다. 그림 1(가)처럼 발산각이 좁은 패키지를 적용하는 경우 백색 광 영역이 근거리에서 발생할 확률이 적어지고, 혼색이 되는 경우에도 특정 패키지 광특성이 강하게 발현되어 중앙에 위치한 패키지의 광특성에 따라 색이 편중되는 현상이 나타난다. 반면에 그림 1(나)처럼 발산

각이 넓은 패키지의 경우 근거리에서 균일한 혼색이 용이하고 경계 쪽에 불균일한 혼색 영역이 최소화되기 때문에 근거리에서 넓고 균일한 혼색 영역을 도출하기 위해서 광각이 큰 개별 패키지를 이용하여 LED 모듈을 설계하였다.

2.2 회로설계

LED 무대조명기기 구동을 위한 회로는 크게 세 가지로 구분된다. 마이크로 컨트롤러의 주변장치 중 PC와의 통신을 위한 RS232회로와 RS232 통신으로 PC에서 전송받은 디밍 명령을 LED 드라이버로 PWM 파형 발생기 회로, LED의 안정적인 전류 드라이빙을 위한 LED driver 회로가 개발되었다. LED driver는 current mirror방식을 적용한 것으로 전압 레벨 또는 디지털 신호에 의해서 구동된다. 본 연구에서 적용된 방식은 TTL레벨의 PWM으로 구동되고, PWM 신호는 마이크로 컨트롤러의 내부 타이머에 의해서 16비트의 분해능을 갖는 파형으로 구현하였다.

2.3 LED 무대조명 기구 및 방열설계

LED 모듈의 중앙부뿐만 아니라 경계 영역의 혼색을 균일하게 하기 위해서 LED 모듈의 효율적인 배치 및 LED 조명 기구를 설계하였다. LED 조명이 시간에 따라 안정적으로 색을 유지하기 위해서 LED소자의 광특성 변화가 최소화 되도록 LED 조명 시스템의 방열 기구를 효율적으로 설계해야 한다.

본 연구에 적용된 LED 조명 기구는 효율적인 방열을 위한 방열 구조를 오픈 형으로 구성하여 시스템의 에이징 타임을 최소화하였으며, 전원 및 회로 케이스를 별도로 구성하여 LED 모듈 및 기구를 포함한 광원부와 분리시켜 필요시 부품에 대한 교체가 용이하도록 구성하여 제품 사양을 확장 가능하도록 구성하였다. 또한 균일한 혼색을 위해 광확산면과 LED 모듈과의 거리를 최소화하기 위한 설계 파라미터를 설정하기 위해 슬라이더 구조로 설계하였다.

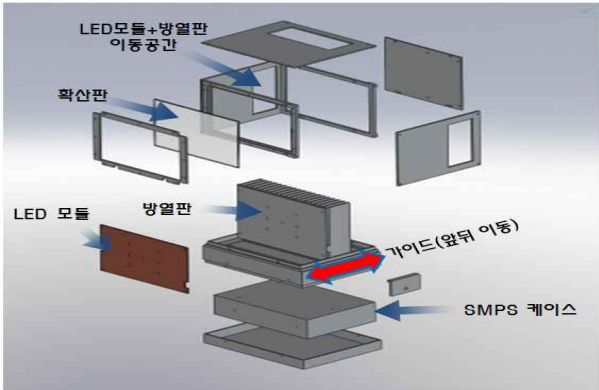


그림 2. 무대조명기구 설계
Fig. 2. Design of stage light device

2.4 Simple-Inverse matching을 적용한 혼색 기법

Simple-Inverse matching 방법은 R,G,B LED의 디밍 제어 파라미터와 광속의 상관관계를 정의하고 샘플링을 통한 기본 색을 정의하여 사용자가 색을 지정하면 지정된 색과 유사한 제어 파라미터를 역매칭 (inverse matching)을 통해 균일하게 색을 생성하는 방법이다. 즉 광색혼합을 위해 색도좌표 내에서 지정된 색은 어떤 제어 파라미터를 통하여 연출되는 색으로 이 연출된 색과 지정된 색의 상관관계를 정의하고 이를 기반으로 색으로부터 제어 파라미터를 추정하여 적용함으로써 광색혼합이 명확하고 정량화되는 혼색 기법이다.

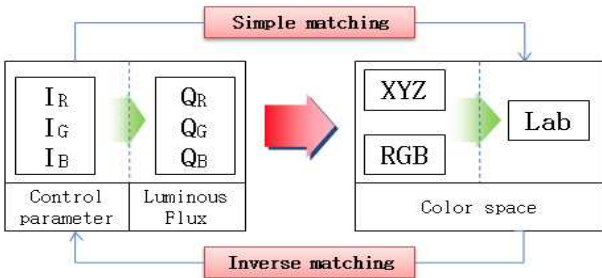


그림 3. Simple-Inverse matching의 흐름
Fig. 3. Flow of Simple-Inverse matching

제안된 알고리즘은 두 부분으로 구별되는데, Simple matching은 인덱스를 기반으로 디밍된 각 패키지의

색제어 파라미터와 연계된 실제 색을 측정하여 매칭해 놓고, 이러한 색으로 조합된 색 좌표를 사전에 지정하는 과정이고, Inverse matching은 사용자가 색을 지정하면 Simple matching에서 혼색된 색과 비교하여 지정된 색의 위치를 추정하여 적합한 색제어 파라미터를 추정하는 과정이다.

2.4.1 Simple matching

색을 지정하기 위해 각 패키지를 8[bit]로 디밍하면 Red 256단계, Green 256단계, Blue 256단계로 구현되고 16,777,216색을 생성하게 되는데, 이 색에 대한 정보를 인덱싱을 통해 Inverse matching에 사용하는 경우 색 비교를 통해 추정한다면 많은 계산 시간이 소요된다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 Simple matching은 각 패키지의 디밍 정보를 샘플링하여 색 지정을 최소화하고 지정된 색으로부터 실시간으로 Inverse matching을 수행하여 사용자가 색 지정시 실시간으로 제어를 하기 위한 방법을 제안한다. 본 연구에 사용된 샘플링 수는 Red 10단계, Green 10단계, Blue 10단계로 혼색된 샘플링 개수는 1,000다. 이 때 혼색을 원활하게 하고 백색광을 구현하기 위해 각 색의 삼자극치를 고려하여 균일한 색감을 표현하도록 각 패키지의 광속을 균일하게 설정하고 설정된 광속을 기반으로 세 샘플링하며 최초 디밍값과 인덱싱함으로써 균일한 색제어 및 색재현성을 향상시킨다. 또한 사용자 지정 색과 샘플링 색의 편차를 최소화하기 위해 선형적인 색공간인 Lab색 공간에서 색차에 대한 계산을 수행한다.

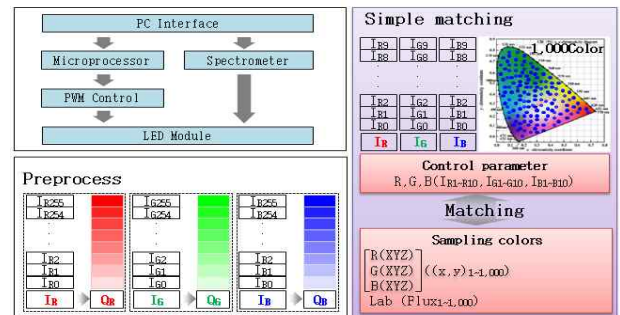


그림 4. Simple matching의 개념
Fig. 4. Concept of Simple matching

2.4.2 Inverse matching

Inverse matching은 사용자가 색을 표현하기 위해 색을 지정하면, 샘플링된 색 중에서 지정된 색과 가장 유사한 이웃색(neighborhood color)을 N개 도출하고 도출된 색과 지정된 색의 상관관계를 가중치로 계산하며 이를 활용하여 색제어 파라미터의 상관관계를 추정하는 방법이다. 이때 샘플링 색공간 내에서는 색 변화와 색제어 파라미터는 선형적인 관계를 유지한다고 가정하고 이때, 발생하는 오차는 감마보정 오차 범주 내에 존재한다고 가정한다.

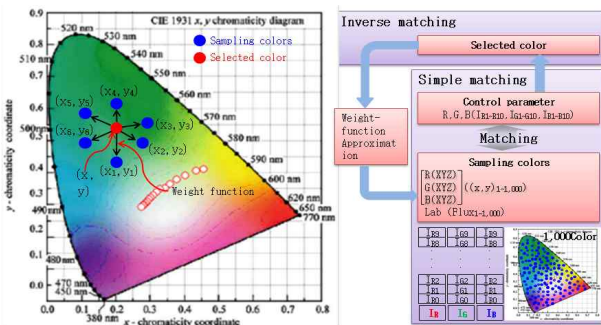


그림 5. Inverse matching의 개념
Fig. 5. Concept of Inverse matching

3. 시제품 제작

3.1 LED 모듈 제작

R,G,B LED의 광학적, 전기적, 방열 특성을 분석 후 이를 토대로 백색광의 혼합 및 균일성 판단을 위하여 1차 단순 R,G,B LED 패키지 시제품을 알루미늄 재질의 PCB 50[mm]×50[mm]×1.6[t로 설계하여 제작하였다. 이때 개별 R,G,B LED를 11[mm] 간격을 두고 삼각형 형태로 패키징한 후 광색혼합의 적합성을 판단하기 위해 백색광 분포도를 측정된 결과 광이 조사된 테두리에 혼색 불 균일 현상이 나타나는 것을 알 수 있었다. 이처럼 광색혼합의 최적조건은 R,G,B LED 광원이 상호간에 최대 가까이 배치하여야 백색광 구현 및 광색의 균일성이 부여된다.

LED 모듈은 Red, Green, Blue 각각의 LED 32개로, 총 96개를 사용하였으며, 혼색조건을 위한 광색 배합

비율의 효율성을 높이기 위해 이들 LED를 2단으로 분리하여 각단에 48개가 배치되도록 설계하였다.

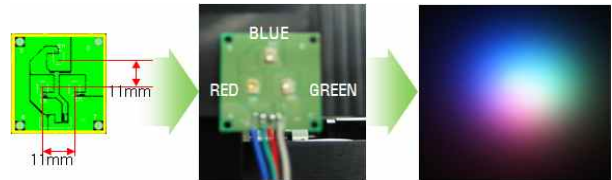


그림 6. 단순 R,G,B LED 패키지의 광혼색
Fig. 6. Light color mixing of simple R,G,B LED package

최적 혼색을 위해서는 광원레벨에서 혼색된 광이 외부로 출력되도록 하였으며, 각각의 LED 구조를 고려한 최적배치를 위해 광출력 포인트를 최대 근접 배치하는 것이 효율적인 방식으로 정삼각형이 되도록 구성하였다. 모듈 설계시에 1차 시제품의 간격을 모델링한 후, 상호간 간격을 5[mm]로 배치하였는데, 이는 LED의 허용전류를 고려한 회로 패턴 폭과 주변회로와의 간섭이 생기지 않도록 최소간격을 유지하였다.

그림 7은 실제 제작된 LED 모듈과 R,G,B LED의 배치에 의한 광색혼합 현상을 보여주고 있고, 광혼색 결과 테두리 경계면의 혼합 불균일은 조명기구 설계 및 제작을 통해 백색광 최적의 고균일, 광혼색 유도로 해결하였다.

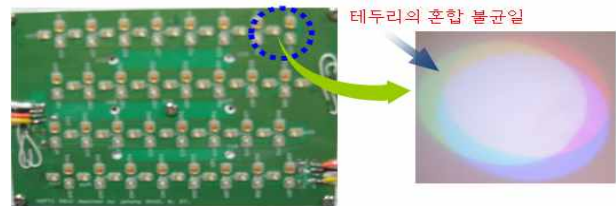


그림 7. R,G,B LED 모듈 제작 및 광혼색
Fig. 7. R,G,B LED module manufacture and light color mixing

3.2 LED 회로 및 색제어 인터페이스 제작

PC 인터페이스 프로그램은 PC1에서 사용자가 무대조명의 특성을 측정함과 동시에 무대조명을 제어하기 위한 제어 프로그램이다.

3.3 LED 무대조명 시제품 제작

광색혼합을 위하여 100[W]급 R,G,B LED 무대조명 시제품을 제작하였다. 그림 10은 시제품 구성요소를 나타내고 있으며, 주요 구성요소 전면부에 R,G,B LED 모듈과 최적 혼색의 여부를 판단하고 기구적으로 거리를 이동하면서 백색광 구현을 위한 cut-off 광학기구, 경계면 혼색 유도용 확산판이 장착되어 있고, 상부와 하부는 혼색 파라미터 실험용 가이드가 동작 가능하도록 제작하였으며, 기구 뒷면은 제어 PC 시스템과 인터페이스를 위한 통신시스템을 제작하여 부착하였다. 그리고 전원부의 SMPS는 상용품인 48[V], 2.1[A] 용으로 기구하부 케이스에 내장을 시켰다. 그리고 전체적인 기구 크기는 156[mm]×116[mm]×139[mm]이다.

그림 8. LED 모듈 제어시스템 구성도
Fig. 8. Diagram of LED module control system

무대 조명의 스펙트럼을 측정하기 위해서 PC2에 측정 트리거 신호를 RS232 통신을 통해 전달하고, 마이크로 컨트롤러에는 LED의 광량을 제어하기 위해서 디밍 신호를 RS232 레벨로 전송한다. 그림 9는 소프트웨어로 스펙트로미터에 의해서 측정된 광원의 색좌표를 CIE 1931 색좌표상에 표시하고, 실제 혼색하기를 원하는 색좌표와의 오차를 보이는 패널로 구성되어 있다. 또한 스펙트로미터로 R,G,B 패키지의 디밍 레벨에 따라서 파장 스펙트럼 데이터를 측정하여 데이터베이스를 구축함으로써 그림 9의 5번 패널에서 혼색 시뮬레이터에 의해서 디밍 레벨 데이터 기준으로 가상 혼색 결과를 예측할 수 있다.

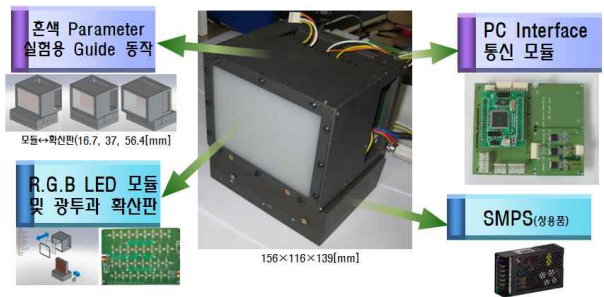


그림 10. 시스템 구성 요소
Fig. 10. Elements of system organization

4. 실험 결과

4.1 R,G,B LED의 컬러 디밍 특성 실험

Simple matching을 위해 R,G,B LED 각 패키지를 디밍하여 그 특성을 파악하였다. 각 패키지의 스펙트럼은 Minolta사의 측정기를 이용하여 CIE 1931 측정법에 의해 측정하였다. Red, Green, Blue 패키지를 각각 10~100[%]까지 10[%]간격으로 디밍 단계를 설정하여 광량에 따른 LED 파장 스펙트럼을 측정하였다. 그림 11은 각 소자의 광량에 따른 파장 스펙트럼 데이터를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 디밍 단계에 관계없이 Red, Green, Blue 파장에서 국소적으로 광량이 토출됨을 알 수 있다.

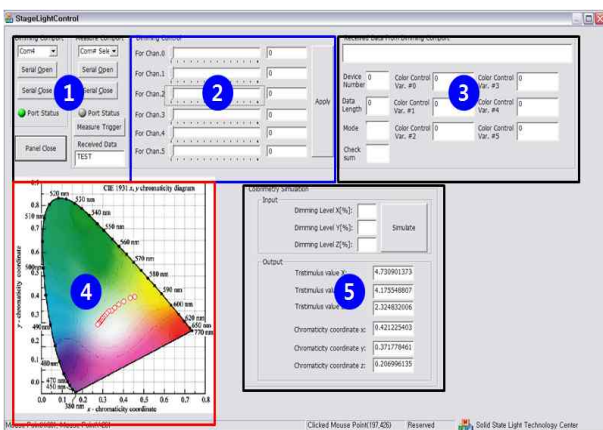


그림 9. PC 인터페이스 소프트웨어
Fig. 9. PC interface software

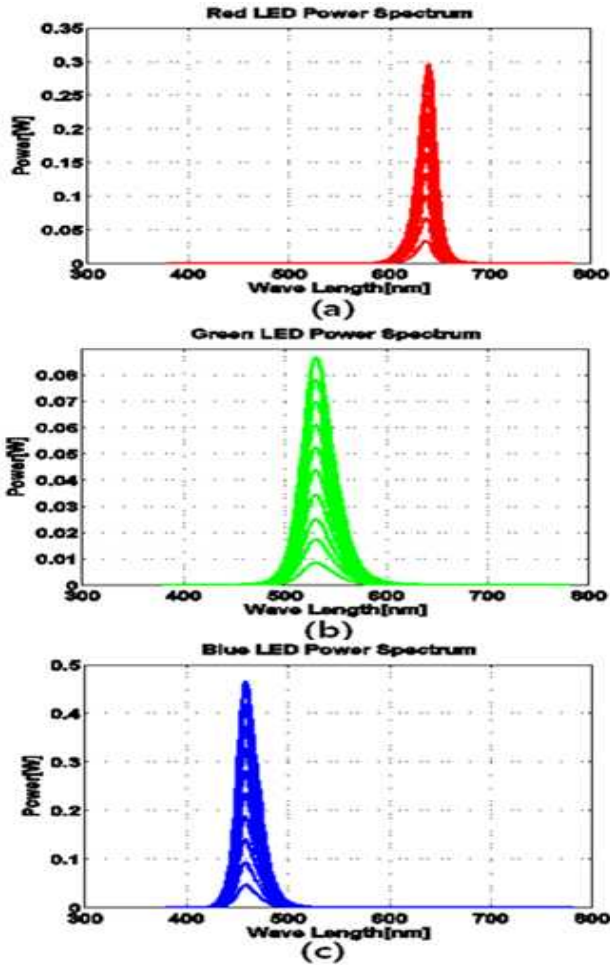


그림 11. (a) Red, (b) Green, (c)Blue LED 소자의 파장 스펙트럼 분포도
 Fig. 11. Wave spectrum range of (a) Red, (b) Green, (c) Blue LED chip

4.2 설계 파라미터 설정 실험

R,G,B LED 모듈과 확산판 사이 거리 조절에 따른 광색혼합의 균일성을 알아보았다. LED 모듈과 확산판 사이의 거리는 최소 16.7[mm]에서 중간 거리 37[mm], 최대거리 56.4[mm]로 변화시키며 실험하였고 광색혼합 균일성을 파악해본 결과, 37[mm] 이상에서는 혼색이 중앙 부분과 경계 부분이 모두 균일하게 나타났다. 제안된 R,G,B LED모듈의 혼색에 적합한 광학 설계 파라미터는 37[mm]로 지정하고 각 색에 대한 균일성을 실험하였다.

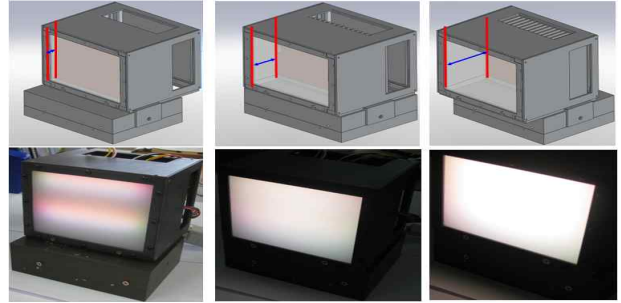


그림 12. 파라미터에 따른 백색광 혼합
 Fig. 12. White color mixing by parameter

4.3 LED 혼색 시뮬레이션 실험

LED혼색 시뮬레이션은 두 가지 방법으로 수행하였다. 4.1에서 측정된 디밍 데이터를 활용하여 제안된 혼색기법을 적용하여 시뮬레이션 하였고(Method 1), 두 번째는 상용화 프로그램을 이용하여 광원을 모델링하는 전산모사기법으로 색온도 5800[K]의 색좌표를 나타내도록 시뮬레이션하였다. (Method 2) 여기에 쓰이는 R,G,B 각 소자의 광량은 9:8:1의 비율을 적용하였다.

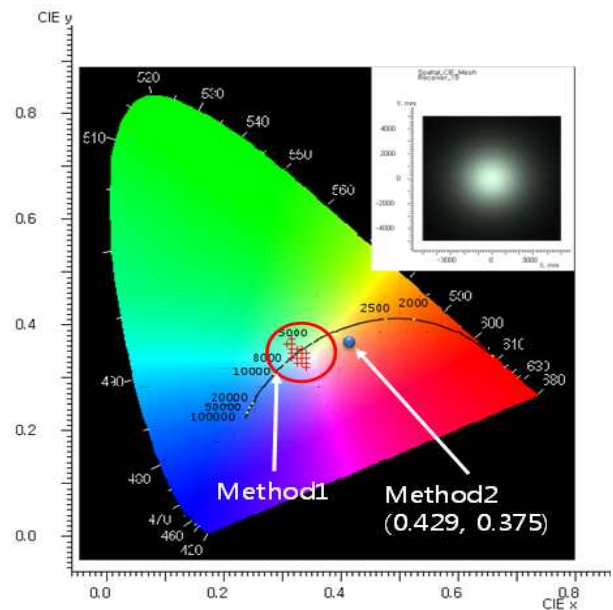


그림 13. 시뮬레이션에 의한 R,G,B 혼색 색좌표
 Fig. 13. Chromaticity coordinate of R,G,B color mixing by simulation

그림 14는 혼색 실험 색좌표와 시뮬레이션 혼색 색좌표를 나타낸다. 두 좌표의 차이는 LED소자의 온도 특성에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 온도에 의한 광량의 변화율이 Green, Blue에 비해 Red가 1.5~2 배 이상 차이가 나기 때문에 그림 14와 같이 Green쪽으로 색좌표가 이동한 것을 볼 수 있다.

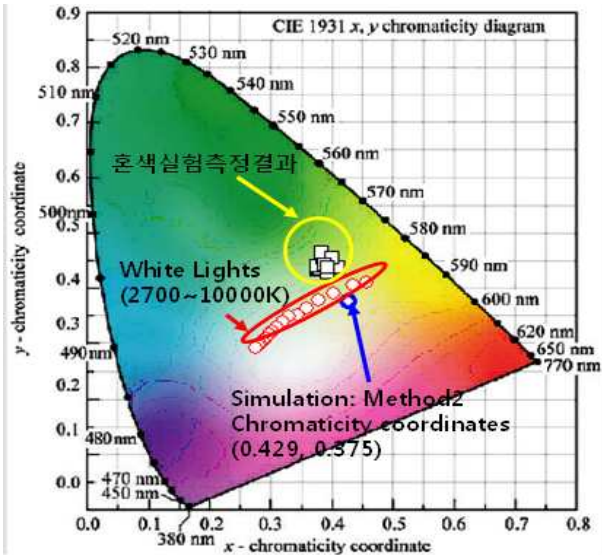


그림 14. 혼색 실험 색좌표와 시뮬레이션 혼색 색좌표
Fig. 14. Chromaticity coordinate of color mixing experiment and color mixing simulation

4.4 색제어 실험

PC 인터페이스 프로그램에서 R,G,B LED 디밍 명령을 수행하게 되면, RS232 통신을 통해 마이크로프로세서 지정된 색의 입력신호가 송신되고, 이를 드라이버 IC의 16비트 PWM 6채널 제어를 통해 제작된 R,G,B LED 무대조명을 제어하게 된다. 디밍 명령 영역에는 R,G,B LED에 대한 입력값 제어툴바가 6개 존재하는데, 실시간 사용은 3개, 나머지 3개는 여유분으로 설계되어 있다. 그림 15는 적색, 녹색, 청색, 자홍색, 청록색, 황색의 광색혼합을 제어한 각각의 색들을 보여주고 있다. 또한 각 색 혼합이 균일하게 생성되므로 지정된 광학 기구 설계 파라미터가 적합하다고 사료된다.

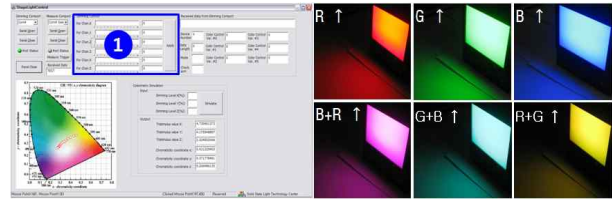


그림 15. PC 인터페이스 기반 LED 모듈 제어
Fig. 15. LED module control based on interface

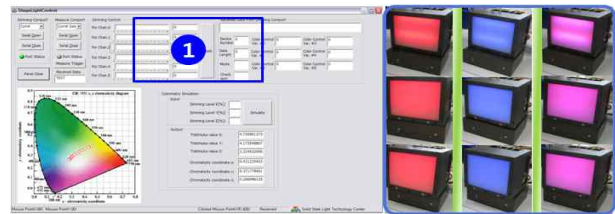


그림 16. 광학 기구 설계 파라미터와 각 혼색별 균일도 관계
Fig. 16. Relation between optical device design parameter and uniformity of each color mixing

5. 결론

본 논문은 LED 무대조명 보더라이트의 제어 및 혼색의 명확성을 확보하기 위해 Simple-Inverse matching 혼색기법뿐만 아니라, LED 패키지 선정, LED 모듈 설계 및 LED 조명기구 설계에도 광색 혼색을 위한 설계요소를 반영하였으며, 최적의 백색광 구현을 위해서 단품 LED의 상호간 최소 배치 거리와 발산각의 중요성, 방열에 의한 광량감소 및 파장의 변색 등을 감안하여 설계 및 시제품을 제작하였다. 또한 밝기조절을 위해 R,G,B 디밍과 색제어를 통해 명도를 바탕으로 채도 색변환에 대한 기반 데이터를 사용한 측정 기반 보정 방법론을 개발하였다.

향후 혼색기법의 Simple matching 및 Inverse matching의 오차 보정기법을 보완하면 더욱 정밀한 색제어가 가능할 것으로 사료된다. 그리고 R,G,B LED 뿐만 아니라 다양한 파장의 LED 패키지를 적용한 조명제어 파라미터에 대한 추출 기법에 대한 연구를 진행한다면, LED 혼색에 대한 기반기술을 확보할 것으로 사료된다.

References

- [1] Tae-Jin Lee "A study on the stage lighting system standardization improvement of theater" 2008.
- [2] 강석훈, 임성무, 송상빈, 여인선, "경사렌즈를 사용한 RGB LED전구 색혼합 향상, 한국조명전기설비학회, 제18권 제2호 pp.8~15, 2004. 3.
- [3] Hwa-Tae Kong, "Controlling the Color Temperature of LED sensor Lamp according to surrounding Temperature" 2007.
- [4] 이장원, 이진우 "실내극장의 표준화 무대조명시스템 설계 설비 개선 방안", 한국조명전기설비학회, 제23권 제5호 pp.55~68, 2009.10.
- [5] <http://www.philipslumileds.com>
- [6] E. Fred Schubert, "Light-Emitting Diodes", Cambridge university press, New York, second edition, 2006.
- [7] 조맹섭, "디지털 컬러의 기본 원리", 도서출판 국제, 2006.

◇ 저자소개 ◇



윤진식(尹鎭植)

1968년 3월 29일생. 2007년 2월 전남대학교 공과대학 전기공학과 박사 수료. 현재 광주테크노파크 지역산업평가단 책임연구원.



송상빈(宋相彬)

1969년 10월 1일생. 2006년 8월 전남대학교 공과대학 전기공학과 박사 졸업. 현재 LED연구사업본부 반도체조명연구센터 센터장. 본 학회 평의원.



임영철(任永徹)

1975년 2월 전남대학교 전기공학과 학사. 1977년 2월 고려대학교 전기공학과 석사. 1990년 2월 고려대학교 전기공학과 박사, 현재 전남대학교 전기공학과 교수.



박정욱(朴政昱)

1975년 2월 19일생. 2007년 8월 광주과학기술원 기전공학 박사 졸업. 현재 한국광기술원 LED연구사업본부 반도체조명연구센터 선임연구원.



홍진표(洪珍杓)

1976년 11월 20일생. 2010년 2월 광주과학기술원 기전공학 박사 졸업. 현재 한국광기술원 LED연구사업본부 반도체조명연구센터 선임연구원.