색온도 제어 가능한 승강기용 LED 조명제품 개발 및 성능측정

(Development and performance measurement of LED lighting system for elevator based on color temperature control)

김기훈* · 천 우영 · 김 진홍 · 송 상빈

(한국광기술원)

(Gi-Hoon Kim*, Woo-Young Cheon, Jin-Hong Kim · Sang-Bin Song)

요 약

고연색성의 실시간으로 색온도 제어 가능한 승강기용 조명 제품 개발을 위하여 4계절 별 일 중 주광의 색온도 변화를 계산 하였다. 4계절 별 일 중의 색온도 변화는 대한민국 서울의 위치를 기준으로 태양광 직사조도, 청공광 조도 등을 계산하고 지면조도와 색온도의 관계로부터 춘분, 하지, 추분, 동지의 일 중 색온도 변화를 계산하였다. 이 값들을 색온도 제어회로의 Microprocessor에 이식함으로 4계절 별로 실시간으로 색온도가 변화하는 승강기용 조명 기구를 개발하였다. 또한 개발 시제품의 전기적, 광학적 성능 측정 결과 각각의 개발 목표 항목을 만족시켰다.

1. 서 론

장수명인 LED를 일반조명제품에 적용시키면 매우 수명이 긴 전기조명을 실현하여 타 광원에 비해 유지보수 비용을 절감시킬 수 있다. 또한 LED 조명제품은 작은 사이즈의 개별 LED가 모여 광원 모듈을 이루므로 개별 LED의 광출력 변화를 달리하면 용이하게 색온도를 제어할 수 있다[1]. 이와 같은 LED의 장점을 승강기용 조명제품에 적용하여 4계절 별로 주광의 색온도와 일 중 동일한 색온도를 제공할 수 있는 조명제품을 개발하였다.

2. 태양광에 의한 조도계산

주광은 여러 성분으로 구성되어 있으며, 측정 위치의 위도 및 경도에 따라서 그 조도를 계산할 수 있도록 되어 있다[2].

해발 0[m]에서 태양광에 수직한 면의 태양광 조도 E_p는 다음과 같다.

$$E_p = \overline{E_0}(1+0.033\cos\frac{360n}{365})e^{\frac{-0.210}{\sin h}} \quad (1)$$

$\overline{E_0} = 127{,}500lx$
n = 연중 n번째 날(10월의 경우 273 + 날짜)
h = 지평선 위 태양고도

그리고 수평면이나 수직면 상의 조도를 계산하기 위해서는 다음 값들을 계산하여야 한다. 기축의 기울기에 의한 태양편위(declination) δ는 태양 궤적이 적도 위 몇 도에 있는지를 나타내며, 다음 식으로 계산된다.

$$\delta = 23.45\sin\beta[\text{도}] \quad (2)$$

$$\beta = \frac{360(n-81)}{365} \quad (3)$$

관찰자의 위치에 따른 경도시간차 ΔT는 다음과 같다.

$$\Delta T = 4(\lambda_{TZ} - \lambda_0)[\text{분}] \quad (4)$$

λ_{TZ} = 표준시간대 중심경도
λ_0 = 관찰자의 경도

지구 공회전 궤도가 타원임에 의한 시간편차 ET는 다음과 같다.

$$ET = 9.87\sin 2\beta - 7.53\cos\beta - 1.5\sin\beta[\text{분}] \quad (5)$$

이들을 이용해서 태양시간 ST를 구하면

$$ST = TZ + ET + \Delta T\ [\text{분}] \quad (6)$$

$$TZ = \text{표준시간}[\text{분}] \quad (7)$$

이 된다. 이 태양시간과 정오의 시간차(정오 이전은 양, 이후는 음)를 분으로 나타내어 여기에 0.25를 곱하면 관찰자와 태양 사이의 경도각인 시간각 H를 구할 수 있다.

$$H = 0.25(720 - ST)\ [\text{도}] \quad (8)$$

그러면 지평선 위 태양의 고도 h와 태양의 방위각(관찰자 위치에서 정남향과 태양사이의 각) ϕ는 다음과 같이 계산된다.

$$\sin h = \cos L \cos\delta \cos H + \sin L \sin\delta \quad (9)$$

$$\sin\phi = \frac{\cos\delta \sin H}{\cos h} \quad (10)$$

L = 관찰자의 위도
ϕ = 3월21일부터 9월21일 사이 이른 오전이나 늦은 오후에는 90도 이상임.

이러한 계산치들을 이용하여 수평면 조도와 수직면 조도를 계산하면 다음과 같다.

$$E_H = E_p \cos(90 - h) = E_p \sin h \quad (11)$$

$$E_V = E_p \cos\psi = E_p \cos h \cos\gamma \quad (12)$$

ψ = 태양광과 수직면 법선 사이의 각
γ = 태양광의 지면사영과 수직면 법선 사이의 각

IESNA는 또한 구름이 30% 이하인 하늘을 청공으로 정의하고 있으나 구름의 위치 등에 따른 편차가 매우 크다. CIE에 의해 정의된 임의 위치 청공의 휘도는 태양의 고도, 천정(zenith)에서의 수직각도, 태양과의 방위각 차이에 따라 달라진다.

청공의 휘도를 알면 청공에 의한 지상 수평면의 조도도 알 수 있으나 이는 매우 복잡한 계산이 되어 실용성이 없다. 일반적으로 사용되는 것은 세계 각국에서의 측정치를 기반으로 한 Gillette와 Pierpoint의 청공광에 의한 수평면조도 E_{HC}의 실험식으로 다음과 같다.

$$E_{HC} = 800 + 15500 \sin^{1/2} h \ [lx] \quad (13)$$

담천공은 구름에 의해 태양광이 차단된 상태로서 그 휘도의 편차가 크지만, CIE에서는 평균치로서 담천공 휘도L_θ를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$L_\theta = \frac{L_{Z0}}{3}(1 + 2\cos\theta) \quad (14)$$

θ = 천정(zenith)과의 수직각도
L_{Z0} = $123 + 8600h$(천정의 휘도)

이러한 휘도 분포에 의한 지상 수평면의 조도는 다음과 같이 계산된다.

$$E_{H0} = \frac{7\pi L_{Z0}}{9} = 300 + 21000 \sin h \ [lx] \quad (15)$$

3. 4계절 별 일 중 색온도 변화

이와 같은 계산법들을 이용한 서울지역의 3월 21일(춘분), 6월 22일(하지), 9월 23일(추분), 12월 22일(동지)일 때 태양고도, 태양 직사광에 의한 수평면조도, 태양 직사광과 청천공에 의한 지면조도의 계산 결과를 나타내면 그림 1, 2, 3과 같다.

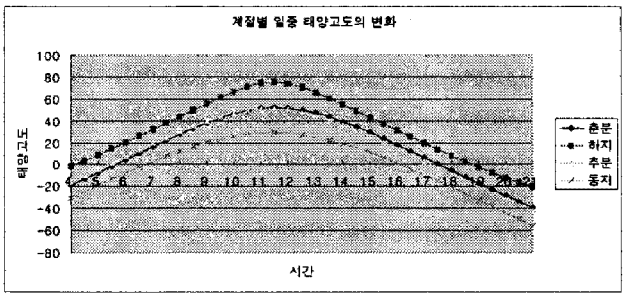

그림 1. 계절별 일 중 태양고도의 변화

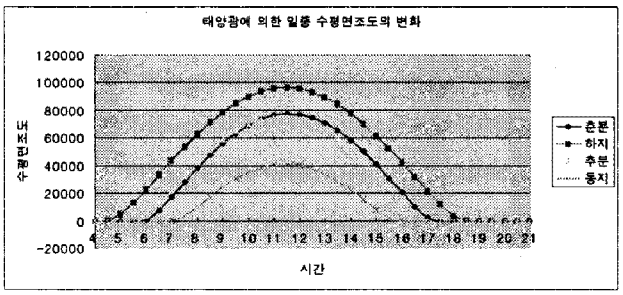

그림 2. 태양 직사광에 의한 계절별 일 중 수평면 조도의 변화

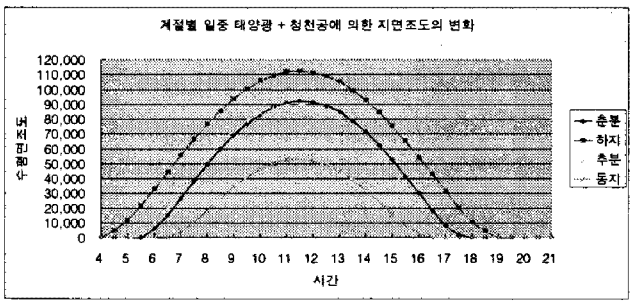

그림 3. 태양 직사광과 청천공에 의한 계절별 일 중 수평면 조도의 변화

일 중의 색온도 변화는 일출, 정오, 일몰시간에 따라서

: 오전 6시(일출) : 2,000K로 모닥불, 촛불의 광색과 같으며 사적인 분위기 (10,000lx)
: 오전 7시 : 3,000K로 전구의 빛과 같으며 따스한 이미지
: 오전 7시~8시 : 3000~4000K로 안정된 분위기
: 오전 8시 : 4000K로 밝은 분위기
: 오전 8시~9시 : 4000~5000K로 시원한 분위기
: 오전 9시~오후12시 : 5000~6000K로 흰빛으로서 밝음.
: 오후 12시: 6000K(80,000lx)
: 저녁 6시(일몰) : 2000K 와 같이 변화한다[3].

그러므로 일 중 시간에 따른 색온도의 변화는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

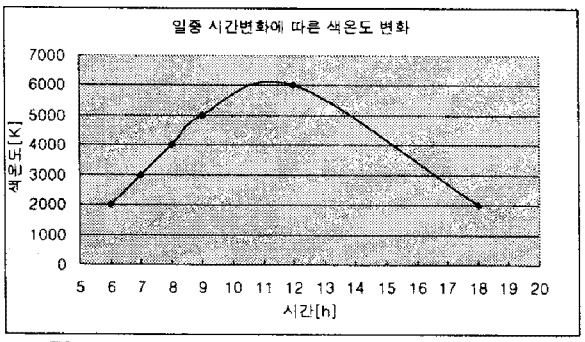

그림 4. 일 중 시간 변화에 따른 색온도 변화

그림 4를 보면 일출, 정오, 일몰시를 기준으로 주광의 색온도가 변화한다. 따라서 계절별 일 중 색온도의 변화는 태양의 고도에 따라 변화하고 태양의 고도가 변화하면 지면의 수평면 조도가 변화하므로 계절별 태양의 고도와 지면의 수평면 조도를 계산하면 4계절 별 색온도의 변화를 알 수 있다. 일출, 일몰시 지면조도는 10,000lx 이고 이때의 색온도는 2,000K 이며, 정오시의 지면조도는 80,000lx 이고 이때의 색온도는 6,000K 이다. 그러므로 조도에 따른 색온도 변화 값을 계산하고 계절별 일 중 조도변화에 따른 색온도 값을 계산하였다. 또한 지면의 수평면 조도는 관찰자 위치에 따른 태양 방위각에도 관계함으로 계절별 조도 변화를 계산한 후 이에 따른 색온도 값을 4계절 별로 결정하였다.

지면조도의 변화에 대한 색온도변화 값의 회귀식을 구하면 그림 5와 표 1과 같다. 그림 5는 지면 조도에 대한 색온도의 변화 함수를 나타내고 있고 표 1은 회귀식 및 회귀식의 상수를 나타내고 있다. 그림 5에서 횡축이 지면조도를 나타내고 있고 종축이 색온도를 나타내고 있다.

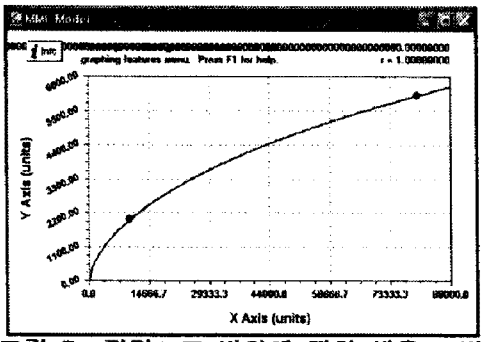

그림 5. 지면조도 변화에 대한 색온도 변화

표 1. 지면조도에 대한 색온도 변화 회귀식 및 상수

MMF Model: $y=(a\times b+c\times x^d)/(b+x^d)$	
Coefficient Data:	
a =	-1.96E-09
b =	3613.415
c =	3.05E+04
d =	0.60110462

표 1의 회귀식을 적용하여 춘분, 하지, 추분, 동지 일 때의 일 중 색온도 변화를 구하면 그림 6과 같이 된다.

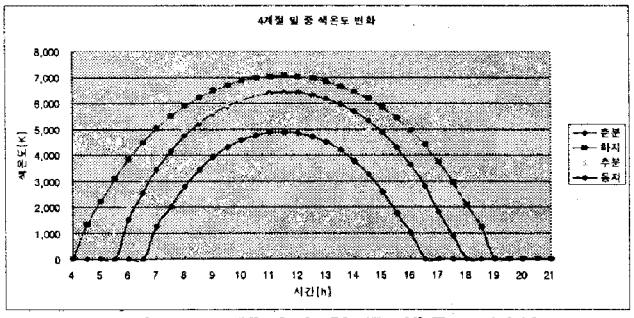

그림 6. 4 계절별 일 중 색온도 변화

그림 7에서 10 4계절의 일 중 색온도를 달성하기 위한 승강기용 조명제품 광원모듈의 W, R, G, B, A LED의 Duty Ratio 비율을 나타내고 있다. 그리고 이와 같이 결정된 W, R, G, B, A의 Duty Ratio를 색온도 제어회로의 MicroProcessor에 이식하여 시제품을 제작하였다.

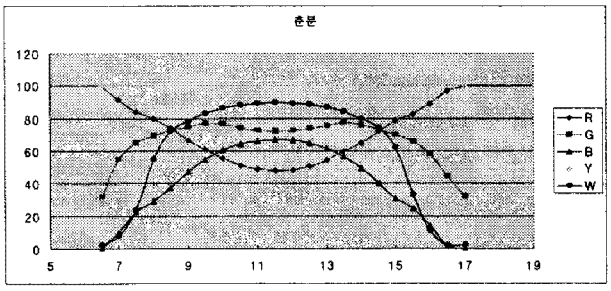

그림 7. 춘분일 때의 일 중 R,G,B,Y,W LED의 Duty Ratio 변화

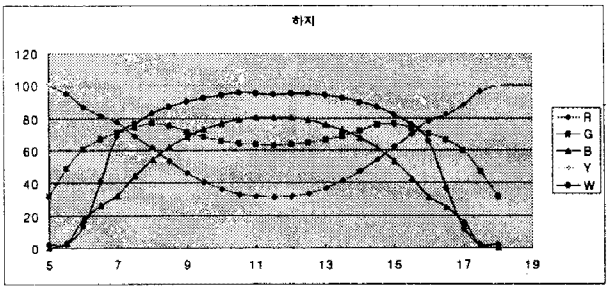

그림 8. 하지일 때의 일 중 R,G,B,Y,W LED의 Duty Ratio 변화

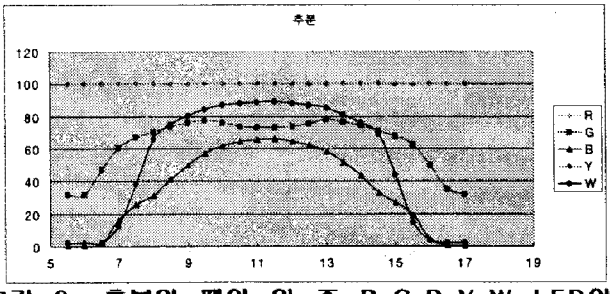

그림 9. 추분일 때의 일 중 R,G,B,Y,W LED의 Duty Ratio 변화

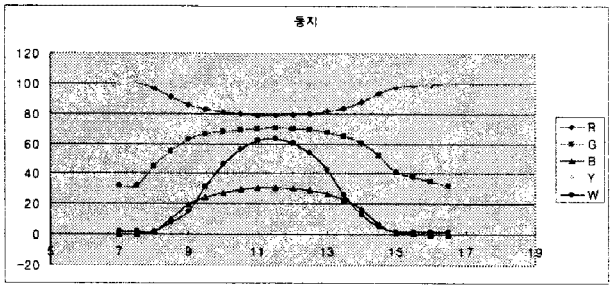

그림 10. 동지일 때의 일 중 R,G,B,Y,W LED의 Duty Ratio 변화

4. 승강기용 LED 조명기구 시제품 제작

4.1 조명기구 외함 및 Heat Sink 제작

조명기구 외함 제작은 그림 11과 같이 각 부품을 제작하고 이들 부품을 조립하여 그림 12와 같이 조명기구 외함을 최종 제작하였다. 그림 11에서 좌측부터 조명기구 외함의 양측면, Heat Sink, 조명기구 외함 윗면, 승강기 천장 매입을 위한 고리, LED 광원모듈을 차례로 나타내고 있다. 그림 12의 좌측 그림은 Heat Sink와 조명기구 외함의 조립과정을 나타내고 있으며, 각 부품을 그림 12의 우측 그림과 같이 결합하여 승강기용 조명제품을 최종 제작하였다. 외함의 윗면부는 공기가 접촉하는 접촉면적을 최대한 넓히기 위하여 줄무늬 패턴을 주었다. 이것은 공기와 조명기구 외함의 접촉면적을 최대한 넓게 하여 LED에서 발생한 열을 쉽게 냉각시키기 위함이다. 또한 외함의 정면부는 Heat Sink로 전달된 LED 광원모듈에서 발생한 열이 Hole을 통하여 쉽게 발산되도록 줄무늬 패턴과 함께 Hole을 제작하였다.

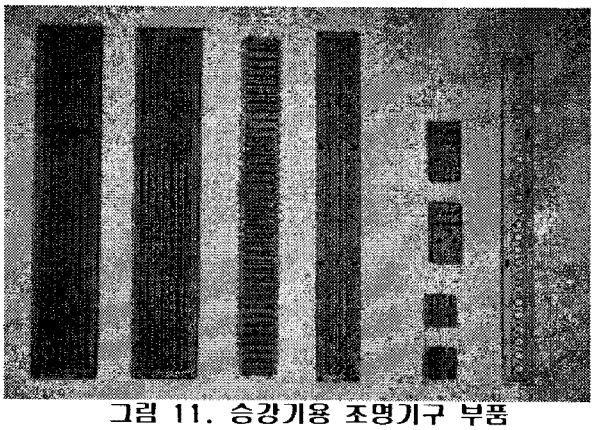

그림 11. 승강기용 조명기구 부품

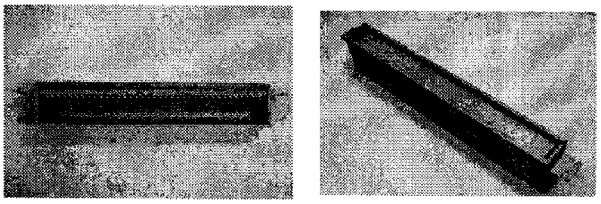

그림 12. 승강기용 조명기구 외함 제작

4.2 20W LED 광원모듈 구동을 위한전원회로 시제품 제작

PCB 설계는 POWER PCB version 5.2 Software 이용하여 폭(W) 34.5mm, 길이(L) 193mm Size로 디자인하였고, 낮은 양산 제조 원가를 고려하여 FR-4 재질의 단면 PCB로 설계하였다. 또한 PCB의 크기를 줄이기 위하여 SMD 부품을 장착하였고, 전류가 많이 흐르는 패턴 부위에 납을 추가로 도포하여 동박의 내부 임피던스를 줄일 수 있도록 설계하였다.

그림 13은 승강기용 20W전원회로 PCB Artwork Design과 PCB 제작 결과를 나타내고 있다.

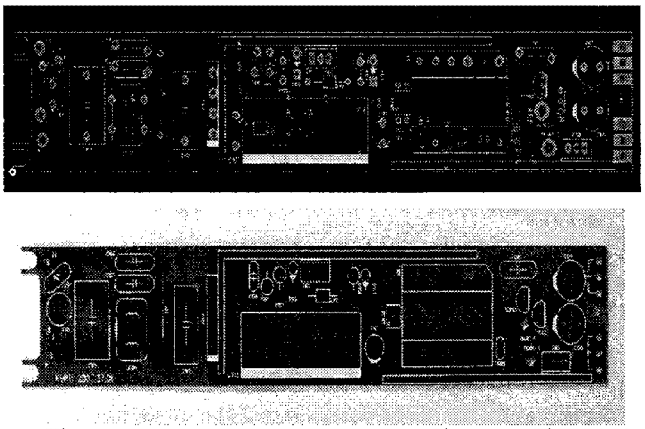

그림 13. PCB Artwork Design 및 PCB 제작결과

20W 전원회로의 구성이 One Stage 방식으로 구성되어 있어서 각 부분의 스위칭소자 (FET, Diode 등)에서 발생하는 열이 높으므로 신뢰성 확보를 위하여 Heat sink를 재작하여 열을 방출해 주어야 한다. 또한 SMD 부품이 장착된 PCB Board에 부품을 장착하고 스위칭 소자(FET, Bridge-diode, diode등)를 Heat Sink에 절연되게 부착하고 조립하여 시제품을 제작하였고, 부품의 진동 및 상호 간섭에 의해 서로 영향을 미치기 때문에 부품소자 간 안전거리를 확보하고 실리콘을 도포하여 안전성을 확보하였다. 또한 1차측, 2차측 절연을 위하여 Heat Sink 절연 Sheet를 3회 이상 테이핑하여 전기적 안정성을 확보하였다. 그림 14는 20W 엘리베이터용 전원회로의 시제품을 보이고 있으며, 각 부품에 안정적인 방열과 절연, 부품 상호간의 간섭을 피하기 위하여 히트싱크와 에폭시, 절연 Sheet를 사용하여 제작하였다.

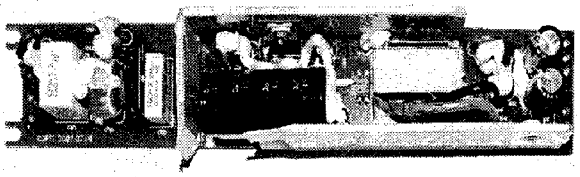

그림 14. 20W LED 광원모듈 구동회로 시제품 제작

4.3 색온도 제어회로 시제품 제작

LED부와 연결을 위해서 Connector Hole을 구성하였고 Case에 장착하기위한 기구 Hole을 부착하였다. 그림 15에 PCB Art Work Design, PCB 제작결과, 최종 시제품을 차례로 나타내었다. 색온도 제어회로는 2 Layer로 구성하였고 최적의 LED 배치구조를 고려하여 설계하였다.

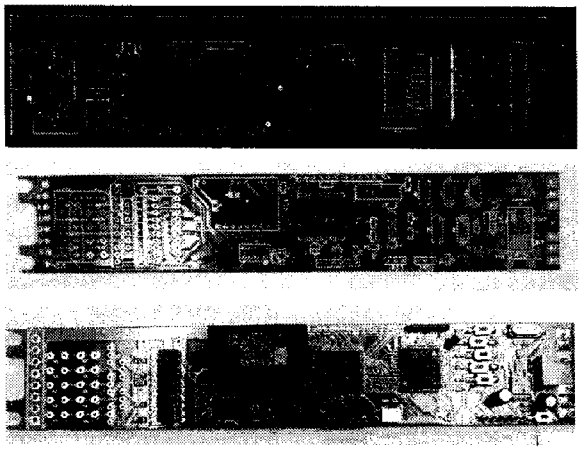

그림 15. 색온도 제어회로 제작

제어회로의 크기는 195×35 의 크기로 제작 되어서 적은 Size의 회로가 구성되었다. Compact한 PCB를 구현하기 위하여 설계상의 어려움이 있었다.

지금까지 제작된 조명기구 외함과 그 속에 전원회로, 제어회로, Heat Sink, LED 광원모듈, 확산판 등을 결합하여 최종 시제품을 제작하였다. 시제품 제작 결과 점등시의 시제품 형상은 그림 16과 같다.

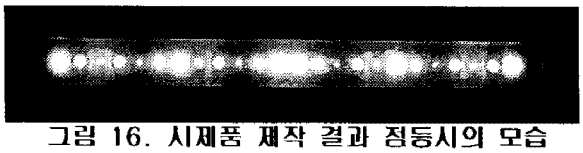

그림 16. 시제품 제작 결과 점등시의 모습

5. 시제품 광학적, 전기적 성능

5.1 전기적 성능

LED 구동용 20W 전원회로 시제품의 입력 전압 사양은 80Vac~250Vac, 50/60Hz에서 동작되며 최대 입력 전류는 Max 1A이다. 출력 전압은 12Vdc, 1.75A, Peak 3A의 출력을 특성을 가지고 있다. 그리고 전체 입력범위(80Vac~250Vac, 50/60Hz)에서 83% 이상의 효율을 갖고 있다. PFC는 90VAC 0.96이며 전체 입력 범위에서는 0.9이상으로 매우 우수한 특성을 가지고 있다.

개발된 LED 구동용 20W 전원회로는 승강기에서 구동하는 특성 중 동작 시에만 발광하므로 전원을 공급해 주는 시간은 빨라야 한다. 개발된 구동회로는 전체 입력범위(80Vac~250Vac, 50/60Hz)에서 0.148sec 이하에서 동작한다. 표 2에 Star-up time의 측정결과를 보인다. Start-up time을 측정은, 전체 입력범위(80Vac~250Vac, 50/60Hz)에 대해서, 주위온도는 25°C±5°C에서 측정 하였고, 전자 부하를 이용하여 최대 부하인 2A를 20W 전원회로에 공급하여 측정 하였다.

표 2. Start-up Time의 측정 결과

Input Voltage/Hz	Load	Start-up Time[sec]
90Vac/60Hz	Max.(2A)	0.122
110Vac/60Hz	Max.(2A)	0.143
132Vac/60Hz	Max.(2A)	0.148
180Vac/50Hz	Max.(2A)	0.115
230Vac/50Hz	Max.(2A)	0.114
264Vac/50Hz	Max.(2A)	0.111

다음의 표 3은 LED 구동용 20W 전원회로에 대한 전기적 특성 측정 및 분석 결과를 나타내고 있다.

표 3. 시제품의 전기적 특성 측정 결과

Vin [Vac]	Iout[A]	Vout[Vdc]	Pout [W]	Pin [W]	Effi[%]	PFC
90/60Hz	0	12.14	--	0.25	--	--
	2	12.07	24.14	28.93	83.44%	0.96
110/60Hz	0	12.14	--	0.29	--	--
	2	12.07	24.14	28.52	84.64%	0.96
132/60Hz	0	12.14	--	0.34	--	--
	2	12.07	24.14	28.70	84.11%	0.96
180/50Hz	0	12.14	--	0.51	--	--
	2	12.07	24.14	28.61	84.37%	0.95
230/50Hz	0	12.14	--	0.77	--	--
	2	12.07	24.14	28.89	83.55%	0.93
264/50Hz	0	12.14	--	0.94	--	--
	2	12.07	24.14	29.75	81.14%	0.9

5.2 광학적 성능

개발된 시제품의 색온도 범위 및 색온도 변화에 대한 R, G, B, Y, A Duty Ratio 값은 그림 17과 표 4와 같다. 그림 17과 표 3을 보면 색온도 가변 범위는 2000~10,000K까지임을 알 수 있다.

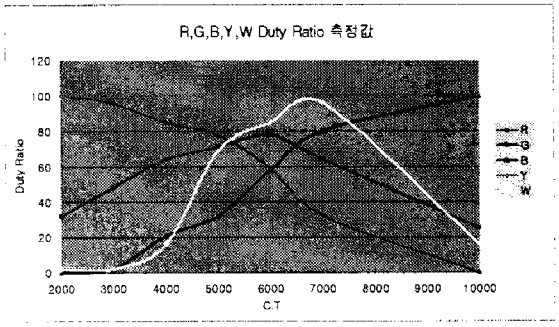

그림 17. 색온도에 따른 Duty Ratio 변화

표 3. 색온도 변화에 따른 Duty Ratio 측정값

LED / 색온도	Red	Green	Blue	Amber	White
2000	100	32	0	100	2
3000	96	48	2	100	2
4000	85	64	21	100	16
5000	78	71	32	100	69
6000	59	78	58	100	85
7000	32	64	80	100	96
10000	0	25	100	100	16

측정 색온도 변화를 CIE 1931 색좌표에 플롯하면 그림 18과 같고 그림을 보면 색온도의 변화가 흑체궤적의 변화와 매우 일치함을 알 수 있다.

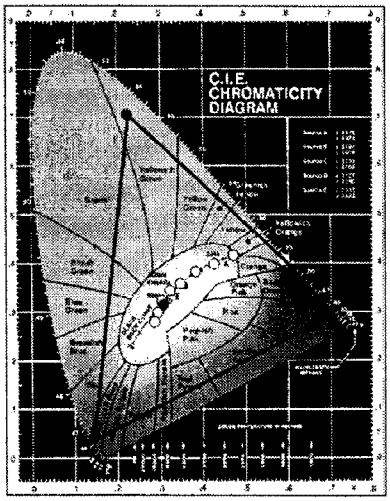

그림 18. Duty Ratio 변화에 따른 색온도 값의 변화

그림 19는 색온도 변화에 대한 분광스펙트럼 분포를 나타내고 있고 각각의 색온도에 대한 C.R.I의 측정결과를 나타내고 있다. 그림 19를 보면 색온도가 7,000K일 때 스펙트럼 분포가 가장 연속적이며 그 때의 C.R.I 값은 95이다.

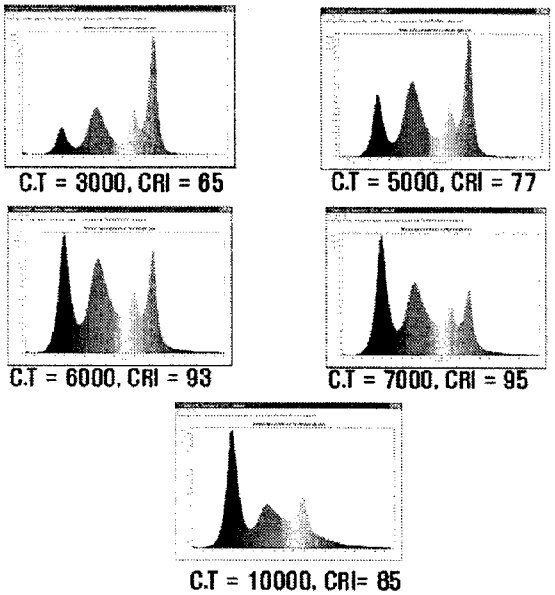

그림 19. 색온도 변화에 따른 분광 스펙트럼 및 C.R.I 값

그림 20은 색온도 변화에 따른 광속 및 발광 효율을 나타내고 있다. 그림 20에서 왼쪽의 종축이 광속을 나타내고 있고 오른 쪽의 종축이 luminous Efficacy를 나타내고 있다. 최대 광속은 색온도 6,000K에서 374lm 이며, 그 때의 발광효율은 18.7lm/W이다.

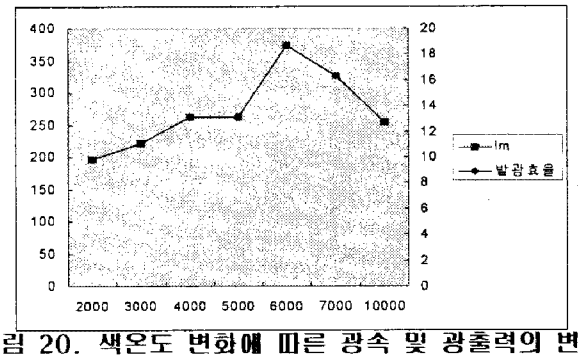

그림 20. 색온도 변화에 따른 광속 및 광출력의 변화

그림 21은 Goniameter를 이용하여 시제품의 배광 성능 및 1/2 발산각을 측정한 결과이다. 그림 21을 보면 확산 배광의 특성을 그대로 나타내고 있으며 1/2 발산각 또한 100°를 만족하였다

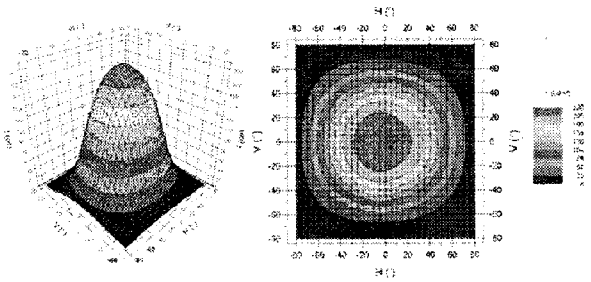

그림 21. Goniometer를 이용한 시제품의 배광 특성 측정 결과

5. 결론

광원의 색온도를 주광과 실시간으로 일치시키는 색온도 제어 알고리즘 및 제어회로 기술은 앞으로 일시적으로 머무는 승강기 조명뿐만이 아닌 실내 전반조명에 적용함으로써 인간의 생체리듬을 왜곡시키지 않는 인간중심의 쾌적한 조명환경을 실현할 수 있다는 점에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 그러나 계절별, 월별, 일별로 주광의 색온도와 정확히 일치하는 조명제품 개발을 위해서는 색온도의 변화를 계산이 아닌 정확한 측정에 바탕을 두어야 할 것이다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 광산업기술력향상사업의 수행결과임

참 고 문 헌

[1] 日本照明學會, "LED 照明ハンドブック", 2006, pp.28~41
[2] Joseph B. Murdoch, "Illuminantion Engineering from Edison's Lamp to the Laser", Macmillan Publishing Comany A Division of Macmillan, Inc., 1985, pp.348~394
[3] 지철근, "빛과함계", 광학과기술, 10권, 3호, P.44