

Development & Reliability Verification of Ultra-high Color Rendering White Artificial Sunlight LED Device using Deep Blue LED Light Source and Phosphor

Jong-Uk An[†] · Tae-Kyu Kwon

Department of Convergence Management of Technology, Jeonbuk National University

Deep Blue LED 광원과 형광체를 이용한 초고연색 백색 인공태양광 LED 소자의 개발

안종욱[†] · 권대규

전북대학교 일반대학원 융합기술경영학과(MOT)

Currently, yellow phosphor of Y3Al5O12:Ce3+ (YAG:Ce) fluorescent material is applied to a 450~480nm blue LED light source to implement a white LED device and it has a simple structure, can obtain sufficient luminance, and is economical. However, in this method, in terms of spectrum analysis, it is difficult to mass-produce white LEDs having the same color coordinates due to color separation cause by the wide wavelength gap between blue and yellow band. There is a disadvantage that it is difficult to control optical properties such as color stability and color rendering. In addition, this method does not emit purple light in the range of 380 to 420nm, so it is white without purple color that can not implement the spectrum of the entire visible light spectrum as like sunlight. Because of this, it is difficult to implement a color rendering index(CRI) of 90 or higher, and natural light characteristics such as sunlight can not be expected.

For this, need for a method of implementing sunlight with one LED by using a method of combining phosphors with one light source, rather than a method of combining red, blue, and yellow LEDs.

Using this method, the characteristics of an artificial sunlight LED device with a spectrum similar to that of sunlight were demonstrated by implementing LED devices of various color temperatures with high color rendering by injecting phosphors into a 405nm deep blue LED light source. In order to find the spectrum closest to sunlight, different combinations of phosphors were repeatedly fabricated and tested. In addition, reliability and mass productivity were verified through temperature and humidity tests and ink penetration tests.

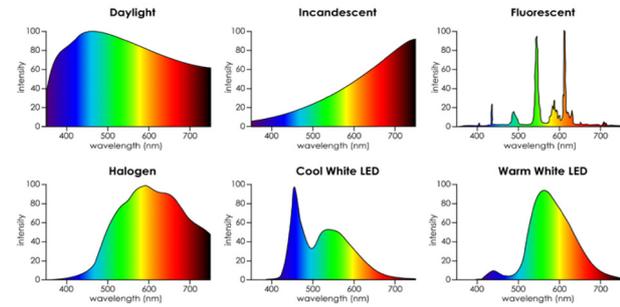
Keywords : Artificial Sunlight, High Color Rendering Index, Deep Blue LED, Phosphor

1. 서론

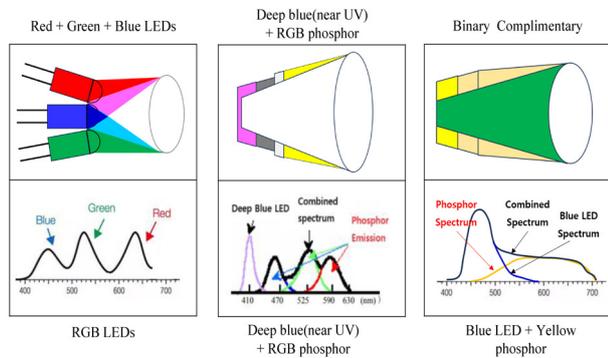
현재 백색 LED(Light Emitting Diode) 소자는 대부분 450~480nm chip LED 광원과 형광체를 패키지에 내장 하여 제작되고 있고, 주입되는 형광체의 특성과 조성에 따라 LED 소자로부터 방출되는 백색광의 색온도, 연색지수 등 주요한 특징이 결정된다.

백색 LED 소자의 파장은 광원과 형광체에 따라 <Figure 1>과 같이 기존 형광등, 백열등, 할로젠 조명과 다른 스펙트럼 특성을 보인다. 백색 LED 소자를 구현 하기 위한 방법은 <Figure 2>와 같이 적녹청색의 LED 광원을 조합하는 방법, 400nm 영역의 Deep blue(near UV(Ultra violet)) LED 광원에 적녹청 형광체를 조합하는 방법과 Binary Complimentary 방법이 있다[4, 12].

적, 녹, 청색을 조합한 백색 LED 소자는 <Figure 3>과 같이 적녹청 LED 광원을 하나의 패키지에 내장하여 빛의 3원색을 조합하는 방법으로 고효율과 장수명의 특징이 있다. 각 LED에 인가되는 전압과 전류에 따라 다양한 색온도 구현이 가능하고 높은 색재현율과 연색 특성을 지니고 있다.



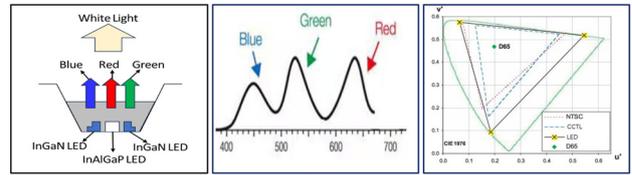
<Figure 1> Spectrums of Various Light Source



<Figure 2> Implementation Methods of White LED

그러나 각각 칩마다 동작 전압의 분균일성, 주변의 온도에 따라 각 칩의 출력이 변하여 색좌표가 달라지는 문제로

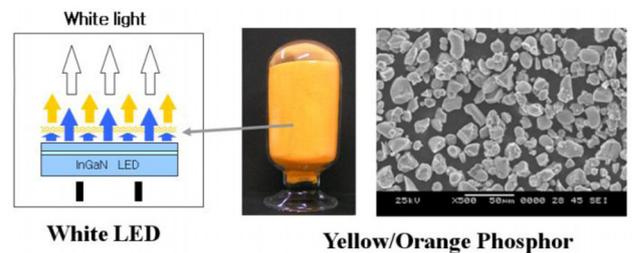
인해 신뢰성이 떨어짐은 물론 제조 단가가 높아지는 단점이 있다



<Figure 3> Realization of white LED Device Through Combination of Red, Green and Blue LED Light Source

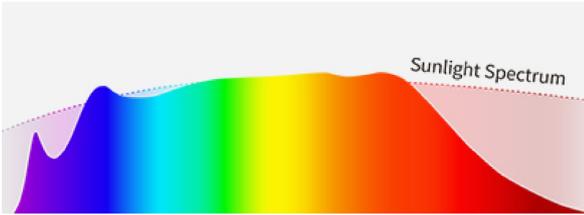
현재 백색 LED 소자를 구현하기 위하여 주로 사용되는 방법은 <Figure 4>와 같이 450~480nm 청색 LED 광원에 Y3Al5O12:Ce3+(YAG:Ce) 형광 소재의 노란색 형광체를 도포하는 방식으로, 이는 구조가 간단하고 높은 휘도를 얻을 수 있으며 가격이 저렴한 특징이 있다.

그러나 스펙트럼 분석을 하면 청색 파장과 황색 파장의 간격이 넓어 색 분리로 인해 색좌표가 동일한 백색 LED 양산이 어렵고 색 안정성과 연색성 등 광학 특성 제어가 어려운 단점이 있다[9, 10, 13].



<Figure 4> Realization of white LED Device Using YAG-based Phosphor in Blue LED Light Source

이에 따라 적색을 내는 형광 소재를 첨가하여 발광 스펙트럼을 넓혀 이런 단점을 보완하고 있으나, <Figure 1>의 cool과 warm LED 소자와 같이 380~420nm 구간의 자색광을 방출하지 못하여 태양광과 같이 전체 가시광 영역의 스펙트럼을 구현하지 못한다. 인간의 눈에는 백색광으로 보이나 실제로는 자색이 부족한 백색이며, 이에 따라 연색지수(CRI:Color Rendering Index)를 90 이상 구현하기 어려워 태양광과 같이 자연스러운 광특성을 기대할 수 없다. 최근 국내 최대 LED 제조사인 S반도체에서 태양광과 유사한 sunlike 제품군을 출시하였고, 오스람은 다양한 파장을 이용하여 태양광과 유사한 스펙트럼 특성을 구현하는 조명 시스템을 공급하고 있다[1, 7].



<Figure 5> Spectrum of Sunlike LEDs

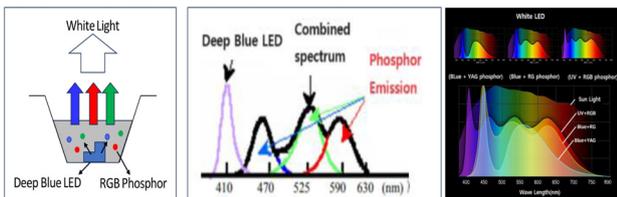
특히 하나의 광원으로 태양광과 유사한 광특성을 구현하기 어렵기 때문에 청색, 녹색, 황색, 적색 성분이 주로 포함된 3개 이상의 청색 기반 백색 LED를 조합하여 태양광과 유사한 스펙트럼, 색온도, 연색 지수를 구현한다. 이런 방법은 조명 시스템 구성이 복잡하고 단가가 높지만 방충용, 전시용등 자연스런 색감을 필요로하는 분야에 사용되고 있다[5, 6].

이러한 청색 LED 광원 기반의 백색 LED 소자 구현의 한계를 극복하기 위해 가시광 영역에서 가장 파장이 짧고 자외선보다 파장이 긴 405nm Deep blue LED 광원과 적녹 청 형광체를 하나의 LED 소자로 제작하는 방법으로 백색 LED를 구현하는 방법을 제안하고, 스펙트럼 최적화를 통해 태양광과 유사한 인공태양광을 구현하고, 이를 검증하고자 한다.

2. 시스템 구성

2.1 인공태양광 구현 방법

인공태양광 구현은 <Figure 6>와 같이 405nm Deep blue LED 광원의 파장이 형광체를 통과하면서 백색을 방출하도록 형광체를 주입하는 방법으로 기존의 450~480nm 청색 LED 광원을 이용하는 방법과 동일한 제조 방법을 사용하게 된다[4].



<Figure 6> Realization of White LED using 405nm Deep Blue LED Light Source and Phosphor

형광체는 광학적으로 활성화된 요소를 도핑한 무기물 수용체 물질로 구성된다. 대부분의 수용체들은 화학식이 A3B5O12를 가진 가넷이다. 여기서 A와 B는 화학적 요소

들이고 O는 산소이다. 다양한 가넷 그룹들 사이에서 특히 이트륨-알루미늄-가넷(yttrium aluminum garnet, YAG) Y3Al5O12는 가장 흔히 사용되는 수용체 물질(host material)이다. 수용체 물질로 YAG를 가진 형광체들을 YAG 형광체라 한다.

형광 소재 특성을 나타내는 항목으로 응용 분야에 따라 차이는 있지만 휘도, 양자효율, 적절한 발광 밴드의 위치(파장), 온도 및 습도에 대한 안정성 등이 중요하다. 이외에도 적당한 평균 입자크기, 입도분포, 불순물의 최소화, 결정 구조상의 단일상, 좋은 결정성 등이 필요하며, 대표적인 형광체는 <Table 1>과 같다.

LED 광원에 적용되는 조명용 형광체로 중 대표적인 할로겐산계 Ca10(PO4)6FCl:Sb,Mn이 가격이 저렴하여, 휘도를 확보하기 위한 목적으로 사용된다. 고품위 광원에는 희토류 이온을 첨가한 형광체가 이용된다. 이것은 청색(SrCaBaMg)5(PO4)3Cl:Eu, 녹색 LaPO4:Ce,Tb, 적색 Y2O3:Eu 등을 혼합한 것이다.

<Table 1> Main Phosphor Combined with 405nm Deep Blue LED light source

Phosphor	Chemical Composition	Intensity	Width
Blue	(Sr,Ca,Ba,Mg) ₁₀ (PO ₄) ₆ Cl ₂ /Eu	○	Narrow
Blue	(Ba,Sr)MgAl ₁₀ O ₁₇ /Eu	○	Middle
Blue	(Sr,Ba) ₃ MgSi ₂ O ₈ /Eu	○	Narrow
Green	SrGa ₂ S ₄ /Eu	○	Middle
Green	β-sialon/Eu	○	Middle
Green	SrSi ₂ O ₂ N ₂ /Eu	○	Middle
Red	(Sr,Ca)S/Eu	○	Broad
Red	(Ca,Sr) ₂ Si ₅ N ₈ /Eu	○	Broad
Red	CaAlSiN ₃ /Eu	○	Broad
Red	La ₂ O ₂ S/Eu	△	Narrow

순방향 전압 3.0~3.1V로 구동하는 405nm Deep blue LED 광원에 <Table 2>와 같이 형광체를 주입하여 1차 제조한 백색 LED 소자의 특성은 <Table 3>, <Figure 6, 7>과 같다. 여기서 Net weight는 형광 물질의 전체 무게로서, 주체인 형광체(Main material)과 봉지제로 사용되는 실리콘(Curing agent)로 구성된다.

1차 시료 제작에 사용된 봉지재는 실리콘을 사용하였고, 무게 기준으로 주체와 경화제를 각 2g씩 혼합하고, 여기에 형광체는 무게 기준 17%을 주입하여 전체 무게는 0.68g로 조성하였다. 배합에 사용된 대표적인 형광체 3종의 무게 비중은 총형광체의 무게 0.68g 중에서 각각 10%, 1%, 10%이고 무게는 0.068g 및 0.0068g이다. 형광체는 전체 봉지재의 무게에 비해 미량이나 배합 비율, 형광체에 따라 각기 다른 스펙트럼 특성을 발현한다.

<Table 2> 405nm Deep Blue LED Light Source and Phosphor Composition of 1st Sample

Silicon(100wt%)			Phosphor 100wt%	
Net weight	Main material A	Curing Agent. B	Weight Ratio	Weight
(g)	(g)	(g)	(wt%)	(g)
4	2	2	17	0.68

Phosphor 1 100wt%		Phosphor 2 100wt%		Phosphor 3 100wt%	
(%)	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)
10	0.0680	1	0.0068	10	0.068

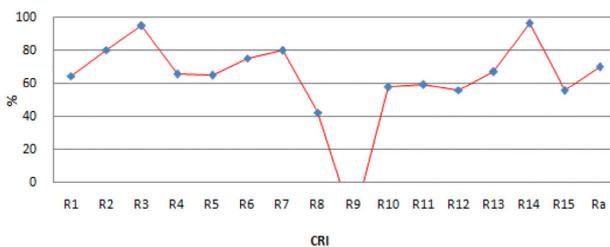
따라서 LED 소자의 스펙트럼은 형광체 성분, 합성 비율, 배합 중량 등에 민감한 영향을 받아, 전형적으로 Trial & Error 방법을 통해 목표로 한 스펙트럼을 구현한다[4, 7].

1차 시료의 경우 <Figure 7>과 같이 청색부터 황색까지 상대적으로 스펙트럼이 낮았으며 적색 형광체의 특성이 강하게 나타나 조정이 필요하다. 특수 연색성(Ri)과 일반 연색성(Ra) 모두 낮게 측정되었고 국제조명위원회(CIE: Commission Internationale de l'Eclairage) 기준의 색도 분포가 비율에 맞지 않았다. Φ_vlm 은 광원에서 출력되는 빛의 전체 광량을 의미하며 단위는 lm(루멘)이다. x, y는 CIE931에서 지정한 좌표 값으로 색좌표상의 위치를 지정한다. CCT(Correlated color Temperature)는 상관색온도라고 부르며 흑체(black-body)가 해당 온도에서 방출하는 빛과 유사한 빛을 의미한다. K는 소비 전력당 방출하는 광량으로 효율을 의미하며, Source는 소비되는 전류, VF(Voltage forward)는 LED에 공급되는 순방향 전압을 의미한다.

<Table 3> Average of Measurement Data of 1st Sample (measured after curing process)

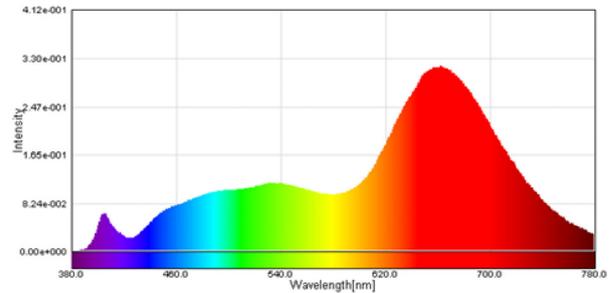
$\Phi_v(lm)$	x	y	CCT	CRI(Ra)
8.5	0.4166	0.3812	3175	70.2505

CRI(Ri)	K(lm/W)	SourcemA	VFV
51	43	60	3.285



<Figure 7> Detailed Color Rendering of 1st Sample

2차 시료는 1차 시료의 형광체 구성에 비해 <Table 4>와 같이 적색 형광체 비율을 50% 감소하였다. 2차 제조한 백색 LED 소자의 특성은 <Table 5>, <Figure 8, 9>과 같다.



<Figure 8> Spectrum of 1st Sample

2차 시료의 봉지재는 1차 시료와 동일하게 실리콘을 기반으로 무게 기준 주체와 경화제를 각 2g씩 혼합 하였다. 여기에 형광체는 1차 시료와 동일하게 무게 기준 17%를 주입하여 형광체 전체 무게는 0.68g이나 사용된 형광체의 비율을 조정하여 적색 파장대를 줄이는 대신 녹색, 황색 파장에 스펙트럼이 좀 더 집중되도록 하였다.

<Table 4> 405nm Deep Blue LED Light Source and Phosphor Composition of Secondary Sample

Silicon(100wt%)			Phosphor 100wt%	
Net weight	Main material A	Curing Agent. B	Weight Ratio	Weight
(g)	(g)	(g)	(wt%)	(g)
4	2	2	17	0.68

Phosphor 1 (100wt%)		Phosphor 2 (100wt%)		Phosphor 3 (100wt%)	
Weight Ratio	Weight	Ratio	Weight	Weight Ratio	Weight
(wt%)	(g)	(%)	(g)	(wt%)	(g)
10	0.068	120	0.8160	5	0.0034

<Table 5> Average of Measurement Data of 2nd Sample (measured after curing process)

$\Phi_v(lm)$	x	y	CCT	CRI(Ra)
10.2	0.4129	0.4192	3537	88.7

CRI(Ri)	lm/W	mA	VFV
84	50	60	3.394

1차 시료와 비교하여 녹색 파장 대역은 향상되었으나 황색 파장의 스펙트럼이 상대적으로 낮은 특성을 나타냈다.

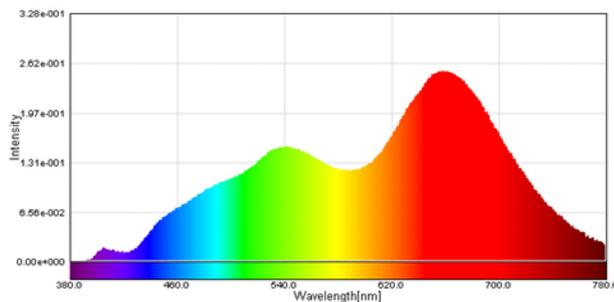
또한, 적색 형광체의 특성이 여전히 강하게 나타나 감소가 필요하나, 특수 연색성(Ri)과 일반 연색성(Ra)이 향상되었다.



<Figure 9> Detailed Color Rendering of 2nd Sample

2.2 인공태양광 LED 소자의 광특성 구현

2차 시료는 소비 전류 60mA, 순방향 전압 3.339V 조건에서 총광량 10.2lm, 소비 전력당 광출력 50lm/W 이고 <Figure 10>과 같이 3500K의 색온도와 평균 연색지수 88.7을 보였다. 이는 태양광의 연색지수 100을 기준으로 태양광과 다른 스펙트럼을 보이는 것으로, 정오, 오후의 태양광과 비교해도 유사하지 않다. 이는 전체 가시광 영역에서 연속적이고, 급격한 스펙트럼 변화가 없는 태양광과 다른 특징으로, 태양광과 유사한 특성을 갖도록 560nm 대역의 에너지를 620nm 대역으로 전이시켜야 한다.

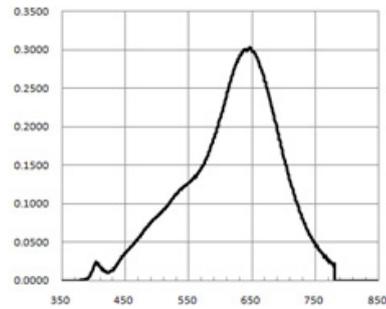


<Figure 10> Spectrum of 2nd Sample

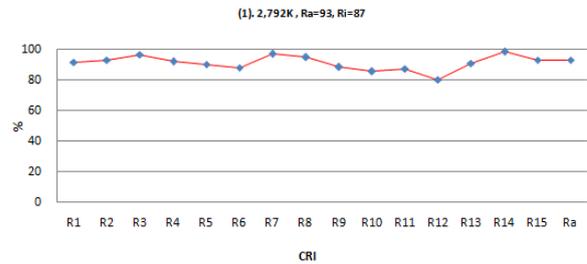
이후 3차 시료의 측정 결과를 참고하여 형광체 배합 비율을 수정 후 경화 공정을 진행하였다. 그 결과 목표치에 근접한 것을 확인할 수 있었고, 이어 진행한 4차 시료의 특징은 <Figure 11>와 같다.

<Figure 11>은 경화 전 측정 결과로써 경화 후 녹색 파장 영역이 더 증가하고, 적색 파장 영역은 감소할 것으로 예상되어, 이를 반영하여 5차 시료를 제작하여 측정하였다. 5차 시료는 <Figure 12>과 같이 태양광에 더욱 근접한

결과를 얻었으며, 색온도 2792K, 평균 연색 지수는 93으로 측정되었다.

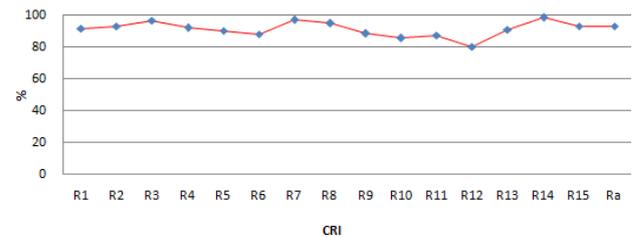


<Figure 11> Spectrum of 4th Sample



<Figure 12> Detailed Color Rendering of 5th Sample

6차 시료는 5차 시료의 특성을 보완하도록 제작되었고 경화 과정을 거쳐 측정된 결과는 <Figure 13>과 같다.



<Figure 13> Detailed Color Rendering of 6th Sample

6차 시료의 측정 결과 자외선 파장 영역에서 돌출된 부분이 확인되었다. 이 특성은 황색 파장 영역이 부족한 것으로 분석되었으며 7차 시료 제작에 이를 반영하여 형광체 비율을 변경하였다.

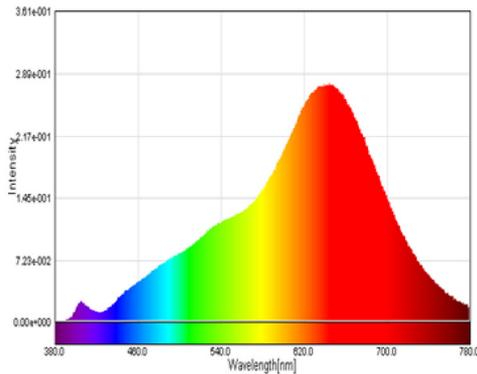
7차 시료는 황색 파장 영역의 스펙트럼을 증가시키기 위해 형광체 비율을 변경하였으나, 효과가 나타나지 않았다. 청색 파장 영역의 돌출된 스펙트럼은 색온도가 감소함에 따라 개선된 결과를 도출하였으나, 7차 시료의 측정 결과가 <Table 6>, <Figure 14>와 같이 국제조명 위원회의 색도와 가장 유사한 것으로 분석되었다.

이러한 과정을 반복하여 8차 시료를 3528 패키지로 제

작하여 측정된 결과는 <Table 7>, <Figure 15>과 같은 특성이 구현되어, 연색지수 Ra 98, 연색지수 Ri 96으로써 태양광과 유사한 값이 측정되었다.

<Table 6> Measurement data of 7th sample

$\Phi_v(lm)$	lm/W	CIE x	CIE y	K	CRI(Ra)
12	58	0.4742	0.4131	2598	94



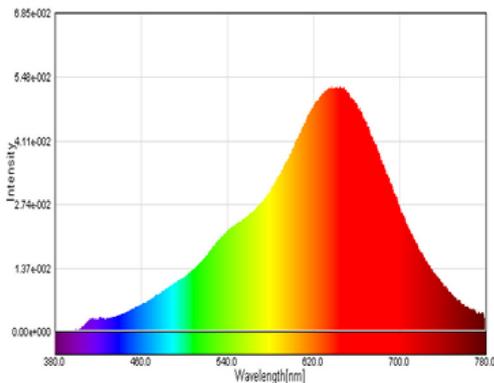
<Figure 14> Spectrum of the 7th Sample

<Table 7> Optical Properties of the 8th Sample

$\Phi_v(lm)$	lm/W	CIE x	CIE y
2	30	0.4955	0.4195

(K)	CRI (Ra)	CRI(Ri)
2419	98	96

전체 방출 광량은 2lm로 소비전력 대비 광출량은 30lm/W였으며, 안정된 색좌표와 2400K의 색온도, 98 이상의 평균 연색성을 보였다. 이는 해질 녘의 태양광과 유사한 색온도, 연색 특성으로서 할로겐 조명과 유사한 특성을 보이고 있다.



<Figure 15> Spectrum of the 8th sample

3. 결과 및 고찰

3.1 신뢰성 및 양산성

신뢰성을 검증하기 위해 <Table 8>과 같이 알루미늄 소재 PCB(Printed circuit board)를 적용한 COB(Chip on board) 패키지 시료를 제작하여 온도 시험을 실시하였다.

신뢰성 및 양산성 시험은 LM80에 따랐으며, LM80은 IESNA(Illuminating Engineering Society of North America ; 북미조명공학회)에서 승인한 광속유지율(LED 수명) 규격이다. LM80 시험은 주로 LED 패키지, 어레이 및 모듈을 포함한 광원의 구성 요소에 초점을 맞추고 이 데이터를 기반으로 구성 요소의 수명을 계산한다.

<Table 8> COB Sample with Aluminum Material PCB

item	405nm LED	PCB	Gold Wire	Silicone	Die Paste
COB	Po:65~70 VF:3.1-3.2	40*35 (mm)	Au 1.0mil	IV54	K**

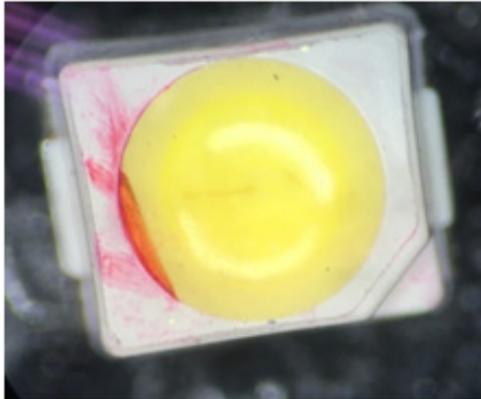
55°C 및 85°C의 2개 이상의 주변 온도가 사용되며, LED는 이 온도와 특정 구동 전류에서 1000시간 동안 작동한 다음 25°C로 냉각하고 광 출력 특성을 측정한다. 이 동작 조건에서 순방향 전류 값이 초기 값보다 -30% 이상 만족하는 것으로 <Table 9>와 같이 확인되었다.

소자의 열적 안정성 외에 봉지재로 사용된 실리콘의 신뢰성 검증을 위하여 SMD(Surface Mounted Device) 3528 규격으로 소자를 제작하여 실리콘과 패키지의 반사면 간의 박리 현상을 확인하였다.

<Table 9> Reliability Test Conditions and Rate of Change

Time (Hr)	Condition (mA)	Variation(%)			
		Iv	Cx	Cy	Ra
0	480	0	0	0	0
250	480	-0.10	-0.02	-0.02	0.22
500	480	-5.92	-1.35	-2.10	1.73
750	480	-3.26	-1.16	-1.39	1.49
1,000	480	-3.28	-0.86	-1.02	1.12

잉크를 투입해 박리 면에서 잉크의 확산 여부를 확인하는 잉크 침투 시험 결과 <Figure 16>와 같이 박리 계면 부위로 잉크가 침투됨을 확인하였고, 이는 양산에 부적합함을 의미한다[3].



<Figure 16> Ink Penetration Test Sample

재현성 평가를 위해 면봉으로 표면에 자극(stress인가)을 주고 시험을 진행 후 평가하였으며 플라즈마를 이용한 표면 처리 여부에 따른 차이를 시험하였고, 그 결과는 <Table 10>과 같다.

<Table 10> Ink Penetration Test Result

Silicon	Plasma	Iv (mcd)	Cx	Cy	CCT	CRI	Vf (V)	Exfoliation
I*****	Y	2,619	0.3368	0.3454	5,321	84.07	3.033	Y
*****1	Y	2,634	0.3344	0.3412	5,461	84.03	3.090	N
****2	Y	2,709	0.3423	0.3571	5,128	81.77	3.116	Y
****52	Y	2,637	0.3394	0.3513	5,225	83.13	3.069	Y
****31	N	2,656	0.3383	0.3467	5,289	83.64	3.066	N
****732	N	2,496	0.3050	0.3033	7,301	83.97	3.044	Y
****452	N	2,672	0.3139	0.3291	6,444	79.45	3.105	Y

실리콘 신뢰성 평가 조건은 온도 85℃, 습도 85%이고 시험 시간은 250시간이며, 시험을 위해 제작된 소자형태와 이에 적용된 실리콘은 <Table 11>과 같다.

<Table 11> Test Sample

PKG type	Silicon
3528	I***752, I***452, O*****
5450	I***752

시험에 사용된 실리콘은 양산에 사용중인 IVS4752(M사 제품)와 IVS445(M사 제품, 열 안정성 향상) 및 OE6631 (DD 사 제품, 열 안정성 개선)이며, <Table 12>, <Table 13>과 같이 사용된 실리콘의 품질이나 특성 차이에 의한 박리보다 배합 비율, 경화제에 따라 박리 정도가 달라짐을 알 수 있다.

<Table 12> Silicon Stability Test Result of IVS Series

	IVS4752	Exfoliation
	# of samples	16
	Bad	16
	Ratio	100%

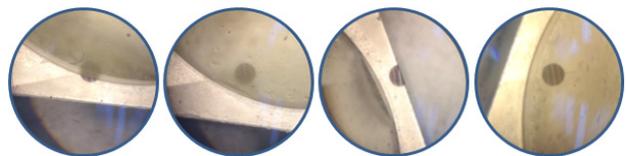
<Table 13> Silicon Stability Test Result of OE Series

	IVS6631	No Exfoliation
	# of samples	16
	Bad	0
	Ratio	0%

고온 고습 시험 결과 계면의 완벽한 박리가 아닌 계면 실리콘 표면이 밀려 올라간 현상이 관측되었다. <Table 14>와 같이 IVS 제품보다 OE 제품을 이용한 경우가 더욱 양호한 결과를 보이고 있고, <Figure 17>와 같은 박리 현상을 확인할 수 있다.

<Table 14> Silicon Stability Test Result

Silicon	SMT	High TM	bad ratio
IVS47**	71%	75%	92%
IVS44**	0%	4%	4%
OE66**	0%	0%	0%

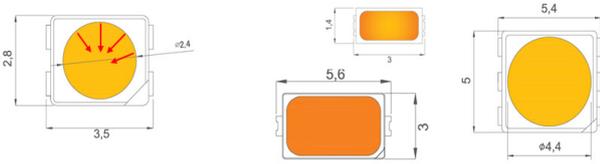


<Figure 17> Silicon Exfoliation after Temperature & Humidity Test

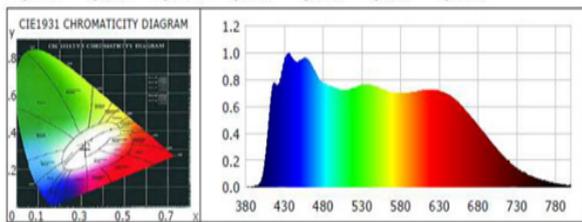
Deep blue chip을 적용한 고연색 백색 LED 소자의 신뢰성을 담보하기 위해 다양한 실리콘 봉지재가 적용된 3528 형과 5450형 패키지를 제작하여 잉크 침투 시험과 고온 고습 시험을 통해 확인한 결과 OE 제품을 적용한 3528형 패키지의 안정성이 가장 높은 것을 확인하였다.

신뢰성 분석을 통해 405nm Deep blue LED 광원과 <Table 15>의 형광체 조합을 통해 실제 구현한 <Figure 18>의 3528 LED 패키지는 <Figure 19>과 같이 태양광과 유사한 스펙트럼을 구현할 수 있으며, <Figure 20>과 같이 형광체의 조합에 따라 평균 연색지수(Ra) 90 이상, 색온도

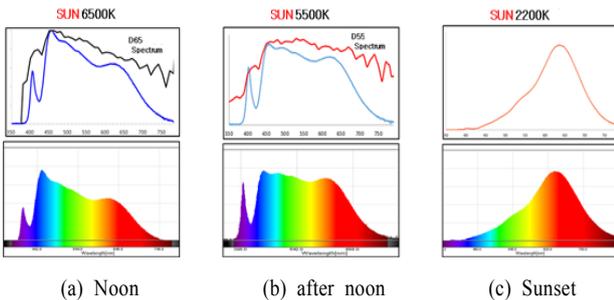
2500~7500K를 만족하는 다양한 인공태양 광원을 구현하였다.



<Figure 18> 3528PKG LED



<Figure 19> Spectrum of 3528PKG using Deep Blue LED Light Source



<Figure 20> Spectrums of Implemented Artificial Sunlight

<Table 15> Phosphors Used in Manufacturing Artificial Sunlight LED Devices with High Color Rendering

Maker	Item	X-Point	Y-Point	FWHM (nm)
N***	LAG354A100	0.3530	0.5740	110
N***	LAG384A100	0.3840	0.5630	111
N***	LAG394A100	0.3930	0.5610	112
N***	LAG414A150	0.4140	0.5530	115
N***	LAG414A180	0.4150	0.5540	114
F***	PA537A1	0.3619	0.6045	121
F***	PA537B1	0.3604	0.6059	123
F***	PA540A1	0.3647	0.6027	123

<Table 15>에 제조사별(Maker)로 적용된 형광체(item)에 따라 구현된 시료의 색좌표(X, Y point)를 표시하였고,

각 시료의 스펙트럼 특성을 FWHM으로 표시하였다. FWHM(Full Width at Half Maximum)은 반치전폭(半值全幅)으로 임의의 함수의 폭을 의미하며, 그 함수의 최댓값의 절반이 되는 두 독립변수 값들의 차이로 정의된다.

3.2 지적재산권 분석

405nm Deep blue LED 광원과 형광체의 조합을 통한 고연색 인공태양광 LED 소자의 사업성을 확보하고 지적 재산권 분쟁의 소지를 확인하고자, <Table 16>과 같이 본 연구의 배경이된 미국 등록 특허US 11127888와 유사한 기술을 보유한 미국내 기업 Vyv의 특허US 9333274, US 9439989, US 9713223, US 9927097, US 10357582, US 10753575와 주요 항목을 비교 하였다[11].

<Table 16> Patent(US 9333274) Comparison

Claim	Vyv	US 11127888
1	peak wave length 380nm ~ 420nm	380nm to 430nm
2	first light source 400-410nm, second, third, fourth light source	first 450-470nm, second 510-550nm, 550-590nm, 630-660nm, 660-730nm
3	first $y=2.23989, x=0.382773$, second $y=1.1551, x=0.195082$	phospho 12.3:1.0:1.0:5.0:0.3
4	spectral energy 380nm ~ 420nm greater than approximately 20%	color temperatur 4477K, CRI 99 light energy 80lm/W.

<Table 16>과 같이 두건의 특허가 1항에서 유사한 과장 범위를 명시하고 있지만 2항은 서로 다른 형광체 구성을 명시하고 있다. 3항의 색좌표 및 형광체 구성이 다르고, 4항과 같이 과장의 에너지 특성이 다른 특성을 보여 주고 있다. 이와 같은 분석을 통해 1항을 제외하고 모든 구성이 상이함으로 특허 구성 요소 완비의 원칙상 침해 가능성이 없음을 알 수 있다.

4. 결론

405nm Deep blue LED 광원과 다양한 형광체의 조합을 통한 고연색 인공태양광 LED 소자는 기존의 450~480nm 광원을 이용하는 방식과 동일한 공정에서 제조할 수 있어 공정 변화에 의한 원가 상승 요인이 없으나, 태양광과 유사한 스펙트럼을 구현할 수 있다. 특히 상용 3528 패키지에 직접 적용하여 광특성과 양산성을 입증 하였다. 8차에 걸쳐 405nm Deep blue LED 광원을 이용해 개발

된 초고연색 인공태양광 LED 소자의 전체 방출 광량은 2lm으로 소비전력 대비 광출량은 30lm/W였다. 안정된 색 좌표와 2400K의 색온도, 98 이상의 평균 연색성을 보였다. 형광체의 배합에 따라 정오, 오후, 해질녘의 태양광과 유사한 광특성을 가지는 인공태양광을 구현할 수 있음을 확인하였다.

고연색 백색 인공태양광의 구현을 위해 형광체의 배합 조건이 중요하여, 부족한 파장 영역 대의 형광체 양을 단순히 늘리는 방식으로 접근하고 있다. 이는 효율의 감소를 유발할 수 있다. 본 실험에서는 형광체에 의한 광효율 손실을 최적화하면서 특정 파장의 스펙트럼을 증대시킬 수 있는 형광체 조성을 입증하였다.

이는 밝은 광대역 청녹 계열의 $\text{CaY}_2\text{ZrGaAl}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ 가넷 형광체로 풀스펙트럼 LED를 구현하여 평균 연색 지수(Ra) 97, 색온도 3334K를 달성한 최근의 연구 결과보다 더욱 다양한 색온도와 높은 평균 연색 지수를 구현하였음을 의미한다[2].

405nm Deep blue chip LED 광원을 적용한 고연색 백색 인공태양광 LED 소자의 신뢰성을 담보하기 위해 다양한 실리콘 봉지재가 적용된 3528형과 5450형 패키지를 제작하여 잉크 침투 시험과 고온 고습 시험을 통해 상용 3528형 패키지가 가장 안정성이 높음을 확인하였고, 실제 양산에 적용할 수 있음을 입증하였다.

3528형 패키지 표면에 자극을 주어 잉크 침투를 가속 하도록 가혹한 조건을 주었고, 온도 85°C, 습도 85% 조건에서 250시간 동안 고온-고습 시험을 통해 실리콘 봉지재의 변형이 없음을 확인하였다.

이와 같은 잉크 침투 시험과 신뢰성 분석을 통해 405nm Deep blue LED 광원과 형광체 조합을 통해 실제 제작, 구현한 3528 LED 패키지는 태양광과 유사한 스펙트럼을 방출하고 있다. 형광체의 조합에 따라 평균 연색지수(Ra) 90 이상, 색온도 범위 2500~7500K를 만족하는 다양한 인공태양 광원을 구현하였다.

가시광 영역에서 가장 파장 짧은 405nm Deep blue LED 광원을 이용한 고연색 인공태양광 LED 소자는 기존의 450~480nm 광원을 사용하는 백색 LED 제조 방식에 비해 높은 연색성을 기대할 수 있고 색온도와 스펙트럼 조절이 가능함으로써 높은 연색성을 필요로 하는 전시용 조명, 검사용 조명, 방송용 조명등 고부가 가치 제품의 경쟁력 향상을 기대할 수 있다.

박물관, 전시관등에서 전시품을 비추는 조명의 경우, 기존 450~480nm 파장을 사용하는 LED 조명에 포함된 청색 파장으로 인해 유기물 재료를 사용한 그림, 서화, 공예품의 탈변색을 유발할 수 있다. 전 세계적으로 독일 기업(E사)가 시장의 대부분을 독점하고 있고, 이런 특성으로 인해 전시품의 고유가치를 하락시킬 수 있으나, 인공 태양광

은 청색으로 인한 부작용이 적어 기존의 전시용 조명을 대체 할 수 있는 충분한 경쟁력이 있다. 또한 제품 고유의 색을 정확히 구별할 필요가 있는 검사용 조명이나, 피사체 고유의 색감을 재현할 필요가 있는 방송용 조명의 경우 인공태양광으로 대체 할 수 있는 충분한 요구가 있다[11].

본 연구에서 제안하고 검증한 405nm Deep blue LED 광원과 다양한 형광체의 조합을 통한 고연색 인공태양광 LED 소자 제조 방법은 대한민국 특허 제10-1990475호로 등록되어 있고, 일본 제6854831호, 미국 US11,127,888로 등록되어 있어, 미국이나 일본 시장에서 지적 재산권 분쟁의 소지가 없으며, 이는 글로벌 대기업과의 기술적 경쟁에서 우위를 점할 수 있는 발판으로 기대된다.

Acknowledgement

This study has been supported by MOTIE funding program “Advanced Graduate Education for Management of Convergence Technology”.

References

- [1] Bae, H.J., Choi, P.J., Choi, Y.M., Kang, Y.J., and Kim, J.Y., Improvement of light extraction efficiency of LED using nanostructure, *The 42nd Winter Annual Conference of The Korean Vacuum Society*, 2012, pp. 398-398.
- [2] Cao, L., Xu, Z., Chan, J., Balaji, D., and Huang, X., Realizing full-spectrum LED lighting with a bright broadband cyan-green -emitting $\text{CaY}_2\text{ZrGaAl}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}^{3+}$ garnet phosphor, *Journal of Luminescence*, 2023, Vol. 263, 120015.
- [3] Han, J.H., Im, H.U., Kim, J.S., Yun, Y.G., and Lee, M.S., Development of LED peeling evaluation method through helium gas detection method *Korea Reliability Society*, 2011.06a. pp 163-171.
- [4] Kim, B.C., Park B.S., and Kim H.J., Implementation of Electrical and Optical characteristics based on new packaging in UV LED, *Smart Media Journal*, 2022, Vol. 11, No. 9, pp. 21-29.
- [5] Kim, J.Y., Lee, D.J., Jeong, T.B., Hyeon, D.H., and No, M.J., The Study about Optical Patterns of LED Package Surface for Light Efficiency, *The Korean Society of Mechanical Engineers, 2011 Autumn Conference Lecture and Paper Abstracts*, 2011, pp 1187-1190
- [6] Kim, Y.D., Kim, G., Heo, D.H., and Lee H., Improve-

- ment of light extraction efficiency of OLED using various optical- functional nano-structures, *Ceramist*, 2018, Vol. 21, No. 1, pp. 64-79.
- [7] Kwon, K.Y., Effect of an emitting-layer height on a photon extraction efficiency in LED, *Journal of the convergence on culture technology: JCCT*, Vol. 7, No. 1, pp. 564-569.
- [8] Luo, H.W., Chou, C.J., Chen, H.S., and Luo, M.R., Museum lighting with LEDs: Evaluation of lighting damage to contemporary photographic materials, *Lighting Research and Technology*, 2018, pp. 1-15.
- [9] Maeng, I.S., Won, H.S., Jang, M.H., and Lee, J.M., Pattern formation on the LED package for the enhancement of light extraction efficiency, *Proceedings of the 2006 Summer Conference of the Optical Society of Korea*, 2006 July 01, 2006, pp. 245-246.
- [10] Song, Y.J. and Hong, M.S., A Study on the Optimal Design for Optical Efficiency of LED, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 2011, Vol. 20, No.3, pp. 361-367.
- [11] Vyv Inc. (<https://vyv.tech>, 11 British American Blvd, New York US, 12110).
- [12] Yoon, J.H. and Lee, I.H., Technology of Luminous efficiency improvement for LED lighting, *Information Display*, 2018, Vol. 19, No. 1, pp. 14-21.
- [13] Yu, I.H., Song, I.S., Lee, J.Y., and Le, S.H., Intensifying the density of a horizontal electric field to improve light efficiency in a fringe-field switching liquid crystal display, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, Vol. 39, No. 11: 2367.

ORCID

Jong-Uk An | <http://orcid.org/0009-0002-8516-1286>

Tae-Kyu Kwon | <http://orcid.org/0000-0002-2755-2062>