

실험계획법 (DOE)에 의한 발광 스펙트럼 제어

(Control of emitting spectrum by design of experiments)

신기해*, 송상빈, 심재민, 김기훈, 이광철, 김재필

(Gi-Hae Shin, Sang-Bin Song, Jae-Min Sim, Ki-Hoon Kim, Kwang-Cheol Lee, Jae-Pil Kim)

요약

LED칩 (발광 피크: 405nm)과 4 종의 형광체 (Blue, Green, OrangeRed, Red)를 이용하여 D65 표준광원과 유사한 발광 스펙트럼을 가지는 광원을 제작하였다. 실험계획법을 활용하여 형광체 간에 교호작용과 농도 변화에 따른 스펙트럼의 형상 변화 경향을 파악할 수 있었으며, 이들 결과를 실험계획법에 의해 최적화함으로써 D65 표준광원과 유사한 스펙트럼을 가지는 광원을 제작할 수 있었다.

1. 서론

분광계측기는 빛의 물리적 성질을 이용하여 피 측정물의 여러 가지 특성을 알아내는 장비로서 대부분 표준광원을 탑재하고 있다. 표준광원의 종류는 국제조명위원회의 규정에 따라 표준광원A~F까지 여러 종류가 있으며, 사용 목적에 따라 광원의 종류가 달라지게 된다. 이러한 표준광원 중에서 A광원 (가스충전상태의 텅스텐 백열전구 표준)은 여러 분야에 활용도가 높은 광원으로서 표준 광원기, 표준 측색기, 조도계, 휘도계, 색차계 등에 사용되고 있다.[1] 최근에는 각종 필터, 렌즈, 유리 제조공정, 자동차 정비공업사 등에서 가시광 (VIS) 측정기로서 활용성이 증가하고 있으며 이 밖에도 신규 건설되는 건물에 유리 시공 수요가 많아짐에 따라 이를 검사하기 위한 측정기의 수요 또한 증가하고 있다. 그러나 기존의 표준광원은 부피가 크고 열이 많이 발생하는 등의 문제점을 안고 있어 휴대가능한 분광분석기 개발에 있어서는 새로운 형태의 표준광원이 요구되고 있다. 따라서 본 연구개발에서는 표준광원 A를 대체할 수 있는 LED 광원을 개발하고자 하였으며, 형광체간의 교호 작용 및 스펙트럼 형태를 제어하기 위하여 실험계획법을 활용하였다.[2]

2. 실험

LED 표준광원의 제작에 사용된 패키지는 3528(가로 35mm, 세로 28mm)형태의 open 패키지였으며, 칩은 Tekcore사의 표준 칩 (발광대역 400~405nm)을 사용하였다. 사용된 봉지재는 실리콘 봉지재(다우코팅: OE6550)였으며 형광체는 Blue, Green, OrangeRed의 경우 실리케이트 계열의 형광체 (Force4사)를 Red 형광체 (Dott technology사)는 나이트라이드 계열의 것을 사용하였다.

적용된 각각의 형광체에 대한 발광 스펙트럼은 그림 1과 같으며, Blue, Green, OrangeRed, Red형

광체의 발광 피크는 각각 460nm 490nm, 540nm, 570nm 그리고 630nm 이었다.

제작된 광원의 광 특성 측정에 사용된 장비는 Instrument System사의 CAS 140CT이다.

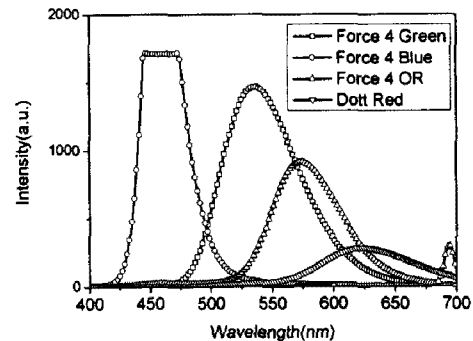


그림 1. Blue, Green, OrangeRed, Red에 대한 발광스펙트럼

다수의 요인이 있는 실험에서 주효과와 상호효과를 조사할 경우 널리 사용되는 실험계획법으로써 요인설계(factorial design)법을 들 수 있다.[3] 본 실험에서는 실험계획법은 4인자, 2수준 완전요인 설계법을 이용하여 수행하였으며, 사용된 프로그램은 MINITAB 15.1 한글 version 이었다. 각 인자의 수준은 예비 실험을 통하여 결정하였으며, Blue형광체의 경우 23, 27wt%, Green의 형광체의 경우 5, 7wt%, OrangeRed 형광체의 경우 1.0, 1.2wt%, Red 형광체의 경우 1.2, 1.4wt%였다. 실험계획법의 특성 값인 결과치는 지정 파장 (405nm, 460nm 490nm, 540nm, 570nm, 630nm)의 상대 강도를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 실험계획법의 실험 조건에 따른 지정 파장의 상대 강도를 나타낸 것이다. 지정 파장은 405, 460, 490, 540, 570, 630nm 이었으며, 이들 파장의 상대강도는 630nm의 스펙트럼 강도를 1로 하였을 때의 상대 비로 나타내었다.

표 1. 실험 계획법에 의한 결과

번	형광체 첨가량(wt%)				피크 파장에서 상대 강도					
	B	G	O	R	405	460	490	540	570	630
1	23	5	1.0	1.2	0.2280	0.5161	0.4172	0.7258	0.7796	1
2	27	5	1.0	1.2	0.1071	0.3827	0.3188	0.5990	0.7411	1
3	23	7	1.0	1.2	0.0984	0.2681	0.2937	0.7016	0.8220	1
4	27	7	1.0	1.2	0.1131	0.4025	0.4206	0.9063	0.9438	1
5	23	5	1.2	1.2	0.2477	0.4019	0.3360	0.6308	0.7804	1
6	27	5	1.2	1.2	0.1069	0.4508	0.3735	0.6825	0.8466	1
7	23	7	1.2	1.2	0.1526	0.3789	0.3703	0.7943	0.9257	1
8	27	7	1.2	1.2	0.0788	0.2880	0.3315	0.8043	0.9130	1
9	23	5	1.0	1.4	0.1894	0.5303	0.4384	0.7576	0.8636	1
10	27	5	1.0	1.4	0.0799	0.2990	0.3005	0.6583	0.7638	1
11	23	7	1.0	1.4	0.1129	0.2925	0.3145	0.7419	0.8817	1
	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

그림 2는 실험 순서에 대한 외적스튜던트화 잔차를 나타낸 그림이다. 실험 순서에 대한 외적 스튜던트화 잔차는 대부분의 실험이 -3부터 3사이에 위치하여 실험이 매우 잘 진행되었음을 나타내었다. 일반적으로 외적 스튜던트화 잔차는 -3부터 3사이에 데이터가 위치하면 매우 경향성 있는 실험이 진행되었음을 의미하는 것으로 신뢰도가 95% 이상이다.[2]

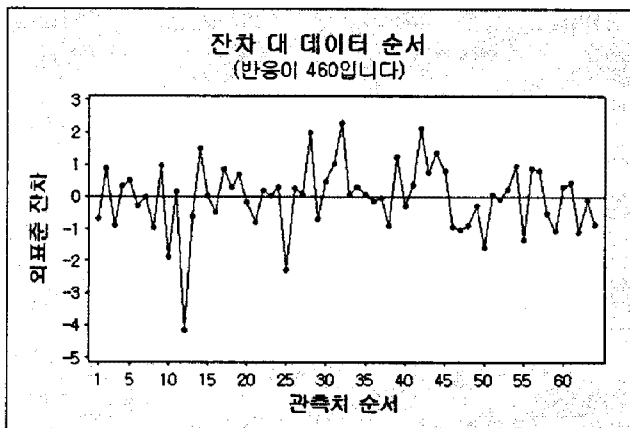


그림 2. 상대강도 460nm의 실험 순서별 외적스튜던트화 잔차

그림 3은 본 실험 범위의 형광체 첨가 농도에서 특정 파장에서의 주효과도를 나타낸 것이다. 460nm에서는 청색 형광체 보다 Green형광체에 대한 효과가 가장 크게 나타났으며 이는 Green형광체의 여기 파장이 405nm 근처와 460nm 근처에 넓게 걸쳐 있기 때문으로 사료된다.

이 밖에도 490nm에서는 Blue와 OrangeRed 형

광체가 상대 강도에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 540과 570nm에서는 Green 형광체가 가장 영향을 크게 미치는 영향인자로 나타났다. 한편 630nm에서는 상대 강도를 모두 1로 가정하였기 때문에 4종의 형광체 모두 주효과도에서 큰 차이를 보이지 않았다.

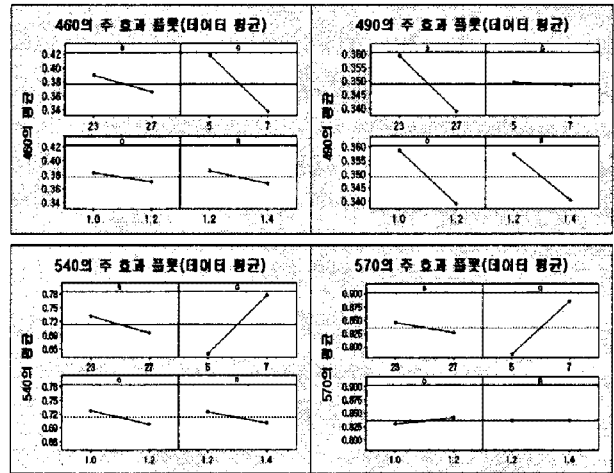


그림 3. 지정 파장에서의 상대강도에 대한 주효과도

그림 4는 지정된 피크의 상대 강도에 대한 interaction plot을 나타낸 것인데 일부 형광체 상호간에 교호작용이 매우 큼을 알 수 있다. 먼저 가장 큰 교호 작용을 보이는 형광체는 Blue형광체와 OrangeRed, Red 형광체로 Blue 형광체가 발광하는 빛을 OrangeRed와 Red 형광체가 다시 여기 광원으로 사용하여 발광하기 때문으로 사료된다. 이밖에도 490nm에서 Blue 형광체와 Green형광체도 매우 큰 교호 작용을 보이는데 이 또한 앞선 설명과 비슷한 원인에 의한 것으로 생각된다.

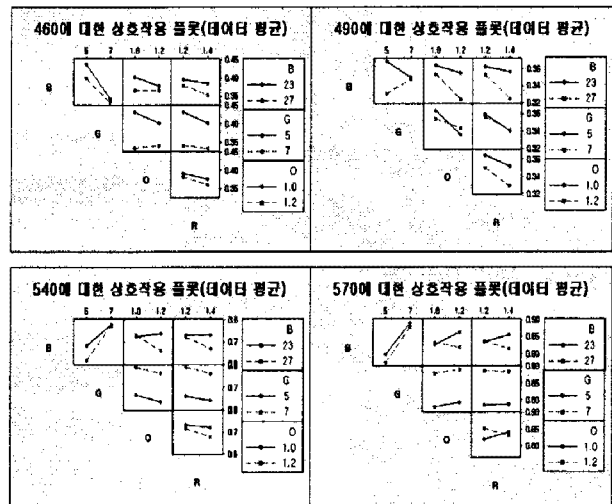


그림 4. 지정 파장에서의 상대강도에 대한 interaction plot

그림 5는 실험계획법에 의한 최적화 결과로 4종의 형광체 조성을 변화시켜 표준광원과 유사한 형태의 스펙트럼을 가질 수 있도록 나타내었다. 지정된 파장의 상대 강도가 표준광원의 상대강도에 가장 유사하게 최적화 되면 첨가되는 형광체의 양을 역을 산출할 수 있는데 최적의 형광체 조합은 Blue: 27wt%, Green: 5wt%, OrangeRed: 1.0wt% 그리고 Red: 1.2wt%임을 알 수 있었다.

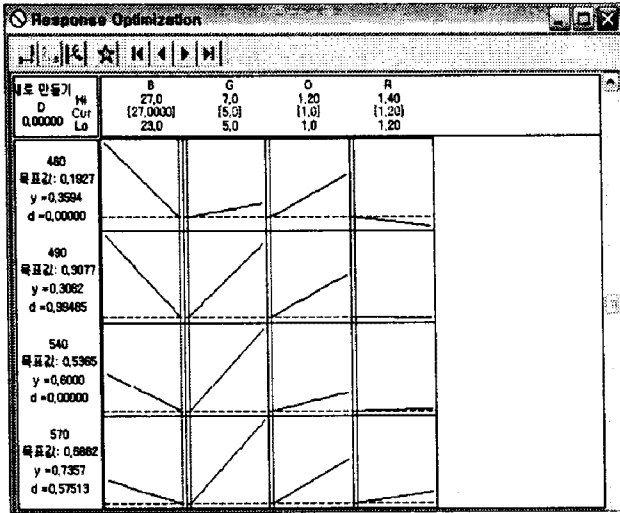


그림 5. 최적화 도구를 이용한 최적의 형광체 조합

그림 6은 실험계획법에서 얻은 스펙트럼과 실제 제작한 광원의 스펙트럼을 비교한 것이다.(B 25 이 2가지 스펙트럼이 유사하다는 것을 알 수 있었다. 즉, 실험계획법을 활용하여 광원의 제작에 있어 신뢰성이 높다는 것이다.

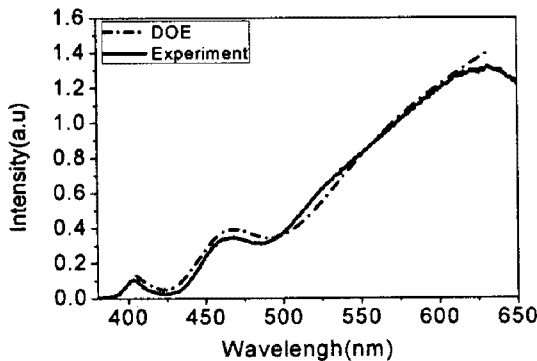


그림 6. D65 표준광원을 기준으로 최적화된 스펙트럼 와 제작된 LED의 스펙트럼 비교

그림 7~10은 4가지 형광체(Blue, Green, OrangeRed, Red) 중 1가지 형광체 첨가 농도를 일정하게 증가시켜 상대 강도의 변화를 나타낸 것이다. 형광체 첨가 농도가 증가할수록 상대 강도는 파장에 따라 다르게 변화하였다.

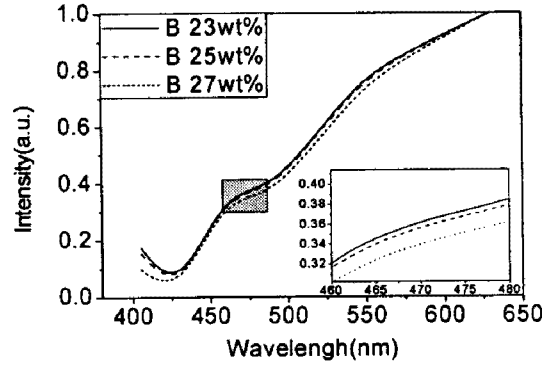


그림 7. Blue 형광체 첨가 농도 변화에 인한 스펙트럼 변화 (G: 6wt%, OR: 1.1wt%, R: 1.3wt%)

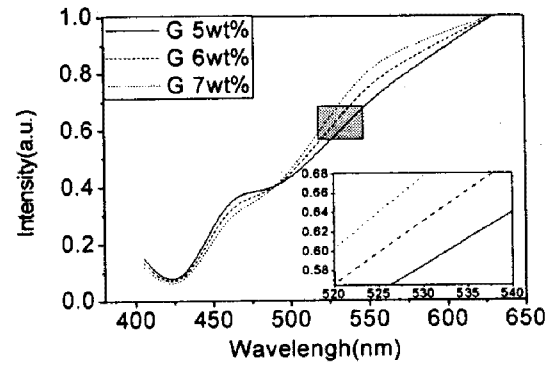


그림 8. Green 형광체 첨가 농도 변화에 따른 스펙트럼 변화 (B: 25wt%, OR: 1.1wt%, R: 1.3wt%)

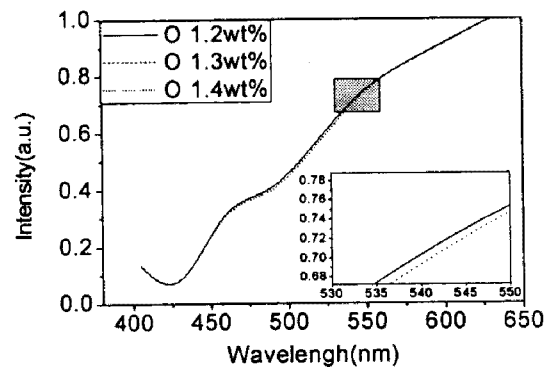


그림 9. OrangeRed 형광체 첨가 농도 변화에 따른 스펙트럼 변화 (B: 25wt%, G: 6wt%, R: 1.3wt%)

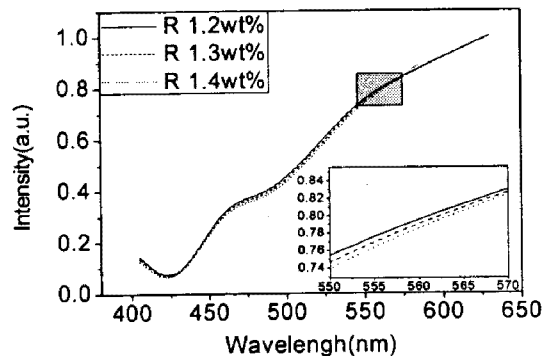


그림 10. Red 형광체 첨가 농도 변화에 따른 스펙트럼 변화 (B: 25wt%, G: 6wt% OR: 1.1wt%)

특히 전체 파장에서 Green 형광체 첨가 농도에 따른 스펙트럼의 변화가 크게 나타나고, 다른 형광체도 약간의 변화를 나타낸다. 이와 같이 3가지 형광체 첨가 농도가 고정되더라도 1가지 형광체 첨가 농도가 변화하게 되면 상대 강도의 변화가 나타났다. 즉, 1가지 형광체라도 전체 파장에 영향을 끼는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 실험에서 실험계획법(DOE)에 의한 발광 광원 스펙트럼 제어에 대해 연구하였다. D65 표준 광원을 대체할 수 있는 발광 스펙트럼을 가진 광원을 제작하였다. 실험계획법에 의해 최적화된 형광체 농도 조합과 그 조합으로 실제 제작한 표준 광원의 스펙트럼이 유사하다는 것을 볼 수 있었다. 즉, 실험계획법을 활용한 최적화 결과로 실제 제작해 보지 못한 광원의 형광체 첨가 농도를 조합하여 원하는 스펙트럼을 가진 광원을 제작할 수 있다는 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 김진한, "색채의 원리", 시공사, pp. 25, 2002.
- (2) 임용빈/박성현/안병진/김영일, "실용적인 실험계획법", pp. 2~14, 자유아카데미, 2008.
- (3) Ratmond H.Myers, Douglas C.Montgomery, "Response Surface Methodology Process and Product Optimizaton Using Designed Experiments", Wiley series in probability and statistics.