



저작자표시-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

치의학 석사학위논문

**시뮬레이션을 이용한 색조 가이드 색구별  
능력을 최대화하는 LED 광원의 탐색**

2013년 2월

서울대학교 대학원  
치의학대학원 치의학과  
김창균

국문초록

## 시뮬레이션을 이용한 색조가이드 색구별 능력을 최대화하는 LED광원의 탐색

서울대학교 치의학대학원

치 의 학 과

김 창 균

본 논문에서는 색조가이드 선택 시 색조탭 간의 색구별 능력에 있어서 LED조명이 미치는 영향을 평가하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 색조가이드의 색구별 능력을 최대화하는 LED광원의 분광함수를 탐색하고자 하였다.

분광복사계를 이용하여 적색, 녹색, 청색의 단일색 LED와 형광체 도포 방식의 백색 LED에 대한 분광함수와 Vitapan 3D master의 26개의 색조탭에 대한 분광반사율 곡선을 측정하였다. 이를 이용하여 각각의 LED 광원에 대하여 색조탭 모두의 CIELAB 색좌표를 계산한 후, 인접 색조탭 간의 색차( $\Delta E^*$ )를 구하였다. 비교를 위하여 표준광원(D65)에 대하여 동일한 방식으로 색조가이드의 색구별 능력을 평가하였다.

또한, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 단위 LED를 조합하여 새로운 조명을 만들고 이에 대한 색조가이드의 색구별능력을 평가하는 방법을 이용하여, 단위 LED의 개수를 10000개까지 늘려가면서 인접 색조탭 간의 색차( $\Delta E^*$ )가 최대화되는 최적화된 LED의 조합을 구하였다.

적색,녹색,청색의 단일색 LED의 경우 표준광원에 비하여 색조탭 간의 색구별능력이 떨어졌으며( $p < 0.001$ ), 백색LED의 경우에는 표준광원과 비교하여 통계적으로 유의할만한 차이를 보이지 않았다.

또한, 녹색 LED와 청색 LED를 1724개와 8276개를 조합하였을 때 인접색조탭 간의 색차( $\Delta E^*$ )가 5.046으로 최대값을 가졌고, 이는 표준광원에 대해서 인접색조탭 간의 색차( $\Delta E^*$ )가 4.260인 것과 비교하여 크게 개선된 것이다.( $p < 0.001$ )

단일색 LED의 경우 좁은 파장영역으로 인해서 색조가이드의 색구별능력이 떨어지나, 파장영역의 분포를 넓게 해줄 경우 색구별능력을 개선시킬 수 있다. 녹색과 청색 LED를 1:4.8의 비율로 조합할 경우 색구별능력을 최대화하는 것으로 나타났다.

주요어 : 색조 가이드, LED 조명, 시뮬레이션, 광원 최적화

학 번 : 2009-22670

## 목 차

1. 서론 .....	1
2. 방법 .....	4
3. 결과 .....	8
4. 논의 .....	13
5. 결론 .....	14
6. 참고문헌 .....	15

# 1. 서 론 (Introduction)

심미적인 보철물의 목표는 사회적 요구에 부응하는 형태학적, 광학적, 생물학적인 특성을 달성하는데 있다. 최근 치아 색을 가진 보철물에 대한 수요가 크게 증가하면서<sup>1)</sup> 치아보철물의 제작에 있어서 정확한 치아 색상의 재현은 매우 중요한 성패요인으로 대두되고 있다. 보철물의 색상은 비록 생리적인 적합성에는 영향을 미치지 않으나 환자의 동의에 있어서는 때론 가장 중요한 요인이 되기도 한다.

치아의 색상 평가는 크게 색조 가이드를 참고하여 육안으로 평가하는 전통적인 방법과 치아의 색상을 평가하는 장비를 이용한 기계적인 방법으로 나뉜다. 전자의 방법이 보다 흔히 사용되고 있으나 측색장비를 이용하는 기계적인 방법이 더 정확하고 보다 재현 가능한 결과를 보여준다.<sup>2)3)4)</sup>

자연치아의 색상을 평가하고 심미수복재료를 통해 재현하는 데 있어서 다양한 색조 가이드 시스템이 사용되고 있다. 그 중에서도 명도, 채도, 색상에 따라 체계적으로 제작된 Vitapan 3D-Master shade guide (VITA Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany)는 자연치의 색상재현에 있어서 상대적으로 coverage error가 낮은 우수한 시스템으로 평가받고 있다.<sup>5)</sup>

치아 및 색조 가이드의 색상을 평가하는 데 사용되는 측색장비로는 흔히 분광광도계(Spectrophotometer)와 분광복사계(Spectroradiometer) 등이 사용된다. 그러나 작은 조리개를 가진 분광광도계를 이용하여 치아의 색상을 평가할 경우 빛의 가장자리 손실효과(edge-loss errors)에 의해 계통오차를 일으킬 수 있다.<sup>6)</sup> 가장자리 손실효과는 조명과 색이 측정이 작은 조리개를 통해 이루어지는 경우, 시편을 통해 들어간 빛의 상당량이 시편의 반투명한 부분에서 산란되어 맨눈으로는 보이던 것이 센서에 의해서는 측정되지 않는 현상을 가리킨다.

뿐만 아니라 치아의 색상은 치아의 크기, 형태, 표면 구조에 따라 달라지는 빛의 반사패턴에 따라 영향을 받는다.<sup>7)</sup> 분광광도계의 경우 편평한 표면을 가진 물체의 색을 측정하기 위해 고안되었기 때문에, 치아나 색조 가이드와 같이 둥글고 불규칙한 표면을 가진 물체의 색을 측정하는데 있어서는 한계를 가지고 있다.<sup>8)</sup> 따라서, 치아의 색좌표를 보다 정확히 측정하기 위해서는 분광복사계의 사용이 추천되며 동일한 이유로 색조 가이드의 색좌표 측정 시에도 분광복사계를 사용하는 것이 보다 정확한 값을 얻는데 유리하다.<sup>9)</sup>

색상을 올바르게 평가하기 위해서는 색을 표현하고 측정하기 위한 척도에 대한 이해가 필요하다. CIE 1976  $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 색공간은 색상을 ( $L^*, a^*, b^*$ )의 3가지 축을 가진 극좌표를 통해 표현된다.<sup>10)</sup>  $L^*$ 은 명도를 나타내고,  $a^*$ 는 적색-녹색축( $+a^*$ 는 적색,  $-a^*$ 는 녹색),  $b^*$ 는 황색-청색축( $+b^*$ 는 황색,  $-b^*$ 는 청색)을 가리키며, 광원 및 물체, 관측자의 분광함수를 이용하여 다음과 같이 도출된다.

CIEXYZ 삼자극치의 계산	CIELAB 색좌표 값의 계산
$X = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \Delta \lambda$	$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$
$Y = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda$	$a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$
$Z = k \sum_{\lambda} S_{\lambda} R_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \Delta \lambda$	$b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$
$k = 100 / (\sum_{\lambda} S_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \Delta \lambda)$	

이 때, S는 광원의 상대분광에너지분포, R은 물체의 분광반사율계수, x, y, z는 표준관측자 컬러매칭함수를 가리키며,  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$ 은 표준 백색에 대한 삼자극치 값을 가리킨다.

CIELAB 색좌표의 계산에는 흔히 약 2°의 시야각에 대해 정의된 CIE 1931 표준관측자와 10°의 시야각에 해당하는 CIE 1964 표준관측자가 사용된다. 비록 CIE 1964 표준관측자가 보다 많은 관측자에 기

초하고 있으나, 시야각이 4° 이하인 관측조건에 있어서는 간상체 간섭으로 인해 Grassmann의 비례법칙이 성립하지 않아 오류가 발생하므로, 치아나 색조 가이드와 같이 작은 물체를 관찰하는 경우 CIE 1931 표준관측자의 사용이 보다 유효한 정보를 제공한다.

CIELAB 색공간은 지각적으로 등간격성을 가지도록 고안된 색공간으로 두 물체의 색차( $\Delta E_{ab}^*$ )를 CIELAB 색공간 내에서 두 물체가 가지는 색좌표 사이의 거리로 나타낼 수 있다.

즉,  $\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L_{ab}^*)^2 + (\Delta a_{ab}^*)^2 + (\Delta b_{ab}^*)^2]^{1/2}$  으로 나타낼 수 있다.

색차( $\Delta E_{ab}^*$ )의 값이 커질수록 색구별이 용이해지는 것을 의미하는데, 관용적으로 인간이 분별할 수 있는 가장 작은 차이를  $\Delta E^*=1$ 이라고 하였으나, Douglas등에 의하면 임상실험환경에서 분광복사계를 가지고 측정된 결과 50%의 사람에 대한 최소식별역(Perceptible threshold)은  $\Delta E^*=2.6$ 이라고 한다.<sup>11)</sup>

물체의 색상은 반사되거나 투과된 광원의 종류에 따라 영향을 받으며 따라서 광원의 특성은 색상의 평가에 중요한 영향을 미친다. 이른바 조건동색(metamerism)의 원리에 따라 임상환경에서 완벽하게 재현했다고 판단했던 치아의 색상이 환자가 일상생활 속에서 접하게 되는 다양한 조명 속에서는 부정확한 것으로 나타날 수 있는 것이다.

최근 LED 조명이 일반화되면서 치과 임상환경에서 기존의 조명을 대체하고 있을 뿐 아니라 일상생활에서도 많이 접할 수 있게 되었다. LED 조명의 경우 수명이 길고 전력소모가 작으며 안정성이 높다는 장점이 있으나 특유의 좁은 파장영역으로 인해 연색성이 낮다는 단점을 가지고 있으며 이를 개선하기 위해 다양한 방법이 시도되고 있다.

본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 색조 가이드 선택 시 기존 LED 조명의 적합성을 살펴보고, 서로 다른 분광분포를 가진 LED의 조합을 통해서 색조 가이드의 색구별 능력을 최대화하는 새로운 LED광원을 탐색하였다.



## 2. 방 법 (Meterial and Methods)

분광복사계를 통하여 측정한 광원 및 색조 가이드의 스펙트럼을 이용하면 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 색조 가이드 내의 색조 탭간의 색차를 계산하여 각 광원에 의한 색조 가이드의 색구별 능력을 평가할 수 있다.

먼저 시중에서 판매되는 적, 녹, 청, 백색의 조명용 LED를 구하여 이들에 의한 색조 가이드의 색구별 능력을 평가하였다. 이를 위해 적, 녹, 청, 백색의 LED에 대하여 분광복사계(Photo Research PR655)를 이용하여 표준 백색타일(CM-A101W, Konica Minolta Sensing, Inc. Osaka, Japan)을 이용하여 스펙트럼을 측정하였다.

실험에 사용된 적, 녹, 청색의 LED의 경우 각각 630, 520, 460nm에서 peak를 가지는 monochromatic LED였으며, 백색 LED의 경우 460nm에서 최대 peak를 가지고 560nm에서 두 번째 peak를 가지는 dichromatic LED였으며, 이들의 분광함수를 그림1a에 나타내었다. 연구에 사용된 표준광원 D65(F2DT12.65)의 분광함수는 그림1b와 같았다.

표준광원 D65(F2DT12.65, Gretagmacbet, Research Triangle Park, NC)하에서 색조 가이드를 구성하는 26개의 색조 탭에 대한 반사스펙트럼을 측정한 후 표준 백색 타일(standard white tile)에 대한 반사스펙트럼과 비교하여 이들 각각의 색조 탭의 분광 반사율 곡선을 구하였다.(그림2)

측정에 앞서 각각의 탭을 항상 일정한 위치에 고정할 수 있도록 거치대를 제작하였고, Light Booth(Color Sense II, Sungjin Hi-Tech, Gyeonggi-Do, South Korea, 그림1b)의 가운데 광원에 잘 노출되는 곳에 놓았다.

그림1a. LED광원의 분광분포곡선

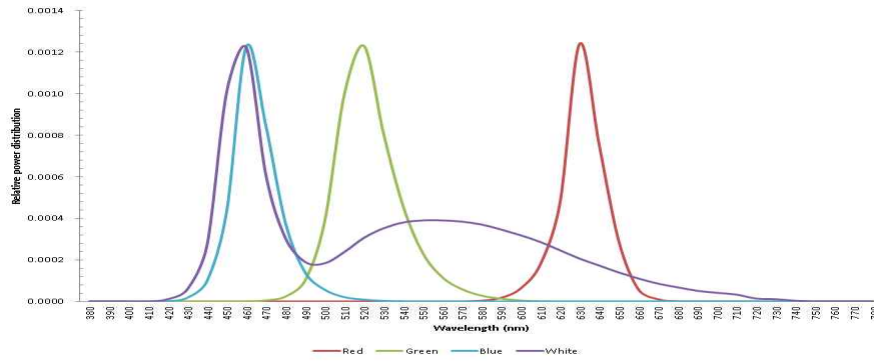


그림1b. 표준광원(D65)의 분광분포곡선

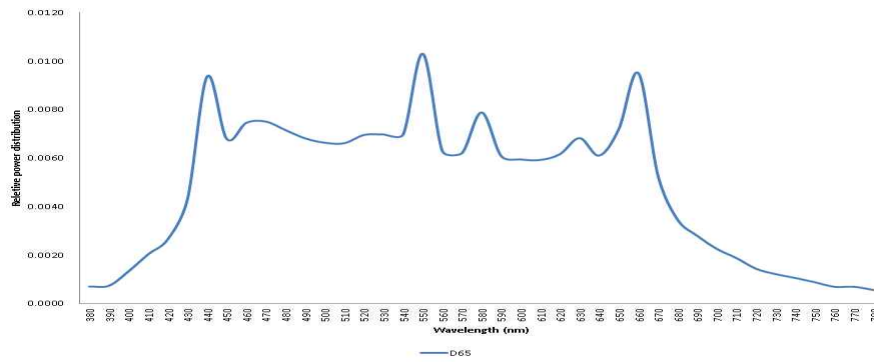
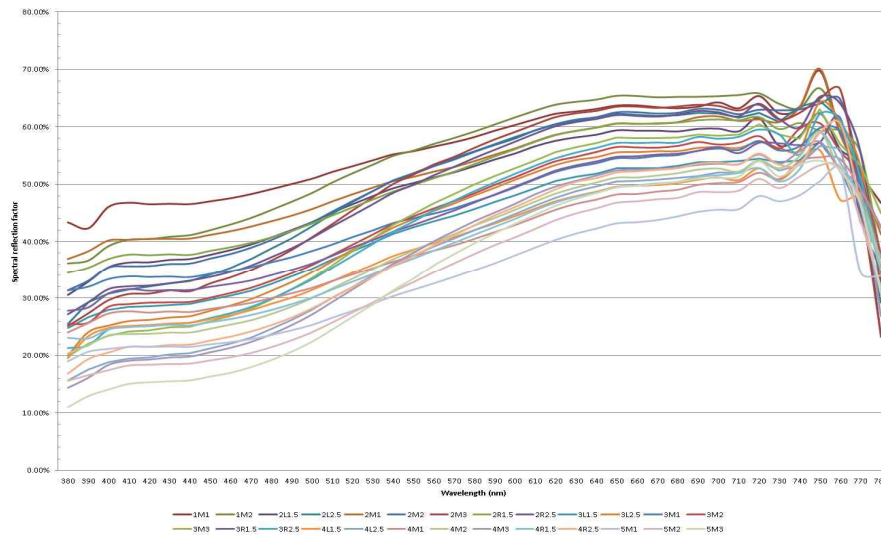


그림2. Vitapan 3D Master 색조 가이드 시스템의 분광반사율 곡선



모든 측정은 1931년 CIE표준 관측조건 중 45도 조명과 수직 관측 조건에 따라 광원의 조사각도는 45도가 되도록 하였고, 관측은 색조 탭에 대하여 수직이 되도록 하였다. 이때 조도의 차이로 인한 영향을 제거하기 위하여 조도 측정계를 이용하여 일정한 조도값(1880 lumen)을 갖도록 광원의 세기를 조절하였다.

이렇게 측정된 광원의 분광함수, 색조 가이드의 분광반사율곡선과 CIE 1931 표준관측함수를 이용하면 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 각 광원에 대해 모든 색조탭들이 가지는 색좌표를 계산할 수 있으며, 다시 이를 이용하여 서로 다른 2개의 색조 탭이 가지는 색차를 계산할 수 있게 된다.

총 26개의 색조 탭 중에서 2개의 색조 탭의 쌍을 고르는 조합은 총  $325(=_{26}C_2)$ 개가 있으나, 이들 325개의 조합 중에서도 서로 명도, 채도, 색상이 가장 비슷한 인접한 색조 탭을 선택하는 경우의 수는 표1과 같이 64쌍의 색조 탭의 조합을 가진다.

적, 녹, 청, 백색의 LED 각각에 대하여 이들 64쌍의 색조 탭간의 조합에 대한 색차를 계산하고, 이를 표준광원 D65와 비교하여 각각의 LED광원이 색조 가이드의 색구별 능력에 미치는 영향을 평가하였다.

색구별 능력을 평가하기 위해서는 두가지 척도를 사용하였는데, 하나는 64쌍의 색조탭의 조합에 대한 색차의 평균값이고, 또 다른 하나는 64쌍의 색조탭의 조합 중에서 식별역( $\Delta E_{ab}^* < 2.6$ )보다 작은 색차를 가지는 조합의 개수를 사용하였다. 전자의 경우 그 값이 클수록, 후자의 경우 그 값이 작을수록 색구별 능력이 우수한 것으로 볼 수 있다.

적, 녹, 청, 백색의 LED를 조합할 경우 새로운 분광함수를 가지는 광원을 만들 수 있는데, 조합하는 비율을 서로 달리할 경우 다양한 광원을 만들어 낼 수 있다.



### 3. 결 과 (Results)

적, 녹, 청, 백색 LED 조명에서 Vitapan 3D master 색조 가이드의 인접 색조탭 간의 비교시 색차의 평균값과 표준편차는 표2와 같았다.

백색>청색>녹색>적색의 순으로 평균값이 컸으며, 색차가 최소 식별 역보다 작은 경우( $\Delta E_{ab}^* < 2.6$ )의 수는 역순으로 나타났다.

표준조명 D65 아래서 인접색조탭간의 색차의 평균값은 4.260으로 나타났으며, LED 조명과 대응표본 t검정시 적, 녹, 청색 LED의 경우 통계적으로 유의한 차이( $p < 0.001$ )를 보였으나 백색 LED의 경우에는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다.

이를 인접 색조탭 간의 인접한 방향, 즉, 명도, 채도, 색상으로 나누어서 살펴본 결과를 그림3에 나타내었다. 그림3a는 평균 색차의 변화를 나타내었고, 그림3b는 인접색조탭간의 색차가 최소식별역보다 작은 경우( $\Delta E_{ab}^* < 2.6$ )의 수를 나타내었다.

인접채도간 비교시 또는 인접색상간 비교시에는 동일하게 D65=백색>청색>녹색>적색의 경향을 나타냈으나, 인접명도간 비교시에는 청색>녹색>D65=백색>적색의 경향을 나타내었다.

표2. LED 조명과 표준조명 하에서의 인접 색조탭의 색차 비교

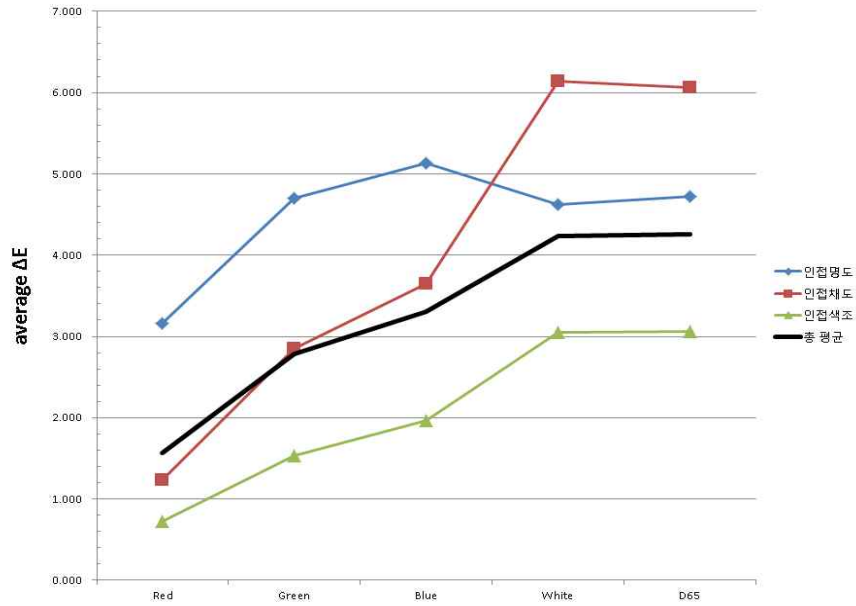
조명의 종류	Red	Green	Blue	White	D65
평균	1.563	2.783	3.299	4.240	4.260
표준편차	1.198	1.497	1.611	1.569	1.525
$\Delta E^* < 2.6$ 인 경우	49/64	36/64	27/64	11/64	12/64

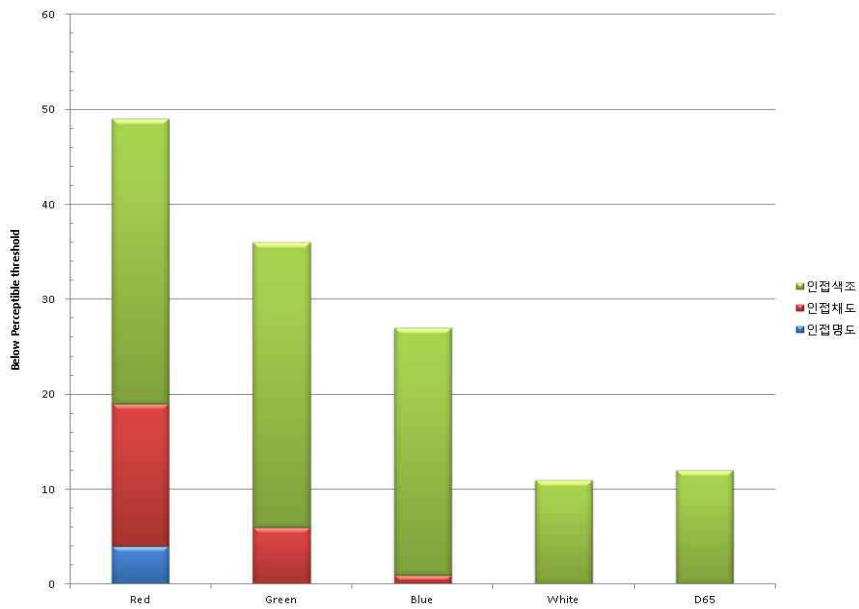
	평균	표준 편차	신뢰구간(95%)		t	F	p-value (양쪽)
			하한	상한			
Red - D65	-2.697	1.541	-3.082	-2.312	-14.00	63	<0.001
Green - D65	-1.477	1.306	-1.804	-1.151	-9.05	63	<0.001
Blue - D65	-0.961	1.145	-1.247	-0.675	-6.71	63	<0.001
White - D65	-0.020	0.138	-0.055	0.014	-1.17	63	0.248

그림3. 명도, 채도, 색상에 따른 인접 색조탭의 비교

a. 평균 색차( $\Delta E^*$ )



b. 최소식별역 이하인 경우의 수



사용한 LED광원의 총 개수에 따라 색조 탭 간의 색차가 가장 크게 나오는 조합과 그 때의 색차의 평균값을 표3에 나타내었다.

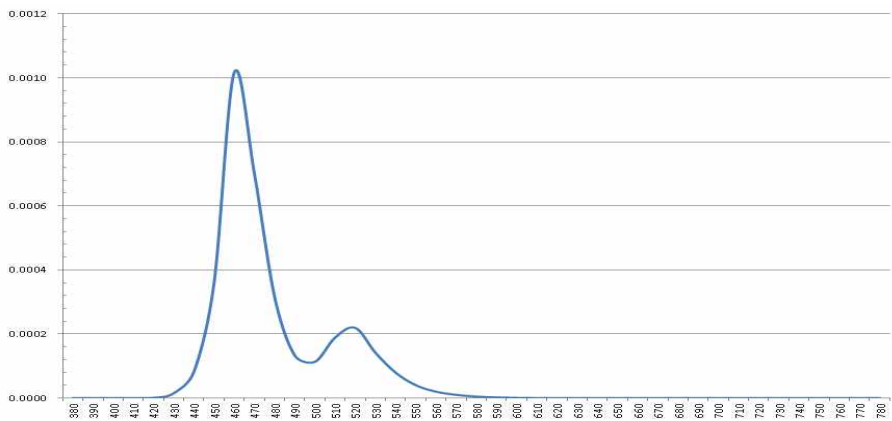
LED광원 1개만을 사용할 경우 백색LED 사용시 인접 색조탭간의 색차가 4.240으로 최대화가 되었으며, 광원의 개수를 늘어감에 따라 인접 색조탭간의 색차는 점차 증가시킬 수 있었다.

사용하는 총 LED의 개수를 10000개로 하였을 경우 녹색(Green) LED와 청색(Blue) LED가 각각 1724개와 8276개의 조합에서 최적의 조합을 갖는 것으로 나타나는 등 (적:녹:청:백)의 비율이 대략 (0:1:4.8:0)의 비율로 조합을 했을 때 인접 색조탭 간의 색차( $\Delta E_{ab}^*$ )가 약 5.046으로 가장 극대화되는 것으로 나타났다.

표3. LED광원의 개수에 따른 최적화된 조합

총 개수	1	2	5	10	20	50	100	10000
Red	0	1	0	0	0	0	0	0
Green	0	0	1	2	3	9	17	1724
Blue	0	0	4	8	17	41	83	8276
White	1	1	0	0	0	0	0	0
average $\Delta E$	4.240	4.356	5.031	5.031	5.032	5.045	5.045	5.046
$\Delta E < 2.6$	11	10	8	8	8	8	8	8

그림4. 최적화된 광원(Opt)의 스펙트럼

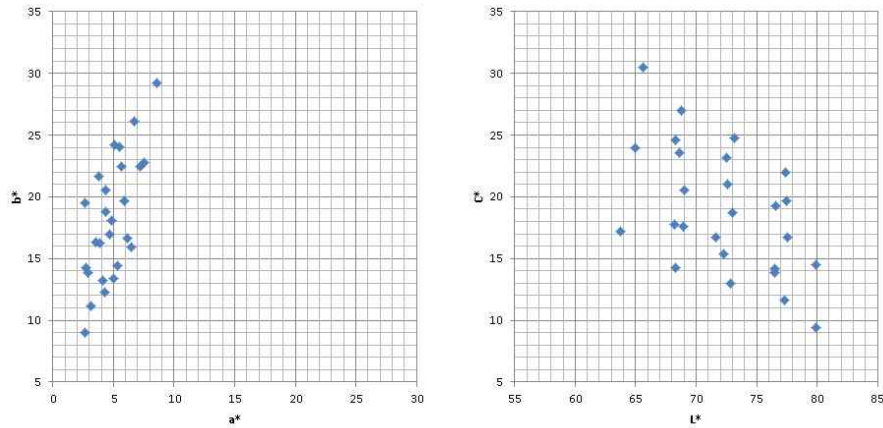


이렇게 최적화된 광원(Opt)의 스펙트럼을 그림4에 나타내었다.

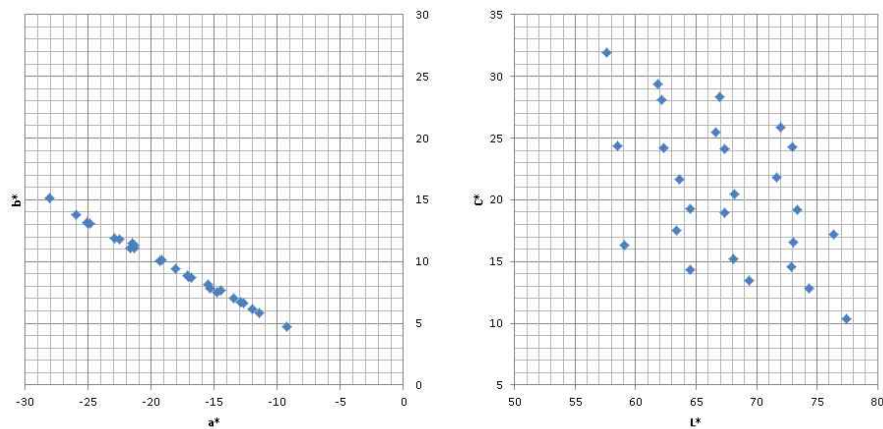
최적화된 광원의 분광함수는 460nm의 파장영역에서 최대 peak를 나타내었으며, 520nm의 파장영역에서 작은 두 번째 peak를 나타내었으며, 600nm이상의 장파장영역에서는 거의 0에 가까운 값을 가지고 있었다.

최적화된 광원(Opt)과 표준광원(D65) 아래에서 Vitapan 3D master 색조 가이드 전체에 대한 CIELAB 색좌표의 분포를 그림5에 나타내었다.

그림5. a. 표준광원(D65)에서의 색조 가이드의 색분포



b. 최적광원(Opt)에서의 색조 가이드의 색분포





색좌표를 L\*축과 C\*축에 나타냈을 경우 최적광원이 표준광원에 비해 보다 넓은 범위에 분포하고 있었고, a\*축과 b\*축에 나타냈을 경우 최적광원이 표준광원에 비해서 좁고 긴 분포를 가지고 있었다.

표4에는 64쌍의 인접색조택 간의 비교에 있어서 최적광원과 표준광원에서의 색차의 평균값을 비교해 보았다.

색차의 평균은 표준광원의 경우 4.260, 최적광원의 경우 5.046이었으며 대응표본 t검정시 통계적으로 유의하게 차이를 보였다. ( $p < 0.001$ )

명도, 채도, 색상으로 나누어 살펴보았을 경우 인접명도의 경우 표준광원의 색차의 평균은 4.724, 최적광원의 색차의 평균은 5.099로 나타났으며, 인접채도의 경우에는 표준광원의 색차의 평균은 6.067, 최적광원의 색차의 평균은 7.509, 인접색상의 경우에는 표준광원의 색차의 평균은 3.063, 최적광원의 색차의 평균은 3.782로 나타났다. 각각 대응표본 t검정시 통계적으로 유의한 차이를 보였다. ( $p < 0.001$ )

표4. 최적광원과 표준광원에서의 색조택간의 색차 평균 비교

ΔE	D65	Opt	Opt-D65	표준 편차	t	F	p-value
인접명도	4.724	5.099	0.375	0.203	8.033	18	<0.001
인접채도	6.067	7.509	1.442	0.456	12.256	14	<0.001
인접색조	3.063	3.782	0.719	0.929	4.241	29	<0.001
총 평균	4.260	5.046	0.786	0.781	8.048	63	<0.001

## 4. 논의(Discussion)

적, 녹, 청색 LED와 같은 Monochromatic LED 조명의 경우 표준조명에 비해 색조 가이드의 색구별 능력이 크게 떨어졌다. 특히 인접 채도 및 색상 비교시 LED 조명의 좁은 분광분포가 색구별을 어렵게 하는 것으로 나타났다. 상대적으로 인접 명도 구별 시에는 LED 조명의 좁은 분광분포가 미치는 영향이 작았으며, 녹색과 청색 LED의 경우 오히려 표준조명에 비해서 명도 구별에 있어서 더 나은 것으로 나타났다.

Dichromatic LED 조명에 해당하는 백색 LED의 경우에는 표준광원과 색구별 능력에 있어서 통계적으로 의미있는 차이를 보이지 않았다.

일반적으로 연색성을 개선하기 위해서 R-G-B방식의 Trichromatic LED 조명이 많이 사용되나 색조 가이드의 색구별에 있어서는 Red에 해당하는 장파장영역이 많이 감소가 된 Dichromatic LED인 백색 LED의 사용만으로도 표준광원과 비슷한 효과를 얻을 수 있음을 보여 준다.

Vitapan 3D Master 색조 가이드의 색구별에 최적화된 LED 조명은 460nm의 파장영역에서 최대 peak를 나타내었으며, 520nm의 파장영역에서 작은 두 번째 peak를 갖는 청색 LED와 녹색 LED를 4.8:1의 비율로 조합한 분광특성을 가지는 것으로 나타났다.

이와 같이 최적화된 광원의 경우 표준광원과 비교하여 크게 개선된 색구별 능력을 가졌으며 통계적으로도 유의하였다. 비교조건에 따라 나누어 명도 비교, 채도 비교, 색상 비교로 나누었을 경우 모든 조건에서 표준광원에 비해 개선된 색구별 능력을 가지는 것으로 나타났다.

한가지 유의해야 할 것은 최적화된 광원이 색의 비교에 있어서 유리한 것이지 정확한 색을 알기에 적합한 것은 아니라는 점이다. 최적광원에서 측정한 명도, 채도, 색상은 색의 차이를 극대화시키기 위해 과장된 값을 가지게 되는 것이다.

즉, 최적광원을 임상환경에서 주 조명으로 사용하기에는 무리가 있으며 조건등색(Metamerism)으로 인한 색상선택의 실패를 줄이기 위한 보조광원으로 사용하는 것이 좋을 것이다.

이 연구에서는 적, 녹, 청색의 630, 520, 460nm에서 peak를 갖는 3가지 종류의 Monochromatic LED와 Dichromatic 백색 LED만을 사용하여 최적화된 광원의 분광분포를 탐색하였다. 4가지 종류의 LED만으로도 표준광원보다 색조 가이드의 색구별 능력에 있어서 극대화된 분광분포를 탐색하여 냈지만, 사용하는 LED의 종류를 추가할 경우 보다 최적화할 여지가 있다는 한계를 가지고 있다.

추후 사용하는 LED의 종류를 늘려서 보다 최적화할 수 있는지 여부를 판단하는 것이 필요할 것으로 보인다.

## 5. 결론 (Conclusions)

이 연구에서 Monochromatic LED인 적색, 녹색, 청색 LED의 경우 표준광원에 비해서 색구별 능력이 크게 떨어졌다. 한편 Dichromatic LED인 백색 LED의 경우 표준광원과 색구별 능력에 있어서 큰 차이를 보이지 않았다.

여러 색의 LED를 조합할 경우 색구별 능력을 최대화할 수 있는데 Vitapan 3D Master 색조 가이드의 색구별 능력을 최대화하는 LED의 조합은 녹색 1: 청색 4.8의 비율의 조합으로 나타났다.

## 6. 참고문헌 (References)

- 1) Sadowsky, S. J. (2006). An overview of treatment considerations for esthetic restorations: a review of the literature. *The Journal of prosthetic dentistry*, 96(6), 433–42.  
doi:10.1016/j.prosdent.2006.09.018
- 2) Paul, S., Peter, a., Pietrobon, N., & Hammerle, C. H. F. (2002). Visual and Spectrophotometric Shade Analysis of Human Teeth. *Journal of Dental Research*, 81(8), 578–582.  
doi:10.1177/154405910208100815
- 3) Park, J.-H., Lee, Y.-K., & Lim, B.-S. (2006). Influence of illuminants on the color distribution of shade guides. *The Journal of prosthetic dentistry*, 96(6), 402–11.  
doi:10.1016/j.prosdent.2006.10.007
- 4) Ahn, J.-S., & Lee, Y.-K. (2008). Color distribution of a shade guide in the value, chroma, and hue scale. *The Journal of prosthetic dentistry*, 100(1), 18–28.  
doi:10.1016/S0022-3913(08)60129-8
- 5) Bayindir, F., Kuo, S., Johnston, W. M., & Wee, A. G. (2007). Coverage error of three conceptually different shade guide systems to vital unrestored dentition. *The Journal of prosthetic dentistry*, 98(3), 175–85. doi:10.1016/S0022-3913(07)60053-5
- 6) Bolt, R. a, Bosch, J. J., & Coops, J. C. (1994). Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Physics in medicine and biology*, 39(7), 1133–42.

- 7) Đozić, A., Kleverlaan, C. J., Aartman, I. H. a., &Feilzer, A. J. (2005). Relation in color among maxillary incisors and canines. *Dental Materials*, 21(3), 187–191. doi:10.1016/j.dental.2004.03.005
- 8) Kim, J.-C., Yu, B., &Lee, Y.-K. (2008). Influence of surface layer removal of shade guide tabs on the measured color by spectrophotometer and spectroradiometer. *Journal of dentistry*, 36(12), 1061–7. doi:10.1016/j.jdent.2008.09.004
- 9) Lee, Y.-K., Yu, B., Lim, J. I., &Lim, H.-N. (2011). Perceived color shift of a shade guide according to the change of illuminant. *The Journal of prosthetic dentistry*, 105(2), 91–9. doi:10.1016/S0022-3913(11)60006-1
- 10) CIE(Commission Internationale de l’Eclairage). Colorimetrytechnical report. CIE Pub. No. 15, 3<sup>rd</sup> ed. Vienna: Bureau Central de la CIE; 2004
- 11) Douglas, R. D., Steinhauer, T. J., &Wee, A. G. (2007). Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch. *The Journal of prosthetic dentistry*, 97(4), 200–8. doi:10.1016/j.prosdent.2007.02.012

Abstract

## Optimization of LED spectra for maximizing color discrimination of shade guide used in esthetic restoration

ChangKyoon Kim

Department of Dentistry

School of Dentistry

Seoul National University

The purpose of this study was to evaluate the effect of LED illuminants on the color discrimination of shade guide and to optimize LED spectra for maximizing color discrimination of shade guide using computer simulation.

In this research, relative spectral power distributions for Red-, Green-, Blue- monochromatic LED and phosphor converted White LED was measured by spectrophotometer. Spectral reflectance curve of 26 shade tabs from a shade guide (Vitapan 3D master) was measured. We could calculate CIELAB color coordinates of each tabs and color differences of adjacent tabs. For comparison, standard illuminant(D65) was also evaluated.

Evaluation of effects of various combination of unit LED on the color discrimination of shadeguide was performed using computer simulation. Increasing the number of unit LED to 10,000, the optimal combination of LED maximizing the color differences of adjacent tabs was explored.

With monochromatic LEDs, color discrimination of adjacent color shadetabs were difficult ( $p < 0.001$ ). There was no statistical difference between white LED and standard illuminant D65.

1724 green LED combined with 8276 blue LED makes the most optimized spectra for shadeguide selection. Average color difference of adjacent shade tabs for optimized illuminant ( $\Delta E^* = 5.046$ ) was greatly improved compare to average color difference for standard illuminant ( $\Delta E^* = 4.260$ ).

keyword: Shadeguide selection, LED, simulation, optimization of  
illuminant

Student Number: 2009-22670