

치의학에서의 색채 응용

김성준*, 백경원

제주대학교 의학전문대학원 치과학교실

Abstract

Application of color science in dentistry

Sung Joon Kim, Kyung Won Baek

Department of Dentistry, Jeju National University School of Medicine, Jeju, Korea

The color and appearance of teeth and oral structures are a complex phenomenon, with many factors such as lighting conditions, translucency, opacity, light scattering, gloss and the human eye and brain influencing the overall perception of tooth color. In clinical practice and research, measurements of the color of natural tooth, gingiva, restorative craniofacial and dental materials are important and applicable to many field. The application of color science in dentistry has enabled the measurement of tooth color in an objective way, with the most common color space in current use being CIE Lab system. This article will provide the color science pertinent to teeth and maxillofacial structure and measurement with geometrical aspects of measuring systems. Also, the article includes the color difference and perception aspects of tooth color together with a review of the range of tooth color measured in different populations. (J Med Life Sci 2010;7:7-12)

Key Words : color, shade, tooth, oral, maxillofacial, colorimeter, spectrophotometer, measurement

서론

치의학의 발전과 생활 수준의 향상에 따라 기능과 형태의 회복이 주 목표였던 과거의 치과 치료에 자연스러움을 강조하는 심미 수복이라는 새로운 영역이 발달하게 되었고, 이에 따라 수복 대상의 정확한 색상의 재현이 중요해지고 있다.

색의 인식에는 광원, 관찰되는 물체, 그리고 물체를 관찰하는 관찰자의 세 가지 요소가 영향을 끼치게 된다. 인간의 눈을 통해 인지되고 판단되는 물체의 색은 절대적일 수 없는데, 이는 색상을 판단하는 관찰자의 색에 대한 기준, 안구의 특성, 색 지각에 대한 훈련 등 다양한 요인들이 색을 결정하는 과정에 관여하기 때문이다.^{1, 2)} 그리고, 이러한 관찰자의 문제 뿐 만 아니라, 물체의 구조, 구성 성분, 물체의 표면상태 및 광원 등 다양한 외부 조건에 따라 감지하는 색은 다르게 나타날 수 있다.^{3, 4, 5)}

치과 영역에서의 색 측정에는 종종 구강 구조물이나 치아, 충전물 고유의 다양한 색, 투명도의 다양성과 불균일한 면을 포함하여 이뤄지고, 그 대상이 평면이 아닌 곡선의 외형을 갖는 경우가 대부분이다. 반면에 색 측정에 있어서 색조와 반사의 표준은 왜곡의 가능성을 줄이기 위해서 편평하고 불투명한 것을 기준으

로 하고 있다. 따라서 구강 구조물의 색의 객관화와 특성화는 많은 평가의 주제가 되어 왔었다. 기본적으로 치아 색조가 많은 관심을 받아왔지만, 피부나 치은의 색조 또한 약 안면 보철물의 심미성을 고려할 때 중요한 고려점이 된다⁶⁾. 따라서, 이를 객관화, 표준화하고 치과의사와 기공사, 혹은 환자와의 정보 전달이 용이하게 하기 위하여 여러 기기를 이용한 치과 영역의 색 측정 시도와 응용이 이뤄지고 있다.

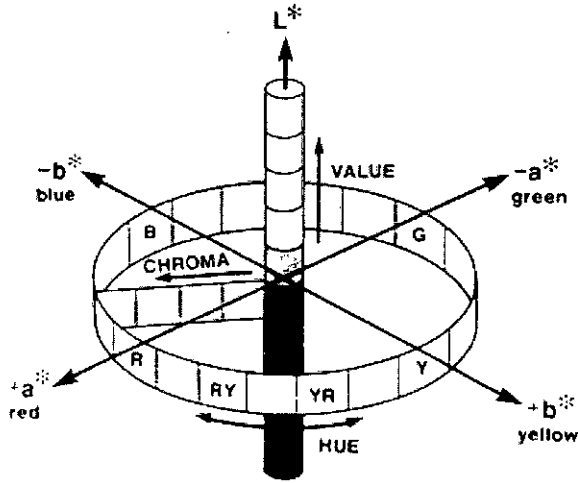
Color and color system

색 현상은 물체와 광원의 물리적 반응과 관찰자 개인의 주관적인 경험이 결합되어 나타는 정신적, 물리적 특질을 공유하는 반응이다⁷⁾. 다른 사람들과 색에 대한 의사소통을 시도할 때 어려움이 생기는데 이를 위해 CIE Lab, CIE LCh, CIE Luv, Hunter Lab, Munsell color space 등 많은 색 공간 체계들이 고안되었다. 그 중 많이 사용되는 Munsell color space에서는 색상(hue), 명도(value), 채도(chroma)로 색을 기술한다⁸⁾. Commission Internationale de l'Éclairage(CIE, 국제 조명위원회)에서 고안한 CIE Lab scale은 측색으로 얻어진 값을 표시하는 방법으로 1976년 정한 것이다. 이 색 공간에서는 측색기로 계속된 3차원 XYZ 값으로부터 산출된 L*, a* 그리고 b* 값에 의한 3차원 직교 좌표표를 이용한다. CIE Lab 표색계에서 L* 값은 명도(lightness)를 나타내는 값으로 0은 완전한 검정을 나타내며 100이면 완전한 백색을 의미한다. a*와 b*는 색도(chromaticity)를

Address for correspondence : Sung Joon Kim
Department of Dentistry, Jeju National University School of
Medicine, 66 Jejudaeakno, 690-756, Jeju, Korea
E-mail : samuelsj@jejunu.ac.kr

나타내며, a*값에서 +는 적색, -값은 녹색 방향의 편향을 나타내며, b*값에서 +는 황색, -값은 청색방향의 편향을 의미한다. 이들 3차원적 좌표계를 이용하면 색의 상호관계를 사람의 색 감각에 가까운 균등 지각 색공간, 즉 균등한 크기로 지각되는 색 차이가 공간내의 동일한 거리에 대응하도록 의도한 색공간으로 나타내는 것이 가능해지는 장점이 있다^{9, 10)}(Fig. 1).

Figure 1. Munsell and CIELAB color space arrangement¹⁰⁾



CIE에서는 측광, 측색에 필요한 표준 광원의 색온도를 결정할 것을 약속하여 표준광 A, B, C, 및 D를 표준 조명으로 사용할 것도 공표하였다¹¹⁻¹⁵⁾. 표준광 A는 2854°K의 색온도를 가지는 가스가 채워진 텅스텐 전구의 점등된 백열전구의 빛을 대표하는데 CIE 색도판 상의 좌표는 $x=0.4476$, $y=0.4075$ 이다. 표준광 B는 4870°K의 색온도를 가지며 색좌표는 $x=0.3485$, $y=0.3518$ 로서 표준광 A에 Davis-Gibson 필터를 첨부하여 만든 빛으로서 평균 태양의 직사광을 대표한다. 표준광 C는 6770°K의 색온도를 가지며, 표준광 A에 C종의 Davis-Gibson 필터를 첨부하여 만든 빛으로서 푸른 하늘을 포함하는 평균 주광을 대표한다. 표준광 D는 자외역을 포함한 여러 가지 상태의 주광을 가리키며, 그 중 D₆₅는 약 6500°K의 색온도를 가지는 자외역을 포함한 평균적 주광을 나타내어 많이 기준으로 많이 사용된다. 추가적으로 표준광 F는 형광램프 빛을 나타낸다¹⁶⁾.

Color measurement

색상 재현의 객관화와 재현성이 우수한 기기를 사용한 방법들이 소개되고 있다. 그 중 한 가지는 Spectrophotometer(분광광도계)나 Colorimeter(색채계측기)를 사용하여 색상을 측정하는 방법이며, 이러한 기기를 이용해 Sproull¹⁷⁾, Lemire 등¹⁸⁾, Grajower 등¹⁹⁾, Macentee 등²⁰⁾, Goodkind 등³⁾의 많은 연구자들이 자연치나 발거된 치아의 색상이 측정하였다. 이 방법은 물체로부터 반사된 빛의 스펙트럼을 분석하여 색상을 현재 과학적 색 표현 방법으로 인정하고 있는 표색 방법 (CIE Lab, L*a*b*)

및 Munsell color order system 등)으로 나타내는 방식이다. 다른 한 가지는 특정 광원과 함께 Charged-Coupled Device(CCD)를 통해 얻어진 영상을 컴퓨터를 이용해 분석하는 방법이다²¹⁻²³⁾. 이는 특정 광원 하에서 CCD 카메라를 통해 얻어진 영상을 컴퓨터로 분석해 현재 치과계에서 특정 재료의 색상을 표현하는 방식이다. 이러한 비색법에 의한 색상 결정에는 과학적으로 재현 가능한 색 체계에 바탕을 두었다기보다는, 일부 재료 제조사에서 제시한 색상 code(Vita shade guide, Biofom shade guide 등)를 바탕으로 재현하고 있어 직관적인 임상에서 제한적으로 간편하게 사용되고 있으나, CIE에서 제시하는 색 체계나 통상적 Munsell color order system 등의 정보를 얻고 수치화하는 데에는 어려움이 있다. 각 측정 기기의 종류, 제조사와 기기는 Table 1에서 예시되어 있다.

Table 1. Examples of instruments for color measurement

Type	Instrument	Manufacturer
Colorimeter	Chromometer CR-321	Minolta
	Chromascan	Sterngold
	ShadeEye chromaMeter	Shofu
	IdentaColor II	Identa
Spectrophotometer	CM-3500d	Minolta
	Vita Easyshade	Vident
Digital image and shade analysis	ShadeScan	Cynovad Inc
	ShadeVision	X-Rite
	Ikam	DCM
Hybrid	SpectroShade	MHT
	ClearMatc	Smart Technology

필터식 색채계인 Tristimulus Colorimeter는 필터와 센서가 일체가 되어 측정하게 되는데, 인간의 눈에 있는 수용기와 똑같은 특징을 지니고 있는 3색 여과기를 이용하여 반사된 빛의 적, 녹, 청색에 대한 값을 분석하는 기계이며 따라서 대부분 세 개의 필터와 광 검출기로 구성되어 있어, L*, a*, b*값을 얻어 내거나 X, Y, Z 자극치를 읽어낸다^{24, 25)}. 3자극 방식으로 얻어진 X, Y, Z 값은 각각의 가시광선 영역의 색 함수의 적분에 의하여 수학적으로 계산되며, 스펙트럼 강도에 1차 형태인 선형으로 대응되어 물리적 수식 계산에 유용하여²⁶⁾, 자연치에 관한 많은 연구가 in vitro와 in vivo상에서 Colorimeter로 이뤄지고 있다. 이에 비하여 Spectrophotometer는 분광 수광 방식을 사용하며 380nm에서 780nm의 가시광선 범위를 5nm-10nm의 간격으로 단파장 반사율을 측정한 뒤 그 결과를 연속적인 그래프로 나타내는 방식으로, 표준광과 색채 시각 효율을 데이터로 처리하여 CIE 자극치를 얻은 후 수학적 변형에 의하여 L*, a*, b* 값으로 시편 색좌표의 절대치를 얻을 수 있는 기계이다^{10, 27-29)}.

측색 조건은 광원과 측정각, 그리고 광원의 확산 각도에 의해서 결정된다. 기기에 따라 다양한 측정 반사각이 적용되어 있고, 측정값의 약간의 차이를 보일 수 있어서, CIE에서 반사율 측정에

있어 빛의 입사 및 관측 방향에 대한 4개의 표준 기하를 정의해 두고 있다³⁶. 측정 기하를 나타낼 때는 (물체 표면에 입사하는 빛의 각도)/(반사되는 빛의 측정 각도)로 표시하는데, (1) 45°/normal (or 0°), (2) normal/45° (3) diffuse/normal (4) normal/diffuse의 네 가지를 추천하고 있다. 우리나라에서는 XYZ계에 의한 삼자극치 표시 방법으로서 KS 한국 산업규격³⁰에 제정되어 있다.

색 측정시 광원의 투과 렌즈 구경은 다양할 수 있는데, Bolt 등³¹과 ten Bosch and Coops³²는 제한된 광원의 구경의 크기를 갖는 측정기기로 투명도가 높은 치아 등의 측정할 경우, 측정 재료 내에서의 많은 양의 빛의 산란이 일어나는 edge-loss 영향을 보고하였다. 이 현상은 구경의 크기 외에 재료 본질의 광학적 특성과 시편의 조사 광원 등에 따라서도 일어나게 된다^{33, 34}. 실제적으로 edge-loss 효과는 시편-측정 구경간의 그림자에서 의해서도 일어날 수 있고, 치과에서 대상으로 하는 치아나 수복 재료, 약 안면 보철물 같은 여러 범위의 투명도를 갖는 대상의 색 측정시에는 이를 최소화하기 위한 고려가 필요하다^{35, 36}.

이상의 과학적인 방법으로 인정되고 있는 측색기를 이용한 측정 방법도 치아에 접촉하는 측정부의 형태와 크기, 그리고 접촉시 치아의 굴곡을 보상할 수 있는 방법의 한계를 가지고 있다. 또한, 기기의 원리에 따라 내부 광원을 사용하여 반사되는 파장을 읽는 방식에서 내부 광원 없이 반사율만을 측정하는 방법 등 다양한 방법이 기기에 적용되고 있어 기기간의 측정 오차도 나타날 수 있다. 또한 반투명 치과용 수복 재료 측정시, 측색

기기 간에도 색차가 나타날 수 있으며, 이는 기기에 대해 측정된 색상을 절대적인 색상으로 적용하기 보다는 상대적인 측정치로 이용하는 것이 바람직하다고 제안되고 있다³⁷.

Color difference

두 물체 간의 색 차이나, 한 물체의 색 변화를 측정하기 위해 CIE Lab system에서는 명확한 장점이 있다. 다른 두 색의 차이는 측정된 각각의 L^* , a^* , b^* 의 3차원 좌표의 값 사이의 절대값을 통하여 얻어 질 수 있다 :

$$\Delta E^* = [(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2]^{1/2} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

각 아래 첨자 1, 2는 두 색의 각각의 측정된 L^* , a^* , b^* 값을 의미하며, ΔL^* , Δa^* , Δb^* 는 두 값의 상대적 변위 차이를 의미한다.

Kuehni 등³⁸은 전체 색 범위에서 ΔE^* 값 1이 지각할 수 있는 수준으로 제시하였다. Gross와 Moser³⁹는 ΔE^* 값이 0에서 2이면 색차를 육안으로 인지할 수 없으나, 2에서 3이면 경우 인지할 수 있는 정도이고, 3내지 8이면 보통 인지할 수 있으며, 8이상이면 현저하게 인지할 수 있다고 하였으며, Seghi 등²⁸은 이상적인 조명하에서 ΔE^* 가 2보다 크면 대부분의 관찰자가 구분해 낼 수 있고 1보다 작으면 덜 분명하다고 했다. 대부분의 자연치의 색조는 전 범위가 아닌 제한된 영역을 차지하고 있으며, 같은 구강 내에서도 치아에 따라 다른 결과가 나타날 수 있어 다양한 견해를 보이고 있다^{12, 28, 38, 40-42} (Table 2).

Table 2. Summary of studies relevant to dental color-matching tolerance

Study	Design	Color difference	Results
Color perceptibility studies			
Kuehni and Marcus ³⁸	In vitro	$\Delta E^*=1.0$	Fifty percent of observers perceived color difference.
Seghi et al ²⁸	In vitro	$\Delta E^*=2.0$	Porcelain specimens were correctly judged by observers 100% of the time.
Johnston and Kao ¹²	In vivo	$\Delta E^*=3.7$	Average color difference between compared teeth rated as match in oral environment.
Color acceptability studies			
Douglas and Brewer ⁴²	In vitro	$\Delta E^*=1.7$	Mean color difference at which 50% of prosthodontists rejected shade match for metal-ceramic crowns.
Ragain and Johnston ⁴¹	In vitro	$\Delta E^*=2.72$	Average 50:50 ΔE^* replacement rate for all subjects was found.
Ruyter et al ⁴⁰	In vitro	$\Delta E^*=3.3$	Fifty percent of observers considered composite resin specimens to be unacceptable.
Johnston and Kao ¹²	In vivo	$\Delta E^*=6.8$	Average color difference between compared teeth rated as mismatch within normal range of tooth color in oral environment.

빛의 스펙트럼 상태 즉, 분광 반사율의 분포가 서로 다른 두 물체의 색이 한 광원에서는 같이 측정되나, 다른 광원에서는 다른 색을 나타내는 조건등색(Metamerism)이 나타날 수 있기 때문에, 정확한 색차를 측정하기 위해서는 두 가지 이상의 다른 조명하에서의 색차를 측정하는 것이 조건등색으로 나타나는 오류를 피할 수 있는 방법이다⁴³.

Natural tooth color range

Spectrophotometer와 Colorimeter를 사용하여 생체 내에서 측정된 다양한 인종과 연령대에 대한 연구가 보고되고 있다⁴⁴⁻⁵³ (Table 3). 같은 국민을 대상으로 한 연구에서도 전치부 치아 색조의 L^* , a^* , b^* 평균 수치는 다양한 분포 범위를 보인다. 동일

한 연구에서 L* 값이 큰 쪽의 차이를 보이는 반면, a*와 b*값의 차이는 크지 않음을 보인다. 이러한 차이는 측정 방법이나 조건에 따라 달라질 수 있는데, Colorimeter는 상당한 edge-loss 영향을 받는 경향으로 보이며, 절대적인 측정도 오류의 영향을

받을 수도 있다³¹⁾. 서로 다른 기기로 동일 치아를 측정한 L*, a*, b* 각각의 차이는 같은 연구에서 colorimeter와 Shade vision system으로 측정한 Cho 등의 연구⁵¹⁾에서 볼 수 있으며, 이에 따라 측정시 각 기기의 특성을 고려하여야 한다⁵⁴⁾.

Table 3. Reported L* a* b* values for anterior maxillary incisors measured in vivo.

Reference	Method	Subject demographics			Mean color co-ordinates (S.D.)		
		Country	Number	Age(years)	L*	a*	b*
Odioso et al. ⁴⁴⁾	Spectrophotometer	USA	180	13-64	69.3 (5.92)	5.1 (1.33)	18.7 (3.37)
Xiao et al. ⁴⁵⁾	Colorimeter	China	405	13-64	70.67 (1.91)	4.29 (2.05)	17.51 (4.13)
Rubino et al. ⁴⁶⁾	Colorimeter	Spain	600	15-50	67.6 (7.0)	4.3 (2.1)	12.1 (3.3)
Douglas ⁴⁷⁾	Colorimeter	Canada	7		54.76 (4.16)	0.06 (0.75)	6.37 (3.65)
Gozalo-Diaz et al. ⁴⁸⁾	Spectrophotometer	USA	120	>18	73.3 (7.7)	4.7 (2.3)	18.8 (4.9)
Gegauff et al. ⁴⁹⁾	Colorimeter	USA	20	20-27	51.1	-0.1	-0.2
Hasegawa et al. ⁵⁰⁾	Spectrophotometer	Japan	87	13-84	73.1 (5.6)	3.4 (1.2)	16.4 (3.9)
Cho et al. ⁵¹⁾	Colorimeter	Korea	47	>19	57.8 (3.5)	-1.0 (0.9)	6.7 (3.1)
Cho et al. ⁵¹⁾	Shade vision system	Korea	47	>19	74.0 (3.4)	5.0 (1.5)	19.4 (4.0)
Zhao and Zhu ⁵²⁾	Spectrophotometer	China	70	18-70	51.48 (8.02)	0.62 (0.14)	0.15 (0.02)
Zhu et al. ⁵³⁾	Spectrophotometer	China	162	20-73	54.91 (6.39)	-1.69 (1.56)	9.19 (5.65)

결론

색은 조명 조건, 투명도와 불투명도, 빛의 흡수와 산란, 광택과 인체의 눈과 종합적 인식 기능의 뇌와 관련된 복합 현상이다. 치과 영역으로의 색 과학의 응용은 치아와 지지 조직의 대한 객관적인 측정이 이뤄지게 되었고, 통용되는 CIE Lab 색 공간 등을 통하여 의사 소통이 가능하게 되었다. 여러 측정 방법과 기기들의 한계와 장단점들이 있으나, 이러한 방법들의 발전으로 인하여 더욱 더 자연스러운 구강 내외에서 수복물이나 보철물의 제작과 장착이 가능하게 되었으며, 객관화된 자료를 통하여, 새로운 재료의 개발이나 연구의 영역은 더 확장되고 있다.

참고 문헌

- 1) 문은배. 색채의 활용. 서울. 도서출판 국제. 2002. p215-271.
- 2) 박은주. 색채 조형의 기초. 제2판. 서울. 미진사. 1996. p56-194.
- 3) Goodkind RJ, Schwabacher WB. Use of a fiber-optic colorimeter for in vivo color measurements of 2830 anterior teeth. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1987;58:535-42.
- 4) Clifford Ms. *The Art and Science of Operative Dentistry* 3rd ed. Mosby-Year book. 1995
- 5) Miller LL. shade matching. *Journal of Esthetic Dentistry*

- 1993;5:143-152.
- 6) Clark EB. An analysis of tooth color. *Journal of the American Dental Association* 1931;18:2093-103.
- 7) Bridgeman I. The nature of light and its interaction with matter. In: McDonald R, editor. *Colour physics for industry*. Huddersfield: H. Charlesworth & Co Ltd: 1987. p.1-34.
- 8) McLaren K. Colour space, colour scales and colour difference. In: McDonald R, editor. *Colour physics for industry*. Huddersfield: H. Charlesworth & Co Ltd: 1987. p.97-115.
- 9) O'Brien WJ, Hemmendinger H, Boenke KM, Linger JB, Groh CL. Color distribution of three regions of extracted human teeth. *Dental Materials* 1997;13:179-185.
- 10) Seghi, R.R., Johnston, W.M., & O'Brien, W.J. Spectrophotometric analysis of colour differences between porcelain systems. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1986;56:35-40
- 11) 황인남, 이광원. 광중합 복합레진의 두께에 따른 투명도 차이가 수복물의 색상에 미치는 영향. *대한치과보존학회지* 1999;24:604-61.
- 12) Johnston WM, Kao EC. Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *Journal of Dental Research* 1989;68:819-22.

- 13) Goodkind RJ, Keenan KM, Schwabacher WB. A comparison of Chromascan and spectrophotometric color measurements of 100 natural teeth. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1985;53:105-9.
- 14) Schwabacher WB, Goodkind RJ. Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1990;64:425-31.
- 15) Yeh CL, Powers JM, Miyagawa Y. Color of selected shades of composites by reflection spectrophotometry. *Journal of Dental Research* 1982;61:1176-9.
- 16) Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). *Colorimetry*, 3rd ed. Publication CIE No. 15.3. Vienna, Austria: Central Bureau of the CIE, 2004.
- 17) Sproull RC. Color matching in dentistry. Part II. Practical applications of the organization of color. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1973;29:556-66.
- 18) Lemire PA, Burk B. *Color in dentistry*. Hartford, CT J.M Ney CO., 1975
- 19) Grajower R, Revah A, Sorin S. Reflectance spectra of natural and acrylic resin teeth. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1976;36:570-9.
- 20) Macentee M, Lakowski R. Instrumental colour measurement of vital and extracted human teeth. *Journal of Oral Rehabilitation* 1981;8:203-8.
- 21) Chu SJ, Tarnow DP. Digital shade analysis and verification: a case report and discussion. *Pract Proced Aesthet Dent*. 2001;13:129-36.
- 22) Chu SJ. Precision shade technology: contemporary strategies in shade selection. *Pract Proced Aesthet Dent*. 2002;14:79-83.
- 23) Paravina RD, Powers JM. *Esthetic color training in dentistry*. St. Louis, Missouri, Mosby Inc., p165-174, 2004
- 24) Van der Burgt TP, Ten Bosch JJ, Borsboom PCF, Kortsmid WJPM. A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1990;63:155-162.
- 25) Tung FF, Goldstein GR, Jang S, Hittelman E. The repeatability of an intraoral dental colorimeter. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2002;88:585-590.
- 26) Hunt RWG. *Measuring colour*. 3rd ed. Fountain Press; 1998.
- 27) Jorgenson MW, Goodkind RJ. Spectrophotometric study of five porcelain shades relative to the dimensions of color, porcelain thickness, and repeated firings. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1979;42:96-105.
- 28) Seghi RR, Hewlett ER, Kim J. Visual and instrumental colorimetric assessments of small color differences on translucent dental porcelain. *Journal of Dental Research* 1989;68:1760-4.
- 29) Seghi RR. Effects of instrument-measuring geometry on colorimetric assessments of dental porcelains. *Journal of Dental Research* 1990;69:1180-3.
- 30) 한국 공업 규격. KS A 0061
- 31) Bolt RA, ten Bosch JJ, Coops JC. Influence of window size in small-window color measurement, particularly of teeth. *Physics in Medicine and Biology* 1994;39:1133-42.
- 32) ten Bosch JJ, Coops JC. Tooth color and reflectance as related to light scattering and enamel hardness. *Journal of Dental Research* 1995;74:374-80.
- 33) Rugh ER, Johnston WM, Hesse NS. The relationship between elastomer opacity, colorimeter beam size and measure colorimetric response. *International Journal of Prosthodontics* 1991;4:569-76.
- 34) Johnston WM, Hesse NS, Davis BK, Seghi RR. Analysis of edge-losses in reflectance measurements of pigmented maxillofacial elastomer. *Journal of Dental Research* 1996;75:752-60.
- 35) Paravina RD, Westland S, Kimura M, Powers JM, Imai FH. Color interaction of dental materials: blending effect of layered composites. *Dental Materials* 2006;22:903-8.
- 36) Paravina RD, Westland S, Johnston WM, Powers JM. Color adjustment potential of resin composites. *Journal of Dental Research* 2008;87:499-503.
- 37) 박수정, 노은영, 조현구, 황윤찬, 오원만, 황인남. 복합레진 색상의 측정 기기에 따른 차이. *대한치과 보존학회지* 2009;34:199-207.
- 38) Kuehni RG, Marcus RT. A experiment in visual scaling of small color difference. *Color Research and Application* 1979;4:83-91.
- 39) Gross MD, Moser JB. A colorimetric study of coffee and tea staining of four composite resins. *Journal of Oral Rehabilitation* 1977;4:311-22.
- 40) Ruyter IE, Nilner K, Moller B. Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. *Dental Materials* 1987;3:246-51.
- 41) Ragain JC Jr, Johnston WM. Color acceptance of direct dental restorative materials by human observers. *Color Research and Application* 2000;25:278-85.
- 42) Douglas RD, Brewer JD. Acceptability of shade differences in metal ceramic crowns. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1998;79:254-60.
- 43) Seelaus R, Troppmann RJ. Facial prosthesis fabrication: coloration techniques. In: Taylor TD, editor. *Clinical maxillofacial prosthetics*. Chicago: Quintessence Publishing; 2000. p. 245-64. Chapter 17.
- 44) Odioso LL, Gibb RD, Gerlach RW. Impact of

- demographic, behavioral, and dental care utilization parameters on tooth color and personal satisfaction. *Compendium of Continuing Education in Dentistry* 2000;21:S35-41.
- 45) Xiao J, Zhou XD, Zhu WC, Zhang B, Li JY, Xu X. The prevalence of tooth discoloration and the self-satisfaction with tooth colour in a Chinese urban population. *Journal of Oral Rehabilitation* 2007;34:351-60.
- 46) Rubino M, Garcia JA, Jiménez del Barco L, Romero J. Colour measurement of human teeth and evaluation of a colour guide. *Color Research and Application* 1994;19:19-22.
- 47) Douglas RD. Precision of in vivo colorimetric assessments of teeth. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1997;77:464-70.
- 48) Gozalo-Diaz DJ, Lindsey DT, Johnston WM, Wee AG. Measurement of color for craniofacial structures using a 45/0-degree optical configuration. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2007;97:45-53.
- 49) Gegauff AG, Rosenstiel SF, Langhout KJ, Johnston WM. Evaluating tooth color change from carbamide peroxide gel. *Journal of the American Dental Association* 1993;124:65-71.
- 50) Hasegawa A, Ikeda I, Kawaguchi S. Color and translucency of in vivo central incisors. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2000;83:418-23.
- 51) Cho B-H, Lim Y-K, Lee Y-K. Comparison of the color of natural teeth measured by a colorimeter and shade vision system. *Dental Materials* 2007;23:1307-12.
- 52) Zhao Y, Zhu J. In vivo color measurement of 410 maxillary anterior teeth. *Chinese Journal of Dental Research* 1998;3:49-51.
- 53) Zhu H, Lei Y, Liao N. Color measurements of 1944 anterior teeth of people in southwest of China. *Chinese Journal of Stomatology* 2001;36:285-8.
- 54) Johnston WM. Color measurement in dentistry. *Journal of Dentistry* 2009;37S:e2-e6