

Kubelka-Munk 이론의 치과 지르코니아 적용에 의한 컴퓨터 컬러 매칭*

정현우¹, 이우근², 안진수^{1**}

¹서울대학교 치의학대학원 치과생체재료과학교실, 치학연구소, ²조선대학교 치과대학 치과재료학교실

Computer color matching by application of Kubelka-Munk theory to dental zirconia materials

Hyeon-Woo Chung¹, Woo-Geun Lee², Jin-Soo Ahn^{1**}

¹Department of Dental Biomaterials Science, School of Dentistry and Dental Research Institute, Seoul National University, Seoul, Korea, ²Department of Dental Materials, School of Dentistry, Chosun University, Gwangju, Korea

(Received: Aug. 28, 2014; Revised: Dec. 9, 2014; Accepted: Dec. 9, 2014)

DOI : <http://dx.doi.org/10.14815/kjdm.2014.41.4.233>

ABSTRACT

A new method to determine the color of restorations, Kubelka-Munk theory was applied to dental zirconia materials(porcelain and core zirconia). Possibility of its application was evaluated in terms of accuracy and predictability. Lava zirconia core blocks were sectioned and prepared with the thickness of 3mm for FS1, FS3 and FS4 specimens. Similarly, Vintage ZR porcelain were prepared with the thickness of 1mm for A1, A2, A3, A3.5, A4 specimens. By applying the data to Kubelka-Munk theory, color prediction was done for every possible combinations of porcelain and core shades. Real color measured by spectrophotometer was compared to the prediction in the CIE Lab color system. The color difference ΔE between the predicted and real color for each specimen combination was averaged about 1.94 (SD 0.41, Min 1.42, Max 2.66). Application of Kubelka-Munk theory to dental zirconia materials seems to have good accuracy based on the data. Manufacturer's recommended combinations and their real color showed big discrepancies in that average ΔE is 5.95 (SD 0.61, Min 4.98, Max 6.64). There is greater difference of average $\Delta E = 7.75$ (SD 0.56, Min 6.99, Max 8.48) between prediction by Kubelka-Munk theory and manufacturer's recommended combinations.

색인어 : Kubelka-Munk theory, Zirconia, Computer color matching, Color

1. 서 론

세라믹 수복물은 그 심미적 이유로 인해서 많이 사용되고 있는 치과 재료로써 PFM(porcelain fused-to metal) 수복물과 최근에 연구가 많이 진행되고 임상에서 사용이 늘어가는 All-ceramic 수복물로 나뉜다. PFM의 경우 강도가 가장 큰 장점이어서 1960년대부터 아직까지도 사용되고 있으나, 내부 금속 코핑과 그것을 가리기 위한 불

투명 포세린의 사용 및 얇은 포세린 두께로 인해 자연 치의 색조를 모방하기에 심미성의 한계가 존재한다(한국 치과재료학교수협의회, 2008).

All-ceramic 수복물은 제조방법이나 재료에 따라서 여러 가지로 나뉘어 질 수 있다. Dicor, Empress, IPS Empress, In-Ceram, LAVA 등의 상용제품을 임상에서 사용하고 있으며, 그 기술은 나날이 발전하고 있는 추세이다. 최근에는 지르코니아(Zirconia)의 파절강도가 기존의 세라믹에 비해 훨씬 우수하여 수복물의 코어로 사용되는 경우가 증가하고 있다. 지르코니아는 물리적 특성만 우수할 뿐 아니라 광학적으로도 금속에 비하여 더욱 심미적이기 때문에 환영받고 있다(한국치과재료학교수협의회, 2008).

* 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A1076079).

** 교신저자 : 110-749, 서울시 종로구 대학로 101, 서울대학교 치의학 대학원 치과생체재료과학교실, 안진수

하지만 지르코니아 수복물 또한 다른 세라믹 수복물과 동일하게도 색상을 결정하는 과정이 표준화되거나 자동화되지 못하였다. Shade guide와의 비교를 통한 육안의 관찰에 의존하고, 치과의사와 기공사 사이의 대화 및 서면작성으로 색조를 결정하기 때문에 정확한 의사소통과 정량화가 쉽지 않다. 또한 그것이 가능하다 하더라도 기공사의 기술에 의존적이며 재현된 포세린의 두께에 의해서 의도한 색상을 완전히 재현하기는 쉽지 않다. 염색 유약을 이용한 색상 조절도 추가적으로 가능하나 비슷한 이유로 인해 자동화되지 못한다.

따라서, 보다 객관적으로 색을 재현하기 위한 노력이 존재해 왔으며, 그러한 시도에서 Kubelka-Munk 이론이 최근에 많이 사용되고 있다(Kubelka와 Munk, 1931). Kubelka-Munk 이론은 빛의 반사가 50% 이상, 투과가 20% 이하인 물질층에 매우 잘 부합하며, 측광하는 매체(medium)의 두께보다 층을 구성하는 입자의 크기가 충분히 작으면 된다고 알려져 있다(Kubelka와 Munk, 1931). 이 조건은 치과 지르코니아에도 잘 부합한다.

자연치를 최대한 모방하기 위해서는 먼저 자연치의 특징을 잘 알아야 할 것이다. 따라서 법랑질과 상아질에 대한 광학특성 연구도 존재하며⁵ Kubelka-Munk 이론이 인간의 치아에도 적용할 경우에 일치도가 높은 것으로 나타났다(Ragain과 Johnston, 2001; Yu 등, 2009). 그리고 기존에 사용되던 수복물 재료로써 레진과 포세린 등의 치과 재료에 Kubelka-Munk 이론을 적용하여 색을 예측하였을 경우에도 그 일치도가 높아서^{10,11} 임상에서 이론을 적용할 가능성을 더욱 인정받을 수 있었다(Wayne 등, 1985; Miyagawa와 Powers, 1983).

색을 수치로 나타내는 방법을 다양하게 연구한 곳 중에, Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)에서는 사람의 시각체계에 상응하는 색표현에 대한 연구를 지속적으로 해왔는데, 1976년에는 Lab 색상계를 소개하였다(Joiner, 2004). 색을 명도(L, lightness), (+a)-(-a) 축, (+b)-(-b) 축의 3축을 바탕으로 표현하였다. 명도는 0~100의 수치로 나타내어지며 0은 흑색, 100은 백색을 의미한다. a는 양수일 때 적색, 음수일 때 녹색을 나타내며, b는 양수일 때 황색, 음수일 때 청색을 의미한다. 따라서 a와 b로 나타내어지는 평면에서 원점에서의 거리는 채도(h), 축에서의 각도는 색상(c)를 나타내어 Lch로 표현할 수 있으며 명도, 색상, 채도를 손쉽게 구할 수 있다. 이때 색의 차이는 ΔE 로 표현되는데, L, a, b의 좌표로 이루어진 3차원에서의 거리를 의미한다.

본 논문에서는 CIE Lab 색상을 사용하여, 지르코니아 코어와 지르코니아 포세린을 사용하였을 경우에 색상을

정량적이고 자동적으로 형성하기 위한 색조의 선택을 자동화하기 위한 컴퓨터 컬러 매칭(CCD, computer color matching)을 평가하고자 한다. 이 알고리즘을 통한 것, 실제의 다양한 조합을 직접 광측정하여 최소 ΔE 인 조합 그리고 업체에서 제안하는 조합의 포세린 및 코어의 색조를 비교해 보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

지르코니아 코어, 지르코니아 포세린, Shade guide의 3가지 종류의 시편을 제작하였다. 지르코니아 코어 시편을 제작하기 위하여, 지르코니아 블록(Lava, 3M ESPE, USA)을 단단히 고정된 뒤 다이아몬드 휠을 회전시키고 냉각제로 물을 사용하여 일정한 크기로 15개의 시편을 제작하기 위하여 절삭하였다. 소성과정을 통한 수축과 목표 두께인 3mm를 이루기 위하여 연삭과정을 고려하여 조금 더 두꺼운 4mm 정도로 시편 두께를 준비하였다. 절삭된 조각에 업체가 제안하는 방법을 통하여 FS1, FS3.5, FS4 색상을 가지게 하기 위하여 각각 5개씩(총 15개) 착색시키고 완전한 소성과정과 냉각과정을 마쳤다. 시편은 다시 왁스 고정을 통하여 hot plate에 부착되었고, 수평형 평면연삭기(HRG-150, AM technology, Korea)에 #320 다이아몬드 휠을 이용하여 연삭하였다.

지르코니아 포세린(Vintage ZR, Shofu, Japan)은 가로 8mm 세로 8mm 높이 1mm의 시편을 제작하기 위하여 수축률을 고려한 몰드를 제작하였다. 몰드에 기포가 발생하지 않도록 충분히 주의를 기울여 A1, A2, A3, A3.5, A4의 색상에 해당되는 분말을 채워 넣고, 업체가 제안하는 방법으로 각각 3개의 시편(총 15개)에 대한 소성을 마쳤다. 정확한 두께를 얻고 색상의 정밀한 측정을 위하여 연삭기(SPL-15 GRIND-X, OKAMOTO, Japan)를 사용하고 Lapping machine을 통해서 6um의 다이아몬드가 포함된 slurry를 사용하여 연마하였다.

Shade guide는 Vita classic shade guide(VITA Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany)를 사용하였다. 인조치아의 순면이 색상을 측정하기에 적당하지 않은 곡면이기 때문에 편평한 면으로 변형하기 위해 연마과정이 필요하였다. 연마의 최종 과정에서는 2000방 사포로 마무리하여 A1, A2, A3, A3.5, A4에 대한 시편의 색상측정 준비를 마쳤다.

시편의 색상을 측정하기 위해서는 분광광도계(Spectrophotometer CM-3500d, Minolta, Japan)가 사용되었다. 분광광도계는 400nm에서 700nm에 이르는 파장을 매 10nm 마다의 구간에서 시편의 각 조합에서의 빛의 반사율을 측정하였고, 이것을 바탕으로 CIE Lab 색상 또한

구할 수 있었다. 이때 시편에 하얀색의 배경과 검은색의 배경을 준비하여 광측정을 진행하였다. 색상의 측정 대상은 shade guide 의 A1, A2, A3, A3.5, A4 시편 5개와 지르코니아 포세린의 DA1, DA2, DA3, DA3.5, DA4 시편 15개 그리고 지르코니아 코어의 FS1, FS3.5, FS4 시편 15개가 각각 진행되었다. 또한 코어 시편에 대해 충분히 얇은 3차 증류수층을 사이에 두고 포세린 시편이 상부에 있을 때의 색상을 모든 조합에 대해서 총 225회 측정하였다.

Kubelka-Munk 이론은 다음의 세 가지 식으로 나타낼 수 있다(Allen, 1974; Ishikawa-Nagai, 1990; Judd와 Wyszecki, 1975).

$$R = \frac{1 - R_g(a - b * ctgh(bSX))}{a - R_g + b * ctgh(bSX)}$$

$$a = \frac{K + S}{S}$$

$$b = \sqrt{(a^2 - 1)}$$

단,
 X = 층의 두께
 Rg = 배경의 반사율
 K = 흡수 상수
 S = 산란 상수
 R = 주어진 파장에서의 반사율

이를 바탕으로 지르코니아 포세린의 두께를 1mm, 하얀색과 검은색 배경(Rg 는 각각 1 과 0)으로 측정된 지르코니아 포세린의 반사율을 R 로 설정하면 각 지르코니아 포세린의 빛 파장별 K, S 상수를 구할 수 있었다. 이 결과를 바탕으로 임의의 지르코니아 코어의 반사율을 Rg 로 두고 a, b, K, S, X 값을 대입함으로써 400 ~ 700nm 각 파장별 지르코니아 코어와 포세린의 조합에 의한 빛의 반사율을 예측이 가능하다.

이렇게 예측된 정보를 바탕으로, 컴퓨터는 임의의 Shade guide 선택에 의해 가장 작은 ΔE 값을 가지는 지르코니아 코어와 포세린 조합을 결정하는 것이 간단한 알고리즘을 통해서 결정된다. 그 결과 최종적으로 알고리즘이 제안한 이 조합을 업체가 제안하는 조합과 비교를 통해 동일성을 확인해 볼 수 있다.

3. 결 과

Vita classic shade guide 의 색상 측정결과는 반사율은 그림 1과 같다. 지르코니아 포세린의 색조별 3개의 시편의 반사율은 그림 2와 같다. 지르코니아 코어의 색조별 5개의

시편의 반사율은 그림 3과 같다. Kubelka-Munk 이론에 의한 각 시편의 조합에 대한 반사율 예측은 그림 4와 같다. 실제의 각 시편의 조합에 대한 반사율은 그림 5와 같다

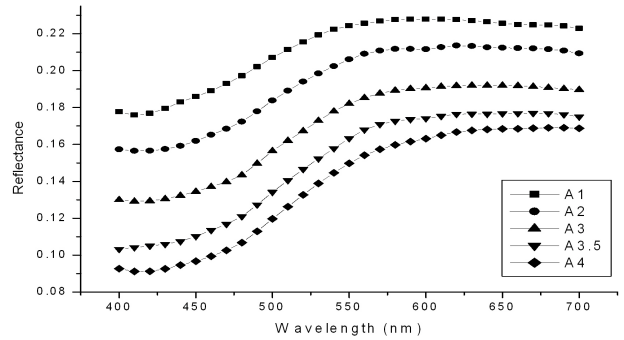


Figure 1. Reflectance wavelength graph of Vita classic shade guide

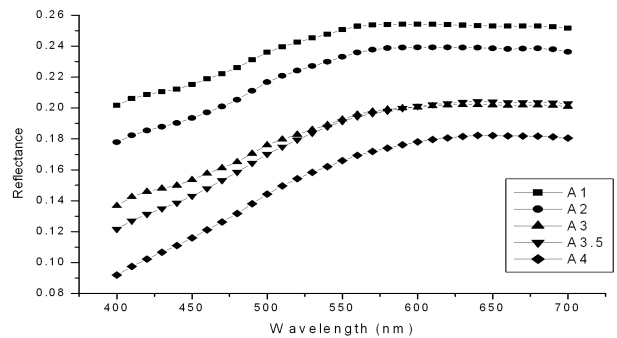


Figure 2. Reflectance wavelength graph of veneer porcelain

Table 1. Color differences between measured colors and calculated colors

Zirconia		실측치			K-M 예상			ΔE
Porcelain	Core	L	a	b	L	a	b	
A1	FS1	60,11	-0,56	8,17	61,61	-1,12	7,26	1,50
	FS3	59,55	-0,69	7,34	61,33	-0,87	7,91	1,78
	FS4	59,39	-0,61	8,09	60,93	-0,55	8,59	1,53
A2	FS1	57,80	-0,47	8,67	60,15	-0,92	8,66	2,35
	FS3	57,84	-0,36	9,38	59,86	-0,65	9,31	2,02
	FS4	56,99	-0,50	8,80	59,45	-0,32	10,01	2,46
A3	FS1	54,23	-0,01	10,17	56,60	-0,47	9,94	2,37
	FS3	54,30	-0,06	10,39	56,29	-0,17	10,70	1,99
	FS4	54,31	-0,08	9,85	55,82	0,22	11,51	1,51
A3.5	FS1	53,45	-0,08	11,69	56,11	-0,49	12,06	2,66
	FS3	53,94	-0,03	11,96	55,81	-0,18	12,73	1,87
	FS4	53,69	-0,04	11,79	55,37	0,20	13,45	1,69
A4	FS1	51,34	0,22	13,95	53,67	-0,19	14,07	2,33
	FS3	51,94	0,15	13,82	53,35	0,14	14,80	1,42
	FS4	51,28	0,13	13,71	52,88	0,57	15,61	1,60

이 반사율 그래프를 CIE Lab 색상으로 전환하여 각각에 대하여 비교를 하면 표 1과 표 2로 요약할 수 있다. 표 1에서 Kubelka-Munk 이론의 예측치와 실측치를 비교해 보았을 때 $\Delta E = 1.42 \sim 2.66$ 으로 나타났다. Douglas에 의하면 ΔE 가 2.6일 때 절반의 임상가들이 색차이를 인지하는 최소값이라고 하였고(Douglas 등, 2007), Kubelka-Munk 이론 예측치와 실측치의 ΔE 는 총 15개의 경우 중 14개의 경우에서 $\Delta E < 2.6$ 의 조건을 만족하였다.

표 2에서 실측치와 업체가 제안하는 조합의 색상을 측정하였을 경우, $\Delta E = 4.98 \sim 6.64$ 로 범위외고 모든 5개의 경우에 $\Delta E > 2.6$ 이었다. 반면에 Kubelka-Munk 이론을 통한 예측치와 업체의 제안 조합에 의한 색차이 $\Delta E = 6.99 \sim 8.48$ 로 모든 경우에 실측치에 비해 더 차이가 많이 나타난다.

Table 2. Color differences between suggested colors and measured and calculated colors

Zirconia		업체 제안				ΔE	
Porcelain	Core	해당 shade	L	a	b	실측	K-M
A1	FS1	A1	54.18	-1.28	6.37	6.24	7.48
	FS3					-	
	FS4					-	
A2	FS1					-	
	FS3	A2	52.19	-0.83	7.91	5.86	7.80
	FS4					-	
A3	FS1					-	
	FS3	A3	49.39	-0.44	9.60	4.98	6.99
	FS4					-	
A3.5	FS1					-	
	FS3					-	
	FS4	A3.5	47.05	-0.17	11.87	6.64	8.48
A4	FS1					-	
	FS3					-	
	FS4	A4	45.32	0.43	12.96	6.02	8.01

표 2에서 나타난 Shade guide 의 5개의 CIE Lab 색상에 대해서 ΔE 가 최소로 나타나는 예측치 조합과 실측치 조합은 표 3으로 요약된다. 즉, 알고리즘에 의해서 제안된 조합은 K-M 예상의 항목을 참조함으로써 간단히 알 수 있다. 이때 Shade guide 의 시편을 재현하기 위한 예측과 실측 최적 포세린, 코어 조합에 차이가 발생한 것은 5개의 경우 중 2개였다. A1의 경우 포세린, A2의 경우 코어의 선택에서 차이가 발생한다.

마지막으로 표 4를 통해서 각 비교에 대한 ΔE 의 평균, 분산, 범위를 정리하였다.

4. 논 의

Douglas와 Ruyter는 보철가들에게 있어서 실험조건일 경우 PFM 수복물과 컴포지트 레진 수복물의 색 차이를 인지하기 위한 최소한의 ΔE 는 각각 1.7, 3.3이라고 한다 (Douglas와 Brewer, 1998). Johnston에 의하면 임상조건에서는 이와 차이가 존재하는데, ΔE 가 3.7이하라면(Johnston과 Kao, 1989) 임상가들에게 완벽한 보철물이라고 고려를 한다는 연구가 있는 반면에, ΔE 가 2.6일 때 절반의 임상가들이 색 차이를 인지하는 최소한의 값이라고 한다. 보철물을 재제작하는 경우 ΔE 가 5.5일 때⁴라고 보고한 연구가 있다.

이러한 연구를 고려해 볼 때 Kubelka-Munk 이론을 이용한 결과에서 실측치와의 ΔE 의 범위가 1.42 ~ 2.66인 것은 이러한 컴퓨터를 이용한 색상 매칭이 지르코니아를 사용한 보철수복 임상에서 유효하게 사용될 수 있다는 것을 의미하며, 더불어 객관화되고 수치화된 방법을 통한 보철물 색상의 결정과 보철물 제작이 가능하다고 보여진다. 또한 임상가들이 shade guide 에 의한 보철물 제작을 대체할 수 있을 정도로 우수한 결과라고 여겨진다.

하지만 shade guide를 통한 업체가 제안한 지르코니아 보철물을 제작하게 되면 ΔE 가 최소 4.98에서 최대 6.64까지 발생할 수 있고, 육안으로도 그 차이를 잘 느낄 수

Table 3. Layer combinations showing minimized color differences by suggested, calculated and measured colors

Shade guide	업체 제안			K-M 예상			실측치		
	Porcelain	Core	ΔE	Porcelain	Core	ΔE	Porcelain	Core	ΔE
A1	A1	FS1	7.48	A4	FS1	0.51	A3	FS1	0.05
A2	A2	FS3	7.80	A4	FS4	0.69	A4	FS3	0.25
A3	A3	FS3	6.99	A4	FS4	3.49	A4	FS4	1.89
A3.5	A3.5	FS4	8.48	A4	FS4	5.83	A4	FS4	4.23
A4	A4	FS4	8.01	A4	FS4	7.56	A4	FS4	5.96

있으며, 보철물의 재제작의 가능성이 높아짐을 의미한다. 따라서 장기적으로 보았을 때 shade guide를 대체해 spectrophotometer를 이용한 방법으로 바뀌는 것이 바람직해 보인다.

그러나 이번 실험에서 사용한 Vita classic shade guide는 Vita 3D - Master shade guide (VITA Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany)에 비하여 체계적으로 제작되지 못한 제품이며, 자연치 색상 재현에 성능이 우수하지 못하다고 알려져 있다(Bayindir 등, 2007). 따라서 Vita 3D - Master shade guide를 비롯한 다른 우수한 shade guide를 통한 실험을 시도해보는 것도 가능할 것이다.

5. 결 론

실험을 통하여 치과 지르코니아를 이용하여 Kubelka-Munk 이론을 적용한 색상의 예측과 실제 측정 색상 그리고 shade guide의 색상을 비교분석해 보았다. Kubelka-Munk 이론을 치과 지르코니아 포세린과 코어에 적용하였을 경우 실제의 색상과의 비교에서 최대 ΔE 가 2.66으로 나타났다. 또한 Vita classic shade guide를 통하여 업체의 제안을 따라 보철물 제작하는 경우 최소 ΔE 가 4.98 발생하여 의도한 색상과 많이 다른 결과물을 얻을 가능성이 높다.

참고문헌

한국치과재료학교수협의회 (2008), 치과재료학, 5판, 서울: 군자출판사 pp. 345-373.

Allen E (1974). Basic equations used in computer color matching, 2. Tristimulus match, two constant theory, *J Opt Soc Am* 64:991-993.

Bayindir F, Kuo, S, Johnston, WM, & Wee AG (2007). Coverage error of three conceptually different shade guide systems to vital unrestored dentition. *J Prosthet Dent* 98(3):175-85.

Douglas RD, Brewer JD (1998). Acceptability of shade differences in metal ceramic crowns. *Journal of Prosthetic Dentistry* 1998;79:254-60.

Douglas RD, Steinhauer TJ, Wee AG (2007). Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch. *J Prosthet Dent* 97:200-8.

Ishikawa-Nagai S (1990). Colorimetric study of dental porcelain - The characteristics of the absorption and scattering coefficients, *J Jpn Pros Soc* 34:585-591.

Johnston WM, Kao EC (1989). Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *J Dent Res* 68:819-22.

Joiner A (2004). Tooth color: a review of the literature, *J Dent* 32:3-12.

Judd DB, Wyszecki G (1975). Color in business, science and industry, 3rd ed, New York: John Wiley & Sons

Kubelka P, Munk F (1931). Ein Beitrag zur Optik der Farbanstriche, *Zeits. f. Techn. Physik* 1931:12:593-601.

Miyagawa Y and Powers JM (1983). Prediction of color of an esthetic restorative material, *J Dent Res* 62 (5):581-584

Ragain JC and Johnston WM (2001). Accuracy of Kubelka-Munk reflectance theory applied to human dentin and enamel, *J Dent Res* 80(2):449-452.

Ruyter IE, Nilner K, Moller B (1987). Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. *Dent Mater* 3:246-51.

Wayne D. Cook, Deborah C. McAree (1985). Optical properties of esthetic restorative materials and natural dentition, *J Biomed Mater Res* 19:469-488.

Yu B, Ahn JS, Lee YK (2009). Measurement of translucency of tooth enamel and dentin, *Acta Odontol Scand* 67:57-64.