

다른 특성을 가지는 도재가 반복소성에 따라 색조변화에 미치는 영향

황 재 선
동남보건대학 치기공과

The Effect of Repeated Firing on the Color Difference of a Metal-Ceramic System with Different Porcelain Powder

Jae-Sun Hwang

Department of Dental Laboratory Technology, Dongnam Health College

[Abstract]

The goal of esthetic restoration is to achieve morphologic, optical, and biologic acceptance. Creation of a natural looking ceramic restoration, which blends harmoniously with surrounding dentition, is not always achieved.

A successful color match is an important aspect of any esthetic dental restoration. Since natural enamel has inherent translucency, it is important that ceramic restorations reproduce the translucency and color of the natural teeth. However, the final color match of porcelain crowns to adjacent natural dentition remains some problem.

Difficulties related to color matching arise from the structural differences that exist between metal ceramic crowns and natural teeth, the limited range of available ceramic shades, inadequate shade guides, different types of metal alloys, repeated firing, the condensation technique, and varying compositions of ceramic materials. Many factors contribute to the esthetic success of dental restoration: optical properties such as color and its elements of hue, value, and chroma; translucency and opacity; light transmission and scattering; and metamerism and fluorescence.

The purpose of this study was to determine the color changes of metal-ceramic system with different veneering porcelain powder after repeated firing.

The objectives of this in vitro study were to measure the lightness(L*), chromaticity(a*), chromaticity(b*), chroma(C*), hue(h), reflectance(%), color difference(ΔE).

The following conclusions were obtained:

1. An increase in the number of firings resulted in decrease in lightness(L*) but increase in chromaticity(a*) with all porcelain. After the second sintering resulted in decrease in chromaticity(b*) with opaque-dentin porcelain and dentin porcelain but in increase with enamel porcelain and translucency porcelain. And after the second sintering resulted in decrease in chroma(C*) with opaque-dentin porcelain and dentin porcelain, but on the whole side in decrease with enamel porcelain and translucency porcelain.

2. After the second firing, a increase in the number of firings resulted in decrease reflectance(%) in all wavelength.

교신저자	성명	황 재 선	전화	031-249-6495	E-mail	hjs1031@dongnam.ac.kr
	주소	경기도 수원시 장안구 정자동 937, 동남보건대학 치기공과				

3. There were noticeable color differences(ΔE) between first sintering and multiple firings(dentin porcelain: 5.29 ~ 8.15, opaque-dentin porcelain: 4.83~8.2, enamel porcelain: 8.93~13.15, translucency porcelain: 9.37~12.91), but the color difference(ΔE) after second sintering were down to 4.87 in all porcelain.

4. Given the NBS Criteria, a 'trace' was not found this study but a 'slight' was found 2-3, 3-5 in dentin porcelain, 2-3 in opaque-dentin porcelain, 3-5, 5-10 in enamel porcelain and translucency porcelain, a 'noticeable' was 2-5, 3-10, 5-10 in dentin porcelain and opaque-dentin porcelain, 2-3, 2-5, 3-10 in enamel porcelain 2-3, 3-10 in translucency porcelain, an 'appreciable' was 1-2, 1-3, 2-10 in dentin porcelain 1-2, 1-3, 2-10, 3-10 in opaque-dentin porcelain, 2-10 in enamel porcelain, 2-5, 2-10 in translucency porcelain, a 'much' was 1-5, 1-10 in dentin porcelain and opaque-dentin porcelain, 1-2, 1-3, 1-5 in enamel porcelain 1-2, 1-3, 1-5, 1-10 in translucency porcelain, a 'very much' was 1-10 in enamel porcelain.

○Key word : repeated firing, multiple firing, porcelain, NBS unit, CIE LAB, color difference, color

I. 서 론

치과치료에서의 심미란 자연스러움을 나타내며, 보철치료 시 치아의 외형, 색상 등을 자연스럽게 표현하기 위해 도재를 보철물의 재료로 오래전부터 사용해왔다(Kelly 등, 1996).

치과기공사는 환자의 자연치와 심미적으로 조화될 수 있는 도재수복물을 제작하기 위해 오랫동안 많은 노력을 기울여 왔다. 도재 수복물을 구강내에서 자연스럽게 보일 수 있도록 제작하는 것은 쉬운 일이 아니다. 금속-도재 수복물은 일반적으로 구강 내에 있어 밝게 빛나는 것처럼 들떠 보이거나 반대로 어둡고 가라앉은 것 같이 보이기도 하고 또 도자기와 같이 opaque한 죽은 치아처럼 보이는 경우도 있다(Jacobs SH 등, 1987). 도재수복물의 심미성에 영향을 주는 요소로는 자연치 특유의 투명감과 고유한 색채 등을 들 수 있는데, 도재수복물의 두께(Hefferman 등, 2002), 미세구조(Ding 등, 1999), 소성횟수(Mclean JW, 1995) 등은 도재수복물의 투명성에 영향을 미치며 (Seghi 등, 1989), 오팔효과, 형광성, 표면구조, 형태, 소성횟수, 응축기술 등은 색상재현에 영향을 미친다(Barghi N과 Richardson JT, 1978). 이러한 다양한 요소들에 의해 도재수복물의 심미성이 결정되는데 수복물과 자연치는 구조적인 차이에 의해 빛의 반사와 흡수 양상이 다르기 때문에 이러한 모든 요소가 자연치와 조화로운 도재수복물을 제작 하는 데에는 한계가 있다. 자연치에 나타나는 전

체적인 색조효과는 법랑질 표면으로부터 반사된 빛과 법랑질과 상아질에서 확산된 빛 그리고 다시 뒤에서 되반사된 빛의 조합의 결과로써 색조는 상아질에 의해서 주로 결정되며 법랑질의 두께와 반투명도에 의해 변화된다.

일반적으로 PFM과 all-ceramic 제작과정 시 도재전용 소결로를 이용하여 400℃이상의 온도에서 소결을 시작하여 유리전이온도인 Tg이상의 온도까지 상승하여 소결을 완료하는 과정들을 최소한 5차례 이상 반복하게 된다. 소결이 완료된 후 실온까지 냉각이 이루어지는데 이때 약 600℃/min 의 속도로 냉각이 이루어진다. 소결과 냉각이 이루어지는 과정에서 재료내에는 많은 열적 stress가 발생되게 되는데 이때 발생하는 stress는 일시적이거나 재료내부에 남을 수도 있게 된다. 소결 시 생성되는 입자의 크기 및 결정상들, 냉각 시 발생하는 열적 stress로 인한 micro crack등도 색조재현에 크게 영향을 미칠 수 있다 (Fairhurst 등, 1989).

자연스러운 심미도재보철물을 위해서는 다양한 도재분말(치경부 도재, 상아질 도재, 법랑질 도재, 반투명 도재)을 이용하여 증류수 또는 special liquid와 혼합하여 적층법(layering technique)을 이용하여 축성한다. 치경부에는 cervical porcelain powder를, 상아질부위에는 dentin porcelain powder를, 절단부위에는 enamel porcelain powder를 축성하며 투명도를 재현하기 위해서는 translucency porcelain powder를, 효과를 부여하기 위해서는 modified porcelain powder, effected

porcelain powder를 이용하여 적층한다. 적층 시에는 각각의 혼합된 도재들이 서로 섞이지 않도록 유의하며 적층(build-up)해야 한다. 이러한 도재분말들이 서로 혼합될 시 우리가 원하는 색을 얻을 수 없어 심미적인 치과도재 보철물을 제작할 수 없게 된다.

일반적으로 한 개의 도재치아(porcelain teeth)를 제작할 시에 다양한 도재분말을 적층함으로써 인해서 색조혼합을 방지하며 소성수축으로 인한 형태를 파악하고자 도재를 여러 번 반복소성하게 된다. 또한 형태 수정 및 부족한 부위가 발생할 경우 임상에서는 빈번하게 반복소성이 이루어지고 있으며 이러한 반복소성은 우리가 원하는 자연치의 색조와 투명성에 영향을 미친다고 알려져 있다.

본 연구에서는 치과용 도재분말 중 상아질 도재(dentin porcelain powder), 법랑질 도재(enamel porcelain powder), 불투명-상아질 도재(opaque dentin porcelain powder), 반투명 도재(translucency porcelain powder)를 반복소성함으로써 나타나는 색변화를 국제조명위원회(Commission Internationale de JE clairage)에 의해 개발된 CIE LAB 색체계의 3가지 빛의 속성인 명도(Lightness, L*), 적색-초록에서의 색도(red-green axis, a*), 황색-파랑에서의 색도(yellow-blue axis, b*)와 채도(Chroma, C*), 색상(Hue, h), 반사율(Reflectance, %)을 분석하여 색차(color difference, ΔE)와 NBS unit을 이용하여 결과를 제시함으로써 임상가들에게 치과도재 제작 시 반복소성의 영향을 제시하고자 한다.

II. 연구방법

1. 실험재료

서로 다른 특성을 가지는 도재가 반복소성에 따라 치과용 도재의 색조변화에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Vintage porcelain powder(Shofu INC., Japan)를 이용하여 실험하였으며 각 특성의 도재는 아래의 표와 같다.

Table 1. Materials tested in this study

Code	Property
A3B	Dentin porcelain powder
59	Enamel porcelain powder
ODA3	Opaque-Dentin porcelain powder
OT	Opal-Translucency porcelain powder

2. 실험방법

1) 시편제조

각각의 도재를 기공과정과 동일하게 유리판위에서 증류수와 혼합한 후 몰드내에 주입하였다. 몰드는 지름이 20.0mm, 두께 2.0mm 크기의 디스크형 몰드를 사용하였다(Fig.1). 도재분말을 응축(condensation)하고 tissue를 이용하여 수분을 제거한다. 응축이 완료되면 몰드에서 분리한 후 도재소성로(porcelain furnace)(Programat X1, Ivoclar Vivadent AG.)를 이용하여 소성한다(Fig.2). 소성은 450℃까지 5분간 건조 시키고, 450℃에서 940℃까지 분당 50℃의 상승온도로 상승시켰다. 940℃에서는 1분 30초간 유지시킨 후 1분간 냉각과정을 거치는 것으로 소성스케줄을 잡았다(Fig.3). 소성시 진공은 100% 진공을 가해졌으며 450℃에서 940℃까지 계속 진공상태에서 소성하였다. 소성이 완료되면 시편의 표면을 연마하기 위

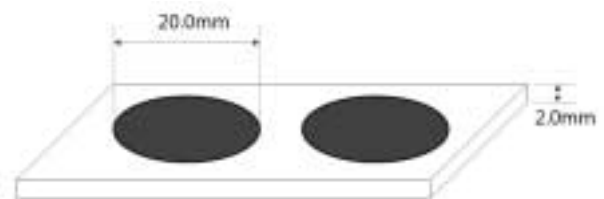


Fig. 1. The schematic illustration of mold design

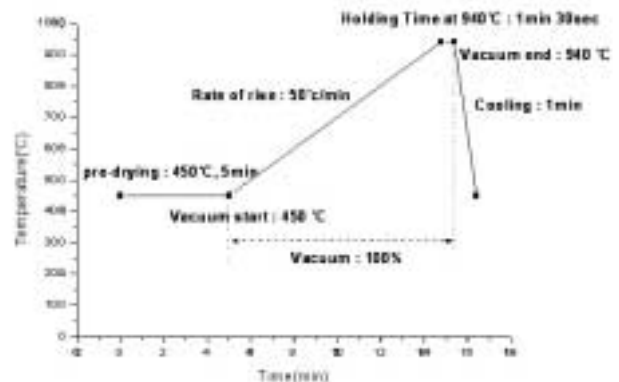


Fig. 2. Sintering schedule

하여 SiC paper #220을 이용하여 두께가 2.0mm가 되게 균일하게 양면을 연마하였다. 연마가 완료된 시편은 초음파세척기에서 5분간 세척한 후 표면을 건조시켰다.

2) 반복소성

각각의 다른 특성을 가지는 도재가 반복소성에 따라 색차에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 1회, 2회, 3회, 5회, 10회 반복소성으로 총 5그룹으로 나누어 관찰하였다. 각 소성 스케줄은 시편 제조와 동일하게 하였다.

3) 색차색도 분석

반복소성이 완료된 시편은 색차색도계(Spectrophotometer CM-3500d, Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 색차를 분석하였다. 색차색도 측정시 표준 D65광원(daylight)을 이용하여 주위환경에 영향을 받지 않도록 하였다. 색차색도 측정은 각 시편을 3회씩 측정하여 평균값을 얻었으며, 측정 후 컴퓨터프로그램을 이용하여 CIE LAB 색공간 좌표인 L*, a*, b* 그리고 C*, h 값 및 wavelength 값을 측정하였다. 측정되어진 값을 이용하여 ΔE를 계산하여 색차를 분석하였으며, National Bureau Standards (NBS) unit을 아래의 식을 이용하여 좀 더 명확히 색조변화를 관찰하였다.

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{[(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]}$$

$$NBS\ unit = \Delta E^*_{ab} \times 0.92$$

Table 2. National Bureau Standards(NBS) unit

Critical remarks of color differences	NBS unit
Trace	0 ~ 0.5
Slight	0.5 ~ 1.5
Noticeable	1.5 ~ 3.0
Appreciable	3.0 ~ 6.0
Much	6.0 ~ 12.0
Very much	12.0~

III. 연구결과

1. 명도변화(L*)

상아질 도재의 명도 값은 1회 소성 시에는 55.51, 2회

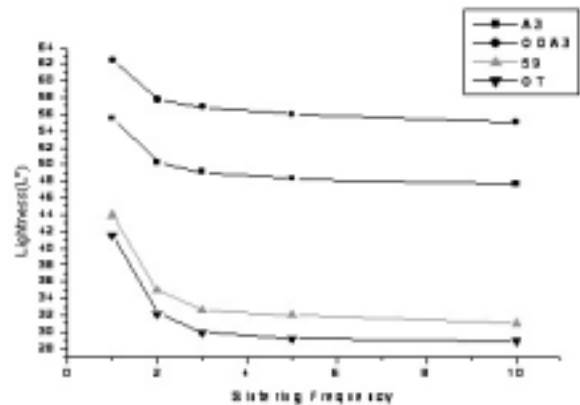


Fig. 3. The graph of lightness

소성 시에는 50.3, 3회 소성 시에는 49.09, 5회 소성 시에는 48.31, 10회 소성 시에는 47.69의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 불투명-상아질 도재의 명도 값은 1회 소성 시에는 62.51, 2회 소성 시에는 57.73, 3회 소성 시에는 56.85, 5회 소성 시에는 56.04, 10회 소성 시에는 55.03의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 법랑질 도재의 명도 값은 1회 소성 시에는 43.93, 2회 소성 시에는 35.05, 3회 소성 시에는 32.66, 5회 소성 시에는 31.98, 10회 소성 시에는 31.03의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 반투명 도재의 명도 값은 1회 소성 시에는 41.5, 2회 소성 시에는 32.17, 3회 소성 시에는 29.94, 5회 소성 시에는 29.2, 10회 소성 시에는 28.9의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 모든 도재에서 2회 소성 시에 명도가 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있으며, 이후 소성을 반복함에 따라 완만하게 명도가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 불투명-상아질 도재의 명도 값이 가장 크게 나타났으며 반투명 도재의 명도 값이 가장 낮게 나타났다(Fig.3).

2. 색도변화(red-green axis, a*)

색도 중 상아질도재의 a* 값은 1회 소성 시에는 1.03, 2회 소성 시에는 1.21, 3회 소성 시에는 1.26, 5회 소성 시에는 1.31, 10회 소성 시에는 1.46의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 불투명-상아질 도재의 a* 값은 1회 소성 시에는 1.91, 2회 소성 시에는 2.02, 3회 소성 시에는 2.11, 5회 소성 시에는 2.2, 10회 소성 시에는 2.18의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 법랑질 도재의 a* 값은

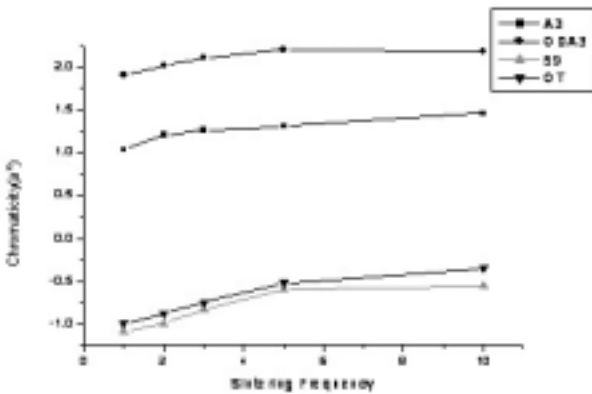


Fig. 4. The graph of chromaticity(a*)

1회 소성 시에는 -1.09, 2회 소성 시에는 -0.99, 3회 소성 시에는 -0.84, 5회 소성 시에는 -0.6, 10회 소성 시에는 -0.56의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 반투명 도재의 a* 값은 1회 소성 시에는 -0.99, 2회 소성 시에는 -0.88, 3회 소성 시에는 -0.75, 5회 소성 시에는 -0.52, 10회 소성 시에는 -0.35의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 모든 도재에서 소성을 반복함에 따라 a* 값이 점차 완만하게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 불투명-상아질 도재의 a* 값이 가장 크게 나타났으며 법랑질 도재의 a* 값이 가장 낮게 나타났다(Fig.4).

3. 색도 변화(yellow-blue axis, b*)

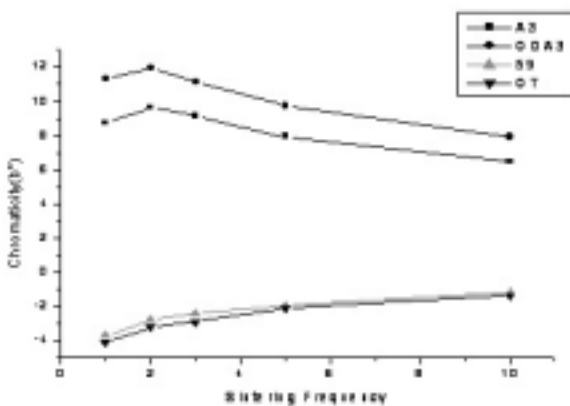


Fig. 5. The graph of chromaticity(b*)

색도 중 상아질 도재의 b* 값은 1회 소성 시에는 8.72, 2회 소성 시에는 9.63, 3회 소성 시에는 9.15, 5회 소성 시에는 7.93, 10회 소성 시에는 6.47의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 불투명-상아질 도재의 b* 값은 1회 소

성 시에는 11.28, 2회 소성 시에는 11.97, 3회 소성 시에는 11.15, 5회 소성 시에는 9.73, 10회 소성 시에는 7.92의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 법랑질 도재의 b* 값은 1회 소성 시에는 -3.67, 2회 소성 시에는 -2.76, 3회 소성 시에는 -2.41, 5회 소성 시에는 -1.93, 10회 소성 시에는 -1.19의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 반투명 도재의 b* 값은 1회 소성 시에는 -4.1, 2회 소성 시에는 -3.2, 3회 소성 시에는 -2.88, 5회 소성 시에는 -2.11, 10회 소성 시에는 -1.35의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 상아질 도재와, 불투명-상아질 도재에서는 1회 소성시보다 2회 소성 시에 b* 값이 증가했으며 그 이후 소성을 반복함에 따라 b* 값이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 법랑질 도재와, 반투명 도재에 있어서는 반복소성을 함에 따라 b* 값이 완만하게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 불투명-상아질 도재의 b* 값이 가장 크게 나타났으며 반투명 도재의 b* 값이 가장 낮게 나타났다(Fig.5).

4. 채도 변화(C*)

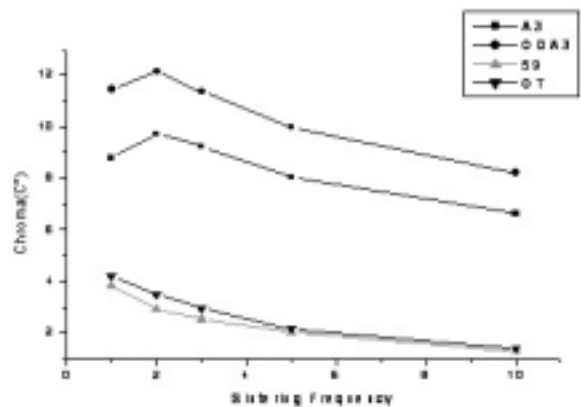


Fig. 6. The graph of chroma(C*)

상아질 도재의 채도 C* 값은 1회 소성 시에는 8.78, 2회 소성 시에는 9.71, 3회 소성 시에는 9.23, 5회 소성 시에는 8.03, 10회 소성 시에는 6.63의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 불투명-상아질 도재의 채도 C* 값은 1회 소성 시에는 11.44, 2회 소성 시에는 12.14, 3회 소성 시에는 11.35, 5회 소성 시에는 9.97, 10회 소성 시에는 8.21의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 법랑질 도재의 채도 C* 값은 1회 소성 시에는 3.83, 2회 소성 시에는 2.93, 3회 소

성 시에는 2.55, 5회 소성 시에는 2.02, 10회 소성 시에는 1.31의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 반투명 도재의 채도 C* 값은 1회 소성 시에는 4.22, 2회 소성 시에는 3.51, 3회 소성 시에는 2.98, 5회 소성 시에는 2.17, 10회 소성 시에는 1.4의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서는 1회 소성시보다 2회 소성 시에 C* 값이 증가했으며 그 이후 소성을 반복함에 따라 C* 값이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있었지만 법랑질 도재와 반투명 도재에 있어서는 반복소성을 함에 따라 C* 값이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 불투명 상아질 도재의 C* 값이 가장 크게 나타났으며 법랑질 도재의 C* 값이 가장 낮게 나타났다(Fig.6).

5. 색상변화(h)

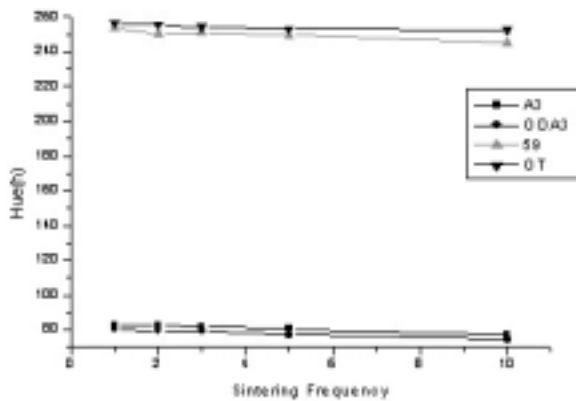
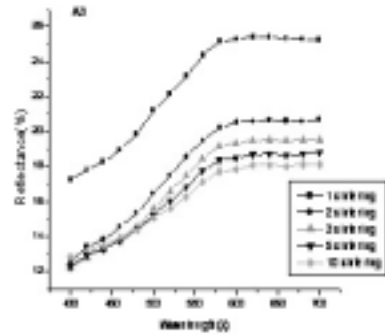


Fig. 7. The graph of hue(h)

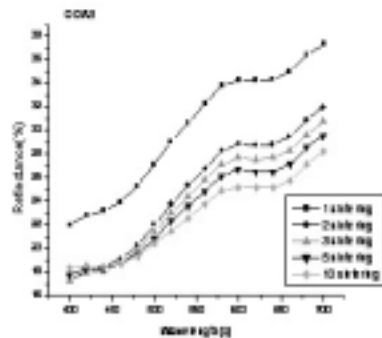
상아질 도재의 색상 h 값은 1회 소성 시에는 83.25, 2회 소성 시에는 82.83, 3회 소성 시에는 82.13, 5회 소성 시에는 80.65, 10회 소성 시에는 77.3의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 불투명-상아질 도재의 색상 h 값은 1회 소성 시에는 80.37, 2회 소성 시에는 79.55, 3회 소성 시에는 79.29, 5회 소성 시에는 77.28, 10회 소성 시에는 74.63의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 법랑질 도재의 색상 h값은 1회 소성 시에는 253.44, 2회 소성 시에는 250.19, 3회 소성 시에는 249.74, 5회 소성 시에는 249.61, 10회 소성 시에는 244.9의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다. 반투명 도재의 색상 h값은 1회 소성 시에는 256.43, 2회 소성 시에는 255.53, 3회 소성 시에는 254.35, 5회 소성 시에는 253.15, 10회 소성 시에는

252.51의 값을 가지는 것을 관찰할 수 있었다(Fig.7).

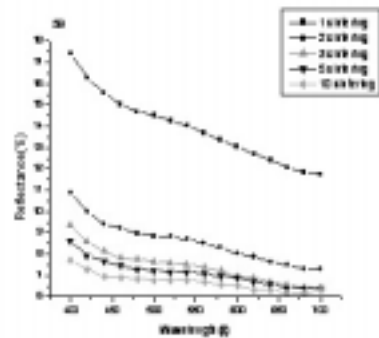
6. 반사율(%)



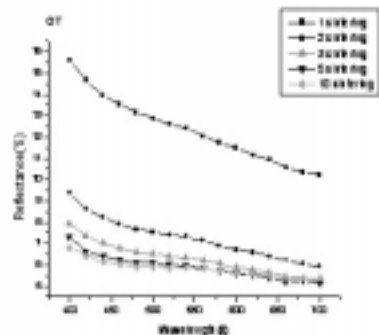
(a) Dentin porcelain (A3)



(b) Opaque-dentin porcelain (ODA3)



(c) Enamel porcelain (59)

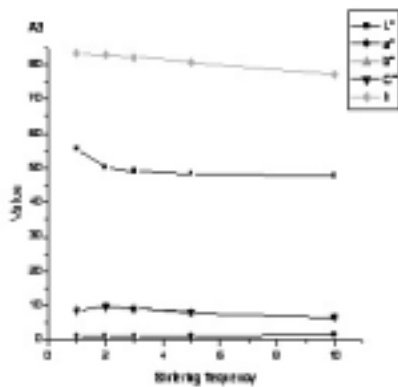


(d) Translucency porcelain (OT)

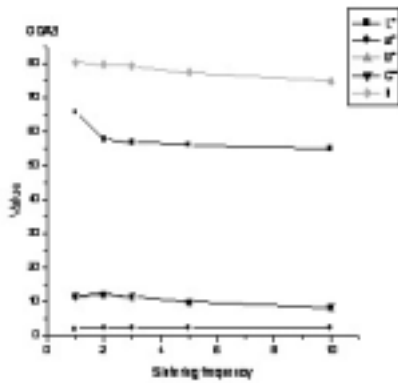
Fig. 8. The graph of reflectance

반사율은 반복소성을 함에 따라 모든 특성의 도재에 있어서 전체적인 감소가 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서는 단파장대에서의 반사율보다 장파장대에서 반사율의 감소가 두드러지는 것을 관찰할 수 있었으며, 범랑질 도재와 반투명 도재에서는 장파장대에서의 반사율보다 단파장대에서 반사율의 감소가 두드러지는 것을 관찰할 수 있었다(Fig.8).

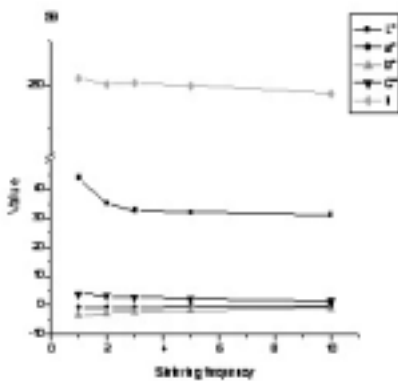
7. 도재의 특성에 따른 변화



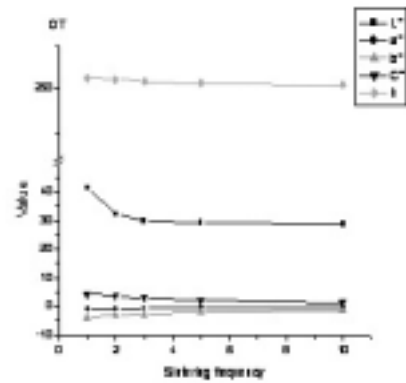
(a) Dentin porcelain (A3)



(b) Opaque-dentin porcelain (ODA3)



(c) Enamel porcelain (59)



(d) Translucency porcelain (OT)

Fig. 9. The graph of lightness(L), hue(h)

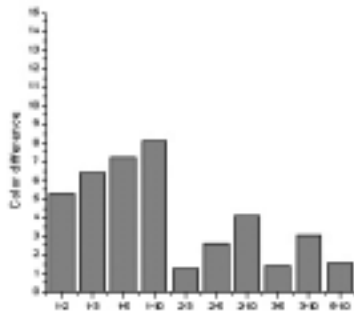
각기 다른 특성을 가지는 도재에서 반복소성의 변화를 관찰해보면 각각의 값은 2회 소성이후 큰 차이를 나타내는 것을 관찰할 수 있었으며 상아질 도재와 불투명 상아질 도재에서의 C* 값이 b* 값과 유사한 경향을 나타내는데 이는 C* 값이 a*, b* 값에 의존하는데 b* 값이 a* 값보다 상대적으로 크게 나타난 결과이다(Fig.9).

8. 색차(ΔE)

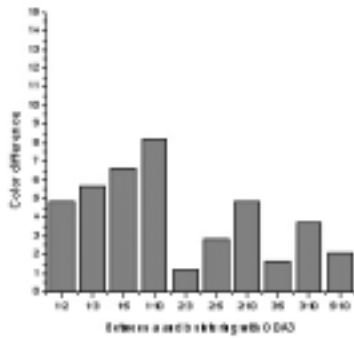
상아질 도재의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 분석한 결과 2회 소성한 시편과는 5.29, 3회 소성한 시편과의 색차는 6.44, 5회 소성한 시편과의 색차는 7.25, 10회 소성한 시편과는 8.15를 나타내었으며, 2회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 3회 소성한 시편과는 1.30, 5회 소성한 시편과는 2.62, 10회 소성한 시편과는 4.10을 나타내었으며, 3회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 5회 소성한 시편과는 1.45, 10회 소성한 시편과는 3.03을 나타내었으며, 5회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 10회 소성한 시편과는 1.59를 나타내었다(Fig.10.a).

불투명-상아질 도재의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 분석한 결과 2회 소성한 시편과는 4.83, 3회 소성한 시편과의 색차는 5.67, 5회 소성한 시편과의 색차는 6.66, 10회 소성한 시편과는 8.2를 나타내었으며, 2회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 3회 소성한 시편과는 1.21, 5회 소성한 시편과는 2.81, 10회 소성한 시편과는 4.87을 나타내었으며, 3회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 5회 소성한 시

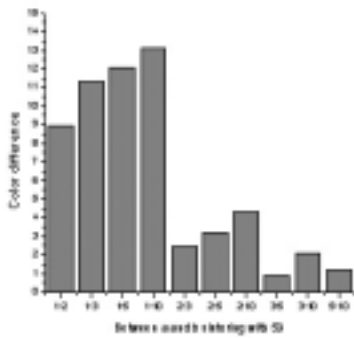
편과는 1.63, 10회 소성한 시편과는 3.71을 나타내었으며, 5회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 10회 소성한 시편과는 2.07을 나타내었다(Fig.10.b).



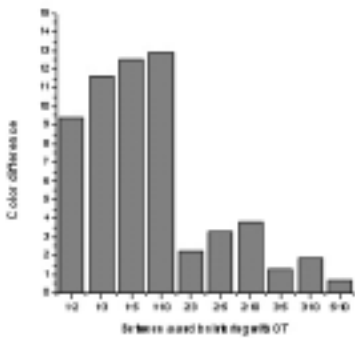
(a) Dentin porcelain (A3)



(b) Opaque-dentin porcelain (ODA3)



(c) Enamel porcelain (59)



(d) Translucency porcelain (OT)

Fig. 10. The graph of color difference(ΔE)

법랑질 도재의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 분석한 결과 2회 소성한 시편과는 8.93, 3회 소성한 시편과의 색차는 11.34, 5회 소성한 시편과의 색차는 12.09, 10회 소성한 시편과는 13.15를 나타내었으며, 2회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 3회 소성한 시편과는 2.42, 5회 소성한 시편과는 3.2, 10회 소성한 시편과는 4.34를 나타내었으며, 3회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 5회 소성한 시편과는 0.87, 10회 소성한 시편과는 2.06을 나타내었으며, 5회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 10회 소성한 시편과는 1.2를 나타내었다(Fig.10.c).

반투명 도재의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 분석한 결과 2회 소성한 시편과는 9.37, 3회 소성한 시편과의 색차는 11.63, 5회 소성한 시편과의 색차는 12.5, 10회 소성한 시편과는 12.91을 나타내었으며, 2회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 3회 소성한 시편과는 2.26, 5회 소성한 시편과는 3.26, 10회 소성한 시편과는 3.8을 나타내었으며, 3회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 5회 소성한 시편과는 1.25, 10회 소성한 시편과는 1.89를 나타내었으며, 5회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차를 비교하면 10회 소성한 시편과는 0.66을 나타내었다(Fig.10.d).

9. NBS(National Bureau Standards) unit

색차를 이용하여 NBS 지수를 계산한 결과 상아질 도재에서 1회 소성한 시편과 2회 소성한 시편과의 NBS 지수는 4.9, 3회 소성한 시편과는 5.9, 5회 소성한 시편과는 6.7, 10회 소성한 시편과는 7.5를 나타내었다. 2회 소성한 시편과 3회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.2, 5회 소성한 시편과는 2.4, 10회 소성한 시편과는 3.8을 나타내었다. 3회 소성한 시편과 5회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.3, 10회 소성한 시편과는 2.8을 나타내었다. 5회 소성한 시편과 10회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.5를 나타내었다.

불투명-상아질 도재에서 1회 소성한 시편과 2회 소성한 시편과의 NBS 지수는 4.4, 3회 소성한 시편과는 5.2, 5회 소성한 시편과는 6.1, 10회 소성한 시편과는 7.5를 나타내었다. 2회 소성한 시편과 3회 소성한 시편과의 NBS

지수는 1.1, 5회 소성한 시편과는 2.6, 10회 소성한 시편과는 4.5를 나타내었다. 3회 소성한 시편과 5회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.5, 10회 소성한 시편과는 3.4를 나타내었다. 5회 소성한 시편과 10회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.9를 나타내었다.

법랑질 도재에서 1회 소성한 시편과 2회 소성한 시편과의 NBS 지수는 8.2, 3회 소성한 시편과는 10.4, 5회 소성한 시편과는 11.1, 10회 소성한 시편과는 12.1을 나타내었다. 2회 소성한 시편과 3회 소성한 시편과의 NBS 지수는 2.2, 5회 소성한 시편과는 2.9, 10회 소성한 시편과는 4.0을 나타내었다. 3회 소성한 시편과 5회 소성한 시편과의 NBS 지수는 0.8, 10회 소성한 시편과는 1.9를 나타내었다. 5회 소성한 시편과 10회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.1을 나타내었다.

반투명도재에서 1회 소성한 시편과 2회 소성한 시편과의 NBS 지수는 8.6, 3회 소성한 시편과는 10.7, 5회 소성한 시편과는 11.5, 10회 소성한 시편과는 11.9를 나타내었다. 2회 소성한 시편과 3회 소성한 시편과의 NBS 지수는 2.1, 5회 소성한 시편과는 3.0, 10회 소성한 시편과는 3.5를 나타내었다. 3회 소성한 시편과 5회 소성한 시편과의 NBS 지수는 1.1, 10회 소성한 시편과는 1.7을 나타내었다. 5회 소성한 시편과 10회 소성한 시편과의 NBS 지수는 0.6을 나타내었다.

NBS 지수에 따라 'Trace'로 평가 되는 것은 관찰할 수 없었으며, 상아질도재의 2-3, 3-5 불투명-상아질도재의 2-3, 법랑질도재의 3-5, 5-10, 반투명도재의 3-5, 5-10회 소성한 시편은 'Slight'으로 평가할 수 있으며, 상아질도재의 2-5, 3-10, 5-10, 불투명-상아질도재의 2-5, 3-10, 5-10, 법랑질도재의 2-3, 2-5, 3-10, 반투명도재의 2-3, 3-10회 소성한 시편은 'Noticeable'으로 평가할 수 있으며, 상아질도재의 1-2 1-3, 2-10 불투명-상아질도재의 1-2, 1-3, 2-10, 3-10 법랑질도재의 2-10, 반투명도재의 2-5, 2-10회 소성한 시편은 'Appreciable'로 평가할 수 있으며, 상아질도재의 1-5, 1-10, 불투명-상아질도재의 1-5, 1-10, 법랑질도재의 1-2, 1-3, 1-5, 반투명도재의 1-2, 1-3, 1-5, 1-10회 소성한 시편은 'Much'로 평가할 수 있으며, 법랑질도재의 1-10회 소성한 시편은 'Very much'로 평가될 수 있다(Fig.11).

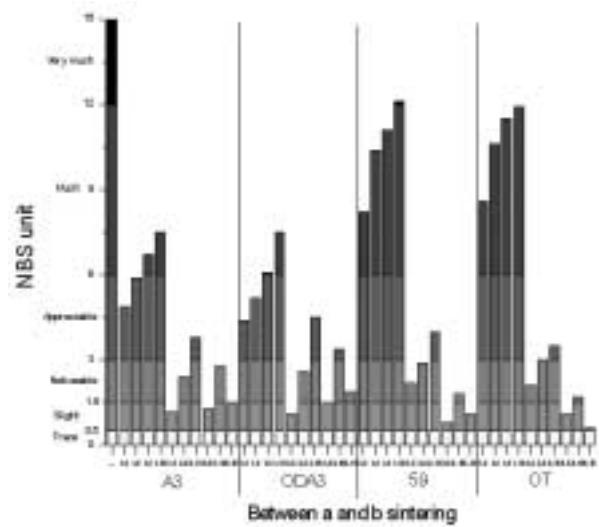


Fig. 11. The graph of NBS unit

IV. 고 찰

심미보철물중 가장 대표적이며 임상에서 흔히 이용되어 지는 것은 porcelain fused crown(PFM)이다. 이러한 porcelain fused crown(PFM)을 이용한 치과보철물을 성공으로 이끌기 위해서는 금속과 도재의 결합, 색 안정성이 중요한 요구조건으로 제시된다. 실제 임상에서는 한 개의 치과도재보철물을 제작하기위해서는 여러 번 반복 소성을 시행한다. 이러한 반복 소성 시 색 안정성은 도재 보철물의 성공요건의 굉장히 중요한 요소이다.

색분석에 있어서는 Munsell system과 색공간 좌표를 활용한 CIE 표색계가 이용되는데 기계적 정량화가 가능한 표색계를 이용하여 분석하는 방법이 많이 이용된다. CIE 표색계는 1931년에 처음 개발 되었으며, 광원과 관찰자에 대한 정보를 표준화하고 표준광원 하에서 표준관찰자에 의해 관찰되는 색을 수치화한 것이다. 이러한 표색계에는 CIEXYZ, CIELAB등 여러 가지가 있다. CIE XYZ 표색계는 균등하지 않은 표색계로 사람이 CIEXYZ 표색계 내에서 일정한 거리의 색들을 보고 판단하였을 때 그 색차가 같지 않다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 색차가 일정하여 보다 더 균일하고 통일된 색차계를 고안하였는데 그것이 CIELAB 표색계이다(Alvin 등, 2007).

보색이론에 바탕하고 있는 CIELAB 표색계는 3원색 이론에 바탕하고 있는 X, Y, Z 3자 극치로부터 계산되어지며 International Commission on Illumination에 의해 1976년에 소개되었고 색공간 $L^*a^*b^*$ 로 정의된다. L^* 은 명도를 나타내고 0에서 100까지의 수로 표시한다. L^* 의 값이 커질수록 흰색에 가까우며 L^* 값이 적을수록 검은색에 가까워진다. a^* 는 적색 및 녹색을 나타내는 지표(red-green axis)이며 값이 클수록 적색을 값이 적을수록 녹색을 나타낸다. b^* 는 황색과 청색을 나타내는 지표(yellow-blue axis)이며 값이 클수록 황색을 값이 적을수록 청색을 나타낸다. 또한 C^* 는 채도를 나타내며 원점에서 색공간 좌표까지의 거리이며 이는 a^* 와 b^* 값을 이용하여 계산할 수 있다. 따라서 a^* 와 b^* 값이 증가하면 자연히 채도도 증가하게 된다. h 는 색상으로 정의되며 a 축($h=0$)에서부터 반시계방향으로 증가하는 각도로 나타내어질 수 있다. CIE $L^*a^*b^*$ 지수에 기준을 둔 색차(ΔE)는 이런 색차계 및 다양한 값들을 이용하여 색을 정량화하고 그 위치와 거리 차이를 이용하여 색 차이를 정량적으로 평가하기 위하여 사용한다(CIE publication No15:2004).

CIE $L^*a^*b^*$ 및 C^* , h 는 아래의 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\text{if } \left(\frac{X}{X_n}\right), \left(\frac{Y}{Y_n}\right), \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.008856$$

Lightness axis, $L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$
 Red-Green axis, $a^* = 500[(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}]$
 Yellow-Blue axis, $b^* = 200[(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]$

$$\text{if } \left(\frac{X}{X_n}\right), \left(\frac{Y}{Y_n}\right), \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.008856$$

Lightness axis, $L^* = 903.29(Y/Y_n)$
 Red-Green axis, $a^* = 3893.5[(X/X_n) - (Y/Y_n)]$
 Yellow-Blue axis, $b^* = 1557.4[(Y/Y_n) - (Z/Z_n)]$

Metric chroma, $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$
 Hue angle, $h = \tan^{-1}(b^*/a^*)$

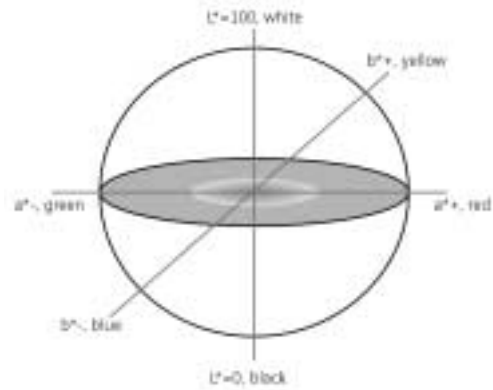


Fig.12. Cylindrical CIELAB color space

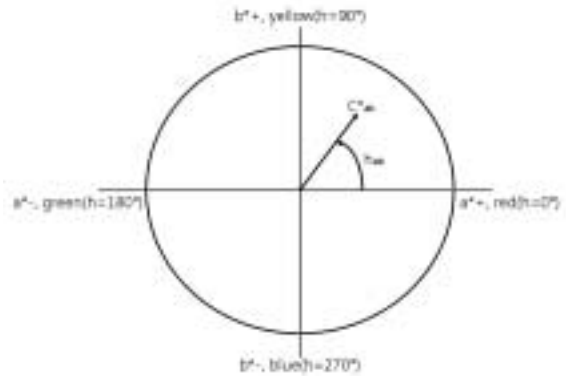


Fig.13. Polar coordinates at C^* , h

반복소성에 따른 도재의 색차에 관한 연구 중 Barghi(1982)는 반복소성이 색차에 영향을 적게 미친다고 보고하고 있으며, Barghi과 Goldberg(1977)도 metal-ceramic system에 사용하는 도재를 9회 이상 반복 소성 시에도 식별가능한 색차를 관찰할 수 없었다고 보고하고 있다. 하지만 O'Brien등(1990)은 6회 이상 반복 소성 시에 인지할 수 있는 색차가 나타난다고 보고하고 있다. 또한 Uludag(2007)등은 세라믹시스템에서 세라믹의 두께와 반복소성이 미치는 영향에 관한 연구를 시행하였는데 소성횟수가 증가할수록 $L^*a^*b^*$ 값이 인지할 수 있을 정도로 변한다고 보고하고 있다. 또한 소성을 반복함에 따라 L^* 값은 감소하며 a^* , b^* 값은 증가한다고 보고하고 있다. 이렇게 색차의 유무여부는 많은 연구자들에 의해 연구되어지고 있지만 아직까지도 논의의 대상이다. 본 연구에서도 Uludag등의 연구결과와 동일하게 모든 도재에서 소성횟수가 증가함에 따라 L^* 값은 감소하며 a^* 값

은 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 b^* 값은 2회 소성 이후 소성횟수가 증가할수록 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서는 감소가 나타나며, 법랑질 도재와 반투명 도재에서는 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

1회 소성 후 연마를 시행한 시편은 거친 표면형태를 재현하고 있어서 명도가 낮을 것으로 예측하기 쉬우나 실제로는 빛을 산란시킴에 따라 chalky하게 보이므로 L^* 값이 반복 소성한 시편보다도 크게 나타났다. 모든 도재에서 2회 소성 이후에는 self-glazing 효과로 인해 표면의 요철이 감소하여 빛의 산란이 줄어들어 L^* 값의 감소가 나타났으리라 사료된다.

적색 및 녹색을 나타내는 지표(red-green axis)에서는 반복소성을 시행함에 따라 모든 도재에서 점차 a^* 값이 증가하게 되는데 이는 적색으로의 변이를 의미한다. 황색과 청색을 나타내는 지표(yellow-blue axis)에서는 1회 소성한 시편보다 2회 소성한 시편에서의 b^* 값이 크게 관찰되는데 이는 표면이 매끄러워져 우리의 눈에는 보다 황색에 가까운 변화로 인지된 결과로 사료된다. 또한 채도는 위의 계산식과 같이 a^* , b^* 값을 이용하여 계산되어지는데 본 연구에서의 결과 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서는 a^* 값보다 b^* 값이 더 크게 나타났으므로 a^* 값 보다는 b^* 값의 영향을 받아 b^* 의 색도변화와 유사한 양상을 나타내는 것으로 관찰되었다. 또한 모든 도재에서 2회 소성 시 self glazing 효과로 인해 채도의 증가를 관찰할 수 있지만 2회 소성 이후에서는 점차 채도가 감소하는 양상을 나타내었다.

반사율 측정 시 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서 장파장에서의 반사율이 단파장에서의 반사율보다 크게 나타나므로 우리 눈에는 높은 파장대의 색인 황색, 적색 계열로 인지된다. 본 연구에 사용된 vintage porcelain은 크게 A, B, C, D 네 가지 계열로 분류되는데 A3 색의 상아질 도재와 불투명-상아질 도재는 A계열로 reddish-brown 특성을 나타낸다. 반면에 법랑질 도재와 반투명도재에서는 단파장에서의 반사율이 장파장에서의 반사율보다 크게 나타났는데 이는 도재의 투명성이 상아질 도재와 불투명-상아질보다 크기 때문이라 사료된다.

색상(h)는 반복소성을 시행함에 따라 모든 도재에서 완만하게 감소하는 양상을 관찰할 수 있었다. 상아질 도재

와 불투명-상아질 도재는 $h=80^\circ$ 근처에서 관찰되는데, $h=90^\circ$ 일 경우 황색축에 위치하게 되므로 반복소성 시 h 값이 감소한다는 것은 황색축($h=90^\circ$)에서 적색축($h=0^\circ$)으로의 변이를 나타낸다. 또한 법랑질 도재와 반투명 도재에서는 $h=250^\circ$ 근처에서 관찰되는데, $h=270^\circ$ 일 경우 청색축에 위치하게 되므로 반복소성 시 h 값이 감소한다는 것은 청색축($h=270^\circ$)에서 녹색축($h=0^\circ$)으로의 변이를 나타낸다.

도재특성에 따른 변화에서는 모든 도재에서는 큰 차이를 관찰할 수 없었으나 2회 소성시 L^* 의 감소가 두드러짐을 알 수 있다. 이는 표면의 요철이 감소하여 빛의 산란이 줄어들어 L^* 값의 감소가 나타났으리라 사료된다.

1회 소성한 시편과 여러 번 반복소성 간의 색차는 크게 나타났는데 이는 표면 연마에 따른 결과로 사료되며 2회 소성 이후 시편은 self-glazing 효과로 인해 그 색차는 크게 줄어들었다.

색차분석방법은 색의 편차(ΔE)를 정량적으로 분석하는 방법임에도 불구하고 임상적으로는 적용하는 데에는 한계성이 있다. 색감에 대해 잘 훈련된 사람의 경우 색차(ΔE)가 0.4이상일 경우 구분이 가능하며 색차가 1일 경우 구분하기 힘들며 2일 경우 임상적으로 허용이 가능하며 3.7이상일 경우 임상적으로 차이가 드러난다고 보고하고 있다.(Goldstein과 Schmitt, 1993; Johnston과 Kao, 1989)또한 ADA(American Dental Association)에서는 shade guide와의 색차(ΔE)를 2 이내로 규정하고 있다.

Crispin 등(1991)은 glazing 처리된 시편과 연마한 시편의 색차를 비교한 결과 ADA의 규정과 O'Brien 등의 연구결과보다 낮은 것을 관찰하였다. 하지만 본 연구에서는 1회 소성한 시편 연마한 시편과 self-glazing된 시편과의 색차가 크게 나타나는 것으로 관찰되었다. 이는 연마방법의 차이에 따라 빛의 산란이 영향을 미쳤으리라 사료되며 본 연구에서는 SiC paper #200으로 연마하였으므로 표면의 요철이 크게 증가하였으므로 빛의 산란이 반복소성한 시편보다도 증가하였기에 색차가 더 크게 나타났으리라 사료된다.

Razzoog 등(1994)은 임상적으로 적절한 평가를 위하여 색차(ΔE)와 함께 National Bureau of Standards(NBS) unit을 이용하여 비교 연구하였다. 색차에 따른 NBS 소

견은 L^* , a^* , b^* 값에서 계산되어지는 ΔE 값보다 객관적인 입장에서 색차에 대한 부연 조건이 가능하므로 색의 질적인 비교로 사용되어질 수 있다. 본 연구에서 NBS 기준에 따르면 'Trace'로 평가 되는 것은 관찰할 수 없었으며, 상아질 도재의 2-3, 3-5 불투명-상아질 도재의 2-3, 법랑질 도재의 3-5, 5-10, 반투명 도재의 3-5, 5-10회 소성한 시편은 'Slight'으로 평가할 수 있으며, 상아질 도재의 2-5, 3-10, 5-10, 불투명-상아질 도재의 2-5, 3-10, 5-10, 법랑질 도재의 2-3, 2-5, 3-10, 반투명 도재의 2-3, 3-10회 소성한 시편은 'Noticeable'으로 평가할 수 있으며, 상아질 도재의 1-2 1-3, 2-10 불투명-상아질 도재의 1-2, 1-3, 2-10, 3-10 법랑질 도재의 2-10, 반투명 도재의 2-5, 2-10회 소성한 시편은 'Appreciable'로 평가할 수 있으며, 상아질 도재의 1-5, 1-10, 불투명-상아질 도재의 1-5, 1-10, 법랑질 도재의 1-2, 1-3, 1-5, 반투명 도재의 1-2, 1-3, 1-5, 1-10회 소성한 시편은 'Much'로 평가할 수 있으며, 법랑질 도재의 1-10회 소성한 시편은 'Very much'로 평가될 수 있다.

즉 색차(ΔE)와 동일하게 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편에서의 차이가 'Appreciable' 이상으로 나타났으며 2회 소성 이후부터는 반복소성을 거듭함에 NBS unit 지수 또한 약간씩 증가하는 양상을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서와 같이 상아질 도재의 반복소성은 1.3~8.15, 불투명-상아질 도재의 반복소성은 1.21~8.15, 법랑질 도재의 반복소성은 0.87~13.15, 반투명 도재의 반복소성은 0.66~12.91까지의 색차를 유발하지만 이는 도재의 제조 회사, 소성온도, 소성로에서의 소성위치, 소성로의 제품 등에 의해 다른 결과를 도출할 수도 있다. 또한 이러한 색차의 원인을 분석하기 위해서는 좀 더 추가적인 연구가 필요하리라 사료된다.

V. 결 론

서로 다른 특성을 가지는 도재가 반복소성에 따라 색차에 미치는 영향을 연구하기 위하여 불투명-상아질 도재, 상아질 도재, 법랑질 도재, 반투명 도재를 이용하여 명도(L^*), 색도(a^* , b^*), 채도(C^*), 색상(h), 반사율(%), 색차(Δ

E), NBS 지수를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 소성횟수가 증가할수록 명도(L^*)는 모든 특성의 도재에서 감소를 나타내지만 적색-녹색 축에서의 색도(a^*)는 모든 특성의 도재에서 증가함을 나타낸다. 불투명-상아질 도재와 상아질 도재에서의 황색-청색 축에서의 색도(b^*)는 두 번째 소성이후 감소를 나타내지만 법랑질 도재와 반투명도재는 증가를 나타낸다. 불투명-상아질 도재와 상아질 도재에서의 채도(C^*)는 두 번째 소성이후 감소를 나타내지만 법랑질 도재와 반투명 도재에서는 전체적인 감소를 나타낸다.
2. 상아질 도재와 불투명-상아질 도재에서의 반사율은 단파장대에서의 반사율보다 장파장대에서 반사율의 감소가 나타났으며, 법랑질 도재와 반투명도재에서는 장파장대에서의 반사율보다 단파장대에서 반사율의 감소가 나타났다.
3. 상아질 도재에서의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차(ΔE)는 5.29~8.15의 범위를 나타내었으며 2회 이후의 반복 소성한 시편의 색차는 1.3~3.03의 범위를 나타내었다. 불투명-상아질 도재에서의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차(ΔE)는 4.83~8.2의 범위를 나타내었으며, 2회 이후의 반복 소성한 시편의 색차는 1.21~4.87의 범위를 나타내었다. 법랑질 도재에서의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차(ΔE)는 8.93~13.15의 범위를 나타내었으며 2회 이후의 반복 소성한 시편의 색차는 0.87~4.33의 범위를 나타내었다. 반투명 도재에서의 1회 소성한 시편과 반복 소성한 시편의 색차(ΔE)는 9.37~12.91의 범위를 나타내었으며 2회 이후의 반복 소성한 시편의 색차는 0.66~3.79의 범위를 나타내었다.
4. NBS unit에 의하여 'Trace'로 평가 되는 것은 관찰할 수 없었으며, 상아질 도재의 2-3, 3-5, 불투명-상아질 도재의 2-3, 법랑질 도재의 3-5, 5-10, 반투명 도재의 3-5, 5-10회 소성한 시편은 'Slight'으로

평가할 수 있으며, 상아질 도재의 2-5, 3-10, 5-10, 불투명-상아질 도재의 2-5, 3-10, 5-10, 법랑질 도재의 2-3, 2-5, 3-10, 반투명 도재의 2-3, 3-10회 소성한 시편은 'Noticeable'으로 평가할 수 있으며, 상아질 도재의 1-2 1-3, 2-10 불투명-상아질 도재의 1-2, 1-3, 2-10, 3-10 법랑질 도재의 2-10, 반투명 도재의 2-5, 2-10회 소성한 시편은 'Appreciable'로 평가할 수 있으며, 상아질 도재의 1-5, 1-10, 불투명-상아질 도재의 1-5, 1-10, 법랑질 도재의 1-2, 1-3, 1-5, 반투명 도재의 1-2, 1-3, 1-5, 1-10회 소성한 시편은 'Much'로 평가할 수 있으며, 법랑질 도재의 1-10회 소성한 시편은 'Very much'로 평가될 수 있다.

참고 문헌

- Alvin G, Delwin TL, Kathryn MS, William MJ. Use of a porcelain color discrimination test to evaluate color difference formulas. *J prosthet Dent*, 98: 101-109, 2007.
- American National Standard/American Dental Association: Specification No.69, Dental ceramic. Chicaco, Council on dental materials, Instruments and Equipment, 1991.
- Barghi N. Color and glaze: effects of repeated firing. *J prosthet Dent*, 47: 393-395, 1982.
- Barghi N, Goldberg J. Porcelain shade stability after repeated firing. *J prosthet Dent*, 37: 173-175, 1977.
- Barghi N, Richardson JT. A study of various factors influencing shade of bonded porcelain. *J Prosthet Dent*, 39: 282-284, 1978.
- Colorimetry. CIE Publication No.15 : 2004, 3rd ed, Vienna, CIE Central Breau, 2004
- Crispin BJ, Hewlett E, Seghi R. Relative color stability of ceramic stains subjected to glazing temperature. *J prosthet Dent*, 66: 20-23, 1991.
- Ding Y, Jiang S, Luo T, Miura Y, Peyghambarian N. Lithium disilicate crystalline slab wave guides from surface crystallised glass. *Electronics lett*, 35: 504-505, 1999.
- Fairhurst CW, Hashinger DT, Twiggs SW. The effect of thermal history on porcelain expansion behavior. *J Dent Res*, 68: 1313-1315.
- Goldstein GR, Schmitt GW. Repeatability of a specially designed intraoral colorimeter. *J prosthet Dent*, 69: 616-619, 1993.
- Heffeernan MJ, Aquilino SA, Diaz-Armold AM, Haselton DR, Stanford CM, Vergas MA. Relative translucency of six all-ceramic systems. Part I :core materials. *J Prosthet Dent*, 88: 4-9, 2002.
- Jacobs SH, Goodacre CJ, Moore BK, Dykema RW. Effect of porcelain thickness and type of metal-ceramic alloy on color. *J Prosthet Dent*, 57: 138-145, 1987.
- Johnston WM, Kao EC. Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *J Dent Res*, 68: 819-822, 1989.
- Kelly JR, Nishimura I, Campbell SD. Ceramics in dentistry: Historical roots and current perspectives. *J Prosthet Dent*, 75: 18-32, 1996..
- Mclean JW. New dental ceramics and esthetics. *J Esthet Dent*, 7: 141-149, 1995.
- O'Brien WJ, Groh CL, Boenke KM. A new, small-color difference equation for dental shades. *J Dent Res*, 69: 1762-1764, 1990.
- Razzog ME, Lang BR, Russel MM. A comparison of the color stability of conventional and titanium dental porcelain. *J prosthet Dent*, 72: 453-456, 1994.
- Seghi RR, Hewlett ER, Kim J. Visual and

instrumental colorimetric assessments of small color differences on translucent dental ceramic. *J Dent Res*, 68: 1760-1764, 1989.

Uludag B, Usumez A, Sahin V, Eser K, Ercoban E. The effect of ceramic thickness and number of firing on the color of ceramic systems: an in vitro study. *J prosthet Dent*, 97: 25-31, 2007.