

Journal of Korean Society of Dental Hygiene

Original Article

캐드캠 세라믹의 코어와 베니어의 서로 다른 두께가 반투명도에 미치는 영향

강 월 · 김지환

고려대학교 대학원 보건과학과 치의기공전공



Effect of translucency on CAD/CAM ceramic according to different core/veneer thickness

Wol Kang · Ji-Hwan Kim

Department of Dental Laboratory Science and Engineering, College of Health Science, Korea University

Received: September 6, 2018

Revised: November 8, 2018

Accepted: November 19, 2018

Corresponding Author: Ji-Hwan Kim, Department of Dental Laboratory Science and Engineering, College of Health Science, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Korea, , Tel: +82-10-6270-0341, Fax: +82-2-916-5943, E-mail: kjh2804@korea.ac.kr

Abstract

Objectives: The purpose of this study was to evaluation the effect of translucency on CAD/CAM ceramic according to different core/veneer thicknesses. **Methods:** A total of 42 samples from 2 groups of 7 ceramic cores, each with 3 thickness values (0.8, 1.0, 1.2 mm) were manufactured. The veneers were also manufactured in 3 thicknesses (0.3, 0.5, 0.7 mm). The group names were based on the name of the ceramic core (IPS e.Max CAD; LD, and IPS Empress CAD; LR). The associated number was determined by the combined thickness of the core and veneer: 1 = (0.8 + 0.7); 2 = (1.0 + 0.5); 3 = (1.2 + 0.3). The translucency was measured using a spectrophotometer and defined via the contrast ratio (CR) and translucency parameter (TP). Two-way ANOVA was performed to compare the 2 groups (material and thickness). **Results:** As the core thickness increased, the TP value also increased, and the CR value (for LR group) decreased. The results of 2-way ANOVA demonstrated that the thicknesses of different core/veneer combinations significantly affected the translucency ($p < 0.05$). **Conclusions:** The different core and veneer thicknesses affected the translucency of CAD/CAM ceramic.

Key Words : CAD/CAM, Spectrophotometer, Translucency

색인 : 반투명도, 분광광도계, 캐드캠

서론

세라믹은 금속 하부 구조가 없기 때문에 반투명도와 색조 재현성을 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다[1]. 금속 하부 구조가 있는 경우 Nakamura 등[2]은 세라믹 두께가 1.6 mm 이상이 되지 않으면 최종 수복물에 색에 영향을 끼친다고 발표하였다. 또한 Vichi 등[3]은 1.0 mm 두께의 도재층은 하부 구조의 색을 시각적으로 인지할 수 있다고 보고하였다. 때문에 심미 치과재료의 등장과 치과 수복물에 대한 환자들의 심미적 요구도가 증가하면서 세라믹의 사용이 증가하였다[4]. 이러한 세라믹은 제작 방법에 따라서 여러 가지 방법으로 나누어진다[5]. 그 중에서 새로운 재료를 적용하기 쉽고, 노동력과 비용을 줄일 수 있으며, 적절한 강도를 얻을 수 있는 캐드캠(computer-aided design and computer aided manufacturing) 세라믹의 사용은 지난 25년간 꾸준히 증가해 왔다[6]. 캐드캠 세라믹으로 주로 사용되는 재료는 지르코니아이다. 그러나 최근에는 리튬디실리케이트(lithium disilicate)나 루사이트(leucite) 세라믹이 지르코니아보다 뛰어난 반투명도를 나타내면서 그 사용이 증가하고 있다[7].

세라믹이 주위 자연치아와 조화를 이루기 위해서는 자연치아의 외형과 구조, 표면질감, 색조 및 반투명도를 재현할 수 있어야 한다[8]. 특히 수복물의 광학적 특성을 자연치아와 유사하게 만들기 위해서 반투명도는 중요한 요소 중 하나이다[9]. 반투명도란 재료를 통과하는 빛의 상대적인 양을 의미하는데[10], 이러한 반투명도를 측정하는 방법에는 여러 가지가 있다[11]. 그 중에서 Translucency parameter(TP)와 Contrast ratio(CR)은 반투명도를 측정하는데 주로 사용되는 방법이다[12]. TP와 CR을 측정할 때는 측정의 정확도에 영향을 줄 수 있는 edge loss 현상을 고려해야 한다[13].

반투명도에 많은 영향을 미치는 요소는 빛이다[14]. 분광광도계를 사용하면 반투명한 시편을 측정하는 중에 빛이 반사되지 않고 가장자리가 산란하면서 빛이 손실될 수 있다. 이를 edge loss라고 하는데[15], 이는 측정의 정확도에 영향을 미칠 수 있다[13]. 특히, 자연치아는 상아질과 법랑질의 두께에 따라서 빛의 확산과 흡수가 다르게 나타난다[16,17]. 이러한 자연치의 상아질과 법랑질의 두께는 사람마다 다르기 때문에 [18], 자연치아에 가까운 수복물을 제작하기 위해서는 서로 다른 코어(core)와 베니어(veneer)의 조합이 필요하다[19]. 또한 코어의 반투명도는 세라믹의 심미성을 좌우하는 요소임과 동시에 재료를 선택하는데 중요한 고려사항이다[20]. 선행연구에서는 In-ceram, spinell, Empress, Empress2, Procera 및 In-ceram Alumina의 코어와 베니어의 두께에 따라서 전부 도재관의 반투명도가 달라진다고 보고하였고 [21], Atonson 등[22]은 코어의 두께와 contrast ratio가 선형관계를 나타낸다고 보고했습니다. 이처럼 심미적인 수복물을 제작하기 위해서는 코어와 베니어의 반투명도가 중요하다는 Johnston[23]과 Zhang 등 [24]의 연구가 있었으나, 아직까지 코어와 베니어의 두께에 따른 반투명도에 대한 결정은 임상경험에 의해 주관적으로 이루어지고 있으며, CAD/CAM 세라믹에 따른 투명도에 관한 정보는 부족한 실정이다[20].

따라서 본 연구의 목적은 캐드캠 세라믹으로 제작한 코어와 베니어의 서로 다른 두께 조합이 반투명도에 미치는 영향에 대해서 평가해 보고자 한다. 귀무가설은 '서로 다른 코어와 베니어의 두께의 조합이 캐드캠 세라믹의 반투명도에 영향이 없다'이다.

연구방법

1. 시편제작

본 연구에서 코어는 Ivoclar Vivadent에서 제작된 Lithium disilicate ceramic(LD)과 Leucite

reinforced ceramic(LR)을 사용하여 각각 0.8 mm, 1.0 mm, 1.2 mm의 두께로 7개씩 총 21개가 제작되었다(IPS e.Max CAD LT A2, IPS Empress CAD A2, Ivoclar Vivadent, German). 베니어는 각각의 코어에 상응하는 세라믹(IPS e.Max ceram, IPS Empress Esthetic veneer; Ivoclar Vivadent, German)을 사용하여 각각 0.3 mm, 0.5 mm, 0.7 mm의 두께로 7개씩 총 21개로, 코어와 베니어가 총 42개 제작되었다 <Fig. 1>. 코어의 제작은 소성 시 일어나는 시편의 뒤틀림과 절삭량을 고려하여 13 mm의 정사각형 모양으로 두께는 1.2 mm, 1.4 mm, 1.6 mm로 다이아몬드 절삭기로 절삭하였다(Diamond Blade, Samsung Clover, Korea). 절삭한 코어는 제조사에서 권장하는 소성 스케줄에 따라 소성하였고, 소성된 시편은 다이아몬드 절삭기를 이용하여 12 mm 정사각형 모양으로 제작되었다. 베니어는 소성수축과 뒤틀림, 절삭할 때 삭제되는 양을 고려하여, 15 mm의 정사각형 모양으로 두께는 0.7 mm, 0.9 mm, 1.1 mm로 실리콘 몰드를 이용하여 축성하였다. 제작된 베니어는 제조사의 지시에 따라 소성하였고, 소성된 베니어는 다이아몬드 절삭기를 이용하여 12 mm 정사각형 모양으로 절삭하였다. 그리고 코어와 베니어 시편의 양면은 각각의 두께와 평면을 맞추기 위해 수평형 평면연삭기(HRG-150; AM technology, Korea)로 600, 800, 1200 grit의 실리콘 연마기(SPL 15 Grind-X; Okamoto, Japan)로 양면을 연마하였다. 모든 시편은 잔유물을 제거하기 위해 증류수가 담긴 초음파 세척기(ultrasonic cleaner; Mujigae, Korea)에 10분간 세척하였다. 각각의 베니어는 그에 상응하는 코어에 겹쳐서 1.5 mm의 두께로 만들었고, 코어와 베니어의 두께 조합에 따라 번호를 부여하였다: 1=(0.8+0.7); 2=(1.0+0.5); 3=(1.2+0.3). 각 코어와 베니어 사이에는 스포이드를 사용하여 증류수를 넣고 압착시켜서 계면에서 발생하는 산란을 최소화하고 계면간의 밀착의 정도를 높였다[25].

2. 측정도구

코어와 베니어 시편의 두께는 디지털 마이크로미터를 이용하여 무작위로 3점을 측정하였다(QuantuMike digital micrometer, Mitutoyo, Japan).

반투명도의 측정은 분광광도계(CM-3600A, Minolta, Japan)를 이용하여 측정되었으며 <Fig. 2>, CR 및 TP는 아래의 식으로 산출되었다.

$$CR = Y_b/Y_w$$

$$TP = [(L_b^* - L_w^*)^2 + (a_b^* - a_w^*)^2 + (b_b^* - b_w^*)^2]^{1/2}$$

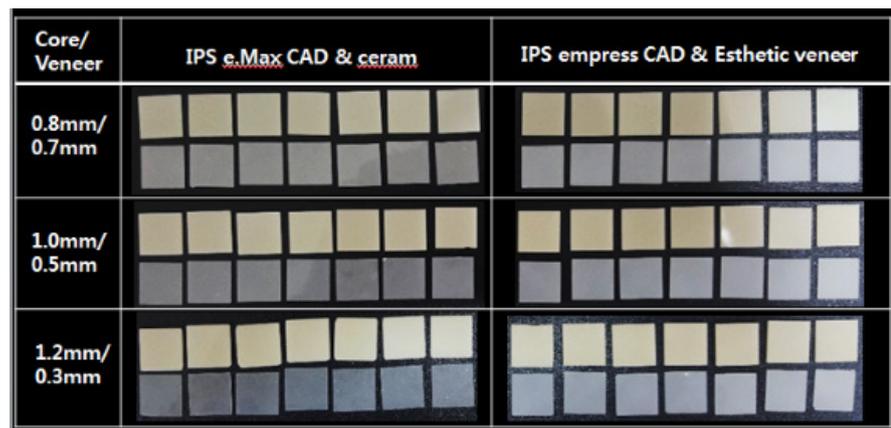


Fig. 1. The different core/veneer thickness

CR은 같은 시편을 흑색 표준판(L*_s=4.2, a*_s=0.2, b*_s=1.1) 위에 올려놓았을 때의 반사율(Y)을 백색 표준판(L*_w=87.0, a*_w=0.1, b*_w=2.8) 위에 올려놓았을 때의 분산에 의한 빛의 반사의 비율이다. 여기서, b_s는 흑색 표준판, w는 백색 표준판을 배경으로 한 값을 나타낸다. CR=0은 완전 투명을 의미하고, CR=1은 불투명을 의미한다. L*은 명도를 나타내고, a*는 적색과 녹색의 정도를 나타내는데 +는 적색방향, -는 녹색방향을 나타낸다. b*는 황색과 청색의 정도로 +는 황색방향, -는 청색방향을 나타낸다. TP는 값이 클수록 반투명도가 높다는 것을 의미한다.

3. 분석방법

통계분석은 SPSS 22.0(IBM, 2016,08,13)을 사용하였고, 통계적 검정의 유의수준은 α=0.05로 하였다. LD와 LR 재료에 따라서 코어와 베니어의 두께의 평균과 표준편차를 구하고, 두께의 평균이 일관성을 가지는지 알아보기 위하여 독립표본 t-test를 실시하였다(p>0.05). CR과 TP의 상관관계는 Pearson's test를 이용하였다. LD와 LR 재료에 따라서 코어와 베니어의 두께에 따른 반투명도를 비교하기 위해서 이원배치 분산분석을 실시하고, 어떤 그룹의 반투명도가 다른지 검증하기 위하여 Tukey의 사후분석을 실시하였다.

연구결과

1. 각 시편의 두께

코어와 베니어 두께의 평균±표준편차는 p값은 <Table 1>과 같다. IPS e.Max CAD 코어와 베니어 0.8 mm/0.7 mm (LD1)은 1.506±0.001, IPS Empress CAD 코어와 베니어 0.8 mm/0.7 mm (LR1)은



Fig. 2. CM-3600A, Minolta, Japan

Table 1. Average thickness of specimens of ceramic materials

Group	N	Thickness(mm)	Mean (SD)	p*
LD1	7	0.8/0.7	1.506±0.001	0.384
LR1	7	0.8/0.7	1.508±0.001	0.384
LD2	7	1.0/0.5	1.507±0.005	0.052
LR2	7	1.0/0.5	1.505±0.001	0.052
LD3	7	1.2/0.3	1.508±0.001	0.058
LR3	7	1.2/0.3	1.503±0.003	0.058

*by t-test

1.508±0.001로 독립표본 t-test 결과, 유의확률이 0.384로 시편의 평균 두께에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. IPS e.Max CAD 코어와 베니어 1.0 mm/0.5 mm (LD2)은 1.507±0.005, IPS Empress CAD 코어와 베니어 1.0 mm/0.5 mm (LR2)은 1.505±0.001로 독립표본 t-test 결과, 유의확률이 0.052로 시편의 평균 두께에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다. IPS e.Max CAD 코어와 베니어 1.2 mm/0.3 mm (LD3)은 1.508±0.001, IPS Empress CAD 코어와 베니어 1.2 mm/0.3 mm (LR3)은 1.503±0.003로 독립표본 t-test 결과, 유의확률이 0.05 보다 크므로 시편의 평균 두께에 따른 차이가 없는 것으로 나타났다.

2. 각 시편의 반투명도

분광광도계를 이용하여 산출된 각각의 값을 이용하여 CR과 TP를 계산하였다. <Table 2>는 각 시편의 두께에 따른 CR과 TP 값을 나타내고 있다. CR과 TP 모두 일정한 두께 내에서 베니어의 두께가 증가할수록 반투명도가 증가하였다.

3. CR과 TP의 상관관계

본 연구에서 사용된 세라믹의 반투명도를 나타내는 CR과 TP 간의 관계를 알아보기 위하여 상관분석을 실시한 결과는 <Table 3>과 같다. 상관계수는 높은 상관성을 나타내며 음(-)의 상관관계를 형성하고 있다.

4. 캐드캠 세라믹의 재료와 두께가 반투명도에 미치는 영향

캐드캠 세라믹 재료와 두께에 따라 CR에 차이가 있는지를 보기 위해 이원배치 분산분석을 실시하였다 <Table 4>. 분산의 동질성에 대한 Levene의 검정 후 유의확률이 0.10으로 유의수준 0.05보다 크므로 등분산은 가정되었다. 이원배치 분산분석 결과 재료의 F값은 30.898, 유의확률은 0.01보다 작으므로 재료에 따른 CR의 차이가 있다고 볼 수 있다. 두께 또한 F값은 84.471이고 유의확률은 0.01보다 작으므로 일정한 두께 내에서 코어와 베니어의 두께가 다를 때 CR의 차이가 있다고 볼 수 있다. 두께와 재료의 교호작용은 CR에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. Tukey의 사후분석 결과, 일정한 두께 내에서 코어와 베니어의 두께는 재료에 따라서 CR값에 유의한 차이를 보였다.

캐드캠 세라믹 재료와 두께에 따라 TP에 차이가 있는지를 보기 위해 이원배치 분산분석을 실시하였다

Table 2. CR and Translucency values of different core/veneer thickness Unit: M(SD)

Group	N	Thickness(mm)	Mean (SD)	
			CR	TP
LD1	7	0.8/0.7	0.64 (0.013)	2.41 (0.025)
LD2	7	1.0/0.5	0.65 (0.004)	2.39 (0.013)
LD3	7	1.2/0.3	0.66 (0.013)	2.37 (0.034)
LR1	7	0.8/0.7	0.62 (0.002)	2.47 (0.005)
LR2	7	1.0/0.5	0.64 (0.004)	2.45 (0.009)
LR3	7	1.2/0.3	0.67 (0.005)	2.40 (0.011)

Table 3. Correlation analysis between CR and TP

Characteristics	CR	TP
CR	1.000	
TP	-0.890**	1.000

**p<0.01 by the pearson's correlation analysis

Table 5. Results of a 2-way ANOVA for mean TP values of different core/veneer thickness (material and thickness) tested

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p*
Material	0.029	1	0.029	76.905	<0.001
Thickness	0.018	2	0.009	24.140	<0.001
Material*Thickness	0.001	2	0.001	1.955	0.156

R²=79.0%, adj. R²=76.1%

*by two-way ANOVA

<Table 5>. 분산의 동질성에 대한 Levene의 검정 후 유의확률이 0.13으로 유의수준 0.05보다 크므로 등분산은 가정되었다. 이원배치 분산분석 결과 재료의 F값은 80.771, 유의확률은 0.01보다 작으므로 재료에 따른 TP에 차이가 있다고 볼 수 있다. 두께 또한 F값은 25.354이고 유의확률은 0.01보다 작으므로 일정한 두께 내에서 코어와 베니어의 두께가 다를 때 TP의 차이가 있다고 볼 수 있다. 두께와 재료의 교호작용은 TP에 유의한 영향을 준다고 볼 수 없다. Tukey의 사후분석 결과, 일정한 두께 내에서 코어와 베니어의 두께가 1.2/0.3와 1.0/0.5인 그룹과, 1.2/0.3와 0.8/0.7인 그룹은 TP에 있어서 유의한 차이를 보였다. 그러나 코어와 베니어의 두께가 1.0/0.5와 0.8/0.7은 TP에 있어 유의한 차이를 보이지 않았다.

총괄 및 고안

캐드캠 기술의 발전으로 임상에서는 캐드캠 세라믹의 사용이 증가하였다. 이러한 캐드캠 세라믹은 두께에 따라서 그 반투명도에 차이가 발생한다[21]. 임상에서는 색조를 선택하기 위해서 색조견본을 사용하고 있지만 반투명도와 관련해서는 견본이 없기 때문에 임상경험이나 제품의 설명서에 의존해야 하는 실정이다[26]. 이러한 문제는 임상에서 오차를 발생시킬 수 있고, 이러한 오차는 보철물의 실패를 야기할 수 있다[27]. 그러므로 본 연구에서는 두께가 변함에 따라서 나타나는 반투명도의 차이를 분석해 보고자 하였다.

Edge loss 현상을 줄일 수 있는 방법으로는, 분광광도계의 관찰 포트를 광선의 크기보다 2~3배 키우면 개선될 수 있다[28]. 또한 시편의 광학접촉도 edge loss 현상을 감소시킬 수 있다[29]. 따라서 본 연구는 직경 3 mm의 분광광도계를 사용하여 직경 12 mm의 시편을 측정하였다. 또한 각 시편 사이에는 스포이드를 이용하여 증류수를 넣고 압착시킨 후에 광학접촉을 시킴으로써 시편 사이에서 발생하는 산란을 최소화하고 시편간의 밀착도를 높였다[8].

세라믹의 반투명도는 두께에 영향을 받기 때문에 일반적으로 세라믹 두께는 1~1.5 mm 가 권장되고 있다. 따라서 본 연구에서는 코어와 베니어 두께의 조합을 1.5 mm로 선정하였고, 코어의 두께는 제조사 설명서에 명시된 최소두께 0.7 mm 보다 두꺼운 0.8, 1.0, 1.2 mm로 선정하였다. 베니어의 두께는 제조사에서 코어의 두께보다 얇게 만들 것을 권장하고 있기 때문에 0.7, 0.5, 0.3 mm로 제작하였다.

본 연구의 TP값은 재료와 관계없이 일정한 두께 내에서 베니어의 두께가 증가함에 따라서 TP값이 증가한 것으로 나타났다. 같은 제조회사 제품으로, 코어와 베니어의 두께는 같지만 재료가 다른 선행연구도 베니어의 두께가 증가함에 TP값이 증가한 것으로 나타났다[30]. 선행연구와의 차이를 감안하더라도 베니어의 두께가 증가함에 TP값이 증가하는 일반적인 경향은 선행연구와 유사했다. 또한 LR군이 LD군보다 TP값이 높은 것으로 나타났다. 이러한 TP값의 차이는 화학적 조성 및 미세 구조, 평균 입자 크기에 기인한 것으로 설명할 수 있다[31]. 또한 Ilie와 Hickel[32]의 연구에서도 LD그룹에 비해 LR 그룹의 반투명도 값이 높은 것으로 나타났다. 그 이유는 리튬디실리케이드가 루사이트에 비해 낮은 파장에서 거의 불투명하기 때문이다. 이를 통해 CAD/CAM 세라믹 제작 시, 충분한 반투명도를 내기 위한 치아 삭제량이 부족하더라

도 일정한 두께 내에서 베니어의 두께를 증가시키거나, 리튬디실리케이트 세라믹 보다는 루사이트 세라믹을 사용할 때, 어느 정도 원하는 반투명도를 재현할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 임상에서도 코어보다 베니어의 두께를 더 증가시킴으로써 전치부 치아 절단 1/3의 반투명도를 증가시킬 수 있을 것으로 사료된다.

CR값은 베니어의 두께가 증가할수록 감소한 것으로 나타났다. 또한 TP값과 CR값은 강한 음의 상관관계를 보였다. 이는 Nogueira와 Della Bona[33]의 연구와도 일치한다. 제한된 두께 내에서 일부 변색된 치아나 색 차폐가 필요한 캐드캠 세라믹을 제작해야할 경우에는 코어의 두께를 증가시키거나, 루사이트 세라믹 보다는 리튬디실리케이트 세라믹을 사용할 때, 일정부분 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

코어의 반투명도와 두께 관계를 조사한 선행연구에서는 재료와 두께의 상호작용에 의해서 반투명도에 차이가 있는 것으로 나타났다[12]. 그러나 본 연구는 재료와 두께에 따른 반투명도에 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 제조회사와 재료 및 조성성분에 기인한 것으로 사료된다.

본 연구의 제한점은 특정 회사의 세라믹을 사용했기 때문에 모든 세라믹에 일반화시키기는 어렵다는 한계가 있기 때문에 향후 다양한 제품에 대한 연구가 필요하다. 더불어 CAD/CAM 세라믹의 표면 거칠기나 소성횟수가 반투명도에 미치는 영향을 파악하기 위한 후속연구도 이루어져야 하겠다.

결론

본 연구는 캐드캠 세라믹의 두께에 따라서 반투명도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 LD 그룹과 LR 그룹 시편을 분광광도계를 이용하여 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LD 그룹과 LR 그룹은 일정한 두께 내에서 베니어의 두께가 증가할수록 반투명도가 증가하는 것으로 나타났다.
2. LD 그룹은 LR 그룹보다 반투명도가 낮은 것으로 나타났다.
3. LD 그룹과 LR 그룹은 코어와 베니어 두께의 조합과 재료의 상호작용에 의해서 반투명도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

이를 통해 LD 그룹과 LR 그룹은 코어와 베니어의 두께의 조합에 따라서 반투명도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러므로 임상에서 캐드캠 세라믹으로 제작한 최종수복물의 반투명도를 표현하고자 할 때에는 코어와 베니어의 두께를 고려해야 한다.

References

- [1] Wee AG, Monaghan P, Johnston WM. Variation in color between intended matched shade and fabricated shade of dental porcelain. *J Prosthet Dent* 2002;87(6):657-66. <https://doi.org/10.1067/mpr.2002.125727>
- [2] Nakamura T, Satio O, Fuyikawa J, Ishigaki S. Influence of abutment substrate and ceramic thickness on the colour of heat-pressed ceramic crowns. *J Oral Rehabil* 2002;29:805-9.
- [3] Vichi A, Ferrari M, Davidson CL. Influence of ceramic and cement thickness on the masking of various types of opaque posts. *J Prosthet Dent* 2000;83:412-7.
- [4] Raptis NV, Michalakis KX, Hirayama H. Optical behavior of current ceramic systems. *Int J Periodontics Restorative Dent* 2006;26:31-41.
- [5] Rosenstiel SF, Land MF, Fujimoto J. *Contemporary fixed prosthodontics*. 5th ed.

- St. Louis: Mosby; 2016: 264-5.
- [6] Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM: current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dental Mater* 2009;28:44-56. <https://doi.org/10.4012/dmj.28.44>
- [7] Guarda GB, Correr AB, Gonçalves LS, Costa AR, Borges GA, Sinhoreti MA, et al. Effects of surface treatments, thermocycling, and cyclic loading on the bond strength of a resin cement bonded to a lithium disilicate glass ceramic. *Oper Dent* 2013;38:208-17. <https://doi.org/10.2341/11-076-L>
- [8] Dozic A, Kleverlaan CJ, Meegdes M, van der Zel J, Feilzer AJ. The influence of porcelain layer thickness on the final shade of ceramic restorations. *J Prosthet Dent* 2003;90(6):563-70. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(03\)00517-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(03)00517-1)
- [9] Davins SP, Myslinski NR. Shade selection by color vision-defective dental personnel. *J prosthet Dent* 1990;63:97-101. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(90\)90276-I](https://doi.org/10.1016/0022-3913(90)90276-I)
- [10] Turgut S, Bagis B, Turkaslan SS, Bagis YH. Effect of ultraviolet aging on translucency of resin-cemented ceramic veneers: An *in vitro* study. *J Prosthodont* 2014;23:39-44. <https://doi.org/10.1111/jopr.12061>
- [11] Wyszecki G, Stiles WS. Color science: concepts and methods, quantitative data and formula. New York: Wiley; 1982: 567-9. <https://doi.org/10.1080/713818072>
- [12] Wang F, Takahashi H, Iwasaki N. Translucency of dental ceramics with different thicknesses. *J Prosthet Dent* 2013;110:14-20. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(13\)60333-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(13)60333-9)
- [13] Yu B, Ahn JS, Lee YK. Measurement of translucency of tooth enamel and dentin. *Acta Odontol Scand* 2009;67:57-64. <https://doi.org/10.1080/00016350802577818>
- [14] Spink LS, Rungruanganut P, Megremis S, Kelly JR. Comparison of an absolute and surrogate measure of relative translucency in dental ceramics. *Dent Mater* 2013;29:70-7. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.03.021>
- [15] Bayindir F, Kuo S, Johnston WM, Wee AG. Coverage error of three conceptually different shade guide systems to vital unrestored dentition. *J Prosthet Dent* 2007;98:175-85. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(07\)60053-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(07)60053-5)
- [16] Oguro R, Nakajima M, Seki N, Sadr A, Tagami J, Sumi Y. The role of enamel thickness and refractive index on human tooth colour. *J Dent* 2016;51:36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.05.010>
- [17] Ten Bosch JJ, Coops JC. Tooth color and reflectance as related to light scattering and enamel hardness. *J Dent Res* 1995;74:374-80. <https://doi.org/10.1177/00220345950740011401>
- [18] Stroud JL, Buschang PH, Giaz PW. Sexual dimorphism in mesiodistal dentin and enamel thickness. *Dentomaxillofac Radiol* 1994;233:169-71. <https://doi.org/10.1259/dmfr.23.3.7835519>
- [19] Holloway JA, Miller RB. The effect of core translucency on the aesthetics of all-ceramic restorations. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 1997;9:567-74.
- [20] Kelly JR, Nishimura I, Campbell SD. Ceramics in dentistry: historical roots and current perspectives. *J Prosthet Dent* 1996;75(1):18-32. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(96\)90413-8](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(96)90413-8)
- [21] Heffernan MJ, Aquilino SA, Diaz-Arnold AM, Haselton DR, Stanford CM, Vargas MA. Relative translucency of six all-ceramic systems. Part II: core and veneer materials. *J Prosthet Dent* 2002;98:10-15. [https://doi.org/10.1016/S0022-3913\(02\)00041-0](https://doi.org/10.1016/S0022-3913(02)00041-0)

- [22] Antonson SA, Anusavice KJ. Contrast ratio of veneering and core ceramics as a function of thickness. *Int J Prosthodont* 2001;14(4):316-20.
- [23] Johnston WM, Ma T, Kienle BH. Translucency parameter of colorants for maxillofacial prostheses. *Int J Prosthodont* 1995;8(1):79-86.
- [24] Zhang Y, Griggs JA, Benham AW. Influence of powder/liquid mixing ratio on porosity and translucency of dental porcelains. *Prosthet Dent* 2004;91(2):128-35.
- [25] O'Brien WJ, Groh CL, Boenke KM. A new, small-color-difference equation for dental shades. *J Dent Res* 1990;69:1762-4. <https://doi.org/10.1177/00220345900690111001>
- [26] Jin HJ. A comparative study on the translucency of various all-ceramic crown materials[Doctoral dissertation]. Seoul: Univ. of Korea, 2006.
- [27] Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V. Shading of ceramic crowns using digital tooth shade matching devices. *Int J Comput Dent* 2005;8(2):129-52.
- [28] Bolt RA, Bosch JJ, Coops JC. Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Phys Med Biol* 1994;39:1133-42. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/39/7/006>
- [29] Ragain Jr. JC, Johnston WM. Accuracy of Kubelka-Munk reflectance theory applied to human dentin and enamel. *J Dent Res* 2001;80:449-52. <https://doi.org/10.1177/00220345010800020901>
- [30] Kursoglu P, Motro PFK, Kazazoglu E. Translucency of ceramic material in different core-veneer combinations. *J Prosthet Dent* 2015;113(1):48-53. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2014.07.011>
- [31] Della Bona A, Nogueira AD, Pecho OE. Optical properties of CAD-CAM ceramic systems. *Journal of dentistry* 2014;42(9):1202-9. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.07.005>
- [32] Ilie N, Hickel R. Correlation between ceramics translucency and polymerization efficiency through ceramics. *Dental Mater* 2008;24:908-14.
- [33] Nogueira AD, Della Bona A. The effect of a coupling medium on color and translucency of CAD-CAM ceramics. *J Dent* 2013;41:e18-e23. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.02.005>