

색소체용액 침투가 지르코니아 및 전장용 세라믹의 전단결합강도에 미치는 영향

정종현, 오계정*

광주보건대학교 치기공과, 전남대학교 미래형 생체부품소재 RIS사업단*

Influence of coloring liquids on the shear bond strength between zirconia and veneering ceramic

Jong-Hyun Jung, Gye-Jeong Oh*

Dept. of dental lab. Technology, Gwang-ju Health University
RIS Foundation for Advanced Biomaterials, Chonnam National University*

[Abstract]

Purpose: This study was to evaluate the effect of coloring liquids on the shear bond strength between zirconia and veneering ceramic.

Methods: Zirconia(15 mm in diameter, 2.5 mm in thickness; n=40) used in the experiment were divided into 5 groups depending on the coloring liquid. Each specimen were polished using a polishing machine(LaboPol-2, Struers, UK). A cylinder of veneering porcelain(6 mm in diameter, 3 mm in thickness) was fabricated and fired on zirconia surfaces. The shear bond strength was measured using a universal testing machine(Model 4302, Instron, USA). All data were analyzed statistically using a one-way ANOVA and Tukey's multiple comparisons test. After the shear bond test, fracture surfaces were examined by SEM.

Results: Colored zirconia showed a higher shear bonding strength than that of uncolored zirconia except for colored zirconia immersed in Zirkozahn coloring liquid. In particular, colored zirconia immersed in Kuwotech coloring liquid showed the highest shear bond strength. After the shear bond test, mixed failure patterns were mainly observed in the failure between zirconia and veneering ceramic.

Conclusion: Coloring liquid enhanced the shear bond strength zirconia and veneering ceramic than uncolored zirconia.

○ **Key words :** All-ceramic, Coloring liquid, Shear bond strength, Veneering ceramic, Zirconia.

* 본 연구는 2016년도 광주보건대학교 연구비 지원에 의해서 이루어진 논문임.

교신저자	성명	오 계 정	전화	010-3223-5855	E-mail	timer22@naver.com	
	주소	광주광역시 북구 용봉동 전남대학교					
접수일	2016.10.27		수정일	2016.11.16		확정일	2016. 11. 25

I. 서 론

지르코니아는 생체불활성 세라믹 재료로 심미성과 생체 적합성이 우수할 뿐만 아니라 내식성 및 내변색성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 또한 금속에 비해 보철물 주위 잇몸 조직이 심미적이며, 열전도가 다른 치과재료들보다 낮으며, 독성이나 염증반응, 알레르기 반응도 일으키지 않는 등 많은 장점 때문에 치과보철재료로서 많이 사용되고 있다(Manicone et al, 2007). 그러나 지르코니아는 불투명하며 채도가 낮고, 백색의 색상을 가져 치아색조 재현이 어렵다는 결점을 가지고 있다. 따라서 보철물 제작 시 최종 도재 수복물의 색상과 조화를 이루는 유색 지르코니아의 사용이 중요하다.

유색 지르코니아 블록을 제작하는 방법은 금속산화물 혼합법과 색소체용액(coloring liquid) 사용법이 있지만 이를 제조하는 회사들은 유색 지르코니아를 제작하는 자세한 방법을 공개하지 않고 있다. 일반적으로 금속산화물과 희귀토류 산화물(rare earth oxide)이 유색 지르코니아를 제조하는데 사용되고 있다고 파악되고 있다. 최근 들어 지르코니아를 이용하여 제작되는 보철물이 매우 증가하고 있고 이에 따라 임상에서 요구되는 심미적인 만족도를 성취하기 위한 유색(coloring) 지르코니아, 트란스(translucent) 지르코니아, 그라데이션(gradation) 지르코니아 등 다양한 지르코니아 블록이 소개되고 있다.

지르코니아 분말에 금속의 착색제를 혼합하여 블록을 제작하는 금속산화물 혼합법은 제조공정이 고온에서 이루어지기 때문에 고온에서 발색의 안정성이 특별히 요구되며, 발색의 어려움과 착색제의 종류, 첨가량 그리고 제조공정 등에 따라 소결온도가 변하게 되고 지르코니아 결정립 미세구조에 영향을 미쳐 지르코니아 블록의 물리적 성질을 변하게 하는 문제점들을 가지고 있다. 이에 반해 착색제를 액체 상태로 지르코니아 분말에 첨가하는 방법은 균일하게 착색제를 분포시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 색소체용액을 사용하는 침지형의 지르코니아 유색화 과정은 금속산화물 분말에 의한 지르코니아 발색법의 단점을 보완할 수 있고 원하는 색조 재현이 용이하여 사용이 크게 증가하고 있는 추세이다(식품의약품안전처, 2015).

지르코니아 색조 재현을 통해 심미성은 향상되었으나 정밀한 보철 수복물의 완성도와 투명도, 자연치아와의 조화를 위해서는 전장도재의 축조가 필요하다(Braga RR et al, 2000). 지르코니아 도재 수복물에서 대부분의 실패는 도재의 파절이나 지르코니아와 도재의 결합부위에서의 파절에 의한 것으로 알려져 있다. 지르코니아와 전장도재의 결합강도는 화학 결합의 강도, 물리적 상호 결합, 계면에서 결합, 젖음성, 지르코니아와 전장도재 간의 열팽창 계수 차이로 발생하는 압축력에 의해 영향을 받을 수 있다(Al-Shehri et al, 1996; Isgro et al, 2003; De Jager et al, 2005).

지르코니아 전부도재관을 구강내에서 오랫동안 안정적으로 사용하기 위해서는 지르코니아 코핑과 전장도재간의 결합강도가 우수해야만 한다. 하지만 임상에서 사용 중인 색소체용액으로 제작한 유색 지르코니아와 전장도재간의 결합강도에 관한 정보가 제한적이기 때문에 지르코니아 색소체용액에 따른 유색 지르코니아와 전장도재의 결합강도에 관한 비교연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 치과 임상분야에서 사용되고 있는 4종의 지르코니아 색소체용액을 사용하여 제작한 유색 지르코니아와 전장도재간의 전단결합강도를 측정하고 파절양상을 관찰하여, 색소체용액에 따른 유색 지르코니아와 전장도재의 결합강도를 비교, 분석하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 실험재료

1) 지르코니아

상용의 분말(KZ-3YF type A, KCM, Japan)을 사용하여 제작한 지르코니아 시편을 사용하였다(Table 1).

Table 1. Chemical composition of zirconia powder

Composition	Content (wt%)
ZrO ₂ (HfO ₂)	94.22%
Y ₂ O ₃	5.43%
Al ₂ O ₃	0.23%
etc.	0.21%

2) 색소체용액

임상에서 사용되고 있는 A2계열의 색조를 띠는 4가지 종류의 색소체용액을 사용하였다. 사용된 색소체용액은 VITA In-Ceram[®]2000 YZ LL1(VITA Zahnfabrik, Germany), Zirkonzahn coloring liquid(Zirkonzahn, Italy), Wieland coloring liquid(Wieland, Germany), Kuwotech coloring liquid(Kuwotech, Korea) 이었다 (Table 2).

Table 2. Coloring liquid used in this study

Coloring liquid	Code
VITA In-Ceram [®] 2000 YZ LL1	L
Zirkonzahn coloring liquid	Z
Wieland coloring liquid	W
Kuwotech coloring liquid	K

3) 전장도재

전장도재는 Ivoclar vivadent사의 IPS e.max Ceram A2 Dentin(Ivoclar vivadent, Liechtenstein)을 사용하였다.

2. 실험방법

1) 실험군의 분류

실험군은 5개 그룹으로 분류하였다. 무색의 지르코니아를 대조군으로 하였고, VITA In-Ceram[®]2000 YZ LL1, Zirkonzahn coloring liquid, Wieland coloring liquid, Kuwotech coloring liquid에 침지한 후 소결한 유색 지르코니아를 실험군으로 하였다(Table 3).

Table 3. The experimental groups used in this study

Group	Code	Coloring liquid	N
1	C	None (uncolored)	8
2	L	VITA In-Ceram [®] 2000 YZ LL1 (A2 shade)	8
3	Z	Zirkonzahn coloring liquid (A2 shade)	8
4	W	Wieland coloring liquid (A2 shade)	8
5	K	Kuwotech coloring liquid (A2 shade)	8

2) 지르코니아 전소결 및 침지

지르코니아 시편을 임상에서 사용하고 있는 색소체 용액 침지법과 유사하게 전소결 하였다. 지르코니아 침지를 위한 전소결은 시편을 소성로(Ovmat 2009[®], Manfredi, Italy)에 위치시키고 상온에서 10℃/min의 속도로 500℃까지 상승시킨 후 3분간 유지한 다음 600℃까지 상승시킨 후 5분간 유지하였다. 전소결이 끝난 시편은 10분간 실온에서 냉각한 후, 준비된 색소체 용액에 3분간 침지하고 건조하였다.

유지한 후 실온까지 하강시켜 소결을 시행하였다. 최종적으로 소결된 지르코니아 시편은 지름 15 mm, 높이가 2.5 mm이었다.

3) 최종소결

건조된 시편을 지르코니아 전용 소결로(Kavo Therm, Kavo, Germany)에 넣고, 실온에서 1,000℃까지 상승시킨 후 20분 동안 유지하고, 1,450℃로 상승시켜 120분간

4) 표면연마

색소체 용액에 침지 후 소결한 시편(지름 15 mm, 높이 2.5 mm)의 연마는 Labopol-2(Struers, UK)를 이용하여 시행하였고, #600 실리콘 카바이드 페이퍼(Struers, UK)로 마무리 연마 후, 세척하였다.

5) 전장도재 축성

시편마다 동일한 접촉면과 크기를 갖는 도재를 축성하기 위해 원기둥 주형을 제작하고, 이를 이용하여 전장도재(IPS e.max ceram dentin A2, Ivoclar vivadent,

Liechtenstein)를 측정하였다. 전장도재는 소성 후 도재의 수축량을 최소화하기 위해 2회에 걸쳐 측정하고 소성하였다. 전장도재의 소성은 소성로(Esgaia®, J. MoritaMFG co., Japan)에서 제조회사가 제시하는 소성 스케줄에 따라 소성하였다. 최종적으로 도재가 직경 6 mm, 높이 3 mm의 원기둥의 형태가 되도록 하였다.

6) 전단결합강도 측정

하중이 지르코니아 시편과 전장도재 사이의 접촉면과 동일한 방향으로 전달되도록 전단결합강도 측정용 지그에 고정한 뒤, 지르코니아에서 도재가 파절될 때까지 만능시험기(Model 4302, Instron, USA)를 이용하여 전단결합강도를 측정하였다(Fig. 1). 지그를 이용하여 시편을 고정하고 지르코니아와 전장도재 접촉면에 0.5 mm/min의 하중속도로 하중을 가하여 전장도재 실린더가 지르코니아에서 분리될 때의 최대하중(P)을 측정 한 후, 다음의 식을 이용하여 전단결합강도를 계산하였다.

$$\text{MPa (전단결합강도)} = P \times 9.8 / (r^2 \times \pi)$$

이 식에서 P는 최대 하중 (kgf), r은 전장도재 실린더의 반지름 (mm) 이다.

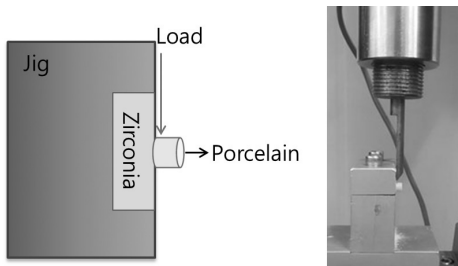


Figure 1. Schematic diagram of shear bond strength test

7) 파단면 분류 및 관찰

지르코니아 시편과 전장도재의 접착 파절 실패 양상을 보기 위해 파단면을 금-팔라듐 합금 코팅 후, 저진공주사전자현미경(JSM-IT300, Jeol, Japan)를 이용하여 관찰하였다. 성분분석은 EDX(energy Dispersive X-ray spectroscopy, EX-200, Horiba, Japan)를 이용하여 관찰하였다. 지르코니아 시편으로부터 전장도재가 깨끗하

게 탈락되면 접착성 파절(adhesive failure), 도재 내에서 파절이 일어나면 응집성 파절(cohesive failure), 지르코니아와 도재와의 접촉계면에서 접착성 파절과 응집성 파절이 같이 일어나면 혼합성 파절(mixed failure)로 분류하였다.

8) 통계분석

전단결합강도의 평균과 표준편차를 계산하고, 각 군의 유의성을 검증하기 위해 SPSS 21 프로그램(SPSS Inc, IL, USA)으로 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 시행하였으며, 집단 간의 차이를 다중비교분석(Tukey's multiple comparison test)을 통하여 사후검정 하였다. 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 로 검증하였다.

III. 결 과

1) 전단결합강도

각 군에서의 전단결합강도 평균값과 표준편차를 Table 4에 표시하였다. 지르코니아와 전장도재의 평균 전단결합강도는 24~27MPa로 나타났다. 색소체 용액 침지 후, Kuwotech coloring liquid를 사용한 그룹(K)의 시편이 가장 높은 전단결합강도를 보였으며, Zirkozahn coloring liquid를 사용한 그룹(Z)에서 가장 낮은 전단결합강도를 보였다($p < 0.05$). 유색과 무색 지르코니아 비교 시, Kuwotech coloring liquid를 이용하여 제작한 유색 지르코니아 그룹을 제외하고, 대조군인 무색 지르코니아 보다 유색 지르코니아가 높은 전단결합강도를 보였으나, 통계학적으로 유의한 차이가 없음을 확인하였다($p > 0.05$)(Fig. 2).

Table 4. Mean and standard deviation of the shear bond strength (MPa)

Group	N	Shear bond strength	
		Mean	SD
C	8	24.85	1.36
L	8	26.24	2.35
Z	8	24.14	2.07
W	8	26.63	2.03
K	8	27.28	1.97

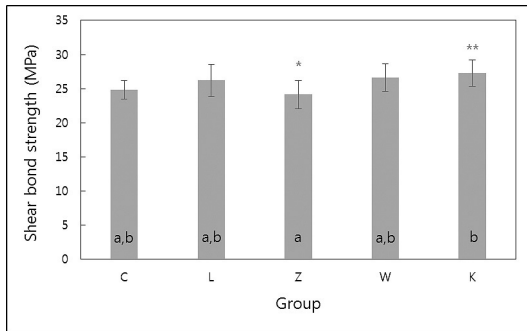


Figure 2. Shear bond strength (MPa). Different letters mean significant difference at $p < 0.05$ level. *, mean the lowest shear bond strength, **, mean the highest shear bond strength.

2) 파단면 관찰

전단결합강도 실험에 사용된 시편에서 지르코니아와 전장도재가 접착되어 있던 면을 중심으로 파절양상을 관찰한 결과, 응집성 파절과 혼합형 파절 양상이 관찰되었다 (Fig. 3). 대부분의 시편에서 혼합형 파절이 나타났으며, 모든 실험군에서 접착성 파절 양상은 관찰되지 않았다. 파절된 원통형의 도재 외층(Outer zone)은 도재 내에서 떨어져 나간 응집성 파절(cohesive failure)을 보인 반면 내층(Inner zone)는 응집성 파절 혹은 혼합성 파절(mixed failure)을 보였다.

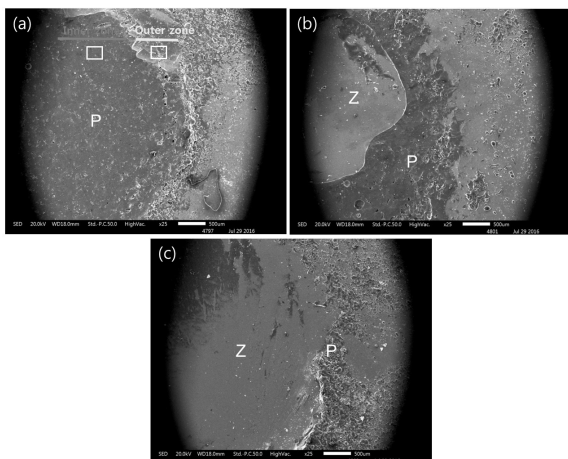


Figure 3. SEM images show fracture pattern after shear bond strength test ($\times 25$). (a) cohesive failure, (b, c) mixed failure. P is represented porcelain, and Z is represented zirconia.

IV. 고찰

최근 환자들의 심미에 대한 요구가 증가하면서, 치과 CAD/CAM용 지르코니아 블록을 이용한 수복물 제작이 확대되고 있다. 지르코니아를 이용한 전부도재관은 구조에 따라 크게 코어와 상부도재로 이루어지는 이중구조 전부도재관과 단일구조로 이루어진 단일구조 전부도재관으로 나눌 수 있다. 이중구조 전부도재관은 상부도재 축성을 위해 추가적인 소성을 필요로 하며 심미성이 뛰어나지만, 상부도재의 파절강도가 약하고 지대치 삭제량이 많은 단점이 있다(정희찬, 2006). 또한, 지르코니아 코어는 금속에 비해 심미적이지만 불투명한 백색이므로 자연치의 심미성을 구현하는데 한계가 있다. 따라서 지르코니아를 절삭한 후 코어를 용액에 담귀 색을 부여하는 침전법(dipping method)을 사용하여 색을 보완하거나 처음부터 색조가 가미된 유색 지르코니아를 사용하기도 한다 (Shah et al, 2008).

코어를 제작할 때 사용하는 침지법은 예비소결된 지르코니아를 담구는 색소체용액(colour liquid)의 농도 및 시간을 변화시킴으로써 원하는 색조를 얻는다(Ocana et al, 1998). 유색 지르코니아는 색소체용액내에 존재하는 금속산화물의 매우 작은 양의 첨가로도 지르코니아의 기계적 성질에 영향을 줄 수 있다고 하였다(Huang et al, 2006; Liu et al, 2010). 지르코니아의 색상을 자연치의 색조와 유사하게 색소체용액을 사용하여 침지 후 제작하여 유색 지르코니아를 제작하면서 이러한 문제점들은 대부분 해결되고 있다. 그러나 시판되고 있는 색소체용액과 전장도재간의 결합강도에 관한 정보는 부족한 상태이다. 이에 본 연구에서는 시판되고 있는 색소체용액 4종을 이용하여 유색 지르코니아를 제작하고, 제작한 지르코니아와 전장도재간의 전단결합강도와 파절양상을 비교 분석하였다.

재료 자체의 강도와 더불어 지르코니아와 전장도재간의 결합 역시 중요한 요소 중 하나이다. 전단결합강도는 외력이 가해졌을 때 접착된 2가지 재료가 부러지거나 파절되기 전에 버틸 수 있는 최대하중을 단면적으로 나누어 결합력을 산출하는 값으로 정의되며(Guess et al, 2008), 측정방법이 비교적 빠르고 간단하므로 지르코니아와 전

장도재간의 전단결합강도를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 전단결합강도 시험 시, cross head speed가 높으면 전단결합강도 시험 동안 응집성 실패를 발생시키는 비정상적인 스트레스 분포를 유발할 수 있으며 이는 결합강도 값에 영향을 줄 수 있다. Hara 등(Hara et al, 2001)은 0.50 mm ~ 0.75 mm/min의 cross head 속도는 접착성 실패를 좀 더 유발하기 때문에 전단강도 측정에 바람직하다고 하였으며 이 연구에서는 0.5 mm/min의 cross head speed를 적용하였다.

금속-도재관에서 금속 코팅과 전장도재의 적절한 결합강도는 25 MPa 이상이 되어야 한다고 알려져 있지만, 본 연구에서 지르코니아와 전장도재간의 전단결합강도는 24~27 MPa 사이로 나타났다. 이는 Al-Dohan 등(2004)의 지르코니아 코어와 비니어 세라믹 시스템에서 임상적으로 적절한 전단결합강도 22-31 MPa, Dundar 등(2007)의 23-41 MPa 사이에 있어 본 연구에서 제작된 유색 및 무색의 지르코니아는 임상적으로 적용하기에 충분하다고 판단된다.

본 연구 결과, Kuwotech coloring liquid 용액으로 만든 유색 지르코니아에서 전장도재와의 전단결합강도가 가장 높게 나타났고, Wieland coloring liquid, VITA In-Ceram[®]2000 YZ LL1, Zirkozahn coloring liquid 용액순으로 나타났다. Zirkozahn coloring liquid를 제외한 색소체용액 처리에 따른 실험군의 전단결합강도는 대조군인 무색 지르코니아 보다 수치가 증가하는 양상을 보였다. 이는 색소체 용액 내에 존재하는 색소체의 함량과 성분 따라 유색 지르코니아의 기계적 특성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 전장도재와의 전단결합강도에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 색소체 용액의 사용방법, 용액의 침지양과 침지 시간, 용액의 침투 정도와 깊이 등에 따라 전단결합강도가 달라질 것으로 생각된다. 그러나 유색 지르코니아와 전장도재간의 결합강도에는 다양한 요인들이 영향을 미치므로 절대적인 결과로 보기에는 한계가 있으므로 상대적 비교 평가 자료로 활용할 필요가 있다고 생각된다. 나아가 본 연구에서 제작한 시편구조보다 임상에서 제작되는 형태는 코팅과 전장도재간의 접촉 면적이 증가하므로 본 연구의 결과보다 높은 결합력을 나타낼 것으로 생각된다.

지르코니아의 주사전자현미경 관찰은 지르코니아와 포세린의 계면 및 지르코니아 결정의 연구에 많이 이용된다. 본 연구에서 육안으로 관찰 시 파절이 전장도재 내에서 시작된 후 균열이 접착면 쪽으로 진행되어 접착면이 분리되는 양상을 보였다. 전장도재는 원형의 띠를 이루며 외측에만 도재가 남아있었으며 내측은 도재가 깨끗하게 떨어져 나가거나 일부 도재가 남아있는 양상을 보였다. 분리가 일어난 접착면은 지르코니아가 완전히 노출되지 않고 도재입자들이 남아 있었다. EDX 분석 결과, 파절양상에 따라 응집성 파절에서는 도재의 성분만이 관찰되었고 혼합형 파절에서는 지르코니아와 도재의 성분이 함께 관찰되었다. 지르코니아와 전장도재간의 결합력이 세라믹의 파절 강도보다 높은 경우, 세라믹 내에서 응집파절이 시작되고 세라믹의 파절강도가 낮다면 계면파절의 형태가 나타난다. 본 실험에서는 계면 파괴 형태와 응집 파절 형태가 혼재된 복합 파절 형태가 많은 것을 확인 하였다.

본 연구에서는 치과 CAD/CAM용 지르코니아와 전장도재간의 전단결합강도를 측정하고, 파절양상을 관찰하였다. 그러나 본 연구에서 사용한 시편은 임상적인 치과수복물의 형태를 반영하지 못하였고, 시편의 개수가 그룹당 8개의 시편으로 많지 않았기 때문에 일반화 하기는 어렵다. 또한, 오랜 시간 구강 내 수분에 노출되었을 때의 상황과도 다르다는 한계점이 있다. 이를 보완하기 위해서는 치과 수복물과 유사한 형태의 시편을 제작하고 충분한 온도 순환 조건을 적용하는 실험이 우선 필요하다고 생각한다. 또한 색소체용액으로 제작된 유색 지르코니아 수복물의 결합 강도와 실패양상은 사용한 색소체용액 및 표면 처리 방법, 응력 전달 방법 등 다양한 요소에 의해 달라질 수 있으며 이에 대한 보다 세분화된 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다. 하지만 유색 지르코니아와 전장도재를 이용하여 제작되는 이중 구조 전부도재관 수복물의 내구성과 재료에 대한 안정적인 사용을 위한 기초자료는 제시했다고 판단된다. 최근에 소개되고 있는 색소체용액도 더 시판되고 있기에 추후 더 많은 연구가 필요하다.

V. 결 론

시판되고 있는 치과 CAD/CAM용 지르코니아 4종의 색소체용액을 이용하여 제작한 유색 지르코니아와 전장도재간의 전단결합강도와 파절양상을 비교 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 4종의 색소체 용액을 이용하여 제작한 유색 지르코니아 중 가장 높은 전단결합강도를 보인 그룹은 Kuwotech coloring liquid용액으로 제작한 그룹이었으며, 가장 낮은 전단결합강도를 보인 그룹은 Zirkozahn coloring liquid를 사용하여 제작한 그룹이었다($p < 0.05$).

2. Kuwotech coloring liquid용액으로 제작한 유색 지르코니아를 제외하고, 유색과 무색의 전단결합강도는 통계학적으로 유의한 차이가 없었다($p > 0.05$).

3. 지르코니아와 전장도재 간의 파절양상은 대부분 혼합형 파절양상을 보였다.

REFERENCES

Al-Dohan HM, Yaman P, Dennison JB, Razzoog ME, Lang BR. Shear strength of core-veneer interface in bi-layered ceramics. *J Prosthet Dent*, 91, 349-355, 2004.

Al-Shehri SA, Mohammed H, Wilson CA. Influence of lamination on the flexural strength of a dental castable glass ceramic. *J Prosthet Dent*, 76, 23-28, 1996.

Braga RR, Ballester RY, Daronch M. Influence of time and adhesive system on the extrusion shear strength between feldspathic porcelain and bovine dentin. *Dent Mater*, 16, 303-310, 2000.

De Jager N, Pallav P, Feilzer AJ. The influence of design parameters on the FEA-determined stress distribution in CAD-CAM produced

all-ceramic dental crown. *Dent Mater*, 21, 242-251, 2005.

Dundar M, Ozcan M, Gokce B, Comlekoglu E, Leite F, Valandro LF. Comparison of two bond strength testing methodologies for bilayered all ceramics. *Dent Mater*, 23(5), 630-636, 2007.

Guess PC, Kulis A, Witkowski S, Wolkewitz M, Zhang Y, Sturub JR. Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics and their susceptibility to thermocycling. *Dent Mater*, 24(11), 1556-1567, 2008.

Hara AT, Pimenta LA, Rodrigues AL. Influence of crosshead speed on resin-dentin shear bond strength. *Dent Mater*, 17, 165-169, 2001.

Isgro G, Pallav P, van der Zel JM, Feilzer AJ. The influence of the veneering porcelain and different surface treatments on the biaxial flexural strength of a heat-pressed ceramic. *J Prosthet Dent*, 90, 465-473, 2003.

Jeong HC. Fracture strength of zirconia monolithic crowns. *J Korean Acad Prosthodont*. 44(2), 157-164, 2006.

Liu Q, Shao LQ, Wen N, Deng B. Surface Microhardness and Flexural Strength of Colored Zirconia. *Adv Mater Research*, 105-106(1), 49-50, 2010.

Manicone PF, Iommetti PR, Raffaelli L. An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications. *J Dent*, 35(11), 819-826, 2007.

Ocana M, Gonzalez-Elipea AR, Andres-Vergesb M, Tartaj P, Serna CJ, Orerad VM. Preparation by hydrolysis of aerosols and colour properties of Cr-doped and Co-doped zircon powder. *J Eur Ceram Soc*, 18(7), 821-830, 1998.

Shah K, Nolloway JA, Denry IL. Effect of coloring with various metal oxides on the microstructure, color and flexural strength of 3Y-TZP. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*, 87(2), 329-337, 2008.

Huang H, Zhang FQ, Sun J, Gao L. Effect of three kinds of rare earth oxides on chromaticity and mechanical properties of zirconia ceramic. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*. 41(6), 327-330, 2006.

식품의약품안전처. 의치착색재의 안전성 및 성능 시험방법 가이드라인, 1-17, 2015.