

## 지르코니아 전장 세라믹의 파절강도에 관한 비교 연구

이정환<sup>†</sup> · 안재석  
광주보건대학 치기공과

### Comparative Study in Fracture Strength of Zirconia Veneering Ceramics

Jung-Hwan Lee<sup>†</sup> and Jae-Seok Ahn

Department of Dental Laboratory Technology, Gwang-Ju Health college University, Shin chang-dong 683-3, Gwangju-City 506-701, Korea

**Abstract** This study was performed to evaluate the fracture strength of the dental zirconia veneering ceramics for zirconia ceramic core. Six commercial zirconia veneering ceramics were used in this study, namely E-Max(Ivoclar vivadent, Inc, Liechtenstein), Creation ZI(KLEMA Dental produckte GmbH, Austria), Cercon ceram kiss(Degudent, GmbH, Hanau-Wolfgang, Germany), Triceram(Dentaurum, Ispringen, Germany), Zirkozahn(Zirkozahn GmbH, Italy), Zirmax(Alpudent, Korea). All samples were prepared according to the relevant instructions of manufacture. Disc specimens were prepared to the final dimensions of 17 mm in diameter and 1.5 mm in thickness. The biaxial flexure strength test was conducted using a ball-on-three-ball method. All specimens were tested in a moisture-free environment. Average flexural strengths were analyzed with Weibull analysis and one-way analysis of variance(ANOVA). Significant differences were founded between the mean flexural strength values of five commercials zirconia veneering ceramics and the other. The flexural strengths and Weibull modulus were similar to those of five groups E-Max(EM), Creation ZI(CR), Cercon ceram kiss(CE), Triceram(TR), Zirkozahn(ZI) with the exception of Zirmax(ZM). The biaxial flexural strength from Cercon ceram kiss(CE) was higher than those of other groups. Fracture analysis showed similar results for these five groups.

**Key words** Bi-axial flexural test, Flexural strength, Zirconia veneering ceramics

## 서 론

결손된 치아에 대한 심미적인 수복 요구가 증가하면서 전치부 영역에서와 마찬가지로 구치부에서도 질적인 만족도와 함께 높은 저작압에 저항할 수 있는 다양한 종류의 심미적 수복재료가 개발되어 임상에 적용되고 있다. 치과용 수복재료는 구강 내 환경에서 적절한 기능을 하기 위해서 기계적 특성, 심미성, 화학적 내구성 및 생체 적합성 등이 우수해야 한다<sup>1,2)</sup>. 이러한 구강 내 요구 조건을 충족하는 대표적 수복재료로 세라믹전장금속관은 충분한 강도와 변연부의 적합성으로 어느 정도 심미적인 부분을 만족시키며 사용되어 왔지만, 비 귀금속 합금의 성분 중 니켈, 크롬 등은 구강 내 국소반응 및 전신적 위해 작용을 일으킬 수 있어 유럽각국에서는 치과용 금속으로의 사용이 금지되어 있고, 금속 구조물의 색조 간섭현상으로

자연치와는 달리 불투명성을 나타내고 치경부에서 금속 변연이 노출될 경우 심미성에 많은 영향을 줄 수 있다. 이러한 문제점들 때문에 다양한 연구와 재료들이 개발되고 있는데, 그 중 완전 세라믹 수복물의 개발은 금속 구조물에 비해 빛의 투과성에 의한 심미성, 자연치와 유사한 색조를 나타낼 수 있는 안정성, 생체 적합성, 충분한 강도 및 변연부의 적합성 등이 우수하여 치과용 수복재료로 다양하게 응용되고 있다. 그렇지만 세라믹은 수복 재료로서 이러한 조건을 충족시키는 반면에 금속과 달리 충격과 인장에 대한 저항성이 낮아 수복 재료로서 결정적인 단점으로 작용 한다<sup>3)</sup>.

세라믹 재료의 파괴는 내부에 잠재하는 균열상의 결함, 그중 가장 약한 결함부에서 균열이 시작 되고, 빠르게 전파되어 파괴에 도달하는 것으로 알려져 있다. Ritter 등<sup>4)</sup>은 세라믹 재료의 응력부식(stress corrosion)으로 일어나는 피로파괴에 대해 이론적 근거를 확립하였고, 피로 파괴에 대한 많은 연구들이 보고되고 있다<sup>5-8)</sup>.

최근 들어서 세라믹스틸(ceramic steel)이라고 제안할 만큼 우수한 기계적 성질을 가지고 있는 지르코니아 세라

<sup>†</sup>Corresponding author  
Tel: 062-958-7696  
Fax: 062-958-7693  
E-mail: Leejh@ghc.ac.kr

믹을 이용한 보철물의 제작이 많아지고 있는데, 지르코니아 전부세라믹관은 대부분의 전부 세라믹관과 마찬가지로 지르코니아 하부 코어와 세라믹 상부구조로 이중구조를 이루고 있다. 이중구조 전부세라믹관의 전장용 세라믹은 낮은 인장력과 취성으로 인해 파절이나 탈락의 가능성이 높은 것으로 알려져 있는데<sup>3)</sup>, 지르코니아 세라믹 코어와 전장용 세라믹의 열팽창계수 차이에 의한 응력 집중과 세라믹의 낮은 젖음성, 소성과정에서 발생하는 세라믹의 소성 후 수축, 그리고 열과 응력에 의한 코어와 전장용 세라믹간의 지르코니아 입자의 상전이현상(transformation) 등으로 전장용 세라믹의 파절 원인들이 보고되고 있다<sup>9,10)</sup>.

구강 환경은 치과용 도재의 피로 파괴가 일어날 모든 인자를 포함하고 있다. 음식과 타액 등의 수분에 노출이 되어있고, 세라믹의 가공과정에서 발생하는 미세결함 등이 복합적으로 작용한다. Sherrill과 O'Brien<sup>11)</sup>은 수중에서 측정된 세라믹의 강도가 대기 중에서 측정된 것보다 낮다고 보고하였다. 구강내 도재 수복물의 피로 수명을 측정하기 위한 여러 가지 측정 방법들이 있지만 본 연구에서는 세라믹의 강도에 미치는 영향을 최소화하기 위해 불활성 조건하에서 파절강도 시험을 행하였다.

지르코니아 전부 세라믹관의 제작에 이용되는 전장용 세라믹에 대한 파절과 파절형태에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 현재 임상에서 사용되고 있는 지르코니아 전용의 전장용 세라믹으로 시편을 제작하고 이축 굽힘 시험을 실시하여, 파절형태를 분석하였고, Weibull 분석을 통해 시편의 강도와 신뢰성의 차이

를 비교하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험재료

본 연구에서 사용한 지르코니아 전장 세라믹은 E-Max(Ivoclar vivadent, Inc, Liechtenstein), Creation ZI (KLEMA Dental produckte GmbH, Austria), Cercon ceram kiss(Degudent, GmbH, Hanau-Wolfgang, Germany), Triceram(Dentaurum, Ispringen, Germany), Zirkonzahn (Zirkonzahn GmbH, Italy), Zirmax(Alpident, Korea)의 상아질 세라믹을 사용하였다. 이축 굽힘 시험을 시행하기 위해, 세라믹 분말은 각 제조회사에서 제공하는 전용의 혼합액을 이용하여 slurry로 만들고 vibration and blotting technique을 사용하여 금형상에 축성한 다음 각 제조회사가 추천하는 소성조건에(Table 1) 따라 상아질 세라믹을 2회 소성하고, 자가 글레이징을 하여 시편의 최종 치수가 직경 17 mm × 두께 1.5 mm가 되도록 원판상의 시편을 제작하였다(N=84). 이후 표면을 균일화하기 위해 # 600 ~ # 2000의 SiC 연마지(Metallographic, USA)로 순차적으로 연마하고 연마과정에서 생성된 미세 결함을 제거하기 위해 1 μm의 다이아몬드 페이스트(Beuhler Ltd, USA)로 마무리 연마를 시행하였다.

### 2. 실험방법

#### 1) 이축 굽힘 시험

전장용 세라믹의 굽힘 강도 측정을 위해 취성이 있는

Table 1. Firing schedules of the veneering materials

Veneering Materials	Code	Pre-Drying		TRI <sup>3</sup> (°C/min)	FT <sup>4</sup> (°C)	V1 <sup>5</sup> (°C)	V2 <sup>6</sup> (°C)	HT <sup>7</sup> (min)
		ST <sup>1</sup> (°C)	DT <sup>2</sup> (min)					
E-Max	EM							
Dentin layer		403	4	50	750	450	749	1
Self glaze		403	4	50	760			1
Creation ZI	CR							
Dentin layer		450	6	45	810	500	810	1
Self glaze		450	6	45	820			1
Cercon ceram kiss	CE							
Dentin layer		450	8	55	830	500	830	1
Self glaze		450	8	55	840			1
Triceram	TR							
Dentin layer		500	8	55	760	500	760	1.5~2
Self glaze		450	2	55	760			1
Zirkonzahn	ZI							
Dentin layer		300	6	55	820	500	820	1
Self glaze		300	2	55	820			1
Zirmax	ZM							
Dentin layer		500	6	60	880	550	880	1
Self glaze		500	5	60	860			1

ST<sup>1</sup>, starting temperature; DT<sup>2</sup>, drying time; FT<sup>3</sup>, final temperature; TRI<sup>4</sup>, temperature rate increase; V1<sup>5</sup>, vacuum on; V2<sup>6</sup>, vacuum off; HT<sup>7</sup>, holding time

세라믹 재료에 널리 적용되는 이축굽힘시험(Bi-axial flexural test)을 적용하였다. 불활성 강도(Dry strength)를 측정하기 위해 시편과 기름(Shin-Etsu, KF-96)을 각각 110°C에서 유지되는 건조기 내에서 48시간 동안 건조시킨 다음 시편을 기름 속에 집어넣었으며, 측정이 이루어질 때까지 다시 24시간 동안 저장하였다. 이축 굽힘 시험을 위해 시편은 직경 17 mm의 유지원주상에 직경 3 mm의 강구 3개를 등간 격으로 위치시킨 이축 굽힘 시험 장치를 재료 시험기(4201, Instron Co, USA)에 장착한 다음 원판상의 시편을 올려놓고, 직경 1.2 mm의 하중봉을 중앙부에서 crosshead 속도 0.5 mm/min으로 파절이 일어날 때까지 압축력을 가하였다. 이축 굽힘 강도( $\sigma$ )는 식 (1) ~ (3)을 적용하여 계산하였다.

$$S = -0.2387 \frac{P(X-Y)}{d^2} \quad (1)$$

$$X = (1 + \nu) \ln(r_2/r_3)^2 + [(1 - \nu)/2](r_2/r_3)^2 \quad (2)$$

$$Y = (1 + \nu)[1 + \ln(r_1/r_3)^2] + (1 - \nu)(r_1/r_3)^2 \quad (3)$$

여기서 S는 최대강도(MPa), P는 시편의 파절하중(N),  $\nu$ 는 Poisson 비(0.25로 설정),  $r_1$ 은 지지원의 반경(mm),  $r_2$ 는 하중부의 원주반경(mm) 및  $r_3$ 는 시편의 반경이다.

2) 파절 강도의 통계적 분석

강도의 분산이 큰 취성 재료의 파절강도는 통계적 분석이 필요하며, 일반적으로 최약환설(Weakest link theory)로부터 유도한 Weibull 통계가 적용되고 있다. 굽힘 강도  $\sigma$ 의 재료가 이보다 낮은 응력 이하에서 파괴될 확률을  $P_f$ 라 하면 굽힘 강도와 파괴확률 사이에는 다음의 식(4)의 관계가 성립한다.

$$P_f = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_0)^m] \quad (4)$$

여기에서, m은 Weibull 계수,  $\sigma_0$ 는 특성강도(characteristic strength)이다.

식 (1)을 대수 변환하여  $\ln \ln[1/(1-P_f)]$ 와  $\ln\sigma$ 의 관계로 표시하면 식 (5)가 얻어진다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-P_f} = m \ln \sigma - m \ln \sigma_0 \quad (5)$$

측정된 n개의 강도 값을 오름차순으로 배열하여 순위를 정했을 때 i 번째 순위에 오는 강도 값의 파괴확률  $P_i$ 를 median rank법을 적용하여 계산하면 식 (6)으로 표시된다.

$$P_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (6)$$

회귀분석에 의해  $\ln \ln[1/(1-P_f)]$ 와  $\ln\sigma$  사이의 상관관계를 조사한 다음 Weibull 계수 m과 특성강도 값을 구하였다.

3) 통계처리

측정 된 각 시험군의 이축 굽힘 강도 값의 결과는 One way ANOVA를 사용하여 통계처리 하였고, 사후검정은 Tukey test로 유의수준  $\alpha = 0.05$ 에서 실시하였다.

결 과

1. Weibull modulus 분석

Table 2는 본 연구에서 사용한 지르코니아 전장용 세라믹으로 제작한 시험재료에 대하여, 불활성 조건하에서 이축 굽힘 시험을 실시하고 각 시편의 파절강도를 Weibull 분석하였다. 파괴확률이 0.5일 때의 중앙값( $\sigma_f(0.5)$ ), Weibull 계수(m), 특성강도( $\sigma_0$ ), 상관관계를 나타내는 결정계수( $r^2$ )를 포함하고 있다. 평균 파절강도( $\sigma_f(\text{avg})$ )는 Cercon ceram kiss(CE)군에서 129.8 MPa로 가장 높았으며 Zirmax(ZM)군에서 68.05 MPa로 가장 낮았고, 통계적으로 유의하였다( $p < 0.05$ ). Weibull 계수는 Triceram(TR)군에서 9.388로 가장 높았으며 Cecon ceram kiss(CE)군에서 5.268로 가장 낮았다(Fig. 1). 이축굽힘강도와 파괴확률 사이의 관계를 나타내는 Weibull 선도는 Fig. 2에 표시하였으며, Weibull 분포는 single mode에 일치하는 경향을 보였다( $r^2 > 0.92$ ).

Table 2. Weibull analysis data of zirconia veneer ceramic specimens

Parameter \ Group	CR	CE	TR	EM	ZI	ZM
$\sigma_f(0.5)$	127.0	133.15	119.55	116.9	113.7	68.05
m	5.969	5.268	9.388	7.159	6.394	8.23
$\sigma_0$	136.75	140.80	126.83	126.36	117.28	69.903
$r^2$	0.959	0.975	0.926	0.980	0.988	0.939
$\sigma_f(\text{avg})$	127.01	129.8	120.53	118.6	109.39	66.02
SD	23.107	26.224	13.981	18.147	18.346	8.660
N	14	14	14	14	14	14

$\sigma_f(0.5)$ =median fracture strength in MPa; m=Weibull modulus;  $\sigma_0$ =Characteristic strength in MPa;  $r^2$ =Weibull distribution regression coefficient squared;  $\sigma_{f(\text{avg})}$ = Mean fracture strength in MPa; SD=Standard deviation; N=number of samples.

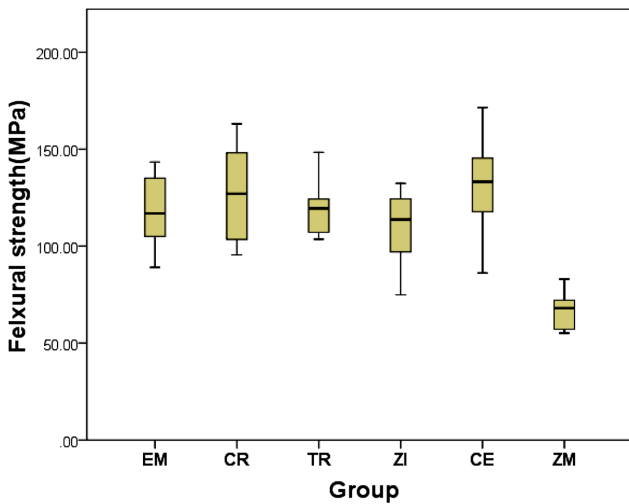


Fig. 1. Comparative value of zirconia veneer ceramic specimens flexural strength. EM; E-Max, CR; Creation ZI, TR; Triceram, ZI; Zirkozahn, CE; Cercon ceram kiss, ZM; Zirmax

2. 파절형태 분석

이축 굽힘 시험 방법으로 파절된 지르코니아 세라믹의 파절형태를 분류하기 위해 ASTM C 1449에 소개된 예에 따라서 파절 하중이 높을수록 파절 조각의 수가 증가하는 것으로 분류 하였다(Fig. 3). 각 군의 시편들은 균열이 중앙에서부터 시작하여 2 - 7조각으로 파절되는 것으로 관찰되었다. E-Max(EM), Creation ZI(CR), Cercon ceram kiss (CE), Triceram(TR), Zirkozahn(ZI) 실험군의 파절형태는 3 - 7조각으로 파절되었고, 평균 파절 하중이 가장 낮게 측정된 Zirmax(ZM) 실험군은 2조각으로만 파절되었다.

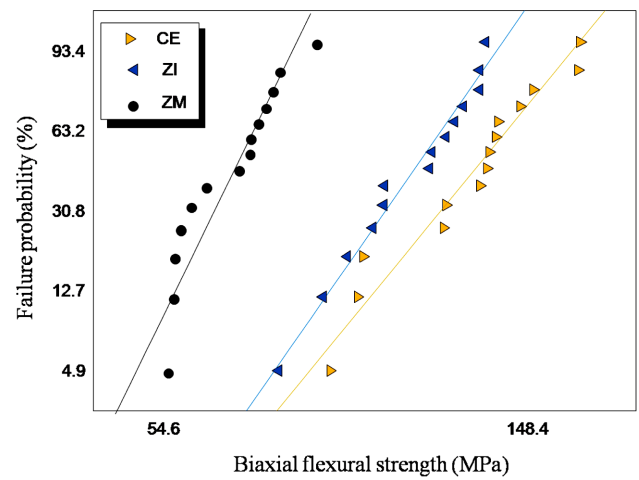
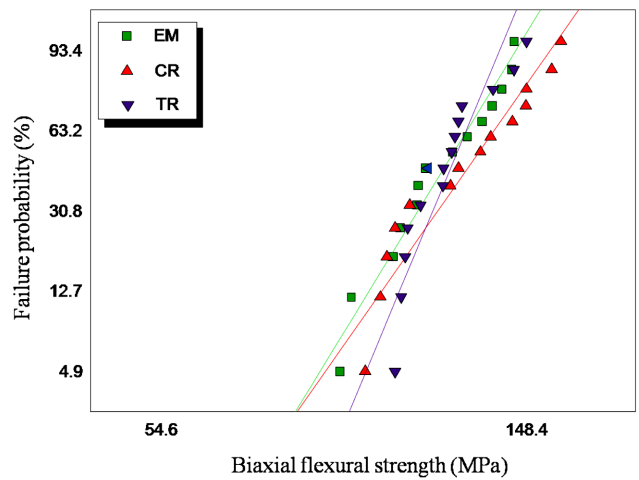


Fig. 2. Weibull plot of fracture strengths of specimens.

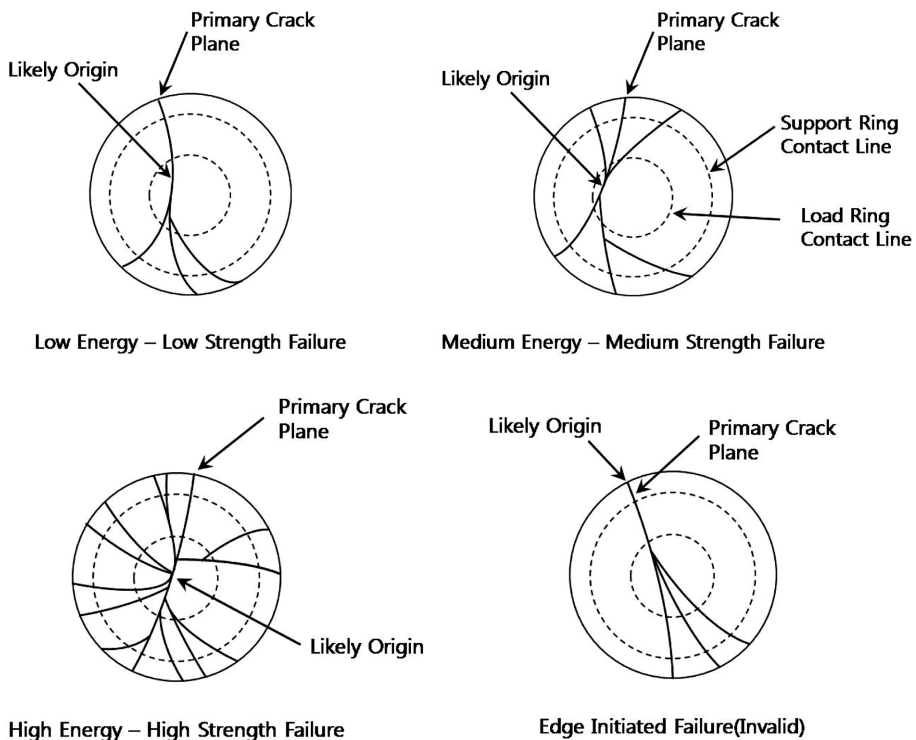


Fig. 3. Illustrated failure patterns appeared in ASTM C 1499-03.

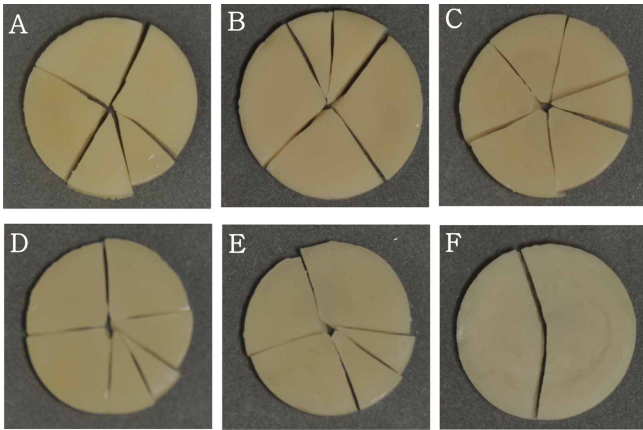


Fig. 4. Typical failure patterns of zirconia veneer ceramic specimens tested by ball-on-three-ball biaxial flexure tests. (A) EM, (B) CR, (C) TR, (D) ZI, (E) CE, (F) ZM.

## 고 찰

전부세라믹관의 임상적인 성공 요소 중 하나는 기계적인 강도이다. 보철물에 작용하는 응력상태는 전단응력, 압축응력 및 인장응력이 함께 작용하는 복합응력 상태이므로, 임상적 성공 여부를 결정하기 위해서는 표준화된 시편을 사용하여 검사하는 것이 필수적이다. 취성재료의 파절강도를 측정하기 위해 일반적으로 사용되는 3점이나 4점 굽힘시험은 시편의 가공이 용이하지 않고, 시험 중에 지지점에서 응력의 집중으로 인한 파절이 일어날 수 있어 얇은 세라믹 재료의 굽힘 시험에는 이축 굽힘 시험이 빈번히 이용되고 있다. Ban 과 Anusavice<sup>12)</sup>, Ban 등<sup>13)</sup>은 이축 굽힘시험은 중심부에 최대 인장력을 부여할 수 있어, 3점이나 4점 굽힘 시험에서와 같은 잘못된 선단의 파절이 적고, 약간 굽은 시편에서도 용이하게 파절강도를 측정할 수 있어 신뢰도가 높은 강도 측정법이라 하였다.

본 연구에서는 전장용 세라믹의 파절 강도를 알아보기 위해 직경 17 mm × 두께 1.5 mm의 원판상의 시편을 제조한 다음, 표면 조정의 효과 차이를 줄이기 위해 전장용 세라믹의 시편을 # 600 ~ # 2000 SiC 연마지를 사용하여 연마를 하고, 생성과정에서 발생하는 미세 결함을 제거하기 위해 1 μm의 다이아몬드 페이스트로 마무리 연마를 시행하였다. 세라믹 재료의 강도는 재료의 강도 이외에 반복되는 소성회수, 표면 마무리, 수분 노출, 등에 의해 영향을 받는다<sup>14-16)</sup>. Smyth와 Magida<sup>16)</sup>는 500°C의 건조한 질소가스중에서 24시간 건조한 후 Glass ceramic의 불활성 강도를 측정하였다. 건조한 상태나 습기가 차단된 상태에서 측정한 불활성강도(Dry strength)는 대기중이나 수중에서 측정한 활성강도(Wet strength)보다 높은 강도 값을 갖게 된다. 본 연구에서는 불활성 강도(Dry strength)를 측정하기 위해 시편과 기름을 각각 110°C에서 유지되는 건조기 내에서 48시간 동안 건조시킨 다음 시편을 기름 속에 집어넣었으며, 측정이 이루어질 때까지 다시 24

시간 동안 저장한 후, ball-on-three-ball법을 적용한 이축 굽힘 시험에 의해 불활성 파절강도를 측정하였다. 각 실험군의 평균 파절강도는 Table 2에서와 같이 Cercon ceram kiss(CE)군이 129.8 MPa로 가장 높았고, Zirmax (ZM)군이 66.02 MPa로 가장 낮았으며 통계학적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다( $p < 0.05$ ). 본 실험에서 측정된 불활성 강도는 Fairhurst 등<sup>18)</sup>과, Myers 등<sup>19)</sup>이 측정된 결과와 유사하였다.

세라믹 디스크 이축굽힘강도 시편의 파절형태는 거의 대부분 인장면에 수직으로 파절이 일어나면서 2 - 7 조각으로 나뉘어서 파절되었고, 파절하중과 파절 조각의 수는 전체적으로 파절하중이 높을수록 파절 조각의 수는 증가하는 것으로 나타났다. ASTM C 1499-03의 분류에 의해 파절형태(failure pattern)는 E-Max(EM), Creation ZI(CR), Cercon ceram kiss(CE), Triceram(TR), Zirkonzahn(ZI) 실험군에서는 High Energy-High Strength Failure와 Medium Energy-Medium Strength Failure 양상으로 분류하였고, Zirmax(ZM) 실험군에서는 Low Energy-Low Strength Failure 양상으로 분류하였다. 파절면과 파절 형태에 대한 분석은 연구가 더 이루어져야 할 것으로 생각된다.

세라믹 시편은 강도시험에서 취성파괴를 하므로 강도가 일정하게 나타나지 않고, 통계적인 분포를 나타나게 된다. 취성파괴 재료의 강도는 재료가 가지고 있는 결함의 크기에 의해 결정되기 때문에 일정하지 않은 분포를 나타내고, 세라믹과 같은 취성재료의 강도 평가에는 최약 링크 이론에 기초한 Weibull 분석이 이용되고 있다. Weibull 분포에서 Weibull 계수  $m$ 값은 분포의 특성을 표시하는 지수로 파절강도가 동일한 재료에 대해서도 Weibull 계수가 작을수록 평균치보다 낮은 응력 하에서 파괴가 일어날 확률이 증가하게 되는 것을 나타내고, Weibull 계수가 높은 경우에는 비교적 균일한 결함의 크기, 분포 및 모양을 가지고 있어서 강도의 분포대가 좁고 상당히 신뢰도가 높다는 것을 의미한다. 일반적으로 취성이 높은 치과재료에서 Weibull 계수는 5 - 20 정도로 알려져 있다<sup>12,13)</sup>. 본 연구에서 각 실험군의 Weibull 분석을 시행한 결과,  $m$ 값은 E-Max(EM)군이 7.159, Creation ZI(CR)군이 5.969, Cercon ceram kiss(CE)군이 5.268, Triceram(TR)군이 9.388, Zirkonzahn(ZI)군이 6.349로 나타나 Triceram(TR)군의 신뢰도가 가장 높음을 알 수 있었다. 이는 Wachtman 등<sup>20)</sup>과 McCabe와 Walls<sup>21)</sup>의 연구 결과와 일치하였다.

본 실험의 제한점으로 지르코니아 전장용 세라믹의 파절강도에 대한 실험이 구강환경을 고려하지 않아 활성화 환경하에서 수복물에 가해지는 응력 집중과, 수복물의 각 성분들 사이의 열수축등으로 인한 임상 수복물의 파절강도와 차이가 있을 수 있다. 지르코니아 전장용 세라믹 파절 강도 비교 평가의 연구 결과로 지르코니아 코어와 전장용 세라믹간의 결합력을 예측하는 것은 잘못을 불러일으킬 수도 있다. 지르코니아 코어와 전장용 세라믹의 결

합력에 대해서는 후속 연구가 더 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 결론

본 연구에서는 최근 치과 임상에서 전부세라믹관의 제작에 이용되고 있는 지르코니아 전장용 세라믹에 대해 ball-on-three-ball법을 적용한 이축굽힘시험을 실시하고, 파절 강도와 파절형태를 분석하였으며, Weibull 분석으로 신뢰성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지르코니아 전장용 세라믹의 평균 강도는 CE>CR>TR>EM>ZI>ZM 군순으로 나타났고, 통계적으로 유의한 차이를 보였으며( $p>0.05$ ), 파절 하중이 높을수록 파절 조각의 수는 증가하였다.
2. Weibull 분석결과 지르코니아 전장용 세라믹의 특성 강도는( $\sigma_0$ )는 CE>CR>TR> EM>ZI>ZM 군순으로 나타났으며, Weibull modulus( $m$ )는 Triceram(TR)군이 가장 높았다
3. 평균 파절강도는 Cercon ceram kiss(CE)군에서 129.8 MPa로 가장 높았으며 Zirmax(ZM)군에서 68.05 MPa로 가장 낮았고, 통계적으로 유의하였다( $p<0.05$ ).
4. 파절형태(failure pattern)는 E-Max(EM), Creation ZI(CR), Cercon ceram kiss(CE), Triceram(TR), Zirkozahn(ZI) 실험군에서는 High Energy-High Strength Failure와 Medium Energy-Medium Strength Failure 양상으로 관찰되었고, Zirmax(ZM) 실험군에서는 Low Energy-Low Strength Failure 양상이 관찰 되었다.

## 참고문헌

1. Rosenblum M: A review of all-ceramic restoration. J Am Dent Assoc 128(3): 297-307, 1997.
2. Park JH, Whang JW, Shin SW: The study of flexural strength of various zirconia ceramics. J Kor Acad Prosthodont 42(2): 142-153, 2004.
3. Albakry M, Gluazzato M, Swain MV: Fracture toughness and hardness evaluation of three pressable all-ceramic dental materials. J Dent 3(3)1: 181-188, 2003.
4. Ritter JE: Engineering design and fatigue failure of brittle materials, In: Bradt RC, Hasselman DPH, Lange FF(eds), Fracture mechanics of ceramics. Vol 4, Crack growth and Microstructure. Plenum, New York, pp. 667-686, 1978.
5. Marcelo M et al.: Influence of pH on slow crack growth of dental porcelains. Dent Mater, 24(6): 814-823, 2008.
6. White SN: Chanical fatigue of a feldspathic dental porcelain. Dent Mater, 9(4): 260-264, 1993.
7. AndrR et al.: Fatigue of zirconia under cyclic loading in water and its implications for the design of dental bridges. Dent Mater, 23(1): 106-114, 2007.
8. Petra C et al.: Shear bond strengths between different zirconia cores and veneering ceramics and their susceptibility to thermocycling. Dent Mater, 24(11): 1556-1567, 2008.
9. 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 crowns. Dent Mater 21(3): 242-251, 2006.
10. Sundh A, Sjogren G: A comparison of fracture strength of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia ceramic crowns with varying core thickness, shapes and veneer ceramics. J Oral Rehabil 31(7): 682-682, 2004.
11. Sherrill CA, O'Brien WJ: Transverse strength of aluminous and feldspathic porcelain. J Dent Res 53(3): 683-690, 1974.
12. Ban S, Anusavice KJ: Inflence of test method on failure stress of brittle dental materials. J Dent Res 69(12): 1791-1799, 1990.
13. Ban S, Hasegawa J, Anusavice KJ: Effect of loading conditions on bi-axial flexure strength of dental cements. Dent Mater 8(2): 100-104, 1992.
14. Russell AG et al.: Flexural strength of feldspathic porcelain treated with ion exchange, overglaze, and polishing. J Prosthet Dent 71(5): 468-472, 1994.
15. Fairhurst CW et al.: The effect of glaze on porcelain strength. Dent Mater 8(3): 203-207, 1992.
16. Fairhurst CW et al.: A study of flaw size in porcelain(abstract). J Dent Res 73: 370, 1994.
17. Smyth KK, Magida MB: Dyanmic fatigue of a machinable glass-ceramic. J Amer Ceram Soc 66(7): 500-505, 1983.
18. Fairhurst CW, Lockwood RD, Twiggs Sw: Dynamic fatigue of feldspathic porcelain. Dent Mater 9(4): 269-73, 1993.
19. Myers ML, et al.: Fatigue failure parameters of IPS-Empress porcelain. Int J Prosth 7(6): 549-553, 1994.
20. Wachtman JB, Capps W, Mandel J: Bi-axial flexure tests of ceramic substrates. J Mater 7: 188-194, 1972.
21. McCabe JF, Walls AWG: The treatment of results for tensile bond strength testing. J Dent Res 14(4): 165-168, 1986.

(Received August 24, 2010; Revised October 8, 2010;  
Accepted October 15, 2010)

