

Empress 2 도재의 두께에 따른 파절강도에 관한 연구

서울대학교 치과대학 치과보철학교실

고정우 · 양재호 · 이선형

I. 서 론

치과 보철학에서 심미에 대한 환자들의 요구가 높아짐에 따라 보철물 제작시 심미적인 고려가 중요시되고 있다. 이것은 치과용 재료의 필요조건인 강도, 변연적합도, 심미성에서, 심미성의 비중이 더욱 높아지고 있음을 의미한다. 많은 치과용 재료 중에서, 도재는 치아와 가장 유사한 대체재료로 각광을 받아왔지만, 약한 강도로 인하여 많은 문제를 야기하여 왔다.

전부도재관의 역사는 1886년 Land¹⁾에 의해 백금 박을 이용한 도재인레이와 도재관 제작법이 소개된 것이 처음으로, 당시에는 파절과 변연적합성의 문제로 사용되지 못하다가 1965년 McLean이 알루미늄강화형 장식계도재를 소개²⁾하면서 사용되었다.

장식계 도재는 가장 흔하게 사용되는 치과용 도재로 굴곡강도가 60~70 MPa 정도여서 금속하부구조물에 의한 강화가 필요하다³⁾. 그러나 도재전장관의 경우 금속코어와 불투명도재가 빛의 투과를 차단하여 자연치와 유사한 투명도를 얻는데는 어려움이 있다⁴⁾. 전부도재관은 이런 금속구조물을 제거하여 심미성의 극대화를 도모하였지만, 도재전장관에 비해 강도가 낮아서 수명을 보장받지는 못했다. 상대적으로 낮은 강도 때문에 사용이 제한되어, 단지 전치부의 보철물이나 교합력이 낮은 환자에서만 적용이 가능했다⁵⁾. 또한 수복물의 파절이 빈번하여 많은 문제를 내포하고 있었다.

강도를 더욱 강화시키기 위해서 다른 결정을 사용해보기도 하고, 결정의 양도 좀더 증가시켜 보기도

했다. 그러나, 결정의 양이 증가되면 구조체의 색조가 탁해지게 되는데 이것이 해결해야 하는 가장 큰 문제이다.

Empress 도재는 백류석강화형 (leucite-reinforced) 도재의 한 종류로, 백류석결정은 유리기질을 강화하고, 미세 균열이 전파되는 것을 막는 역할을 수행한다. 도재 ingot의 색조를 각 환자의 치아색에 맞추어 선택할 수 있기 때문에 색조의 재현성이 우수하고, 제작과정 중 백류석결정과 glass의 열팽창계수가 다르므로, 제작 과정중 도재의 강도가 증가되는 특성을 보인다⁶⁾.

최초의 lithium disilicate 유리도재는 1950년대초 Stooky에 의해서 개발된 것으로, 당시에 가장 주목을 받은 부분은 핵화기전(nucleation mechanism)과 결정화되는 역학부분이었다. 그러나 화학적인 불안정, 부적절한 투명도, 조절되지 않는 미세 균열의 형성 등의 단점⁷⁾을 가지고 있었다. 뿐만 아니라, 제작이 쉽지 않고 매우 많은 시간이 소요되었다⁷⁾. 이런 단점은 1990년대에 이르러서 Beall과 Echeverria⁷⁾에 의하여 보완되었다. 그들은 재료의 투명도를 좋게 하면서, 심미성과 결정화의 정도를 조합하여 우수한 강도를 부여하고자 하였다. Lithium disilicate를 이용하여 체적의 60%가 넘게 결정입자를 첨가함으로써 골격구조/framework를 강화하고 증가된 투과성을 얻을 수 있었다. 이는 lithium disilicate의 골절률이 유리기질(glassy matrix)과 유사하므로, 빛이 재료를 통과하는 동안에 분산이나 회절이 적게 일어나기 때문이다. 이 결정구조인 lithium disilicate는 0.5~4.0 μ m의 길이로 서로 얽혀있는 구조(interlocking

structure)로 되어 있어 강한 강도를 보이게 된다.

이런 결정구조를 가지는 Empress 2는 용융주조되는 glass-ceramic ingot와 소결된 glass ceramic으로 구성되는 전혀 새로운 도재이다⁸⁾. 골격은 강도를 부여하고, veneering재료는 광학적인 특성인 형광성이나 opalescence등을 부여하게 된다. Empress 2는 원래의 Empress에 비해서 다음과 같은 차이를 보이고 있다. 결정의 함량이 30~40%에서 60%이상으로 높아졌기때문에, 선팽창계수가 $15.0 \pm 0.5 \times 10^{-6}$ 에서 $10.6 \pm 0.5 \times 10^{-6}$ 으로 바뀌고, 예전에 사용하던 veneering 재료를 더 이상 사용할 수 없다. 새로운 veneering재료는 일반적인 치아에서 나타나는 불화석결정과 같은 구조를 가지고 있음으로 해서 유리도재(glass ceramic)와의 생체친화성을 증가시킬 뿐 아니라 재료의 투과도 조절도 쉽게 한다. 따라서, Empress 2는 도재전장관에 비해서 기계적인 특성뿐만 아니라 심미적으로도, 많은 임상적인 장점을 보이고 있다⁹⁾. 또한 강도의 강화로 인하여 단일치 수복뿐 아니라, 다수치 수복에도 적용할 수 있게 되었지만, 다른 도재와의 비교연구는 많지 않다.

본 연구에서는 Empress 2 도재의 두께에 따른 파절강도를 장식계 도재인 Vita VMK 및 예전의 Empress와 비교하고자 하였다.

II. 연구재료 및 방법

1. 연구재료

실험군으로 Empress 2 Staining 도재(I군)와 Empress 2 Layering 도재(II군)를 사용하였고, 대조군으로는 Vita VMK를 사용하였다. 각 군마다 0.8mm, 1.0mm, 1.4mm, 1.8mm, 2.2mm의 두께로 5개씩, 총 75개의 시편을 제작하였다.

2. 연구방법

1) 시편 제작

① Vita VMK 시편

아크릴판에 11mm지름의 구멍을 뚫은 후, 같은 크기의 아크릴판에 놓고 Vita VMK porcelain (EN3.5, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Germany)을 이용하여 응축하였다. 25개의 도재시편

은 ultrasonic condenser(Shofu Inc., Japan)상에서 3분간 응축시킨 후, 제조자의 지시에 따라서 도재소성로(Centrion, Ney Co., U.S.A.)에서 600℃에서 6분간 건조시키고, 진공상태에서 55℃/min의 속도로 930℃까지 올려 1분간 유지하여 소성하였다. 소성 후에 모든 시편은 필요한 두께를 가지도록 120, 220, 400, 600, 800 grit의 SiC 연마지로 단계적으로 연마하여 0.03mm이내의 오차 범위 내에서 정확한 두께와 평평한 면을 가지도록 하였다. 시편은 50℃의 증류수로 10분간 초음파세척 한 후, 세제로 닦고, 다시 증류수로 10분간 초음파세척을 실시하였다. 연마과정에서 발생한 응력을 없애기 위해서 600℃의 도재 소성로에 30분간 방치하였다. 그 후에 한쪽 면을 glazing하였다. Glazing은 Vitachrome fluid를 얇게 도포한 후 600℃에서 4분간 건조시키고, 100℃/min의 속도로 900℃까지 온도를 올려 진공조건없이 1분간 유지하여 overglazing을 실시하였다.

② Empress 2 Staining 시편

각 두께별로 11mm의 구멍을 가진 아크릴판에서 inlay wax(Schüler Dental Co., Germany)를 사용하여 디스크형태의 납형을 제작하였다. 제작된 납형을 IPS-Empress ring base위에 부착하였다. 매물체의 혼합방법은 IPS Empress 매물체 액과 증류수, 그리고 매물체 분말의 비율이 31ml : 13ml : 200g이 되도록 정확한 양을 계측하여 진공혼합법으로 60초간 혼합하고 매몰링 하단부터 매물체를 채웠다. 매물체가 완전히 경화된 후 매몰링 기저부와 매몰링을 제거하고 기저부를 다듬었다. 매물체와 ceramic ingot 그리고 AlOx plunger를 소환로에 넣고 실온에서부터 5℃/min의 속도로 온도를 높여 250℃에서 30분간 계류시키고, 다시 온도를 높여 850℃에서 60분간 계류시켰다. Press furnace(IPS Empress EP500, Ivoclar, Liechtenstein, Germany)에서 staining technique을 위한 프로그램을 선택하고 700℃까지 예열을 시행한 후에 IPS Empress ceramic ingot와 AlOx plunger를 매물체에 넣고 press furnace중앙에 위치시킨 후 가열 및 가압과정을 시행하였다. 가압과정이 끝난 매물체를 소환로에서 꺼내 실온까지 식힌 후, 80μm의 glass beads (Shofu Co., Japan)로 4 bar의 압력으로 매물체를 제거하다가, 시편이 보이면 2 bar의 압력으로 마무리하였다. 주입선을 제거한

후 대조군과 마찬가지로 연마, 세척하였다. 세척 후에 2회의 staining과 1회의 glazing을 제조자의 지시대로 시행하였다.

③ Empress 2 Layering 시편

제작방법은 staining방법과 대부분 동일하였다. Empress 2 Staining과 마찬가지로 납형을 제작하여 매물, 소환, 압축성형, 매물재 제거의 과정을 거쳐 도재 시편을 제작하였다. 다른 점은 preheating시에 staining technique과는 달리 ingot는 가열하지 않았고, 용융주조시의 온도도 920℃로 더 낮았다.

세척 시에도 staining technique과는 다르게 Invex liquid(2% hydrofluoric acid)에서 10분간 처리하였다. 연마, 세척 후에 opaque powder와 glazing liquid II를 사용하여 wash 소성, glazing시행하였다.

2) Biaxial flexure testing

디스크 형태의 굴곡시험의 한 종류인 Piston on three-ball test(ASTM Standard F394-78,1991)를 시행하였다. 시편의 두께는 마이크로미터(Kori Seiki Manufacturing Co. Ltd., Tokyo, Japan)로 시편의 중심부에서 3곳을 측정하여 0.03mm이내의 오차범위에 있는 것만 시험하였다. 시편의 지름은 세 곳에서 측정하여 기록하였다. 디스크 시편은 7.37mm의 지름을 가지는 원에 120°씩 위치한 세 개의 금속구(3.18mm 지름) 위에 놓여졌다. 힘을 가할 때 균일한 힘의 분산을 위하여 시편과 load cylinder 사이에 0.05mm의 얇은 플라스틱 판을 위치시켰다.

Load cylinder의 끝부분은 지름이 1.58mm로 평평한 형태였고, 10 kN의 load cell로 힘을 가하였으며, crosshead speed는 0.1mm/min이었다. 파절시험에는 만능시험기(Universal testing machine, Instron 6022, U.K.)가 이용되었으며, 파절될 때의 하중값을 기록하였다.

기록된 하중값은 Shetty 등¹⁰의 공식에 의해서 굴곡강도로 환산되었다.

$$\sigma_m = -0.2387P(X-Y)/d^2$$

σ_m = 굴곡강도(flexural strength (MPa))

$$X = (1+\nu)\ln(B/C)^2 + \{(1-\nu)/2\}(B/C)^2$$

$$Y = (1+\nu)[1+\ln(A/C)^2] + (1-\nu)(A/C)^2$$

P = 파절시 적용된 하중 (N)

A = support circle의 반지름 (mm)

B = 피스톤 말단강구가 시편에 접촉하는 면의 반지름(mm)

C = 원형시편의 반경 (mm)

d = 시편의 두께 (mm)

ν = Poisson ratio(0.25) (Anusavice and Hojjatie¹¹, 1992)

3. Scanning electron microscopy (SEM)

파절이 일어난 표면의 양상을 육안으로 관찰한 후, 주사전자현미경(Jeol JSM-840A Jeol Ltd., Akishima Tokyo, Japan)으로 관찰하였다. 각 실험

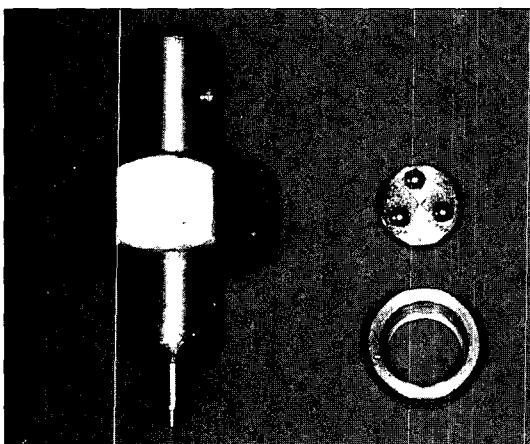


Fig. 1. Piston on three-ball test(ASTM F394-78,1991).

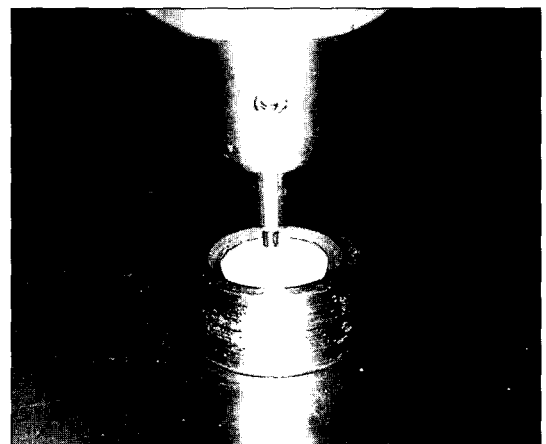


Fig. 2. Loading test on the Instron machine.

군의 대표적 시편을 gold coating하고 SEM사진(×40,400,1000)을 찍어 표면을 비교하였다.

4. 통계처리

각 군의 굴곡강도를 SAS 통계 프로그램(SAS, SAS Institute INC. Cary, NC, U.S.A.)에서 One Way ANOVA분석법과 Scheffé's test를 이용하여 분석하였다.

또한, 세 재료의 파괴강도(failure stress)를 분석하기 위하여 Weibull analysis를 시행하였다. Weibull modulus와 1, 5%의 파괴확률에서의 강도수준(strength level)은 굴곡강도를 Weibull regression analysis를 하여 계산되어졌다. Weibull 분포의 정의는 다음 식으로 정의가 가능하다.

$$P_f = 1 - \exp[-(\sigma/\sigma_{no})^m]$$

P_f = 파괴확률(probability of failure)

σ = 주어진 파괴확률에서의 강도

σ_{no} = 분포계수(characteristic strength)

m = Weibull modulus

따라서 $\ln[-\ln(1-(1-P_f))] = Y$ 축으로 하고 $\ln(\text{굴곡강도}) = X$ 축으로 하는 그래프를 그리면, 그 기울기

에서 m (Weibull modulus)값을 얻을 수 있다.

III. 연구성적

1. 파절강도

Instron을 이용하여 도재 디스크에 압력을 가하여 도재가 파절되는 순간의 하중값을 기록하고, 각 군별로 평균값을 구한 결과, 두께에 따른 파절하중값은 Table I과 같았다. 각 군별로 두께가 증가함에 따라서 대조군에서는 42.78 N에서 413.76 N으로, Empress 2 Staining에서는 65.54 N에서 600.60 N으로, 그리고 Empress 2 Layering에서는 190.00 N에서 1115.00 N으로 점차로 높은 하중에서 파절을 나타냈다. 파절 하중을 보면, 대조군보다는 실험군에서 1.5배에서 3배정도 높은 값을 보였다.

측정된 파절 하중을 가지고 굴곡강도를 계산한 값은 Table I과 같다. 대조군에서는 평균 98.94 MPa의 값을 보인데 반해서, Empress 2 Staining은 157.32 MPa, Empress 2 Layering은 309.86 MPa로 Empress 2 가 대조군에 비해서 1.5배에서 3배정도 높은 굴곡강도를 보여주었다.

동일한 두께에서 대조군과 실험군 사이에서는 통

Table I. The fracture load and biaxial flexural strength

Ceramic(thickness)	Fracture load(N)	Mean flexural strength(MPa)	Standard deviation
Vita VMK (0.8)	42.78	84.67	5.80
Vita VMK (1.0)	98.26	88.06	5.60
Vita VMK (1.4)	165.20	107.95	17.87
Vita VMK (1.8)	258.26	101.99	25.01
Vita VMK (2.2)	413.76	112.05	22.99
Empress 2 St.(0.8)	65.540	140.72	9.05
Empress 2 St.(1.0)	155.18	164.55	29.81
Empress 2 St.(1.4)	233.46	150.13	23.65
Empress 2 St.(1.8)	434.50	171.18	19.81
Empress 2 St.(2.2)	600.60	160.12	12.79
Empress 2 La.(0.8)	190.00	323.13	17.96
Empress 2 La.(1.0)	283.54	339.16	33.81
Empress 2 La.(1.4)	437.20	298.34	20.67
Empress 2 La.(1.8)	732.00	290.82	20.87
Empress 2 La.(2.2)	1115.00	307.72	31.46

Table II. ANOVA(Analysis of Variance) ($\alpha=0.05$)

Source	DF	Mean Square	F	Pr>F
Vita VMK	4	730.96	2.38	0.0865
Em 2 St.	4	723.41	1.73	0.1820
Em 2 La.	4	1893.28	2.85	0.0508
0.8mm	2	77735.89	532.57	0.0001
1.0mm	2	82828.11	120.43	0.0001
1.4mm	2	49992.54	114.88	0.0001
1.8mm	2	45636.85	94.17	0.0001
2.2mm	2	52000.95	92.73	0.0001

DF, Degree of freedom ; Pr, Probability

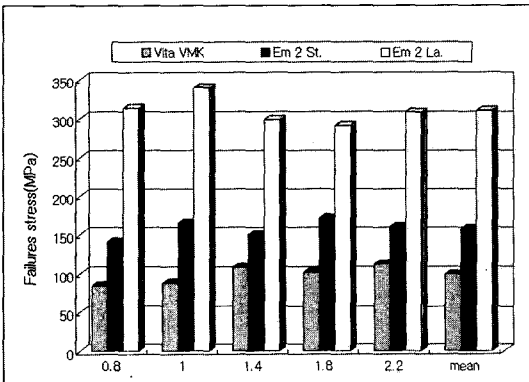


Fig. 3. Comparative value of flexural strength.

계적으로 유의한 차이($p<0.05$)가 나타났고, Empress 2 Layering이 Empress 2 Staining이나 Vita VMK 보다 통계적으로 유의하게($p<0.05$) 강한 굴곡강도를 나타냈고, Empress 2 Staining은 Vita VMK보다 통계적으로 유의하게 강했다($p<0.05$). 그러나, 동일한 실험군에서는 두께에 따라서는 굴곡강도가 유의한 차이를 보이지는 않았다($p>0.05$).

굴곡강도를 사용하여 Weibull 분석을 한 결과, 각 실험군에 대한 Weibull modulus를 구하였다. 결과는 Table IV와 같다. 계산되어진 m 값은 다음과 같다. Vita VMK는 5.67 ± 0.4988 , Empress 2 Staining은 7.89 ± 0.2908 , Empress 2 Layering은 11.47 ± 0.2967 이다. m 의 값은 Vita에서 Empress 2 Staining, Empress 2 Layering으로 갈수록 더욱 커졌다.

Table III. Scheffe's 95% Confidence test

	Vita VMK	Empress2	Empress2
		Staining	Layering
0.8mm	A	B	C
1.0mm	A	B	C
1.4mm	A	B	C
1.8mm	A	B	C
2.2mm	A	B	C

2. 파절양상의 관찰

도재디스크가 힘을 받아서 균열이 방사상으로 진행되었다. 그래서 하중점 아래로부터 가장자리로 파절이 일어났다. 부하가 가해진 점 하방은 둥근 원형의 함몰부가 형성되기도 하였다.

대조군인 Vita VMK에서는, 대체로 두조각으로 파절이 일어났고, 파절조각이 intact한 양상을 보였다. 그러나 Empress 2 Staining군에서는 3~6조각으로 파절되었고, 힘이 가해지지 않은 부분에서도 파절이 되었다. 대부분은 크게 세조각으로 파절되었지만, 두께가 두꺼워짐에 따라서 파절선이 증가하였다. Empress 2 Layering군에서는 대부분 세조각으로 파절되어, 파절선(crack line)이 많지 않았고, 힘을 받지 않는 부분에서 파절되는 경우는 없었다.

Table IV. Results of the Weibull regression analysis

Material	N	m value	SD	$\sigma_{0.01}$ (MPa)	$\sigma_{0.05}$ (MPa)	R ²
Vita VMK	25	5.67	0.4988	47.16	62.87	0.8078
Empress 2 Staining	25	7.89	0.2908	93.21	114.60	0.9347
Empress 2 Layering	25	11.46	0.2967	217.80	251.06	0.9320

m value = Weibull modulus; $\sigma_{0.01}$ = stress levels at 1% probability of failure; $\sigma_{0.05}$ = stress levels at 5% probability of failure; R² = regression coefficient

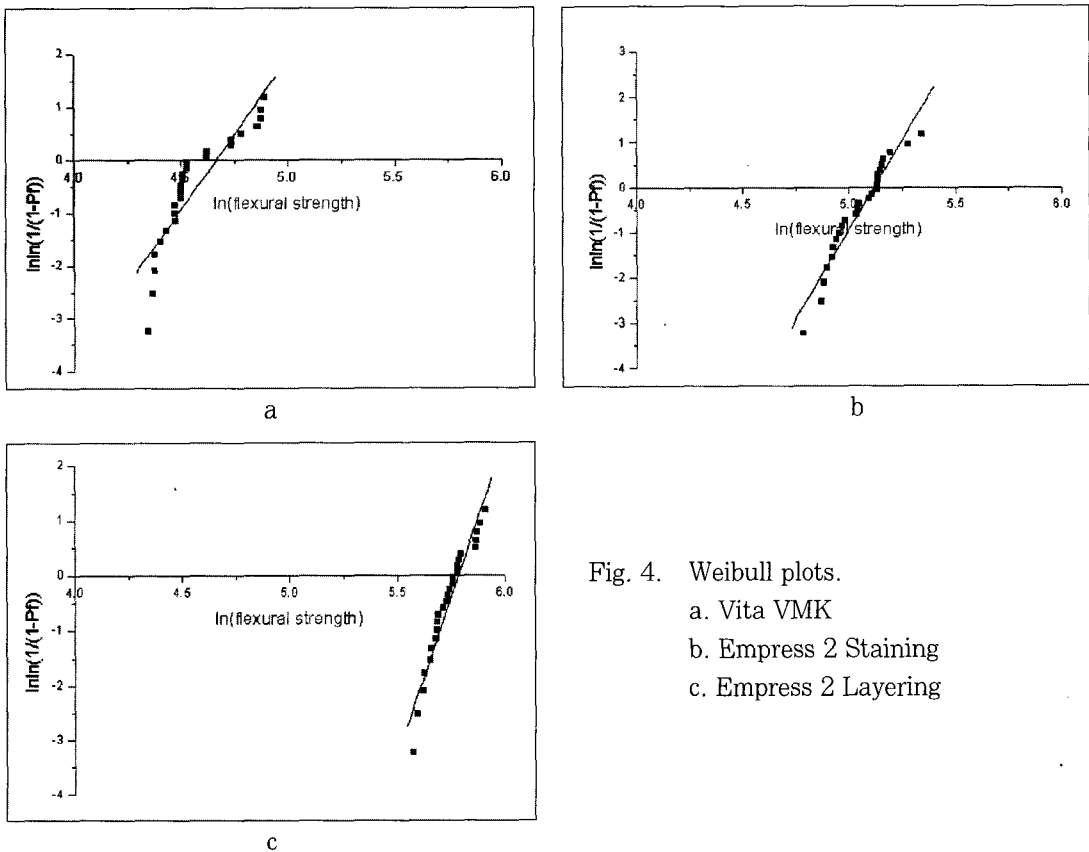


Fig. 4. Weibull plots.
 a. Vita VMK
 b. Empress 2 Staining
 c. Empress 2 Layering

주사전자현미경으로 관찰한 결과, 대조군에서는 파절면이 날카롭고, 기포나 많은 굴곡을 보였다. Empress 2 실험군은 파절선이 거칠고, 매우 불규칙한 모습을 보이고 있었다. 강확대($\times 1000$) 관찰에서, 대조군은 기포나 틈(flaws)이 많이 보이고, 파절선이 길지 않은 모습이였다. Empress 2 Layering군

에서는 결정입자들이 매우 치밀하게 얽혀 있고 파절선이 매우 길게 주행하고 있는 모습을 보여주고 있었다.

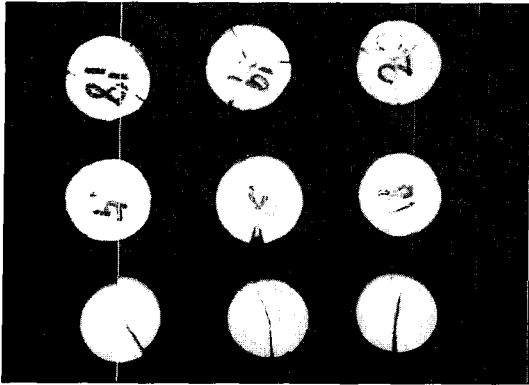


Fig. 5. Appearance of fractured specimens.

IV. 총괄 및 고안

1. 파절강도

가공의치의 임상적인 성공을 조절하는 중요한 요소 중의 하나는 기계적인 강도이다. 일반적으로 보철물에는 압축력, 인장력, 그리고 전단력이 복잡한 양상으로 분포하게 된다. 이런 힘을 표준화된 시편에서 검사하는 것이 필요하며, 성공적인 사용여부를 결정할 수 있게 한다. 깨지기 쉬운 도재같은 재료에서는, 원하지 않는 gripping이나 선단의 파절(edge fracture)때문에 여러 유형의 파절이 일어나게 된다. 많은 실험방법들에서, 도재의 파절강도값은 비교적 넓은 분포를 보이고 있고, 일관성 있는 실험값을 보이는 방법은 없다²⁾.

굴곡강도검사의 장점은 시편의 한쪽 면에 순수하게 인장력을 가할 수 있다는 데 있으며, 3점굴곡강도 시험이나 4점굴곡강도시험을 통하여 깨지기 쉬운 재료인 도재⁵⁾나 도재전장관의 강도를 많이 시험해왔다^{13,14)}. 현재는 중심부에 최대 인장력을 부여해서 잘못된 선단 결합효과를 피할 수 있는 biaxial flexural test가 가장 신뢰할 수 있는 굴곡강도 검사법으로 인정받고 있다¹⁵⁻¹⁸⁾. 검사되는 시편에 약간의 변형을 허용함으로써 해서 선단의 조건에 의해 영향받지 않는 결과를 얻을 수 있기 때문이다. Biaxial flexural test의 중요한 가설은 시편이 동질성의 구조를 가진다는데 있다. 도재가 완전히 동질의 것은 아니지만, 시편의 기하학적인 형태(geometry)는 이 시험방법에서 무시할만하다고 여러 연구¹⁹⁾에서 보고하고 있다.

전부도재관이 치아수복물로서 기능을 발휘하기 위해서는 교합력에 견딜 수 있는 적절한 강도를 지녀야 한다. 근래에 개발된 대부분의 전부도재관 재료 및 제작방법은 교합력을 견딜 수 있는 충분한 강도를 지녔으며²⁰⁾, 심미적이고 제작 과정이 간단하도록 개발되어 임상에서 좋은 결과를 얻고 있다²¹⁾.

도재의 이론적인 강도는 silicone-oxygen 결합을 파괴하는데 필요한 힘으로 18 GPa²²⁾이나 실제 강도는 이보다 1/10~1/1,000 정도로 약하다²³⁾. 전부도재관의 굴곡강도에 대한 다른 연구들을 살펴보면, Ergle 등⁵⁾은 Empress의 굴곡강도를 평균 135.7 MPa로 측정하였으며, Cattell 등²⁴⁾은 Empress의 굴곡강도가 117.3 MPa로 Cerinate porcelain과 더불어 높게 나타났다. 그러나 Alpha porcelain등 다른 실험군과의 유의한 차이는 없었다고 한다. Giordano 등⁵⁰⁾은 4점 굴곡강도 실험에서 Vita VMK가 67 MPa, IPS-Empress는 65MPa, In-Ceram Alumina는 236 MPa이라고 한다. 보고된 바에 의하면, Seghi, Sorensen²⁶⁾은 3점굴곡강도 실험에서 Vita VMK는 70.78 MPa, Empress(staining하지 않은 것)는 92.74 MPa, staining과 glazing을 한 경우에는 121 MPa, In-Ceram은 446 MPa이라고 한다.

최근 Kappert²⁷⁾는 biaxial flexural strength를 조사하여 IPS Empress 2의 굴곡강도가 433 MPa, In-Ceram alumina는 430 MPa, Empress는 130 MPa, Vitadur N는 120 MPa이라고 보고하고 있다.

본 연구에서는, Empress 2의 강도가 다른 실험군에 비해서 월등히 높은 값을 보이고 있다. Empress 2 layering technique의 골격구조물로 사용되는 도재는 309.9 MPa의 굴곡강도를 보여 In-Ceram과 유사한 강도를 보여주었다. 또한 두께에 따른 파절강도의 실험에서 두께 1.8mm군에서 732 N의 값을 보여서 단일치 수복 뿐 아니라 다수치의 수복에도 가능함을 보여주고 있다.

임상연구에 의하면 대구치의 평균 저작력은 565 N이고 소구치의 경우는 288 N이다. Layering technique시에 제조자가 권장하는 교합면 삭제량은 2.2mm로 veneering에 필요한 0.5mm를 제하더라도 1.7mm로, 본 실험에서 732 N의 파절강도를 보여 저작력에 저항하기에 충분함을 보여주고 있다. 이는 staining technique의 434 N에 비교할 때 높은 강도이며, 만일 소구치에 보철을 하는 경우에, layering

technique을 사용하면, 삭제량을 감소시켜 치질보존이 가능함을 암시한다.

Hopkins²⁸⁾는 치아에 부착시키지 않은 여러 가지 두께의 도재 시편의 파절강도를 비교한 결과 도재의 두께가 증가할수록 파절강도가 증가된다고 한다. Tsai 등²⁹⁾은 glass ceramic의 두께에 따른 파절기전에 대한 연구에서 1.6mm 이상에서는 Dicor의 파절강도는 두께의 증가에 비해서 큰 증가를 보이지 않으며, 두께에 따른 굴곡강도의 증가는 유의한 차이를 보이지 않는다고 한다. Sorensen, Mito, Chamberlain³⁰⁾은 Empress 2 framework material의 두께를 감소시키고, 물에 저장하면서 강도를 연구한 결과 1.0mm에서 0.8mm로 줄인 경우에 유의한 차이를 보이지 않으나, 0.5mm로 감소시킨 경우에 30% 정도의 강도감소를 보이고 있다.

본 연구에서도 두께에 따른 굴곡강도비교에서 두께의 증가가 파절강도를 증가시키기는 했지만, 굴곡강도의 증가에 유의한 차이를 보이지는 않는다($p > 0.05$). 이것으로 두께보다는 실험재료가 굴곡강도에 더 많은 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

도재시편은 강도시험시에 취성파괴를 하므로, 하나의 시편을 잘라서 만드는 시편들의 경우에도 그 강도가 일정하게 나타나지 않고, 통계적인 분포를 나타내게 된다. 취성파괴 재료의 강도는 그 재료에 있는 결함의 크기에 의해서 결정되기 때문이다. 더 정확히 말하면, 이 흠들의 크기가 일정하지 않고 어떤 분포를 이루고 있기 때문이다³¹⁾. 많은 시편들에 대해서 강도시험을 한 경우에 나타나는 강도의 분포는 극한치 통계학으로 다룰 수 있으며, 그 중의 하나가 Weibull 이론이다. 이 이론은 재료의 파괴에 대한 어떤 물리적인 근거를 바탕으로 한 것이 아니고, 오로지 통계학만을 바탕으로 한 것이기 때문에 실제보다 너무 단순화되었다는 비판을 받기도 한다. Weibull 계수 (m)는 도재의 신뢰도를 나타낼 때 가장 흔히 사용되는 수치이다. 즉, m 값은 결함들의 심한 정도와 신뢰도의 높낮음을 나타내는 척도가 된다. m 값이 높은 경우에는 비교적 균일한 결함의 크기, 분포 및 모양을 가지고 있어서 강도의 분포대가 좁고 신뢰도가 상당히 높다는 뜻이다. Cattell 등³²⁾의 연구에서 Weibull modulus를 측정하였는데, Empress가 6.60, Cerinate가 10.20, Alpha porcelain은 6.93이었으며, Zeng 등⁴¹⁾의 연구에서 Piston-

on-three-ball로 측정한 결과 IPS Empress가 5, In-Ceram이 10, Procera가 6을 보였다. Pressable 도재에 대한 연구¹⁵⁾에서 Empress는 10.2, OPC는 13.8이라고 보고하고 있다. 기존의 도재들중에서, In-Ceram이 비교적 높은 신뢰도를 보여주고 있으며, 본 실험에서는 Table IV에서 보여주듯이 Empress 2를 layering technique으로 제작한 경우에서 가장 높은 값을 보여주어 staining technique에 비해서 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

Empress 2가 강한 강도를 보이는 이유는, 결정인 lithium disilicate들이 서로 얽혀있어 균열의 진행을 막을 뿐 아니라, 결정의 함량을 60% 이상으로 증가시켰기 때문이다. 또한 용융주조되고 소결되는 과정에서 결정들이 성장하여 유리기질과 동질의 결합이 이루어지게 되기 때문이다³³⁾. 따라서 파절인성 및 파절강도가 Empress의 2배 이상이 된다.

용융주조하는 도재는, 회사에서 제조되는 ingot가 흠이 없는 상태이고 제작과정에서 흠을 최소화하므로 대조군인 Vita VMK에 비해 높은 강도를 보이게 된다. 이것은 Empress가 Vita VMK보다 높은 강도를 보이는 것에 대한 설명이 된다.

도재의 강도는 재료의 강도 이외에도 표면처리나 반복되는 소성횟수, 표면 마무리, 수분노출 등에 의해 영향을 받는다³⁴⁻³⁶⁾. 본 연구에서는 이런 표면 조정의 효과를 실험군에 따라서 차이가 없도록 하기 위해 SiC 연마재를 사용하여 800grit까지 연마한 후, Empress 2 staining technique의 경우에는 2번의 staining과 1번의 glazing을 하여, 보철물을 제작하는 경우와 유사한 표면처리를 하도록 하였다. Empress 2 layering technique의 경우에는 wash firing 후에 glazing을 하였다. Layering technique의 경우에는 framework material에 바로 glazing이 되지 않으므로 wash firing의 과정을 포함시켰다.

도재전장관에서 사용되는 장식계도재는 백류석 결정과 연관된 내재적인 미세파절을 가지며, 여러 번 소성하는 경우에 도재의 강도가 약화된다^{35,36)}. 그러나 Empress는 staining과 glazing 과정을 통하여 보강제역할을 하는 백류석(leucite)양이 증가되어 충분한 강도를 지닌 치아수복물의 제작이 가능하다. Luthy 등³⁷⁾은 veneering, glazing에 따른 heat-pressed ceramic의 강도차이를 연구한 결과 159, 175 MPa로 두 방법에 따른 강도의 차이는 없다고 보고

하였으나, Dong 등³⁶⁾은 heat pressing이 강도를 74 MPa에서 126 MPa로 증가시킨다고 하였으며, 최종 강도는 160~180 MPa로 다른 전부도재관 system에 견줄 만 하다고 하였다. 이런 강도의 증가는 열처리 에 의해서 유리기질내에 있는 백류석결정들이 좀더 균일하게 분산이 이루어지기 때문이라고 한다. 또한 Markert와 Russell⁶⁾은 열처리 후 굴곡강도의 변화에도 불구하고 백류석의 양의 증가는 없다고 하였고 Russell 등³⁴⁾은 그의 연구에서 도재의 표면을 미세하게 조정하고 활택을 잘하는 경우에 강도가 증가한다고 하였다.

도재는 구강내환경처럼, 수분에 노출되는 경우에 강도가 감소하게 된다. Hornberger와 Marquis³⁹⁾는 도재를 1주일 동안 수분에 침적시킨 연구에서, In-Ceram alumina(Vident)는 25% 강도의 감소를 보였지만, Empress 2 도재는 유의한 차이를 보이지 않았다고 보고하고 있다.

도재의 파절실험은 하중속도에 따라서 영향을 받기도 한다. 즉, crosshead speed를 증가시킬수록 파절강도 값도 증가하게 된다²⁾. 이외에도 파절강도 값을 변화시킬 수 있는 요인으로는 stressing rate, stress concentration, 시편의 크기, 파절 mode 등이 있다^{12,40,41)}.

2. 파절 양상

도재가 내재적인 결함이 있거나 제작과정 중에 결함이 생기면 쉽게 깨진다. 제작과정중의 결함에는 기계적인 마모나 기포, 불순물의 함입 등이 있다. 내재적인 재료에 의한 결함에는 입자 크기의 다양성, 잔존응력, 이차상에 나타나는 열팽창율의 차이에 의한 미세 파절과 약한 이차상의 결합등이 있다⁴²⁾. 대조군의 경우에 두 조각으로 파절이 일어났고, 이것은 파절이 힘을 받은 부분에서 시작이 되거나, 힘을 지지하는 부분에서 일어났음을 의미한다^{43,44)}. 도재디스크는 힘을 받은 부분의 표면에서만 파절이 일어나는 Hertzian fracture와 전체가 파절이 되는 bulk fracture의 모습을 보였다. 본 연구에서, Hertzian 파절이 기록된 파절 강도에 이르기 전에 일어났지만, 그 값을 기록하지는 못했다. Harvey 등⁴⁵⁾이 보고한 것처럼, bulk fracture가 cone-crack fracture 보다 더 낮은 강도에서 일어났다.

파절면에 대한 주사전자현미경 사진은 강도가 더 강한 것에 대한 이유를 제시해준다. Al-Shehri 등⁴⁶⁾의 연구와 같이 높은 굴곡강도를 보인 실험군은 더 치밀하고 균일한 결정화를 보여주었다. 그러나 낮은 강도를 보이는 실험군은 결정화정도가 낮고, 결정들이 불균일하게 분포하고 있다. 이런 사실로 내재결정들이 파절의 전달을 막아주는 역할을 수행했다고 추측할 수 있다.

임상적으로, 수복물에는 인장력이나 압축력, 전단력 등이 작용하게 된다. 이런 힘들이, 표면에 존재하는 결함에 모이게 되면, 수복물의 미세구조를 파괴할 수 있다. 그리고 그 파절은 주변으로 전파해나가게 된다. 따라서 도재들은 파절의 전파를 막기 위한 미세구조를 가지야 하며, 표면의 결함을 줄여야 한다⁴⁷⁾. 기계적으로 형성되는 결함은 표면에 존재하고, 연마나 표면처리에 의해 영향을 받게 된다⁴⁸⁾. 시편은 연마하는 방향에 의해서, 연마홈(grinding flaw)의 방향성이 결정되게 된다⁴⁹⁾. 이 때 시편에 만들어지는 압축층(layer of compressive stress)은 재료를 강화시킨다³⁴⁾.

도재의 강도는 흠의 수와 크기 및 모양의 다양성에 의해서 영향을 받게 되며, 가장 의미를 가지는 것은 표면에 존재하는 것으로 지름이 100 μm 정도의 것이다⁵⁰⁾. 이런 흠에 낮은 수준의 굴곡력이 작용하면 인장력이 생기게 되고⁵¹⁾, 균열이 천천히 성장한다. 기존균열의 성장은 그 힘을 상쇄시키고, 힘은 단지 잔류응력의 형태로 남게된다. 그러나, 시간이 경과하고 계속적으로 힘이 가해지면, 기존 균열이 계속 성장하게 되고 결국은 파절된다. 파절의 시작은 주된 흠의 위치와 크기에 좌우되며, 반드시 두께가 얇은 곳에서 먼저 시작되는 것은 아니다⁵²⁾. 표면 결함의 증가는 파절을 시작하게 하는 강도를 감소시킴으로써 더 낮은 강도에서 파절이 시작하도록 유도하는 역할을 한다⁵³⁾. Marquis와 Wilson⁵⁴⁾에 의하면, 임상적으로 사용되는 도재전장판이 전부도재관에 비해서 흠이 더 많다고 한다. 도재 파우더를 축성하는 과정에서 생기는 흠 때문이라고 설명하고 있다.

디스크형태의 시편을 이용한 본 실험결과, Empress 2 도재는 충분한 강도 및 신뢰도를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나, 구강내에서의 만성적 스트레스와 스트레인, 급격한 온도변화와 같은 환경이 고려되지 못했다. 따라서 적절히 고안

된 실험적인 비교연구와 임상연구가 계속 이루어져야 할 것으로 생각된다.

V. 결 론

본 실험에서는 Empress 2 도재의 두께에 따른 파절강도를 비교하기 위하여, 대조군으로 Vita VMK, 실험군 I군은 Empress 2 staining technique으로 제작된 시편, 실험군 II군은 Empress 2 layering technique으로 제작된 시편을 사용하였다. 두께는 0.8, 1.0, 1.4, 1.8, 2.2mm로 하여 각각의 실험군에 따라서 5개씩 총 75개를 제작하였다. 각각의 시편에 대해 3회씩 두께를 측정 한 후에, 도재 disc 시편의 biaxial flexure strength 실험에 대한 파절강도를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 실험군중, II군이 가장 높은 하중에서 파절이 일어났고, 그 다음은 I군, 대조군의 순으로 파절하중 값을 나타내었다.
2. Empress 2 Staining인 I군의 파절강도는 0.8mm에서 65.54 N, 1.0mm에서 155.2 N, 1.4mm에서 233.5 N, 1.8mm에서 434.5 N, 2.2mm에서 600.1 N이었다.
3. Empress 2 Layering인 II군의 파절강도는 0.8mm에서 190.0 N, 1.0mm에서 283.5 N, 1.4mm에서 437.2 N, 1.8mm에서 732.0 N, 2.2mm에서 1115.0 N이었다.
4. 동일한 실험군내에서, 두께에 따른 굴곡강도는 통계적으로 유의성 있는 차이는 나타나지 않았다 ($p>0.05$).

REFERENCES

1. Land CH : A new system of restoring badly decayed teeth by means of an enamelled metallic coating. *Independent Practitioner*, 1886;7:407.
2. McLean JW, Hughes TH. The reinforcement of dental porcelain with ceramic oxides. *Br Dent J* 1965;119:251-167.
3. Campbell SD. A comparative strength study of metal-ceramic and all ceramic materials : modulus of rupture. *J Prosthet Dent* 1989;62:476-470.
4. Sproull RC. Color matching in dentistry. Part I. The three-dimensional nature of color. *J Prosthet Dent* 1973;29:416-426.
5. Myers ML, Ergle JW, Fairhurst CW, Ringle RD. Fatigue failure parameters of IPS-Empress porcelain. *Int J Prosthodont* 1994;7:549-553.
6. Machert JR Jr, Russell CM. Leucite crystallization during processing of a heat-pressed dental ceramic. *Int J Prosthodont*. 1996;9:261-265.
7. Schweiger M, Holand W, Frank M, Drescher H, Rheinberger V. IPS Empress 2: A new pressable high-strength glass-ceramic for esthetic all-ceramic restorations *Quintessence Dent Tech* 1999;143-151.
8. David SH, Lee Culp. Clinical characteristics of a new all-ceramic system. *Signature* 1999;4:11-17.
9. Gary Severence. Introducing a Lithium Disilicate Glass-Ceramic: IPS Empress 2. *Signature* 1999;4:1-3.
10. Shetty DK, Rosenfield AR, McGuire P, Bansal GK, Duckworth WH. Biaxial flexure tests for ceramics *Am Ceram Soc Bull* 1980;59:1193-1197.
11. Anusavice KJ, Hojjatie B. Tensile stresses in glass-ceramic crowns: effect of flaws and cement voids. *Int J Prosthodont* 1992;5:351-358.
12. McLean JW. The science and art of dental ceramics: volume 1 The nature of dental ceramics and their clinical use. *Quintessence Publishing Co.* 1979.
13. Bryant R.W., Mahler D.B. Modulus of elasticity in bending of composites and amalgams *JPD* 1986;56:243-248.
14. Coffey JP, Anusavice KJ, Dehoff PH, Lee RB. Influence of contraction mismatch and cooling rate on flexural failure of PFM systems *J Dent Res* 1988;67:61-65.

15. Cattell MJ, Knowles JC, Clarke RL, Lynch E. The biaxial flexural strength of two pressable ceramic systems. *J Dent* 1999;27:183-196.
16. Giordano R. Unpublished data, 1994. Boston University, Boston.
17. Marshall DB. All improved biaxial flexure test for ceramics. *Am Ceram Soc. Bull.* 1980; 59:551-553.
18. Shetty DK, Rosenfield AR, Duckworth WH, Held PR. A biaxial flexure test for evaluating ceramic strength. *J Am Ceram Soc.* 1983;66:36-42.
19. Lamon J. Statistical approaches to failure for ceramic reliability assessment *J Am Ceram Soc* 1988;71:106-112.
20. Jones DW. Development of dental ceramics. *Dent Clin North Am* 1985;29:621-644.
21. Probst L : Compressive strength of two modern all-ceramic crowns. *Int J Prosthodont.* 1992;5:409.
22. Eagan RJ, Swearingen JC. Effect of composition on the mechanical properties of aluminosilicate and borosilicate glasses. *J. Amer. Cera. Soc.* 1978;61:28.
23. Jones DW. The strength and strengthening mechanisms of dental ceramics. In: Mclean, J.W., ed. *Dental ceramics. Proceedings of the first international symposium on ceramics.* Chicago : Quintessence Publishing Co.1983:83-141.
24. Cattell MJ, Clarke RL, Lynch EJ. The transverse strength, reliability and microstructural features of four dental ceramics—Part I. *J Dent* 1997;25:399-407.
25. Isenberg BP, Garber DA. Directly milled ceramic inlays and onlays—CAD/CAM system. Garber DA, \Goldstein RE(eds). *Porcelain and Composite Inlays and Onlays : Esthetic Posterior restorations.* Chicago : Quintessence, 1994;3:199-202.
26. Seghi RR, Sorensen JA. Relative flexural strength of six new ceramic materials *Int J Prosthodont* 1995;8:239-246.
27. Kappert HF. Examination report to Ivoclar AG, Schaan, January 1998.
28. Hopkins K. An investigation into the role of porcelain thickness in determining the load-carrying capacity of porcelain laminates. *Br. Dent. J.* 1989;167:201-204.
29. Tsai YL, Petsche PE, Anusavice KJ, Yang MC. Influence of glass-ceramic thickness on Hertzian and Bulk fracture mechanisms. *Int J Prosthodont* 1998;18:27-32.
30. Sorensen JA, Mito WT, Chamberlain TM. Core ceramic flexural strength from water storage and reduced thickness IADR abstract Vancouver 1999.
31. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 1951; 18:293-297.
32. Cattell MJ, Clarke RL, Lynch EJR. The biaxial flexural strength and reliability of four dental ceramics— Part II *J. Dent.* 1997;25:409-414.
33. Sorensen JA, Cruz M, Mito WT. Research evaluations of a lithium disilicate restorative system: IPS Empress 2. *Signature* 1999;4:4-10.
34. Russell AG, Giordano II, Campbell S, Pober R. Flexural strength of feldspathic porcelain treated with ion exchange, overglaze, and polishing. *J Prosthet Dent* 1994;71:468-472.
35. Fairhurst CW, Lockwood PE, Ringle RD. The effect of glaze on porcelain strength. *Dent Mater* 1992;8:203-207.
36. Fairhurst CW, Morena R, Lockwood PE, Ringle RD. A study of flaw size in porcelain (abstract). *J Dent Res* 1994;73:370.
37. Luthy H, Dong JK, Wohlwend A, Schaerer P. Effect of veneering and glazing on the strength of heat-pressed ceramics. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1993;103:1257-60.
38. Dong JK, Luthy H, Wohlwend A, Schaerer P.

- Heat-pressed ceramics: technology and strength. *Int J Prosthodont* 1992;5:9-16.
39. Hornberger H, Marquis PM. The effect of environment on the mechanical properties of In-Ceram. In: *Proceedings of a Conference on Lifetime Prediction and Failure Analysis of Restorative Materials*. *Dent Mater* 1994;7:83.
 40. Creyke WEC, Sainsbury IEJ, Morrell R. Design with non-ductile materials. London: Applied Science 1982:68-101,115-133.
 41. Zeng K, Oden A, Rowcliffe D. Flexure test on dental ceramics. *Int J Prosthodont* 1996;9:434-439.
 42. Harvey CK, Kelly JR. Contact damage as a failure mode during in vitro testing *J Prosthodont* 1996;5:95-100.
 43. Ban S, Anusavice KJ. Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. *J Dent Res* 1990;69:1791-1799.
 44. Kelly JR. Perspectives on strength. *Dent Mater* 1995;11:103-110.
 45. Harvey CK, Kelly JR. Contact damage as a failure mode during in vitro testing. *J Prosthodont* 1996;5:95-100.
 46. Al-Shehri SA, Mohammed H, Wilson CA. Influence of lamination on the flexural strength of a dental castable ceramic. *J Prosthet Dent* 1996;76:23-8.
 47. Kelly JR. Perspectives on strength. *Dent Mater* 1995;11:103-110.
 48. Lange FF Structural ceramics: A question of fabrication reliability. *J Mater Eng Sys* 1984;6:107-113.
 49. Rice RW, Mecholsky JJ, Becker PF. Effect of grinding direction on flow character and strength of single crystal and polycrystalline ceramics. *J Mater Sci* 1981;16:853-862.
 50. Kelly JR, Giordano R, Pober R, Cima MJ Fracture surface analysis of dental ceramics. *Int J Prosthodont* 1990;3:430-40.
 51. Hoekstra KE Dicor research facts. In: Pamiejer CH, ed. *Proceedings of the International symposium on alternatives to the use of traditional porcelain*. Framingham, Mass. Restorative techniques. 1986:49-76.
 52. Thomson JY, Anusavice KJ, Naman A, Morris HF. Fracture surface characterization of clinically failed all-ceramic crowns. *J Dent Res* 1994;73:1824-1832.
 53. Fleming GJ, Shelton RM, Marquis PM. The influence of clinically induced variability on the bi-axial fracture strength of cemented aluminous core porcelain discs. *dental Materials* 1999;15:62-70.
 54. Masrquis PM, Wilson HJ. A tooth for a tooth-ceramics in modern dentistry. *Chem Industry* 1986:657-661.
 55. Hwang JW, Yang JH, Lee SH, Chung HY. A study on fracture strength of conventional and copy-milled In-Ceram crowns, *J Korean Acad Prosthodont* 1997;35:417-429.
 56. Paek SJ, Yang JH, A study on the fracture strength of all-ceramic crowns. *J Korean Acad Prosthodont* 1995; 33:611-625.
 57. Jin TH, Kim HJ, Physical properties of the reused IPS-Empress ceramic part II: study on the flexure strength, *J Korean Acad Prosthodont* 1998;36:524-529.

Reprint request to:

Jae-Ho Yang, D.D.S., M.S.D., Ph.D.

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Seoul National University
28, Yonkon-Dong, Chongro-Gu, Seoul, 110-749, Korea
jhoyang@snu.ac.kr

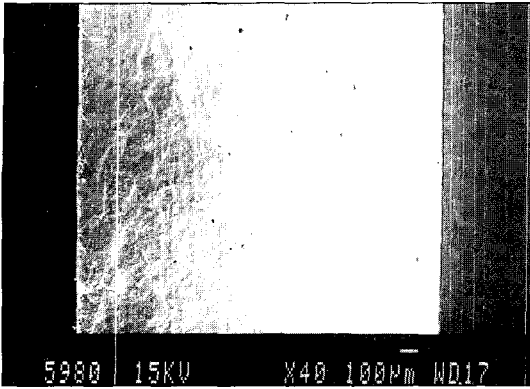


Fig. 6. SEM of fracture surface of Vita VMK specimen ($\times 40$).

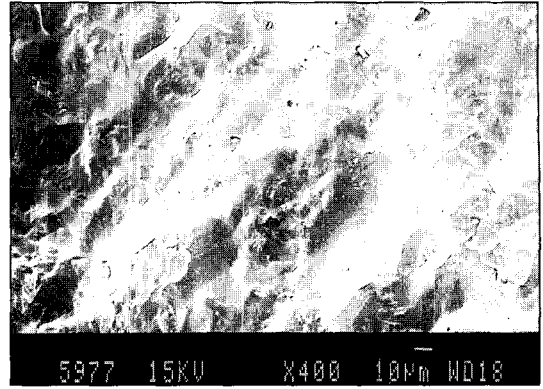


Fig. 7. SEM of fracture surface of Vita VMK specimen ($\times 400$).



Fig. 8. SEM of fracture surface of Vita VMK specimen ($\times 1000$).

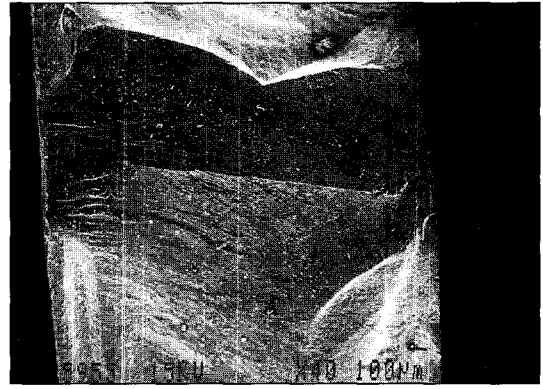


Fig. 9. SEM of fracture surface of Empress 2 Staining specimen ($\times 40$).

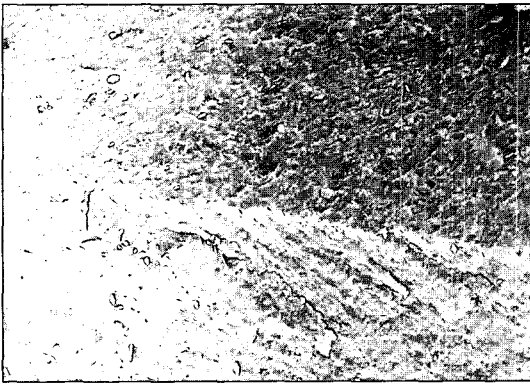


Fig. 10. SEM of fracture surface of Empress 2 Staining specimen ($\times 400$).

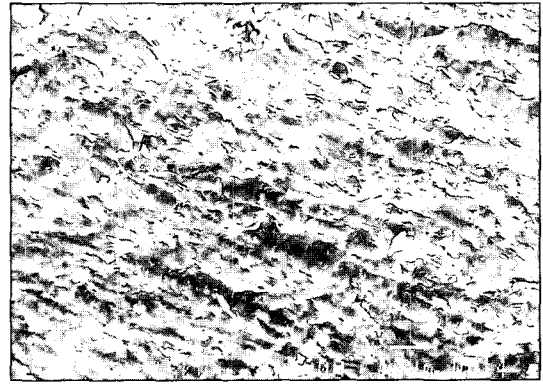


Fig. 11. SEM of fracture surface of Empress 2 Staining specimen ($\times 1000$).

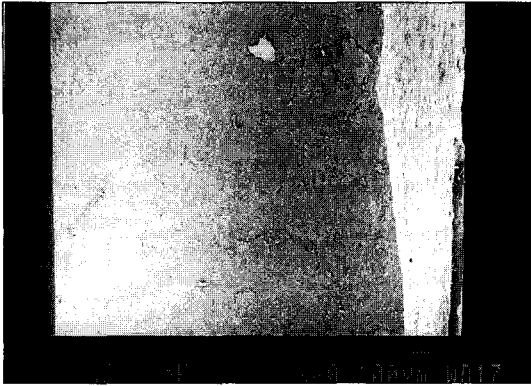


Fig. 12. SEM of fracture surface of Empress 2 Layering specimen ($\times 40$).

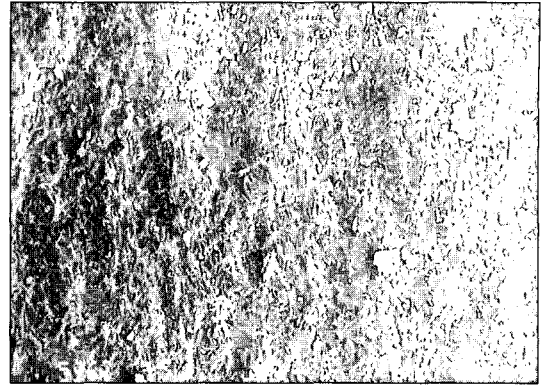


Fig. 13. SEM of fracture surface of Empress 2 Layering specimen ($\times 400$).

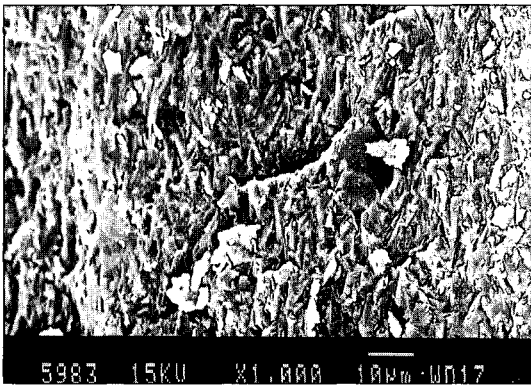


Fig. 14. SEM of fracture surface of Empress 2 Layering specimen ($\times 1000$).

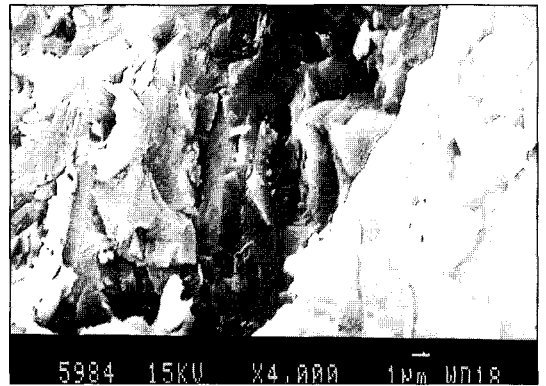


Fig. 15. SEM of fracture surface of Empress 2 Layering specimen ($\times 4000$).

ABSTRACT

INFLUENCE OF THICKNESS OF EMPRESS 2 CERAMIC ON FRACTURE STRENGTH

Jung-Woo Koh, D.D.S., Jae-Ho Yang, D.D.S., M.S.D., Ph.D., Sun-Hyung Lee, D.D.S., M.S.D., Ph.D.

Department of Prosthodontics, College of Dentistry, Seoul National University

All-ceramic restorations have had a more limited life expectancy than metal ceramic crowns because of their lower strength. The relatively lower strength has limited the use of all-ceramic crowns to the areas where occlusal loads are lower. Therefore many researches have been done to increase the strength of all-ceramic crowns.

IPS Empress 2 is a new type of lithium disilicate glass-ceramic with enhanced physical characteristics which has been in use clinically since 1998. Previous researches reported that the flexural strength of all-ceramic material was greater than 300 MPa, and all-ceramic crowns can be used in staining or layering technique.

The objective of this study was to investigate the influence of the thickness of IPS Empress 2 ceramic on fracture strength. Both staining technique and layering technique was investigated. Vita VMK was used as control.

For all three groups, five specimens each of 0.8mm, 1.0mm, 1.4mm, 1.8mm, and 2.2mm thickness (a total of 75 specimens) were prepared.

Control group: Vita VMK Porcelain specimens were prepared with dentine ceramic and liquid glazing was done.

Group I : IPS Empress 2 were prepared with staining technique and stained twice and glazed once.

Group II : IPS Empress 2 were prepared with layering technique and glazed after wash firing.

The thickness and diameter of the specimen were measured and controlled after specimen preparation. Biaxial Flexure Test (ASTM Standard F394-78) was adopted as this test method produces results least affected by the edge condition of the specimens. Fracture strength was measured with Instron Universal Testing Machine. Conclusions are as follow :

1. The fracture strength was increase in order of control group, test group I, test group II.
2. Fracture strength of the group I (Empress 2 Staining) was 65.54 N in 0.8mm, 155.2 N in 1.0mm, 233.5 N in 1.4mm, 434.5 N in 1.8mm, and 600.1 N in 2.2mm.
3. Fracture strength of the group II (Empress 2 Layering) was 190.0 N in 0.8mm, 283.5 N in 1.0mm, 437.2 N in 1.4mm, 732.0 N in 1.8mm, and 1115.0 N in 2.2mm.
4. No statistical difference was found in flexural strengths according to thickness in a specified group($p>0.05$).

Key Words : Empress 2, Biaxial flexure test, Fracture strength