

전부도재관용 도재의 미시적 균열전파 양상

김효성·최규형·정희웅·원대희*·이민호**·배태성

전북대학교 치과대학 치과재료학교실 및 구강생체과학연구소
전북대학교 금속공학과*, 광양대학교 제철금속공학과**
(1998년 6월 1일 접수, 1998년 9월 11일 채택)

Microstructural Aspects of Crack Propagation in All-Ceramic Materials

H.S. Kim, K.H. Choi, H.W. Chung, D.H. Won*, M.H. Lee**, T.S. Bae

Department of Dental Materials and Institute of Oral Bioscience, School of Dentistry, Chonbuk National University

*Department of Metallurgical Engineering, Chonbuk National University

**Department of Metallurgical Engineering, Kwang Yang University

(Received June 1, 1998, Accepted September 11, 1998)

요 약 : 본 연구에서는 전부도재관용 도재의 균열전파 양상과 구강환경이 파절강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 시행되었다. 도재의 굽힘강도는 In-Ceram, IPS-Empress 및 VMK68의 순으로 나타났으며, 수중에서 보다 기름중에서 더 높은 강도를 보였다. 비커스 압자 압입부와 압입부를 중심으로 한 파면의 관찰 결과, VMK68 도재의 경우에는 9.8N의 압입하중하에서, IPS-Empress의 경우에는 49.0N의 압입하중하에서 표면에 median crack이 형성되는 양상을 보였으며, 균열이 압자의 압입시에 형성된 벽개면을 따라서 빠르게 성장하여 파괴에 도달한 양상을 보였다. In-Ceram의 경우에는 49.0N의 압입하중하에서 Palmqvist crack이 형성되는 양상을 보였으며, 알루미늄 입자에 의한 균열의 굴곡과 crack bridging으로 인한 강화기전이 관찰되었다.

Abstract : This study was performed to evaluate the effect of surface flaw on the fracture of all-ceramic materials. A feldspathic porcelain of VMK68, a castable ceramic of IPS-Empress, and an alumina-glass composite of In-Ceram were used. Specimens were prepared as 12×3×1 mm in dimensions, and a Vickers-produced indentation crack was made at the center of the tensile surface. Test specimens were immersed in distilled water and in oil, which were broken under a crosshead speed of 0.05 mm/min by 3-point bend test at 37°C. The characteristic patterns of Vickers indentation and fracture surfaces were examined by an optical microscope and a scanning electron microscope. The fracture surfaces of the VMK68 and the IPS-Empress showed a median crack pattern at the fracture origin and indicated a tendency to cleavage hackle. The fracture surface of the alumina-glass composite, In-Ceram, showed a Palmqvist crack pattern at the fracture origin and indicated a tendency of toughening by the frictional interlocking between the microstructurally rough fracture surfaces.
Key words : all-ceramic material, alumina-glass composite Vickers-produced indentation crack, dynamic fatigue

서 론

세라믹 재료는 압축강도가 크고, 내마모성, 심미성 및 생체적 합성 등이 우수하므로 치관성형재료로서 우수한 많은 장점을 갖고

있지만, 취성이 커서 강도가 재료에 포함된 결함의 분포와 크기에 크게 영향을 받으므로 파절에 대한 저항을 증가시키기 위해 다양한 방법이 검토되고 있다.

파절에 대한 저항성의 증가를 위해, 장식 도재에서는 하부구조에 금속을 강화한 도재전장구조판이 도입되었으나, 빛의 반사, 투과 및 형광성 등이 자연치와는 달라서 자연스럽지 못한 단점을 보였으며[1,2], 이같은 관점에서 심미성이 뛰어난 전부도재

Table 1. Materials used in this study

표 1. 실험에 사용된 재료

Brand	Manufacturer
Vita VMK68	HR Gmbh & Co.
IPS-Empress	Ivoclar AG.
Vita In-Ceram	HR Gmbh & Co.

관용 도재에 관심이 집중되었다. 결정화 유리는 유리를 주성분으로 하는 장식 도재와는 달리 결정화 열처리에 의해 미세구조 내에 상당량의 결정상을 생성하고 있지만, 소결과 열처리 과정에서 수축이 크고, 강도와 인성의 증가에도 한계점을 나타냈으며, 이같은 문제점을 극복하기 위해 소성과정에서 열과 압력을 가하는 heat press technique이 도입되었다[3,4]. 최근 세라믹 재료의 소결과과정에서 일어나는 수축 및 강도와 파괴인성 등의 기계적 성질을 개선하기 위해 고강도와 고인성의 세라믹 재료를 용접보다 저온에서 소성하여 다공성의 소결체를 만든 다음 여기에 저점도의 유리를 용융-침투하여 세라믹-유리 복합체를 형성하는 방법이 도입되었다. 세라믹-유리 복합체에서는 종래의 세라믹 소결체의 단점으로 지적되어 온 소결과과정에서의 수축 및 강도와 인성 등의 기계적 성질이 크게 개선되었지만, 심미성이 떨어지므로 코어용 재료로서 사용되고 있다[5-8].

수분이 존재하는 환경하에서 세라믹 재료의 표면에 인장응력이 작용하면 표면 결합부의 균열선단에서는 화학적 반응성이 증가하므로 응력부식으로 인한 균열성장이 일어난다. 유리나 세라믹 재료의 응력부식(stress corrosion)에 관하여, Hillig와 Charles[9], Hasselman[10], Wiederhorn[11] 등은 인장응력의 작용시에 표면 결합부의 균열선단에서는 수증기와의 화학적 반응으로 인해 응력부식으로 인한 균열성장이 일어난다고 하였고, Sherill과 O'Brien[12], Southan과 Jørgensen[13] 등은 응력부식으로 인한 균열성장으로 시간경과에 따라 강도가 저하한다고 하였다. Anusavice와 Lee[14]는 구강내에서 외력의 작용이 없이도 표면에 인장응력이 잔류할 경우 응력부식으로 인한 지연 파괴(delayed fracture)가 일어날 수 있다고 하였고, Anusavice 등[15]은 금속과 도재간의 열수축의 차이로 인한 잔류응력과 저작에 의한 응력 등의 조합으로 균열선단에서 응력집중이 일어날 경우 피로에 의한 파괴가 일어날 수 있다고 하였다.

본 연구에서는 전부도재관용 도재의 균열전파 양상과 수분이 파절강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 시편의 표면에 비커스 압자를 압입하여 파괴를 지배하는 예리한 균열을 형성한 다음 균열전파 양상 및 시험환경이 파절강도에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

실험재료 및 방법

본 연구에서는 도재전장주조관용 도재인 VMK68을 대조군으

Table 2. Firing schedules of materials

표 2. 도재의 소성조건

Brand	Heating up(°C)	Hold time
Vita VMK68* (3-times)	600-930(6 min)	1 min
IPS-Empress** (layering technique)	700-1180(8 min)	20 min
Dentin firing schedule (two-times)	400-910(8.5 min)	3 min
Vita In-Ceram***		
Sintering	20-120(6 hours) 120-1120(2 hours)	2 hours
Glass infiltration	20-1180(30 min)	6 hours
Removal of excess glass*	600-900(3 min)	2 min

(Furnace) *Vita Vacumat 300, **IPS-Epress EP 500, ***Vita Incerama

로, IPS-Empress와 In-Ceram을 실험군으로 사용하였다(Table 1).

각 시험재료를 사용하여 직경 12.0mm×두께 1.0mm의 원판상의 시편을 제작하였다. VMK68은 소성수축을 고려하여 내경 14.2mm×두께 1.4mm의 금형상에서 도재를 축성한 다음 제조사의 지시에 따라 930°C에서 소성하였으며, 동일한 소성 사이클에 따라 2회의 반복소성을 행하였다. IPS-Empress는 내경 12.5mm×두께 1.4mm의 금형상에서 납형을 만든 다음 lost-wax 법에 의해 주형을 형성하였고, 1180°C에서 제조사가 추천한 heat-press technique을 적용하여 소성을 행하였으며, layering technique[16] 적용시의 dentin firing cycle에 따라 910°C에서 2회의 반복소성을 행하였다. In-Ceram은 내경 12.0mm×두께 1.0mm로 제작된 석고형상에서 slip casting 법을 적용하여 알루미늄을 성형한 다음 1120°C에서 저온소성을 행하였으며, 이어서 1180°C에서 유리를 용융침투시켜 알루미늄-유리 복합체를 제조하였다. 각 시료의 소성 schedule을 Table 2에 표시하였다. 시료 표면상의 결합을 제거하기 위해 비교적 경도가 낮은 VMK68과 IPS-Empress는 400~2000번의 emery paper로 연마하였고, In-Ceram은 400~2000번의 diamond disc(Shinil Diamond Industrial Co.)로 연마하였으며, 연마과정에서 형성된 인장면상의 미세결합을 제거하기 위해 1μm와 0.3μm의 diamond paste를 사용하여 마무리 연마를 행하였다.

3×12×1mm의 굽힘시험용 시편을 제작하기 위해 준비된 원판상 시편의 중심부를 저속 다이아몬드 절단기(Beuhler Ltd, Isomet)로 폭 3mm가 되도록 절단하였으며, 절단부가 시편의 파절에 미치는 영향을 최소화하기 위해 시편의 모서리를 45°방향에서 연마하여 0.1mm 씩 제거하였다. 준비한 모든 시편은 증류수 중에서 5분간 초음파 세척을 행하였으며, 수분을 제거하기 위해 실온의 건조기내에 10일 동안 보관하였다. 굽힘시편의 인

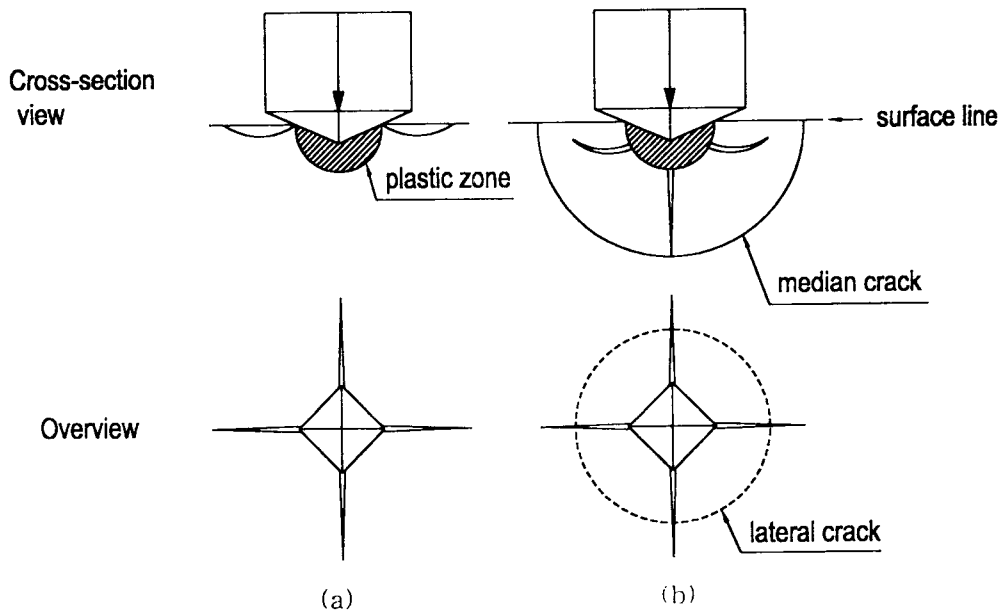


그림 1. 세라믹 재료의 표면에 비커스 압자를 압입할 때 형성되는 균열 형상을 나타낸 그림
 Fig. 1. Schematic illustration of Vickers-produced indentation fracture system. (a) radial/Palmqvist crack, (b) median/half-penny crack

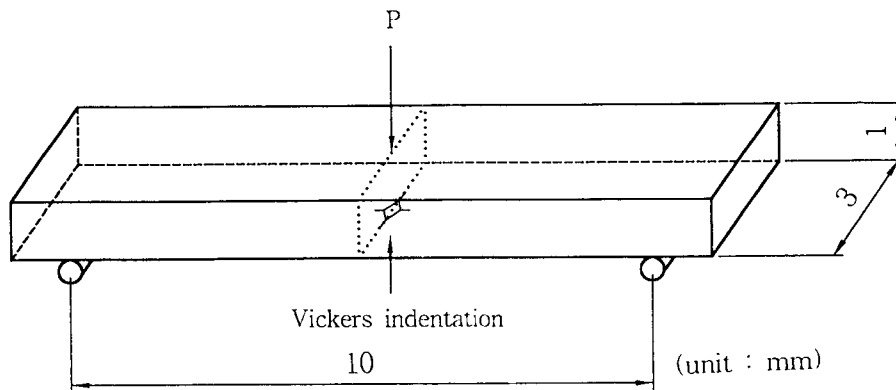


그림 2. 비커스 압자의 압입에 의해 균열을 형성한 시편의 굽힘시험 모식도
 Fig. 2. Schematic diagram of specimen with Vickers-produced indentation crack(mm)

장면 중앙에 파괴를 지배하는 결함을 형성하기 위해 비커스 경도시험기(Matsuzawa Co., Ltd., DVK-2)에 시편을 위치시키고 49.0N의 압입하중을 가하여 압흔을 형성하였으나, 이 하중하에서 파괴가 일어난 VMK68의 경우에는 9.8N의 압입하중을 가하여 압흔을 형성하였다. Fig. 1은 세라믹 재료의 표면에 비커스 압자를 압입하였을 때 나타나는 압흔과 압입부 주위에 형성되는 균열 양상을 도시한 것이다. 압입하중이 작을 때는 radial (Palmqvist) crack 형성되지만, 압입하중이 점차 증가함에 따라 돌연 소성영역 하부에 수직균열이 발생하며 radial/median crack이 형성되고, 이것이 최종적으로 half-penny crack으로 발전한다[13,14].

세라믹 재료의 활성화 불활성 조건하에서의 파괴강도를 측정하기 위해 37°C의 증류수와 기름중에서 3점굽힘시험을 실시하

였다. 활성화조건하에서의 파괴강도를 측정하기 위해 재료시험기(Instron Co., Mini55)에 3점굽힘장치를 위치시키고, Fig. 2에 나타낸 것과 같이, 비커스 압자의 압입에 의해 형성된 균열이 하중점 직하방에 오도록 위치시킨 다음 37°C의 증류수 중에서 crosshead 속도 0.05mm/min으로 굽힘시험을 실시하였다. 시편상에 존재하는 수분을 제거하고 시험과정에서 수분과의 접촉을 차단하여 불활성 조건을 만들기 위해 시편과 기름(Shin-Etsu Co., Ltd., KF-96)을 온도 120°C, 압력 -760mmHg에서 유지되는 진공건조기(Jeio tech Co., VO-10X)에 넣고 24시간 동안 유지한 다음 시편을 기름속에 집어넣었다. 굽힘시험은 37°C의 기름중에 3점굽힘장치를 위치한 상태에서 수중에서의 측정시와 동일한 조건으로 행하였다. 시험재료에 따른 통계적 유의성을 분석하기 위해 측정된 결과의 분산분석을 행한 다음 Tukey 다

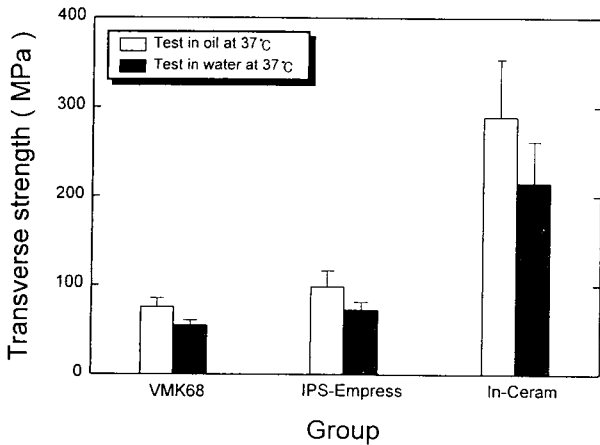


그림 3. 활성과 불활성 조건하에서의 3점굽힘강도
 Fig. 3. Transverse strength of three dental ceramics containing a Vickers-produced indentation crack

중범위검증법에 의해 각 군간의 차이를 비교하였으며, 측정조건에 따른 통계적 유의성을 분석하기 위해 t-test를 행하였다.

세라믹 재료의 표면에 비커스 압자를 압입하였을 때 형성되는 균열 및 이들 균열이 굽힘시험시에 파괴에 미치는 영향을 평가하기 위해 비커스 압자의 압입부와 파면을 광학현미경 (Nikon, Model Optiphot)과 전자현미경(Hitachi X-650)으로 관찰하였다.

실험성적

Fig. 3은 시험환경이 파절강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 37°C의 증류수와 기름중에서 crosshead 속도 0.05mm/min으로 3점굽힘시험을 행하였을 때의 굽힘강도를 도시한 것이다. 굽힘강도는 In-Ceram, IPS-Empress 및 VMK68의 순으로 크게 나타났으며, 각 시험재료간에 유의한 차이를 나타냈다($p < 0.01$). 기름중에서보다 수중에서의 강도가 더 낮은 값을 보였으며, 통계적 유의성을 검증한 결과 VMK68과 IPS-Empress는 유의수준 $\alpha=0.01$ 에서, In-Ceram은 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의한 차이를 나타냈다.

Fig. 4는 시편의 표면에 비커스 압자를 압입하였을 때의 압흔상과 압흔의 대각선 방향으로 성장한 균열을 광학현미경으로 관찰한 것으로, VMK68은 9.8N, IPS-Empress와 In-Ceram은 49.0N의 하중을 가하여 압자를 압입하였다. VMK68(a)과 IPS-Empress(b)의 압입부에서는 압흔상과 압흔의 대각선 방향으로 성장한 radial crack 및 표면과 나란한 방향으로 성장한 lateral crack에 의한 chipping 양상이 관찰되지만, In-Ceram의 압입부에서는 압흔상과 압흔의 대각선 방향으로 성장한 radial crack 이 관찰된다.

Fig. 5는 압흔의 대각선 방향으로 성장한 radial crack을 전자현미경으로 관찰한 것이다. 상대적으로 강도가 낮은 VMK68

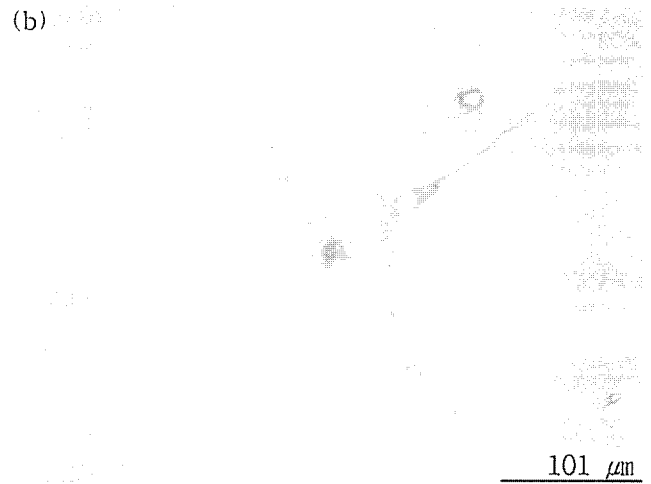
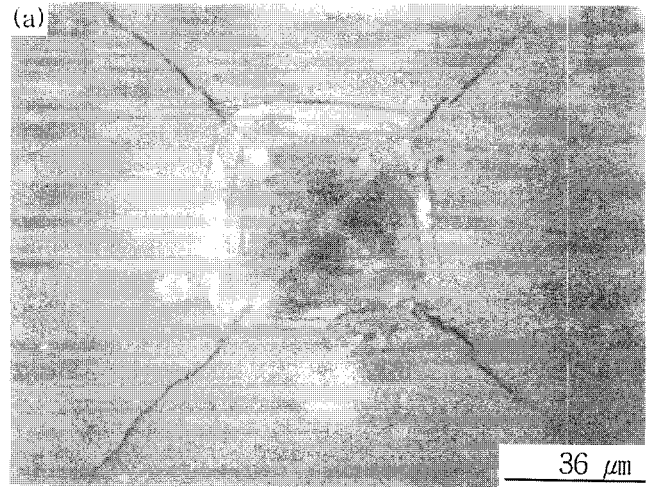


그림 4. 세라믹 재료의 표면에 비커스 압자를 압입하였을 때의 압흔양상
 Fig. 4. Photomicrographs of Vickers-produced indentation crack pattern (a) VMK68, (b) IPS-Empress, (c) In-Ceram

(a)과 IPS-Empress(b)에서는 균열성장의 구동력이 커서 균열

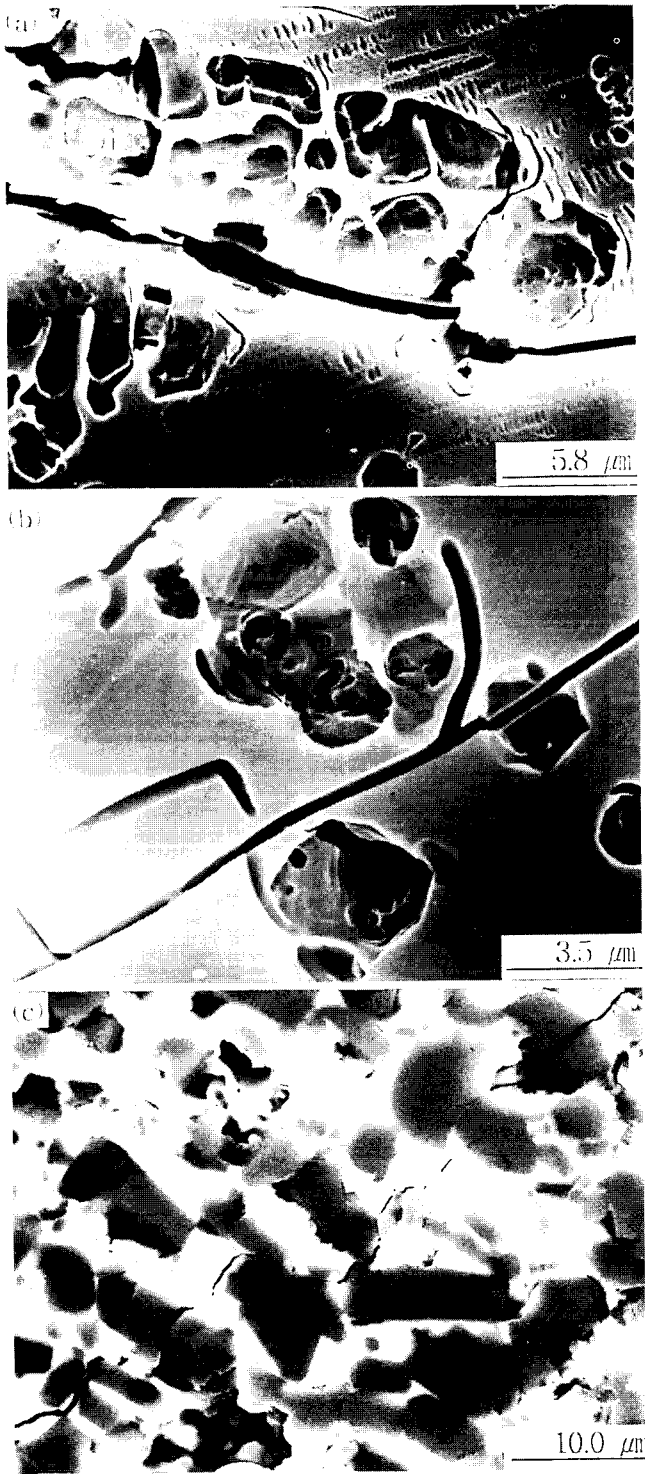


그림 5. 세라믹 재료의 표면에 비커스 압자를 압입하였을 때의 균열 전파 양상
 Fig. 5. Scanning electron micrographs of Vickers-produced indentation crack (a) VMK68, (b) IPS-Empress, (c) In-Ceram.

이 분산된 백류석(leucite) 결정을 가로질러 수직하게 전파된 양

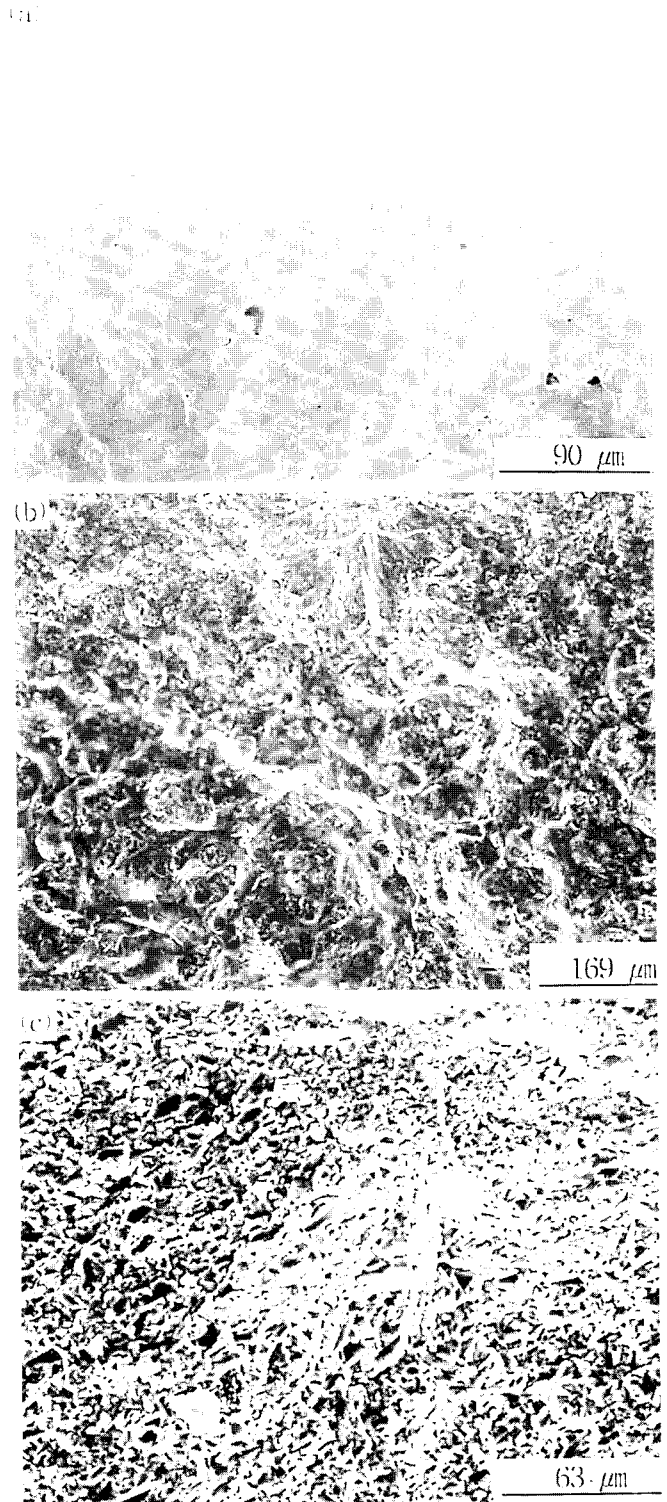


그림 6. 세라믹 재료의 3점굽힘시험 후의 파면 양상
 Fig. 6. Scanning electron micrographs of fracture surfaces after 3-point bend test (a) VMK68, (b) IPS-Empress, (c) In-Ceram

상을 보이며, 균열의 말단부에서 부분적으로 결정입자에 의해 균열경로가 굴곡되는 양상이 관찰된다. In-Ceram(c)에서는 분

산된 고강도의 알루미늄이나 입자에 의해 균열이 굴곡되고 부분적으로는 균열이 알루미늄 입자를 가로질러 전파된 양상이 관찰된다.

Fig. 6은 37°C의 증류수 중에서 crosshead 속도 0.05mm/min으로 3점굽힘시험을 실시한 다음 압입부를 중심으로 한 파면을 전자현미경으로 관찰한 것이다. VMK68(a)과 IPS-Empress(b)의 파면에서는 반원형의 영역에 형성된 표면 균열이 벽개면을 따라서 방사상으로 성장하여 파괴가 일어난 양상이 관찰되지만, In-Ceram(c)의 파면에서는 분산된 알루미늄 입자에 의한 균열의 굴곡과 crack bridging으로 야기된 거친 파면이 관찰된다.

총괄 및 고안

세라믹 재료는 재료의 제조, 수복물의 준비 및 사용과정에서 다수의 결함이 자연발생적으로 생성되며, 활성화환경하에서는 이들 결함부에서 응력부식으로 인한 균열성장을 수반하므로 균열 선단에서의 응력이 시간경과에 따라 증가하게 되며, 따라서 파절 가능성이 없는 낮은 응력수준에서도 균열의 크기가 임계치에 도달하면 돌연 불안정 파괴가 일어난다. 파괴가 파절 가능성이 없는 낮은 응력수준에서 일정한 시간이 경과한 후에 일어나므로 지연파괴라고도 하며, 이 과정이 일정한 정하중하에서 진행되는 경우를 정적 피로(static fatigue), 작용력의 크기가 시간에 따라 변화하는 경우를 동적 피로(dynamic fatigue)라고 한다[1, 17]. 본 연구에서는 세라믹 재료의 표면에 가장 취약한 결함을 생성함과 함께 결함의 크기를 표준화하기 위해 시편의 인장면 중앙에 비커스 압자를 압입하여 균열을 형성하였으며, 수분이 파괴에 미치는 영향을 평가하기 위해 수증과 수분이 차단된 기름 중에서 굽힘시험을 실시하였다.

세라믹 재료의 파괴는 인장응력의 작용시에 균열이 성장하여 일어나므로 균열성장을 억제하기 위해 여러 가지 방법도 도입되고 있다. 용융상태에서 급냉하거나 이온교환에 의한 매입효과(stuffing effect)로 압축 잔류응력을 발생시켜 균열성장을 억제하는 방법, 고인성의 세라믹 입자를 기질 내에 분산시키거나 열처리에 의해 미세 결정상을 생성시켜 균열의 굴곡, 굴절 및 소멸을 유도하는 방법, 분산된 입자의 상변태로 인한 체적팽창으로 유도된 다수의 미세 균열이 파괴 에너지의 일부를 흡수하여 균열성장을 억제하는 방법 등이 이용되어 왔다[6,18]. 본 연구에서 사용한 세라믹 재료에서는 고강도 세라믹인 백류석과 알루미늄 입자의 분산 및 유리의 결정화를 유도하고 있으며, 이들 분산된 입자에 의해 균열의 굴곡과 crack bridging으로 균열의 성장을 억제하고 있다.

세라믹 재료의 표면에 압자를 압입하면 압입부를 중심으로 한 좁은 범위에서 탄소성 변형이 일어나며 압입부 하방에 균열이 발생한다. 비커스 압자의 압입시 압입부에는 1차적으로 소성영역이 형성되고, 이 소성영역과 탄성영역의 접점에 발생한 인장응력으로 인해 압자의 모서리를 따라서 radial crack이 생성된다. 파괴인성치에 비해 압입하중이 작을 때에는 얇은 반타원형

의 표면형 균열(Radial/Palmqvist crack)이 형성되지만, 압입하중이 커지면 소성영역의 하부에 압자의 끝을 따라서 돌연 수직 균열이 발생하며 압자의 대각선 방향의 수직인 두 면상에 median crack이 형성되고, 이것이 잔류응력의 영향을 받아 최종적으로 반원형의 half-penny crack으로 발전한다. 또한 소성역과 탄성역의 역학적 불일치로 인한 잔류응력 때문에 소성영역의 하부에 횡방향의 lateral crack이 형성되며, 세라믹 재료의 반투명성으로 인해 균열영역의 하부에 chipping 현상이 나타난다[19-21]. 박 등[22]은 라미네이트용 도재에 비커스 압자를 압입하였을 때 9.8N의 압입하중 하에서 median crack이 형성되었다고 하였고, 안 등[23], 김 등[24]은 VMK68은 9.8N의 압입하중 하에서 median crack 양상을 보였지만, In-Ceram은 49.0N의 압입하중 하에서 Palmqvist crack 양상을 보였다고 하였다. 본 연구에서 비커스 압자의 압입시 VMK68은 9.8N의 압입하중 하에서, IPS-Empress는 49.0N의 압입하중하에서 median crack이 형성되는 양상을 보였으나, In-Ceram은 49.0N의 압입하중하에서 얇은 표면형의 Palmqvist crack이 형성되는 양상을 나타내어 안 등[23], 김 등[24]의 결과와 일치하는 양상을 보였다.

세라믹 재료의 표면에 존재하는 결함의 크기가 강도에 미치는 영향에 관하여, Dabbs 등[25]은 압입하중이 radial crack이 형성되는 한계를 초과할 경우 파절강도가 급격히 감소한다고 하였고, Evans[26], Rice[27,28]는 결함의 크기가 200 μ m 이하인 경우에도 파절강도의 저하를 초래할 수 있다고 하였다. Rice 등[29]은 세라믹 재료의 표면에 존재하는 얇은 반타원형의 결함에 인장응력이 작용할 경우, 균열이 두께방향으로 보다 빠르게 성장하여 반원형이 되고, 이 시점으로부터 균열성장이 보다 빠르게 가속되어 방사상으로 성장하며, 파면에서는 균열 진원지를 중심으로 거울영역(mirror region), 안개영역(mist region), 깃털영역(hackle region) 및 거시적 균열가지 등의 특징적인 영역이 나타난다고 하였다. 본 연구에서 비커스 압자의 압입 후 균열전파 양상을 조사한 결과, 압입부에서 half-penny crack 양상을 보인 VMK68과 IPS-Empress에서는 압입부를 중심으로 한 반원형의 좁은 영역에서는 수많은 미세균열이 방사상으로 성장한 비교적 매끈한 면이 관찰되었으며, 이후의 영역에서는 균열이 벽개면을 따라서 방사상으로 빠르게 성장하여 형성된 hackle 상의 거친 파면이 관찰되었다. 압입부에서 Palmqvist crack 양상을 보인 In-Ceram에서는 알루미늄 입자에 의한 균열의 굴곡과 crack bridging으로 거친 요철면이 관찰되며, 균열성장으로 형성된 거친 요철면 사이의 맞물림과 마찰작용으로 인해 강화가 일어났다고 생각된다.

세라믹 재료는 내수성이 뛰어나고 산이나 알칼리에 의해서도 쉽게 침식이 일어나지 않기 때문에 이들 분위기에 장시간 노출된 경우에도 거의 강도의 저하를 보이지 않지만, 침식이 일어날 가능성이 있는 이들 분위기하에서 인장응력이 작용하게 되면 균열 선단에서의 원자간의 거리신장으로 인해 활성화 상태에 도달하여 응력부식으로 인한 침식이 일어나게 된다. 표면 결함부에

서 지속적인 균열성장이 일어나므로 응력의 작용시간이 길어짐에 따라 파절강도가 저하하게 되며, 따라서 건조한 상태나 습기가 차단된 기름 중에서는 대기중이나 수중에서 측정할 경우보다 높은 파절강도를 갖게 된다. Sherrill과 O'Brien[12]은 대기중에서보다 수중에서 세라믹 재료의 파절강도가 저하한다고 하였고, Southan과 Jörgensen[13]은 수중에서의 정적 실험을 통해 응력의 작용시간이 증가함에 따라 파절강도가 저하한다고 하였으며, Jones와 Wilson[30]은 부하속도의 감소에 따라 파절강도의 저하가 일어난다고 하였다. 또한 Smyth와 Magida[31]는 유리상이 결정상보다 응력부식이 일어나기 쉬우므로 활성환경하에서 상대적으로 빠르게 강도의 저하가 일어난다고 하였고, Morena 등[32]은 알루미늄 도재가 장식 도재에 비해 유리성분을 30-40% 정도 함유하고 있지만 활성환경 하에서의 파괴에 대한 저항성은 장식 도재에 비해 크게 증가하였으며, 이것은 분산된 알루미늄 입자에 의해 균열성장이 억제되기 때문이라고 하였다. 본 연구에서 37°C의 증류수와 기름 중에서 3점굽힘강도를 비교한 결과, 수중에서의 강도가 기름 중에서보다 더 낮은 값을 보였으며, 이는 수중에서 인장응력이 작용함에 따라 결함부의 균열선단에서 응력부식으로 인한 균열성장이 일어났기 때문으로 생각된다.

결 론

본 연구에서는 전부도재관용 도재의 균열전파 양상과 수분이 파절강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 굽힘시험용 시편의 인장면 중앙부에 비커스 압자를 압입하여 균열을 형성한 다음 37°C의 증류수와 기름 중에서 3점굽힘시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. VMK68과 IPS-Empress의 압입부와 파면에서는 median crack 양상이 관찰되었으며, 균열이 압입시에 형성된 벽개면을 따라서 빠르게 성장하여 파괴가 일어난 양상이 관찰되었다.

2. In-Ceram의 압입부와 파면에서는 Palmqvist crack 양상이 관찰되었으며, 균열의 굴곡과 crack bridging에 의한 강화기전이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. D. W. Jones, "The strength and strengthening mechanisms of dental ceramics. In: J. W. McLean (ed), *Dental ceramics, Proceedings of the first international symposium on ceramics*", Chicago, Quintessence, pp. 110-116, 1983.
2. S. O. Hondrum, "A review of the strength properties of dental ceramics", *J Prosthe. Dent.*, vol. 67, pp. 859-865, 1992.
3. P. J. Adair, D. G. Grossman, "The castable ceramic crown", *Int. J. Periodont. Rest. Dent.*, vol. 4, pp. 3-6, 1984.
4. G. Beham, "IPS-Empress A new ceramic technology", Ivoclar-Vivadent Report vol. 6, pp. 1-13, 1990.
5. L. Pröbster, J. Diehl, "Slip-casting alumina ceramics for crown and bridge restorations", *Quintessence Int.*, vol. 23, pp. 25-31, 1992.
6. R. R. Seghi, J. A. Sorensen, "Relative flexural strength of six new ceramic materials", *Int. J. Prosth.*, vol. 8, pp. 239-246, 1995.
7. J. Fischer, M. Schmid, H. F. Kappert, J. R. Strub, "Texture formation of the dental ceramic core material In-Ceram and thermal expansion of its individual components", *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, vol. 46, pp. 461-463, 1990.
8. W. D. Wolf, K. J. Vaidya, L. F. Francis, "Mechanical properties and failure analysis of alumina-glass dental composites", *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 79, pp. 1769-1776, 1996.
9. W. B. Hillig, R. J. Charles, "Surfaces, stress-dependence surface reactions, and strength. In: V. F. Zackey(ed), *High Strength Materials*", New York, Wiley, pp. 682-701, 1965.
10. D. P. Hasselman, "Proposed theory for the static fatigue behaviour of brittle ceramics", *Ultra fine grain ceramics*, New York, Syracuse Univ. Press, pp. 297, 1968.
11. S. M. Wiederhorn, "Subcritical crack growth in ceramics, In: R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange(eds), *Fracture Mechanics of Ceramics*", vol 2, New York, Plenum, pp. 613-646, 1974.
12. C. A. Sherrill, W. J. O'Brien, "Transverse strength of aluminous and feldspathic porcelain", *J. Dent. Res.*, vol. 53, pp. 683-690, 1974.
13. D. R. Southan, K. D. Jörgensen, "The endurance limit of dental porcelain", *Aust. Dent. J.*, vol. 19, pp. 7-11, 1974.
14. K. J. Anusavice, R. B. Lee, "Effect of firing temperature and water exposure on crack propagation in unglazed porcelain", *J. Dent. Res.*, vol. 68, pp. 1075-1081, 1989.
15. K. J. Anusavice, B. Hojjatie, P. H. DeHoff, "Influence of metal thickness in stress distribution on metal ceramic crowns", *J. Dent. Res.*, vol. 64(Spec Iss), pp. 246, 1985.
16. J. K. Dong, H. Luthy, A. Wohlwend, P. Schärer, "Heat pressed ceramics: Technology and Strength", *Int. J. Prosth.*, vol. 5, pp. 9-16, 1992.
17. J. E. Ritter, "Engineering design and fatigue failure of brittle materials", In: R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman, F. F. Lange(eds), *Fracture Mechanics of Ceramics*. Vol

- 4, New York : Plenum, PP. 667-686, 1978.
18. 이 동녕, 김 정수, 이 성근 공역. 변형과 파괴역학. 회중당, pp. 345-349, 1992.
 19. D. B. Marshall, B. R. Lawn, "Residual stress effects in sharp-contact cracking: I", J. Mat. Sci., vol. 14, pp. 2001-2012, 1979.
 20. R. F. Cook, G. M. Pharr GM, "Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics", J. Am. Ceram. Soc, vol. 73, pp. 787-817, 1990.
 21. 西田俊彦, 安田榮一 編著, セラミックスの力學的特性評價. 日刊工業新聞社, pp. 80-84, 1985.
 22. 박찬운, 배태성, 이상돈, "치과용 라미네이트 도재의 피로 파괴에 관한 실험적 연구", 대한치과보철학회지, vol. 31, pp. 461-484, 1993.
 23. 안승근, 이주형, 배태성, "압자압입법에 의한 치과용 도재의 파괴인성 평가", 대한치과보철학회지, vol. 34, pp. 309-319, 1996.
 24. 김효성, 백명주, 이민호, "표면결함이 치과용 도재의 파괴에 미치는 영향", 대한약기능교합학회지, vol. 13, pp. 257-264, 1997.
 25. T. B. Dabbs, D. B. Marshall, B. R. Lawn, "Flaw generation by indentation in glass fibers", J. Am. Ceram. Soc-Discussions and Notes., vol. 63, pp. 224-225, 1980.
 26. A. G. Evans, "Structural reliability, A processing-dependence phenomenon", J. Am. Ceram. Soc., vol. 65, pp. 127-137, 1982.
 27. R. W. Rice, "Processing induced sources of mechanical failure in ceramics", In : H. Palmour, R. Davis, T. Hare (eds), Processing of Crystalline ceramics. New York Plenum Press, pp. 303-319, 1978.
 28. R. W. Rice, "Failure initiation in ceramics : Challenges to NDE and processing", In : C. C. Sorrell, B. Ben-Nissan (eds), Materials Science Forum vol 34-36, Ceramic Developments, Switzerland : Trans Tech Publications, pp. 1057-1064, 1988.
 29. R. W. Rice, W. R. Grace and Co, "Perspective on Fractography. In : J. R. Varner, V. D. Frechette(eds), Fractography of Glass and Ceramics", vol. 22, Advances in Ceramics, pp. 3-56, 1988.
 30. K. K. Smyth, M. B. Magida, "Dyanmic fatigue of a machinable glass-ceramic", J. Amer. Ceram. Soc., vol. 66, pp. 500-505, 1983.
 31. D. W. Jones, and H. J. Wilson, "Some properties of dental ceramics", J. Oral. Rehab., vol. 2, pp. 379-396, 1983.
 32. R. Morena, P. E. Lockwood, C. W. Fairhurst, "Fracture toughness of commercial dental porcelains", Dent. Mater., vol. 2, pp. 58-62, 1995.