

압자압입법에 의한 치과용 도재의 파괴인성 평가

*전북대학교 치과대학 보철학교실
**전북대학교 치과대학 치과재료학교실

안승근*、이주형**、배태성**

I. 서론

도재와 같이 강도가 결함에 크게 영향을 받는 재료에서는 결함이 강도에 미치는 영향을 충분히 고려해야 하며, 이 같은 관점에서 파괴인성(Fracture Toughness)의 측정이 요구된다. 파괴인성은 결함에 대한 강도의 민감도를 나타내는 파라미터로서, 재료가 파괴를 일으킬 때까지 저장할 수 있는 변형에너지의 총량이나 인장응력하에서 결함이 급속하게 전파되어 파괴를 일으킬 때의 임계응력확대계수로 표시한다.

취성재료의 표면에 압자의 압입시 압흔부를 중심으로 비탄성적인 변형영역이 형성되며, 하중이 증가함에 따라 반경방향으로 원형수직 균열이 발생하며 소성변형 영역 하부에 radial/median crack이 형성된다. Irwin⁽¹⁾은 균열선단 부근의 응력장을 해석하여 완전탄성체의 불안전 파괴의 기준이 되는 파괴인성을 정의하였고, Lawn과 Wilshaw⁽²⁾는 파괴인성이 Vickers 압흔의 반경방향의 균열길이와 비례관계가 성립함을 보고하였으며, Evans와 Charles⁽³⁾, Marshall과 Lawn⁽⁴⁾, Anstis등⁽⁵⁾은 압자 압입시에 형성된 균열길이와 압흔의 크기로부터 파괴인성을 구하는 방법(Indentation Fracture Method : IF법)을 소개하였다. 또한 Marshall과 Fuller⁽⁶⁾는 Knoop와 Vickers

압자압입시의 파괴인성을 비교하여 Vickers 압자압입시의 결과가 더 잘 일치함을 보고하였다.

치과용 도재의 파괴인성에 관하여, Morena등⁽⁷⁾은 leucite결정을 다량 포함하는 frit에서 파괴인성이 증가한다고 하였고, Anusavice와 Lee⁽⁸⁾는 소성온도에 따른 파괴인성치를 비교하였으며, 박 등⁽⁹⁾은 반복소성이 파괴인성에 미치는 영향을 조사하였다. Taira등⁽¹⁰⁾은 파괴인성 측정시 radial/median crack의 형성을 위해서는 적절한 하중조건 선택이 필요하다고 하였고, Rosenstiel과 Porter^(11, 12)는 도재수복물에 대한 겉보기 파괴인성을 조사하였으며, 박 등⁽¹³⁾은 라미네이트용 도재의 파괴인성 및 레진의 접착이 균열전파에 미치는 영향에 관하여 조사하였다.

압흔법에 의한 파괴인성의 계산시는 그 재료의 탄성계수 값이 요구된다. 탄성계수의 측정시는 인장, 압축, 굽힘 및 비틀림 시험에 의한 정적 측정법 및 펄스법이나 공진법과 같은 동적 측정법이 적용되고 있으며, 또한 근사적인 방법으로 압자압입법이 적용되고 있다. Lawn과 Howes⁽¹⁴⁾는 Vickers 압흔상의 탄성회복도를 E/H의 비로 표시하였고, Marshall등⁽¹⁵⁾은 Knoop 압흔상의 탄성회복도를 측정하여 E/H의 비를 결정하는 방법을 소개하였으며, Rosenstiel과 Porter^(11, 12)는 Knoop 압흔상으로부터 치과용 도재의 E/H의 비를 결

정한 다음 Vickers 압흔상을 이용하여 파괴인성을 계산하였다.

본 연구는 최근 임상에서 이용되고 있는 치과용 도재의 파절에 대한 저항성을 평가하기 위해, Knoop 압자압입법에 의해 도재의 Young's modulus를 측정한다. 다음 Vickers 압자압입법을 적용하여 파괴인성을 측정하였으며, 또한 Vickers 압자의 압입시에 형성된 균열형상을 조사하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구에서는 IPS-Empress, Vita Hi-Ceram 및

Vita In-Ceram의 코어용 도재 3종류, shade DA2의 G-Cera porcelain과 Vitadur-N의 라미네이트용 도재 2종류 및 shade 62의 Ceramco와 Shade A2의 Vita VMK68 도재전장주조관용 도재 2종류를 사용하였다(Table 1).

2. 실험방법

1) 시편의 제작

도재전장 주조관용과 라미네이트용 도재는 vibration and blotting technique으로 도재를 축성한 다음 제조자의 지시에 따라 3회 반복 소성하였고, IPS-Empress는 직경 12mm, 두께 2mm의 납형을 만든 다음 제조자의 지시에 따라 열과 압력을 가하

Table 1. Materials used in this study

Brand	Code	Manufacturer
Vita VMK68	VB	H.R. Gmbh & Co.
Ceramco	CB	Cermaco Inc.
G-Cera Porcelain	GB	G-C Industrial Co.
Vitadur-N	VN	H.R. Gmbh & Co.
IPS-Empress	IE	Ivoclar AG
Vita Hi-Ceram	VH	H.R. Gmbh & Co.
Vita In-Ceram	VI	H.R. Gmbh & Co.

Table 2. Firing schedule of each material

Br	Heating-up(°C)	Hold time
Ceramco & Vita VMK68 (3 times firing)	600- 930 (6 min)	1 min
G-Cera Porcelain (3 times firing)	650- 960 (6 min)	1 min
Vitadur-N (3 times firing)	600- 960 (6 min)	1 min
IPS-Empress Vita Hi-Ceram	700- 1180 (8 min)	20 min
Firing of die	600- 1000 (10 min)	3 min
1st, 2nd firing	600- 1700 (10 min)	
3rd firing	600- 1700 (10 min)	3 min
Vita In-Ceram	20- 120 (6 hours)	
Sintering	120- 1120 (2 hours)	2 hours
Glass infiltration	120- 1100 (30 min)	6 hours

자의 압입을 위해 표면을 0.3 μ m alu-mina 단계까지 경면연마하였으며, 종류수하에서 5분간 초음파 세척을 행한 후 측정전 3일동안 건조기 내에 보관하였다.

2) Young's modulus의 측정

Young's modulus를 계산하기 위해 Knoop 압자 압입법을 적용하였다. 미소경도측정기(Matsuzawa Seiki Co., Ltd.)에 대각선의 비(a/b)가 7.11인 Knoop 압자를 고정한 다음 압입하중 9.8N, 유지시간 20초의 조건에서 압흔상의 대각선 길이를 측정하였다.

Knoop 압자압입시 하중을 받고 있는 상태에서는 압흔상의 긴 대각선과 짧은 대각선의 길이의 비(a/b)는 7.11이 된다. 하중을 제거하면 긴 대각선의 길이(b)는 거의 영향을 받지 않으나 짧은 대각선의 길이(a)는 탄성회복으로 인해 감소를 나타낸다. 따라서 Young's modulus는 경험적으로 얻어진 식(1)을 적용하여 계산할 수 있다⁽¹⁵⁾.

$$E = \frac{0.45 H_k}{b/a - b'/a'} \quad (1)$$

여기에서, Hk는 Knoop경도, a'와 b'는 각각 압흔상의 긴 대각선 길이와 짧은 대각선의 길이이다(Fig. 1). 이 방법의 적용시 Young's modulus는 짧은 대각선 길이에 민감하게 영향을 받으므로 주의 깊은 측정이 요구된다.

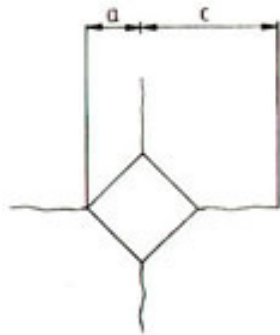


Fig. 1. Surface trace dimensions of Vickers indentation used to measure the half-diagonal(a) and the initial length(c).

3) 파괴인성의 측정

파괴인성을 계산하기 위해 Vickers 압자압입법을 적용하였다. 압입하중(P)에 비해 파괴인성이 작은 재료에서는 Median/lateral crack이 형성되지만, 파괴인성이 큰 재료에서는 얇은 반 타원형의 Palmqvist crack이 형성된다. Fig. 2는 도재 표면에 Vickers 압자압입시의 압흔상을 도시한 것이다. 영구변형의 크기를 표시하는 대각선의 반길이 a와 초기균열 길이 c를 측정하였으며, Vickers 경도(Hv)는 식(2)를 적용하였고, 파괴인성(K_{IC})은 median crack에 대해서는 식(3)을⁽¹⁶⁾, Palmqvist crack에 대해서는 식(4)를 적용하였다^(16, 17).

$$H_v = 0.4635 \frac{P}{a^2} \quad (2)$$

$$K_{IC} = 0.018 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right) \quad (3)$$

$$K_{IC} = 0.012 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{2}{5}} \left(\frac{H_v P}{l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

여기에서 l=c-a이다. 경험적으로 c/a가 2.3-2.5 이하일 때는 표면형 균열에 대한 평가식을, 그 이상일 때는 median crack에 대한 평가식을 적용하는 것이 바람직하다.

본 연구에서 코어용 도재인 Vita Hi-Ceram과 In-Ceram은 압입하중 49.0N, 유지시간 20초의 조건에서 Palmqvist crack 양상을 보여 식(4)를 적용하여 파괴인성을 계산하였으나, 나머지 도재는 압입하중

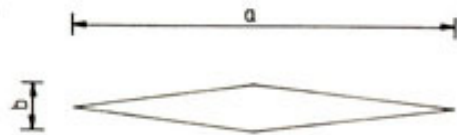


Fig. 2. Surface trace dimensions of Knoop indentation used to measure the long & short diagonal.

9.8N, 유지시간 20초의 조건에서 Median crack양상을 보여 식(3)을 적용하여 파괴인성을 계산하였다.

4) 주사전자현미경 관찰

도재에 Vickers 압자를 압입한 후 균열 양상을 광학 현미경(Nikon, Model Optiphot)과 SEM(Hitachi X-650)으로 관찰하였다. Vita VMK68도재는 두께 방향으로 형성된 균열형상을 관찰하기 위해 8X24X2 mm의 시편 중앙에 압입하중 9.8N, 유지시간 20초의 조건으로 압자를 압입한 다음, 압흔부에 최대 인장응력이 발생하도록 3점굽힘시험 장치에 시편을 고정하였으며, crosshead speed 0.5 mm/min에서 시험편을 파절시켜 파면을 관찰하였다.

5) 통계적 분석

측정된 결과의 통계적 유의성을 검증하기 위해 분산 분석(One Way Analysis)을 행한 후 Scheff 다중범위 검증법(Multiple Range Test)에 의해 평균치를 개별 비교하였다.

III. 실험성적

Table 3에 Knoop 압자압입법을 적용하여 측정된 Young's modulus, Vickers 경도 및 IF법을 적용하여 계산한 파괴인성치를 요약한 결과이다. 알루미늄이나

유리를 침투시켜 결정화 열처리한 코어용 도재 Vita In-Ceram에서 각각 Young's modulus(E)가 154.4 ± 49.2 Gpa, Vickers 경도가 12.60 ± 0.71 Gpa, 파괴인성이 2.562 ± 0.311 MPa · m^{1/2}로 최대치를 나타냈다. 통계적 유의성을 검증한 결과, Young's modulus는 Vita In-Ceram 군과 Vita Hi-Ceram군, Vita In-Ceram, Hi-Ceram군과 나머지 군간에 유의수준=0.01에서 유의한 차이를 보였다(Fig. 4). 파괴인성치는 Vita In-Ceram과 Vita Hi-Ceram 군간에는 유의수준=0.05에서, Vita In-Ceram, Hi-Ceram 군과 나머지 군간에 유의수준=0.01에서 유의한 차이를 보였다(Fig. 5).

Fig. 6은 도재전장주조관용인 Vita VMK68 도재의 표면에 9.8N의 압입하중으로 Vickers압자를 압입하

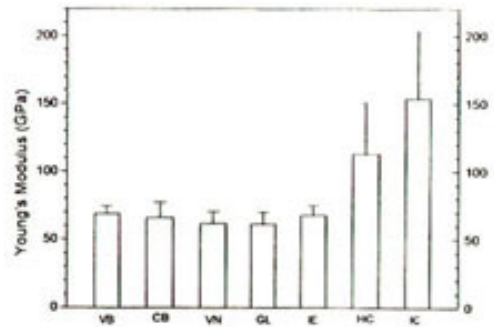


Fig. 3. Young's modulus of some dental ceramics measured by indentation method.

Table 3. Young's modulus(E), Vickers hardness(HV), and Fracture toughness(KIC) of materials tested by indentation fracture method.

Specimen code	E(GPa)	Hv(GPa)	KIC(MPam ^{1/2})
VB	69.4 ± 5.1	4.29 ± 0.36	0.48 ± 0.054
CB	66.2 ± 11.1	4.10 ± 0.09	1.192 ± 0.224
VN	62.1 ± 8.5	5.08 ± 0.30	0.908 ± 0.132
GL	61.4 ± 8.6	5.31 ± 0.28	1.031 ± 0.117
IE	67.8 ± 7.1	5.67 ± 0.26	1.264 ± 0.296
HC	113.3 ± 37.8	7.55 ± 1.98	2.074 ± 0.255
IC	154.4 ± 49.2	12.60 ± 0.71	2.562 ± 0.311

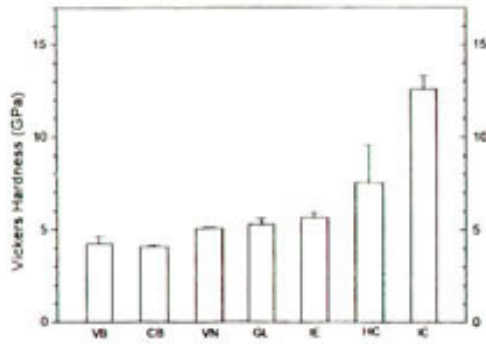


Fig. 4. Vickers hardness numbers of some dental ceramics.

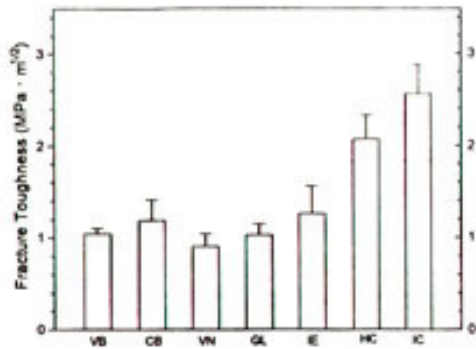


Fig. 5. Fracture toughness of some dental ce-ramics measured by indentation frac-ture method.

였을 때의 균열형상을 SEM으로 관찰한 것이다. 표면에서 압자압입에 의한 압흔상과 대각선 방향으로 형성된 균열 및 lateral crack 양상으로부터 median/lateral crack 양상이 관찰된다(Fig. 6(a)). 또한 Vickers 압자를 압입한 후 시편을 횡으로 파절시켜 관찰한 파면에서는 압흔상 직하방에서 소성영역, 반경방향의 수직균열 및 횡방향으로 성장한 lateral crack이 관찰되었으며, 압흔상을 중심으로 한 반원형의 영역에서 관찰되는 방사선상으로 전파된 미세균열로부터 median/half-penny crack이 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 6(b),(c)).

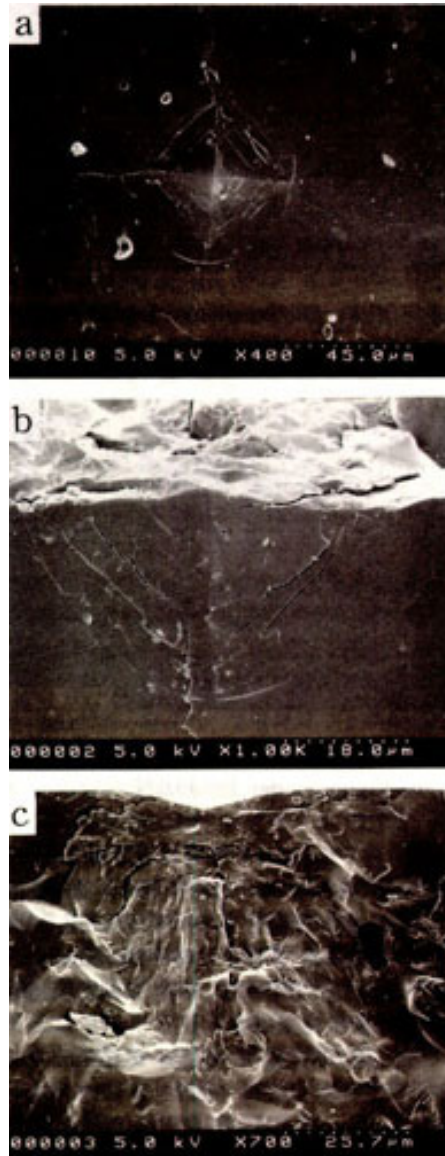


Fig. 6. Vickers indentation pattern under P=9.8N(a), and fracture surface by 3-point flexure test(b,c) of Vita VMK68 porcelain.

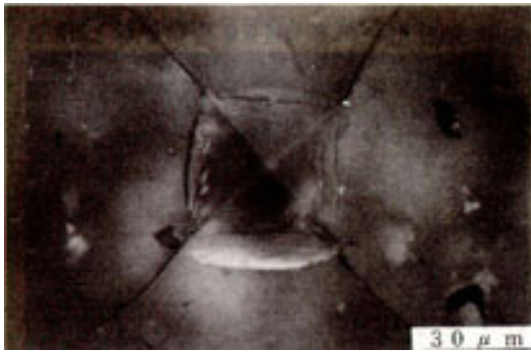


Fig. 7. Vickers indentation pattern of Vitadur-N under P=9.8N.

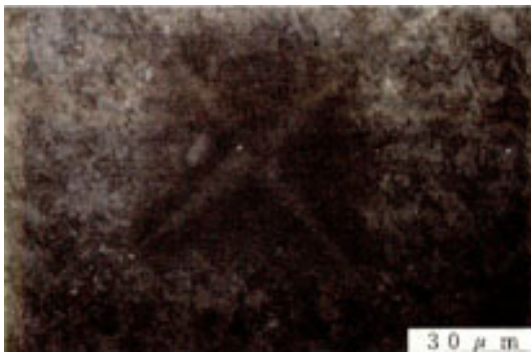


Fig. 8. Vickers indentation pattern of Vita In-Ceram under P=9.8N.

Fig. 7은 Vitadur-N의 표면에 압입하중 9.8N, 유지시간 30초의 조건으로 Vickers 압자를 압입하였을 때의 광학현미경 사진으로, 압흔상의 대각선 방향으로 형성된 균열과 lateral crack에 의한 clipping 양상으로부터 median/lateral crack 양상이 관찰된다.

Fig. 8은 코어용 도재 Vita In-Ceram의 표면의 압입하중 49.0N, 유지시간 20초의 조건으로 Vickers 압자를 압입하였을 때의 광학현미경 사진으로, 압흔상의 크기에 비해 대각선 방향으로 형성된 균열의 길이가 짧고, 또한 lateral crack 양상이 관찰되지 않는 것으로부터 Palmqvist crack이 발생하였다고 생각되지만, 압자의 크기가 굵은 관계로 균열길이를 관찰하는 것이 용이하지 않았다.

IV. 총괄 및 고안

치과용 도재는 압축강도가 크고 내마모성, 심미성 및 생체적합성이 양호하므로 다양한 수복기법이 적용되고 있으나, 취약하여 강도가 결합에 크게 영향을 받으므로, 도재 수복물의 파절은 주로 제작 및 사용중에 발생한 결합부에 인장응력이 작용할 때 일어나게 된다. 도재 수복물의 파절에 대한 저항성을 증가시키기 위한 대책으로 하부 구조물로서 금속을 강화한 도재전장구조관이 널리 이용되어 왔으나, 빛의 투과, 반사 및 형광성등이 자연치와 다른 특성을 보여 자연스럽지 못하기 때문에 심미성이 우수한 all ceramic system에 관심이 집중되어 왔다. 내화모형법은 도재를 내화모형상에 축성한 다음 소결하는 방법으로, die와 인접한 도재의 표면에 파절의 원인이 되기 기공이나 미세결함이 생성되는 단점을 보였다^(18, 19). castable glass ceramic system은 유리의 주조 성형 후 결정화열처리에 의해 강도를 증가시키는 방법이지만, 결정화 과정에서 부가적인 수축이 일어나는 단점을 보였다⁽²⁰⁻²²⁾. 도재의 수축을 최소화하기 위해 미리 결정화 처리한 결정화유리에 열과 압력을 가하여 성형하는 heat press technique이 소개되었으며⁽²³⁾, 또한 알루미늄에 유리를 침투시켜 결정화처리함으로써 높은 강도를 갖는 세라믹 코어를 제작하는 기법^(24, 25) 등이 임상에서 적용되고 있다.

파괴인성의 측정시 금속재료에서 피로균열을 삽입하는 방법으로 표준화되어 있으나, 세라믹 재료에서는 피로균열을 만드는 것이 용이하지 않았으므로 다양한 파괴인성 측정법이 적용되지만, 현재까지 국제적으로 표준화된 방법은 마련되어 있지 않은 실정이다. 도재의 파괴인성 측정시 파괴역학 시편을 이용하는 large crack model은 균열의 크기가 미세조직의 입자에 비해서 크기 때문에 균열의 크기 및 성장의 제어가 용이하지 않게 된다. 또한 투명한 재료와는 달리 도재는 균열관찰이 용이하지 않으므로 균열길이와 성장속도 등을 관찰하지 않고도 파괴인성을 측정하는 방법을 선택하는 것이 요구되며, 이같은 관점에서 시편의 모양과 형상에 구애를 받지 않고, 한 개의 작은 시편에서도 반

복측정이 가능한 IF 법이 도재의 파괴인성 측정에 빈번하게 적용되고 있다⁽⁴⁶⁾. 그러나 이 방법은 시료의 입자크기가 작고, 또한 기공률이 낮아서 균열이 잘 발달될 수 있는 경우에만 적용이 가능하다.

IF 법에 의한 파괴인성의 계산시는 탄성계수와 경도의 비(E/H)값이 요구된다. Anstis등⁽⁵⁾은 압자압입에 의해 측정된 E/H의 오차가 파괴인성치의 오차범위에 크게 영향을 미치지 않는다고 하였고, Lawn과 Howes⁽⁴⁴⁾는 Vickers압자를 압입한 경우에 균열이 형성되지 않는 낮은 하중하에서 깊이방향의 탄성회복도를 E/H의 비로 표시하였으며, Marshall 등⁽⁴⁵⁾은 균열형성에 크게 영향을 받지 않고, 또한 보다 높은 압입하중하에서도 측정이 가능한 Knoop압자압입법에 의해 E/H의 비를 측정하는 방법을 소개하였는데, 대부분의 취성재료에서 E/H ≥ 0.03 일 경우 오차범위 10% 이내에서 E/H의 비를 결정할 수 있다고 하였다. 본 연구에서는 9.8N의 압입하중하에서 형성된 Knoop 압흔상의 긴 대각선과 짧은 대각선의 길이를 측정하여 Young's modulus를 계산하였다.

도재의 탄성계수에 관하여, Kase 등⁽²⁶⁾은 도재전장주조관용 Ceramco 도재에서 68.0-69.9 Gpa, Vita VMK68 도재에서 68.0-69.4 Gpa 임을 보고하였고, 박 등⁽¹³⁾은 G-Cera Porcelain과 레진 시멘트에서 각각 62.6 GPa과 15.0 GPa로 나타남을 보고하였으며, 박 등⁽⁹⁾은 도재전장주조관용 도재의 4회 소성시 Ceramco 도재에서 68.3 Gpa, Vita 도재에서 69.4 Gpa, Ceramco 도재에서 66.2 Gpa 및 G-Cera Porcelain에서 62.1 GPa로 다른 방법에 의한 측정 결과와 대략 10% 이내에서 차이를 보였다. 도재의 탄성계수는 동일한 시료를 사용한 경우에도 시료의 준비, 시편의 제작방법 및 측정방법 등에 따라 다양한 결과를 나타낼 수 있으며, 따라서 압자압입법은 도재의 Young's modulus를 비교하기 위한 유효한 방법이라 생각된다. 측정치의 통계적 분석 결과, Vita In-Ceram과 Vita Hi-Ceram이 여타의 도재와 유의수준 $\beta=0.01$ 로서 유의한 차이를 보였는데, 이것은 알루미늄을 다량 포함하는 코어용 도재가 변형에 대한 저항성이 크다는 것을 의미한다(Table 3, Fig. 3).

IF법에 의한 파괴인성의 계산시는 median crack을 형성해야 하므로 압입하중에 따른 균열형상의 관찰이 요구된다. Evans와 Charles⁽³⁾, Evans⁽²⁷⁾, Lawn등⁽²⁸⁾은 Vickers 입자압입시에 발생하는 median crack에 대한 파괴인성 측정법을 소개하였고, Anstis등⁽⁵⁾은 파괴역학 시편과 압자 압입법의 결과를 비교할 수 있도록 상수를 0.016으로 수정하였으며, Niihara 등⁽¹⁷⁾은 압입하중이 작을 때 형성되는 얇은 반타원형 균열(Palmqvist Crack)에 대해서도 적용이 가능한 파괴인성의 측정시 표면하에 발생한 균열은 Vickers 압흔상과 생성된 균열의 크기를 계속하는 방법에 의해서도 균열형상을 예측할 수 있다. median crack이 발생한 경우에는 식(3)에서 압입하중(P)와 초기 균열길이(c)사이에 $p \propto c^3/2$ 의 관계가 성립하고, Palmqvist crack이 발생한 경우에는 식(4)에서 $p \propto l$ 의 기울기를 검토함으로써 균열형상을 예측할 수 있다⁽⁴⁶⁾.

Fig. 9는 세라믹 재료의 표면에 Vickers 압자를 하였을 때 나타나는 균열형상을 도식적으로 나타낸 것이다. 세라믹 재료의 표면에 압자를 압입하면 압자 끝의 압입부에는 1차적으로 소성영역이 형성되고, 이 소성영역과 탄성영역의 접점에 발생한 인장응력으로 압자의 모서리를 따라서 균열이 형성되며, 파괴인성치에 비해 압입하중이 작을 때에는 얇은 반타원형의 Palmqvist crack이 형성된다(Fig.9(a)). 압입하중이 점차 증가하게 되면 소성영역 하부에 압자의 끝을 따라서 돌연 수직균열(Radial crack)이 발생하며 압자의 대각선 방향의 수직인 2면상에 원형의 median crack이 형성되고, 이것이 최종적으로 잔류응력의 영향을 받아 반원형의 half-penny crack으로 발전한다. 또한 소성역과 탄성역의 역학적 불일치로 인한 잔류응력으로 인해 소성역에 횡방향의 lateral crack이 발생하며, 그 재료의 파괴인성에 비해 압입하중이 큰 경우에는 lateral crack이 시편의 표면을 향하게 되므로 반투명한 도재에서는 균열영역 내에서 clipping현상이 일어난다(16, 29, 30).(Fig. 9(b)). 본 연구에서 도재의 표면에 압자압입시 코어용 알루미늄 도재인 Vita Hi-Ceram과 Vita In-Ceram은 49.0N의 압입하중하에서 Palmqvist crack 양상을 보였으나, 여타의 도재는

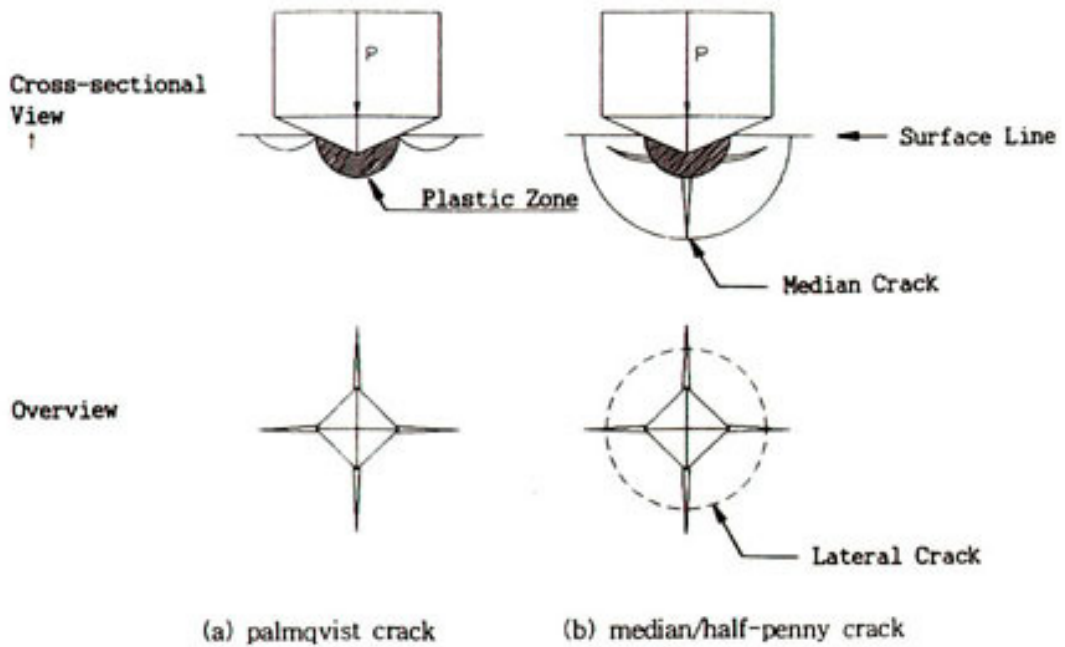


Fig. 9. Schematic illustration of Vickers indentation cracks.

9.8N의 압입하중을 가하였을 때 median/lateral crack 양상이 관찰되었다(Fig. 6-Fig. 8).

IF 법을 적용하여 계산한 치과용 도재의 파괴인성은 0.5-3.0MPa $m^{1/2}$ 으로 보고되고 있다. Morena등⁽⁷⁾은 Ceramco 사의 glass frit에서 파괴인성이 0.80-0.85MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로 나타났으나, lucite 결정을 다량 포함시킨 frit에서는 lucite결정이 균열성장을 억제하여 파괴인성이 1.3 MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로 증가한다고 하였고, Anusa-vice와 Lee⁽⁸⁾는 Vita 장석도재를 836-934 $^{\circ}$ C에서 소성하였을 때 파괴인성이 1.02-1.45 MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로 나타난다고 하였다. 1.02-1.45 MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로 나타난다고 하였다. 또한 Rosenstiel과 Porter^(11, 12)는 도재전장주조관용 도재의 겉보기 파괴인성이 1.86-2.26 MPa $\cdot m^{1/2}$, all ceramic crown

에서 도재의 겉보기 파괴인성이 1.79-2.10 MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로, 하부구조에 의해 지지를 받는 수복물에서 도재의 파괴인성이 증가한다고 하였다. 본 연구에서 도재전장주조관용과 라미네이트용 도재의 파괴인성이 0.91-1.16 MPa $\cdot m^{1/2}$ 로 나타나서, Morena 등⁽⁷⁾, Anusa-vice와 Lee⁽⁸⁾의 결과와 유사한 양상을 보였다. 또한 코어용 알루미늄 도재인 Vita In-Ceram군이 2.562 \pm 0.311 MPa $\cdot m^{1/2}$, Hi-Ceram군이 2.074 \pm 0.255 MPa $\cdot m^{1/2}$ 으로 여타의도재보다 파괴인성이 다소 높게 나타났으며, 통계적 유의성을 검증한 결과 Vita In-Ceram, Vita Hi-Ceram군과 나머지 도재군간에 유의수준=0.01에서 유의한 차이를 보였다 (Table 3, Fig.5).

V. 결론

본 연구는 최근 임상에서 이용되고 있는 치과용 도재의 파괴인성을 측정하기 위해, Knoop 압자압입법에 의해 Young's modulus를 측정한 다음 Vickers 압자압입법을 적용하여 파괴인성을 측정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Young's modulus와 경도는 코어용 알루미늄 도재인 Vita In-Ceram군에서 각각 154.4 ± 49.2 GPa 와 12.60 ± 0.71 GPa로 최대를 보였으며, 나머지 군과 통계학 적으로 유의한 차이를 보였다($P=0.01$).
2. 파괴인성은 Vita In-Ceram군에서 2.562 ± 0.331 MPa · m^{1/2}으로 가장 크고, Vita dur-N군에서 0.908 ± 0.132 MPa · m^{1/2}으로 가장 작게 나타났으며, Vita In-Ceram군과 Vita Hi-Ceram 군간에는 유의수준 $\beta=0.05$ 에서, Vita In-Ceram, Vita Hi-Ceram군과 나머지 군간에는 유의수준 $\beta=0.01$ 에서 유의한 차이를 보였다.
3. 코어용 알루미늄 도재군은 49.0N의 압입하중하에서 Palmqvist crack양상을 보였으나, 나머지 도재군은 9.8N의 압입하중하에서 median crack 양상을 보였다.

참고문헌

1. Irwin, G.R. : Handbuch der physik, Vol.6, Springer Verlage, Berlin, 1958.
2. Lawn, B.R. and Wilshaw, T.R. : Indentation Fracture : principles and application. J. Mater. Sci. 10 : 1049, 1975.
3. Evans, A.G. and Charles, E.A. : Frature toghness determinations by indentation. J. Am. Ceram. Soc., 59 : 371, 1976.
4. Marshall, D.B. and Lawn, B.R. : Residual stress effects in sharp contact cracking J. Mater. Sci., 14 : 2001, 1979.
5. Anstis, G.R., Chantikul, P., Lawn, B.R., and Marshall, D.B. : A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness : I. Crack Measurements. J. Am. Ceram. Soc., 64 : 553, 1981.
6. Marshall, D.B. and Fuller, E.R. : Control-led flaws in ceramics : A comparison of knoop and vickers indentation. J. Am. Ceram. Soc 66 : 127, 1983.
7. Morena, R., Lockweed, P.E., Mackert, J.R., and Fairhurst, C.W. : Fracture toughness and crack-microstructure interaction of a dental porcelain. J. Dent. Res., 63 : 234, Abst. No.573, 1984.
8. Anusavice, KJ. and Lee, R.B. : Effect of firing temperature and water exposure on crack propagation in unglazed porcelain, J.Dent. Res., 68 : 1075, 1989.
9. 박 주미, 배 태성, 송 관엽, 박 찬운 : 치과용 도재의 균열전파 특성과 도재-금속간의 응력분석. 대한치과보철학회지 32 : 47, 1994.
10. Taira, M, Nomura, Y., Wakasa, K, Yamaki, M., and Matruj, A : Studies on fracture toughness of dental ceramics. J. Oral. Re-habil, 17 : 551, 1990.
11. Rosenstiel, S.F and Poter, S.S. : Apparent fracture toughness of all-ceramic crown system. J. Prosthet. Dent. 61 : 185, 1989.
12. Rosenstiel, S.F and Poter, S.S. : Apparent fracture toughness of of all-ceramic crown systems. J. Prosthet. Dent. 62 : 529, 1989.
13. 박 찬운, 배 태성, 이 상돈 : 치과용 라미네이트 도재의 피로파괴에 관한 실험적 연구. 대한치과보철학회지 31 : 461, 1993.
14. Lawn, B.R. and Howes, V.R. : Elastic re-recovery at hardness indentations. J. Mater. Sci. 16 : 2745, 1981.
15. Marshall, D.B., Noma, T. and Evans, A.G. : A simple method for determining elastic-modulus-to hardness ratios using Knoop

- indentation measurements. *Com. Ceram. Soc. C-* 175, 1982.
16. 西田後彦, 安田榮一編著 : セテミックスの 力學的特性 評價. 日刊工業新聞社, 1985.
 17. Niihara, K, Morena, R. and Hasselman, D.P.H., *J. Mater. Sci. Letters* 1 : 13, 1982.
 18. Optec HSP laboratory technique manual. Jeneric/Pentron Inc. Wallingfod, Conn, January, 1988.
 19. Vita Zahnfabrik : Vita Hi-Ceram Working Instructions. Bad Sackingen, Germany, 1988.
 20. Adair, P. J. and Grossman, D. G. : The castable ceramic crown. *Int. J. Perodont. Rest. Dent.* 2 : 33, 1984.
 21. Hobo, S. and Iwata, T. : Castable apatite ceramics as a new biocompatible restorative material. I. Theoretical considerations. *Quintessence Int.* 16 : 135, 1985.
 22. Iijima, H., Hakamazuka, Y., Ito, S. and Hata, Y. : Clinical application and evaluation of Olympus Castable Ceramics(OCC).
 23. Beham, G. : IPS-Empress : A new ceramic technology. Ivoclar-Vivadent Report 6 : 1, 1990.
 24. Probster, L. and Diehl, J. : Slip-casting alumina ceramics for crown and bridge restorations. *Quintessence Int.* 23 : 25, 1992.
 25. Sadoum, M. : All ceramic bridges with the slip-casting technique. Presented at the 7th International Symposium on Ceramics. Paris, September, 1988.
 26. Kase, H.R., Tesk, J.A., and Case, E. D. : Elastic constants of two dental porcelains. *J. Mater. Sci.*, 20 : 534, 1985.
 27. Evans, A.G. : Fracture toughness : The role of indentation techniques. In [Fracture Mechanics Applied to Brittle Materials], Freiman, S.W., ed., ASTM STP 678, p112, 1979.
 28. Lawn, B. R., Evans, A.G., and Marshall, D. B. : Elastic/plastic indentation damage in ceramics. The Median/Radial Crack System, *J. Am. Ceram. Soc.*, 63 : 573, 1980.
 29. Marshall, D. B. : Residual Stress Effects in Shape Contact Cracking, *J. Mat. Sci.*, 13 : 2001, 1979.
 30. Cook, R.F. and Pharr, G. M. : Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics., *J. Am. Ceram. Soc.*, 73 : 787, 1990.

=Abstract=

AN EVALUATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF DENTAL CERAMICS BY INDENTATION FRACTURE METHOD

Seung-Geun Ahn*, D.D.S., Ju-Hyung Lee**, D.D.S., Tae-Sung Bae**, Ph.D.

**Dept. of prosthodontics, School of Dentistry, Chonbuk University*

***Dept. of Dental Materials, School of Dentistry, Chonbuk University*

This study was performed to evaluate the fracture toughness of seven commercially available dental ceramics by indentation fracture method. All specimens were fabricated to the final dimensions of approximately 12mm in diameter 2mm in thickness. The characteristic indentation dimensions of Vickers or Knoop indentation were measured to calculate the fracture toughness values and Young's moduli.

The results obtained were summarized as follows;

1. Young's modulus and Vickers hardness of Vita In-Ceram showed the maximum values of 154.4 ± 49.2 Gpa and 12.60 ± 0.71 Gpa, respectively. Results of Scheff test exhibited the significant difference between Vita In-Ceram group and others($p < 0.01$).
2. Maximum fracture toughness of 2.562 ± 0.37 MPam^{1/2} for Vita In-Ceram and the maximum one of 0.908 ± 0.132 MPam^{1/2} for Vitadur-N were calculated. Results of Scheff test showed the significant difference between Vita In-Ceram group and Vita Hi-Ceram($p < 0.05$) : also between Vita In-Ceram or Vita Hi-Ceram and others($p < 0.01$).
3. The alumina-based core ceramics showed the aspect of Palmqvist crack for the indentation load of 49.0N, but others showed the median/lateral crack for the indentation load of 9.8N.