

활성환경에서 세라믹 수복 재료의 파괴 거동

배태성^{1,*}, 이민호¹, 윤선중²

¹전북대학교 치과대학 치과생체재료학교실 및 생체흡수성소재연구소

²전북대학교 의과대학 정형외과학교실

Fracture behavior of ceramic restorative materials in the active environments

Tae-Sung Bae^{1,}, Min-Ho Lee¹, Sun-Jung Yoon²*

¹*Department of Dental Biomaterials and Institute of Biodegradable Materials,
School of Dentistry, Jeonbuk National University, Jeonju-si, Republic of Korea*

²*Department of Orthopedic Surgery, Jeonbuk National University Medical School,
Jeonju-si, Republic of Korea*

When tensile stress is applied to metal, the fracture occurs after the shape changes due to plastic deformation, and also the crack velocity resulting from defects is very slow, so that the defects do not significantly affect the fracture behavior. Ceramic materials, on the other hand, are brittle and rarely plastic deformation so the stress concentration occurs at the crack tip of the most dominant flaw in the material, so that the crack progresses rapidly and the defect greatly affects the fracture. Therefore, when evaluating the fracture behavior of ceramic materials, a measurement of the fracture toughness is required, considering the effects of the defect. Since ceramic materials have excellent resistance to water and erosion is difficult to occur even by acids or alkalis, their strength is not significantly reduced even after prolonged exposure to these environments. However, in the active environment in which erosion due to stress corrosion proceeds, a problem arises in which the survival life is shortened. If crack growth caused by stress corrosion occurs in the active environment, it is not a problem because the crack growth caused by stress corrosion is very slow when the stress level is low compared to the strength. However, when the level of applied stress level is high compared to the strength, the crack growth is fast and the service life may be greatly reduced, so the use of a ceramic materials having high strengths are required.

Keywords : Flexural strength, Fracture toughness, Slow crack growth

서론

세라믹스(ceramics)라는 용어는 어원적으로는 고대 희랍

어인 kearmos 즉 흙을 구워서 만든 물질이라는 말에 그 어원을 두고 있으며, 도기와 자기를 통칭한 소결체를 의미하는 용어로 쓰이고 있지만 넓은 의미로는 무기재료를 통칭하

Min-Ho Lee (ORCID: 0000-0001-6142-4876)
Sun-Jung Yoon (ORCID: 0000-0001-0002-0003)

*Correspondence: Tae-Sung Bae (ORCID: 0000-0002-8307-4544)
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 54896 Republic of Korea
Affiliation: Department of Dental Biomaterials and Institute of Biodegradable Material, School of Dentistry, Jeonbuk National University, Jeonju-si, Republic of Korea
Tel: +82-63-270-4041, Fax: +82-63-270-4040
E-mail: bts@jbnu.ac.kr

Received: Received: Sep. 08, 2022; Revised: Sep. 29, 2022; Accepted: Sep. 29, 2022

여 세라믹 재료라고 부른다. 금속 재료와 세라믹 재료에 인장응력이 작용할 때의 파괴 거동을 비교해보면, 금속 재료는 소성변형으로 인하여 외부의 형상이 변화된 후 파괴가 일어나고 또한 재료 내의 결함에서 비롯한 균열의 진전속도가 매우 느리기 때문에 미세 결함은 파괴 거동에 크게 영향을 미치지 않는다. 반면 세라믹 재료는 취성이 있고 거의 소성변형이 일어나지 않으므로 재료 내의 가장 취약한 결함부의 균열선단에서는 응력의 집중과 확대가 일어나고 이 확대된 응력이 파괴 한계를 초과하면 균열이 빠르게 진전하여 파괴가 일어나므로 미세 결함은 파괴에 크게 영향을 미친다(1-3). 본 연재에서는 구강 내 세라믹 소결체(포세린, 글라스-세라믹, 알루미나, 지르코니아)의 파괴 특성을 평가하는 방법에 대하여 검토해보고자 한다.

본 론

1. 세라믹 재료의 강도 평가

세라믹과 같은 취성재료의 파괴는 일반적으로 인장응력이 작용하는 가장 취약한 결함부에서 균열이 진전하여 일어나므로 인장강도의 측정이 요구된다. 하지만 인장시험이 용이하지 않기 때문에 인장응력의 발생이 용이한 굴곡시험법이 강도의 측정에 빈번하게 적용되고 있으며, 주로 3점이나 4점 굴곡 시험 및 2축 굴곡시험이 널리 적용되고 있다. 3점이나 4점 굴곡시험은 시편의 폭에 비해서 길이가 길고, 지지점에서 응력집중에 의한 파괴가 일어날 수 있으므로 세라믹 소결체의 굴곡강도의 평가를 위해 종종 2축 굴곡시험이 적용되고 있다(4, 5). 2축 굴곡시험은 중앙 하중점에 최대인장응력이 나타나므로 부적절한 선단의 파괴가 적고, 약간 굽은 시편에 대해서도 용이하게 파괴강도를 측정할 수 있으며, 또한 시편의 크기와 준비절차가 임상에서 쉽게 이루어질 수 있으므로, 치과용 세라믹 재료의 굴곡강도 평가시에 빈번하게 적용되고 있다(3, 6). 2축 굴곡시험은 시편의 지지와 하중을 가하는 방식에 따라 여러 가지 시험 방법이 제안되고 있지만, 일반적으로 동일 원주상의 3위치에서 시편을 지지하고 중앙부에서 하중을 가하는 방식인 ball-on-three-ball 법이 널리 적용되고 있다(7).

세라믹 재료는 분말의 제조와 소결체의 준비 과정에서 다양한 크기의 결함이 자연발생적으로 생성되고 파괴는 가장 취약한 결함부에서 균열이 진전하여 일어나므로 강도의 결과는 분산이 매우 크고 비대칭적인 분포를 보이는 경우가 많으므로 와이블 통계(Weibull statistics)를 이용한 해석이 바람직하다. 실험치로부터 계산된 와이블 계수 m 값이 95% 신뢰한도를 나타내기 위해서는 적어도 30개 이상의 시편에 대한 측정이 필요하다(8, 9).

와이블 통계에서 인장강도 σ 인 재료가 이보다 낮은 응력에서 파괴가 일어날 확률 P 는 식 [1]으로 표시된다.

$$P = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad [1]$$

여기에서, m 은 와이블 계수, σ_0 는 특성강도(characteristic strength)이다. 와이블 통계에서 가장 중요한 변수는 와이블 계수(m)로서 와이블 계수 값이 클수록 평균 값보다 낮은 응력에서 파괴가 일어날 확률이 감소한다(10).

Figure 1은 Weibull 계수 m 과 파괴확률 P 사이의 관계를 나타낸 것이다. Weibull 계수가 5인 재료는 100개의 시료 중에서 수개가 평균치의 60% 이하에서 파괴되지만, Weibull 계수가 10인 재료에서는 수개가 평균치의 80% 이하에서, 그리고 Weibull 계수가 20인 재료는 수개가 평균치의 90%

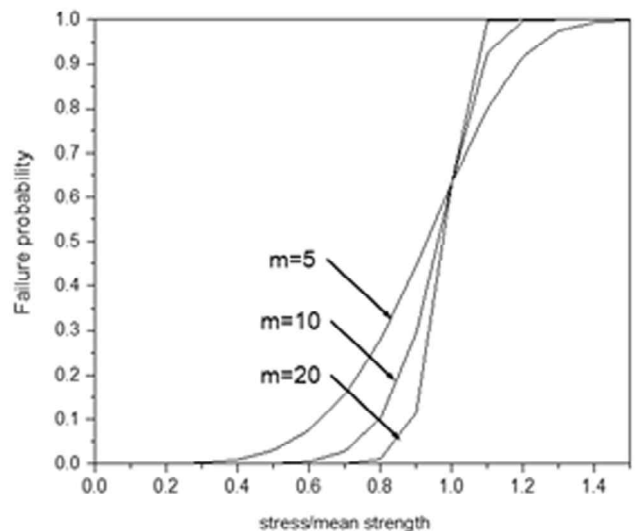


Figure 1. Relationship between the Weibull modulus m and the failure probability P .

이하에서 파괴되는 것을 의미한다. 일반적으로 치과용 세라믹 소결체의 Weibull 계수는 5-20 정도이지만, 공업용 fine ceramics 개발 시에는 Weibull 계수 20 이상을 달성하는 것을 목표로 하고 있다.

2. 세라믹 재료의 파괴인성 평가

세라믹 소결체에 인장응력이 작용할 때 결함이 없는 경우에는 낮은 수준의 응력이 발생하지만, 재료 내에 결함이 있으면, Figure 2에서 볼 수 있는 것과 같이, 결함의 끝에 응력이 집중하며 확대가 일어나고 이 확대된 응력이 한계를 초과할 경우 돌연 불안정 파괴가 일어난다. 균열선단에서 일어나는 응력의 확대 정도는 균열의 형상과 크기에 의존하며, 일반적으로 응력확대계수(K_1)는 작용한 응력(σ)과 균열 길이(a)의 제곱근에 비례하므로 식 [2]로 표시된다(1, 2, 11).

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{a} \quad [2]$$

파괴인성은 인장응력이 작용할 때 재료 내의 가장 취약한 결함부에서 균열이 빠르게 성장하여 불안정 파괴가 일어날 때의 응력확대계수로 정의하고 있다. 파괴인성의 측정 시 금속재료에서는 표준화된 시편을 준비한 다음 피로균열을 삽입하고서 측정하는 방법으로 표준화되어 있다. 하지만, 세라믹 재료에서는 시편에 피로균열을 만드는 것이 용이하지 않기 때문에 여러 가지의 측정법이 적용되고 있지만, 국제적으로 표준화된 방법은 마련되어 있지 않다. 파괴인성의 측정 방법으로는 파괴역학적 시편을 이용하는 방법, 에너지해석법, 압자압입법 등이 적용되고 있다(9). 파괴역학 시편을 이용하는 large crack model에서는 균열의 크기가 미세조직의 입자에 비해서 크기 때문에 균열의 크기 및 성장의 제어가 용이하지 않다. 특히 세라믹 소결체와 같이 반투명한 재료는 투명한 재료와 달리 균열의 관찰이 용이하지 않으므로 균열의 진전을 관찰하지 않고도 파괴인성을 측정하는 방법이 요구되며, 이러한 이유 때문에 압자압입법이 널리 적용되고 있다. 압자압입법은 시편의 모양과 형상에 구애를 받지 않고, 한 개의 작은 시편에 대해서도 반복적인 측정이 가능하므로 치과용 세라믹 재료의 파괴인성 측정에 빈번하게 적용되고 있지만, 이 방법은 시료의 입자크기가 작고 시편이 기포를 적게 포함하여 시편의 표면에서 균열이

잘 발달될 수 있는 경우에 적용이 가능하다(1, 2, 12).

Figure 3은 세라믹 소결체의 표면에 비커스(vickers) 압자를 압입하였을 때 나타나는 균열형상을 나타낸 것이다. 비커스 압자를 압입하면 압자의 압입부에는 1차적으로 소성영역이 생성되고, 이 소성영역과 탄성영역의 접점에 발생한 인장응력으로 인하여 압자의 모서리를 따라서 균열이 생성된다. 파괴인성치에 비교하여 압입하중이 상대적으로 작을 때는 얇은 반타원형의 표면형 균열(radial/palmqvist crack)이 생성되지만(a), 압입하중이 커지면 소성영역의 하부에 수직방향으로 균열이 생성되면서 압자의 대각선 방향의 수직면상에 median crack이 생성되고, 이것이 잔류응력의 영향

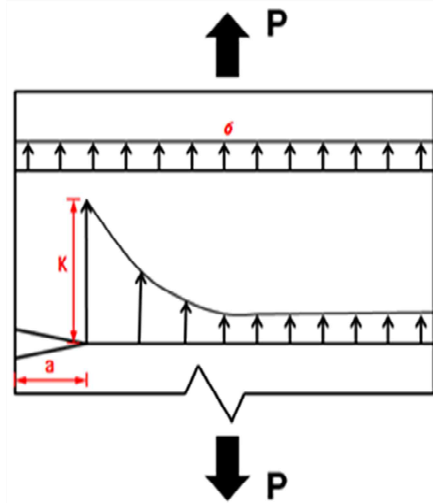


Figure 2. Stress distribution when tensile stresses are applied on ceramic materials.

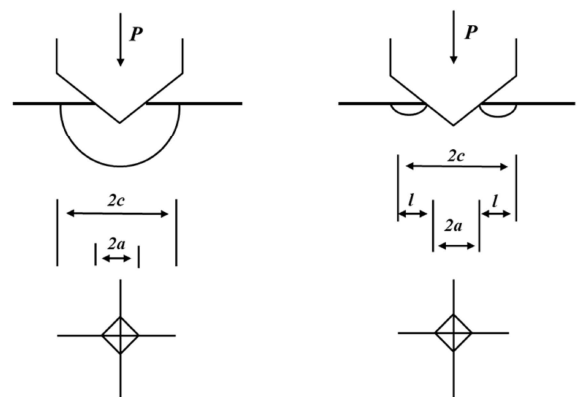


Figure 3. The crack patterns produced when the Vickers indentation is conducted(2).

을 받아서 최종적으로 반원형 균열로 발전한다(b). 또한 소성영역과 탄성영역의 역학적 불일치로 인한 잔류응력의 영향을 받게 되므로 소성영역의 하부에는 횡방향으로 lateral crack이 생성되며, 세라믹 소결체의 반투명성 때문에 균열 영역의 하부에서 chipping 양상이 관찰된다(13, 14).

세라믹 소결체에 인장응력이 작용할 때 얇은 반타원형의 표면형 균열이 생성된 경우 균열의 진전은 매우 느리게 진행된다. 하지만, 균열의 형상이 반원형이 되면 두께 방향으로 빠르게 성장하여 파괴에 이르게 되므로 압자압입법에서는 반원형의 균열이 생성되는 조건에서 파괴인성 값을 계산하고 있다(15). Lawn 등(16)은 비커스 압자의 압입부 직하방에 반원형의 median crack이 생성되는 경우 압입하중과 초기균열길이는 파괴인성 값과 선형적인 비례관계를 보인다고 하였고, Anstis 등(17)은 압흔의 크기와 초기균열길이로부터 파괴인성 값을 계산하는 식 [3]을 제안하였으며, Niihara 등(18)은 세라믹 소결체의 표면에 얇은 표면형 균열인 Palmqvist crack이 생성된 경우에 적용이 가능하도록 파괴인성 계산식을 수정하여 식 [4]를 발표하였다.

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{P}{c^{3/2}} \right) \quad [3]$$

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

여기에서, H_v 는 비커스 경도, E 는 탄성계수, P 는 압입하중, c 는 초기균열길이, a 는 압흔의 대각선 반길이, 그리고 $I = c - a$ 이다. 경험적으로는 c/a 가 2.3-2.5 이하일 때는 표면형 균열에 대한 평가식 [4]를 적용하지만, 그 이상일 때는 반원형 균열에 대한 평가식 [3]을 적용한다.

3. 활성환경에서 표면결함이 세라믹 재료의 파괴에 미치는 영향

세라믹 소결체는 내수성이 뛰어나고 산이나 알카리에 의해서도 침식이 일어나지 어렵기 때문에 이들 환경에 장시간 노출된 경우에도 강도는 크게 저하되지 않는다. 하지만, 이러한 액상의 조건에서 인장응력이 작용하는 활성환경에서는 원자간의 결합이 활성화되어서 응력부식으로 인한

침식이 일어나게 된다. 규산염 세라믹 소결체에서 응력부식이 진행되는 경우 균열선단에서는 규산염의 수화반응 (Figure 4)이 진행되므로 시간이 경과하며 파괴강도의 저하가 일어난다.

활성환경에서 응력부식이 진행될 경우 균열속도(crack velocity) V 와 응력확대계수(stress intensity factor) K_I 의 관계로 도시하면, Figure 5에서 볼 수 있는 것과 같은, 3개의 서로 다른 영역이 나타난다. 영역 I은 균열성장이 균열선단의 응력부식속도에 의해 지배되는 영역이고, 영역 II는 균열이 커져서 균열속도는 부식반응속도보다 수분이 균열선단

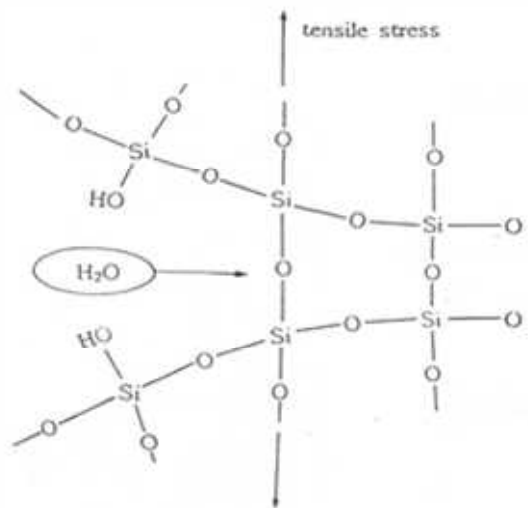


Figure 4. Crack growth due to stress corrosion in silicate ceramic materials.

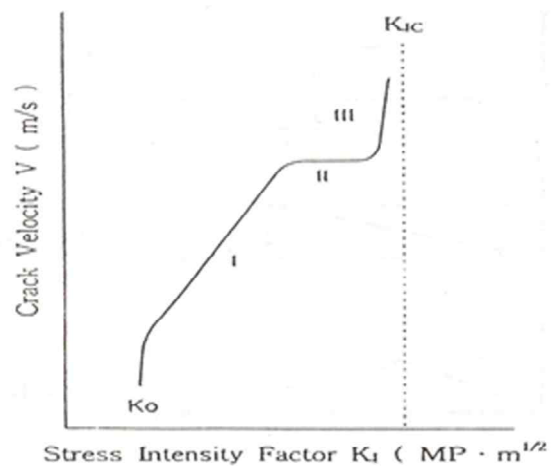


Figure 5. K-V diagram obtained under active environments (2, 19).

으로 이동하는 확산속도에 의해서 지배되는 영역이고, 또한 영역 III은 균열속도가 빨라지면서 응력확대계수 K_I 이 파괴 인성 값인 K_{Ic} 에 도달하며 파괴가 일어나는 영역이다. 영역 I의 응력부식에 의한 균열성장이 세라믹 재료의 피로파괴를 지배하는 경우, 균열속도는, 식 [5]에서 볼 수 있는 것과 같이, 응력확대계수 K_I 의 n 승에 비례하는 관계를 보이게 된다(1, 2, 11, 12, 19).

$$V = \frac{da}{dt} = AK_I^n \quad [5]$$

여기에서, A와 n은 주어진 재료의 강도와 환경에 의존하는 상수로서, n을 균열성장지수(crack growth exponent)라고 부른다.

세라믹 수복물에서 응력부식이 일어나서 균열성장이 시작되면 응력확대계수도 균열의 성장과 더불어서 증가하므로 균열성장이 점차 빨라지면서 파괴에 도달하게 된다. Sherrill과 O'Brien(20)은 세라믹 소결체의 파괴강도는 대기 중에서도 수중에서 더 빠르게 저하한다고 하였고, Southan과 Jorgensen(21)은 수중에서 정적 시험을 한 후 응력의 작용시간이 길어짐에 따라서 파괴강도가 더 크게 저하된다고 하였다. 또한 Smyth와 Magida(22)는 결정상보다 글라스 상에서 응력부식이 일어나기가 더 쉬우므로 활성환경에서 강도가 더 빠르게 저하한다고 하였고, Kim 등(23)은 루사이트 결정을 함유하는 글라스-세라믹인 IPS Empress와 글라스 침투 알루미늄 세라믹인 In-Ceram에 압입하중 49.0 N으로 비커스 압자를 압입하고 활성 조건과 불활성 조건에서 파괴 강도를 측정하였을 때 활성 조건에서 파괴강도가 더 낮게 나타났다고 하였다.

구강 내 활성환경에서는 파괴 가능성이 없는 낮은 수준의

응력이 작용하는 경우에도 응력부식으로 인하여 균열성장이 계속되므로 시간이 경과하며 균열선단의 응력이 증가하고, 이 응력이 어떤 한계를 초과하면 균열이 빠르게 성장하며 불안정 파괴가 일어나며, 이러한 현상을 정적 피로(static fatigue)라 한다. 세라믹 소결체에 정적 응력 σ_s 를 가할 때 파괴까지의 시간 t_s 는 다음의 식 [6]으로 표시할 수 있다(11, 19).

$$t_s = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{V} \quad [6]$$

여기에서, a_i 는 파괴에 가장 민감하게 영향을 미치는 균열의 초기길이이고, a_c 는 식 [2]의 $Y\sigma\sqrt{a}$ 가 K_{Ic} 에 도달했을 때의 임계균열길이이다.

세라믹 소결체에 정적 응력 σ_s 를 가하여 피로 파괴 특성을 평가하는 것이 용이하지 않기 때문에 강도의 변형속도 의존성에 근거하여 일반적으로 일정한 변형속도 조건에서 파괴 강도를 측정 후 피로 파라미터를 추정하는 방법이 널리 적용되고 있다. 세라믹 소결체에 정부하속도 σ' 으로 하중을 가했을 때의 파괴강도 σ_f 와 파괴까지의 시간을 τ 라 하면 σ_f 를 정적으로 가했을 때의 파괴까지의 시간 t 와 τ 사이에는 $t = \frac{\tau}{n+1}$ 의 관계가 성립하므로 동적 피로시험에서 얻은 결과를 이용하여 하중이 정적으로 작용하는 경우의 수명을 예측해 볼 수 있다.

활성환경에서 응력부식이 일어날 경우 균열속도 V와 응력 확대계수 K_I 사이에 식 [4]의 관계가 성립한다. n 값은 일반적으로 금속재료의 경우에는 약 4 정도의 값을 갖지만, 세라믹 재료에서는 10-20 정도의 큰 값을 갖는다. 금속재료와 세라믹 재료의 불활성 강도가 동일한 조건에서 작용력과 균열속

Table 1. The effect of stress ratio on the crack growth rate

Stress Ratio σ_1/σ_2	Crack Growth Rate		
	Metal (n=4)	Ceramics (n=10~20)	
	$(\sigma_1/\sigma_2)^4$	$(\sigma_1/\sigma_2)^{10}$	$(\sigma_1/\sigma_2)^{20}$
2.0	1.6×10^1	1.0×10^3	1.0×10^6
0.5	0.6×10^{-1}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-6}

도 사이의 관계를 살펴보겠다. 작용력이 2배가 되면 균열속도는 금속재료에서는 16배 증가하지만, 세라믹 재료에서는 1,000-1,000,000배 증가하므로 내구수명이 크게 단축된다. 반대로 작용력이 1/2로 감소하면 균열속도는 역으로 감소하므로 내구수명은 크게 길어진다. 따라서 세라믹 소결체의 강도가 높고 작용력의 수준이 낮을 경우 균열속도는 크게 저하될 것이므로 금속재료에 비해서 파괴가 일어나기 어렵게 된다.

세라믹 소결체의 파괴는 인장응력이 작용하는 상태에서 균열이 진전하여 일어나므로 파괴강도를 높이기 위해서 여러 가지의 방법이 고려되고 있다. 용융상태에서 급냉하거나 이온교환 처리를 하거나 하여서 표면에 잔류 압축응력을 발생시키는 방법, 고인성의 세라믹 재료를 기질 내에 분산시키거나 열처리에 의하여 기질 내에 다수의 미세 결정상을 생성하여 균열의 굴절, 굴곡을 유도하는 방법, 분산된 세라믹 입자의 상변태에 의한 체적팽창으로 기질 내에 압축응력을 발생시키는 방법 등이 적용되고 있다(24).

활성환경에서 세라믹 소결체에 인장응력이 작용하면 표면의 미세 결함부에서는 응력부식으로 인하여 지속적인 균열성장이 일어나므로 시간이 경과하며 파괴강도가 저하한다(20, 21). 세라믹 소결체 표면의 결함이 파괴강도에 미치는 영향에 관하여, Dabbs 등(25)은 압입하중이 radial crack이 형성되는 한계를 초과하는 경우 파괴강도가 급격히 감소한다고 하였고, Evans(26), Rice(27, 28)는 결함의 크기

가 200 μm 이하인 경우에도 파괴강도의 저하를 초래할 수 있다고 하였다. Rice 등(29), Quinn(30)은 세라믹 소결체 표면의 얇은 반타원형의 표면형 결함부에 인장응력이 작용하는 경우 초기에 균열의 성장은 느리게 진행되지만 반원형으로 성장하면 이 시점으로부터 균열의 성장이 빠르게 가속되어 방사상으로 성장하여서 파괴에 도달하며, 파면에서는 균열의 진원지를 중심으로 하여 거울영역(mirror region), 안개영역(mist region), 깃털영역(hackle region) 및 거시적 균열가지 등의 특징적인 영역이 나타난다고 하였다(Figure 6). 글라스의 경우에는 거울영역이 매우 평편하지만 다결정 세라믹의 경우에는 거울영역의 표면이 거칠고 입자 질감을 갖는다(1). Kim 등(23)은 IPS Empress와 In-Ceram Alumina에 압입하중 49.0 N으로 비커스 압자를 압입하고서 정적 및 동적 하중을 가하였을 때 루사이트 함유 IPS Empress의 경우에는 radial crack 하부에서 비교적 매끈한 파면이 관찰되었지만, 글라스 침투 알루미늄 세라믹인 In-Ceram의 경우에는 알루미늄 입자에 의한 균열의 굴곡으로 인하여 비교적 거친 파면이 관찰되었다고 하였다.

맺음말

치아가 상실된 경우 보철치료는 형태적 및 기능적 수복을 중심으로 이루어져 왔지만 수복물에 대한 환자들의 심미적

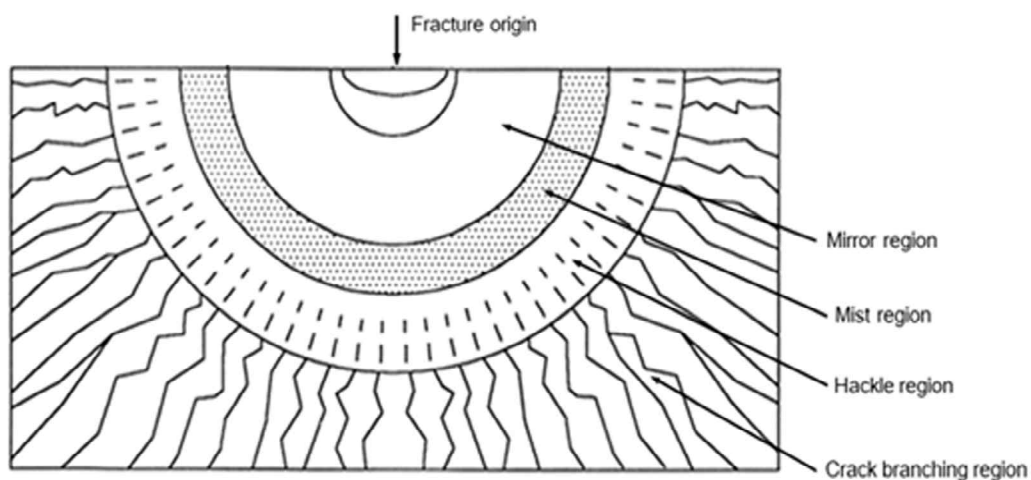


Figure 6. Schematic of the fracture surface when the tensile stresses are applied in an active environments(1, 30).

요구가 증가하며 색상과 반투명성이 자연치와 유사한 세라믹 재료에 대한 관심이 증가하고 있다. 세라믹 소결체(포세린, 글라스-세라믹, 알루미늄, 지르코니아)는 내수성이 뛰어나고 산이나 알칼리에 의해서도 침식이 일어나기 어려우므로 이들 환경에 장시간 노출된 경우에도 강도는 그다지 크게 변하지 않지만 활성화환경에서는 응력부식에 의한 침식을 수반하므로 기대수명이 단축되는 문제가 발생한다. 세라믹 재료는 균열성장지수 n 값이 10-20에 달하므로 강도에 비하여 작용력의 수준이 낮은 경우에는 응력부식에 의한 균열속도가 매우 느리므로 문제가 되지 않지만, 반대로 강도에 비하여 작용력의 수준이 높은 경우에는 균열속도가 빨라서 내구수명이 크게 저하될 수 있으므로 강도가 높은 수복재료 사용이 요구된다.

참고문헌

- William D, Callister Jr, Rethwisch DG. 박인규, 이재갑, 김용석 공역. 재료과학과 공학. 10 ed, (주)시스마프레스 2022;483-7.
- 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 1985;80-4.
- Ban S, Anusavice KJ. Influence of test method on failure stress of brittle dental materials. J Dent Res 1990;69:1791-9.
- Marshall DB. All improved biaxial flexure test for ceramics. Am Ceram Soc Bull 1980;59:551-3.
- Shetty DK, Rosenfield Ar, Duckworth WH, Held PR. A biaxial flexure test for evaluating ceramic strength. J Am Ceram Soc 1983;66:36-42.
- Wachtman JR Jr, Capps W, Mandel J, Biaxial flexure test of ceramic substrates. J Mater 1972;7:188-94.
- Shetty DK, Rosenfield AR, Duckworth WH, Held PR. A bi-axial flexure test for evaluating ceramic strength. J Am Ceram Soc 1983;66:36-42.
- Anusavice KJ, Shen C, Vermost B, Chow B. Strengthening of porcelain by ion exchange subsequent to thermal tempering. Dent Mater 1992;3:149-52.
- McCabe JF, Walls AWG. The treatment of results for tensile bond strength testing. J Dent 1991;14:165-8.
- Ban S, Haserawa J, Anusavice KJ. Effect of loading conditions on bi-axial flexure strength of dental cements. Dent Mater 1992;8:100-4.
- Davidge RW, McLaren JR, Tappin G. Strength-probability-time (STP) relationships in ceramics. J Mater Sci 1973;8:1699-705.
- 배성인, 한민구. 파괴역학시험법: 파괴인성의 측정법. 원창출판사 1992;73-127.
- Marshall DB, Lawn BR. Residual stress effects in sharp-contact cracking. Part 1. Indentation fracture mechanics. J Mater Sci 1979;14 2001-12.
- Cook RF, Pharr GM. Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics. J Am Ceram Soc 1990;73:787-817.
- Evans AG, Charles EA. Fracture toughness determinations by indentation. J Am Ceram Soc 1976;59:371-2.
- Lawn BR, Evans AG, Marshall DB(1980). Elastic/plastic indentation damage in ceramics. Teh Mddian/Radial Crack System. J Am Ceram Soc 1980;63:574-81.
- Anstis GR, Chantikul P, Lawn BR, Marshall DB. A critical evaluation of indentation techniques for measuring fracture toughness: I. Direct crack measurements. J Am Ceram Soc 1981;64:533-8.
- Niihara K, Morena R, Hasselman DPH, Evaluation of K_{Ic} of brittle solids by the indentation method with low crack-to-indent ratios. J Mater Sci Letters 1982;1:13-6.
- 이준근. 세라믹스의 기계적 특성. 반도출판사 1994;84-7.
- Sherrill CA, O'Brien WJ. Transverse strength of aluminous and feldspathic porcelain. J Dent Res 1974; 53:683-90.
- Southan DR, Jorgensen KD. The endurance limit of dental porcelain. Aust Dent J 1974;19:7-11.
- Smyth KK, Magida MB. Dyanmic fatigue of a machinable glass- ceramic. J Amer Ceram Soc 1983;66: 500-5.

23. Kim HS, Choi KH, Chung HW, Won DH, Lee MH, Bae TS. Microstructural aspects of crack propagation in all-ceramic materials. *J of KOSOMBE* 1988;19:433-40.
24. Seghi RR, Sorensen JA. Relative flexural strength of six new ceramic materials. *Int J Prosth* 1995;8:239-46.
25. Dabbs TB, Marshall DB, Lawn BR. Flaw generation by indentation in glass fibers. *J Am Ceram Soc* 1980;63:224-5.
26. Evans AG. Structural reliability, A processing-dependence phenomenon. *J Am Ceram Soc* 1982;65:127-37.
27. Rice RW. Processing induced sources of mechanical failure in ceramics, In Palmour H, Davis R, Hare T(eds), *Processing of Crystalline ceramics*. New York : Plenum Press 1978; 303-19.
28. Rice RW. Failure initiation in ceramics : Challenges to NDE and processing. In Sorrell CC, Ben-Nissan B(eds), *Materials Science Forum*. Vol 34-36, Ceramic Developements, Switzerland : Trans Tech Publications 1988;1057-64.
29. Rice RW, Grace WR and Co. Perspective on Fractography. In Varner JR, Frechette VD(eds), *Fractography of Glass and Ceramics*. Vol 22, *Advances in Ceramics* 1988;3-56.
30. Quinn GD. *Fractography of ceramics and glasses*. National Institute of Standards and Technology. 2016; 3-1-3-73.

활성환경에서 세라믹 수복 재료의 파괴 거동

배태성^{1,*}, 이민호¹, 윤선중²

¹전북대학교 치과대학 치과생체재료학교실 및 생체흡수성소재연구소

²전북대학교 의과대학 정형외과학교실

금속 재료와 세라믹 재료에 인장응력이 작용할 때의 파괴 거동을 비교해보면, 금속 재료는 소성변형으로 인하여 외부의 형상이 변화된 후 파절이 일어나고 또한 재료 내의 결함에서 비롯된 균열의 진전속도가 매우 느리므로 미세 결함은 파절 거동에 크게 영향을 미치지 않는다. 반면 세라믹 재료는 취성이 있고 거의 소성변형이 일어나지 않으므로 재료 내의 가장 취약한 결함부의 균열선단에서 응력의 집중과 확대가 일어나고 이 확대된 응력이 파괴 한계를 초과하면 균열이 빠르게 진전하여 파괴가 일어나므로 미세 결함이 파괴에 크게 영향을 미친다. 따라서 세라믹 소결체(포세린, 글라스-세라믹, 알루미나, 지르코니아)의 파괴 특성 평가 시는 결함의 영향을 고려하는 파괴인성의 측정이 요구된다. 세라믹 소결체는 내수성이 뛰어나고 산이나 알칼리에 의해서도 침식이 일어나지 어렵기 때문에 이들 환경에 장시간 노출된 경우에도 강도는 그다지 크게 저하되지 않는다. 하지만, 이러한 액상의 조건에서 인장응력이 작용하는 활성환경에서는 응력부식에 의한 침식이 일어나므로 시간이 경과하며 강도가 저하하여 기대수명이 단축되는 문제가 발생한다. 활성환경에서 응력부식에 의한 균열성장이 일어나는 경우에 강도에 비하여 작용력의 수준이 낮은 경우에는 응력부식에 의한 균열성장이 느리므로 문제가 되지 않지만, 반대로 강도에 비하여 작용력의 수준이 높은 경우에는 균열속도가 빨라서 내구수명이 크게 저하될 수 있으므로 강도가 높은 수복재료의 사용이 요구된다.

색인단어 : 굴곡강도, 파괴인성, 저속균열성장
