

치아용 세라믹스에서의 접촉피로 및 강도저하

점연길, 이수영*, 최심철**

창원대학교 공과대학 세라믹공학과, 창원, 641-773

*필 치과, 안양, 430-080

**한양대학교 응용화학공학부 세라믹공학과, 서울, 133-791

(1999년 5월 18일 접수)

Contact fatigue and strength degradation in dental ceramics

Yeon-Gil Jung, Soo-Young Lee* and Sung-Churl Choi**

Department of Ceram. Sci. Eng. Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

*Phil Dental Clinic, Anyang 430-080, Korea

**Department of Ceram. Sci. Eng. Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received May 18, 1999)

요 약 치아용 대체재료로 사용되고 있는 세 가지의 세라믹스, 장석질 자기, 운모를 함유한 유리-세라믹 및 유리침윤 알루미나에 대한 접촉피로를 실제 치아의 접촉상황과 유사한 구형압자를 이용한 헤르지안 압입시험법으로 물에서 수행하였으며, 각 재료에서의 접촉손상이 강도에 미치는 영향을 고찰하였다. 초기의 손상형태는 각 재료가 갖는 미세구조에 의존하여 나타났으며, 장석질 자기는 취성거동을 나타내는 cone 형태의 균열이, 운모를 함유한 유리-세라믹은 준-소성 변형 거동을 나타내는 변형이, 그리고 유리침윤 알루미나는 두 재료의 중간거동을 나타내었다. 그러나 반복하중의 수($n = 1 \sim n = 10^6$)가 증가됨에 따라 모든 재료에서 급격한 강도저하를 나타내었으며, 파괴는 접촉피로에 의해 형성된 손상에서 일어났다. 일정하중(200 N, 500 N 및 1000 N)에서 반복하중의 수가 증가됨에 따라 두 번의 강도저하가 일어났으며, 첫 번째의 강도저하는 cone 형태의 균열이 주 요인으로 작용되었으며, 두 번째 강도저하는 반복하중에 따른 radial 형태의 균열에 의해 일어났다. 이러한 radial 형태의 균열발생은 각 재료에서 급격한 강도저하를 가져왔으며, 계속적인 반복하중으로 재료의 파괴를 유발시켰다. 반복하중의 수를 고정시킨 후 압입하중의 변화에 따른 강도저하에 대한 고찰을 통해 장석질 자기가 접촉피로에 대한 손상내구성을 갖음을 알 수 있었다.

Abstract Hertzian indentation tests with spherical indenters in water were conducted to examine the contact fatigue in three dental ceramics, such as feldspathic porcelain, micaceous glass-ceramic (MGC) and glass-infiltrated alumina, which was used as dental restorations, and evaluated the effect of contact damage on strength. Initial damage was dependent on microstructure, showing cone cracks of brittle behavior in the feldspathic porcelain and deformation of quasi-plastic behavior in the MGC, with an intermediate case in the glass-infiltrated alumina. However, as increasing the number of cyclic loading ($n = 1 \sim n = 10^6$) all materials showed an abrupt strength degradation, at which fracture was originated from damage in the contact fatigue. There were two strength degradation with increasing the number of cyclic loading in specific loads (200 N, 500 N, 1000 N): first was from the cone cracks, and second was from the radial cracks created by cyclic loading. The radial cracks, once formed, led to rapid degradation in strength properties, finally the material was failed at the high number of cyclic loading. Strength degradation with indentation load at fixed number of cyclic loading indicated that the feldspathic porcelain should be highly damage tolerant to the contact fatigue.

1. 서 론

세라믹스는 화학적 안정성 및 우수한 내마모성에 기인하여 치아용 대체재료로 사용되고 있으며, 새로운 응용성을 개발하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[1-3]. 특히 금속에 porcelain을 코팅시킨 crown은 세라믹스로 사용되는

porcelain이 실제 치아인 enamel과 유사한 특성을 갖고 있다는 장점을 이용하여 치아용 대체재료로 사용되고 있다[3]. 그러나 이러한 다양한 장점에도 불구하고 모든 세라믹스 crown은 “입안의 조건” 즉, 임상적인 실험에서 수년 후에는 모든 세라믹스 crown은 파괴된다고 보고되고 있다[2-7]. 이러한 세라믹스에서의 파괴는 인장응력 하에서 균열

들의 “느린 성장(slow growth)”에 의해 일어나며, 특히 실제 “입안의 조건”과 유사한 물의 환경에서는 “느린 성장”에 의한 세라믹스의 파괴현상이 뚜렷하게 된다[8]. 또한 반복하중(cyclic loading) 하에서는 이러한 환경의 영향이 세라믹스의 파괴에 지배적으로 작용하게 된다[9-11].

최근에는 인장응력에 의한 세라믹스의 파괴에 대한 연구와 함께 실제 “입안의 조건”에서 세라믹스의 파괴가 압축응력에 영향을 받는다는 것이 보고되고 있으며[12-14] 이러한 것은 구형의 압자를 이용한 Hertzian 압입시험법으로 잘 관찰할 수 있다[15-18]. Hertzian 압입시험에서 접촉하중 시 형성되는 손상형태는 세라믹스의 미세구조에 영향을 받게 된다. 균일한 미세구조 즉, 미세한 입자들로 이루어진 미세구조에서는 세라믹스 고유의 취성거동(brittle behavior)을 관찰할 수 있으며, Hertzian 압입시험 시 재료의 표면에서는 ring 형태의 균열이 형성되며, 재료의 내부에서는 cone 형태의 균열이 형성된다[15-17]. 한편 불균일한 미세구조, 즉 큰 입자들로 이루어진 미세구조에서는 전단응력(shear stress)에 의한 미세균열(micro-crack)들이 재료내부에서 형성되며, 이러한 미세균열들은 준-소성 변형(quasi-plastic deformation)과 같이 나타내게 되고, 표면에서는 균열의 형성없이 접촉하중에 의한 압흔자국만이 관찰된다[18].

본 연구에서는 치아용 대체재료로 응용이 되고 있거나 용도가 개발되고 있는 세라믹스의 접촉피로에 대한 연구를 수행하였으며, 이때 실제 응용조건과 유사한 상황(물의 환경 및 구형압자를 사용)에서 일정한 하중을 반복적으로 가하였다. 이러한 결과로서 전형적인 취성특성을 갖는 치아용 세라믹스와 준-소성 특성을 갖는 치아용 세라믹스에 대한 접촉피로 특성을 관찰하여, 이를 접촉피로에 의해 형성된 접촉손상이 강도저하에 미치는 영향을 고찰하였다. Hertzian 압입시험법은 기존의 일반적인 시험방법보다 실제의 응용환경에서 치아가 맞이하게 되는 접촉상황을 잘 설명할 수 있으므로, 실제 응용성을 고려하여 치아용 세라믹스가 반복하중 하에서 나타내는 손상 내구성 및 수명예측에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 재료선택 및 특성

본 연구에서는 치아용 대체재료로 사용되고 있거나 응용이 고려되고 있는 다양한 세라믹스 중 장석질 자기(Feldspathic Porcelain; Vita Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany), 운모가 함유된 유리-세라믹스(Micaceous glass-ceramics; 이하 MGC로 약함, Corning Inc., Corning,

NY, U.S.A) 및 유리침윤 알루미늄(Vita Zahnfabrik, Bad Sackingen, Germany)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 재료들은 crown용 및 inlay와 onlay용 대체재료로서 상업적으로 시판되고 있는 재료들이며, 각각의 제조방법에 대해서는 이전에 발표된 논문에서 자세히 설명되었다[19, 20] 모든 시험편은 10 μm 의 diamond wheel을 사용하여 양면을 평행하게 만든 후, 주사전자현미경을 이용한 미세구조 관찰, 접촉피로시험 및 이에 따른 강도시험을 위해 한 면을 1 μm 까지 diamond paste로 연마하였으며, 3 \times 4 \times 25 mm의 bar 시험편으로 제작하여 접촉피로시험 및 강도시험을 수행하였다.

2.2. 접촉피로 시험

치아용 세라믹스의 피로특성을 고찰하기 위해 Hertzian 압입시험법을 이용하였으며, 일정한 하중(P)으로 반복하중을 가하는 방법 및 일정한 반복하중 수(n)에서 압입하중을 변하시키는 방법을 통해 접촉피로 특성을 고찰하였다. 압자로는 WC(tungsten carbide)의 구형압자를 사용하여 압자의 피로를 최소화시키고자 하였으며, 실제 치아에서 접촉되는 반경(cuspal radii; 2~4 mm)를 고려하여 구형압자의 크기를 $r = 3.18 \text{ mm}$ 로 선택하였다[5]. Hertzian 압입시험을 위한 상세한 설명은 역시 이전에 발표된 논문들에서 자세히 언급되었으며[19-21], 본 연구에서도 이들에 따라 수행하였다.

피로시험은 10 Hz의 주기로 반복적으로 하중을 가하였으며, 가한 하중은 재료의 특성에 따라 200 N에서 최고 2500 N까지 변화시켰다. 또한 각 하중(200 N, 500 N 및 1000 N)에서 재료의 수명예측을 위해 강도저하 및 재료의 파괴가 일어나는 반복하중 수(n)까지 수행하였으며, 또한 반복하중 수(n)를 고정시킨 후 반복하중 도중 재료의 파괴가 일어나지 않는 하중까지 압입하중을 변화시켜 이에 따른 재료의 접촉피로 특성을 고찰하였다. Fig. 1에서 접촉피로에 대한 자세한 모식도를 나타내었다. P_{max} 는 목적으로 하는 접촉하중을 의미하며, P_{min} 은 시험도중 구형압자가 일정한 접촉점을 벗어나는 것을 방지하기 위해 설정된 하중으로 통상 20 N 이하로 주어졌다. 모든 접촉피로 시험은 접촉되는 부분이 종류수에 잠긴상태에서 수행되었으며, 주어진 각 하중에 대해 최소한 5개 이상의 시험편으로 접촉피로 특성을 관찰하였다. 접촉피로 시험에 의해 표면에 형성된 손상형태를 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 표면 및 표면아래에서의 균열 형성에 대한 고찰을 위해 투과 광학현미경을 이용하였다. 투과 광학현미경에서 사용된 시험편은 투명성을 부여하기 위해 접촉피로 시험이 끝난 시험편의 뒷면을 10 μm diamond wheel을 사용하여 0.5~1 mm의 두께까지 만든 후, 최종적으로 1 μm 로 연마하여 준

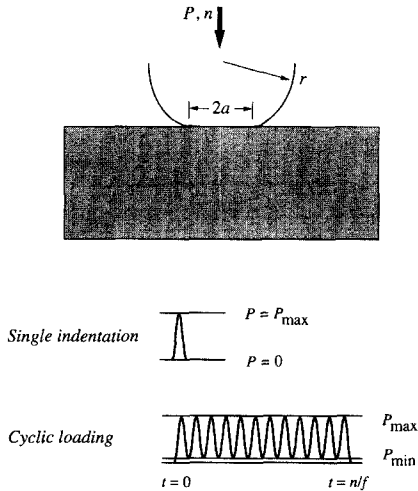


Fig. 1. Schematic of Hertzian contact test, with sphere of radius r and n cycles at load P over contact radius a . Tests are conducted in single indentation and cyclic loading at frequency f .

비하였다.

강도측정은 피로시험을 행한 면을 인장응력이 형성되는 면으로 하여 4-point 굽힘시험으로 수행하였다. 강도측정 시의 수분에 의한 영향을 배제시키기 위해 물에서 Hertzian 압입시험을 행한 시험편을 건조시킨 후 silicon oil을 압흔 자리에 떨어뜨렸으며, 빠른 파괴로 강도를 측정하였다. 재료의 접촉피로 특성의 고찰을 위해 하중을 고정시킨 후 접촉피로시험을 행하여 강도저하를 관찰하는 것과 반복하중 수(n)를 고정한 후 하중을 변화시켜서 강도저하를 관찰하는 두 가지를 수행하였으며, 각각에서 강도저하가 일어나는 하중 및 반복하중 수(n)를 조사하여 치아용 세라믹스에 대한 접촉피로 특성 및 손상 내구성을 고찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에서는 본 연구에서 사용된 각 시험편의 미세구조를 나타내었다. 장석질 자기(Fig. 2A)에서는 유리상의 기지와 강도증진을 위해 첨가된 sanidine 결정상 입자로 이루어져 있으며, 결정상의 입자크기는 약 1~7 μm 의 범위로 분포되어 있다. MGC(Fig. 2B)에서는 유리상에서 석영이 판상의 형태로 존재하고 있으며, 전체 부피분율은 약 60 vol%이고, 판상의 두께 및 지름은 각각 약 0.7 μm 와 3 μm 정도이다. 유리침윤 알루미늄나(Fig. 2C)에서는 어두운 부분이 알루미늄나 입자이며 밝은 부분을 침윤된 유리상(lanthanum-aluminosilicate glass; $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$)이다. 침윤된 유리상의 부피분율은 약 30 vol%이며,

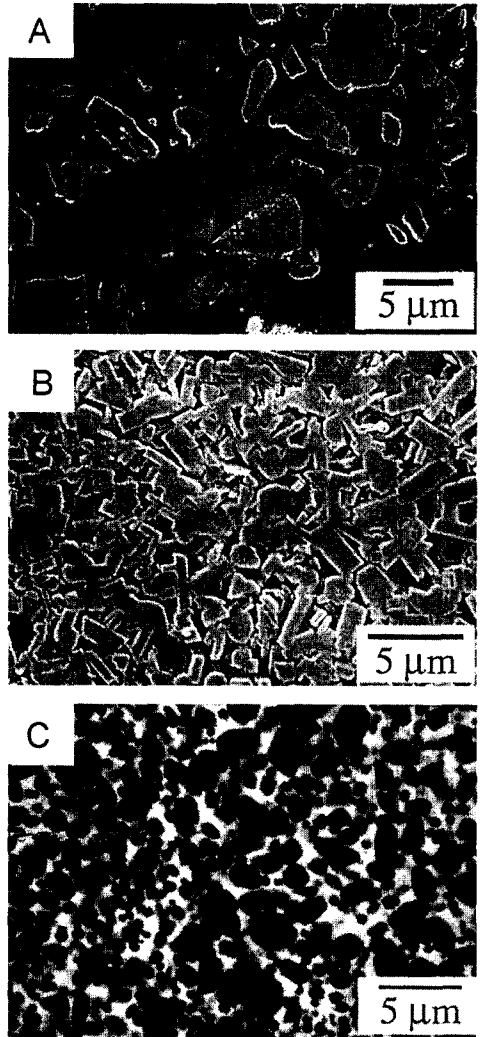


Fig. 2. Scanning electron micrographs showing microstructure of dental ceramics: (A) feldspathic porcelain; (B) micaceous glass-ceramic; and (C) glass-infiltrated alumina.

가압성형으로 초기의 porous한 시험편을 제조한 후 유리상을 침윤시켜 제조되었다[19].

반복하중에 따른 접촉피로가 재료의 강도저하에 미치는 영향을 각각의 재료에 대해 Figs. 3-5에서 나타내었다. 모든 재료에 있어서 반복하중 수(n)가 증가함에 따라 강도저하를 나타내었으며, 파괴원점이 전이되는 반복하중 수(n)에서는 급격한 강도저하 현상이 나타났다. 그리고 안이 채워진 표시(원, 네모, 세모 및 마름모)는 파괴가 압흔에서 일어났다는 것을 의미하며, 안이 비워진 것은 압흔자리가 아닌 자연적인 재료결합에서 파괴가 일어난 것을 의미한다. Fig. 3에서는 장석질 자기에 대한 강도변화를 나타내었으며,

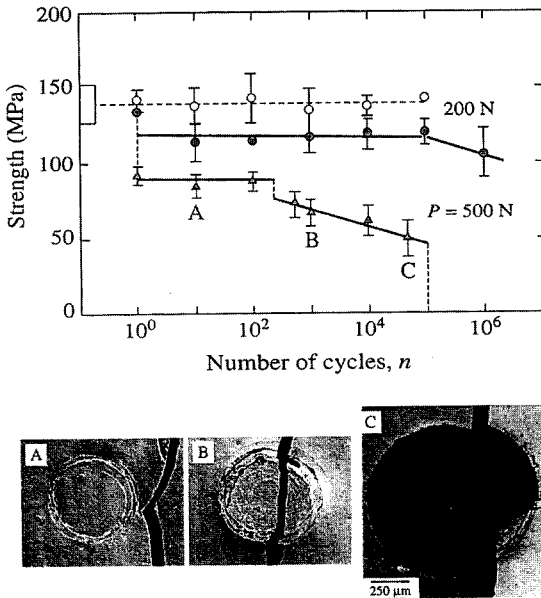


Fig. 3. Strength as a function of number of cyclic loading n for feldspathic porcelain. Data points are means and standard deviations, minimum 5 specimens per point. Unfilled symbols indicate failures from natural flaws, filled symbols failures from indentation sites. Open box at left axis represents strengths of polished, unindented specimens. Micrographs show surface failure sites at point A, B and C marked on plot.

이때 접촉하중은 200 N과 500 N으로 하였으며, 이러한 접촉하중은 한번의 압입(single indentation)으로 강도변화가 나타나는 하중과 나타나지 하중으로 설정하였다. 접촉하중 200 N으로 접촉피로 시험을 한 경우에는 $n = 10^6$ 까지 강도의 저하가 나타나지 않고 있으며, 단지 파괴가 압흔자리 또는 자연적인 재료결합에서 일어나는 지의 여부에 따라 20~30%의 강도값의 저하를 나타내고 있다. 결국 낮은 접촉하중에서는 파괴원점이 접촉손상과 자연적인 재료결합에 의해 경쟁적으로 일어나며, 이러한 결과로 낮은 접촉하중에서는 단지 표면에서의 ring 균열만을 형성시키며 더 이상의 균열진행을 일으키지 못한다는 것을 알 수 있다. 그러나 반복하중 수(n)가 계속적으로 증가할 경우 $n = 10^6$ 에서 강도저하가 시작됨을 알 수 있다. 한편 높은 접촉하중(500 N)에서는 한번의 접촉으로도 강도저하가 급격히 일어났으며, 반복하중 수(n)가 증가됨에 따라 두 번째의 강도저하를 관찰되었다. 이러한 두 번째의 강도저하는 연속적으로 계속되며, $n = 5 \times 10^5$ 에서는 초기 강도값의 약 35% 정도의 강도값을 나타내었으며 계속적인 반복하중에서는 재료의 파괴를 가져오게 됨을 알 수 있었다. 또한 이러한 강도저하는 파괴원점과 연관성을 가지고 있으며, Fig. 3A에

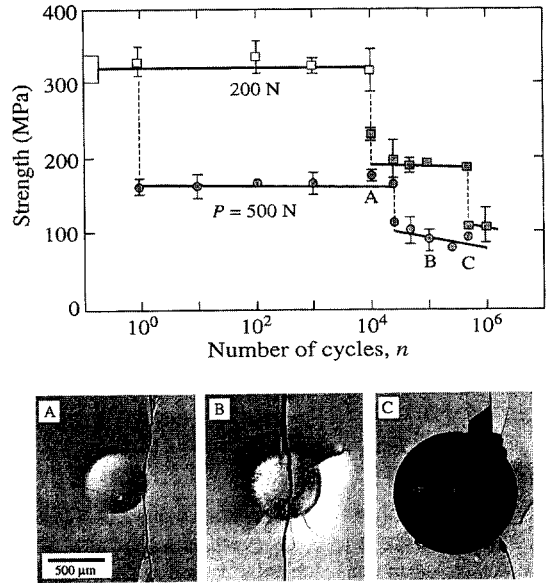


Fig. 4. Strength as a function of number of cyclic loading n for micaceous glass-ceramic. Data points are means and standard deviations, minimum 5 specimens per point. Unfilled symbols indicate failures from natural flaws, filled symbols failures from indentation sites. Open box at left axis represents strengths of polished, unindented specimens. Micrographs show surface failure sites at point A, B and C marked on plot.

서 나타낸 것과 같이 파괴원점이 접촉점의 바깥에 위치하고 있으며, 이러한 것은 전형적인 cone 균열에 의한 취성 파괴를 의미한다[15-17]. 두 번째의 강도저하가 일어난 이후인 Fig. 3B에서는 접촉피로에 의한 보다 심각한 접촉손상을 관찰할 수 있으며, 파괴원점은 접촉점의 안쪽에 존재함을 알 수 있다. 반복하중 수(n)의 증가에 따라 이러한 접촉손상의 크기는 증가되며, 표면에서 재료의 탈락, 즉 fretting 현상을 관찰할 수 있다[22]. 역시 파괴원점은 접촉점의 안쪽에 위치하고 있다.

MGC에서 접촉피로에 따른 강도변화를 장식질 자기와 같은 접촉하중(200 N 및 500 N)에 대해 관찰하여 Fig. 4에서 나타내었으며, 장식질 자기와는 달리 일정한 반복하중 수(n)에서 급격한 강도저하를 보인다. 접촉하중 200 N으로 반복하중을 가한 후의 강도변화는 $n = 10^4$ 까지 나타나지 않았으며(파괴원점은 자연적인 재료결합), 이후에는 급격한 강도저하를 나타내면서 Fig. 4A와 같이 파괴원점이 접촉점의 바깥쪽으로 이동되었다. 계속적인 반복하중 수(n)의 증가에 따라 $n = 5 \times 10^5$ 에서 두 번째의 급격한 강도변화를 나타내었으며, 파괴원점은 다시 접촉점 안쪽으로 이동되었다. 접촉하중이 500 N인 경우에는 장식질 자기와 같이 한번의 압입으로 급격한 강도저하를 나타내었으며, $n = 2.5 \times$

10⁴에서 두 번째 강도저하를 보인 후 강도는 급격히 저하되었다. 최종적인 강도값은 최초의 강도값의 약 25% 정도를 유지하게 되며, $n = 10^6$ 이상에서는 반복하중을 가하는 도중 재료의 파괴를 맞이하게 된다. 한편 작은 반복하중 수(n)에서는 미세구조의 영향에 의해 준-소성 변형이 나타났으며, 반복하중 수(n)를 증가시킴에 따라 접촉점 바깥쪽에서 cone 형태의 균열도 형성되어 첫 번째 가오저하의 요인으로 작용됨을 알 수 있었고, 장식질 자기(Fig. 3B)에서는 잘 관찰되지 않았던 radial 형태의 균열이 형성되어 두 번째의 강도저하에 영향을 미침을 알 수 있었다(Fig. 4B). 두 번째 강도저하 후의 지속적인 반복하중에서는 장식질 자기에서 관찰되었던 표면에서의 재료의 탈락현상(fretting)을 관찰할 수 있다.

장식질 자기 및 MGC 보다 초기 강도값이 높은 유리침윤 알루미늄아에서는 두 번째의 강도저하 현상을 관찰하기 위해서 보다 높은 접촉하중이 요구되었으며, 따라서 1000 N까지 접촉하중을 증가시켜 접촉피로 특성을 관찰하였다(Fig. 5). 접촉하중이 200 N 및 500 N인 경우는 각각 $n = 10^6$ 및 $n = 5 \times 10^5$ 에서 첫 번째의 강도저하를 나타내었으며, 파괴는 압흔자리에서 일어났다. 유리침윤 알루미늄아에 대한 200 N 및 500 N의 접촉하중은 본 실험에서 설정한

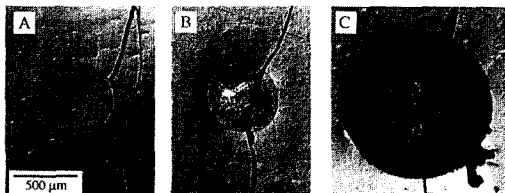
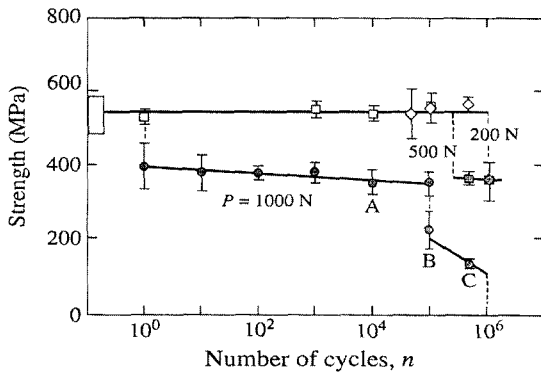


Fig. 5. Strength as a function of number of cyclic loading n for glass-infiltrated alumina. Data points are means and standard deviations, minimum 5 specimens per point. Unfilled symbols indicate failures from natural flaws, filled symbols failures from indentation sites. Open box at left axis represents strengths of polished, unindented specimens. Micrographs show surface failure sites at point A, B and C marked on plot.

최대 반복하중 수($n = 10^6$)까지 두 번째 강도저하를 나타내지 않았다. 접촉하중이 1000 N인 경우에서는 역시 앞의 두 재료의 경우와 동일하게 첫 번째 강도저하($n = 1$)와 두 번째 강도저하($n = 10^5$)를 나타내었으며, 두 번째 강도저하 후의 지속적인 반복하중은 표면에서의 재료의 탈락현상(fretting)을 관찰할 수 있었으며(Fig. 5C), 이 후의 지속적인 반복하중은 결국 재료의 파괴를 유발시킴을 알 수 있었다.

접촉피로에 대한 강도저하의 고찰 및 파괴원점의 관찰을 통해서 각각 다른 미세구조를 갖는 세라믹스에서 공통적으로 일어나는 현상들을 관찰할 수 있었다. 즉, 재료의 첫 번째 강도저하 후의 강도값은 가한 접촉하중의 크기에 상관없이 일정하게 유지하게 되며, 이때의 파괴원점은 접촉점의 바깥쪽이라는 것이었다(Figs. 3A, 4A 그리고 5A). 그리고 두 번째의 강도저하에서는 이러한 파괴원점이 접촉점 안쪽으로 이동되며(Fig. 3B, 4B 그리고 5B), 지속적인 반복하중은 표면에서의 재료의 탈락(fretting, Figs. 3C, 4C 그리고 5C)과 함께 결국 재료의 파괴를 이끌어 냄을 알 수 있었다. 따라서 이러한 연구를 통해 치아용 대체재료로서의 세라믹스가 갖는 피로특성 및 손상내구성에 대한 고찰이 가능함을 알 수 있었고, 미세구조에 상관없이 모든 치아용 세라믹스는 실제 응용상황과 유사한 물에서의 접촉피로에 민감한 반응을 보이고 있음을 알 수 있었다[8-14]. Figs. 3, 4 및 5에서 나타난 파괴원점의 이동에서 두 번째 강도저하는 접촉피로에 따른 radial 형태의 균열에 의해 영향을 받게 되며, 이러한 것은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 각 재료에서 radial 형태의 균열이 형성되는 시점은 두 번째의 강도저하가 일어나는 반복하중 수(n)와 일치하고, 균열은 접촉점 주위 및 바깥쪽에서 어두운 부분과 함께 나타나게 되며 이것은 표면아래에서 손상을 나타내는 것이다. 이러한 radial 형태의 균열은 Vickers 압입에서 전형적으로 나타나는 균열형태로서 비록 구형의 압자에 의해 형성된 radial 형태의 균열이지만 재료의 강도에 치명적인 영향을 미치게 된다[16, 23, 24].

Fig. 7에서는 반복하중 수(n)를 고정시킨 후 접촉하중의 변화에 대한 강도변화를 관찰하였다. MGC는 cone 형태의 균열에 의해 급격한 첫 번째 강도저하를 나타낸 후 선형적인 강도저하를 나타내었으며, radial 균열에 의한 두 번째 강도저하 후에는 지속적인 강도저하 현상을 나타내었다. 유리침윤 알루미늄아에서도 역시 cone 형태의 균열에 의해 급격한 첫 번째 강도저하를 나타내었으며, 접촉하중의 증가에 따라 연속적인 강도저하를 나타내었다. 반면 장식질 자기에서는 cone 형태의 균열에 의해서는 강도저하가 일어나지 않았으며, radial 형태의 균열에 의해 급격한 첫 번째 강도감소를 나타내었지만 증가되는 접촉하중에 따른 더 이상의 강도저하는 관찰되지 않았다. 따라서 접촉피로에 따른

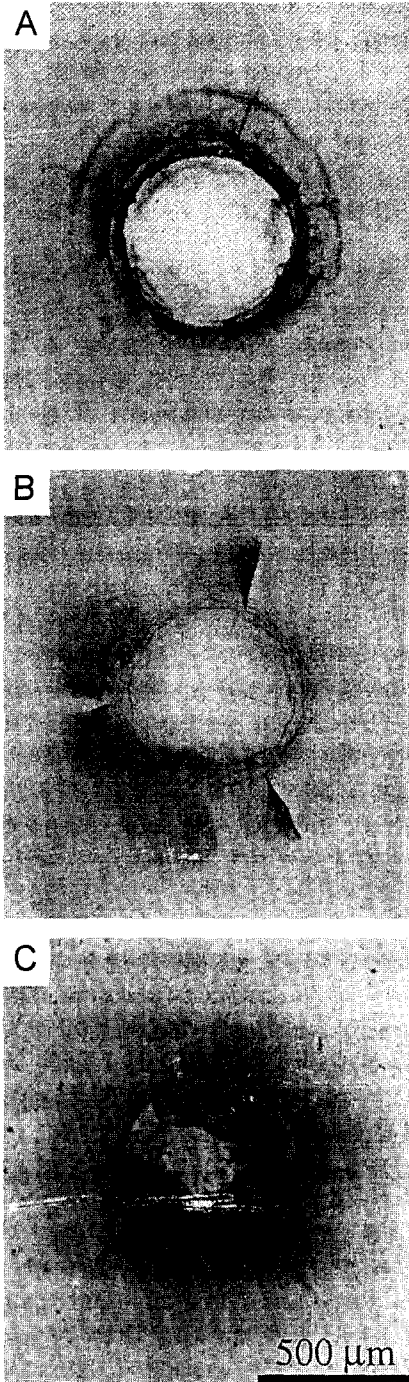


Fig. 6. View of subsurface damage in specimens thinned from back surface in transmitted light: (A) feldspathic porcelain, $P = 500\text{ N}$, $n = 5 \times 10^3$; (B) micaceous glass-ceramic, $P = 500\text{ N}$, $n = 5 \times 10^4$; and (c) glass-infiltrated alumina, $P = 1000\text{ N}$, $n = 10^3$. Indentation with WC sphere ($r = 3.18\text{ mm}$).

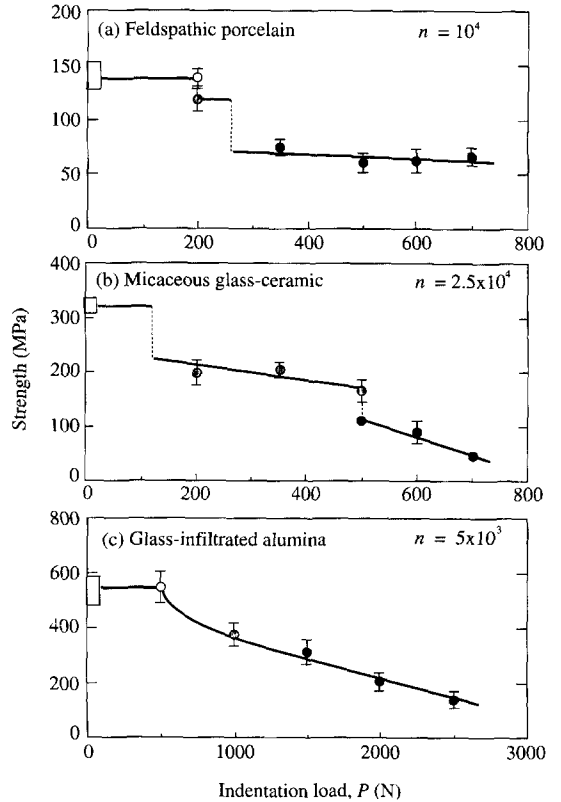


Fig. 7. Strength as a function of indentation load P at number of cyclic loading n indicated: (A) feldspathic porcelain; (B) micaceous glass-ceramic; and (C) glass-infiltrated alumina. Data points are means and standard deviations, minimum 5 specimens per point. Unfilled symbols indicate failures from natural flaws. Filled symbols indicate failures from indentation sites; grey symbols from cone cracks, black symbols from radial crack. Open box at left axis represents strengths of polished, unindented specimens.

접촉손상이 재료에 형성된 후에도 강도저하가 일어나지 않고 있는 장식질 자기의 경우 다른 두 재료에 비해 손상에 견디는 정도가 뛰어나다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 치아용 세라믹에서의 접촉피로 특성과 이들에 의해 재료에 형성되는 접촉손상이 강도에 미치는 영향을 실제 치아의 접촉상황을 잘 모방할 수 있는 Hertzian 압입법을 이용하여 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 모든 재료들은 실제 "입안의 조건"과 유사한 물의

환경에서 행한 접촉피로에 대해 민감한 반응을 나타내었으며, 이러한 낮은 저항성은 강도저하 및 재료의 파괴로 나타났다. 또한 접촉손상에 의한 강도저하에서는 반복하중의 수(n) 및 압입하중에 의존하지 않고 파괴원점에 따라 강도 값이 결정됨을 알 수 있었다.

2) 강도저하가 일어나는 파괴원점은 반복하중 수(n)의 증가에 따라 자연적인 재료결합에서 접촉점 바깥쪽으로 다시 접촉점 안쪽으로 전이됨을 알 수 있었으며, 이러한 파괴원점의 이동은 강도의 급격한 저하와 일치하게 됨을 알 수 있었다. 계속적인 반복하중 수(n)의 증가는 표면에서의 재료의 탈락(fretting) 현상이 일어나며 곧이어 재료의 파괴가 일어남을 알 수 있었다.

3) 접촉손상에 의한 두 번째 강도저하의 주 요인으로는 radial 형태의 균열형성에 있음을 관찰할 수 있었으며, 이것은 모든 재료의 시험편에서 두 번째 강도저하가 일어나는 조건(장석질 자기; $P = 500\text{ N}$, $n = 10^2 \sim 5 \times 10^2$, MGC; $P = 500\text{ N}$, $n = 2.5 \times 10^4$, 유리침윤 알루미늄; $P = 1000\text{ N}$, $n = 10^5$)이나 후의 반복하중 수(n)에서 접촉피로 시험을 행한 시험편으로 투과 광학현미경 관찰을 함으로써 확인할 수 있었다.

4) 고정된 반복하중 수(n), 두 번째 강도저하가 일어나는 반복하중 수(n) 또는 전·후의 반복하중 수(n), 에서 압입 하중의 변화에 따른 강도저하의 고찰을 통해 radial 형태의 균열에 의한 급격한 강도저하가 일어나지만 재료가 파괴될 때까지 더 이상의 강도저하를 나타내지 않는 장석질 자기가 다른 두 재료에 비해 우수한 손상 내구성을 나타냄을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] R.A. Giordano, Compendium 17(8) (1996) 779.
- [2] J.K. Kelly, J.A. Tesk and J.A. Sorensen, J. Dent. Res. 74(6) (1995) 1253.
- [3] J.R. Kelly JR, Ann. Rev. Mater. Sci. 27 (1997) 443.
- [4] W.P. Kelsey, T. Cavel, R.J. Blankenau, W.W. Barkmeier, T.M. Wilwerding and M.A. Latta, Amer. J. Dent. 8 (1995) 259.
- [5] R.C. Wheeler, A textbook of dental anatomy and physiology. Philadelphia, PA: W.B. Saunders (1958) 354.
- [6] K.J. Anusavice, In: Quality Evaluations of Dental Restorations. K.J. Anusavice editor. Chicago: Quintessence (1989) 15.
- [7] R.G. Craig, In: Restorative Dental Materials. F.G. Craig, editor. St. Louis: Mosby, Chapter 4 (1997).
- [8] S.M. Wiederhorn, J. Am. Ceram. Soc. 50(8) (1967) 407.
- [9] S. Lathabai, Y-M. Mai and B.R. Lawn, J. Am. Ceram. Soc. 72(9) (1989) 1760.
- [10] S. Lathabai, J. R del and B.R. Lawn, J. Am. Ceram. Soc. 74(6) (1991) 1340.
- [11] R.H. Dauskardt, D.B. Marshall and R.O. Ritchie, J. Am. Ceram. Soc. 73(4) (1990) 893.
- [12] F. Guiberteau, N.P. Padture, H. Cai and B.R. Lawn, Philos. Mag. A68(5) (1993) 1003.
- [13] H. Cai, M.A.S. Kalceff, B.M. Hooks, B.R. Lawn and K. Chyung, J. Mater. Res. 9(10) (1994) 2654.
- [14] A. Pajares, L. Wei, B.R. Lawn and D.B. Marshall, J. Mater. Res. 10(10) (1995) 2613.
- [15] F.C. Frank and B.R. Lawn, Proc. Roy. Soc. Lond. A299(1458) (1967) 291.
- [16] B.R. Lawn and T.R. Wilshaw, J. Mater. Sci. 10(6) (1975) 1049.
- [17] B.R. Lawn, Fracture of brittle solids. 2nd ed., (Cambridge: Cambridge University Press, U.K., 1993).
- [18] B.R. Lawn, N.P. Padture, H. Cai and F. Guiberteau, Science 263 (1994) 1114.
- [19] Y.G. Jung and S.C. Choi, J. Kor. Ceram. Soc. 35(7) (1998) 671.
- [20] I.M. Peterson, A. Pajares, B.R. Lawn, V.P. Thompson and E.D. Rekow, J. Dent. Res. 77(4) (1998) 589.
- [21] Y.G. Jung and S.C. Choi, J. Kor. Ceram. Soc. 35(5) (1998) 429.
- [22] P.J. Kennedy, A.A. Conte, E.P. Whittenton, L.K. Ives and M.B. Peterson, Friction and Wear of Ceramics. S. Jahnmir, editor. (New York, 1994) pp. 79-98.
- [23] D.B. Marshall, B.R. Lawn and P. Chantikul, J. Mater. Sci. 14(9) (1979) 2225.
- [24] N.P. Padture and B.R. Lawn, Acta Metall. 43(4) (1995) 1609.