

지르코니아/알루미나 복합체의 *In-vitro* Hertzian 피로거동

이득용[†] · 박일석* · 김대준** · 이세종***

대림대학 재료정보학과

*연세대학교 세라믹공학과

**세종대학교 신소재공학과

***경성대학교 신소재공학과

(2003년 12월 2일 접수; 2004년 1월 6일 승인)

In-vitro Hertzian Fatigue Behavior of Zirconia/Alumina Composites

Deuk Yong Lee,[†] Il-Seok Park,* Dae-Joon Kim,** and Se-Jong Lee***

Department of Materials Engineering, Daelim College of Technology, Anyang 431-715, Korea

*Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

**Department of Advanced Materials Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea

***Department of Advanced Materials Engineering, Kyungsung University, Busan 608-736, Korea

(Received December 2, 2003; Accepted January 6, 2004)

초 록

인공치아용 3Y-TZP와 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체를 유사 구강분위기인 인공타액 하에서 500–3000 N의 하중 조건으로 10⁶ 횟수까지 헤르찌안 반복하중 피로특성을 조사하였다. 500 N의 하중에서 5×10⁵까지 반복피로 실험결과, 강도 저하 및 균열 현상은 관찰되지 않았다. 피로특성은 3Y-TZP가 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체보다 상전이에 의한 응력회복 때문에 우수하였다. 하중값이 증가함에 따라 링 균열에서 방사상 균열로 전이되었을 때 급격한 강도 저하 현상이 발생하였다. 강도 저하 현상은 유사 구강 분위기하에서 반복 하중 접촉 시 발생한 균열을 통해 침투한 인공타액의 화학적 침식으로 더욱 가속화 되었다.

ABSTRACT

The degree of the indentation damage and strength degradation for 3Y-TZP ceramics and (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ dental implant composites was investigated under the Hertzian cyclic fatigue. Fatigue tests were conducted at contact loads of 500 to 3000 N and up to 10⁶ cycles in exact in vitro environments. At 500 N, no strength degradation and crack generation was observed up to 5×10⁵ contact cycles. Fatigue properties of 3Y-TZP ceramics was superior to (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites due to stress relief caused by the phase transformation from tetragonal to monoclinic phase. As contact load increased, the drastic reduction in strength was found when the damage transition from ring to radial crack occurred. The extent of strength degradation was more pronounced in vitro environments probably due to chemical corrosion of artificial saliva through cracks introduced during large numbers of contacts.

Key words : Dental implant abutment, *In-vitro*, Zirconia/Alumina composites, Hertzian contact fatigue, Artificial saliva

1. 서 론

치아에 우식이 발생하거나 사고, 상해 등에 의한 손상이나 결손이 일어나면 치아를 대체할 수 있는 치아 대체 재료를 사용하게 된다. 인공치아는 턱뼈에 고정시키는 고정체(fixture), 상부구조물(abutment), 치관(crown)으로 구성되어 있다.¹⁻³⁾ 상부구조물로 Ti나 Ti 합금이 주로 사용되

어 왔다.¹⁾ 최근에 인체와의 생체 적합성이나 내구성외에도 자연치아와 외관상 가까운 정도를 나타내는 심미성(aesthetics)이 중요하게 고려되면서 세라믹이 적용되었다. 세라믹 상부구조물로 알루미나가 사용되었으나 낮은 파괴인성으로 인하여 가공 및 임상 시 40%의 파절이 발생하였다.⁴⁾ 그러므로, 알루미나를 대체한 고인성 지르코니아가 현재 사용되고 있다.

3 mol% Y₂O₃가 첨가된 안정화 지르코니아(3Y-TZP)는 파괴강도 및 R-curve 거동등의 우수한 기계적 특성을 가지고 있다.^{5,6)} 하지만, Y-TZP는 저온(100~400°C)에서 장시간 사용 시 정방정에서 단사정으로 상 전이가 일어나

[†]Corresponding author : Deuk Yong Lee

E-mail : dylee@daelim.ac.kr

Tel : +82-31-467-4835 Fax : +82-31-467-4830

강도가 저하되는 저온열화의 문제점을 갖고 있다.⁷⁾ 저온 열화를 억제하기 위한 세가지 방법이 일반적으로 알려져 있다. 결정립 크기 조절, 안정화제 양 조절, 복합체 제조 등이다. 그러나, 위 세가지 방법은 상전이가 억제되는 대신 파괴인성이 감소하는 문제점을 갖고 있다.^{8,9)}

Y_2O_3 와 Nb_2O_5 의 산화물을 적절히 첨가한 (Y,Nb)-TZP는 Y-Nb ordering에 의하여 우수한 상 안정성과 인성값을 갖는다고 보고되었다.^{8,10)} 또한, (Y,Nb)-TZP에 Al_2O_3 를 첨가한 (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 복합체는 상 안정성뿐만 아니라 기계적 특성도 우수하였다.^{11,12)} (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 복합체의 강도값은 700 MPa로 상용 3Y-TZP의 850 MPa 보다 작은 문제점을 갖고 있지만 우수한 파괴인성, 상 안정성, R-curve 거동, 와이벌 계수, 내마모성 등의 장점으로 인하여 널리 사용되고 있다.^{5,6,8,10-12)} 본 연구에서는 인공타액(artificial saliva) 내에서의 헤르찌안(Hertzian) 피로시험에 따른 (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 복합체에 관한 압입손상과 이에 따른 강도저하 거동에 대해 고찰하였다.

2. 실험방법

Y/Nb-TZP/ Al_2O_3 복합체는 참고문헌에 자세히 기술된 것에 따라 제조하였다.^{1,5,6,8,10-12)} Y/Nb-TZP/ Al_2O_3 복합체의 성형체는 1550°C 2시간 상압 소결하였다. 소결체의 직경과 두께는 각각 20 mm, 1.7 mm이었다. 3Y-TZP(Tosoh Inc., Japan)는 원료분말을 직접 사용하였다.

반복 하중 피로시험은 인공타액(artificial saliva) 분위기에서 반경 3.18 mm의 WC 볼을 이용하여 예비하중 19.6 N에, 500 N에서 3000 N의 하중범위에서 시행하였다. 원판형 시편은 동적 피로시험기(Instron 8871, USA)의 크로스헤드 하방에 고정되어 있는 WC 볼 아래 정중앙에 위치하도록 배열한 후, WC 볼을 시편에 접촉할 때까지 아래로 내린 후 상온에서 10 Hz 진동수의 반파정류파(haversinusoidal waveform) 형태로 반복 하중을 가했으나 최소하중은 19.6 N로 설정하여 0 N까지 감소시키지는 않았다. 모든 시험은 인공타액이 가득 담긴 항온조 내에서 실행되었으며 사용된 인공타액은 참고문헌^{3,13)}에 의거 제조하였다. 실험에 대한 신뢰성을 높이기 위해 각 실험단계에서 최소 5개의 시편에 대해 같은 실험을 반복하였다.

반복 하중 피로 실험 후 각 시편들은 금(gold)으로 코팅하여 손상된 부분을 노말스키(Nomarski) 간섭 대비를 이용한 반사광학현미경(ME-600L, Nikon Instech Co., Ltd., Japan)으로 관찰하였다. 압입한 시편들의 강도는 만능시험기(Instron 4202, USA)를 사용하여 삼구 평판 이축 꺾임 강도 시험법으로 23 MPa⁻¹의 응력속도로 측정하였다.¹⁻³⁾ 파단 시편들은 같은 방법으로 노말스키 광학 현미경으로 손상에 의한 파괴원과 경로를 관찰하였다.

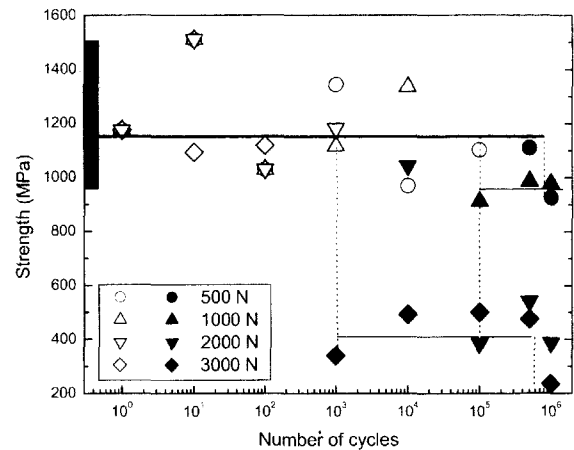


Fig. 1. Strength variation as a function of Hertzian fatigue contact cycles for 3Y-TZP ceramics under different contact loads in artificial saliva.

3. 결과 및 고찰

Fig. 1에 3Y-TZP의 파괴강도 변화를 가해진 반복하중의 횟수의 함수로 나타내었다. 그래프의 y축에 950~1500 MPa의 강도영역에 있는 사각형 모양의 영역은 압입하중을 가하지 않은 시편의 파괴강도(inert strength) 표준편차 범위를 의미한다. 시험편에 내재되어 있는 결함들에 의한 파단 시편의 강도값은 백색점으로, Hertzian 피로 접촉손상에 의해 일어난 파단은 흑색점으로 표시하였다.³⁾ 모든 시편들의 강도는 접촉 하중과 무관하게 임의의 접촉 횟수에 도달했을 때 순간적으로 저하되었다.

Jung 등¹⁴⁾은 다양한 재료의 피로거동을 고찰한 후 이트리아 안정화 지르코니아(Y-TZP)는 도재(porcelain) 고유의 취성 파괴와 달리 준소성(quasi-plastic) 거동을 보인다고 보고하였다. 인공타액 내에서 관찰한 본 연구의 실험 결과는 물 속에서 실험한 연구 결과^{3,14,16)}와 유사한 거동을 보이지만, 접촉 하중 반복 횟수가 낮은 경우 강도저하(strength degradation) 현상이 발생하였다. 급격한 강도 저하 현상은 반복 접촉 시 발생하는 균열을 통하여 인공타액이 침투함에 따라 균열정장이 가속화되어 일어나는 것으로 추정된다.^{3,13-16)} 육안으로 인공타액으로 인하여 접촉손상 주위에 색상이 검게 변색되는 것이 관찰되었다. Lee¹³⁾ 등은 인공타액 및 체액등 수용액에서 산화-환원 전위에 의해 치아수복물에 전기화학적 부식이 발생한다고 보고하였다. 특히, 치아수복용 합금 및 재료의 부식은 구강내의 산도, 습도, 온도, 염도변화 뿐만 아니라 합금의 표면상태도 큰 영향을 미치며 기공이나 석출물이 적을수록 부식저항성이 크다고 발표하였다. 본 연구에 사용된 인공타액은 pH 5.2로 KCl, NaCl, NaH_2PO_4 , Na_2S , 요소등으로 구성되어 있다.³⁾ 그러므로, 인공타액이 물보다 화학적으로 강한 산성 조건으로 접촉손상으로 발생한 균열을 통한 인공타액

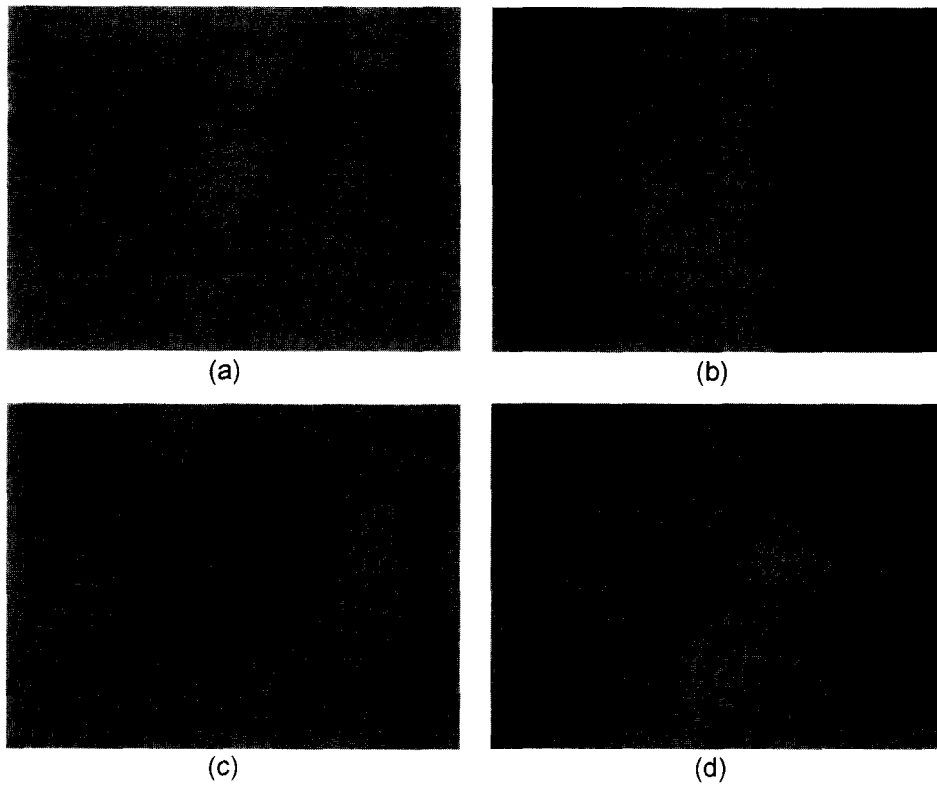


Fig. 2. Nomarski optical micrographs of Hertzian indentation and failure sites of 3Y-TZP ceramics after fatigue test at contact load 500 N. (a) Hertzian indentation (5×10^5 cycles), (b) failure sites (5×10^5 cycles), (c) Hertzian indentation (1×10^6 cycles), and (d) failure sites (1×10^6 cycles).

침투가 화학적 침식 파괴를 빠르게 진행시키는 것으로 추정된다.

Figs. 1과 2에서 보는 것처럼 500 N의 하중을 5×10^5 회 반복적으로 가했을 때, 3Y-TZP에서 압입 흔적이 관찰되었으나(항복하중, P_Y) 파단은(Fig. 2(b)) 시험편에 내재되어 있는 결함들에 의하여 발생하였다. 반복횟수 10^6 회부터(Fig. 1) 강도값이 저하되기 시작하였다. Fig. 2(d)에서 보는 것처럼 파단은 압입흔적 접촉테를 따라 일어났고 강

도값의 감소는 크지 않았다. 저작압이나 치아 끝단의 곡률 등 진료시의 변수들은 각각 접촉 하중과 압입자 반경 등 헤르찌안 변수들과 밀접한 관계가 있다.^{3,14-16} 치아 수복물은 적어도 끝단의 반경이 2-4 mm인 대합치에 의해 200 N의 저작압이 10^6 회 이상 반복적으로 가해지는 상황에서 견디어야 한다.¹⁵ 따라서, 이번 연구에 사용된 3Y-TZP는 500 N 하중에서의 반복횟수 10^6 회까지 견딜 수 있으므로 물리화학적 특성만을 고려한다면 일반적인 구강

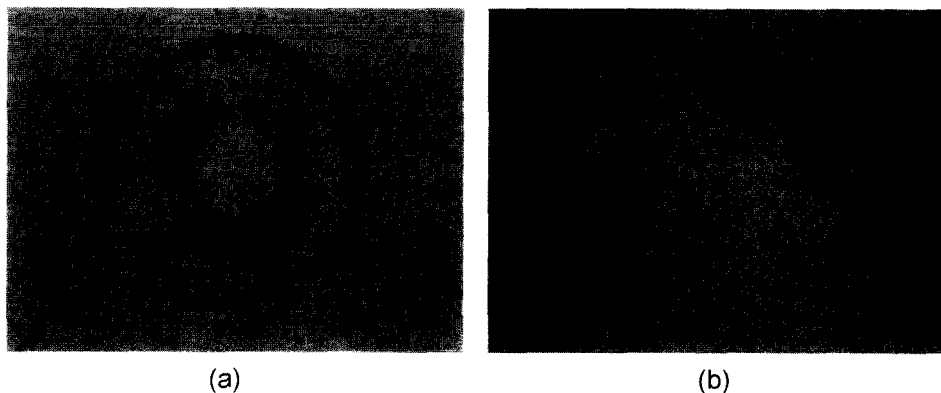


Fig. 3. Nomarski optical micrographs of (a) Hertzian indentation and (b) failure sites of 3Y-TZP ceramics after fatigue test of 1×10^6 cycles at 1000 N.

환경 내에서 인공치아 수복물로 사용하기에 적합한 것으로 사료된다.

1000 N 하중조건에서 노말스키 현미경으로 관찰한 접촉 손상은 Fig. 3에 나타나 있다. 1000 N 하중 하에서 압입흔적(P_Y)은 반복하중이 10^5 회 가해진 후에 실험적으로 관찰되었다. 압입흔적은 반복횟수 10^6 회 이상 가해졌을 때 균열로 전이하지 않았다. Fig. 1에서 보는 것처럼 강도값의 감소가 거의 없었다.

2000 N의 하중 하에서는 압입흔적은 반복하중이 10^4 회,

균열(P_C)은 반복접촉이 10^5 회 이상 가해졌을 때 링균열 형태로 관찰되었다(Fig. 4). 반복하중이 10^6 회 가해진 후에서 Fig. 4에서 보는 것처럼 링균열은 준소성의 발달과 관련되어 있는 방사상 균열로 전이하지 않았다. 링균열이 생성됨에 따라 강도값은 급격히 감소하였다. 3000 N 하중 하에서는 반복횟수가 증가함에 따라 파단경로는 접촉손상 외부에서, 접촉테(contact edge), 손상부위 내부로 전파하였다. 10^3 횟수에서 관찰된 압입흔적에 링균열이 발생하고 반복하중 횟수가 10^6 에서 방사상 균열(Fig. 5)로 전

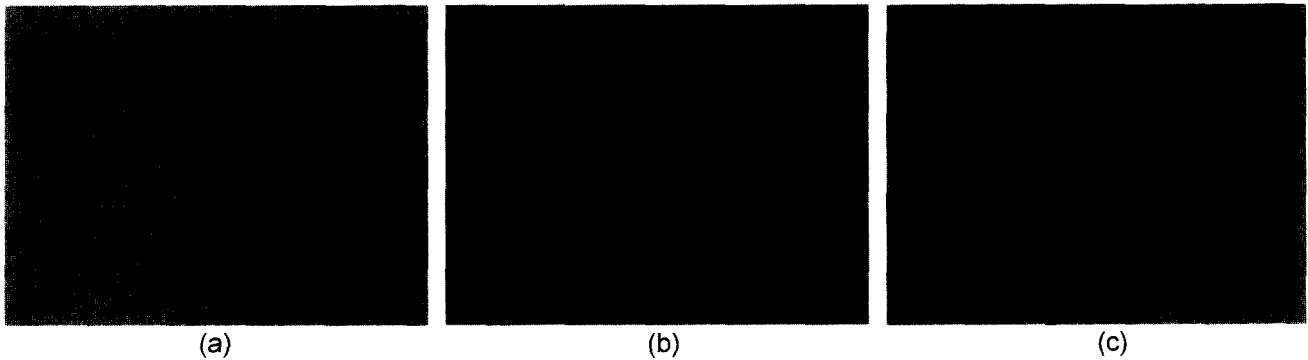


Fig. 4. Nomarski optical micrographs of Hertzian indentation sites of 3Y-TZP ceramics after fatigue test at 2000 N. (a) 1×10^4 cycles, (b) 1×10^5 cycles, and (c) 1×10^6 cycles.

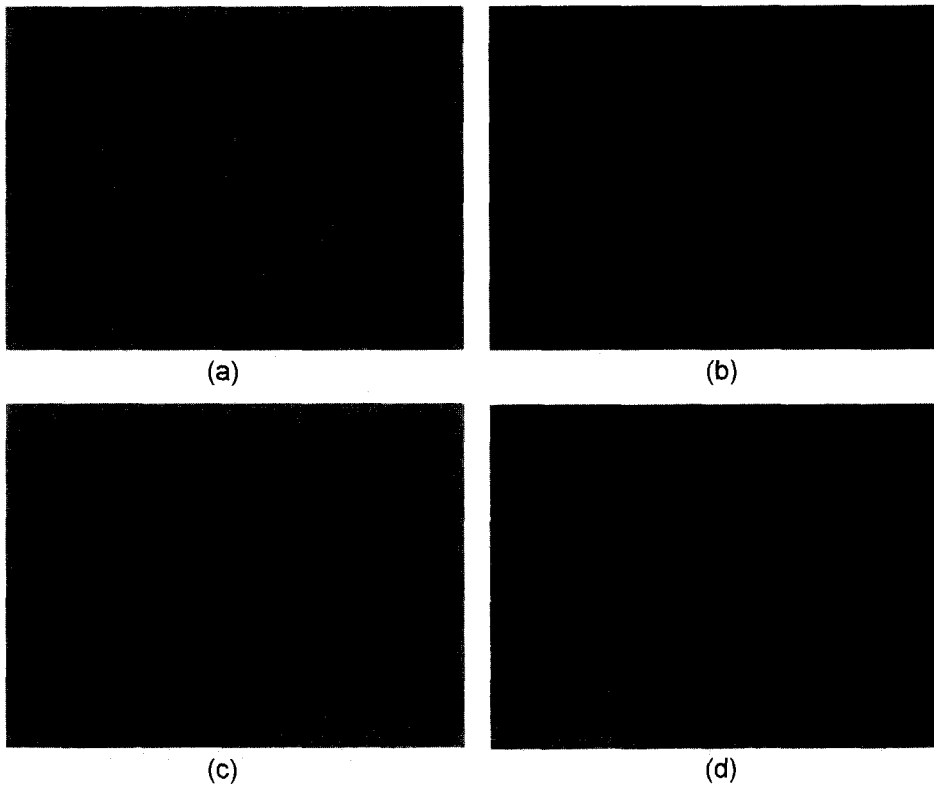


Fig. 5. Nomarski optical micrographs of Hertzian indentation and failure sites of 3Y-TZP ceramics after fatigue test at 3000 N. (a) Hertzian indentation (1×10^3 cycles), (b) failure sites (1×10^3 cycles), (c) Hertzian indentation (1×10^6 cycles), and (d) failure sites (1×10^6 cycles).

이하에 Fig. 1에서 보는 것처럼 2차 강도저하로 인한 재료수명에 치명적인 영향을 주었다. 균열형상의 전이는 하중 반복 횟수가 증가함에 따라 가속되었으며 방사상 균열은 수명에 치명적 영향을 미치는 것으로 추정된다. 파괴가 손상 부분 내부로 발생한 것은 압입자에 의한 근접축 손상이 증식, 축적되고 내부손상의 증가로 인하여 방

사상 균열이 외부로 전파된 것으로 추정된다.¹⁴⁾ 임계 횟수(critical cycle) 이후의 강도저하는 이번 실험이 부식성의 인공타액 내에서 수행되었기 때문에 물 속에서 실험한 결과들에¹⁴⁻¹⁶⁾ 비해 더욱 크게 관찰되었다. 임계횟수는 접촉하중이 증가함에 따라 감소하였다.

Fig. 6에는 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 파괴강도 변화를 가해진 반복하중의 횟수의 함수로 나타내었다. 그래프의 y축에 630-760 MPa의 강도영역에 있는 사각형 모양의 영역은 압입하중을 가하지 않은 시편의 파괴강도(inert strength) 표준편차 범위를 의미한다. 3Y-TZP에 비하여 250 MPa 정도 낮은 값이었다. 분무건조된 원료분말인 3Y-TZP와 달리 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃는 분말합성만으로 제조되어 반응성이 떨어져서 강도값이 작은 것으로 추정된다.⁵⁾ 500 N의 하중을 가했을 때 5×10⁵ 반복횟수 이상에서 압입흔적과 강도의 저하가 발생하였다. 인공타액과 반응하여 압입흔적이 쉽게 관찰되었다. 1000 N의 하중에서 Fig. 7에서 보는 것처럼 10⁴ 반복횟수에서 압입흔적이 발생하기 시작하여 10⁵회에서 파괴경로가 접촉손상 외부에서 접촉테(contact edge)로 변화하면서 강도저하가 관찰되었다.

하중이 2000 N으로 증가함에 따라 강도저하 현상이 급격히 발생하였다. 반복하중 10²와 10⁵회에서 각각 링균열과 방사상균열이 관찰되었다. 반복횟수가 증가함에 따라

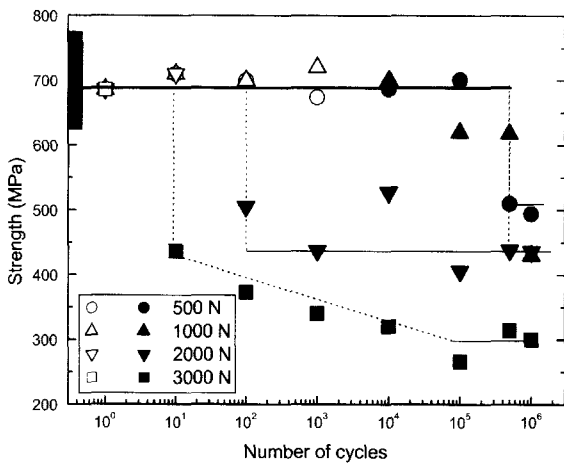


Fig. 6. Strength variation as a function of Hertzian fatigue contact cycles for (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites under different contact loads in artificial saliva.

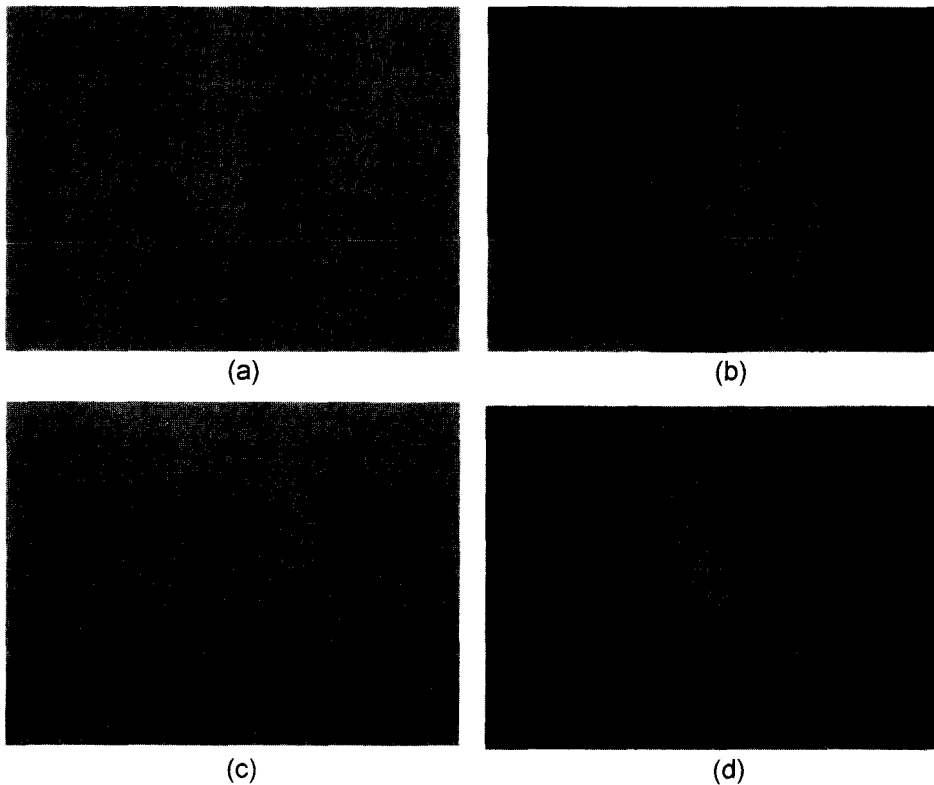


Fig. 7. Nomarski optical micrographs of Hertzian indentation and failure sites of (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites after fatigue test at 1000 N. (a) Hertzian indentation (1×10⁴ cycles), (b) failure sites (1×10⁴ cycles), (c) Hertzian indentation (1×10⁵ cycles), and (d) failure sites (1×10⁵ cycles).

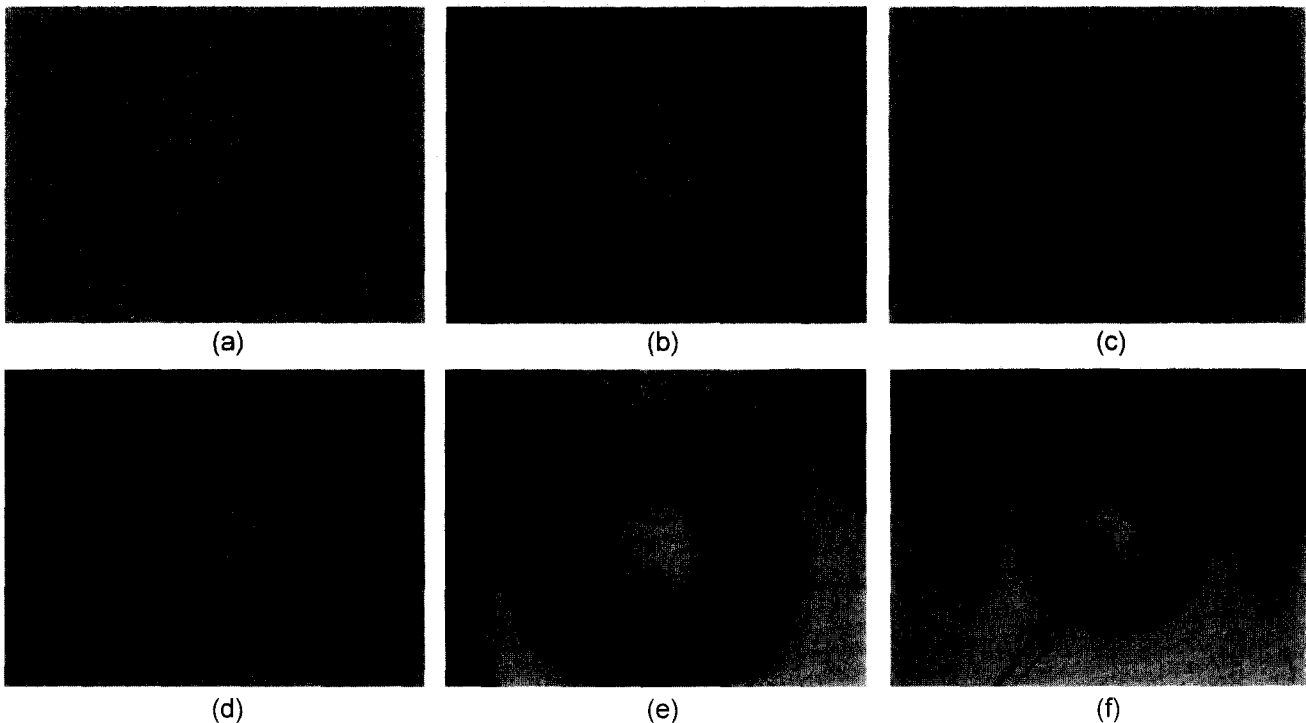


Fig. 8. Nomarski optical micrographs of Hertzian indentation and failure sites of (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites after fatigue test at 3000 N. (a) Hertzian indentation (1×10^3 cycles), (b) failure sites (1×10^3 cycles), (c) Hertzian indentation (1×10^4 cycles), (d) failure sites (1×10^4 cycles), (e) Hertzian indentation (1×10^5 cycles), and (f) failure sites (1×10^5 cycles).

균열의 깊이와 두께가 증가하면서 강도가 저하되었다. 3000 N에서 강도저하는 가속화되었다. Fig. 8에서 보는 것처럼 링균열의 두께가 가장 크게 성장하였으며 10^5 회에서는 방사상균열 뿐만 아니라 표면층의 소성변형에 의한 요철현상이 발생하였다. 2차 강도값 저하는 방사상균열 발생이전인 10^1 회부터 관찰되었으며 파단은 손상부위 내부로 전파하였다. (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체는 3Y-TZP에 비하여 적은 반복 접촉횟수에서 강도저하 현상이 관찰되었다. 3Y-TZP는 반복하중 시 정방정에서 단사정으로 상전이에 의한 파괴팽창으로 응력회복¹⁾이 발생하여 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체보다 피로특성은 우수하였다. 그러나, (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체에서는 3Y-TZP에서 3000 N의 5×10^5 반복접촉¹⁴⁾ 시 일어나는 자체파괴현상은 관찰되지 않았다.

Jung 등¹⁴⁾은 유리침투 알루미늄 복합체나 Y-TZP 같은 고인성의 치과용 세라믹의 수명은 준소성 손상 모드 발달과 연관이 있다고 발표하였다. 고인성의 지르코니아는 전단방향으로 취약하며 전단응력이 계속 집중함에 따라 결정립계가 약해진다.^{3,14)} 약한 결정입계를 따라 입계 슬라이딩의 현상은 미세균열을 유발시키고 반복 접촉 횟수가 증가함에 따라 방사상 균열을 형성함으로써 재료의 수명, 즉 파괴강도는 현저히 저하되는 것이다. 본 실험에서 WC 볼에 의한 반복 접촉에 의한 응력집중으로 야기되는 접촉 손상은 링균열, 방사상 균열과 표면하부의 균열원

의 원인이 되는 것으로 추정된다. 또한, 헤르찌안 접촉 손상은 재료가 물 속보다 구강 내 분위기인 인공타액에 노출되었을 때 균열을 통해 침투된 인공타액의 화학적 반응^{3,13,14)}에 의하여 하중값이 증가함에 따라 강도 및 수명 저하가 가속화 되는 것이 관찰되었다. 인공치아 상부 구조물로 사용되는 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체와 3Y-TZP는 하중이 증가함에 따라 강도저하 현상이 관찰되었지만, 구강 내의 저작운동은 200 N의 하중으로 실험하중보다 낮은 값으로 인공치아로 사용하기에 적합하였다.

4. 결 론

치과용 세라믹으로 사용되는 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체와 3Y-TZP의 반복피로 거동을 인공타액 분위기 하에서 조사하였다. 유사구강 내 조건 하에서 500-3000 N의 접촉하중을 주면서 복합체의 압입 손상과 강도 변화 거동을 관찰한 결과, 500 N의 하중이 5×10^5 회까지 반복적으로 가하여도 강도값은 유지되었다. 그러므로, (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체와 3Y-TZP는 구강환경에서 치과용 인공치아 상부구조물 재료로 적합하였다. 접촉하중과 횟수가 증가함에 따라 접촉손상 형태는 취성파괴형(링 균열)에서 변형형(방사상 균열)으로 전이되었다. 취성에서 소성 전이는 하중에 의해 지배되었다. 반복 피로시험 후 강도값은 인공타액 분위기에서 현저히 저하되었는데, 이는 반복

접촉 중 생성된 균열을 통해 침투된 인공타액의 화학적 침식 때문인 것으로 추정된다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00276).

REFERENCES

1. D.-J. Kim, J.-S. Han, S.-H. Lee, J.-H. Yang, and D. Y. Lee, "Zirconia/Alumina Composite Dental Implant Abutments," *Key Eng. Mater.*, **254-256** 699-702 (2004).
2. D. Y. Lee, D.-J. Kim, B.-Y. Kim, and Y.-S. Song, "Effect of Alumina Particle Size and Distribution on Infiltration Rate and Fracture Toughness of Alumina-glass Composites Prepared by Melt-infiltration," *Mater. Sci. & Eng. A*, **341** 98-105 (2003).
3. D. Y. Lee, S.-J. Lee, I.-S. Park, J.-W. Jang, and B.-S. Kim, "Glass-alumina Composites Prepared by Melt Infiltration: III. *In-vitro* Fatigue Behavior," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [7] 662-66 (2003).
4. S. O. Hondrum, "A Reviews of the Strength Properties of Dental Ceramics," *J. Prosthet. Dent.*, **67** [6] 859-65 (1992).
5. D. Y. Lee, D.-J. Kim, B.-Y. Kim, and Y.-S. Song, "Effect of Alumina Particle Size on R-curve Behavior of (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 Composites," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [10] 936-41 (2001).
6. D. Y. Lee, S.-J. Lee, J.-W. Jang, H.-K. Kim, and D.-J. Kim, "Biotribological Properties of TZP/ Al_2O_3 Ceramics for Biomechanical Applications," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [6] 525-29 (2003).
7. S. Lawson, "Environmental Degradation of Zirconia Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **15** 485-502 (1995).
8. D. Y. Lee, D.-J. Kim, and D.-H. Cho, "Low-temperature Phase Stability of Y_2O_3 and Nb_2O_5 Co-doped TZP Ceramics," *J. Mater. Sci. Lett.*, **17** [3] 185-87 (1998).
9. D. Y. Lee, G. A. Gogotsi, D.-J. Kim, and N.-J. Park, "Hydrothermal Stability of Zirconia Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [2] 190-93 (2002).
10. D. Y. Lee, J.-W. Jang, and D.-J. Kim, "Raman Spectral Characterization of Existing Phases in the ZrO_2 - Y_2O_3 - Nb_2O_5 System," *Ceram. Int.*, **27** [3] 291-98 (2001).
11. D. Y. Lee, D.-J. Kim, J.-W. Jang, D.-W. Choi, and S.-J. Lee, "Phase Stability of (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 Composites under Low Temperature Hydrothermal Conditions," *Mater. Lett.*, **39** [4] 221-26 (1999).
12. D. Y. Lee, D.-J. Kim, and B.-Y. Kim, "Influence of Alumina Particle Size on Fracture Toughness of (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 Composites," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **22** [13] 2173-79 (2002).
13. S.-H. Lee, D.-S. Ham, H.-K. Kim, J.-W. Jang, and M.-H. Kim, "The Effect of Burn-out Temperature and Cooling Rate on the Microstructure and Corrosion Behavior of Dental Casting Gold Alloy," *J. Kor. Academy Dental Technol.*, **22** [1] 73-82 (2000).
14. Y.-G. Jung, I. M. Peterson, D. K. Kim, and B. R. Lawn, "Lifetime-limiting Strength Degradation from Contact Fatigue in Dental Ceramics," *J. Dental Res.*, **79** 722-31 (2000).
15. H. Cai, M. A. S. Kalceff, B. M. Hooks, and B. R. Lawn, "Cyclic Fatigue of a Mica-containing Glass-ceramic at Hertzian Contacts," *J. Mater. Res.*, **9** 2654-61 (1994).
16. B. R. Lawn, "Ceramic-based Layer Structures for Biomechanical Application," *Current Opinion in Solid State & Mater. Sci.*, **6** 229-35 (2002).