

(Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 결함 저항성

이득용 · 김대준* · 이명현** · 장주웅***

대림대학 재료정보공학과, *KIST 재료연구부

요업기술원 차세대사업단그룹, * (주)우리동명 치과재료연구소
(2000년 11월 4일 접수)

Flaw Tolerance of (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ Composites

Deuk Yong Lee, Dae-Joon Kim*, Myung-Hyun Lee** and Ju-Woong Jang***

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

*Materials Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea

**Next Generation Enterprise, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Seoul, 153-023, Korea

***Dental Material Research Center, We Dong Myung Dental Industrial Co., Ltd., KwangMyung, 423-060, Korea

(Received November 4, 2000)

초 록

90.24 mol% ZrO₂-5.31 mol% Y₂O₃-4.45 mol% Nb₂O₅ 조성의 (Y,Nb)-TZP와 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체를 1550°C~1600°C에서 1~2 시간 소결하여 제조하였다. 시편의 결함에 대한 저항성을 조사하기 위하여 R-curve, Weibull modulus, slow crack growth 변수등을 조사하였다. 실험결과, (Y,Nb)-TZP와 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체 모두 상용 3Y-TZP 보다 우수한 결함 저항성이 관찰되었다. (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 결함 저항성은 Al₂O₃ 첨가에 의한 결정립 사고 인화, 분산강화, R-curve 효과에 의한 것으로 추정된다.

ABSTRACT

(Y,Nb)-TZP with a composition of 90.24 mol% ZrO₂-5.31 mol% Y₂O₃-4.45 mol% Nb₂O₅ and (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites were sintered for 1~2 h at 1550~1600°C in air. Weibull modulus, R-curve, and slow crack growth were investigated to evaluate the flaw insensitivity of the specimen. Experimental results indicated that (Y,Nb)-TZP and (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites had a better flaw tolerance than the commercial 3Y-TZP. Excellent flaw insensitivity of (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites may be due to the combined effects of grain bridging, dispersion toughening, and R-curve toughening.

Key words : (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ Composite, R-Curve, Weibull modulus, Slow crack growth

1. 서 론

Y₂O₃, CeO₂ 등 산화물이 첨가된 정방정 지르코니아 (TZP)는 균열 선단 (crack tip) 주위에 정방정에서 단사정으로 상전이 효과에 (t → m phase transformation) 의하여 우수한 균열 저항성을 (R-curve behavior) 갖고 있다.^{1,2)} 이러한 R-curve 거동은 가공 중에 발생하는 결함에 대하여 저항성 (flaw tolerance)과 좁은 강도 분포등으로 인하여 균열 성장을 억제하여 생체 경조직 (hard tissue) 소재등으로 사용하기에 적합한 것으로 추정된다.

최근에 불안정화제인 5가 산화물인 Nb₂O₅를 3가 산화물인 Y₂O₃와 함께 적절히 지르코니아에 첨가한 지르코니아 고용체가 ((Y,Nb)-TZP) 우수한 상 안정성과 높은 인성값을 보인다고 보고되었다.^{3,5)} 1550°C 온도에서 15 시간 소결한 (Y,Nb)-TZP는 평균 결정립 크기가 4.6 μm인데도 불구하고

Y-Nb ordering⁶⁾과 산소공공의 수 감소^{3,4)}에 의하여 150°C~250°C 온도와 4 MPa 압력의 수증기 분위기 하에서 5 시간 열처리를 하여도 정방정에서 단사정으로 상전이가 전혀 일어나지 않는 상 안정성이 관찰되었다.⁷⁾ 또한, (Y,Nb)-TZP 단미체와 Al₂O₃가 첨가된 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체를 이용하여 ISO 10993-1 기준에 의한 생체 적합성 실험과 생체 실험을 행하였다. 실험결과, 독성이 전혀 발생하지 않았으며 세포증식이 정상적이었고 동물 피하조직에 매식한 후 12주 후에는 동물조직 내부에 규칙적인 섬유결합 조직성 피막으로 (elongated fibroblasts and well formed collagen fibrils) 덮여 있었으며 염증세포가 (inflammatory cell) 전혀 발생하지 않는 등 생체 적합성이 우수한 것으로 보고되었다.⁸⁾ 또한, 상기 복합체를 hot-press,⁵⁾ hot-isostatic press⁹⁾ 법으로 제조할 경우 ~1 GPa의 우수한 강도값이 관찰되었다.

우수한 상 안정성^{3-5,10}과 생체 적합성을⁸ 가진 (Y,Nb)-TZP 와 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체를 상압 소결하여 생체 경조직 세라믹스로서의 사용 가능성을 조사하기 위하여 결합 및 균열 성장 저항성을 나타내는 R-curve 거동,^{2,11,12} Weibull 계수^{1,12} 및 slow crack growth (SCG) 저항성^{13,14}을 이축강도법¹⁵과 4점 곡강도법¹⁶을 이용하여 각각 조사 비교 분석하였다.

2. 실험방법

(Y,Nb)-TZP를 제조하기 위하여 ZrO₂ (Tosoh Inc., Tokyo, Japan), Y₂O₃ (Aldrich Inc., 99.99%, USA), Nb₂O₅ (Aldrich Inc., 99.9%, USA)를 출발물질로 사용하여 혼합된 분체를 폴리에틸렌 병에 지르코니아 불과 함께 에탄올을 매체로 하여 24 시간동안 습식 혼합하여 90.24 mol% ZrO₂-5.31 mol% Y₂O₃-4.45 mol% Nb₂O₅의 (Y,Nb)-TZP를 원료 조성물을 준비하였다. 건조된 혼합 원료분말을 1100°C에서 4 시간 하소한 다음 attrition mill을 이용하여 지르코니아 불과 에탄올을 매체로 하여 480 rpm의 속도로 2 시간 분쇄하였다. (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 경우에는 건조된 (Y,Nb)-TZP 분말에 2.8 μm Al₂O₃ (Sumitomo, Japan) 입자를 부피비로 20% 첨가한 후 지르코니아 불과 에탄올을 매체로 하여 24 시간 습식 혼합하였다. 건조된 분말은 100 메쉬 체에서 체조립하여 과립을 얻었으며 1차 성형후 140 MPa의 압력으로 정수압 성형하였다. 원판형 성형체 (Φ: 20, t: 1.8 mm)는 6°C/min의 속도로 900°C까지 승온시킨 후 3°C/min의 속도로 1550°C까지 승온 한 후 2 시간 유지한 후 로냉하였다. SCG용 사각시편은 준비된 분말을 분무건조기를 (DCR-2, Sakamoto Eng. Co., Ltd., Japan) 이용하여 분무 건조 (spray dry) 시킨 후 65×65 mm 금형을 이용하여 상기와 같은 방법으로 제조하여 1°C/min의 속도로 승온 400°C와 600°C에서 각각 1시간씩 유지한 후 3°C/min 속도로 1600°C까지 승온한 후 1시간 유지한 후 로냉하였다. 열처리를 한 소결체는 4×3×45 mm가 되도록 절단하여 사각시편을 제조하였다. 상용 3Y-TZP는 분무건조 작업 없이 직접 사각시편을 제조하였다.

소결체 시편의 결보기 밀도는 아르키메데스 방법을 이용하여 측정하였으며, 미세구조는 소결시편의 표면을 자동연마기로 1 μm까지 연마한 후 소결온도보다 50°C 낮은 온도에서 12분간 에칭 후 주사전자현미경 (SEM)을 이용하여 관찰하였다. 결정립 크기는 SEM 사진으로부터 linear intercept 방법으로 측정하였다.¹⁷

연마한 시편들은 연마 중 발생할지 모를 잔류응력을 제거하기 위하여 1200°C 온도에서 2 시간 열처리하였다. 시편의 강도값은 이축강도 및 4점 곡강도 실험법으로 측정하였다. 이축 강도 실험방법은 참고문헌에 자세히 기술되어있다.^{10,15} 4점곡강도 실험은 crosshead 속도를 10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵,

10⁻⁴ m/s의 4가지로 변화시키면서 속도당 10개씩의 시편을 이용하여 ASTM C1368 규격에 의거 측정 SCG 변수인 n 값을 결정하였다.¹³ 파괴인성은 indentation-strength 방법으로 측정하였다.^{18,19} 원판형 소결체 중심부에 비커스 압흔체를 이용하여 균열의 길이가 압흔체 대각선의 길이보다 2.5 배가 넘는 490 N의 하중으로 압흔한 후 수분에 의한 균열 전파를 방지하기 위하여 실리콘 오일을 도포하였다. 압흔한 시편들은 이축강도 측정법과 같은 방식으로 파단한 후 Chantikul 등이¹⁸ 제안한 식을 이용하여 파괴인성값을 계산하였다. 파괴인성값 결정시 강도와 탄성계수의 비는 시편 표면에 Knoop 압흔체를 이용하여 압흔체 모서리 부분에 균열이 발생하지 않는 하중의 조건에서 압흔한 후 압흔체의 대각선의 길이를 측정하여 Marshall 등이¹⁹ 제안한 식에 의거 결정하였다.

Weibull 계수는 $P=(i-0.5)/n$ 의 식을 (P는 파괴확률, i 강도 순위, n 전체 시편수) 이용하여 계산하였다.^{1,2,12} 본 실험에서는 조성당 각각 30개의 시편을 이용하여 측정하였다. R-curve 거동은 Krause¹¹ 제안에 의거하여 4~490 N의 하중으로 인장방향 시편에 비커스 경도계를 이용하여 각 하중당 5개씩의 시편에 압입한 후 균열길이와 강도값을 측정하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

1600°C에서 1 시간 소결한 3Y-TZP, (Y,Nb)-TZP, (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 상대밀도값은 각각 99.3, 99.1, 98.2%이었다. 일반적으로 단미체들은 99% 이상의 밀도값이 관찰되었지만 Al₂O₃가 첨가된 복합체는 Al₂O₃가 첨가됨에 따라 기지상인 ZrO₂의 결정립계 이동도가 (grain boundary

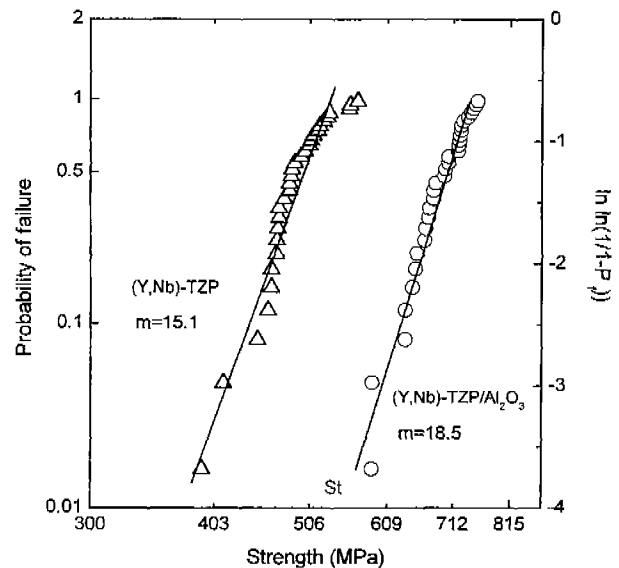


Fig. 1. Weibull plots for (Y,Nb)-TZP and (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites.

mobility) 감소함에 따라 소결력이 저하되어 ~98%의 상대밀도값이 관찰된 것으로 추정된다.^{7,20)} (Y,Nb)-TZP와 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 결합에 대한 저항성을 나타내는 Weibull 계수는 Fig. 1에서 보는 것처럼 각각 15.1과 18.5이었다. Al₂O₃가 첨가된 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 경우에는 Fig. 1에서 보는 것처럼 (Y,Nb)-TZP 단미체 보다 우수한 결합 저항성이 (flaw tolerance) 관찰되었다. 우수한 결합 저항성은 Al₂O₃가 결정입계에 존재함으로써 ZrO₂ 기지상 입자 성장을 억제하여 결합들의 크기분포가 좁아지고 Al₂O₃ 입자의 분산강화 (dispersion toughening) 효과에 의하여 긴 균열들의 (long crack) 성장이 상당히 억제되는 것으로 추정된다.²¹⁻²⁵⁾ 4~490 N 하중별로 압흔한 3Y-TZP, (Y,Nb)-TZP, (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체 시편을 indentation-strength 방법으로 측정한 압흔 하중과 강도값의 plot 결과를 직선회기법으로 (linear regression) 기울기를 측정한 결과 각각 0.28,²⁾ 0.21, 0.23으로 1/3값 보다^{2,22)} 작으므로 R-curve 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

R-curve 거동은 Krause가¹¹⁾ 제안한 파괴인성 (fracture resistance, K_R)과 균열전파 (crack extension, ΔC)간의 power law 함수를 이용하여 Fig. 2에 도시되어 있다. Li 등에²⁾ 의하면 3Y-TZP는 균열의 성장 초기단계에서 인성값이 (fracture resistance) 균열이 성장 (crack extension)함에 따라 상전이 효과에 의하여 증가한다고 보고되었다. 하지만, R-curve의 초기 기울기값이 3Y-TZP는 0.047로 상전이 효과에 의한 인성 강화현상이 크지 않은 것을 알 수 있다.²⁾ Fig. 2에서 보는 것처럼 단미체나 복합체 모두 3Y-TZP 보다는 초기 기울기값이 우수한 R-curve 거동이 관찰되었다. (Y,Nb)-TZP 복합체는 0.13으로 (Y,Nb)-TZP 단미체보다도 높은 초기 기울기를 (stiffness) 갖는 우수한 R-curve 거동이 관찰되었다. 이는 Al₂O₃ 첨가에 의하여 결정립 기교 인화

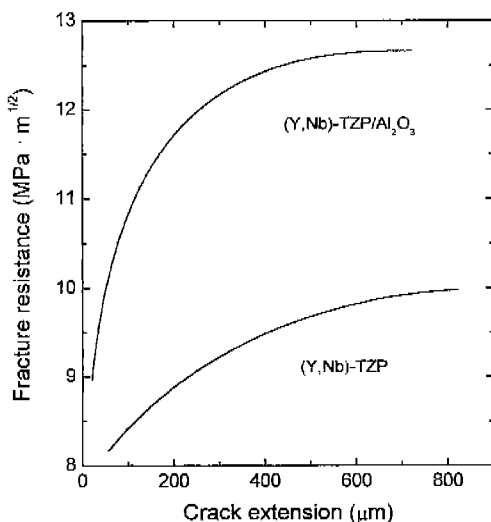


Fig. 2. R-curves for (Y,Nb)-TZP and (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composite constructed by the indentation-strength method.

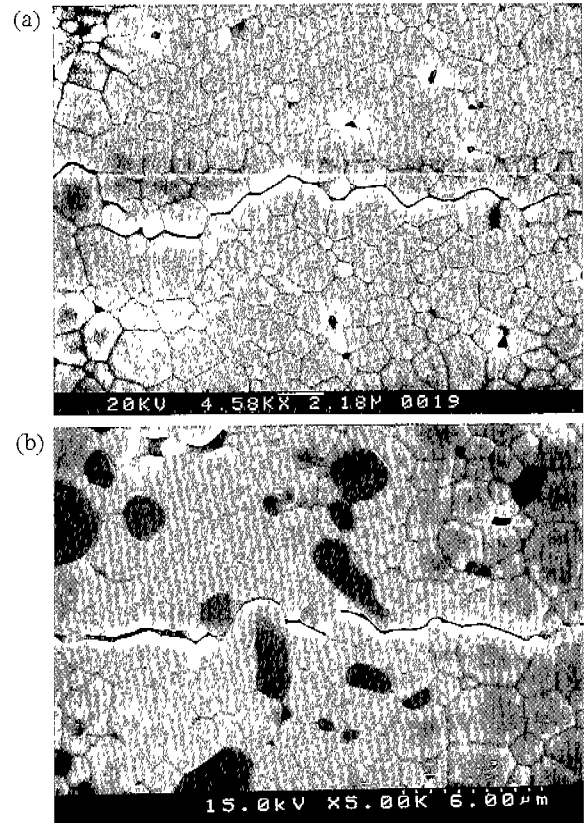


Fig. 3. SEM micrographs of (a) (Y,Nb)-TZP and (b) (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites.

(grain bridging), 균열편향 (crack deflection)등의 분산강화 효과에 의한 것으로 추정된다.^{22,26)} 또한, 우수한 R-curve 특성으로 인하여 균열이 임계균열 크기로 성장하는 것을 억제할 것으로 추정된다. Fig. 3의 SEM 사진에서 보는 것처럼 단미체나 Al₂O₃ 첨가된 복합체의 경우, 균열은 결정립계를 따라 성장하는 입계파괴모드 (intergranular mode)이었으며 결정립에서 불연속적으로 연결되는 결정립 기교 인화 (grain bridging toughening) 현상이 관찰되었다. 균열의 입계 파괴모드와 결정립 기교는 각각 균열의 길이를 증가시키고 균열의 연속적이고 지속적인 성장을 억제시켜 인성값을 증진시켜 최종적으로 우수한 R-curve 거동을 나타내는 것으로 추정된다.²²⁾ 단미체와 복합체의 인성값은 각각 5와 8 MPa · m^{1/2}이었다. 복합체의 경우에는 Al₂O₃ 분산상 입자들이 기지상의 결정입계에 random하게 분포하므로 분산상 입자들 주위에 형성하는 잔류 압축응력으로 인해 균열의 성장을 억제하는 효과 (pinning effect),¹²⁾ 분산강화 효과 (dispersion toughening),^{22,26)} R-curve 거동에²⁴⁾ 의하여 파괴인성값이 더욱 증가하는 것으로 추정된다.

결합에 대한 저항성을 자세히 조사하기 위하여 SCG 변수인 n 값을 ASTM C1368에^{13,14)} 의거하여 constant stress-rate testing 법인 (dynamic fatigue) displacement-control 방식을 이용하여 상온에서 측정하였다. crosshead speed를

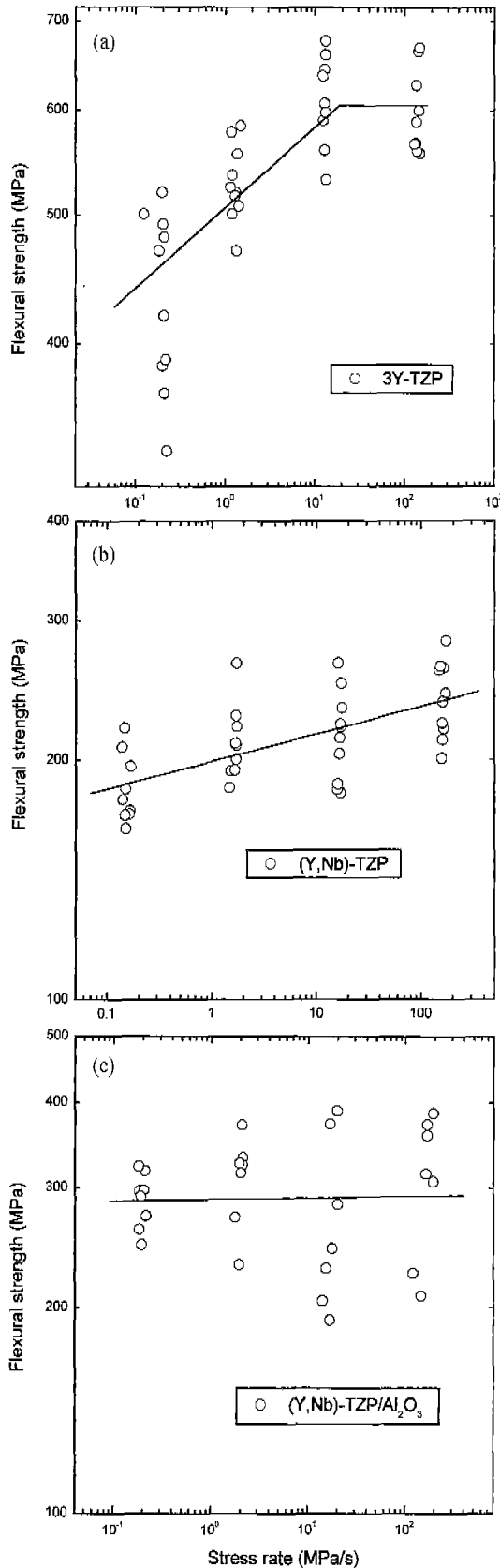


Fig. 4. Plots of strength versus stress rate for (a) 3Y-TZP, (b) (Y,Nb)-TZP and (c) (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ composites.

10⁻⁷, 10⁻⁶, 10⁻⁵, 10⁻⁴ m/s인 4단계로 변화시키면서 10개씩의 시편을 4점곡강도 실험법으로¹⁶⁾ semiarticulated 4-point test fixture를 이용하여 측정하였다. 상용 3Y-TZP, (Y,Nb)-TZP, (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 constant stress-rate에 따른 강도변화 실험결과는 Fig. 4에 나타나있다. 3Y-TZP가 다른 시편에 비하여 높은 강도값을 갖는 이유는 상용 분말을 직접 사용하였으나 단미체나 복합체 시편들은 분말들을 합성 후 분무건조시켜 제조하여 분말간의 반응성이 떨어져 낮은 강도값이 관찰되는 것으로 사료된다. 3Y-TZP는 cross-head speed가 10⁻⁷ m/s에서 10⁻⁵ m/s로 증가함에 따라 강도값은 증가하다가 10⁻⁴ m/s의 crosshead speed에서는 거의 같은 강도값이 관찰되었다. 반면에, 단미체인 (Y,Nb)-TZP는 stress-rate이 증가함에 따라 강도값도 지속적으로 증가하였다. 직선회기법으로 계산한 3Y-TZP와 (Y,Nb)-TZP의 SCG 변수인 n값은 각각 11, 28이었다. 일반적으로 n값이 클수록 균열 성장에 대한 저항성이 높은 것을 의미하므로 (Y,Nb)-TZP의 균열전파에 대한 저항성은 3Y-TZP 보다 상대적으로 우수하였다.¹⁴⁾ 그러나, Al₂O₃가 첨가된 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체의 경우에는 stress-rate에 상관없이 거의 일정한 강도값이 유지되었다. 이는 균열성장에 대한 저항성이 매우 크므로 상온의 조건하에서는 SCG의 효과가 거의 없는 것으로 관찰되었다. 따라서, 생체 경조직 재료로 (hard tissue materials) 사용하는데 필수적인 결함 저항성 (flaw tolerance), SCG 저항성과 reliability가 매우 우수하므로 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체는 인공치아 지대주 (dental implant) 및 인공 고관절 골두 (hip joint femoral head) 소재등으로 사용 가능한 것으로 추정된다.

4. 결 론

우수한 상 안정성 및 생체 적합성을 갖는 Al₂O₃가 첨가된 (Y,Nb)-TZP/Al₂O₃ 복합체에 대한 결함 저항성인 Weibull modulus, R-curve 거동, SCG 변수를 측정하여 생체 경조직 재료로서의 사용 가능성을 조사하였다. 실험결과, 18.5의 우수한 Weibull modulus와 R-curve 거동이 관찰되었는데 이는 Al₂O₃ 첨가에 의한 결정립 가교 인화 (grain bridging), 균열편향 (crack deflection)등 분산강화 (dispersion toughening) 현상, Al₂O₃ 분산상 입자들이 기지상의 결정입계에 random하게 분포하여 압축응력 분위기에 의한 균열의 성장을 억제하는 효과 (pinning effect)와 R-curve 특성에 의한 것으로 추정된다. SCG 저항성을 측정한 결과, (Y,Nb)-TZP 복합체는 상온에서 stress-rate 변화에 의한 강도값의 변화가 거의 없는 우수한 SCG 저항성이 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여

연구되었음. (KRF-2000-041-F00275)

REFERENCES

1. M. J. Readey and C. L. McCallen, "Microstructure, Flaw Tolerance, and Reliability of Ce-TZP and Y-TZP Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**(10), 2769-2776 (1995).
2. J.-F. Li, A. Kawasaki and R. Watanabe, "R-Curve Determination of 3Y-PSZ by the Indentation Strength-in-Bending Method," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **105**(1), 88-90 (1997).
3. 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), 185-187 (1998).
4. D. Y. Lee, D.-J. Kim, D.-H. Cho and M.-H. Lee, "Effect of Nb_2O_5 and Y_2O_3 Alloying on the Mechanical Properties of TZP Ceramics," *Ceram. Intl.*, **24**(6), 461-465 (1998).
5. D. Y. Lee, D.-J. Kim and K.-S. Cho, "Mechanical Properties of Hot-pressed TZP Ceramics Doped with Y_2O_3 and Nb_2O_5 ," *Mater. Trans., JIM*, **39**(2), 262-267 (1998).
6. P. Li, I. Chen and J. E. Penner-Hahn, "Effect of Dopants on Zirconia Stabilization-An X-ray Absorption Study:III, Charge-compensating Dopants," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(2), 1289-95 (1994).
7. 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), 221-226 (1999).
8. D.-J. Kim, M.-H. Lee, D. Y. Lee and J.-S. Han, "Mechanical Properties, Phase Stability, and Biocompatibility of (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 Composite Abutments for Dental Implant," *J. Biomed. Mater. Res. (Appl. Biomater.)*, **53**(4), 438-443 (2000).
9. D. Y. Lee and D.-J. Kim, "Strength and Fracture Toughness of Isostatically Hot-pressed (Y,Nb)-TZP/ Al_2O_3 Composites," *J. Mater. Sci. Lett.*, **19**(14), 1233-1235 (2000).
10. D. Y. Lee, D.-J. Kim and Y.-S. Song, "Chromaticity, Hydrothermal Stability, and Mechanical Properties of TZP Ceramics Doped with Yttrium, Niobium, and Ferric Oxides," *J. Mater. Sci. and Eng. A*, **289**(2), 1-7 (2000).
11. R. F. Krause, Jr., "Rising Fracture Toughness from the Bending Strength of Indented Alumina Beams," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(5), 338-343 (1988).
12. N. Ramachandran, L.-Y. Chao and D. K. Shetty, "R-curve Behavior and Flaw Insensitivity of Ce-TZP/ Al_2O_3 Composite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(4), 961-969 (1993).
13. ASTM Standard C1368-97, "Determination of Slow Crack Growth Parameters of Advanced Ceramics by Constant Stress-Rate Flexural Testing at Ambient Temperature," pp. 688-696 in *ASTM Annual Book of Standards*, Vol. 15.01, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1997.
14. H.-J. Choi, H.-J. Kim, J.-K. Lee and Y.-W. Kim, "Slow Crack Growth Behavior of Si_3N_4 with $Yb_2Si_2O_7$ Tie-line Composition as Sintering Additives," *J. Eur. Ceram. Soc.*, in press.
15. ASTM Standard F394-78, "Biaxial Flexure Strength (Modulus of Rupture) of Ceramic Substrate"; pp. 446-450 in *ASTM Annual Book of Standards*, Vol. 15.02, Section 15, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1996.
16. ASTM Standard C1161-94, "Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature," pp. 306-312 in *ASTM Annual Book of Standards*, Vol. 11.03, Section D, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA 1997.
17. E. E. Underwood, Quantitative Stereology; pp. 81, Addison-Wesley Publishing Co., New York, USA, 1970.
18. P. Chantikul, G. R. Anstis, B. R. Lawn and D. B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II, Strength Method," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**(9), 539-543, 1981.
19. D. B. Marshall, T. Noma and A. G. Evans, "A Simple Method for Determining Elastic-Modulus-to-Hardness Ratios using Knoop Indentation Measurements," *Comm. Am. Ceram. Soc.*, **65**, C175-C176, 1982.
20. D. D. Upadhyaya, P. Y. Lalvi and G. K. Dey, "Processing and Properties of Y-TZP/ Al_2O_3 Composites," *J. Mater. Sci.*, **28**, 6103-6106 (1993).
21. J. L. Shi, B. S. Li and T. S. Yen, "Mechanical Properties of Al_2O_3 Particle-Y-TZP Matrix Composite and its Toughening Mechanism," *J. Mater. Sci.*, **28**, 4019-4022 (1993).
22. J.-F. Li and R. Watanabe, "Fracture Toughness of Al_2O_3 -Particle-dispersed Y_2O_3 -partially Stabilized Zirconia," *J. Am. Ceram. Soc.*, **78**(4), 1079-1082 (1995).
23. K. Tsukuma, K. Ueda and M. Shimada, "Strength and Fracture Toughness of Isostatically Hot-Pressed Composites of Al_2O_3 and Y_2O_3 -Partially-Stabilized ZrO_2 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(1), C4-C5 (1985).
24. M. Hirano and H. Inada, "Fabrication and Properties of (Y,Ce)-TZP/ Al_2O_3 and Y-TZP/ Al_2O_3 Composites from Fine Powders Prepared by a Hydrolysis Technique," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **99**(2), 124-130 (1991).
25. K. Tsukuma, K. Ueda, K. Matsushita and M. Shimada, "High-temperature Strength and Fracture Toughness of Y_2O_3 -Partially-Stabilized ZrO_2/Al_2O_3 Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(2), C56-C58 (1985).
26. K. T. Faber and A. G. Evans, "Crack Deflection Processes-I. Theory," *Acta Metall.*, **31**(4), 565-576 (1983).