

Mechanical and optical properties of alumina/zirconia-glass dental crown composites

Deuk Yong Lee[†] and Ju-Woong Jang*

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

*Dental Material Research Center, We DongMyung Co., Ltd., Kwangmyung 423-060, Korea

(Received October 4, 2002)

(Accepted March 31, 2003)

Abstract Alumina/zirconia-glass composites prepared by melt-infiltration were investigated to evaluate the influence of zirconia addition on mechanical and optical properties of the composites and glass penetration kinetics. The infiltration distance was parabolic with respect to time as described by the Washburn equation and the penetration rate constant, K , decreased due to the reduction in pore size as the amount of zirconia rose. The zirconia addition increased lightness (L^*) but reduced K , transmittance and color sharpness (C^*). It can be concluded that the zirconia addition was not effective to the mechanical properties of the composites due to the increase in porosity even though the toughness of the composites increased when zirconia was added up to 15 wt%.

Key words Alumina/zirconia, Lanthanum-aluminosilicate glass, Melt-infiltration, Mechanical properties, Optical properties

인공치관용 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 기계적 및 광학적 특성

이득용[†], 장주웅*

대림대학 재료정보학과, 안양, 431-715

*(주)우리동명 치과재료연구소, 광명, 423-060

(2002년 10월 4일 접수)

(2003년 3월 31일 심사완료)

요약 용융침투법으로 알루미나/지르코니아-유리 복합체를 제조하여 지르코니아 첨가가 복합체의 기계적 및 광학적 특성과 유리 침투 kinetic에 미치는 영향을 조사하였다. 유리 침투시간이 증가할수록 침투깊이는 Washburn식에 의한 포물선 관계로 증가하였으며 침투 상수인 K 는 기공 크기의 함수로 지르코니아 첨가량이 증가할수록 기공 크기의 감소로 감소하였다. 지르코니아 양이 증가함에 따라 명도(L^*)는 증가하지만 유리 침투 상수(K), 투과율(transmittance), 채도(C^*)가 감소하였다. 지르코니아가 15 wt% 첨가될 때까지 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 인성값 증가를 보였지만 기공률의 증가로 인하여 기계적 특성 향상에는 크게 기여하지 않았다.

1. 서론

치아우식이나 결손이 일어났을 때 현재 가장 널리 사용되고 있는 치아수복재는 치과주조용 금합금이다. 가장 흔히 사용되는 Au-Ag-Cu 계 또는 Au-Pt-(Pd) 계 금합금은 인체에 무해하고 내화학성이 뛰어나며 자연치아에 근접하는 내구성을 보유하므로 보편적으로 널리 사용되어 왔다. 그러나 이러한 금합금으로는 자연치아의 아름다운 아이보리색과 투광성을 발현하기가 어렵다. 따라서

대체재료를 찾으려는 연구가 수십년전부터 이어져 왔으며[1-3] 그중 하나로 제안되는 방식이 독일 Vita사의 In-ceram 방식이다. In Ceram 방식은 입도를 제어한 알루미나(또는 지르코니아, 스피넬 등) 분말을 물에 풀어 반죽으로 만들어 치아식고모형위에 붓으로 칠한 다음 무수축 소결 후 유리를 침투시켜 치아의 코어 형상을 띤 치밀한 알루미나-유리침투 복합체를 제조하는 것으로 요약할 수 있다[2]. 이 방식은 붓으로 칠하여 제작해야 하므로 숙련된 기술자가 필요하다. 그렇지 않을 경우 두께가 불균일하게 되어 쉽게 파절될 가능성이 많다[2-4].

최근에는 일반 상용분말을 직접 1차 소결하여 bulk type의 CAD/CAM용 전성형체를 제조한 후 3차원 laser scanner를 이용하여 환자의 수복용 치아를 읽은 후 CAD/

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-467-4835

Fax: +82-31-467-4830

E-mail: dylee@daelim.ac.kr

CAM을 이용하여 인공치관 형상을 제작하는 direct ceramic machining(DCM) 방식이 연구 개발되었다[5, 6]. 상기 방식은 인공치관 제조 시 slip casting법보다 제조 비용을 더욱 절감할 수 있으며, 공정 중에 발생할 수 있는 잠재적 위험요소들을 줄일 수 있는 이점이 있다[6]. 인공 치관용 알루미나-유리 복합체의 기초 연구에서 CAD/CAM용 전성형체의 최적 조건의 알루미나는 이중입도분포(bimodal)를 가지면서 평균입도가 3.0 μm 로 충진율, 강도 및 인성값이 가장 우수한 것으로 관찰되었다[7, 8]. 본 연구에서는 알루미나-유리 복합체의 기계적 특성을 증진시키고자 인성값이 우수한 지르코니아를[9-11] 0~20 wt% 첨가한 알루미나/지르코니아 다공성 전성형체에 유리를 용융침투시켜 알루미나/지르코니아-유리 복합체를 제조하여 기계적 및 광학적 특성, 유리침투 kinetic에 미치는 지르코니아 첨가 효과를 조사하였다.

2. 실험 방법

출발물질인 알루미나 분말은 평균입경이 3.0 μm (AL-M43, Sumitomo, Tokyo, Japan)를 사용하였다[7, 8]. 지르코니아는 인성값이 우수한 3 mol% Y_2O_3 -1.5 mol% Nb_2O_5 -95.5 mol% ZrO_2 를 1100°C에서 4시간 하소한 후 어트리션 밀로 30분 분쇄하여 준비하였다[9-11]. 준비된 분말은 지르코니아의 첨가량에 맞추어 24시간 습식혼합하여 최종분말을 제조하였다. 기계적 특성, 유리 침투 및 광학적 특성 실험 시편은 직경과 두께가 각각 20 mm \times 3 mm, 10 mm \times 15 mm, 25 mm \times 13 mm가 되도록 1차 성형한 후 140 MPa의 압력으로 2차 정수압 성형하였다. 성형체는 10°C/min의 승온속도로 1120°C까지 승온한 후 2시간 유지한 후 노냉하였다. 부분적으로 소결된 알루미나 위에 함침용 유리분말과 증류수를 섞어 바른 후 30°C/min의 승온속도로 1100°C까지 승온한 후 4시간 유지하여 유리가 시편내로 완전히 용융 침투되어 복합체가 형성되도록 하였다. 상기 실험조건은 In-Ceram의 제조공정과 같은 조건을 사용하였다[1-4]. 원판형 복합체 시편은 1 μm 까지 최종 경면 가공하였으며 960°C에서 10분간 열처리하여 가공 중에 발생될지 모르는 잔류응력을 제거하였다[4]. 가공 후 기계적 및 광학적 특성용 복합체의 최종두께는 각각 1.7 mm, 10 mm이었다.

복합체에 사용된 함침용 유리는 La_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_2 계 알루미나[7, 8] 및 지르코니아(Z-21, Vita In-Ceram, Germany) 침투용 유리로서 알루미나/지르코니아의 조성에 맞추어 중량비로 혼합하였다. 알루미나 유리 제조방법은 청량한 분말들을 마모 유발을 이용하여 건식 혼합한 후 백금 도가니에 장입하여 전기로에서 1400°C에서 2시간 유지한 후 수냉하여 프리트 한 후 디스크 밀(Pulverisette 13, Fritsch

GmbH, Germany)을 이용하여 분쇄하고 100 메쉬를 전 통과였다.

출발물질인 알루미나 및 지르코니아 분말의 평균입경 및 분포는 laser particle size analyzer를 이용하였으며 전성형체의 상대밀도는 아르키메데스법을 이용하여 측정하였다. 열처리 전후 시편의 크기를 광학현미경을 이용 측정하고 부피로 환산하여 부피 수축률을 계산하였다. 전성형체의 기공 크기와 분포는 수는 porosimeter(Autopore II 9220, Micrometrics, USA)로 0.04에서 400 MPa의 압력 범위에서 측정하였다. 복합체의 미세조직, 투과도(transmittance) 및 색상변화는 전자현미경(SEM, S-4200, Hitachi, Japan)과 UV spectrometer(UV-2501PC, Shimadzu, Japan)을 이용하여 수행하였다. 투과도는 가시광선 파장영역인 360~700 nm에서 수행하였으며 가시광선 전영역의 투과율은 측정된 그래프의 면적인 적분값으로 계산하였다. 색상변화는 1976년에 정한 Commission Internationale de l'Eclairage(CIE) 표색방식인 $L^*a^*b^*$ 색공간(color space)를 이용하여 표시하였다[12]. 표색계에서 명도를 L^* , 색상과 채도를 나타내는 색도(밝기이외의 성질)를 a^* 와 b^* 로 나타낸다. 색도도(a^*b^* 평면도)란 색입체의 수평방향 단면도에 해당하는 것으로 a^* 와 b^* 는 색도와 색의 방향을 나타낸다. a^* 는 적색방향, $-a^*$ 는 녹색방향, b^* 는 황색방향, $-b^*$ 는 청색방향이다. 원점으로부터의 거리는 채도(C^*)로 식, $C^* = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$ 을 이용하여 결정하였다. 본 연구에서는 L^*C^* 와 a^*b^* 색좌표로 색을 분석하였다.

복합체의 기계적 특성인 강도와 인성은 이축곡강도(biaxial flexural strength)법과 압흔-강도법(indentation-strength)을 각각 이용하였다[7-10, 13, 14]. 강도값은 ASTM F-394-78[13]와 ISO 6474에[14] 의거 결정하였으며 파괴인성은 Chantikul 등이[15] 제안한 식을 이용하여 결정하였다. 강도와 인성값의 실험방법은 참고문헌에 자세

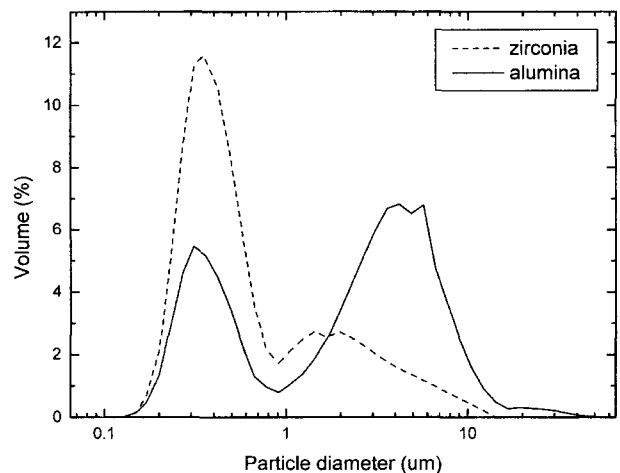


Fig. 1. Comparison of particle size distribution for alumina and zirconia, respectively.

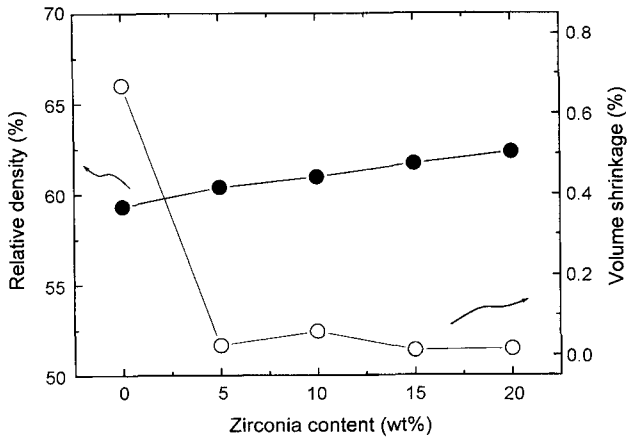


Fig. 2. Shrinkage and relative density of alumina/zirconia preforms as a function of zirconia content.

히 기술되어있다[7-10].

3. 결과 및 고찰

소결의 초기단계 온도인 1120°C에서 1차 소결한 다공성 전성형체(porous preform)의 충전률은 큰 입자들에 의하여 연속적인 망목구조를 가진 골격사이의 침입형 기공 안을 작은 입자들이 채움으로 증가한다고 보고되었다 [7, 8, 16, 17]. 평균입도 0.49 μm를 가진 지르코니아의 입도 분포는 Fig. 1에서처럼 알루미나에 비해 작고 좁으므로 작은 입자의 증가는 큰 알루미나 입자에 형성된 골

격 사이의 침입형 기공을 채우는 작은 입자양의 증가로 인한 높은 표면적 에너지 때문에 충전보다는 수축이 빨리 증가할 가능성이 있는 것으로 추정되었다[18]. 그러나, 알루미나/지르코니아 전성형체의 수축률과 상대밀도 값을 측정한 결과(Fig. 2) 수축률은 0.6 %에서 지르코니아가 5 wt% 첨가됨에 따라 ~0 %로 감소하고 지르코니아 양이 증가함에 따라 일정한 값을 유지하였다. 상대밀도는 지르코니아 첨가에 따라 다소 증가하였으나 거의 일정하였다. 지르코니아를 첨가함에 따라 알루미나/지르코니아 전성형체의 수축률이 ~0 %로 감소한 것은 큰 입자들에 의한 수축률은 거의 무시할 정도이므로 작은 알루미나 입자들의 치밀화(densification)가 발생하지 않은 것으로 추정된다[18]. 큰 알루미나 입자와 작은 알루미나 입자들간의 접촉이 Fig. 3의 SEM 미세조직에서 보는 것처럼 결정입계로 이동한(migrate) 흰색의 지르코니아 입자에 의하여 단절되고 수축률이 매우 느린 큰 알루미나 입자들에 의한 치밀화만 가능하지만 큰 입자들의 구조적 강성(structural rigidity) 때문에 지르코니아가 첨가됨에 따라 수축률이 ~0 %로 감소한 것으로 추정된다[7, 8, 16, 17]. 일반적으로 작은 알루미나 입자들의 빠른 치밀화는 큰 알루미나 입자 주위의 기공 크기를 증가시킨다고 보고되었다[18]. 그러나, 알루미나/지르코니아 전성형체의 기공 크기는 지르코니아 양이 0~20 wt%로 증가함에 따라 0.44 μm에서 0.21 μm로 점차적으로 감소하였다. 그러므로, 기공 감소현상은 알루미나의 치밀화가 발생하지 않았으므로 작은 입자 크기를 가진 지르코니아의 충전 때문에 발생하는 것으로 추정된다.

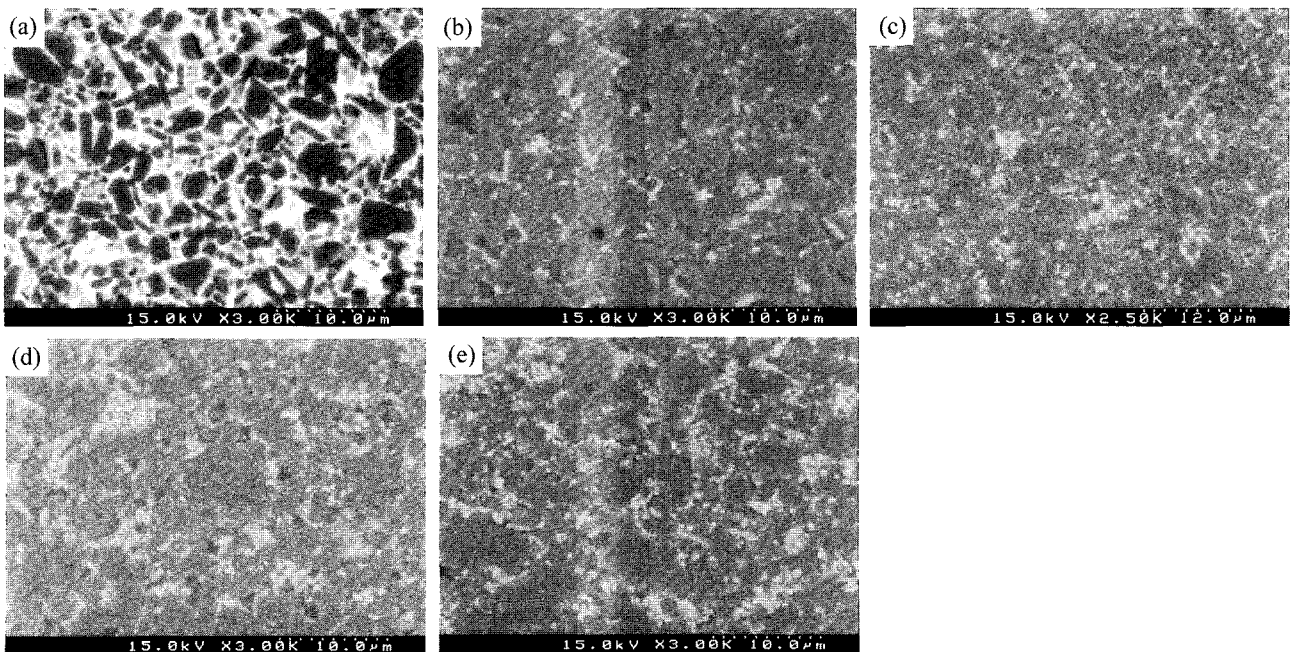


Fig. 3. SEM micrographs of imaged with backscattered electrons of alumina/zirconia-glass composites. The zirconia content is (a) 0 %, (b) 5 %, (c) 10 %, (d) 15 % and (e) 20 %, respectively.

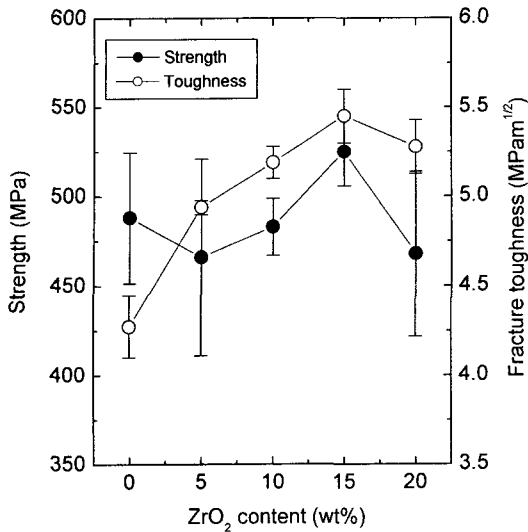


Fig. 4. Flexural strength and fracture toughness of alumina/zirconia-glass composites as a function of zirconia content.

알루미나/지르코니아-유리 복합체의 강도와 인성값이 Fig. 4에 나타나 있다. 강도값은 지르코니아 양이 20 wt% 첨가될 때까지 오차범위 내에서 일정한 값을 유지하였다. 하지만, 인성값은 지르코니아 첨가량이 15 wt%까지 증가함에 따라 증가하다가 20 wt%에서 감소하였다. 일반적으로 Griffith의 파괴이론에 의한 유리의 결함 크기는 $50\ \mu\text{m}$ 로 평균 알루미나 입자간 거리보다 큰 경우에는 결함의 크기가 입자간 평균거리에 의하여 결정되어지는 강도의 관계식($\sigma = [3\gamma E\Phi/\pi R_{Al}(1-\Phi)]^{1/2}$, σ , E , Φ , R_{Al} 은 각각 강도, 탄성계수, 알루미나 부피분율, 알루미나

입자 크기 반경)에서 보는 것처럼 강도값은 알루미나 입도와 입자 부피분율에 의하여 결정되어진다[17]. 알루미나의 입도는 1120°C 의 1차 소결온도에서 변화가 거의 없으므로 지르코니아 양 증가에 의한 고체분율의 증가로 강도값이 증가할 것으로 추정된다. 하지만, Fig. 4에서 보는 것처럼 지르코니아 양의 증가로 인한 기공률의 증가로 복합체의 강도값에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 관찰되었다. 기공률은 지르코니아 함량이 0%에서 20%로 증가함에 따라 38.5%, 39.98%, 40.2%, 40.95%, 43.89%로 증가하였다.

알루미나/지르코니아-유리 복합체의 인성 강화기구는 균열 휨과 지르코니아 입자의 상변태에 의한 복합효과에 의하여 증가하고 기공률의 증가로 감소한다고 보고되었다[19]. Fig. 5에서 보는 것처럼 경도가 우수한 알루미나 입자에서는 균열 휨 현상이 발생하고 지르코니아 입자는 균열에 의해 절단되는 현상이 관찰되었다. 하지만, 균열 시 지르코니아 입자의 상변태에 의한 압축응력에 의하여 균열의 전파를 억제함으로써 인성이 증가할 것으로 추정된다. 하지만, 지르코니아 함량이 증가함에 따라 기공률의 증가로 인하여 20% 이상 첨가된 경우에는 인성의 감소가 관찰되었다. 복합체의 최적 조건은 지르코니아가 15 wt% 첨가되었을 때이며 강도와 인성값은 각각 $525 \pm 19\ \text{MPa}$, $5.45 \pm 0.15\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 이었다.

$\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 계 유리 침투시간과 침투 깊이에 대한 결과가 Fig. 6에 도시되어 있다. 일반적으로, 일정깊이에 유리가 도달하는 시간은 기공의 크기에 비례한다고 발표되었다[8, 16, 17]. 유리침투능력은 Fig. 6에서 보는

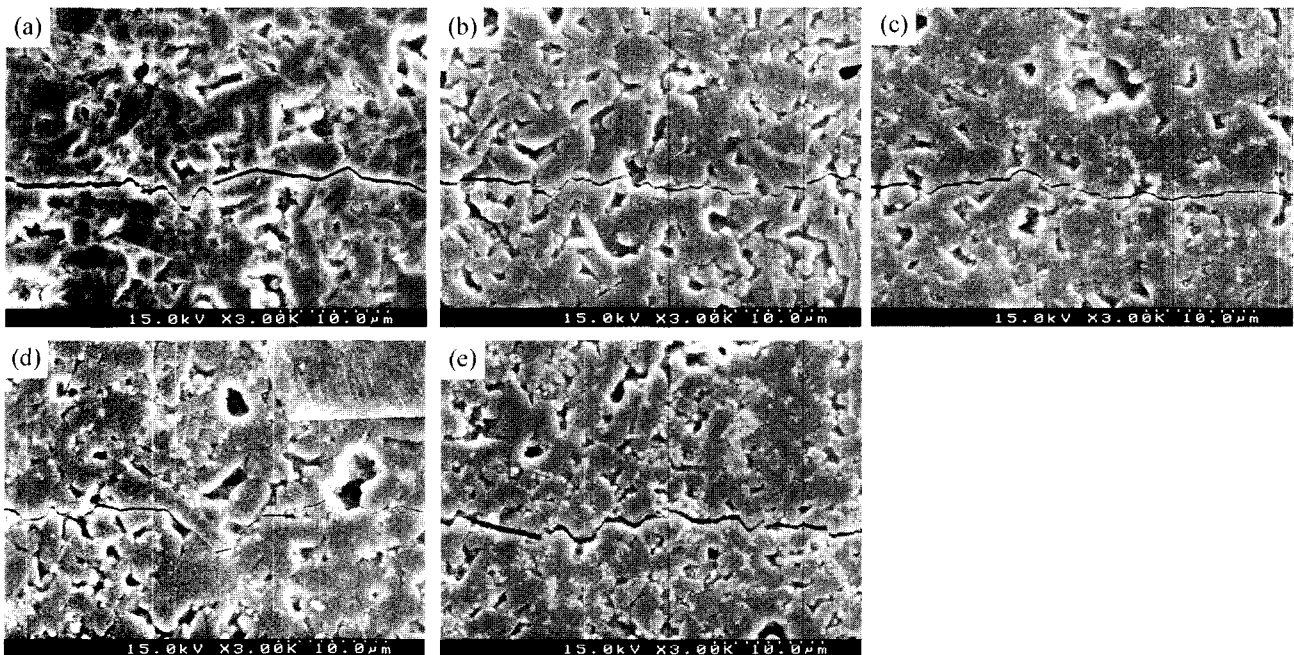


Fig. 5. SEM micrographs of imaged with backscattered electrons of the indented alumina/zirconia-glass composites. The zirconia content is (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, (d) 15% and (e) 20%, respectively.

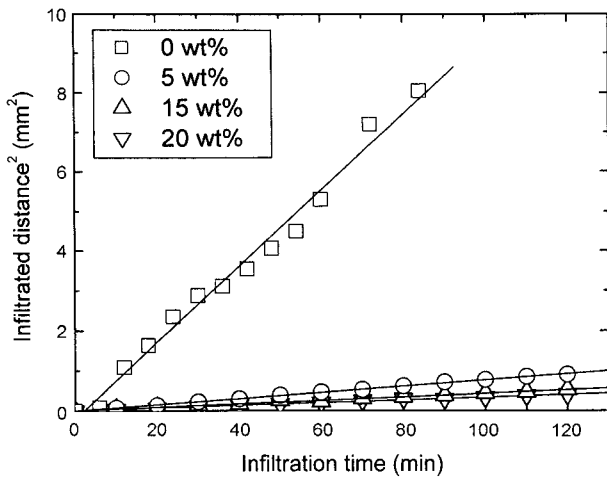


Fig. 6. (Infiltrated distance)² as a function of infiltration time for the alumina/zirconia preforms having different zirconia content.

것처럼 유리침투 시간이 증가할수록 Washburn 식($x^2/t = K$; x , t , K 는 침투깊이, 침투시간, 침투상수)에 [20, 21] 의거 포물선 형태로 증가하였으며, 증가율은 기공 크기가 증가할수록 증가하였다. 지르코니아 첨가량이 0~20%로 증가함에 따라 기공 크기는 $0.44 \mu\text{m}$ 에서 $0.21 \mu\text{m}$ 로 감소하였다. 지르코니아 양이 증가함에 따라 작은 기공 크기 때문에 유리침투에 많은 시간이 소요되므로 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 치밀화에 제약이 있을 것으로 추정되었다. 기계적 특성 실험결과, 지르코니아가 20% 첨가시 복합체의 강도와 인성값이 감소하는 것이 관찰되었다. 본 연구의 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 계 유리 침투 거동의 실험적 결과는 Washburn식 [20, 21]과 일치하였다.

가시광선 영역인 360~700 nm 범위 내에서 UV spectrometer를 이용 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 투과도와 색상변화를 측정하였다. Fig. 7에서 보는 것처럼 가시광선 파장 내에서 흡수 및 반사가 일어날 시에는 투

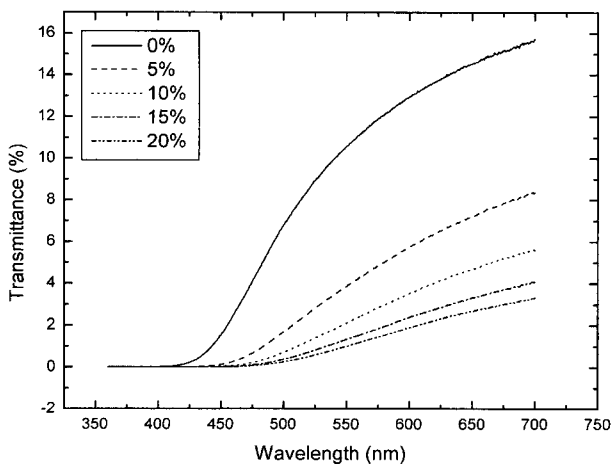


Fig. 7. Transmittance spectra in visible region of alumina/zirconia-glass composites having different zirconia content.

과 피크가 비연속적으로 발생하지만 알루미나/지르코니아-유리 복합체 모든 시편들은 연속적인 투과 피크가 관찰되었다. 투과도는 파장이 360 nm에서 700 nm로 장파장쪽으로 갈수록 증가하였다. 일반적으로 장파장인 550~700 nm는 빨강(610~700 nm), 주황(570~590 nm), 노란색(500~570 nm)으로 구성되어있다. 자연치아의 색상은 노란 갈색계통(yellowish brown)으로 상기 결과는 인공치아용 소재로 적합하였다. 하지만, 지르코니아 양이 증가함에 따라 투과율은 감소하므로 지르코니아는 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 투과성에 효과적이지 못하였다. 흰색의 지르코니아 첨가는 명도(lightness, L^*)를 증가시키지만 채도(C^*)가 감소하였다. 채도의 감소는 색의 선명도가 감소하면서 탁도를 증가시켰다 [12]. 지르코니아 첨가량의 증가는 녹색($-a^*$)과 황색(b^*)이 감소하는 방향으로 색이 변하였다. 그러므로, 지르코니아의 첨가로 인한 색의 변화는 크지 않았지만 명도가 증가한 반면 심미적인 투과성과 채도(L^*)가 감소하였다.

4. 결 론

Die-pressing법으로 제조한 알루미나/지르코니아 전성형체에 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 계 알루미나 및 지르코니아 유리를 혼합 침투시켜 만든 알루미나/지르코니아(15 wt%)-유리 복합체는 단일 인공치관 및 브리지 인공치관 응용에 충분한 기계적 특성인 525 MPa의 이축강도와 $5.45 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 파괴인성값이 관찰되었다. 유리 침투시간이 증가할수록 침투깊이는 포물선 관계로 증가하였으며 침투 상수인 K 는 기공 크기의 함수인 지르코니아 첨가량이 증가할수록 감소하였다. 지르코니아 양이 증가함에 따라 유리 침투 상수(K), 투과율(transmittance), 채도가 감소하였다. 지르코니아가 15 wt%까지 첨가됨에 따라 알루미나/지르코니아-유리 복합체의 인성값이 증가하였지만 강도값의 변화는 없었다. 따라서 정방형 지르코니아의 첨가는 유리침투 복합 세라믹 재료를 강화시키는데 크게 기여하지 않았다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R-05-2000-000-00242-0) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] S.O. Hondrum, "A Reviews of the Strength Properties

- of Dental Ceramics", *J. Prosthet. Dent.* 67(6) (1992) 859.
- [2] W.D. Wolf, "Strength and Fracture Toughness of Alumina-Glass Dental Composites Prepared by Melt-Infiltration, Ph.D. Dissertation", University of Minnesota (1995).
- [3] H. Hornberger, "Strength Microstructure Relationships in a Dental Alumina Glass Composite, Ph.D. Dissertation", University of Birmingham (1995).
- [4] D.-J. Kim, M.-H. Lee and C.-E. Kim, "Mechanical Properties of Tape Cast Alumina-glass Dental Composites", *J. Am. Ceram. Soc.* 82(11) (1999) 3167.
- [5] T. Sohmura and J. Takahashi, "Use of CAD/CAM System to Fabricate Dental Prostheses. Part I: CAD for a Clinical Crown Restoration", *Int. J. Prosthodontics* 8(3) (1995) 252.
- [6] J. Gauckler, F. Filser, P. Kocher, H. Luthy, P. Scharer and A. Feher, "High Strength, High Reliable All-ceramic Dental Bridges", *Intl. Sym. Advanced Materials with Biomedical Applications*, June 7-8, 1999, Githersburg, MD, USA.
- [7] D.Y. Lee, J.-W. Jang, D.-J. Kim, I.-S. Park, J.-K. Lee, M.-H. Lee and B.-Y. Kim, "Glass-alumina Composites Prepared by Melt-infiltration: I. Effect of Alumina Particle Size", *J. Kor. Ceram. Soc.* 38(9) (2001) 799.
- [8] D.Y. Lee, J.-W. Jang, D.-J. Kim, I.-S. Park, J.-K. Lee, M.-H. Lee and B.-Y. Kim, "Glass-alumina Composites Prepared by Melt-infiltration: II. Kinetic Studies", *J. Kor. Ceram. Soc.* 39(2) (2002) 145.
- [9] 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. Intl.* 27(3) (2001) 291.
- [10] 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) (2002) 2171.
- [11] 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) (1998) 185.
- [12] D.Y. Lee, D.-J. Kim and Y.-S. Song, "Chromaticity, Hydrothermal Stability and Mechanical Properties of t- ZrO_2/Al_2O_3 Composites Doped with Yttrium, Niobium and Ferric Oxides", *Mater. Sci. & Eng. A* A289 (2000) 1.
- [13] Standard Test-Method for Biaxial Flexure Strength (Modulus of Rupture) of Ceramic Substrates, ASTM Designation F 394-78, Annual book of ASTM Standards Vol. 15.02, Section 15, 446-450. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA (1996).
- [14] International Standard of Implants for Surgery - Ceramic Materials Based on High Purity Alumina, ISO 6474:1994(E), Geneva, Switzerland.
- [15] P. Chantikul, G.R. Anstis, B.R. Lawn and D.B. Marshall, "Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II. Strength Method", *J. Am. Ceram. Soc.* 64(9) (1981) 539.
- [16] D.Y. Lee, D.-J. Kim and Y.-S. Song, "Properties of Glass-spinel Composites Prepared by Melt Infiltration", *J. Mater. Sci. Lett.* 21(15) (2002) 1223.
- [17] D.Y. Lee, D.-J. Kim and B.-Y. Kim, "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* 34(1) (2003) 98.
- [18] S. Taruta, K. Kawashima, K. Kitajima, N. Takusagawa, K. Okada and N. Otsuka, "Influence of Zirconia Addition on the Sintering Behavior of Bimodal Size Distributed Alumina Power Mixtures", *J. Ceram. Soc. Jpn.* 102(2) (1994) 139.
- [19] M. Guazzato, M. Albakry, M.V. Swain and S.P. Ringer, "Microstructure of Alumina and Alumina/zirconia-glass Infiltrated Dental Ceramics", *Key Eng. Mater.* 240 (2003) 879.
- [20] W.B. Hillig, "Melt Infiltration Approach to Ceramic Matrix Composites", *Comm. Am. Ceram. Soc.* 71(2) (1988) C96.
- [21] E.O. Einsler, "Capillary Infiltration Rates into Porous Media with Applications to Silcomp Processing", *J. Am. Ceram. Soc.* 79(2) (1996) 333.