

유리침투 알루미나 복합체의 물성에 미치는 유리조성의 영향 (II) : La₂O₃의 영향

이재희 · 김철영[†]

인하대학교 세라믹공학과
(2004년 11월 9일 접수; 2004년 11월 30일 승인)

Effect of Glass Composition on the Properties of Glass-Infiltrated Alumina (II) : Effect of La₂O₃

Jae-Hee Lee and Cheol Young Kim[†]

Department of Ceramic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
(Received November 9, 2004; Accepted November 30, 2004)

초 록

SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO-La₂O₃계 유리에서 La₂O₃를 변화시키며 다양한 조성의 유리를 만든 후 이를 다공성 알루미나에 침투시켜 알루미나-유리 복합체를 얻었다. 여기서 유리의 조성 변화에 따른 침투특성 및 기계적 강도의 변화를 관찰하였다. 유리중의 La₂O₃는 유리의 고온 점도를 감소시켜 유리의 젖음성과 유동성을 향상시키고 유리의 침투를 용이하게 한다. 유리가 다공성 알루미나에 침투하여 기공을 메우면서 일부 알루미나를 용해시킨다. 이 유리 용융물 중 Al₂O₃ 성분은 결정질 알루미나에 다시 석출하여 입자성장이 일어나는데 이때 특정 방향으로 알루미나 입자가 성장한다. La₂O₃가 20 몰% 첨가된 유리를 침투시켰을 때 유리가 결정화하여 복합체의 강도를 증진시켰다.

ABSTRACT

Glasses of SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃-CaO-La₂O₃ with various amounts of La₂O₃ were infiltrated into a porous alumina to make an alumina-glass composite. The infiltration characterization and bending strength of the composite were examined in terms of glass composition. La₂O₃ in the glass decreased the high temperature viscosity and this enhanced the wetting behaviour of this glass to alumina, and made glass infiltration easier. The infiltrated glass dissolved the alumina skeleton, and Al₂O₃ component in the glass melt reprecipitated on the alumina. The grain growth occurred to a specific crystal direction. The glass containing 20 mole% of La₂O₃ was crystallized after infiltration, and this enhanced the bending strength of the composite.

Key words : High temperature viscosity, Glass-alumina composite, Dissolution-reprecipitation grain growth, Infiltration

1. 서 론

인공 치관 재료로는 금속, 도치, 완전 세라믹(all ceramics) 등이 사용되고 있다. 현재는 금속 재료에 유리를 코팅하여 우수한 기계적 성질을 나타내면서 심미성을 보완한 도치가 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이 경우 유리의 두께가 얇아서 금속의 색이 밖으로 비치게 되어 심미성이 떨어지게 된다.¹⁾ 따라서 심미성이 우수한 세라믹스를 치관재료로 사용하려는 노력이 이루어져 왔으나 세라믹스의 취약성이 항상 문제가 되었다.^{2,3)}

1980년대 세라믹스를 비교적 낮은 온도에서 소결하여 다공성 세라믹스를 얻은 후 그 기공 속으로 금속 용융물

을 침투시켜 세라믹-금속 복합체를 얻는 상호 침투 복합재료(inter-penetrating phase composition) 기술이 소개되었다.^{4,5)} 한 독일 회사는 이 방법을 이용하여 가공성과 강도가 우수한 완전 세라믹스 치관재료를 개발하였다.^{6,7)} 이 방법에서는 알루미나를 주입 성형한 후 저온에서 열처리하여 다공성 알루미나 소결체를 얻고 이 다공체에 유리를 침투시켜 알루미나-유리 복합체를 만드는 것이다. 이때 낮은 온도에서 소결된 알루미나는 가공성이 우수하여 치아 모양으로 쉽게 가공할 수 있고 그 속에 유리를 침투시켜 기계적 강도가 우수하고 인성이 좋은 완전 세라믹 치관재료를 얻을 수 있었다.

이 때 침투용 유리로는 SiO₂-B₂O₃-CaO-La₂O₃-Al₂O₃계 유리가 많이 사용되고 있으며 이에대한 보고는 많이 되고 있다.^{8,9)} 그러나 이 유리를 구성하는 각 성분이 얻어진 복합재료의 물성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 본 연구자는 지난번 연구에

[†]Corresponding author : Cheol Young Kim
E-mail : cheolkim@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7525 Fax : +82-32-862-0129

Table 1. Glass Batch Composition and Density

(mol%)

Component	Batch	L0	L5	L10	L15	L17	L20
SiO ₂		37	35.1	33.3	31.4	30.7	29.6
B ₂ O ₃		23	21.9	20.7	19.6	19.1	18.4
Al ₂ O ₃		22	20.9	19.8	18.7	18.3	17.6
CaO		18	17.1	16.2	15.3	14.9	14.4
La ₂ O ₃		0	5	10	15	17	20
Density (g/cm ³)		2.52	2.92	3.33	3.66	3.83	4.03

서 이 계의 유리에서 Al₂O₃의 영향에 대한 연구를 보고한 바 있다.¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 SiO₂-B₂O₃-CaO-La₂O₃-Al₂O₃계 유리에서 먼저 La₂O₃가 유리의 점도 및 젖음 성에 미치는 영향을 구명하고, 이들 유리를 다공성 알루미늄에 침투시켰을 때의 침투 특성과 기계적 강도에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 구명하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 침투용 유리의 제조

본 연구에서 사용한 침투용 유리 조성은 Table 1에 나타내었다.

이들 유리에서는 L0를 기본 조성으로 하여 SiO₂, B₂O₃, Al₂O₃, CaO의 상대적인 양은 일정히 유지하면서 La₂O₃의 첨가량을 0 몰%에서 20 몰%까지 변화시켰다. 그리고 이 표에는 얻어진 유리의 밀도도 함께 나타내었다.

유리를 제조하기 위한 원료로는 일급시약인 SiO₂, H₃BO₃, CaCO₃, Al₂O₃, La₂O₃를 사용하였다. Table 1의 조성에 따라 각 성분을 유리 기준 100g으로 칭량하여 자이로 블렌더에서 1시간동안 잘 혼합한 후 백금 도가니에 넣고 용융하였다. 용융온도는 조성에 따라 1200~1500°C으로 하였으며, 2시간 동안 용융한 후 스테인레스 강판 위에서 급냉, 파쇄하여 유리분말을 얻었다. 균질한 유리를 얻기 위해 이들 유리분말을 위와 같은 조건으로 재 용융 하였다. 2차 용융이 끝난 유리는 흑연 몰드에 부어 4각 봉으로 성형하고, 유리전이온도 근처에서 서냉 하였다. 이 유리봉을 적당한 크기로 절단하여 침투용 유리로 준비하였다.

2.2. 유리-알루미늄 복합체 시편의 제작

먼저 다공성 알루미늄은 다음과 같은 방법으로 제작하였다. 즉, 평균 입자 크기가 0.75 μm인 α-알루미늄 분말(A17series, 순도 99.8~99.9%, 밀도 3.90 g/cm³, Alcoa) 6g에 미량의 물을 성형조제로 혼합한 후 29 MPa의 압력으로 성형하였다. 이때 시편의 크기는 10×60×4 mm인 직육면체로 하였으며, 이 성형체를 5°C/min의 승온속도로 1100°C에서 1시간 동안 소성하였다. 소성된 알루미늄은 다이아

몬드 절단기를 이용하여 40 mm 길이로 절단하고 표면을 600 mesh SiC 연마지로 연마하여 유리 침투용 시편으로 준비하였다.

복합체 시편의 제작은 소성된 다공성 알루미늄 위에 각 조성의 유리를 덩어리 상태로 올려놓고 1300°C에서 열처리하여 얻었다. 이 때 유리와 알루미늄간 반응성이 없다고 가정할 경우, 침투깊이는 다음 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.¹¹⁾

$$h = \left(\frac{d_p t \gamma_s \cos \theta}{4\eta} \right)^{1/2} \quad (1)$$

여기서, h 는 침투깊이, d_p 는 기공의 크기, t 는 침투시간, γ_s 는 유리의 표면에너지, θ 는 젖음각, η 는 유리의 점도이다.

2.3. 유리의 고온점도 측정

본 연구에서 사용할 모든 유리에 대한 고온 점도를 측정하였다. 먼저 각 조성의 유리를 분쇄하여 특수하게 제작된 백금도가니(외경-20.5 mm, 내경-18.5 mm)에 넣고 1400°C에서 충분히 용융시켰다. 그리고 로의 온도를 1300°C, 1200°C로 내린 후 HBTDV-II(BrookField)점도계를 이용하여 점도를 측정하였다. 이 때 로 내의 열적 평형을 위해 각 온도에서 30분간 유지 시간을 주었다. 그리고 사용된 스펀들은 27번 백금 스펀들(지름-11.5 mm)이었다.

2.4. 알루미늄에 대한 유리의 젖음각 측정

Table 1에 나타난 모든 유리에 대하여 알루미늄에 대한 젖음 각을 자체 제작한 로를 이용하여 측정하였다. 먼저 유리분말을 44 μm 이하로 분쇄한 후 5% PVA 용액과 섞어서 지름 3.85 mm, 높이 5 mm의 원기둥형 시편으로 성형하였다. 이를 순도 99%의 치밀질 알루미늄 기판 위에 세우고 젖음 성(wettability) 측정 로에서 온도 변화에 따른 유리의 봉괴현상을 관찰하였다. 1400°C까지 5°C/min의 승온 속도로 온도를 상승시키면서, 일정 시간마다 카메라로 촬영하였고 이 때 얻어진 사진으로부터 젖음 각(wetting angle)을 측정하였다.

2.5. 굽힘 강도 측정

각 조성의 유리가 침투된 복합체의 굽힘 강도는 만능

시험기(대경정밀공업(주), R300)를 이용하여 KSL 1591¹²⁾의 굽힘 강도 시험 방법에 따라 측정하였다. 3-점 굽힘 측정법을 이용하였으며, 이 때 하부 지지 점 사이의 거리는 20 mm, 시험편의 하중 점 크로스 헤드 속도는 0.5 mm/min로 하였다.

2.6. 미세 구조 분석

복합체의 파단면을 경면 연마 한 후 50 vol% HF 용액으로 30초 동안 에칭하여 시편을 준비하였다. 각 조성의 유리가 칩투된 복합체의 미세구조를 주사 전자현미경(Hitachi; X-4200, 가속전압 20 kV)과 에너지 분산 스펙트럼(EDS)을 통하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유리의 조성 변화에 따른 젖음성 변화와 점성변화

다공성 알루미늄에 유리를 칩투시킬 때 가장 중요한 성질은 각각의 표면장력 특성에 의한 유리의 알루미늄에 대한 젖음성과 유리의 점성이다.¹³⁾ 따라서 유리를 칩투시키기 전 각 조성의 유리에 대한 알루미늄과의 젖음성을 관찰하여 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다.

유리와 알루미늄기판 사이의 젖음각과 퍼짐성은 다음 식들로 표현된다.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \tag{2}$$

$$S_{sl} = \gamma_{sv} - (\gamma_{lv} + \gamma_{sl}) \tag{3}$$

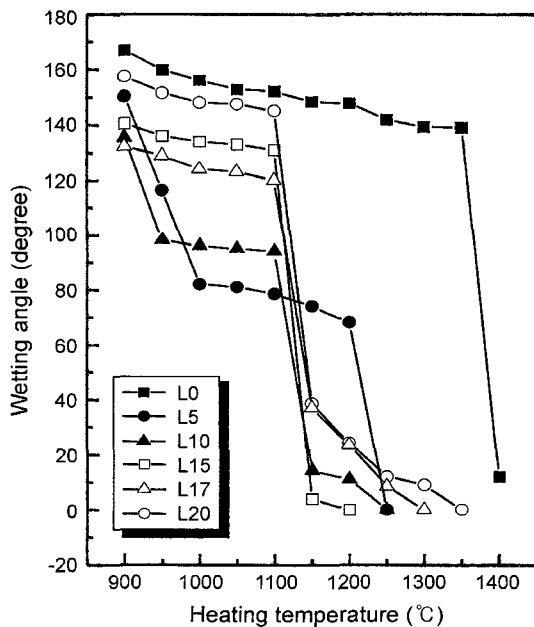


Fig. 1. Wetting angle variation of the glass with La₂O₃ content.

여기서 θ 는 젖음각, S_{sl} 은 퍼짐 계수 그리고 γ_{sv} 는 알루미늄의 표면 에너지, γ_{lv} 는 유리의 표면 에너지, γ_{sl} 은 알루미늄과 유리사이의 계면에너지이다. 퍼짐이 이루어지기 위해서는 퍼짐 계수 값이 양이어야 한다. 유리의 조성에 관계없이 일정한 온도에서 γ_{sv} 는 항상 같고 유리의 조성에 따라 변화가 있는 것은 γ_{lv} 와 γ_{sl} 이다.

본 연구에서 사용한 유리 중에서 La₂O₃가 첨가되지 않은 유리는 1350°C까지 큰 젖음 각을 나타내고 있었다. 그러나 La₂O₃가 5 몰% 첨가된 유리에서는 젖음 각이 1200°C를 지나면서 갑자기 줄어들었고, 10 몰% 이상 첨가된 유리에서는 1100°C를 지나면서 젖음 각이 갑자기 줄어들기 시작했다. 유리 중에 La₂O₃의 첨가량이 15 몰%까지 증가함에 따라 온도에 따른 젖음 각의 감소가 빨리 일어나 L17 유리의 경우 1200°C에서 완전한 젖음 성을 나타냈다. 이로서 La₂O₃를 소량만 첨가하여도 완전 젖음 성을 나타내는 온도가 현저히 감소함을 알 수 있다. La₂O₃를 17% 이상 첨가하였을 때 1050°C 근처에서 젖음 각이 서서히 감소하는 것은 이 온도에서 유리가 결정화하는 것과 연관이 있다고 생각한다. 이들 유리를 1200°C와 1300°C에서 열처리한 시편을 X-선 회절 분석해 본 결과 L17, L20에서 Ca₃La₆(SiO₃)₁₂라고 하는 결정상이 발견되었으며 L20 유리를 1300°C에서 열처리 하였을 때의 XRD 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

이렇게 La₂O₃를 첨가함에 따라 젖음 성이 증가하는 것은 La₂O₃ 첨가에 따라 ($\gamma_{lv} + \gamma_{sl}$) 값이 감소함을 나타내고 있다. 그러나 비슷한 계의 유리에서 La₂O₃가 표면장력에 미치는 영향에 관한 연구보고가 없어서 현재로는 정확한 이유를 설명할 수는 없다.

모든 조성의 유리에 대하여 1200°C와 1300°C에서 점도를 측정하였다. 그리고 그 결과 Fig. 3에 나타내었다.

La₂O₃가 15 몰%까지 그 첨가량이 증가됨에 따라 점도

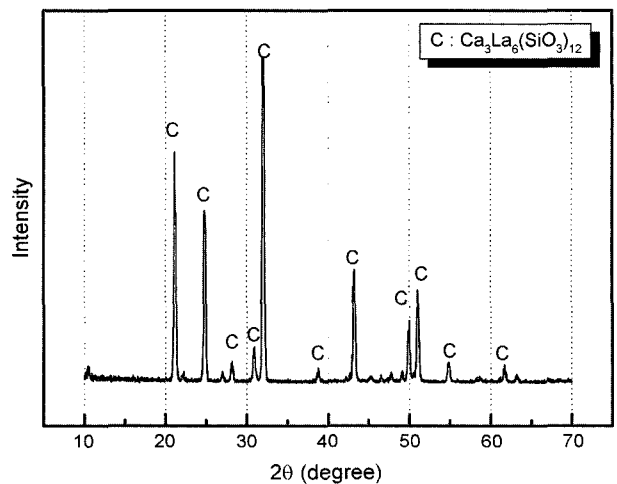


Fig. 2. XRD patterns of L20 glass heat-treated at 1300°C.

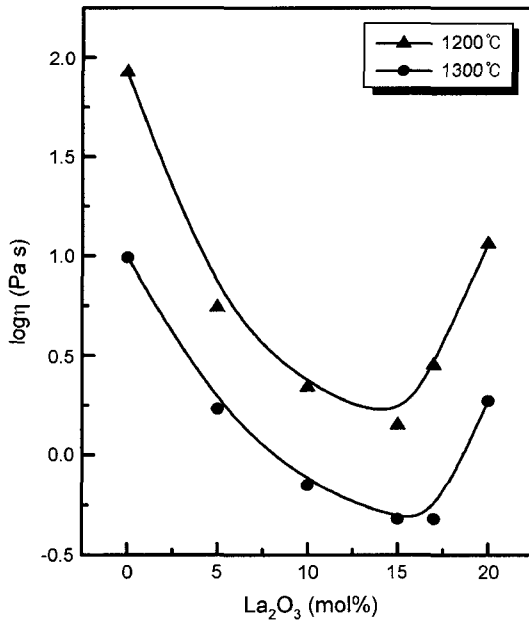


Fig. 3. High temperature viscosity variation of the glass with La₂O₃ content.

값이 감소하여, 1300°C에서는 그 점도 값이 9.76 Pa · s에서 0.48 Pa · s로 낮아졌다. 이는 La₂O₃가 알루미나 규산염계 유리 구조 내에서 수식체로 들어가 용제 역할을 하기 때문이다.^{14,15)} La₂O₃가 15 몰% 이상의 첨가량에서는 점도 값이 다시 증가하는 경향이 보였는데, 이는 유리의 결정화가 일어나기 때문이다.

3.2. 유리의 조성 변화에 따른 침투깊이 변화

유리의 조성에 따라 다공성 알루미나로의 침투가 어떻게 진행되는지를 알아보기 위해 1100°C에서 소성한 알루미나 시편을 사용하여 유리 조성변화에 따라 침투깊이를 측정하여 보았다. La₂O₃ 계열의 유리에서는 짧은 시간 열처리하여 유리를 침투시킬 경우 유리-알루미나간 반응성이 크지 않아 실험 방법의 식(1)을 적용시킬 수 있으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

유리의 침투깊이는 다음과 같이 측정하였다. 즉, 다양한 조성의 유리를 다공성 알루미나에 침투시킨 후 다이아몬드 절단기를 사용하여 시편의 파단면을 얻는다. 그리고 이 시편을 푸른색 잉크에 담근 후 광학현미경으로 보면서 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정되었다 침투깊이를 측정하였다. 침투가 된 부분은 잉크를 흡수하지 않아 색깔을 띠지 않으나 침투가 되지 않은 부분은 잉크가 흡수되어 푸른색을 나타내었다.

그리고 계산 값에 사용한 각 변수의 값은 다음과 같이 하여 결정되었다. 기공의 크기는 0.1 μm로 하였고,¹⁶⁾ 침투시간은 3분으로 하였으며 젖음 각과 점도는 앞 절의 실측값을 대입하였다. γ₀는 CaO-Al₂O₃-SiO₂로 이루어진 조

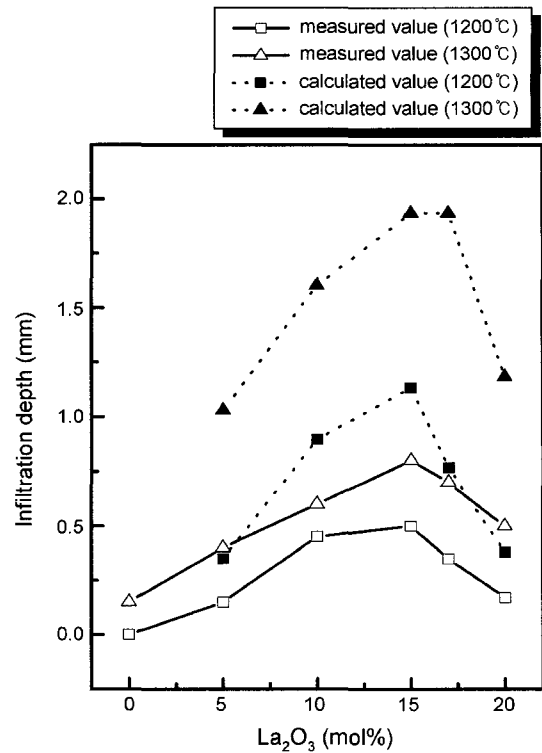


Fig. 4. Change in infiltration depth of the glass with La₂O₃ content.

성의 온도에 따른 표면장력의 값¹⁷⁾을 참고하여 1200°C와 1300°C에서의 모든 표면 장력 값을 400 mJ로 계산하였다.

1200°C에서는 계산 값이 실측값에 비해 2~2.3배 더 큰 값을 나타내고 있었고 1300°C에서는 계산 값이 실측값에 비해 2.4~2.8배 더 큰 값을 나타내고 있었으나 그 경향성은 잘 일치하고 있었다. 계산값과 실측값이 차이를 보이는 것은 계산식이 하나의 원통형 모세관에 의해 침투될 때를 가정하여 만들어졌고, 알루미나 기공 내에 차있는 기체의 영향에 의해 유리의 침투가 방해되었기 때문이라 생각된다.¹⁸⁾ 한편 La₂O₃이 다량 포함된 본 실험의 경우 γ₀값이 정확히 400 mJ이라고 말하기는 힘들다. 그리고, 이들 결과에서 L0의 유리는 1200°C와 1300°C 모두에서 젖음 각이 90° 이상이였기 때문에 계산 값을 낼 수가 없어 표기하지 않았다.

이들 유리의 침투깊이 결과로 볼 때 알루미나 기공 속으로의 유리의 침투는 유리의 젖음성과 점도에 큰 영향을 받고 있었고 점도가 낮을수록 젖음 성이 좋을수록 그 침투깊이가 증가하였다.

3.3. 알루미나-유리 복합체의 미세구조 분석

다공성 알루미나에 유리를 침투시킨 후 나타나는 미세구조변화를 알아보기 위하여 먼저 1100°C에서 소성한 알루미나를 유리를 올려놓지 않고 1300°C에서 5분, 2시간,

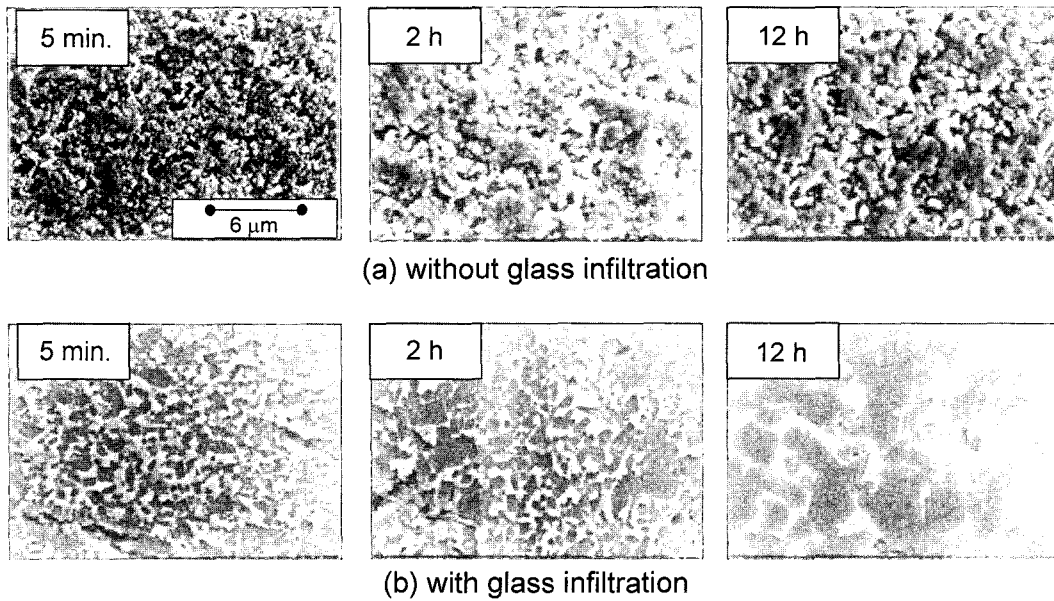


Fig. 5. Microstructure changes of alumina with heat-treatment time at 1300°C .

12시간 열처리하여 시편을 준비하였다. 그리고 1100°C 에서 소성한 알루미나위에 L15 유리를 얹고 1300°C 에서 5분, 2시간, 12시간 침투시킨 시편을 준비하였다. 이들 시편에 대한 주사전자현미경 관찰 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

유리 없이 1300°C 에서 소성한 알루미나는 열처리시간이 길어짐에 따라 약간의 치밀화 과정만이 보이고 입자

의 성장은 나타나고 있지 않았으나, L15 유리를 침투시킨 복합체는 침투시간이 증가함에 따라 알루미나 입자의 성장이 보였고, 특히 특정 방향으로 입자성장이 더 크게 나타났다. 이러한 입자성장의 기구를 Fig. 6에 모식도로 나타내었다.

1100°C 에서 소성된 알루미나는 약 45%의 기공을 가지고 있고, 1300°C 에서 유리를 침투시키게 되면 여기에 유리 용융체가 채워지며 동시에 입자의 재배열이 발생하게 된다. 즉, Fig. 6(c)처럼 용해-석출 과정으로 인해 작은 입자들이 유리 내로 용해되어 큰 입자 위로 다시 석출하여 입자의 성장이 이루어지게 된다. 이때 입자의 성장은 한쪽 방향으로 더 크게 일어나 판상의 모양을 띄고 기둥과 같은 면을 가지게 된다. 이러한 입자의 재배열은 수분 내에 이루어진다¹¹⁾고 보고되어 있다. 그리고 알루미나 분말을 유리와 함께 소결할 때 이 유리가 알루미나를 쉽게 용해시키고 이어서 녹아있던 Al^{3+} 이온이 알루미나의 (0001)과 $(\bar{1}102)$ 면으로 석출하여 기둥면을 형성한다고 보고^{13,16)}하고 있는데 본 실험에서도 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 생각한다.

3.4. 조성변화에 따른 기계적 강도의 변화

La_2O_3 가 전혀 포함되지 않은 유리(L0)를 제외한 모든 조성의 유리를 1100°C 에서 소성된 다공성 알루미나에 침투시킨 후 굽힘 강도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. L0의 경우는 유리의 침투가 충분히 일어나지 않아 강도 측정에서 제외하였다.

La_2O_3 의 양을 5 몰%에서 17 몰%로 증가하여도 굽힘 강도 값은 147 MPa에서 168 MPa로 20 MPa 정도 증가할 뿐

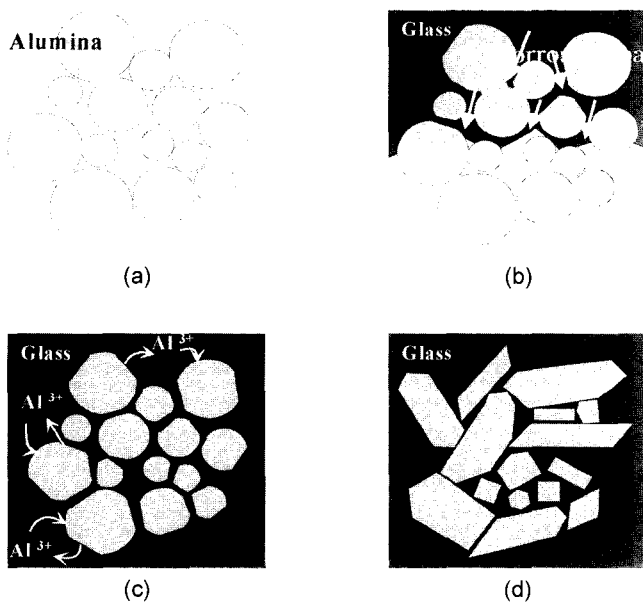


Fig. 6. Glass infiltration and grain growth mechanism. (a) sintered body, (b) infiltration (corrosion and rearrangement), (c) dissolution and precipitation, and (d) grain growth.

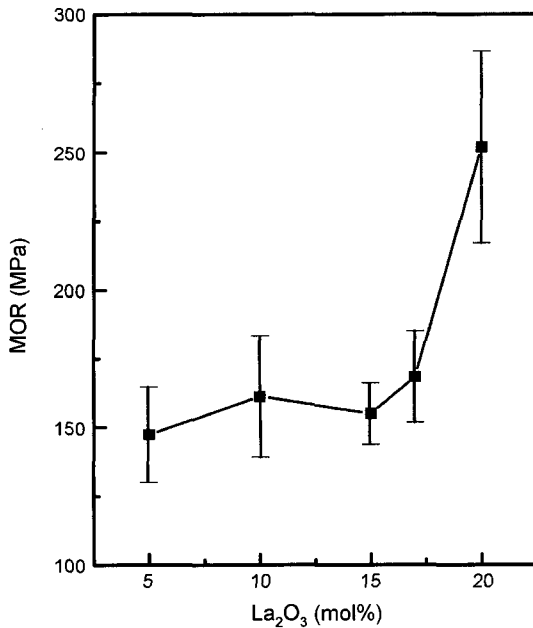


Fig. 7. MOR variation of glass-infiltrated alumina with various La₂O₃ contents in the glass.

큰 증가는 보이지 않았다. 앞의 연구(Al₂O₃의 영향)¹⁰⁾에서는 유리에서 Al₂O₃ 양이 증가할수록 알루미늄의 침식이 줄어들어 강도가 증가하였다. 그러나 본 연구에서는 침투용 유리 중 Al₂O₃의 양이 22% 정도로 일정하였기 때문에 침식 특성이 La₂O₃의 첨가량에 따라 비슷하게 나타나므로 강도 변화도 거의 나타나지 않았다. La₂O₃가 20 mole% 첨가된 L20 유리의 경우에는 유리가 침투된 후 결정화가 일어났다. 그 결정상은 Fig. 2에 나타난 것처럼 Ca₃La₆(SiO₃)₁₂이었으며 이 시편의 강도 값은 다른 시편의 강도 값보다 훨씬 높은 252 ± 23 MPa를 나타내었다. 앞으로 침투된 유리의 결정화가 유리 침투 알루미늄 복합체의 강도에 미치는 영향에 대한 연구도 필요하다고 생각된다.

4. 결 론

SiO₂-B₂O₃-CaO-Al₂O₃-La₂O₃계 유리에서 La₂O₃의 양을 변화시키며 유리를 얻은 후 이 유리들을 다공성 알루미늄의 기공 속으로 침투시켜 알루미늄-유리 복합체를 얻었다. 이때 La₂O₃의 양 변화가 유리의 침투특성 및 얻어진 복합체의 강도에 미치는 영향에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유리중에 La₂O₃의 양이 15 몰%까지 증가할수록 유리의 점도는 감소하고 알루미늄에 대한 젖음성도 향상되었다. 이에 따라 유리의 침투깊이도 증가하였다.

2. 침투된 유리 와 알루미늄이 반응하여 용해-석출 반응을 보였으며 석출 시 알루미늄의 특정 방향으로 입자성

장이 있었다.

3. La₂O₃가 20 몰% 첨가된 유리를 침투시켰을 때 유리의 결정화가 발견되었으며 이때 알루미늄-유리 복합체의 강도는 많이 증가하였다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. A. E. Clark and K. J. Anusavice, Dental Application; pp. 1091-1100 in Engineered Materials Handbook, Vol. 4, Ceramic and Glasses. ASM International (1991).
2. D. W. Jones, "Development of Dental Ceramics-An Historical Approach," *Dent. Clin. North Am.*, **29** [4] 621-44 (1985).
3. J. W. McLean and T. H. Hughes, "The Reinforcement of Dental Porcelain with Ceramic Oxides," *Br. Dent. J.*, **119** [6] 251-67 (1965).
4. Y. Pan and J. L. Baptista, "The Infiltration of Cobalt Silicides into Silicon Carbide Preforms," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **18** 201-07 (1998).
5. W.-P. Tai, T. Watari, and T. Torikari, "Fabrication of Al₂O₃-Al Composites by Reaction Melt Infiltration," *Am. Soc. Bull.*, **76** [4] 86-9 (1997).
6. L. Probst and J. Diehl, "Slip Casting Alumina Ceramic for Crown and Bridge Restoration," *Quintessence Int.*, **23** [1] 25-31 (1992).
7. W. D. Wolf, L. F. Francias, C.-P. Lin, and W. H. Douglas, "Melt-Infiltration Processing and Fracture Toughness of Alumina-Glass Dental Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [10] 2691-94 (1993).
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: I. Effect of Alumina Particle Size," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [9] 799-805 (2001).
9. D. Y. Lee, B.-S. Kim, J.-W. Jang, M.-H. Lee, I.-S. Park, and D.-J. Kim, "Effect of Zirconia Addition on Mechanical Properties of Spinel/Zirconia-Glass Dental Crown Composites Prepared by Melt-Infiltration," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **39** [11] 1028-34 (2002).
10. J.-H. Lee and C. Y. Kim, "Effect of Glass Composition on the Properties of Glass-Infiltrated Alumina (I): Effect of Al₂O₃," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **40** [3] 301-08 (2003).
11. R. M. German, Sintering Theory and Process, pp. 225-312, John Wiley & Sons (1996).
12. Korean Industrial Standard KSL 1591, "Fine Ceramics (Advanced Ceramics, Advanced Technical Ceramics) - Test Method for Flexural Strength of Monolithic Ceramics at Room Temperature," Koeam Standards Association, 2001.
13. W. D. Wolf, K. J. Vaidya, and L. F. Francis, "Mechanical Properties Failure Analysis Glass-Alumina Dental Com-

- posites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **79** [9] 1769-76 (1996).
14. M. B. Volf, *Chemical Approach to Glass; Glass Science and Technology*, 7 pp. 391-405, Elsevier (1984).
 15. H. Shuigen and C. Guorong, "Influence of Composition Factors on the Low Temperature Viscosity of Insulator Glass," *Glass Tech.*, **33** [2] 53-6 (1992).
 16. J.-H. Lee, "Effect of Glass Composition and Processing Condition on Glass Infiltration into Porous Alumina," Inha Univ., Master Thesis (2000).
 17. N. P. Bansal and R. H. Doremus, *Handbook of Glass Properties*, pp. 101-24, Academic Press (1986).
 18. S. J. Glass and D. J. Green, "Permeability and Infiltration of Partially Sintered Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82** [10] 2745-52 (1999).