

## 알루미나 적층복합체의 미세구조 배향

송준호 · 박상엽<sup>†</sup>

강릉대학교 재료공학과

(2001년 1월 19일 접수, 2001년 3월 28일 승인)

## Microstructure Orientation of Alumina Laminate Composites

Jun-Ho Song and Sang-Yeup Park<sup>†</sup>

Dept. of Ceramics Eng., Kangnung Univ., Kangwondo 210-702, Korea

(Received January 19, 2001, Accepted March 28, 2001)

### 초 록

배향 입자층과 비배향 입자층이 상호적층된 알루미나 적층복합체를 연속 테이프캐스팅 및 상압소결에 의해 제조하였다. 알루미나의 미세구조 배향을 위하여 알루미나 판상입자를 배향물질(template)로 사용하였으며, 알루미나의 입자배향 거동에 미치는 액상의 영향을 알아보기 위해 anorthite( $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_8$ )를 첨가하였다. 적층체 내의 알루미나 입자배향을 X-선 회절법으로 분석한 결과 (006)면과 (1010)면으로 배향되어 있었다. 액상조성이 첨가되지 않은 경우와 비교시 anorthite를 첨가한 경우 입자배향층 내에는 액상으로 인한 큰 기공이 생성되었으며 배향도는 감소되었다. 그러나, 액상조성으로 anorthite가 첨가되어 입자배향이 이루어진 적층체 계면에서는 입자배향으로 인한 효과적인 균열전파 제어 거동이 관찰되었다.

### ABSTRACT

Alumina laminate composites with alternating layers of textured and untextured alumina were fabricated by continuous tape casting and pressureless sintering. For the microstructure texturing of alumina, alumina platelets were used as a template, and  $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_8$  (anorthite) was added to observe the effect of liquid phase on the microstructure texturing behavior of alumina. The degree of orientation in textured alumina was confirmed by XRD peaks at (006) plane and (1010) plane. In the case of anorthite addition, large pores were formed in the textured layer and the degree of orientation was decreased compared to the laminate without anorthite addition. However, well-controlled crack propagation was observed at the interface of laminate due to textured microstructure in the case of anorthite addition.

**Key words :** Microstructure texturing, Alumina laminate composites, Anorthite

### 1. 서 론

알루미나 세라믹스는 높은 경도와 탄성계수, 내식성과 내마모성을 가지고 있으므로 고온 구조용 부품에 널리 이용되고 있다. 알루미나 미세구조의 제어를 응용할 경우 높은 파괴인성을 지닌 복합체 제조가 가능하므로 최근 미세구조 제어에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1-5)</sup> 높은 파괴인성이나 강도를 얻기 위한 기존의 연구방법으로는 미세입자 사용을 통한 치밀화 증진개념으로 소결체내에 존재하는 결함의 크기를 가능한 작게 유지하고자 하는 것이다.<sup>1,2)</sup> 그러나, 최근의 연구동향은 균열의 크기 감소에 비해 균열전파시 균열의 성장을 억제함으로써 파괴거동을 증진시키고자 하는 것으로 nano, in-situ, laminate<sup>3-7)</sup> 등의 다양한 미세구조 설계 기법을 중심으로 연구되고 있다. 산화물 요업체의 경우 파

괴인성과 강도는 특히 서로 상반된 성질을 지니므로 강도 증진과 함께 파괴인성을 높이는 것이 중요한 과제로 되어있다. 파괴인성을 높이기 위한 최근의 연구는 입자크기가 큰 이방성 입자를 배향물질로 첨가하여 전체적으로 큰 이방성을 지닌 미세구조를 형성하는 것으로 TGG(template grain growth)로 알려져 있다.<sup>8,9)</sup> 이러한 미세구조 배향(microstructure texturing) 기법은 주로 alumina계와 mullite계를 중심으로 이루어지고 있으며, 입자배향에 미치는 영향으로는 소결조건, 액상량, 배향재(template)의 첨가량등이 중요한 것으로 알려져 있다.<sup>8-13)</sup>

알루미나의 경우 미세구조 배향은 비정상 입자성장의 개념을 응용하는 것으로, 효과적인 미세구조 배향을 위해서는 비정상 입자성장을 일으키는 원인 및 성장기구등에 대한 이해가 필요하다. 현재까지 보고된 비정상 입자성장의 원인으로 Ca 및 Si계 불순물로 인한 불균일한 액상분포와 불균일한 초기 분말의 입도분포로 알려져 있다.<sup>14-17)</sup> 한편, 소결체

<sup>†</sup>Corresponding author : sypark@knusun.kangnung.ac.kr

내에 비정상 입자성장이 일어나는 경우는 일반적으로 큰 입자와 작은 입자들이 서로 혼재되어 불균일한 미세구조를 이루므로 기계적 물성의 감소를 예측할수 있다. 따라서, 비정상 입자성장에 대한 기존의 연구들은 비정상 입자성장의 원인을 규명하여 균일한 미세구조를 얻고자 하는 것이 주된 목적이며, 알루미나의 비정상 입자성장을 감소시키기 위해서는 소량의 MgO를 첨가하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다.<sup>18,19)</sup> 그러나, 최근 Messing등<sup>8)</sup>이 알루미나계에서 platelet 첨가로 인한 알루미나의 입자배향을 발표한 이후로 비정상 입자성장을 이용한 이방성 제어 미세구조에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이러한 입자배향 연구의 의미는 비정상입자의 성장시 입자배향성을 잘 제어해 준다면 배향된 입자들로 인한 물성증진이 가능하기 때문이다.

본 연구에서는 알루미나의 비정상 입자성장 거동을 이용하여 배향성을 지닌 알루미나 미세구조를 지닌 배향층/비배향층의 연속적인 미세구조를 지닌 적층복합체를 제조하고자 하였다. 이러한 입자배향층을 포함한 적층체를 제조하고자 한 이유는 기존의 단섬유 분산 강화 복합체의 개념을 적층체에 도입하기 위한 것으로 입자비배향층은 기지상 역할을 입자 배향층은 섬유상 역할을 하게된다. 이러한 미세구조 제어 적층체 설계를 통해 얻을수 있는 장점으로는 적층체 계면과 입자배향층내에서의 효과적인 균열굴절 제어를 통해 파괴인성 증진이 가능할 것으로 판단된다. 한편, 섬유 강화복합체에서 중요한 것으로 알려진 섬유상 코팅층 설계에 있어서 입자배향성 코팅의 영향을 살펴볼 수 있다는 장점도 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 입자 배향층/비배향층 적층체 제조를 통하여 미세구조 제어를 이용한 효과적인 균열전파거동이 가능한 가를 관찰하고자 하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 출발원료

본 연구에서 사용된  $Al_2O_3$ 는 일본 Sumitomo사의 고순도 alumina(AKP50, >99.999, 평균크기  $0.1 \sim 0.3 \mu m$ , BET  $9 \sim 15 m^2/g$ )이며, seed로 사용된  $Al_2O_3$  platelet(Fig. 1)은 일본 Showa Denki사 제품으로 두께  $1 \mu m$ , 평균입경  $5 \sim 25 \mu m$ 인 분말을 400 mesh까지 단계별로 체거름하여 사용하였다. 한편, 알루미나 입자들의 균일한 입자성장을 위하여 Mg-Nitrate ( $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ , Aldrich Chemical, USA)를 사용하여 MgO를 1000 ppm 첨가하였다. 액상 첨가제로 사용된 Anorthite( $CaAl_2Si_2O_8$ )는  $CaCO_3$ (Shinyo Pure Chemical, Japan),  $SiO_2$ (Shinyo Pure Chemical, Japan) 및 alumina (AKP50)를 사용하여 합성하였다.

알루미나의 입자배향에 미치는 platelet 분들의 영향을 알아보기 위하여 배향층 조성의 경우 알루미나 platelet을 5,



Fig. 1. SEM micrograph of alumina platelets.

10, 15 vol% 첨가하였으며, 비 배향층에서의 미세구조 균질화를 위하여 순수한 알루미나와 MgO가 1000 ppm 첨가된 알루미나를 사용하여 비교하였다. 한편, 알루미나의 입자배향에 미치는 액상의 영향을 관찰하기 위하여 Ap(alumina platelet)가 10 vol% 첨가된 배향층에  $CAS_2$ (anorthite)를 5 vol% 첨가하여 액상이 첨가되지 않은 경우와 비교하였다.

### 2.2. 알루미나 적층체 제조

슬림은 수용성계로 제조하였으며 슬림의 특성을 향상시키기 위하여 polyglycerin계 바인더와 가소제 및 분산제를 소량 첨가하여 초음파로 분산 처리한 후 자석식 교반기에서 일정 시간동안 안정화 처리하였다. 적층체는 연속 테입캐스팅법에 의해 비배향층과 배향층을 연속적으로 21층까지 적층하여 제조하였다. 연속 테입캐스팅시 적층체의 두께는 마이크로 미터를 이용하여 조절하였으며, 성형된 적층체는 일정한 크기로 절단하여 대기중에서 48시간 동안 건조한후  $600^\circ C$ 에서 2시간 동안 하소하였다.

하소된 적층체는 Keramax 발열체를 지닌 수직로를 이용하여  $1600^\circ C$ 와  $1650^\circ C$ 에서 16시간 동안 소결하였다. 시편의 가열 및 냉각속도는  $10^\circ C/min$ 로 일정하게 유지하였다. 소결시에 치밀화 과정은 캐스팅 면에 수직한 방향인 바 형태의 적층체를 제작하여 dilatometer(Anter Co., USA)에서 상온에서  $1550^\circ C$ 까지의 승온속도  $10^\circ C/min$  조건에서 길이

변화를 통해 관찰하였다. 소결시 슬립제조에 사용된 첨가제의 burn-out 거동은 열중량분석기(TGA, Shmadzu Co., Japan)를 사용하여 1200°C까지 10°C/min의 승온속도로 관찰하였다.

2.3. 미세구조 관찰 및 입자배향도 분석

시편의 미세구조 관찰을 위하여 소결체를 micro-cutter (Buhler Isomet 2000, USA)에서 절단한 후 bakelite로 mounting하여 SiC 연마지 및 다이아몬드 paste를 이용하여 1 µm까지 순차적으로 미세연마하였다. 시편의 미세구조는 각각 SEM(Scanning Electron Microscope, LEO420, UK)을 이용하여 관찰하였다. 평균 입자크기 및 종횡비(aspect

ratio)는 image analyser(Omnimct 3, Buehler, USA)를 사용하여 1000~1500개의 입자를 기준으로 하여 digital image process 방법으로 계산한 후 smoothing 처리하였다. 평균입자 크기는 Feret 직경을 측정하여 결정하였으며, 종횡비는 미세구조 상에서 장축과 단축을 측정하여 계산하였다. 입자배향도는 X선 회절분석기(MO3XHF, MAC Science, Japan)를 사용하여 특정면의 회절강도를 분석하였다. 미세연마된 시편표면에 Vicker's indenter를 이용하여 10 kg 하중으로 indentation한 후 적층체 계면에서 균열 전파거동을 관찰하였다.

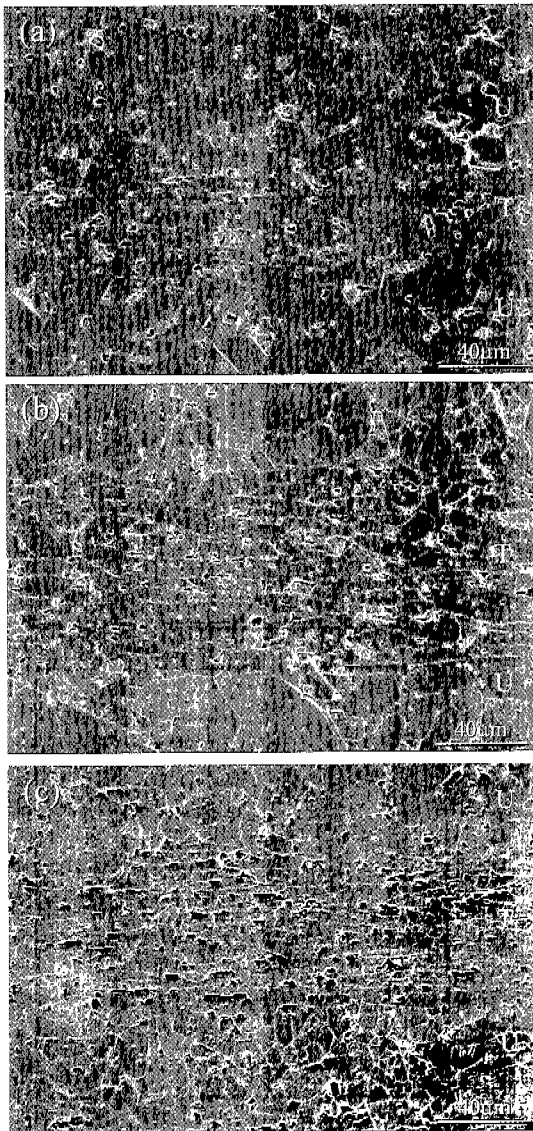


Fig. 2. SEM micrographs of textured alumina laminate composites sintered at 1600°C for 16 h. (U : Untextured layer T : Textured layer) (a) A-5 vol% Ap, (b) A-10 vol% Ap, (c) A-15 vol% Ap.

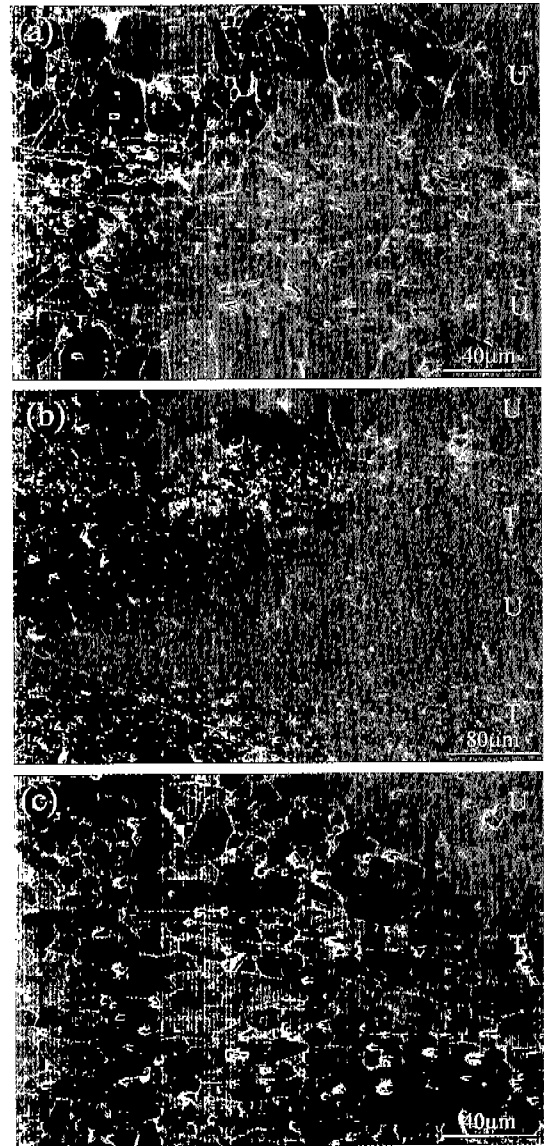


Fig. 3. SEM micrographs of textured alumina laminate composites sintered for 16 h. (U : Untextured layer T : Textured layer) (a) A-Ap, 1600°C, (b) A-Ap, 1650°C, (c) AM-Ap, 1650°C.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Alumina 입자배향에 미치는 Alumina Platelet 분률의 영향

Fig. 2는 알루미나 분말에 각각 5, 10, 15 vol%의 알루미나 platelet을 첨가하여 1600°C에서 16시간 소결된 알루미나 적층체(A-Ap)의 미세구조로 비교적 잘 배향된 알루미나 입자의 미세구조를 나타내며, 배향도는 10 vol% 알루미나 platelet 첨가시 가장 우수하였다. Fig. 3은 비배향된 알루미나 층에 MgO를 첨가한 경우와 첨가하지 않은 경우의 미세구조를 나타낸다. 비 배향층에서는 알루미나 입자의 불균일한 분포가 관찰되었으며(Fig. 3(a)), 소결온도가 1650°C로 증가시 부분적으로 비정상 입자성장이 관찰되었다(Fig. 3(b)). 따라서, 비 배향층에서 알루미나의 비정상 입자를 억제하기 위하여 MgO를 첨가하였으며(AM-Ap), 그 결과 균일한 입자분포를 나타내었다(Fig. 3(c)).

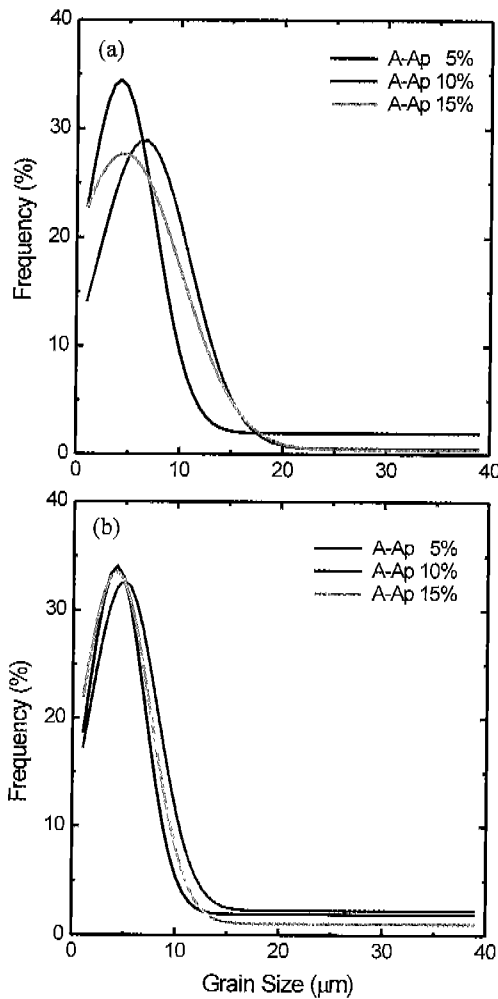


Fig. 4. Grain size distribution of alumina in (a) textured and (b) untextured layer. Specimen sintered at 1600°C for 16 h.

Fig. 4는 비 배향층과 배향층에서 알루미나 platelet 첨가량에 따른 입자크기 변화를 나타낸다. 비 배향층에서는 입자크기가 대략 5 μm으로 일정하였으나, 배향층에서는 platelet 첨가량이 10 vol%인 경우 입자크기는 대략 7 μm으로 5, 15 vol%인 경우에 비해 증가된 것을 나타낸다. Fig. 5는 비 배향층과 배향층에서 알루미나 platelet 첨가량에 따른 aspect ratio 변화를 나타내는 것으로 비 배향층에서의 aspect ratio는 2.5로 일정한 반면 배향층에서는 platelet 첨가량 증가에 따라 aspect ratio 증가 및 폭 넓은 분포곡선을 나타내었다.

Fig. 6은 위에서 관찰된 알루미나의 입자배향 거동을 도식적으로 나타낸 것이다. 배향재로 첨가된 알루미나 platelet은 캐스팅 방향에 수평한 방향으로 배열되며(a), 치밀화된 이후 입자성장 초기에는 방향성을 지닌 platelet이 우선적으로 성장(over growth)됨과 동시에 미세한 알루미나 입자들의 무질서한 입자성장이 일어나게 된다(b). 우선적으로 성장되는

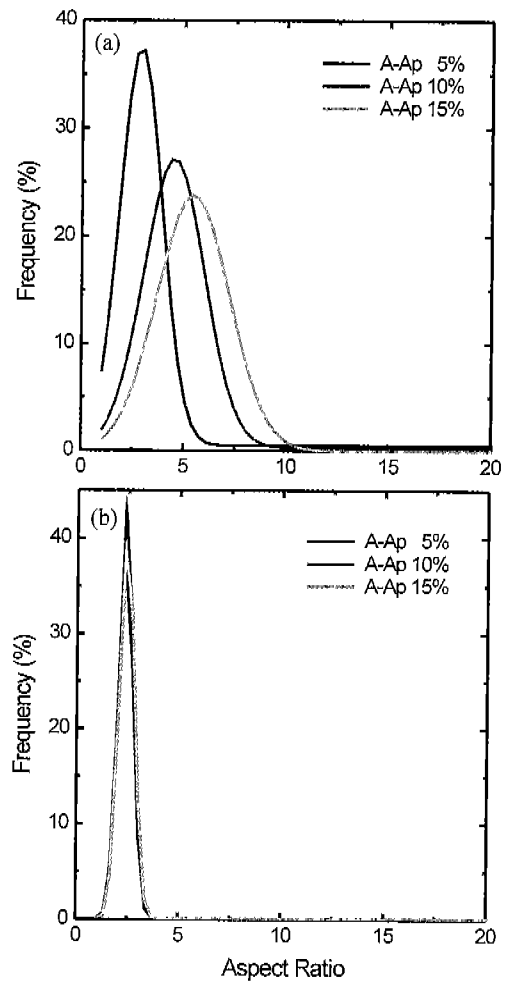


Fig. 5. Effect of platelet addition on the aspect ratio of (a) textured and (b) untextured layer. Specimen sintered at 1600°C for 16 h.

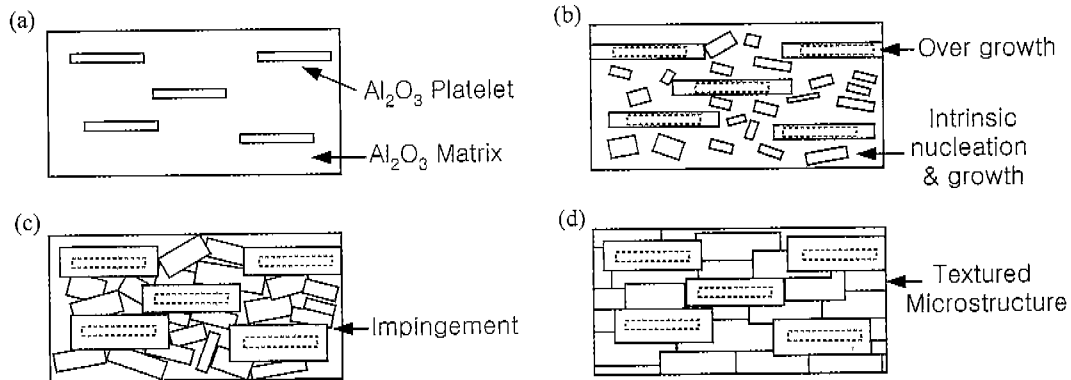


Fig. 6. Schematics of microstructure texturing process. (a) Initial stage, (b) Intrinsic matrix growth stage, (c) Impingement stage, and (d) Final textured stage.

platelet들 간에는 상호간의 충돌(impingement)로 인하여 입자성장은 느려지게 되고, 따라서 platelet 주위의 알루미나 입자들이 보다 빠르게 성장하게 된다(c). 결과적으로 platelet 주위에서 빠르게 성장된 알루미나 입자는 이미 배향된 platelet의 방향을 따라 성장하므로 전체적인 입자 배향이 이루어지게 된다(d). 현재 알루미나 입자배향에 대한 기구는 알루미나 (0001) 면의 성장속도가 (1120)과 같은 프리즘 면들에 비해 훨씬 빨리 성장한다는 이론적인 근거로 하여 platelet을 templet로 사용시 platelet의 입자성장만으로 입자배향이 이루어진다는 것으로 알려져 있다.<sup>8)</sup> 그러나 본 실험 결과 초기에 첨가된 platelet의 입자크기를 기준으로 하면 길이 방향과 두께 방향으로의 성장이 일어났으나 성장속도는 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 따라서, 입자배향시 알루미나 platelet의 역할은 그 자체만의 성장으로 입자배향이 이루어지는 것이 아니라 platelet 주위입자들의 입자성장을 일정한 방향으로 일어나게 하는 가이드 역할을 하는 것으로 판단된다.

3.2. Alumina 입자 배향성에 미치는 anorthite 액상첨가의 영향

알루미나 입자배향시 alumina platelet의 영향에 대한 결과로부터 alumina platelet의 최적 첨가량은 10 vol%로 판단되어 입자배향에 미치는 액상의 영향을 관찰하는 실험에서는 10 vol% platelet 첨가량을 기준으로 실험하였다. Fig. 7은 소결시 적층체들의 수축거동을 나타내는 것으로 소결수축은 1000°C부터 시작되었으며, 적층체들 중에서 알루미나-anorthite(A-CAS<sub>2</sub>)계 경우가 알루미나 단미나 알루미나-알루미나 platelet (A-AP) 계에 비해 큰 수축 거동을 나타내었다. 이는 액상형성제로 첨가된 anorthite로 인한 치밀화 촉진에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 알루미나 입자 배향층에 CAS<sub>2</sub>를 첨가하여 1600°C에서 16시간 소결된 시편의 미세구조를 나타낸다. Fig. 8(a)는 MgO가 첨가되지 않은 시편(A-CAS<sub>2</sub>)의 경우로 알루

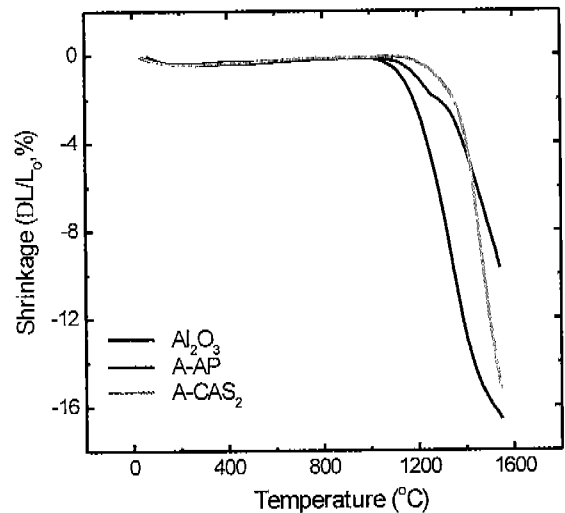
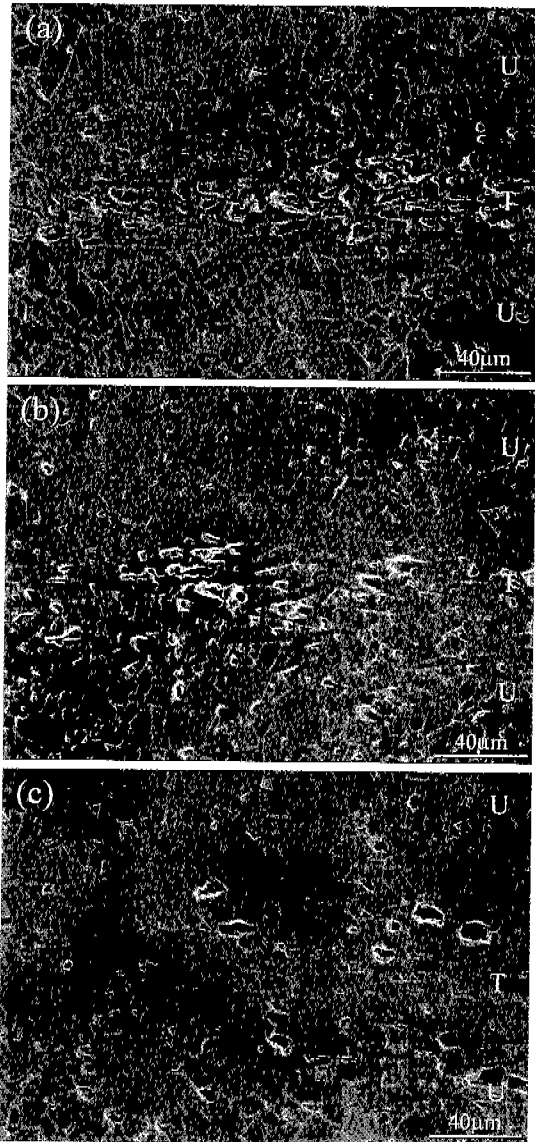


Fig. 7. Dilatometer measurements.

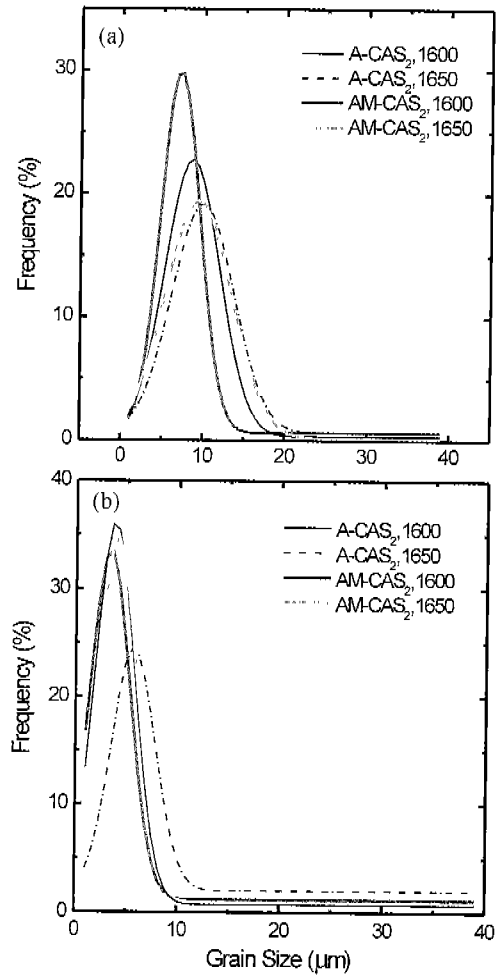
미나 입자의 배향은 어느 정도 이루어져 있으나 입자배향도는 감소된 것으로 관찰되었다. 이는 배향층 내에 형성된 비교적 높은 기공 분률을 고려하면 입자배향을 위해 첨가된 액상의 불균일한 분포가 입자들 간의 미끌어짐(sliding)에 의한 재배열 과정으로 인해 유발된 것으로 판단된다. 한편, 비배향층에서의 알루미나 입자분포는 비교적 불균일하며 비정상 입자성장을 나타내고 있는데, 이는 배향층 내에 첨가된 액상의 일부가 비배향층으로 침투되었기 때문으로 판단된다. Fig. 8(b)는 비 배향층에 MgO를 첨가하여 소결한 시편(AM-CAS<sub>2</sub>)의 미세구조로 Fig. 8(a)의 비배향층의 미세구조에 비해 입자크기가 감소하고 입자크기 분포도 상대적으로 균일한 것을 나타낸다. 그러나 배향층내 기공분률은 MgO를 첨가하지 않은 경우에 비해 감소하였으나 알루미나 입자의 배향도는 거의 유사하였다. 한편, Fig. 8(c)는 비 배향층에 MgO가 첨가된 시편을 1650°C에서 소결한 것으로 1600°C에서 소결된 시편에 비해 배향층 내의 입자들의 배향성이 증가된 것을 알 수 있다. 한편, 배향층과 비 배향층의 알루



**Fig. 8.** SEM micrographs of textured alumina laminate composites sintered for 16 h. (U : Untextured layer T : Textured layer) (a) A-CAS<sub>2</sub>, 1600°C, (b) AM-CAS<sub>2</sub>, 1600°C, (c) AM-CAS<sub>2</sub>, 1650°C.

미나 입자분포는 1600°C에서 소결된 시편에 비해 보다 균일한 반면 배향층내 입자들의 aspect ratio는 감소되어 두께방향으로 성장된 것을 나타낸다. 이는 소결 온도 상승에 따라 입자성장이 이방성에서 등방성화되기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 배향층과 비 배향층에서 알루미늄 입자크기 분포를 측정한 결과이다. 배향층에서는 소결온도가 1600°C에서 1650°C로 상승됨에 따라 입자크기 분포의 폭이 넓어져서 입자배향이 보다 활발해진 반면, 비 배향층에서는 MgO 첨가로 인해 입도분포 폭이 감소되어 균일한 입자성장을 나



**Fig. 9.** Grain size distribution of alumina in (a) textured, (b) untextured layer. Specimen sintered for 16 h.

타내었다. 한편 비 배향층에서는 MgO 첨가로 인해 입도분포가 비교적 균일해진 것을 나타낸다. 따라서 MgO 첨가는 anorthite와 같은 액상이 존재하더라도 알루미늄의 균일한 입자성장에 효과적이라는 것을 나타낸다. Fig. 10(a)는 배향층에서 소결온도 및 MgO 첨가가 aspect ratio에 미치는 영향을 나타내는 것으로 소결온도 상승 및 MgO 첨가에 따라 두께 방향으로의 성장이 일어나서 aspect ratio가 감소하는 것을 나타낸다. 한편, Fig. 10(b)는 비 배향층에서 소결온도와 MgO 첨가가 aspect ratio에 미치는 영향을 나타내는 것으로 소결온도와 MgO 첨가에 무관하게 일정한 aspect ratio를 나타내고 있다.

### 3.3. X-선회절에 의한 입자배향도 관찰

Fig. 11은 적층소결체를 캐스팅 방향에 평행한 방향으로 연마하여 입자배향성을 X-선회절법에 의해 분석한 결과이다. 각 회절피크를 분석하기 위한 기준시편으로 배향되지 않은 알루미늄(AKP 50) 분말을 사용하였다. 알루미늄 분말은

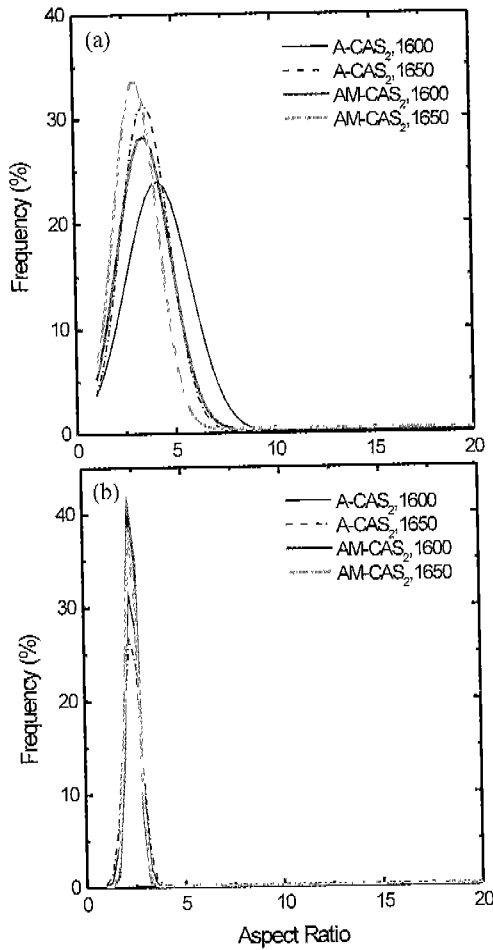


Fig. 10. Effect of platelet addition on aspect ratio. (a) textured layer (b) untextured layer.

전형적인 알루미나 피크를 나타내고 있으며, (006)면의 회절강도( $I/I_0$ ,  $I_0=100$ )는 5% 미만으로 측정되었다. 한편, 본 실험 조성의 적층소결체 배향층에서 관찰된 알루미나 피크는 알루미나 분말 피크의 위치와 동일하게 나타났으나 회절강도는 결정면에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 기준시편과 비교시 (006)면의 상대 회절강도가 80% 정도로 크게 증가하였으며, (1 0 10)면의 회절강도도 크게 증가되었다. 한편, 알루미나 분말에서 상대적으로 크게 나타났던 (113)면의 피크는 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 이 결과는 알루미나의 입자배향시 (006)면과 (1 0 10)면으로 배향된다는 것을 의미하는 것으로 미세구조 상에서 관찰된 알루미나의 입자배향성과 일치되는 결과이다. 한편, (006)면의 회절강도를 기준으로 분석한 결과 platelet 단독으로 첨가한 경우가 배향성이 우수한 것으로 나타났으며, 상대적으로 anorthite와 같은 액상첨가제가 들어가는 경우 배향도는 감소되었다.

3.4. 입자배향된 적층소결체의 균열전파 거동

Fig. 12는 anorthite를 첨가하여 입자배향된 적층소결체의 연마면에 10 kg의 하중으로 Vickers indentation한 후 균열의 전파거동을 관찰한 것으로 Fig. 12(a)의 경우 시편과 수직방향의 압흔에서는 균열이 전혀 발생하지 않았고, 단지 층과 수평한 쪽으로 균열이 발생하여 전파하였으며, 전파된 균열은 배향층 쪽으로 거의 직선적으로 전파하다 입자배향층과의 계면에서 크게 굴절되어 배향층 내에서는 배향층에 평행한 방향으로 전파되었다. 이러한 결과로 적층체 내의 잔류응력을 분석하면 소결시 시편의 수직방향 즉, 배향방향과 수직인 방향으로 인장응력이 형성되며, 배향된 방향으로 인장응력이 형성되는 것으로 판단된다.<sup>20)</sup> 한편, Fig. 12

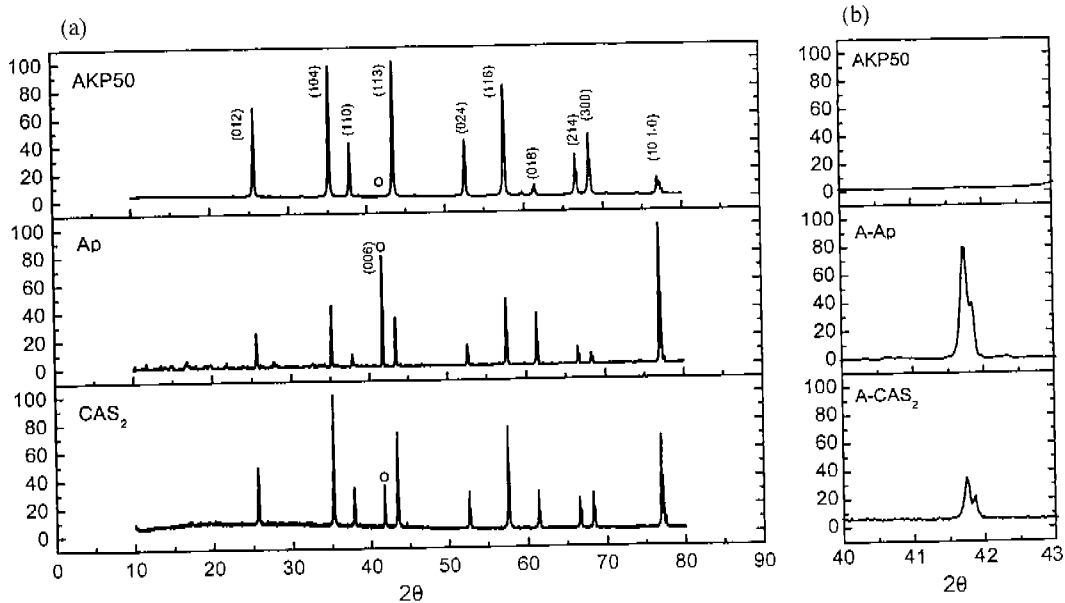


Fig. 11. XRD patterns showing the intensity difference between (a) (006) and (113) plane, and (b) (006) plane.

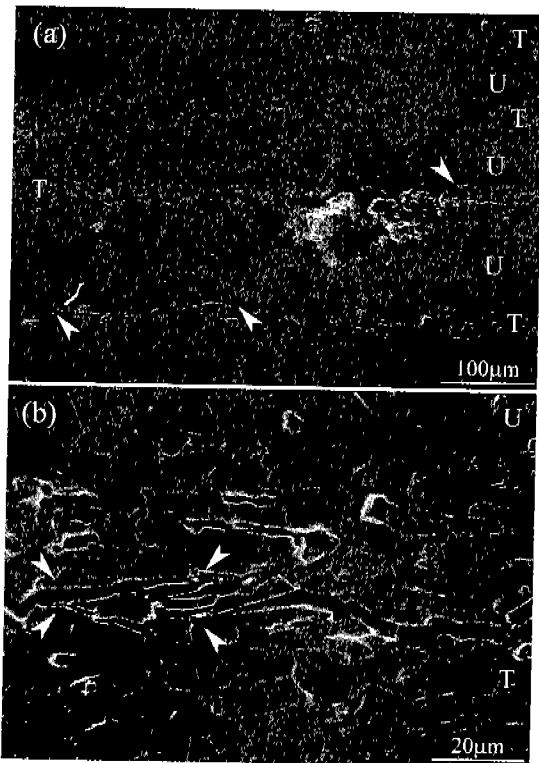


Fig. 12. SEM micrographs show a well controlled crack propagation in A-CAS<sub>2</sub> specimen sintered at 1600°C for 16 h. Arrows indicate crack deflection and crack bridging (U : Untextured layer T : Textured layer).

(b)에 나타난 입자배향층 내의 균열 전파는 미세구조 상에 화살표로 표시한 것과 같이 crack branching과 crack deflection, crack bridging 등의 다양한 균열전파 억제 거동이 하나의 미세구조 내에 모두 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 균열이 입자배향층 내로 들어오게 되면 이러한 다양한 균열전파 억제 거동들에 의하여 균열이 지닌 탄성변형에너지가 상당히 소모될 수 있으므로 damage tolerance 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 배향 입자층과 비배향 입자층이 상호적층된 알루미늄 적층복합체를 제조하여 알루미늄의 배향성 입자성장 및 균열전파 거동에 대해 고찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 알루미늄 platelet을 templet로 사용하여 입자 배향층과 입자 비 배향층으로 구성된 미세구조를 지닌 알루미늄 적층복합체를 연속테잎캐스팅 및 상압소결에 의해 제조하였으며, 10 vol% 알루미늄 platelet을 templet로 사용한 경우 (006)면과 (1 0 10)면으로 배향된 알루미늄 입자 층을 지닌 적층체 제조가 가능하였다.

2. 알루미늄 입자배향을 위해 액상첨가제로 anorthite를 첨가한 경우, 액상이 첨가되지 않은 시편에 비해 배향된 층에서의 기공률 증가와 입자배향성 감소가 관찰되었다. 한편, 소결온도를 1650°C로 증가시킨 경우 1600°C에서 소결된 것과 비교시 기공률 감소 및 입자배향도는 증가되었으나, 배향된 알루미늄 입자는 길이방향 보다는 두께방향으로 성장하여 aspect ratio가 감소하였다.

3. Anorthite가 첨가되어 입자배향된 알루미늄 적층복합체는 균열전파시 적층체 계면에서 가장 큰 균열굴절 거동을 나타내었으며, 배향층 내에서는 crack deflection, crack branching, crack bridging 등의 균열전파 억제기구가 작용되어 균열전파의 효과적인 억제가 가능하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강릉대학교 동해안 해양생물 자원 연구센터와 심원학술재단 연구비의 일부 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### REFERENCES

1. A. G. Evans, "Structural Reliability: Processing-dependent Phenomenon," *J. Am. Ceram. Soc.*, **65**(3), 127-137 (1982).
2. R. F. Cook, B. R. Lawn and C. J. Fairbanks, "Microstructure-strength Properties in Ceramics: I, Effect of Crack Size on Toughness," *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(11), 604-615 (1985).
3. K. Niihara, "New Design Concept of Structural Ceramics-Ceramic Nanocomposite," *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **99**(10), 974-982 (1991).
4. P. L. Chen and I. W. Chen, "In-situ Alumina-Alumina Platelet Composite," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(9), 2610-2612 (1992).
5. T. Chartier, D. Merle and J. L. Besson, "Laminar Ceramic Composite," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **15**, 101-107 (1995).
6. H-G. Bang and S-Y. Park, "Crack Formation and Propagation Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> Laminate Composites," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(11), 1058-1064 (2000).
7. D-W. Shin, D-H. Yoon, S-S. Park and H-D. Kim, "Fracture Behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Macro-composites with Layered and Fibrous Structures," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **34**(7), 758-766 (1997).
8. T. Carisey, I. Levin and D. G. Brandon "Microstructure and Mechanical Properties of Textured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 283-289 (1995).
9. M. M. Seabaugh, I. H. Kerscht and G. L. Messing "Texturing Development by Templated Grain Growth in Liquid Phase Sintered  $\alpha$ -Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **8**(5), 1181-1188 (1997).
10. E. Suvaci and G. L. Messing, "Critical Factors in the Templated Grain Growth of Textured Reaction-bonded Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **83**(8), 2041-2048 (2000).



11. L. An, "Indentation Fatigue in Random and Textured Alumina Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**(1), 178-182 (1999).
12. D. Brandon, D. Chen and H. Chan "Control of Texturing in Monolithic Alumina," *Mater. Sci. and Engr.*, **A195**, 189-196 (1995).
13. S. H. Hong and G. L. Messing, "Development of Textured Mullite by Templated Grain Growth," *J. Am. Ceram. Soc.*, **82**(4), 867-872 (1999).
14. H. Song and R. L. Coble, "Origin and Growth Kinetics of Platelike Abnormal Grains in Liquid-Phase-Sintered Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(7), 2077-2082 (1990).
15. S. I. Bae and S. Baik, "Determination of Critical Concentration of Silica and/or Calcia for Abnormal Grain Growth in Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(8), 1065-1067 (1993).
16. C. A. Handwerker, P. A. Morris and R. L. Coble, "Effect of Chemical Inhomogenities on Grain Growth and Microstructure of Alumina," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(1), 130-136 (1990).
17. M. Hillert, "On the Theory of Normal and Abnormal Grain Growth," *Acta. metall.*, **3**, 227-238 (1965).
18. C. A. Bateman, S. J. Bennisson and M. P. Harmer, "Mechanism of the Role of Magnesia in Sintering of Alumina Containing Small Amounts of a Liquid Phase," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(7), 1241-1244 (1989).
19. H. Park and S-Y. Park, "The Effect of Pressure on the Abnormal Grain Growth in Alumina," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37**(7), 617-624 (2000).
20. S-Y. Park, B. Saruhan and H. Schneider, "Mullite/Zirconia Laminate Composites for High Temperature Application," *J. Euro. Ceram. Soc.*, **20**, 2463-2468 (2000).