

## Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 첨가가 질화규소 세라믹스의 제조 및 그 기계적 특성에 미치는 영향

노상훈\* · 김부안\*\* · 문창권\*\* · 정해용\*\* · 서원찬\*\* · 윤한기\*\*\*

\*부경대학교 신소재공학부 대학원

\*\*부경대학교 신소재공학부

\*\*\*동의대학교 기계공학과

## The Effects of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> on the Mechanical Properties of Silicon Nitride

SANG-HOON NOH\*, BU-AHN KIM\*\*, CHANG-KWON MOON\*\*, HAE-YONG JEONG\*\*, WON-CHAN SEO\*\* AND HAN-KI YOON\*\*\*

\*Department of Materials Science and Engineering, Graduate School of Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Division of Materials Science and Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*\*Department of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Silicon nitride 질화규소, Sintering additive 소결조제, Hot press 일축가압, Flexural strength 굽힘강도, High temperature strength 고온강도

**ABSTRACT:** In the present work, silicon nitride was fabricated with Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> as a sintering additive and its mechanical properties were investigated. Silicon nitride with 3, 5, and 7 wt% of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> was prepared and sintered by a Hot Pressing (HP) technique at 1750 and 1800 °C for 2 h. The process was performed under different process pressures of 30 and 45 MPa. Mechanical properties (density, strength, hardness, and fracture toughness) were investigated as a function of the Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> content in Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics showing similar mechanical properties compared with Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics. But its high temperature strength was considerably higher than that of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics.

### 1. 서 론

산업이 고도화되고 이용되는 부품소재가 더욱 가혹한 환경에 노출됨에 따라 기존의 금속이나 고분자소재보다 높은 기계적 특성을 지니는 구조세라믹스에 대한 요구가 증대되고 있다. 그러나 실제 응용에 있어서 구조세라믹스는 자체의 신뢰도와 취성 때문에 많은 제한이 있으며, 이를 극복하기 위해 가혹한 환경에서의 높은 강도와 파괴인성을 확보하는 것이 가장 중요한 과제로 대두되고 있다(Tsuge et al., 1975; Sanders and Mieskowski, 1985).

대표적인 구조세라믹스인 질화규소는 강도, 내열성, 내열충격성, 내화학성, 내마모성 등이 매우 우수한 재료이다. 이러한 특성으로 자동차 엔진부품, 가스 터빈, 절삭 공구, 베어링, 펌프용 실링(Sealing)재로 산업전반에 걸쳐 활용되고 있다. 하지만 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>는 소결 시 충분한 소결강도를 가지기 전에 분해할 뿐만 아니라, 난소결성이며 파괴인성 또한 낮은 것이 단점으로 지적되고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 일반적으로 질화규소는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, ZrO<sub>2</sub> 등의 소결조제를 첨가하여

액상소결로 제조되고 있으며, 그 종류와 조성에 따라 소결체의 기계적, 화학적 성질을 변화시킬 수 있다(Liang and Dutta, 2001; Hirasaki et al., 1994; Clarke and Thomas, 1978). 하지만 이러한 소결조제들은 원료 중에 존재하는 불순물들과 함께 입계에 모여 유리상을 형성하게 되며, 고온에서 연화되어 입계 미끄러짐을 일으켜 전체 세라믹스의 기계적 물성을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 사실을 종합하여 볼 때, 치밀한 소결체를 얻기 위해 다량의 소결조제는 필수적이나 고온 환경에서의 응용을 고려할 때 바람직하지 않다.

이에 본 연구에서는 기존의 구조세라믹스 제조에 보편적으로 사용되는 소결조제인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 첨가 대신 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>를 사용하여 Hot press법으로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스를 제조하였다. 제조된 시편을 사용하여 밀도, 굽힘 강도, 경도, 파괴인성 등의 기계적 특성과 고온특성을 조사하여 이에 미치는 소결조제의 조성 및 소결온도와 소결압력에 따른 영향을 연구하고 기존의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스와 비교하였다.

### 2. 실험 방법

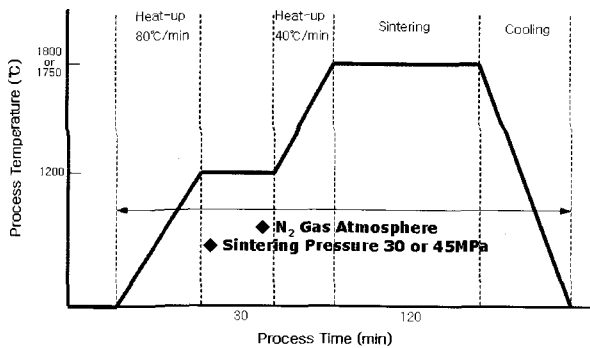
#### 2.1 사용원료 및 시편제조

교신저자 김부안: 부산광역시 남구 용당동 산 100번지

051-620-1642 kimba@pknu.ac.kr

**Table 1** Compositions and processing conditions of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> materials

Specimens	Sintering additives (wt %)	Process temperature (°C)	Process pressure (MPa)	Sintering tme (h)
A	3 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )	1750	30	2
B	5 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
C	7 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
D	3 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )	1800	45	
E	5 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
F	7 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
G	3 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )	1800	30	
H	5 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
I	7 (Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> )			
J	8 (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )			



**Fig. 1** Schematic diagram of the sintering process for hot pressing

본 연구에서는 SN-E10(SAMAN, Japan) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말을 사용하였으며 소결조제로써 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (99.99%, HIGH PURITY CHEMICALS, Japan)를 사용하였다. 소결조제의 양과 소결조건을 Table 1 에 나타내었다. 각각의 분말은 에탄올을 용매로 하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Jar에서 24시간씩 Planetary ballmilling을 통하여 분쇄, 혼합 과정을 거쳤으며, 이후 40°C에서 48시간이상 건조시켰다. 이렇게 얻어진 분말을 Graphite mold에 넣어서 Hot press를 사용하여 가압소결 하였다. 소결조건은 Fig. 1과 같이 1200°C까지 80°C/min의 승온 속도로 가열하고 30분유지 후, 1750, 1800°C의 목표온도까지 40°C/min 로 가열하였으며 목표 온도에서 2시간 동안 소결하였다. 소결압력은 30, 45MPa 이며 모든 과정은 N<sub>2</sub> gas 분위기에서 실시하였다. N<sub>2</sub> gas의 압력은 1200°C까지는 .740mmHg이며 이후 최고 온도까지는 750mmHg로 유지하였다.

한편, 기계적 특성 비교를 위한 표준시편은 현재 질화규소 제조에 가장 보편화 되어있는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(5wt%)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(3wt%) 조성을 택하여 같은 소결조건으로 제조하였다.

**2.2 시편의 기계적 특성 평가**

일축가압에 의하여 소결된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 세라믹스의 결보기 소결밀도는 각 시편 당 10회씩 측정하여 평균치를 산출하였으며, 이론밀도에 대한 결보기 소결밀도의 비를 백분율로 환산하여 상대밀도를 계산하였다. 그리고 기계적 특성평가를 위해 4(Wmm×36(L)mm×3(T)mm크기의 장방형 단면의 봉상시험편으로 절단하여 가공하였다. 표면 연마를 위해 250, 125, 30, 10um의 순서대로 연마재를 사용하여 경면 연마하였으며 시험편 가공 시에 발생할 수 있는 모서리의 미세 균열을 제거하기 위해 45°각도로 두께의 1/10만큼 모서리 가공을 하였다. 굽힘 강도 시험 시 Span length는 30mm, Crosshead speed는 0.5mm/min으로 상온에서 3점 굽힘 강도 시험을, 1200°C의 진공분위기와 산화분위기에서 3점, 4점 고온 굽힘 강도시험을 각각 실시하였다.

한편, 경도시험은 Vickers 경도시험기(5030TKV, INDENTEC)를 사용하여 각 시편의 종류에 따라 10kgf의 압자압입하중에서 10회 측정하여 평균치를 산출하였다. 파괴인성은 IF (Indentation fracture)법에 의해 측정, 계산하였다. IF법의 기초가 되는 식은 몇 가지가 있으며 사용한 식에 따라 K<sub>IC</sub>의 평가치가 조금 다르다. IF법은 작은 시편에 편리하며, 시험법이 간단하고 시험환경의 제어도 비교적 용이하다는 것 등의 장점이 많은 파괴인성 평가법이다. K<sub>IC</sub>산출의 기초로 되고 있는 식은 반 경험식이므로 K<sub>IC</sub>의 절대치의 평가에 대해서는 문제가 있지만 상대인성의 측정에는 대단히 우수한 방법이라고 할 수 있

고 이에 대한 연구가 활발히 진행되어 오고 있다(김부안과 문창권, 2001; Jung et al., 2005). 본 실험에서는 재료 자체의 탄성계수를 고려할 필요 없이 상대적인 파괴 인성치를 쉽게 구할 수 있는 Lawn and Fuller식 (1)을 사용하였다(Miyoshi et al., 1985; Lawn and Fuller, 1975).

$$K_{IC} = x(P_v/c^{3/2}) \quad (1)$$

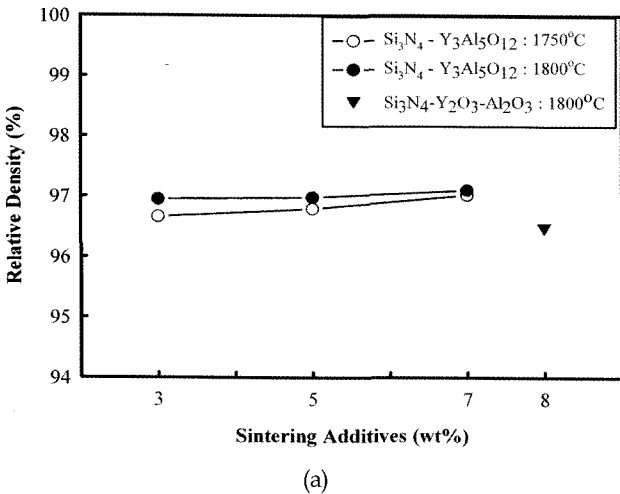
$$x = 1/(\pi^{3/2} \tan \psi)$$

$$\psi = 68^\circ$$

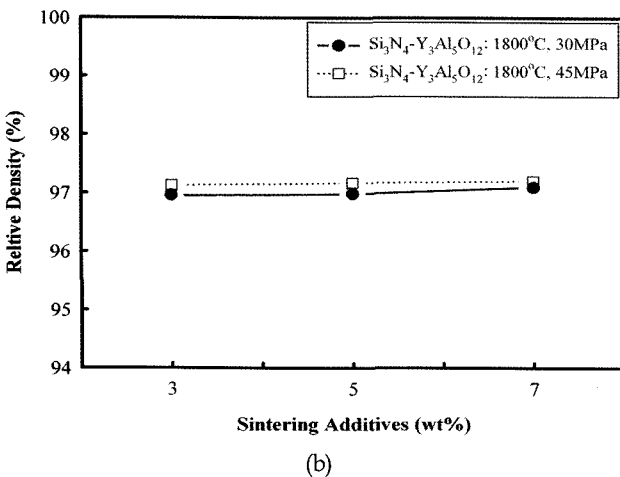
여기서  $P_v$ 는 비커스 하중,  $C$ 는 Median crack의 반경이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 밀도 변화



(a)



(b)

Fig. 2 Relative density of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics with different process temperatures (a) and process pressures (b)

Fig. 2(a)에 1750, 1800°C에서 소결한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스 소결체의 소결조제 첨가량에 따른 상대밀도의 변화를 나타내었다. 모든 시편은 상대밀도 96%이상으로 매우 우수한 특성을 나타내었으며, Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>를 소결조제로 사용한 질화규소는 소결조제 첨가량이 3%에서 7%로 증가하는 경우 소결온도에 관계없이 비슷한 상대밀도를 나타내었다. 그리고 소결온도 1800°C에서 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 첨가하여 소결한 시편의 상대밀도를 비교하면, 같은 소결조건에서 제조하였음에도 불구하고 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제의 소결체가 약간 높은 상대밀도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 기존의 소결조제보다 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제가 적은 양으로도 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 치밀화를 이루는데 효과적임을 나타낸다.

한편, Fig. 2(b)에 소결압력을 달리한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 세라믹스의 상대밀도를 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 소결압력의 증가에 따라 질화규소 세라믹스의 밀도도 증가하였으며, 이는 더 높은 압력에 의한 소결체의 밀도 향상을 기대할 수 있다고 생각된다.

#### 3.2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 경도

소결온도 1750°C, 1800°C인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 소결조제 첨가량에 따른 비커스 경도를 Fig. 3에 도시하였다. 1750°C에서 소결조제의 첨가량 3, 5wt% 시편의 경우, 비커스 압자에 의한 압흔이 뚜렷하게 생성되지 않아 측정이 불가능 하였다. 하지만 1750°C, 소결조제 7wt%를 첨가한 시편의 경우에는 압흔이 어느 정도 뚜렷하여 그 경도 값을 측정할 수 있었으며, 그 값은 1418Hv로 나타났다. 이러한 사실로 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>를 소결조제로 하여 그 첨가량 3wt%와 5wt%로 한 질화규소 세라믹스 시편의 경우에는 소결에 의한 치밀화는 어느 정도 이루어지지만, 10kgf의 비커스 압자 압입하중에 견딜 정도의 강도는 충분히 형성되지 않았다고 판단된다. 그러나 1800°C에서 소결한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 비커스 경도는 소결조제 첨가량에 관계없이 1590~1680Hv로 나타났으며, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편의 경우 보다 약간 높은 값을 나타내었다.

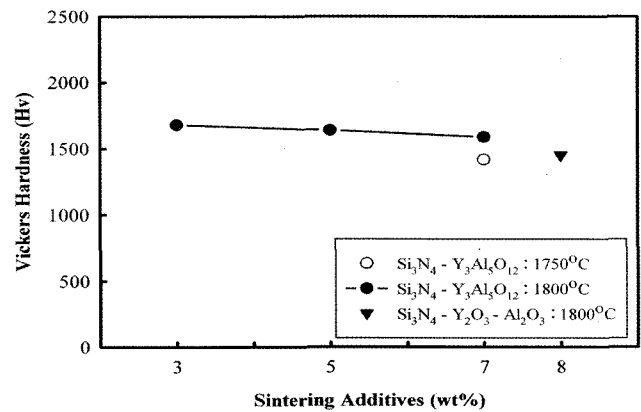
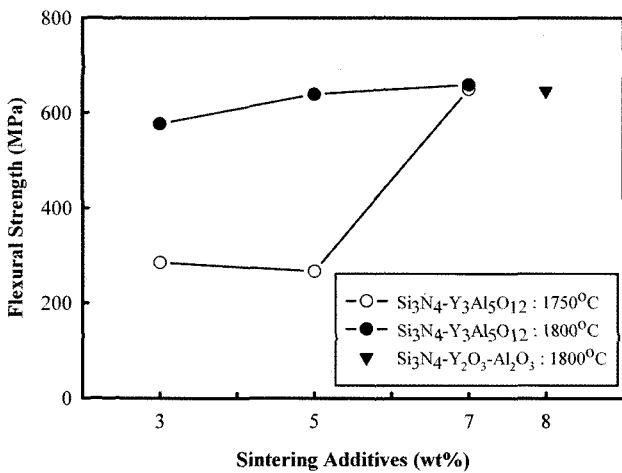


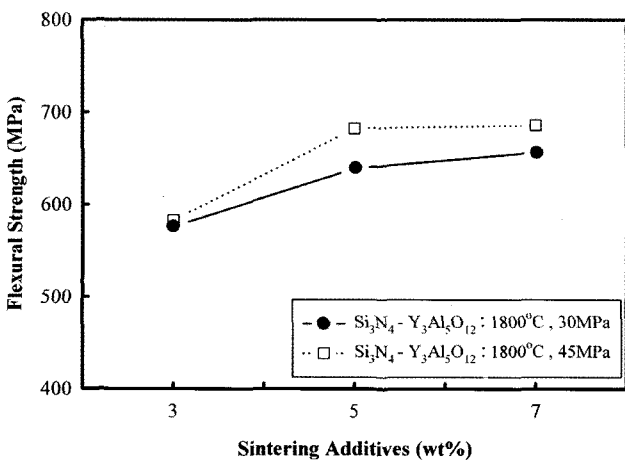
Fig. 3 Vickers hardness of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics with different process temperatures

3.3 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 굽힘 강도

Fig. 4(a)에 소결온도 1750, 1800°C인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제 첨가량에 따른 굽힘 강도변화를 나타내었다. 1750°C 소결시편에서 소결조제의 조성이 3wt%에서 7wt%로 증가함에 따라 굽힘 강도 값은 증가하였고 소결조제의 양이 적은 3 및 5wt% 시편의 강도 값은 7wt%와 비교할 때 상당히 낮은 값을 나타내고 있다. 이는 1750°C라는 낮은 온도에서는 적은 양의 소결조제로는 충분한 소결이 이루어지기 어려우며 효과적인 소결이 이루어지기 위해서는 7wt% 이상의 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제가 필요하다는 사실을 나타낸다. 이러한 사실은 앞서 언급한 3.2절의 경도 특성과 일치하는 것으로 이러한 조건에서의 질화규소 세라믹스의 소결에서는 정상적인 주상정 조직이 발달되지 않았거나 매우 미약할 것으로 예상된다. 그리고 Fig. 4



(a)



(b)

Fig. 4 Flexural strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics with different process temperature (a) and process pressures (b)

(a)의 1800°C에서 소결조제를 달리하여 소결한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>세라믹스의 굽힘 강도를 나타낸 그래프를 보면, Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제 시편의 굽힘 강도는 첨가량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으며, 그 값 또한 600에서 700MPa로 양호한 강도 값을 보이고 있다. 또한 기존의 소결조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 사용한 질화규소의 경우 강도 값은 640MPa로 5wt%의 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>를 첨가한 질화규소와 근사한 값을 보였다. 이는 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제를 사용하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 1800°C에서 소결할 경우 적은 양으로도 충분한 강도 값을 가지는 소결체를 얻을 수 있다는 것을 나타내고 있다. 한편, Fig. 4(b)에 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제를 사용하여 소결압력을 달리한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 굽힘 강도 결과를 나타내었다. 소결압력을 45MPa로 높인 시편의 강도 값은 소결압력을 30MPa로 소결한 시편보다 높은 값을 보였다. 이는 3.1절의 밀도의 결과와 마찬가지로 더 높은 압력에 의한 기공의 제거와 소결시의 첨가제로 인한 액상의 양에 의한 물질의 확산 속도의 영향 등으로 생각된다.

3.4 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 파괴인성

Fig. 5는 소결온도 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 소결조제와 소결온도에 따른 파괴인성의 변화를 나타낸 그래프이다. 1750°C 소결 시편은 6.7MPa·m<sup>0.5</sup>의 값을 나타내었다. 소결온도 1800°C인 시편의 파괴인성을 보면 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 소결조제의 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>는 소결조제 첨가량에 따라 5.4-6.2MPa·m<sup>0.5</sup>의 값을 가지며 기존의 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 소결조제 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 파괴인성 값인 5.7MPa·m<sup>0.5</sup>과 비교하여 비슷한 값을 나타내어, 소결조제 종류에 따른 파괴인성치의 현저한 차이는 나타나지 않았다.

3.5 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 고온 강도

질화규소 세라믹스의 경우 고온에서의 응용도 매우 중요한 분야이기 때문에 1000°C이상의 고온 환경에서의 물성을 조사할 필요가 있다. 본 실험에서는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹스의 소결 조제의 종류와 첨가량에 따른 고온 강도차이를 알아보기 위해 1200°C,

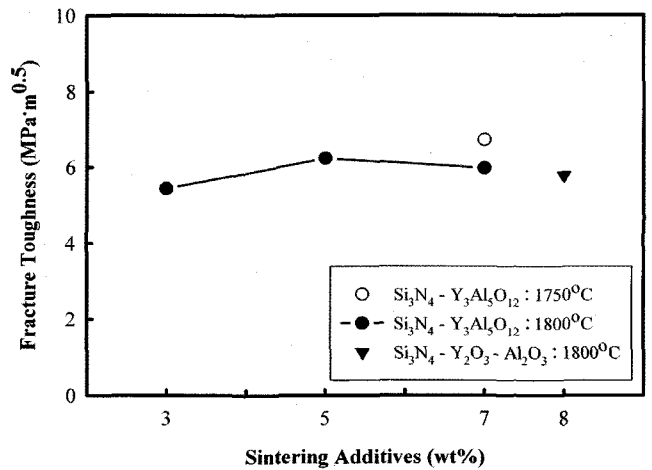


Fig. 5 Fracture toughness of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics with different process temperatures

진공 분위기와 산화분위기 하에서 3점, 4점 굽힘 시험을 각각 실시하고 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 1200°C, 진공분위기 하에서 실시한 3점 굽힘 시험 결과를 나타낸 그림 Fig. 6(a)를 보면, 3wt%의 Y3Al5O12 소결조제를 첨가한 Si3N4의 고온 강도 값은 460MPa를 나타내고 있으며 기존의 소결조제인 Y2O3-Al2O3를 첨가한 Si3N4의 고온강도 값인 290MPa에 비해 매우 높은 값을 나타내고 있다. 한편, 1200°C, 산화분위기하에서 실시한 4점 굽힘 시험 결과를 나타낸 Fig. 6(b)를 보면 Y3Al5O12 소결조제를 첨가한 Si3N4의 고온강도 값은 소결압력과 소결조제 첨가량의 증가에 따른 큰 변화는 없었지만 300에서

400MPa의 굽힘강도 값을 보였으며, 기존의 소결조제인 Y2O3-Al2O3를 첨가한 Si3N4의 고온강도 값은 250MPa로 나타났다. 그리고 상온에서의 굽힘강도는 Y3Al5O12 소결조제를 첨가한 Si3N4와 Y2O3-Al2O3를 첨가한 Si3N4가 비슷한 굽힘강도값을 나타내었지만, 고온에서는 Y3Al5O12 소결조제를 첨가한 Si3N4의 경우가 소량의 소결조제 첨가로도 아주 우수한 고온강도를 나타내었으며 기존의 Si3N4에 비교하여 약 25~40% 정도 고온강도가 증가하였다. 한편 산화분위기하에서의 고온 4점 굽힘 시험편의 강도 값이 진공분위기하에서의 고온 3점 굽힘 시험편의 강도 값에 비해 낮은 것은 시험분위기하에 의한 차이보다는 3점 굽힘과 4점 굽힘의 시험방법의 차이에서 나타나는 치수효과(Size effect)로 생각된다.

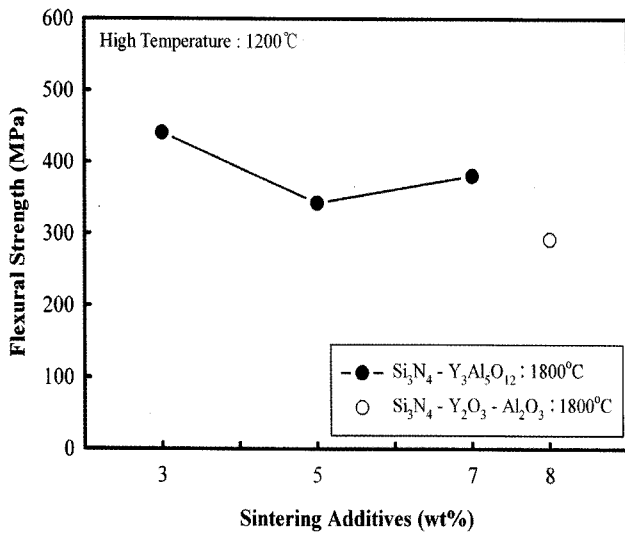
일반적으로 세라믹스 재료에서 소결축진과 치밀화를 얻기 위해 불가피하게 첨가하는 소결조제는 후에 비정질 입계상으로 내부에 잔존하게 되는데 고온 환경에 도달하였을 경우, 응력이집중하여 입계상의 연화에 의해 발생한 미세 균열의 성장이 가속화 되어 파괴가 일어난다(이상훈, 1995). 그러므로 소결 시 다량의 소결조제는 고온 환경이라는 관점으로 볼 때 바람직하지 않다. 이러한 사실을 종합하여 볼 때, Y3Al5O12를 소결조제로 사용할 경우, 보다 적은 양의 첨가로도 효과적인 질화규소 세라믹스의 소결이 가능할 뿐만 아니라, 특히 고온 환경에서의 강도특성의 향상에 매우 유리할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

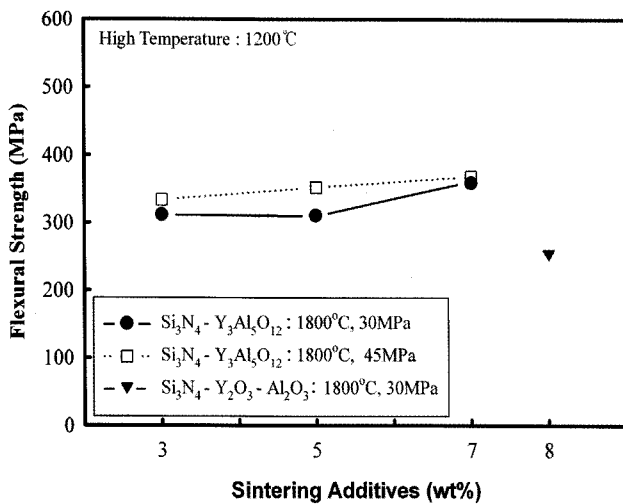
본 연구에서는 Y3Al5O12 소결조제를 사용하여 1750, 1800°C에서 30, 45MPa의 압력으로 질화규소 세라믹스를 제조하였다. 소결조제의 조성은 3, 5 및 7wt%였으며 제조된 Si3N4 세라믹스의 기계적 특성을 통해 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Y3Al5O12 소결조제를 첨가한 질화규소는 1750°C에서 소결했을 경우 5wt% 이하의 소량으로는 정상적인 기계적 특성을 얻을 수 없었다.
- (2) Y3Al5O12 소결조제를 사용한 질화규소는 1800°C에서 소결했을 때 양호한 강도를 나타내었다.
- (3) 1800°C에서 Si3N4 세라믹스의 소결 시 소량의 Y3Al5O12 소결조제로도 양호한 소결 특성을 보였으며 기존 조성의 질화규소 세라믹스와 비교하여 근사한 밀도, 경도, 강도, 파괴인성 값을 나타내었다.
- (4) 진공분위기하에서의 Y3Al5O12 소결조제 시편의 고온강도 값은 380~440MPa이고 기존 소결조제 시편의 고온강도 값은 290MPa이었다. 그리고 산화분위기하에서 Y3Al5O12 소결조제 시편의 고온강도 값은 310~370MPa이고 기존 소결조제 시편은 250MPa를 나타내었다.
- (5) 소량의 Y3Al5O12 소결조제로도 Si3N4의 고온강도를 향상시킬 수 있었다. 이는 Si3N4 세라믹스의 고온 환경에서의 응용을 더욱 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌



(a)



(b)

Fig. 6 High temperature strength of Si3N4 ceramics; 3-point bending test at 1200°C under high vacuum (a) and 4-point bending test at 1200°C under oxidation circumstance (b)

- Clarke, D.R. and Thomas, G. (1978). "Microstructure  $Y_2O_3$  Fluxed Hot-pressed Silicon Nitride", *Journal of American Ceramic Society*, Vol 61, No 3-4, pp 114-118.
- Jung, H.C., Yoon, H.K., Kim, B.A., Park, J.S. and Kohyama, A. (2005). "Fracture Toughness of Liquid Phase Sintered SiC by Using Indentation Fracture Method", *Key Engineering Materials*, Vol 297-300, pp 137-142.
- Lawn, B.R. and Fuller, E.R. (1975). "Equilibrium Penny-like Cracks in Indentation Fracture", *J. Mater. Sci.*, Vol 10, pp 2016.
- Hirasaki, N., Akimune, Y. and Mitimo, M. (1994). "Sintering of  $Y_2O_3-Al_2O_3$  Doped  $\beta-Si_3N_4$  Powder and Mechanical Properties of Sintered Materials", *Journal of Ceramic Society, Japan*, Vol 102, pp 791-795.
- Sanders, W.A. and Mieskowski, D.M. (1985). "Strength and Microstructure of Sintered  $Si_3N_4$  with Rare-earth-oxide Additions", *Ceramic Bulletin*, Vol 64, No 2, pp 304-309.
- Tsuge, A., Nishida, K. and Komatsu, M. (1975). "Effect of Crystallizing the Grain-boundary Glass Phase on the High-temperature Strength of Hot-pressed  $Si_3N_4$  Containing  $Y_2O_3$ ", *Journal of American Ceramic Society*, 58(7-8), pp 323-326.
- Miyoshi, T., Sagwa, N. and Sassa, T. (1985), "The Evaluation on the Fracture Toughness of Structural Ceramics", *Journal of Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol 51, No 471, pp 60-11.
- Liang, Y. and Dutta, S.P. (2001). "Application Trend in Advanced Ceramics Technologies", *Technovation*, Vol 21, pp 61-65.
- 김부안, 문창권 (2001). "세라믹스 파괴인성평가에 있어서 IF법 과 AE", *한국해양공학회지*, Vol 15, No 2, pp 61-65.
- 이상훈 (1995). 열기관용 세라믹 소재 및 부품 개발, 선도기술 개발사업 제 1단계 3차년도 보고서, 한국화학연구소, pp 41.

---

2007년 3월 16일 원고 접수

2007년 11월 22일 최종 수정본 채택