



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

소결보조제 종류에 따른 사이알론의
강도 특성



2009년 2월

부경대학교 대학원

기계공학학연합동과정

문 석 재

공 학 석 사 학 위 논 문

소결보조제 종류에 따른 사이알론의
강도 특성

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2009년 2월

부경대학교 대학원

기계공학학연합동과정

문 석 재

문석재의 공학석사 학위논문을
인준함

2008년 12월



주 심 공학박사 안 병 현 (인)

위 원 공학박사 안 석 환 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

제 1 장 소결보조제 Al_2O_3 및 Y_2O_3 종류에 따른 사이알론 특성

1.1 서 론	1
1.2 연구 내용 및 방법	3
1.3 결과 및 고찰	6
1.3.1 밀도 및 굽힘강도 특성	6
1.3.2 비커스경도	9
1.3.3 파괴인성	11
1.3.4 파단면관찰	13
1.4 요약	16
1.5 참고 문헌	17

제 2 장 소결보조제 AlN 및 Y_2O_3 첨가에 의한 사이알론 특성

2.1 서 론	18
2.2 연구 내용 및 방법	19
2.3 졸겔법에 의한 졸겔 무기바인더	22
2.4 결과 및 고찰	24
2.4.1 모재 파괴인성(Fracture Toughness)	24

2.4.2 모재 경도와 밀도	25
2.4.3 모재의 굽힘강도	28
2.4.4 열처리 균열재의 굽힘강도	30
2.4.5 모재 및 열처리 시험편의 Morphology	33
2.5 요약	38
2.6 참고 문헌	40
제 3 장 결론	42



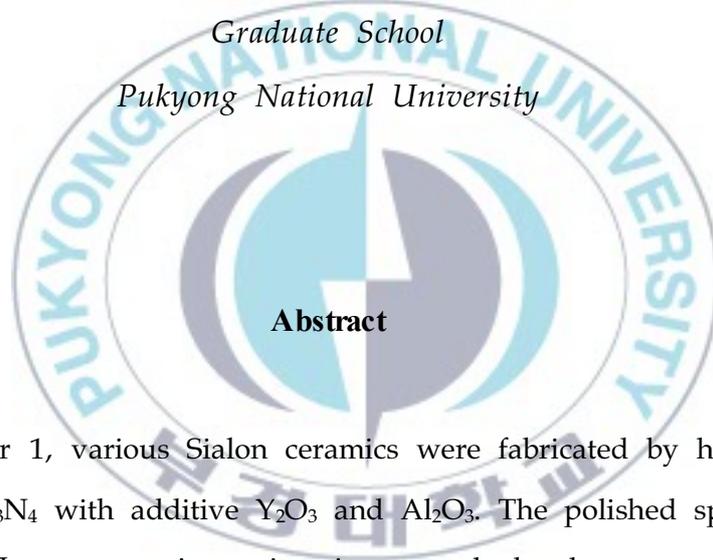
Characteristics of Strength of Sialon according to the Kinds of Additive

Suk Jae Moon

UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering

Graduate School

Pukyong National University



Abstract

In chapter 1, various Sialon ceramics were fabricated by hot-pressing mixtures of Si_3N_4 with additive Y_2O_3 and Al_2O_3 . The polished specimen of SiAlON I ~ III went on increasing in strength by heat treatment, heat treated non-polished specimen were similar or up to polished specimen in strength. The polished specimen of both SiAlON IV and V showed a very high strength, but were not increasing of strength by heat treatment. All specimens were fractured on the surface and at the inner flaws. Surface fractures were initiated from the polished surface flaw and corner flaw. Inner fractures were initiated from an internal defect

In chapter 2, Sialon was produced by hot-pressing the mixtures of Si_3N_4 , AlN and Y_2O_3 powders. Fracture toughness and Vickers hardness of smooth specimen were average $7.05 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ and $H_v = 1580$, respectively. Density of three kinds of specimens, smooth specimen, smooth and healed specimen, smooth with SiO_2 colloidal coating and healed specimen, had beyond 99 % of theoretical density. Bending strength of smooth healed specimens had high strength more than 1 GPa. Crack healed specimens recovered as strength as smooth specimen, That is, cracked specimen with SiO_2 colloidal coating on cracked part recovered strength by heat treatment, completely. Crack healing of Si_3N_4 composite ceramics had contributed SiO_2 glassy phase and $\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ crystal phase to strength recovery.



제 1 장 소결보조제 Al_2O_3 및 Y_2O_3 종류에 따른 사이알론 특성

1.1 서론

철강생산업체는 강관에 아연 혹은 알루미늄 도금을 하기 위하여 도금 탕로 설비를 가동하고 있다. 이 도금 탕로 내에는 강관을 지탱하기 위한 부품으로서 기존에는 세라믹 부싱의 형태로 사용하고 있는데 면 접촉 방식을 이룬다. 그러나 세라믹 가격이 고가이기 때문에 일차적으로 경제성이 문제가 되어 기존의 부싱방식을 로울러 형상으로 변경이 불가피하게 되었다. 롤러 형상의 점 접촉 변경은 세라믹 가격을 절감하려는데 목적이 있다. 로울러 구동축과 접촉하여 가동되며, 이 때 로울러에는 세라믹 로울러 베어링이 사용된다.

또 하나의 문제점은 도금 탕로 내에서 부싱과 구동축의 면접촉으로 진동에 의한 파장이 크다. 그래서 로울러 형상으로 설계 변경이 필요하며, 이 때 로울러 베어링 소재로 공강도, 내열성, 내충격성 또는 내식성 등이 뛰어난 Si_3N_4 를 사용한다.¹⁾ Si_3N_4 를 사용할 경우 고온에서 규소가 철과 반응을 용이하게 함으로서 철 금속에 용해되는 현상이 발생한다. 이 고온반응에 의해 Si_3N_4 는 철과 접촉할 경우 마모가 현저하게 증가하고 가동 중 균열 발생에 의하여 베어링이 파단한다. 이 때 설비가동이 중단되는 문제가 발생하기 때문에 대체 소재개발이 요구된다. 따라서, 로울러와 구동축이 면접촉이 아닌 점접촉을 유지하여 가동하중에 대한 진동을 작게 하고, 로울러 베어링 소재의 내구성을 향상시키기 위하여 대체 소재로서 사이알론(Sialon)을 개발하고 사이알론 세라믹 로울러(roller)을 STS316 강으로 구성된 베어링의 몸체에 조립하여 도금공정이 지속성을 갖도록 하고자 한다.

Si_3N_4 의 소결은 공유결합성이 매우 강하고, 자기확산계수가 매우 작기 때문

에 자체만으로는 거의 소결이 되지 않는다. 그 때문에 치밀한 Si_3N_4 소결체를 얻기 위하여 통상 Y_2O_3 , Al_2O_3 또는 MgO 등을 소결보조제로 사용한다.²⁾ 이들 소결보조제는 Si_3N_4 분말 표면에 존재하는 SiO_2 와 반응하여 액상을 형성하고, Si_3N_4 의 $\alpha \rightarrow \beta$ 변태 및 소결을 촉진하고, 소결 후에는 입계에 유리상으로 존재한다³⁾. 그 때문에 Si_3N_4 소결체의 고온특성, 즉 고온강도, 크립특성, 내산화성 등은 Si_3N_4 결정립 자체의 성질보다도, 유리상의 화학조성, 양에 크게 의존한다⁴⁾. 더욱이 소결보조제의 입경, 입도분포 또는 불순물의 종류, 양도 소결거동에 영향을 준다고 생각된다.

본 연구에서는 Si_3N_4 에 평균입경이 다른 소결보조제 Al_2O_3 와 초미립자 Y_2O_3 를 소결보조제로 첨가하여 소결한 사이알론의 기계적 특성을 보고하고자 한다.



1.2 연구 내용 및 방법

세라믹스는 소결하는 소재의 입경에 강도가 크게 좌우하므로 첨가하는 Al_2O_3 의 입경을 변화시키고, 소결보조제 Y_2O_3 를 첨가하여 소결하였다. 실험에 사용한 재료는 Table 1.1과 같다.

SiAlON I, II 및 III의 Si_3N_4 와 Al_2O_3 조성비(wt.%)는 90.99 : 9.01이고, 볼 밀은 전용용기에 에탄올과 Si_3N_4 볼($\phi 5$)을 사용하여 20시간 동안 혼합하였다. 혼합한 슬러리는 $90^\circ C$ 의 로에서 24시간 건조시켜 소결 전에 파쇄하여 $106 \mu m$ 망으로 걸러서 사용하였다. 소결은 $40 * 40 mm$ 탄소몰드를 사용하여 질소분위기에서 30 MPa의 압력으로 $1800^\circ C$ 에서 1시간 동안 실시하였다. SiAlON III의 콜로이드는 용액 중에 8.5 % Al_2O_3 의 고용체를 함유하고 있으나, 상온에서는 Al_2O_3 의 수용액 상태이나, $500^\circ C$ 이상 온도에서 Al_2O_3 의 고용체가 형성된다. SiAlON IV 및 V의 Si_3N_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 조성비(wt.%)는 88 : 5 : 7이고, 폴리비닐 알코올은 3 wt.% 첨가하여 전용용기에 알코올과 Si_3N_4 볼($\phi 5$)을 사용하여 24시간 동안 혼합하였다. 혼합한 슬러리는 $90^\circ C$ 의 로에서 24시간 건조시켜 소결 전에 파쇄하여 $106 \mu m$ 망으로 걸러서 사용하였다.

소결은 $35 * 60 mm$ 탄소몰드를 사용하여 질소분위기에서 35 MPa의 압력으로 $1700^\circ C$ 및 $1850^\circ C$ 에서 1시간 동안 실시하였다.

소결된 재료는 연삭한 후, Fig. 1.1과 같이 $3 * 4 * 40 mm$ 크기로 절단, 경면 연마하여 굽힘 강도 시험에 사용하였다. 시험편의 밀도는 아르키메데스 (Archimedes) 원리를 이용한 전용 저울을 사용하여 측정하였으며, 상대밀도 계산 시 사용된 이론밀도는 각 분말의 이론밀도에 준하여 혼합법칙(rule of mixture)으로 구하였다.

SiAlON I, II 및 III 시험편은 5가지 종류로 하였다. ① 경면 연마한 시험편, ② 경면 연마하는 도중에 발생했을 것이라 생각되는 균열을 치유하기 위하여 $1200^\circ C$ 에서 열처리한 시험편, ③ 균열 치유에 기여한다고 알려져 있는

SiO₂를 공급하기 위하여 SiO₂ 콜로이드를 표면에 도포^{5,6)}하여 1200 °C에서 열처리한 시험편, ④ 미연마 시험편을 1200 °C에서 열처리한 시험편, ⑤ 미연마 시험편 표면에 SiO₂ 콜로이드를 표면에 도포하여 1200 °C에서 열처리한 시험편, SiAlON IV 및 V 시험편은 4종류로서 위의 ①, ②, ③과 ⑥ 경면 연마하는 도중에 발생했을 것이라 생각되는 균열을 치유하기 위하여 1300 °C⁷⁾에서 열처리한 시험편을 각각 사용하였다.

상기와 같은 시험편을 사용하여 굽힘 시험은 실온에서 크로스헤드속도 0.5 mm/min의 속도로 3점 굽힘 장치를 사용하여 실시하였다. 이 때 스패는 30 mm이다. 파단면은 광학현미경을 사용하여 관찰하였으며, 비커스경도는 마이크로 비커스 경도기와 비커스 경도기를 사용하여 측정하였다.



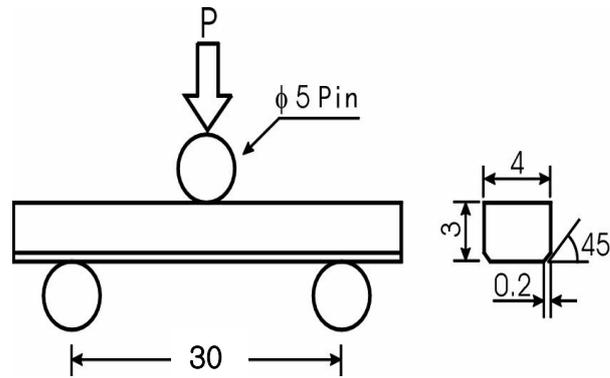


Fig. 1.1 Specimen shape and load system (unit : mm)

Table 1.1 Specimen materials and sintering conditions

Specimen	Materials	Production	Sintering Condition
SiAlON I	Si ₃ N ₄ mean size 0.2 μm Al ₂ O ₃ mean size 0.1 μm	SN-E10, Ube, Japan AKP-700, Sumitomo Chemical, Japan	30 MPa, 1800 °C, 1 hr
SiAlON II	Si ₃ N ₄ mean size 0.2 μm Al ₂ O ₃ Ultra fine 31 nm	SN-E10, Ube, Japan CI Chemical, Japan	
SiAlON III	Si ₃ N ₄ mean size 0.2 μm Al ₂ O ₃ 8.5 % colloidal	SN-E10, Ube, Japan NGE Tech, Korea	
SiAlON IV	Si ₃ N ₄ mean size 0.2 μm Al ₂ O ₃ mean size 0.1 μm	SN-E10, Ube, Japan AKP-700, Sumitomo Chemical, Japan	35 MPa, 1700 °C, 1 hr
SiAlON V	Y ₂ O ₃ Ultra fine 33 nm polyvinyl alcohol	CI Chemical, Japan	35 MPa, 1850 °C, 1 hr

1.3 결과 및 고찰

1.3.1 밀도 및 굽힘강도 특성

SiAlON I ~ V 소결체에서 얻어진 밀도와 굽힘 강도를 각각 Fig. 1.2와 Fig. 1.3에 나타낸다. Fig. 2에서 밀도는 이론 밀도 100 %에 대하여 SiAlON I ~ III은 94.6, 94.5 및 93.6 %를 나타내고, SiAlON IV와 V는 97.5와 97.9 %를 나타내었다. 소결 첨가제 Y_2O_3 를 가지는 것이 높은 밀도를 나타내었으며, 또한 소결 온도가 높은 것이 근소하나마 높은 값을 나타내었다.

Fig. 1.3에서 SiAlON I ~ III은 시험편①(□)에 비하여 시험편②(○)와 ③(△)의 강도가 약 2~2.5배 정도로 대폭 상승하였다. 이것은 열처리에 의하여 경면 연마 시에 발생한 표면 또는 모서리의 미세한 균열이 치유되었다는 것을 의미하며, 경면 연마한 것이 약간 더 상승하였다. 이것으로 열처리에 의하여 강도를 상승시킬 수 있는 것이라 판단하였다. 따라서 미연마 시험편을 열처리하여 굽힘 강도를 평가하였다. 미연마 시험편④(◁)와 ⑤(☆)는 경면 연마하여 열처리한 시험편과 비슷하거나 높은 정도의 강도가 상승하였다. 더구나 시험편①(□)보다는 강도가 약 1.5~2.2배 정도 상승하였으며, 경면 연마하여 열처리한 것과 거의 비슷한 정도였다. 이 그림에서 콜로이드를 첨가하여 소결한 SiAlON III이 나노 파우더를 첨가하여 소결한 SiAlON II보다 강도가 더욱 상승하였다. 또한 미연마재를 열처리함으로써 높은 강도 상승이 나타났으므로 가공 등에 따르는 경비 절감 효과는 나노사이즈 파우더를 사용하는 것이 효과가 있다고 판단된다. SiAlON IV의 시험편①(□)은 6개 실시하여, 평균 굽힘 강도가 약 884 MPa을 나타내었으며, 이 중 2개는 약 1000 MPa을 상회하는 강도값을 얻었다. 그러나 시험편②(○)와 ③(△)은 시험편①에 비하여 약 78 %로 오히려 강도가 저하하였다. 더구나 시험편⑥(◇)는 약 67 %로 더욱 저하하였다. 이것은 열처리에 의하여 강도 상승을 도모할 수 없다고 판단된다. 이

러한 원인은 추후 해명되어야 할 것으로 생각한다. SiAlON V의 시험편①에 대하여 ②, ③, ⑥의 평균 굽힘 강도는 각각 104 %, 106 %, 97 %를 나타내었다. 이 경우에 있어서는 SiO₂ 콜로이달 및 열처리 온도의 영향은 적었다.



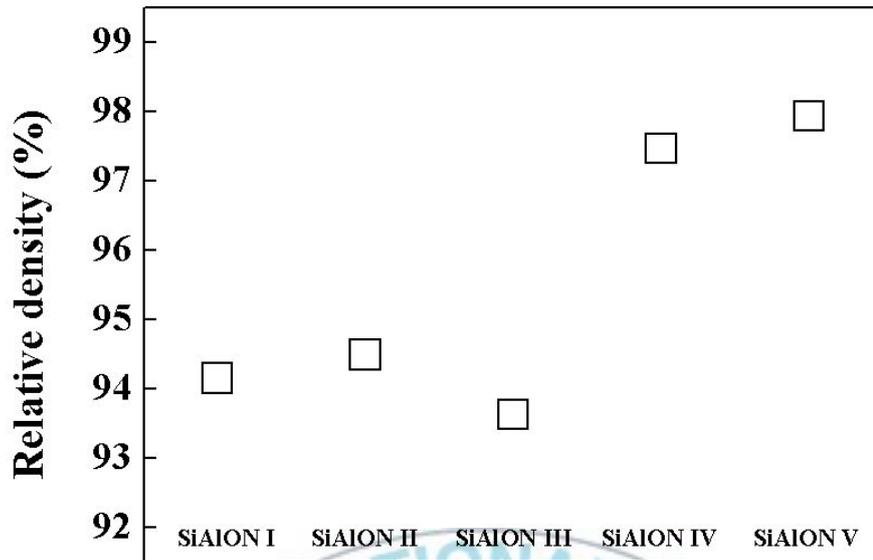


Fig. 1.2 Relative density of sintering material

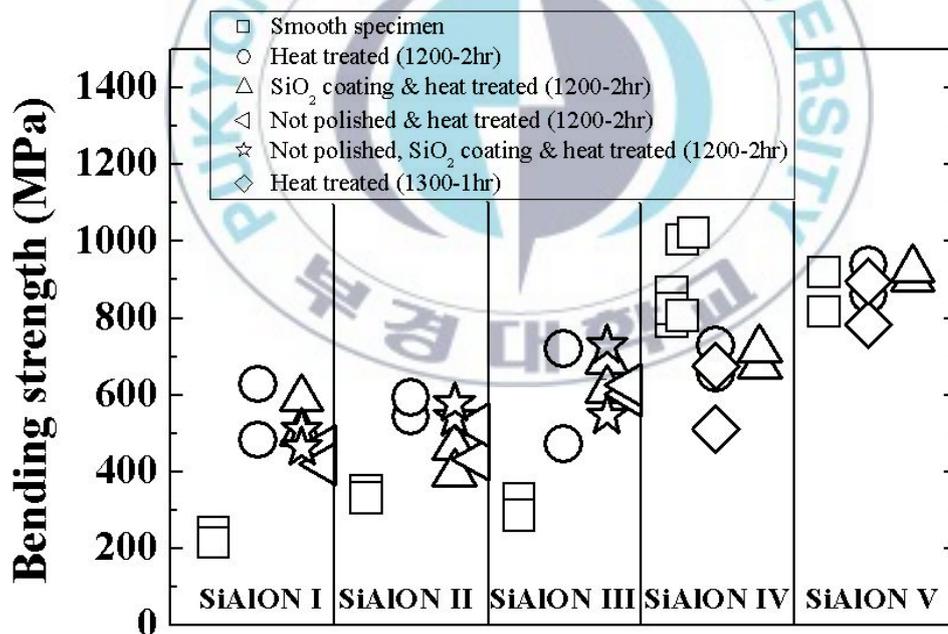


Fig. 1.3 Bending strength of sintering material

1.3.2 비커스경도

SiAlON I ~ V 소결체에서 얻어진 모재의 비커스 경도(\square)를 Fig. 1.4에 나타낸다. 경도는 비커스 경도시험기(5030 TKV, INDENTEC)을 사용하여, 각 시편에 대하여 5 kgf의 압입하중에서 15초 동안 압자를 압입하여 경도를 측정하였다. 정확한 경도를 산출하기 위하여 각 시편마다 5회 측정하여 평균값을 산출하였다. 비커스경도 산출은 $H_v = 1.8544P/d^2$ 을 사용하였다. 여기서 H_v 는 비커스경도, P 는 압입하중, d 는 압흔의 대각선 길이의 평균을 나타낸다. 이 그림에서 SiAlON I 은 1581.7 Hv, SiAlON II는 1652.4 Hv, SiAlON III는 1692.9 Hv, SiAlON IV는 1477 Hv, SiAlON V는 1409.1 Hv를 얻었다. 그림에서 비커스 경도의 평균은 Si_3N_4 와 Al_2O_3 를 합성하여 소결한 SiAlON I, II 및 III가 Y_2O_3 를 첨가한 SiAlON IV 및 V보다 높은 값을 나타내었다. 더구나 SiAlON II 및 III의 경도는 1600 Hv이상의 높은 경도를 나타내었다. 그러나 SiAlON IV 및 V는 낮은 경도를 나타내고 있으나, Fig. 2에서 모재의 굽힘 강도는 SiAlON I, II 및 III보다 높은 강도를 나타내었다.

SiAlON IV의 모재 6개에 대한 마이크로 비커스경도(\circ)를 Fig. 1.4에 나타낸다. 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여, 각 시편에 대하여 1 kgf의 압입하중에서 5초 동안 압자를 압입하여 경도를 측정하였다. 정확한 경도를 산출하기 위하여 각 시편마다 5회 측정하여 평균값을 산출하였다. 이 그림에서 6개의 모재 시험편(1547.2 Hv, 1555.6 Hv, 1543.3 Hv, 1538.1 Hv, 1561.6 Hv, 1569.9 Hv)의 평균은 1553 Hv를 얻었다. 이것은 SiAlON IV 모재 비커스 경도 1477 Hv보다 높은 마이크로 비커스 경도를 나타낸다. Fig. 1.2에서 2개의 모재 강도는 1000 MPa 이상을 나타내고 있으나, 경도가 SiAlON I, II 및 III보다 낮아, 이에 대한 금후의 연구가 필요하다.

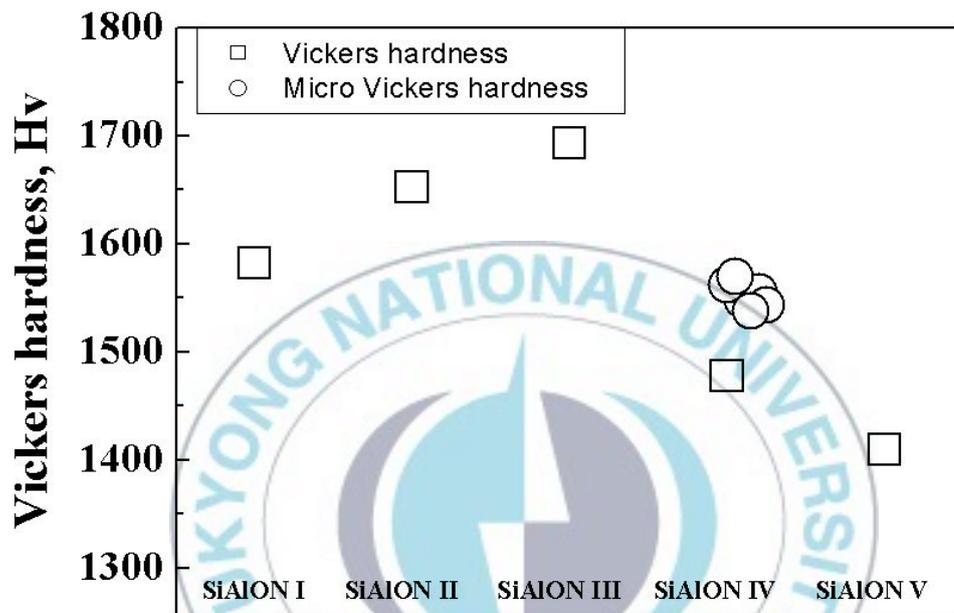


Fig. 1.4 Vickers hardness of sintering material

1.3.3 파괴인성

파괴인성은 IF(Indentation Fracture)법에 의하여 구하였다. IF법은 압자압입에 의해서 생긴 균열의 크기를 압흔의 크기와 함께 측정하여 K_{IC} 를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 IF법의 기초가 되는 식이 몇 가지 있지만, 그 중에서도 재료 자체의 탄성계수를 고려할 필요 없이 파괴 인성치를 쉽게 구할 수 있는 Lawn and Fuller 식 $K_{IC} = x(Pv/c^{3/2})$ 을 사용하였다. 여기서 $x = 1/(\pi^{3/2}\tan\Psi)$, $\Psi = 68^\circ$ 이다. 그리고 Pv 는 비커스하중, c 는 Median Crack의 반경이다.

5종류 시험편에서 얻어진 파괴인성을 Fig. 1.5에 나타낸다. 이것은 5번 측정 한 평균값이다. 파괴인성은 각각 $4.26 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $4.04 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $4.07 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $5.57 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 및 $6.33 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 을 얻었다. 이것은 본 연구에서 목표로 한 $5.7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 보다 각각 75 %, 71 %, 71 %, 98 % 및 111 %를 나타내었다. 비교적 모재 굽힘 강도가 높은 SiAlON IV 및 V의 소결체에서 본 연구의 목표 파괴인성을 얻을 수 있었다.



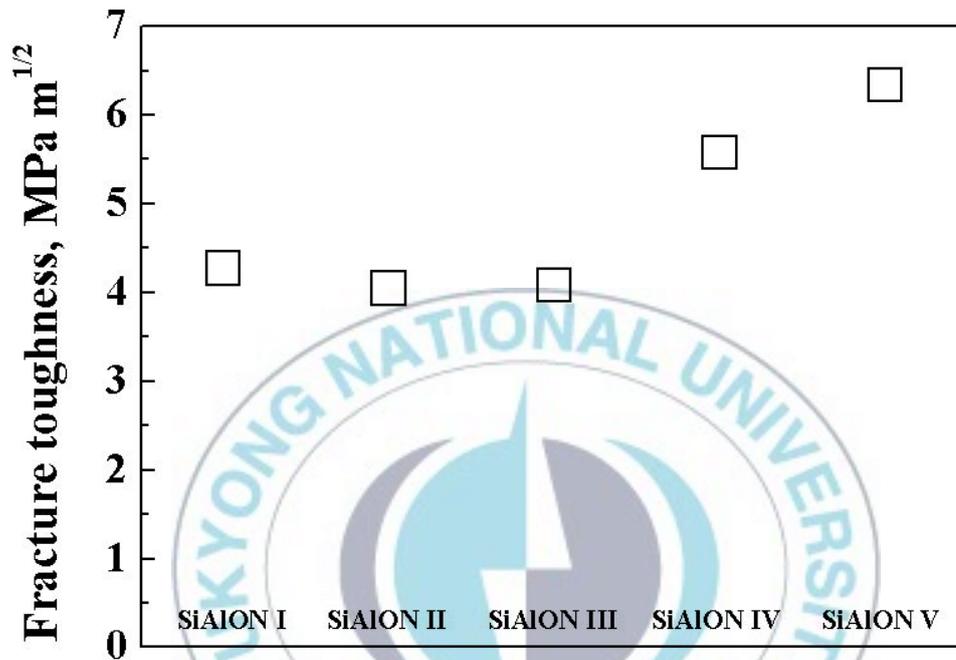


Fig. 1.5 Fracture toughness of sintering material

1.3.4 파단면 관찰

5종류의 소결체에서 얻어진 모재의 파단면 사진을 Fig. 1.6에 나타낸다. ㉠ SiAlON I, ㉡ SiAlON II, ㉢ SiAlON III, ㉣ SiAlON IV, ㉤ SiAlON V의 소결체의 파단면이다. 그림에서 소결체의 파단면은 표면 또는 내부에서 파단하였다. 표면 파단은 경면 연마한 표면의 결함과 모따기에서 발생한 모서리의 결함이 원인이었다. 또한 내부 파단은 소결 시에 형성된 표면하의 개재물이 원인이었다.



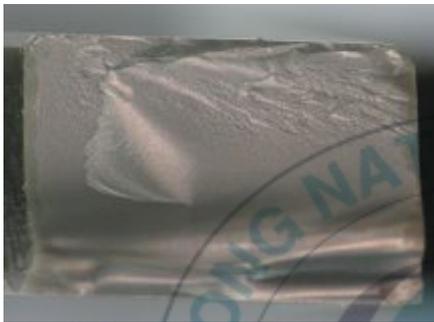


$\sigma_B = 241.3 \text{ MPa}$
(corner defect)



$\sigma_B = 214.5 \text{ MPa}$
(surface defect)

Ⓐ **SiAlON I**



$\sigma_B = 348.5 \text{ MPa}$
(corner defect)



$\sigma_B = 330.9 \text{ MPa}$
(inner defect)

Ⓑ **SiAlON II**



$\sigma_B = 328.5 \text{ MPa}$
(corner defect)



$\sigma_B = 285.2 \text{ MPa}$
(surface defect)

Ⓒ **SiAlON III**

Fig. 1.6 Fracture surfaces of sintering material



$\sigma_B = 1002.4 \text{ MPa}$
(surface defect)



$\sigma_B = 1020.4 \text{ MPa}$
(corner defect)

Ⓓ **SiAlON IV**



$\sigma_B = 918.3 \text{ MPa}$
(corner defect)



$\sigma_B = 815.8 \text{ MPa}$
(corner defect)

Ⓔ **SiAlON V**

Fig. 1.6 Continued

1.4 요약

본 연구에서 소결 제작한 사이알론의 기계적 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. SiAlON I ~ III은 열처리에 의하여 강도를 상승 시킬 수 있었고, 열처리한 미연마 시험편은 경면 연마하여 열처리한 시험편과 비슷하거나 높은 정도로 강도가 상승하였다. SiAlON IV 및 V는 모재의 강도가 현저하게 높았으며, 열처리에 의한 강도 상승은 얻을 수 없었다.

2. SiAlON I ~ III의 비커스 경도가 SiAlON IV 및 V보다 높은 값을 나타내었다. 그러나 SiAlON IV 및 V의 모재 굽힘 강도는 SiAlON I, II 및 III보다 높은 강도를 나타내었다. SiAlON IV 및 V의 파괴인성은 SiAlON I, II 및 III보다 높은 값을 얻었다.

3. 소결체의 파단은 표면 또는 내부에서 파단하였으며, 표면 파단은 경면 연마한 표면의 결함과 모따기 부분에서 발생한 모서리의 결함이 원인이었다. 또한 내부 파단은 소결 시에 형성된 표면하의 개재물이 원인이었다.

4. 제1장에서 연구한 사이알론은 1 GPa 이상의 고강도 사이알론을 얻을 수가 없었다.

1.5 참고 문헌

1. D. Anson, K. S. Ramesh, and M. DeCorso, 1991, "Application of Ceramics in Industrial Gas Turbines; Task 1, Technology Background"; Task 1 Report, U.S. Department of Energy Contract No. DE-AC-2-89CE40878, DOE/CE/40878-2.
2. F. F. Lang, 1980, "Silicon Nitride Poly Systems: Fabrication, Microstructure and Properties", Int. Met. Rev., No.1, pp. 1~20.
3. K. Yabuta, H. Nishio and K. Uematsu, 1991, "Effect of Phase Composition on the Mechanical Properties of Hot Isostatically Pressed SiAlON Ceramics", Journal of the American Ceramic Society, Vol. 74, pp. 884-886.
4. K. H. Jack, 1976, "Sialons and Related Nitrogen Ceramics", J. Mater. Sci., Vol. 11, pp. 1135~58.
5. K. W. Nam, M. K. Kim, S. W. Park, S. H. Ahn and J. S. Kim, 2007, "Crack Healing Behavior and Bending Strength of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ Composite Ceramics by SiO_2 Colloidal", Mater. Sci. and Engng. A, Vol. 471, pp. 102~105.
6. M. K. Kim, S. B. Kang, S. H. Ahn and K. W. Nam (2007), "Strength and Surface Morphology of Si_3N_4 Composite Ceramics Coated with SiO_2 Gel", Solid State Phenomena Vols. 124-126, pp. 719~722.
7. K. W. Nam, M. K. Kim, H. S. Kim, J. W. Kim and S. H. Ahn (2006), "Bending Strength of Si_3N_4 Monolithic and $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ Composite Ceramics and Elastic Wave Characteristics by Wavelet Analysis", International Journal of Modern Physics B, Vol. 20, No. 25-27, pp. 4279~4284.

제 2 장 소결보조제 AlN 및 Y₂O₃ 첨가에 의한 사이알론 개발

2.1 서 론

Si₃N₄ 소결체는 고강도, 내열성, 내열충격성 및 내식성 등 뛰어난 특성을 많이 가지고 있기 때문에, SiC와 함께 엔진부품, 내식성이 강한 해양구조물 등의 구조용 재료로 주목받고 있으며, 이미 일부는 실용화되어 있다¹⁾. 그러나 Si₃N₄ 자체는 공유결합성이 매우 강하고, 자기 확산계수가 매우 작기 때문에²⁾ 자체만으로 소결 할 수 없다. 그 때문에 치밀한 Si₃N₄ 소결체를 얻기 위해서 통상 Y₂O₃, Al₂O₃, MgO 또는 TiO₂ 등을 소결보조제로 사용 한다³⁻⁵⁾. 이들 소결보조제는 Si₃N₄ 분말 표면에 존재하는 SiO₂와 반응하여 액상을 생성하여 Si₃N₄의 α → β 변태 및 소결을 촉진하고, 소결 후는 입계에 유리상으로 남는다. 그 때문에 Si₃N₄ 소결체의 고온 특성, 즉, 고온강도, 크립특성, 내산화성 등은 Si₃N₄ 결정체 자체의 성질보다도 유리상의 화학조성, 양에 크게 의존한다⁶⁾. 이와 같이 소결보조제는 치밀한 Si₃N₄ 소결체를 얻기 위하여 필요한 것이지만, 고온특성을 열화 시키는 문제가 있다.

Si₃N₄ 소결보조제로서 여러 가지 산화물이 검토되고 있지만, Si₃N₄에 Al이나 O를 고용하여 고용체를 만드는 것이 제안되어⁷⁾ 이를 사이알론이라 불렀다. 이들은 뛰어난 특성을 가지고 있어, 오늘날 절삭공구 등에 응용되고 있다. 또한 최근 SiO₂ 콜로이드를 사용하여 가공 중에 생성된 균열을 치유하는 방법이 제안^{8,9)}되어 가공단가의 저감 및 고온강도 향상에 기여하고 있다.

본 연구에서는 Si₃N₄와 AlN에 소결보조제 Y₂O₃를 첨가하여 사이알론을 소결하고, 소결체를 열처리함으로써 고강도 사이알론을 개발하였다. 특히 균열부에 SiO₂ 콜로이드를 코팅하여 열처리함으로써 강도를 회복하였다.

2.2 연구 내용 및 방법

본 연구에 사용한 분말은 $0.2 \mu\text{m}$ Si_3N_4 , $1.2 \mu\text{m}$ AlN 및 $0.27 \mu\text{m}$ 인 소결보조제 Y_2O_3 이다. 분말의 조성비(wt.%)는 95.02 : 3.09 : 1.89이고, 불밀은 전용 용기에 이소프로판올과 Si_3N_4 분(φ5)을 사용하여 24시간 동안 혼합하였다. 혼합한 슬러리는 90°C 의 로에서 24시간 건조시켜 소결 전에 파쇄하여 $106 \mu\text{m}$ 망으로 걸러서 사용하였다. 소결은 $40 \times 40 \text{ mm}$ 탄소몰드를 사용하여 질소분위기에서 35 MPa의 압력으로 1850°C 에서 1시간 동안 실시하였다. Fig. 2.1은 소결 흐름도를 나타낸다. 소결체는 $3.0 \times 4.0 \times 40 \text{ mm}$ 의 크기의 시험편으로 가공하여 경면연마 한 후, 모따기를 하였다. Fig. 2.2에 3점 굽힘 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

시험편의 밀도는 아르키메데스(Archimedes)원리를 이용한 전용 저울을 사용하여 측정하였으며, 상대밀도 계산 시 사용된 이론밀도는 각 분말의 이론밀도에 준하여 혼합법칙(rule of mixture)으로 구하였다.

모재시험편과 SiO_2 콜로이달을 표면에 코팅한 시험편의 치유 처리는 1200°C 2시간 공기중에서 열처리하였다¹⁰⁾. 표면 코팅에 사용한 SiO_2 콜로이달은 500°C 이상에서 결정상 SiO_2 를 형성한다.

상기와 같은 시험편을 사용하여 굽힘 시험은 실온에서 크로스헤드속도 0.5 mm/min 의 속도로 3점 굽힘 장치를 사용하여 실시하였다. 이 때 스패는 30 mm 이다.

파단면은 SEM을 사용하여 관찰하였으며, 파괴인성은 IF(Indentation Fracture)법에 의하여 구하였다. IF법은 압자압입에 의해서 생긴 균열의 크기를 압흔의 크기와 함께 측정하여 K_{IC} 를 구하는 방법이다. 본 연구에서는 IF법의 기초가 되는 식이 몇 가지 있지만, 그 중에서도 재료 자체의 탄성계수를 고려할 필요 없이 파괴 인성치를 쉽게 구할 수 있는 아래 Lawn and Fuller 식¹¹⁾을 사용하였다.

$$K_{IC} = x(Pv/c^{3/2}) \quad (2.1)$$

여기서 $x = 1/(\pi^{3/2}\tan\Psi)$, $\Psi = 68^\circ$ 이다. 그리고 Pv 는 비커스하중, c 는 Median Crack의 반경이다. 모재의 비커스경도는 비커스 경도기를 사용하여 측정하였다.



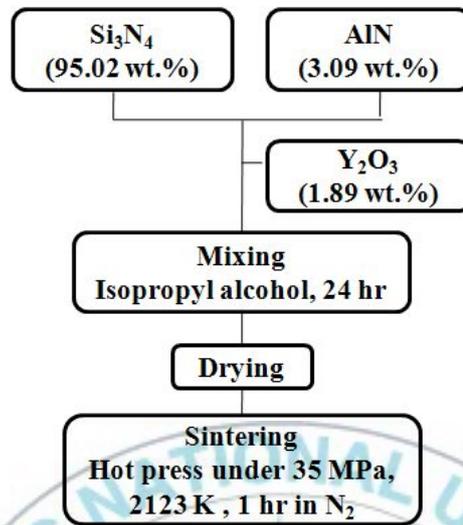


Fig. 2.1 Sintering flow chart

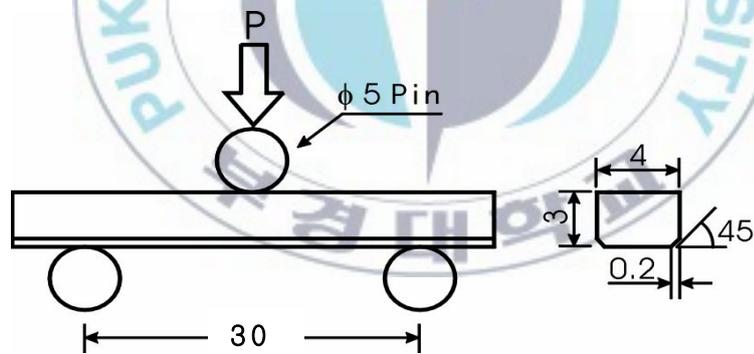


Fig. 2.2 Specimen shape and load system (unit: mm)

2.3 졸겔법에 의한 졸겔 무기바인더

SiO₂ 콜로이드 제조 시 바인더의 적절한 선택은 코팅 막의 물리적, 화학적, 기계적 특성에 영향을 주고 나노 금속 기능성의 신뢰성에 영향을 준다. 유/무기 하이브리드 바인더는 변형된 졸-겔법을 이용하여 제조할 수 있었다. 졸-겔(Sol-Gel)법은 금속의 유기 및 무기화합물의 용액에서 출발하여 용액 중에서의 화합물의 가수분해와 중합에 의해 용액을 금속산화물 또는 수산화물의 미립자가 용해된 졸로, 더욱이 반응을 진행시키면 겔화한다.

유/무기 하이브리드 바인더 제조 과정은 미립자의 응집체인 침전을 전해질 등을 넣어 분산시키는 방법과 분자 또는 이온을 적당한 크기의 입자까지 성장시키는 방법이 알려져 있지만, 금속 알콕사이드(alkoxide)의 가수분해에 의해서도 졸을 만들 수 있다.

금속 알콕사이드를 Me(OR)_n으로 나타내면, 이 화합물은 식(2.2)의 반응과 같이 가수분해하여 Me(OH)_n를 생성한다. 그리고 이것은 식(2.3)과 같은 반응을 일으킨다.



여기서, Me는 Si, Ti, Na, Ba 등의 금속, R은 CH₃, C₂H₅, C₃H₇ 등의 알킬기, n은 금속의 산화수이다.



Me(OH)_n이 식 (2.3)에 의해 중축합하여, 용액중에 -Me-O-Me-O-의 결합이 형성된 골격을 가지는 산화물 미립자가 생성된다. Fig. 2.3에 하이브리드 바인더 제조공정의 일반적인 개념도를 나타낸다.

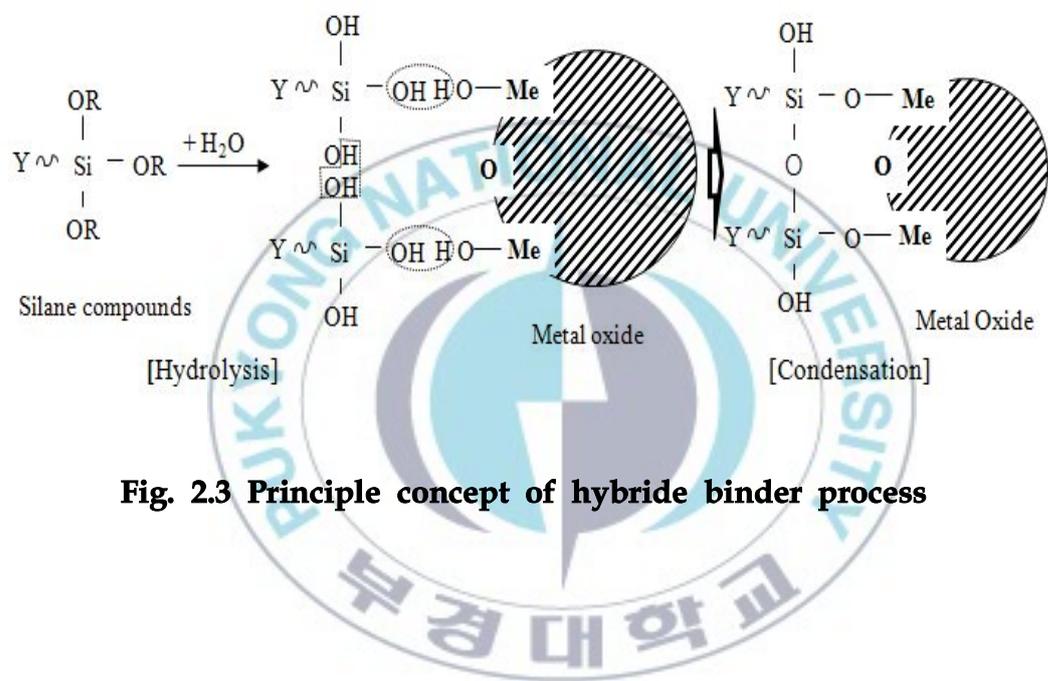


Fig. 2.3 Principle concept of hybride binder process

2.4 결과 및 고찰

2.4.1 모재 파괴인성(Fracture Toughness)

파괴인성은 충격 시험에서처럼 충격 하중의 영향을 받았을 때 균열전파에 저항하는 재료의 능력을 말한다. 실은 파괴인성은 소결한 사이알론 시험편을 사용하여 10곳을 측정하여 식 (2.1)에 의하여 구하였다. 얻어진 결과를 Fig. 2.4에 나타낸다. 파괴인성은 사이알론 세라믹스의 소결상태에 따라서 최저 6.2에서 7.6 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 까지 분산이 있었으며, 평균은 약 $7.05 \text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 이었다.

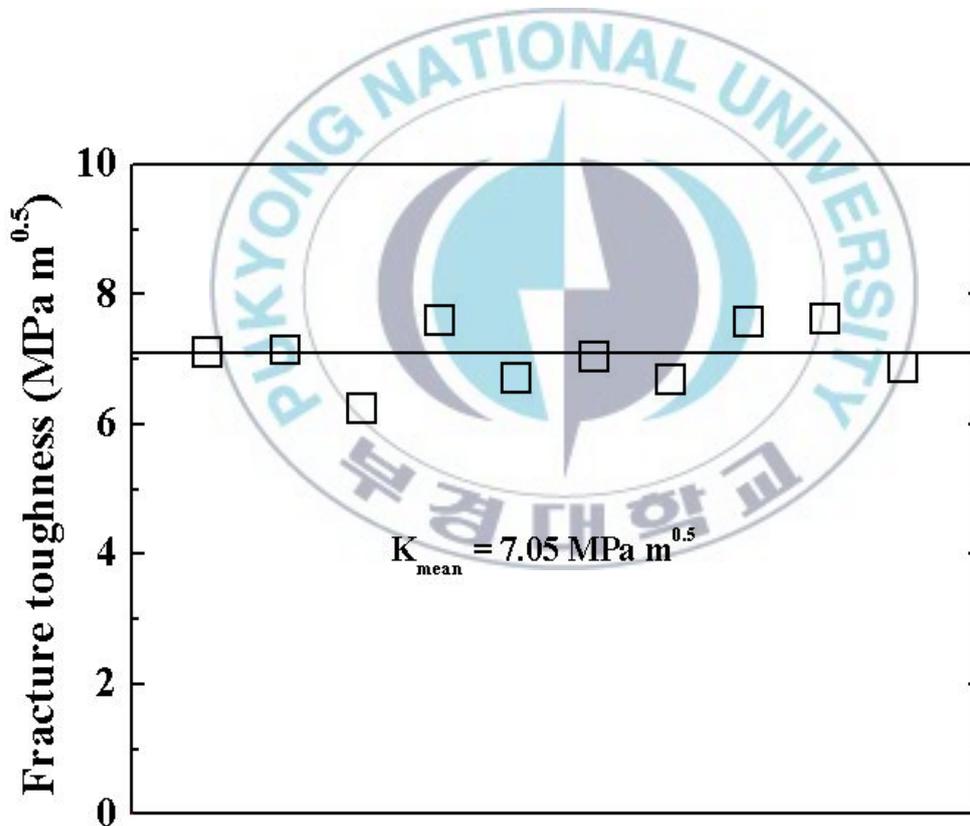


Fig. 2.4 Fracture toughness of smooth specimen

2.4.2 모재 경도와 밀도

소결한 사이알론의 경도는 $P= 24.5 \text{ N}$ 의 하중으로 비커스경도기를 사용하여 10곳을 측정하여 Fig. 2.5에 나타내었다. 비커스경도의 평균은 $H_v = 1580$ 이었다. 사이알론의 밀도는 모재시험편(14개), 모재치유시험편(7개), SiO_2 콜로이달을 시험편 표면에 코팅한 모재치유시험편(8개)를 측정하여 각각 Fig. 2.6, 2.7 및 2.8에 나타내었다. 3종류의 평균밀도는 각각 $3.21, 3.21, 3.20 \text{ g/cm}^3$ 로서 비슷하였으며, 이론밀도 3.23 g/cm^3 의 99 % 이상을 얻었다.



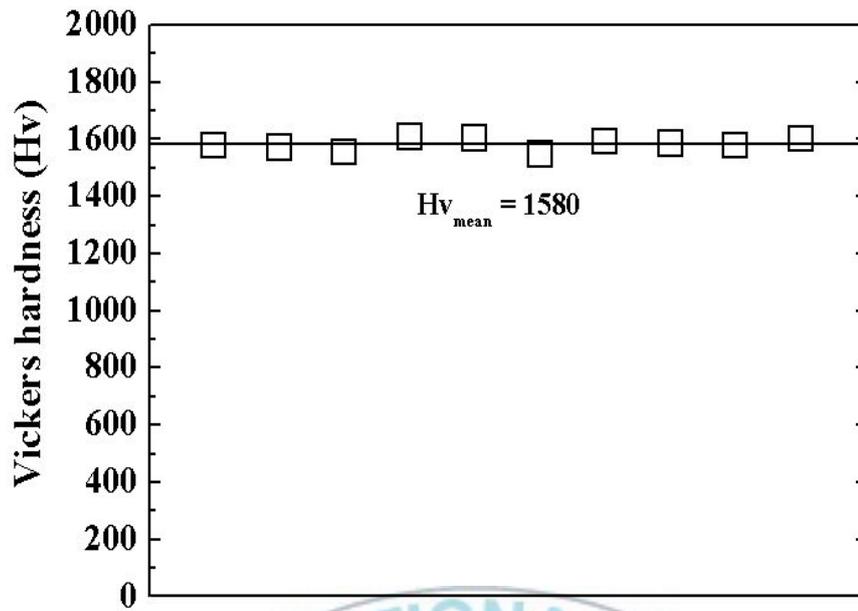


Fig. 2.5 Vickers hardness of smooth specimen

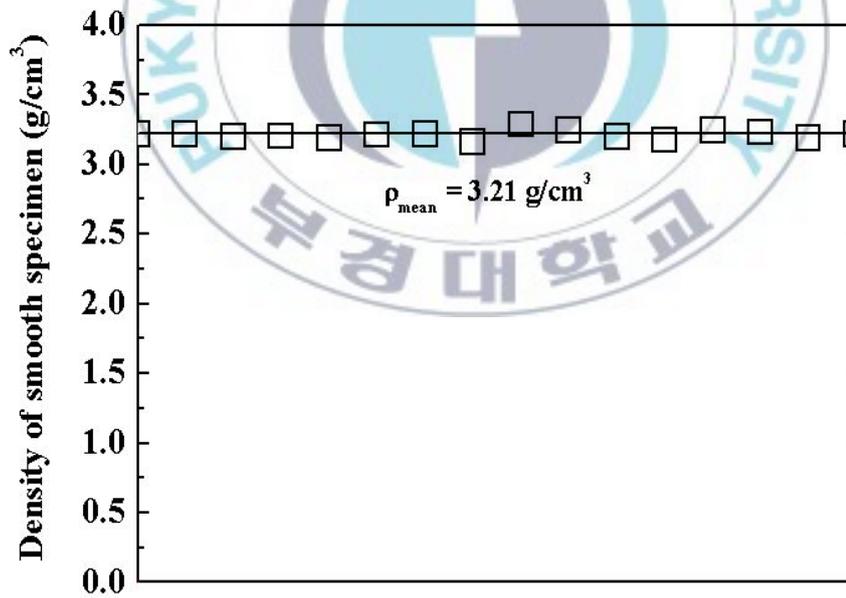


Fig. 2.6 Density of smooth specimen

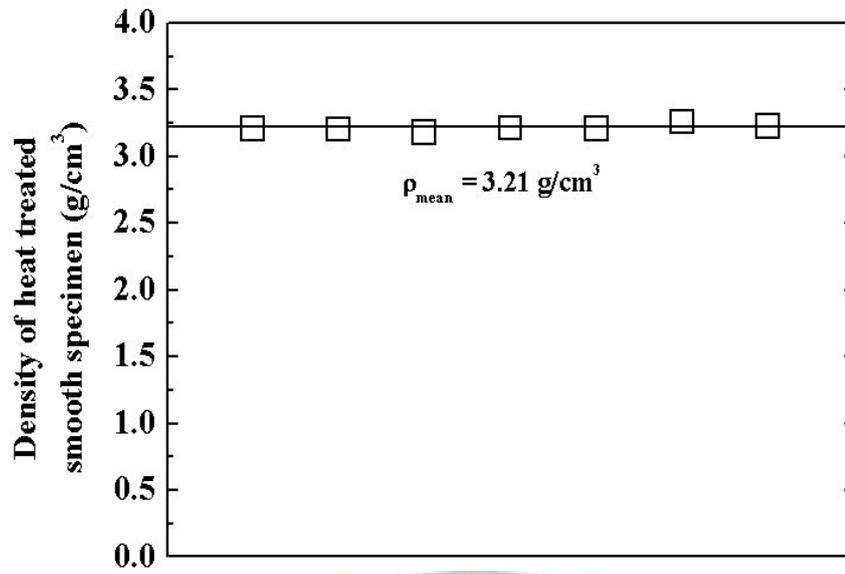


Fig. 2.7 Density of heat treated smooth specimen

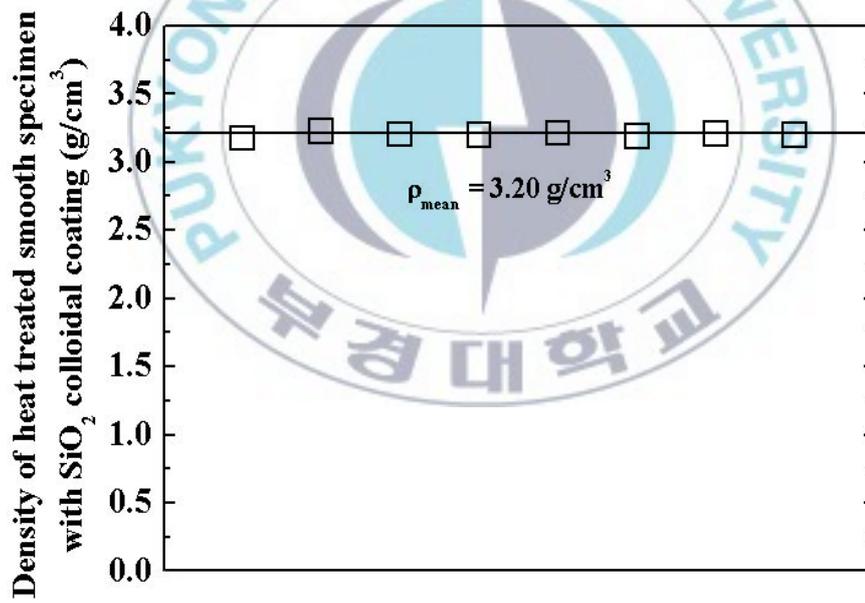


Fig. 2.8 Density of heat treated smooth specimen with SiO_2 colloidal coating

2.4.3 모재의 굽힘강도

실온에서 굽힘강도에 대한 모재 시험편의 열처리 온도 영향을 Fig. 2.9에 나타내었다. 그림에서 □은 모재시험편, △은 모재 열처리 시험편, ◁은 SiO₂ 콜로이달을 시험편 표면에 코팅한 모재치유시험편을 각각 나타낸다.

모재시험편(□)의 평균 굽힘강도는 974 MPa이지만, 시험편 가공 시에 형성된 표면의 미세균열을 치유하기 위하여 다양한 온도에서 열처리하였다. 열처리 1시간에서 열처리 온도를 1300 °C, 1400 °C, 1500 °C로 변화시킨 결과, 각각 1003 MPa, 1040.8 MPa, 738 MPa를 나타내었다. 이 온도 범위에서 모재 시험편은 1400 °C에서 최적의 강도를 나타내었다. 그러나 열처리를 위하여 온도를 상승시킬 때, 고온까지 상승에는 많은 시간이 소요되며 에너지 손실이 크므로, 이보다 낮은 온도에서 장시간 열처리를 실시한 것의 강도가 비슷하게 나타나면 경제적인 이득이 될 것이다. 따라서 1200 °C에서 열처리를 실시하여 비교하였다. 그 결과 2시간과 3시간 열처리한 평균 굽힘강도는 각각 1160 MPa 및 1191 MPa로서 3시간이 약간 높은 것을 알 수 있었다. 이들 강도는 모재의 굽힘 강도보다 119 % 및 122 %를 나타내었으며, 둘 다 1 GPa 이상의 강도를 나타내고 있어, 고강도 사이알론을 개발하였다. 그러나 강도의 분산 및 경제적인 측면을 고려하여 1 GPa 이상의 굽힘강도를 얻을 수 있는 사이알론의 최적의 열처리 조건은 1200 °C, 2시간이 이라 판단된다.

Si₃N₄ 또는 SiC 세라믹스의 가공 시에 형성된 표면 균열 치유 시 형성된 균열 치유 물질은 SiO₂ 결정상이라는 연구결과^{12,13,14})에 의하여 졸겔법에 의한 제조된 졸겔 무기바인더 SiO₂ 콜로이달을 표면 코팅하여 1200 °C, 2시간 열처리한 영향을 ◁기호로 나타내었다. SiO₂ 콜로이달을 표면 코팅한 모재의 평균 굽힘 강도는 1109 MPa로서 1 GPa 이상의 강도를 나타내었으나, SiO₂ 콜로이달을 표면 코팅하지 않은 것과 유사한 강도를 나타내어, SiO₂ 콜로이달을 표면 코팅에 의한 효과는 거의 없는 것으로 판단하였다.

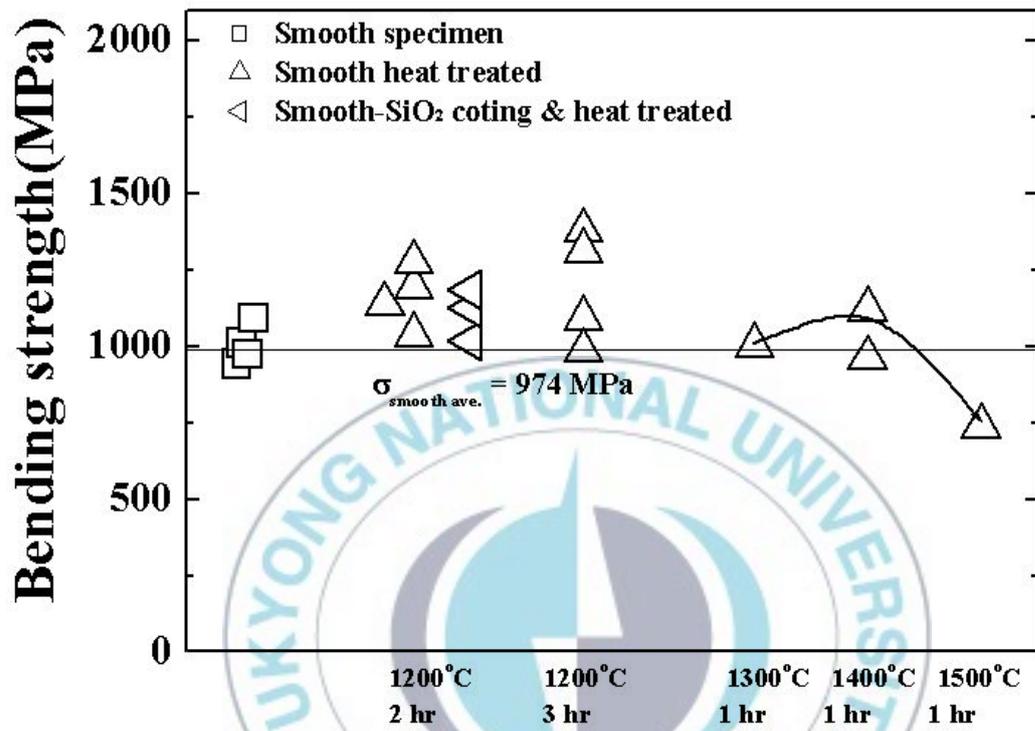


Fig. 2.9 Bending strength of smooth specimen with heat treatment at variance temperature

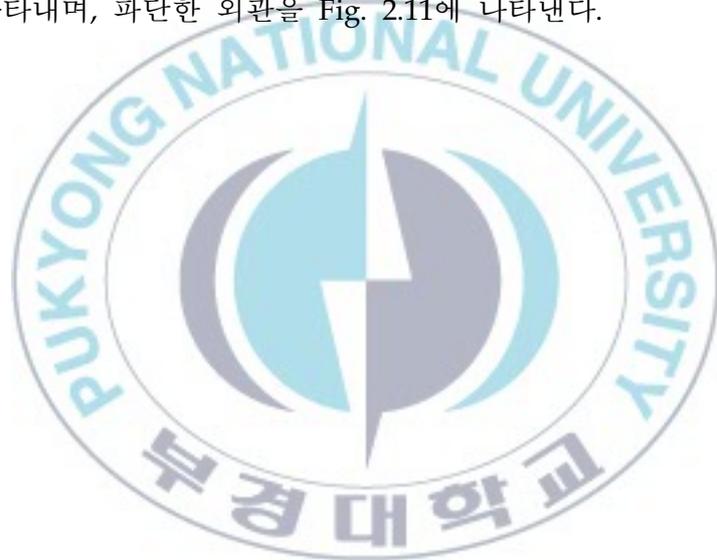
2.4.4 열처리 균열재의 굽힘강도

□은 모재시험편, ○는 균열재 시험편, ● 균열 열처리 시험편, ●는 SiO₂ 콜로이드를 균열재 시험편 표면에 코팅한 균열 치유시험편을 각각 나타낸다. 균열 치유 처리는 시험편 가공 시에 발생할 수 있는 미세균열 또는 사용 시 발생할 수 있는 균열을 치유하기 위하여 실시하였다. 이 때 표면균열은 시험편의 중앙에 $P = 24.5 \text{ N}$ 의 하중으로 균열길이 $2a \approx 100 \mu\text{m}$ 를 가공하였다.

모재 굽힘 시험과 같이 다양한 열처리 온도에서 균열 치유한 시험편을 사용하여 굽힘 시험한 결과를 Fig. 2.10에 나타내었다. 모재시험편(□)의 평균 굽힘강도는 974 MPa이지만, 균열 시험편은 499 MPa로서 모재 시험편의 약 51 % 강도를 나타내었다. 그러나 적당한 온도 및 시간에서 열처리한 균열 시험편은 강도가 회복된 것을 알 수 있다. 즉, 균열 시험편은 열처리 1시간에서 열처리 온도를 1300 °C, 1400 °C, 1500 °C로 변화시킨 결과, 각각 830 MPa, 1014 MPa, 744 MPa를 나타내었다. 이 온도 범위에서 균열시험편은 1400 °C에서 최적의 강도를 나타내며, 모재보다 높은 1 GPa 이상의 강도를 얻었다. 그러나 균열재 열처리를 위하여 온도를 상승시킬 때, 고온까지 상승에는 많은 시간이 소요되며 에너지 손실이 크므로, 이보다 낮은 온도에서 장시간 열처리를 실시한 것의 강도가 비슷하게 나타나면 경제적인 이득이 될 것이다. 따라서 1200 °C에서 균열시험편의 열처리를 실시하여 비교하였다. 그 결과 2시간과 3시간 열처리한 평균 굽힘강도는 각각 957 MPa 및 1028 MPa로서 3시간이 약 71 MPa 높은 것을 알 수 있었다. 이들 강도는 모재의 굽힘 강도에 비하여 98 % 및 106 %를 나타내었으며, 모재 굽힘강도와 비슷하거나 1 GPa 이상의 강도를 나타내었다. 1200 °C, 2시간 열처리한 균열시험편에서도 1002 MPa를 나타낸 것도 있어, 균열길이 $2a \approx 100 \mu\text{m}$ 까지의 균열 시험편은 열처리에 의하여 1 GPa까지의 강도를 회복시킬 수 있는 것으로 판단된다. 그러나 강도의 분산 및 경제적인 측면을 고려하여 1 GPa 이상의 굽힘강도를 얻을 수 있는 균열시

험편의 최적의 열처리 조건은 1200 °C, 3시간이 이라 판단된다.

Si₃N₄ 또는 SiC 세라믹스의 가공 시에 형성된 표면 균열 치유 시 형성된 균열 치유 물질은 SiO₂ 결정상이라는 연구결과^{12,13,14})에 의하여 졸겔법에 의한 제조된 졸겔 무기바인더 SiO₂ 콜로이드를 표면 코팅하여 1200 °C, 2시간 열처리한 영향을 ●기호로 나타내었다. SiO₂ 콜로이드를 표면 코팅한 균열시험편의 평균 굽힘 강도는 972 MPa로서 모재 시험편의 굽힘강도 974 MPa과 비슷하게 나타났다. 그러나 SiO₂ 콜로이드를 균열부에 코팅하지 않은 시험편의 굽힘강도 957 MPa보다는 약간 높게 나타났으나, 분산을 고려하면 유사한 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 SiO₂ 콜로이드의 균열부 표면 코팅에 의한 효과는 거의 없는 것으로 판단하였다. 그림에서 *는 균열치유부 이외에서 파단된 시험편을 나타내며, 파단한 외관을 Fig. 2.11에 나타낸다.



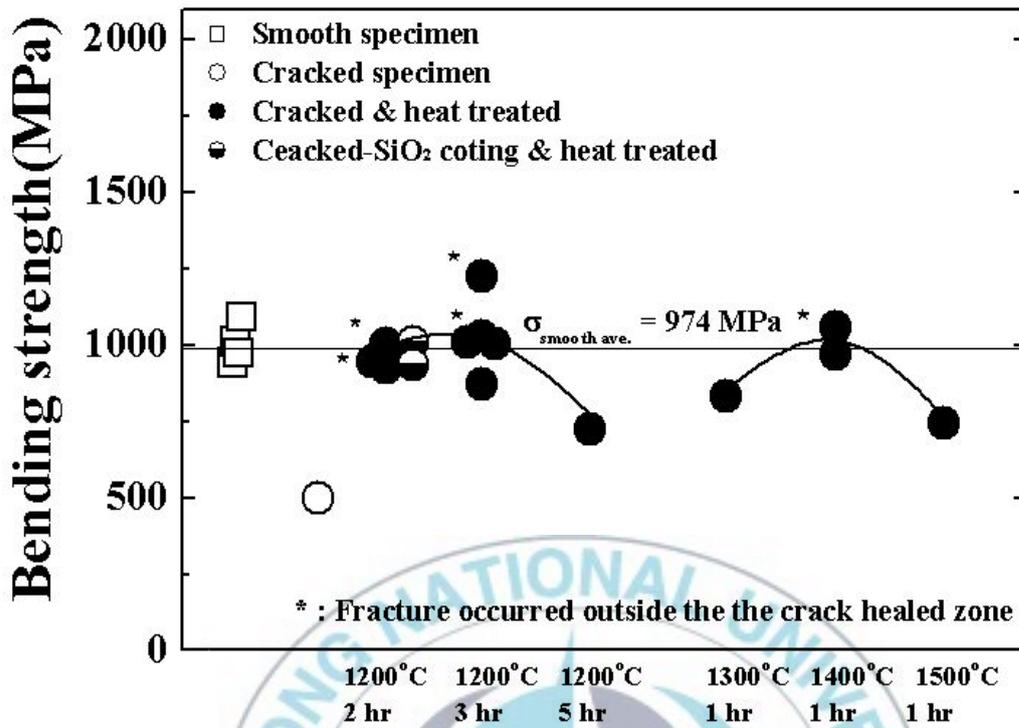


Fig. 2.10 Bending strength of cracked specimen with heat treatment at variance temperature

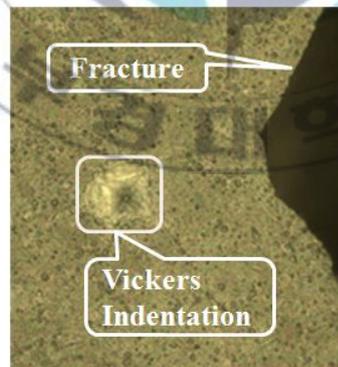
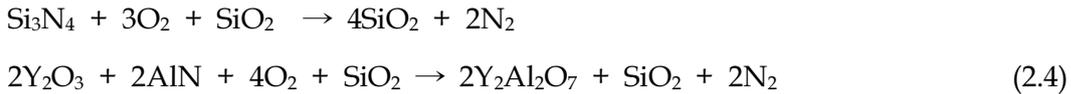


Fig. 2.11 Fracture pattern : fracture initiated from outside the crack-healed zone

2.4.5 모재 및 열처리 시험편의 Morphology

저자들은 Si_3N_4 복합 세라믹스의 균열치유 반응을 유도하였으며^{12,13}, AlN 이 함유된 사이알론 세라믹스의 균열치유 반응은 아래와 같다.



여기서 $\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 은 결정상이다. SiO_2 는 유리상과 결정상의 2가지 상태가 있으며, 결정상 SiO_2 양은 균열치유 온도에 의존한다. 따라서 Si를 함유하는 세라믹스는 유리상 SiO_2 가 강도회복에 기여한다. 그러나 높은 온도에서 균열을 치유하면 유리상 SiO_2 가 기화하여 큰 결함이 형성된다¹⁵.

Fig. 2.12는 모재시험편의 표면SEM사진이다. 이 때 사용한 에칭용액은 NaOH 10% 용융염이다. 이 그림에서 모재시험편의 외관은 막대모양의 긴 결정이 성장하여 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.9에서 모재치유시험편은 모재시험편보다 강도가 높게 나타났다. 이러한 원인을 규명하기 위하여 2종류 시험편의 파단면을 비교하기 위하여 Fig. 2.13에 나타내었다. (a)는 모재시험편, (b)는 모재치유시험편을 나타낸다. 그러나 (a)와 (b) 파단면은 소결에 의하여 긴 막대모양의 결정이 성장하여 있다. 파단외관은 결정의 수직 파괴 또는 뿔힘 현상이 나타나 있다. 뿔힘 현상은 모재시험편에서 약간 많이 나타나 있었으나, 전체적으로 파단형상은 비슷한 경향을 나타내었다. 그러나 모재치유시험편의 강도가 높게 나타난 이유는 가공 중에 발생한 미세한 표면 균열 등이 열처리함으로서 식(2.4)와 같이 형성된 유리상 SiO_2 에 의하여 치유된 것이 원인이라 판단된다.

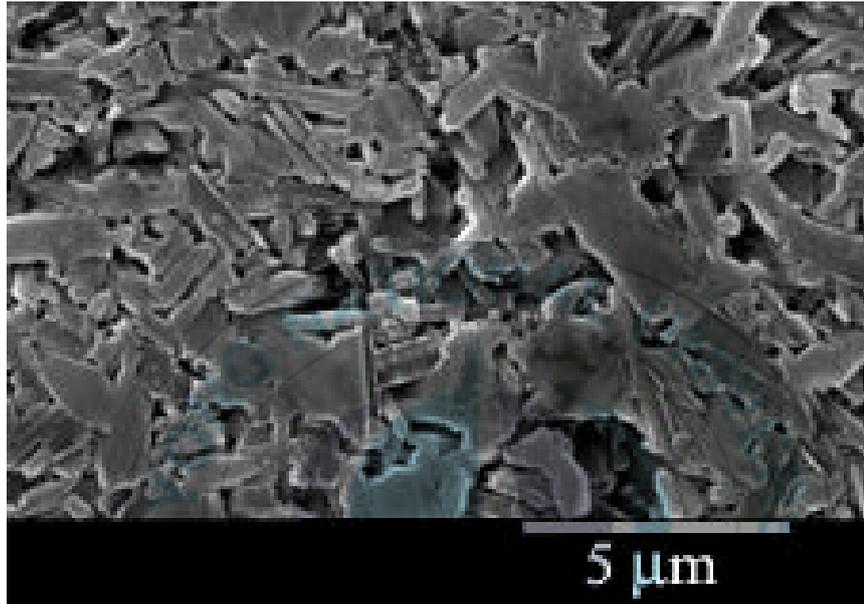
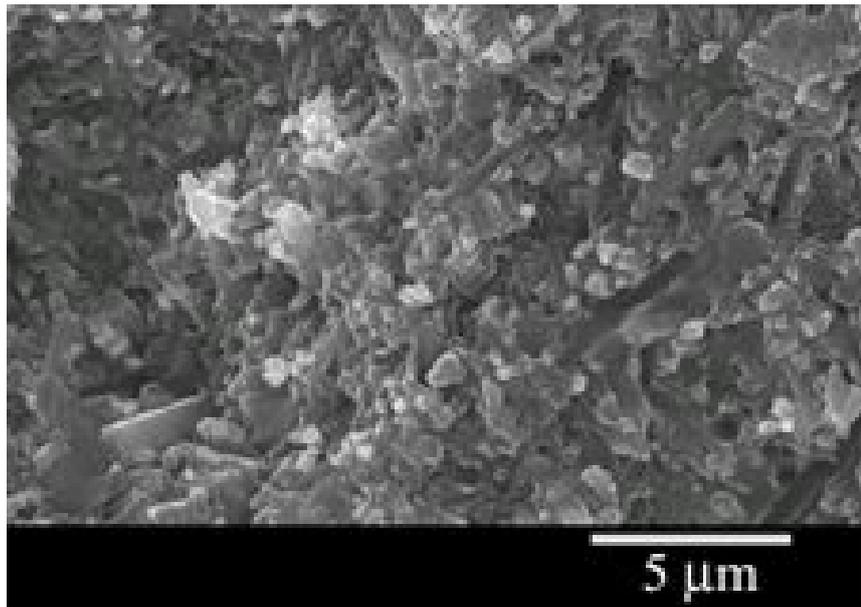
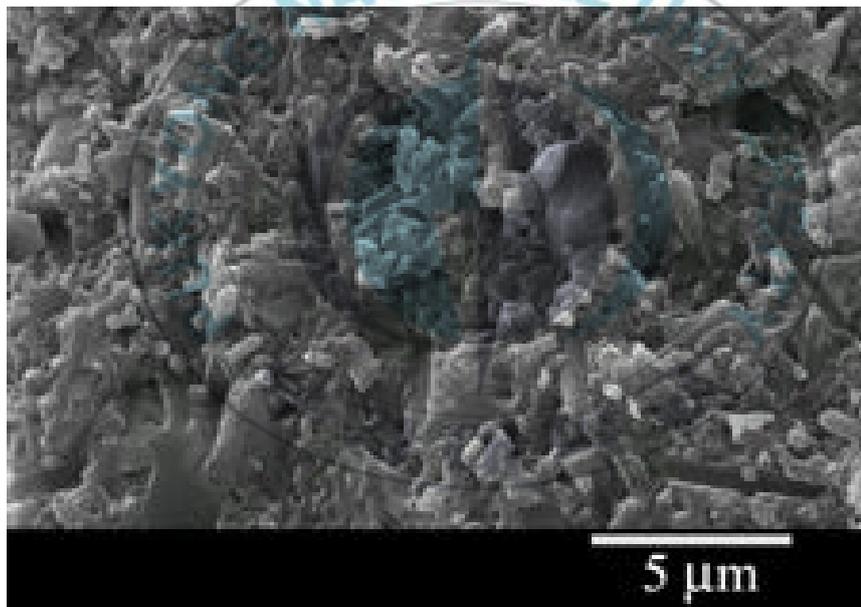


Fig. 2.12 SEM micrographs of surface of smooth specimen



(a)



(b)

Fig. 2.13 SEM micrographs of fracture surface.

(a) smooth specimen,

(b) healed smooth specimen

열처리에 의하여 형성된 시험편 표면의 산화물은 EPMA를 사용하여 조사하였다. Table 2.1은 모재시험편, 모재치유시험편 및 SiO₂ 콜로이달 코팅 모재치유시험편의 표면성분(wt.%)이다. 열처리 치유는 1200 °C, 2시간 공기 중에서 실시하였다. 시험편 표면은 Si, Y, Al 및 O가 검출되어, 식(4)의 Y₂Al₂O₇ 및 SiO₂의 결정상이 형성되어 강도 회복에 기여하였음을 알 수 있다. 모재치유시험편 및 SiO₂ 콜로이달 코팅 모재치유시험편의 성분 분포는 거의 비슷한 양상을 보이고 있어 강도와 좋은 일치를 나타낸다.

Table 2.1 Oxidation of surface by EPMA (wt.%)

Specimen	Si	Y	Al	O
Smooth	93.30	4.68	2.02	-
Smooth & healed	48.98	18.90	2.52	29.64
Smooth with SiO ₂ colloidal coating & healed	56.70	11.20	2.00	30.10

균열 치유 물질을 조사하기 위하여, 시험편 표면의 Si, O 및 N의 EPMA에 의한 기본 사상 이미지를 Fig. 2.14에 나타낸다. Fig. 2.14(a)는 모재시험편, Fig. 2.14(b)는 모재치유시험편 및 Fig. 2.14(c)는 SiO₂ 콜로이달 코팅 모재치유시험편을 나타낸다. 그림에서 Si는 (b)에서 (a)와 (c)보다 증가한 것으로 나타났고, (b)와 (c)의 O는 (a)보다 상당히 증가한 이미지를 나타낸다. 그리고 (b)와 (c)의 N은 모재보다 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 식(4)와 일치한다.

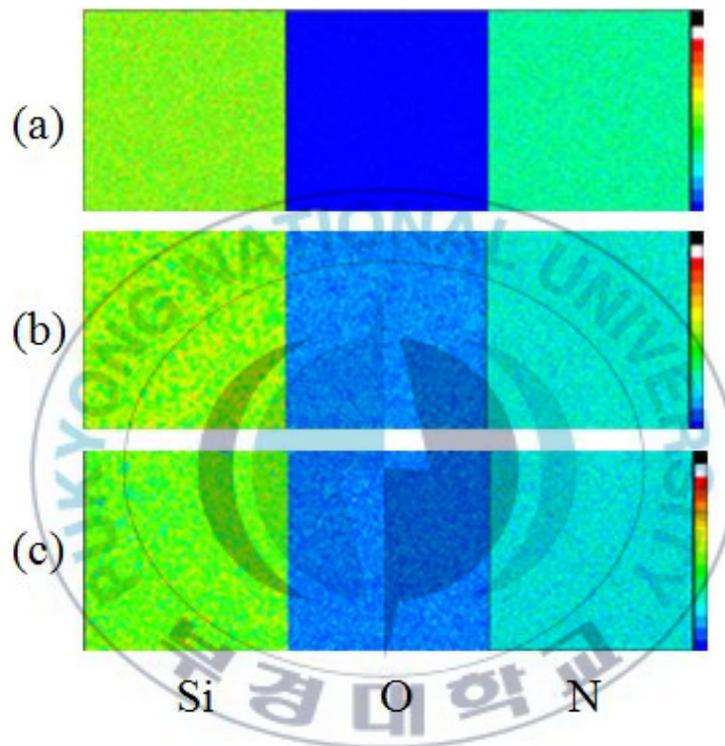


Fig. 2.14 Elemental mapping by EPMA.

(a) smooth specimen,

(b) smooth and heated at 1200 °C, 2hr in air,

(c) smooth with SiO₂ colloidal coating and heated 1200 °C, 2hr in air

2.5 요약

본 연구에서는 Si_3N_4 와 AlN 에 소결보조제 Y_2O_3 를 첨가하여 사이알론을 소결하고, 소결체를 열처리함으로써 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 모재의 파괴인성 및 경도는 각각 평균 $7.05 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$, $H_v = 1580$ 이었다. 그리고 밀도는 모재시험편, 모재치유시험편, SiO_2 콜로이달 코팅 모재치유시험편에서 각각 3.21 , 3.21 , 3.20 g/cm^3 로서 비슷하였으며, 이론밀도 3.23 g/cm^3 의 99 % 이상을 얻었다.
2. 굽힘강도는 모재시험편 974 MPa , $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 2시간과 3시간 모재치유시험편은 각각 1160 MPa 과 1191 MPa , SiO_2 콜로이달 코팅 모재치유시험편 1109 MPa 을 얻어, 1 GPa 이상의 고강도 사이알론 세라믹스를 개발하였다.
3. 시험편 가공 또는 사용 시에 발생할 수 있는 균열을 치유하여 강도를 회복한 균열 치유 시험편은 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, 2시간과 3시간에서 각각 957 MPa 과 1028 MPa 을 나타내어 모재 굽힘강도와 비슷하거나 1 GPa 이상의 강도를 나타내었다. 그리고 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 2시간에서 SiO_2 콜로이달 코팅 균열치유시험편은 972 MPa 을 나타내어 모재시험편의 강도만큼 회복하였다.
4. 사이알론 세라믹스의 균열치유는 SiO_2 유리상과 $\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 결정상이 강도회복에 기여하였다.
5. EPMA에 의한 분석에서 균열 치유 물질은 Si는 모재치유시험편에서 증가하였고, O는 2종류의 치유시험편에서 상당히 증가하였다. 그러나 N은 2종류의 치유시험편에서 모재보다 감소하였다.

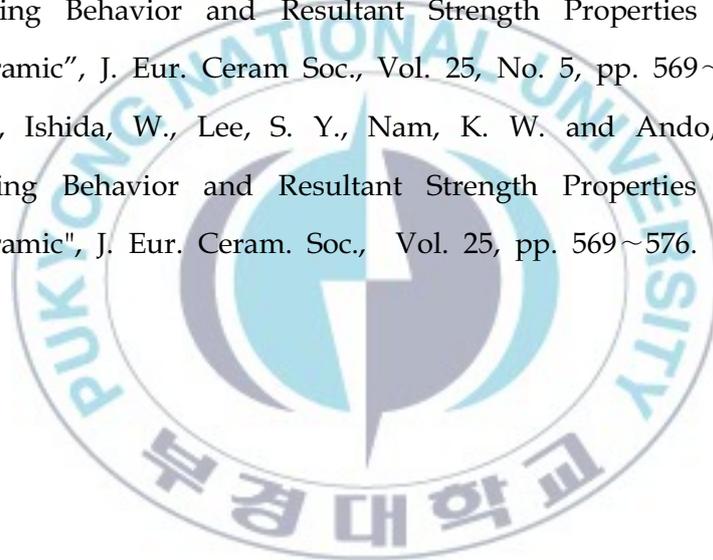
6. 제2장에서 합성한 사이알론 조성으로 1 GPa 이상의 고강도 사이알론을 개발하여, 베어링용 세라믹스로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.



2.6 참고 문헌

1. For example, H. Sakano and K. Asano, 1987, "Ceramics for automobile", Sankaido, pp. 180.
2. K. Kijima and S. Shirasaki, 1976, "Nitrogen self-diffusion in silicon nitride", Journal of Chemical Physics, Vol. 65, pp. 2668-2671.
3. F. F. Lange, 1980, "Silicon Nitride Systems: Fabrication Microstructure, and Properties", Int. Metals Rev. Vol. 247, No. 1, pp. 1 - 20.
4. F. F. Lange, 1983, "Fabrication and Properties of Dense Polyphase Silicon Nitride," Bull. Am. Ceram. Soc., Vol. 62, No. 12, pp. 1369-74.
5. K. W. Nam, M. K. Kim, S. W. Park, S. H. Ahn and J. S. Kim, 2007, "Crack Healing Behavior and Bending Strength of Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by SiO₂ Colloidal", Mater. Sci. and Engng. A, Vol. 471, pp. 102 ~105.
6. K. H. Jack, 1976, "Sialons and Related Nitrogen Ceramics", J. Mater. Sci., Vol. 11, pp. 1135-58.
7. K. H. Jack and W. I. Wilson, 1972, "Ceramics based on Silicon Nitride", Nature Physical Science, Vol. 238, No. 28, pp. 128-129.
8. K. W. Nam, S. J. Moon, S. W. Park, S. H. Ahn and J. S. Kim, 2007, "Characteristics of Sialon by Additive Al₂O₃ and Y₂O₃", Proceeding of The KSPSE 2007 Fall Annual Meeting, pp. 262 ~267.
9. K. W. Nam, S. W. Park, S. H. Ahn, 2008, "Crack-healing behavior and strength properties of SiC ceramics according to additives SiO₂", Proceeding of Korea Ocean Science Technique Council 2007 Joint Meeting, pp. 2430.
10. S. Wada and Y. Ukyo, 1989, "Euro-Ceramics", Vol. 1, pp. 566 ~571.

11. B. R. Lawn and E. R. Fuller, 1975, "Equilibrium Penny-Like Cracks in Indentation on Fracture", J. Mater. Sci., Vol. 10, pp. 2016~24.
12. M. K. Kim, S. B. Kang, S. H. Ahn and K. W. Nam. 2007, "Strength and Surface Morphology of Si₃N₄ Composite Ceramics Coated with SiO₂ Gel", Solid State Phenomena, Vols. 124-126, pp. 719~722.
13. M. K. Kim, S. W. Park, C. S. Son, S. H. Ahn and K. W. Nam, (2006), "Crack Healing and Bending strength of Si₃N₄/SiC Composite Ceramics by Additive Powder TiO₂", Proceeding of The KSME 2006 Fall Annual Meeting, pp. 149~152.
14. S. K. Lee, W. Ishida, S. Y. Lee, K. W. Nam and K. Ando, 2005, "Crack-Healing Behavior and Resultant Strength Properties of Silicon Carbide Ceramic", J. Eur. Ceram Soc., Vol. 25, No. 5, pp. 569~576.
15. Lee, S. K., Ishida, W., Lee, S. Y., Nam, K. W. and Ando, K.. 2005, "Crack-Healing Behavior and Resultant Strength Properties of Silicon Carbide Ceramic", J. Eur. Ceram. Soc., Vol. 25, pp. 569~576.



제 3 장 결론

본 연구에서 합성한 사이알론 소결체의 특성을 평가 한 결과, 수입하고 있는 소재의 상온 강도와 비슷한 1 GPa 정도의 고강도 사이알론을 얻을 수 있었다. 이에 따른 경제적인 효과는 수입 대체 효과를 가져 올 수 있고, 국내 사이알론 소결 기술의 발전, 기간산업의 발전 및 안정적인 사이알론 세라믹스 베어링을 공급할 수 있을 것이라고 판단된다. 그리고 철강 산업뿐만 아니라 인체에 영향을 미칠 수 있는 식품 산업의 기계 구조물에도 사용할 수 있어서 국민 건강 증진에도 기여할 수 있다고 판단되어 평가할 수 없을 정도의 막대한 경제적 이득을 초래할 수 있다고 판단된다. 그러나 일반적으로 세라믹스는 고온에서 사용하므로 사용조건과 비슷한 고온 강도 특성을 평가하는 것이 필요하다.

