

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.9.957

## 고강도 사이알론의 균열치유와 고온강도 특성

남기우<sup>†</sup> · 박상현\* · 박승원\* · 문석재\*

(2009년 6월 19일 접수, 2009년 7월 17일 수정, 2009년 7월 17일 심사완료)

### Characteristics of Crack Healing and High Temperature Strength of High Strength Sialon

Ki Woo Nam, Sang Hyun Park, Seung Won Park and Suk Jae Moon

**Key Words:** Sialon(사이알론), High Strength(고강도), Crack Healing(균열치유), Strength Recovery(강도회복), SiO<sub>2</sub> Colloidal(SiO<sub>2</sub> 콜로이드), High Temperature Strength(고온강도)

#### Abstract

Sialon was produced by hot-pressing the mixtures of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, AlN and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders. All fracture tests were performed on a three-point loading system with a 30 mm bending span. Fracture toughness and Vickers hardness of smooth specimen were average 7.05 MPa · m<sup>0.5</sup> and Hv = 1580, respectively. Density of three kinds of specimens, smooth specimen, smooth and healed specimen, smooth with SiO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> colloidal coating on cracked part recovered strength by heat treatment, completely. Crack healing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite ceramics had contributed glassy SiO<sub>2</sub> to strength recovery. Limiting high temperature for bending strength of heat treated smooth specimen for bending strength was about 1273 K.

#### 1. 서론

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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 있다.<sup>(1)</sup> 그러나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 자체는 공유결합성이 매우 강하고, 자기 확산계수가 매우 작기 때문에<sup>(2)</sup> 자체만으로 소결 할 수 없다. 그 때문에 치밀한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 소결체를 얻기 위해서 통상 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO 또는 TiO<sub>2</sub> 등을 소결보조제로 사용한다.<sup>(3~5)</sup> 이들 소결보조제는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말

표면에 존재하는 SiO<sub>2</sub>와 반응하여 액상을 생성하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 α→β 변태 및 소결을 촉진하고, 소결후는 입계에 유리상으로 남는다. 그 때문에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 소결체의 고온 특성, 즉, 고온강도, 크립특성, 내산화성 등은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정체 자체의 성질보다도 유리상의 화학조성, 양에 크게 의존한다.<sup>(6)</sup> 이와 같이 소결보조제는 치밀한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 소결체를 얻기 위하여 필요한 것이지만, 고온특성을 열화시키는 문제가 있다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 소결보조제로서 여러 가지 산화물이 검토되고 있지만, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>에 Al이나 O를 고용하여 고용체를 만드는 것이 제안되어,<sup>(7)</sup> 사이알론이라 불렸다. 이들은 뛰어난 특성을 가지고 있어, 오늘날 절삭공구 등에 응용되고 있다. 또한 최근 SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 사용하여 가공중에 생성된 균열을 치유하는 방법<sup>(8,9)</sup>이 제안되어 가공단가의 저감 및 고온강도 향상에 기여하고 있다.

본 연구에서는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 AlN에 소결보조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 부산지부 춘계학술대회(2009. 5. 8., 동명대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 부경대학교 신소재공학부

E-mail : namkw@pknu.ac.kr

TEL : (051)629-6358 FAX : (051)629-6353

\* 부경대학교 대학원

를 첨가하여 사이알론을 소결하고, 소결체를 열처리함으로써 고강도 사이알론을 얻었다. 특히 열처리한 균열재의 강도, 균열치유물질의 규명 및 열처리된 모재의 고온압축강도를 평가하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

본 연구개발에 사용한 분말은 0.2 μm Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 1.2 μm AlN 및 0.27 μm인 소결보조제 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>이다. 분말의 조성비(wt.%)는 95.02 : 3.09 : 1.89이고, 분말은 전용 용기에 이소프로판올과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>볼(φ5)을 사용하여 24시간 동안 혼합하였다. 혼합한 슬러리는 363 K의 로에서 24시간 건조시켜 소결전에 분쇄하여 100 μm망으로 걸러서 사용하였다. 소결은 40 \* 40 mm 탄소몰드를 사용하여 질소분위기에서 35 MPa의 압력으로 2123 K에서 1시간 동안 실시하였다. Fig. 1은 소결 흐름도를 나타낸다. 소결체는 3.0 × 4.0 × 40 mm의 크기의 시험편으로 가공하여 경면연마 한 후, 모따기를 하였다. Fig. 2에 3점굽힘 시험편의 형상과 치수를 나타낸다.

모재시험편과 SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 표면에 코팅한 시험편의 치유 처리는 1473 K, 2시간 공기중에서 열처리하였다.<sup>(10)</sup> 표면 코팅에 사용한 SiO<sub>2</sub> 콜로이드는 773 K 이상에서 결정상 SiO<sub>2</sub>를 형성한다.

상기와 같은 시험편을 사용하여 굽힘 시험은 실온 및 고온에서 크로스헤드속도 0.5 mm/min의 속도로 3점 굽힘 장치를 사용하여 실시하였다. 이 때 스패는 30 mm이었다.

파단면은 SEM을 사용하여 관찰하였으며, 파괴인성(K<sub>IC</sub>)은 IF(Indentation Fracture)법에 의하여 구하였다. IF법은 압자압입에 의해서 생긴 균열의 크기를 압흔의 크기와 함께 측정하여 K<sub>IC</sub>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 식 (1)을 사용하였다.<sup>(11)</sup>

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

여기서  $x = 1/(\pi 3/2 \tan \Psi)$ ,  $\Psi = 68^\circ$ 이다. 그리고 Pv는 비커스하중, c는 median crack의 반경이다. 모재의 비커스경도는 비커스 경도기를 사용하여 측정하였다.

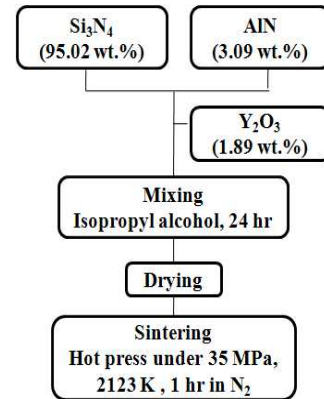


Fig. 1 Sintering flow chart

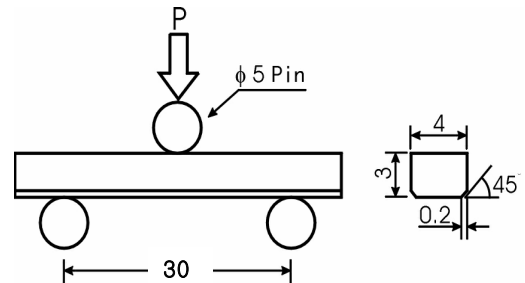


Fig. 2 Specimen shape and load system (unit; mm)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 모재의 파괴인성

파괴인성(K<sub>IC</sub>)은 충격 시험에서처럼 충격 하중의 영향을 받았을 때 균열전파에 저항하는 재료의 능력을 말한다. 실온 파괴인성은 소결한 사이알론 시험편을 사용하여 10곳을 측정하여 식 (1)에 의하여 구하였다. 파괴인성은 사이알론 세라믹스의 소결상태에 따라서 최저 6.2에서 7.6 MPa · m<sup>0.5</sup>까지 분산이 있었으며, 평균은 약 7.05 MPa · m<sup>0.5</sup>이었다. 이것은 Ye 등의 결과와 비슷하다.<sup>(12)</sup>

#### 3.2 모재의 경도와 밀도

소결한 사이알론의 경도는 P = 24.5 N의 하중으로 비커스경도기를 사용하여 10곳을 측정하였다. 비커스경도의 평균은 Hv = 1580이었다. 사이알론의 밀도는 모재시험편(14개), 모재치유시험편(7개), SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 시험편 표면에 코팅한 모재치유시험편(8개)를 측정하였다. 3종류의 평균밀도는 각각 3.21, 3.21, 3.20 g/cm<sup>3</sup>로서 비슷하였으며, 이론밀도 3.23 g/cm<sup>3</sup>의 99 % 이상을 얻었다.<sup>(12)</sup>

### 3.3 모재의 상온 굽힘강도

실온에서 굽힘강도에 대한 모재 시험편의 열처리 온도 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 □은 모재시험편, △은 모재 열처리 시험편, ◁은 SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 시험편 표면에 코팅한 모재치유 시험편을 각각 나타낸다.

모재시험편(□)의 평균 굽힘강도는 974 MPa이지만, 시험편 가공 시에 형성된 표면의 미세균열을 치유하기 위하여 다양한 온도에서 열처리하였다. 열처리 1시간에서 열처리 온도를 1573 K, 1673 K, 1773 K로 변화시킨 결과, 각각 1003 MPa, 1040.8 MPa, 738 MPa를 나타내었다. 이 온도 범위에서 모재 시험편은 1673 K에서 최고강도를 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 1473 K에서 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 강도의 119 % 및 122 %를 나타내었으며, 둘 다 1 GPa 이상의 강도를 나타내고 있어, 고강도 사이알론을 얻었다. 이것은 열처리함으로써 가공시에 발생한 미세균열이 치유되었기 때문이라 생각한다. 그러나 강도의 분산 및 경제적인 측면을 고려하여 1 GPa 이상의 굽힘강도를 얻을 수 있는 사이알론의 최적의 열처리 조건은 1473 K, 2시간이라 판단된다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 또는 SiC 세라믹스의 가공시에 형성된 표면 균열 치유 시 형성된 균열 치유 물질은 SiO<sub>2</sub> 결정상이라는 연구결과<sup>(13,14)</sup>에 의하여 졸겔 법에 의한 제조된 졸겔 무기바인더 SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 표면 코팅하여 1473 K, 2시간 열처리한 영향을 ◁기호로 나타내었다. SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 표면 코팅한 모재의 평균 굽힘 강도는 1109 MPa로서 1 GPa 이상의 강도를 나타내었으나, SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 표면 코팅하지 않은 것과 유사한 강도를 나타내어, SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 표면 코팅에 의한 효과는 거의 없는 것으로 판단하였다.

### 3.4 균열치유재의 상온 굽힘강도

모재 굽힘 시험과 같이 다양한 열처리 온도에

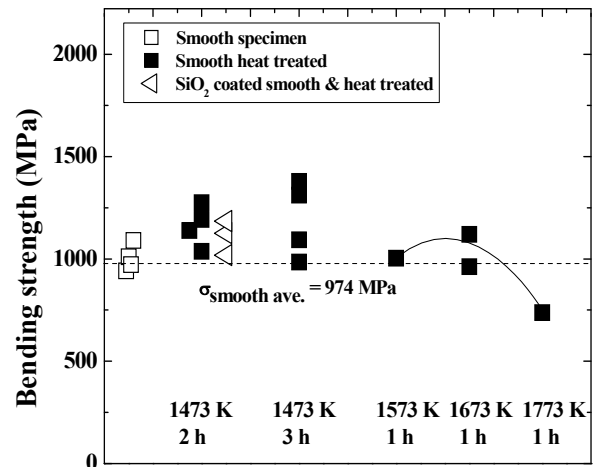


Fig. 3 Bending strength of smooth specimen with heat treatment at variance temperature

서 균열 치유한 시험편을 사용하여 굽힘 시험한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그림○에서 □은 모재시험편, ○는 균열재 시험편, ● 균열 열처리 시험편, ◐는 SiO<sub>2</sub> 콜로이드를 균열재 시험편 표면에 코팅한 균열 치유시험편을 각각 나타낸다. 균열 치유 처리는 시험편 가공시에 발생할 수 있는 미세균열 또는 사용시 발생할 수 있는 균열을 치유하기 위하여 실시하였다. 이 때 표면균열은 시험편의 중앙에 P = 24.5 N의 하중으로 균열길이 2a ≃ 100 μm를 가공하였다.

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 1573 K, 1673 K, 1773 K로 변화시킨 결과, 각각 830 MPa, 1014 MPa, 744 MPa를 나타내었다. 이 온도 범위에서 균열시험편은 1673 K에서 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 1473 K에서 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 모재

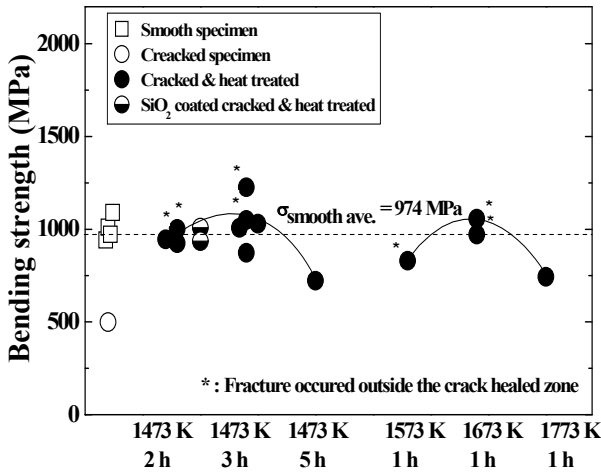


Fig. 4 Bending strength of cracked specimen with heat treatment at variance temperature

의 굽힘 강도에 비하여 98 % 및 106 %를 나타내었으며, 모재 굽힘강도와 비슷하거나 1 GPa 이상의 강도를 나타내었다. 1473 K, 2시간 열처리한 균열시험편에서도 1002 MPa을 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 균열시험편의 최적의 열처리 조건은 1473 K, 3시간이라 판단된다.

$\text{Si}_3\text{N}_4$  또는  $\text{SiC}$  세라믹스의 가공시에 형성된 표면 균열 치유 시 형성된 균열 치유 물질은  $\text{SiO}_2$  결정상이라는 연구결과<sup>(13,14)</sup>에 의하여 졸겔 법에 의한 제조된 졸겔 무기바인더  $\text{SiO}_2$  콜로이드를 표면 코팅하여 1473 K, 2시간 열처리한 영향을  $\odot$  기호로 나타내었다.  $\text{SiO}_2$  콜로이드를 표면 코팅한 균열시험편의 평균 굽힘 강도는 972 MPa로서 모재 시험편의 굽힘강도 974 MPa과 비슷하게 나타났다. 그러나  $\text{SiO}_2$  콜로이드를 균열부에 코팅하지 않은 시험편의 굽힘강도 957 MPa보다는 약간 높게 나타났으나, 분산을 고려하면 유사한 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서  $\text{SiO}_2$  콜로이드의 균열부 표면 코팅에 의한 효과는 거의 없는 것으로 판단하였다. 그림에서 \*는 균열 치유부 이외에서 파단한 시험편을 나타내며, 파단한 외관을 Fig. 5에 나타낸다.

3.5 열처리된 모재의 고온 굽힘강도

Fig. 6은 1473 K 공기 중에서 2시간 동안 열처

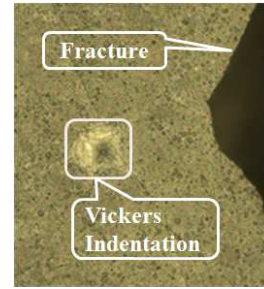


Fig. 5 Fracture pattern; Fracture initiated from outside the crack-healed zone

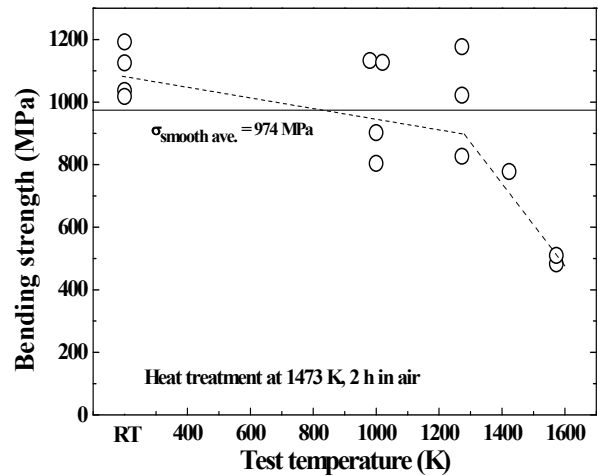


Fig. 6 Effect of test temperature on the bending strength of smooth specimen

리된 모재의 시험온도 영향을 나타낸 것이다. 모재의 평균 강도(실선)는 974 MPa을 나타내었으나, 열처리한 모재의 상온 평균 강도는 1160 MPa을 나타내었다. 고온 강도는 온도가 증가함에 따라서 감소하여 1273 K에서 급격하게 감소하여, 1573 K에서 약 500 MPa을 나타내었다. 그러나 1073 K와 1273 K의 강도는 분산은 있으나, 평균적으로 모재의 강도와 비슷한 특성을 나타낸다. Ando 등의 연구에서 열처리제는 결정화에 따라서 고온 강도에 큰 영향을 보여 주었다.<sup>(15)</sup> 그러므로 사이알론의 열처리제는 굽힘 강도의 한계온도가 비교적 높은 것으로 보아 균열 치유제는 2.6절에서 설명하는 것과 같이 유리상  $\text{SiO}_2$ 라 판단된다.  $\text{SiC}$  단상체는 유리상에 의하여 한계온도 873 K로 낮았으나,  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ 와 플라이트/ $\text{SiC}$ 는 1273 K로 높았다. 이러한 차이는 기지재와 균열 치유제의 접착력이 원인이라 설명하였다.<sup>(15)</sup>

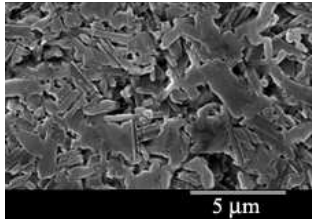
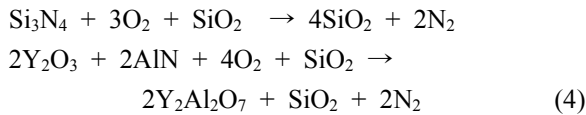


Fig. 7 SEM micrographs of surface of smooth specimen

### 3.6 모재 및 열처리재의 Morphology

저자들은  $\text{Si}_3\text{N}_4$  복합 세라믹스의 균열치유 반응을 유도하였으며,<sup>(13)</sup>  $\text{AlN}$ 이 함유된 사이알론 세라믹스의 균열치유 반응은 아래와 같다.



여기서  $\text{Y}_2\text{Al}_2\text{O}_7$ 은 결정상이다.  $\text{SiO}_2$ 는 유리상과 결정상의 2가지 상태가 있으며, 결정상  $\text{SiO}_2$ 양은 균열치유 온도에 의존한다. 따라서 Si를 함유하는 세라믹스는 유리상  $\text{SiO}_2$ 가 강도회복에 기여한다. 그러나 높은 온도에서 균열을 치유하면 유리상  $\text{SiO}_2$ 가 기화하여 큰 결함이 형성된다.<sup>(14)</sup>

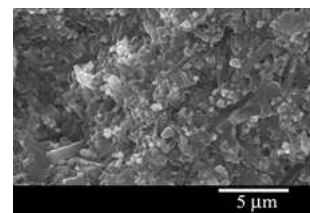
Fig. 7은 모재시험편의 표면SEM사진이다. 이때 사용한 에칭용액은  $\text{NaOH}$  10 % 용융염이다. 이 그림에서 모재시험편의 외관은 막대모양의 긴 결정이 성장하여 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 3에서 모재치유시험편은 모재시험편보다 강도가 높게 나타났다. 이러한 원인을 규명하기 위하여 2종류 시험편의 파단면을 비교하기 위하여 Fig. 8에 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 가공중에 발생한 미세한 표면 균열 등이 열처리함으로써 식 (4)와 같이 형성된 유리상  $\text{SiO}_2$ 에 의하여 치유된 것이 원인이라 판단된다.

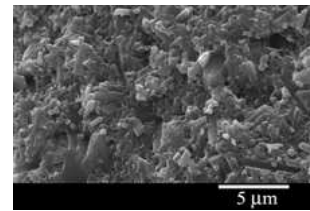
균열재 시험편의 열처리에 의하여 균열치유에 기여하는 표면 산화물은 FESEM을 사용하여 조사하였다. Table 1은 모재시험편, 균열재 치유시

Table 1 Composition of surface by EPMA (wt.%)

Composition Specimen	Si	N	Al	O
Smooth	94.20	4.20	1.95	-
Cracked & healed	48.98	15.53	2.48	32.99
Cracked with $\text{SiO}_2$ colloidal coating & healed	56.70	11.20	2.00	30.10



(a)



(b)

Fig. 8 SEM micrographs of fracture surface. (a) smooth specimen, (b) healed smooth specimen

험편 및  $\text{SiO}_2$  콜로이드 코팅 균열재 치유시험편을 3번 측정하여 평균한 표면성분(wt.%)이다. 치유처리는 1473 K, 2시간 공기중에서 실시하였다.

균열재 치유시험편 및  $\text{SiO}_2$  콜로이드 코팅 균열재 치유시험편은 O가 검출되어, 식 (4)의  $\text{SiO}_2$ 의 결정상이 형성되어 강도 회복에 기여하였음을 알 수 있다. 그러나 O의 성분은 거의 비슷한 양이 검출되어 Fig. 4의 강도와 좋은 일치를 나타낸다. O는 모재에서 검출되지 않았으나, 치유재에서 산화반응으로 많이 증가하였다. N은 열처리함으로써 식 (4)와 같이 발생하여 표면에서 많이 검출되었지만, 강도에는 영향을 미치지 않았다.<sup>(15)</sup>

## 4. 결 론

본 연구는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 와  $\text{AlN}$ 에 소결보조제  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 를 첨가하여 사이알론을 소결하고, 소결체를 열처리함으로써 고강도 사이알론을 개발한 결과는 다음

과 같다.

(1) 소결보조제 이트리아의 첨가로 높은 파괴인성과 고밀도의 사이알론을 핫프레스로 소결할 수 있었다.

(2) 모재시험편은 열처리를 실시함으로써 가공시에 형성된 미세균열이 치유됨으로서 1 GPa 이상의 고강도 사이알론 세라믹스를 얻었다.

(3) 시험편 가공 또는 사용 시에 발생할 수 있는 균열재는 열처리함으로써 SiO<sub>2</sub> 유리상에 의하여 치유되어 모재 굽힘강도와 비슷하거나 1 GPa 이상의 강도를 나타내었다.

(4) 열처리재는 결정화에 따라서 고온 강도에 큰 영향을 주었으며, 모재시험편의 고온한계는 1273 K이었다.

(5) FESEM을 사용한 열처리재의 표면 분석에서, 모재는 O가 검출되지 않았으나, 치유재는 치유반응으로 많이 증가하였다. N은 열처리함으로써 발생하여 표면에서 많이 검출되었으나, 강도에 대한 영향은 없었다.

## 후 기

이 논문은 2007학년도 중소기업 산학협력지원사업에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

- (1) Sakano, H. and Asano, K., 1987, "Ceramics for Automobile," *Sankaido*, p. 180.
- (2) Kijima, K. and Shirasaki, S., 1976, "Nitrogen Self-Diffusion in Silicon Nitride," *Journal of Chemical Physics*, Vol. 65, pp. 2668~2671.
- (3) Lange, F.F., 1980, "Silicon Nitride Systems: Fabrication Microstructure, and Properties," *Int. Metals Rev.* Vol. 247, No. 1, pp. 1~20.
- (4) Lange, F.F., 1983, "Fabrication and Properties of Dense Polyphase Silicon Nitride," *Bull. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 62, No. 12, pp. 1369~74.
- (5) Nam, K.W., Moon, S.J., Park, S.W., Ahn, S.H. and Kim, J.S., 2007, "Characteristics of Sialon by Additive Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Proceeding of The KSPSE 2007 Fall Annual Meeting*, pp. 262~267.
- (6) Jack, K.H., 1976, "Sialons and Related Nitrogen Ceramics," *J. Mater. Sci.*, Vol. 11, pp. 1135~58.
- (7) Jack, K.H. and Wilson, W.I., 1972, "Ceramics Based on Silicon Nitride," *Nature Physical Science*, Vol. 238, No. 28, pp. 128~129.
- (8) Nam, K.W., Kim, M.K., Park, S.W., Ahn, S.H. and Kim, J.S., 2007, "Crack Healing Behavior and Bending Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Composite Ceramics by SiO<sub>2</sub> Colloidal," *Mater. Sci. and Engng. A*, Vol. 471, pp. 102~105.
- (9) Nam, K.W., Park, S.W., Ahn, S.H., 2008, "Crack-healing Behavior and Strength Properties of SiC Ceramics According to Additives SiO<sub>2</sub>," *Proceeding of Korea Ocean Science Technique Council 2007 Joint Meeting*, pp. 2430.
- (10) Wada, S. and Ukyo, Y., 1989, "Euro-Ceramics," Vol. 1, pp. 566~571.
- (11) Lawn, B.R. and Fuller, E.R., 1975, "Equilibrium Penny-Like Cracks in Indentation on Fracture," *J. Mater. Sci.*, Vol. 10, pp. 2016~24.
- (12) Ye. F., Hohhman. J.M., Holzer. S. and Iwasa. M., 2004, "Microstructural Development of Y-α/(β)-Sialon after Post Heat-Treatment and its Effect on Mechanical Properties," *Ceramics International*, Vol. 30, pp. 229~238.
- (13) Kim, M.K., Park, S.W., Son, C.S., Ahn, S.H. and Nam, K.W., 2006, "Crack Healing and Bending Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Composite Ceramics by Additive Powder TiO<sub>2</sub>," *Proceeding of The KSME 2006 Fall Annual Meeting*, pp. 149~152.
- (14) 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, No. 5, pp. 569~576.
- (15) Ando, K., Houjyou, K., Chu, M. C., Takeshita, S., Takahashi, K., Sakamoto, S., 2002, "Crack-Healing Behavior of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC Ceramics under Stress and Fatigue Strength at the Temperature of Healing (1000 °C)," *J. Eur. Ceram. Soc.* Vol. 22, pp. 1339~1346.