

## 가압소결 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합체의 마찰마모특성

백용혁 · 최 응 · 박용갑\*

전남대학교 세라믹공학과 · 신소재기술연구소

\*선문대학교 재료공학과

(1999년 7월 19일 접수)

## Tribological Properties of Hot Pressed SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites

Yong Hyuck Baik, Woong Choi and Yong Kap Park\*

Department of Ceramic Eng. Advanced Materials Research Institute, Chonnam National  
University Kwangju 500-757, Korea

\*Department of Materials Science and Eng., Sunmoon University Chung-Nam 336-840, Korea

(Received July 19, 1999)

### 초 록

$\alpha$ -SiC에  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 10~30 vol%까지 10 vol% 간격으로 혼합하고 소결 조제로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 각각 6 wt%로 첨가한 후, 1,800°C에서 1시간 동안 25 MPa의 압력으로 Hot Press하여 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합체를 제조하였다. 상대 이론 밀도 및 꺾임 강도는  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 20 vol% 첨가하였을 때 99.1% 및 34,420 MPa으로 가장 우수하였으며, 비마모량도  $2.09 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ 으로 가장 작았다. 그리고 파괴 인성(K<sub>IC</sub>)은  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 10 vol% 첨가하였을 때 4.65 MN/m<sup>3/2</sup>로 가장 좋았으나, 소결 과정에서 입자들이 합체, 성장될 때 입성장의 균일성과 균질성이 마찰 마모 저항성 저하에 크게 영향을 준 것으로 생각된다.

### ABSTRACT

SiC-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites were prepared by mixing  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder to  $\alpha$ -SiC powder in the range of 10 to 30 vol% with 10 vol% interval. 6 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 6 wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> were respectively added as sintering aids. Hot pressing was performed at 1,800°C for 1 hour with 25 MPa pressure. In the case of adding 20 vol% of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder, the relative density to theoretical value and the flexural strength were 99.1% and 34,420 MPa, respectively, and the worn amount was  $2.09 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ , which were the highest values in the all range of the composition. Although the composite containing 10 vol% of  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder showed the highest fracture toughness(K<sub>IC</sub>) of 4.65 MN/m<sup>3/2</sup>, the reduction of the wear resistance in this composite is likely to be affected by the homogeneity and the uniformity of the grain coalescence and growth during the sintering process.

**Key words :** Hot Press, Tribological Property, Silicon Carbide, Silicon Nitride

### 1. 서 론

세라믹스는 실온 부근에서 높은 강도와 경도, 내마모성, 화학적 안정성 등이 우수한 재료이므로 내 마찰 마모 재료로의 이용에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>1)</sup>

최근에는 탄화규소(SiC)의 높은 경도와 강도, 내마모성과 낮은 마찰계수 및 우수한 화학적 안정성을 이용한 밸브, Mechanical Seal, 볼 베어링, 노즐 등 각종 산업용 부품으로 그 이용 분야가 확대되고 있다.<sup>2,3)</sup> 특히 Mechanical Seal, 볼 베어링, 노즐 등에서의 마찰 마모 특성은 기계의 수명과 밀접한 관계가 있으므로 기계 부품 등 구조 재료에서 대단히 중요하다.

또한, 질화규소(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)는 고온 강도 및 내산화성이 우수

하고, 저열 팽창성, 높은 마모 저항성의 재료이므로 자동차의 Turbo Charger Rotor<sup>4)</sup>에 사용되어진 이래 엔진 부품과 절삭공구 등에도 사용되는 등 고온 구조 재료로서 주목을 받고 있으며, 현재에도 질화규소 소결체의 파괴 인성과 마찰 마모 저항성의 개선을 위하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>에 SiC Whisker를 첨가하는 등 많은 연구들이 이루어지고 있다.

탄화규소나 질화규소는 소결이 곤란하여 상압 소결, 가압 소결<sup>5,6)</sup> 또는 열간 등압 소결<sup>7,8)</sup> 방법 등으로 소결체를 제조하고 있다. 이들 방법 중에서 성형성 및 생산성으로 보면 상압 소결 방법이 가장 적당하나 소결체의 특성이 낮은 결점이 있다. 반면 성형성과 생산성은 낮지만 소결체의 특성이 가장 우수한 방법은 고온에서 가압하는 Hot Pressing 방법이다.

본 연구는 입상인 탄화규소( $\alpha$ 형) 분말에 질화규소( $\alpha$ 형) 분말을 균일하게 혼합하여 소성함으로써 입상인  $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 장주상인  $\beta$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>로 전이시켜 입상인 탄화규소와 이상 교차 조직을 갖는 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 복합체를 제조하였을 때 마찰 마모 저항성에 미치는 영향을 검토하였다. 소결 조제로서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>계를 사용하였고 Hot Pressing 방법으로 시편을 제조하였다. 물성 측정은 꺾임 강도, 파괴 인성 및 비마모량을 측정하였고, 마찰 마모면의 미세 구조를 SEM으로 관찰하여 질화규소의 첨가량에 따른 마찰 마모 저항성과 미세 구조 변화와의 관계를 확인하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 사용 원료 및 시편 제조

본 연구에서 사용한 탄화규소 분말은 Showadenko사의 제품(A-1)으로 순도 98.1%, 결정상은 6H가 94%, 15R이 6%이며, 평균 입경이 0.45  $\mu$ m로서 Free Carbon 1.08%, Free SiO<sub>2</sub> 0.71%의 불순물이 포함된 것이다. 또한 질화규소 분말은 H. C. Stark사의 고순도 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말( $\alpha$ -Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, 평균 입경 0.7  $\mu$ m, 비표면적 12~15 m<sup>2</sup>/g, M11)을 사용하였다. 소결 조제로 사용한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 AES-11C(Sumitomo Chem. Co., Ltd., Japan)를, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 분말은 H. C. Stark사의 Fine Grade로 99.95% 이상의 순도와 평균 입경 1.0  $\mu$ m 이하인 미분말을 사용하였다.

시편 제조는 SiC 분말에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말을 10, 20 및 30 vol% 씩을 각각 혼합하고, 여기에 소결 조제로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 wt%와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 wt%를 첨가, 조합하였다. 각 조합물들은 무수 Methyl Alcohol 중에서 각 원료의 비중 차이로 인한 분리가 일어나지 않은 상태로 될 때까지 Alcohol을 서서히 증발시키면서 충분히 혼합한 후, 50°C의 Dry Oven에서 건조, 100 mesh 체를 통과시켜 과립화한 다음, 1,800°C에서 1시간 동안 25 MPa의 압력으로 Hot Pressing 하였다. 이때 소결 시편의 크기는 직경 30 mm, 두께 약 5 mm인 Disk 형으로 하였다. 소결 밀도 및 꺾임 강도 측정용 시편은 소결된 Disk형 시편을 4×5 mm의 각주형으로 절단하여 사용하였으며 파괴 인성 및 마찰 마모 측정용 시편은 소결된 Disk형 시편(직경 30 mm, 두께 약 5 mm)을 그대로 사용하였다.

### 2.2. 물성 측정

#### 2.2.1. 꺾임 강도 및 파괴 인성

소결된 시편의 밀도는 아르키메데스 원리를 이용한 방법으로, 꺾임 강도는 3 Point Bending 방법으로 상온에서 측정하였으며, 이때 Cross Head Speed는 0.25 mm/sec., Span의 길이는 20 mm로 하였다. 측정값은 시편 4개를 측정하여 그 평균값으로 나타내었다.

파괴 인성(K<sub>IC</sub>) 측정은 시편 표면을 0.1  $\mu$ m Diamond Paste로 최종 연마한 후 비커스 미소경도 시험기(Matsuzawa, DVK-2S, Japan)로 측정하였으며, 이 때 하중은 10 kgf, Load Speed는 40  $\mu$ m/sec., 유지 시간은 10 sec로 하였다. 측정값은 Lawn and Fuller<sup>14</sup>가 제시한 방법으로 구하였으며 각 시편 당 7회 측정하여 그 평균값을 나타내었다.

#### 2.2.2. 마찰 마모

마찰 마모량 측정은 Pin-on-Disk Type의 마찰 마모 시험기(Orientec EFM-111-F)를 사용하였다. 마찰 마모 측정은 시편의 표면을 연마한 후, 수(Water) 중에서 접동 속도(Sliding Speed) 300 mm/sec로 2시간 동안 행하여 마모량을 구하였다. 이 때 가해진 하중은 5 kg로 하였다. 마모량 측정은 표면 조도계(Tokyo SEIMITSU 사, SURFCOM 113-B)로 마모된 Track의 4개 지점에서 마모된 단면적을 측정하고 그 평균값을 비교하였다. 이 때 마찰 마모 상대 재질로 사용한 Pin의 재질은 SiC 97%의 순도를 가지고 밀도 3.1 g/cm<sup>3</sup>, 경도 25,000 MPa, 탄성률은 4.1×10<sup>5</sup> MPa인 SiC Ball(日本化學陶業, SiC-11 Ball) 및 순도가 99.9%이고 밀도 3.9 g/cm<sup>3</sup>, 경도 1,800 kg/mm<sup>2</sup>, 파괴인성 3.5 MN/m<sup>3/2</sup>인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ball (Nikkato, SSA-999W)을 사용하였다.

또한, 소결된 시편의 미세구조와 마찰 마모면을 확인하기 위하여 SEM(JSM-840A, Jeol, Japan)으로 미세 구조를 관찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 소결 밀도

Fig. 1은 SiC 분말에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말을 첨가하였을 때 소결체의 상대 이론 밀도(이하 "소결 밀도"로 표시함)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보면 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 10 vol% 첨가하였을 때 98.9%, 20 vol% 일 때 99.1%로 차이가 크지는 않았으나 20 vol% 일 때 소결 밀도 값이 가장 높았다. 이는 1,900°C에서 1시간 동안 가압 소결한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/10 vol%SiC 복합체<sup>12</sup>의 소결 밀도 값인 98.9% 보다는 다소 우수하였다. 그러나 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 첨가량이 30 vol%로 증가되면 오히려 소결 밀도는 급격히 감소하였다.

### 3.2. 꺾임 강도 및 파괴 인성

SiC 분말에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 분말의 첨가량을 변화시켰을 때 소결체의 꺾임 강도와 파괴 인성 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 꺾임 강도의 변화 경향을 보면 소결 밀도와 같은 경향을 보이고 있다. 즉, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 첨가량이 10 vol%일 때 31,630 MPa, 20 vol%일 때 34,420 MPa, 30 vol%일 때 24,710 MPa로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol%일 때 가

장 높은 값을 나타내었고, 첨가량이 30 vol%로 증가하면 오히려 급격히 감소하였다. 이는 1,900°C에서 1시간 동안 분위기 가압 소결한  $\text{Si}_3\text{N}_4/10 \text{ vol}\% \text{SiC}$  복합체<sup>12)</sup>의 꺾임 강도 값인 930 MPa보다 훨씬 우수하였다. 그러나, 파괴 인성의 경우에는  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 첨가량이 증가할수록 계

속 감소되었다. 즉  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 첨가량이 10 vol%일 때  $4.65 \text{ MN/m}^{3/2}$ 로 가장 높은 값을 나타내었으나, 20 vol%에서  $3.66 \text{ MN/m}^{3/2}$ 로 크게 감소하였고, 30 vol%에서는 20 vol%의 경우와 비슷한  $3.46 \text{ MN/m}^{3/2}$ 의 값을 나타내었다.  $\text{Si}_3\text{N}_4$  10 vol%의 경우 1,750°C에서 반응 소결한 SiC 소결체<sup>13)</sup>의  $2.9 \text{ MN/m}^{3/2}$  보다는 크게 우수하였으며, 1,850°C에서 상압 소결한 SiC 소결체<sup>14)</sup>의  $4.7 \text{ MN/m}^{3/2}$  값과 비슷한 결과이었다. 파괴 현상은 입계 파괴와 입내 파괴가 같이 나타나고 있으나 강도 증진에 크게 영향을 미치는 입내 파괴 현상은  $\text{Si}_3\text{N}_4$  첨가량이 10 vol%와 30 vol%의 경우보다 20 vol%일 때 더 많이 나타나고 있는 것으로 보아  $\text{Si}_3\text{N}_4$  20 vol%일 때 꺾임 강도 값이 가장 높은 것을 알 수 있었다. 따라서, 꺾임 강도와 파괴 인성 측정 결과를 볼 때  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 첨가량은 20 vol%가 적당하였으며, 그 이상의  $\text{Si}_3\text{N}_4$  첨가는 SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  복합체의 특성을 크게 저하하는 것으로 생각되었다.

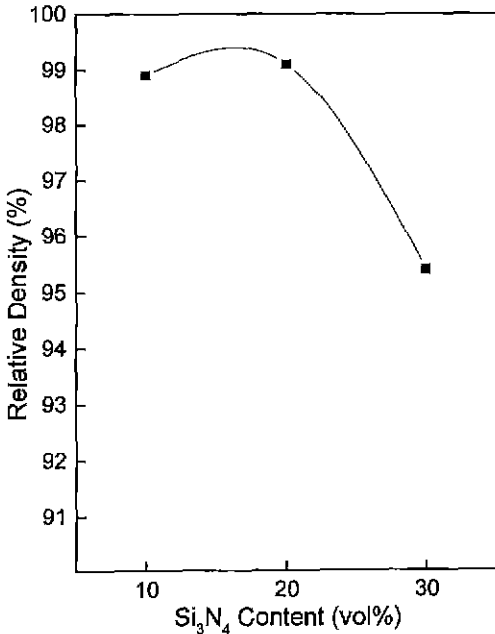


Fig. 1. Relative density of SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  composites as a function of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  content

3.3. 마찰 마모 및 미세 구조

1,800°C에서 Hot Pressing 방법으로 소결한 SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  복합체를 Disk로 하고 마찰 마모 상대 재질로 SiC 및  $\text{Al}_2\text{O}_3$  질 Pm을 사용하였을 때 비마모량의 변화를 Fig 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 비마모량을 보면 SiC 질 Pin을 사용한 경우,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  10 vol%에서  $2.53 \times 10^3 \text{ mm}^2$ , 20 vol%에서

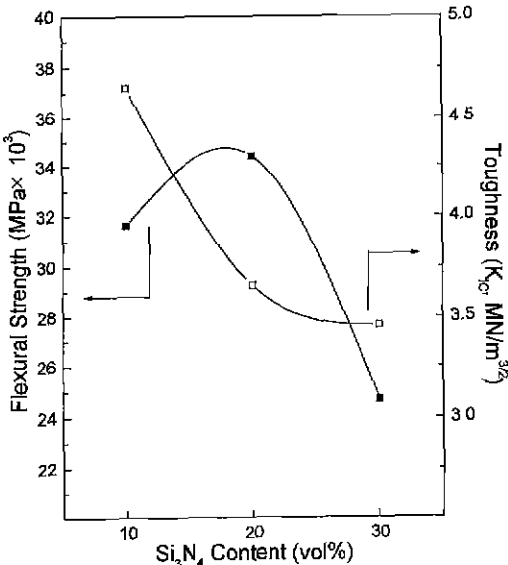


Fig. 2. Flexural strength and toughness of SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  composites as a function of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  content.

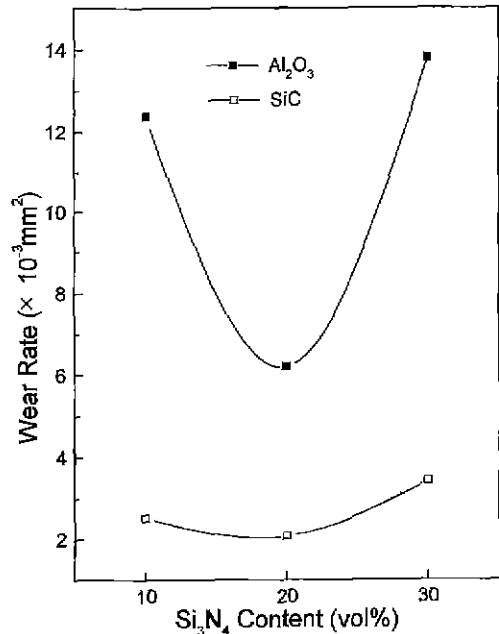


Fig. 3. Specific wear rate of SiC/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  composites as a function of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  content.

2.09×10<sup>3</sup> mm<sup>2</sup>, 30 vol%에서 3.44×10<sup>3</sup> mm<sup>2</sup>로 10~20 vol%에서 큰 차이는 없었으나 비마모량이 가장 적은 것은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol% 첨가 시편이었다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 질 Pin을 사용한 경우에는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 첨가량이 20 vol% 일 때 6.22×10<sup>3</sup> mm<sup>2</sup>로 비마모량이 가장 낮았고, 10 vol%와 30 vol%에서는 비마모량이 매우 크게 나타났다

마찰 마모 상대 재질로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 질 Pin을 사용한 경우 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 함량에 상관없이 전반적으로 높은 마모량을 나타냈는데, 이는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 질 Pin의 마찰계수(μ=0.4~0.5)가 SiC 질 Pin의 마찰계수(μ=0.2)<sup>1)</sup>에 비하여 높기 때문에 마찰 마모 될 때 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 질 Pin에서 새로운 마모면이 더 발생할 뿐만 아니라 이 때 생성된 마모분들이 Disk 시편의 마모를 촉진시켰기 때문이라 생각된다.

일반적으로 마찰 계수 및 비마모량은 경도가 높을수록, 열전도도가 낮을수록 증가하고, 파괴 인성이 클수록 낮아지는 것으로 알려져 있으므로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 첨가량이 많을수록 소결이 촉진될 뿐만 아니라 장주상의 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 입상인 α-SiC가 2상 교차 조직을 많이 형성하므로 꺾임 강도와 파괴 인성 및 마찰 마모 저항성이 크게 증진될 것으로 기대되었다. 그러나, 본 연구에서 가장 치밀한 소

결 밀도와 높은 꺾임 강도 및 마찰 마모 저항성이 가장 우수한 특성을 나타낸 것은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 20 vol% 첨가된 경우이며 그 이상의 첨가는 오히려 소결체의 치밀성을 저하시킬 뿐 아니라 꺾임 강도와 마찰 마모 저항성을 크게 감소시키고 있다. 또한 파괴 인성 값도 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 첨가량이 증가할수록 계속 감소하였다 이는 소결 온도 1,800°C에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 일부가 분해, 감소되었기 때문이라 생각되며, 이러한 현상이 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 첨가량이 많은 시편에서 더 크게 나타났기 때문이라 생각된다.

이를 확인하기 위하여 Fig. 4에 마찰 마모면의 미세구조와 마찰 마모 저항성이 가장 우수한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol%인 소결체의 미세 구조를, 그리고 Fig. 5에는 소결체의 결정상을 XRD로 분석하여 그 결과를 각각 나타내었다.

Fig. 4에서 마찰 마모면의 미세 조직(Figs. 4a), 4b) and 4c))을 보면, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 10 vol%의 경우 입자들이 덩어리 형태로 탈락되면서 깊이 파여 있는 상태를 볼 수 있으며, 합체된 입자들 사이에 큰 균열이 남아있는 것도 볼 수 있었다 20 vol%의 경우에는 큰 균열은 물론 미세한 균열도 관찰되지 않았고, 작은 입자들이 소량 탈락된 부분이 보이고 있다. 30 vol%에서는 미세한 Crack이

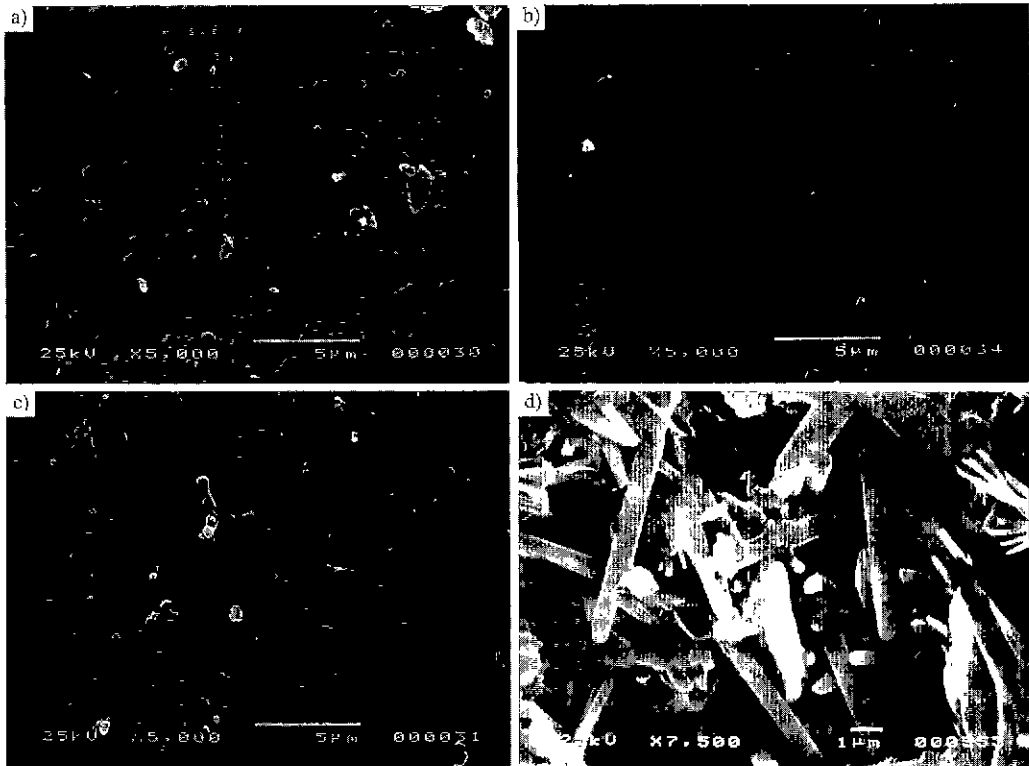


Fig. 4. SEM micrographs of SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites; a), b), c) worn surfaces of SiC/10, 20, 30 vol%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites and d) etching surface of SiC/20 vol%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites

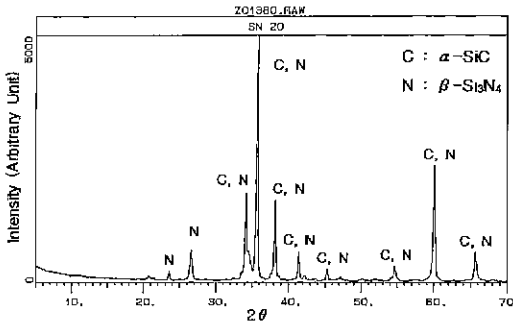


Fig. 5. X-Ray diffraction pattern of SiC/20 vol%Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite.

간혹 보일 뿐이며, 입자들이 덩어리 형태로 탈락되면서 깊게 파여 있는 현상은 볼 수 없고, 작은 입자들이 많이 탈락된 부분들이 보이고 있다.

이는 소결 과정에서, 입상 결정들이 합체되어 큰 입자를 만들 때 이 합체된 입자들의 크기가 불균일하고 기공이 많게 되면 마찰 마모될 때 입자들이 덩어리 형태로 탈락되면서 깊게 파이는 현상이 나타나고, 반면 합체된 입자들의 크기와 분포가 균일하면 작은 입자들이 탈락되면서 깊게 파이는 현상은 나타나지 않았다.

그러므로 입성장(합체)이 균일할 뿐만 아니라 미세 조직이 치밀하고 균질해야 우수한 마찰 마모 저항성을 나타낸다고 생각된다.

마찰 마모 저항성이 가장 우수하고 소결 밀도와 쥐임 강도 값이 높은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol% 소결체의 미세 구조(Fig 4(d))에서 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 결정으로 생각되는 잘 발달된 많은 주상형 입자들을 확인할 수 있었다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 첨가량 변화에 따른 소결체들의 결정상을 XRD로 분석하였으나 결정상들의 변화가 없었으므로 소결 밀도, 쥐임 강도, 파괴 인성 및 마찰 마모 저항성이 우수한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol% 시편의 XRD 분석 결과만 Fig. 5에 나타내었다. XRD 분석 결과 α-SiC와 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 상만이 존재하였으며 α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 모두 β-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>로 전이된 것을 확인할 수 있었다. 소결 조제로 첨가된 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로부터 생성될 수 있는 물질들은 확인되지 않았다.

#### 4. 결 론

α-SiC 분말에 α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 10~30 vol%까지 10 vol% 간격으로 혼합하고 소결 조제로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 wt%와 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6 wt%를 첨가하여 질소 분위기에서 1,800°C에서 1시간 동안 25 MPa의 압력으로 시편을 제조하고, 소결 밀도, 쥐임 강도, 파괴 인성 및 내 마찰 마모 특성을 측정하고, SEM으로 미세 구조를 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 20 vol%를 첨가하였을 때 상대 이론 밀도 약 99.1% 및 쥐임 강도 34,420 MPa의 가장 좋은 특성을 나타내었다.

파괴 인성(K<sub>1c</sub>)은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>가 10 vol%로 첨가된 시편이 4.65 MN/m<sup>3/2</sup>로 가장 좋았으며, 마찰 마모 저항성은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 20 vol% 첨가 시편이 2.09×10<sup>-3</sup> mm<sup>2</sup>로 가장 우수하였다. 마찰 마모 저항성은 파괴 인성(K<sub>1c</sub>)이 높을수록 양호한 것으로 되어 있으나, 소결 과정에서 입자들이 합체, 성장될 때 입성장의 균일성과 균질성이 마찰 마모 저항성에 크게 영향을 미치는 것으로 생각된다.

#### 감사의 글

본 연구는 1996년도 한국과학재단 특정기초연구(과제 번호 : 96-03-00-02-01-3) 지원에 의하여 이루어 졌으며 이에 감사를 드립니다.

#### REFERENCES

1. M. Iwasa and Y. Tojibana, "Friction and Wear of Ceramics Measured by a Pin-on-Disk Tester," *Yogyo Kyokai-Shi*, **94**(3), 336-343 (1986).
2. B. Wachtman Jr., *Structural Ceramics*, Vol. 29, pp. 91-163, Academic Press Jan., 1989.
3. S. Somya and Y. Inomata, "SiC Ceramics," *Rokakuho*, 409-425 (1988).
4. E. M. Lenoc and J. L. Meglen, "International Perspective on Ceramic Heat Engines," *Am. Ceram. Bull.*, **64**(2), 271-275 (1985).
5. D. R. Johnson, A. C. Schaffhauser, V. J. Tennerly and E. L. Long, "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Project," *Am. Ceram. Bull.*, **64**(2), 276-281 (1985).
6. M. Taguchi, "Applications of High-Technology Ceramics in Japanese Automobiles," *Adv. Ceram. Mater.*, **2**(4), 754-762 (1987).
7. G. Sasaki, H. Nakase, K. Suganuma, T. Fujita and K. Niihara, "Mechanical Properties and Microstructure of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Matrix Composite with Nano-Meter Scale SiC Particles," *J. Ceram. Soc. Jan.*, **100**(4), 536-540 (1992).
8. Y. Akimune, T. Ogasawara and N. Hirosaki, "Influence of Starting Powder Characteristics on Mechanical Properties of SiC-Particle/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites," *J. Ceram. Soc. Jan.*, **100**(4), 463-467 (1992).
9. F. F. Lange, "Effect of Microstructure on Strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC Composite System," *J. Am. Ceram. Soc.*, **56**(9), 445-450 (1973).
10. Y. Akimune, N. Hirosaki and T. Ogasawara, "Mechanical Properties and Microstructure in Sintered and HIPed SiC Particle/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites," *J. Mat. Sci.*, **27**, 6017-6021 (1992).
11. B. R. Lawn and E. R. Fuller, "Equilibrium Penny-Like

- Crack in Indentation Fracture," *J. Mater. Sci.*, **10**(12), 2016-2024 (1976).
12. 김병수, 김인술, 장윤식, 박홍채, 오기동, "고강도 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC 구조세라믹스에 관한 연구," *요업학회지*, **30**(12) 999-1006 (1993).
  13. 박현철, 박상환, 최승철, "반응소결 탄화규소의 제조 및 특성에 관한 연구 II," *요업학회지*, **33**(10), 1156-1162 (1996).
  14. 이종국, 강현희, 이의구, 김 환, "출발상제어에 의한 자기복합화 미세구조의 탄화규소 세라믹스 제조," *요업학회지*, **34**(12), 1240-1246 (1997).