

질화규소의 미세조직과 기계적 성질에 미치는 h-BN 첨가의 영향

김승현* · 이영환* · 조원승*[†] · 김준규** · 조명우*** · 이은상*** · 이재형****

*인하대학교 재료공학부

**인하대학교 소재연구소

***인하대학교 기계공학부

****영남대학교 재료금속공학부

(2003년 6월 9일 접수; 2003년 8월 6일 승인)

Effect of h-BN Content on Microstructure and Mechanical Properties of Si₃N₄

Seung-Hyun Kim,* Young-Hwan Lee,* Won-Seung Cho,*[†] Jun-Gyu Kim,**
Myeong-Woo Cho,*** Eun-Sang Lee,*** and Jae-Hyung Lee****

*School of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**Institute of Advanced Materials, Inha University, Incheon 402-751, Korea

***School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

****School of Metallurgical and Materials Engineering, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

(Received June 9, 2003; Accepted August 6, 2003)

초 록

Si₃N₄-BN계 기계 가공성 세라믹스를 1800°C에서 2시간동안 25 MPa의 압력하에서 열간 가압소결하여 제조하였다. Si₃N₄ 매트릭스에 판상의 h-BN 첨가량을 5-30 vol%까지 증가함에 따라 굽힘강도는 Si₃N₄ 단미의 1000 MPa에서 720-400 MPa로 감소하였고, 파괴인성도 Si₃N₄ 단미의 7.6 MPa·m^{1/2}에서 6.5-4.1 MPa·m^{1/2}로 감소하였다. β-Si₃N₄의 결정립 크기와 형상비는 h-BN 첨가에 의해 약간 감소하였다. Si₃N₄ 단미는 절삭시 취성 파괴를 나타내어 절삭이 불가능하였으나, Si₃N₄-BN계 기계 가공성 세라믹스는 파괴가 발생하지 않으면서 절삭이 가능하여, 우수한 기계 가공성을 나타내었다. h-BN 함량이 증가할수록 절삭과 마이크로 드릴링시의 절삭력은 감소하였다.

ABSTRACT

Si₃N₄-BN based machinable ceramics were fabricated by hot-pressing at 1800°C for 2 h under a pressure of 25 MPa. The microstructure, mechanical properties, and machinability were investigated. With increasing h-BN content from 5 vol% to 30 vol%, three point flexural strength decreased from 1000 MPa of monolithic Si₃N₄ to 720-400 MPa. The fracture toughness, K_{IC}, was decreased from 7.6 MPa·m^{1/2} of monolithic Si₃N₄ to 6.5-4.1 MPa·m^{1/2}. The grain size and aspect ratio of β-Si₃N₄ slightly decreased with increasing h-BN content. Si₃N₄ monolith could not be machined due to brittle fracture, but Si₃N₄-BN based machinable ceramics could be machined without fracture, showing excellent machinability. With increasing h-BN content, the thrust force during cutting and micro-drilling process was decreased.

Key words : Machinable ceramics, Si₃N₄, h-BN, Mechanical property, Machinability

1. 서 론

질화규소(Si₃N₄)는 강도, 내열성, 내마모성 등 우수한 성질을 갖고 있기 때문에 고온 구조용 재료로서 적용범위가 넓다. 현재 자동차의 엔진부품, 베어링 등의 각종 분야에 응용되어 상업화되고 있다.^{1,2)} 그러나, 구조용 세라믹스의 사용범위가 확대됨에 따라 높은 치수정확도를 요구하게 되어, 이를 위해서는 소결체를 원하는 형태로 가

공하는 연삭, 절삭 등의 기계 가공은 필수적이다. 일반적으로 기계 가공에 사용되는 공구는 고속도강이나 초경합금재질이기에 때문에 경도 및 강도가 높은 세라믹스의 가공에는 부적절하다. 질화규소 세라믹은 높은 취성으로 인해 기계 가공시 균열전파에 의한 파괴가 발생하므로, 기계 가공시 고도의 숙련된 기술을 요하고 다이아몬드 지석 등을 이용하여 가공하기 때문에, 가공에 따른 세라믹스의 제조단가를 높이는 원인이 되고 있다. 실제로 세라믹스의 가공에 소요되는 비용이 전체 공정 단가의 50%까지 달한다는 보고가 있다.³⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위하여 운모(mica)계, 육방정 질화붕소(h-BN)계 등의 기계 가공성 세라믹스(machinable ceramics)에 관한 많은 연

[†]Corresponding author : Won-Seung Cho

E-mail : wscho@inha.ac.kr

Tel : +82-32-860-7528 Fax : +82-32-874-3382

구가 진행되고 있다.^{4,7)}

기계 가공성 세라믹 복합재료에 첨가되는 h-BN은 흑연과 유사한 구조를 가지며 전기절연성이 높고 내열 및 내식재료, 전기절연재료로 사용되는데, 판상 입자들의 벽개성 때문에 절삭공구 선단에서 발생한 균열이 내부로 진행되지 않아 뛰어난 기계 가공성을 나타낸다.^{4,7)}

따라서, 본 연구에서는 고온 구조용 재료로서 적용범위가 넓은 질화규소 세라믹에 기계가공성을 부여하기 위해 h-BN을 복합화한 Si₃N₄-BN계 기계 가공성 세라믹스를 열간가압에 의해 제조하였다. 그리고, 기계적 물성과 미세조직, 기계 가공성에 미치는 h-BN의 영향을 체계적으로 조사하여, 양호한 기계 가공성을 갖는 Si₃N₄-BN계 기계 가공성 세라믹스의 제조하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조

본 실험에서 제조한 복합체의 매트릭스 분말로는 α -Si₃N₄(Ube Kosan사, E-10, α -phase >95%, 평균입자크기 : 0.17 μ m)를 사용하였고, 소결조제로는 Y₂O₃(Shinetsu chemical사, 순도 : >99.5%, 평균입자크기 : 0.25 μ m)와 Al₂O₃(Sumitomo chemical사, AKP-30, 순도 : >99.99%, 평균입자크기 : 0.39 μ m)를 사용하였다. h-BN(고순도 화학연구소, 순도 : >99%, 평균입자크기 : 10 μ m)은 판상형태의 입자를 사용하였다.

α -Si₃N₄ 원료분말에 소결조제로서 8 mol%의 Y₂O₃와 6 mol%의 Al₂O₃를 첨가하고, h-BN을 5~30 vol% 첨가하였으며, 결합제(DL-Campor)를 소량 첨가한 후 알루미늄아제 포트에서 72시간동안 Si₃N₄ ball을 이용하여 에틸 알콜 중에서 습식 밀링하였다. 습식 밀링 후 분말의 건조에 있어서는 Si₃N₄와 h-BN과의 비중차(Si₃N₄의 이론밀도 : 3.19 g/cm³, h-BN의 이론밀도 : 2.29 g/cm³)로 인한 중력 편석을 방지하기 위해, 에틸 알콜을 함유하는 혼합분말을 hot plate와 교반기를 사용하여 균일하게 혼합·건조한 후 마지막으로 건조로에서 100°C, 3 h 건조하였다. 건조한 분말은 16 mesh의 체에서 체질하여 1 mm 이하의 조립분말을 얻었다. 조립 분말을 흑연 몰드에 장입한 후, 1800°C, N₂ 분위기에서 2시간동안 25 MPa의 압력으로 열간 가압하여 소결체를 제조하였다. 제조한 소결체는 다이아몬드 절삭기를 이용하여 절삭한 후 평면·연삭 및 경면·연마를 통해 시편(3×4×36 mm)을 제조하였다.

2.2. 물성측정 및 조직관찰

각 시편의 상대밀도는 아르키메데스법을 이용하여 체적 밀도를 측정한 후 체적 밀도와 이론밀도의 비로써 계산하였다. 단, 이론밀도는 원료분말의 조성분과 성분원소의 밀도로부터 혼합법칙(rule of mixture)을 이용하여 계산하

였다. 각 시편의 강도는 하부 지점 사이의 거리는 30 mm로 하고 시험편의 하중점에 크로스 헤드 속도 0.5 mm/min로 하중을 가하여, 시험편이 파괴될 때까지의 최대 하중을 측정하여 굽힘 강도(3점, 4점)⁸⁾를 측정하였다. 시편의 파괴인성(K_{IC})은 압자 압입법을 사용하여 측정하였다. 압자 압입법은 각 시편의 압입면을 경면연마한 후 micro-hardness tester를 사용하여 98 N의 하중으로 Vickers 압흔을 도입한 후, K_{IC}{K_{IC}=0.203(c/a)^{-3/2} · H_v · a^{1/2}; c는 크랙 길이 평균의 반, a는 압흔 대각선 길이 평균의 반, H_v는 비커스 경도⁹⁾를 측정하였다. Young's modulus는 Grindosonic (J. W. Lemmens, MK5)을 사용하여 동적 탄성계수(공진법)를 측정하였다.

각 시편의 파단면, β -Si₃N₄ 결정립의 지름, 길이, Vickers 압흔의 전파균열과 h-BN 판상 입자와의 상호작용을 SEM(Jeol; JSM 5500)으로 조사하였다. Si₃N₄ 결정립의 지름과 길이는 경면 연마한 시편을 화학적 에칭(HF+HNO₃ 용액, 80°C, 60 min)하여 관찰하였다. Monolith와 h-BN 첨가에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위해 TEM(Philips, CM 200)을 이용하였다. 그리고 결정립과 입계의 원소분석을 위해 EDS 분석을 행하였다. 각 시편의 결정상 및 입계상을 동정하기 위하여 XRD 분석(Philips, PW 3719)을 행하였다. 측정 조건은 Cu K α 선을 이용하여 10°~70°의 범위에서 주사속도 6°/min로 행하였다.

마지막으로, 제조한 Si₃N₄-BN계의 세라믹의 기계 가공성을 알아보기 위해 절삭가공과 미세드릴링 가공실험을 수행하였다. 절삭저항성을 알아보기 위해, 절삭시 공구에 작용하는 X, Y, Z 방향의 절삭력을 압전센서 type의 밀링용 공구동력계로 측정하였다. 절삭공구는 초경공구를 사용하였으며, 절삭은 spindle rate 398 rpm, feed rate 30 mm/min의 조건하에서 depth of cut 0.1 mm와 0.2 mm의 두 가지 경우에 대해 행하여 절삭저항을 측정하였다. 또한, 직경 0.4 mm의 미세구멍을 가공하기 위하여 마이크로 드릴링 머신(TUNGALOY, SDM-01-15BF)을 사용하였으며, 드릴회전속도의 변화(15,000~30,000 rpm)에 따른 저항성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

Si₃N₄에 h-BN 입자를 0~30 vol% 첨가한 후 열간 가압 소결에 의해 제조한 각 시편들의 상대밀도 측정결과를 Fig. 1에 나타내었다. h-BN 첨가량이 대략 20 vol%까지는 거의 치밀화되었으나, 25 vol%와 30 vol% BN 첨가의 경우 상대밀도는 각각 97.1%, 96.7%로 감소하였다. h-BN 입자의 첨가량이 증가함에 따라 상대밀도는 약간씩 감소하였는데, 이는 판상의 h-BN 입자가 액상 소결과정시 입자의 재배열을 방해하기 때문¹⁰⁾으로 생각된다.

Fig. 2에는 BN 첨가량에 따른 굽힘 강도의 변화를 조

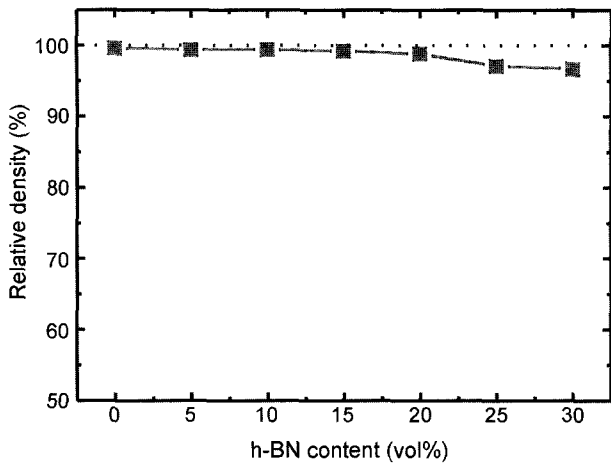


Fig. 1. Effect of h-BN content on relative density of Si₃N₄-BN based ceramics.

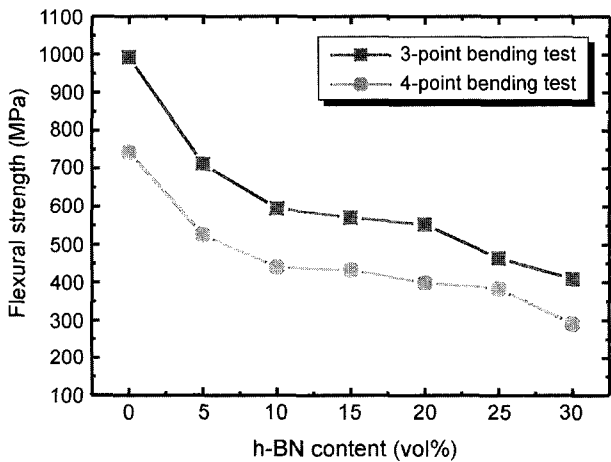


Fig. 2. Effect of h-BN content on the flexural strength of Si₃N₄-BN based ceramics.

사한 결과를 나타내었다. 굽힘강도는 잘 알려진 바와 같이 3점 굽힘 강도값이 4점 굽힘 강도값에 비해 약 20% 이상 높은 값을 나타내었는데, 이는 취성재료의 파괴강도에 미치는 size effect에 기인하는 것으로 생각된다. 3점 굽힘 강도의 경우, 시편 Si₃N₄의 경우에는 1000 MPa의 높은 강도를 나타내었으며, h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 강도는 점차적으로 감소하여, 최대 30 vol% BN 첨가에 의해 405 MPa까지 감소하였다. Griffith와 Orowan의 파괴 역학이론¹¹⁾에 의하면 취성재료의 파괴강도(σ_f)는 평면변형(plane strain)조건에 대해 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_f = \left[\frac{2E\gamma}{\pi C(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서 E , γ , C , ν 는 각각 Young's modulus, 파괴에너지, 균열길이의 반(half crack length), Poisson's ratio를 나타낸다. 이 식에 의하면 파괴강도는 E 와 γ 에 비례하고, C 에

반비례한다. h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 강도가 감소하는 이유를 위 식에 준하여 판단하면, Si₃N₄의 탄성계수(287.5 GPa)¹²⁾에 비해 상대적으로 낮은 탄성계수를 갖는 h-BN 입자(a축 방향은 86 GPa, c축 방향은 34 GPa)¹²⁾의 함량이 증가함에 따라 복합재료의 탄성율이 감소하고 또한, 파괴원으로 작용하는 잔류기공이 증가하였기 때문으로 생각된다. 그리고 Si₃N₄ 매트릭스의 열팽창계수(2.87 × 10⁻⁶/°C)¹³⁾와 h-BN의 열팽창계수(c축 방향; 7.15 × 10⁻⁶/°C)¹³⁾ 차이로 인해 고온에서 Si₃N₄-BN 복합재료를 제조한 후 냉각과정에서 h-BN의 c축 방향에 수직인 면에 인접한 매트릭스층에는 잔류 인장응력이 도입될 것으로 판단되며, 강도감소에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

Fig. 3에 h-BN 첨가량에 따른 탄성계수의 변화를 조사한 결과를 나타내었다. Si₃N₄ 단미의 탄성계수는 293.6 GPa의 높은 값에서 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 거의 직선적으로 감소하는 경향을 나타내어, 30 vol%의 BN 첨가에 의해 192.1 GPa로 감소하였다.

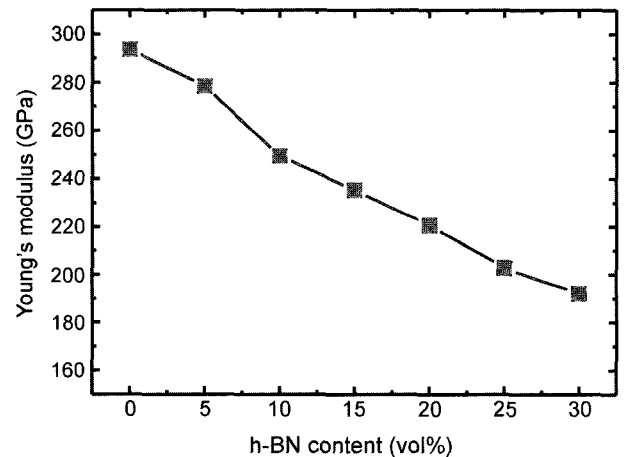


Fig. 3. Effect of h-BN content on the Young's modulus of Si₃N₄-BN based ceramics.

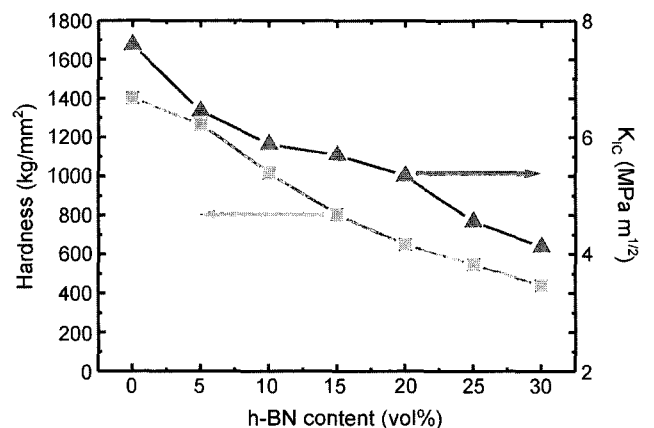


Fig. 4. Effect of h-BN content on Vickers hardness and fracture toughness of Si₃N₄-BN based ceramics.

Fig. 4에 경도와 파괴인성에 미치는 h-BN 첨가의 영향을 나타내었다. 먼저, 경도는 시편 Si_3N_4 단미의 경우에 $1,402 \text{ kg/mm}^2$ 의 높은 경도값을 나타내었으나, h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 내었고, 30 vol% 첨가에 의해 442 kg/mm^2 로 Si_3N_4 의 경도값에 비해 약 70% 감소하였다. 파괴인성도 Si_3N_4 단미의 경우에 $7.58 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 높은 값에서 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 감소하여 30 vol% BN 첨가의 경우 약 $4.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 의 낮은 값을 보였다. 경도 및 파괴인성이 감소한 것은 Si_3N_4 에 비해 낮은 탄성계수를 갖는 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 Si_3N_4 -BN 복합재료의 탄성계수가 감소되기 때문으로 생각된다. 기타의 원인으로는 전술한 바와 같이 h-BN의 첨가에 따른 상대밀도가 감소하기 때문으로 판단된다.

한편, h-BN 첨가에 따른 미세조직의 변화를 조사하기 위해, 시편의 열간 가압에 수직한 면을 경면연마한 후 에칭한 조직을 SEM으로 관찰한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. h-BN을 첨가하지 않은 시편 Si_3N_4 에서는 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 의 장축경이 약 $3.2 \mu\text{m}$ 의 결정립으로 구성되어 있으나, h-BN 첨가량이 증가할수록 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 결정립의 장축경이 감소하여, 30 vol% BN 첨가의 경우에는 약 $2.8 \mu\text{m}$ 로 감소하였다. 한편, 열간 가압 소결체 내의 Si_3N_4 결정립은 3차원적으로 배향되어 있으므로 정확한 길이의 측정이 곤란하다. 따라서, 2차원(겉보기)형상비를 2차원 단면 조직내에서의

겉보기 길이와 지름을 측정된 결과, Si_3N_4 monolith에 비해 h-BN의 첨가량이 증가할수록 약간 낮은 형상비를 나타내었다. 이는 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 는 c-축으로 우선적으로 성장하는 경향이 있는데, 액상소결의 중기과정인 용해-재석출 과정에서 판상의 h-BN 입자에 의해 Si_3N_4 의 물질이동이 방해되었기 때문으로 생각된다.

Fig. 6에 XRD 분석에 의해 생성상을 동정한 결과를 나

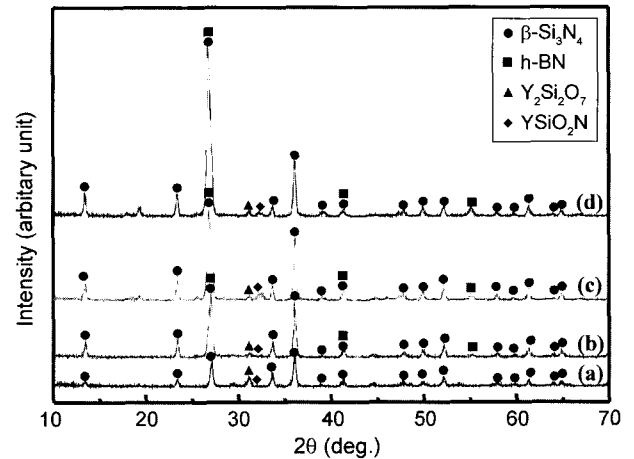


Fig. 6. XRD patterns for Si_3N_4 -BN based ceramics in surfaces vertical to hot-pressing direction; (a) Si_3N_4 , (b) Si_3N_4 -10 vol% BN, (c) Si_3N_4 -20 vol% BN, and (d) Si_3N_4 -30 vol% BN.

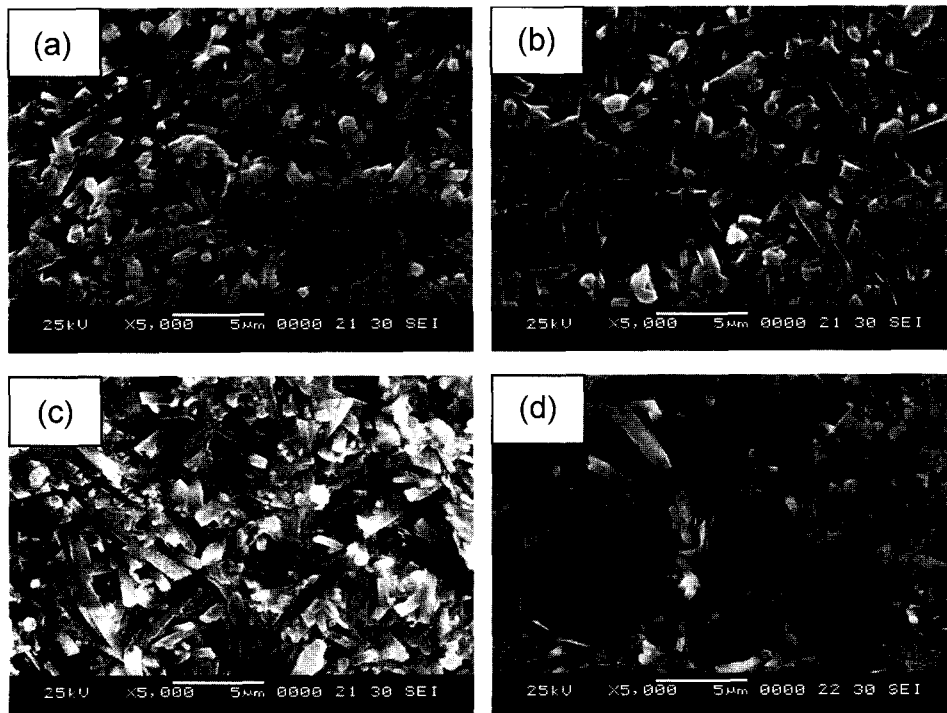


Fig. 5. SEM images of etched surfaces. Polished tensile surfaces were chemically etched by HF + HNO_3 sol; (a) Si_3N_4 , (b) Si_3N_4 -10 vol% BN, (c) Si_3N_4 -20 vol% BN, and (d) Si_3N_4 -30 vol% BN.

타내었다. Si_3N_4 는 α 상에서 β 상으로 100% 상전이하였음을 알 수 있다. β - Si_3N_4 상과 h-BN 이외에도 소량의 $\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, YSiO_2N 가 검출되었다. 이는 액상소결과정에서 소결조제인 Y_2O_3 와 Si_3N_4 원료분말의 표면에 존재하는 SiO_2 와의 반응에 의해 생성된 것으로 판단된다.

Fig. 7에 TEM으로 관찰한 미세조직(명시야상)을 나타내었다. Si_3N_4 단미의 경우 조직상에서 진한 회색으로 보이는 부분을 EDX로 분석한 결과, Y, Al, O 등의 성분이 검출되었다. 본 실험에서 소결조제로 첨가한 Y_2O_3 는 Si_3N_4 내에는 고용되지 않으므로 진한 회색부분은 Y_2O_3 성분을

포함하는 입계상(intergranular phase, 그림상에 G.B.로 표시)임을 알 수 있다. 그리고 입계상은 주로 삼중점(triple point)에 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 입계상으로 인하여 질화규소의 고온강도가 저하되는 것으로 알려져 있다. 한편, BN을 20 vol% 첨가한 시편의 경우 육각 판상의 h-BN 입자가 주로 Si_3N_4 의 결정입계에 분포함을 알 수 있었으며, Si_3N_4 와 h-BN 간의 반응에 의한 생성물들은 확인되지 않았다.

Fig. 8에 파단면의 조직을 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. h-BN을 첨가하지 않은 Si_3N_4 단미의 조직은 침

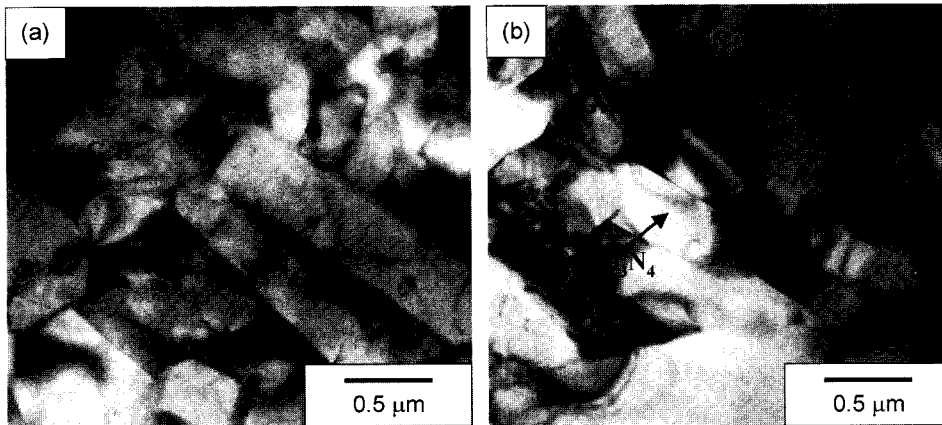


Fig. 7. TEM images (bright field mode) of Si_3N_4 monolith and Si_3N_4 -BN based ceramics. "G.B." denotes intergranular phase; (a) Si_3N_4 monolith and (b) Si_3N_4 -20 vol% BN.

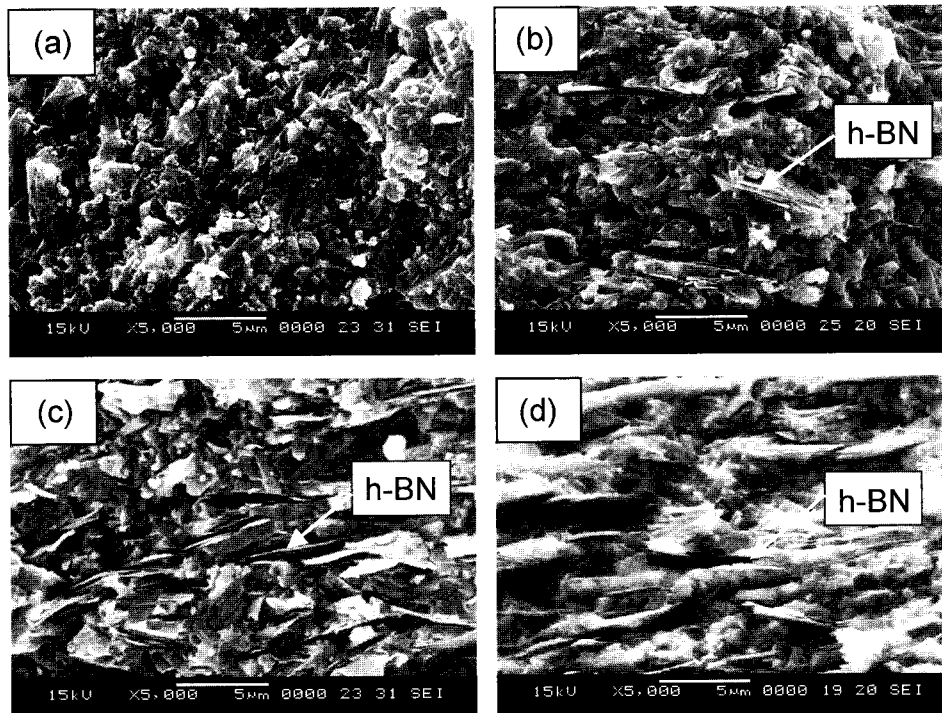


Fig. 8. SEM images of fracture surface for Si_3N_4 -BN based ceramics; (a) Si_3N_4 , (b) Si_3N_4 -10 vol% BN, (c) Si_3N_4 -20 vol% BN, and (d) Si_3N_4 -30 vol% BN.

상의 β - Si_3N_4 결정립으로 구성되어 있으며, h-BN을 첨가한 모든 조성에서는 β - Si_3N_4 결정립내에 판상의 h-BN 입자가 균일하게 분산되어 있음을 알 수 있었고, 거의 모든 판상의 h-BN 입자가 열간 가압 방향에 수직으로 배향되어 있음을 알 수 있다.

세라믹 복합재료의 인성 증진기구(toughening mechanism)로는 pull-out, 미세균열, 균열편향, 열팽창계수의 차에 기인한 매트릭스에의 압축응력 부가, 가교(bridging), 하중부담 효과 등이 있으며, 이러한 기구에 의해 균열의 전파에 따른 에너지의 소비가 증가하여 파괴인성의 증가에 기여한다. 본 실험에서 Si_3N_4 -BN계 복합재료의 파단면상에서 미세균열 등은 관찰할 수 없었다. 그리고, Si_3N_4 매트릭스에 비해 h-BN이 c축 방향으로 높은 열팽창계수를 가지며, h-BN의 낮은 탄성계수로 인해 압축응력 부가와 하중부담효과도 기대할 수 없다. Si_3N_4 -BN계 복합재료에 Vickers 균열을 도입한 후 전파 균열과 h-BN 입자와의 상호작용을 SEM으로 관찰한 결과, 판상의 입자에 의한 가교가 관찰되었다. 따라서, Si_3N_4 -BN계 복합재료의 경우 가교가 주된 인성증진기구로 작용한다고 생각된다. 한편, 본 연구에서는 파괴인성을 압자압입(IF)법으로 측정할 바, h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 균열길이 증가하여 파괴인성이 감소하는 결과를 보였으나, indentation strength 법과 같은 파괴인성 측정법을 사용한다면 판상입자의 가교 등에 의한 R-curve 거동을 나타내어 파괴인성이 증가할 것으로 판단되었다. 현재 추가실험을 수행하여 R-curve 거동을 조사하고 있으며, 추후 연구결과를 발표할 예정이다.

마지막으로, 본 실험에서 제조한 Si_3N_4 -BN계 세라믹에 대하여 절삭실험과 미세 드릴링 가공시의 절삭저항성을 조사하였다. 우선 Fig. 9에 절삭가공시의 절삭저항성을 조사한 결과를 나타내었다. h-BN을 첨가하지 않은 Si_3N_4 단미는 기계가공이 불가능하여 절삭저항성의 측정결과를 도출하지 않았다. h-BN의 함량이 증가할수록 절삭저항은 감

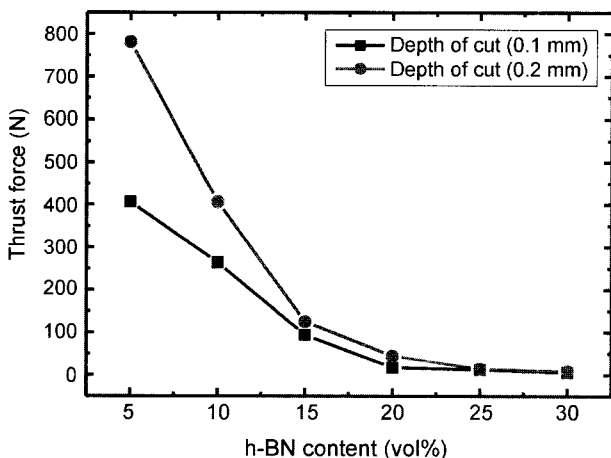


Fig. 9. Effect of h-BN content on the resistance of Si_3N_4 -BN based machinable ceramics.

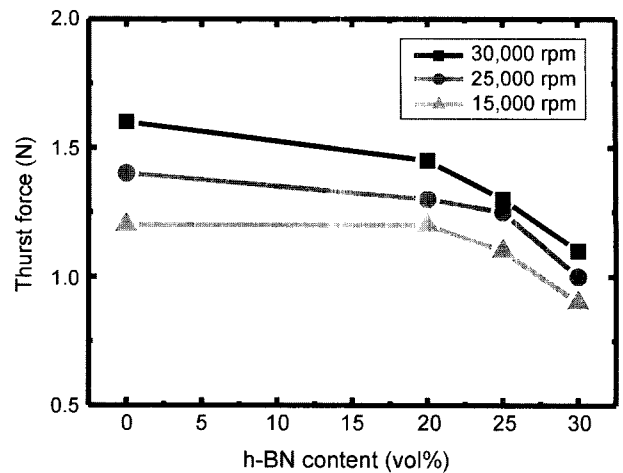


Fig. 10. Effect of h-BN content on the resistance of micro hole (diameter : 0.4 mm) drilling for Si_3N_4 -BN based machinable ceramics.

소하였다. 15 vol%까지는 절삭저항이 급격히 감소하였으나, 20 vol% 이상의 h-BN 첨가에서는 거의 일정한 절삭저항을 나타내었다. 한편, 절삭 깊이를 0.1 mm에서 0.2 mm로 증가함에 따라 저항성은 증가하였으나, 대략 15 vol% 이상의 h-BN을 첨가한 시편에서는 절삭 깊이에 따른 절삭저항은 큰 차이가 없었다. Fig. 10에는 직경 0.4 mm의 구멍을 가공하기 위한 미세드릴링 시험결과를 나타내었다. h-BN 함량이 증가함에 따라 드릴링시의 저항성은 감소하였다. 그리고, 드릴 회전속도에 따른 절삭저항은 증가하였다. 30 vol% h-BN 첨가의 경우 15000 rpm에서 30000 rpm으로 증가함에 따라 1.1 N에서 0.9 N로 감소하여 기계 가공 저항성이 감소하는 경향을 보였다. 이상의 기계 가공성 실험결과로부터 본 실험에서 제조한 Si_3N_4 -BN계 세라믹은 우수한 기계 가공성을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

Si_3N_4 -BN계 기계 가공성 세라믹에 대하여 h-BN 첨가량에 따른 기계적 성질과 미세조직, 기계 가공성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Si_3N_4 -BN계 기계 가공성 세라믹의 상대밀도는 h-BN 함량이 많을수록 감소하였으며, Si_3N_4 단미와 h-BN 함량이 5~20 vol%까지는 거의 이론밀도를 보였으며, 25 vol%와 30 vol%에서는 각각 97.1%, 96.7%의 밀도를 나타내었다. 이는 판상의 h-BN 입자가 액상소결시 입자의 재배열을 방해하기 때문으로 생각된다.

2. 3점 굽힘강도는 Si_3N_4 단미의 경우 약 1000 MPa로 높은 강도를 나타내었으나, h-BN 함량이 증가할수록 감소하였다. 경도와 파괴인성도 h-BN 함량이 증가할수록 감

소하는 경향을 보였다. 이는 h-BN 함량이 증가할수록 복합재료의 탄성계수의 감소가 주된 원인으로 생각된다. 그리고, β - Si_3N_4 의 결정립 크기와 형상비는 h-BN 첨가에 의해 약간 감소하였다.

3. h-BN 함량이 증가할수록 절삭 및 미세드릴링가공시의 저항은 감소하였고, 취성 파괴없이 가공이 가능한 우수한 절삭성을 나타내었다. 따라서, 본 실험에서 제조한 Si_3N_4 -BN계 세라믹이 우수한 기계 가공성을 나타내고 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제(R01-2001-000-00257-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. H. Kawamurs, "Key Engineering Materials," Vol. 89-91 pp. 713-18, Ed. by M. J. Hoffman, P. T. Becher, and G. Petzow, Trans Tech Publication, Brockfield. USA, 1994.
2. R. Raj, "Fundamental Research in Structural Ceramics for Service Near 2000," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** [9] 2147-74 (1993).
3. P. Blake, T. Bifano, T. Dow, and R. O. Scattergood, "Precision Machining of Ceramic Materials," *Ceram. Bull.*, **67** [6] 1038 (1988).
4. K. S. Mazdiyasi, R. Ruh, and E. E. Hermes, "Phase Analysis and Characteristics of AlN-BN Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64** [8] 1149-54 (1985).
5. D. G. Grossman, "Machinable Glass-ceramics Based on Tetrasilic Mica," *J. Am. Ceram. Soc.*, **55** [9] 446-49 (1972).
6. C. K. Chyung, G. H. Beall, and D. G. Grossman, "Microstructures & Mechanical Properties of Mica Glass-ceramics," pp. 1167-95 in *Electron Microscopy and Structure of Materials*, Ed. by G. Thomas, R. M. Fulrath, and R. M. Fisher, University of California Press, Berkeley, 1972.
7. J. S. Gam, J. S. Ha, D. S. Cheong, and K. S. Han, "Machinable and Strength of AlN-BN Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **31** [2] 177-84 (1994).
8. KS L 1591, "Testing Method for Flexural Strength (Modulus of Rupture) of High Performance Ceramics," p. 1-4 (1984).
9. K. Niihara, "Indentation Microfracture of Ceramics," *Ceram.*, **20** [1] 12-8 (1985).
10. W. S. Cho and K. Hayashi, "Effect of Uni-directional Orientation of SiC Whiskers on Pressureless-sintering Densification of SiC Whisker/ Si_3N_4 Ceramics Composite," *J. Jpn. Soc. Powder Metallurgy*, **40** [1] 16-9 (1993).
11. R. W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," 4th Ed., pp. 315-21, John Wiley Sons, Inc., New York, 1995.
12. J. F. Shackelford and W. Alexander, "Materials Science and Engineering Handbook," 3rd Ed., p. 764, CRC Press, New York, 2001.
13. J. F. Shackelford and W. Alexander, "Materials Science and Engineering Handbook," 3rd Ed., pp. 455-56, CRC Press, New York, 2001.