

# Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스의 마이크로 홀 가공특성에 관한 연구

김동우\*, 조명우#, 조원승\*\*, 이웅숙\*\*\*, 이재형\*\*\*\*

## A Study on the Micro Hole Drilling Characteristics of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-hBN Based Machinable Ceramics

Dong Woo Kim\*, Myeong Woo Cho#, Won Seung Cho\*\*, Eung Sook Lee\*\*\* and Jae Hyung Lee\*\*\*\*

### ABSTRACT

Ceramics are very difficult-to-cut materials because of its high strength and hardness. Their machining mechanism is characterized by cracking and brittle fracture. In this paper, to give good machinability to the ceramics, h-BN powders are added to Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by volume of 20, 25 and 30%. And the machinability of the produced ceramics is tested using micro drilling system. Through required experimental works, it is shown that the micro drilling machinability is varied along with the volumetric percentage of h-BN powders. Also, it is verified that the obtained results can be used to develop new machinable ceramics of good material properties and machinability.

**Key Words** : BN(boron nitride, 질화 붕소), Cutting force (절삭력), Micro drill(마이크로 드릴), Machinable Ceramics(가공성 세라믹), R-Curve(R 커브), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(질화 규소),

### 1. 서론

세라믹스는 강도, 고온에 대한 내열성, 마멸, 내부식성 등과 같이 일반적인 금속재료에 비하여 상대적으로 우수한 물리적 특성을 가지고 있어 절삭공구, 자동차의 스파크 플러그, 실린더 라이너 등과 같이 고온에서 사용되는 기계부품 외에 반도체

체 장비용 부품, 브라운관 제조용 치구 등에 있어 그 적용분야가 확대되어 가고 있다.<sup>1,2,3</sup> 그러나 금속재료에는 없는 세라믹의 우수한 특성에도 불구하고 아직까지 세라믹스의 사용용도가 광범위하지 못한 이유는 기계가공이 어렵다는 단점이 있기 때문이다.

구조용 세라믹스 제품은 통상적으로 소결에

\* 접수일 : 2003 년 5 월 26 일; 게재승인일: 2004 년 2 월 20 일

\* 인하대학교 기계공학과 대학원

# 교신저자, 인하대학교 기계공학과

Email chomwnet@inha.ac.kr Tel. (032) 860-7306

\*\* 인하대학교 재료공학부

\*\*\* 한국기계연구원 지능형 정밀기계연구부

\*\*\*\* 영남대학교 재료공학부

의한 방법으로 제조되며, 소결 방법으로 제작된 세라믹은 소결 후 발생하는 재료수축의 정도를 정확하게 예측하기가 어려우므로 제품에 요구되는 치수정밀도를 만족시키기에는 한계가 있다. 따라서 정밀한 여기에 공차를 요구하는 경우나 소결(sintering)에 의해서 최종 형상을 완성하기 어려운 경우에는 소결 후에 기계가공이 필수적이라 할 수 있다.<sup>4</sup>

그러나 기계가공에 사용되는 공구의 재질에 비하여 세라믹스의 경도와 강도가 높은 경우가 대부분이며, 세라믹스의 절삭기구(cutting mechanism)도 금속과 상이하하여 주로 취성파괴에 의하여 절삭이 진행된다. 따라서, 절삭이 전혀 진행되지 않거나, 또는 가공시에 세라믹의 취성으로 인해 균열의 전파에 의한 표면파괴가 발생하여 요구되는 품질수준을 충족시키기 어렵게 된다. 따라서 이를 해결하기 위하여 세라믹스에 가공성을 부여한 가공성 세라믹스(machinable ceramics)가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 기계 가공성 세라믹스는 운모계<sup>5-7</sup>, Al<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>계<sup>8</sup>, h-BN계<sup>9</sup> 등이 있다.

본 연구는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>에 BN(boron nitride)을 첨가하여 가공성 세라믹스를 제조하고, 이에 대하여 마이크로 드릴 가공 실험을 통하여 향후 미세가공에 적합한 가공성 세라믹스의 개발과, 관련된 최적의 가공조건을 도출하기 위한 기반기술의 개발에 목적을 두었다.

## 2. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 가공성 세라믹스

### 2.1 가공성 세라믹스의 제조

치밀화 된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-B 계 가공성 세라믹스를 제조하기 위해 실험에서 제조한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스의 매트릭스 분말로는 α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(Ube Kosan Co., E-10, α-phase > 95%, 평균 입자 크기: 0.17 μm)를 사용하였고, 소결 조재료는 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Shinetsu chemical Co., 순도 : > 99.5%, 평균 입자 크기: 0.25μm)와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(Sumitomo chemical Co., AKP-30, 순도 : > 99.99%, 평균 입자 크기 : 0.39 μm)를 사용하여 열간가압소결(1800℃×2h, 25 MPa, N<sub>2</sub>)에 의해 제조하였다. 그리고 기계가공성을 부여하기 위해 h-BN(High Purity chemicals, 순도 : > 99%, 평균 입자 크기 : 10 μm)을 첨가하였다.

Fig.1 에는 가공성 세라믹스의 제조 공정을 나타내었고 Fig. 2 에는 세라믹스를 제조하기 위한

재료분말의 SEM 사진(×5,000)을 나타낸 것으로 원료 분말인 α-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 첨가 분말인 h-BN의 형상을 나타내었다. h-BN은 Fig.2(b)에서 보는 바와 같이 판상 형태의 입자로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며 이로부터 세라믹스에 층상 벽개성을 부여하여 h-BN의 함량과 입자크기에 따라 기계가공이 결정된다.

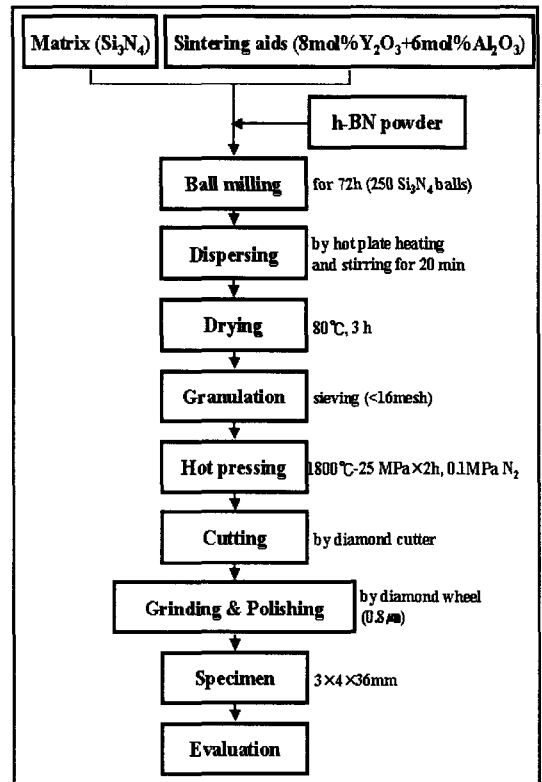
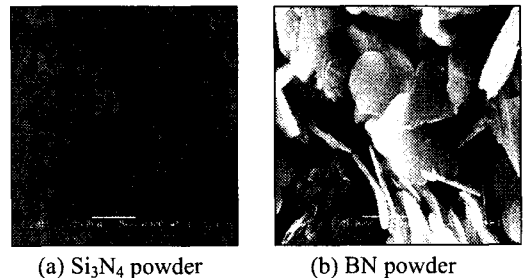


Fig. 1 Flow chart of experimental procedure



(a) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powder

(b) BN powder

Fig. 2 SEM micrographs of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> and BN powders

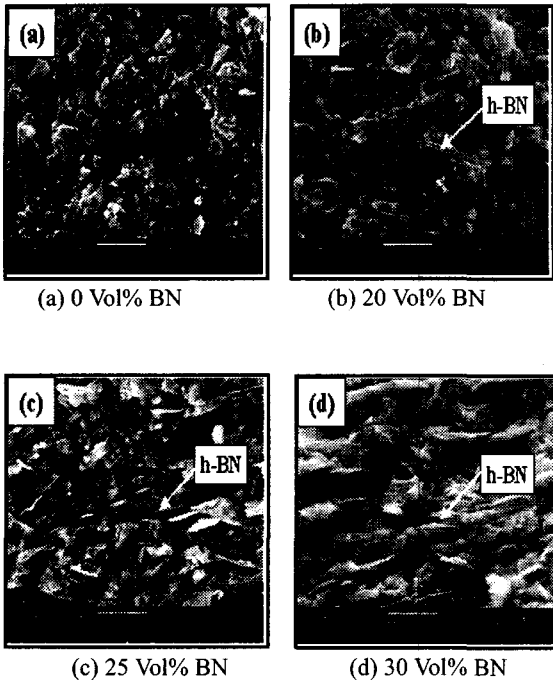


Fig. 3 SEM micrographs of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN composites

본 연구를 위하여 BN의 체적함량이 0%, 20%, 25%, 30%인 복합체를 소결을 통하여 제조하였으며, Fig.3에 각 BN 함량에 따라 제조된 가공성 세라믹스 파단 면의 SEM 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 BN의 양이 증가할수록 판상 구조가 증가하는 것을 볼 수 있다.

## 2.2. 가공성 세라믹스의 물성치

위에서 언급한 바와 같이 BN의 양이 증가하면 절삭성을 향상시키는 판상구조가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 구조용 세라믹스는 기계 등의 부품으로 사용하기 위한 것이며, 따라서, 아무리 가공성이 우수하다고 하여도 세라믹스 본연의 성질이 크게 저하되지 않아야 한다. 따라서 제조된 세라믹스에 대하여 BN 함량에 따른 상대밀도의 변화, 굽힘강도, 그리고 경도와 파괴인성을 측정하여 그림에 나타내었다.

각 조성에 있어서 이론밀도는 혼합법칙(rule of mixture)으로 구하였고, 이때 사용된 성분 물질들의 이론밀도와 열간가압 소결된 시편들의 이론밀도에 대한 퍼센트밀도 측정결과를 Fig. 4에 나타

내었다. 각 시편 SM, SB5, SB10, SB15, SB20 조성에서의 밀도측정 결과를 보면 거의 이론밀도를 보였으며 SB25와 SB30에서는 각각 97.1%, 96.7%의 밀도를 나타내었다. h-BN 입자의 첨가량이 증가함에 따라 이론밀도에 대한 퍼센트밀도는 감소하였는데, 이는 첨가한 소결조제(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)는 액상을 형성하여 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 α→β 전이와 치밀화를 돕지만 판상의 h-BN 입자가 소결시 입자 재배열을 방해하기 때문으로 생각된다.

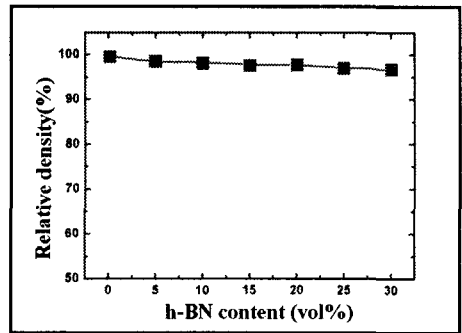


Fig. 4 Density plots of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN ceramics

Fig.5, 6는 제조된 세라믹스에 대하여 BN 함량에 따른 경도와 굽힘강도를 측정된 값을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 BN의 양이 증가할수록 기계적 특성은 저하되고 있다. 따라서, 세라믹스 본연의 특성을 크게 저하시키지 않고 가공이 가능한 BN의 함량 및 이에 따른 최적의 가공조건의 결정이 함께 이루어져야 요구하는 목적을 달성할 수 있다.

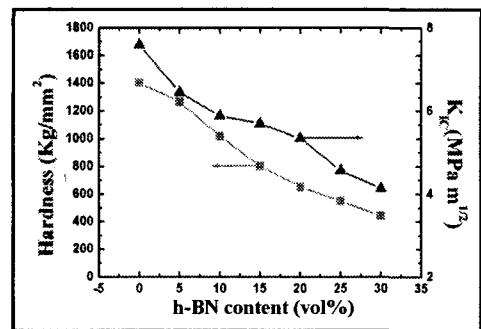


Fig. 5 Effects of BN contents on the Vickers hardness and Fracture toughness of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN ceramics

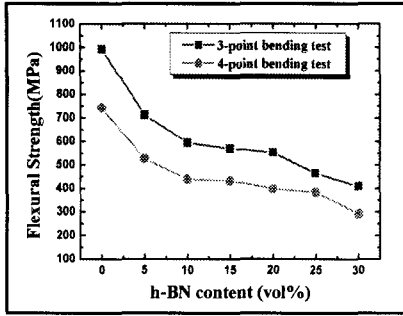


Fig. 6 Effect of BN contents on the flexural strength of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN ceramics

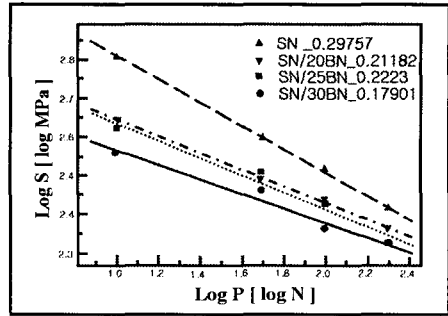


Fig. 7 Indentation strength vs indentation load of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN based machinable ceramics.

### 2.3 R-curve 거동

Fig. 7 은 제조된 가공성 세라믹스의 압입하중에 대한 압입강도를 보여준다. 균열접속이 일어남에 따라 선형 회귀법으로 구한 기울기는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 는 파괴인성이 균열성장에 따라 변함이 없는 0.33 에 가까우며, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스는 기울기가 30 vol% h-BN 일 때 0.18 로서 파괴인성이 균열성장함에 따라 증가할 것이 예상된다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 는 파단면이나 균열 전파도에서 보았듯이 균열접속의 스케일이 작아서, 작은 균열에서 이미 파괴인성이 포화 되었기 때문에 더 이상의 균열성장에 의한 파괴인성 증가는 보이지 않아서 기울기가 0.30 에 머물렀다.

Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스의 49N 의 하중 후 압입강도는 300 MPa 내외여서 98N 하중 또는 그 이상의 하중 후 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 압입강도와 비슷하거나 오히려 크다. 절삭가공에서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 는 상대적으로 매우 큰 압력을 가하며 절삭을 해야 하므로, 절삭 후 강도는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스가 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 보다 오히려 높을 수 있다. 이는 사용 중 접촉손상이 어느 정도 일어나는 환경에서는 상식과는 달리 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스가 더 강한 재료가 될 수 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8 은 압입강도 데이터를 이용하여 구한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 과 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스의 R-커브이다. 예상대로 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 는 파괴인성이 짧은 균열에서 파괴인성이 빨리 포화 되어 균열성장에 따라 파괴인성이 더 증가하지 않는다. 반면에 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스는 작은 균열에서는 파괴인성이 상대적으로 낮으나, 균열의 성장에 따라 파괴인성이 서서히 증가하여 500 μm 이상의 긴 균열에서

는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 보다 오히려 높아진다.

앞에서 언급한 바와 같이, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스가 사용 중 접촉손상이 일어나는 환경에서는 더 강한 재료가 될 뿐만 아니라 파괴인성도 높아서 내마멸 또는 내충격성이 뛰어난 재료가 될 수 있다. 뿐만 아니라 증가하는 R-커브는 본 연구의 주안점인 가공성을 높여준다. 즉, 작은 균열에서는 파괴인성이 낮아서 절삭이 용이해진다. 그러나 또 하나의 중요한 특성은 긴 균열에서의 높은 파괴인성으로서 이는 피삭체가 절삭가공 될 때 손상을 최소화할 수 있도록 제한 시킨다.

긴 균열에서의 높은 파괴 인성은 긴 균열의 발생을 막아서 절삭가공이 주로 작은 파편으로 생기게 되므로 절삭가공 후의 강도가 크게 저하되지 않게 하며 표면 거칠기를 좋게 할 것이다. 이러한 압입강도 및 R-커브 분석은 가공성 세라믹스 가공 기구를 이해할 수 있게 해주고 가공성 세라믹스의 개발 및 최적화에 매우 좋은 틀이 될 것으로 생각 된다.

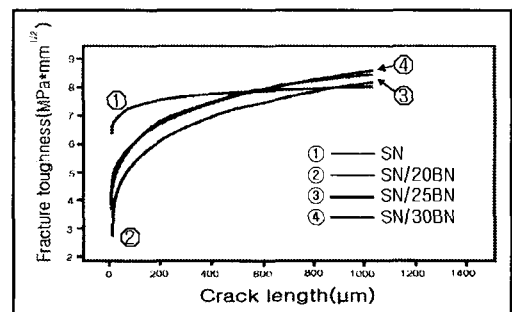


Fig. 8 R-curves of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based machinable ceramics.

### 3. 가공성 평가

#### 3.1 마이크로 드릴링 시스템

제조된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 계 가공성 세라믹스의 미세구멍에 대한 가공성 평가를 위하여 실험이 행하여졌다. Fig. 9 에 마이크로 드릴링 시스템과 절삭력을 모니터링 하기위한 구성이 개략적으로 도시되었다.

본 실험에 사용된 마이크로 드릴링 머신은 TUNGALOY 사의 SDM-01-15BF 형으로 스텝이송 구동방식을 적용하여 드릴의 파손 방지 뿐만 아니라 칩과 열의 배출을 용이하게 하고자 하였다. 또한 절삭력 측정을 위하여 KISTLER 9257A 를 사용하였으며 가공 후 피삭재의 가공상태 즉 Micro hole 의 가공구멍 확대오차는 SEM 과 측정 시스템을 사용하여 측정하였다.

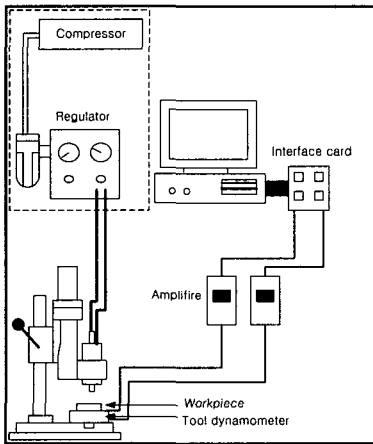


Fig. 9 Micro drilling system

#### 3.2 실험 방법 및 조건

드릴에 작용하는 힘은 크게 토크와 트러스트로 나뉜다. 그러나 본 실험에 사용된 공구 동력계로는 드릴의 반경 방향 즉 토크를 측정할 수가 없기 때문에 축방향 하중인 트러스트를 측정하여 실험결과를 분석하였다

Table 1 과 Table 2 에 실험에 사용된 가공조건을 나타내었다. 피삭재의 표면 거칠기와 표면 경화를 해결하기 위하여 피삭재를 폴리싱 하였으며, 가공한 구멍과 구멍 사이의 거리는 앞에서 뚫은 구멍의 영향을 받지 않도록 구멍 사이의 거리가 최소 10mm 이상 되도록 하였다.

미세드릴의 경우에는 드릴 직경의 미세화에 따른 강성저하로 한 스텝으로 깊은 구멍을 뚫기에는 한계가 있으며, 일반 드릴과는 달리 강성 저하로 인해 가공 구멍의 깊이가 클수록 파손의 가능성이 증가한다. 따라서 미세드릴로 깊은 구멍을 가공하기 위해서는 Fig.10 에 나타난 바와 같이 스텝 이송을 이용하여 가공하는 것이 일반적이다. 그러나 절삭저항을 감소시키기 위하여 스텝 수를 필요이상 많이 증가시키면 드릴의 수명은 증가하지만 가공능률은 현저하게 저하된다. 따라서, 절삭저항이 커지지 않는 범위 내에서 스텝 이송량을 크게 하면 드릴 수명을 향상시키고 가공능률의 저하를 막을 수 있다.

Table1 Experimental conditions for micro drilling

D(mm)	BN(%)	Step	RPM
0.15	0%	10	25,000
	20%		
	25%		
	30%		
0.25	0%	10	
	20%		
	25%		
	30%		
0.4	0%	10	
	20%		
	25%		
	30%		

Table2 Experimental conditions for micro drilling

RPM	BN(%)	Step	Feed (mm/min)
15,000	0%	10 (ratio aspect:5) Dia:0.4mm	30
	20%		
	25%		
	30%		
30,000	0%		
	20%		
	25%		
	30%		

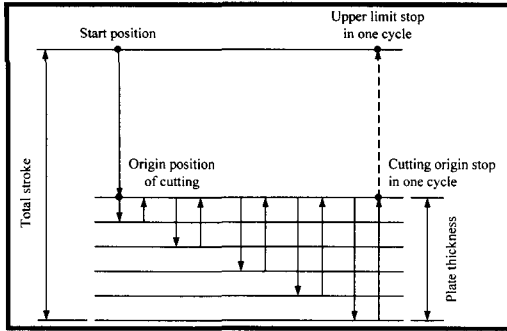


Fig. 10 Step feed diagram for micro drilling

#### 4. 실험 결과

##### 4.1 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 세라믹스의 특성 및 가공성 평가

실험조건에 따라 마이크로 드릴 실험을 하여 도출된 절삭력을 밑의 Fig. 11~13 에 나타내었다. 이는 2 장에서 나타낸 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 가공성 세라믹스의 강도와 경도 실험치와 마찬가지로 절삭력 또한 BN의 함량에 증가에 따라 감소가 되는 경향을 나타내었다.

보통 다른 세라믹스와 같은 경우에는 강도와 파괴인성 간에 서로 상반되는 변화를 보여주는데 즉, 강도를 높이면 파괴인성이 낮아지고, 파괴인성이 높으면 강도가 낮아지는 것이다. 따라서, 고강도의 세라믹스는 강한 취성을 나타내고, 보다 안정된 기계적 특성을 보이는 세라믹스는 낮은 강도를 나타내는 것이다. 하지만 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 세라믹스의 경우 BN의 함량 증가에 따라서 저강도와 낮은 파괴인성을 보이는데 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 강도가 감소하는 이유를 판단하자면, 탄성계수(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> : 300 GPa, h-BN : 41~103 GPa)가 상대적으로 낮은 h-BN 입자의 함량이 증가함에 따른 탄성율의 감소와 h-BN 입자의 첨가량이 증가함에 따른 응집된 h-BN 입자들이 존재할 가능성의 증가에 따른 균열길이의 증가 등 여러 가지 복합적인 원인에 기인한다고 생각된다.

또 다른 이유는 열팽창계수 차이로 인한 균열 길이가 축과 수직인 h-BN 과 매트릭스 계면에서의 잔류 인장응력의 영향과 미약하기는 하지만, 소결 밀도의 감소에 따른 기공율 증가도 강도가 감소하는 원인이 된다고 생각된다.

파괴인성도 0% BN의 경우에 7.58 MPa·m<sup>1/2</sup>의 높은 값에서 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 h-BN의 벽개성에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 미세균열이 판상의 h-BN 입자의 벽개면을 따라 전파되기 쉬워짐을 의미한다.

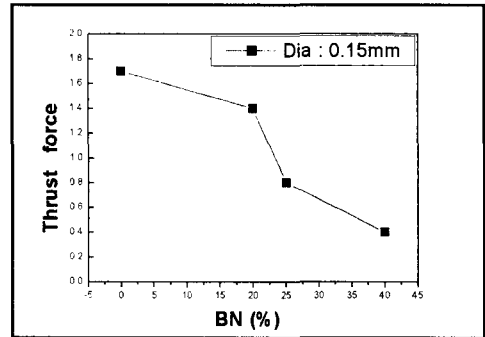


Fig. 11 Thrust force variation (Dia: 0.15mm)

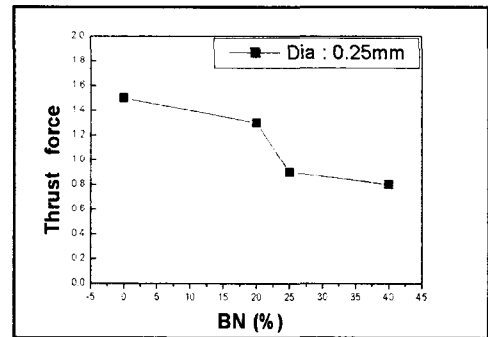


Fig. 12 Thrust force variation (Dia: 0.25mm)

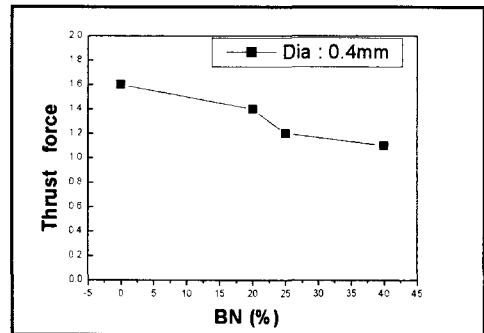


Fig. 13 Thrust force variation (Dia: 0.4mm)

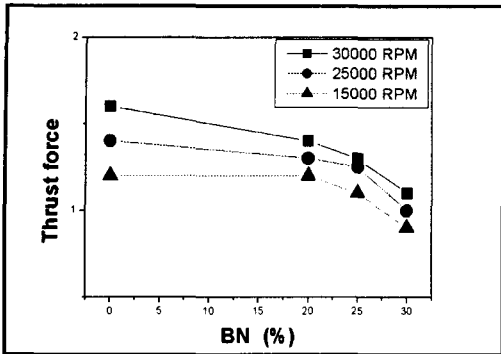
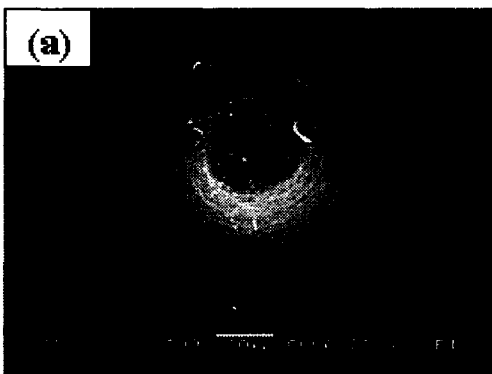


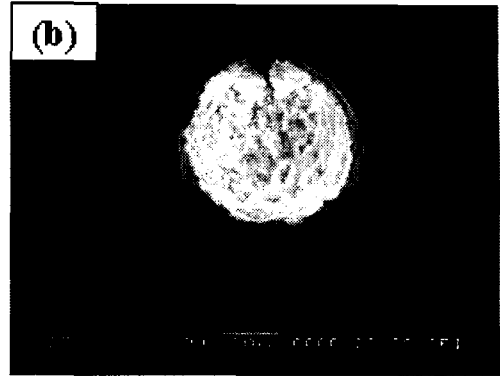
Fig. 14 Thrust force variation according to RPM (Dia.: 0.4mm)

#### 4.2 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-BN 세라믹스의 가공면의 관찰

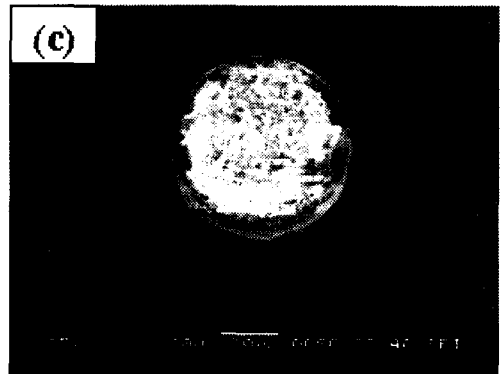
주사전자 현미경(SEM)을 사용하여 가공 형상을 촬영하여 Fig.15 에 나타내었으며 Vision 측정 시스템을 이용하여 가공된 구멍의 진원도 및 직경을 측정하여 Fig. 16 에 나타내었다. BN의 함량이 적을 수록 가공된 면의 구멍의 직경과 진원도가 점점 커지는 것을 관찰할 수 있다. 특히 BN 함량이 0%인 경우 드릴이 주어진 가공 깊이만큼 진입을 하지 못할 뿐만 아니라 가공된 구멍의 크기 및 진원도가 상당히 나쁜 반면에 BN의 함량이 25% 이상인 경우 좋은 가공 형상을 얻었다. 이는 BN g 함량이 0%인 경우 제조된 가공성 세라믹의 높은 강도와 경도로 인하여 미세 드릴의 초기 가공 진입시 wandering 현상이 크게 발생하여 구멍의 가공 확대 오차 및 진원도를 증가시킨다고 사료된다.



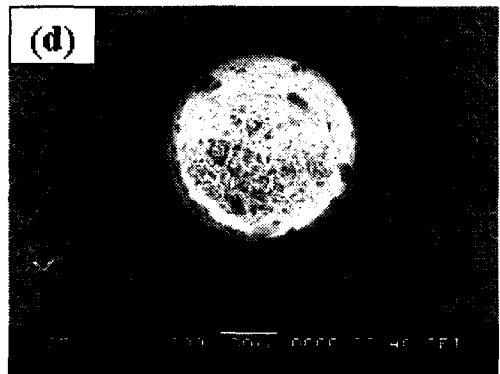
(a) 0 Vol% BN  
(Hole size = 0.230mm, Roundness = 0.0314)



(b) 20 Vol% BN  
(Hole size = 0.183mm, Roundness = 0.0307)

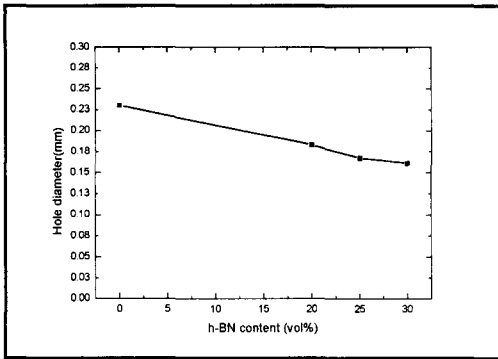


(c) 25 Vol% BN  
(Hole size = 0.167mm, Roundness = 0.0297)

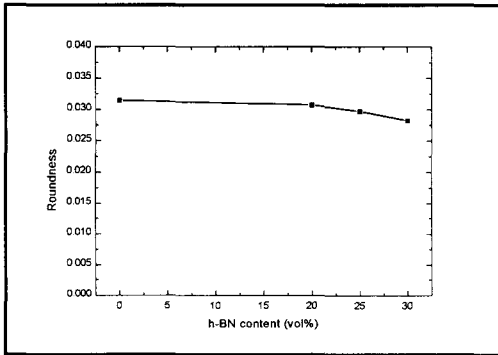


(d) 30 Vol% BN  
(Hole size = 0.161mm, Roundness = 0.0282)

Fig. 15 Micrographs of machined micro holes



(a) Variation of machined hole diameter



(b) Variation of roundness

Fig. 16 Variations of hole size and roundness

### 5. 결론

본 연구에서는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  에 가공성을 부여하기 위해 h-BN 을 복합한  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 기계 가공성 세라믹스를 열간가압소결(1800°C-25MPa×2h, 0.1MPa N<sub>2</sub>)에 의해 제조하였다. h-BN(Vol) 함량을 각각 0%, 20%, 25%, 30%로 조성을 변형시켜 마이크로 드릴을 이용  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 가공성 세라믹의 미세 조직 및 기계 가공성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 기계 가공성 세라믹스의 이론밀도에 대한 퍼센트밀도는 h-BN 함량이 많을수록 감소하였으며,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monolith 와 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 액

상소결시 입자의 재배열을 방해하기 때문으로 생각된다.

- $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 기계 가공성 세라믹스의 3 점 굽힘 강도는  $\text{Si}_3\text{N}_4$  monolith 의 경우는 약 1GPa 로서 높은 강도를 나타내었으나, h-BN 함량이 증가할수록 감소하였다. 경도와 파괴인성도 h-BN 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 h-BN 함량이 증가할수록 판상의 h-BN 입자의 벽개면을 따라 미세균열이 용이하게 전파되는 것을 의미하며 탄성율의 감소도 원인이 된다.
- $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 기계 가공성 세라믹스의 기계적 성질에 영향을 미치는 인자로는, 상대밀도(Ds), 강도(FS), 경도(Hv),  $\text{Si}_3\text{N}_4$  의 결정립의 크기,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  와 h-BN 결정립의 배향 이방성 등이 있음을 알 수 있다.
- $\text{Si}_3\text{N}_4$ -BN 계 기계 가공성 세라믹스는 h-BN 함량이 증가할수록 절삭력은 감소하였고, 파괴되는 일이 없이 가공이 가능한 우수한 절삭성을 나타내었다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2001-000-00257-0) 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

- Kawamura, H., "Key of Engineering Materials," Edited by Hoffman, M. J., Becher, P. T., and Petzow, G., Trans Tech Publication, Brockfield., Vol. 89, pp. 713-718, 1994.
- Raj, R., "Fundamental Research in Structural Ceramics for Service Near 2000°C," J. Am. Ceram. Soc., Vol. 76, pp. 2147-2174, 1993.
- Park, J.S., Kim, K. J., Shim, W. H., Kwon, W. T. and Kim, Y.W., "Cutting Characteristics of SiC-based Ceramic Cutting Tools, Part 1: Microstructure and Mechanical Properties of SiC-based Ceramic Cutting Tools," J. of the KSPE, Vol. 9, pp. 82-83, 2001.
- 什郷康生., "セラミックス研削におけるダイヤモンド砥石の選擇と使用法," 機械技術., Vol. 36, pp. 69-75, 1991.
- Chyung, K. and Grossman, G., "Fluorophlogopite Mica Glass Ceramics," Tenth International Congress



- on Glass, pp. 33-40, 1974.
6. Beall, G. H., "Structure, Properties and Applications of glass Ceramics," *Advances in Nucleation and Crystallization in Glasses*, Am. Ceramic Society, pp. 251-261, 1972.
  7. Chyung, C. K., Beall, G. H. and Grossman, D. G., "Microstructure and Mechanical Properties of Mica Glass-Ceramics," University of California Press, California, pp. 1167-1194, 1972.
  8. Ohya, Y., Hamano, K. and Nakagawa, Z., "Effect of some Additives on Microstructure and Bending Strength of Aluminum Titanate Ceramics," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 70, pp. 184-166, 1987.
  9. Mazdiyasi, K. S., Robert, R. and Edward, E. H., "Phase Characterization and Properties of AlN-BN composites," *Am. Ceram. Soc.*, Vol. 64, pp. 1149-54, 1985.