한국공작기계학회논문집 Vol.13 No.2 2004. 4.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

파우더 블라스팅에 의한 Si_3N_4-hBN계 머시너블 세라믹스의 미세패턴 가공성 평가

박동삼*, 조명우+, 김동우++, 조원승+++

(논문접수일 2003. 6. 12, 심사완료일 2003. 9. 15)

Micro-Pattern Machining Characteristics Evaluation of Si_3N_4-hBN based Machinable Ceramics Using Powder Blasting Process

Dong Sam Park*, Myeong Woo Cho+, Dong Woo Kim++, Won Seung Cho+++

Abstract

Sandblasting has recently been developed into a powder blasting technique for brittle materials. In this study, the machinability of Si_3N_4-hBN based machinable ceramics are evaluated for micro - pattern making processes using powder blasting. Material properties of the developed machinable ceramics according to the variation of h-BN contents give a good machinability to the ceramics. The effect of scanning times, the size of patterns and variation of BN contents on the erosion depth of samples without mask and samples with different mask patterns in powder blasting of Si_3N_4-hBN ceramics are investigated. The Parameters are the impact angle of 90°, the scanning times of nozzle up to 40, and the stand-off distances of 100mm. The widths of masked pattern are 0.1mm, 0.5mm and 1mm. The powder used is Alumina particles, WA#600. and the blasting pressure of powder is 0.2MPa. Through required experiments, the results are investigated and analyzed. As the results, the machinability of the developed ceramics increases as the BN contents in the ceramics.

Key Words : Powder Blasting, Machinability(가공성), Machinable Ceramics, Masking Process(마스킹 공정) Erosion Depth

1. 서 론

질화규소(Si_3N_4)는 강도, 경도, 화학적 안정성, 내열충격성, 고온강도, 내마모성, 내식성이 우수하며 낮은 열팽창계수를 가지고 있고, 기존의 금속재료에 비하여 고온에서 사용할 수 있기 때문에 고온 구조용 재료로서 적용범위가

* 주저자, 인천대학교 기계공학과 (dspark@incheon.ac.kr)
주소: 402-749 인천 남구 도화동 177
+ 인하대학교 기계공학부
++ 인하대학교 기계공학과 대학원
+++ 인하대학교 재료공학부

넓다. 현재 Si_3N_4는 자동차의 엔진부품, 절삭공구, 베어링, 고온 에너지 변환장치 및 자동차 부품과 항공우주용 구조재료 등의 각종 분야에 응용되어 상업화되고 있다[1,2]. 그러나, 고온 구조용 세라믹의 사용범위가 확대됨에 따라 제품의 치수정확도에 대한 요구수준이 높아지게 되었으며, 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 기계적 가공에 의한 정밀도 향상이 필수적이라 할 수 있다. 그러나, 질화규소는 일반적인 세라믹스의 특성인 취성으로 인해 기계 가공 시 균열전파에 의한 파괴가 발생하므로, 기계 가공 시 요구되는 기술수준이 높아야 하고 고가의 부가장비가 필요하게 되어 가공에 따른 세라믹스의 단가를 높이는 원인이 되고 있다[3]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 머시너블 세라믹스(machinable ceramics)에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[4-6]. 머시너블 세라믹스로 널리 이용되는 재료는 판상의 h-BN 입자들의 벽계성을 이용한 Si_3N_4-BN계[6,7], 운모결정의 벽개성을 이용한 운모-유리 세라믹계[8,9] 등이 있다.

1920년대에 미국에서 천연운모를 저융점 유리에 결합시킨 운모계 세라믹[10]으로 시작되어, 1970년대에 들어서 불소 금운모를 석출시킨 결정화 유리의 개발 이후 본격적으로 연구가 활발히 진행되어 초기에는 운모-유리 결합제, 운모-소결체, 운모-인산염 결합체 등에 관한 연구가 행해졌고, 결정화법에 의한 머시너블 세라믹스의 개발이 이루어진 후 많은 연구가 수행되고 있다[11-13].

한편, 국내의 연구동향을 살펴보면, AlN-BN계[13], Si_3N_4-BN계[7], 국내산 납석을 이용한 머시너블 세라믹스[14]에 대한 연구결과를 발표한 바 있으나, 지속적인 연구는 수행되고 있지 않다. 국내에서는 머시너블 소재의 제조공정, 가공평가기술 등의 원천기술의 축적이 선진국에 비해 매우 취약한 실정이며, 정밀 기계용 부품, 반도체 장비용 부품, 브라운관 제조용 치구 등에 응용되는 고부가가치의 머시너블 세라믹스 소재는 외국으로부터 전량 고가로 수입되고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구는 Si_3N_4-hBN계 가공성 세라믹스를 개발하고, 파우더 블라스팅(Powder blasting)에 의한 미소패턴을 가공할 때 h-BN 함량에 따른 가공성의 차이를 평가하는데 목적을 두었으며, 이를 위하여 h-BN의 함량에 따라서 마스크 패턴의 크기 및 형상, 노즐의 주사회수 등이 미소패턴의 가공효율에 미치는 영향을 분석하고자 수행되었다.

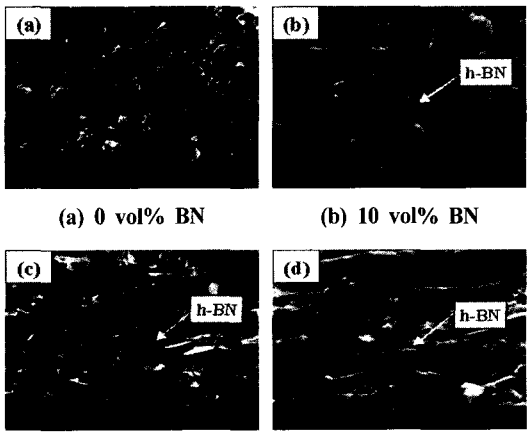
2. Si_3N_4-hBN계 머시너블 세라믹스의 특성 분석

2.1 머시너블 세라믹스의 제조

본 실험에 사용된 소재는 고온구조용 재료로 적용범위가 넓은 Si_3N_4-hBN계 세라믹스이며, 치밀화 된 Si_3N_4와 Si_3N_4-hBN계 머시너블 세라믹스를 제조하기 위해 실험에서 제조한 Si_3N_4-BN계 머시너블 세라믹스의 매트릭스 분말로는 α-Si_3N_4(Ube Kosan Co., E-10, α-phase＞95%, 평균 입자크기: 0.17㎛)를 사용하였고, 소결조제로는 Y_2O_3(Shinetsu chemical Co., 순도: ＞99.5%, 평균입자크기: 0.25um)와 Al_2O_3(Sumitomo chemical Co., AKP-30, 순도: ＞99.99%, 평균 입자 크기: 0.39㎛)를 사용하여 열간가압소결(1800℃ ×2h, 25㎫, N_2)에 의해 제조하였다. 그리고 기계가공성을 부여하기 위해 h-BN(High Purity chemicals, 순도: ＞99%, 평균 입자 크기: 10㎛)을 첨가하였다. h-BN은 흑연과 유사한 구조를 가지며, 전기절연성이 높고 내열 및 내식재료, 전기절연재료로 사용되는데 판상입자들의 벽개성 때문에 절삭공구의 선단에서 발생한 균열이 내부로 진행되지 않아 뛰어난 기계가공성을 나타낸다[6]. Fig. 1은 세라믹스를 제조하기 위한 원료 분말인 α-Si_3N_4와 첨가 분말인 h-BN의 SEM 사진(×5,000)을 나타낸 것이며, h-BN은

(a) Si_3N_4 powder (b) h-BN powder

Fig. 1 SEM photograph of Si_3N_4 and h-BN



(a) 0 vol% BN (b) 10 vol% BN

(c) 20 vol% BN (d) 30 vol% BN

Fig. 2 SEM photographs of fracture surface in each specimen

Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이 판상 형태의 입자로 구성되어 있는 것을 알 수 있으며, 이로부터 세라믹스에 층상 벽개성을 부여하여 h-BN의 함량과 입자크기에 따라 기계가공성이 달라지게 된다.

실험을 위하여 BN의 체적함량이 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%인 복합체를 소결을 통하여 제조하였으며, Fig. 2에 BN 함량에 따라 제조된 머시너블 세라믹스 파단 면의 SEM 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 BN의 양이 증가할수록 판상 구조가 증가하는 것을 볼 수 있다.

2.2 머시너블 세라믹스의 물성치

그림으로부터 h-BN의 양이 증가하면 가공성을 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 굽힘강도(Fig. 3), 경도와 파괴인성(Fig. 4)을 측정하여 그림으로 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 h-BN의 양이 증가할수록 기계적 특성은 저하되고 있다. 따라서, 세라믹스 본연의 특성을 크게 저하시키지 않고 가공이 가능한 h-BN의 함량 및 이에 따른 최적의 가공조건의 결정이 함께 이루어져야 요구하는 목적을 달성할 수 있다.

3. 파우더 블라스팅에 의한 미세패턴 가공성 평가

3.1 파우더 블라스팅 가공의 개요

파우더 블라스팅은 종래에 표면의 페인트 제거나 디버링(deburring) 및 유리장식에 사용되어져 오던 sand blasting 기법이 발전된 형태로서 최근 유리나 실리콘 및 세라믹 등 경취재료의 미세가공에 널리 사용되고 있다[15-18]. 이 가공법은 고압의 가스에 의하여 가속된 수 ㎛~수십 ㎛의 미립분사재(micro abrasive)들을 노즐로부터 고속으로 분사하고 이들의 충격력으로 재료에 미세한 크랙을 발생시켜 가공하는 기계적 에칭(mechanical etching)의 일종이다. Powder blasting의 기본원리를 Fig. 5에 나타내었다. 분사재는 입자의 크기가 3-30㎛인 알루미나를 주로 사용하는데 입자들은 노즐에서 1-5기압의 공기로 가속되어 약 80-200m/sec의 속도로 공작물에 충돌되면서 표면 가공을 일으키게 된다. 가공을 원하지 않는 부분은 설계된 패턴형상을 갖는 마스크(mask)로 보호를 한 상태에서 가공하게 되는데, 노즐을 좌우 혹은 전후로 스캐닝하면 아주 미소하거나 복잡한 형상뿐

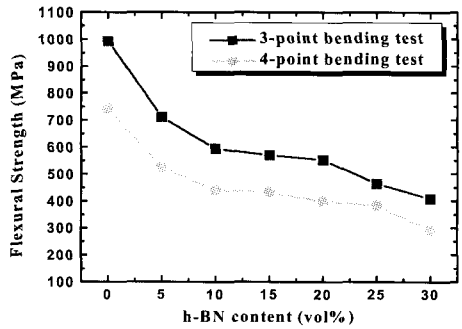


Fig. 3 Effect of h-BN content on the flexural strength of various specimens and fracture toughness for various specimens

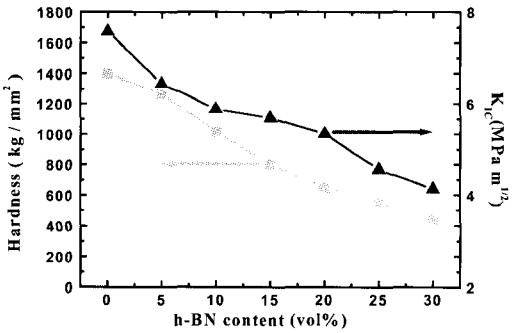


Fig. 4 Effect of h-BN content on Vickers hardness and fracture toughness for various specimens

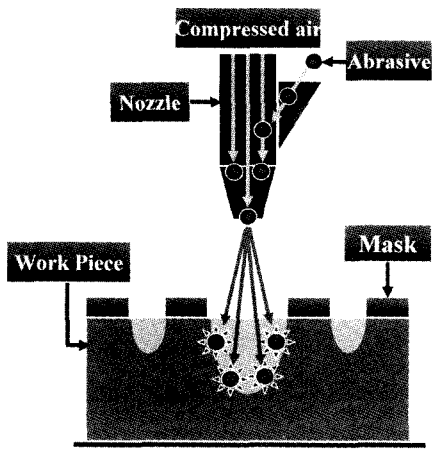


Fig. 5 A schematic principle of powder blasting

만 아니라 높은 세장비(aspect ratio)의 부식도 가능하게 된다. 가공의 깊이는 스캐닝 횟수를 조절하여 제어가 가능하다.

3.2 시편의 제작

분사회수가 표면 가공에 미치는 양향을 조사하기 위하여 두 단계의 실험을 수행하였다. 첫 단계 실험은 마스크가 없는 평면형상의 시편에 대하여 가공성을 분석하였으며, 두 번째 단계의 실험에서는 0.1mm 두께의 마스킹용 필름인 Ordyl BF410(일본)을 사용한 마스크가 있는 시편에 대한 가공성을 조사하였다. 직경 혹은 폭이 0.1, 0.5 및 1mm인 직선, 정사각형 및 원형의 3종류의 패턴 마스크를 갖는 Fig. 6과 같은 시편을 사용하였다. Fig.은 원과 선 및 정사각형의 3종류 패턴을 모두 포함하고 있는 한 시편의 형상을 나타낸 것이며, Fig. 7(a-c)는 각 패턴의 대표적 형상을 확대하여 나타낸 것으로 패턴의 경계부 마스킹이 완벽하지 않음을 보여주고 있다.

한편, 사용된 세라믹 시편의 성분조성은 Si_3N_4 86mol%, Y_2O_3 8mol%, Al_2O_3 6mol%로 일정하며 마스크가 없는 시편의 경우 BN은 0~30vol%로, 마스크가 있는 시편은 10, 15 및 20vol%인 것을 사용하였다.

3.3 실험 장치 및 조건

모든 실험은 일본의 Sintobrator에서 제작 MICRO BLASTER (type MB1)을 사용하여 수행되었다. 노즐은 알루미나 재질로 내경이 8mm인 원통형상이며 사용된 미립 분사재는 알루미나의 일종인 WA#600이다. 분사재의 공급은 150g/min으로, 분사압력은 0.25MPa로 일정하게 유지하였다. 실험조건은 Table 1에 요약하여 나타내었다.

첫 번째 단계의 실험에서 분사재는 Fig. 8(a)와 같이 전체의 시편표면에 분사되며 두 번째 단계 실험에서는 Fig. 8(b)와 같이 노즐의 중심선이 마스크 패턴의 중심선에 일치하도록 분사되게 하였다.

3.4 측정

마스킹이 없는 시편에 대한 제거 깊이는 버니어캘리퍼스를 사용하여 초기 상태와 가공 후의 시편 두께로부터 산출하였다. 마스킹을 한 시편에 대한 패턴의 가공 깊이는 Veeco사의 박막두께 측정기(DEKTAK 3)를 이용하여 구하였으며 파우더 블라스팅 가공 전 시편의 마스킹 상태나 가공 후 시편의 단면 형상은 HIROX사의 미세영상 시스템(KH1000)을 사용하여 관찰하였다.

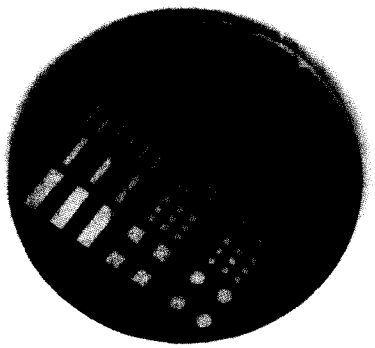
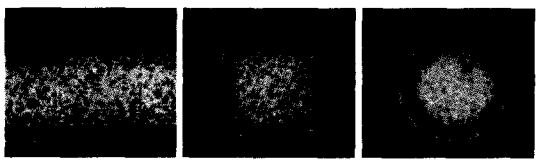


Fig. 6 A masked sample including 3 patterns

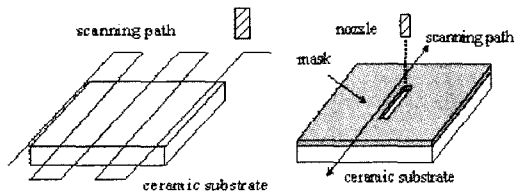


(a) Line-type (b) Square-type (c) Dot-type

Fig. 7 Masked patterns for powder blasting

Table 1 Experimental conditions

Powder material	WA #600
Impact angle(°)	90
Scanning speed(mm/s)	50
Scanning path interval(mm)	5
Mass flow rate of powder(g/min)	150
Blasting pressure(MPa)	0.25
Stand-off distance(mm)	100
Scanning times	10, 20, 30



(a) Without mask (b) With mask

Fig. 8 Nozzle scanning path

4. 실험결과 및 고찰

4.1 평면가공실험

마스킹이 없는 상태에서 개발 세라믹의 BN 성분별 각 시편에 대한 파우더 블라스팅 가공실험을 수행하였다. 시편의 BN 성분비(vol%)가 각각 0, 5, 10, 15, 20, 25 및 30인 시편에 대하여 노즐의 주사횟수를 10회, 20회 및 30회로 변화시키면서 세라믹의 제거 깊이를 분석한 결과를 Fig. 9와 같이 나타내었다. BN함량이 0%일 경우는 거의 가공이 일어나지 않았으며 BN함량이 증가함에 따라 동일 주사횟수에 대하여 제거 깊이가 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다. 특히 주사횟수가 많을수록 제거 깊이는 더 크게 증가하고 있다. 이러한 결과는 BN 함량이 증가할수록 가공성이 증가한다는 것을 의미한다.

4.2 마스킹 시편의 가공성

도트의 직경과 직선 홈 및 정사각형 패턴의 폭이 포켓의 폭이 각각 500㎛이고 BN 함유량이 15%인 Fig. 7의 마스킹 시편에 대하여 노즐의 주사 횟수를 10회로 했을 때 가공 후의 시편형상을 3D Micro-Vision System으로 촬영한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 각 패턴에서 목표로 하였던 형상이 거의 정확하게 가공되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 Fig. 7(b)의 선형 홈 패턴에 대하여 박막두께 측정기를 사용한 단면 측정결과를 도시한 그림으로 가공 깊이는 약 15㎛으로 나타나고 있다. 단면의 형상은 정확한 직각면은 아닌데 이는 파우더 블라스팅의 가공 기구상 피할 수 없는 현상으로 파우더 블라스팅을 이용한 미세가공 시 하나의 제약요건이 됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 각 패턴 형상에 대하여 BN의 함량 변화에 따른 가공 깊이를 나타낸 그림이다. 모든 패턴형상에 대하여 BN 함량이 커질수록 가공 깊이 또한 거의 비례하여 커지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 각 패턴의 크기는 가공 깊이에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있는데 전반적으로 패턴의 크기가 증가할수록 가공 깊이는 커진다. 이는 blast lag 현상에 기인하는 것으로 패턴형상이 커질수록 가공 깊이가 커진다는 기존의 연구결과와 어느 정도 잘 일치하고 있다.

이러한 실험결과로부터 파우더 블라스팅에 의한 머시너블 세라믹스의 가공이 일반적인 형태의 평면연마뿐만 아니라 100㎛ 정도까지의 미세패턴까지도 충분히 가공할 수 있다는 것을 알 수 있으며, 가공성은 BN의 함량이 커질수록 양호해지는 경향을 보였다.

따라서, 미세형상이나 패턴의 정밀 미세가공에 큰 어려움을 겪던 세라믹을 대체하여 머시너블 세라믹스의 활용분야가 크게 확대될 것으로 보이며, 앞으로는 실제의 부품에 대한 적용 연구가 요구된다고 할 수 있다.

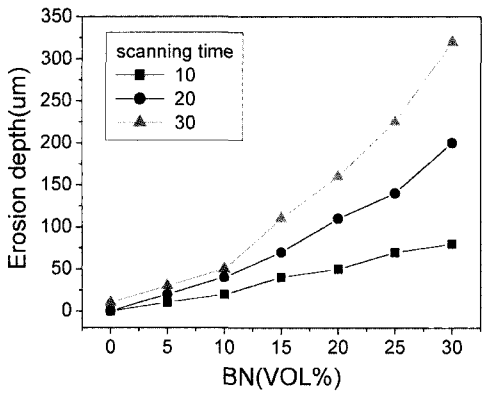
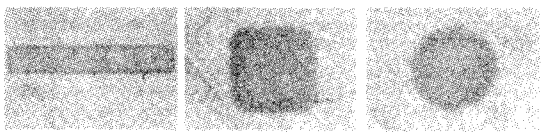


Fig. 9 Variation of errosion depth



(a) Line-type (b) Square-type (c) Dot-type

Fig. 10 Pattern shape generated by powder blasting (15 Vol% BN, pattern dimensions 500㎛)

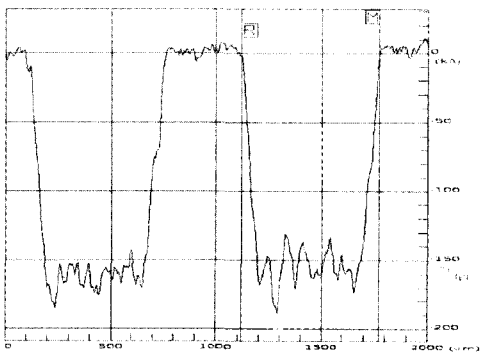
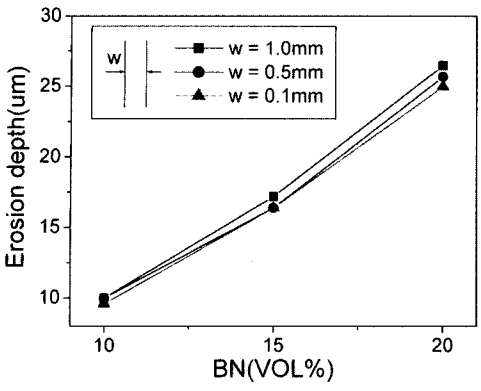
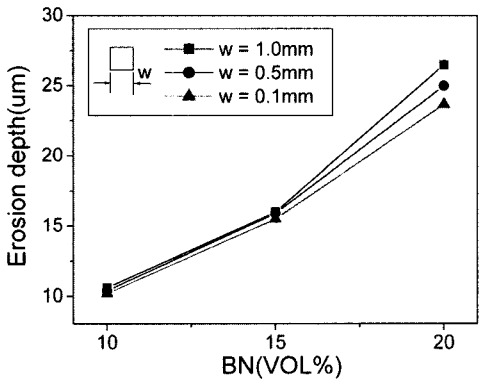


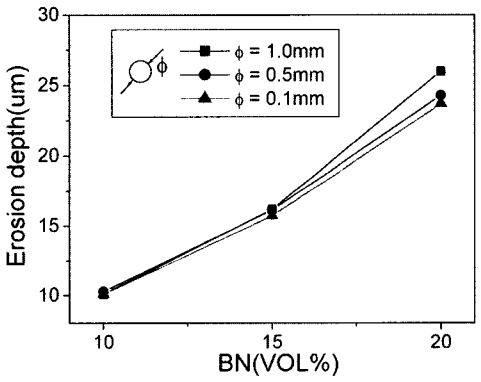
Fig. 11 Cross section of line-type groove (BN 15Vol%, groove width 500㎛)



(a) Line-type groove



(b) Square-type pocket



(c) Dot-type pocket

Fig. 12 Effect of BN contents(Vol%) on the erosion depth(Nozzle scanning times=10)

5. 결 론

본 연구에서 경취재료의 패턴가공 혹은 3차원 미세성형 가공에 주로 응용되고 있는 파우더 블라스팅을 이용하여 열간가압소결에 의하여 제작된 Si_3N_4-hBn계 머시너블 세라믹스의 가공성 평가를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마스크가 없는 시편에서 BN함량이 0%일 경우는 거의 가공이 일어나지 않았으며 BN 함량이 증가함에 따라 동일 주사횟수에 대하여 제거 깊이가 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있었다.

(2) 머시너블 세라믹스에 대한 마스킹 작업이 효율적으로 가능하다는 것을 확인하였다.

(3) 마스크가 있는 3종류의 패턴 형상에 대하여 BN 함량이 커질수록 가공 깊이는 거의 직선적으로 비례하여 커짐을 알 수 있었다. 그러나, 각 패턴의 크기는 가공 깊이에 거의 영향을 미치지 않았다.

(4) 직경이나 폭이 0.1mm까지의 미세패턴까지도 정밀 미세가공이 가능함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구비 지원(R01-2001-000-00257-0)으로 수행된 연구의 일부입니다.

참 고 문 헌

(1) Hoffman, M. J., Becher, P. F., and Petzow, G., 1994, *Silicon Nitride '93, Published in Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Inc., Uetikon-Zurich, Switzerland, pp. 713～718.

(2) Raj, R., 1993, "Fundamental Research in Structural Ceramics for Service Near 2000℃", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 76, No. 9, pp. 2147～2174.

(3) Blake, P., Bifano, T., Dow, T., and Scattergood, R. O., 1988, "Precision Machining of Ceramic Materials", *Ceramic Bulletin*, Vol. 67, No. 6, p. 1038.

(4) Chyung, K., Beall, G. H., and Grossman, D. G., 1974, "Fluorophlogopite Mica Glass Ceramics", *Tenth International Congress on Glass*, pp. 33～40.

(5) Ohya, Y., Hamano, K., and Nakazawa, Z., 1987, "Effect of some Additives on Microstructure and Bending Strength of Aluminum Titanate Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 70, No. 8, pp. 184～186.

(6) Mazdiyasni, K. S., Ruh, R., and Hermes, E. E., 1985, "Phase Characterization and Properties of AlN-BN composites", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 64, No. 8, pp. 1149～1154.

(7) Lee, K. S., Lee, S. K., and Kim, D. K., 1998, "Quasi-Plasticity of Si3N4-BN Composites", *The Materials Research Society of Korea*, Vol. 8, No. 3, pp. 84～89.

(8) Komeya, K., Inoue, H., and Tsuge, A., 1974, "Role of Y2O3 and SiO2 Additions in Sintering of AlN", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 57, No. 9, pp. 411～412.

(9) Schwetz, K. A., Knoch, H., and Lipp, A., 1983, "Sintering of Aluminum Nitride with Low Oxide Addition", *Progress in Nitrogen Ceramics*, Ed. by F.L. Riley, Martinus Nijhoff, The Hague, Netherland, pp. 245～252.

(10) Taimon, S., 1980, "Composition mica-machinable ceramics-", *Ceramics*(Japanese), Vol. 15, No. 3, pp. 156～159.

(11) Chyung, C. K., 1969, "Secondary Grain Growth of Li2O-Al2O3-SiO2-TiO2 Glass Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 52, pp. 242～245.

(12) Suzuki, S. S., Taruta, S., and Takusagawa, N., 1998, "Sintering and Microstructure of Alumina/ Mica and Spinel/Mica Composites", *The Korean Journal of Ceramics*, Vol. 4, No. 4, pp. 363～367.

(13) Baik, D. S., No, K. S., and Chun, J. S.-S., 1995, "Mechanical Properties of Mica Glass-Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 78, No. 5, pp. 1217～1222.

(14) Kim, j. S., Ha, J. S., Chung, D. S., and Han, K. S., 1994, "Machinability and strength of AlN-BN Ceramics", *Journal of the Korea Ceramic Society*, Vol. 31, No. 2, pp. 177～184.

(15) Choi, J. S., Park, K. H., and Park, D. S., 2001, "Micro Grooving of Glass Using Micro Abrasive Jet Machining", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 178～183.

(16) Wensink, H., Berenshot, U. W., Jan seu H. V., and Elwenspoek, M. C., 2000, "High Resolution Powder Blast Micromachining", *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) 2000*, pp. 769～774.

(17) Ligthart, H. J., Slikkerveer, P. J., In't Verd, F. H., Swinkels, P. H. W., and Zonneveld, M. H., 1996, "Glass and Glass Machining in Zeus Panels", *Philips J. Res.*, Vol. 50, No. 3/4, pp. 475～499.

(18) Solignac, D., Sayah, A., Constantin, S., Freitag, R., and Gijs, M. A. M., 2001, "Powder blasting for the realization of microchips for bio-analytic applications", *Sensor and Actuators*, A3003, pp. 1～6.