

# 절삭 선단의 축 방향 경사각이 가공성 세라믹에 미치는 영향

장성민<sup>†</sup> · 윤여권<sup>\*</sup>

유한대학 기계과 · \*유한대학 기계설계과  
(2008. 2. 1. 접수 / 2009. 4. 6. 채택)

## Effect on Axial Rake Angle of Cutting Edge for Machinable Ceramics

Sung-Min Jang<sup>†</sup> · Yeo-Kwon Yun<sup>\*</sup>

Department of Mechanical Engineering, Yuhan College

\*Department of Mechanical Design, Yuhan College

(Received February 1, 2008 / Accepted April 6, 2009)

**Abstract** : The machining process of ceramics can be characterized by cracking and brittle fracture. In the machining of ceramics, edge chipping and crack propagation are the principal reasons to cause surface integrity deterioration. Such phenomenon can cause not only poor dimensional and geometric accuracy, but also possible failure of the ceramic parts. Thus, traditional ceramics are very difficult-to-cut materials. Generally, ceramics are machined using conventional method such as grinding and polishing. However these processes are generally costly and have low MRR(material removal rate). To overcome such problems, in this paper, h-BN powder, which gives good cutting property, is added for the fabrication of machinable ceramics by volume of 10 and 15%. The purpose of this study is an analysis of endmill's rake angle for appropriate tools design and manufacturing for the machinable ceramics. In this study, Experimental works are executed to measure cutting force, surface roughness, tool fracture, on different axial rake angle of endmills. Cutting parameters, namely, feed, cutting speed and depth of cut are used to accomplish purpose of this paper. Required experiments are performed, and the results are investigated.

**Key Words** : difficult-to-cut material, machinable ceramics, MRR, h-BN, axial rake angle

### 1. 서론

고경도, 고강도, 고용융점 그리고 크리프 저항에 우수한 세라믹 소재는 고기능성과 광범위한 용도로 인해 고부가가치의 구조용 부품소재로 각광을 받고 있다. 세라믹은 고유의 경취성을 갖고 있어 난삭재로 분류되며 절삭공구, 압출 금형을 위한 다이, 자동차 엔진, 항공기용 부품 등 다양한 용도로 이용되고 있다. 세라믹 소재는 일반적으로 고온, 소결 방법에 의해 제조하며 소결 중 수축, 비틀림 등의 영향에 의해 정밀도가 저하된다. 따라서 소결 후 정밀 기계가공 공정을 요구한다. 현재까지 주된 기계가공 공정은 다이아몬드 휠을 사용한 연삭가공이다. 가공방법으로, 방전가공은 원리적으로 소재가 도체인 것만 가능하므로 대부분 부도체인 세라믹 소재에 적용하기에는 한계가 있다<sup>1)</sup>. 초음파 가

공은 가공 후 표면품위를 높일 수 있는 장점은 있으나 초음파 진동에 의해 연마입자와 공작물의 1회 충격으로 발생하는 미세 치핑에 의한 재료제거량이 극히 미미한 단점이 있다<sup>2)</sup>. 레이저가공은 표면품위가 상대적으로 좋지 못하다<sup>3)</sup>. 또한 연삭가공은 에너지 소비가 크고 소재의 표면 결함을 유발한다는 단점이 있다<sup>4)</sup>.

금속재료의 절삭 메카니즘은 연속적인 전단 소성변형에 기인한다. 반면에 경취성 재료인 세라믹 소재의 경우, 공구가 소재에 접촉후 세라믹에 그 절삭력이 전달되어 초기 미세 균열(microcrack)이 발생하고 점차 그 균열이 확장되어 자유표면에 도달하였을 때 칩이 생성된다. 따라서 칩의 형태는 미세 파우더 형태를 갖는다. 또한 금속재료를 절삭가공할 때에는 공구가 소재에 접촉되는 초기 시점, 소재의 측면부 그리고 공구가 가공을 끝내는 소재 선단부에서 소성변형에 의한 버(burr)를 발생시킨다. 반면에 세라믹의 경우에는 치핑 등에 의한 파

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
twkjsm@yuhan.ac.kr

손을 초래하므로 가공 후 정밀도를 악화시킨다. 세라믹의 치명적 단점이기도 한 경취 특성은 우수한 강도, 내마멸성, 내열성 등 뛰어난 특성을 갖고 있어 광범위하게 사용될 수 있는 소재임에도 기계가공이 어렵고 가공 후 치수정밀도와 표면품위를 떨어뜨려 산업계에서 널리 사용되지 못하고 있는 이유이다.

코팅재<sup>5,6)</sup>로도 사용이 되는 세라믹 가공에 관련된 연구논문을 살펴보면 Zhang<sup>7)</sup> 등은 세라믹스의 그레인 크기에 의한 구조적 특징과 절삭조건 선택이 세라믹 재료의 취성 파괴와 변형을 조절할 수 있고, 엔드밀을 사용한 덴탈 세라믹(Dental ceramics) 가공에서는 운모 사이즈에 따른 가공성과 가공전 후의 기계적 특징을 비교하였다<sup>8)</sup>. 절삭가공 공정을 통해 세라믹을 생산할 경우, 칩은 사용되는 공구와 공작물간에 지립자로 작용하여 공구의 마멸을 촉진시킨다. 이와 같은 현상으로 인한 공구마멸을 억제하기 위해 가공 중 발생하는 칩을 뜨거운 공기로 흡입하여 효율적으로 제거토록 하였다<sup>9)</sup>. 또한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 세라믹을 대상으로 PCBN공구를 사용한 가공에서 가공영역의 온도는 공구마멸에 영향을 미치게 되며, 액화질소냉각(Liquid nitrogen coolant)을 적용하여 가공된 시편의 표면상태는 그렇지 않은 시편의 표면거칠기에 비하여 훨씬 더 양호해 짐을 보였다<sup>10)</sup>.

소결공정에 의한 세라믹의 정밀도를 향상시키기 위해 기계가공은 요구된다. 그러나 아직까지는 기계적인 2차 가공을 수행한다하더라도 그 정밀도를 보장할 수 있는 기술적 노하우를 갖고 있지 못하며, 그 기초 연구도 부족한 실정이다.

세라믹의 경취성은 가공 후 표면에 균열을 초래한다. 이러한 균열발생은 세라믹의 성분뿐만 아니라 가공방법에 따라 서로 달라진다. 또한 공구의 기하학적 조건에 따라 서로 치핑 등에 의한 공구의 파손상태가 변화되므로 향후 가공성 세라믹을 대상으로 한 공구의 설계에도 반드시 고려되어야 할 중요인자이다.

본 연구에서는 고 정밀 세라믹 생산의 어려운 현실을 극복하여 제품에 대한 소비자의 신뢰를 높이고 세라믹의 용도에 따라 고유의 특성을 조절하는 대신 기계 가공성을 개선시킨 BN을 함유한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 머시너블 세라믹을 대상으로 BN의 함유량과 절삭공구의 축방향 경사각 변화에 의한 가공성을 파악하여 향후 머시너블 세라믹의 고정밀 생산과 절삭공구의 설계개발을 위한 기초연구 자료로 유용하

게 활용될 수 있도록 하였다.

## 2. 시편제조 및 절삭 메카니즘

BN을 혼합한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 머시너블 세라믹을 Fig. 1과 같은 공정에 의해 제조하였다<sup>11)</sup>. 기계가공이 가능한 머시너블 세라믹은 일반적인 금속재료와는 다른 절삭 메카니즘을 갖는다. 머시너블 세라믹은 절삭 선단이 접촉하여 발생한 절삭력이 세라믹의 임계응력값에 도달할 때 초기의 미세 균열이 확장되어 세라믹의 자유표면에 도달함으로써 칩이 발생하는 메카니즘을 갖는다. Fig. 2는 절삭공구를 사용한 가공에서 세라믹의 칩 발생 메카니즘을 대략적으로 나타내기 위한 그림이다. 칩의 발생은 세라믹의 성분과 기계적 특징에 따라 다소 차이는 있으나 분말의 칩 형태를 갖는 고유의 특징을 갖는다.

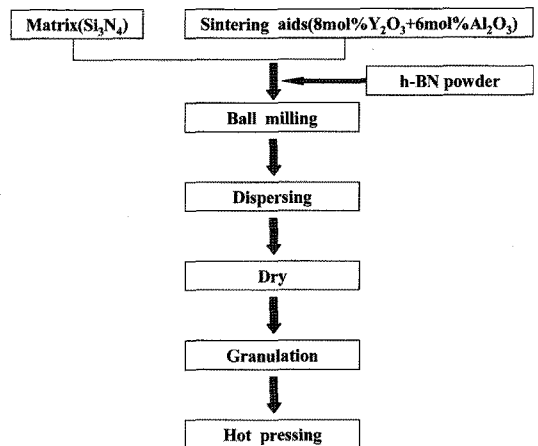


Fig. 1. Flow chart of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-hBN machinable ceramics manufacturing.

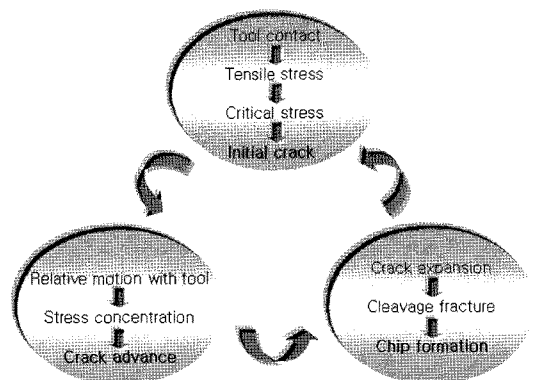


Fig. 2. Machining mechanism mode of machinable ceramics.

세라믹의 특성에 의해 MRR(Material Removal Rate)를 크게 하는 것은 물리적으로 불가능한 실정이다. 이러한 이유로 제한적인 절삭조건으로 실험적 연구가 수행되었다 하더라도 가공성 세라믹을 대상으로 공구의 기하학적 조건 변화에 의해 연구된 성과는 없는 실정이다. 본 연구에서는 가공성 세라믹을 대상으로 공구의 기하학적 변화와 절삭 조건에 따른 특성을 절삭력, 세라믹 표면 그리고 공구파손 관점에서 분석하였다.

실험적 분석을 위해 본 연구에서는 제조된 세라믹을 인서트 형태의 선단 TECN32R을 생크에 고정된 초경 엔드밀 공구를 사용하였다.

### 3. 실험 및 결과 분석

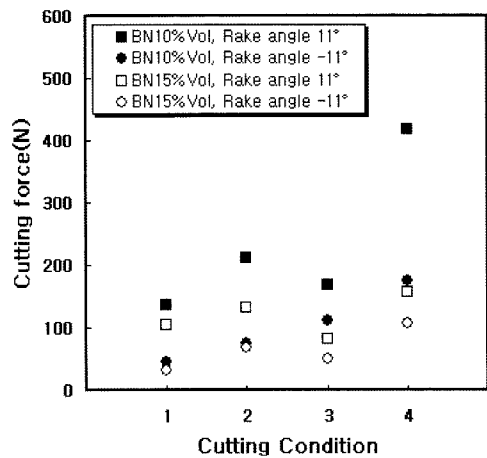
#### 3.1. 실험장비 및 조건

본 연구에서 절삭력을 측정하기 위해 공구동력계(Kistler 9272)를 사용하였고 표면거칠기는 Taylor Hobson Surtronic3+를 사용하여 산술적 평균값 Ra를 측정하였다. Table 1은 실험에 사용된 절삭공구와 절삭조건을 나타낸 것이다.

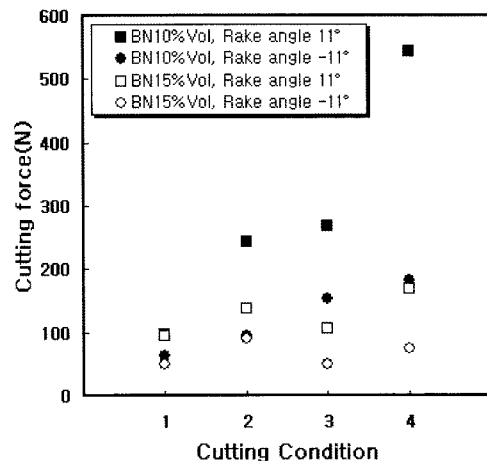
#### 3.2. 절삭력

Fig. 3~4는 BN을 함유한 가공성 세라믹의 절삭성을 실험적으로 파악하고 향후 절삭공구 설계를 위한 토대를 마련하고자 기초 절삭력을 실험한 결과이다. 절삭속도는 40m/min의 조건으로 실험하였다. Fig. 3은 이송속도 30mm/min, Fig. 4는 이송속도 60mm/min으로 실험한 결과이다. Fig. 3에서 BN의 함유량 10%Vol인 경우가 BN의 함유량 15%Vol인 경우보다 절삭력을 크게 하였다. 절삭력의 크기는 BN의 함유량뿐만 아니라 경사각의 차이에서도 뚜렷한 차이를 나타내었는데 -11°의 경우가 +11°인 경우보다 작게 나타났다. Fig. 4는 이송속도가 60

mm/min인 경우로 Fig. 3의 결과보다 절삭력을 크게 한다. 이송의 증가는 공구와 시편 간에 더 큰 힘을 작용시키므로 절삭력을 증가시키기 때문이다. BN의 함유량이나 경사각의 관점에서는 Fig. 3과 유사한 경향을 보이고 있다. 절삭력 실험결과에서 공통점은 BN 함유량의 증가가 절삭력을 감소시켜 절삭성을 개선시킨다는 것과 경사각이 -11°인 경우가 절삭력을 감소시킨다는 것을 알 수 있는데, 특히 스러스트에 대한 절삭력을 크게 감소시켜 절삭성을 개선하므로 향후 절삭공구 설계에 고려되어야 할 것이다.



1. feed force, depth of cut 0,1mm, 2. feed force, depth of cut 0,2mm  
3. thrust force, depth of cut 0,1mm, 4. thrust force, depth of cut 0,2mm  
Fig. 3. Variation of Cutting force with cutting parameter(feed rate 30mm/min).



1. feed force, depth of cut 0,1mm, 2. feed force, depth of cut 0,2mm  
3. thrust force, depth of cut 0,1mm, 4. thrust force, depth of cut 0,2mm  
Fig. 4. Variation of Cutting force with cutting parameter(feed rate 60mm/min).

Table 1. Tool geometry and cutting conditions

Cutting condition	Parameter
Cutter diameter(mm)	32
Axial depth of cut(mm)	0.1, 0.2
Radial depth of cut(mm)	8
Axial rake angle	+11°, -11°
Radial rake angle	- 2°
Approach angle	0°
Feed rate(mm/min)	30, 60
Cutting speed(m/min)	40

### 2.3. 표면거칠기

Fig. 5~8은 BN을 함유한 가공성 세라믹의 표면 거칠기를 측정한 결과이다. 절삭속도는 모두 40m/min의 조건으로 절삭력 실험조건과 동일하다. 일반적으로 세라믹은 절삭공구의 마멸을 크게 한다. 또한 금속재료와는 다른 절삭 메커니즘을 갖는다. 따라서 가공 길이에 따른 표면상태에도 큰 변화가 있을 것으로 예상되어 본 연구에서는 세라믹 시편 가공부의 8, 23, 38mm의 3 포인트에서 표면 상태의 변화를 관찰하였다. Fig. 5와 6은 BN의 함유량이 10%Vol인 시편을 대상으로 이송속도가 각각 30과 60mm/min으로 실험한 것이다. Fig. 5에서 절삭깊이가 더 큰 경우가 표면거칠기 상태가 좋지 않았다. 경사각의 관점에서 보면 음각(-11°)인 경우가 표면거칠기를 더 양호하게 하였다. 측정 포인트에 따른 결과는 첫 번째 측정 포인트에서의 표면상태가 두 번째, 세 번째 포인트에서의 상태보다 대체적으로 양호하게 나타났으나 때때로 두 번째 측정 포인트에서의 표면거칠기 값이 세 번째 측정 포인트에서의 값보다 더 좋지 않은 결과를 보였다. Fig. 6은 Fig. 5에 비해 이송속도가 60mm/min으로 증가되었으며 다른 조건은 모두 동일하다. 이송속도의 증가에 의해 표면상태는 다소 악화되었으며, 측정 포인트에 따른 결과는 Fig. 5와 6 모두 불규칙한 경향을 보이고 있다. 가공성 개선을 위해 BN을 함유시키더라도 세라믹 시편의 경취성으로 인해 절삭 초기부터 공구 선단의 파손은 시작되었고, 이후 불규칙적인 선단의 파손이 계속 진행되었을 것으로 예측할 수 있다. 이것은 공구파손과 시편 특성에 따른 복합성이 표면상태의 불규칙에 영향을 주는 것이다. Fig. 7과 8은 BN의 함유량이 15%Vol인 가공성 세라믹을 대상으로 이송속도가 각각 30과 60mm/min으로 실험한 것이다. Fig. 7에서 절삭깊이의 증가에 의해 표면거칠기는 악화되었으며, 경사각이 -11°인 경우가 +11°의 경우보다 표면거칠기를 양호하게 하였다. Fig. 5와 비교할 때 BN의 함유량이 증가하여 절삭성이 향상된 것이다. Fig. 8의 경우는 Fig. 6과 비교하여 이송속도만 증가되었을 뿐 그 외에 절삭조건은 동일하다. 이송속도가 증가함으로써 표면거칠기가 악화되었고 다소 복잡하게 나타났다. 이송속도의 증가는 절삭력의 증가를 일으켜 초정공구의 파손을 일으키는 주요한 원인으로 작용하였고 이에 따라 표면거칠기 상태를 악화시켜 세라믹의 품위를 저하시켰다.

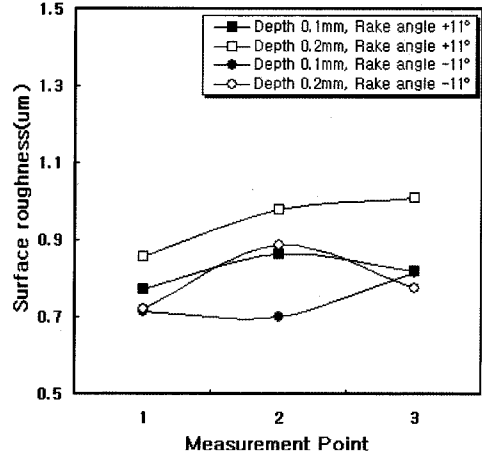


Fig. 5. Surface roughness by measurement point for  $Si_3N_4$ -hBN ceramics(BN10%).

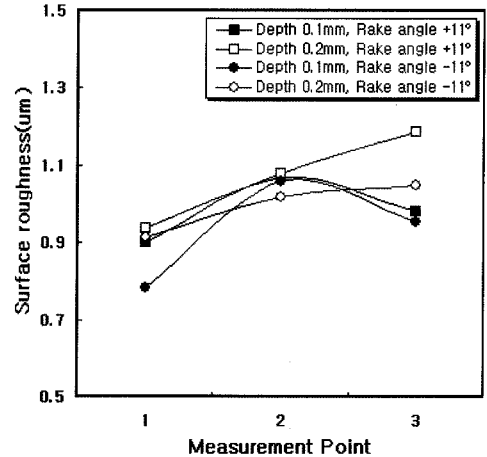


Fig. 6. Surface roughness by measurement point for  $Si_3N_4$ -hBN ceramics(BN10%).

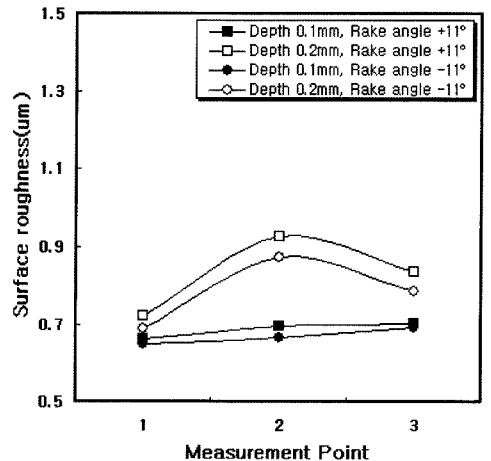


Fig. 7. Surface roughness by measurement point for  $Si_3N_4$ -hBN ceramics(BN15%).

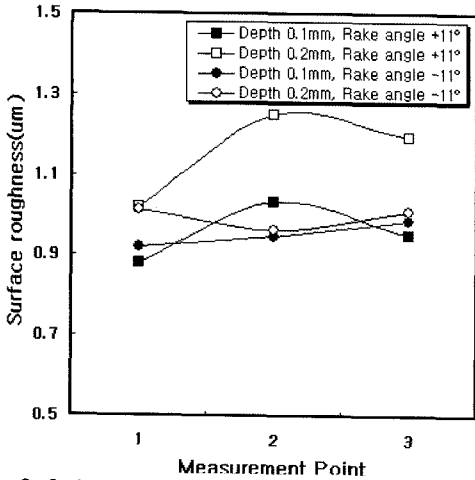


Fig. 8. Surface roughness by measurement point for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN15%).

측정 포인트에 따른 표면거칠기값이 다소 복잡하고 불규칙한 특징을 보이는 것은 세라믹이 절삭되는 과정에서 세라믹 표면이 Fig. 9와 같이 분말 형태의 칩으로 발생되면서 칩 입자의 크기가 다소 불규칙한 미세 분말의 형태로 형성되었기 때문으로 판단된다. 이것은 세라믹 성분 중 그래인 입자의 간격과 배열 형태를 정확하게 제어할 수 없는 문제 등 복합적인 원인에 기인한 결과로 사료되며, 결국 이것이 세라믹의 절삭성에 영향을 미치게 되므로 향후 가공성 세라믹의 정밀가공기술 개발에 고려되어야 할 것으로 판단된다.

#### 2.4. 공구파손

가공성 세라믹의 절삭가공 후 절삭 선단을 공구 현미경을 통하여 확인하였다. 그 결과는 Fig. 10~17에 나타내었다. Fig. 10~13은 축방향 경사각 +11°의 경우이고 Fig. 14~17은 -11°의 경우이다. 절삭

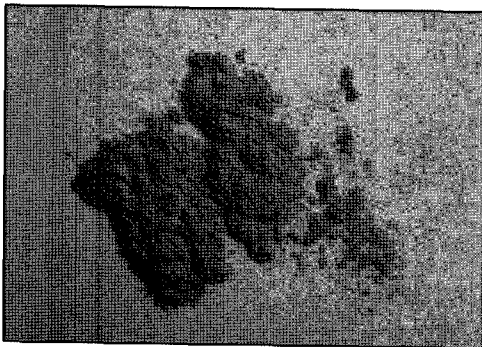


Fig. 9. Chip photograph after machining of machinable ceramics.

깊이와 이송속도의 증가가 있는 경우에는 공구의 파손상태가 뚜렷하게 나타났다. 경사각의 차이에 있어서는 -11°의 경우에서 공구파손이 감소한 것으로 나타났다. +11°의 경우, 가공중 선단과 경사면의 치핑에 의한 파손이 두드러졌으나 -11°의 경우에는 그러한 파손의 형태가 약화되었다. 이것은 Fig. 3과 4에서 경사각이 -11°일 경우, 절삭력의 크기가 더 작게 발생한 것과도 연관성이 있는 것이라 할 수 있다. 이와 같은 결과는 향후 가공성 세라믹을 대상으로 안전한 절삭가공 공정을 위해서는 경사각을 둔각으로 설계해야 한다는 근거가 된다. 또한 선단에서 치핑 현상이 두드러지게 나타난 것으로 보아 선단의 형상은 예리하지 않아야 할 것을 판단된다. 향후 가공성 세라믹을 대상으로 절삭실험을 수행할 경우 본 연구를 근거로 절삭공구의 기하학적 형상을 결정하여야 할 것이다.

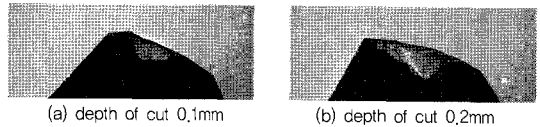


Fig. 10. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN10%, feed rate 30mm/min, rake angle 11°).

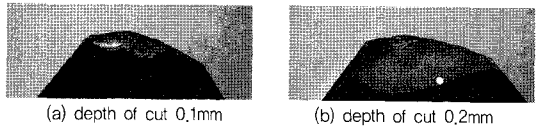


Fig. 11. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN10%, feed rate 60mm/min, rake angle 11°).

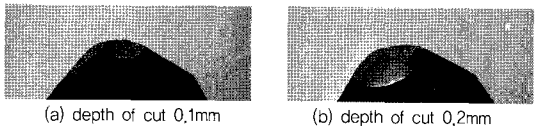


Fig. 12. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN15%, feed rate 30mm/min, rake angle 11°).

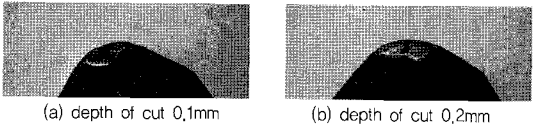


Fig. 13. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN15%, feed rate 60mm/min, rake angle 11°).

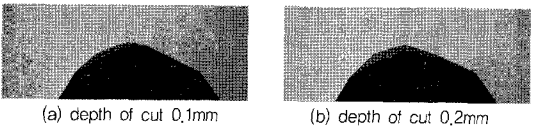


Fig. 14. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN10%, feed rate 30mm/min, rake angle -11°).

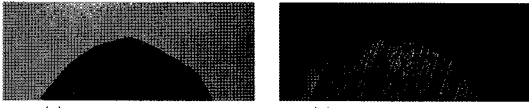


Fig. 15. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN10%, feed rate 60mm/min, rake angle  $-11^\circ$ ).



Fig. 16. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN15%, feed rate 30mm/min, rake angle  $-11^\circ$ ).

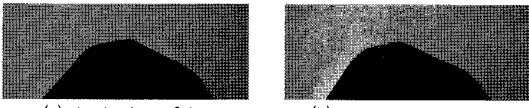


Fig. 17. Tool breakage photograph of tool for  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -hBN ceramics(BN15%, feed rate 60mm/min, rake angle  $-11^\circ$ ).

#### 4. 결론

본 논문은 가공성 세라믹을 대상으로 안전한 절삭가공을 위한 공구설계를 목적으로 수행한 기초 연구이다. 공구의 축 방향 경사각이 세라믹의 가공성에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험적인 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) BN의 함유량이 많은 경우 가공성을 개선할 수 있으며 절삭력을 감소시켜 공구의 파손을 억제할 수 있다.
- 2) 칩 발생은 미세 분말형태로 나타났으며, 세라믹의 미세 조각들이 불규칙하게 파열되어 작업자의 안전을 저해하는 것으로 나타났다.
- 3) 공구 파손에 영향을 미치는 절삭력의 크기는 경사각이 음의 각인 경우가 양의 각인 경우보다 작게 나타났으며 특히, 스러스트 방향에 영향을 크게 주므로 공구설계 시 고려해야 한다.
- 4) 세라믹의 가공후 표면거칠기는 음의 경사각에서 양호하게 나타났으며 측정 포인트에 따라서는 다소 불규칙하게 나타났는데, 이것은 시편의 경취성으로 인한 공구파손과 소재의 표면결함으로 인한 것이다. 세라믹 그레인 간격과 배열 형태를 정

확하게 제어할 수 있는 제조상의 기술적 성과에 따라 달라질 수 있을 것으로 사료된다.

5) 양의 경사각의 경우 선단과 경사면의 치핑에 의한 파손이 두드러졌으며, 음의 경사각의 경우에는 그러한 파손의 형태가 감소되었다.

#### 참고문헌

- 1) Koenig, W., Dauw, D.F., Levy, G., and Panten, U., "EDM-future Steps towards the Machining of Ceramics", *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No. 1, pp. 623 ~ 631, 1998.
- 2) 박성준, 이봉구, 최현중, "초음파 진동을 이용한 세라믹 소재의 마이크로 홀 가공", *한국공작기계 논문집*, Vol. 13, No. 2, 2004.
- 3) Copley, S. M., *Handbook of High Speed Machining Technology*, Chapman and Hall, pp. 1771 ~ 1775, 1985.
- 4) Malkin, S., and Ritter, J. E., "Grinding Mechanism and Strength Degradation for Ceramics", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, pp. 211 ~ 218, 1989.
- 5) J. W. Han, "A Study on the Residual Stresses of Ceramic Coating", *Journal of the KOSOS*, Vol. 22, No. 1, pp. 19 ~ 23, 2007.
- 6) J. W. Han, "Failure of Ceramic Coatings Subjected to Thermal Cyclings", *Journal of the KOSOS*, Vol. 20, No. 2, pp. 19 ~ 23, 2005.
- 7) Zhang, G., Cao, Y. and Qi, L., "Single Point Cutting of Machinable Glass Ceramics", *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 27, pp. 159 ~ 164, 1999.
- 8) Zhang, G., Qi, L. and Cao, Y., "Assessment of Machining Performance of Dental Ceramics", *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 26, pp. 105 ~ 110, 1998.
- 9) Yan, B. H., Guang, F. Y. and Chow, H. M., "Study on the Turning Characteristics of Alumina-based Ceramics", *J. of MPT*, Vol. 54, pp. 341 ~ 347, 1995.
- 10) Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P., and Murugapan, M., "Cryogenic PCBN turning of ceramic( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )", *Wear*, Vol. 196, pp. 1 ~ 6, 1996.
- 11) 장성민, 조명우, 조원승, 이재형, "Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 머시너블 세라믹의 R-curve 거동분석과 가공성 평가", *한국정밀공학회 제21권, 제1호*, pp. 61 ~ 70, 2004.