

Si₃N₄-hBN 머시너블 세라믹의 R-curve 거동분석과 가공성 평가

장성민[#], 조명우^{*}, 조원승^{**}, 이재형^{***}

Evaluation of R-curve Behavior Analysis and Machinability of Si₃N₄-hBN Machinable Ceramics

Sung Min Jang[#], Myeong Woo Cho^{*}, Won Seung Cho^{**}, Jae Hyung Lee^{***}

ABSTRACT

Generally, ceramics are very difficult-to-cut materials because of its high strength and hardness. 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. Ceramics can be machined with traditional method such as grinding and polishing. However, such processes are generally cost-expensive and have low material removal rate. Thus, in this paper, to overcome these problems, BN powder, which gives good cutting property, is added for the fabrication of machinable ceramics by volume of 5,10,15,20,25 and 30%. And, mechanical properties, R-curve behavior and machining tests are carried out to evaluate the machining properties of the manufactured machinable ceramics.

Key Words : difficult-to-cut material(난삭재), cracking and brittle fracture(균열과 취성파괴), edge chipping(선단치핑), machinable ceramics(가공성 세라믹스), R-curve behavior(균열저항거동)

1. 서론

일반적인 세라믹스 가공에 있어서 칩형성에 대한 지배적인 역할은 미세균열에 의한 취성파괴이다. 이러한 이유로 가공된 세라믹스의 기계적 성질은 떨어진다. 결과적으로, 세라믹스 제품의 신뢰도를 높이기 위해, 기계적 특성은 용도에 따라 일정한 수준이 유지되어야 하며 가공중에 재료의 미세 구조적 특징을 제어하고 재료제거를 위한 가공조건

의 선택적 적용으로 표면정밀도를 높여 제품의 높은 품질을 유지할 수 있어야 한다. 금속재료에는 없는 세라믹스의 우수한 특성에도 불구하고 아직까지 세라믹스의 사용용도가 광범위하지 못한 이유는 기계가공이 어렵다는 치명적인 단점이 있기 때문이다. 세라믹스 제품은 소결에 의한 방법으로 제조되며, 소결방법으로 제작된 세라믹은 소결후의 재료 수축을 정확하게 예측할 수 없으므로 제품에 요구되는 치수 정밀도를 맞추는 데에는 한계가 있다.

… 접수일: 2003년 6월 3일 ; 게재승인일: 2003년 11월 14일
교신저자: 인하대학교 기계공학과 대학원
Email: g2002080@inhavision.inha.ac.kr Tel: (032)860-7306
* 인하대학교 기계공학부
** 인하대학교 재료공학부
*** 영남대학교 재료금속공학부

따라서 치수정밀도를 높이기 위해 세라믹스는 소결 후 기계가공을 필요로 한다. 그러나 세라믹스의 기계가공을 어렵게 하는 것은 금속재료에 비하여 강도와 경도가 높을 뿐만 아니라 고유의 취성으로 인해 야기되는 문제 때문이다. 이로 인하여 세라믹에 대하여 일반적으로 적용되는 기계가공은 다이아몬드 휠을 사용한 연삭과 폴리싱 정도로 제한하여 적용되어지고 있는 실정이며, 사용되는 장비의 고비용과 낮은 재료 제거율로 인해 세라믹을 소재로 하는 정밀제품의 생산에 경제적, 시간적 소비가 많을 뿐만 아니라 고비용, 저효율적인 가공으로 제품의 구입단가를 높이므로 소비자에게 미치는 부담을 크게 하기 때문에 고능률적 생산방식이 요구된다. 따라서 세라믹 제품에 대하여 고정밀의 부품을 대량 생산하기 위해서는 낮은 재료제거량을 갖는 입자를 이용한 가공보다는 상대적으로 기계가공에 요구되는 시간을 감소시키기 위해 더 높은 재료제거율이 가능하도록 하는 기술의 필요성이 요구된다. 그러므로 엔드밀 공구 등을 이용하여 절삭가공이 가능한 세라믹의 개발과 가공기술에 대한 기초연구가 기대되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 외국에서 전량 고가로 수입되고 있는 반도체 장비용 부품, 브라운관 제조용으로 치구 등에 응용되는 세라믹의 대량생산을 위한 머시너블 세라믹을 제작하여 그 기계적 특성과 가공특성을 평가하였다.

2. 머시너블 세라믹의 특성

머시너블 세라믹은 Fig. 1에서와 같이 밀링가공 등을 이용한 절삭가공 후 가공면에 미세한 균열을 발생시키며, 공구가 가공을 시작하는 순간과 끝나는 면에서 피삭재의 모서리부에 심각한 칩핑을 발생시킨다¹. 엔트리 선단 칩핑(entry edge chipping)은 공구가 처음에 세라믹 시편에 접촉할 때 충격에 의해 입구부분에서 발생한다. 이그릿 선단 칩핑(exit edge chipping)은 공구가 세라믹 시편을 벗어날 때 탄성복원력에 의해 형성된다. 이러한 선단칩핑은 가공되는 재료의 치명적인 파손을 일으킨다. 이밖에 공구경로를 따라 발생하는 칩핑 등은 모두 세라믹 재료가 갖고 있는 고유의 취성으로 인해 가공중에 발생하는 미세파괴와 취성파괴의 메카니즘에 지배적으로 영향을 받기 때문이다.

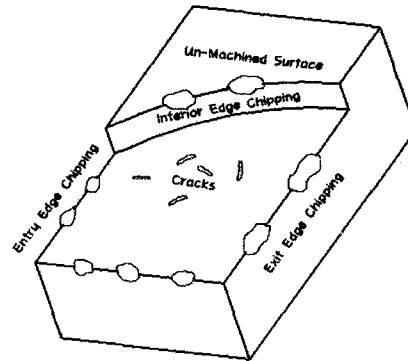


Fig. 1 Schematic pictures of machining properties in ceramic materials

Zhang² 등은 그의 논문에서 머시너블 글래스 세라믹 재료를 단인 절삭공구를 적용하여 그라인 크기에 따른 미세 구조적 특징과 적당한 절삭조건 선택이 세라믹 재료의 취성으로 인한 파괴와 변형을 조절할 수 있다는 것을 보였다. 또한 엔드밀을 사용한 밀링가공에서 덴탈 세라믹(dental ceramics)을 대상으로 운모 크기에 따른 가공성과 가공전후의 기계적 특징을 비교하였다³. PCBN공구를 사용하여 Si_3N_4 세라믹의 가공에서 절삭영역의 온도는 공구마멸에 관한 상당한 영향을 가지며 액화질소냉각(liquid nitrogen coolant)을 적용하여 가공된 공작물의 표면거칠기는 액화질소냉각을 적용하지 않은 공작물의 표면거칠기보다 훨씬 더 양호해진다⁴. 또한 세라믹을 절삭할 때 발생하는 칩은 공구와 공작물사이에서 지립자 역할을 하여 공구마멸을 촉진시킨다. 따라서 이러한 공구마멸을 억제하기 위해 더운 공기로 칩을 흡입 제거하도록 하면 칩 제거가 효율적으로 되어 공구 마멸율은 감소된다⁵.

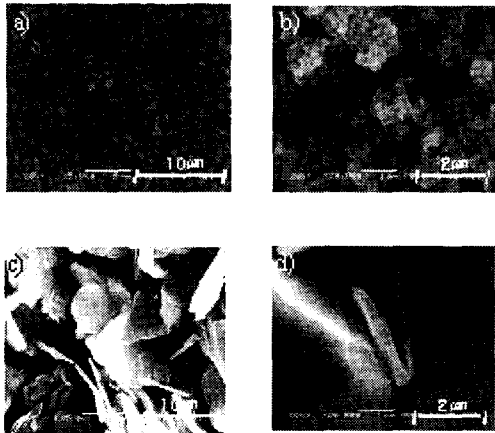
2.1 머시너블 세라믹 시편제조

본 실험에서 제조한 복합체의 매트릭스 분말로는 α - Si_3N_4 (Ube Kosan사, E-10, α -phase >95%, 평균 입자 크기 : $0.17 \mu\text{m}$)를 사용하였고, 소결조제로는 Y_2O_3 (Shinetsu chemical사, AKP-30, 순도 : >99.5%, 평균 입자 크기 : $0.25 \mu\text{m}$)와 Al_2O_3 (Sumitomo chemical사, 순도 : >99.99%, 평균 입자 크기 : $0.39 \mu\text{m}$)를 사용하였다. 그리고 첨가 분말인 h-BN(고순도 화학연구소, 순도 : >99%, 평균 입자 크기 : 10

(μm)을 사용하였다.

Fig. 2에는 h-BN 입자를 나타내었다. BN 입자는 판상의 형상을 보이고 있는 것을 알 수 있다.

Si_3N_4 -8mol% Y_2O_3 -6mol% Al_2O_3 의 조성으로 시편을 제조하고, 이 조성에 h-BN 분말을 5, 10, 15, 20, 25, 30vol%씩 첨가한 조성으로 제조하였다.



- (a) Si_3N_4 powders(lower magnification, $\times 5,000$)
- (b) Si_3N_4 powders(higher magnification, $\times 20,000$)
- (c) BN powders(lower magnification, $\times 5,000$)
- (d) BN powders(higher magnification, $\times 20,000$)

Fig. 2 SEM micrographs of Si_3N_4 and BN powders

각 시편의 결정상 및 입계상을 동정하기 위하여 XRD분석(Cu-K α 선, 주사범위 : $20^\circ \sim 70^\circ$, 주사속도 : $6^\circ/\text{min}$)을 행하였으며 원료분말과 첨가분말의 입자크기와 결정구조 및 BN 입자 첨가에 따른 미세조직의 변화를 관찰하기 위해 SEM을 이용하였다. SEM의 관찰 조건은 시료를 IB-2 ion coater (Giko Engineering사)에서 이온전류를 8 mV로 하고 1분간 유지하여 카본 코팅한 후, 가속전압 20 kV하에서 관찰하였다.

각 조성에 있어서 이론밀도는 rule of mixture로부터 구하였고, 이때 사용된 성분 물질들의 이론밀도와 고온가압 소결된 시편들의 밀도측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. 기본적으로 세라믹은 미세 파우더의 소결공정을 거쳐 제조되며, 이렇게 적용된 공정때문에 다공성은 대개 피할 수 없다. 따라서 피할 수 없는 다공성의 존재로 인하여 이론적인 완

전한 밀도는 얻을 수 없다. 각 조성 시편들의 밀도 측정 결과를 보면 h-BN 입자의 첨가량이 20%Vol

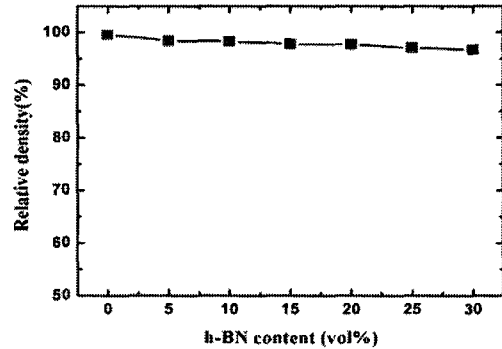


Fig. 3 Density of Si_3N_4 -BN Ceramics containing 0, 20, 25, and 30 vol% BN, hot-pressed at 180°C for 2h under 25 MPa and N_2 atmosphere

까지는 거의 이론밀도를 보였으며 25%vol과 30%vol에서는 각각 98%, 97.3%의 밀도를 나타내었다. 밀도는 h-BN 입자의 첨가량이 많을수록 상대밀도는 감소하였는데, 이는 판상의 BN 입자가 소결시 입자 재배열을 방해하기 때문으로 판단된다.

2.2 굽힘강도와 경도

먼저 Si_3N_4 -hBN계 머시너블 세라믹스의 상온 굽힘강도 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. h-BN 입자 무첨가의 경우 990 MPa~1 GPa로서 높은 강도를 나타내었으며, h-BN 입자의 첨가량이 많을수록 강도는 감소하였다.

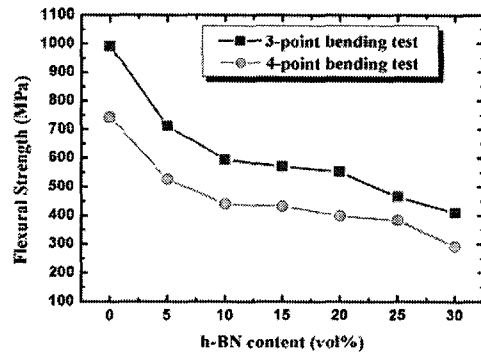


Fig. 4 Effect of BN contents on the flexural strength of Si_3N_4 -BN composites

h-BN 입자의 첨가량이 20vol%, 25vol% 및

30vol%에서의 강도는 각각 550~560 MPa, 460~470 MPa, 270~280MPa로 나타났다. 강도가 감소하는 이유는 (1) 탄성계수(Si_3N_4 : 300 GPa, BH : 41~103 Pa)가 상대적으로 낮은 h-BN 입자의 함량이 증가함에 따른 탄성율의 감소, (2) 소결 밀도의 감소에 따른 기공율 증가, (3) h-BN 입자의 첨가량이 증가함에 따른 응집된 h-BN 입자들이 존재할 가능성, (4) 첨상의 h-BN 입자의 벽계면을 따라 일어날 파괴면적의 증가에 따른 표면에너지의 감소 등 여러 가지 복합적인 원인에 기인한다고 판단된다.

BN함유량에 따른 비커스 경도값 변화와 파괴인성값을 Fig. 5에 나타내었다. 경도와 파괴인성값은 BN이 전혀 첨가되지 않은 경우의 Si_3N_4 의 경우에 각각 $1,402\text{kg/mm}^2$ 와 $7.58\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 의 높은 값에서 BN의 함유량이 증가할수록 감소하는 경향으로 나타났다. 이것은 BN의 벽개성에 기인하는 것으로 판단되는데, BN입자의 첨가량이 증가할수록 미세균열이 판상의 BN입자의 벽계면을 따라 전파되기 쉬워짐을 의미한다.

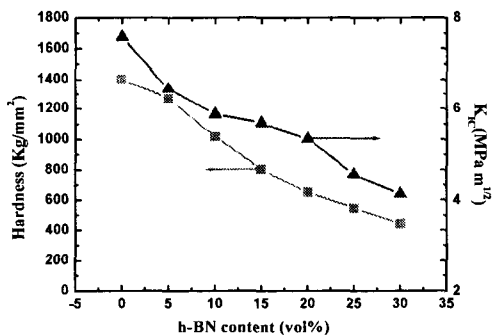


Fig. 5 Effect of BN contents of Vickers hardness and fracture toughness of Si_3N_4 -hBN composites

3. 압입강도와 R-곡선거동

3.1 압입강도

R 곡선은 재료의 파괴거동특성에 영향을 받으며 구조물에 균열이 있는 경우에도 영향을 받는다. 균열 개구변위와 R 곡선은 균열의 성장에 따라 증가하게 된다. 이것은 균열 프로파일의 연성화를 좀 더 일으키는 결과가 되며 이러한 관점들은 파괴역학적 관점으로 접근될 수 있다⁶. R곡선은 여러 가

지 모양을 취할 수 있는데, 표면 에너지가 변화하지 않는 이상적인 취성재료의 경우, 기울기가 거의 없는 평평한 R곡선을 가지며, 연성파괴를 갖는 금속재료는 증가하는 R곡선을 가진다. 균열선단에서의 소성영역은 균열이 성장함에 따라 그 크기가 증가한다.

Fig. 6은 압입하중에 의한 압입균열(indentation crack)의 상태를 보여주는 SEM 사진들이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 모든 시편들의 압입균열들은 일정한 직선의 형태로 발생하는 것이 아니라 전체적으로 입계파괴의 불규칙한 스플라인 형태로 진행하였다. BN이 전혀 함유되어 있지 않은 Si_3N_4 의 경우인 Fig. 6(a)는 입계면 파괴가 상대적으로 작아서 구불거리는 정도가 크지 않았다. 그러나 BN의 함유량이 증가될수록 구불거리는 정도는 점점 더 크게 발생되어 균열의 흔적이 크게 발생하는 경향을 보였다.

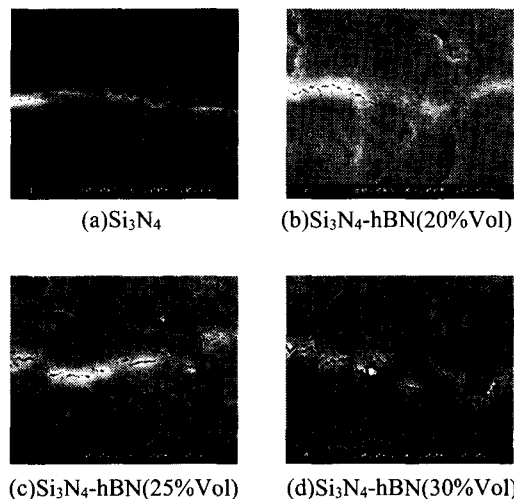


Fig. 6 SEM micrographs of fracture surfaces and crack paths by indentation

Fig. 7은 Si_3N_4 와 BN이 혼합된 Si_3N_4 -hBN 머시너블 세라믹 시편들의 압입하중에 따른 압입강도를 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 압입하중의 증가에 따라 압입강도는 감소하며, 시편이 균열저항을 보이는 경우 그 감소 정도가 작아진다. BN이 전혀 함유되어 있지 않은 Si_3N_4 의 경우에서 감소 정도가 가장 크고 BN이 30%Vol 함유된 Si_3N_4 -hBN에서 가장 완만한 감소를 보이는 것을 알 수 있으며

그 정도는 최소자승법에 의한 직선의 기울기로 나

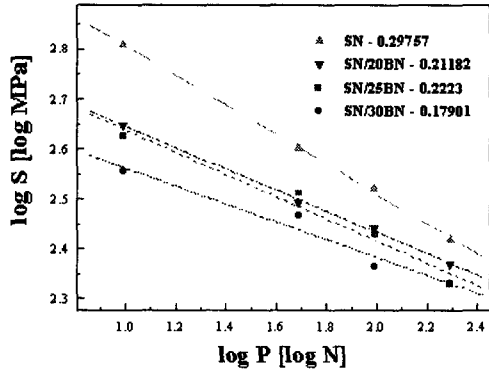


Fig. 7 Indentation strength versus indentation load for Si_3N_4 and Si_3N_4 -hBN

타내었다. 기울기 $-1/3$ 은 균열저항을 전혀 보이지 않는 시편의 경우이며 기울기의 절대값이 작을수록 균열저항이 크며 균열이 성장함에 따라 파괴인성도 더욱 크게 증가한다. Fig. 7에서 Si_3N_4 는 그 기울기 값이 거의 -0.3 에 근사한 값을 갖으며, BN의 함유량 증가에 의해 기울기의 절대값이 작아지므로 그 파괴인성이 점점 증가되어지는 것을 나타내고 있다. 따라서 BN의 함유량 증가는 높은 하중, 긴 균열에서 상대적으로 큰 저항특성을 나타내므로 균열 성장에 대한 저항이 향상되는 것을 의미한다.

3.2 R-곡선거동

Fig. 8은 이러한 균열크기에 대한 파괴인성을 보여주는 R-곡선을 나타내었다. R-곡선은 압입강도, 하중 그리고 압입균열의 크기사이의 관계식을 사용하여 얻어진다. 대체로 균열의 길이가 약 $550 \mu\text{m}$ 이상에서 BN을 함유한 머시너블 세라믹의 경우에서 더 큰 파괴인성을 갖는 것으로 나타났다. 특히 BN이 전혀 함유되어 있지 않은 경우와 BN이 함유되어있는 경우의 R-curve 거동은 분명하게 다르다는 것이다. Fig. 8에서 BN이 전혀 첨가되어 있지 않은 Si_3N_4 세라믹의 경우 초기균열 상태에서 이미 파괴인성 값은 6.4 이상의 값을 갖는다. 그러나 균열의 크기가 증가하는 것에 비하여 상대적으로 파괴인성값의 상승은 거의 없어 R곡선의 기울기가 BN이 첨가되어 있는 다른 머시너블 세라믹의 경우보다 상대적으로 거의 평평한 상태를 나타내고 있다. 이러한 경우에는 재료의 저항이 균열의 성장에

관계없이 일정한 것인데, 세라믹의 크기에 비하여 세라믹 내의 소성영역이 작은 경우가 그러한 경우이며, 이것은 결정립에 의한 균열진전의 크기가 미미하기 때문이며, 앞서 Fig. 7에서 서술되었던 결과에 비쳐 이미 예상되었던 것이다. 한편 BN의 함유량이 증가하여 R곡선이 증가하는 경우에 있어서 BN이 함유된 머시너블 세라믹의 경우는 균열이 증가함에 따라 파괴인성값도 계속 증가되는 것을 알 수 있다. 이것은 균열이 진전되는 구불구불한 폭의 크기가 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 이와 같이 BN의 함유량이 증가하여 R곡선이 증가하는 경우에 있어서, 균열이 증가하는 최소응력의 크기는 BN의 함유량이 많을수록 적어진다. 결과적으로 균열크기의 증가에 따라 파괴인성은 계속 증가한다는 것이다. R곡선은 세라믹 재료의 경취성이 크게 되면 기울기가 거의 “영”에 가까운 결과를 보이며, 금속의 성질에 근사하게 가까워질수록 그 기울기값은 점점 증가된다. 따라서, Fig. 8과 같이 BN의 함유량이 가장 많은 30%Vol에서 R곡선의 기울기 값이 가장 큰 값을 가지므로 그 성질은 금속의 성질에 근사하게 다가갈 것이라고 예상할 수 있으며 재료의 특성이 경취성에서 다소 벗어난다. 따라서 초경공구 등을 이용한 기계가공에서 가공성을 훨씬 향상시키게 될 것이다.

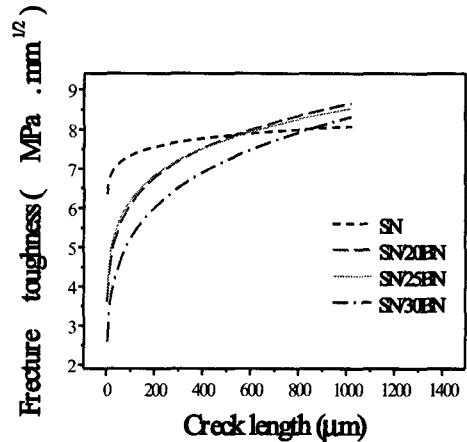


Fig. 8 R-curves of Si_3N_4 based machinable ceramics

4. 가공성 평가

4.1 머시너블 세라믹스의 절삭 메카니즘

본 연구에 적용되는 세라믹은 내열 충격에 강하여 고온강도가 요구되는 용도로 사용되는 질화규소(Si_3N_4)계이다.

일반적인 금속재료의 절삭가공에서는 연속적인 전단소성변형에 의해 칩을 배출시킨다. 그러나 피삭재로서 세라믹스의 특징은 전형적인 취성의 성질이 있다. 이러한 취성으로 인하여 금속재료와는 달리 연속적인 칩의 배출은 불가능하며, 취성에 의한 불연속적인 칩의 배출에 기인하여 표면상태가 좋지 않다. 세라믹의 절삭기구 모델은 Fig. 9에 대략적으로 나타내었다. 세라믹의 경우에는 절삭공구가 공작물에 접촉되어 충돌하는 순간 재료 내부에는 미세균열이 발생되고, 가공이 계속됨에 따라 미세균열은 더욱 성장되고 결과적으로 칩이 발생되어 재료가 분리된다. 이와 같이 일반적인 세라믹 재료의 칩의 형성은 높은 정도로 인해 미세균열과 취성파괴가 반복되어 발생하는 불연속칩이 발생하며, 이것은 미소크기에 유착된 그래인 배열의 벽계파괴이

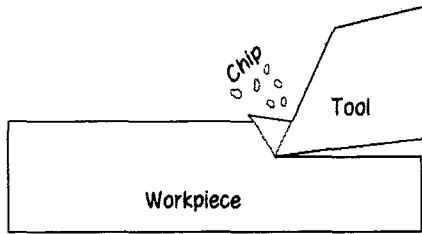


Fig. 9 Schematic diagram on cutting mechanism of ceramics

다. Fig. 10은 세라믹의 칩형성 단계를 나타내었다. 공구가 세라믹에 접촉을 시작함으로써 발생하는 공작물의 인장응력이 임계값에 도달할 때 균열은 시작된다. 공구와 공작물간의 상대운동이 진행됨에 따라 균열선단 부근에서 응력집중과 소성변형이 발생하고, 결과적으로 이것이 균열을 성장시킨다. 균열성장이 공작물의 자유표면에 도달함에 따라 공작물로부터의 칩은 그래인 배열의 벽계파괴의 결과로서 발생한다. 따라서 머시너블 세라믹의 가공중에 칩형성에 관한 메카니즘은 일반적인 금속의 가공중에 나타나는 전단면을 따라 전단되는 것과는 다른 결과를 보인다. 칩형성에 관한 절삭깊이의 영향은 작게 하는 것이 좋은데 이것은 응력집중의 위치가 자유표면에 가깝도록 하여 결과적으로 칩 형성을

용이하게 작용하기 때문이다².

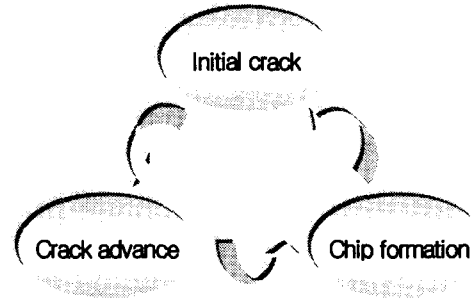


Fig. 10 Process of chip formation in ceramics

4.2 가공특성

소결공정을 거쳐 제작된 세라믹 제품은 치수정확도가 높지 않다. 따라서 제품에 요구되는 치수정밀도를 위해서는 공작물로부터 불필요한 부분을 제거해야 한다. 본 연구에서는 머시너블 세라믹을 제작하여 공작물로부터 필요없는 불필요한 재료의 일부분을 제거하기 위하여 엔드밀을 사용한 밀링 가공 공정을 수행하였다. 가공성 실험을 위해 머시닝센터에서 엔드밀 공구에 의한 절삭성 평가를 함에 있어서 절삭력 측정은 공구동력계(Kistler 9272)를 사용하였다. 본 실험에 사용된 엔드밀 공구는 머시너블 세라믹의 가공특성과 절삭성을 시험하기 위해 일반 금속재료의 절삭에 주로 사용되는 $\varnothing 32$ 드로우 어웨이형 엔드밀을 사용하였으며 인서트 팁은 초경재질인 TECN32TR을 사용하였다. 실험용 피삭재는 핫프레스금형 설비를 이용하여 제작하였으며 시편의 크기는 $45 \times 45 \times 12$ 의 치수로 완성하였고, 실험에 적용된 가공방법은 상향건식가공으로 하였으며 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Cutting conditions

| Workpiece (Si_3N_4 -hBN) | Cutting velocity V(m/min) | Feed rate f(mm/min) |
|--|-------------------------------|------------------------|
| BN(5,10,15,20,25,30Vol) | 40 | 30, 60 |
| Depth of cut d(mm) | Radial depth of cut rd(mm) | |
| 0.1, 0.2 | 8 | |

세라믹재료의 절삭특성은 Fig. 11에서와 같이 미세균열의 전파에 의한 칩의 발생이 미세파우더의 형태로 발생하였으며, BN함량이 많을수록 파우더

는 더욱 미세하게 되어 분진의 형태로 발생되었다.

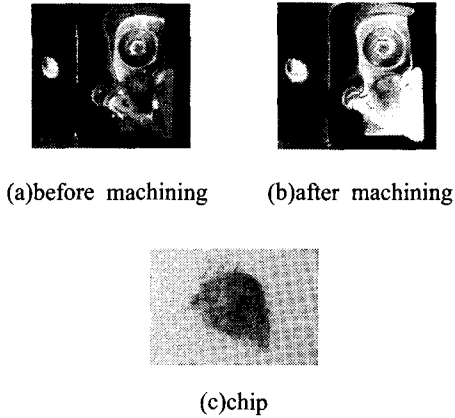
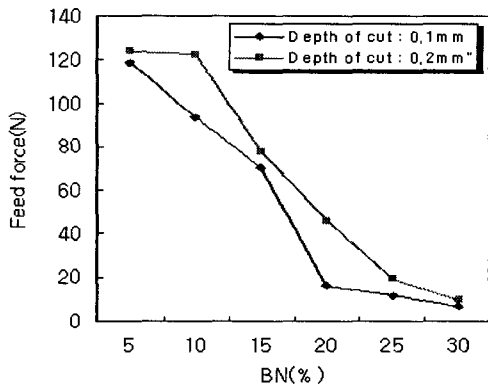


Fig. 11 Photograph of tool before and after machining

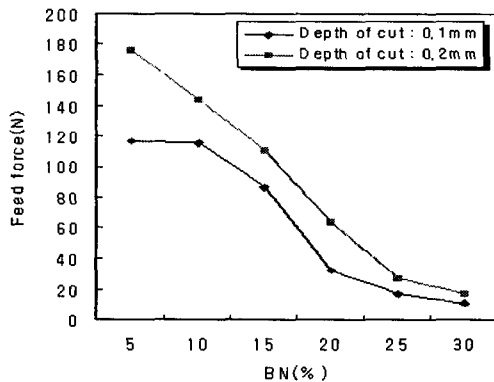
가공 후의 공구는 미세 파우더 지립자에 의해 덮여 씌어진다.

머시너블 세라믹을 엔드밀 공구를 사용하여 얻어지는 절삭력을 측정하기 위해 공구동력계를 이용하여 절삭가공 실험을 수행하였다.

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 BN의 함량이 5,10,15,20,25,30%Vol 함유된 Si_3N_4 머시너블 세라믹에 대하여 이송방향 절삭력과 축방향 절삭력에 대한 측정결과이다. Fig. 12에서 이송방향 절삭력은 BN함량이 20%Vol이상에서 절삭력의 변화가 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 BN 20%Vol에서 세라믹의 취성에 기인한 균열발생이 급격하게 줄어들기 때문인 것으로 판단된다. 특히 25%, 30%Vol에서 이송방향 절삭력은 두드러지게 작게 측정되었다. Fig. 12와 13의 그래프를 비교

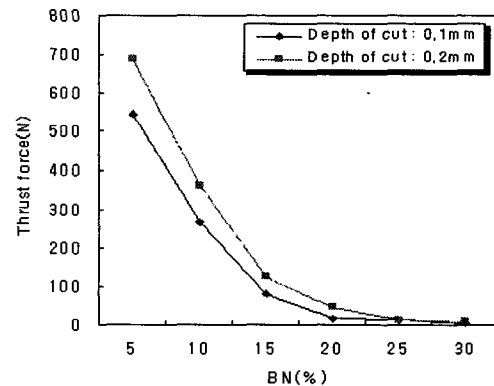


(a) $v(40\text{m}/\text{min})$, $f(30\text{mm}/\text{min})$, $r \cdot d(8\text{mm})$

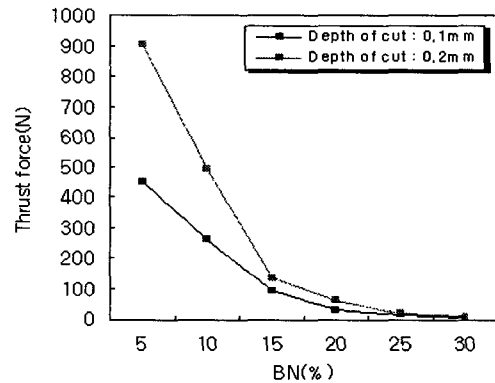


(b) $v(40\text{m}/\text{min})$, $f(60\text{mm}/\text{min})$, $r \cdot d(8\text{mm})$

Fig. 12 Variation of principle force with BN contents of Si_3N_4 -BN composites



(a) $v(40\text{m}/\text{min})$, $f(30\text{mm}/\text{min})$, $r \cdot d(8\text{mm})$



(b) $v(40\text{m}/\text{min})$, $f(60\text{mm}/\text{min})$, $r \cdot d(8\text{mm})$

Fig. 13 Variation of thrust force with BN contents of Si_3N_4 -BN composites

해보면 BN의 함유량이 20%Vol이하에서는 이송방향 절삭력에 비하여 축방향 절삭력이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있으나 25%와 30%Vol에서는 이송방향 절삭력이 축방향 절삭력보다 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 BN의 함유량이 25%, 30%Vol에서는 경도가 크지 않은 일반적인 금속 절삭에서 나타나는 절삭력 결과와 가장 유사하며, 따라서 상대적인 관점에서 금속의 절삭메카니즘인 연속적인 전단 소성변형에 의한 칩의 발생이 25%와 30%Vol의 BN을 함유한 경우에서 그 가능성을 희미하게나마 보일 수 있다고 판단된다.

Fig. 13에서는 축방향 절삭력의 변화가 BN15%Vol이하에서 크게 발생함을 나타내는데, 이것은 BN15%Vol이하에서 엔드밀 가공시에 시편의 표면에 발생하는 균열형성 중에 초경공구의 마멸과 칩핑이 빠른 속도로 발생되어 상호간 접촉면의 증가에 의한 것이며, BN 20%Vol이상에서는 이러한 공구손상이 급격하게 감소되었기 때문에 축방향 절삭력의 크기도 크게 감소되었다.

Fig. 14는 BN을 함유한 Si_3N_4 머시너블 세라믹을 엔드밀 가공 후 표면의 SEM 촬영결과를 나타낸 사진이다. Fig. 14(a)는 BN이 5%Vol 함유되어 있는 경우로써 본래 세라믹이 갖고 있는 특징을 가장 잘 나타내고 있다. 초경공구로 가공한 후의 표면은 가공물의 높은 경취성으로 인해 공구와 상호간의 접촉에 의해 가공물에 균열발생을 뚜렷하게 남겨져 있는 특징을 보였다. Fig. 14(b), (c), (d)는 BN이 각각 10, 15, 20%Vol 함유되어 있는 경우로써 Fig. 14(a)보다는 덜하지만 칩이 발생되어 재료가 제거되는 메카니즘이 초기 균열이 성장하여 칩이 발생하는 절삭메카니즘을 뚜렷하게 보이고 있다. 이러한 메카니즘을 갖는 절삭가공에서는 표면의 품위를 떨어뜨릴 뿐만 아니라 상대적으로 높은 소요동력이 요구되며 가공변형으로 인해 표면에 높은 응력을 유발시킴으로써 가공 후 시편의 기계적 강도를 약화시키는 원인이 된다. 또한 무리한 절삭깊이와 이송은 시편이 갖는 경취성에 기인하여 표면정밀도를 심각하게 손상시키는 원인이 될 뿐만 아니라 시편에 파손을 초래한다. Fig. 14(e)와 (f)는 각각 25, 30%Vol의 BN이 함유되어 있는 경우로 BN함유량은 적은 세라믹 시편에 비해 상대적으로 균열성장이 적게 발생되었으며, 특히 가공면이 매끄럽게 형성되었다. 따라서 BN함유량의 증가는 가공 후 표면 품위를 향상시켜준다.

세라믹의 가공 후 표면품위는 그레인 사이즈의 크기에 영향을 많이 받는데⁷, BN의 함유량이 표면 거칠기에도 크게 영향을 미치고 있다는 것을 나타내는 것이다.

Fig. 15는 Fig. 14에 대한 표면거칠기 측정결과를 나타내며, BN의 함유량이 증가할수록 표면거칠기값이 양호해짐을 알 수 있다. 특히 BN의 함유량이 25%, 30%Vol에서 표면의 상태가 두드러지게 향상되었음을 알 수 있다.

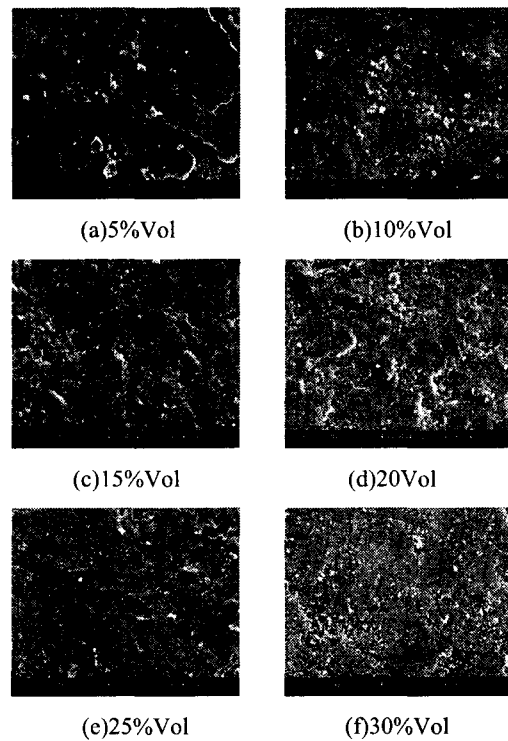
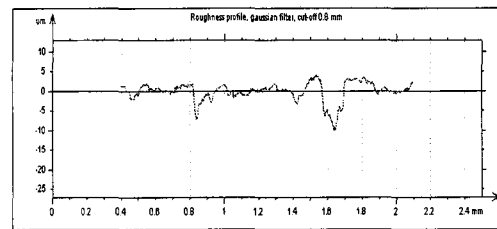
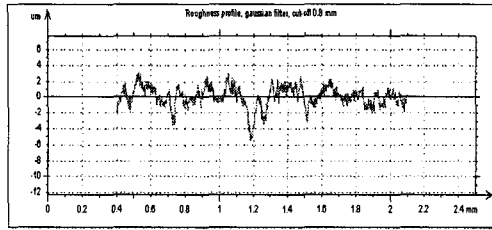


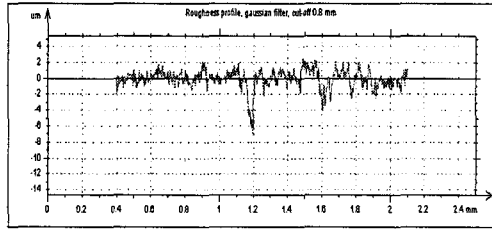
Fig. 14 Micrographs($\times 1000$) after machining of Si_3N_4 -hBN composite ceramics



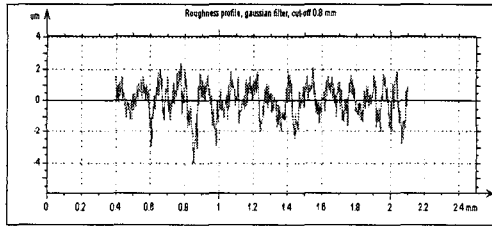
(a)5%Vol



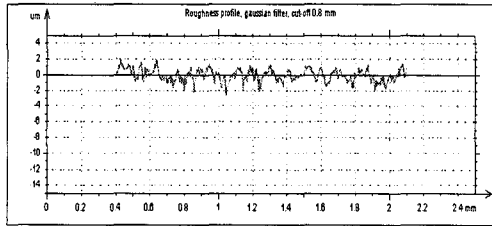
(b)10%Vol



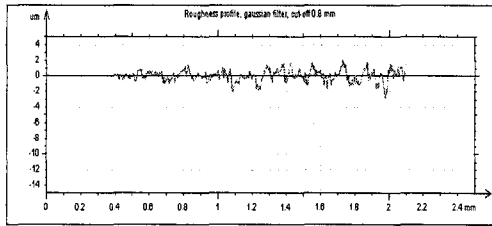
(c)15%Vol



(d)20%Vol



(e)25%Vol



(f)30%Vol

Fig. 15 Surface roughness profiles for Fig. 14

5. 결론

본 연구는 Si_3N_4 세라믹성분에 BN을 각각 5,10,15,20,25,30%Vol 혼합하여 기계적 특성과 2날 엔드 밀을 사용하여 절삭가공 후 그 절삭성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시편들의 밀도측정 결과 h-BN 입자의 첨가량이 증가할수록 밀도값이 떨어지며 경도 등의 기계적 특성도 점점 약화되는 것으로 나타났다.
- (2) R-곡선은 재료거동 특성과 균열에서도 영향을 받으며, BN함량의 많을수록 R-곡선이 증가하는 것으로 나타났으며, 이것은 금속재료의 성질에 다소 유사하게 작용되었기 때문에 절삭성을 향상시킨다.
- (3) 5~15%Vol의 BN을 함유한 Si_3N_4 머시너블 세라믹은 초기 균열성장에 따른 칩 발생 메커니즘으로 인해 가공 후 표면에 균열이 두드러지게 발생하였음을 SEM 사진을 통해 확인하였으며 특히, 30%Vol에서는 균열이 거의 나타나지 않았다.
- (4) BN의 함유량이 많을수록 취성에 기인한 절삭 메커니즘에서 상대적으로 전단소성 변형에 의한 연속칩의 발생이 가능함을 보였으며, 가공 후 기계적 강도값에도 변화가 적어 가공 후에도 신뢰성 높은 세라믹 제품을 얻을 것이라 판단된다.
- (5) BN의 함유량이 20%Vol이상에서 절삭력은 크게 감소되는 결과로 나타났는데, 이것은 세라믹 표면의 균열 발생에 의한 취성과파괴 메커니즘으로부터의 영향을 적게 받는 것으로 분석되었다.

후 기

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

참고문헌

1. Cao, Y., "Failure analysis of exit edges in ceramic machining using finite element analysis," Engineering Failure Analysis, Vol. 8, pp. 325-338, 2001.
2. Zhang, G., Cao, Y. and Qi, L., "Single point cutting of machinable glass ceramics," Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXVII, pp. 159-164, 1999.
3. Zhang, G., Qi, L. and Cao, Y., "Assessment of

- machining performance of dental ceramics," Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXVI, pp. 105-110, 1998.
4. Wang, Z. Y., Rajurkar, K. P., and Murugappan, M., "Cryogenic PCBN turning of ceramic(Si_3N_4)," Wear, Vol. 196, pp. 1-6, 1996.
 5. Yan, B. H., Guang, F. Y., and Chow, H. M., "Study on the turning characteristics of alumina-based ceramics," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 54, pp. 341-347, 1995.
 6. Liu, S. Y., and Chen, I. W., "High Temperature Crack Growth in Silicon Nitride under Static and Cyclic Loading: Short-Crack Behavior and Brittle-Ductile Transition," Acta mater. Vol. 44. No. 5, pp. 2079-2092, 1996.
 7. Zhang, Z. H., Zhang, J. H., Sun, K. M., and G.D. Wang, "Study on the diamond tool drilling of engineering ceramics," Journal Materials Processing Technology, Vol. 122, pp. 232-236, 2002.