

가공성 세라믹 절삭에서 공구의 마멸 패턴과 메카니즘

장성민[†] · 백승엽^{*}

유한대학 기계과 · *인덕대학 기계설계과
(2009. 7. 12. 접수 / 2010. 10. 11. 채택)

Wear Patterns and Mechanisms of Cutting Tool in Cutting of Machinable Ceramics

Sung-Min Jang[†] · Seung-Yub Baek^{*}

Department of Mechanical Engineering, Yuhan University

^{*}Department of Mechanical Design, Induk University

(Received July 12, 2009 / Accepted October 11, 2010)

Abstract : When the ceramic material is being machined, micro crack and brittle fracture dominate the process of material removal. Generally, ceramics are very difficult-to-cut materials and machined using conventional method such as grinding and polishing. However, such processes are generally cost-expensive and have low material removal rate. Machinable ceramics used in this study contain BN powder to overcome these problem and for productivity elevation. This paper focuses on machinability evaluation during end mill process with CNC machining center in this study. Experiment for this purpose is performed for tool wear patterns and mechanism.

Key Words : difficult-to materials, machinable ceramics, BN powder, CNC machining center, Tool wear patterns and mechanism

1. 서론

고능률, 고기능 부품의 개발을 위해서는 그 기능을 발휘할 수 있는 부품소재의 개발이 선행되어야 한다. 자동차와 비행 물체의 엔진 등에서 발생하는 고열은 부품의 치수 및 형상정밀도를 변화시켜 그 기능의 저하를 초래한다. 그러므로 내열성이 강한 부품소재로써, 사용 중 변형과 기능에 지장이 없는 고급 소재의 개발이 필수적이다. 초합금은 코발트를 기본 성분으로 하는 것임에도 이와 같은 고열 조건의 사용에 충분하지 못하다. 전형적인 세라믹의 경우에는 용융점이 매우 높아 1,000°C 이상의 고열에서 충분한 크리프 저항을 가진다. 코팅재^{1,2)}로도 사용이 되는 세라믹은 기계부품으로써 마모 저항이 매우 우수하여 베어링이나 기계 공구에도 사용되며 활용 가치가 매우 크다고 할 수 있다.

세라믹은 절삭성이 매우 어려운 대표적인 난삭재이다. 일반적으로 세라믹의 기계가공은 지립자에

의한 원통 및 평면연마 등 연삭기계를 이용하여 정밀 부품을 생산한다. 세라믹 피삭재를 대상으로 많은 재료 제거율의 조건으로 기계가공을 하는 것은 매우 어렵다. 왜냐하면 세라믹이 갖고 있는 고유의 경취특성 때문이다. 그러므로 세라믹의 기계 가공 조건은 재료 제거율을 작게 하는 조건인 느린 이송 속도, 작은 절입량으로 하여야 한다.

절삭성을 파악하는 방법 중 하나는 공구의 마멸 특성을 분석하는 것이다. 피삭재가 세라믹인 경우, 공구의 마멸 메카니즘을 분석한 연구가 부족한 실정이다. 가공성 세라믹을 대상으로 절삭 선단의 마멸특성과 메카니즘 분석이 중요한 이유는 마멸로 인한 공구의 선단 파손이 피삭재에 작용하는 절삭력을 증대시키고, 그 힘이 피삭재의 비정상적 절삭과 파손의 원인으로 작용하기 때문이다. 또한 그 결과는 가공 후 세라믹 피삭재의 기계 강도를 약화시키므로 구조적 안전에 영향을 미치기 때문이기도 하다. 마멸이 심한 절삭공구를 사용하였을 경우 세라믹 소재가 파괴로 진전되지 않더라도, 세라믹 소재 내부에 균열이 잔존하여 기계구조 또는 정밀부

[†] To whom correspondence should be addressed.
twkjsm@yuhan.ac.kr

품에 사용될 경우 파괴 위험이 항상 내재되어 있기 때문에 기계적 구조 안전에 치명적일 수 있다.

기계가공이 어려운 기존의 세라믹 소재의 사용으로는 고능률, 고기능 부품의 대량 생산이 곤란하므로 기계가공이 가능한 세라믹 소재의 개발과 가공성 평가에 관한 연구가 필요한 시점이다. 그러므로 본 연구에서는 가공성 세라믹을 대상으로, 가공성 평가의 척도로써 절삭 공구의 마멸 특성과 메카니즘을 분석 평가하였다.

2. 가공성 세라믹의 제조 및 절삭 특성

생산성 향상과 기계 가공성 개선을 위한 고 품질의 가공성 세라믹 시편 제조를 위해 사용된 매트릭스 분말은 α -phase>95%인 α -Si₃N₄은 평균 입자 크기 0.17 μ m인 Ube Kosan사에서 생산되는 것을 사용하였다. 몰당에 의한 생산에 필요한 소결제는 평균 입자 크기 0.25 μ m, 순도 >99.5%인 Shinetsu chemical사의 제품인 Y₂O₃를 사용하였다. 가공성 개선을 위한 첨가한 h-BN 입자는 순도 >99%, 평균 입자 크기 10 μ m를 사용하여 소결 제조하였다. BN 입자는 그 형상이 판상이다. 본 연구에서 제조된 시편은 Si₃N₄-8mol%Y₂O₃-6mol%Al₂O₃의 조성으로 제조하였으며, 여기에 h-BN 분말을 5, 10, 15, 20, 25, 30 vol%씩 첨가한 조성으로 제조하였다.

가공성 세라믹은 절삭 가공시 공구가 세라믹에 진입하는 초기와 끝단에 시편의 모서리부에서 심각한 칩핑을 발생시키며 가공면에서 미세 균열을 발생시킨다³⁾. 이것은 세라믹의 경취성에 기인한 것으로 항절력 충격에 취약하여 발생하는 현상이다.

Zhang⁴⁾ 등은 그의 논문에서 머시닝 센터를 사용한 세라믹 재료를 단인 절삭공구를 사용하여 그라인 크기에 따른 미세 구조적 특징과 적당한 절삭조건의 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 가공전, 후의 기계적 특징을 비교하였다⁵⁾. PCBN공구를 사용하여 Si₃N₄ 세라믹 가공에서 절삭영역의 온도는 공구마멸에 관한 상당한 영향을 가지며 액화질소냉각(liquid nitrogen coolant)을 적용하여 가공된 공작물의 표면거칠기는 액화질소냉각을 적용하지 않은 공작물의 표면거칠기보다 훨씬 더 양호해 진다⁶⁾. 또한 세라믹을 절삭할 때 발생하는 칩은 공구와 공작물사이에서 지립자 역할을 하여 공구마멸을 촉진

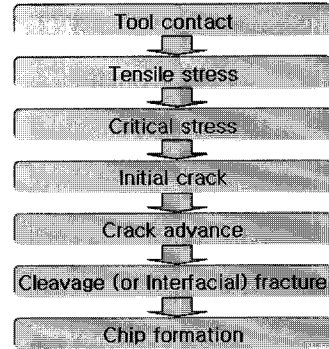


Fig. 1. Machining mechanism of machinable ceramics.

시킨다. 따라서 이러한 공구마멸을 억제하기 위해 더운 공기로 칩을 흡입 제거하도록 하면 칩 제거가 효율적으로 되어 공구마멸이 감소된다⁷⁾. 본 연구에 적용되는 세라믹은 Si₃N₄에 BN을 함유시킨 것으로 충격에 강하여 고온강도가 요구되는 질화규소계 세라믹이다. BN 입자가 첨가되지 않은 Si₃N₄의 경우 990MPa~1GPa의 높은 강도를 나타내었으며 BN 입자의 첨가량이 증가할수록 강도, 파괴인성, 경도 등의 기계적 특성은 저하된다⁸⁾.

실험에 사용될 세라믹을 절삭할 때 발생하는 칩은 미세 분말 형태의 불연속 칩이다. 절삭 중 시편이 임계 응력에 도달할 때 시편에 균열이 발생, 성장, 탈락되는 과정을 반복하면서 인접한 그라인이 벽계파괴되어 칩이 발생된다. Fig. 1에 세라믹의 절삭 메카니즘을 대략적인 순서대로 나타내었다.

3. 실험 및 결과

3.1. 실험방법

본 연구는 CNC 머시닝 센터를 사용한 가공에서 절삭공구의 마모 패턴 및 메카니즘 분석을 목적으로 하며, 제조현장에서 일반적으로 사용이 되는 인서트 형태의 K10종 초경 엔드밀에 의해 가공하였

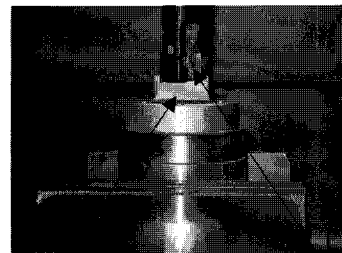


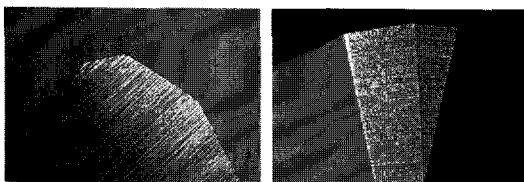
Fig. 2. Schematic diagram of experimental equipments.

다. 시편은 45mm×45mm×12mm의 크기로 준비하였고 건식 절삭하였다. Fig. 2는 본 연구의 목적을 수행하기 위하여 밀링 바이스에 세라믹 시편을 고정된 상태와 인서트 형태의 초경 팁을 생크에 고정시킨 엔드밀 공구를 주축에 장착한 상태를 사진으로 나타낸 것이다.

3.2. 경사면 마멸

머시닝 센터에서 각각의 실험조건에 의한 절삭 가공 후 공구 선단의 마멸 패턴은 공구현미경을 통하여 관찰 분석하였다. Fig. 3은 절삭가공 전 초경 인서트 팁의 사진을 나타낸다. Fig. 4~7은 BN입자를 5~30% 함유한 가공성 세라믹 시편을 절삭 후 각각의 인서트 팁 마멸상태를 나타낸 것이다. 절삭 속도는 모두 40m/min의 조건으로 실험하였다.

Fig. 4는 이송속도 30mm/min, 절삭깊이 0.1mm의 조건으로 엔드밀 가공 후 각각의 절삭선단에서 마멸과 파손의 형태를 나타낸 것이다. (a)는 BN의 함유가 5%로써 칩핑에 의한 파손 형태가 가장 심하게 발생하였다. (b)는 BN의 함유가 10%인 경우로써 칩핑에 의한 파손이 여전히나 5% 함유된 경우보다는 다소 약화되어 발생하였다. (c)는 BN을 15% 함유한 시편을 대상으로 한 것으로써 칩핑에 의한 파손이 두드러지게 감소되었음을 확인할 수 있다. 또한 선단의 각진 모서리 라인이 라운드 형태로 변형된 것은 세라믹 지립자에 의한 어브레시브 마멸의 증거이다. BN의 함유가 20% 이상이 되면 경사면에서는 칩핑에 의한 공구 손상은 더 이상 발생하지 않았고 어브레시브 마멸의 형태로만 발생하였으며 특히, 25% 이상의 BN을 함유하였을 때에는 어브레시브 마멸의 크기가 크게 감소되었음을 확인하였다. Fig. 5는 절삭깊이 0.2mm의 조건으로 엔드밀 가공한 결과로써 다른 조건은 Fig. 4와 동일하다. 절삭깊이가 증가된 경우에는 공구마멸의 형태는 Fig. 4의 경우와 그 경향이 거의 유사하였으며, 칩핑과 어브레시브 마멸에 의한 공구 마손이 더 크게 발생하였다.



(a) rake face (b) clearance face

Fig. 3. Thraw away tip before cutting.

Fig. 6은 이송속도 60mm/min, 절삭깊이 0.1mm의 조건으로 엔드밀 가공 후 각각의 절삭선단에서 마멸과 파손의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 7은 절삭깊이 0.2mm의 조건으로 엔드밀 가공한 결과로

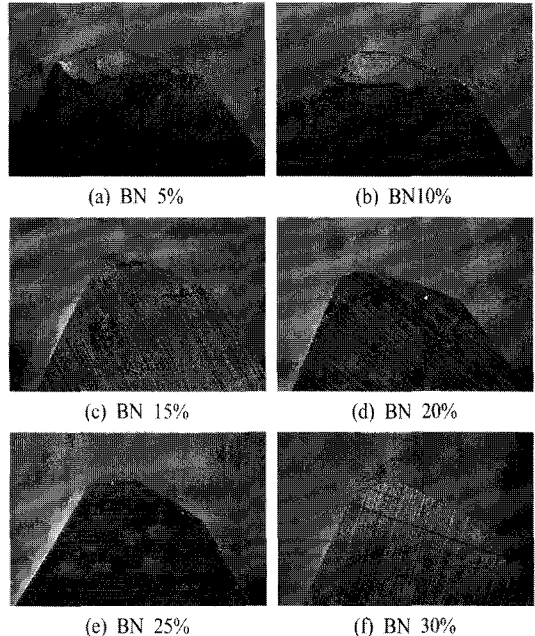


Fig. 4. Chipping and breakage in rake face of carbide tool (feed rate 30mm/min, depth of cut 0.1mm).

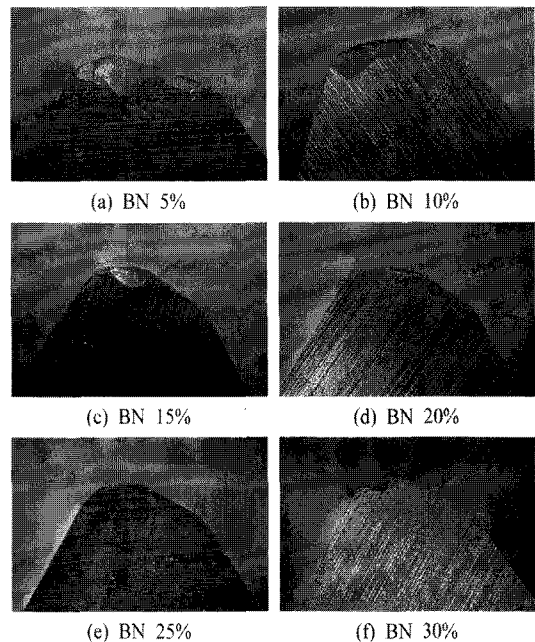


Fig. 5. Chipping and breakage in rake face of carbide tool (feed rate 30mm/min, depth of cut 0.2mm).

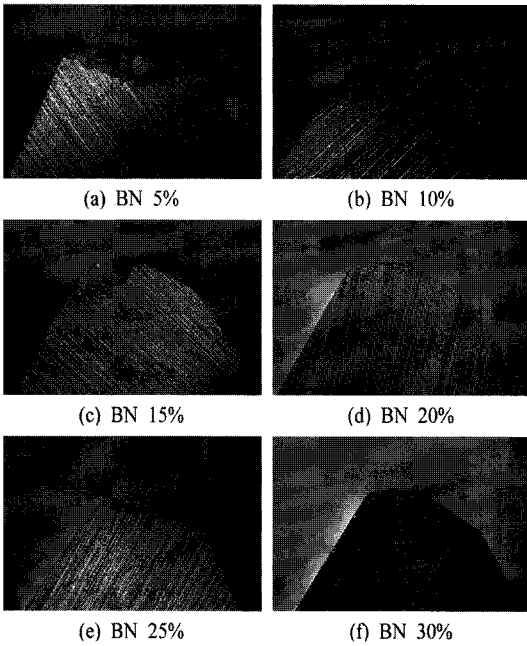


Fig. 6. Chipping and breakage in rake face of carbide tool (feed rate 60mm/min, depth of cut 0.1mm).

서 다른 조건은 Fig. 6과 동일하다. Fig. 6과 7은 각각 Fig. 4와 5에 비교하여 이송속도가 2배 증가된 것이다. 이송속도의 증가는 절삭력을 더욱 증가시키므로 절삭공구의 선단에 미치는 영향도 증가된다.

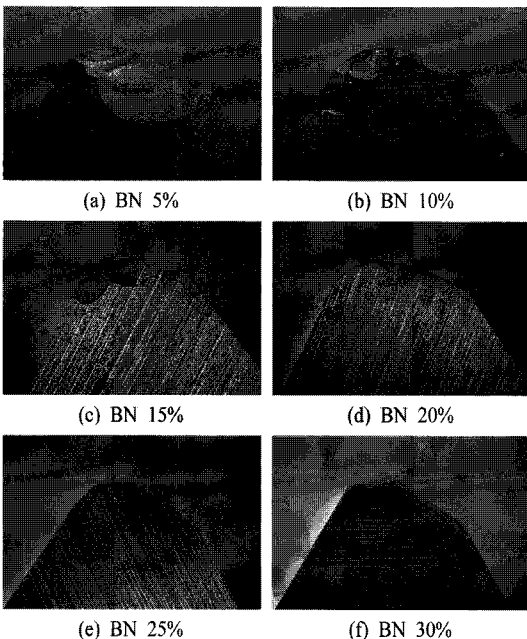


Fig. 7. Chipping and breakage in rake face of carbide tool (feed rate 60mm/min, depth of cut 0.2mm).

그러므로 Fig. 6과 7은 Fig. 4와 5에 비교하여 절삭 선단의 파손을 더욱 크게 한다는 것을 예상할 수 있다. 특히 이송의 증가는 칩핑에 의한 영향을 증가시키므로 BN의 함유량이 20%인 세라믹 시편에 까지 선단의 칩핑을 발생시키는 결과를 초래하였다. 또한 마손에 의한 손상은 BN 25%, 30%를 함유한 시편에서도 이송속도의 증가로 인해 공구 손상이 더욱 크게 발생하였음을 확인할 수 있다. Fig. 7과 같이 절삭깊이가 증가되면 칩핑과 공구손상의 영향은 더욱 증가한다.

그러므로 본 연구에서 가공성 세라믹을 대상으로 실험적 방법에 의한 초경공구의 경사면 마멸은 칩핑과 마손에 의한 어브레시브 마멸이 공구 손상의 주요 원인을 확인할 수 있다.

3.3. 여유면 마멸

본 연구에서 공구의 경사면 손상은 칩핑에 의한 영향이 주요 원인이다. 실험에 사용된 시편의 특성상 연속적인 칩 발생은 발생하지 않으며 미세 분말과 같은 형태로 발생되므로 가공 중 발생하는 칩은 공구와 시편 사이에서 지립자로 작용하여 공구의 손상을 초래한다. 이러한 손상은 공구의 측면과 여유면의 마멸폭과 깊이를 크게 하였으며 Fig. 8~11에 나타내었다. 금속을 대상으로 한 일반적인 마멸 특성은 공구의 코너 선단의 일정 지점에서 발생하며, 여유면의 표면에 광택을 보이며 박리된다. 본 연구에 사용된 가공성 세라믹의 경우에는 금속의 절삭과는 다른 특성을 보였다. 실험적으로 평가된 여유면 마멸 특성은 세라믹 가공시 발생하는 칩이 공구와 여유면 사이에서 지립자 역할로 작용하여 여유면 표면의 어브레시브 마멸의 원인으로 발생, 마모 폭을 증가시키는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 이송속도 30mm/min, 절삭깊이 0.1mm의 조건으로 엔드밀 가공 후 각각의 절삭선단에서 마멸과 파손의 형태를 나타낸 것이다. Fig. 8의 (a)~(f)는 BN의 함유가 5~30%인 가공성 세라믹을 대상으로 엔드밀 가공 후 초경공구의 파손 형태를 나타낸 것이다. (a)는 BN을 5% 함유한 가공성 세라믹을 대상으로 절삭 후 공구가 마멸된 사진으로 마멸 폭과 넓이가 가장 크게 나타났으며 마멸의 거칠기가 다른 것에 비교하여 가장 뚜렷하게 발생하였음을 확인할 수 있다. 가공성 세라믹에 함유된 BN 함유량이 증가할수록 이와 같은 상태의 마멸은 감소되며 특히, 30%의 BN을 함유한 경우에는 마멸이 거의 발생하지 않았음이 확인되었다. Fig. 9는 절

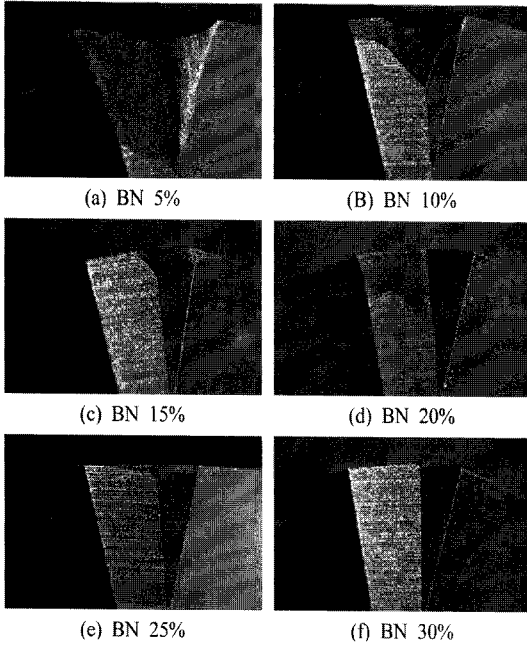


Fig. 8. Chipping and breakage in clearance face of carbide tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0,1mm).

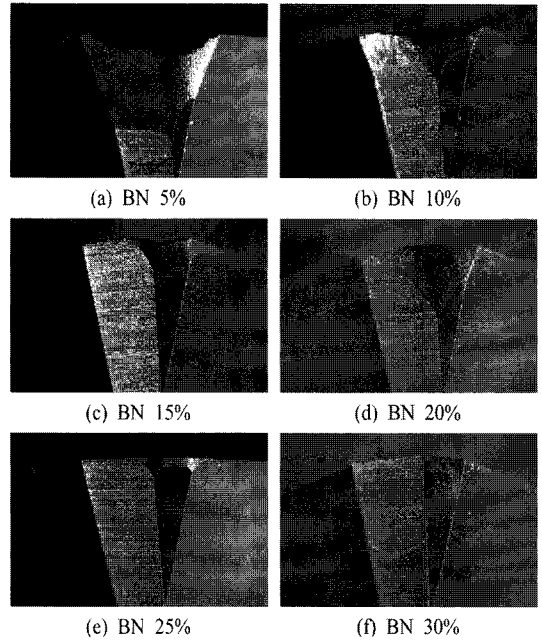


Fig. 10. Chipping and breakage in clearance face of carbide tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0,1mm).

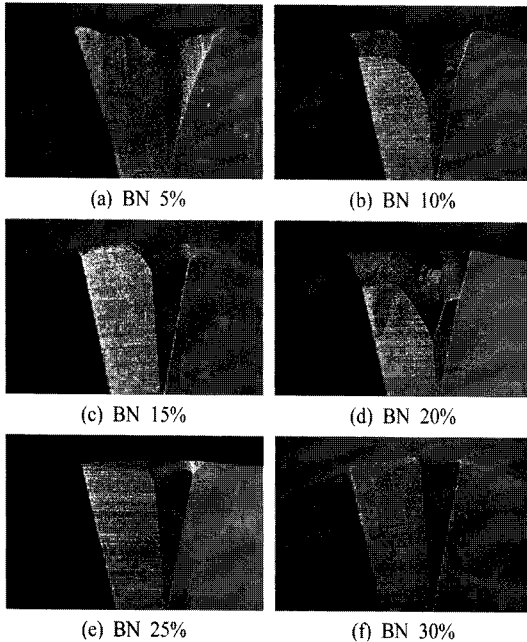


Fig. 9. Chipping and breakage in clearance face of carbide tool(feed rate 30mm/min, depth of cut 0,2mm).

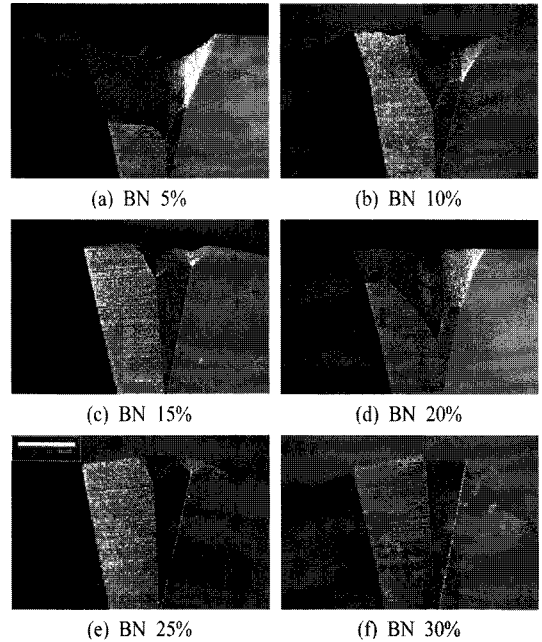


Fig. 11. Chipping and breakage in clearance face of carbide tool(feed rate 60mm/min, depth of cut 0,2mm).

삭깊이 0.2mm의 조건으로 엔드밀 가공한 결과로써 다른 조건은 Fig. 8과 동일하다. 절삭깊이의 증가는 공구와의 접촉면적을 증가시키므로 절삭력을 크게 발생시키며, 이에 따라 공구의 마멸을 증가시

킨다. 그러나 Fig. 8과 비교하여 두드러지게 증가되지는 않았으며 다소 증가되었을 뿐, BN의 함유량에 따른 전체적인 공구마멸의 경향은 Fig. 8과 유사하였다. Fig. 10은 이송속도 60mm/min, 절삭깊

이 0.1mm의 조건으로 엔드밀 가공 후 각각의 절삭 선단에서 여유면의 마멸 형태를 나타낸 것이다. Fig. 11은 절삭 깊이를 0.2mm의 조건으로 엔드밀 가공한 결과로써 다른 조건은 Fig. 10과 동일하다. Fig. 10과 11은 각각 Fig. 8과 9에 비교하여 이송속도가 2배 증가된 것이다. 이송속도의 증가는 절삭력을 더욱 크게 하여 여유면 마멸을 증가시킨다. 그러므로 Fig. 8과 9에 비하여 절삭선단에서의 여유면 마멸의 폭과 넓이가 더욱 크게 발생하였음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문은 Si3N4 세라믹에 5~30%의 BN을 함유한 가공성 세라믹을 대상으로 정밀 부품의 안전한 생산을 위한 초경 절삭선단의 마멸 패턴과 메커니즘을 실험적으로 분석한 연구이며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) BN의 함유량이 적을수록 경사면은 칩핑에 의한 공구 손상이 크게 발생하며, 반대로 BN의 함유량이 많은 경우에는 주로 어브레시브 마멸의 형태로 공구 손상이 발생한다.
- 2) 여유면에서 공구 손상의 형태는 모두 지립자 형태의 칩에 의한 어브레시브 마손의 형태로 나타났으며 BN의 함유량이 적을수록 공구의 마멸폭과 넓이를 크게 한다.
- 3) 손상된 공구 여유면의 거칠기는 BN의 함유량이 적을수록 거칠게 나타나는 것을 거시적으로 확인할 수 있었다.

4) 절삭깊이와 이송의 증가는 절삭 선단의 경사면과 여유면 손상을 다소 증가시켰을 뿐 크게 영향을 미치지 않는다는.

참고문헌

- 1) J. W. Han, "A Study on the Residual Stresses of Ceramic Coating", Journal of the KOSOS, Vol. 22, No. 1, pp. 19~23, 2007.
- 2) J. W. Han, "Failure of Ceramic Coatings Subjected to Thermal Cyclings", Journal of the KOSOS, Vol. 20, No. 2, pp. 1~5, 2005.
- 3) Y. Cao, "Failure analysis of exit edges in ceramic machining using finite element analysis", Engineering Failure Analysis, Vol. 8, pp. 325~338, 2001.
- 4) G. Zhang, Y. Cao and L. Qi, "Single point cutting of machinable glass ceramics", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXVII, pp. 159~164, 1999.
- 5) G. Zhang, L. Qi and Y. Cao, "Assessment of machining performance of dental ceramics", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXVI, pp. 105~110, 1998.
- 6) Z. Y. Wang, K. P. Rajurkar and M. Murugappan, "Cryogenic PCBN turning of ceramic(Si3N4)", Wear, Vol. 195, pp. 1~6, 1996.
- 7) B. H. Yan, F. Y. Huang and H. M. Chow, "Study on the turning characteristics of alumina-based ceramics", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 54, pp. 341~347, 1995.
- 8) S. M. Jang, M. W. Cho, W. S. Cho and J. H. Lee, "Evaluation of R-curve Behavior Analysis and Machinability of Si3N4-hBN Machinable Ceramics", J. of KSPE, Vol. 21, No. 1, pp. 61~70, 2004.