

열간가압소결에 의해 제조된 AlN-hBN 복합재료의 마이크로 엔드밀링 절삭특성 비교와 공구마모에 관한 실험적 연구

백시영*, 신봉철⁺, 조명우⁺⁺, 조원승⁺⁺⁺
(논문접수일 2008. 3. 18, 심사완료일 2008. 4. 30)

Experimental Investigations on Micro End-milling Cutting Characteristics Comparison and Tool Wear Behavior of AlN-hBN Composites Sintered by Hot-pressing

Si Young Beck*, Bong Cheol Shin⁺, Myeong Woo Cho⁺⁺, Won Seung Cho⁺⁺⁺

Abstract

The objective of this study is to evaluate micro end-milling characteristics and tool wear behavior of AlN-hBN composites. First, AlN based composites with hBN contents in the range of 10 to 20vol% were prepared by hot-pressing. Vickers hardness and flexural strength of the prepared composite specimens were measured and compared according to the vol% of hBN variations. Then, cutting force variations were measured and analyzed using a tool dynamometer during the micro end-milling experiments; and machined surface shapes and roughness were investigated using a 3D non-contact type surface profiler. After micro end-milling, worn tools were investigated using a tool microscope and SEM images. From the experimental results, it can be observed that the cutting forces decreased, and surface qualities were improved with increasing hBN contents. At low content of hBN, tool chipping was observed; and tool wear rate decreased with increasing hBN contents. The results of this study insist that proper machining conditions, including tool wear behavior investigation, should be determined for the micro end-milling of AlN-hBN composites for its further application.

Key Words : AlN-hBN composites(복합재료), Machinable ceramics(머시너블 세라믹스), Machinability evaluation(가공성 평가),
Micro end-milling(마이크로 엔드밀링), Micro tool wear(마이크로공구 마모)

* 인하대학교 기계공학과 대학원 (beck2007@nate.com)
주소: 402-751 인천광역시 남구 용현동 253 기계공학과 2북265C 마이크로생산시스템연구실
+ 인하대학교 기계공학과
++ 인하대학교 기계공학부
+++ 인하대학교 신소재공학부

1. 서론

질화알루미늄(AIN)계 세라믹스는 우수한 열전도성과 높은 경도를 지니고 있으며, 고온에서의 내열성, 내마모성 등이 우수한 소재로 높은 용융점과 크리프 저항 값을 지니고 있다. 또한 비전도성 특성을 지니고 있으며, 실리콘과 열팽창 계수가 유사해 반도체 치구재료로도 사용되고 있으며, 내마모성 전자부품, 저항기의 히트싱크 재료 등으로 그 적용이 확대되고 있다⁽¹⁻³⁾. AIN와 같은 구조용 세라믹스는 통상적으로 소결에 의해 제조되며, 연마 등의 입자에 의한 가공방법으로 소결 후 재료수축에 의해 발생하는 형상오차의 보정 및 표면거칠기 개선 등의 후공정이 수행되고 있다. 그러나 AIN계 세라믹스는 대표적인 난삭재의 하나로 초경공구에 의한 기계가공은 거의 불가능한 소재로 알려져 있으며, 이러한 AIN계 세라믹스 소재의 광범위한 응용을 위해서는 복잡한 형상의 정밀 기계가공이 가능해야 한다. 세라믹스의 절삭 메커니즘은 재료의 소성유동에 의해 칩이 발생하는 금속의 경우와는 달리, 재료의 경취성으로 인해 공구에 의해 시작된 미세균열이 재료내부에 전파되며, 이러한 미세균열의 전파가 자유표면에 도달하면 재료의 일부가 파괴되어 이탈되는 메커니즘으로 이해되고 있다. 이에 비하여 AIN계 세라믹스에 육방정 질화붕소(hexagonal boron nitride, hBN)를 첨가시킨 AIN-hBN계 세라믹스 복합재료는 초경공구를 이용한 기계가공이 가능하여 머시너블 세라믹스(machinable ceramic)라 불리 운다. 첨가된 hBN은 흑연과 유사한 구조를 가지며, hBN의 판상입자들이 미세균열의 전파를 용이하게 하여 재료의 벽개성^(4,5)을 향상시키며, 이로 인해 재료의 항절삭력이 크게 저하되어 기계가공이 용이한 것으로 알려져 있다^(6,7). 이러한 AIN-hBN계 머시너블 세라믹스의 절삭 메커니즘을 설명하기 위한 대략적인 순서도를 Fig. 1에 나타내었다.

본 연구에서는 AIN매트릭스에 판상의 hBN을 10, 15, 20vol% 첨가하고, 열간가압소결에 의해 실험을 위한 시편을 제작하였으며, 제작된 시편에 대하여 마이크로 엔드밀을 이용한 미세가공실험을 수행하여 그 결과를 고찰하였다. 먼저 hBN 함유량의 변화에 따른 시편의 절삭성 및 가공 후 표면을 공구동력계와 3차원 형상측정기를 사용하여 관찰하였으며, 고속의 마이크로 가공에서 필연적으로 발생하는 공구의 파손 및 마모저동을 공구현미경과 SEM 사진을 통하여 고찰하였다.

실험결과 hBN의 함유량이 증가하면 재료의 경도 및 파괴인성 등의 물성치가 크게 저하되나, 동시에 절삭력의 감소,

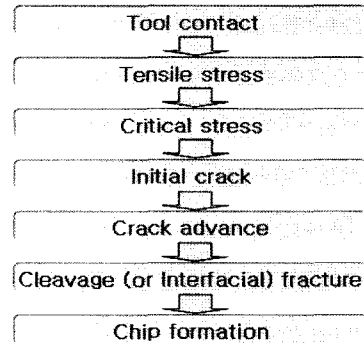


Fig. 1 Flow chart for Machining mechanism of machinable ceramics

표면거칠기의 개선 등의 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 동시에 공구의 파손이나 마모 또한 감소하는 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 향후 AIN-hBN계 머시너블 세라믹스 소재에 요구되는 적절한 hBN 함유량 및 적절한 미세가공 조건의 결정을 위한 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. AIN-hBN 계 머시너블 세라믹스의 제조

치밀화된 AIN-hBN 머시너블 세라믹스를 제조하기 위해 매트릭스 분말로 α -AIN(순도 99.15%, 평균입도 2.9 μ m, Tokuyama, Japan)을 사용하였고 기계가공성을 부여하기 위해 hBN(순도 99%, 평균 입도 크기 10 μ m, TDK, Japan)을 0~20vol% 첨가하였다. 소결조건으로는 Y₂O₃(순도 99.9%, 평균입도크기 0.25 μ m, Shinetsu Chemical Co., Japan)와 유기결합제인 DL-camphor를 소량 첨가하여 열간가압소결(1800 $^{\circ}$ C \times 2h, 30MPa, N₂분위기)에 의해 실험에 필요한 시편(각 1개의 hBN 10, 15, 20vol% 함유량 별 ϕ 60mm, 두께 8mm)과 물성평가를 위한 각각의 시편(3 \times 4 \times 36mm)을 제조 하였으며, 이에 대한 개략적인 제조공정은 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 3은 AIN 분말과 hBN 입자를 나타낸 것이며, Fig. 4는 제조된 머시너블 세라믹스 파단면을 SEM으로 촬영한 결과이다. hBN이 함유되지 않은 AIN 단일체(monolith) 세라믹스의 경우 전형적인 입계 파괴양상을 보이는데 비하여 AIN-hBN 복합재료에서는 hBN의 첨가에 따라 파괴양상이 달라지며, 15vol%와 20vol%의 hBN을 첨가한 경우에는 입계파괴와 입내파괴가 동시에 나타난 것이 관찰되었다⁽⁵⁻⁷⁾.

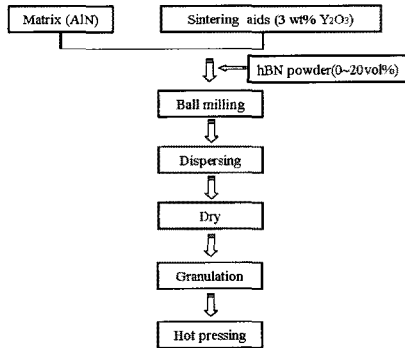
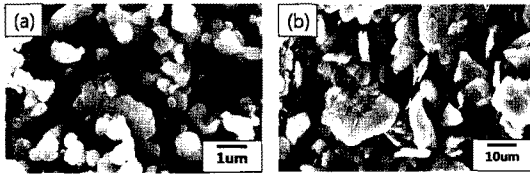


Fig. 2 Flow chart of AlN-hBN Machinable ceramics machining mechanism

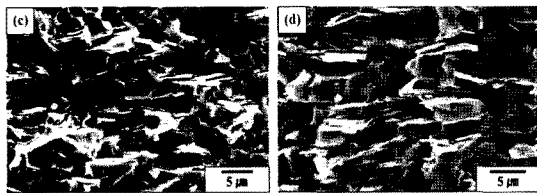


(a) AlN powder (b) hBN powder

Fig. 3 SEM micrographs of AlN and hBN powders



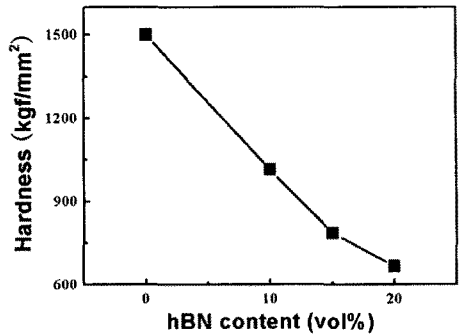
(a) 0vol% of hBN (b) 10vol% of hBN



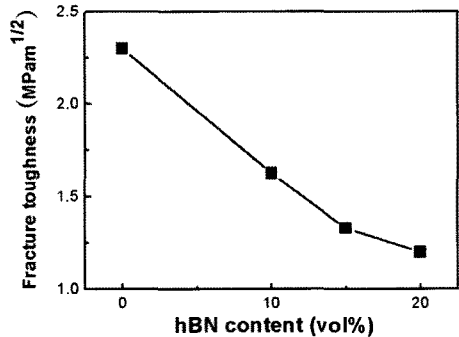
(c) 15vol% of hBN (d) 20vol% of hBN

Fig. 4 SEM micrographs of fracture surfaces of the AlN-hBN composites

Fig. 4에서 보는 바와 같이 hBN의 양이 증가할수록 시편 파단면의 판상조직이 증가하는 것을 확인할 수 있으며⁽⁸⁾, 이러한 판상조직의 증가는 세라믹스 시편의 미세균열의 전파를 용이하게 하여 시편의 가공성이 개선되는 것으로 알려져



(a) Vickers hardness variations



(b) Fracture toughness variations

Fig. 5 Effects of hBN contents on the material properties of the composites

있다^(9,10).

Fig. 5는 제조된 AlN-hBN 머시너블 세라믹스에 대하여 hBN 함유량에 따른 시험시편(3×4×36mm)에 압자압입법을 사용하여 측정된 경도와 파괴인성 K_{IC}(microhardness tester: Tukon model 300, 98N, 30초, 5회 측정) 값의 변화를 나타낸 것이며, hBN함유량이 증가할수록 이러한 특성 값이 저하되는 것을 알 수 있다. 따라서 hBN의 함유량이 증가하면 머시너블 세라믹스의 절삭성은 개선되나 경도와 파괴인성 등과 같은 물성치는 저하되므로, 재료에 요구되는 적절한 조건의 결정이 중요한 요소라는 것을 알 수 있다.

3. 실험장치 구성 및 조건

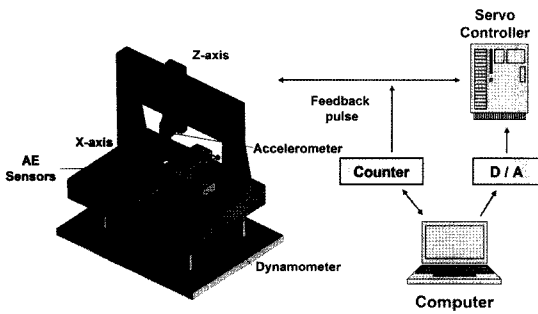
본 실험에 사용된 실험장치의 개요를 Fig. 6(a)에 나타내었으며, (b)는 마이크로 스테이지에 측정용 센서를 설치한 사진이다. 절삭력 측정 및 분석을 위해 마이크로 가공용 공구동력계(Kistler 9256C1)를 테이블에 설치하였고, 그 위에

지그를 조립하여 제조된 머시너블 세라믹스 시편을 고정하였다. 실험에 사용된 장비의 사양은 Table 1에 나타내었으며, 실험에 적용된 절삭조건은 Table 2와 같다.

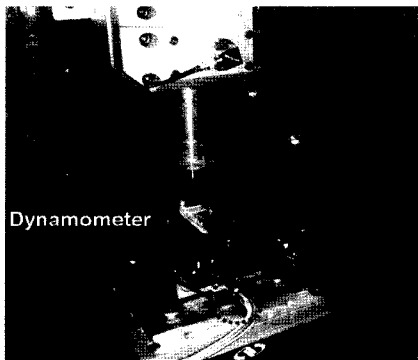
4. 실험 결과

4.1 절삭력 측정

AIN-hBN 세라믹스 시편의 hBN 함유량 및 가공조건 변화에 따른 절삭성을 실험적으로 파악하고자 마이크로 가공용 공구동력계(Kistler 9256C1)로 측정된 절삭력의 이송방향과 축방향 성분을 Fig. 7에 나타내었다. 실험은 스피indle 회전수 30,000rpm에서 이송속도 30mm/min, 40mm/min, 절삭깊이 10 μ m, 20 μ m의 조건에서 수행되었으며, 그림에 나타난 바와 같이 시편의 hBN 함유량이 증가할수록 각 방향 절삭력의 크기가 감소하였으며, 동일한 hBN 함유량을 가진 시편의 경우 이송속도와 절삭 깊이가 증가할수록 절삭력이 증가하는 것을 알 수 있다. 측정된 절삭력의 크기가 hBN 함유량의 증가에 따라 감소하는 이유는 제조된 시편에 함유된 판상의 hBN조직이 공구에 의해 발생된 미세균열의 전파를



(a) Schematic diagram



(b) Installed sensors

Fig. 6 Experimental system setup

Table 2 Experimental cutting conditions for micro end milling

Cutting variable	Cutting condition
Feed rate	30, 40mm/min
Spindle revolution	30,000rpm(47.1m/min), 40,000rpm(62.8m/min)
Tools(2-flute flat HCE, Ti coating)	ϕ 500 μ m Micro end-mill
Tool helical angle	30 $^\circ$
Workpieces	AIN-hBN 10, 15, 20vol%
Depth of cut	10, 20, 30, 60 μ m
Milling mode	Down milling

Table 1 Specification of the micro machining System

Traveling range	X, Y-axis : 600mm Z-axis : 200mm
Resolution	X, Y, Z-axis : 0.1 μ m
Accuracy	X, Y-axis : 0.2 μ m
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2 μ m
Max. velocity	X, Y-axis : 200mm/s Z-axis : 100mm/s
Rotational speed	Max. 100,000rpm
Spindle run-out	Max. 0.6 μ m
Static radial load	Max. 6kgf
Workpiece weight	Max. 45kgf
Lubrication	Dry cutting

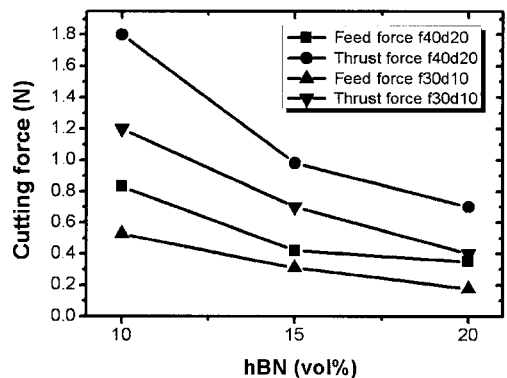


Fig. 7 Measured cutting force variations

용이하게 하여 적은 힘으로 칩의 발생이 가능하였기 때문이며, 앞의 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 시편의 경도 및 파괴인성이 저하되었기 때문이다. 또한 hBN 함유량에 따른 축방향 절삭력의 차이가 이송방향의 절삭력과 비교하면 상대적으로 크게 발생한 것을 관찰할 수 있는데, 이는 hBN 함유량

에 따른 시편의 경도 차이로 공구파손의 정도가 크게 차이가 났기 때문이라고 사료되며, 특히 hBN 함유량이 적을수록 선단 여유면의 칩핑과 마모가 크게 발생하여 공구와 시편과의 접촉 면적이 증가한 결과로 판단된다.

4.2 가공표면 측정

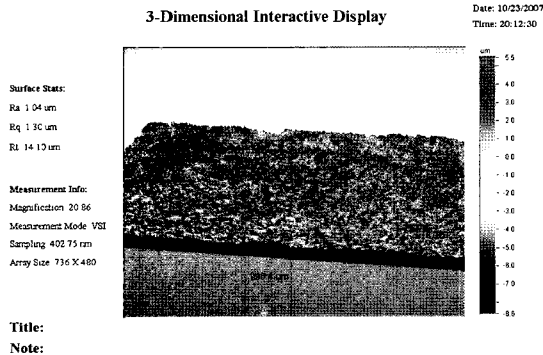
Fig. 8은 hBN의 함유량이 각각 10, 15, 20vol%인 시편을 마이크로 엔드밀링 가공 후 3차원 형상측정기(Veeco NT-1000)로 측정된 가공면의 상태를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 가공조건에서 hBN 함유량 증가에 따라 측정된 표면거칠기가 Ra=1.04 μ m, Ra=0.92 μ m, Ra=0.79 μ m로 개선되는 것을 알 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 hBN의 함유량이 증가할수록 절삭력의 크기 및 변동이 감소한 결과라고 판단된다.

4.3 공구파손 및 마모고찰

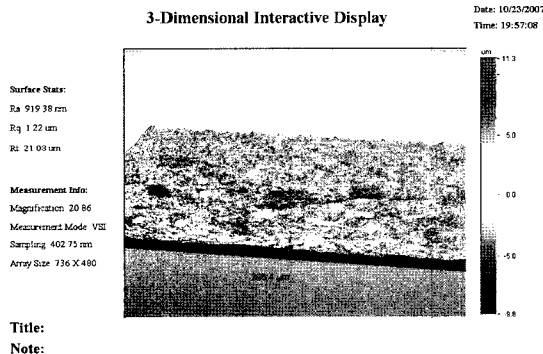
절삭 중 발생하는 공구의 파손이나 마모는 공작물의 가공 품질을 결정짓는 중요한 변수 중의 하나이다. 특히 미세가공에서는 사용되는 공구의 직경이 매우 작고 주로 고속영역에서 가공이 진행되기 때문에 일반 절삭가공에 비하여 공구의 마모가 신속하게 진행되며, 가공 중에는 공구의 상태를 육안으로 확인하는 것이 불가능하므로 이에 대한 체계적인 고찰이 필요하다⁽¹¹⁾.

4.3.1 기초실험

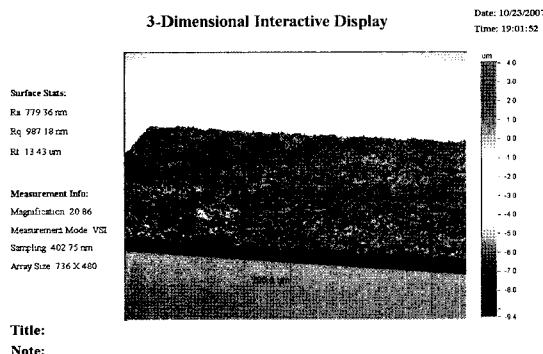
본 연구를 수행하기 위한 기초실험으로 hBN이 20vol% 함



(a) 10vol% of hBN(Ra=1.04 μ m)

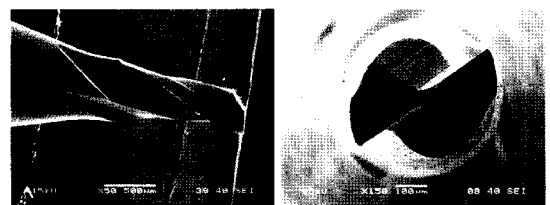


(b) 15vol% of hBN(Ra=0.919 μ m)

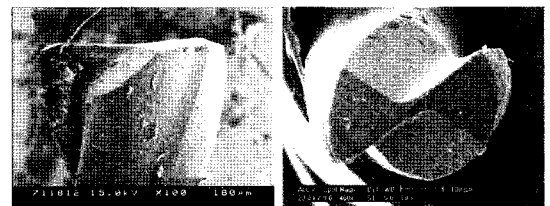


(c) 20vol% of hBN(Ra=0.789 μ m)

Fig. 8 Measured 3D profile and surface roughness after machining



(a) New tool, before cutting



(b) Worn tool, after cutting

Fig. 9 SEM micrographs of a micro tool before and after machining

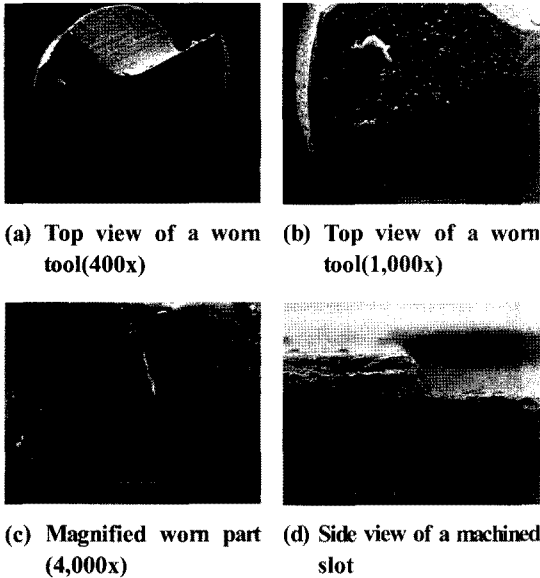


Fig. 10 SEM micrographs of a worm micro tool and a machined micro slot

유된 시편을 직경 500 μ m인 마이크로 엔드밀로 30,000rpm, 이송속도 30mm/min, 절삭깊이 20 μ m의 조건에서 미세 슬롯을 20mm 가공한 후 SEM 사진을 촬영하여 공구전단의 손상 상태를 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 가공 전 공구의 예리한 형상이 가공 후에는 선단과 여유면에 심한 마모가 진행되었음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 공구의 손상상태 및 가공된 미세 슬롯의 상태를 관찰하기 위해 배율을 변화시키며 촬영한 SEM 사진이며, 공구의 선단이 칩핑에 의해 손상된 것을 관찰할 수 있으며, 이로 인하여 그림 (d)와 같이 가공된 미세 슬롯의 단면이 직각에서 벗어난 상태로 형성되었음을 확인할 수 있다.

4.3.2 hBN 함유량 변화에 따른 공구마모 형태 분석

AlN-hBN 세라믹스의 hBN함유량 변화에 따른 마이크로 공구의 마모형태 분석을 위하여 hBN을 각각 10, 15, 20 vol% 함유한 세라믹스 시편을 직경 500 μ m 마이크로 엔드밀로 20mm 길이의 미세 슬롯을 절삭하여 그 결과를 관찰하였다. 실험에 사용된 절삭조건은 회전수 30,000rpm, 이송속도 30mm/min, 절삭깊이 20 μ m이며, Fig. 11에 절삭 전후의 공구상태를 공구현미경과 SEM을 이용하여 관찰한 사진을 나타내었다. 그림 (b)은 hBN이 10vol% 함유된 시편을 가공한

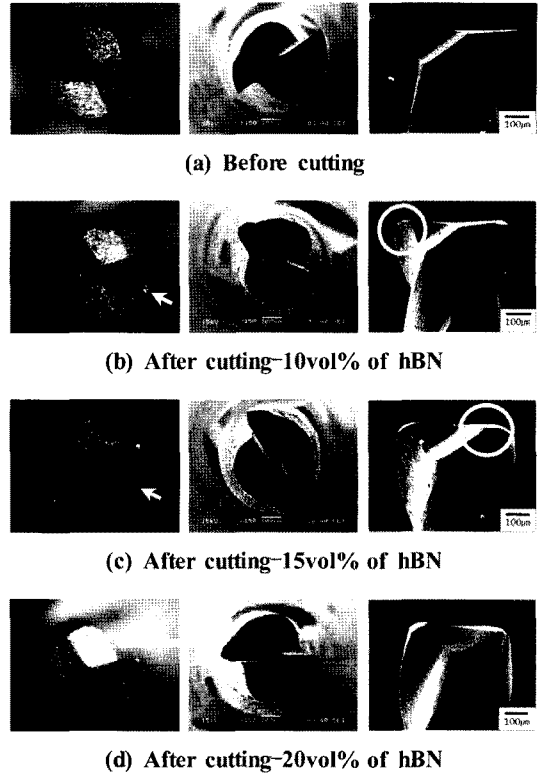


Fig. 11 Tool wear behaviors with different hBN contents

후의 공구상태이며, 시편의 상대적으로 높은 경도 및 공구와 시편과의 접촉충격에 의하여 절삭선단 여유면에 칩핑으로 인한 공구파손이 뚜렷하게 나타난 것을 관찰할 수 있다. 그림 (c)에 나타낸 hBN 15vol%의 경우 칩핑 현상이 줄어들고 가공 중 형성된 분말형태의 칩이 시편과 공구사이에서 연삭 마모를 초래한 것을 관찰할 수 있으며, 그림 (d)의 hBN 20vol%의 경우 가장 마모가 적게 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 hBN 함유량의 증가에 따라 시편의 경도 및 파괴인성이 현저하게 저하되며, 절삭시 생성되는 분말형상의 칩 크기가 감소하여 연삭마모의 정도가 감소하였기 때문 이라고 판단된다. 또한 공구의 고속회전에 의하여 재료를 제거하는 마이크로 가공의 특성상 절삭속도가 가장 높으며, 취약한 공구의 외주부에서 칩핑 및 마모가 집중적으로 발생되는 것을 관찰할 수 있다.

4.3.3 절삭조건 변화에 따른 공구마모 형태 분석

다음으로 동일한 성분의 시편에 대하여 절삭조건 변화

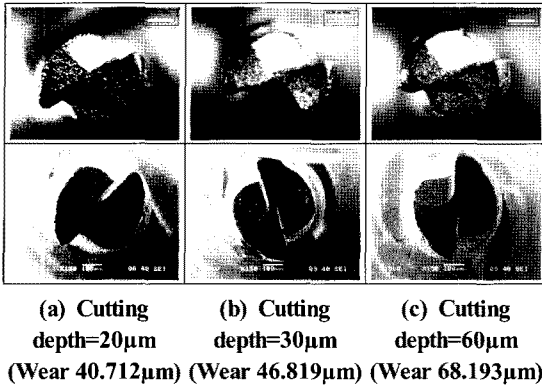


Fig. 12 Tool wear behaviors under different cutting conditions(for 20vol% of hBN)

에 따른 공구마모 형태의 고찰을 위한 실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 실험은 hBN 함유량이 20vol%인 시편에 대하여 상기와 동일한 절삭조건에서 수행되었다. 절삭 깊이를 20, 30, 60 μm 로 증가시키며 미세 슬롯을 가공한 후 마모의 길이를 공구현미경(썬백비전 STV-C-2010)을 사용하여 500배율로 공구의 바다 직경을 중심선으로 수평선상에서 한쪽 날의 여유면 마모 최대 폭을 측정하고 SEM을 이용하여 촬영한 결과를 Fig. 12에 나타내었다⁽¹²⁾. 절삭 깊이가 20, 30, 60 μm 로 증가함에 따라 공구 선단부의 마모 폭이 40.7, 46.8, 68.2 μm 로 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 절삭 깊이의 증가에 따라 재료제거량 및 분말형태의 칩 생성량이 증가하며, 생성된 칩의 배출이 원활하지 못하여 공구의 연삭 마모를 촉진시킨 결과로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 AlN-hBN계 머시너블 세라믹스에 대한 마이크로 엔드밀링 가공특성 및 공구마모 양태를 고찰하기 위하여 hBN 함유량이 10, 20, 30vol%인 시편을 제조하여 관련 실험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 제조된 AlN-hBN계 머시너블 세라믹스의 물성치 시험 결과 강도 및 파괴인성은 hBN의 함유량이 증가할수록 저하되었다.
- (2) 절삭력 측정 결과 hBN 함유량이 증가할수록 절삭력이 감소하였으며, 이는 판상의 hBN 입자가 공구에 의해 발생한 미세균열의 전파를 용이하게 한 결과에 기인한 것

이다.

- (3) 가공된 표면의 형상측정 결과 hBN 함유량이 증가할수록 가공된 표면의 거칠기가 향상되는 것을 알 수 있었으며, 이는 절삭력 및 진동의 감소와 더불어 발생하는 칩의 크기가 작아지는데 기인한 결과라고 판단된다.
- (4) 가공 전후의 공구상태를 분석한 결과 hBN 함유량에 따라 공구의 파손 및 마모상태가 다르게 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. hBN을 10vol% 함유한 경우 칩핑으로 인한 파손이 가장 뚜렷하게 나타났으며, 15vol% 시편의 경우 절삭가공으로 생성된 세라믹스의 미세분말 칩이 시편과 공구 사이에서 마모를 초래하여 여유면에 공구 손상을 일으켰다. 또한 20vol%를 함유한 경우에는 칩핑과 마모에 의한 손상이 두드러지게 약화되는 것을 알 수 있었다.
- (5) hBN의 함유량이 증가할수록 절삭력 및 공구의 마모가 감소하고 가공표면의 품질이 향상되었다. 그러나 소재의 강도 및 파괴인성이 현저하게 감소하므로 차후 응용 제품 설계시 소재에 요구되는 특성에 적합한 미세가공 조건의 도출이 필요하다.

후기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- (1) Tajika, M., Rafaniello, W., and Niihara, K., 2000, "Sintering behavior of direct nitride AlN powder," *Materials Letters*, Vol. 46, pp. 98~104.
- (2) Zhao, H., Wang, W., Fu, Z., and Wang, H., 2008, "Thermal conductivity and dielectric property of hot-pressing sintered AlN-BN ceramic composites," *Ceram. Int.*, viewed 20 January 2008, <<http://www.sciencedirect.com>>.
- (3) Werdecker, W. and Aldinger, F., 1984, "Aluminum Nitride-An Alternative Ceramic Substrate for High Powder Application in Microcircuits," *IEEE Trans. Components Hybrids Manuf. Technol.*, Vol. CHMT-7, No. 4, pp. 399~404.
- (4) Cho, M. W., Kim, D. W., Cho, W. S., Park, D. S., and Lee, J., 2007, "Micro Groove Machining Characteristics of Si₃N₄-hBN Composites," *Key*

- Engineering Materials*, Vol. 336-338, pp. 1461~1464.
- (5) Park, D. S., Cho, M. W., Kim, D. W., and Cho, W. S., 2004, "Micro-Pattern Machining Characteristics Evaluation of Si₃N₄-hBN based Machinable Ceramics Using Powder Blasting Process," *Trans. of KSMTE.*, Vol. 13, No. 2, pp. 33~39.
- (6) Cho, W. S., Piao, Z. H., Yoo, Y. C., Lee, T. C., Cho, M. W., Hong, Y. C., Park, K., and Hwang, W.S., 2007, "Microstructure and mechanical properties of AlN-hBN based machinable ceramics prepared by pressureless sintering," *J. Europ. Ceram. Soc.*, Vol. 27, pp. 1425~1430.
- (7) Gam, J. S., Ha, J. S., Cheong, D. S. and Han, K. S., 1994, "Machinability and Strength of AlN-BN Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, Vol. 31, No. 2, pp. 177~184.
- (8) Beck, S. Y., Cho, M. W., and Cho, W. S., 2008, "Mechanical Properties and End-milling Characteristic of AlN-hBN Based Machinable Ceramics," *J. Kor. Ceram. Soc.*, Vol. 45, No. 1, pp. 75~81.
- (9) Cao, Y., 2001, "Failure analysis of exit edges in ceramic machining using finite element analysis," *Engineering Failure Analysis*, Vol. 8, pp. 325~338.
- (10) Jang, S. M. and Cho, M. W., 2004, "Surface Properties and Tool Wear of Si₃N₄-hBN Machinable Ceramics in Endmill Machining using Tungsten Carbide Tool," *J. Kor. Soci. Manuf. Pro. Eng.*, Vol. 3, No. 1, pp. 15~21.
- (11) Cho, M. W., Kim, D. W., and Cho, W. S., 2007, "Analysis of micro-machining characteristics of Si₃N₄-hBN composites," *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 27, pp. 1259~1265.
- (12) Lai, X., Li, H., Li, C., Lin, Z., and Ni, J., 2008, "Modelling and analysis of micro scale milling considering size effect, micro cutter edge radius and minimum chip thickness," *Int. J. Mach. Tools & Manuf.*, Vol. 48, pp. 1~14.