

SEM 내 마이크로 절삭에 의한 초경합금재의 절삭 특성에 관한 연구

허성중[#]

Study on Cutting Characteristics of WC-Co with Micro Cutting in SEM

Sung Jung Heo[#]

ABSTRACT

This paper describes that the micro-cutting of WC-Co using PCD (Polycrystalline Diamond) and PcBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) cutting tools are performed with SEM(Scanning Electron Microscope) direct observation method. The purpose of this study is to present reasonable cutting conditions to obtain precise finished surface and machining efficiency. Summary of the results are shown below: (1) The thrust cutting forces tend to increase more than the principal forces as the depth of cut and the cutting speed are increased preferably on orthogonal micro-cutting. (2) The tool wear in the flank face was formed larger than that in the rake face on orthogonal micro cutting. (3) The wear appearance for PCD tools is abraded by hard WC particles of the work materials, which lead diamond grain to be detached from the bond.

Key Words : WC-Co(초경합금재), Difficult-to-Cut materials(난삭재), Micro-cutting(마이크로 절삭), SEM(주사형 전자현미경) PCD cutting tools(다결정 다이아몬드 절삭공구), tool wear(공구 마멸), cutting resistance(절삭저항), machined surface(가공면)

1. 서론

최근, 절삭 가공에 있어서 제품의 소형화 및 공작기계의 고성능화에 의한 초정밀 가공과 고속, 고능률적 가공과 고기능, 고부가가치를 위한 난삭재의 사용 증가에 의한 난절삭가공 등에 관한 연구의 필요성이 더욱 중요하게 인식되고 있다.

난삭재의 하나인 초경합금재는 텅스텐 카바이드(WC, 융점 1495°C)를 주성분으로 하는 여러 종류의 탄화물을 대상으로 이들 탄화물 미분말에 코발트, 철, 니켈, 등의 철계 금속을 결합제로 첨가

하여 소결 성형 시킨 금속을 총칭하는 것으로 용도에 따라 탄화 티탄(TiC), 탄화 탄탈(TaC)을 적당한 비율로 첨가한다.¹

이러한 초경합금재는 저온 경도는 물론 고온 경도가 우수하고 고강도로서, 물리적 성질이 안정되어 있는 것이 특징이며 높은 압축강도, 고온 경도, 강성 및 내마멸성을 가지므로 외부 압력이 작은 특징을 가지고 있다.

따라서 금형 부품의 제작, 즉 불 다이스부나 표면 결합이 생기기 쉬운 컴팩트 디스크, 초정밀 사출 금형용 금형의 편치부, 미세 성형용 금형 재

접수일: 2003 년 5 월 15 일; 게재승인일: 2003 년 8 월 14 일
교신저자: 두원공과대학 기계과
E-mail: sjheo@doowon.ac.kr, Tel: (031) 670-7135

료 등 내마멸, 내충격, 내식용 및 절삭 공구용으로 다양한 방면에 이용이 증가하고 있다.

초경합금재, 서어멧(cermet), 엔지니어링 세라믹스(engineering ceramics)와 같은 소결 경취성 재료는 소결체가 그대로 제품이 되는 경우도 있지만 높은 치수 정밀도와 표면 거칠기를 요구하는 제품에서는 소결 후, 최종 기계 가공이 필요로 하게 된다.

초경합금재의 가공에 일반적으로 이용되고 있는 가공법은 연삭 가공이며, 저자는 지금까지 고능률, 초정밀화를 추구하기 위한 초경합금재의 최적 연삭 가공 조건을 가공 현장에 제시하는 연구를 행해 왔다.^{2, 3, 4, 5} 그러나 가공 방법의 선택에 있어서는 연삭 가공의 주된 목적인 치수정밀도, 가공표면 거칠기 등 정밀도의 측면 뿐만 아니라 생산량의 증가 및 가공비의 절감과 같은 가공 능력의 향상도 반드시 고려하여야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 조성이 다른 3 종류의 내마멸 공구용 초경합금재를 대상으로 주사형전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope) 내 마이크로 절삭(Micro-cutting)을 통한 절삭 특성을 규명함으로써, 가공 정밀도와 공구 마멸을 고려한 고능률적 절삭 가공의 가능성을 연구하였다.

이를 위한 구체적인 방법으로는 공구동력계를 SEM 내 마이크로 절삭 장치에 장착하여, 초경합금재의 종류별 조성, 즉 경질 입자인 WC의 함유량에 따른 절삭저항의 차이를 비교하고, 절삭속도 및 절삭깊이의 변화에 따른 절삭저항을 측정하였다. 또한, 마이크로 절삭 시의 공구마멸과 결손의 형태 및 절삭 가공면의 상태와의 관계를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 SEM 내 마이크로 절삭 실험장치

SEM 내 마이크로 절삭장치는 절삭깊이의 정확한 설정을 위해 공구대의 강성을 높여 제작하였다. Fig. 1 에 본 연구를 위해 새롭게 제작한 SEM 내 마이크로 절삭 장치를, Fig. 2 에 그 구성을 나타내었다. 각 부분에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

베이스 블록부 ①은 뒷면에 뚫은 더브테일 홈(dovetail groove)과 고정구에 의해 SEM 내의 시료대에 고정된다. 공구 ②는 공구 홀더 ③에 삽입 후 나사로 체결되고, 다시 공구대 ④에 설치된 후,

베이스 블록에 고정된다. 공구대는 절삭저항을 측정하기 위해, Fig. 3 에 나타낸 바와 같이 스트레인 게이지(strain gage)를 사용하여 자체 설계, 제작된 공구동력계로 교환하여 설치할 수 있다.

시료대 베이스 ⑤는 시판되고 있는 레일 블록(rail block) ⑥과 이송용 볼 나사 ⑦을 사이에 두고 베이스 블록(base block) 위를 부드럽게 미끄럼 운동할 수 있다. 피삭재의 이송은 이송 볼 나사(ball screw) ⑦을 SEM 의 경통 외부의 스피드 컨트롤 모터(speed control motor)에 직결하여 행하고, 그 회전수 및 감속비를 제어함으로써 피삭재의 이송을 2 μ m/sec 부터 1mm/sec 사이에서 임의의 값으로 설정할 수 있다.

마이크로 절삭 장치용 시료대는 피삭재 홀더 ⑧과 그것을 공구대의 방향으로 미끄럼 운동시키는 이송 장치 ⑨로 구성되어 있다.

절삭 깊이의 설정은 베벨 기어(bevel gear)에 연결되어 있는 축을 모터에 연결하여, 직접 피삭재 홀더를 작동시킬 수 있도록 함으로써 1 μ m 단위의 정확한 설정이 가능할 수 있도록 하였다.

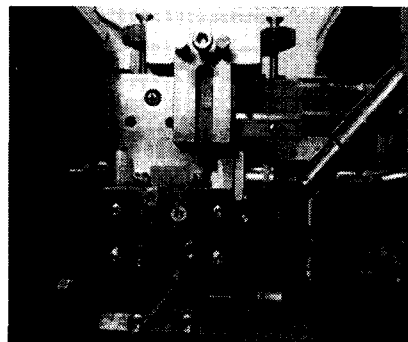


Fig. 1 Photo of micro-cutting device in SEM

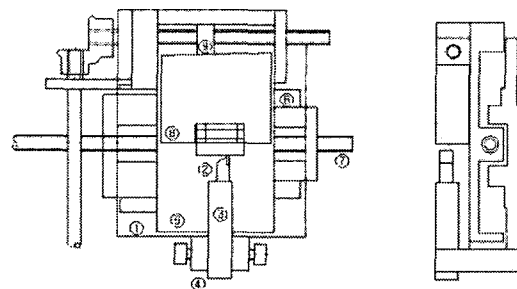


Fig. 2 Structure of micro-cutting device

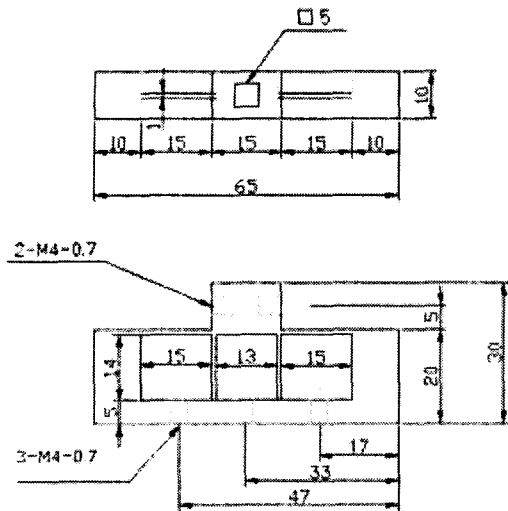


Fig. 3 Tool dynamometer for micro-cutting

2.2 실험조건 및 방법

초경합금재의 마이크로 절삭 실험에 사용한 공구는 최근 실용화 되고 있는 다결정 다이아몬드 (PCD: polycrystalline diamond) 공구 2 종류와 다결정 cBN(PcBN: polycrystalline cubic boron nitride) 공구이다.

또한 WC 의 함유량이 다른 3 종류의 내마멸 내충격 공구용 초경합금재, V40, V50 및 V60(ISO 분류 기호)을 피삭재로 하였다.

피삭재의 화학적 조성을 Table 1 에, 주된 기계적 성질을 Table 2 에 각각 나타내었다.

이들 피삭재는 소정의 치수(15×15×0.7mm)로 소결 성형하여, 정밀 연삭기로 관찰면 및 절삭면을 연삭하고, 래핑(lapping) 후 마이크로 절삭장치의 시료대에 장착하여 Table 3 에 나타낸 절삭 조건으로 실험을 행하였다.

Table 1 Chemical composition (wt%)

Cemented carbides	W	Co	Ti	Ta	C
V40	73.3~78.0	17~22	-	-	4.7~5.1
V50	73.3~78.0	17~22	-	-	4.7~5.1
V60	65.3~73.7	22~30	-	-	4.3~4.7

Table 2 Mechanical properties

Cemented carbides	Hardness (Hv)	Compressive strength (kg/mm ²)	Young's modulus (×10 ⁴ kg/mm ²)
V40	86.5	420	5.4
V50	84.0	360	5.1
V60	82.0	320	4.8

Table 3 Experimental conditions of micro-cutting

Cutting speed v(μm/s)	2, 10, 100
Depth of cut t(μm)	5, 20
Tool material, rake angle(α)and flank angle(β)	PCD α= 0°, -5°, 12° β= 3°, 6° PCBN α= 0°, β= 3°

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭저항에 의한 절삭특성

본 실험에 들어가기에 앞서 피삭재의 조성을 알아 보기 위해 실험에 사용된 피삭재 중 V60 초경합금재의 표면을 SEM 에서 관찰한 것을 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 검게 보이는 것이 WC 입자, 회색 부분이 결합제인 Co 를 나타낸다. WC 입자의 크기는 약 5~10μm 정도임을 알 수 있다.

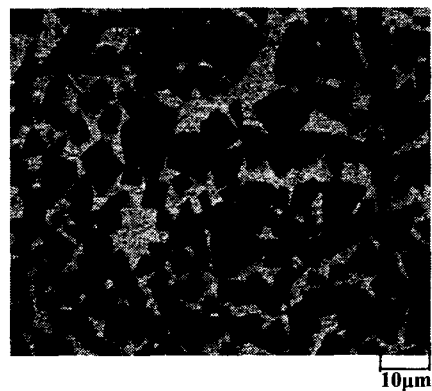


Fig. 4 Microstructure of used work material V60 composition

3.1.1 피삭재의 성분 조성에 따른 절삭저항

경질 입자인 WC 의 함유율(%)에 대한 절삭특성을 비교하기 위한 절삭저항의 측정 결과를 Fig.

5~ Fig. 8 에 나타내었다.

절삭깊이를 5 μm 하고, PCD 공구의 윗면 경사각(α)을 0°, -5°로 변화시켜 마이크로 절삭한 Fig. 5~Fig. 6 에서 알 수 있듯이 WC 의 함유량이 증가함에 따라 절삭저항은 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 배분력에 있어서는 그러한 경향이 나타나지 않고 오히려 V50 의 절삭저항 값이 가장 크게 나타나고 있다.

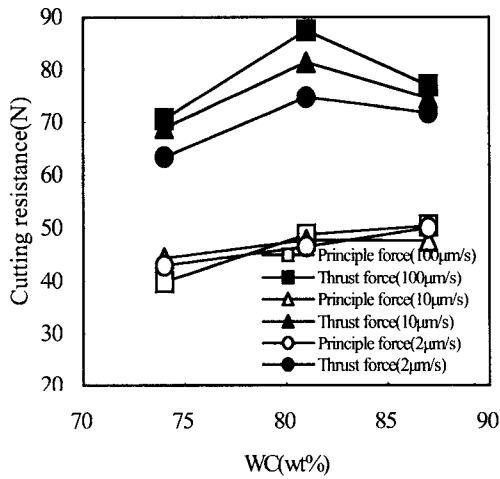


Fig. 5 Comparison of cutting resistances according to contain rate of WC
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ, t=5\mu\text{m}$]

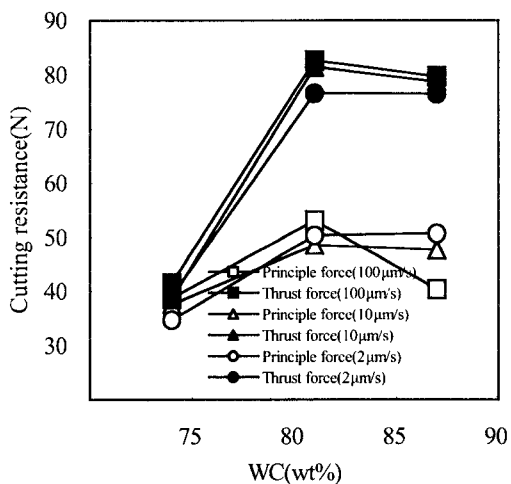


Fig. 6 Comparison of cutting resistances according to contain rate of WC
[Tool; PCD $\alpha=-5^\circ, \beta=3^\circ, t=5\mu\text{m}$]

마찬가지로 PCD 공구의 윗면 경사각(α)을 0°, -5°로 변화시키며 절삭 깊이를 20 μm 로 늘여 절삭을 행한 Fig. 7~Fig. 8 에 있어서도 주분력은 약간 증가하지만 배분력은 그러한 경향을 나타내지 않는다.

본 연구에서 사용한 피삭재에서 WC 함유율의 차이는 그다지 크지 않으므로 배분력의 증가 경향이 두드러지게 나타나지는 않지만, Fig. 5~Fig. 8 에서 나타난 결과로부터, 초경합금재의 일반 절삭의 경우에 있어서도 WC 의 함유율이 증가함에 따라 절삭 저항이 증가하며, 이 때 배분력은 주분력 보다 큰 값을 나타낸다는 사실을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 일반 강재의 절삭에서는 볼 수 없는, 고경도 난삭재의 절삭에서 나타나는 특유의 현상인 것으로 여겨진다.

동일한 공구로 절삭할 때, 절삭 깊이 20 μm 의 조건에서 절삭저항의 차이로서 차이가 크게 나타나고 있으며, 공구의 윗면 경사각이 -5°일 경우, WC 입자의 함유율이 증가할 수록 0°보다 큰 절삭 저항 값을 나타내고 있다.

이것은 네가티브 경사각(negative rake angle)을 가지고 있는 $\alpha=-5^\circ$ 의 공구 형상에서는 절삭 깊이가 피삭재의 WC 입자 크기 보다 크게 되어 경사면 부근에 존재하는 입자의 영향이 나타나기 때문이라고 여겨진다.

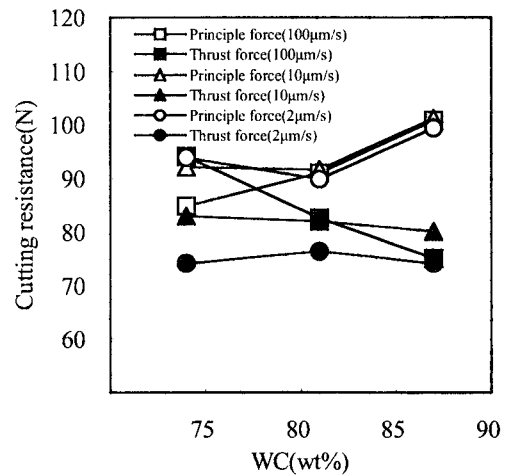


Fig. 7 Comparison of cutting resistances according to contain rate of WC
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ, t=20\mu\text{m}$]

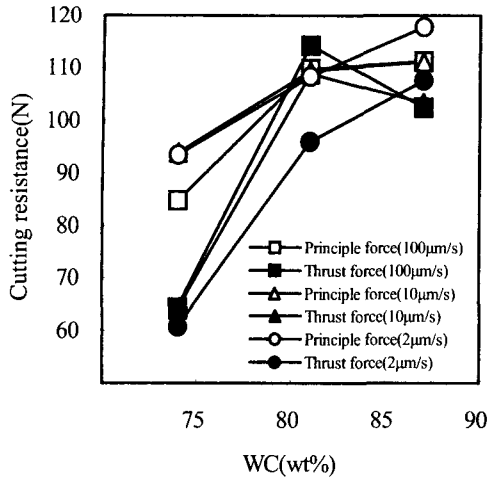


Fig. 8 Comparison of cutting resistances according to contain rate of WC
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ, t=20\mu\text{m}$]

아울러, 절삭이 진행됨에 따라 공구가 피삭재인 초경합금재의 내부에 입자의 수가 많은 곳을 지나게 됨에 따라서 절삭저항은 더욱 증가할 것이라고 추측할 수 있다.

3.1.2 절삭속도 변화에 따른 절삭력

여기서는 초경합금재의 SEM 내 마이크로 절삭에 있어서 절삭속도의 변화에 대한 절삭특성을 알아보았다.

Fig. 9-10 은 공구의 윗면 경사각이 0° 인 PCD 공구를 사용하여 절삭 깊이 $5\mu\text{m}$ 과 $20\mu\text{m}$ 의 두 가지 경우, 절삭속도의 변화에 따른 절삭 저항을 나타낸 것이다. 절삭 깊이 $5\mu\text{m}$ 과 $20\mu\text{m}$ 의 양쪽 다 주분력에 있어서는 거의 일정한 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 배분력은 절삭속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내며, 특히 절삭속도가 느린 범위에서의 변화가 크다.

이것은 공구 여유면과 피삭재 절삭면에 나타나는 입자와의 마찰 혹은, 경사면에서의 마찰이 배분력의 상승에 어떤 영향을 미치고 있기 때문이며, 절삭속도 $2\mu\text{m/s}$ 의 극저속에서는 그 마찰이 거의 무시되기 때문에 일어나고 있는 현상이라고 여겨진다. 여기서는 나타내지 않았으나 윗면 경사각이 다른 공구에서의 절삭에 있어서도 배분력은 비슷한 경향을 나타내고 있으며 주분력에서의 특별한 경향은 볼 수 없었다.

여기서 주목할 사실은 절삭속도 $2\mu\text{m/s}$ 극저속 영역에서 배분력이 감소되는 요인이 존재하고 있다는 것이다.

3.1.3 절삭깊이 변화에 따른 절삭력

동일한 절삭 속도 $10\mu\text{m/s}$ 에서, 공구의 윗면 경사각을 $0^\circ, -5^\circ$ 로 변화시켜 절삭 실험한 결과로서, 절삭 깊이의 변화에 따른 절삭 저항의 변화를 나타낸 것이 Fig. 11-12 이다.

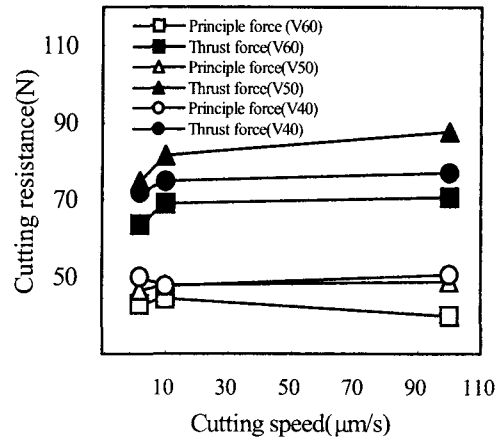


Fig. 9 Comparison of cutting resistances according to cutting speed
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ, t=5\mu\text{m}$]

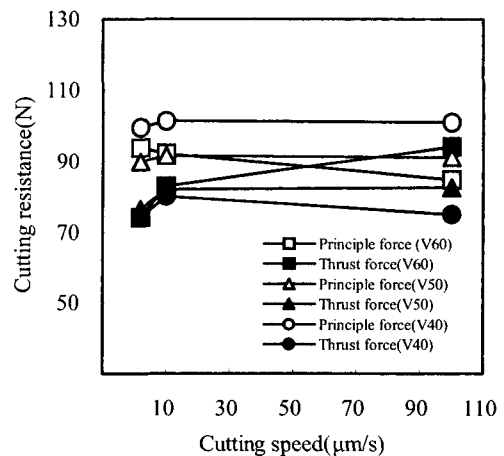


Fig. 10 Comparison of cutting resistances according to cutting speed
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ, t=20\mu\text{m}$]

Fig. 11 에서 알 수 있듯이 절삭 깊이가 작은 부분에서 배분력이 주분력의 값을 상회하고 있으나, 절삭 깊이 20 μm 에서는 그 관계가 역전하고 있으며 Fig. 12 에서도 유사한 경향을 볼 수 있다.

배분력의 경향이 윗면 경사각이 -5° 인 경우에서 더 두드러지는 것은 공구의 형상에 의한 변화라고 생각되어 진다.

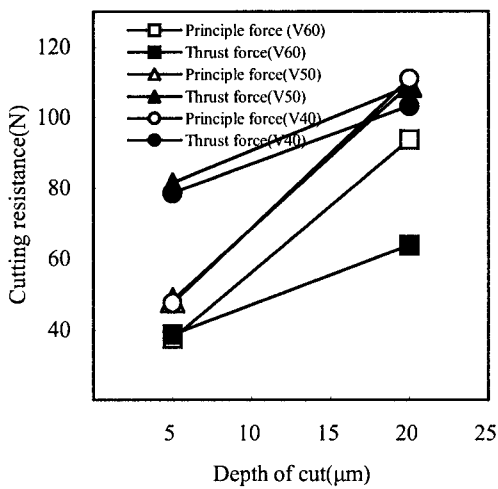


Fig. 11 Comparison of cutting resistances according to depth of cut
[Tool; PCD $\alpha=0^\circ$, $\beta=3^\circ$, $t=10\mu\text{m}$]

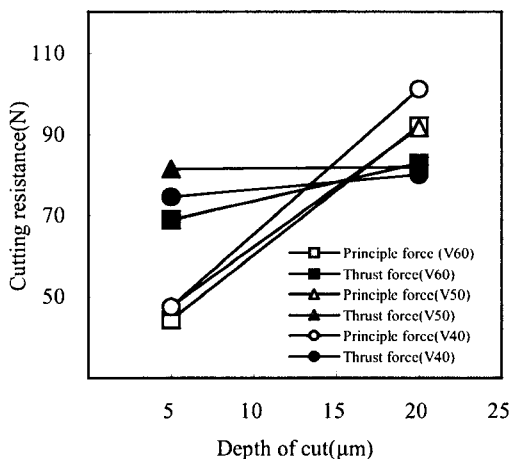


Fig. 12 Comparison of cutting resistances according to depth of cut
[Tool; PCD $\alpha=-5^\circ$, $\beta=3^\circ$, $t=10\mu\text{m}$]

앞에서도 설명하였듯이 통상의 선반 절삭에 있어서는 배분력의 값이 주분력보다 크게 나타남을 알 수 있었지만 본 연구에서의 마이크로 절삭 깊이에서는 그 결과와는 반드시 일치하지는 않았다.

본 연구에서 사용한 SEM 내 마이크로 절삭 장치에서는 구조상 절삭 깊이 20 μm 정도가 한계이다.

마이크로 절삭에서는 WC 입자 크기 정도의 절삭 깊이를 가함으로 인하여 입자의 영향이 크게 나타나므로, 절삭 깊이를 이보다 크게 줄 수 있는 통상의 선반 절삭과 같은 결과로는 되지 않는다고 생각되어 진다.

따라서 선반, 밀링 가공 등 절삭깊이가 마이크로 절삭에 비해서 큰 절삭을 행하면 배분력과 주분력의 관계가 어떻게 변화하여 가는지 판명하여 이와 같은 사실을 명확하게 알 수 있을 것이다.

이상의 실험 결과로부터, 초경합금재의 절삭에 있어서는 배분력의 값에 그 절삭에 있어서 특징이 현저히 나타나고 있음을 알 수 있었으며, 그 영향을 미치고 있는 것은 WC 입자라고 생각된다.

3.2 공구마멸

Fig. 13 (a)~(d)는 지금까지의 실험에서 사용한 공구 형상과 다른 $\alpha=12^\circ$ 의 포지티브 윗면 경사각 (positive top rake angle)과 여유각 $\beta=6^\circ$ 의 PCD 공구를 사용하여 V60 초경합금을 마이크로 절삭한 전후의 공구 경사면 및 여유면을 관찰한 예이다.

그림에서 (a), (c)는 마이크로 절삭하기 전을, (b)와 (d)는 약 30mm 정도 마이크로 절삭한 후의 모양으로, (a), (c)와 비교하여 (b), (d)에는 경사면 및 여유면에 있어서 마멸이 나타남을 확인하게 알 수 있다.

이 관찰 결과에 의해, 경질 WC 입자는 공구의 날 끝에 직접 충돌하여 전단 파괴되고 있다고 생각되며, 이 때 하중이 인선에 집중적으로 작용하므로 공구에 미치는 손상은 상당히 크게 됨을 확인할 수 있다.

한편, PCBN 공구를 사용하여 마이크로 절삭 실험을 행하였으나 잦은 공구의 결손이 발생하여 충분한 데이터를 얻기 힘들었다. 또, 초경합금 절삭 공구 K10(HRA91.5~92.5, 항절력 190kgf/mm²) 사용하여 시험 절삭을 시도하였으나 가공면의 상태와 공구의 마멸 및 결손으로 판단할 때 정상적인 절삭이 이루어지지 않음을 알 수 있었다.

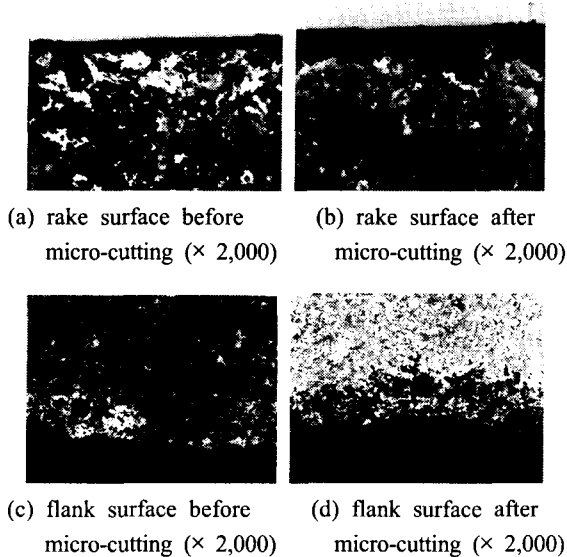


Fig. 13 SEM photographs of tool wear shape at Rake and flank surface of PCD tool in micro-cutting of WC-Co after 30mm cutting length [v=10 μ m/s, t=10 μ m, α =12 $^\circ$, β =6 $^\circ$]

Fig. 14 (a)~(d)은 PCBN 공구 및 PCD 공구(α =0 $^\circ$)의 절삭에서 생긴 공구 결손의 예를 공구 현미경 사진으로 나타낸 것이다. 그림에서 왼쪽 2개는 PCBN 공구를 오른쪽은 PCD 공구를 나타낸 것이다. 이 경우, 결손은 모두 절삭 시작점에서의 공구 진입 단계에서 발생하였으며 공구 여유면에 큰 파괴가 생기고 있음을 알 수 있다.

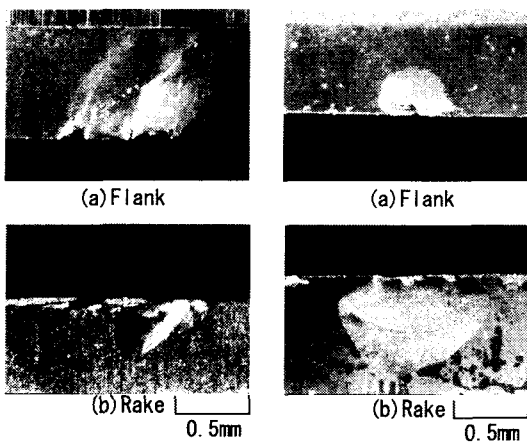


Fig. 14 Optical microphotographs of typical chipping

이와 같은 현상은 공구가 피삭재에 진입할 때 전단이 생기는 방법이 특이하였으며, 정상 상태에 있어서 전단각 보다도 큰 각도를 가지는 영향에 기인한다고도 볼 수 있지만 피삭재 자체의 경도에 더 큰 문제가 있는 것으로 생각되어 진다.

3.3 가공면 상태

초경합금재의 절삭 가공에 있어서 적절한 공구 형상을 검증하기 위해 공구 형상의 변화에 의한 가공 표면 및 측면의 상태를 살펴 보았다.

Fig. 15 는 각각 +, 0, -(α =0 $^\circ$, -5 $^\circ$, 12 $^\circ$)의 공구 경사각을 가진 PCD 및 경사각 0 $^\circ$ 의 PCBN 공구를 사용하여 V60 초경합금재를 마이크로 절삭하였을 때 가공면의 SEM 사진이다.

Fig. 8(a)~(d)에서 마찬가지로 볼 수 있듯이 공구경사각 +, 0, -의 경우 모두 평행하고 불규칙하게 팬 절삭 홈을 볼 수 있다. 따라서, 절삭 중에 공구 날 끝보다 아래 부분까지 파괴를 일으키는 결과와 같은 절삭 홈이 남아 있는 것이라고 생각되어진다.

또한, 공구 경사각이 네가티브의 쪽이 포지티브 보다 굽힘 파괴 영역이 넓기 때문에, 절삭면 아래의 파괴 영역이 동시에 크고 넓게 되고 있다. 이와 같은 사실로부터 공구 경사각이 0 $^\circ$, -5 $^\circ$ 와 같이 네가티브의 쪽이 절삭면은 양호할 것이다.

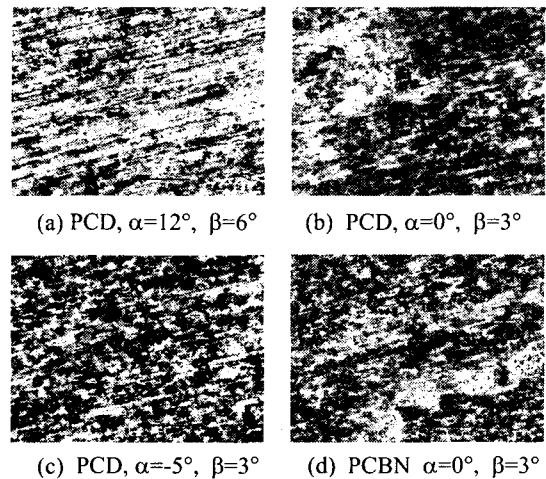


Fig. 15 SEM photograph of the machining surface integrity by various tool shapes [WC-Co V60, v=10 μ m/s, t=10 μ m, \times 500]

Fig. 16은 Fig. 15와 같은 조건으로 절삭 한 후, 공구 형상이 절삭면 거칠기 및 버어(burr)의 생성 억제에 미치는 영향을 알아 보기 위해, 피삭재의 측면을 관찰한 SEM 사진이다.

Fig. 16(a)~(d)에 있어서 어떤 공구 경사각의 경우도 절삭 표면은 파괴된 미세한 조직과 공구 여유면 방향으로 눌러진 조직에 의해 덮혀 있는 부분이 많아 자세하게 관찰하는 것이 용이하지 않지만 Fig. 16(a)~(d) 가운데 공구 경사각이 가장 네가티브한 -5° 가 가장 절삭면의 거칠기가 양호하고, 버어의 생성도 그만큼 작은 것을 확인할 수 있었다.

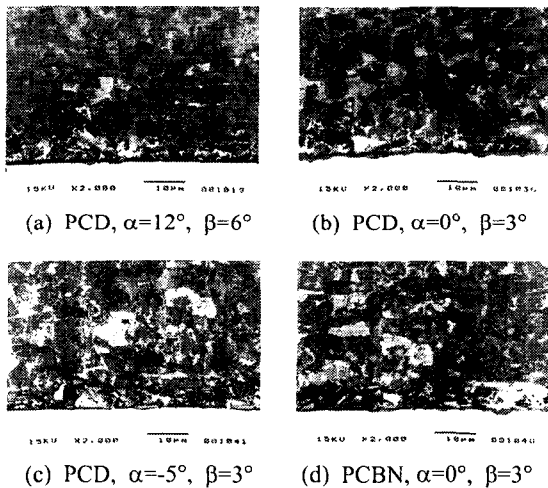


Fig. 16 SEM photographs of cutting surface in the side view by various tool shape [WC-Co V60, $v=10\mu\text{m/s}$ $t=10\mu\text{m}$, $\times 2,000$]

4. 결론

본 연구는 조성이 다른 3 종류의 내마멸 공구용 초경합금재를 대상으로 형상이 다른 PCD와 PCBN 공구를 사용하여 SEM 내 마이크로 절삭을 통한 절삭 특성을 규명하고자 하였다. 본 연구에서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 초경합금재의 마이크로 절삭에 있어서 WC의 함유율이 증가함에 따라 절삭 저항이 증가하며, 이 때 배분력은 주분력 보다 큰 값을 나타내었다.

(2) 절삭속도 $2\mu\text{m/s}$ 극저속 영역에서 배분력이 오히려 감소되는 비정상 상태를 나타내었는데, 이

는 공구의 여유면과 피삭재 절삭면에 나타나는 입자와의 마찰이 배분력의 상승에 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.

(3) 마이크로 절삭에서는 WC 입자 크기 정도의 절삭 깊이를 가함으로 인하여 입자의 영향이 크게 나타남을 알 수 있었다.

(4) 경질 WC 입자는 공구의 날 끝에 직접 충돌하여 전단 파괴되고 있다고 생각되며, 이 때 하중이 인선에 집중적으로 작용하므로 공구에 미치는 손상은 상당히 크게 됨을 확인할 수 있었다.

(5) 공구 경사각이 네가티브의 쪽이 절삭면의 거칠기가 양호하고, 버어의 생성도 그만큼 작은 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Suzuki, H., Cemented Carbides and Sintered Hard Materials, Maruzen Co. Ltd., p. 33, 1989.
2. Heo, S. J., Kang, J. H., Kim, W. I., "Study on Ultra-Precision Grinding Condition of WC-Co," J. of the KSPE, Vol. 10, No. 1, pp. 42-51, 1993.
3. Heo, S. J., Kang, J. H., Kim, W. I., "A Study on the High Efficiency Grinding of WC-Co," KSME(A), Vol. 17, No. 3, pp. 721-730, 1993.
4. Heo, S. J., Wang, D. H., Kim, W. I., "Surface Grinding of Tungsten Carbide for High Quality Using Diamond Wheel," Transactions of the KSMTE, Vol. 4, No. 3, pp. 12-24, 1995.
5. Heo, S. J., "A Study on the Internal Grinding of Tungsten Carbide Materials to Improve the Machining Performance," J. of the KSPE, Vol. 13, No. 6, pp. 52-58, 1996.