

SEM 내 미소절삭에 의한 초경합금재의 칩 생성 기구

허성중*(두원공과대학), 김원일(경남대학교 기계자동화공학부)

Chip Formation of WC-Co on Micro-cutting in SEM

S. J. Heo(Mecha. Eng. Dept. DTC), W. I. Kim(Mecha. Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

This study investigates the micro-cutting of cemented carbides using PCD(polycrystalline diamond) and P CBN(polycrystalline cubic boron nitride) cutting tools are performed with SEM direct observation method. The purpose of this study is to make clear the cutting mechanism of cemented carbides and the fracture of WC particles at the plastic deformation zone in orthogonal micro-cutting. And also to achieve systematic understanding, the effect of machining parameter on chip formation and machined surface was investigated, including cutting speed, depth of cut and various tool rake angle.

Key Words : SEM(Scanning Electron Microscope, 주사현전자현미경), WC-Co(초경합금), PCD cutting tool(다결정 다이아몬드 절삭공구), chip formation(칩 형성), Micro-cutting(미소절삭)

1. 서론

초경합금재(cemented carbides materials)란 탄화물 분말을 철, 코발트, 니켈 등의 철계 금속을 이용하여 소결하여 결합시킨 합금을 총칭하는 것¹으로 저온 경도는 물론 고온 경도가 우수하고, 고강도로서 제반 물리적 성질이 안정되어 있는 것이 특징이므로 절삭 공구용 뿐만 아니라 광산용 공구, 터널 공사용 비트, 철강의 압연 롤러 등 내마모, 내충격 용으로도 많이 사용되어 진다.

초경합금재의 가공은 재료가 가진 초난삭성으로 인해 일반적으로 연삭 가공에 의해 이루어지고 있으므로 가공 능률이 낮다. 반면에 선반, 밀링머신 등을 이용한 절삭은 고능률 가공은 가능하나 공구의 수명 단축과 잦은 결손 및 가공면 표면 거칠기의 악화 등의 원인으로 지금까지 대단히 곤란한 것으로 여겨지고 있지만 최근 상용화되고 있는 다이아몬드 소결체(Polycrystalline Diamond, 이하 PCD로 줄여 씀) 공구와 CBN 소결체(polycrystalline cubic boron nitride, 이하 PCBN) 공구에 의해 초경합금재의 절삭가공은 비교적 용이하게 되었다.

그러므로, 본 연구에서는 초경합금재의 초정밀 절삭의 가능성을 찾기 위해 주사형 전자현미경

(Scanning Electron Microscope, 이하 SEM) 내에서 마이크로 절삭을 행하여, 여러 가지 절삭조건에 대한 절삭현상을 직접 관찰하였다. 즉, 절삭 과정에서 텅스텐 카바이드(WC) 및 코발트(Co)에 일어나는 균열의 동적거동과 칩(chip)으로서의 재료 제거 과정을 상세히 고찰함으로써 절삭기구를 규명하고자 하였으며, 경사각을 변화시킨 PCD 와 PCBN 을 사용하여 절삭 현상의 차이점을 살펴봄으로써 초경합금재의 절삭에 더욱 적절한 공구재료를 검증하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 전자현미경 내 마이크로 절삭 장치

SEM 내 마이크로 절삭장치는 절삭깊이의 정확한 설정을 위해 공구대의 강성을 높여 제작하였다.

Fig. 1 은 실험에 사용한 SEM 내 미소절삭 장치의 개관이다. 본 장치는 크게 SEM 내 시료대에 고정된 베이스 블록부(base block part) (1), 그 위를 이동하는 시료대 베이스(workpiece die base) (4) 및 시료대의 3 부분으로 크게 이루어져 있으며, 그 외 고정구 (2), 동력계 (3), 볼 나사 (5) 및 피삭재 홀더 (6)과 절삭 깊이 설정 장치 (7)로 구성되어 있다.

절삭 깊이를 설정하는 방법으로서, 모터로 직접 피삭재 홀더를 작동시킬 수 있도록 함으로써 1 μ m 단위의 정확한 설정이 가능할 수 있도록 하였다.

또한, 공구 홀더는 피삭재 두께에 맞추어 공구 윗면상의 높이를 변화시킬 수 있도록 설계하여, 불필요한 움직임을 없애는 등 강성을 높여 제작 하였다.

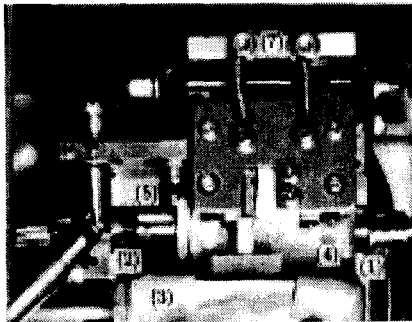


Fig. 1 Photo of micro-cutting device in SEM

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 피삭재는 피삭재 내부의 경질 WC 입자의 크기와 Co 량에 의한 절삭 특성을 파악하기 위해, 내마모, 내충격 공구용 초경합금재, V50 및 V60(ISO 분류 기호)을 사용 하였다.

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

이들 피삭재는 소정의 치수 (15 \times 15 \times 0.7mm)로 소결 성형하여, 정밀 연삭기로 관찰면 및 절삭면을 연삭한 후, 래핑(lapping) 다듬질을 행하였다.

그리고, 마이크로 절삭장치의 시료대에 장착하여 시료실 내의 진공도가 2.0 \times 10⁻²Pa 에 도달한 것을 확인 후, 실험을 행하였다.

마이크로 절삭 중 입자의 단계에서 절삭을 멈추고 칩의 형성 과정, 공구 인선부 및 입자의 파괴 거동 등을 관찰하기 위해 사진 촬영을 하였으며, 일부분은 VTR 로 관찰상을 기록하여 실험 후의 검토 자료로 삼았다. 주된 마이크로 절삭조건은 Table 3 에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%)

Cemented carbides	W	Co	Ti	Ta	C
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	Specific gravity (g/cm ³)	Hardness (Hv)	Compressive strength (kg/mm ²)	Young's modulus ($\times 10^4$ kg/mm ²)
V50	13.5	84.0	360	5.1
V60	13.1	82.0	320	4.8

Table 3 Experimental conditions of micro-cutting

Cutting speed v(μ m/s)	1, 10, 100
Depth of cut t(μ m)	1, 5, 10
Tool material, rake angle(α) and flank angle(β)	PCD : $\alpha = 0^\circ, -5^\circ, 12^\circ$ $\beta = 3^\circ, 6^\circ$ PCBN : $\alpha = 0^\circ, \beta = 3^\circ$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭 칩 형성 및 칩 생성 과정

초경합금재의 절삭에 있어서 절삭 칩의 생성 과정을 규명하기 위해 큰 압축력을 받는 절삭 날 부근 2 의 경질 WC 입자에 크랙이 발생하여 파쇄되는 거동을 관찰하여 고찰하였다.

Fig. 2 는 절삭 깊이 10 μ m, 절삭 속도 10 μ m/s 로 마이크로 절삭하며 연속 촬영한 절삭 칩 생성과정의 관찰 결과를 나타낸 것이다. 그림 중 L 은 최초의 관찰 지점으로부터 공구 이동 거리(cutting distance)이다.

그림에서 알 수 있듯이, 초경합금재의 절삭에 있어서 WC 입자의 파쇄에 의한 절삭 칩 생성 과정은 주로 4 단계로 이루어져 있다고 생각된다.

즉, ① 공구 진입 단계, ② 균열 발생 단계, ③ 균열 단계, ④ 절삭 칩 유출의 단계의 일주기를 거쳐 완전하게 절삭 칩 중에 유출되고 있다.

Fig. 2(a)는 공구 날 끝 전방으로부터 약 15 μ m 에 있는 지름 약 7 μ m 의 WC 입자(타원 부분)를 나타낸 것으로, 이와 같은 절삭 날의 진입 단계에서는 공구 앞 부분과 접촉되어 있는 입자를 볼 수 있지만 그다지 큰 변화는 확인할 수 없다.

Fig. 2(b)에 나타낸 균열의 발생 단계에 있어서는 WC 입자는 입자 내부에 미세한 균열이 생긴 모양으로서, WC 입자가 전단영역에 유입된 직후에 여유면 아래쪽의 절삭 방향에 대해 약 10 $^\circ$ 방향으로 발생한 것을 알 수 있다.

Fig. 2(c)는 공구 날 끝 전방에 5 μ m 까지 접근하였을 때의 균열 단계를 나타낸 것으로, WC 입자는 (b)에서 발생 및 성장한 균열이 점점 커져서 여러 개의 불규칙한 파편으로 분리되고 있다. 이 때, WC 입자는 편저한 소성 유동을 일으킴으로써 공구 날

끝 부근에서 발생한 균열이 전단면에 걸쳐서 성장하여, 반시계 방향으로 회전하며 위쪽으로 유출되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 2(d)는 (c)의 단계를 저배율($\times 3,500$)로 관찰한 것으로, 이 시점에서 절삭 칩의 형태는 규칙적인 전단형을 나타내고 있다.

Fig. 2(e)에 나타난 절삭 칩의 유출 단계에서 WC 입자에서 발생한 균열은 전단 영역에서의 전단 응력에 의해 WC 입자 주위의 공동(空洞)과 일체화되고 있다. 그 후, 파편들은 공구 여유면과 접촉되어 반시계 방향으로 회전하면서 이동하여 완전한 절삭 칩의 형태로 유출되고 있는 것이 확인되었다.

Fig. 2(f)는 (e)의 단계를 저배율($\times 3,500$)로 관찰한 것으로 WC 입자는 전단영역에서 미세화 된 후, 그것들의 일부가 공구 날 끝과 직접 충돌하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 피삭재에 발생한 균열은 전단영역을 거쳐 하나의 절삭 칩 형성 사이클이 종료되며, 형성된 절삭 칩은 공구 경사면을 따라 유출된 후 다시 새로운 칩 형성이 시작된다.

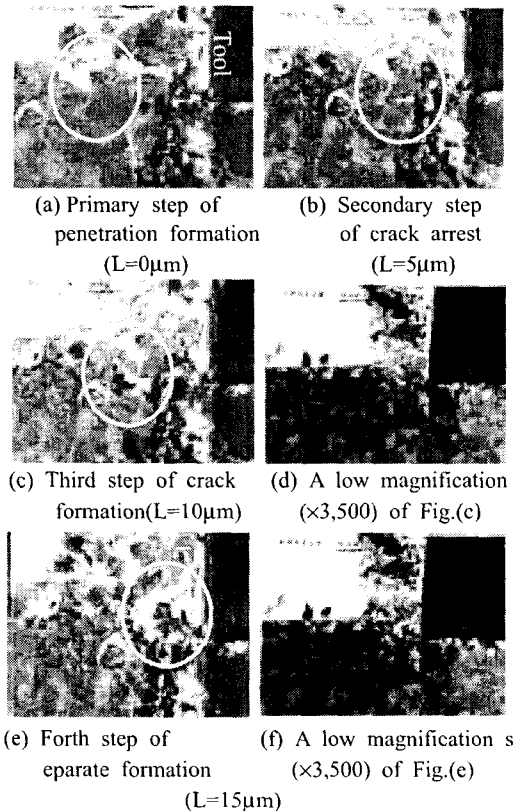


Fig. 2 Successive SEM photographs of chip formation process in micro-cutting
[Workpiece; WC-Co V60, Tool; PCD $\alpha=0^\circ$, $\beta=3^\circ$, $t=10\mu\text{m}$, $v=10\mu\text{m/s}$]

3.2 마이크로 절삭 현상

3.2.1 WC 입자의 불규칙한 전단 거동

Fig. 3(a)-(d)는 초경합금재를 전단영역에서의 절삭 칩 내 WC 입자를 연속적으로 관찰한 사진이다.

WC는 원래 육방정(hexagonal) 형상이지만 소결 과정에서 성장하면 조직 중에서는 3각, 굽자형상(錐形狀) 혹은 사다리꼴형상(梯形狀)을 나타낸다.

Fig. 3의 조직 중에서 흰색의 콘트라스트를 나타내는 상이 Co, 즉 결합상이다.

절삭 중에 WC 입자는 절삭 칩 가운데로 유출되지만, 그림에서 알 수 있듯이 WC 입자(\rightarrow 표)가 분열되지 않고, 오히려 입자를 둘러싸고 있는 결합재(Co)에서 공동(空洞)이 발생하여, 그대로 절삭 칩으로 유출되는 경우도 많은 것을 확인할 수 있었다.

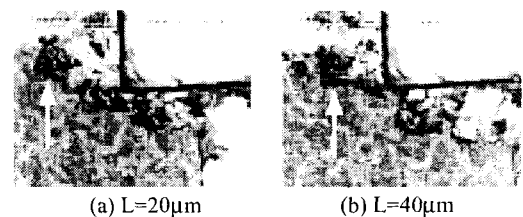
이와 같은 불규칙한 전단 현상은 WC와 Co의 경도 차에서, 상대적으로 연성이 높은 Co의 경계면에 걸려서 큰 전단력을 받아 전단영역이 형성되기 때문이라고 여겨진다. 즉, WC 입자 자체가 그 파괴응력³을 넘을 수 있는 것과 같은 큰 전단응력을 받아 파괴됨과 함께, 주위의 Co도 입자에 의한 하중의 집중에 의해 변형되었다고 말할 수 있다.

모재에 외력이 작용하면 탄성영역에서는 경질 입자 근방에 응력 집중이 발생하여 여기서의 응력이 모재의 내력(耐力, yield strength)을 넘어서면 항복이 일어난다. 더욱 외력이 증가하면 항복영역이 넓어지면서 입자 부근에서는 가공경화가 일어나고, 가공경화지수의 크기에 의존하여 높아지게 된다.

마지막으로 응력은 모재의 파괴응력에 도달함으로써 소성 불안정 상태가 되어, Fig. 3(b)에서 볼 수 있었던 입자 근방의 미세 균열(파괴)이 발생하게 된다.

위와 같은 과정에서, WC 입자 근방의 응력이 입자 자체의 파괴 응력을 넘어서게 되면 입자는 파괴되어 미세화 되는 것이다.

초경합금재의 마이크로 절삭에 있어서 전체적인 절삭 현상을 관찰한 것으로부터, 결합재의 변형 가능성 또한 높기 때문에, WC 입자에 걸리는 힘이 약화 되는 확률도 높은 것이라고 생각할 수 있다.



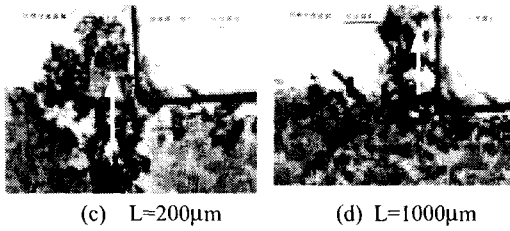


Fig. 3 Successive SEM photographs of shearing deformation process during micro-cutting at various cutting distance L
[Workpiece; WC-Co V60, Tool: PCD $\alpha=0^\circ$, $\beta=3^\circ$, $t=10\mu\text{m}$, $v=5\mu\text{m/s}$]

3.2.2 공구형상에 따른 전단 파괴 거동

Fig. 4는 각각 다른 경사각, 즉 $+$, 0 , $-$ ($\alpha=0^\circ, -5^\circ, 12^\circ$)를 가진 PCD와 PCBN을 사용하여 V50, V60 초경합금재를 마이크로 절삭 한 경우의 절삭 칩 생성의 변화 등을 관찰한 것의 일부이다.

Fig. 4(a)-(c)에서 각각 볼 수 있듯이 공구 경사각이 작으면 작을 수록 절삭 칩의 두께가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다.

따라서, PCD를 사용하여 초경합금재를 절삭한 경우의 적절한 공구 경사각은 $-5^\circ\sim 0^\circ$ 정도가 타당하다고 할 수 있다.

Fig. 4(d)는 (c)와 같은 형상을 가진 PCBN 공구를 사용하여 V60 초경합금재를 마이크로 절삭하였을 때를 나타낸 것이다. PCD 공구를 사용하였을 때와 비교하면 이 때에는 파편이 더욱 많은 전단형 절삭 칩이 배출되고, 공구가 진행한 가공 표면의 상태도 악화되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 초경합금재의 절삭에 적합한 공구로서는 PCBN보다 PCD 공구라는 것으로 판단되어진다.

Fig. 4(e), (f)는 V60보다 경도와 압축 강도가 높은 V50을 Fig. 4(c)와 같은 형상의 PCD를 사용하여 마이크로 절삭하였을 때의 사진으로, V60을 절삭한 경우와 비교하여 절삭 칩의 배출이 나쁘고, 절삭 날의 수준에서 다시 전단되고 있는 것을 알 수 있다.

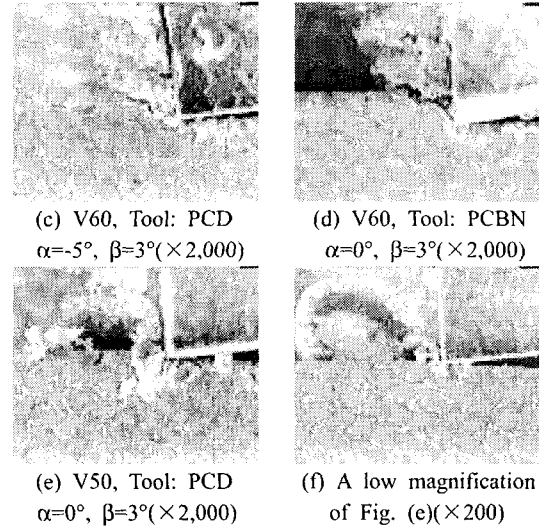
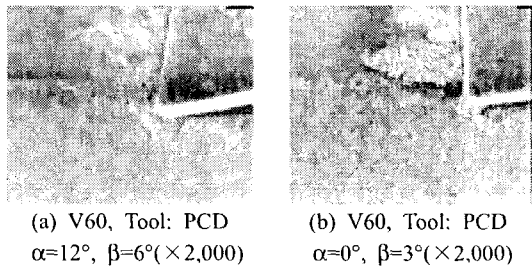


Fig. 4 Comparison of the whole chip formation by various tool shapes and workpieces
[Workpiece; WC-Co V50, V60, Tool; PCBN, $v=10\mu\text{m/s}$, $t=10\mu\text{m}$]

4. 결론

(1) 초경합금재의 절삭에 있어서 절삭 칩 형태가 생성되는 과정은 주로 4 단계로 성립되었다. 즉, ① 공구 진입 단계, ② 균열 발생 단계, ③ 균열 단계, ④ 절삭 칩 유출의 단계의 일주기를 완료하여 완전하게 절삭 칩으로 유출되었다.

(2) 초경합금재의 절삭에 적합한 공구로는 PCBN보다 PCD 공구인 것이 판명되었으며, 이 때 공구 경사각은 $-5^\circ\sim 0^\circ$ 정도가 타당하였다.

참고문헌

1. 鈴木 壽, 超硬合金と焼結硬質材料, 丸善株式会社, p. 33, 1989
2. 貴志浩三, 江田弘, 海上政治, "アルミニウム-けい素合金における切削加工層の微細化組織の生成機構," 日本精密機械, Vol. 38, No. 12, p. 1011, 1972.
3. 白井英治, 帶川利之, 白高洋, "快削添加物粒子のぜい性効果(その1)," 日本精密機械, Vol. 46, No. 7, p. 849, 1980.