

초정밀 절삭가공 기술

목 차

1. 서론
2. 초정밀절삭가공의 조건
 - 2.1. 가공재료
 - 2.2. Diamond 공구
 - 2.3. 공작기계
 - 2.4. 가공조건
 - 2.5. 기타
3. Diamond의 바이트로서의 특성
 - 3.1. 색에 의한 경도의 차
 - 3.2. 경도
 - 3.3. 열전달성
 - 3.4. 벽개성
4. 경면절삭가공용 Diamond Bite
 - 4.1. 바이트의 형상
 - 4.2. 잔류응력 및 가공변질층
 - 4.3. 마멸과 박리현상
 - 4.4. 재료
5. 미세절삭현상의 특이성
 - 5.1. 미세절삭현상
 - 5.2. 미세절삭면에서의 가공면 현상
 - 5.3. Diamond 절삭에 의한 칩의 생성
 - 5.4. 절삭력 및 절삭온도
6. Diamond 공구의 동향과 전망

1. 서 론

최근들어 초정밀가공기술(Ultra-precision machining technology)이라는 용어가 자주 논란의 대상이 되고 있다. 이와같은 현상은 초정밀가공의 중요성이 그만큼 인식되고 있다는 반증이다. 실제로 현대의 각종 첨단산업에 있어 초정밀가공을 요하지 않는 분야는 거의 없다고 보아도 좋다. 이와같은 초정밀가공의 종류에는 여러가지가 있겠지만 그 대표적인 분야로 거의 모든 제품 생산에 있어 근간이 되고있는 초정밀 절삭가공 기술의 중요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않는다.

그러면 절삭가공에 있어서는 어느정도의 가공정밀도에다 “초”자를 붙일 것인가 하는 의문이 있으나, 이것은 그 시대의 기술수준에 의해 달라질 수 있으며, 오늘날의 시점에서는 제품의 치수 및 형상정밀도 0.1 μ m, 표면조도는 그 1/10 수준인 0.01 μ m 정도 또는 그 이하인 것으로 생각할 수 있다. 치수·형상정밀도에 관해서는 보다 엄밀하게는 가공물의 치수와의 比에 의하는 것이 통상적이며 타당하다고도 할 수 있으나, 이러한 관점에서는 미세 가공과는 구별하여 생각해야 한다. 그 比가 10⁻⁶의 오다에 있는 가공을 현재는 초정밀 가공으로 말하고 있다. 예를들면 직경 100mm의 원통을 가공하는 경우에는 그 진원도가 0.1 μ m 정도로 된다.

표면조도는 외국의 경우 현재의 최고도달 정밀도가 중심선 평균거칠기로 0.001 μ m에 까지 이르고 있으며, 이는 금속의 결정적자간격(A⁰=10⁻¹⁰)에 육박하고 있는 것이다.

이와같은 초정밀 절삭가공을 달성하기위하여

이 재 경·제 태 진·이 응 속
(한국기계연구소 가공기술실)

국내외를 막론하고 수많은 연구가 진행되고 있는 것은 주지의 사실이며, 관련기술의 범위도 매우 광범위하여 다방면의 복합적인 기술개발 없이는 그 실현이 불가능하다고도 할 수 있다.

한편, 지금까지의 기계공업에 있어서 가공정밀도가 높은 생산대상으로서는 블록계이지를 비롯한 정밀측정기기 분야에 그 예가 많았다. 그러나 기능의 고도화와 더불어 전기, 전자, 반도체, 광학 관련기기 및 각종 제어기기 등에 그 필요성이 증가하고 있다. 이들의 생산에는 어떠한 경우에도 부품형상 및 가공면거칠기를 얻기 위한 제거가공 수단으로서 연삭 혹은 래핑등 지립을 이용한 가공공정이 포함되었다. 이러한 기술은 금속재료만이 아니고 수정진동자, 자기헤드, 반도체 부품등에 이용되는 유리, 수정, 페라이트, 실리콘 혹은 세라믹 등의 경취성 재료에도 그 응용예가 증가하고 있다. 또, 최근 레이저를 중심으로 한 고정도 복잡형상의 연질금속 가공이 급증하고 있으나 지립을 이용한 가공에서와 마찬가지로 형상정도와 가공면거칠기를 동시에 향상시킨다는 것은 어려운 일이다. 따라서 형상정도와 가공면거칠기를 동시에 만족시

키기 위해 고정도, 고강성의 동작기계와 마모가 거의 생기지 않는 절삭공구를 이용한 초정밀 절삭가공 기술이 급속히 발전하고 있다. 이것의 대표적인 예가 천연 diamond를 이용하여 구리 및 알루미늄을 선삭가공하여 표면조도 0.05 μ m 이하의 경면을 쉽게 얻는 기술이다. Diamond를 이용한 절삭가공에 의하면 거칠기 뿐만아니라 양호한 치수정밀도, 진원도, 원통도, 평면도, 진직도등의 표면정밀도가 거의 요구치에 가깝게 얻어진다.

또한 지립가공의 대상은 철 계통의 기계부품 혹은 유리의 광학 부품등이 대상인 반면, 다이아몬드 바이트를 이용한 초정밀 절삭가공에서는 최근의 전자공학의 진보와 정보화 사회로의 발전에 따라 고정밀도가 필요하게 된 비자성 금속인 구리, 알루미늄, 플라스틱 등도 가공대상으로 하고 있다. 컴퓨터의 자기디스크, 건식 복사기의 드럼 등이 대표적인 예 이다(표 1).

이러한 부품들에는 기억밀도, 입출력 속도, 상의선명도가 표면 정밀도와 밀접한 관계를 맺고 있으므로 극한의 정밀도가 요구되어 최근 diamond에 의한 절삭가공이 급속히 보급되고 있는

표 1) 초정밀 절삭가공의 용도와 요구정도 예

명 칭	가공방법	피삭재	정 도(μ m)	용 도
자 기 디 스크	선 삭	Al 합금	조도 0.006-0.01Ra	HARD DISK
폴 리 콘 미 러	플라이 컷 (FLYCUT)	Al 합금	조도 0.01-0.02 Rmax 평면도 $\lambda/6$ 이상 인접면기울기 3" 이상	LASER PRINTER BAR CODE READER
평 면 구 면 경	〃	무산소동 (OFHC)	조도 0.02-0.05 Rmax	LASER 가공기
감 광 드 럽	선 삭	Al 합금	조도 0.05 Rmax	복사기
비 구 면 경	〃	무산소동 (OFHC)	조도 0.02-0.05 Rmax 형상정도 0.3-1.0	LASER 가공기 우주 관측기기
구 면 렌즈 비 구 면 렌즈	〃	플라스틱	조도 0.2 Rmax 형상정도 0.1-1.0	카메라 VTR 카메라 콘택트 렌즈

분야이다. 이 용도의 diamond 선반은 지금까지의 선반과는 다른 초정밀이라고 하는 입장에서 특별히 설계 제작되어야 한다. 따라서 여기서는 고정밀도 공작기계와 단결정 diamond 공구를 사용한 절삭가공기술, 이른바 “초정밀 diamond 경면 절삭가공”을 달성하기 위한 조건과 공구인 diamond bite의 초정밀가공에 있어서의 중요성, 성능 및 특성, 그리고 미세 절삭현상의 특이성 및 금후 해결되어야 할 diamond bite의 문제점 등에 대하여 간단히 알아보기로 한다.

2. 초정밀 절삭가공의 조건

초정밀 diamond 절삭가공은 수 많은 이점을 가지고 있지만, 이것을 달성하기 위해서는 다이아몬드 절삭가공의 전반에 관한 종합적인 고찰을 해볼 필요가 있다.

2.1. 가공재료

제조법, 조직, 전가공, 가공전후 혹은 가공중의 열처리 등에 영향을 받지 않고 재료의 균질성이 유지되어야 한다. 또 미소 절입에 있어서의 재료의 가공성 및 공구마멸에 미치는 재료의 성질을 고려해야 한다. 현재는 동 및 동합금, 알루미늄 및 알루미늄합금을 중심으로 한 경금속과 플라스틱을 중심으로 한 비금속 재료가 diamond 절삭이 가능한 재료로 되어 있다. 참고로 표 2에 다이아몬드 절삭대상 피삭재를 나타낸다.

재료의 순도는 99.999%까지 요구된다. 따라서

표 2) Diamond 절삭 대상 피삭재

종 류	재 료
비철금속	동 및 동합금, 알루미늄 및 합금, 금, 은, 납, 무전해 니켈도금, 백금, 마그네슘, 텅스텐 카바이드, 아연
비 금 속	플라스틱, 카이본, 섬유강화 그라파이트, 유리, 석영, 세라믹스, 그래나이트, 고무, 목재, Ge, 다결정 Si, ZnSe, ZnS
복합재료	Fiberglass, Epoxy and Filled Plastics

공작물의 자중, 지지력등에 의한 역학적 변형 및 열변형, 경년변화등의 물리적 변형, 그리고 재료의 균일성, 피삭성등 재료의 물성적 요인등도 정밀도와 밀접한 영향이 있으므로 무시할 수 없다.

2.2. Diamond 공구

초정밀가공에서 가장 중요시되는 것은 표면거칠기에 관계되는 공작물과 공구의 관계이다. 날끝 재료로 diamond가 사용되는 이유는 우선 경도가 가장 강한 결정이고, 예리한 날끝 가공이 가능하기 때문이다. 즉 초정밀가공은 미세한 칩을 내는 가공이므로 칩이 1 μ m 이하가 되면 절삭을 위한 전단응력이 급격히 증가하여 대부분 재료의 이상 전단응력에 가까운 값이 된다. 따라서 통상의 고속도강 및 초경합금 뿐아니라 슷들의 A(알러뎀),

표 3) 각종 공구재용 내마멸성 물질의 특성

물 질	비중	영 율 ($\times 10\text{kg/mm}^2$)	경도(mHV) (kg/mm^2)	열전도율 ($\text{Cal/cmsec}^\circ\text{C}$)	열팽창계수
Diamond	3.52	99	9000	5.0	3.1
CBN	3.48	71	4500	0.48	4.7
WC	15.8	70	1700-2400	0.29	5.1
TiC	4.92	46	3200	0.08	7.6
Al ₂ O ₃	3.98	42	3000	0.1	8.5

C(카보런덤) 입자 초차도 그 강도에 견디지 못하므로 현재로서는 단석 천연 diamond만이 유일한 공구재이다. 참고로 표3에는 각종 공구재에 사용되는 내마멸성물질의 특성을 나타내었다.

한편, diamond의 예리한 날끝은 래핑으로 가공하지만 강한 취성때문에 날끝의 형상을 선택하는데는 절삭능력, 내마모성 및 결정의 피연마성을 고려하지 않으면 안된다. 또한 diamond는 인성이 약하므로 고경도 재료의 절삭에는 chipping이 일어나며, 연질 금속인 동, 알루미늄 등을 절삭하여도 보통의 공구재료와 유사한 마모가 생겨 거칠기가 나빠지므로 재연마의 필요성이 있다.

2.3. 공작기계

공구와 공작물간의 상대위치 움직임에 의해 높은 형상정도를 준다고하는 의미에서 기계운동의 정확성은 초정밀 가공의 기본이 되며, 매우 중요한 것이다.

우선 미세 절입과 미소 각도선회가 가능한 기구를 갖춘 공구대가 필요하다. 또, 공구대의 이송메카니즘은 스틱슬립현상이 없이 저속을 낼수 있어야 하며, 테이블의 안내면 정밀도에 악영향을 주지 않는 방식이어야 한다. 양호한 진원도를 얻을려면 주축의 회전정밀도가 우수해야 하며, 더우기 회전축과 공구날끝의 상대변위가 있어서는 안된다. 이 상대변위는 기계진동에 영향을 미치므로 진동이 생기는 곳으로 부터의 절연에 관해서도 고려해야 한다. 평면도, 진직도는 테이블의 안내정밀도의 직선성에 관계가 있고, 원통도, 평행도는 테이블의 이송방향과 공작물 회전축과의 평행도, 혹은 직각도에 의해 결정되며, 열변형에 의한 변위도 평면도, 진직도, 원통도, 평행도와 관계가 있어 무시하지 못한다.

따라서 초정밀 가공기의 설계에 있어서는 아주 미세한 사항도 신중히 고려해야만 한다.

2.4. 가공조건

재료별, 또는 공구형상에 맞는 절삭속도, 절입,

이송등의 영향에 대해 확실히 파악해야 된다. 가공면거칠기는 인선선단의 형상과 이송에 의해 영향을 많이 받지만 절삭속도, 이송등의 함수로서 재료의 성질에 따라 많은 차이를 보인다. 특히 미소절입에 있어서의 재료의 절삭기구는 칩 생성과정만 고려한다면 일반절삭과 유사하다고 생각할수 있으나, 미세절삭에서는 표면의 형성이 제일 중요하므로 절삭공구 날끝의 미시적 구조의 역할에 영향을 받는다는 것을 알아야 한다. 또한, 가공액의 종류 및 가공물의 온도변화등의 문제도 검토되어야 하며, 실제절삭에 있어서는 칩의 처리도 문제가 된다.

2.5. 기타

그 외의 사항으로서 방진 즉, 방진인 건축구조에 고도의 Clean-room등이 고려되어야 하며, 가공경비의 문제도 경제성에 입각하여 살펴봐야 한다. 그리고 초정밀 가공에서 측정이 차지하는 위치는 상당히 높다. Namo-meter에 달하는 가공면 거칠기, 0.01 μ m 단위의 운동 정밀도 및 가공부품 형상 정밀도, 98%를 넘는 반사율 등의 정량적 측정법 확립이 뒤따라야 한다.

또한 diamond 절삭가공면의 안정에 대해서 가공면의 물리 화학적 성질뿐만 아니라 가공 스트레인 및 잔류응력 등에 대해서도 상세히 검토되어야 하며, 절삭중의 절삭저항 및 절삭온도 등에 관한 실험 데이터의 축적이 필요하다.

3. Diamond의 바이트로서의 특성

Diamond는 뛰어난 경도 때문에 우수한 절삭공구의 소재로서 외관미, 가공정밀도, 장기간 가동의 목적에 널리 사용되고 있으며, 최근 정압 베어링의 발달과 더불어 절삭가공상 불가결한 공구로서 diamond 바이트가 더 한층 초점이 되고 있다. 그러나 diamond 바이트는 폐쇄적인 영역에서 생산되고 있고 기술적 자료의 발표도 숫자가 적어 일반적으로는 그 특성이 잘 이해되어 있지 않은 상태이다. 따라서 여기에서는 diamond의 바이트로서의 특성,

경면가공등에 대해 그 개요를 서술한다.

3.1. 색에 의한 경도의 차

Diamond 원석의 색은 적, 청 등 여러가지가 있지만, 갈색, 황, 무색이 많으며 산출양도 그 순으로 각기 경도차가 있다. 갈색이 가장 단단하고 그 다음으로 무색, 황색의 순이 된다. (단, 경도계의 입자로 사용하는 경우 그 경도차는 거의 영향을 미치지 않는다.)

Diamond는 다른 광물 결정에 비하여 매우 높은 점성을 갖고 있으며, 특히 황색의 경우는 이점이 뛰어나 화이트로서 사용하는 경우 Chipping에 강하다. 내마모성은 낮지만 화이트의 수명이 날끝 파손에 의존한다는 측면에서 파손이 생기기 어렵고 취급이 쉬운 황색 계통이 많이 이용된다. 갈색의 원석은 이와 정반대로 경도는 우수하나 점성이 떨어져 가공 중에 충격으로 치핑이 발생하기 쉽다. 그러나 유의하여 사용하면 날끝능선의 R이 $0.3\mu\text{m}$ 정도의 마멸상태에 도달하면 그후로는 쉽게 치핑이 생기지 않으며 장거리의 절삭이 가능해 진다. 난삭재의 절삭가공에서 좋은 성능을 나타내는 화이트는 거의 갈색의 원석을 사용한 것이 많다. 원석은 갈색, 황색, 무색이 많은데 그 이유로서는 diamond가 지하에서 형성될 때 결정 중에 다량의 질소가 함유되든가 혹은 방사능에 의해 결정격자가 파괴되고 주변온도가 이에 복합적으로 작용하여 그렇게 된 것으로 알려져 있다. 그러나 동일 결정형, 동일색이라도 동일 물성으로 취급하기는 어려우며, 무색 투명한 것이라도 형성과정에 차이가 있고 보석급의 원석이라도 화이트로서의 우수한 특성을 갖고 있다고는 말할 수 없다.

3.2. 경도

원자간의 결합력이 매우 견고하여 굽고 누르는 어떠한 경도측정방법에도 타물질에 비해 높은 수치를 나타낸다. 연삭저항은 코란덤의 140배 정도이다. 그림 1에서 본면 다이아몬드의 최강의

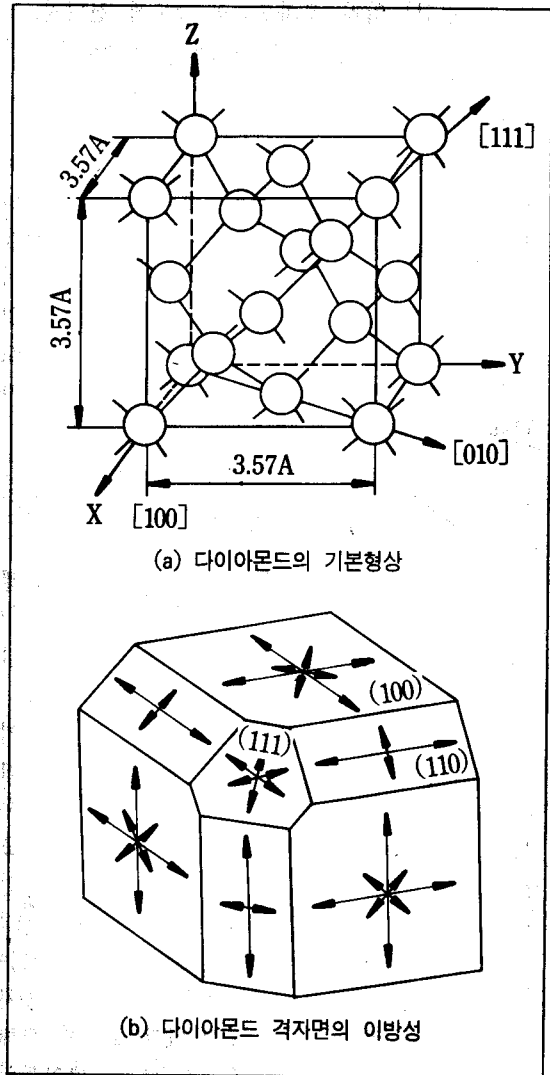


그림 1)

결정 위치는 (1, 1, 1)면이지만 폴리싱하여 인장강도를 계산하면 헬쯔(Helz)의 탄성이론에 의해 $400\sim 1000\text{kg/mm}^2$ 에 이르는 것으로 알려져 있고 또한 결정 위치에 의해 상당히 커다란 편차를 나타내는 것으로 되어 있다.

화이트의 제작에 있어서는 (1, 1, 1)면에 평행하게 연마하여 이면을 경사면으로 하면 crater 마모에 대해서 높은 강도를 얻을 수 있다. 그러나 (1, 1, 1)면에 평행한 연마는 불가능하여 통상은 3도 정도의 경사각을 붙여 연마하지만 이경우 경사면의 강

도는 떨어진다. 0.5도 정도로 연마할 수 없는 것은 아니지만 무리한 연마가 되므로 연마면의 정밀도가 나오지 않으며 예리한 인선이 되지않는다. 따라서 결정방위의 어느 곳을 경사면으로 취하는가는 매우 어려운 문제를 내포하며, 특히 초정밀 절삭에 있어서는 인선의 강도와 정밀도가 동시에 요구되어지므로 이점에 관해서는 계속적인 연구가 필요하다. 날끝능 선단 R은 지금까지 직접 측정하는 것이 불가능하였지만 2개의 2차 전자검출기를 가진 SEM으로 측정한 결과가 발표되고 있다. 연마된 diamond 공구는 40~60nm이고, 이온스펙타가공된 diamond 공구는 10수nm의 능선반경을 가지고 있으며 이 날끝의 예리함에 의해 금속면 절삭에 있어서의 응력, 가공변질층, 가공표층의 흐름무늬등의 발생을 작게 할 수 있다.

3.3. 열전달성

Diamond는 탄소원자의 공유결합으로 이루어져 있어 열전도율은 광물중에서 최대이며 석영유리의 100배 정도이다. 절삭가공시의 발열량은 매우 작으며 이는 인선의 정밀도가 높고 diamond의 불활성에 의해 다른 바이트 보다 마찰계수가 작으며, 경사면이 매끄러워 칩의 유동이 좋다는 것에 기인하며 또한 발생한 열도 Shank부에 빠르게 전도되어 피삭물의 열에 의한 변형방지에 잇점이 있다.

3.4. 벽개성

단일결정의 원석을 사용하므로 다른 바이트에서 볼수없는 벽개성이 있고 이것은 다이아몬드 바이트의 결점으로 되어 있다. 취급에 충분히 유의하여 충격을 주지 말아야 하며, 손가락 끝으로 만지지 않도록 하여야 한다. 벽개변에 평행하게 충격을 주면 쉽게 나누어지므로 원석 가공상의 기술로서 활용되지만, 바이트로서 사용한 경우에는 문제가 생긴다.

금속 결정립계에 불순물이 있든지, 재질이 불균일하여 내부의 경도차가 큰 경우 (연하고 단단한

상호 교차절삭은 단속절삭에 해당하여, 연속충격을 주는 경우의 파괴강도에 비하여 1/4 정도의 힘에도 파손되는 경우가 있다)등의 원인으로 인선 혹은 chip 그 자체가 파손된다. diamond 원석은 앞에서 언급한 바와같이 원석이 각기 다르므로 경우에 따라 파손이 일어나는 것은 어쩔수 없다. chip내의 다소의 균열은 통상 지장이 없고, 평균적인 사용 상태에서의 절삭저항은 200g 정도이고 초정밀 절삭시에는 10g 정도이다.

4. 경면 절삭가공용 Diamond Bite

Diamond bite에 의한 정밀절삭, 경면절삭은 오래전부터 알려져 왔지만 근년에 이 방향의 기술이 크게 진전하여, 초정밀 절삭이란 분야가 확립되었다. 여기서 초정밀절삭이란 다듬질 치수정밀도 0.2 μ m/150mm, 표면거칠기 0.02 μ m Rmax 정도가 표준이다. 물론 이것은 생산공정의 가공으로 정상적으로 얻어지는 정밀도의 의미이고 보다나은 다듬질의 가능성도 있어 표면거칠기 0.004 μ m Rmax의 보고도 있다.

이와같은 초정밀의 실현에는 가공기계의 연구개발이 중요한 기초가 되며, 또한 공구인 다이아몬드 바이트에 관해서도 많은 연구가 뒤따라야 한다. 최대의 문제는 공구의 성능, 특히 수명의 편차가 심해 생산성에 영향을 미치며 공구의 계획적인 관리에 지장을 초래하는 것이다. 따라서 신뢰성이 높은 초정밀 절삭용 diamond bite가 안정적으로 공급되는 것이 급선무이다. 초정밀가공을 치수정밀도와 다듬질면의 표면거칠기로 구분한다면 전자는 주로 가공기계에 관계가 있고 후자는 공구와 많은 관련이 있다. 따라서 초정밀 경면가공용 diamond bite의 성능으로서는 절삭면의 거칠기에 중점이 주어지고, 또한 공구의 수명도 표면거칠기가 나빠져서 어느 한도를 넘는 시기로 규정하므로 역시 표면거칠기의 문제이다. 이러한 관점에서 부터, 이하 diamond 바이트의 성능을 고찰하며 수명의 편차 문제 해결의 방도를 찾아본다.

4.1. 바이트의 형상

경면절삭가공의 경우 대부분 넓은 면적의 공작물을 표면거칠기 0.01 μm 정도로 가공하므로 여기에 사용되는 바이트는 이송 마크가 생기지 않도록 만들어져야 하며, 통상의 바이트와는 비교되지 않는 고정밀도의 가공면을 가지고 있어야 한다. 이러한 바이트의 종류에는 크게 나누어 직

선날과 곡률을 가진 곡선날이 있다(표 4).

직선날은 절삭가공시 바이트의 설치 각도가 매우 중요하며 어렵고 미묘한 기술을 요구한다. 실제로 10°의 각도에 의해 다듬질면의 양부가 좌우되어지며, 가공면의 정밀도는 매우 우수하다. R을 가진 곡선날은 설치하는 용이하지만 면정밀도는 직선날에 비해 다소 떨어지는 편이다. 따라서 이상적인 경면 절삭의 경우에는 설치각도의 미세

표 4) 초정밀 절삭가공용 Diamond bite의 분류

분류기호	도선형상·형변	정 도 한 계		치 수 한 계		가공물에			
		기호	한 계 치	기호	한 계 치				
			정 급	초정급		일급품	특수품		
R 형		R	$\pm 0.05\text{mm}$	$\pm 0.005\text{mm}$	W	0.5~3.0mm	0.1~5.0mm	· 복사기용 드럼 · 반도체 반사경 · 렌즈	
		(	$\theta 100^\circ$ 이하	0.1 μm	R	0~50mm	50~200mm	
		($\theta 160^\circ$ 이하	1 μm	0.15 μm	α	0°~30°		0°~30°
		(			β	-3°~3°	-3°~3°
R		R	$\pm 0.05\text{mm}$	$\pm 0.005\text{mm}$	W	0.1~5.0	0.03~0.1mm	비구면렌즈 비구면반사경 콘택트렌즈	
		θ_0	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.2^\circ$	R	0.1~5mm	0.03~0.1mm		
		(	$\theta 100^\circ$ 이하	0.1 μm	α	3°~10°	3°~10°	
		($\theta 160^\circ$ 이하	1 μm	0.15 μm	β	0°~3°		0°~3°
(	$\theta 180^\circ$ 이하	2 μm	0.3 μm	θ_0	45°~	30°~45°		
삼각형 T		θ_0	$\pm 3^\circ$	$\pm 0.1^\circ$	W	0.5~3.0	0.1~5.0mm	렌즈용 금형	
		-	0.5 μm	0.05 μm	θ_0	40°~	30°~40°		
					α	3°~12°	3°~12°		
					β	-3°~5°	-3°~5°		
평 형		θ_0	$\pm 0.5^\circ$	$\pm 0.1^\circ$	W	0.5~3.0	0.1~5.0mm	복사기용드럼 다면경 메모리디스크	
		-	0.5 μm	0.05 μm	θ_0	0°~90°	0°~90°		
					α	0°~90°	0°~30°		
					β	-3°~10°	-3°~10°		
F		R	$\pm 0.1\text{mm}$	$\pm 0.005\text{mm}$	W	0.5~3.0	0.1~5.0mm		
		-	0.5 μm	0.05 μm	R	0.05~2mm	0.05~2mm		
					α	0°~30°	0°~30°		
					β	-3°~10°	-3°~10°		

조정이 가능한 바이트 홀더와 함께 직선날을 사용하는 것이 좋다. 그러나 제품의 곡률반경이 작은 집광용 미러 등은 R을 가진 날이 아니면 안되는 것으로 알려져 있다.

4.2. 잔류응력 및 가공변질층

여기서의 문제는 초정밀절삭에 의해 단순히 경면의 기하학적인 평면, 혹은 곡면을 얻는 것이 아니라, 얇은 박판공작물의 가공시 또는 가공물 내부에 변질이 일어나면 안되는 경우이다. 이로 인해 사용년수의 감소, 성능의 저하를 초래하므로 어떻게 하면 이것을 최소로 억제하는가가 제품의 품질에 관한 중요한 과제이다. 원인은 모두 절삭시의 저항에 있으므로 절삭저항을 줄이는 인선형상의 바이트를 선정해야 한다. 이상적인 설계에 의하면 가공변질층을 극소로 줄이는 것이 가능하며, 통상적인 바이트의 사용에서는 변질층의 두께가 $1\mu\text{m}$, 특히 초정밀 절삭의 경우는 $0.2\mu\text{m}$ 정도이다.

4.3. 마멸과 박리현상

Diamond 바이트의 여유면 마멸은 초경바이트의 1/10000이하로 알려져 있다. 공구재료로서의 diamond의 최대의 특징인 경도는 내마멸성에도 나타난다. 바이트의 마멸에서 경사면마멸과 여유면마멸로 나누는 것은 관찰, 측정이 편리하기 때문이며, 날끝의 능선부의 마멸에 관해서는 언급된 경우가 적다. 그러나 날끝 능선부는 극도로 예리한 인선이므로 마멸되어 둔화되는 것이 당연하며, 신품의 diamond 바이트로 상당량을 절삭한 뒤에야 절삭성능이 안정된다고 하는 것은 이와같은 이유 때문이다. 그러나 초정밀절삭에서는 전술한바와 같이 날끝의 예리함이 생명이므로 이러한 마멸을 위한 사전절삭은 바람직하지 못하다.

Diamond 바이트에 의한 절삭은 초정밀가공으로 취급되지만 요구, 실현되는 정밀도에 따라 여러 가지 단계가 있고 초정밀에 이르지 못하는 경우도 있으므로 주의를 요한다. 또한 다이아몬드 바이

트의 마멸상태에 관한 광학 현미경, 혹은 주사형 현미경의 사진들이 많이 발표되어 마멸현상 규명의 유력한 자료로서 활용되고 있지만 실제로 초정밀 절삭에 이용된 바이트의 사진은 그렇게 많지 않다. 그 이유는 초정밀 diamond 바이트의 인선 능선부의 정밀도는 주사형 현미경으로도 해상이 어려운 영역으로서 아직까지 그 손모 과정이 충분히 밝혀져 있지 않기 때문이다.

한편, diamond의 마멸이 미소한 벽개편의 이탈이라고 하는 논리에 따르면, 공구의 손모로서의 마멸과 박리현상은 동일 현상으로 해석된다. 그러나 상식적으로는 마멸보다도 훨씬 크게 이탈하는 것이 박리현상이다. 모든 물질중에서 가장 단단한 diamond는 전형적인 경취성 물질이다. 따라서 예리한 날끝에 박리현상이 생기기 쉬우므로 세심한 주의가 필요하게 되고 이러한 박리가 일어나면 면저철기를 나쁘게하고 공구수명을 짧게 한다. 바이트의 제작공정에서도 박리현상의 가능성이 있으며, 특히 날끝 연마공정은 diamond분말을 이용하는 래핑작업이므로 박리의 발생우려가 많아 날끝 능선에 대한 연마방향도 주요한 논제가 되고 있다.

이러한 결합의 검사는 수백배의 현미경으로 볼 수 있으나, 상세한 형상을 보기에는 해상력이 부족하여 박리현상이 있는 위치는 날끝 능선상에 하나의 광점으로 인식된다.

이것은 실용적인 검사법으로서 일반적으로 이용되지만 발견 가능한 박리의 크기는 한계가 있으며, 보다 상세하게 고해상의 관찰도 가능하지만 상당한 노력과 시간이 소요되며 일반적 검사법으로 상용 되기는 힘들다.

4.4. 재료

Diamond는 천연산의 광물로서는 예외적으로 불순물이 적고, 완전애 가까운 단결정을 산출함으로써 경도외의 특성과 더불어 정밀 절삭의 바이트 재료로 적합하여, 초정밀절삭용 바이트 재료로도 천연산 diamond를 이용한다. 이러한 천연 diamond 중에 결함이 적은 상질의 diamond 원석은 보석

용으로서 고가로 취급되고, 이 선별에서 빠진 것이 공업용 diamond 원석이며, 매우 불량한 것도 있다. 초정밀절삭용 바이트의 재료는 공업용 원석을 검사하여 결함이 아주 작은 결정을 선택한다. 원석의 형상, 표면상태에 따라서는 결정내부가 보이지 않는 것이 많다. 이 경우, 원석을 가능한한 평행한 2면이 생기도록 연마하면 미소크랙 및 이물질의 내포등을 쉽게 볼 수 있고, 편광에 의한 내부응력의 관측에도 좋다.

또한 선정의 기준으로는 가공중 감량이 가급적 적게 되면서 소정의 바이트로서의 형상을 만들 수 있도록 외형이 고려되어야 하며, 원석비 및 가공비를 줄일 수 있도록 하여야 한다.

내부 결함등의 품질상의 검사를 엄중히 한다면 그 만큼 원석의 가격이 높아지므로 경제성도 무시할 수 없지만 바이트의 성능의 측면에서 보면 결정외형은 2차적인 문제이다.

합성 diamond의 품질의 제어가 가능해지면 양질 결정의 안정적인 공급을 기대할 수 있으나 현재는 지립용 미소결정이 대량생산되고 있고, 커다란 단결정의 합성도 가능하지만 천연품보다도 제조비용이 많이들어 아직까지는 비경제적이다.

5. 미세절삭 현상의 특이성

5.1. 미세절삭 현상

소위 초정밀 절삭에서는 연질의 금속피삭재를 표면거칠기 $0.01R_{max}$ 이하, 치수형상 정밀도 $0.1\mu m$ 대의 다듬질이 요구된다. 이 기술의 기본은 극히 높은 정밀도와 강성을 가진 공작기계의 운동(회전 및 직진)을 절삭성이 뛰어난 다이아몬드를 공구로 사용하여 피삭성이 좋은 공작물상에 충실히 전사하는 것이다. 이 경우의 절삭조건은 절입깊이 $5\sim 50\mu m$, 이송속도 $1\sim 40\mu m/rev$, 절삭속도 $2\sim 5m/s$ 의 범위이다. 따라서 칩의 생성 및 마찰등의 가공현상이 발생하는 규모는 일반절삭에 비하여 $1/10\sim 1/100$ 에 달하여 μm 대 혹은 그 이하의 극히 작은 범위이고 이러한 현상 자체가 정밀도를 좌우하는 최대요인의 하나이므로 그 특이성을 충

분히 이해하는게 중요하다. 예를들어 수 mm이상의 절입, 수백 μm 이상의 칩 두께가 보통인 일반 절삭에서는 절삭공구의 날끝의 예리함정도로 취급하던 것도 수 μm 이하의 칩을 발생시키는 미소 절삭에서는 그러한 모델이 성립하지 않는다는 것은 쉽게 상상할 수 있다.

여기서는 일반 절삭의 경우와 비교하여 초정밀 절삭에 있어서 나타나는 절삭현상의 특징을 고찰한다. 그림 2는 Orthogonal Micro Diamond Cutting Model을 그림으로 나타낸 것이다. (a)는 절입깊이 공구반경보다 훨씬 큰 경우로 일반적인 경우와 마찬가지로 칩 생성과정 및 표면의 성질은 각 결정입자의 방위와 구조에 영향을 받는다. (b)는 공구 R이 절입과 같은 정도의 미세 절삭의 경우로서 공작물은 커다란 Negative Rake Angle로

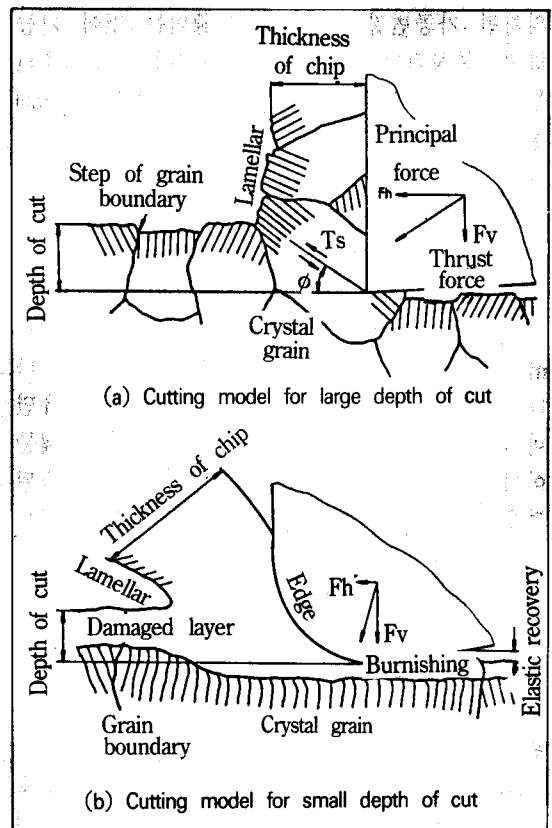


그림 2) Cutting models of orthogonal micro diamond cutting

절삭되며 Rubbing이나 Burnishing 같은 소성변형이 절삭작용보다 우세하다. 구체적으로 마이크론 이하의 칩이 발생하여 절삭력 및 절삭온도의 변화가 달라진다. 그리고, 기본적으로 공작물의 다듬질면은 버니싱과정에 의해 이루어진다. 바꾸어 말하면 절삭면의 윤곽은 절삭방향에 수직한 면내에서 공구 윤곽의 복사이다. 따라서 각종 교란이 없다면 매끄러운 공구일수록 다듬질면을 형성하는 능력이 많은 것이다. 그러나 실제의 공구의 전사과정에서의 전달 특성은 공구 경사면과 공작물간의 각종 계면현상에 의해 다소 달라지게 된다. 이는 피삭재의 탄소성 거동에 의한 공간적, 시간적 변동 및 응착 마모등의 물질 이동과 이에 따른 피삭재 내의 경질입자의 거동에 의한 것등을 생각할 수 있다. 따라서 여기서는 일반절삭의 경우와 비교해가면서 초정밀 절삭에서 절입의 미세화에 따른 절삭현상의 특징을 고찰한다.

5.2. 미세절삭에서의 가공면 형성

단결정 diamond는 다른 공구 재료에 비해 매우 예리한 날끝으로 다듬질할 수 있으므로 절삭성이 매우 좋다. 절삭성이 좋다는 것은 아주 얇은 칩을 분리할 수 있는 능력을 가졌다는 것이며, 실제 두께가 100nm 이하의 칩을 분리할 수 있다고 보고되고 있다.

절삭면에 바이트의 인선형상이 전사되는 원리는 이미 널리 알려져 있다.

그림3은 원호형의 인선에 의한 절삭 상황을 도식적으로 나타낸다. 바이트면의 전사가 이상적으로 실현된 절삭면의 단면은 그림의 우측과 같이

공구인선의 반경 R과 같은 원호로 1회전당 이송량 F의 피치로 ABC와 같은 원호가 반복되는 곡선으로 된다.

곡선의 파고치 H_r 은 F/R 의 조건에서 $H_r = F^2/8R$ 으로되며, 이를 이론거칠기라 한다. 윗식에서 H_r 은 F와 R의 선정에 의해 임의의 작은 수치로 줄일 수 있다. 또한 직선날 바이트에서는 절입을 이송방향과 평행으로 하면 이론 거칠기가 0으로 된다.

그러나 실제 절삭에서의 절삭면의 거칠기 곡선은 그림의 ABC와 같은 이상형이 깨어져 거칠기 값은 H_r 보다 크진다. 그림의 왼쪽은 절삭동작중의 바이트 인선으로 그림중의 그물빚금 부분이 제거되면 완전한 전사가 된다. 이부분의 두께 t는 그림에서는 두껍지만 실제 초정밀 절삭의 조건에서는 매우 얇다. 수치적으로 바이트의 R은 수mm, 이송 F는 10 μ m 내외가 적용되고 있다. 기계에서 설정하는 절입량 D도 수 μ m이지만 t는 이것보다도 훨씬 적다. 또한 두께 t는 일정하지 않으며 선단 E에서는 0으로 수렴한다. P위치의 두께가 바이트 인선으로 절삭가능한 한계두께라고 하면 P보다 우측에 있는 부분은 절단되지 않고 좌측이 PP'로 파단된 상태로 칩이 된다. 결국 PPE는 깎이지 않고 바이트 날끝으로 눌러 찌부러진 상태로 버니싱 작용에 의해 전사형상 PE를 만든다. 이 경우에 PPE가 우측으로 흘러나가면 돌기 Q가 되어 전사가 이루어지지 않고 표면거칠기가 나빠진다.

정상적으로 가공된 부분도 가공표면층에 소성변형에 의한 내부응력이 존재하므로, 초정밀 절삭에서는 가공변질층을 극소로 줄이기 위해 경 가공 즉, 칩이 얇은것이 바람직하다. 버니싱과정은

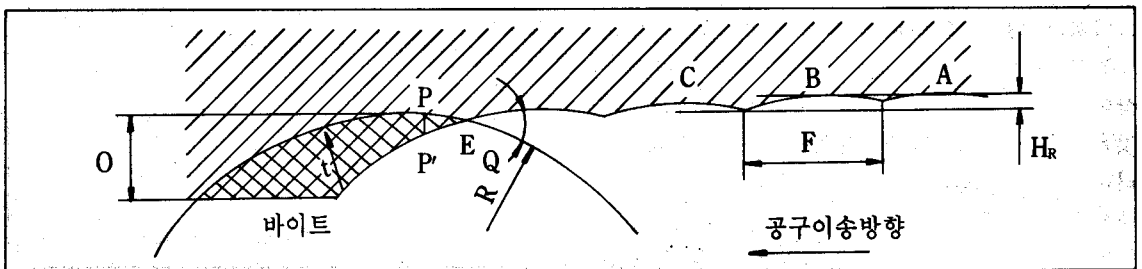


그림 3) 원호형인선의 전사

순전히 소성변형이므로 경면가공에서는 바람직하지 못하다.

이와같은 가공변질층을 극소로 억제하기 위해서는 그림의 임계점 P는 가능한 한 우측으로 가도록 하고, 바이트의 가공한계두께 PP'를 줄이는 즉, 얇은 칩을 분리하기 위한 능력이 필요하다. 따라서, diamond bite의 예리한 날끝은 이러한 요구에 부응하며 초정밀 절삭을 가능하게 한다.

그리고 주절인각 θ 와 부절인각 α 를 갖는 직선날의 절삭면 거칠기 H_{max} 는 이송 f 에 대해 그림 4에서와 같이 주어진다.

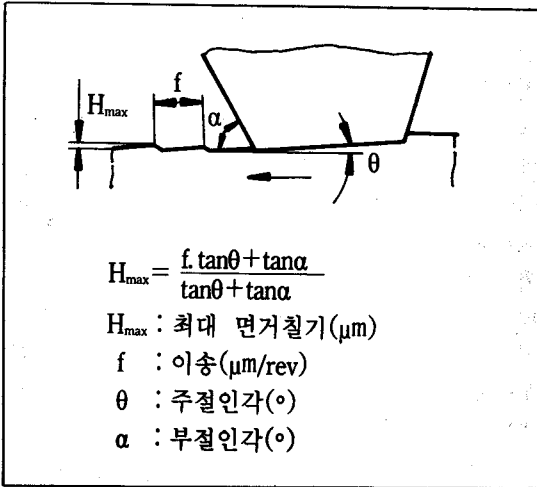


그림 4) 직선형 인선의 전사

5.3. Diamond 절삭에 의한 칩의 생성

단결정 천연 다이아몬드 공구를 이용한 연질 금속의 초정밀 경면 절삭 기술개발에 있어서 보다 가공기술을 높이기 위해 가공중의 절삭 상태를 파악하는 것은 중요한 일이다.

특히 절입량이 아주 적은 미세가공에다 고속절삭이기 때문에 가공상태를 정확하게 인식하는 것은 종래로부터 곤란한 것으로 알려져 왔다. 그러나 최근 절삭음에 의해 절삭상태를 감시하고, 주사전자현미경(SEM)으로 가공면의 상태를 관측하거나 노말스키 미분간섭 현미경 및 다른 방법을 통하여 절삭상태를 관측하려는 시도가 있다.

초정밀 다이아몬드 절삭에 있어서의 칩과 경면생성메카니즘에 대해서는 그림 5와 같이 R 바이트에 의한 절삭단면의 기하학적형상을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{절삭폭} : C_w = \frac{f}{2} + \sqrt{2dR - d^2}$$

경면창성부분 M_r 의 중앙부 절삭단면 깊이 :

$$t_o = R - \sqrt{R^2 - f^2} = \frac{f^2}{2R} = 4h$$

경면창성부분 M_r 의 가장 깊은곳의 절삭면깊이 :

$$t_r = \frac{f^2}{R} = 2t_o = 8h$$

절삭단면상 최대 칩두께 :

$$t_{max} = R - \sqrt{R^2 + f^2 - 2f\sqrt{2dR - R^2}}$$

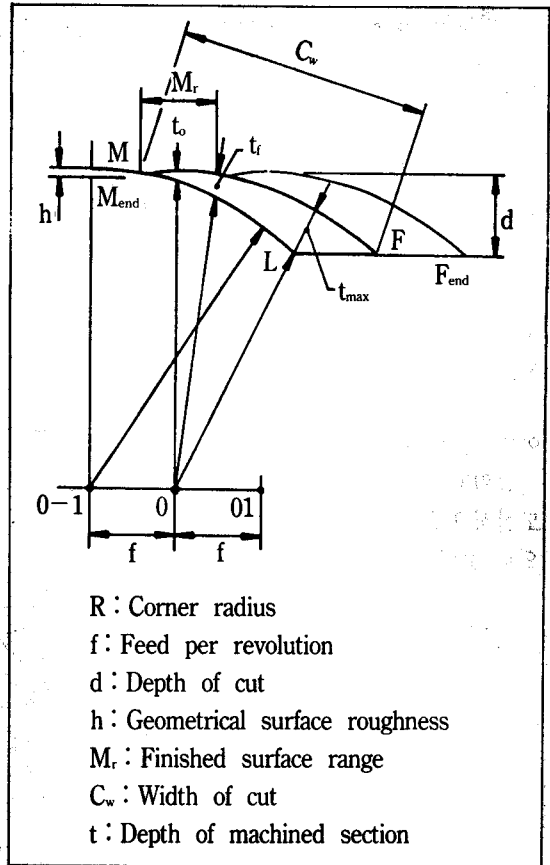


그림 5) R 바이트에 의한 칩의 기하학적 형상

실제 경면가공의 경우, 기하학적인 표면거칠기 $h=0.01\mu\text{m}$ 를 얻을 수 있는 조건 ($R=5\text{mm}$, $f=20\mu\text{m/rev}$, $d=2\mu\text{m}$)으로 계산해보면 $C_w=151\mu\text{m}$, $t_r=80\text{mm}$, $t_c=40\text{nm}$, $t_{\text{max}}=526\text{nm}$ 로 된다. 일반적으로 R 바이트에 의한 초정밀 절삭가공에서는 유동형 연속칩이 발생하며, 공구와의 접촉이 있는 부분은 매끄럽고 광택이 있으며 반대쪽은 광택이 없고 주름(Lamella)이 생긴다. 특히, 경면형성부분에 해당되는 M쪽의 칩에는 절삭단면 깊이의 미소로 인해 끝부분에 균열이 생기고 주름이 잡히게 된다. 이 주름진 부분의 폭은 이소량 f 보다 크고 경면형성부분 전부가 이 부분에 해당된다. 따라서 주름무늬가 생긴 부분의 전단각(Shear angle)이 다른 부분보다 큰 것으로 추정되고 칩의 관찰에 의해 전단각이 변화하는 경계가 존재한다는 것을 고려할 수 있다. 초정밀 절삭가공과 같은 미소절삭에서 전단각을 확정하는 것은 일반적으로 곤란하지만, 절삭길이와 칩길이와의 대응으로부터 전단각을 측정하면 주름이 있는 M단은 약 17° , F단은 14° 로 된다. 이값은 알루미늄의 보통 절삭가공에서 측정된 값의 가공변질층의 영향을 받지 않은 곳의 전단각 ($10\sim 15^\circ$) 및 가공변질층 부분의 전단각 ($15\sim 23^\circ$)과 거의 같은 수치이다. 따라서 Nano meter 단위의 미소절입 제거가공에서는 공구 날끝 반경보다 적은 절삭단면 깊이의 절삭이 이루어지며, 예리한 날끝의 공구일수록 인선의 전사성이 좋고 기하학적 표면거칠기에 가까운 절삭면을 얻을 수 있게 된다.

5.4. 절삭력 및 절삭온도

절삭에서의 기본현상은 전단영역에서의 전단, 경사면에서의 마찰, 날끝 선단에서의 분리 작용(가공면 형성작용도 포함)으로 나눌 수 있다. 여기서 전단과 마찰작용은 절입 두께의 대소에 대해서 유사한 법칙이 성립하고, 일반 절삭에서는 가공 에너지의 대부분을 차지하며 특히 공구마멸등에 관련되므로 많은 관심을 모으고 있다. 분리작용은 물리적 현상이 명확하게 밝혀지지는 않았지만 미소절삭(미크론 단위 및 그 이하)의

절입 깊이에서는 이 부분의 날끝 선단의 현상이 절적, 양적으로 중요하게 된다. 이때는 비절삭 저항이 외형상 비정상적으로 크게 되고 전단각이 작아지는 등 일반절삭과는 다른 현상을 볼 수 있다.

이 현상은 날끝의 곡률에 의해 유효 경사각이 감소하기 때문에 외형상 관찰되는 것으로서 재료강도에서의 치수효과는 아닌 것으로 설명되고 있다. 다이아몬드 바이트에 의한 미소절삭에서도 같은 현상이 나타나고 있다. 잘 다듬질된 절입에서도 절입이 $0.2\mu\text{m}$ 이하가 되면 주분력에서의 비절삭 저항이 급증하는 예가 있다. 또한 점진적으로 공구의 마모가 증대함에 따라 주분력에는 양적으로 커다란 영향을 미치지 않지만 배분력이 대폭적으로 증가하는 경향을 볼 수 있고 나아가서 변형 영역이 줄어들수록 소성변형보다 가공면형성에 소요되는 표면에너지 즉, 버니싱과정에 소요되는 에너지가 커질 가능성이 있다.

또한 절입의 미세화에 따른 비절삭 저항이 커지면 절입 두께의 조그마한 변동에 기인하는 자러진송(chattering)이 발생하기 쉬우므로 좋은 가공면을 얻기 위해선 공작물 강성, 기계강성, 절삭조건 선택에 상당한 주의가 필요하게 된다.

미세절삭에서는 소비에너지의 절대치가 작은만큼, 절삭온도는 문제가 되는 경우가 많지 않다. 일반절삭과 같은 발열모델을 가정한다면 절입이 작게 되어도 전단면상의 전단에너지에 의한 온도상승은 일반 절삭과 비교하여 거의 변화가 없지만, 경사면에서의 온도상승은 마찰거리가 줄어들어 따라 절삭배분력이 주분력보다 커지는 것을 고려하면 미세절삭에서의 절삭온도 모odel은 오히려 연삭가공의 모odel에 가깝게 생각할 필요가 있다. 즉 여유면의 마찰발열 비중이 증가하는 것이다.

미세절삭에 사용되는 공구재료로서의 diamond는 열전도율이 가장 크고, 마찰계수 또한 작으므로 일반절삭의 경우와 절삭온도를 비교하면 수십분의 일에 해당되지만, diamond의 열화학적 성질 즉, 산화에 의한 강도저하, 흑연화에 의한 열손상 등의 측면에서 온도 상승은 강력히 억제되어야 하며, μm 이하의 마모가 문제시되는 diamond 공구에서는 중요한 사항이다.

6. Diamond 공구의 동향과 전망

초정밀절삭용 diamond 바이트의 날끝형상에 관해서는 여러가지 설계안이 있고, 다양하게 개발되고 있지만, 바이트 품질의 균일성 즉, 성능과 수명의 차이에 관해서는 아직까지 미해결이다. 초정밀절삭용 바이트에 있어서 더욱 중요한 날끝능선에 관해서는 지금까지 단순히 추정치로만 알고 있었으나, 최근들어 몇가지의 측정 데이터가 발표되고 있다.

그러나 양호한 날끝능선, 불량한 능선, 소정의 다듬질이 이루어지지 못하고 수명에 달해버린 능선등 제각기의 형상, 구조 등이 밝혀지지 않고 있으며, 또한 그 제작법을 개발하는 것은 금후의 연구 과제로 남아 있다. 그리고, 단결정 바이트의 연마에 대해서는 많은 기술적인 진전이 이루어져 왔으나, 수명의 차이는 해결하지 못하고 있다. 예를들어, 양품과 불량품인 바이트 즉, 대량의 절삭을 성공적으로 수행한 바이트와 단수명인 바이트 2가지를 동시에 재연마 하였을 경우, 양품은 역시 장수명을 가지며 불량품은 역시 단수명이다.

이러한 사례는 허다하여 수명차의 원인이 인선의 연마 외에도 더 있다고 생각된다. 그 첫째의 원인은 diamond 결정의 이방성으로 생각할 수 있다. 바이트의 손모과정등이 결정방위에 의존하는 것은 당연하게 생각되어지겠지만 그 대책 내지 이용에서는 문제점이 남아있다.

즉, diamond의 연마가공에서 이방성 그자체가 공구마멸에 미치는 문제, 그리고 경사면, 여유면 등의 마멸은 알기쉽지만, 날끝 능선을 둔화시키는 마멸은 어떻게 진행되는가 하는 두가지 문제점이다. 바이트의 결정방위와 성능, 수명과의 관련은 실험적으로 해명되지 않으면 안되며, 이러한 관점에서 유리한 결정 방위를 찾고자하는 노력도

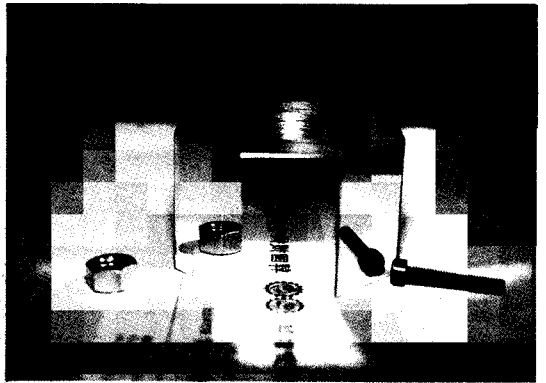
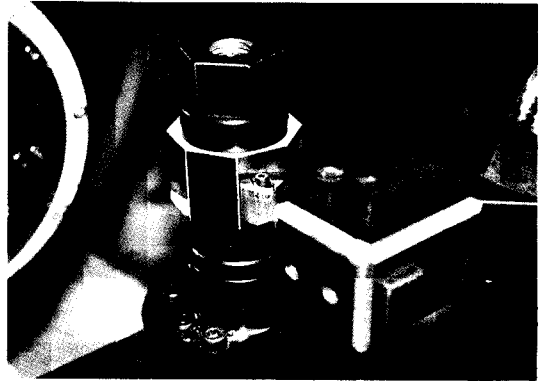


사진) Diamond bite와 Fly-cutting 방식에 의한 Si의 경면절삭 장면 및 완성된 Polygon mirror('89. 12. KIMM)

일부수행 되고있다.

두번째 원인은 재료인 diamond 원석에 있다. 결함이 밝혀진 원석은 제외되지만 극히 경미한 결함은 어디까지 허용될 것인가가 문제이다. 내부응력, 착색을 포함하여 결함의 인자는 다양하지만 제각기 바이트의 성능수명과의 관련은 명확하게 밝혀져 있지 않다. 이러한 인자 중에서도 어느것이 가장크게 영향을 미치는지를 밝혀낸다면 경면가공기술의 확립에 커다란 진보가 이루어질 것으로 기대된다.