

Si 와 Ge 의 초정밀 절삭특성

원종호*(충남대 기계공학과), 박상진, 안병민(충남대 기계공학과 대학원), 도철진, 홍권희, 김건희,
유병주(기초과학지원 연구소)

The Characteristics of Ultra Precision Machining of Si and Ge

Jong-ho Won (Dept. of Mechanical Eng. , Chungnam Univ.), Sang-jin Park, (Graduate school, Chungnam Univ.),
Geon-hee Kim, Byeong-ju Rui, Cheol-jin Do, Kweon-hee Hong(Korea basic science institute)

ABSTRACT

Single point diamond turning technique for optical crystals is reported in this paper. The main factors influencing the machined surface quality are discovered and regularities of machining process are drawn. Optical crystals have found more and more important applications in the field of modern optics. Optical crystals are mostly brittle materials of poor machinability. The traditional machining method is polishing which has many shortcomings such as low production efficiency, poor ability to be automatically controlled and edge effect of the workpiece. SPDT has been widely used in manufacturing optical reflectors of non-ferrous metals such as aluminum and copper which are easy to be machined for their proper ductility. But optical crystals being discussed here are characterized by their high brittleness which makes it difficult to obtain high quality optical surfaces on them.

The purpose of our research is to find the optimum machining conditions for ductile cutting of optical crystals and apply the SPDT technique to the manufacturing of ultra precision optical components of brittle materials. As a result, the cutting force is steady, the cutting force range is 0.05-0.08N. The surface roughness is good when spindle is above 1400rpm, and feed rate is small. The influence of depth of cut is very small.

Key Words : Brittle materials(취성재료), SPDT(단결정 다이아몬드 선반), Non-ferrous metal(비철재료), Cutting force(절삭력), Surface roughness(표면거칠기)

1. 서론

광학용 유리는 현대 광학분야에서 더욱더 중요한 부분을 차지하고 있다. 초정밀 가공분야에서는 이들 재료들에서 어느 정도의 광학표면을 얻을 수 있는지가 중요한 문제로 되어왔다. 광학용 유리는 대부분 가공성이 좋지 않은 취성재료들이다. 전통적인 가공방법으로는 낮은 생산 효율과 자동으로 조절 능력이 부족하고 공작물의 edge effect와 같은 많은 결점을 가진 폴리싱이 있다. 게다가 폴리싱은 수요가 증가하고 있는 비구면을 가공할 수 없다. 단결정 다이아몬드 선삭은 적당한 연성 때문에 가공하기 쉬운 알루미늄, 동과 같은 비철금속의 광학 반사경 제조에 널리 사용되고 있다.^{1,3)} 그러나 최근의 광학 재료들은 우수한 품질의 광학 표면을 얻기가 곤란하고, 높은 취성을 갖는다. 만약 이런 취성

재료들의 가공 조건들이 최적화 되지 않는다면 절삭영역에서 결정재료의 미세 분열 때문에 가공표면에 피치와 크랙이 남게 될 것이다. 그러나 우리는 파쇄기구로부터 크랙 발생과 전파가 재료의 긴장상태에 따라 달라진다는 것을 알 수 있다.^{4,5)} 다른 한편으로는 절삭영역에서 긴장영역은 절삭 매개 변수들과 절삭공구 형상을 조절함으로써 최적화 될 수 있다. 그래서 미세 균열을 피할 수 있고 마치 연성 재료들의 가공처럼 소성변에 의해 물질을 제거할 수 있는 최적 조건하에서의 취성물질의 가공을 “연성 절삭” 이라고 한다.

본 연구에서는 광학유리의 연성 절삭에 대한 최적의 가공조건을 찾는 것이며 취성 재료의 초정밀 광학 요소들을 제조하는데 다이아몬드 선삭 기술을 적용하는 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

선삭가공 시 절삭력을 측정하기 위하여 구성된 실험 장치의 개략도는 Fig. 1에서 보여주고 있다.

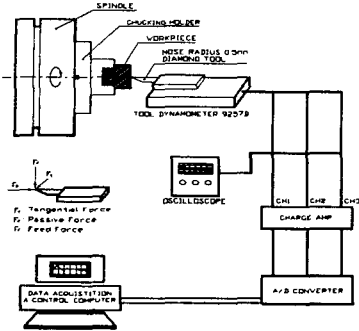


Fig. 1 Diagram of set up for measuring force

초정밀 가공기(DTM)에 공구동력계를 장착 할 수 있도록 지그(Jig)를 설계·제작하여 부착하였다. 실험은 단결정 다이아몬드공구로 $\phi 38\text{mm}$, $\phi 40\text{mm}$ 크기의 Si와 Ge를 단면절삭방법으로 절삭 실험을 실시하였다. 초정밀 가공기에 설치된 압전형 공구동력계(Kistler 9257B)를 이용하여 얻은 아날로그 3축 절삭력 신호를 증폭한 후 A/D 변환기를 통하여 PC에 전송하여 데이터 처리하였다. 단면 절삭에 의한 절삭력 측정으로 Fig. 1과 같이 Y축 방향에 작용하는 힘인 주절삭력을 F_t (tangential force)로 표기 하였으며, Z축 방향으로 작용하는 절삭력인 배분력을 F_p (Passive force)로 나타내고, X축 방향에 작용하는 힘인 이송분력을 F_f (Feed force)로 표기하였다.

다이아몬드 공구에는 주로 코너 노즈반경 $R=1.0$, 경사각 -5 도로 여유각 10 도로 예리하게 완성된 R 마이트를 사용하였다. 또한, 가공액으로서 방전유를 압축공기와 혼합하여 분사하는 방법을 취하였다.

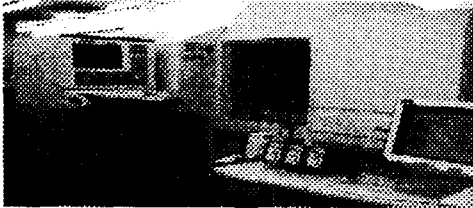


Photo. 1 photograph of the ultra precision machine(Nanoform600)

2.2 실험방법 및 실험조건

초정밀 가공기의 절삭력을 측정하기 전에 우선 초정밀 가공기의 특성을 파악하기 위하여 가공을 하지 않을 경우 주축회전속도에 따라 공구동력계의 신호를 비교 분석하였다. 그리고 절삭조건인 절삭깊이 이송속도에 따른 절삭력을 공구동력계에서 나오는 신호를 컴퓨터에서 분석하였다.

실험방법은 일차 초정밀 가공한 Si, Ge를 주축

의 진공척에 20Psi로 고정하여 회전시키고 공구대에 천연다이아몬드 공구를 장착한 후 절삭조건에 따라 실험을 수행하였고, 가공 후 절삭조건에 따른 가공면의 표면거칠기는 비접촉 표면조도 측정기인 NT2000으로 중심선평균거칠기(R_a)를 측정하였다.

Table 1은 본 실험에 선정된 절삭조건들을 나타낸 것이다.

Table 1. Cutting condition

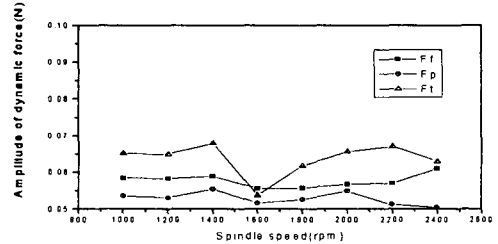
Item	Cutting condition
Cutting speed(rpm)	800, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400
Feed rate(mm/min)	1, 2, 4, 6, 8, 10
Depth of cut(μm)	0.1, 0.5, 1, 2, 4, 6, 8, 10
Vacuum pressure	20 kg f/cm ²
Cutting fluid	Air+EDM oil

3. 고찰

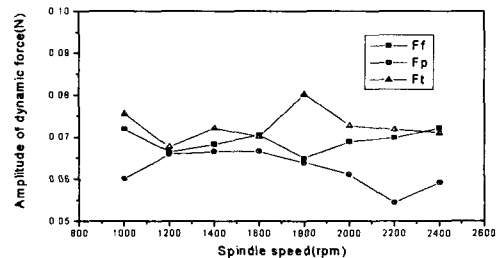
3.1 절삭력에 대한 고찰

3.1.1 주축회전수 변화에 따른 절삭력

Fig. 2는 Si와 Ge를 이송속도 5mm/min, 절삭깊이 5 μm 의 절삭조건으로 주축회전속도 변화에 따른 동적상태의 절삭력을 측정된 결과이다. Si의 경우 0.06~0.08N의 동적 절삭력이 측정 되었으며, Ge의 경우 0.05~0.06N의 동적 절삭력이 측정 되었다. Ge보다 Si의 절삭력이 크게 나타난 것은 Si의 경도가 높기 때문으로 이해할 수 있다.



(a) Ge

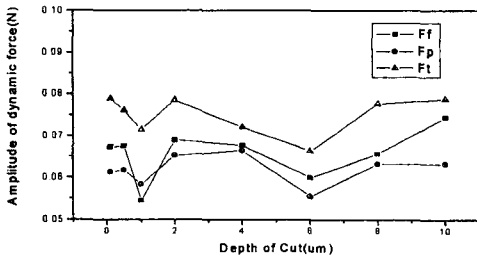


(b) Si

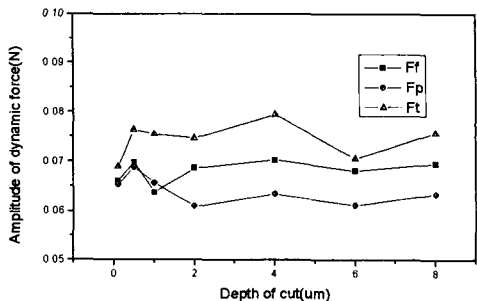
Fig. 2. Dynamic cutting force versus spindle speed (depth of cut: 5 μm , Feed : 5mm/min)

3.1.2 절삭깊이 변화에 따른 절삭력

Fig. 3 은 Si 와 Ge 를 주축 회전수 1400rpm, 이송 속도 5mm/min 의 절삭 조건에서 절삭깊이 변화에 따른 동적 상태의 절삭력을 측정 한 결과이다. Si 와 Ge 모두 주분력이 가장 크게 나타나고 이송분력 배분력 순으로 나타나고 있다. 절삭깊이가 1 μm에서 절삭력이 작아지는 이유는 절삭깊이가 극히 작을 경우(1 μm이하)에는 경사각의 절삭깊이가 공구 날끝 부위의 R 값보다 작아 절삭 할때에 음의 공구상면 경사각(negative rake angle)으로 절삭되어 러빙이나 버니싱 같은 소성 변형이 절삭보다 크게 작용하기 때문에 공구와 공작물 사이의 절삭압력이 상당히 증가된다.⁶⁾ 이와 같은 경우 손상된 표면의 공작물을 공구 선단이 심하게 누르게 되면 공작물 표면 거칠기에도 악영향을 미칠 수 있다.



(a) Ge



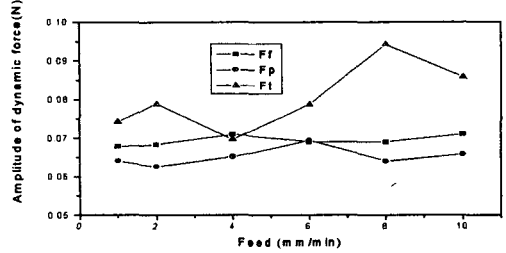
(b) Si

Fig. 3 Dynamic cutting force versus depth of cut (spindle speed: 1400rpm, Feed : 5mm/min)

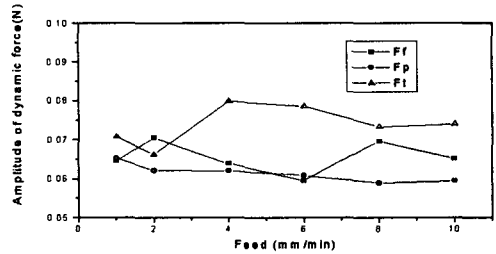
3.1.3 이송속도 변화에 따른 절삭력

Fig. 4 는 Si 와 Ge 를 주축회전수 1400rpm, 절삭 깊이가 5 μm의 절삭조건에서 이송속도 변화에 따른 동적 절삭력을 측정 한 결과이다. Ge 의 경우 삼분력이 일정하며 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 이송속도가 증가하면 절삭면적이 넓어지기 때문에 절삭력이 증가한다. Si 의 경우 절삭력이 변화 하는데, 그 이유는 Ge 에 비해 취성이 강해서 이송할 때 공구와 공작물 사이의 접촉이 원활하

지 않기 때문으로 판단된다.



(a) Ge



(b) Si

Fig. 4 Dynamic cutting force versus feed (Spindle speed: 1400rpm, Depth of cut: 5μm)

3.2 표면 거칠기에 대한 고찰

3.2.1 주축회전수 변화에 따른 표면 거칠기

Fig. 5 는 주축회전수 변화에 따른 Si 와 Ge 의 표면 거칠기를 나타내고 있다. 주축회전수가 빨라짐에 따라 표면 거칠기는 양호하게 나타나고 있다. 주축회전수 1400rpm 이상에서는 Si, Ge 모두 Ra 값이 3nm 이하의 경면을 얻을 수 있었다. 따라서 주축회전수는 1400rpm 이상으로 하는 것이 표면 거칠기 향상에 도움을 줄 수 있다.

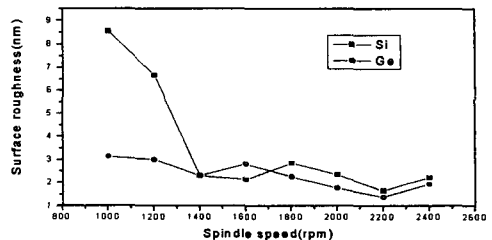


Fig. 5 Surface roughness versus spindle speed (depth of cut: 5 μm, Feed : 5mm/min)

3.2.2 절삭깊이 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 6 은 주축회전수 1400rpm, 이송속도 5mm/min 에서 절삭깊이 변화에 따른 Si 와 Ge 의 표면거칠기를 나타내고 있다. 같은 조건에서 Ge 의 표면거칠기 값이 Si 보다 양호한 것을 알 수 있다. 그 이유는 Si 가 Ge 보다 취성이 강하기 때문이다. Ge 는 이론적 표면 거칠기 식과 같이 절삭깊이는

표면거칠기에 거의 영향을 미치지 않으므로 거칠기 변화가 일정하게 나타남을 볼 수 있다. Si의 경우 Ge보다 취성이 강해 절삭깊이가 깊어지면서 연성 모드 절삭이 아닌 취성모드에서 절삭이 이루어 지므로 표면조도가 나빠짐을 알 수 있다. 절삭깊이 0.1 μm에서 Si와 Ge는 각각 1.8nm, 1.29nm의 Ra 값이 측정되었다.

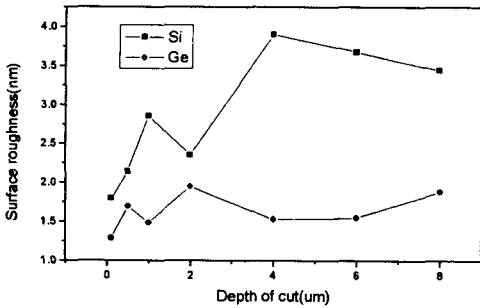


Fig. 6 Surface roughness versus depth of cut (spindle speed: 1400rpm, Feed: 5mm/min)

3.2.3 이송속도 변화에 따른 표면거칠기

Fig. 7은 주축회전수 1400rpm, 절삭깊이 1 μm에서 이송속도 변화에 따른 Si와 Ge의 표면 거칠기를 나타내고 있다. Ge의 경우 이송속도 빨라지면서 서서히 표면 거칠기가 나빠지나 Si의 경우 Ge에 비해 급격히 표면거칠기가 나빠지는 것을 볼 수 있다. 이것은 Si가 Ge에 비해 취성이 강하기 때문이라고 판단된다. Si는 4mm/min 이하에서 3nm 이하의 양호한 표면 거칠기를 얻을 수 있는데 이것은 취성재료의 연성절삭에는 낮은 이송률이 적합하다는 결론을 얻을 수 있다. 칩 두께는 절삭 영역의 응력이 발생하는 영역과 미세균열의 발생에 영향을 미치는 주된 인자라는 것이 학회에 보고되었다. 만약 칩 두께가 작은 값으로 유지된다면 절삭 영역의 응력이 집중되는 부분은 작아서 미세균열을 야기시키지 않을 것이다. 공구 선단을 따라 입계 칩두께 t_c 가 존재하는데, $t > t_c$ 의 범위에서는 미세균열이 절삭하는 동안 발생하지만, $t < t_c$ 의 범위에서는 공작물이 균열 없이 소성변형에 의해 제거된다. 따라서 연성가공은 이러한 범위에서 수행된다. 그러나, t_c 의 위치는 대부분 공구 이송률 f 에 의존한다. f 가 감소함에 따라 칩두께 t 역시 감소한다. 동시에 공작물이 소성변형에 의해 제거되는 영역은 확장된다. 낮은 공구 이송률이 주어진다면 가공된 평면에 가까운 지역에서 연성가공에 의하여 대끄러운 표면을 얻을 수 있다.

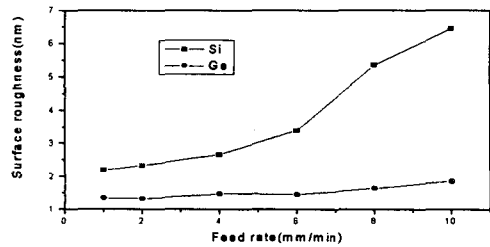


Fig. 7 Surface roughness versus feed (Spindle speed: 1400rpm, Depth of cut: 5μm)

4. 결론

Si와 Ge를 다이아몬드 공구로 초정밀가공 시 절삭조건인 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력과 표면거칠기에 관한 고찰을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Si와 Ge의 초정밀 가공 시 절삭력은 0.05~0.08N의 동적 절삭력이 측정되었다.
2. Si와 Ge는 이송속도 5mm/min, 절삭깊이 10 μm 주축회전수 1400rpm 이상에서 3nm 이하의 표면 거칠기를 얻었다.
3. 절삭깊이의 변화에 따른 표면거칠기는 변화가 크게 나타나지 않고, 주축회전수 1400rpm, 절삭깊이 0.1 μm에서 Si와 Ge는 각각 1.8nm, 1.29nm의 Ra 값이 측정되었다.
4. 주축회전수 1400rpm, 이송속도 절삭깊이 1 μm에서 Si는 2.2nm, Ge는 1.35nm의 표면거칠기를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 이재경, 이용숙, 제태진, 심충건, 종동우, 고태조, "초정밀 경면 절삭 가공 기술 개발", 과학기술처 최종보고서, 1992
2. 성기형, 한복수, 김형철, 김기수, 남궁석, "초정밀 선삭 가공 시스템에 관한 연구", 대한공업교육학회지, Vol. No 2, pp. 116-124.1997
3. Donaldson, D. D. Thompson, "Design and Performance of Small Precision CNC Turning Machine." Ann. CIRP, Vol. 35, PP. 373-376, 1986
4. Junyi Yu, Jiwang Yan "Ultraprecision diamond turning of optical crystals" SPIE Vol. 1994/5
5. 한복수, 김기수, "초정밀 공작기계용 공기 정압 스피들 시스템의 강성해석 및 성능평가", 대한공업학회지, 제 21 권, 2 호, pp. 116-124.1997
6. T. Moriwaki, K. Okuda, "Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting." Ann CIRP, Vol. 38, pp115-118, 1989