

초정밀 절삭에서의 가공깊이 최소화에 관한연구

손성민*, 허성우+, 안중환**

A Study on the minimizing of cutting depth in sub-micro machining

SeongMin Son*, SungWoo Her+, JungHwan Ahn**

Abstract

Ultra precision diamond cutting is a very efficient manufacturing method for optical parts such as HOE, Fresnel lenses, diffraction lenses, and others. During micro cutting, the rake angle is likely to become negative because the tool edge radius is considerably large compared to the sub-micrometer-order depth of cut. Depending on the ratio of the tool edge radius to the depth of cut, different micro-cutting mechanism modes appear. Therefore, the tool edge sharpness is the most important factor affecting the qualities of machined parts. That is why diamond especially mono-crystal diamond, which has the sharpest edge among all other materials is widely used in micro-cutting.

The question arises, given a diamond tool, what is the minimum (critical) depth of cut to get continuous chips while in the cutting process? In this paper, the micro machinability around the critical depth of cut is investigated in micro grooving with a diamond tool, and introduce the minimizing method of cutting depth using vibration cutting. The experimental results show the characteristics of micro cutting in terms of cutting force ratio (F_x/F_y), chip shape, surface roughness, and surface hardening around the critical depth of cut.

Key Words : Micro Cutting, Diamond Tool, Minimum Depth of Cut, Vibration Cutting

1. 서론

정보기술과 관련된 부품들의 급격한 수요증가와 더불어 각종 광학소자, 전자소자 또는 이들 소자들의 집적화에 관한 많은 연구들이 수행되고 있다. 광학소자의 경우 홀로그래픽 광학소자(Holographic Optical Element : HOE), 프레넬 렌즈, 렌티큘라 렌즈 등이 많이 이용되고 있다.

이들 소자는 표면이 미세한 홈들로 이루어진 회절격자를 갖고 있기 때문에 이러한 미세 홈들을 가공하는 것이 가장 중요한 핵심기술이라 할 수 있다.[1]

다이아몬드 공구를 이용한 초정밀 마이크로가공은 광학소자의 회절격자를 형성하는 마이크로 홈을 우수한 면조도, 비교적 높은 자유도와 짧은 가공시간에 제작할 수 있다는 장점으로 많이 적용되고 있다. 다이아몬드 공구는 강성이 우수하고, 날끝이 예리하여 미세한 홈을 가공하는데

* 손성민, 부산대학교 지능기계공학과 (semson@pusan.ac.kr)
주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30

+ 부산대 지능기계공학과

++ 부산대 기계공학과

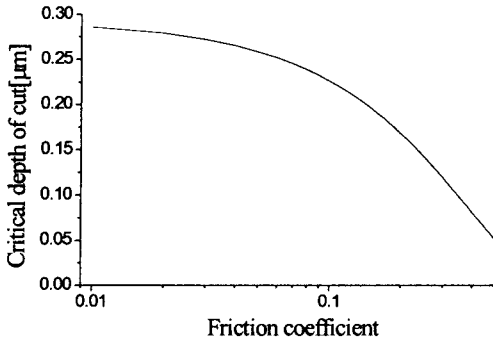


Fig. 2 Simulated critical depth of cut versus friction coefficients

3. 진동절삭을 이용한 한계절삭깊이의 축소

시뮬레이션 결과를 통해 마찰계수가 클수록 한계절삭깊이가 작아짐을 알 수 있다. 하지만, 마찰계수는 임의의 두 재료사이에 나타나는 고유의 값이기 때문에 일단 공구의 형상이 정해지고 공작물과 공구의 재질이 정해지면 한계절삭깊이는 변하지 않게 된다. 이를 극복하기 위하여 진동절삭 기법을 적용하였다. 그림 3은 진동절삭에 의해 마찰계수가 증가하여 한계절삭깊이를 더욱 작게 하는 메커니즘을 보여 준다.

공구가 공작물에 대해 ρ 의 경사각으로 진동을 하게 되면 공구에 저항하는 수평방향 두께, 즉 절삭깊이는 t 에서 t_v 로 증가하게 된다. 또한 공구가 가속도를 갖고 공작물에 충돌하기 때문에 마찰계수의 플로잉 부분(Plowing term)이 증가하고 마찰계수는 정속도에서 보다 가·감속이 있을

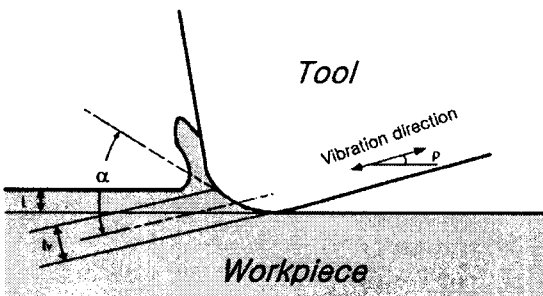


Fig. 3 Schematic diagram of cutting depth decreasing mechanism by vibration cutting

때 더욱 증가하기 때문에 진동절삭에서 마찰계수는 증가하게 된다.

4. 실험 조건

본 연구에서는 주절삭방향이송이 공기정압 안내면(Air Bearing Slider)으로 구성되어 있어 가공중에 발생하는 기구의 마찰 동특성이 무시될 수 있는 구조이며 Y축과 Z축은 볼 스크류(Ball Screw)로 구동되는 가공기를 이용하였다.

사용된 공구는 날끝반경이 $1\mu\text{m}$ 인 다이아몬드공구이며 공작물은 7-3황동과 무산소동을 이용하였다. 실험조건을 정리하면 표 1과 같다.

Table 1

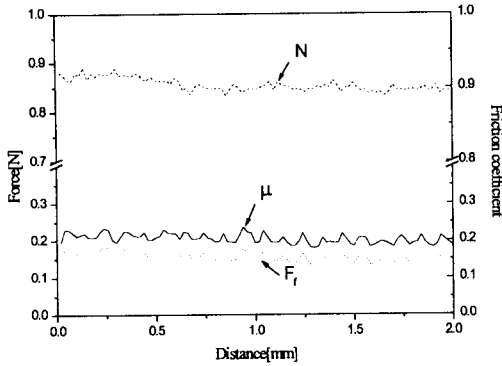
Item	Description	Condition
Tool	Mono-crystal Diamond	edge radius : $1\mu\text{m}$ width : 1mm
Slide	X axis Y axis Z axis	< $1\mu\text{m}$ < $2\mu\text{m}$ < $0.1\mu\text{m}$
Workpiece	7-3 Brass OFHC	
Cutting condition	depth of cut feedrate	$0.1\sim 0.5\mu\text{m}$ 1 mm/sec

5. 실험 결과

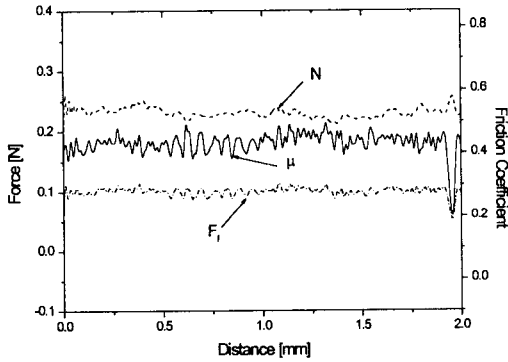
5.1 마찰계수

그림 4는 다이아몬드 공구와 공작물 사이의 마찰계수를 측정한 결과이다. 마찰계수의 측정은 마찰력 F_f 를 수직력 N 으로 나누어 구하였으며 황동의 경우 약 0.2, 무산소동의 경우 약 0.4로 측정되었다.

따라서 그림 2의 시뮬레이션 결과를 참고하면 황동은 $0.17\mu\text{m}$, 무산소동은 $0.08\mu\text{m}$ 가 이론적인 한계절삭깊이가 된다. 본 연구의 가공실험에서는 가공절삭깊이를 $0.1\mu\text{m}$ 간격으로 주었고 실제 가공환경 상에서 절삭열의 영향, 가공시의 진동 등을 고려하면 황동의 경우는 $0.2\mu\text{m}$ 절삭깊이의 가공에서 무산소동의 경우는 $0.1\mu\text{m}$ 절삭깊이로 가공했을 때 가공특성의 변화가 나타날 수 있음을 기대할 수 있다.



(a) for 7-3 Brass

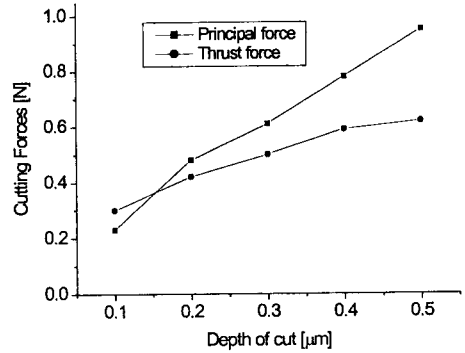


(b) for OFHC

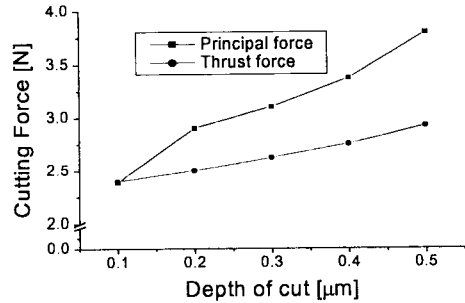
Fig.4 Friction forces and coefficients between workpiece and diamond tool

5.2 일반절삭의 절삭력

7-3황동과 무산소동을 일반적인 방법으로 절삭가공하였을 때의 절삭력 변화를 조사하였다. 그림 5의 (a)는 황동의 절삭력 그래프로 가공깊이 $0.1\mu\text{m}$ 에서는 배분력이 주분력보다 크지만 가공깊이가 $0.2\mu\text{m}$ 이상에서는 주분력이 배분력보다 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 때의 절삭칩 형상도 가공깊이 $0.1\mu\text{m}$ 에서는 단속적인 형태를 보이지만 $0.2\mu\text{m}$ 이상에서는 연속형 칩이 발생한다. 그림 5의 (b)는 무산소동에 대한 절삭력 그래프이다. 무산소동의 경우는 마찰계수가 황동에 비해 크기 때문에 $0.1\mu\text{m}$ 의 가공깊이에서도 주분력과 배분력이 거의 같게 나타난다. 칩의 형상도 두께가 작기 때문에 일부 끊어짐이 발생하지만 연속적인 형태로 나타났다.



(a) for 7-3 Brass



(b) for OFHC

Fig. 5 Averaged cutting forces versus depth of cut

5.3 표면거칠기 및 가공물의 경도

한계절삭깊이에서의 가공특성을 알아보기 위하여 표면거칠기를 측정하였으며 그림 6과 같은 결과를 얻었다. 황동과 무산소동 모두 가공깊이가 $0.2\mu\text{m}$ 일 때, 표면거칠기가 가장 작은 값을 보이고 있다. 하지만, 무산소동이 황동의 경우보다 가공깊이 $0.1\mu\text{m}$ 에서의 표면거칠기와 차이가 현저히 적음을 확인할 수 있다.

한계절삭깊이가 연속형 칩을 생성하는 최소 가공깊이 임을 감안하면 황동의 경우는 $0.2\mu\text{m}$ 에서 무산소동은 $0.1\mu\text{m}$ 에서 표면정도가 가장 좋은 결과가 나타날 것을 기대할 수 있으나 무산소동의 마찰계수가 크고 재료 특성상 연성이 커서 표면거칠기가 예상보다 크게 나타난 것으로 추측된다. 그리고 황동과 무산소동 모두 주어진 가공깊이를 고려하면 표면거칠기가 우수하다고는 확인하기 힘든 값을 보이고 있다. 이것도 절삭깊이에 비해 마찰계수가 큰 영향을 주는 것으로 생각된다.

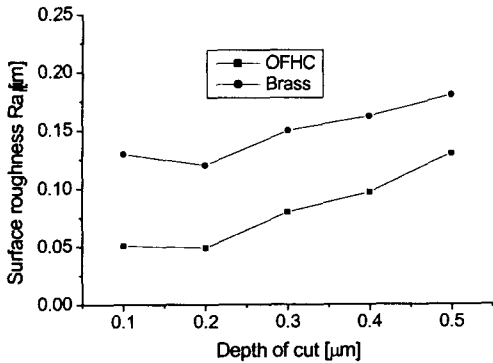


Fig. 6 Surface roughness versus depth of cut

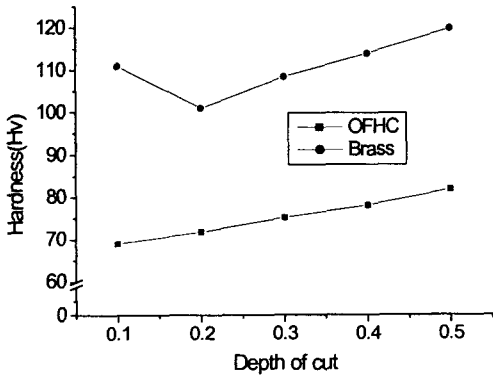


Fig. 7 Micro-hardness versus depth of cut

가공물의 표면에는 절삭가공시의 잔류응력에 의해 가공 경화현상이 나타나는데, 절삭가공시 공구가 칩을 발생시키며 정상적인 가공을 할 때보다 공작물을 정상적으로 가공하지 못한 상태에서 잔류응력이 더 커져 경도가 크게 측정될 것이라는 추측이 가능하다. 그림 7은 가공물의 경도를 측정 한 결과로 연속칩을 발생하는 한계절삭깊이가 0.1µm인 무산소동의 경우는 가공깊이가 증가함에 따라 가공물의 경도도 점차 증가해 가는 반면에 황동의 경우는 연속형 칩을 발생하는 가장 작은 가공깊이인 0.2µm에서 경도가 가장 작게 나타남을 확인할 수 있다.

5.4 진동절삭의 적용

진동절삭은 공구에 일정 주파수로 미세한 진동을 주어 공구가 임펄스 형태로 공작물을 제거하는 방법으로 절삭력이 감소하여 표면정밀도의 향상과 버발생 억제 등에 효과가 큰

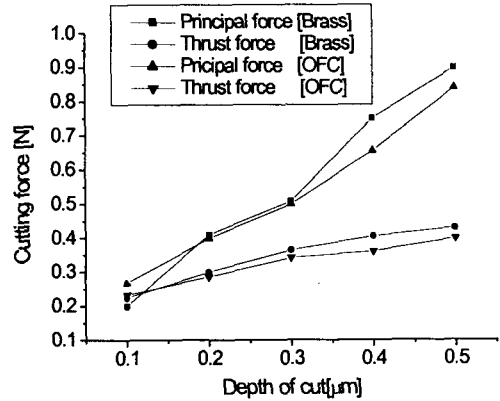


Fig. 8 Cutting forces in vibration cutting

것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 장점들 외에 공구가 일정한 각을 갖고 공작물에 진입함으로써 실질적인 가공깊이를 증가시키고 공구의 지속적인 속도변화와 더불어 마찰계수를 증가시켜 일반적인 가공에서의 동일한 가공조건에서도 한계절삭깊이를 더 작게 할 수 있음을 증명하고자 한다.

그림 8은 진동절삭으로 황동과 무산소동을 가공했을 때의 가공깊이에 따른 절삭력 그래프이다. 진동절삭에서도 가공깊이의 증가에 따라 절삭력이 함께 증가하고 있으나 일반절삭과 비교하면 1/2이하로 줄어든 것을 확인할 수 있다. 가공깊이 0.1µm에서 주분력이 배분력에 비해 작게 나타나는데 이는 공구가 공작물에 대해 약 10°의 각으로 진입하기 때문이며 가공시 황동과 무산소동 모두 안정된 연속형 칩이 발생하였다.

그림 9는 진동절삭에 의해 가공된 면의 거칠기를 조사한 결과이다. 일반절삭에 비해 가공면의 거칠기가 현저하게 줄어들었으며 값의 차이가 크지는 않지만 황동과 무산소동 모두 가공깊이가 증가함에 따라 표면거칠기가 증가하고 있다. 황동의 경우 일반절삭가공에서는 0.2µm가 한계절삭깊이로 되어 0.1µm의 가공깊이로 가공했을 때의 가공면 거칠기가 0.2µm로 가공했을 때 보다 크게 나타났으나 진동절삭으로 가공하였을 경우는 그렇지 않았다. 무산소동의 경우는 진동절삭을 하였을 때도 일반절삭에서의 같이 가공깊이 0.1µm에서의 표면거칠기가 0.2µm에서의 표면거칠기 보다 낮은 결과를 보였으나 진동절삭으로 0.1µm의 가공깊이로 가공하였을 때 표면거칠기가 약 Ra 0.01µm로 우수한 표면정도를 보였다.

6. 결론

가공깊이가 공구의 날끝반경보다 작은 sub-micro 오더의 절삭가공에서 연속형 칩을 생성하는 한계절삭깊이와 공구와 공작물 사이의 마찰계수와와의 관계를 조사하였으며, 진동 절삭을 이용하여 한계절삭깊이를 최소화하는 방법을 시도 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 공구의 날끝반경과 다이아몬드공구/공작물 간의 마찰 계수를 이용하여 한계절삭깊이를 구하였다.
- 2) 마찰계수가 클수록 한계절삭깊이는 작아지는 것을 가 공실험을 확인하였다.
- 3) 진동절삭을 이용하면 일반절삭에서 측정된 한계절삭 깊이를 더욱 작게할 수 있음을 절삭력, 표면거칠기, 가공경화현상 등을 통해 확인하였다.

따라서 가공깊이가 sub-micro 오더인 초정밀 가공에서 가공깊이를 최소화하기 위해서는 공구와 공작물 사이의 마찰계수가 커야 하지만 이는 재료의 결정에 종속되는 것 으로 진동절삭과 같은 가공기법의 변화에 의해 화학적 혹은 물리적으로 마찰계수를 변화시켜 가공깊이를 최소화 할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Z. J. Yuan, M.Zhou, S. Dong, 1996, "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, pp. 327~330.
- (2) M.I. De Barros a, L. Vandenbulcke a, J.J. Blchet b, 2001, "Influence of diamond characteristics on the tribological behaviour of metals against diamond-coated Ti6Al4V alloy", Wear 249 (2001) pp. 6878
- (3) Yuji Furukawa and Nobuyuki Moronuki, 1998, "Effect of Material Properties on Ultra Precise Cutting Processes", Annals of the CIRP Vol. 37/1/1998.

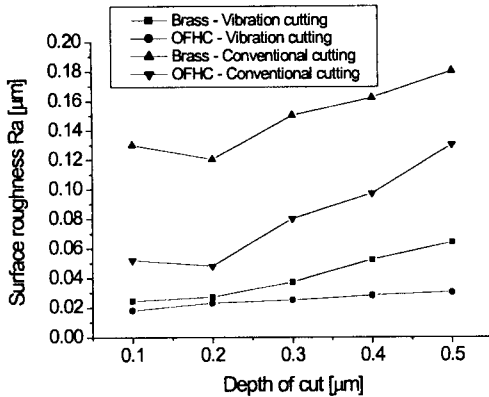


Fig. 9 Surface roughness in vibration cutting

그림 10은 진동절삭에 의해 가공된 면의 경도를 측정 한 결과이다. 공작물 원재료의 경도가 황동의 경우는 100, 무 산소동의 경우는 54정도 있음을 감안하면 진동절삭에 의해 생성된 면에서는 전체적으로 가공경화가 크게 나타나지 않았다. 이는 진동절삭에서는 공구가 주기적인 임팩트를 가하며 공작물을 제거하기 때문에 일반절삭에 비해 크게 줄어드는 절삭력 때문이다. 그래프의 경향을 볼 때, 가공깊이 0.1μm 와 0.2μm에서의 가공경화는 거의 차이가 없다는 것을 확인할 수 있다. 이는 가공면 거칠기 그래프와 더불어 진동절삭에 의해 한계절삭깊이가 축소되었음을 확인할 수 있게 한다.

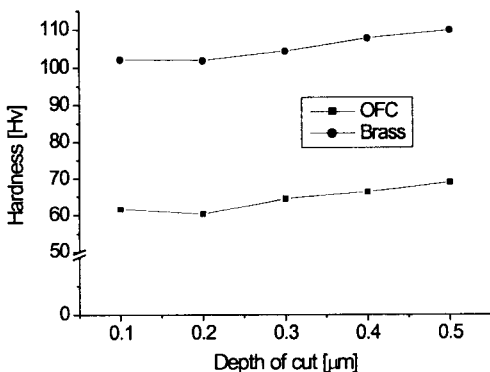


Fig. 10 Micro-Hardness in vibration cutting