

마이크로 가공에서의 한계절삭깊이에 관한 연구

손성민*, 이희석(부산대 대학원), 안중환(부산대 기계공학과)

A Study on Critical Cutting Depth in Micro-Machining

S. M. Son*, H. S. Lee(Graduate School, PNU), J. H. Ahn(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

In micro-machining, diamond tool is commonly used because it brings much better micro-machinability due to its edge sharpness. However, it is a big question even how thinly the sharp edge of a diamond tool can cut a chip from the workpiece surface. This paper is to investigate the critical cutting depth, at which the dominant cutting mode changes from chip formation to burnishing or vice versa, for a given edge radius. The theoretically critical cutting depth is $0.25\mu\text{m}$ ($0.8\mu\text{m}$) in cutting using a square type(V-type) diamond tool that has edge radius of $1\mu\text{m}$ ($1.5\mu\text{m}$). Experimentally, the dominant cutting mode changes and cutting surface becomes better at critical cutting depth. To get high quality surface, depth of cut must be critical cutting depth because less plastically deformed substrate is left on the surface.

Key Words : Micro-Machining (마이크로 가공), Critical Cutting Depth (한계절삭깊이)

1. 서 론

최근 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 유리하지만, 공작물 결정립 내의 원자간 결합을 끊어내면서 절삭하는 마이크로가공에서는 치수효과로 인한 비절삭력 증가와 버발생, 형상 찌그러짐 등의 발생으로

가공품질을 저하시키는 문제가 야기된다. [2,3]

특히, 서브 마이크로 혹은 수 마이크로대의 절삭깊이에서는 공구 날끝 반경의 예리한 정도에 따라 음의 경사각으로 공작물을 가공하게 되어 매크로 가공에서는 무시될 수 있었던 문제들이 부각된다. 공구 날끝 반경보다 작은 절삭깊이의 마이크로 가공에서 가공물의 소성변형에 의한 영향보다 탄성변형에 의한 영향의 증가로 인해 배분력이 주분력보다 크게 되어 가공정도가 불량한 절삭깊이가 존재하게 된다. 이 때, 안정적인 절삭이 가능한 최소절삭깊이를 한계절삭깊이라 정의하고, 절삭깊이에 따라 가공물의 정밀도와 품질도 달라지게 된다.

본 연구에서는 다이아몬드 공구를 이용한 마이크로가공에서의 공구 날끝 반경으로 인한 한계절삭깊이를 구하고, 절삭깊이에 따른 가공특성을 관찰하여 보다 정밀도 높은 가공물을 제작할 수 있는 절삭깊이에 관한 조건을 제시하고자 한다.

2. 한계절삭깊이

마이크로 절삭가공에서는 절삭깊이가 공구 날끝 반

경보다 작아져 음의 경사각(Negative Rake Angle)으로 절삭하게 된다. Fig. 1은 마이크로 가공에서 절삭깊이를 공구 날끝 반경이하로 가공할 때의 절삭 메카니즘을 보여준다. 날끝 반경이 r 인 공구에 의해 절삭깊이 t_c 로 가공할 때, 피삭재의 탄·소성 변형에 의해 실제 절삭되는 한계절삭깊이는 $t_{c,min}$ 로 되고 t_s 만큼 탄성회복(Spring Back)이 발생한다. 절삭력을 이용하여 수직항력 및 수평항력을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} N &= F_z \cos \theta + F_x \sin \theta \\ \mu N &= F_x \cos \theta - F_z \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 μ 는 공구와 공작물 사이의 마찰계수이다. 식 (1)로부터 θ 를 구하면,

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{F_x - \mu F_z}{\mu F_x + F_z} \right) \quad (2)$$

이 되고, 공구와 접촉하는 임계점 P_c 에서 한계절삭깊이를 계산하면 식(4)로 정리된다.[4]

$$\begin{aligned} t_{c,min} &= r(1 - \cos \theta) = r \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}} \right) \\ &= r \left(1 - \frac{F_z + \mu F_x}{\sqrt{(F_x^2 + F_z^2)(1 + \mu^2)}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

한편, V형상 공구는 총절입량이 증가할수록 공구의 기하학적 형상에 영향을 받게 된다. V형상 다이아몬드 공구는 정면에 노우즈반경(Nose Radius)이 존재하여 가공에 의해 V홈의 경사면을 형성시키는 절삭날의 측면에 작은 반경을 가지게 된다. Fig. 2는 본 연구의 실험에 사용된 노우즈각 90°의 V형상 다이아몬드 공구의 기하학적 형상과 이에 따른 절삭 메카니즘을 나타낸다. 절삭깊이가 t_c 일 때, 45°각도의 A면에서의 절삭깊이 t_{cf} 은 $0.707t_c$ 가 된다. 측면에서의 날끝 반경이 r_f 일 때, 절삭력 F_x , F_z ($0.707F_z$)와 마찰계수를 이용하여 측면에서의 한계절삭깊이 $t_{cf,min}$ 는 식 (3)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{cf,min} = r_f \left(1 - \frac{0.707F_z + \mu F_x}{\sqrt{(F_x^2 + 0.5F_z^2)(1 + \mu^2)}} \right) \quad (4)$$

이를 이용하여 V홈 가공에서의 한계 절삭깊이 $t_{cv,min}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{cv,min} = \sqrt{2} t_{cf,min} \quad (5)$$

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험장치

마이크로가공에서의 한계절삭깊이에 관한 연구에 이용된 실험장치는 Fig. 3과 같다. 주절삭방향인 X축은 공기정압 안내면(Air Bearing Slider)으로 구성되어 있어 가공중에 발생하는 마찰 등의 동특성이 무시될 수 있다. Y축과 Z축은 볼 스크류(Ball Screw)로 구동되며, 특히 Z축은 미세절삭을 위하여 감속비가 큰 감속기를 사용하였다.

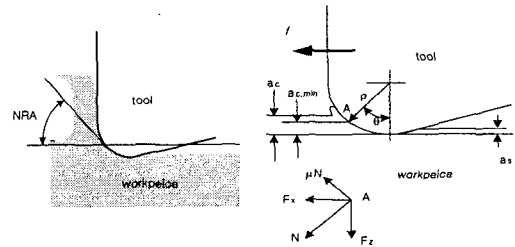


Fig. 1 The Relationship between critical cutting depth and the cutting edge radius in micro machining

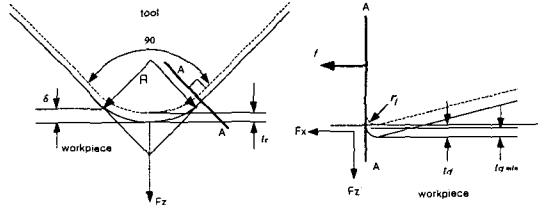


Fig. 2 Diagram of cutting mechanism of V-type

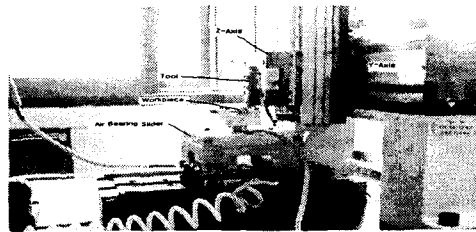
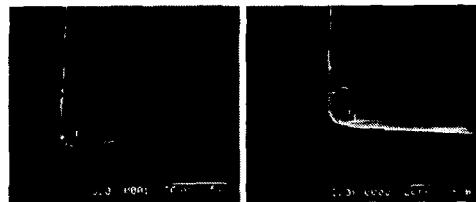


Fig. 3 Photograph of micro-machining machine



(a) square type (b) V-type

Fig. 4 SEM photograph of tool edge

3.2 실험방법

Fig. 4는 본 실험에 사용된 다이아몬드 공구의 SEM 사진이다. Fig. 4(a)는 사각형 형태의 홈을 생성하는 사각형 형태의 공구로 날끝 반경이 약 $1\mu\text{m}$ 이고, (b)는 V형상의 홈을 생성하는 V형상 공구로 노우즈 반경이 $80\mu\text{m}$ 이며, 날끝 반경이 약 $1.5\mu\text{m}$ 이다.

이 두 개의 공구로 각각 사각형 형태의 홈과 V형상의 홈을 생성할 때의 한계절삭깊이와 그에 따른 절삭특성을 조사하는 실험을 행하였다. 이 때의 가공조건을 Table. 1로 정리하였다.

4. 실험 결과

4.1 사각형 홈 가공

식 (3)과 (4)에서 알 수 있듯이, 한계절삭깊이는 절삭력, 마찰계수 그리고 공구의 날끝 반경과 관계가 있음을 알 수 있다. 절삭력과 마찰계수는 피삭재와 가공조건에 따라 변화하게 되고 날끝 반경은 마모가 되지 않는다는 가정 하에 항상 일정하다. Fig. 5에서는 절삭력의 비에 따른 한계절삭깊이와의 관계를 보이고 있다(마이크로 가공에서의 마찰계수는 약 0.05~0.2정도로 알려져 있음). 이러한 조건에서 한계절삭깊이 이하에서의 절삭력은 탄성변형에 의한 영향을 크게 받기 때문에 주분력보다 배분력이 더 크게 된다.

Fig. 5를 통해 절삭력의 비가 1일 때의 한계절삭깊이는 약 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 이내에 존재하는 것을 알 수 있다. 한계절삭깊이가 정해짐으로서 이를 기점으로 탄성변형의 영향으로 인해 주분력보다 배분력이 큰 가공상태에서 주분력이 배분력보다 크게 되는 상태, 즉, 한계절삭깊이 이상에서 가공이 안정되는 상태로 변한 것이라 추측된다.

Table.1 Cutting Condition

| Workpiece | 7-3 Brass, Aluminum | |
|---|---|--|
| Tool | Diamond Tool (Square type, V type(90°)) | |
| Depth of cut (Cutting velocity : 3mm/s) | Square type | 0.1, 0.2 0.3, 0.4, $0.5\mu\text{m}$ |
| | V-type | 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, $1\mu\text{m}$ |

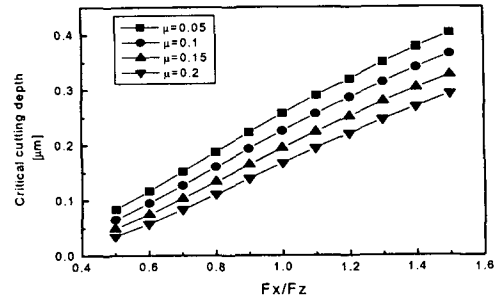
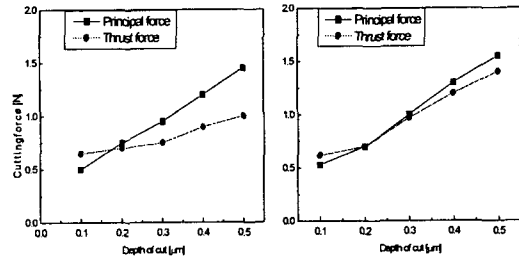


Fig. 5 Variation of critical cutting depth (Square type)



(a) 7-3 Brass

(b) Aluminum

Fig. 6 Variation of cutting force (Square-type)

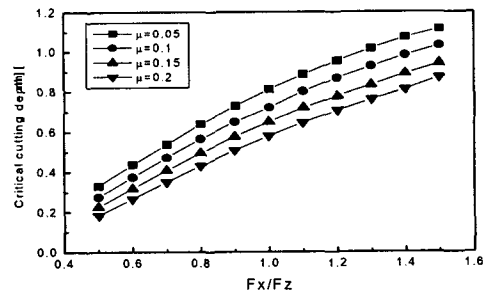
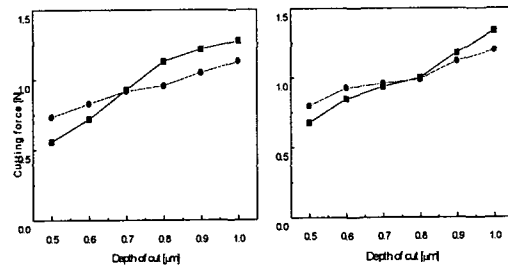


Fig. 7 Variation of Critical cutting depth (V-type)



(a) 7-3 Brass

(b) Aluminum

Fig. 8 Variation of cutting force (V-type)

이를 확인하기 위하여 피삭재 황동과 알루미늄에 대해 절삭깊이를 0.1~5 μm 까지 변화시켜 가공실험을 하였고 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 황동의 경우 절삭깊이 0.1~0.2 μm 구간에서 주분력과 배분력의 크기가 역전되고, 알루미늄의 경우는 절삭깊이 0.2~0.3 μm 구간에서 그 크기가 역전되므로 이 구간에 한계절삭깊이가 존재함을 알 수 있다. 또한, 이 가공조건에서 다이아몬드 공구와 피삭재 황동과 알루미늄과의 마찰계수는 각각 0.15, 0.1에 가깝다는 것을 알 수 있다.

4.2 V홈 가공

V홈 가공의 경우 절삭깊이는 가공기 Z축의 이송으로 결정되는데, 실제 절삭에 큰 영향을 주는 부분의 공구 날의 측면부분이다.

본 실험에 사용된 V형상 다이아몬드 공구는 90도의 노우즈 각과 약 80 μm 의 노우즈 반경 그리고 약 1.5 μm 의 날끝 반경을 갖고 있다. 마찰계수와 절삭력 비에 따른 한계절삭깊이는 Fig. 7과 같다. 본 실험에서 V홈 가공시 한계절삭깊이는 0.5~0.8 μm 사이임을 확인 할 수 있다. 따라서, 주분력과 배분력의 역전이 한계절삭깊이 이상에서 발생할 것임을 추측할 수 있으며, 이를 확인하기 위하여 절삭깊이를 0.5~1 μm 까지 변화시켜 절삭가공 실험을 하였고 Fig. 8과 같은 결과를 얻었다.

황동의 경우 절삭깊이 0.6~0.7 μm 구간에서 주분력과 배분력의 크기가 역전되고, 알루미늄의 경우는 절삭깊이 0.7~0.8 μm 구간에서 그 크기가 역전되므로 이 구간에 한계절삭깊이가 존재함을 알 수 있다. 또한, 이 가공조건에서 다이아몬드 공구와 피삭재 황동과 알루미늄과의 마찰계수는 각각 0.15, 0.1에 가깝다는 것을 알 수 있다.

4.3 표면거칠기

한계절삭깊이 이하에서와 이상에서 가공하였을 때의 가공상태를 조사하기 위하여, 사각형 다이아몬드 공구를 이용하여 가공실험을 행하였다. Fig. 5와 Fig. 6에서 얻은 결과를 토대로 한계절삭깊이 이하인 0.1 μm 에서부터 0.5 μm 까지 절삭깊이를 변화하여 가공실험을 행하여 표면거칠기를 측정된 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다. 한계절삭깊이 이하인 0.1 μm 로 가공하였을 때는 탄성변형의 영향으로 인해 절삭깊이가 0.2 μm 일 때보다 표면거칠기(Ra)가 크고, 한계절삭깊이 이상에서는 가공면 거칠기가 절삭깊이의 증가에 따라 함께 증가하는 경향을 보였다. 따라서, 보다 평활한 가공면을 얻기 위해서는 절삭깊이를 가능한 작게 하는 것이 유리하지만

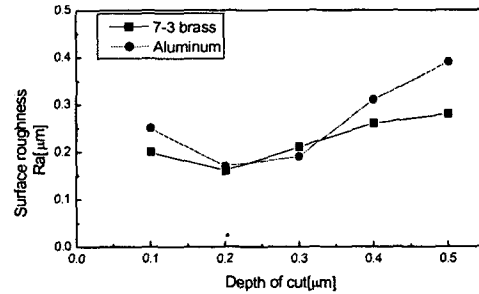


Fig. 9 Variation of surface Roughness(Ra)

한계절삭깊이 이하로 가공하면, 오히려 가공면이 나빠지게 됨을 확인하였다.

5. 결 론

다이아몬드 공구를 이용한 마이크로 홈 가공실험을 통하여 공구의 날끝 반경으로 인해 발생하는 한계절삭깊이를 구하였으며, 절삭깊이에 따른 가공특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 한계절삭깊이보다 작은 절삭깊이로 가공할 경우, 절삭에 의한 소성변형보다 재료변형으로 인한 탄성변형이 커서 배분력이 주분력보다 크게 나타난다.
- 2) 보다 양호한 가공면을 얻기 위해서는 가능한 절삭깊이를 작게 하여야 하지만, 한계절삭깊이 이하에서는 오히려 가공면 상태가 나빠지므로 한계절삭깊이로 가공할 경우 가장 양호한 가공면을 얻을 수 있다.

참고문헌

1. 森田, 山形, 樋口, "超精密切削加工によるホログラム光學素子の製作", 精密工學會秋季學術講演會講演論文集, pp.21, 1997
2. 임한석, "다이아몬드 공구에 의한 미세홈가공의 정도향상에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, pp.12-15, 1997
3. Kiyoshi SAWADA, Tomohiko KAWAI, "Development of Ultraprecision Micro Grooving", JSME International Journal Series C, pp. 170-176, Vol. 43, No. 1, 2000
4. Z.J. Yuan, M. Zhou, S. Dong, "Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining", Journal of Materials Processing Technology 62, pp. 327-330, 1996