

A6061 의 미소 드릴링시 절삭조건이 Burr 형성에 미치는 영향

박동삼*, 최종순**, 권상호***

Effect of Cutting Conditions on Burr Formation
in Micro-drilling of A6061

Dong-Sam Park*, Jong-Soon Choi**, Sang-Ho Kwon***

ABSTRACT

Theoretical and experimental studies on burr formation and deburring in many manufacturing processes have been actively pursued. Though micro-drilling has become more important in the production of precision parts such as PCB, air bearing, camera and nozzle, most studies on drilling burr formation have focused on the conventional drilling process. This paper describes burr formation process and the effect of cutting conditions such as spindle speed, feedrate and drilling depth per one step on burr formation in drilling A6061 with drills of diameter 1.0mm and 0.6mm. Experimental results showed that burrs with cap were formed at relatively low feedrates, while petal burrs with several large burr fragments were formed at high feedrates. Burr height appeared to increase at the higher feedrates and lower spindle speeds. The effect of final cutting depth on burr height was negligible.

Key Words : Micro-drilling (미소드릴링), Burr(버), Burr Measurement (버 측정), Cutting Condition (절삭조건)

1. 서론

최근 산업제품의 경량화, 소형화 추세에 따라 그것을 구성하는 부품의 소형화와 정밀화가 절실히 요구되고 있다. 일반적으로 기계가공의 25~35%를 차지하는 구멍가공에도 이 경향은 나타나기 시작하여 미소구멍 가공의 중요성이 날로 증대하고 있다. 미소 드릴링(micro-drilling)의 명확한 정의는 없지만 일반적으로 구멍지름이 1.0mm 이하의 구멍가공을 말하며 자동차용 연료 분사노즐, 의약품침, 에어 베어링, 시계, 카메라 등의 정밀기계 부품 가공, 나아가 IC 기판의 구멍가공, 광파이버 케이블의 커넥터 부분 가공, 잉크젯 프린터 노즐,

센서 부품, 유체 제어기기의 구멍가공 등 그 응용 분야가 다양하다.

한편, 이와 같은 구멍가공의 정밀화나 자동화에 큰 장애요소가 되고 있는 것이 바로 버(burr)이다. 특히, Gillespie¹⁾는 정밀부품의 디버링(deburring) 비용이 완성 부품가격의 30%를 차지한다는 연구 결과를 발표하기도 할 정도로 버의 최소화 및 적절한 디버링 기법의 선택은 중요한 문제가 되고 있다.

지금까지의 구멍가공시 버 발생 현상에 관한 연구들을 보면 대부분 범용 구멍가공에 관한 것으로 Gillespie^{2,3)}는 드릴링 버의 형성기구를 설명하고 버의 형태를 분류하였다. 또한, Takazawa⁴⁾는 드릴

* 인천대학교 기계공학과

** 인천대학교 대학원 기계공학과

*** 인천대학교 교육대학원

링 버의 형상을 rollover burr, poisson burr 및 tear burr 의 3 가지로 분류 하였으며, Kitajima 등¹⁵⁾은 2 차 버(secondary burr)의 형성과정 등을 규명하였다. 그 외에도 많은 연구가 있지만 3~12mm의 범용 구멍가공시의 버 발생에 관한 연구^{16,7)}가 대부분을 이루고 있다.

직경 1mm 이하의 미소 드릴링에 관한 연구로는 인쇄회로기판(PCB)의 구멍가공에 관한 연구^{8,9)}, 스테인레스강의 미소 드릴링시 버 형성에 관한 연구¹⁰⁾ 등이 있으나 아직 본격적인 연구는 시작되지 않고 있어 최근 미소드릴 가공의 중요도와 이용이 날로 확산되고 있는 실정에서 미소 드릴링시의 버 형성에 관한 연구가 시급히 요청되고 있다.

또한, 지금까지의 드릴링 버에 관한 연구들을 보면 절삭조건과 공작물의 재질에 따라 버의 발생 경향이 서로 상충되는 부분들이 상당히 나타나고 있어 미소 드릴링시의 버 발생 현상에 대한 많은 실험 데이터의 축적이 요구된다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있는 알루미늄 합금 A6061을 대상으로 미소 드릴링시의 버 발생과정과 절삭속도, 이송속도(feedrate), step 당 절삭깊이 등의 절삭조건이 출구 버(exit burr)의 형상과 크기에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다.

2. 미소드릴 가공의 특성

미소구멍 가공은 드릴을 이용하는 기계적 가공법과 방전, 레이저, 전자빔 가공으로 대표되는 고에너지 가공법으로 크게 분류할 수 있다. 고에너지 가공법은 깊은 구멍가공시 가공정밀도나 가공변질층 등의 문제가 발생하며, 드릴가공은 공구강성 저하로 파손발생의 문제점이 있지만 가공정밀도가 좋고 세장비가 큰 가공이 가능하여 생산성 및 가공 비용면에서 실용화 가능성이 높다.

한편, 이러한 미소드릴 가공은 일반 드릴링 가공에 비하여 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

- 1) 주속이 낮으므로 드릴의 고속회전이 필요하다.
- 2) 칩변형에 의한 공구파손으로 공구수명이 짧다.
- 3) 절삭칩의 배출성이 나쁘다.
- 4) 가공면의 거칠기에 따라 위치결정 정밀도가 큰 영향을 받는다.
- 5) 드릴이 미세지름이 될수록 형상정밀도가 나빠진다.

- 6) 드릴의 강성저하로 칩변형이 발생하기 쉬우며 이로 인하여 구멍의 진직도, 진원도, 원통도 등의 형상정밀도가 나쁘다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 드릴의 형상 즉 여유각과 비틀림각, 치즐에지와 치즐포인트, 선단각 등을 적절히 변형시켜야만 된다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

실험에 사용된 공작기계는 최대주축 회전수가 10000rpm 인 미국의 Hass Automation Inc. 에서 제작된 수직 머시닝센터(VF - 4)이며, 드릴은 미국 M.A. FORD 에서 제작된 $\phi 0.6\text{mm}$ 와 $\phi 1.0\text{mm}$ 의 드릴이며, 재질은 초경합금, 선단각 128° , 비틀림각(helix angle)은 $28^\circ 30'$ 이다. 버의 측정은 만능 공구 현미경(NIKON 20, 일본)을 사용하였다.

3.2 실험방법

실험에 사용된 시편의 재질은 드릴링시 버를 관측하기가 비교적 용이한 A6061이며, 시편형상은 $80 \times 80 \times 3\text{mm}$ 로 가공하여 드릴링 두께가 3mm 가 되도록 하였다. 절삭조건은 드릴직경 $\phi 0.6\text{mm}$, $\phi 1.0\text{mm}$ 에 대하여 절삭속도는 6000rpm, 8000rpm, 10000rpm 으로, 이송속도는 0.01mm/rev, 0.02mm/rev, 0.03mm/rev 의 3 단계로 각각 나누어 선정하였다.

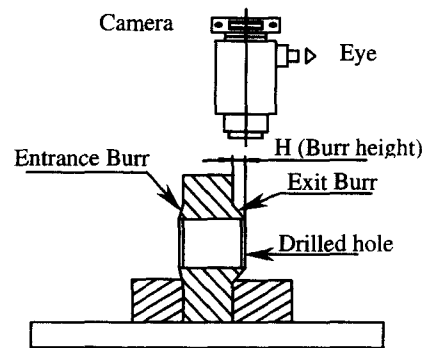


Fig. 1 Burr height measurement using microscope

한편, 출구버의 계측방법은 형상과 크기 모두 공구현미경을 통하여 관측하였다. 출구버의 최대 높이는 시편을 수평상태로 두고 측정하는 방법과 수직으로 두고 측정하는 방법이 있으며 수평상태의 경우 평균 버높이 측정에는 유리하나 구멍 주위를

따라 최대 버 높이를 찾기가 힘들 뿐 만 아니라 시간이 많이 걸리는 등의 단점이 있어 본 연구에서는 Fig.1 과 같이 시편을 수직으로 세운 상태에서 공구현미경의 초점을 시편 평면부에 맞춘 후 그 초점이 버의 끝단부에 다시 맞추어질 때까지 렌즈를 움직여 렌즈의 수평방향 이동 거리를 버의 최대 높이로 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 출구 버의 발생과정

미소 구멍가공 시의 출구버 형성과정을 규명하기 위하여 Fig. 2 와 같이 공작물 시편의 밑면을 기준으로 가공완료시 드릴의 돌출길이(exit length) l 을 변화시키며 버의 형성과정을 관찰하였다. 실험 조건은 Table 1 과 같다.

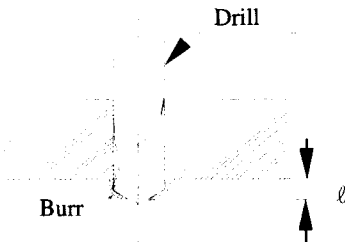


Fig. 2 Exit burr formation

Table 1 Cutting Conditions

Drill diameter (mm)	1.0
Spindle speed (rpm)	8000
Feedrate (mm/rev)	0.01, 0.02, 0.03
Exit length (mm)	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
Cutting fluid	ROCOL ULTRACUT 370

Fig. 3 과 Fig. 4 는 feedrate 가 각각 0.01mm/rev 와 0.02mm/rev 일 때의 실험결과를 나타낸 것으로 출구버는 다음의 3 단계 과정으로 형성된다는 것을 알 수 있다.

[단계 1] (a),(b)와 같이 드릴 포인트가 공작물을 관통하기 직전에 피삭재의 중심이 추력(thrust)에 의하여 밀려나와 소성변형이 되면서 압출된다.

[단계 2] (c)와 같이 계속되는 드릴의 전진에 따라 소성 변형부에 인장력이 가해지면서 돌출부의 균열이 발생한다.

[단계 3] (d), (e), (f)와 같이 드릴의 완전 관통에

따라 돌출물이 분리된다.

그런데, [단계 3]에서 특이한 점은 이송속도가 낮을 경우는 cap 형상의 버, 혹은 cap 이 제거된 균일한 버(uniform burr)가 발생되지만 이송속도가 커질 경우 버가 크게 찢어지는 petal 버가 발생한다는 것이다. 이송속도가 0.03mm/rev 인 경우 이러한 경향은 더욱 뚜렷이 나타났다. 이는 이송속도가 낮을 경우 관통직전의 추력이 작기 때문에 드릴날의 코너부근에서 피삭재의 소성영역이 작아져 탄성영역의 지지에 의하여 돌출날 뿌리부가 얇게 절삭되어 돌출물의 분리가 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 이송속도가 커질 경우 피삭재가 마찰열에 의하여 연화되면서 추력의 급증에 따라 소성변형도 넓게 나타나 돌출물의 내측으로부터 방사형 균열현상이 나타난 버가 발생하게 된다.

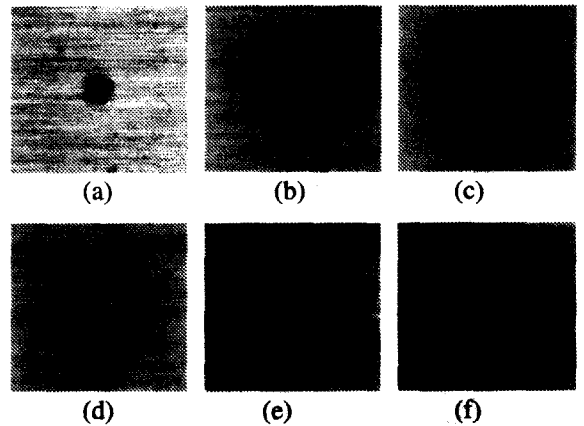


Fig. 3 Stages of exit burr formation (feedrate 0.01mm/rev)

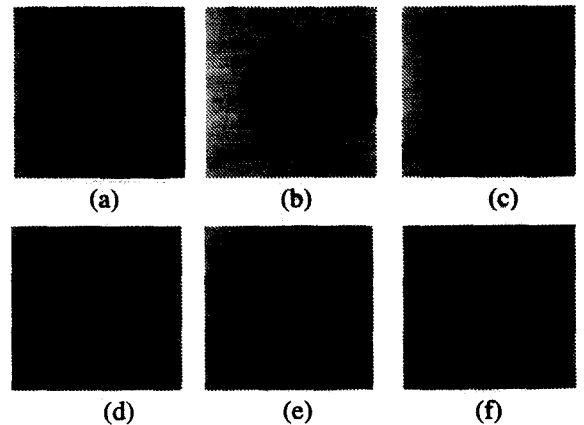


Fig. 4 Stages of exit burr formation (feedrate 0.02mm/rev)

4.2 절삭조건에의 영향

본 실험에서는 절삭속도, 이송속도 및 1 step 당 절삭깊이가 버 형성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 Table 2 와 같은 절삭조건으로 실험을 수행하고 발생하는 버의 형상과 크기를 관찰하였으며 사용된 절삭조건은 추천 절삭조건에 따라 선정하였다. 한편, 본 연구에서는 최종 step 에서의 절삭 두께가 항상 0.2mm 가 되도록 하였으며 한 step 당 절삭깊이는 0.4mm, 0.6mm, 0.8mm 이다.

Table 2 Cutting conditions

Drill diameter (mm)	0.6
Spindle speed (rpm)	6000, 8000, 10000
Feedrate (mm/rev)	0.01, 0.02, 0.03
Final cutting depth(mm)	0.2
Drilling depth per step(mm)	0.4, 0.6, 0.8
Cutting fluid	ROCOL ULTRACUT 370

4.2.1 버의 형태

실험결과 발생하는 버의 형태는 Fig. 5 와 같이 3 종류로 나타냈다. Type I 은 버가 구멍 출구면에 미소하지만 균일하게 분포되는 형태이며, Type II 는 cap 이 출구 모서리에 남아있는 형태인데 cap 이 제거 된다면 Type I 과 같은 형태가 된다. Type III 는 버가 찢어진 형태이다.

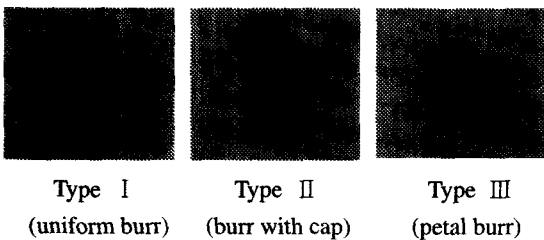


Fig. 5 Three types of micro-drilling burrs

버형태를 절삭조건에 따라 도시하면 Fig. 6 과 같이 나타났다. 이 그림으로부터 버의 형태는 이송속도와 큰 상관성을 갖는다는 것을 알 수 있는데, 이송속도가 낮을 경우에는 Type I 이, 이송속도가 높아질수록 Type II 에서 Type III 으로 변하고 있다. 드릴의 회전수나 1 step 당 절삭깊이는 큰 영향을 미치지 않지만, 일반적으로 그 양이 증가할수록 Type I ⇒ Type II ⇒ Type III 으로 변해간다는 것을

알 수 있다. 이는 버의 발생기구에 대한 설명에서 버 발생단계의 최종단계인 [단계 3]에서 버의 형태가 Type II 와 Type III 로 나누어지게 되는 이유 설명과 동일한 맥락에서 이해될 수 있다.

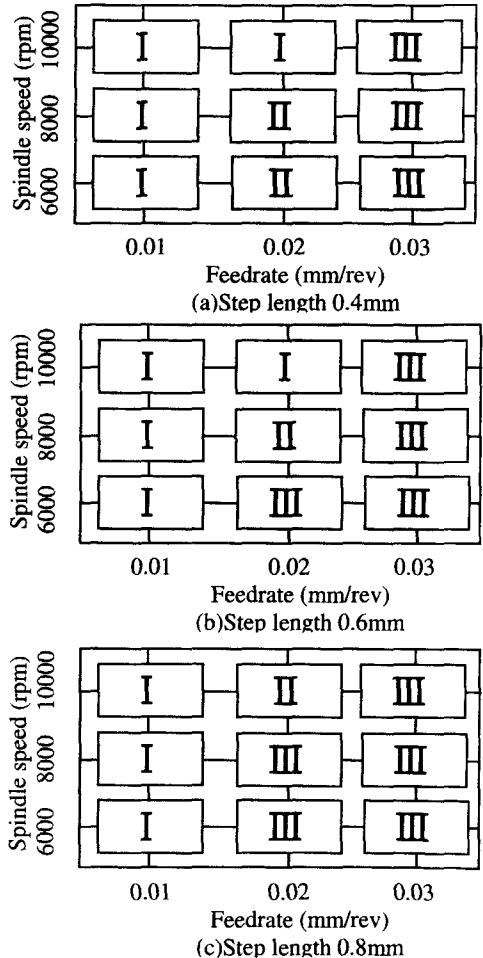


Fig. 6 Effect of drilling conditions on burr shape

4.2.2 버의 크기

버의 크기측정은 공구현미경을 이용한 버의 측면 투시로부터 최대높이를 측정하였는데 측면 투시도의 예를 Fig. 7 에 나타내었다. 균일버가 아닌 경우 버의 크기 측정방법은 cap 버인 경우는 cap 을 제외한 높이를, petal 버인 경우는 특히 돌출된 부분을 제외 하였는데, 이러한 부분은 1 차버(primary burr)로 디버링시 크게 문제가 되지 않기 때문이다. step 당 절삭깊이가 각각 0.4mm, 0.6mm 및 0.8mm 일 때 이송속도와 절삭속도가 출구버의

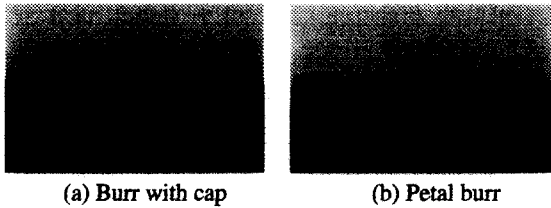


Fig. 7 Side view of burr with cap and petal burr for measurement of burr height

크기에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. 전체적으로 보면 미소 드릴링시 버의 높이는 이송속도와 절삭속도에 따라 큰 영향을 받고 있으며 step 당 절삭깊이는 영향을 미치긴 하나 중요한 변수가 아님을 알 수 있다. 먼저, 이송속도의 영향을 보면 모든 경우에 이송 속도가 증가할수록 버의 크기가 증가 하는데 특히 절삭속도가 낮을 경우 증가하는 경향이 더욱 뚜렷하다.

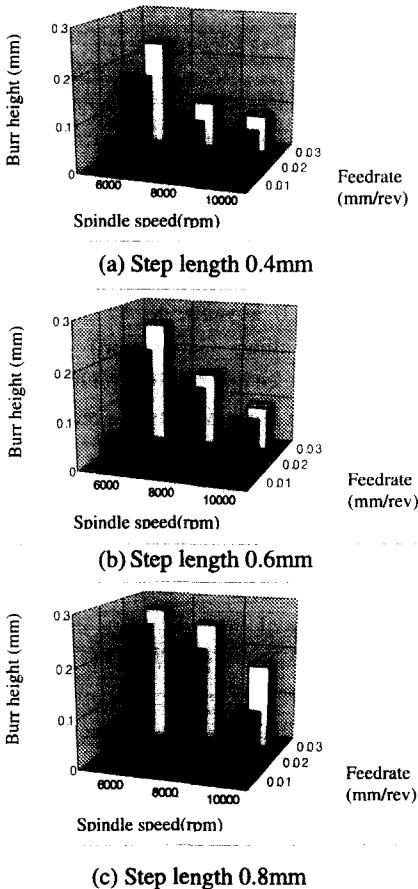


Fig. 8 Effect of cutting conditions on burr height

절삭속도의 영향은 이송속도가 0.01mm 일 경우에는 뚜렷하지 않고 거의 일정한 양상을 보이거나 혹은 절삭속도가 중속(8000rpm) 일 때 버의 크기가 감소하는 경향을 보이기도 한다. 그러나, 이송속도가 커지면 절삭속도의 증가에 따라 버의 크기도 크게 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이는 일반적인 범용드릴 가공시에 절삭속도가 커질수록 버의 크기가 증가 한다는 실험결과와는 반대임을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 미소 드릴링시에는 이송속도는 가급적 작게, 절삭속도는 크게 하는 것이 버의 크기를 최소화 하는 조건임을 알 수 있다.

4.3 최종 절삭두께의 영향

본 실험에서는 최종 절삭두께가 버의 형성과 크기에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 9에서 보는 바와 같이 공작물 시편의 밑면으로부터 l 위치까지 구멍가공을 완료한 후 나머지 부분을 단번에 가공하여 버의 형상을 관찰하였다. 실험조건은 Table 3과 같으며, Fig. 10은 최종 절삭두께가 버의 크기에 미치는 영향을 나타낸 것으로 최종 절삭두께는 버의 크기에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

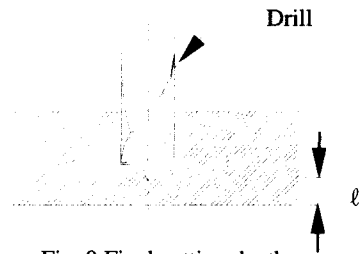


Fig. 9 Final cutting depth

Table 3 Cutting Conditions

Drill diameter (mm)	0.6
Spindle speed (rpm)	8000
Feedrate (mm/rev)	0.01, 0.02, 0.03
Final cutting depth (mm)	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
Cutting fluid	ROCOL ULTRACUT 370

이 그림에서 알 수 있듯이 버의 크기는 주로 이송속도에 의하여 결정되며, 이송속도가 증가할수록 버의 크기가 크게 나타나고 있는데 이는 앞에서의 실험 결과와 일치되는 경향을 보여 주고 있다.

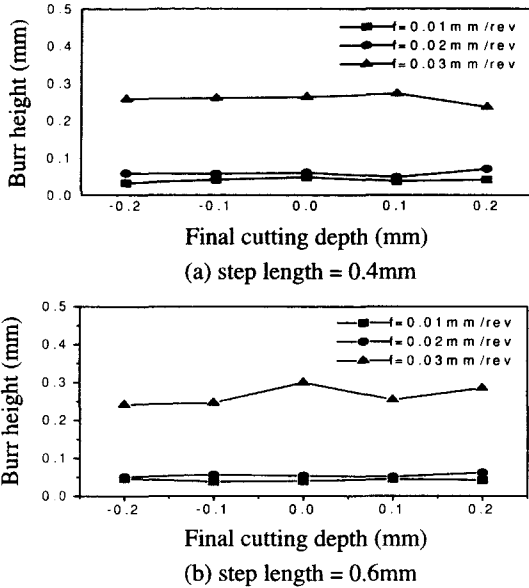


Fig. 10 Effect of final cutting depth on burr height

5. 결론

알루미늄 합금 A6061 관재의 미소 드릴링시 버 발생 과정 규명과 절삭조건이 버의 형상 및 크기에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험적 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 미소구멍 가공시 출구버의 형성과정은 크게 3 단계로 나눌 수 있는데, 즉 피삭재 중심의 소성 변형으로 인한 압출단계, 피삭재의 돌출부 균열 단계 및 돌출부의 분리단계로 나누어 설명할 수 있으며, 버 발생기구는 이송속도의 영향을 크게 받는다.
- 2) $\phi 0.6\text{mm}$ 드릴을 이용한 구멍가공시 버 형태는 균일버, cap 버 및 petal 버의 3가지로 나타났다.
- 3) 버의 형태는 이송속도의 영향을 크게 받으며 저 이송에서는 균일버, 중 이송에서는 cap 버, 고 이송에서는 petal 버가 발생한다.
- 4) 절삭조건 중 이송속도가 버의 크기에 가장 큰 영향을 미치며, 이송속도가 증가하면 버의 크기가 항상 증가한다.
- 5) 절삭속도도 버의 크기에 어느 정도 영향을 미치며, 이송속도가 낮을 경우에는 그 영향이 크지 않으나 이송속도가 증가할수록 절삭속도의 증가에 따라 버의 크기는 감소한다.
- 6) Step 당 절삭깊이는 버의 크기에 크게 영향을

미치지 못하지만, 그 깊이가 클수록 버의 크기는 증가한다.

- 7) 최종 절삭단계의 변화는 버의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다.
- 8) 미소 드릴링시 버의 높이를 최소화 하기 위해서는 가능한 한 이송속도는 작게, 절삭속도는 크게, step 당 절삭깊이는 작게 해야 한다.

참고문헌

1. L. K Gillespie, " Deburring Precision Miniature Parts," Precision Engineering, Vol. 1, No.4, pp. 189-198, 1979.
2. L. K Gillespie, " Burr Produced by Drilling," Bendix Corp. Unclassified Topical Report BDX-613-1248, December, 1975.
3. L. K Gillespie, "Effects of Drilling Variables on Burr Properties," Bendix Corp. Unclassified Topical Report BDX-613-1502, March, 1976.
4. K. Takazawa, " The Academic Challenge of Burr Technology in Japan", SME Deburring and Surface Conditioning Technique Conference, 1985.
5. K. Kitajima, K. Takazawa, et al., " Study on Mechanism and Similarity of Burr Formation in Face Milling and Drilling," Technology Reports of Kansai University, No. 32, March, 1990.
6. K. Adachi, T. koyama, K. Murakami, " Study on Vibratory Drilling (1st Report)- Analysis of the Vibrating Device and Cutting Conditions of Drilling," Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 42, No. 12, pp. 47, 1976.
7. K. Adachi, et al., " A Study on Burr in Low Frequency Vibratory Drilling," Bull. Japan Soc. of Prec. Engng., Vol.21, No4, pp. 258-264, 1987.
8. M. Hiranaka , et al., " Studies on Bending at Small Hole Drilling of Printed Wiring Boards," Journal of JSPE, Vol. 59, No. 1, pp. 119- 124, 1993.
9. H. Schulz, " Drilling of Small Hole in Printed Circuits," CIRP General Assembly, Edinburgh, August, 1993.
10. J. Stein, Burr Formation in Precision Drilling of Stainless steel, Ph. D. Dissertation, Dept. of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, May, 1995.