

철계 금속 마이크로 절삭 가공시 저온 환경에서의 버 발생에 관한 기초연구

김건희¹ · 김동준¹ · 손종인² · 윤길상³ · 허영무³ · 조명우[#]

A Basic Study on Burr Formation of Micro Cutting Process with the Ferrous Metal at Low Temperature

G. H. Kim, D. J. Kim, J. I. Sohn, G. S. Yoon, Y. M. Heo, M. W. Cho

(Received February 26, 2009)

Abstract

In this paper, a basic study on micro cutting process with SM20C at low temperature environment was performed. In macro cutting fields, the cryogenic cutting process has been applied to cut the refractory metal but, the serious problem may be generated in micro cutting fields by the cryogenic environment. However, if the proper low temperature is applied to micro cutting area, the cooling effect of cutting heat is expected. Such effect can make the reduction of tool wear and burr formation. For verifying this possibility, the micro cutting experiment at low temperature was performed and SEM images were analyzed.

Key Words : Micro-machining, Micro-endmilling, Low Temperature Cutting, Burr, Vortex Tube

1. 서 론

기계적인 재료 제거 메커니즘을 기반으로 하는 마이크로 절삭 가공 기술은 다양한 형상 및 패턴 가공에 대한 대응성이 우수하며, 가공 가능한 재료도 매우 다양함에 따라 관련 장비 및 가공 품질 향상에 대한 관심이 날로 증대되고 있다. 특히 바이오 칩, 휴대용 연료전지 등과 같은 기능성 미세 형상 및 패턴을 내제한 어플리케이션의 필요성이 증대됨에 따라 이러한 초소형 어플리케이션의 대량생산이 가능한 마이크로 금형 코어 제작에 대한 수요가 높아지고 있으며, 또한 이를 위한 기계적인 마이크로 가공 기술 역시 많은 연구가 진행되고 있다[1~5].

일반적인 절삭 가공 시 발생하는 버(burr)는 가

공품질을 저하시키며, 절삭 후 공정 소요를 증가시키는 주요 요인이라고 할 수 있다. 이러한 버는 절삭 가공 조건, 공구 마모, 가공재료의 특성 등 다양한 요인에 의하여 발생된다. 특히 난삭재의 경우 가공시 발생하는 높은 절삭열로 인한 급속한 공구 마모 등의 문제가 발생됨에 따라 버 생성이 증가되고, 가공면 품질도 저하된다. 따라서 난삭재 가공 시 높은 절삭열로 인한 가공 경화 현상을 방지하기 위하여 공구와 공작물을 매우 낮은 온도 상태를 유지하면서 가공을 진행하는 극저온 절삭 공정에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 대표적 난삭재인 티타늄 절삭 가공에 주로 적용되어 왔다[6~9].

마이크로 절삭 가공 공정에서 버는 일반적인 절삭 공정에서의 버 발생보다 더욱 심각한 문제

1. 인하대학교 기계공학과 대학원

2. 인천대학교 기계공학과 대학원

3. 한국생산기술연구원 정밀금형팀

교신저자: 인하대학교 기계공학과,

E-mail:chomwnet@inha.ac.kr

를 야기한다. 특히 매우 작은 크기의 가공 형상으로 인하여 절삭 가공 후 공정 수행이 난해한 마이크로 절삭 가공에서는 디버링(deburring) 공정수행 중에 기존 가공 형상의 보존이 어려운 경우가 많다.

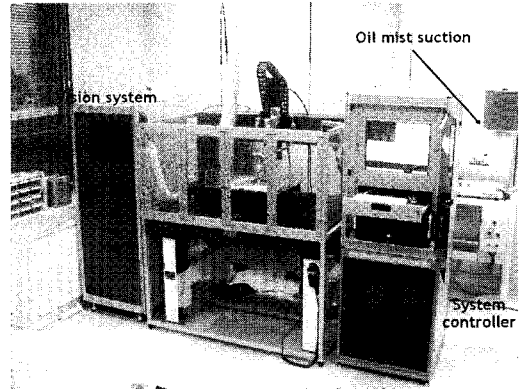
이러한 현상이 발생하는 이유는 마이크로 절삭 가공 시 발생하는 비절삭 에너지(specific cutting energy)가 일반적인 절삭 가공 공정에 비하여 상대적으로 크게 발생[10]됨에 따라 공구 마모, 공구 변형, 매우 좁은 영역에서의 높은 절삭열 발생 등이 야기되며, 이로 인하여 발생하는 가공 형상 크기 대비 버의 크기가 상대적으로 매우 커서 버 제거 공정이 원활하지 않기 때문이라고 할 수 있겠다. 따라서, 절삭 가공 후 별도의 디버링 공정을 수행한다고 하더라도 절삭 공정 단계에서 발생하는 버를 최소화하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 마이크로 절삭 가공 시 매우 좁은 절삭 영역에서 발생하는 절삭 열을 급속하게 냉각시킴으로써 공구 마모와 버 발생량을 저감시킬 수 있는 방법에 대한 기초연구를 진행하였다. 기존에 연구되었던 난삭재 가공 시 적용 가능한 극저온 절삭 공정을 참고하여 가공 중 저온의 공기를 가공 부위에 공급함으로써 절삭 열을 저감시키는 저온 절삭 공정을 수행하였으며, 가공 후 버 발생 양상을 고찰하였다.

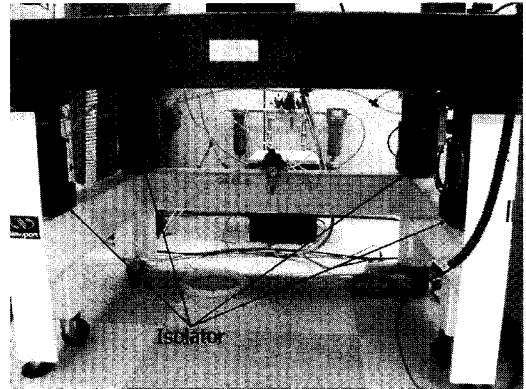
2. 실험장치 및 방법

2.1 마이크로 가공 시스템

본 연구의 마이크로 절삭가공 실험에 사용된 가공 시스템은 Fig. 1과 같다. 해당 가공 시스템은 3 축 동작기계와 동일한 구조로 제작되었으며, 주축의 경우 수직 방향으로 설치되어 있다. 가공 시스템의 주축에는 마이크로 엔드밀링 공정을 수행할 수 있도록 에어 스피들이 장착되어 있으며, 일반적인 절삭 공정에 비하여 공구 직경대비 날당 이송량이 매우 큰 마이크로 절삭 공정의 특성을 고려하여 날당 이송량을 줄일 수 있도록 최고 100,000rpm 까지 가속할 수 있는 스피들을 적용하였다. 또한, 가공 초기 공구의 셋업이 난해하기 때문에 가공 시편의 분리 없이 시스템상에서 2 차원 가공형상의 기하를 측정할 수 있는 비전 센서를 주축에 장착할 수 있도록 구성하였으며, 마이크로 절삭 가공의 경우 가공 시스템 자체에서 발생하는 진동 저감도 중요하지만 외부로부터 전



(a) Various parts of system



(b) Isolator and under frame

Fig. 1 Micro cutting system

Table 1 Specification of the micro cutting system

Traveling range	X,Y-axis(600mm), Z-axis(200mm)
Resolution	All axes 0.1 μm
Accuracy	X,Y-axis(6 μm), Z-axis(2 μm)
Repeatability	All axes 0.2 μm
Rotational speed	Max. 100,000 rpm (rev./min)
Spindle runout	Max 0.7 μm
Specimen weight	Max 10kg

달되는 진동 저감도 매우 중요하게 고려되어야 할 부분임에 따라 시스템이 설치된 정반 하부에 아이솔레이터(isolator)를 설치하여 바닥면으로부터 전달되는 진동을 최소화 하였다.

본 연구에서 중점적으로 고려하고 있는 미세영

역에서의 절삭열 냉각을 위한 절삭유 공급은 절삭 영역의 미세함을 고려하여 본 시스템에서는 지용성 절삭유를 미스트(mist) 형태(5cc/shot, 분사 압력 5bar)로 공급되도록 구현되어 있으며, 분사되는 절삭유로 인한 시스템 오작동 가능성을 배제하기 위하여 집진기도 별도로 적용하였다. 또한, 미세한 절삭 깊이의 균일성을 확보하기 위하여 가공 시편의 기울어짐(tilting error)으로 인한 절삭 깊이 변화를 가공 전에 보정할 수 있도록 시스템 베드(bed) 상에 별도의 tilting stage 를 장착하였다. Table 1 은 가공 시스템의 세부 사양을 정리한 것이다.

2.2 마이크로 엔드밀

일반적으로 1mm 이하의 직경을 가지는 마이크로 엔드밀은 매우 작은 직경으로 인한 약한 강성을 보완하기 위하여 공구 직경대비 날 길이가 범용 엔드밀에 비하여 매우 작으며, 대부분 초경으로 제작되거나 더욱 유리한 가공 특성을 확보하기 위하여 별도의 코팅 처리를 거치게 된다. 또한, 공구의 기하학적 특성으로 인하여 공구 고유 진동수가 매우 높으며, 구조적으로는 높은 정적 강성을 가진다[11]. 이와 같이 언급된 마이크로 엔드밀은 매우 작은 크기와 기하로 인하여 공구 날의 초기 상태 판별이나 공구 직경 측정이 매우 어려우며, 공구 샹크(shank)와 공구 날부 사이의 큰 직경 차이로 인하여 제조상 편심 발생 가능성 등으로 가공 전에 반드시 공구 현미경 및 비전 센서를 통한 상태 관찰이 필요하다[12].

본 연구의 마이크로 절삭 공정 실험에 적용된 마이크로 엔드밀(직경 200 μ m, 날 길이 400 μ m, 헬릭스 각 15°)의 경우 직경 측정 결과 공칭 직경인 200 μ m보다 작은 178.59(\pm 0.16) μ m의 직경을 가짐을 확인할 수 있었다(Fig. 2). 이는 앞서 언급된 바와 같이 공구 샹크부와 공구 날 부의 큰 직경 차이로 인하여 제조상 편심 발생, 장착 시 발생하는 런아웃(runout) 등을 고려하여 공구를 제작하였기 때문으로 사료된다.

2.3 실험 방법

티타늄과 같은 난삭재의 범용 가공 시 적용할 수 있는 극저온 절삭의 경우 가공 시 발생하는 높은 절삭열을 냉각시키기 위하여 가공 재료를 액화 질소 등에 일정 시간 노출시켜 극저온 상태로 만든 후 가공 시에도 액화 질소를 지속적으로

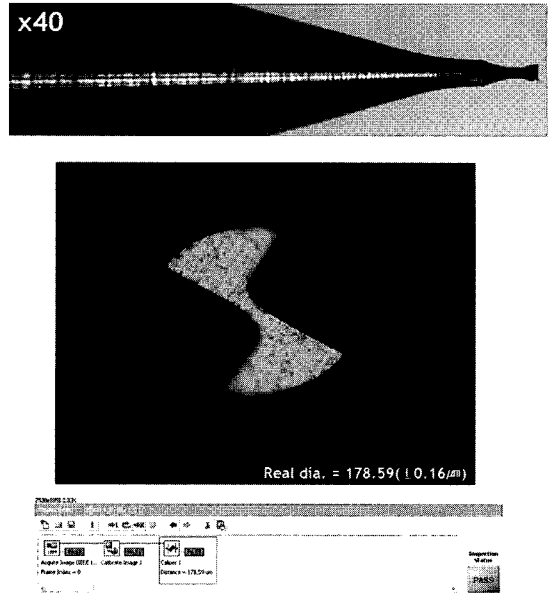


Fig. 2 Micro endmill used in this study

공급하여 가공을 수행한다. 이러한 경우 가공 영역의 온도가 약 영하 200 $^{\circ}$ C 수준까지 하강하게 된다. 마이크로 절삭 가공의 경우 극저온 상태에서는 공구의 약한 강성과 재료의 수축 등이 더욱 큰 문제로 영향을 미칠 것으로 예상되며, 이로 인하여 공구의 파손 및 가공 정밀도 저하 등이 야기될 것으로 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 약 영하 20 $^{\circ}$ C 수준의 공기를 가공 중 지속적으로 분사함으로써 미세 절삭 영역과 주변 온도를 저하시키고자 하였다. 저온의 공기를 가공영역에 공급하기 위하여 본 연구에서는 상온의 압축 공기를 공급할 경우 저온의 공기를 분사할 수 있는 vortex tube 를 이용한 cold air gun 을 적용하였다.

적용된 cold air gun 은 7bar 수준의 상온 압축공기를 공급할 경우 최저 영하 30 $^{\circ}$ C 수준의 저온 공기를 분사할 수 있다. Fig. 3 은 vortex tube 의 기본 원리를 나타낸 그림이다[13].

저온 환경에서의 버 발생 및 절삭 품질 평가를 위하여 동일한 절삭 조건 하에서 절삭유 공급 및 냉각 조건을 변화시키면서 실험을 수행하였다. 절삭 조건은 주축 회전 속도 50,000rpm, 이송량 40mm/min(날당 이송량 0.4 μ m/tooth)로 고정하였으며, 저온 공기만 분사했을 경우와 저온 공기와 절삭유를 동시에 분사하는 조건으로 실험을 수행한 후 가공 품질을 분석하였다. 마이크로 절삭 가공 형상 및 가공재료는 Fig. 4 와 같다.

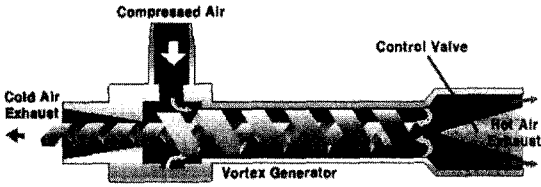


Fig. 3 Mechanism of a vortex tube[13]

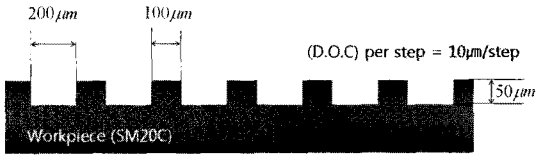


Fig. 4 Micro channel geometry and workpiece

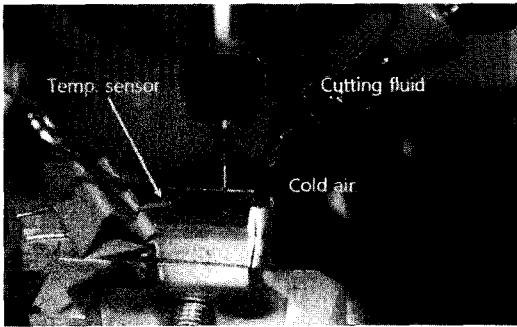


Fig. 5 Micro cutting experiment at low temperature

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 5 는 저온 환경에서의 마이크로 절삭 가공 실험 모습을 나타낸 것이다. Cold air gun 에 공급되는 공기압은 7bar 로서 장비의 사양으로는 약 영하 30℃ 의 저온 공기가 공급되어야 하나 가공 영역에 근접한 부위에 저온 공기를 공급하기 위하여 에어 호스 및 노즐을 적용함으로써 공기의 온도 저하 효율은 다소 떨어짐에 따라 노즐 입구를 기준으로 온도 측정 결과 평균 영하 16℃ 의 저온 공기가 분사됨을 확인하였다. 그러나, 노즐을 통과한 저온 공기가 상온에 노출되면서 급속하게 온도가 상승하여 저온 공기만을 분사할 경우 가공 표면에서의 측정 온도는 0℃ 수준이었으나, 절삭유를 동시에 분사할 경우 저온 공기와 더불어 저온 공기에 의해 일부 냉각된 절삭유의 영향으로 인하여 가공 표면의 온도가 평균 영하 10℃

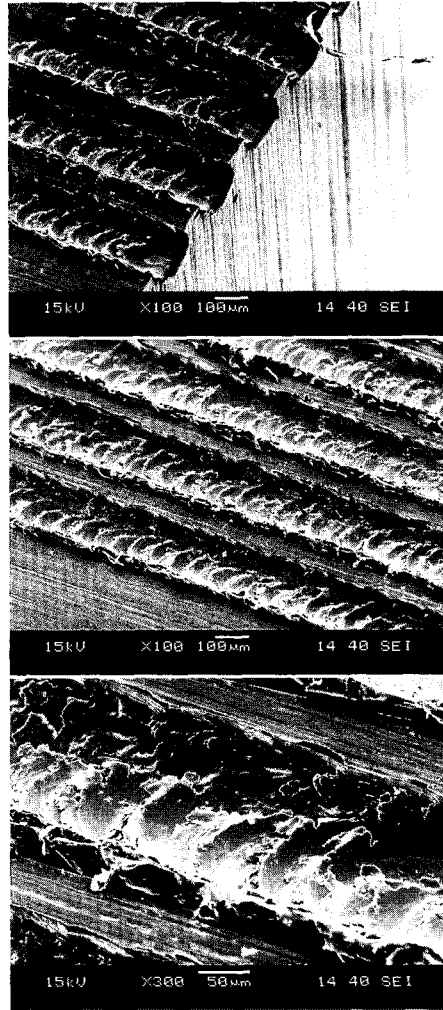


Fig. 6 SEM images of micro channel(only cold air)

수준으로 유지됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 6, 7 은 저온 공기만 분사 했을 경우와 저온 공기와 절삭유를 동시에 분사 했을 경우에 대한 가공 형상의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 그럼에서도 알 수 있듯이 절삭유와 저온 공기를 동시에 분사한 경우에 버 발생이 줄어들음을 관찰할 수 있었으며, 아울러 바닥면 가공 품질도 더욱 향상됨을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 일반적인 절삭 가공 영역에서 주로 시행되는 난삭재의 극저온 절삭 공정을 참고하여 마이크로 절삭 가공 시 가공 영역에서의

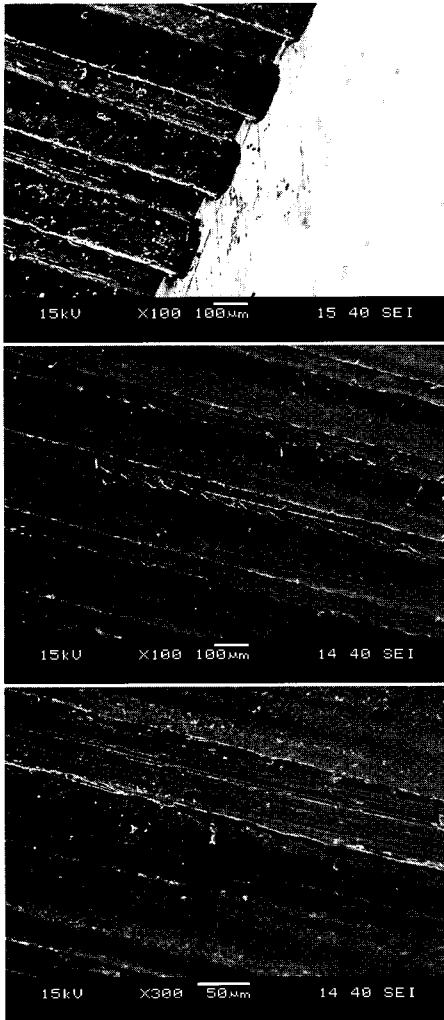


Fig. 7 SEM images of micro channel(Cold air + Cutting fluid)

절삭 온도 저하를 목적으로 저온 환경에서의 마이크로 절삭 가공에 대한 기초 연구를 수행하였다. 가공 중 저온 공기 분사를 위하여 vortex tube를 이용한 cold air gun을 적용하였으며, 절삭유와 저온 공기를 동시에 분사함으로써 평균 영하 10℃의 가공 표면 온도 저하를 실현할 수 있었다. 가공 후 SEM 이미지 촬영을 통한 마이크로 채널 형상 및 버 발생 경향을 분석한 결과 상대적으로 낮은 가공 표면 온도를 확보할 수 있었던 저온 공기와 절삭유 동시 분사의 조건에서 더욱 양호한 가공 결과 및 버 발생량 저감을 확인할 수 있었다. 이로써 마이크로 절삭 가공 시 저온 환경 적용이 가공 품질 및 버 발생량 저감에 많은 영

향이 있음을 검증할 수 있었다.

저온 환경에서의 마이크로 절삭 공정을 수행함으로써 양호한 가공 결과를 확보할 수 있으나, 매우 작은 가공 형상 크기를 고려할 경우 가공 재료의 수축 및 팽창 등의 변형으로 인한 가공 정밀도 저하 문제도 추후 적극적으로 고려되어야 할 문제 중의 하나로 판단된다. 비록 극저온 절삭 공정 보다 상대적으로 적은 변형이 발생할 것으로 예상되지만, 우수한 가공 정밀도 확보를 위해서는 반드시 고찰되어야 할 부분이다. 아울러 저온 공기의 온도 제어 및 냉각 수준 향상이 이루어질 경우 버 발생량은 더욱 줄어들 수 있을 것으로 판단됨에 따라 관련 연구도 동반 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] K. H. Hong, K. H. Kim, S. C. Yang, H. S. Kim, S. G. Lee, M. H. Kook, M. G. Bok, H. T. Kim, H. L. Yang, M. S. Kim, J. H. Won, 2007, A study on characteristics of surface roughness of oxygen-free copper by Development of micromachine, Proceedings of the Kspe Spring Conference 2007.
- [2] J. W. Jung, J. G. Kim, T. J. Ko, H. S. Kim, J. K. Park, 2004, Research on the machinability in Micro Machining, Proceedings of the Ksmte Spring Conference 2004, pp. 99~104.
- [3] G. D. Kim, B. G. Loh, 2007, Elliptical Vibration Cutting with Variable Trajectory for Ultra-precision Micro-Machining, Korean society for Precision Engineering, Vol. 24, No.11, pp. 52~58.
- [4] A. B. M. A. Asad, Takeshi Masaki, M. Rahman, H. S. Lim, Y. S. Wong, 2007, Tool-based micro-machining, Journal of Materials Processing Technology, Vol.192~193, pp. 204~211.
- [5] Eckart Uhlmann, Sascha Piltz and Kai Schauer, 2005, Micro milling of sintered tungsten-copper composite materials, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 167, pp. 402~407.
- [6] C. S. Kim, S. S. Oh, Y. H. Lim, 1994, A Study on the Cutting Characteristics of SCM440, SNCM21, STS 304 in Cryogenic Cutting, Korean society for Precision Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 44~53.
- [7] Yakup Yildiz and Muammer Nalbant, 2008, A review of cryogenic cooling in machining processes,

- International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 947~964.
- [8] Shane Y. Hong, Yucheng Ding, 2001, Cooling approaches and cutting temperatures in cryogenic machining of Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 1417~1437.
- [9] K. A. Venugopal, S. Paul, A. B. Chattopadhyay, 2007, Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling, Wear, Vol. 262, pp. 1071~1078.
- [10] J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, 2006, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 313~332.
- [11] D. Cox, G. Newby, H. W. Park, S. Y. Liang, 2004, Performance evaluation of a miniaturized machining center for precision manufacturing, Proceedings ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, pp. 13~20.
- [12] G. H. Kim, K. P. Hong, Y. M. Heo, G. S. Yoon, T. I. Seo, M. W. Cho, 2008, Development of a Micro Tool inspection and Verification System, International Conference on Mechanical & Manufacturing Engineering 2008.
- [13] O. K. Kwon, H. T. Jeong, J. H. Yun, K. Park, 2007, A Study on Rapid Mold Heating System using High-Frequency Induction Heating, Transactions of the KSME A, Vol. 31, No. 5, pp. 594~600.