

블엔드밀을 이용한 고속가공에서 가공환경 변화에 따른 열특성 평가 Evaluation of thermal characteristics by cutting environments in high speed ball end-milling

이채문*, 김석원(부산대 대학원), 이득우, 김정석(부산대 기계공학부)
C. M. Lee*, S. W. Kim, D. W. Lee, J. S. Kim

Abstract

The trend of cutting process today goes toward higher precision and higher efficiency. Many thermal/frictional troubles occur in high-speed machining of die and mold steels.

In this paper, the thermal characteristics are evaluated in high speed ball end-milling of hardened steel(HRc42). Experimental work is performed on the effect of cutting environments on tool life and cutting temperature. Cutting environments involve dry, wet(20bar), compressed chilly air at -9°C , compressed chilly air at -35°C . The measuring technique of cutting temperature using implanted thermocouple is used. The cutting temperature is about 790°C , 350°C and 540°C in dry, wet and compressed chilly air at -9°C , respectively. The tool life for compressed chilly air at -9°C is longer than all other cutting environments in experiment.

1. 서론

최근 절삭가공은 주축의 고속화와 공구재료의 개발, 코팅기술의 발전 등으로 인해 절삭속도

의 고속화가 가능하게 되었으며, 난삭재의 가공이나 초고속, 초정밀 가공과 같은 특수한 가공기술도 개발되고 있다. 그러나 절삭속도가 증가할수록 공구의 수명은 상대적으로 감소하며 특히 고속가공에서는 공구 수명의 지배적인 요인이 되는 절삭온도가 증가하여 공구수명을 급격하게 감소시킨다.(1) 절삭온도 상승은 공구의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 피삭재의 표면에 가공변질층이나 잔류응력과 같은 결함을 발생시켜 제품의 품질을 격하시키므로 고속가공을 실현하기 위해서 꼭 해결되어야 할 문제중의 하나로 여겨진다.

일반적으로 선삭의 경우는 절삭온도에 대한 많은 연구가 진행되었으나 엔드밀 가공은 특성상 절삭온도의 측정에 많은 어려움이 있으므로 이론적 해석과 실험적 방법이 병행되어 연구가 진행되고 있다.(2,3,4) 엔드밀링과 같은 단속절삭에서의 열적 조건은 선삭과 같은 연속절삭과는 다른 것으로 알려져 있다. 단속절삭에서 공구는 피삭재 절삭시 가열과 냉각을 되풀이하며 연속절삭과는 다른 열적 피로 메카니즘으로 파단 될 것이다. 최근에는 단속절삭과 연속절삭에서의 온도차이가 고속가공에서 더 크다고 알려지고 있다.(5) 단속절삭에서의 이와 같은 특성은 아직 물리적인 충분한 설명이 부족한 상태다. 연속절삭과는 대조적으로 단속절삭에서의 이론적인 온도측정은 별로 발표되지 않았으며 아직 온도 발생 메카니

즘이 또한 해명되지 않아 단속절삭에서의 온도관련 연구의 필요성이 제기되고 있다.

일반적인 절삭가공에서는 윤활과 냉각을 목적으로 절삭유를 사용하고 있다. 절삭속도가 낮은 영역에서는 윤활을 주목적으로 공급하며, 절삭속도가 증가할수록 절삭력은 감소하고 절삭온도가 증가하므로 윤활보다는 냉각에 더 큰 목적을 가지고 절삭유를 공급한다.(6) 그러나 절삭유의 사용은 환경오염을 초래하며 강화된 법적 규제에 의한 관리비용이 문제시되고 있다. 이와 같은 절삭유의 문제점을 해결하고 가공성을 더욱 향상시키기 위해 여러 연구가 진행되었다.(7)

따라서 본 논문에서는 엔드밀 가공에서 압축냉각공기와 같은 가공환경 변화가 절삭온도와 공구마멸등에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 가공환경 변화에 따른 공구마멸 특성

2.1 실험 방법 및 조건

Table 1은 본 실험에 사용된 절삭조건을 나타낸 것이다. 공구는 TiAlN코팅이 된 초경공구를 사용하였으며 절삭깊이는 반경방향으로 0.5mm, 날당 이송은 0.1mm/tooth로 고정시켰고 피크피드는 경사면상에서 2mm로서 황삭 조건에서 실험을 수행하였다. 배출된 칩의 영향을 최소화하기 위해 시편을 45° 경사를 주어 설치하였다. 공구의 경로는 수평상방향에서 하향절삭이 되도록 설정하였다. 가공환경은 건식, 습식, -9℃와 -35℃ 압축냉각공기로 설정하여 각 가공환경에 따른 공구마멸 실험을 수행하였다. 특히 압축냉각공기의 경우 냉각온도가 다른 압축공기를 공급하여 압축공기의 온도변화가 공구마멸에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 압축냉각공기는 절삭점에서 약 1cm 떨어진 지점에서 공구 진행방향에서 공구를 향해 분사하였으며 분사압력은 약 7.5kg/cm²였다. 습식의 경우 분사압력은 약 20bar였다.

Table 1. Experimental Conditions

Machining Parameters	
Workpiece	45° inclined plane
	STD11(HRc 42)
Cutting Tool	Carbide end mill (TiAlN Coated, 8φ, 2 flutes)
Operation	Down milling
Cutter Orientation	Horizontal upward
Cutting Speed	210m/min
Rotational speed (RPM)	8694(Horizontal upward)
Feed rate	0.1mm/tooth
Depth of cut	0.5mm(Axial)
	2mm(Radial)
Cutting Environment	Dry, Wet, Compressed Chilly Air (-9℃, -35℃)

Fig. 1은 본 실험에 사용된 압축냉각공기 시스템을 나타낸 것이다.

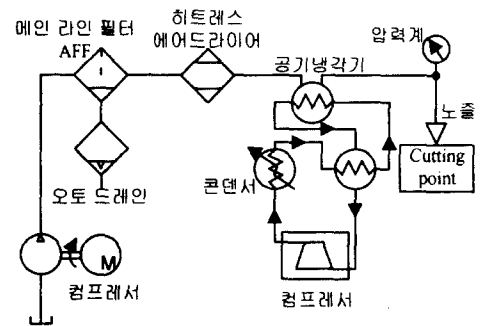


Fig. 1 Schematic illustration of the compressed chilly air system

공기중의 수분은 압축공기의 냉각에 악영향을 미치며 공기가 이동하는 관내에서 얼어 냉각효율을 저하시키므로 메인 라인 필터와 히트레스

에어 드라이어를 이용하여 충분히 건조시킨다. 냉각기를 통과한 압축냉각공기는 노즐을 통과하여 절삭점에 분사되며 노즐 통과시 단열팽창에 의해 온도가 감소된다. 압축냉각공기의 냉각온도를 충분히 유지하기 위하여 공기가 이동하는 관은 최대한 단열재를 이용하여 단열하였다.

공구마멸은 CCD카메라(x50)를 이용하여 측정하였으며 플랭크마멸이 0.3mm일 때를 공구수명한계로 설정하였다.

2.2 실험 결과

Fig. 2는 가공환경변화에 따른 공구마멸 실험 결과를 나타낸 것이다.

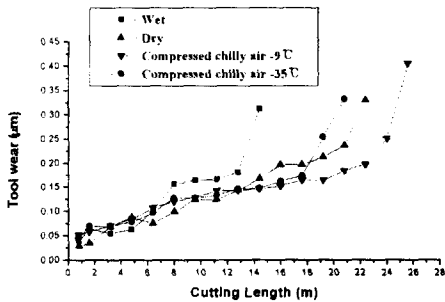


Fig. 2 Cutting length against cutting environments

볼엔드밀 가공은 절삭시의 가열과 비절삭시의 냉각을 주기적으로 반복하는 단속절삭의 형태를 취하게 되는데, 습식의 경우 절삭유의 냉각작용으로 인해 공구는 심한 열적 피로를 받게되므로 공구수명이 건식에 비해 감소함을 알 수 있다. -9 °C의 압축냉각공기 경우 절삭거리가 약 25m에 도달하였을 때 공구수명한계에 도달하였다. 압축냉각공기의 경우 고압의 공기로 인해 칩배출이 원활하게 이루어지고 유체인 절삭유에 비해서 기체인 압축냉각공기는 열전도성이 떨어지므로 절삭시 발생하는 절삭열을 냉각시키는 정도

가 습식에 비해 상당히 약하므로 습식과 비교하여 공구에 전달되는 열적 충격은 감소하여 결과적으로 공구수명을 증가시킨다.

Fig. 3은 가공환경에 따른 공구수명한계에 도달하였을 때의 공구마멸형태를 나타낸 그림이다.

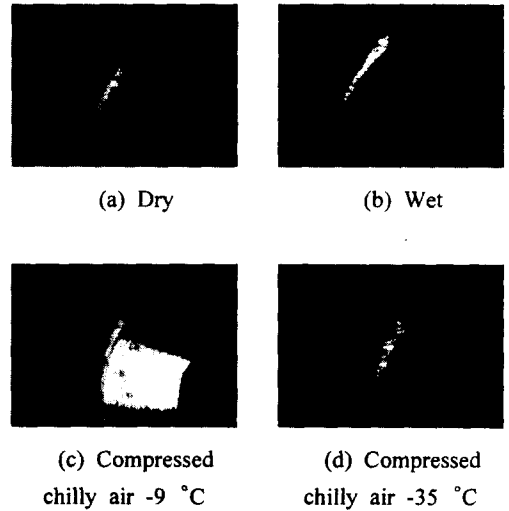


Fig. 3 Wear patterns against cutting environments

Fig. 3 (a)는 가공환경이 건식인 경우의 공구마멸을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 건식과 압축냉각공기의 경우 마멸의 형태가 마찰로 인한 정상적인 마멸이 되었음을 볼 수 있다. 습식의 경우는 절삭유의 냉각작용에 의해 공구가 열적 충격을 받아 치핑과 같은 이상마멸이 발생하였다. 압축냉각공기의 경우에도 정상적인 마멸이 발생함을 볼 수 있다.

3. 가공환경 변화에 따른 절삭온도 측정

3.1. 실험 방법

가공환경변화가 절삭온도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 마멸실험과 동일한 절삭조건으

로 실험을 수행하였다. 시편은 STD11으로 경도가 HRC42인 것을 사용하였다. 공구는 TiAlN 코팅이 된 초경공구를 사용하였다. 본 실험에 사용된 열전대는 측정 온도범위가 $-200^{\circ}\text{C} \sim 1250^{\circ}\text{C}$ 인 K-type으로 직경이 0.0762mm이다. 열전대의 접점길이는 정확한 절삭온도를 측정하기 위하여 1mm정도로 갱납했었다. 열전대가 삽입된 구멍의 영향을 최소화하기 위해서 피삭재에 구멍의 지름을 0.5mm로 뚫었으며 구멍사이의 간격을 4mm 하였다. 열전대의 끝이 시편위로 약 0.3mm정도 나오도록 열전대를 설치하고 열전대 전용 시멘트를 이용하여 열전대와 공작물을 완전히 절연되도록 고정하였다. 따라서 가공실험에서 절입깊이를 0.5mm로 설정하여 가공을 수행하여 가공 후 열전대의 남은 접점의 크기가 0.2mm정도가 되도록 하였다. 측정점이 볼엔드밀의 절삭부위 중앙에 위치하도록 설정하였으며 피삭재를 45° 기울여 칩의 배출을 원활히 하여 칩으로 인한 잘못된 온도 측정을 방지하였다. Fig. 4는 실험장치를 간략히 나타낸 것이다. 열전대가 공구에 의해 절삭될 때 공구의 기전력이 절삭시 발생한 절삭온도와 같이 열전대에 전달되고 열전대와 공구의 접촉이 끊어질 때 절삭온도만이 측정되는 원리를 이용하였다.

Fig. 5는 본 논문에 사용된 열전대 절삭법을 이용하여 가공환경이 습식일 때 절삭온도를 측정 한 것이다. 공구가 열전대를 절삭하는 순간에 절삭부위의 온도와 열전대와 공구의 접촉으로 인한 공구의 기전력이 동시에 측정되어 기전력이 크게 증가함을 볼 수 있다. 공구와 열전대의 접촉은 급속접촉으로서 아주 짧은 시간에 기전력이 증가하였다가 접촉이 끊어지는 순간 공구의 기전력은 사라지고 절삭부위의 온도가 측정됨을 확인할 수 있다. 공구의 한 날 당 이송이 0.1m/tooth, 절입깊이가 0.5mm, 공구의 반경이 4mm, 구멍의 직경이 0.5mm이므로 공구와 열전대가 접촉하는 거리는 약 1.937mm이며 접촉하는 시간은 약 66.8ms정도

이다. 이 시간 동안 공구는 약 10회전을 하며 전체 구멍을 통과하는 시간동안 약 20회 공구와 열전대의 접촉이 발생하게 된다. 따라서 열전대와 공구가 접촉하는 주기는 약 3.45msec가 된다.

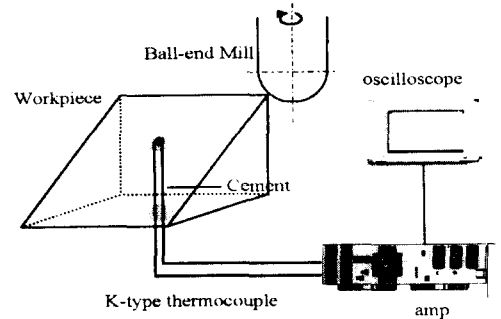


Fig. 4 Experimental set-up of measuring cutting temperature.

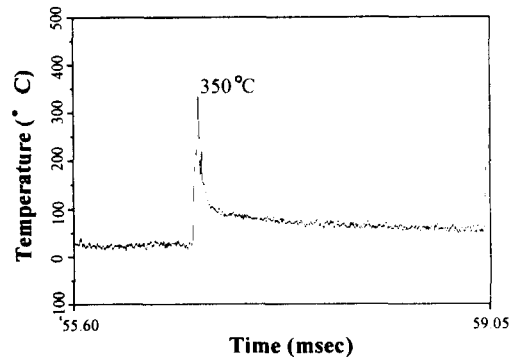


Fig. 5 Signal of thermocouple at separating from cutting tool

3.2 열전대를 이용한 절삭온도 측정결과

Fig. 6은 열전대 절삭법을 이용하여 가공환경에 따른 절삭온도를 측정 한 결과이다. 습식의 경우는 건식에 비해 비교적 낮은 절삭온도를 나타내고 있으며 이로 인해 공구는 열적 충격으로 인한 공구수명 감소가 발생한다. 압축냉각공구의 경우 유체인 절삭유에 비해 열전도성이 떨어지므

로 절삭열을 냉각시키는 정도가 작으며 따라서 절삭온도 또한 습식에 비해 높게 나타났다. 압축 냉각공기는 원활한 칩 배출과 냉각으로 공구수명을 증가시키는 요인이 되었다.

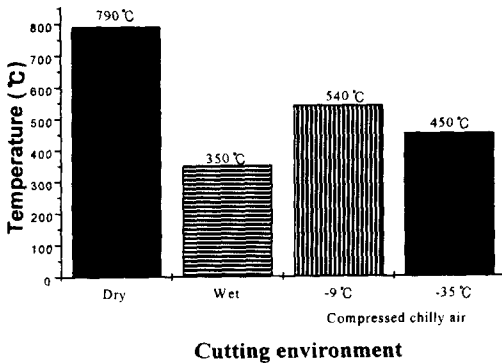


Fig. 6 Cutting temperature against cutting environments

4. 결론

본 실험에서는 볼엔드밀을 이용하여 절삭속도 210m/min에서 가공환경의 변화에 따라 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경도가 HRC42인 STD11를 가공환경변화에 따라 공구수명을 실험한 결과 -9°C의 압축냉각공기에 의한 경우가 건식보다는 약 4m, 절삭유제를 사용한 경우보다는 약 11m 정도로 절삭거리가 증가하였다.
2. 가공환경변화에 따른 절삭온도 측정결과 습식의 경우가 -9°C의 압축냉각공기보다 약 440°C 정도 낮게 측정되었다.
3. 볼엔드밀링의 절삭온도 측정에는 많은 어려움이 있으며 본 실험에서 이를 해결하기 위하여 열전대를 직접 절삭하는 방법을 제시하였으며 측정결과 비교적 정확한 절삭온도를 구할 수 있다.

후기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] F. F. LING and Edward Saibel, "On the tool-life and temperature relationship in metal cutting", Transactions of the ASME, pp. 1113-1117, 1956
- [2] David Wei Yen, Paul K. Wright, "A remote temperature sensing technique for estimating the cutting interface temperature distribution", Journal of Engineering for industry, vol. 108, pp. 252-263, 1986
- [3] Jehnming Lin, Shinn-Liang Lee, Chen-I Weng, "Estimation of cutting temperature in high speed machining", Journal of engineering Materials and Technology, vol. 114, pp. 289-296, 1992
- [4] P. Lezanski, M. C. Shaw, "Tool face temperatures in high speed milling", Journal of Engineering for Industry, vol. 112, pp. 132-135, 1990
- [5] D. A. Stephenson, A. Ali, "Tool temperatures in interrupted metal cutting", Journal of Engineering for Industry, vol. 114, pp. 127-136, 1992
- [6] Robert I. King, "Handbook of high-speed machining technology"
- [7] R. Kovacevic, C. Cherukuthota and M. Mazurkiewicz, "High pressure waterjet cooling /lubrication to improve machining efficiency in milling", Int. J. Mach. Tools. Manufact, vol. 35, No. 10, pp. 1459-1473, 1995