

금형강의 고속가공시 절삭력 및 표면조도의 특성 (Characteristics of Cutting Force and Surface Roughness in the High-Speed Machining of Die Material)

손창수(부산대 원), 강명창(부산대 기계기술연구소),
이용철(연암공전 금형설계과), 이득우, 김정석(부산대 NSDM 연구센터)

Abstract

The high-speed machining is one of the most effective technology to improve productivity. Because of the high speed and high feedrate, high-speed machining can give great advantages for the machining of dies and moulds.

In this paper, high-speed milling for HP-4 die material was carried out with coated tungsten carbide ball endmill. In the high-speed machining, the cutting force and surface roughness of workpiece show very various characteristics at different cutting conditions. Especially surface roughness of workpiece depends largely on pick feed and feed per revolution of ball endmill. In the condition that pick feed and feed per revolution are equal, better surface roughness is measured. By obtaining good surface roughness at high speed, efficiency of machining can be increased

Key Words : High Speed Machining(고속가공), Die Material(금형강), Ball Endmill(볼엔드밀),
Cutting Force(절삭력), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서 론

최근 공작기계와 공구의 급격한 발전에 의해 고속 가공(High-Speed Machining)에 의한 가공성 향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 범용절삭에 의해서는 절삭조건에 대한 제한에 따라 수요에 대한 공급이 제대로 이루어지지 않아 생산성 향상이 절실히 요구되어 지고 있는 실정이다. 특히 금형 가공은 생산성 향상을 위해 CAD/CAM등 컴퓨터를 이용한 가공 자동화에 주력하고 있다. 한편 최근 도입된 "고속 절삭", "고정도 고품위가공(FF가공)", "fp 가공" 등에 의해 가공시간의 단축과 가공능률의 향상, 그리고 고품위의 가공면을 얻을 수 있다.⁽¹⁾

고속 가공에서는 스피indle 모터의 회전수를 증가시킴으로써 높은 절삭속도를 얻을 수 있고 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도보다 훨씬 높은 이송속도를 얻을 수 있다. 따라서 이런 높은 이송속도에 의한 가공시간의 대폭적인 감소가 고속가공의 큰 잇점이 된다. 하지만 고속가공에 있어 공작기계의 강성과 구조, 공구의 형상, 가공기술, 가공조건 등에 의해 고속가공은 많은 영향을 받게 되며⁽²⁾ 특히 볼

엔드밀을 이용한 금형제작시 공구의 1회전당 이송량(fr)과 피크피드량(Pf)의 설정에 의해 표면조도의 형상이 크게 달라진다.⁽³⁾

한편 고속가공시 공구의 수명이나 공작물의 절삭성능은 공구와 공작물간의 재질에 의해 결정되는데 실제 금형제작시 쓰이는 금형재료중 프리하드강은 SKD계열강에 비해 가공시 난삭성을 보이는 주된 성분인 크롬(Cr)의 함유비가 작기 때문에 절삭성이 좋으며 경도가 큰 특성을 보이고 있다.⁽⁴⁾

이에 본 연구에서는 금형의 자유곡면가공에 많이 쓰이는 볼엔드밀을 사용하여 최근 금형제작시 산업 현장에서 금형재료로서 많이 쓰이고 있는 HP금형강을 평면절삭할 때 범용 절삭과 고속 절삭에서의 절삭조건에 따른 표면거칠기와 절삭력을 비교 검토하면서 고속절삭에 의한 가공능률의 향상을 살펴보았다.

2. 실험방법 및 조건

2.1 실험 장치

본 실험을 위한 장치도를 Photo. 1에 나타내었다.

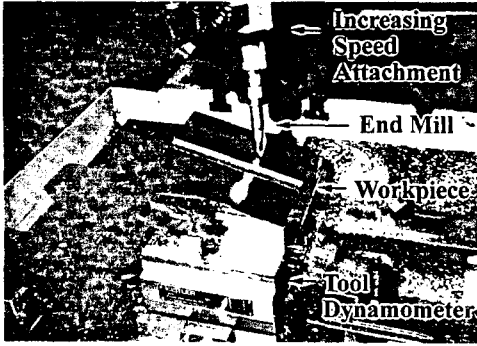


Photo. 1 Experimental Setup

고속의 절삭속도를 얻기 위해 최고 스피indle 회전수가 4000rpm인 범용 머시닝센터(WHA CHEON VMC-430)에서 5배까지 속도를 증가시킬 수 있는 주축 증속기(NIKKEN NXG7)를 이용하여 실험을 행하였다. 머시닝센터의 테이블 위에 공구동력계(kistler 9257 B)를 장착하여 금형강(HP -4)을 가공하여 나온 절삭력신호를 증폭기와 A/D변환기를 거쳐 PC를 통해 획득하였다.

2.2 가공방법

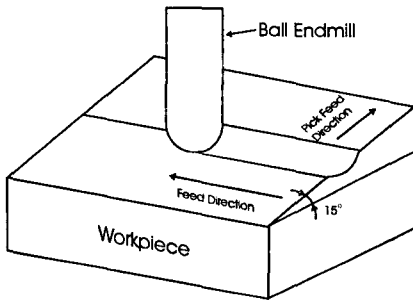


Fig. 1 Cutting Method for Ball Endmill Machining

Fig. 1은 볼엔드밀을 이용한 고속가공시 공구와 공작물사이의 위치를 나타낸 것으로 볼엔드밀의 기하학적 형상의 특성으로 인해 공구의 절삭날의 중심에서의 절삭속도는 0이 되어 실제 절삭이 이루어지지 않게 된다. 그리고 가공시 배출된 칩에 의한 재절삭이 이루어지지 않게 하기 위해 공구와 공작물간에 경사각을 주어 칩의 유효 배출공간(Effective Chip Space)을 넓게 하는 것이 필요하게 된다. 또한 볼엔드밀의 절삭날에 걸리는 부하는 절삭에 참여하는 절삭날의 위치에 따른 절삭속도의 분포와 평균 절삭폭(Mean Thickness of Cut)에 의해 결정되는데

경사각이 커질수록 칩의 단면적이 커지고 이에 의해 공구와 공작물간에 마찰이 심해져 공구날에 열응력을 증가시킨다. 따라서 한계치 이상의 경사각에서는 공구날에 걸리는 부하가 커지며 이로 인해 공구수명에도 악영향을 미치므로 경사각을 10~20°로 설정함으로서 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.⁽⁵⁾ 이에 본 연구에서는 경사각을 15°로 설정하여 실험을 실시하였다.

2.3 실험조건 및 방법

본 연구에서의 실험조건은 Table 1과 같다

Table 1 Experimental Condition

Tool	Coated WC Ball End Mill, $\phi = 10 \text{ mm}, z = 2$
Workpiece	HP 4
Spindle Revolution (rpm)	2600, 5200, 7800, 10400
Cutting Speed, V (m/min)	85, 63, 42, 21
Feed (mm/min)	260~3120
Feed per Revolution, fr (mm/rev)	0.1 0.12, 0.15, 0.2, 0.245 0.3
Pick Feed, Pf (mm)	0.2, 0.245, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
Axial Depth of Cut (mm)	0.3
Increasing Speed Attachment	Speed rate (1 : 5) Max Spindle Speed (20000rpm) Max Tool Dia. (10 ϕ)

본 연구에서는 주축 증속기를 이용하여 최고 20000 rpm의 회전수를 얻을 수 있으나 실험에 사용된 범용 머시닝 센터의 안정성을 고려하여 회전수 10400 rpm까지 절삭속도를 증가시키며 실험을 실시하였다. 그리고 공구마멸이 일정할 때 주어진 절삭속도에서 가공시간을 일정하게 하기 위해 가공시간을 결정하는 주요인인 1회전당 이송량과 피크피드량의 값을 일정하게 한 후 가공시간이 일정한 범위에서 피크피드량과 1회전당 이송량을 동시에 변화시키면서 4가지 절삭속도에 대한 공작물의 표면거칠기의 특성을 살펴보았다. 또한 모든 조건을 동시에 하향 절삭(Down Cut) 실험한 후 공작물을 머시닝 센터에서 분리하고 표면조도기(Mistubishi Sufitest 401)를 이용하여 중심선 평균 거칠기 방법(Ra)으로 이송방

향과 피크피드방향의 표면거칠기를 측정하여 고속절삭시 각 조건에 따른 공작물의 표면거칠기의 특성을 살펴보았다.

본 실험에 공작물로 사용된 HP금형강의 성분조성과 경도를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Composition of Workpiece

C	Si	Mn	Cr	Mo	Alloys	Hs
0.38 ~ 0.44	0.2 ~ 0.4	0.9 ~ 1.1	0.9 ~ 1.1	0.2 ~ 0.3	Contain	39~45

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도에 따른 절삭력 및 표면거칠기의 특성

A/D변환기를 통해 획득한 세분력 방향의 절삭력 신호형태는 Fig. 2와 같다

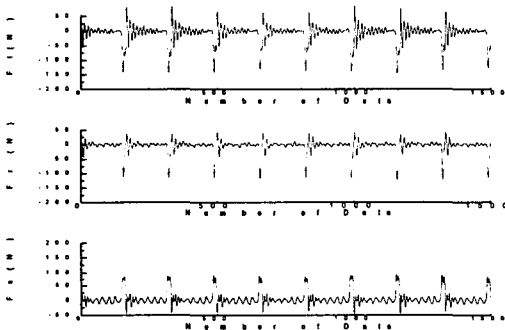


Fig. 2 Variation of cutting force ($V=42\text{m/min}$, $Pf=0.245\text{mm}$, $fr=0.245\text{mm/rev}$)

볼랜드밀 가공시 나타나는 절삭력은 Fig. 2의 절삭조건에 있어서 접선방향분력(F_t)은 140N, 반경방향분력(F_r)은 115N, 그리고 축방향분력(F_a)은 90N으로 세분력 중 접선방향분력이 가장 큰값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 접선방향분력이 실제 절삭에서의 주분력에 해당하며 볼랜드밀의 회전운동에 대하여 이송방향 저항이 가장 크기 때문이다.

절삭속도의 증가에 따른 절삭력의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 공구의 날당 이송량을 일정하게 설정하여 절삭속도의 증가와 함께 이송속도도 증가시켜 볼랜드밀의 절삭폭은 항상 일정하게 하였다. 그 결과 절삭력은 절삭속도가 증가하여도 일정해야 하지만 실제로 절삭속도에 따른 절삭력을 관찰해 본 결과, 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 다소 커지는 경향을 보이고 있다.

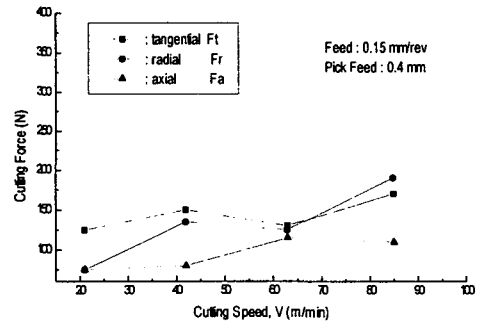


Fig. 3 Characteristics of cutting force according to cutting speed

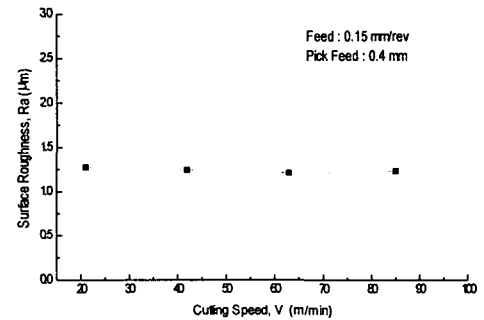


Fig. 4 Characteristics of surface roughness according to cutting speed

Fig. 4는 절삭속도와 표면거칠기와의 관계를 나타낸 것으로 주어진 절삭조건에서 절삭속도가 증가하여도 표면거칠기는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이것은 Fig. 5에서 나타나듯이 피크피드량이 0.4mm 이하의 조건에서 표면거칠기는 절삭속도에 영향을 받지 않는다는 것을 말하며, 0.4mm이상의 피크피드에서는 과도한 피크피드량으로 인해 표면거칠기의 값이 절삭속도에 많은 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 그러므로 피크피드가 0.4mm이하의 절삭조건에서 피크피드량과 날당 이송량이 같을 때는 절삭속도가 증가하여도 공구의 날당 이송량과 피크피드량이 같기 때문에 공작물 표면의 커스프(Cusp)의 간격과 높이가 일정하게 된다. 따라서 표면거칠기는 거의 같은 경향을 보이며 절삭속도의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

3.2 피크피드량과 1회전당 이송량의 변화에 따른 절삭력 및 표면거칠기의 특성

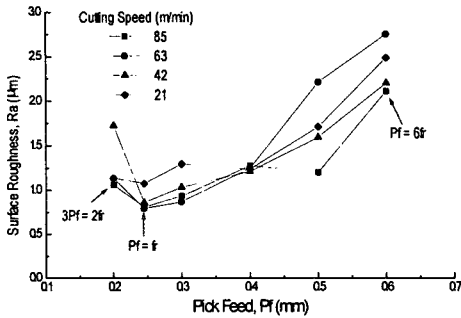


Fig. 5 Characteristics of surface roughness according to pick feed

Fig. 5은 동일한 절삭속도에 대하여 가공시간이 일정할 때의 피크피드량의 변화에 따른 피크피드방향의 표면거칠기의 값을 나타낸 것으로 피크피드량이 감소할수록 표면거칠기의 값이 점차 작아진다. 1회전당 이송량이 피크피드량보다 커지게 되면 표면거칠기는 다시 거칠어 짐을 알 수 있다. 이는 피크피드 방향의 표면거칠기는 피크피드량의 영향뿐만 아니라 1회전당의 이송량의 영향도 받는다는 것을 의미하는 것으로 적절한 표면거칠기를 얻기 위한 가공조건을 제시하고 있다. 즉 피크피드량과 1회전당 이송량이 같을 때 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수가 있음을 잘 알 수 있다.

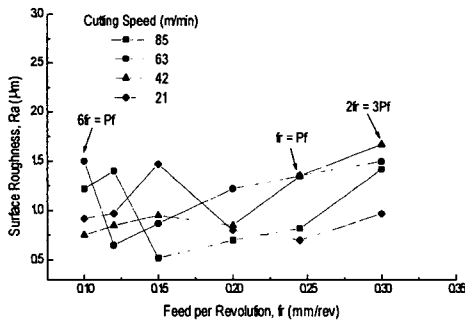


Fig. 6 Characteristics of surface roughness according to feed per revolution

[회전당 이송량이 변할 때의 공구 이송방향의 표

면거칠기의 값을 Fig. 6에 나타내었다. 본 실험의 조건에서는 주어진 절삭속도에 대해 가공시간을 일정하게 하기 위해 1회전당 이송량을 작게 하는 만큼 피크피드량을 증가시켰는데 Fig. 5에서 살펴본 바와 같이 1회전당 이송량과 피크피드량이 같아질 때 가장 양호한 표면거칠기값을 보여야 하지만 실제 실험에서는 절삭속도에 따라 차이를 보이고 있다. 이는 이송방향의 표면거칠기도 1회전당 이송량과 함께 피크피드량에 의해 영향을 받게 되는데 1회전당 이송량보다 오히려 피크피드량에 영향을 많이 받게 되어 이송방향의 표면거칠기 값의 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 생각된다.

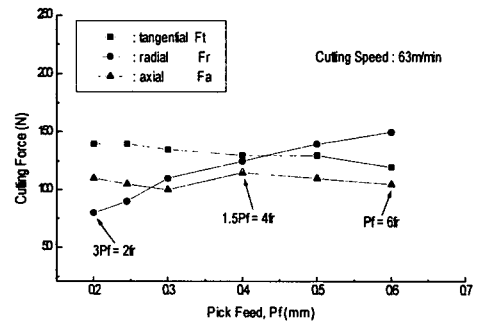


Fig. 7 Characteristics of cutting force according to pick feed

Fig. 7은 공구의 1회전당 이송량과 피크피드의 변화에 따른 절삭력의 변화를 나타낸 것으로 공구의 1회전당 이송량이 감소할수록 공구의 접선방향 분력은 서서히 작아지지만 반경방향분력은 급격한 증가를 보이고 있다. 이를 통해서도 본 조건의 절삭은 피크피드량에 의해 많은 영향을 받으며 피크피드량이 증가할수록 적절한 절삭조건이 아님을 알 수 있다.

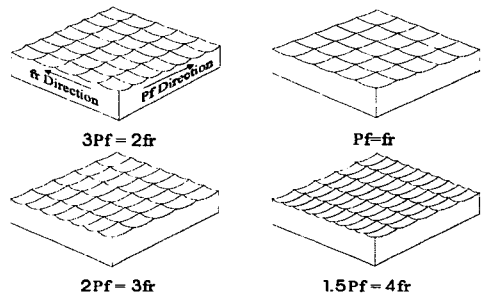
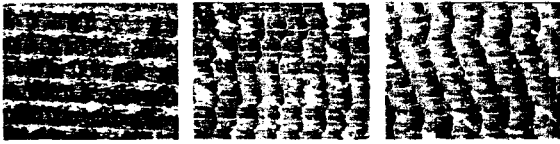


Fig. 8 Patterns of machined surface

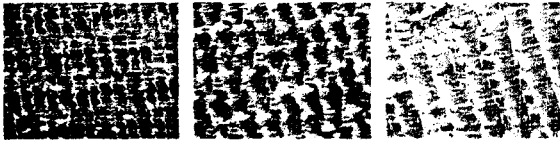
Fig. 8은 1회전당 이송량과 피크피드량의 변화에 의한 표면 커스프의 현상변화를 나타낸 것으로 1회전당 이송량과 피크피드량이 같을 때에 표면의 커스프가 균일한 형상을 보이게 되어 표면거칠기가 가장 양호한 값을 가지게 된다.

Photo. 2에 실제 실험 후 표면의 형상을 금속 현미경(SZH10 OLYMPUS)으로 사진촬영한 것으로 스피ndl의 회전수에 관계없이 1회전당 이송량과 피크피드량이 같을 때에는 정사각형의 균일한 표면형상을 관찰할 수 있다.



Pf(0.4mm) > fr(0.15mm) Pf(0.245mm) = fr(0.245mm) Pf(0.2mm) < fr(0.3mm)

(a) In constant 10400rpm



Pf(0.4mm) > fr(0.15mm) Pf(0.245mm) = fr(0.245mm) Pf(0.2mm) < fr(0.3mm)

(b) In constant 5200rpm

Photo. 2 Workpiece surface representing the relationship between feed per revolution and pick feed with any constant spindle revolution after machining

3.3 절삭조건과 가공능률과의 관계

앞 절에서 살펴본 바와 같이 피크피드량이 0.4mm 이하의 절삭조건에서는 표면거칠기는 절삭속도와 관계없이 거의 일정하다. 이를 통해서 고속의 절삭속도에서도 1회전당 이송량과 피크피드량을 같게 함으로 일반 절삭조건과 거의 동일한 표면거칠기를 얻을 수 있다.

그러므로 고속절삭을 통한 가공능률의 증대를 기대할 수 있게 된다.

Fig. 9에서는 절삭속도에 따른 칩제거율(MRR)과 표면거칠기의 관계를 나타내고 있는데 절삭속도가 증가할수록 칩제거율은 선형적으로 증가하는 반면 표면거칠기는 거의 일정한 값을 보이고 있다. 따라서 고속절삭을 함으로서 칩제거율을 증가시키고 동시에 원하는 표면거칠기를 얻음으로서 절삭공정의 가공능률을 향상시킬 수 있게 된다.

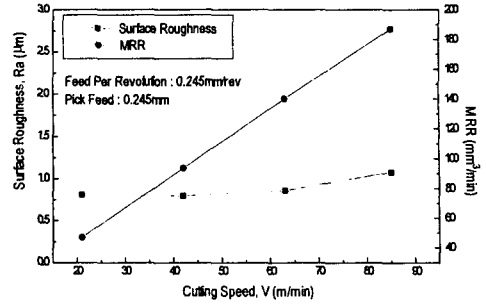


Fig. 9 Relationship between surface roughness and material removal rate according to cutting speed

4. 결론

HP 금형강을 볼랜드밀로 가공시 일반 절삭과 고속 절삭을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 표면거칠기는 회전당 이송량과 피크피드량의 변화에 따라 영향을 많이 받으며 회전당 이송량과 피크피드의 양이 같을 때 가장 양호한 경향을 보인다.
- 2) 고속절삭시 표면거칠기의 값은 공구 날 당이송량과 피크피드량이 같을 때 절삭속도의 영향이 작으며 이를 이용하여 가공능률의 향상을 가져올 수 있다.
- 3) 공구의 날당 이송량이 같을 때 절삭력은 고속절삭이 됨에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

1. 中村 誠, 箕澤武夫, "FF加工機SF64による金型の高効率加工" Vol.9, No.7, pp74~75, 1994
2. H. Schultz "High-Speed Machining" Annals of the CIRP Vol.41, No.2, pp637~643, 1992
3. 内勝國雄, "金型の高品位・高効率仕上切削法の開発", JSPE Vol.59, No.4, pp117~122, 1993
4. 田部博輔, "金型用鋼材の技術動向" 型技術, Vol. 11, No.7, pp17~22, 1996
5. H. Schultz "High-Speed Milling of Dies and Moulds Cutting Conditions and Technology" Annals of the CIRP Vol.44 No.1, pp35~38, 1995