

주축증속기를 이용한 금형강의 고속절삭에 관한 연구

이용철*, 강명창**, 이득우***, 김정석***

A Study on the High-Speed Machining of Die/Mold Material Using a Spindle-Speeder

Yong-Chul Lee*, Myeong-Chang Kang**, Deug-Woo Lee***, Jung-Suk Kim***

ABSTRACT

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

In this paper, high-speed machining for HP-4 die material was carried out with a coated tungsten carbide ball endmill. In the high-speed machining, the cutting force and surface roughness of workpiece show various characteristics in different cutting conditions. Especially, the surface roughness of the workpiece depends largely on pick feed and feed-per-revolution of the ball endmill.

In the condition where 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 산업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계 구성 부품의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여 주고, 생산성의 개선은 가공경비를 줄임으로 경쟁력을 강화시킨다. 그러나 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건의 제한으로 이러한

요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 특히 금형제품은 단품 및 주문생산에 의존하고 있어, 제품의 정밀도 향상, 납기단축 그리고 제조경비절감(Cost down)을 가져올 수 있는 제작방식을 채택하지 않으면 경쟁력을 잃고만다. 최근 여러 공업선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 고속절삭^{(1)~(3)}은 이러한 문제점을 해결할 뿐만아니라 지금까지 절삭가공으로 불가능했던 고정도강재 등의 난삭재도 절삭가공⁽⁴⁾이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다.

* 연암공업대학 정밀기계과
** 부산대학교 기계연구소
*** 부산대학교 ERC/NSDM

고속 가공에서는 주축의 회전수를 증가시킴으로써 높은 절삭속도를 얻을 수 있고, 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도보다 훨씬 빠른 이송속도로 절삭이 가능하다. 이런 빠른 이송속도에 의한 가공시간의 대폭적인 감소가 고속가공의 큰 잇점이다. 그러나 고속가공에 있어 공작기계의 강성과 구조, 공구의 형상, 가공기술, 가공조건 등에 의해 고속가공은 많은 영향을 받게 되며,⁽⁶⁾ 특히 볼엔드밀을 이용한 금형가공시 공구의 1회전당 이송량(이하 f_r 로 표기)과 피크피드량(이하 P_f 로 표기)의 설정에 의해 표면조도의 형상이 크게 달라진다.^(6,7)

이에 본 연구에서는 금형의 자유곡면가공에 주로 사용되는 볼엔드밀을 가지고, 최근 금형강재로 많이 쓰이는 프리하든강⁽⁸⁾의 한 종류인 HP-4강재를 평면절삭할 때, 공구제작사에서 추천하는 절삭속도 21m/min(주축회전수 2,600rpm)을 일반절삭으로 잡고, 이 보다 큰 절삭속도 즉 42m/min.(5,200rpm), 63m/min(7,800rpm), 85m/min(10,400rpm)로 증속하여 절삭한 것들을 고속절삭으로 잡아서 가공실험하였다. 이 때의 일반절삭과 고속절삭에서의 절삭조건에 따른 표면거칠기와 절삭력을 비교 검토하면서 고속절삭에 의한 가공능률 즉 절삭가공에서의 단위시간당 칩제거율의 향상을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

국내 금형업체가 대부분 중소기업형태로 운영되고 있어, 고가인 고속가공기의 구입은 거의 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 별도의 고속가공기를 구입하지 않고, 일반 NC밀링이나 머시닝센터에 손쉽게 장착하여 고속가공을 실행할 수 있는 아주 저렴한 시판의 주축증속기(Spindle Speeder, NXG7, NIKKEN)를 구입하여 실험하였다. 주축증속기의 원리는 기어 치차열을 이용하여 주축회전수를 5배까지 증속할 수 있는 장치로, 일반 공구 호울더와 같이 공작기계의 주축에 쉽게 장착, 사용한다. 본 실험에 사용된 머시닝센터(VMC430, 화천기계(주))는 최고주축회전수가 4,000rpm이므로 20,000rpm까지의 증속이 가능하다.

수직머시닝센터의 테이블 위에 공구동력계(9257 B, Kistler)를 장착하여 시편을 가공하고, 이 때 나온 절삭력신호를 증폭기와 A/D변환기를 거쳐 PC를 통해 획득하였다.

수직머시닝센터에서 볼엔드밀을 가지고 공구와 공작물 가공면 사이의 경사각이 0인 수평면을 가공하면, 볼엔드

밀의 기하학적인 형상 특성으로 인해, 공구날의 중심끝단에서의 절삭속도는 0이 되어, 정상적인 절삭이 이루어지지 않게 된다. 그리고 가공시 배출된 칩에 의한 간섭을 배제하기 위해 공구와 공작물의 가공면 사이에 어느 정도의 경사각을 주어 칩의 유효배출공간(Effective Chip Space)을 넓게 하는 것이 필요하다. 또한 볼엔드밀의 절삭날에 걸리는 부하는 절삭에 참여하는 절삭날의 위치에 따른 절삭속도의 분포와 평균절삭폭(Mean Thickness of Cut)에 의해 결정되는데, 경사각이 커질수록 칩의 단면적이 커지고, 이로 인해 공구와 공작물간에 마찰이 심해져 공구날에 열응력을 증가시킨다. 따라서 한계치 이상의 경사각에서는 공구에 걸리는 부하가 커지게 되고, 공구수명에도 악영향을 미치므로, 경사각을 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 로 설정함으로써 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.⁽⁹⁾

이에 본 연구에서는 Fig.1과 같이 공작물 가공면의 기울기를 15° 로 설정하고, 절삭깊이는 0.3mm를 주어 절삭가공 실험을 실시하였다. 본 실험에 사용된 공구는 고속가공용 초경코팅 볼엔드밀이고, 시편재질은 HP-4 금형강재를 사용하였다. Fig.2와 Table 1에 본 실험의 사

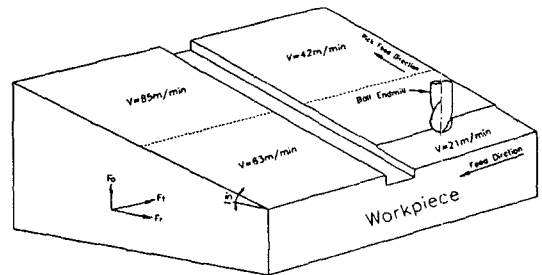


Fig. 1 Cutting Method for Ball Endmill Machining



Fig. 2 Experimental Setup

Table 1 Experimental Conditions

Tool	Coated WC Ball End Mill, $\phi = 10 \text{ mm}$, $z = 2$
Workpiece	HP-4 (H _R C36)
Spindle Revolution	2600, 5200, 7800, 10400 rpm
Cutting Speed, V	21, 42, 63, 85 m/min
Feed (mm/min)	260-3120
Feed per Revolution, fr (mm/rev)	0.3, 0.245, 0.2, 0.15, 0.12 0.1
Pick Feed, Pf (mm)	0.2, 0.245, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6
Axial Depth of Cut	0.3 mm
Spindle Speeder	Speed up ratio (1 : 5) Max. Spindle rpm (20000rpm)

진과 절삭조건을 각각 나타내었다.

본 연구에서는 주축증속기를 이용하여 최고 20,000 rpm의 회전수를 얻을 수 있으나, 실험에 사용된 일반머시닝센터와 주축증속기의 안정성을 고려하여, 회전수를 2,600, 5,200, 7,800, 10,400rpm까지 4단계로 주축회전수를 증가시키며 실험을 실시하였다. 그리고 주어진 절삭속도에서 각각의 가공능률을 같게 하기 위해서, 이를 결정하는 주요인자인 fr과 Pf의 곱을 일정하게 유지하면 되므로 fr과 Pf의 곱이 항상 일정하게 되도록 fr과 Pf의 량을 동시에 변화시키면서 절삭하였다. 즉 fr과 Pf의 량을 Table 1에 제시한 순서대로 설정하여 6가지의 절삭조건으로, 4종류의 절삭속도에 대해서 각각의 절삭가공실험을 실시하였다.

위에서 언급한 각 조건에서 절삭한 공작물의 가공표면을 표면조도기(401, Surftest, Mitutoyo)를 이용하여 중심선평균표면거칠기(μmRa)로 fr방향과 Pf방향의 두방향에서 측정하여, 각 조건에 따른 공작물의 표면거칠기의 특성을 살펴보았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭속도에 따른 절삭력의 특성

볼엔드밀로 여러 가지 절삭조건을 변화시키면서 절삭했을 때, 접선방향분력(Ft), 반경방향분력(Fr), 축방향분

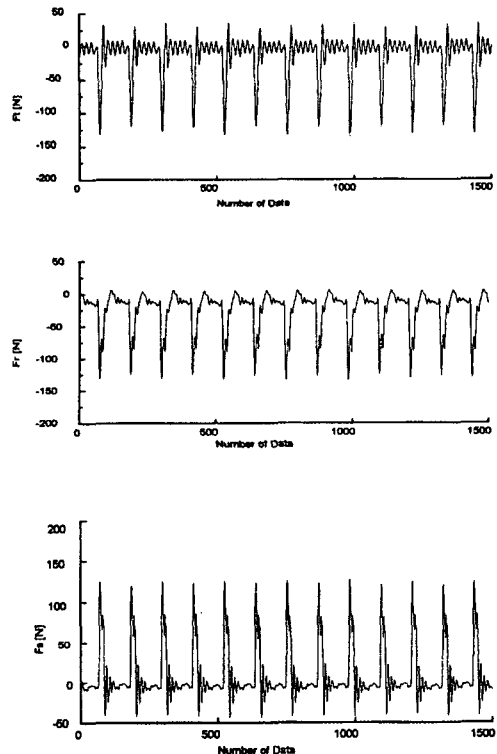


Fig. 3 Variation of cutting force (V=63m/min, fr=0.15mm/rev, Pf=0.4mm)

력(Fa) 세분력 중에서 절삭조건에 관계없이 모든 경우 공히 접선방향분력이 가장 큰 값을 나타내었다. 이는 접선방향분력이 실제 절삭에서의 주분력에 해당하며 볼엔드밀의 회전운동에 대하여 이송방향 저항이 가장 크기 때문이다. A/D변환기를 통해 획득한 세분력 방향의 절삭력 신호형태를 대표적으로 Fig. 3에 나타내었으며, Fig.4에는 절삭속도의 증가에 따른 절삭력의 변화를 나타내었다. 공구의 날당 이송량을 0.075mm/tooth로 일정하게 하고, 절삭속도 즉 주축회전수를 증가시키면 분당이송속도는 회전수의 증가에 비례해서 증가하게 된다. 아울러 Pf를 0.4mm로 일정하게 하여 볼엔드밀의 한 날당 절삭체적을 항상 일정하게 하였다.

공구 한 날당 절삭체적을 같게 한 상태에서 절삭속도만 증가시킨다면 절삭속도가 증가되어도 공구 한 날당 걸리는 절삭력은 항상 일정해야 하고, 단지 단위시간당 칩제거량은 절삭속도의 증가에 비례해서 증가하게 되어야 한다. 그러나 실제로 절삭속도의 증가에 따른 절삭력을 관

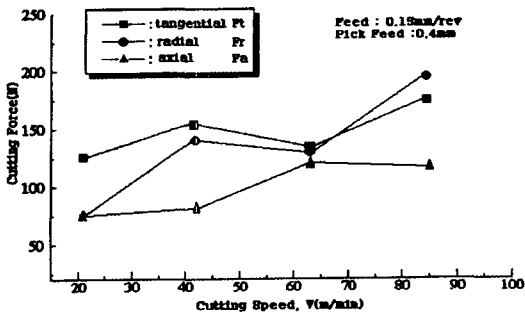


Fig. 4 Characteristics of cutting force according to cutting speed

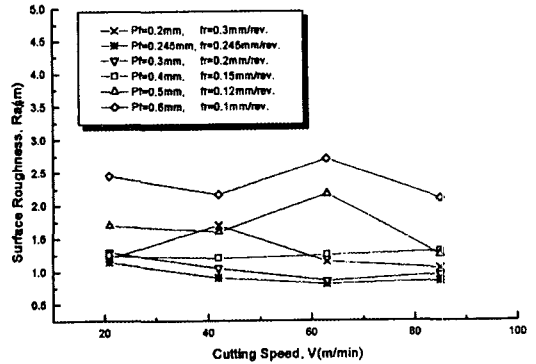


Fig. 6 Characteristics of surface roughness in the pick feed direction according to cutting speed

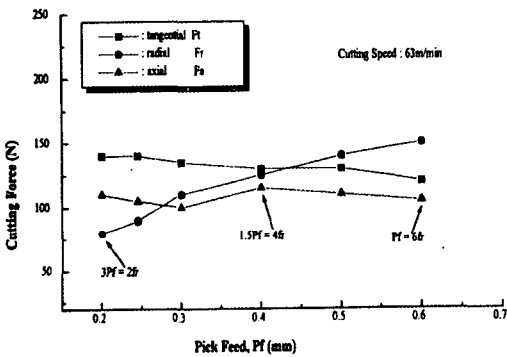


Fig. 5 Characteristics of cutting force according to pick feed

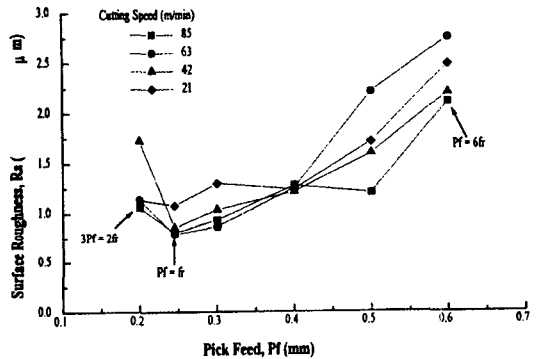


Fig. 7 Characteristics of surface roughness in the pick feed direction according to pick feed

찰해 본 결과, 절삭속도의 증가에 따라 절삭력이 다소 커지는 경향을 보이고 있다. 이것은 절삭속도의 증가에 따라 공구날이 공작물에 닿아서부터 칩을 제거하는 시간이 짧아지므로 이에 따른 순간적인 절삭력의 증가와 고속절삭에서 무시할 수 없는 모멘텀효과⁽¹⁰⁾로 인해서 증가된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 공구의 f_r 과 P_f 의 변화에 따른 절삭력의 변화를 나타낸 것으로, 공구의 f_r 이 감소할수록 공구의 접선방향 분력은 서서히 작아지지만 반경방향분력은 급격한 증가를 보이고 있다. 이를 통해서도 본 조건의 절삭에서는 P_f 에 많은 영향을 받으며, 어느 한계 이상의 P_f 값은 적절한 절삭조건이 아님을 알 수 있다. 본 실험에서의 세 분력을 종합적으로 검토해 보면 $P_f=0.4\text{mm}$ 가 가장 적합한 값으로 나타났다.

3.2 절삭속도에 따른 표면거칠기의 특성

가공능률이 항상 일정한 가공조건, 즉 $P_f \times f_r$ 을 같게 한 절삭조건하에서 절삭속도의 증가에 따른 표면거칠기의 변화를 고찰하기 위하여 Table 1에 열거한 6가지 조건에 대해서 절삭한 후의 피크피드 방향의 표면거칠기 변화경향을 Fig. 6에 각각 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 $f_r \times P_f$ 를 일정하게 하고 절삭속도만을 증가시켰을 때, 각 조건에서의 가공면의 표면거칠기는 동일조건하에서 절삭속도에는 크게 영향을 받지 않고 있으나, 대체로 절삭속도가 증가함에 따라 오히려 표면거칠기가 다소 좋아지는 것을 알 수 있다. 이것은 가공면의 표면거칠기가 향상될 뿐만 아니라 가공능률은 증속비에 비례해서 증가되는 결과이므로 고속가공의 가능성을 충분히 설명해주는 것으로 판단된다.

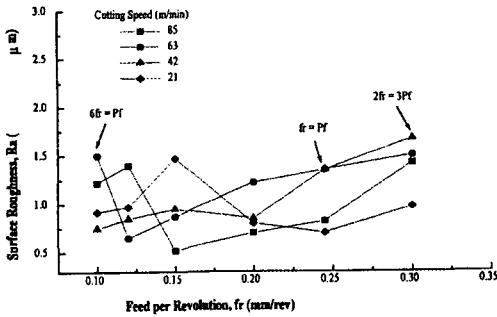


Fig. 8 Characteristics of surface roughness in the feed direction according to feed-per-revolution

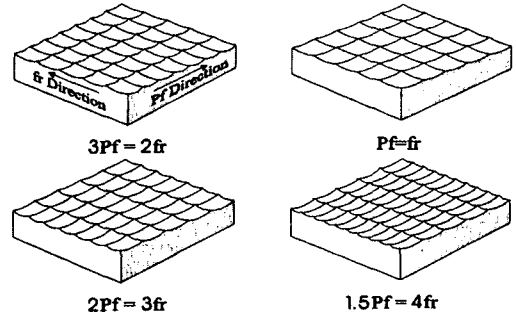


Fig. 9 Patterns of machined surfaces

그리고 Fig. 7에는 동일한 절삭속도에 대하여 가공능률이 일정할 때의 피크피드의 변화에 따른 피크피드방향의 표면거칠기의 변화값을 나타낸 것이다.

Fig. 7에 나타나듯이 피크피드의 변화에 따른 피크피드방향의 표면거칠기의 영향은 절삭속도가 각기 다른 네 종류의 조건에서 전체적인 변화는 거의 비슷한 경향을 보여 주고 있으나, 가공면의 표면거칠기가 이송속도와 피크피드의 설정에 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

동일한 절삭속도하에서 Pf와 fr의 관계가 표면거칠기에 미치는 영향을 고찰해 보면, 네 경우 모두 Pf=fr의 조건에서 표면거칠기가 가장 좋게 나타나고 있으며, Pf가 fr보다 작거나 크면 표면거칠기가 오히려 나쁘게 나타나고 있다. 특히 Pf가 어느 한계를 넘어서게 되면 급격히 나쁘게 나타나고 있다. 이것은 Pf방향의 표면거칠기가 Pf의 영향뿐만 아니라 fr의 영향도 받는다는 것을 의미하는 것으로 적절한 표면거칠기를 얻을 수 있는 최적 가공조건이 존재함을 의미한다. 즉 그것은 Pf와 fr이 같을 때이며, 이 경우가 가장 양호한 표면거칠기가 얻어짐을 알 수 있다. 본 실험에서의 Pf=fr인 경우는 0.245 mm 이다.

Fig. 8에는 fr이 변할 때의 공구이송방향의 표면거칠기를 나타내었다. 본 실험의 조건에서는 주어진 절삭속도에 대해 가공능률을 일정하게 하기 위해 fr을 작게 하는 만큼 Pf량을 증가시켰는데, Fig. 7에서 살펴본 바와 같이 fr과 Pf가 같아질 때 가장 양호한 표면거칠기값을 보여야 하지만, 실제 실험에서는 절삭속도에 따라 차이를 보이고 있다. 이는 이송방향의 표면거칠기도 1회전당 이송량과 함께 Pf량에 의해 영향을 받게 되는데 fr량보다 오히려 Pf량에 영향을 많이 받게 되어, 이송방향의 표면거칠기 값의 변화가 불규칙적으로 나타나는 것으로 생각된다.

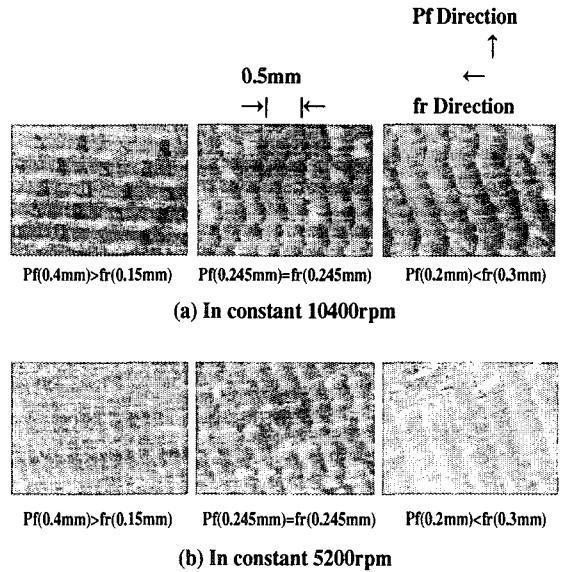


Fig. 10 Workpiece surface representing the relationship between feed-per-revolution and pick feed with constant spindle revolution after machining

Fig. 9는 fr과 Pf의 변화에 의한 가공표면의 형상변화를 도형적으로 간략히 모델링한 것을 보여 주고 있다. 두 날의 블랜드밀로 가공한 절삭면을 기하학적으로 고찰해 보면 피크피드와 공구 한 날당 이송량(fr)이 같은 Pf=fr인 절삭조건에서 절삭가공흔의 가로세로 길이가 똑같은 정사각형의 형상, 즉 Fig. 9의 Pf=fr일 때의 그림과 같은 형상이 되어야 한다. 그러나 실제적으로 가공된 면의 형상은 피크피드와 회전당 이송량이 같은 Pf=fr의 조건하에서 이러한 형상으로 가공된다. 이는 공작기계의 회전

정밀도, 공구의 장착상태 및 공구날끝의 불일치 등으로 인한 현상으로, 결국 공구의 두날 중에서 날끝이 많이 닿는 쪽의 가공흔만이 남아 최종 표면거칠기로 나타난 것으로 생각된다.

Fig. 10에는 실제 가공한 공작물의 가공표면형상사진을 금속현미경(SZH10, OLYMPUS)에서 촬영한 것을 실었다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 주축회전수에 관계없이 f_r 과 P_f 가 같을 때에 정사각형의 균일한 표면형상을 관찰할 수 있으며, 이 사진에서 이를 잘 증명해 주고 있다.

3.3 절삭조건과 가공능률과의 관계

3.2절과 Fig.7에서 살펴본 바와 같이 P_f 가 0.4mm이하의 절삭조건하에서는 표면거칠기(R_a)가 절삭속도에 관계없이 일정 범위내에 분포하고 있으며, 전체적으로 보면 조건에 따라서 다소 미소한 차이는 있지만 절삭속도가 빠른 조건에서 오히려 표면거칠기가 좋게 나타나고 있다. 특히 $P_f=f_r$ 의 조건에서는 표면거칠기가 더욱 좋게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 절삭속도를 고속화함과 동시에 P_f 와 f_r 를 같게 하므로써 일반절삭보다 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있음은 물론 가공능률을 크게 향상시킬 수 있음을 의미한다.

Fig. 11에서는 피크피드량과 공구 회전당 이송량을 같게 한 절삭조건에서 절삭속도를 증가시킴에 따른 단위시간당 칩제거율(MRR)의 이론값과 피크피드방향의 표면거칠기의 관계를 나타내고 있다. Fig. 11에서 보는 바와 같이 절삭속도가 증가할수록 칩제거율은 선형적으로 증

가하고 있으며, 표면거칠기도 다소 좋아짐을 알 수 있다. 따라서 피크피드량과 공구 회전당 이송량을 같게 한 절삭 조건하에서 고속절삭을 함으로서 단위시간당 칩제거율을 증가시키고 동시에 원하는 표면거칠기를 얻음으로 인해 절삭공정의 가공능률을 향상시킬 수 있게 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

일반 머시닝센터에서 주축증속기를 이용하여 HP-4 금형강을 볼랜드밀로, 공구제작사에서 권장하는 절삭속도로 가공한 일반절삭과 이보다 2~4배로 증속시킨 절삭속도로 가공한 고속절삭의 실험연구에 관한 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 표면거칠기는 일반절삭과 고속절삭 공히 피크피드량과 공구 회전당 이송량의 변화에 따라 많은 영향을 받으며, 피크피드량과 공구 회전당 이송량이 같을 때 가장 양호한 표면거칠기를 얻을 수 있다.
- 2) 피크피드량과 회전당 이송량을 같게 한 절삭조건하에서 고속절삭을 실시함으로써 일반절삭에 비해 가공능률의 향상을 크게 가져 올 수 있다.
- 3) 공구의 날당 이송량을 일정하게 유지하고 절삭속도를 증가시켰을 때, 절삭력은 고속절삭이 됨에 따라 서서히 증가하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 연암공업대학교 부산대학교 정밀정형 및 금형가공기술센터의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Peter Rigby, "High speed milling in the mold and die making industries," Diamond & CBN Ultrahard materials Symposium '93, pp. 3~14, 1993.
2. 中村 誠, 澤武夫, "FF加工機SF64による金型の高能率加工," 型技術, Vol. 9, No. 7, pp. 74~75, 1994.
3. Shuji Minamino, Koichi Kitajima, "Development of Endmill for High Speed and High

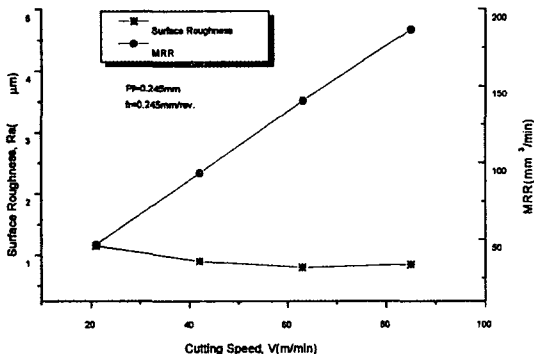


Fig. 11 Relationship between surface roughness in the pick feed direction and material removal rate according to cutting speed

- Feed Cutting.” Proceedings of 3rd Int. Conf. on Die & Mold Technology, pp. 265~271, 1995.
4. 玉井 秀樹, 福井 雅彦, “高硬度金型材の高效率切削加工の研究,” 型技術, Vol. 10, No. 7, pp. 28~29, 1995.
 5. H. Schultz “High-Speed Machining,” Annals of the CIRP Vol. 41, No. 2, pp. 637~643, 1992.
 6. 内 國雄, “金型の高品位・高能率仕上切削法の開発,” JSPE Vol. 59, No. 4, pp. 117~122, 1993.
 7. 中村 誠, “自由曲面仕上げ加工における最適條件設定,” 機械工具, 1995年5月, pp. 81~86, 1995.
 8. 田部 博輔, “金型用鋼材の 技術動向,” 型技術, Vol. 11, No. 7, pp. 17~22, 1996.
 9. H. Schultz, “High-Speed Milling of Dies and Moulds Cutting Conditions and Technology,” Annals of the CIRP, Vol. 44 No. 1, pp. 35~38, 1995.
 10. 梁民陽, 절삭가공 이론과 실제, 청문각, pp. 177~178, 1997.