

실험계획법을 이용한 고속가공의 가공정밀도 향상에 관한 연구

권병두*(창원대 대학원 기계설계공학과), 고태조(영남대),
정종윤, 정원지, 이춘만(창원대)

A Study on the Improvement of Machining Accuracy in High Speed Machining using Design of Experiments

B. D. Kweon*(Mech. Eng. Dept., Changwon National Univ.), T. J. Ko(Youngnam Univ.)
J. Y. Jung, W. J. Jung, C. M. Lee(Changwon National Univ.)

ABSTRACT

High-speed machining is one of the most effective technologies to improve productivity. Because of the high speed and high feed rate, high-speed machining can give great advantages for the machining of dies and molds. This paper describes on the improvement of machining accuracy in high-speed machining. Depth of cut and feed rate are control factors. The effect of the control factors on machining accuracy is investigated using two-way factorial design.

Key Words : High-Speed Machining (고속가공), Surface Roughness (표면거칠기), Design of Experiments (실험계획법), Two-way factorial design (이원배치법)

1. 서론

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 감소시켜 경쟁력을 강화시킨다. 그러나 기존의 일반 절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건에 대한 제한으로 이러한 요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 특히 금형제품은 단품 및 주문 생산에 의존하고 있어, 제품의 정밀도 향상, 납기단축 그리고 제조경비절감(Cost down)을 가져올 수 있는 제작방식을 채택하지 않으면 경쟁력을 잃고 만다.

최근 여러 공업선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 고속가공(High-Speed Machining)^(1,2)은 이러한 문제점을 해결할 뿐만 아니라 지금까지 절삭가공으로 불가능했던 고경도강재 등의 난삭재도 절삭가공이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다. 고속가공에서는 주축회전수(Spindle speed)를 증가시킴

으로써 높은 절삭속도(Cutting speed)를 얻을 수 있고, 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도(Feed rate)보다 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,⁽³⁾ 특히 볼랜드밀을 이용한 금형가공시 공구의 1회전당 이송량과 피크피드량(Pick feed)의 설정에 의해 표면거칠기(Surface roughness)의 형상이 크게 달라진다.

본 연구는 최근 국내 A사가 개발한 고속 금형가공기의 가공조건에 따른 가공특성을 파악하기 위한 실험 연구의 예비실험으로서, 절삭깊이(Depth of cut)와 이송속도의 변화가 치수정밀도와 표면거칠기에 미치는 영향을 살펴보았다. 이원배치법(Two-way factorial)을 이용하여 실험을 실시하고 데이터를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 고속가공기는 수직형머시닝 센터로 최대 주축회전수 20,000rpm, 최대 급속·절삭 이송속도 40m/min 이다. 수직형머시닝센터에서 볼엔드밀을 가지고 공작물을 가공할 때, 볼엔드밀의 기하학적인 형상 특성으로 인해, 공구와 공작물의 가공면 사이에 어느 정도의 경사각을 주어 칩의 유효 배출공간(Effective chip space)을 넓게 하는 것이 필요하다. 또한, 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 미치게 되므로 가공 표면도 좋지 않게 나타난다. 보고된 바에 의하면 경사각을 10°~20°로 설정함으로써 고속가공시 절삭의 최적화를 이룰 수 있다고 보고되고 있다.⁽⁴⁾ 이에 본 연구에서는 시편 형상의 직선 경사부분을 45°, 30°, 15°로 설정하여 경사각에 따른 가공 특성을 살펴 보았다. 또한 원호부분은 NURBS 보간을 사용하여 가공하였다.

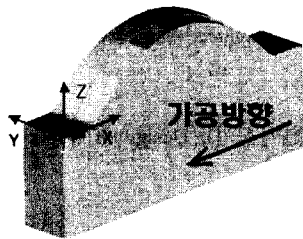


Fig 1. Modeling of sample

그리고 실험의 효율을 높이기 위해 Fig 1의 시편 9개를 하나로 결합했고, ϕ 12-평엔드밀을 이용하여 황삭가공을 1회만 실시하였다.

실험계획법을 적용한 전체적인 실험순서는 Fig 2와 같다. 절삭깊이(Depth of cut)와 이송속도를 제어 인자로 선정하고, 주축회전수는 16,000rpm으로 고정하였다. 본 실험에 사용된 공구는 알루미늄 전용 공구로 날수가 2개인 ϕ 6-볼엔드밀이고, 시편재질은 알루미늄 60계열을 사용하였다. 피크피드량은 0.15mm, Cusp 높이가 0.001mm로 하여 CAMTOOL을 이용하여 NC-code를 생성하였다.

각 인자의 수준은 Table 1과 같이 결정하였다. 이 수준은 현장에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 값이다. 가공순서는 난수표를 사용하여 완전 랜덤화하여 Table 2에 보인 순서로 실시하였다. 그리고 중삭, 정삭 가공시 고정도윤곽보정기능(HPCC)을 사용하여 가공하였다. 가공 실험은 4회 가공하였으나 데이터 분석은 4회 중 1회만 선택하여 실시하였다. 앞

에서 언급한 각 조건에서 절삭한 시편을 3차원 측정기를 이용하여 가공 오차를 측정하였고, 가공표면을 표면조도기를 이용하여 중심선평균표면거칠기(Ra)로 피크피드 방향에서 측정하였다.

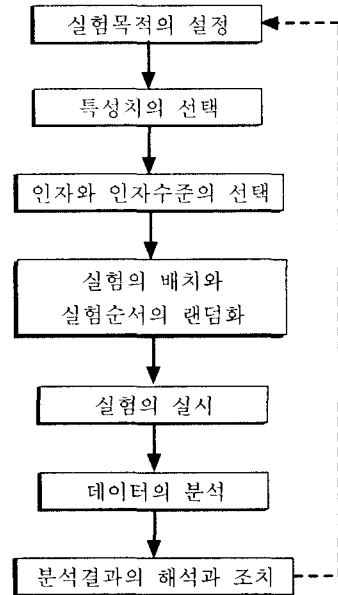


Fig 2. Flow chart for Design of Experiments

Table 1. Factors and levels

Factor			Level		
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	Depth of cut	mm	0.1	0.2	0.3
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600

Table 2. Machining sequence

Run No. / Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	1	2	1	3	3	2	3	1	2
B	1	3	3	3	1	2	2	2	1

3. 실험결과 및 고찰

절삭깊이와 이송속도의 수준이 가공오차와 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

3.1 가공오차

3차원형상의 가공오차를 측정하기 위해서는 시편을 여러방향으로 측정해야 하나, 본 연구에서는 편의상 Z방향의 가공오차만 측정하였다. Z 방향의 가공오차란, 3차원 측정기를 이용하여 측정한 Z좌표

에서 모델링상의 Z좌표를 빼 값이다.

Fig 3은 직선 보간을 사용하여 가공한 부분의 가공조건에 따른 Z 방향의 가공오차(Machining error in Z-direction)를 나타내었다. Fig 4는 NURBS 보간을 사용하여 가공한 부분의 가공조건에 따른 Z 방향의 가공오차를 나타내었다. 그래프상의 영문 알파벳은 가공 순서와 측정 위치를 나타낸다. 가공이 시작되는 부분(a)과 끝나는 부분(i)은 두 점을 측정하였고 다른 곳(b~h)은 직선 경사면에서는 세 점을 측정하였으며, 원호부분에서는 한 점씩 측정하였다. Fig 3과 Fig 4를 살펴보면 이송속도, 절삭깊이 모두 가공조건에 따른 Z 방향의 가공오차에 미치는 영향은 분산분석 결과 무시할만 하였다.

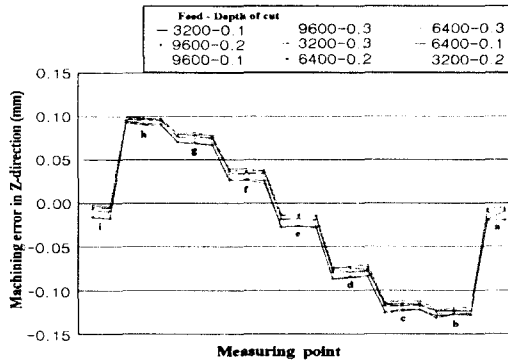


Fig 3. Machining error in Z-direction of each run, (Linear interpolation)

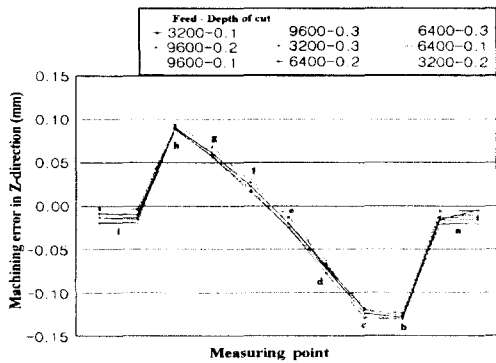


Fig 4. Machining error in Z-direction of each run, (NURBS interpolation)

3.2 표면거칠기(Surface roughness)

직선보간을 이용한 가공부분을 각 가공조건에 따른 경사각(slope)에 따른 표면거칠기를 측정하여 반복이 없는 이원배치법의 분산분석(Analysis of

variance)을 하여 분산분석표(Analysis of variance table)⁽⁶⁾를 작성하고 F-검정을 하였다. 여기서 경사각은 수평면과 가공면이 이루는 각도를 말한다. F-검정결과 경사각이 15° 이고 상향절삭(Upward cutting)이 되는 부분(d)과 경사각이 15° 이고 하향절삭(Downward cutting)이 되는 부분(f) 모두 유의수준 5%에서 인자 A(절삭깊이)와 인자 B(이송속도)의 귀무가설(Null hypothesis)이 채택되었다. 즉, 경사각이 15° 일 때는 절삭깊이와 이송속도는 표면거칠기에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

경사각이 30° 이고 상향절삭이 되는 부분(c)의 분산분석표를 Table 3에 보였고, 경사각이 30° 이고 하향절삭이 되는 부분(g)의 분산분석표를 Table 4에 보였다. 여기서 사용된 기호는 다음과 같다.

S : 변동 ϕ : 자유도
V : 불편분산 E : 분산의 기대값

Table 3. Analysis of variance table for surface roughness(slope=30° , Upward cutting)

	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.01)
A	0.012141	2	0.006070	1.62270	6.94	18.0
B	0.067879	2	0.033940	9.07243	6.94	18.0
E	0.014964	4	0.003741			
T	0.094984	8				

Table 4. Analysis of variance table for surface roughness(slope=30° , Downward cutting)

	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.01)
A	0.001218	2	0.000609	0.125	6.94	18.0
B	0.090983	2	0.045492	9.33637	6.94	18.0
E	0.019490	4	0.004873			
T	0.111692	8				

Table 3과 Table 4를 보는 바와 같이 인자 A는 5% 유의 수준에서 유의하지 않고, 인자 B는 5%의 유의 수준에서 유의하다. 즉, 표면거칠기에는 절삭깊이는 영향을 미치지 않고, 이송속도가 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

이상의 분산분석 결과를 이용하여 인자 B의 추정을 실시하였다. 점추정량(Point estimation)은 표면거칠기의 평균으로 하였다. 경사각이 30° 이고 상향절삭이 되는 부분(c)의 신뢰구간의 폭은 ± 0.0972 이다. 경사각이 30° 이고 하향절삭이 되는 부분(g)의 신뢰구간의 폭은 ± 0.1109 이다. 인자 B의 각 수준에서의 모형의 추정값을 그래프에 기입하고 위에서 구한 신뢰구간의 폭을 붙이면 B_i 수준에서의 95% 신뢰구간을 Fig 7과 Fig 8에 보였다.

3.3 결과 고찰

이상의 실험결과에서 주목되는 점은, 일반적으로 경사면을 가공할 때, 절삭저항에 의한 공구의 휨현상으로 경사면을 올라가는 상향절삭 시에는 미절삭이 일어나고, 경사면을 내려가는 하향절삭시에는 과절삭이 일어난다.⁽⁵⁾ 그러나 Fig 4, Fig 5에서는 과절삭과 미절삭이 반대로 나타나고 있다. 그리고, Z 방향의 가공오차가 일반적인 가공오차의 범위를 넘어서 매우 크게 나타났다. 이것은 고속급형가공기의 잘못된 백래시(backlash) 보정이나, 본 실험에서 사용된 고속급형가공기의 Z축의 열변형에 의한 것으로 추정된다.

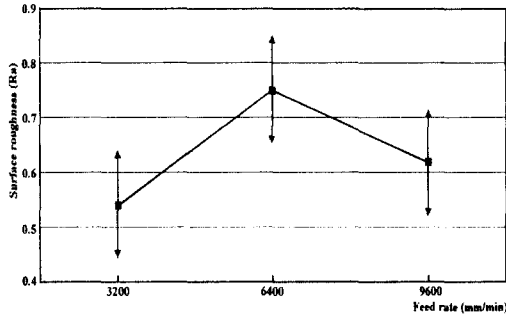


Fig 7. Confidence interval of B_1
(slope = 30° , Upward cutting)

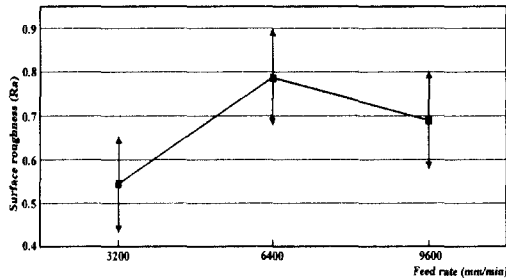


Fig 8. Confidence interval of B_1
(slope= 30° , Downward cutting)

Fig 7과 Fig 8에서 보는바와 같이 이송속도 $B_1 = 3200\text{mm/min}$ 로 가공했을 때, 좋은 가공면을 얻을 수 있다고 볼 수 있다. 그러나, 이송속도가 6200mm/min 보다 증가할수록 표면거칠기가 좋아지는 것을 볼 수 있다. 즉, 본 실험에서 설정한 이송속도 구간에서는 이송속도가 3200mm/min 일 때 표면거칠기가 가장 좋은 것으로 나타났지만, 이송속도를 9600mm/min 이상으로 했을 때 3200mm/min 일때보다 더 좋은 표면거칠기가 나타날 수도 있다는 것이다.

따라서, 이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 정확히 알기 위해서는 이송속도의 범위를 좀더 넓혀서 실험을 수행하여야 할 것이다. 또한, 절삭깊이와 이송속도 뿐만 아니라 다른 가공조건을 제어인자로 선정하여 고속가공에서의 가공특성에 대한 더 많은 실험이 수행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 A사에 의해 개발된 고속급형가공기의 가공조건에 따른 가공특성을 규명하기 위한 실험연구의 예비실험으로서 수행되었다. 주축회전수를 고정하고 절삭깊이와 이송속도를 변화시키면서 가공실험을 수행하였다. 반복이 없는 이원배치법을 이용하여 가공오차와 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험에서 수행한 가공조건의 범위에서 각 조건에 의한 영향은 아래와 같다.

- 1) 절삭 깊이는 Z 방향 가공오차에 유의한 영향을 미치지 않는다.
- 2) 절삭 깊이는 표면거칠기에 유의한 영향을 미치지 않는다.
- 3) 이송속도는 표면거칠기에 대해 경사각이 15° 에서는 유의하지 않았고, 경사각이 30° 에서는 유의한 결과를 얻었으며, 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있는 이송속도를 구할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터와 (주)대우종합기계의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Peter Rigby, "High speed milling in the mold and die making industries", Diamond & CBN Ultrahard materials Symposium '93, pp.3~14, 1993.
2. Shuji Minamino, koichi Kitajima, "Development of Endmill for High Speed and High Feed Cutting", Proceedings of 3rd Int. Conf. on Die & Mold Technology, pp. 265~271, 1995.
3. H. Schultz "High-Speed Machining", Annals of the CIRP Vol. 41 No. 2, pp. 637~643, 1992.
4. 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.
5. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, CAD/CAM 시스템과 CNC절삭가공, 회중당, pp. 358, 1996.
6. 박성현, "현대실험계획법", 민영사, 2000.