

실험계획법을 이용한 고속가공의 가공정밀도 향상에 관한 연구

이춘만*, 권병두**, 고태조***, 정종윤****, 정원지*

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

Choon Man Lee*, Byung Doo Kweon**, Tae Jo Ko***, Jong Yun Jung****, Won Jee Chung*

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, feed rate and spindle revolution 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), Two-way factorial design (이원배치법), Surface roughness (표면 거칠기), Design of experiments (실험계획법)

1. 서론

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계 구성 부품의 고정밀 및 고성능 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여 주고, 생산성의 개선은 가공 경비를 감소시켜 경쟁력을 강화시킨다. 그러나 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건에 의해 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 경쟁

력을 잃고 만다. 여러 공업선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 고속가공(High-Speed Machining)^(1,2)은 이러한 문제점을 해결할 뿐만 아니라 지금까지 절삭가공으로 불가능했던 고정도강재 등의 난삭재도 절삭가공이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다. 고속 가공에서는 주축회전수(rpm)를 증가시킴으로써 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 많

2002년 1월 7일 접수

* 창원대학교 기계설계공학과

** 창원대학교 대학원 기계설계공학과

*** 영남대학교 기계공학부

**** 창원대학교 산업시스템공학과

은 영향을 받게 된다.⁽³⁾

국내에서도 많은 장점을 가지고 있는 고속가공 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 국내에서 진행된 고속가공에 대한 연구들은 대부분 외국에서 생산된 고속가공기를 사용한 연구 결과들이고, 실제 생산현장에 적용하기는 어려운 점들이 많다.

따라서 본 논문의 목적은, 국내에서 개발된 고속가공기를 이용하여 가공조건에 따른 고속가공기의 특성을 파악하고 고속가공기의 성능을 평가하는데 있다. 또한 3차원 고속가공기를 이용한 자유곡면가공을 많이 하는 금형업체에서 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 논문에서 사용된 고속가공기는 수직형머시닝센터로 최대 주축회전수 20,000rpm., 최대 급속 절삭 이송속도 40m/min 이다.

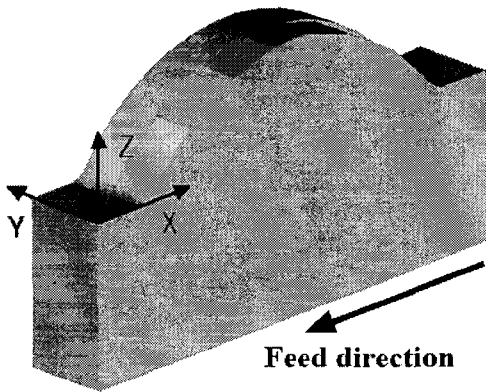


Fig. 1 Modeling of sample

수직형머시닝센터에서 불엔드밀을 가지고 공작물을 가공할 때, 불엔드밀의 기하학적인 형상 특성으로 인해, 공구와 공작물의 가공면 사이에 어느 정도의 경사각을 주어 칩의 유효배출공간(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 경사각에

서는 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 Fig. 1과 같이 시편 형상의 직선 경사부분을 45°, 30°, 15°로 설정하여 경사각에 따른 가공 특성을 살펴 보았다. 또한 원호부분은 NURBS 보간을 사용하여 가공하였다. 그리고 공구가 경사면을 올라가면서 절삭하는 상방향절삭(Upward cutting)과 공구가 경사면을 내려가면서 절삭하는 하방향절삭(Downward cutting)시 공구에 작용하는 절삭부위는 같은 경사각도를 가지는 시편이라 할지라도 공구경로에 따라 절삭부위가 다르게 나타난다. 이에 본 논문에서는 상방향절삭과 하방향절삭의 가공특성을 파악할수 있게 좌우 대칭인 형상으로 시편을 결정하였다.

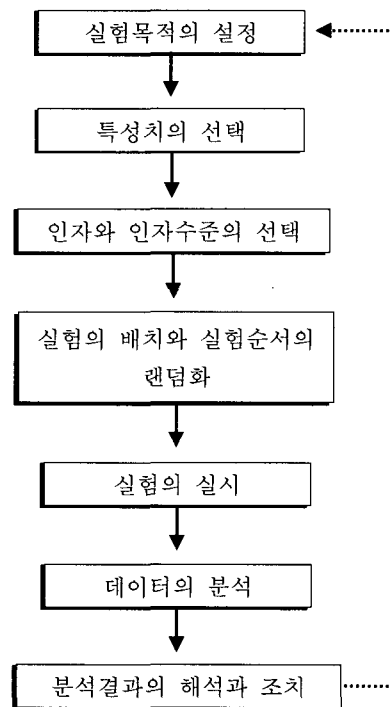


Fig. 2 Flow chart for Design of Experiments

Table 1 Factors and levels for experimental machining according to depth of cut and feed rate (RPM : 16000rpm)

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 for experimental machining according to depth of cut and feed rate (A : Depth of cut (mm), B : Feed rate (mm/min))

	B1(3200)	B2(6400)	B3(9600)
A1(0.1)	1	8	3
A2(0.2)	9	6	2
A3(0.3)	5	7	4

본 실험에 사용된 공구는 알루미늄 전용 공구로 날수가 2개인 $\phi 6$ -볼엔드밀이고, 시편재질은 알루미늄 60XX계열을 사용하였다. 이는 절삭력을 최소화시킴으로써 고속가공기의 축에 대한 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서이다. 피크피드량은 0.15mm, Cusp 높이는 0.001mm로 하여 CAMTOOL을 이용하여 NC-code를 생성하였다.

본 논문의 실험은 실험계획법을 적용하여 실험을 실시하고, 측정된 데이터를 분산분석(Analysis of variance)을 통해 분석하였다. 실험계획법을 적용한 전체적인 실험순서는 Fig. 2와 같다. 본 논문의 실험에서 이송속도, 절삭깊이, 주축회전수를 제어인자로 하였는데, 이는 표면거칠기와 가공오차에 가장 큰 영향을 주는 인자이기 때문이다. 본 논문에서는 2회에 걸쳐 실험을 실시하였는데, 첫 번째는 절삭깊이와 이송속도를 제어인자로 하였고, 두 번째는 주축회전수와 이송속도를 제어인자로 하였다.

각 실험에서 인자의 수준은 Table 1, Table 3과 같이 결정하였다. 이 수준은 현장에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 값이다. 가공순서는 난수표를 사용하여 완전 랜덤화 하여 Table 2, Table 4에 보인 순서로 실시하였다. 그리고 중삭, 정삭 가공시

Table 3 Factors and levels for experimental machining according to feed rate and spindle RPM (Depth of cut : 0.1mm)

Factor			Level			
Sign	Factor	Unit	1	2	3	4
A	RPM	rpm	12000	14000	18000	20000
B	Feed rate	mm/min	3200	6400	9600	

Table 4 Machining sequence for experimental machining according to feed rate and spindle RPM (A : RPM (rpm) , B : Feed rate (mm/min))

	B1(3200)	B2(6400)	B3(9600)
A1(12000)	6	2	7
A2(14000)	1	10	3
A3(18000)	11	8	4
A4(20000)	5	12	9

고정도윤곽보정기능(HPCC)을 사용하여 가공하였다. 앞에서 언급한 각 조건에서 절삭한 시편을 3차원 측정기(PRISMO 7, ZEISS)를 이용하여 가공 오차를 측정하였고, 가공표면을 표면조도기(Surfest SV-600, Mitutoyo)를 이용하여 중심선평균표면거칠기(Ra)로 피크피드(pick feed) 방향에서 측정하였다. 측정된 특성치는 분산분석을 이용하여 분석하였고 도평균의 추정을 하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 절삭깊이와 이송속도를 고려한 가공실험

절삭깊이와 이송속도를 고려한 가공실험에서 반복이 없는 이원배치법을 적용하여 실험을 실시하였고, 표면거칠기와 3차원 측정위치는 Fig. 3과 같고, 각각의 측정위치에 a에서 i까지의 부호를 정하였다. 그리고 분산분석을 이용하여 절삭깊이와 이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 4는 직선보간으로 가공한 부분의 표면거칠

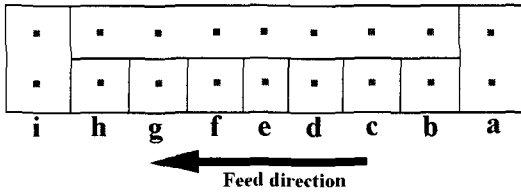


Fig. 3 Measuring point

- Depth of cut-0.1, Feed rate-3200 ○ Depth of cut-0.2, Feed rate-6400
- ◇ Depth of cut-0.2, Feed rate-9600 △ Depth of cut-0.3, Feed rate-6400
- ▽ Depth of cut-0.1, Feed rate-9600 □ Depth of cut-0.1, Feed rate-6400
- ◇ Depth of cut-0.3, Feed rate-9600 ○ Depth of cut-0.1, Feed rate-3200
- △ Depth of cut-0.3, Feed rate-3200 △ Depth of cut-0.2, Feed rate-3200

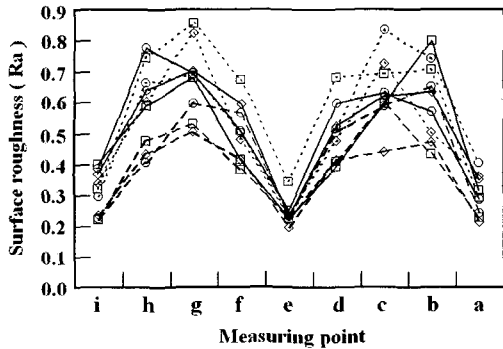


Fig. 4 Surface roughness according to measuring point (Linear interpolation)

- Depth of cut-0.1, Feed rate-3200 ○ Depth of cut-0.2, Feed rate-6400
- ◇ Depth of cut-0.2, Feed rate-9600 △ Depth of cut-0.3, Feed rate-6400
- ▽ Depth of cut-0.1, Feed rate-9600 □ Depth of cut-0.1, Feed rate-6400
- ◇ Depth of cut-0.3, Feed rate-9600 ○ Depth of cut-0.1, Feed rate-3200
- △ Depth of cut-0.3, Feed rate-3200 △ Depth of cut-0.2, Feed rate-3200

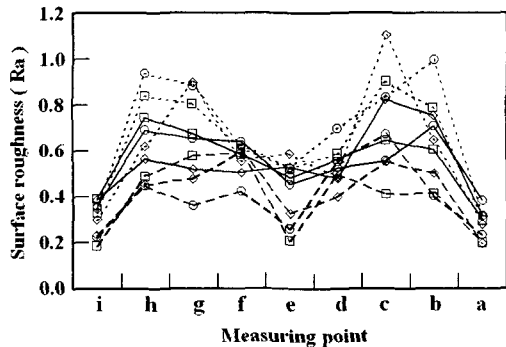


Fig. 5 Surface roughness according to measuring point (NURBS interpolation)

기를 그래프로 나타내었고, Fig. 5는 NURBS보간으

로 가공한 부분의 표면거칠기를 나타내었다. 본 실험에서 Cusp 높이를 0.001mm로 설정하여 가공하였는데 표면거칠기가 대체적으로 양호한 것을 볼 수 있다. 그러나 a, e, i 위치에서 표면거칠기가 아주 양호하게 나왔다. 이 부분은 경사각이 0°인 평면인데, 일반적으로 블엔드밀을 이용하여 평면을 가공할 때 보다 경사면을 가공할 때 표면거칠기가 양호하게 나오는 것으로 알려져 있다. 그러나 Fig. 4에서는 평면에서 표면거칠기(Ra)가 대체적으로 0.2~0.4 μ m 사이의 값으로 아주 양호하게 나왔다. 이것은 블엔드밀의 기하학적 특성상 절삭속도가 0인 지점이 가공에 참여하게 되고 이로인해 정상적인 절삭이 아닌 공구가 표면을 문지르는 현상이 발생하여 표면거칠기가 양호하게 나타난 것으로 생각된다. 그리고 Fig. 4에서 평면 부위를 제외하면 d, f 부분에서 상대적으로 양호한 표면거칠기를 나타내고 있는데, d, f 부분은 15°경사면이다. 이는 고태조⁽⁵⁾의 실험결과에서 블엔드밀을 이용하여 경사면을 가공할 때 공구의 마모와 절삭력, 표면거칠기등을 고려하였을 때 15°경사면이 가장 적절할 경사면이라는 실험결과를 뒷받침해주고 있다.

Table 5는 공구의 문지름 현상이 발생한 평면부위를 제외한 나머지 경사면에 대해서 분산분석을 하여 분산분석표를 나타내었다. 분산분석표에서 각 요인이 F_0 값이 $F_0 > F(a)$ 이면 귀무가설(Null hypothesis)은 유의수준 α 에서 기각된다. 즉, 귀무가설이 기각되면 요인이 특성치에 유의한 영향을 준다고 한다. Table 5에서 보면 분석결과 절삭깊이는 모든 가공경사각에서 표면거칠기에 아무런 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 하지만 난삭재나 고경도의 재료 가공시 절삭깊이의 변화에 따라 공구에 작용하는 과도한 절삭력으로 인해 런아

Table 5 Surface roughness analysis of variance table (slope = 15°, 30°, 45°)

Source	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.01)
A	0.03073	2	0.01537	1.38148	6.94	18.0
B	0.24334	2	0.12167	10.9385	6.94	18.0
E	0.04449	4	0.01112			
T	0.31856	8				

※ A : Depth of cut · B : Feed rate · E : Error
 · T : Sum · S : Variation · V : Mean squared
 · ϕ : Degree of freedom

웃이 발생하여 표면거칠기에 영향을 미칠 것이다. 그리고 이송속도는 유의수준 95%의 신뢰수준을 가지고 표면거칠기에 유의한 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

이상의 결과를 가지고 이송속도의 모평균의 추정을 하였다. 이송속도의 모평균의 점추정값은 이송속도가 3200mm/min 일 때 0.3076, 6400mm/min 일 때 0.6115, 9600mm/min 일 때 0.6885이다. 다음으로 t-분포표를 이용하여 이송속도의 95% 신뢰구간폭을 계산하면 ± 0.2183 이다. 이송속도의 각 수준에서 모평균의 점추정값을 그래프로 그리고 신뢰구간의 폭을 붙이면 이송속도의 95% 신뢰구간을 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 이송속도의 변화에 따라서 표면거칠기는 증가하는데 3200mm/min에서 가장 좋은 표면거칠기를 나타낸다고 볼 수 있다.

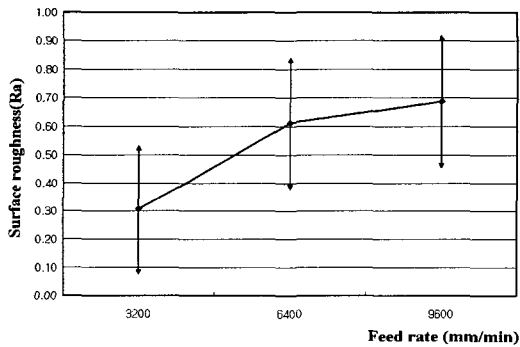


Fig. 6 Confidence interval of surface roughness for feed rate

3.2 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험

절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험과 같은 방법으로 표면거칠기를 측정하였고, 측정위치도 Fig. 3과 같이 동일한 위치를 측정하였다. Fig. 7은 직선보간을 이용하여 가공한 부분의 표면거칠기를 나타내었고, Fig. 8은 NURBS보간을 이용하여 가공한 부분을 나타냈는데, 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험과 유사한 결과가 나왔다. 절삭깊이와 이송속도를 고려한 실험에서와 마찬가지로 a, e, i의 평면 부위가 다른 가공경사각을 가지는 부위보다 표면거칠기가 양호하게 나온 것을 볼 수 있다. 이것 역시

앞서 실시한 실험과 마찬가지로 주축의 고속회전에 따른 주축의 진동발생으로 인한 이상가공으로 판단된다. 그리고 가공경사각이 15°인 부분에서 표면거칠기가 양호한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

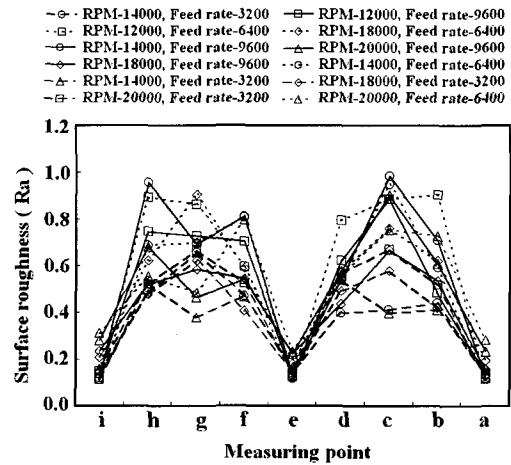


Fig. 7 Surface roughness according to measuring point (Linear interpolation)

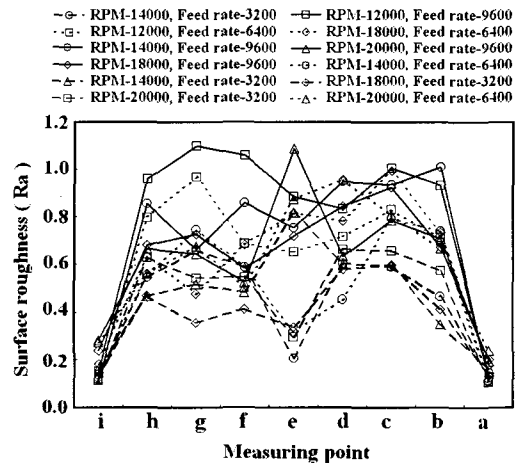


Fig. 8 Surface roughness according to measuring point (NURBS interpolation)

이상의 측정결과를 이용하여 이상가공을 나타내는 a, e, i 부분을 제외한 나머지 부분의 표면거칠기를 분산분석을 하여 Table 6에 분산분석표로 나

타내었다. 주축회전수는 10% 유의수준에서 유의하고 이송속도는 1% 수준에서도 유의하다. 즉, 표면거칠기에는 이송속도와 주축회전수가 모두 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이상의 분산분석 결과를 가지고 이송속도와 주축회전수의 모평균의 추정을 하였다. 점추정값은 이송속도가 3200mm/min 일때 0.5156, 6400mm/min 일때 0.7226, 9600mm/min 일때 0.6678 이고, 주축회전수가 12000rpm 일때 0.7086, 14000rpm 일때 0.6630, 18000rpm 일때 0.5972, 20000rpm 일때 0.5724이다.

Table 6 Surface roughness analysis of variance table (slope = 15°, 30°)

Source	S	ϕ	V	F ₀	F (0.10)	F (0.05)	F (0.01)
A	0.03465	2	0.01155	4.28608	3.29	4.76	9.78
B	0.09194	2	0.04597	17.0597	3.46	5.14	10.9
E	0.01617	4	0.00269				
T	0.14275	8					

※ · A : RPM · B : Feed rate · E : Error
 · T : Sum · S : Variation · V : Mean squared
 · ϕ : Degree of freedom

다음으로 t-분포표를 이용하여 이송속도의 90% 신뢰구간폭을 계산하면 ± 0.05823 이고, 주축회전수의 90% 신뢰구간폭을 계산하면 ± 0.05043 이다. 이송속도의 각 수준에서 모평균의 점추정값을 그래프로 그리고 신뢰구간의 폭을 붙이면 이송속도 90% 신뢰구간을 Fig. 9과 같이 나타낼 수 있고, 주축회전수도 같은 방법으로 90% 신뢰구간을 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 이송속도가 3200mm/min 일 때 가장 좋은 표면거칠기를 나타내고, 주축회전수는 12000rpm에서 표면거칠기가 가장 나쁘고, 20000rpm에서 가장 좋다. 따라서 이송속도는 3200mm/min, 주축회전수는 20000rpm에서 가장 좋은 표면거칠기를 얻을 수 있다. 다음으로 이송속도와 주축회전수의 조합에서의 모평균의 점추정을 하였다. 점추정값은 0.4458이고 90% 신뢰구간폭은 0.1361이다. 따라서 확률 90%로 이송속도 3200 mm/min, 주축회전수 20000rpm으로 가공하였을때, 표면거칠기는 신뢰구간 0.3097과 0.5816 사이에 포함될 것이라고 기대된다.

이송속도와 주축회전수를 고려한 실험에서는 표면거칠기와 함께 3차원 측정기를 이용하여 가공오차(Machining error)를 측정하였다. 가공오차란 3차원 측정기를 이용하여 측정된 좌표값에서 모델링상의 좌표값을 뺀 값이다. 가공된 3차원 형상의 가공오차를 측정하기 위해서는 시편의 X축, Y축, Z축 모두 측정하여야 한다. 그러나 Fig. 1에서 보는 바와 같이 시편형상이 Y축 방향으로는 평행하기 때문에 어느 곳을 측정해도 오차는 0(Zero)이다. 그리고 본 실험에서 사용된 고속가공기의 X축과 Z축의 구성이 X축에 Z축이 부착되어 있는 형태이고, 시편의 형상이 X축 방향으로 경사면을 이루고 있으므로 Z축만의 측정으로도 충분하기에 측정의 편의상 Z축의 가공오차만을 측정하였다. 측정 위치는 표면거칠기를 측정한 위치와 동일하다.

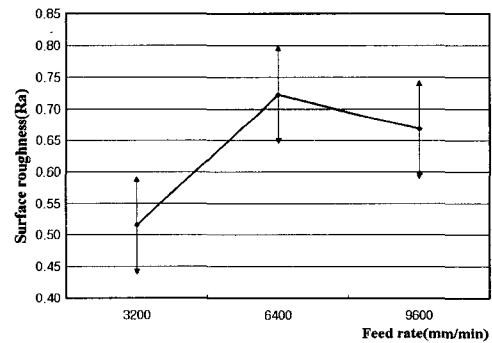


Fig. 9 Confidence interval of surface roughness for feed rate

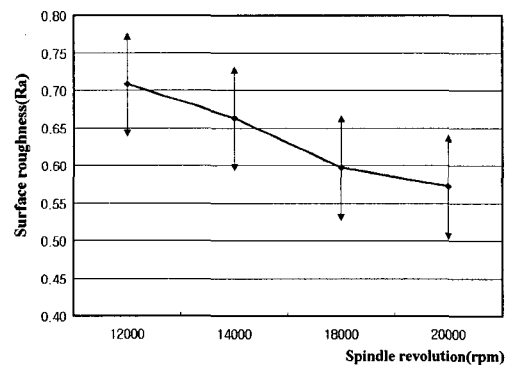


Fig. 10 Confidence interval of surface roughness for spindle RPM

Fig. 11 ~ Fig. 14에 Z축 방향의 가공오차를 그래프화하여 나타냈는데, Fig.11과 Fig. 12는 이송속도가 각각 3200mm/min, 6400mm/min인 직선 보간을 이용한 가공 결과를 나타내었고, Fig. 13과 Fig. 14는 이송속도가 각각 3200mm/min, 9600mm/min인 NURBS 보간을 이용한 가공 결과를 나타내었다. 그래프는 왼쪽이 상방향절삭이 일어나는 부분이고 오른쪽이 하방향절삭이 일어나는 부분이다. 일반적으로 가공이론에서 공구가 휘어지는 현상으로 인해 상방향절삭시는 미절삭이 일어나고 하방향절삭시는 과절삭이 일어나는 것으로 알려져 있다.⁽¹¹⁾ Fig. 11~ Fig. 14를 보면 이러한 현상이 뚜

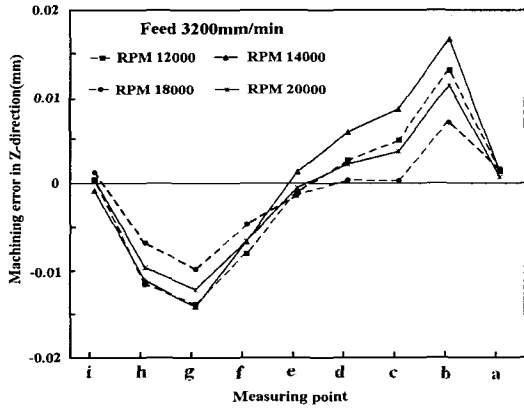


Fig. 11 Machining error in Z-direction according to cutting condition (Linear interpolation)

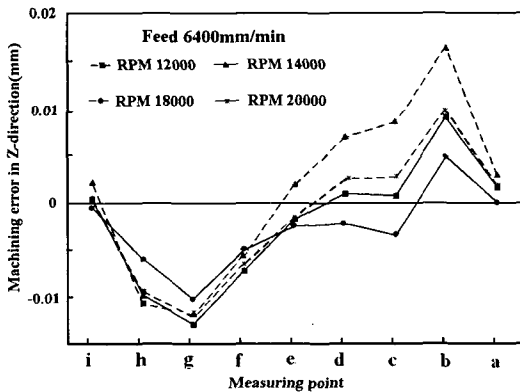


Fig. 12 Machining error in Z-direction according to cutting condition (Linear interpolation)

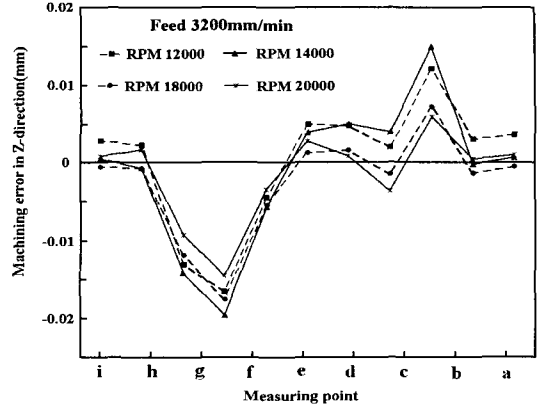


Fig. 13 Machining error in Z-direction according to cutting condition (NURBS interpolation)

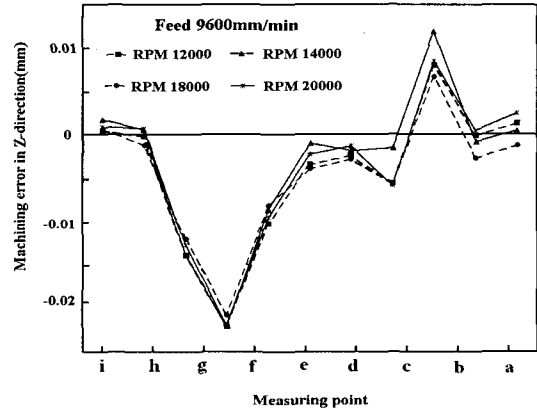


Fig. 14 Machining error in Z-direction according to cutting condition (NURBS interpolation)

렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 Fig. 11~ Fig. 14에서 보면 가공경사각이 0°인 a, e, i 평면부위는 $\pm 5\mu\text{m}$ 보다 작은 가공오차가 나타나고 있고, 평면부위를 제외한 나머지 부분은 각각의 가공조건에 대해서 가공오차의 편차가 평균적으로 $10\mu\text{m}$ 에서 $5\mu\text{m}$ 정도 나타나고 있다. 이것은 주축회전수와 이송속도는 가공오차에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다.

그리고 Fig. 11과 Fig. 13을 비교해보면 NURBS 보간을 이용하여 가공을 하더라도 가공오차에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되지만, 가공시간

은 직선보간을 이용하여 가공하였을 때보다 단축되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

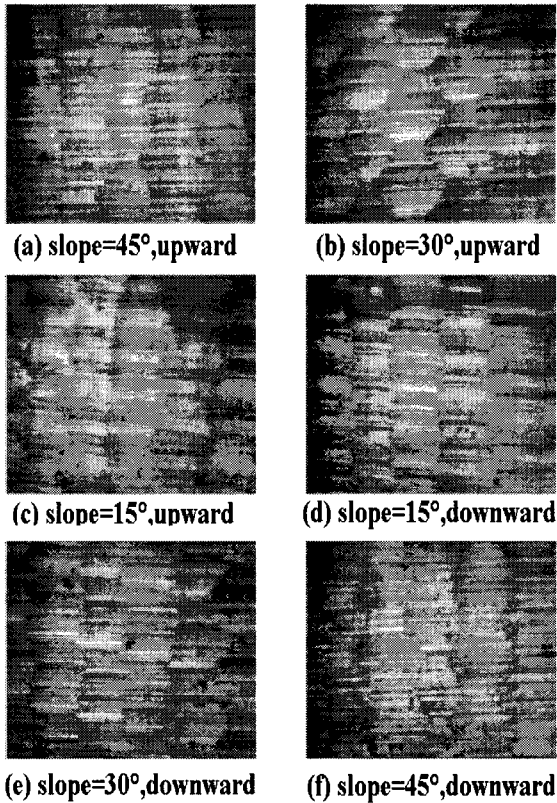


Fig. 15 Shape of machined surface

Fig. 15는 이송속도가 3200mm/min일 때의 시편의 가공표면을 공구현미경으로 촬영한 결과를 나타내었다. 6400mm/min, 9600mm/min에서도 비슷한 양상을 보여주고 있는데, 가공경사각이 작을수록 절삭흔이 사각형에 점점 가까워지고 일정함을 확인할 수 있다. 절삭흔이 일정하고 사각형 모양을 나타낸다는 것은 표면거칠기가 양호하다기 보다는 폴리싱(polishing)과 같은 가공후처리 공정시 보다 용이한 작업을 할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 국내에서 생산된 고속가공기를 이용하여 블엔드밀에 의한 절삭실험을 통해, 고속가공기의 가공조건에 따른 고속가공의 가공 특성을 파

악하고, 고속가공기의 성능을 평가하기 위해 이원배치법을 적용하여 실험을 실시하였고, 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수가 표면거칠기와 가공오차에 미치는 영향을 분산분석을 통해 분석하였다.

본 실험에서 수행한 가공조건 범위에서 각 조건에 의한 영향은 다음과 같다.

1. 이원배치법을 적용하여 실시한 본 실험 결과를 분산분석을 통해 분석한 결과, 알루미늄의 고속절삭가공에서 절삭깊이는 표면거칠기에 아무런 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있었는데, 이것은 고속가공시 절삭깊이에 따른 공구의 절삭부하를 높은 주축회전수로 공구의 절삭부하를 감소시키기 때문이다.
2. 이송속도와 주축회전수는 비교적 낮은 가공경사각(30°)에서 표면거칠기에 유의한 영향을 미치고 있다. 이송속도와 주축회전수는 절삭이 일어날 때 공구의 절삭부하에 영향을 주는 인자이며 절삭부하를 줄이면 표면거칠기가 좋아지게 된다. 본 가공실험 결과에서도 절삭부하를 줄일 수 있도록 이송속도를 줄이고 주축회전수를 높임으로써 좋은 표면조도를 얻을 수 있다.
3. 공구현미경을 이용하여 가공면을 촬영한 결과 낮은 이송속도에서 일정한 모양의 절삭흔이 관찰되었는데, 이는 후처리 공정시 용이한 작업을 할 수 있다.
4. 본 실험에서 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수를 변화시켜가며 가공실험을 한 결과 알루미늄의 고속절삭가공에서 절삭깊이, 이송속도, 주축회전수는 가공오차에 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

1. R. I. King, R. L. Vaughn, "A Synoptic view of High-Speed Machining From Salomon to the Present," Ann. ASME, pp. 1~13, Dec. 1984.

2. J. Tlustý, "High speed milling," Proceedings of the 6th Int. machine tool engineers conference(IMEC), pp. 35~60, 1994.
3. 양민양, "절삭가공 이론과 실제," 청문각, pp. 174, 183, 1997.
4. 이종찬, "고속가공기술," 한국공작기계학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 5~10, 1998.
5. J. F. Kahles, M. Field and S. M. Harvey, "High Speed Machining Possibilities and Need," CIRP Vol. 27/2/1978, pp. 551~560, 1978.
6. 고태조, 정훈, 김희술, "고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정," 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 9, pp. 135~144, 1998.
7. H. Schulz, St. Hock, "High-speed Milling of Dies and Molds - Cutting Conditions and Technology," Annals of the CIRP, Vol. 44, No. 1, pp. 35~38, 1995.
8. 박성현, "현대 실험계획법," 민영사, pp. 681~682, 2000.
9. 김경균, 강명창, 이득우, 김정석, "볼 엔드밀을 이용한 고속가공에서 금형제품의 형상가공 특성 파악," 한국정밀공학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 143~146, 1997.
10. 정훈, "고속엔드밀링에서 가공면 경계표현법을 통한 공구경로 방향 선정," 영남대학교 석사학위 논문, 1997.
11. 최병규, 전차수, 유우식, 편영식, "CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공," 회중당, pp. 357~358, 1997.
12. 박희영, 고해주, 윤헌구, 정윤교, "금형가공을 위한 고속·고정도 가공기술의 연구", 한국공작기계학회 '99년도 추계학술대회 논문집, pp. 221~226, 1999.
13. 강철희, "공작기계기술의 현재와 미래(3)," 한국정밀공학회지, Vol. 12, No. 6, pp. 5~12, 1995.
14. 손창수, 강명창, 김정석, 이득우, 황경현, 김종관, "볼 엔드밀을 이용한 난삭재의 고속가공 특성," 한국정밀공학회 '97년도 추계학술대회 논문집, pp. 139~142, 1997.