

고속가공의 표면거칠기 향상에 관한 연구

A Study on Improvement of Surface Roughness for High Speed Machining

정중윤¹⁾, 고태조²⁾, 이춘만³⁾, 정원지³⁾, 조혜영¹⁾
Jong-Yun Jung¹⁾, Tae Jo Ko²⁾, Choon Man Lee³⁾, Won Jee Chung³⁾, Haeyoung Cho¹⁾

ABSTRACT

Competitive power in manufacturing industries mainly depends on production time and quality of products. The main issue for achieving this goal is to build high speed and super accuracy machine. The machine has been developed in the aspect of hardware. However, applications in high speed machining is not sufficient to give solutions to industries in machining. This research presents a method to improve surface roughness adopting experimental design. This research finds experimental factors which have great impact on surface roughness. From the experiments cutting conditions are found for better quality of machining.

1. 서론

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계 구성 부품의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여주고, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 가격 경쟁력을 높여 준다. 그러나 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭조건의 제한으로 이러한 요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 본 연구는 최근 금형제품의 가공에 많이 사용되는 고속가공의 특성을 알아보기 위한 연구이다.

고속가공을 주변형 영역(primary deformation zone)에서 전단의 국부화(shear localization)가 완전히 일어나는 속도 이상에서의 가공으로 정의하기도 하나 이 정의는 정량적이지 못하고, 고속가공이라 함은 현재 대부분의 생산현장에서 사용되는 가공속도보다 현저히 높은 경우로 부르는 것이 일반적이다[1].

고속가공은 가공의 효율성을 추구하는 고능률 가공과 가공표면의 정밀성을 추구하는 고품위가공으로 구분되는데, 고능률 가공은 가공속도와 함께 이송속도를 증가시킴으로써 소재 제거율을 극대화시켜 가공시간을 단축시키는 방법이며, 고품위가공은 고속가공과 함께 공구경로의 간격을 감소시킴으로써 최종표면에 남는 커슥 높이를 최소화시키는 가공방법으로 폴리싱(polishing)이나, 사상가공 같은 가공 후 공정을 생략하거나 시간을 줄일 수 있다.

1) 창원대학교 산업시스템 공학부
2) 영남대학교 기계공학부
3) 창원대학교 메카트로닉스공학부

2 고속절삭 가공시편

자유곡면을 많이 갖는 금형의 절삭가공에서는 볼엔드밀을 이용하여 밀링가공을 주로 하게 되는데 이 경우 공구는 절삭방향 또는 공구표면 법선의 각도에 따라서 절삭특성이 달라지게 된다. 즉, 평면을 볼엔드밀을 이용하여 가공할 때 공구 중심부의 절삭속도는 영(zero)이 되기 때문에 절삭이 이루어지지 않게 되고, 따라서 공구의 치핑이나 마모가 빨리 발생하게 되며 가공물의 표면품질 등에 영향을 미치게 된다. 또한, 경사각이 커질수록 칩의 단면적이 커지고, 공구와 공작물간에 마찰이 심해져 공구날에 열응력을 증가시키므로 한계치 이상의 경사각에서는 공구에 걸리는 부하가 커지게 되고 공구수명에도 악영향을 미치게 되므로 가공 표면도 좋지 않게 나타난다.

이러한 사항을 고려하여 고속가공에서의 가공특성을 알아보기 위해 Fig.1과 같이 직선부분의 경사각도를 0° , 15° , 30° , 45° 로 하여 시편의 형상을 선정하였다. 고속가공시 상방향절삭과 하방향절삭의 가공특성을 파악할 수 있게 좌우 대칭인 형상으로 시편을 모델링하였다. 그리고 시편의 나머지 부분은 원호형상으로 하여, NURBS보간을 이용하여 가공하였다. Fig.2에는 시편 형상의 상세한 치수를 나타내었다.

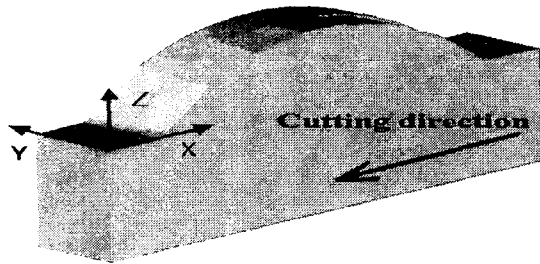


Fig. 2 시편의 모델링

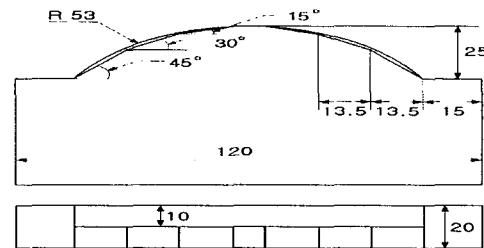


Fig. 2 시편의 도면

3. 주축회전수와 이송속도의 표면거칠기에 미치는 영향

본 연구에서 사용한 피삭재 재질은 절삭저항을 최대한 줄인 상태에서 고속가공기의 성능과 고속가공 특성을 알아보기 위해 상대적으로 연한 aluminum(Al6061)으로 선정하였다. 고정도윤곽보정기능(HPCC)을 사용하여 가공하였고 실험에 사용된 공구는 aluminum가공 전용 공구로 날수가 2개이고 지름이 6mm인 것을 사용하였다.

가공실험은 반복이 없는 이원배치법을 적용하였으며 제어인자는 주축회전수와 이송속도이다. 절삭깊이는 생산현장에서 가장 많이 사용하는 0.1mm로 하고, 이송속도의 수준수는 3수준으로, 3,200mm/min, 6,400mm/min, 9,600mm/min으로 설정하였고, 주축회전수는 16,000rpm을 제외한 12,000rpm~20,000rpm 범위내에서 2000rpm씩 증가시켜가며 4수준으로 하였다. 실험의 효율을 높이기 위해 Fig.3과 같이 시편 12개를 일체로 만들어 가공하였고 표면거칠기를 측정할 위치는 Fig. 4와 같고, 가공방향의 직각방향으로 측정하여 각각의 측정위치에 a ~ i의 부호를 정하였다. 그리고 분산분석을 이용하여 절삭깊이와 이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다.

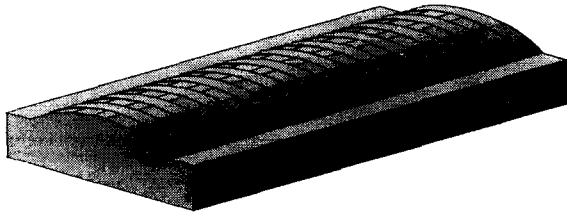


Fig. 3 실험에 사용된 시편

이송속도와 주축회전수 두인자의 수준을 조합하여 총 12회의 가공을 실시하였고, 가공순서는 난수표를 이용하여 랜덤화 하였다. 실험의 순서는 Table 1에 나타내었고, 가공조건을 정리하면 Table 2과 같다.

Table 1 절삭실험 순서

	B1 3,200mm/min	B2 6,400mm/min	B3 9,600mm/min
A1 12,000rpm	6	2	7
A2 14,000rpm	1	10	3
A3 18,000rpm	11	8	4
A4 20,000rpm	5	12	9

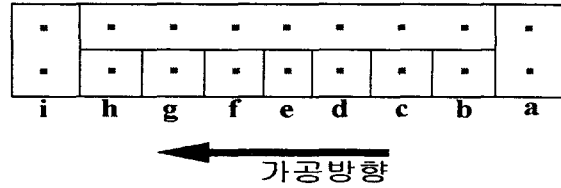


Fig. 4 시편의 측정 위치

Table 2 절삭 조건

Spindle revolution [rpm]	12,000, 14,000, 18,000, 20,000
Feed rate [mm/min]	3,200, 6,400, 9,600
Depth of cut [mm]	0.1
Pick feed [mm]	1.5
Cusp-height [mm]	0.001
Allowance	.
Tolerance [mm]	0.003

Fig. 5는 직선보간을 이용하여 가공한 부분을 측정위치에 따라 나타내었고, Fig. 6은 가공조건에 따라 나타내었다. Fig. 7은 NURBS 보간을 이용하여 가공한 부분을 측정위치에 따라 나타내었고, Fig. 8은 가공조건에 따라 나타내었다. 본 실험에서 커스 높이를 $1\mu\text{m}$ 로 하여 가공하였는데, Fig. 5 ~ Fig. 8에서 보는바와 같이 표면거칠기가 대체적으로 양호한 것을 볼 수 있다. 일반적으로 볼엔드밀을 이용하여 평면을 가공할 때보다 경사면을 가공할 때 표면거칠기가 양호하게 나오는 것으로 알려져 있으나 가공경사각이 0° 인 평면 a, e, i 위치에서 표면거칠기가 아주 양호하게 나왔다[2]. 이것은 주축의 빠른 회전으로 인한 주축의 진동 발생으로 피삭재를 원활히 절삭하지 못하고 표면을 문지르는 현상이 발생하여 표면거칠기가 양호하게 나타난 것으로 생각된다.

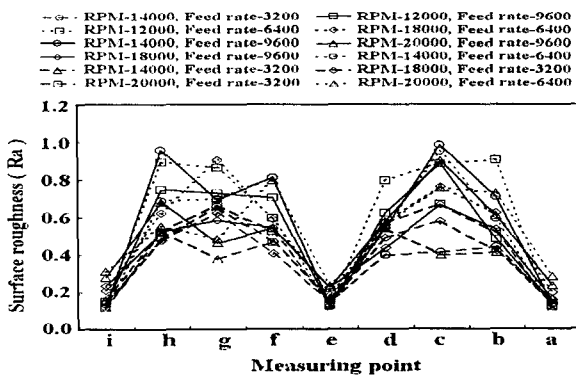


Fig. 5 각 측정위치에서의 표면조도 (직선보간)

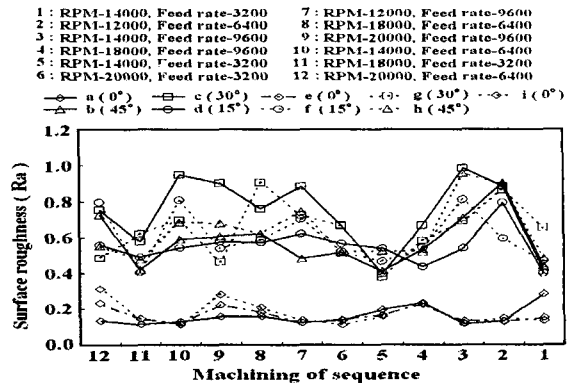


Fig. 6 절삭조건에 따른 표면조도 (직선보간)

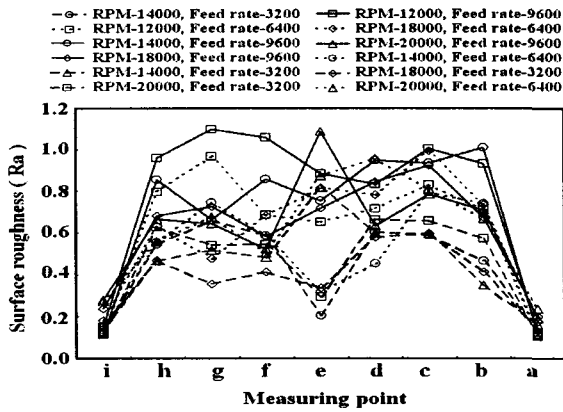


Fig. 7 각 측정위치에서의 표면조도 (NURBS 보간)

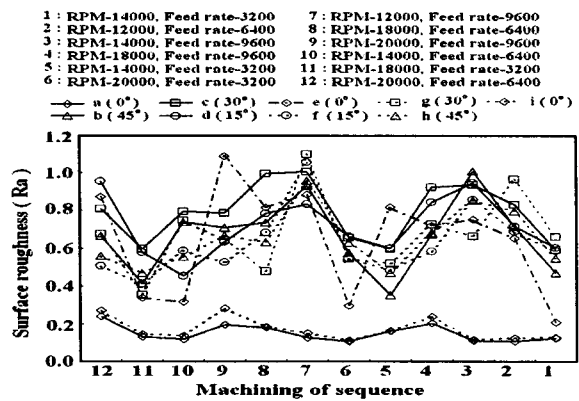


Fig. 8 절삭조건에 따른 표면조도 (NURBS 보간)

이상의 측정결과를 이용하여 a, e, i 부분을 제외한 나머지 부분의 가공경사각에 따라 분산분석표를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 경사각도별 표면거칠기의 ANOVA Table

	Source	S	ϕ	V	F_0	F(0.05)	F(0.01)
b (45°)	A	0.01784	3	0.00595	0.46311	4.76	9.8
	B	0.14080	2	0.07040	5.48333	5.14	10.9
	E	0.07703	6	0.01284			
	T	0.23566	11				
c (30°)	A	0.04507	3	0.01502	1.01606	4.76	9.8
	B	0.29739	2	0.14869	10.05638	5.14	10.9
	E	0.08872	6	0.01479			
	T	0.43117	11				
d (15°)	A	0.05393	3	0.01798	4.61567	4.76	9.8
	B	0.02852	2	0.01426	3.66088	5.14	10.9
	E	0.02337	6	0.00389			
	T	0.10581	11				
f (15°)	A	0.04957	3	0.01652	1.87706	4.76	9.8
	B	0.11909	2	0.05954	6.76404	5.14	10.9
	E	0.05282	6	0.00880			
	T	0.22148	11				
g (30°)	A	0.17114	3	0.05705	9.88852	4.76	9.8
	B	0.05326	2	0.02663	4.61616	5.14	10.9
	E	0.03461	6	0.00577			
	T	0.25901	11				
h (45°)	A	0.07102	3	0.02367	1.55534	4.76	9.8
	B	0.11522	2	0.05761	3.78508	5.14	10.9
	E	0.09132	6	0.01522			
	T	0.27756	11				

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

전체적으로 가공경사각이 15°인 부분에서 표면거칠기가 양호한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있는데 이는 고태조[3]와 정훈[4]의 연구에서도 유사한 결과가 발표되었다. 이러한 결과는 불엔드밀로 경사면을 가공할 때 공구와 피삭재가 접촉하여 절삭이 일어나는 부분이 다르기 때문이다. 전체적으로 가공경사각이 30°이하의 낮은 각도에서 이송속도와 주축회전수는 표면거칠기에 영향을 미치는 경향을 나타내고 있다.

이상의 분산분석 결과를 가지고 이송속도와 주축회전수의 모평균의 추정을 하였다. 점추정값은 이송속도가 3,200mm/min 일때 0.51564, 6,400mm/min 일때 0.72256, 9,600mm/min 일때 0.66776 이고, 주축회전수가 12,000rpm 일때 0.70862, 14,000rpm 일때 0.66303, 18,000rpm 일때 0.59720, 20,000rpm 일때 0.57243이다. 다음으로 t-분포표[5]를 이용하여 이송속도에 대한 표면거칠기의 95% 신뢰구간폭을 계산하면 ±0.07327이고, 주축회전수에 대한 표면거칠기의 95% 신뢰구간폭을 계산하면 ±0.06346이다. 이송속도의 각 수준에서 모평균의 점추정값과 신뢰구간의 폭을 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있고, 주축회전수도 같은 방법으로 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다.

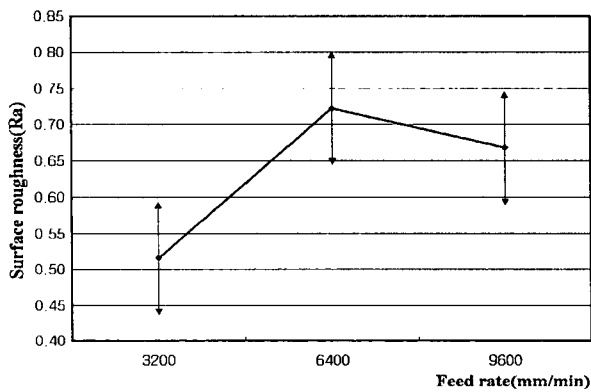


Fig. 9 이송속도에 대한 표면거칠기의 추정

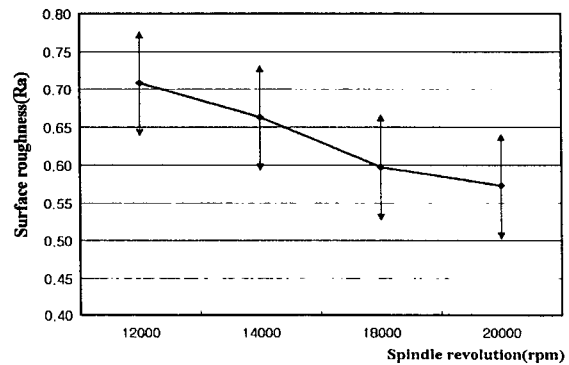


Fig. 10 주축회전수에 대한 표면거칠기의 추정

이 실험에서 표면거칠기와 함께 3차원 측정기를 이용하여 가공오차(Machining error)도 측정하였다. 본 실험에서 사용된 고속가공기의 특성상 Z축만의 측정으로도 충분하기에 측정의 편의상 Z축의 가공 오차만을 측정하였다.

Fig. 11과 Fig. 12에 Z축 가공오차를 그래프화하여 나타내었다. Fig. 11과 Fig. 12의 그래프는 왼쪽이 상방향절삭이 일어나는 부분이고 오른쪽이 하방향절삭이 일어나는 부분이다. 공구가 휘어지는 현상으로 인해 상방향절삭시는 미절삭이 일어나고 하방향절삭시는 과절삭이 일어났다. Fig. 11과 Fig. 12를 보면 이러한 현상이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있고 가공경사각이 0°인 a, e, i 평면부위는 ±5μm 보다 작은 가공 오차가 나타나고 있고, 평면부위를 제외한 나머지 부분은 각각의 가공조건에 대해서 가공오차의 편차가 평균적으로 10μm에서 5μm정도 나타나고 있다. 이것은 주축회전수와 이송속도는 가공오차에 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수 있다. 그리고 Fig. 11과 Fig. 12를 비교해보면 NURBS보간을 이용하여 가공을 하더라도 가공오차에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되지만, 가공시간은 직선보간을 이용하여 가공하였을 때보다 단축되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

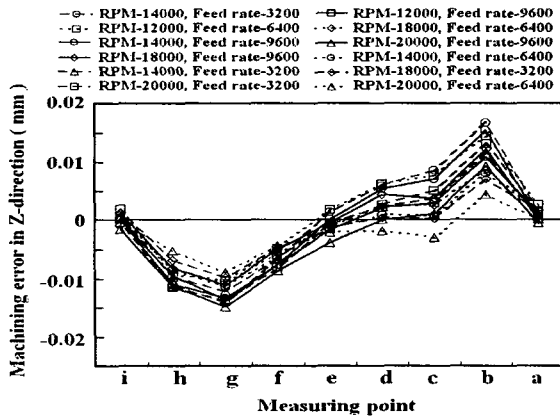


Fig. 11 Z축 방향의 가공오차
(직선 보간)

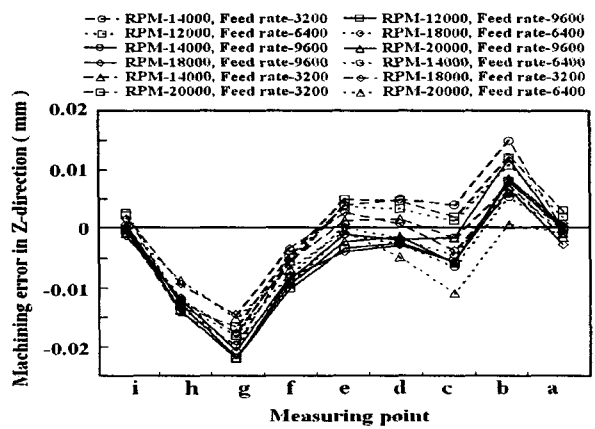


Fig. 12 Z축 방향의 가공오차
(NURBS 보간)

4. 결론

경사각도 30°이하 낮은 구간에서 RPM의 변화는 표면 거칠기에 영향을 미치며, 20,000rpm일 때 가장 양호한 표면거칠기(Ra 0.5724±0.0634 , 신뢰수준 95%)를 나타내었다. Feed 또한 경사각도 30°이하 낮은 구간에서 표면거칠기에 영향을 미치며, 3,200mm/min일 때 가장 양호한 표면거칠기(Ra 0.5156±0.0668 , 신뢰수준 95%)를 나타내었고, RPM과 Feed는 Z축 가공 오차에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그리고 공구가 휘어지는 현상으로 인해 상방향절삭시는 미절삭이 일어나고 하방향절삭시는 과절삭이 일어나며, NURBS보간을 이용하여 가공을 하더라도 가공오차에는 큰 영향을 미치지 않는다고 판단되지만, 가공시간은 직선보간을 이용하여 가공하였을 때보다 단축되는 것을 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

- [1] 양민양, 절삭가공 이론과 실제, 청문각, pp. 172, 1997.
- [2] 권병두, “실험계획법을 이용한 고속가공의 가공정밀도 향상에 관한 연구”, 창원대학교 석사학위 논문, 2002.
- [3] 고태조, 정훈, 김희술, “고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정”, 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 9, pp. 135-144, 1998.
- [4] 정훈, “고속엔드밀링에서 가공면 경계표현법을 통한 공구경로 방향 선정”, 영남대학교 석사학위 논문, 1997.
- [5] 박성현, 현대 실험계획법, 민영사, pp. 681-682, 2000.

후기

본 연구는 과학기술부 · 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.