

고속가공 가공 정밀도 예측에 관한 연구

이춘만^{*}, 류승표[†], 정원지^{‡‡}, 정종윤⁺⁺⁺, 고태조⁺⁺⁺⁺

A Study about an estimate about machining accuracy of High Speed Machining

C. M. Lee^{*}(Changwon National Univ.), S. P. Ryu[†](Graduate School Changwon National Univ.), W. J. Chung^{‡‡}(Changwon National Univ.)
J. Y. Jung⁺⁺⁺(Changwon National Univ.), T. J. Ko⁺⁺⁺⁺(Yeungnam Univ.)

Abstract

High-speed machining is one of the most effective technology 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 and an estimate about machining accuracy of high-speed machining.

Key Words : High-speed Machining, STD11, Surface Roughness

1. 서 론

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 각종 기계 구성 부품의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도의 개선은 제품의 부가 가치를 높여주고, 생산성의 개선은 가공경비를 감소시켜 가격 경쟁력을 높여 준다. 그러나 기존의 일반절삭에 의해서는 각종 공구 및 공작물의 재질에 따른 절삭 조건의 제한으로 이러한 요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 관점에서 고속가공은 향·정삭 가공 개념 없이 생산성 향상과 밀접한 관계가 있으며 자동차, 항공기, 전기, 전자산업 등에 적용되어 가공 능률 향상과 공정감소로 인한 경비절감을 꾀할 수 있어 최근 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 금형제품은 단품 및 주문 생산에 의존하고 있어, 제품

의 정밀도 향상, 납기단축 그리고 제조경비 절감(Cost down)을 가져올 수 있는 제작방식을 채택하지 않으면 경쟁력을 잃고 만다. 이러한 고정밀 가공, 고능률 가공을 지향하게 되면서 대두된 고속가공(High-speed machining)은 생산비용 및 생산시간을 단축시키는 가공기술을 말한다. 이에 최근 국내 공작기계 제작사와 금형업체들은 고품위 및 고능률 가공을 실현할 수 있는 제작방식으로 고속가공기술, 고속가공기로 눈을 돌리고 있으며 거기에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 본 논문의 목적은, 국내에서 개발된 고속가공기를 이용하여 가공조건에 따른 고속가공기의 특성을 파악하고 고속가공기의 성능을 평가하는데 있다. 또한 표면 거칠기와 같은 가공정도에 미치는 절삭조건이 이 속도와 주축회전수로 결정할 때 이 두 인자에 대한 근사화식을 도출하여 사용자가 가공을 통해 측정을 하지 않아도 임의의 가공조건에서 가공정도를 예측할 수 있는 프로그램을 만들고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 고속가공기는 수직형머시닝센터로 최대 주축회전수 20,000rpm., 최대 급속·절삭 이송 속도 40m/min 이다. 사용된 공구는 고속가공 전용 공구로

* 창원대학교 기계설계공학과

E-mail : cmlee@srkim.changwon.ac.kr

TEL : (055)279-7572

+ 창원대학교 기계설계공학과 대학원

++ 창원대학교 기계설계공학과

+++ 창원대학교 산업시스템공학과

++++ 영남대학교 기계공학부

날수가 2개인 고속가공용 ϕ 6-볼엔드밀(SANDVIK)이고, 시편재질은 일반 금형업체에서 많이 사용되는 냉간 공구강인 STD11 ($HRC45$)을 사용하였다. 본 실험에 사용된 장비 및 절삭조건은 Table 1과 같다.

Table 1 The Specification of Experimental Equipment and Cutting Condition

Machine Tool	Vertical Machining Centers (ACE-M500, DAEWOO Heavy Industries & Machinery Ltd)
Spindle Speed(rpm)	10000, 12000, 14000
Feed per tooth(mm/tooth)	0.1, 0.2, 0.3
Depth of Cut(mm)	0.1
Pick-Feed(mm)	0.15
Cusp Height(mm)	0.001
Tool	HSM 2 Ball Endmill Diameter : ϕ 6
Workpiece	STD11($HRC45$)

수직형머시닝센터에서 볼엔드밀로 가공시 최적의 경사각을 $10^\circ \sim 20^\circ$ 로 설정함으로서 고속가공시 절삭의 최적화를 이를 수 있다고 보고되고 있다.⁽⁴⁾ 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 시편 형상의 직선 경사부분을 $45^\circ, 30^\circ, 15^\circ$ 로 설정하여 경사각에 따른 가공 특성을 살펴보았다. 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 Fig. 1과 같이 좌우 대칭인 형상으로 시편을 결정하였다. 표면거칠기를 측정한 위치는 Fig. 2와 같고, 가공방향의 직각 방향으로 측정하여 각각의 측정위치에 a ~ i의 부호를 정하였다.

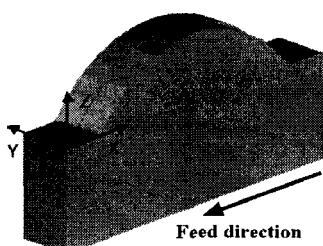


Fig. 1 Modeling of sample

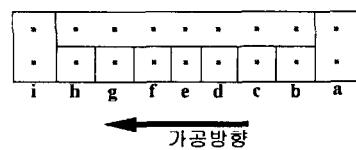


Fig. 2 Measuring point

본 연구의 실험은 실험계획법을 적용하여 실험을 실시하고, 측정된 데이터를 분산분석(Analysis of variance)을 통해 분석하였다. 본 논문의 실험에서 이송속도, 주축회전수를 제어인자로 하였는데, 이는 표면거칠기에 가장 큰 영향을 주는 인자이기 때문이다. 본 연구에서는 각각의 rpm에 대한 날당이송량의 변화를 주어 2가지의 실험을 실시하였다. 각 실험에서 인자의 수준은 Table 2 ~ Table 3과 같이 결정하였으며, 가공순서는 난수표를 사용하여 완전 랜덤화 하여 실시하였다.

첫 번째 실험에선 비교적 높은 이송속도에서 가공을 실시하였기 때문에 공구마모를 고려 하나의 시편당 1개의 공구를 사용하였다. 두 번째 실험에선 금형업체의 효율적인 금형가공을 위해 현재사용중인 공구의 수명을 최대로 생각한 공구회사의 공구 추천속도를 고려하여 하나의 공구로 가공 실험을 실시하였다. 따라서, 본 연구에서는 공구마모를 무시하였다.

Table 2 Factors and levels for first experimental machining according to RPM and feed per tooth
(Depth of cut : 0.1mm)

Factor		Level			
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	RPM	rpm	10000	12000	14000
B	Feed per tooth	mm/tooth	0.1	0.2	0.3

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

Factor		Level			
Sign	Factor	Unit	1	2	3
A	RPM	rpm	10000	12000	14000
B	Feed per tooth	mm/tooth	0.06	0.08	0.1

앞에서 언급한 각 조건에서 절삭한 시편을 가공표면을 표면조도기(Surftest SV-600, Mitutoyo)를 이용하여 중심선평균표면거칠기(R_a)로 피크피드(pick feed) 방향에서 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 주축회전수와 날당이송량에 관한 가공실험

주축회전수와 날당이송량에 관한 가공실험에서 반복이 없는 이원배치법을 적용하여 실험을 실시하였다. 그리고 분산분석을 이용하여 주축회전수와 이송속도가 표면거칠기에 미치는 영향을 분석하였다. 본 실험에서 Cusp 높이를 0.001mm로 설정하여 가공하였다.

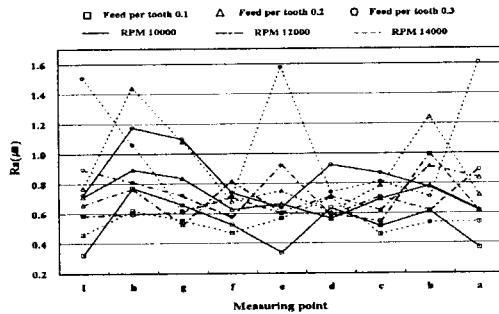


Fig. 3 Surface roughness according to measuring (Linear part)

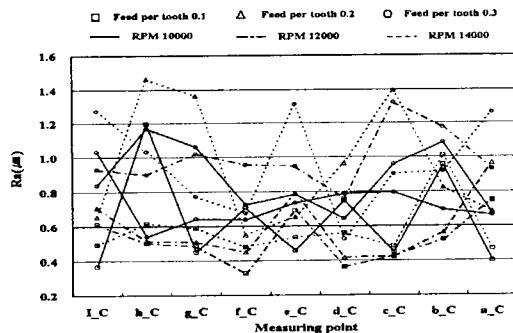


Fig. 4 Surface roughness according to measuring p (Curve part)

Fig. 3과 Fig. 4는 직선 보간으로 가공한 직선 부분과 곡선 구간의 표면거칠기를 그래프로 나타낸 것이다. 전체적으로 이전 가공⁽⁶⁾에 비해 불규칙한 표면거칠기를 나타내었으며 몇 가지의 가공조건을 제외하고는 평면보다는 경사구간의 표면거칠기가 좋게 나타났다. 또한 높은 이송속도에서 상대적으로 나쁜 표면거칠기를 나타내었다. 이는 가공하는 소재가 난삭재임에도 불구하고 이송속도를 높게 잡아 무리한 가공조건으로 가공하였기 때문에 결과 및 소재에 좋지 않은 영향을 준 것으로 분석된다.

Table 4는 주축회전수와 이송속도에서의 표면거칠기에 대한 분산분석표이다. 분산분석 결과 상향 30°(c)구

간과 하향 45°(h)구간에서 날당이송량이 표면거칠기에 영향이 미치는 것으로 나왔다. 상향 15°(d)구간과 평면구간(e)에서 상대적으로 주축회전수보다 날당이송량이 영향이 있는 것으로 나타났다.

Table 4 Surface roughness analysis of variance

Source	S	ϕ	V	F_0	F(0.10)	F(0.05)
(45°)	A	0.07917	2	0.03959	1.55363	4.32
	B	0.01887	2	0.00944	0.37035	4.32
	E	0.10192	4	0.02548		
	T	0.19997	8			
(30°)	A	0.01243	2	0.00621	1.20999	4.32
	B	0.011373	2	0.05687	11.07395	4.32
	E	0.02054	4	0.00514		
	T	0.14670	8			
(15°)	A	0.03480	2	0.01740	1.32992	4.32
	B	0.06068	2	0.03034	2.31914	4.32
	E	0.5233	4	0.01308		
	T	0.14780	8			
(0°)	A	0.31539	2	0.15770	1.70541	4.32
	B	0.67938	2	0.33969	3.67360	4.32
	E	0.36987	4	0.09247		
	T	1.364649	8			
(15°)	A	0.01096	2	0.00548	0.57664	4.32
	B	0.00293	2	0.00147	0.15437	4.32
	E	0.03801	4	0.00950		
	T	0.05190	8			
(30°)	A	0.16253	2	0.08127	2.31902	4.32
	B	0.00509	2	0.00254	0.07259	4.32
	E	0.14017	4	0.03504		
	T	0.30779	8			
(45°)	A	0.00579	2	0.00290	0.32290	4.32
	B	0.08484	2	0.04242	4.73079	4.32
	E	0.03587	4	0.00897		
	T	0.12650	8			

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

3.2 경제적 이송속도 구간에서의 가공실험

Fig. 5와 Fig. 6은 가공시편의 직선부분과 곡선부분을 측정위치에 따라서 표면거칠기를 그래프화 하여 나타내 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 보면 이송속도와 주축회전수 고려한 가공 실험에 의해 명확한 W자 형태를 나타내고 있으며, 각 가공조건에 대해서 좋은 가공 정도를 보이고 있다. 이는 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험 때보다 공구의 마모가 일어나지 않았기 때문에 나온 결과라고 볼 수 있다. 하지만, 표면조도가 경사구간을 제외한 평면구간에서 좋지 않은 결과를 나타낸다. 이는 공구비를 절약하면서 고속가공을 실시할 수는 있지만 평면을 가지는 금형에 대해서는 좋은 표면거칠기를 얻을 수는 없다. 일반 금형업체에서 좋은 표면품질을 얻는 것과 생산비용을 줄이는 문제를 잘 이용한다면 보다 효율적인 고속가공의 이점을 얻을 수 있을 것이다. 날당이송량과 주축회전수의 가공 영향을 확인하기 위해 분산분석을 통해 분석한 결과 날당이송량과 주축회전수는 표면거칠기에 전체적으로 유의하지 않게 나타났다. Table 5와 Table 6은 날당이송량과 주축회전수에 대한 분산분석 결과를 나타낸다. Table 5는 전체 구간에 대한 분산

분석 결과이고, Table 6은 좋지 않은 표면거칠기를 가지는 평면구간을 제외한 경사구간에 대한 분산분석 결과를 나타내었다.

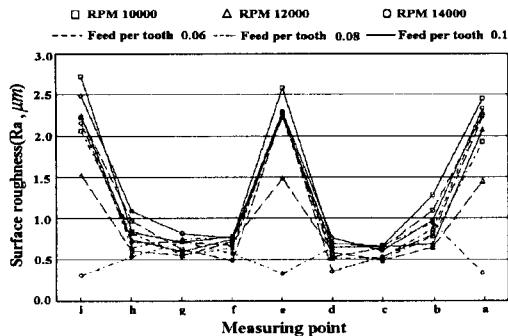


Fig. 5 Surface roughness according to measuring (Linear part)

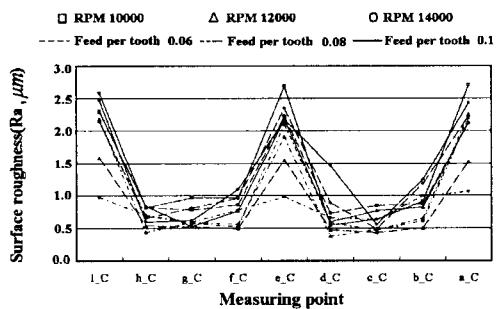


Fig. 6 Surface roughness according to measuring (Curve part)

Table 5 Surface roughness analysis of variance tab section)

Source	S	φ	V	F ₀	F(0.10)	F(0.05)
A	0.08721	2	0.04361	0.69130	4.32	6.94
B	0.18842	2	0.09421	1.49349	4.32	6.94
E	0.25232	4	0.06308			
T	0.52795	8				

Table 6 Surface roughness analysis of variance t (slope section)

Source	S	φ	V	F ₀	F(0.10)	F(0.05)
A	0.01083	2	0.00541	1.47485	4.32	6.94
B	0.03001	2	0.01501	4.08812	4.32	6.94
E	0.01468	4	0.00367			
T	0.05552	8				

* A : RPM · B : Feed per tooth · E : Error · T : Sum

· S : Variation · φ : Degree of freedom · V : Mc squared

분산분석을 실시한 결과 날당이송량과 주축회전수는 영향을 미치지 않는 것으로 나왔다. 하지만, 절삭깊이와 이송속도를 고려한 가공실험과 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공과 마찬가지로 이는 고속가공에서 표면거칠기의 가공 및 측정 오차값과 분산분석이 데이터 분석용이기 때문에 가공결과와의 오차가 발생할 수 있다. 즉, 일반적인 연구결과를 고려해볼 때 인자들의 가공에 미치는 영향이 일반적인 가공들보다 줄어들었다고 생각할 수 있다. 즉, STD11이라는 소재에 특성상 날당이송량과 주축회전수가 가공에 미치는 영향이 일반적인 가공들보다는 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반 금형업체에서 STD11 소재로 가공을 할 때 시간 및 비용을 줄이기 위해 고속가공을 하는 것이 유리하다는 것을 증명해주고 있다.

그리고 인자들의 영향이 줄어들었다고 판단했을 때 이송속도와 주축회전수를 고려한 가공실험과 유사하게 상방향 15° 구간(d)일 때와 하방향 45° 구간(h)에서 상대적으로 B인자(날당이송량)의 영향이 나타났다. 그리고, Fig. 29의 표면거칠기 그래프에서 각각의 상대구간인 상방향 15° 구간(d)에 대해서는 하방향 15° 구간(f) 하방향 45° 구간(h)에 대해서는 상방향 45° 구간(b)을 비교해보면 영향을 미치는 상방향 15° 구간(d)과 하방향 45° 구간(h)의 표면거칠기가 더 좋게 나타났음을 확인할 수 있다. 즉, 상방향 절삭시는 15° 이하의 낮은 각도에서 날당이송량이 표면거칠기에 영향을 미치고, 하방향 절삭시는 45° 이상의 높은 구간에서 날당이송량이 표면거칠기에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이상의 측정결과를 이용하여 표면거칠기에는 이송속도와 주축회전수가 일부 각도 구간에 대해서 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

3.3 가공 정밀도 예측 프로그램

본논문에선 주축회전수, 이송속도가 특성치인 표면거칠기에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석은 실험계획법 중에서 이원배치법(Two-way Factorial Design)을 적용하였고, 분산분석을 이용하였다. 이 경우 표면거칠기는 주축회전수와 이송속도가 어느정도 영향을 미치는 것으로 나왔다. 실제로 특성치 즉, 표면거칠기에 미치는 원인들은 무수히 많지만 주축회전수와 이송속도만 그 특성치에 영향을 미친다고 가정하면 주축회전수와 이송속도에 대한 표면거칠기의 함수를 측정한 Data를 바탕으로 근사함수의 도출이 가능할 것이다. 이는 실험으로써 획득한 측정 Data값뿐만 아니라 같은 실험인자내에서 조건을 달리 하여도 그에 해당하는 Data를 근사화할 수 있다는 말이 된다. 예를 들어 주축회전수를 10000, 12000, 14000rpm으로 그리고 날당이송량이 0.06, 0.08, 0.1mm/tooth일 때 9가지의 실험 조건에 대한 실험을 실시하여 표면거칠기의 Data를 얻었을 때 다른 주축회전수와 날당이송량인 경우, 즉 11000rpm,

0.09mm/tooth일 때의 표면거칠기를 알고 싶을 때 가공을 실시하여 표면거칠기를 측정하지 않아도 사용자가 그 표면거칠기를 어느정도 예측할 수 있다는 뜻이다. 결국 이 값은 실험의 결과를 바탕으로 한 근사화값이기 때문에 실제 그 가공조건에서 가공한 결과와 다를 수도 있지만 신뢰구간 폭 안의 값일 것이다. 그리고 그 실험의 횟수가 증가하면 증가할수록 Data의 누적으로 인해 그 값은 더 정확해 질 것이다.

만약, 가공인자가 절삭깊이와 이송속도 일 때 또는 공구와 주축회전수 등과 같은 경우도 특성치에 그 가공조건들만 영향을 미친다고 가정을 하면 위에서 설명한 내용을 바탕으로 근사화식을 도출해 낼 수 있을 것이다.

$$f(x) = a_0 x^{a_1} x^{a_2} \quad \text{식 (1)}$$

식 (1)은 앞서 설명한 근사화식을 나타내기 위한 다중비선형함수의 역방정식이다. 다중선형함수로 나타내기 위해 양변에 \log 를 취하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\log y = \log a_0 + a_1 \log x_1 + a_2 \log x_2 \quad (2)$$

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + e$$

이러한 방정식은 두 개 이상의 변수를 갖는 함수의 실험값을 보간하는 데 특히 유용하다. 이러한 2차원의 경우 회귀분석은 평면으로 된다. 앞의 경우와 같이 계수들의 최적값은 식 (3)과 같은 잔차의 제곱합을 고려함으로써 결정된다.

$$R = \sum_{i=0}^N [y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}]^2 \quad (3)$$

그리고, 각 미지계수들에 대한 편 미분을 취하면 식 (4)와 같다.

$$\frac{\partial R}{\partial a_0} = -2 \sum_{i=0}^N |y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}|^2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_1} = -2x_{1i} \sum_{i=0}^N |y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}|^2$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_2} = -2x_{2i} \sum_{i=0}^N |y_i - a_0 - a_1 x_{1i} - a_2 x_{2i}|^2$$

잔차의 제곱합이 최소가 될 때의 계수들은 이러한 편미분들이 0으로 될 때의 값으로 결정되며, 이러한 결과는 식 (5)와 같은 행렬식으로 표현될 수가 있다.

$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & A_{1,3} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & A_{2,3} \\ A_{3,1} & A_{3,2} & A_{3,3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서

$$A_{1,1} = N, \quad A_{1,2} = \sum_{i=1}^N x_{1i}, \quad A_{1,3} = \sum_{i=1}^N x_{2i},$$

$$A_{2,1} = \sum_{i=1}^N x_{1i}, \quad A_{2,2} = \sum_{i=1}^N (x_{1i})^2, \quad A_{2,3} = \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i},$$

$$A_{3,1} = \sum_{i=1}^N x_{2i}, \quad A_{3,2} = \sum_{i=1}^N x_{1i} x_{2i}, \quad A_{3,3} = \sum_{i=1}^N (x_{2i})^2$$

$$z_1 = \sum_{i=1}^N y_i, \quad z_2 = \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i, \quad z_3 = \sum_{i=1}^N x_{2i} y_i$$

이다.

두 개 이상의 변수를 갖는 경우도 이렇게 다중 선형근사함수로 나타내어 위에서 설명한 a_0 , a_1 과 a_2 를 도출하는 방법을 사용함으로써 식(1)과 같은 형태의 역 방정식을 다중선형함수의 형태로 변환시킴으로써 다중비선형의 근사함수를 도출해 낼 수 있다.

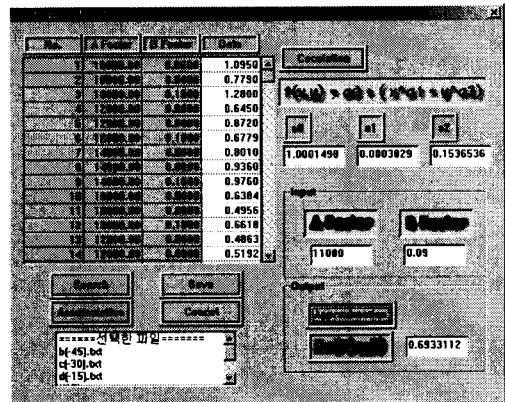


Fig. 7 The estimate program about cutting cond (RPM, Feed per tooth)

Fig. 7은 위에서 설명한 이론을 바탕으로 제작한 프로그램이다. 사용한 Data는 경제적 이송속도 구간에서의 가공실험의 표면거칠기이다. 좋지 않은 표면거칠기를 가지는 평면구간을 제외한 경사구간에서의 표면거칠기를 입력하였다.

11000rpm과 날당이송량 0.09mm/tooth에 대한 표면거칠기의 값이 근사식화 과정에 의해 약 0.6933112 μm 의 값이 나오게 된다. 여기서 나온 표면거칠기는 경제적 이송속도 구간에서의 가공실험 Data에 대한 근사값이기 때문에 실제로 위 조건에서 가공한 경우의 표면거칠기와 다를 수도 있다. 만약 Data가 계속 축적 된다면 보다 정확한 표면거칠기를 예측 할 수 있을 것이다. 그리고 Factor와 Data가 꼭 RPM, 날당이송량과 표면거칠기가 아닌 다른 Factor들과 특성치에 대해서도 계산이 가능하다. 역시 다른 Factor들에 대해서도 Data를 축적 시키는 과정을 통해 정확한 특성치를 예측 할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내에서 생산된 고속가공기를 이용하여 볼엔드밀에 의한 STD11 절삭실험을 통해, 고속가공기의 가공조건에 따른 고속가공의 가공 특성을 파악하고, 이송속도, 주축회전수가 표면거칠기에 미치는 영

향을 분산분석을 통해 분석하였으며, 축적된 Data를 바탕으로 표면거칠기와 같은 특성치를 예측할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

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

1. STD11과 같은 난삭재인 경우 가공 시간의 단축을 위해 무리한 가공조건으로 가공 할 시 공구와 시편에 좋지 않은 영향을 미침을 알 수 있었다. 이는 적절한 가공 조건 선정의 중요성을 의미한다.

2. STD11의 경제적 이송속도 구간에서의 가공 실험 결과에선 평면구간의 표면거칠기가 양호하지 못한 것을 확인하였다. 이는 일반 금형업체에서 효율적인 가공을 위해서는 경제적인 측면과 표면품질을 고려하여 적절한 선택을 한다면 고속가공의 이점을 얻을 수 있을 것이다.

3. STD11 가공실험 결과를 분산분석을 통해 분석한 결과 날당이송량(이송속도), 주축회전수는 표면거칠기에 AI과 같은 연질 소재보다 적은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 STD11 가공시 일정범위 안에서는 표면거칠기에 영향이 줄어듦으로 고속가공의 적용이 유리함을 확인하였다.

4. 여러 가지 절삭조건 중 주축회전수와 이송속도만 표면거칠기에 영향을 준다고 가정을 하여 실현한 Data에서 근사화 식을 유도함으로써 어느 임의의 조건에서의 표면거칠기를 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

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, Dec.1984, pp.1 ~ 13.
2. J. Tlusty, "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. 고태조, 정훈, 김희술, "고속 볼엔드밀링에서 공구마모를 고려한 공구의 가공경사각 선정", 한국정밀공학회지, Vol. 15, No. 9, pp. 135 ~ 144, 1998.
5. 이춘만, 최치혁, 정원지, 정종윤, 고태조, 김태영, 고속 절삭가공기술개발, 한국공작기계학회 "2002년도 춘계 학술대회 논문집", pp. 266 ~ 271, 2002.
6. 이춘만, 최치혁, 정원지, 정종윤, 고태조, 김태영, STD11 금형강의 고속가공에서 가공정밀도 향상에 관한 연구, 한국공작기계학회 "2002년도 추계학술대회

논문집, pp. 329 ~ 334, 2002.

7. Milton C.Shaw, Metal Cutting Principles, 1986.

8. P.Mathew and P.L.B.Oxley, "Predicting the Effects of Very High Cutting Speeds on Cutting Forces, etc.", CIRP Vol.31/1/1982, pp.49 ~ 52.

9. J. F. Kahles, M. Field and S. M. Harvey, "High Speed Machining Possibilities and Need", CIRP Vol.27/2/1978, pp.551 ~ 560.

10. 이종찬, "고속가공기술", 한국공작기계학회 '98년도 춘계학술대회 논문집, pp. 5 ~ 10, 1998.

11. 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.

12. 김경균, 강명창, 이득우, 김정석, "볼 엔드밀을 이용한 고속가공에서 금형제품의 형상가공 특석파악", 한국정밀공학회 '97추계학술대회 논문집, pp. 143 ~ 146, 1997.

13. 정훈, "고속엔드밀링에서 가공면 경계표현법을 통한 공구경로 방향 선정", 영남대학교 석사학위 논문, 1997.

14. 이춘만, 권병두, 고태조, 정종윤, 정원지, "실험계획법을 이용한 고속가공의 가공정밀도 향상에 관한 연구", 한국정밀공학회회지, Vol. 19, No. 7, pp. 88 ~ 96, 2002.