

Ball End Mill 가공의 표면거칠기 제어 알고리즘 개발 A Development of Algorithm for Control of Surface Roughness on Ball End Mill

오영생(광주기능대), 박창언(목포대학교), 김일수(목포대학교),
정영재(목포대학교), 손준식(목포대학교 대학원)

Oh Young-Saeng(KwangJu Poly-technic College), Paek Chang-Eun(Mokpo National Univ.), Kim Il-Soo (Mokpo National Univ.), Jeong Young-Jae(Mokpo National Univ.), Son Joon-Sik(Graduate School, Mokpo National Univ.)

Abstract

One of the crucial problems that must be solved in a computerised unmanned machining environments requires the development of algorithm in order to predict the reliable cutting conditions on surface roughness. This paper is to develop the mathematical models for choosing the suitable cutting conditions and assist a comprehensive understanding of its machinability properties for cutting process by Ball End Mill. The mathematical equations developed to predict the surface roughness was compared with the experimental results. It has been found that theoretical results obtained from the empirical equations agree with the experimental results of surface roughness.

1. 서 론

일반적으로 볼엔드밀에 의한 가공면 표면거칠기는 기하학적으로 인선(tooth)의 이송방향으로 각 인선 하나의 피드마크(feed mark)로 표시되는 경우와, 이송방향과 직각방향인 pick feed방향에서 cusp에 의한 표면거칠기를 표현하는 두 가지 방법이 있다. 이송방향의 표면거칠기는 절삭날부의 날끝형상과 이송속도로서 표현되는 함수이며, pick feed방향의 표면거칠기는 볼엔드밀의

직경과 pick feed의 크기로 결정되는 함수인데 이러한 확정인자에 의해 계산되어지는 표면거칠기를 이론적 표면거칠기라 한다¹⁻²⁾. 실제 표면거칠기에 영향을 미치는 요소들은 커터의 진동, 칩(chip)의 형상, 소재의 성질, 절삭공구의 날끝 형상이 있으며, 이들 요소들 변화에 표면거칠기 변화 측정 및 정도를 파악하는데 상당히 어려움이 있다.

또한 볼엔드밀은 곡면가공을 할 때 주로 사용되는 절삭공구로써 CNC가공의 생산성과 안정성을 높이기 위한 성능평가나 절삭조건 변화에 의한 절삭력 등 이론적인 해석과 현상규명에 치중되었다. 볼엔드밀 작업은 금형을 제작할 때 기계작업으로서는 최종 정삭작업에 사용되므로 가공면의 표면거칠기 평가는 중요한 요소이다. 하지만 볼엔드밀을 이용하여 최종 정삭작업시 절삭조건에 표면거칠기에 관한 연구가 미진한 실정이다. 따라서 경사면각도의 변화에 따라 여러 절삭조건을 달리할 때 나타나는 표면거칠기의 관계를 구명하기 쉽게 절삭조건을 결정할 수 있는 실험식을 개발하여 오늘날 산업현장에서 자동화 시스템개발에 많은 연구가 이루어지고 있다³⁾.

본 연구에서는 요인사험(factorial design) 실험방법을 이용하여 저탄소강 시험재료를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험결과를 기초로 곡면가공에 요구되는 표면거칠기에 최적의 절삭조건을 제시하고자 수학적 모델 개발하였다. 통계학 프로그램인 SAS를 이용하여 직선 및 곡선 방정

식을 개발하였으며, 수학적 모델의 정확성을 점검 분석하기 위하여 분산분석법(variance technique)과 백분율 오차법(percentage error method)을 이용하여 실험 측정값과 이론식으로부터 측정값을 선형회귀방법(Linear regression method)으로 플롯점들의 최적의 선을 나타내고, 최적의 수학적 모델을 선정하였다.

2. 실험

Table 1 Cutting process variables and limits

Variable	Unit	Level			Coddng		
		Law	Middle	Hight	Law	Middle	Hight
Feed direction	degree (°)	-45	0	45	0	1	2
Pickfeed direction	degree (°)	0		45	0		1
Axial depth	mm	1		3	0		1
Pickfeed	mm	1.2		3	0		1
Feed /tooth	mm/min	0.025		0.05	0		1

볼엔드밀을 이용한 자유 곡면가공을 하는 데 경사면 가공시 변화하는 표면거칠기의 상태를 파악하고자 Table. 1과 같이 절삭조건 및 범위를 결정하였다. Feed direction의 이송방향에서 평면을 가공하는 상태의 조건인 0°와 상방향절삭(upward cutting)을 하는 경우의 45°와 하방향절삭(downward cutting)조건인 -45°로 각각 변수를 주고 이송방향과 직각방향각도(pickfeed direction), 절삭깊이, pickfeed, feed등 절삭조건은 Table. 1과 같이 구성하고 각 조건마다 code화하여 각기 다른 조건 실험을 48회 실시할 수 있도록 실험디자인을 작성하였다. 선정된 변수들의 값은 볼엔드밀을 사용하여 곡면가공시 가장 중요한 정삭가공에 알맞은 조건의 값을 취하였으며, 절삭속도(cutting speed)는 40m/min으로 일정하게 선정하고 볼엔드밀의 직경은 12mm로 선택하였다. 두 가지 절삭조건도 표면거칠기에 많은 영향을 줄 수 있으나 평엔드밀 절삭이나 드릴 등과 같이 유사한 경향을 나타내어 본 연구에서는 절삭조건으로 포함되지 않았다.

사용한 시험편 재료는 모든 공작기계에 널리

사용되며, 고속가공을 하여도 구성인선이 적게 발생하며, 칩배출이 용이하여 동력소모가 비교적 적게 일어나므로 가공면 표면거칠기가 양호하게 나타나고 공구 수명이 길어 일반적으로 절삭가공하는 재료로 널리 이용되고 있는 저탄소강(패삭강)을 선정하였다. 시험편은 component dynamometer에 설치할 수 있도록 볼트구멍을 가공하고 counter boring 작업을 하였으며, 경사면 가공은 combination set으로 45°를 맞추어 face cutter로 가공하였다. 표면거칠기 측정은 표면거칠기 측정기의 측정대(leveling stand)위에 시험편을 설치하여 다이알게이지(dial indicator)로 수평을 잡고 표면거칠기의 촉침(stylus tip)으로 중심선평균거칠기(R_a)와 최대높이거칠기(R_{max})를 측정할 수 있도록 초기 조건을 선정한다. 컷오프(cut off)값은 0.8mm, 측정길이(traversing length)를 4.0mm로 측정요소를 3개 부분으로 나누어 측정하였으며, 측정값은 analyzer에 수치로 표시하였으며, 변위량에 비례하는 전압은 증폭기(amplifier)에서 증폭시킨 후 A/D converter를 통하여 디지털 기록기(digital recorder)에 직접 기록하도록 하여 평균치 값을 취하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수학적 모델 개발

표면거칠기는 절삭깊이, 이송속도, 이송방향각도, 이송방향과 직각방향의 스텝, 이송방향과 직각방향의 각도에 의하여 영향을 받는다는 것을 실험결과로부터 알 수 있다. 그러므로 최적 절삭조건을 위한 수학적인 모델 개발은 주어진 품질 기준의 제품을 생산하기 위한 절삭변수들을 각각 콤비네이션 함으로 달성할 수 있다. 5개의 절삭변수를 가지고 응답변수(y)는 표면거칠기의 크기를 나타내는 변화함수로서 다음과 같이 나타낸다⁴⁾.

$$y = f(F D P_f P_d P_{fd}) \quad (1)$$

실험적인 수학적 모델은 표면거칠기에 절삭변수 영향 및 입력과 출력변수 관계를 연구하기 위하여 수학적인 방정식을 개발하고, 2개 측정함수 크기

에 최적의 수학적 방정식을 선정하는 것이다.

Box et al⁴⁾은 실험 범위 내에 선형관계를 가정하고, 곡선 방정식을 도입하였으며 다음과 같이 나타났다.

$$y = a(F)^{a_1} (D)^{a_2} (P_f)^{a_3} (P_d)^{a_4} (P_{fd})^{a_5} \quad (2)$$

a 및 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 와 b_5 는 상수이다.

선형방정식은 다음과 같이 나타낸다:

$$y = k + b_1(F) + b_2(D) + b_3(P_f) + b_4(P_d) + b_5(P_{fd}) \quad (3)$$

여기서 k 및 b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 상수이다.

3.2 표면거칠기의 수학적 방정식

표면거칠기를 예측하고 입력계수와 표면거칠기 사이의 상호관계를 조사하기 위하여 직선방정식과 곡선방정식을 실험결과로부터 개발하였으며, 표면거칠기 사이의 상호관계를 연구하기 위하여 최적의 방정식 유도는 다중회귀분석(multiple regression analysis) 같은 기본적인 통계적 방법을 이용하였다⁵⁾. 이 분석을 위하여 상업용 통계 컴퓨터 프로그램 SAS를 이용하였으며, 절삭변수에 해당하는 상수들을 얻을 수 있었다.

실험디자인에 이용된 절삭변수와 상수를 식(2)과 식(3)에 대입하여 최대높이 거칠기와 중심선 평균거칠기를 계산하였다.

(1) 곡선방정식

$$R_{\max} = 10^{1.566} \times F^{0.483} D^{0.081} \times P_f^{0.043} \times F_d^{-0.013} \times P_{fd}^{0.281} \quad (4)$$

$$R_a = 10^{0.142} \times F^{0.439} D^{0.125} \times P_f^{0.124} \times F_d^{0.005} \times P_{fd}^{0.728} \quad (5)$$

직선 방정식:

$$R_{\max} = 0.749 + 152.067F + 0.497D + 0.277P_f + 0.141F_d + 0.836P_{fd} \quad (6)$$

$$R_a = -0.397 + 11.60F + 0.075D + 0.056P_f + 0.021F_d + 0.169P_{fd} \quad (7)$$

개발된 수학적 모델의 정확성을 점검 및 분석하기 위하여 분산분석(Variance technique)을 이용하였다. Table. 2는 위에서 개발한 방정식들의 산출표준오차(standard error of estimate), 복합상관계수(coefficient of multiple correlation), 결정계수(coefficient of determination)를 보여준다. 식(4~5)의 복합상관계수는 식(6~7)의 복합상관계수보다 높다는 것은 Table 2로부터 알 수 있다. Figs. 1~4은 실험으로 측정된 값과 이론 식으로부터 계산된 표면거칠기 값을 산란 그래프(scatter graph)로 나타내고, 선형회귀 방법을 이용하여 플롯 점들의 최적의 선을 표시하였다.

Table 2 Analysis of variance tests for mathematical models for surface roughness

No. of equation	Standard error of estimate	Coefficient of multiple correlation	Coefficient of determination (%)
4	2.3200	0.6794	56.160
5	0.1861	0.7258	62.679
6	0.0911	0.6704	64.952
7	0.09527	0.7354	63.988

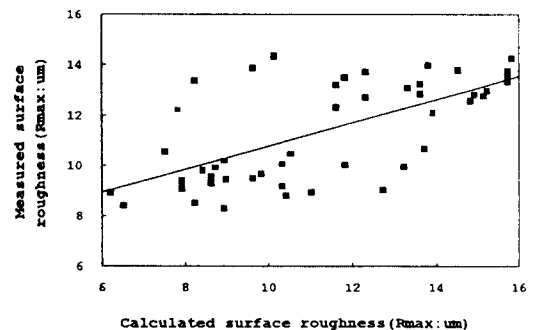


Fig.1 Comparison of measured and calculated surface roughness(R_{\max}) using linear equation

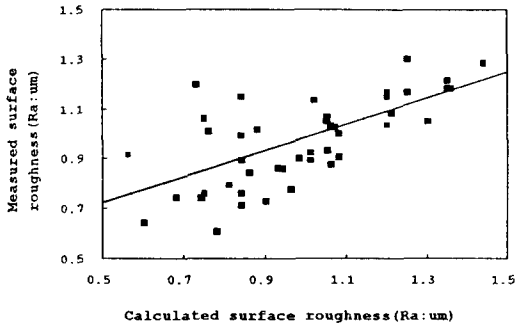


Fig. 2 Comparison of measured and calculated surface roughness(R_a) using linear equation

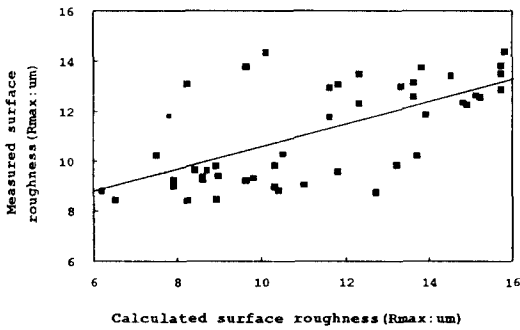


Fig. 3 Comparison of measured and calculated surface roughness(R_{max}) using curvilinear equation

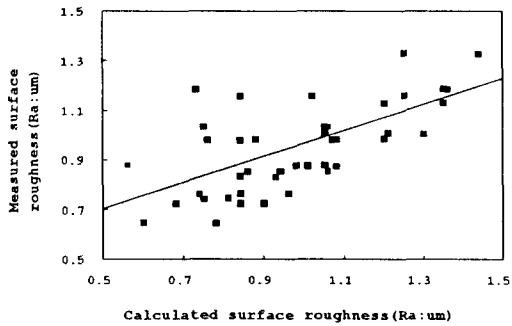


Fig. 4 Comparison of measured and calculated surface roughness(R_a) using curvilinear equation

3.3 실험식의 비교

모델의 정확성을 평가하기 위한 방법으로 이론값을 실험값과 비교하는 백분율 오차법 (percentage error method)을 이용하였다. 계산된 백분율을 8개 범주(0~5%, 6~10%, 11~15%, 16~20%, 21~25%, 26~30%, 31~35%, 36~40%)으로 나누어서 직선방정식과 곡선방정식에 대한 분석결과를 Figs. 5~6에 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 R_{max} 는 직선방정식이 신뢰도가 높게 나타났으며, R_a 는 오차백분율 15% 범위에 87%의 분포를 나타내며, 직선방정식과 곡선방정식에 의한 차이가 미소하게 나타났다. 결론적으로 직선 및 곡선방정식은 절삭저항과 표면거칠기에 관한 볼랜드밀 작업 및 자동화 절삭제어에 필요한 수학적 모델로 이용될 수 있다.

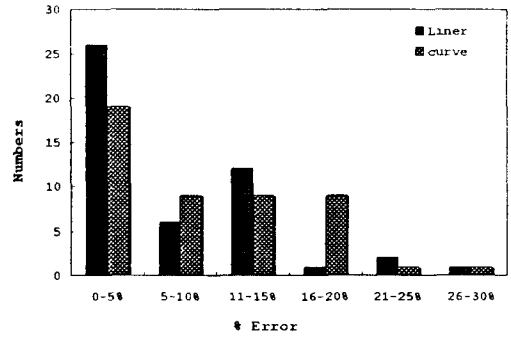


Fig. 5 Accuracy analysis of surface roughness (R_{max})

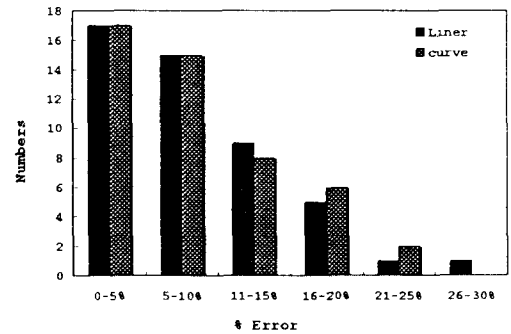


Fig. 6 Accuracy analysis of surface roughness (R_a)

4. 결 론

볼엔드밀을 사용하여 곡면가공시 절삭조건에 따른 표면거칠기의 관계를 연구하기 위하여, 시편을 45° 경사면으로 제작하여 실험을 실시하였다. 실험결과를 기초로 하여 상업용 통계프로그램 SAS를 이용하여 직선 및 곡선방정식을 개발하였다. 개발된 방정식을 이용하여 측정한 실험값과 실험식에 의한 예측값을 비교 분석하였으며 상당히 정확하다는 것을 알 수 있었다. 개발된 방정식들은 복잡상관계수가 높기 때문에 자동화 및 제어 알고리즘으로 사용될 수 있을 것이다. 피피드방향의 표면거칠기는 피피드량과 볼엔드밀의 직경에 따라 변화하는 값이며, 피피드량을 미소량으로 했을 때 표면조도는 양호하게 나타나지만 feed mark가 남는 사실을 발견할 수 있었다. 따라서 이 분야의 연구는 지속되어 볼엔드밀 가공으로 최종작업이 이루어질 수 있도록 지속적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

1. 한홍삼, 이동주, "CNC밀링에 의한 블록곡면 가공시 가공특성에 관한 연구", 한국정밀공학 회지, 제12권, 제11호, pp. 45-51, 1995.
2. 양민호, "볼엔드밀 가공시 절삭력 해석모델에 관한 연구", 한국해양대학교 대학원 석사학위 논문, 1996.
3. T. Hosoi, "Cutting Actions of Ball End Mill with Spiral Edge", Analysis of the CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 94-99, 1997.
4. G. E. P. Box and W. H. Hunter, "Statistics for Experiments: An Introduction to Design Data Analysis and Model Building", John Wiley and Sons, New York, pp. 165-240, 1978.
5. SAS Institute Inc., "SAS/STAT Users Guide", SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, pp. 83-95, 1988.