한국정밀공학회지 제 21 권 제 10 호 (2004 년 10 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 10, October 2004.

다중회귀분석을 이용한 절삭특성 평가

이영문#, 장승일*, 전정운**, 배현호**

Evaluation of Cutting Characteristics Using Multiple Regression Analysis

Young Moon Lee#, Seung Il Jang*, Jeong Woon Jun**, Hyun Ho Bae**

ABSTRACT

Using the multiple regression analysis cutting forces of turning processes have been predicted based on the cutting conditions such as feed rate(f), depth of cut(d), and cutting velocity(v). The statistical inference of the equation was checked by ANOVA test. The validity of the proposed regression analysis was verified by two sets of cutting tests of 27 cutting conditions and the additional cutting tests of 18 cutting conditions. From the results of analytical and experimental studies, it was found that there was no significant difference between the measured and predicted cutting forces. Also, the shear and friction characteristics of turning processes were analyzed with predicted cutting forces.

Key Words : Multiple regression analysis(다중회귀분석), Turning(외경선삭), Shear(전단), Chip-tool friction(칩공구 마찰), Specific cutting energy(비절삭에너지)

기호설명

a ; significance level
d ; depth of cut(Doc)
f ; feed rate
v ; cutting speed
F_x ; thrust cutting force
F_y ; main cutting force
F_z ; feed cutting force
R^2 ; coefficient of determination
u_s ; specific shear energy
u_f ; specific friction energy
u ; specific cutting energy

1. 서론

최근 공작기계 및 공구재료의 발달과 함께 절삭가공기술의 고도화를 위한 연구가 다각적으로 진행되고 있으며, 특히 효율적인 절삭가공기술의 확립을 위한 사용공구 및 피삭재에 대한 절삭성 평가와 함께 절삭결과에 대한 예측이 시도되고 있다. 절삭과정은 그 본질에 있어 칩 생성과정이며, 대부분의 금속절삭시 칩 생성은 전단역이라 불리우는 극히 한정된 영역에서 매우 좁은 간격을 두고 잇달아 일어나는 집중된 전단소성변형에 의해 이루어지고 생성된 칩은 공구경사면과 심한 마찰을 일으키면서 외부로 배출된다.[1]

접수일 : 2003 년 11 월 28 일; 게재승인일: 2004 년 6 월 11 일
교신저자: 경북대학교 기계공학부
E-mail : ymlee@knu.ac.kr Tel. (053) 950-5574
* 경북대학교 기계공학부
** 경북대학교 대학원 기계공학과

따라서 절삭성 평가에 있어 가장 기초적인 문제는 전단소성변형거동과 칩-공구경사면의 마찰거동에 미치는 절삭조건, 피삭재와 공구의 재질 및 형상 등 절삭입력조건의 영향을 밝히는 것이다.[2]

절삭성 평가요소 중 비절삭에너지(specific cutting energy)는 일반적으로 가장 중요한 평가요소로 채택되고 있으며, 공구 동력계에 의해 측정된 절삭력과 주어진 절삭조건으로부터 얻어진다.[3] 그러나, 절삭력은 다양한 절삭입력조건에 따라 달라지며, 때로는 공작기계의 능력(Power)의 범위 밖에서 가공이 수행되는 일이 종종 발생하게 되어 공작기계 자체에 심각한 손상과 무리를 주게 된다. 따라서 절삭실험을 통하여 개개의 절삭조건이 절삭력에 미치는 영향 및 절삭조건의 상호작용을 정량화하려는 연구들이 시도되고 있다.

본 논문에서는 절삭실험에서 획득한 절삭력과 절삭조건 상호간의 관련성을 규명하고 정량화하는 방법으로 다중회귀분석[4,5]을 이용하여 일반적인 3 차원 절삭공정인 외경선삭공정에서 절삭력을 예측하는 방법을 제시하였다. 또한 예측절삭력을 이등[2]이 제시한 등가경사절삭모델에 대입하여 외경선삭과정의 전단 및 칩-공구 마찰특성을 분석하였다.

2. 다중회귀분석 모델

회귀분석(regression analysis)이란 변수들간의 관련성을 규명하기 위하여 어떤 수학적 모형을 가정하고, 이 모형을 측정된 변수들의 데이터로부터 추정하는 통계적 분석방법이다. 본 연구에서는 반응변수의 변화를 설명하는 설명변수가 두 개 이상인 경우의 회귀모형인 다중회귀모형(multiple regression model)을 사용하였다.

다중회귀모형은 일반적으로 식 (1)과 같이 정의된다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \cdots + \beta_i x_{ii} + \cdots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i \quad (1)$$

여기서, β_i (i=1, 2, 3.… p)는 추정되어야 할 회귀계수들이며, y_i 는 주어진 설명변수 x_{ii} 를 포함한 회귀모형식의 i 번째의 반응값을 나타낸다. ε_i 는 서로 독립이고 동일한 분포 $N(0, \sigma^2)$를 따르는 오차항이다.

다중회귀모형에서 회귀계수들은 최소제곱법에 의해 식(2)와 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \cdots + \hat{\beta}_p x_{ip} \quad (2)$$

또한, 고려되는 회귀모형 또는 추정된 회귀식의 적합성 여부를 확인하기 위하여 분산분석[6](analysis of variance, ANOVA)을 실시하여 그 유의성을 검증하였다.

3. 절삭실험

절삭공구는 대표적인 황삭용 인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 PCLNR2525M12 를 사용하였다. 피삭재로는 기계부품소재로 널리 사용되고 있는 기계구조용강 SM45C 를 사용하였다.

Fig. 1 은 절삭력 측정 개략도를 나타낸 것으로 절삭력을 측정하기 위하여 공구동력계(Kistler, 9257A)에서 나오는 절삭력 신호를 전하증폭기 및 A/D 변환기를 통하여 PC 에서 신호분석기능을 갖고 있는 소프트웨어 패키지를 사용하여 분석하였다.

절삭실험조건은 Table 1 에 나타낸 바와 같이 이송, 절삭깊이 및 절삭속도를 각각 3 단계로 하여 총 27 가지의 절삭조건을 설정하여 건식 절삭실험을 행하였다.

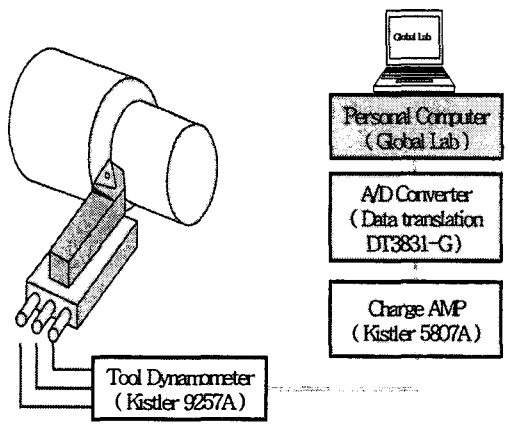

Fig. 1 Cutting force measurement

Table 1 Cutting conditions and lathe specifications

Cutting conditions	Feed rate(mm/rev)	0.15, 0.25, 0.35
	Depth of cut (mm)	0.5, 1, 1.5
	Cutting speed (m/min)	80, 140, 200
	Cutting fluid	None
Lathe specification	Power	7.5KW(5.5HP)

4. 측정결과 및 고찰

4.1 회귀분석에 의한 절삭력 예측

식 (3), (4) 및 (5)는 실험결과에서 얻어진 데이터와 다중회귀분석을 이용하여 각 변수들의 회귀계수값을 구하여 절삭 3 분력(Fx, Fy 및 Fz)의 회귀식을 구한 것이다.

$$F_x = -81.307 + (1212.609 \times f) + (0.514 \times v) + (167.977 \times f \times d) - (3.258 \times f \times v) \quad (3)$$

$$F_y = -20.449 + (506 \times f) + (235.660 \times d) + (1437.133 \times f \times d) - (0.610 \times d \times v) \quad (4)$$

$$F_z = 109.029 + (634.916 \times f) + (60.793 \times d) - (0.487 \times v) + (595.732 \times f \times d) - (3.534 \times f \times v) + (0.444 \times d \times v) \quad (5)$$

Table 2, 3 및 4 는 추정된 회귀식의 적합성 유무를 검증하기 위하여 분산분석을 한 결과를 나타낸 것이다.

유의수준 0.05 에서 절삭 3 분력(Fx, Fy 및 Fz)의 유의확률이 극히 작은 0.001 미만으로 나와 반응변수와 설명변수 사이에 유의한 회귀관계가 존재함을 알 수 있다. 또한, 절삭 3 분력에 영향을 미치는 인자로서 Fx 및 Fz 의 경우 이송이 가장 유의한 인자로 나타냈으며, Fy 는 이송과 절삭깊이의 교환작용이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Table 2 Analysis of variance for Fx

Source	d.o.f	Sum of Squares	Mean of Squares	Fo	F(0.05)
Model	4	173046	43262	301.2200	<0.0001
Error	22	3159.6484	143.6206		
Corrected Total	26	176206			

Table 3 Analysis of variance for Fy

Source	d.o.f	Sum of Squares	Mean of Squares	Fo	F(0.05)
Model	4	1938137	484534	674.1700	<0.0001
Error	22	15812	718.7091		
Corrected Total	26	1953948			

Table 4 Analysis of variance for Fz

Source	d.o.f	Sum of Squares	Mean of Squares	Fo	F(0.05)
Model	6	504015	84002	227.9000	<0.0001
Error	20	7371.9613	368.5981		
Corrected Total	26	511387			

두 변수사이의 유의관계가 존재하더라도 회귀선이 데이터들의 변화 형태를 얼마나 잘 반영하는가는 별개의 문제이다.

본 논문에서는 적합된 회귀선이 데이터를 얼마나 잘 반영하는가를 판단하는 인자로서 결정계수(coefficient of determination, R^2)를 사용하였다.

회귀식 (3), (4) 및 (5)의 모형 결정계수 R^2 값은 0.982, 0.992 및 0.986 으로 회귀선이 데이터에 잘 적합함을 나타내고 있다.

4.2 신뢰성 검증

추정된 회귀식의 신뢰성을 검증하기 위해 처음 절삭조건인 이송 0.15, 0.25 및 0.35mm/rev 사이의 값 0.2 및 0.3mm/rev 인 조건에서 총 18 가지의 추가실험을 행하였다.

Fig. 2, 3 및 4 는 절삭속도 140m/min 에서 얻어진 배분력(Fx), 주분력(Fy) 및 이송분력(Fz)의 실험값과 회귀식에 의해 구해진 예측값을 이송에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 O 표시된 부분은 추가실험에서 얻어진 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 배분력의 실험값과 예측값은 빠른이송에서 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나, Fig. 3 및 4 에서 보는 바와 같이 주분력 및 이송분력은 대체적으로 실험값과 예측값이 잘 일치하고 있으며, 절삭속도 80 및 200m/min 에서도 같은 경향을 나타내었다.

또한, Fig. 5, 6 및 7 은 추가실험의 각 조건에 실험값과 예측값의 오차를 백분율(%)로 나타낸 것으로, 그림에서 점선은 평균 오차율을 나타내며 전체적으로 절삭 3 분력의 실험값과 예측값의 평

균오차율은 5%이내의 값을 나타내었다.

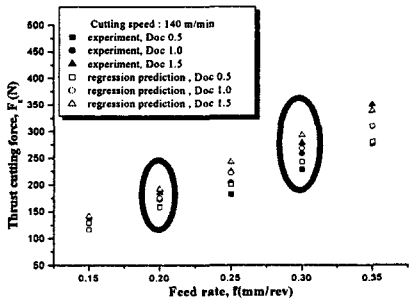

Fig. 2 Measured and predicted thrust cutting force Fx(N) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

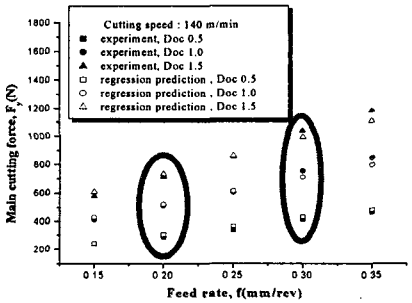

Fig. 3 Measured and predicted main cutting force Fx(N) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

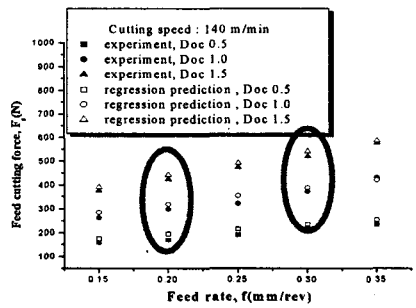

Fig. 4 Measured and predicted feed cutting force Fz(N) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

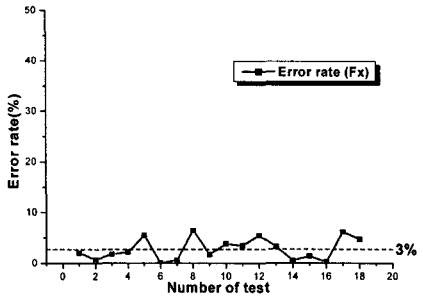

Fig. 5 Error rate of measured and predicted thrust cutting force Fx(N)

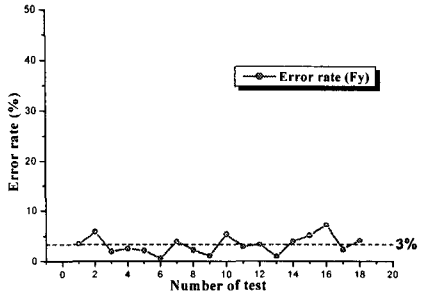

Fig. 6 Error rate of measured and predicted main cutting force Fy(N)

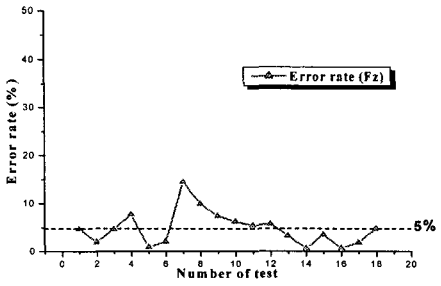

Fig. 7 Error rate of measured and predicted feed cutting force Fz(N)

4.3 절삭특성

절삭실험에서 얻어진 절삭력과 예측절삭력을 이등 [2]이 제시한 외경선삭에 상당하는 등가경사절삭모델에 대입하여 전단특성 및 칩과 공구의 마찰특성을 비교· 분석하였다.

Fig. 8, 9 및 10 은 절삭속도 140m/min 인 조건에서 절삭깊이에 따른 비전단, 비마찰 및 비절삭에너지의 측정값과 예측값을 나타낸 것이다.

Fig. 8 및 9 에서 보는 바와 같이 비전단에너지 및 비마찰에너지는 빠른이송에서 약간의 차이를 보이고 있으나, 느린이송 영역인 0.25mm/rev 이하에서는 비교적 잘 일치하고 있다. 이러한 경향은 절삭속도 80 및 200m/min 에서도 나타나고 있다. 비전단 및 비마찰에너지의 측정값과 예측값을 비교한 결과, 평균오차율이 10%이내로 나타나고 있다.

전체적인 절삭특성의 평가요소인 비절삭에너지는 Fig. 10 에서 보는 바와 같이 예측값과 측정값 모두 이송이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 절삭에 있어서의 치수효과[8](size effect)에 기인한 것으로 판단되며 비절삭에너지의 측정값과 예측값의 평균오차율은 5%이내로 높은 신뢰성을 나타내었다. 또한 비절삭에너지는 절삭동력(=Fy•V)를 단위시간당의 절삭체적으로 나눈값으로 정의된다. 여기서 예측된 비절삭에너지로부터 절삭조건에 따른 절삭동력의 예측이 가능하다. 현재 주어진 조건에서는 예측된 절삭동력이 공작기계의 모터능력을 벗어나지 않아 안정적으로 절삭이 가능하였다.

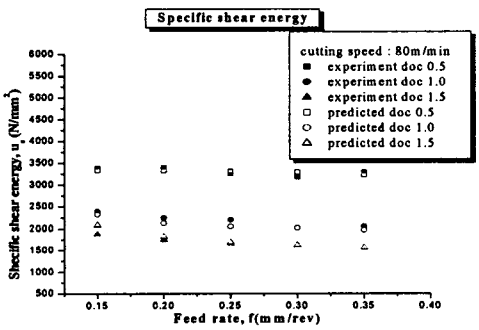

Fig. 8 Measured and predicted specific shear energy (us) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

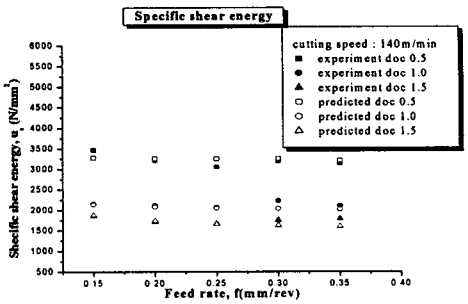

Fig. 9 Measured and predicted specific friction energy(uf) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

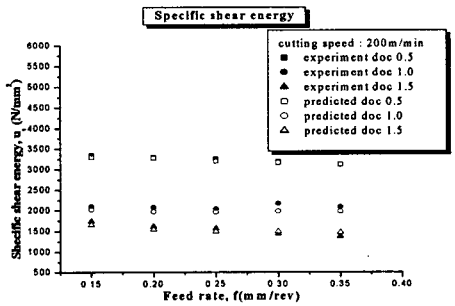

Fig. 10 Measured and predicted specific cutting energy(u) vs. feed rate, f(mm/rev) with cutting speed 140m/min

5. 결론

본 논문에서는 다중회귀분석을 이용하여 절삭 3 분력을 예측하고, 예측절삭력을 이용하여 외경선삭과정시의 절삭특성을 분석하였다.

1. 회귀분석으로 구해진 절삭 3 분력 회귀식의 결정계수(R^2)값이 각각 0.982, 0.992 및 0.986 으로 높은 유의성을 나타내었다.
2. 절삭 3 분력 회귀식의 신뢰성 검증 결과, 전체적으로 각 절삭력의 평균오차율이 5%이내의 낮은 오차율을 나타내었다.
3. 예측절삭력을 절삭성 평가에 적용시켜 비전단, 비마찰 및 비절삭에너지를 구한 결과, 평균오차율이 각각 8%, 5% 및 5%이하의 값을 나타내었다.

참고문헌

1. Zorev, N. N., "Interrelationship between Shear Processes Occurring Along Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting," Pro. Inter. Res. Prod. Conf., Carnegie Inst. of Tech., pp. 42-49, 1963.
2. Lee, Y. M., Choi, W. S., Song, T. S., Park, T. J. and Jang, E. S., "Analysis of Chip-Tool Friction and Shear Charateristics in 3-D Cutting Process," J.KSPE, Vol.16. No.6, pp. 190-196, 1999.
3. Jawahir, I. S., Qureshi, N. and Arsecularatne, J. A., "On the Interrelationships of Some Machinability Parameters in Finish Turning with Cermet Chip Forming Tool Inserts," Int. J. Mach Tools Manufact. Vol. 32. No.5, pp. 709-722, 1992.
4. Myers., R. H., " Classical and Modern Regression with Applications," Duxbury, pp. 82-98, 1989.
5. Montgomery, D.C., " Design and Analysis of Experiments, " John Wiley and Sons, 1976.
6. Agresti, A., " An introduction to categorical data analusis, " Wiley, 1996.
7. Baker, W. R., Marshall, E. R. and Shaw, M. C., "The Size Effect in Metal Cutting," TRANS. ASME, Vol.74, pp. 61-72, 1952.