

비선형 회귀분석에 의한 엔드밀 가공조건에 따른 Al7075의 표면정도 예측

조연상[†] · 박흥식[‡]

동아대학교 기계공학과

Prediction of Surface Roughness of Al7075 on End-Milling Working Conditions by Non-linear Regression Analysis

Yonsang Cho[†] and Heungsik Park[‡]

Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A University

(Received September 25, 2010; Revised November 1, 2010; Accepted November 3, 2010)

Abstract – Recently, the End-milling processing is needed the high-precise technique to get a good surface roughness and rapid time in manufacturing of precision machine parts and electronic parts. The optimum surface roughness has an effect on end-milling working condition such as, cutting direction, spindle speed, feed rate and depth of cut, and so on. It needs to form the correlation of working conditions and surface roughness. Therefore this study was carried out to presume of surface roughness on end-milling working condition of Al7075 by regression analysis. The results was shown that the coefficient of determination(R^2) of regression equation had a fine reliability of 87.5% and nonlinear regression equation of surface rough was made by multiple regression analysis.

Keywords – end-milling(엔드밀 가공), working condition(가공조건), surface roughness(표면정도), regression analysis(회귀분석), regression equation(회귀방정식)

1. 서 론

최근에 각종 정밀기계 또는 전자기기의 부품은 주로 높은 정밀도를 요구하기 때문에 높은 가공정도로 다양한 형상을 가공할 수 있는 알루미늄 합금 소재를 엔드밀을 이용하여 가공을 한다[1].

특히 알루미늄 합금은 가공시에 절삭저항은 그다지 크지 않으나 저속에서는 칩이 경직형으로 생성되고 구상인선(built-up edge)이 많이 발생하기 때문에 절삭깊이가 증가하면 표면층의 변화 양상이 매우 복잡하게 되는 문제점을 내포하고 있다[2,3]. 따라서 가공조건을 부적절하게 선정하면 공구의 이상마멸이 발생하여 공구수

명이 현저히 떨어지고 피삭재에 대한 후처리 공정을 수반하기 때문에 생산성, 경제성에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서 알루미늄 합금은 가공시에 발생하는 여러 가지 문제를 해결하고 가공시의 표면정도를 향상시키기 위해 고속 주축을 탑재한 고속 가공기를 이용하여 가공하고 있다[4].

일반적으로 고속 가공기를 이용하여 알루미늄 합금을 엔드밀로 가공할 때는 가공조건 중에서 절삭속도가 절삭깊이와 이송에 비하여 표면정도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[4]. 현재까지 이러한 가공조건이 표면정도에 어느 정도 영향이 있는지 분석하여 그 상관관계를 정량적으로 나타내는 연구는 거의 없는 실정에 있다. 따라서 가공조건이 표면정도에 미치는 영향에 대하여 정량적으로 분석할 수 있으면, 가공조건에 따른 표면정도를 예측하여 양호한 표면정도를 얻을 수

[†]주저자 : bluecys@nate.com

[‡]책임저자 : parkhs@dau.ac.kr

있는 최적의 가공조건을 선정할 수 있다고 생각된다.

그러나 양호한 표면정도를 얻기 위한 최적의 가공조건을 제시하기 위해서는 각 조건의 변화에 따른 실험이 많이 필요하기 때문에 시간과 비용 면에서 매우 비효율적이다. 따라서 최소의 실험으로 각 가공조건과 표면정도의 상관관계를 나타낼 필요가 있다. 본 연구에서는 이를 위해 최근 다양한 분야에 널리 사용되고 있는 실험계획법[5,6]을 이용하였다. 실험계획법은 다양한 가공조건에 따른 표면정도에 대한 데이터를 분산분석과 회귀분석 방법[7,8]을 이용하여 통계적으로 분석함으로써 최소의 실험으로 최적의 가공조건에 대한 정보를 효과적으로 얻을 수 있는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금 Al7075를 가공조건을 달리하여 고속 엔드밀로 가공한 후 표면정도를 측정하고, 이를 실험계획법의 통계적 분석방법인 분산분석과 회귀분석을 이용하여 각 가공조건에 따른 표면정도의 상관관계를 평가하고 수학적 모델로 나타내었다. 그리고 이를 통해 가공조건에 따른 표면정도를 예측함으로써 최적의 가공조건을 선정하는데 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 실험장치

본 실험에서는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 알루미늄 합금을 엔드밀 가공하기 위하여 주축의 최고 회전수가 10,000 rpm이고 공구 이송속도는 1,000 mm/min인 현대 AJV18 수직형 머시닝센터를 사용하였다. 실험을 위한 시험편은 알루미늄 합금 Al7075로써 35×25×25 mm

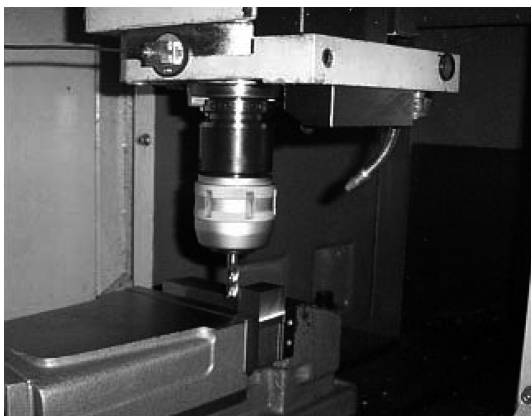


Fig. 1. Schematic of vertical machining center.

크기로 일정하게 가공하였고 표면도가 0.01 mm 이하가 되도록 평면 연마하였다. 절삭공구는 코팅 처리된 10 mm의 초경 엔드밀을 사용하였으며, 각 가공조건에 따른 평면 절삭가공 실험은 시험편의 가로방향 35 mm를 기준으로 하여 건식 평면 가공을 행하였다.

2-2. 실험계획법 및 중회귀분석

실험계획법은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 가공조건에 따라 얻은 표면정도를 여러 가지 통계적 방법으로 분석하여 상호간의 관계를 도출하는 것으로 본 연구에서는 엔드밀 가공의 결과인 시험편의 표면 정도를 특성치로 두고 이에 가장 영향을 많이 주는 가공조건인 정삭가공을 위한 주축의 회전수, 이송속도 및 절삭깊이를 인자로 선정하였다. 각 인자의 수준은 실험에 사용된 머시닝센터의 가공 범위 내에서 Table 1과 같이 3 가지 수준(level)으로 정하여 실험을 하였다. 그리고 분산분석 및 중회귀분석을 이용하여 측정된 가공면의 표면정도 Ra와 이에 영향을 주는 인자인 가공조건과의 상관관계를 파악하였다.

분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)은 두 개 이상 다수의 집단을 비교하고자 할 때 집단 내의 분산, 총평균과 각 집단의 평균의 차이에 의해 생긴 집단 간 분산의 비교를 통해 만들어진 F분포를 이용하여 가설

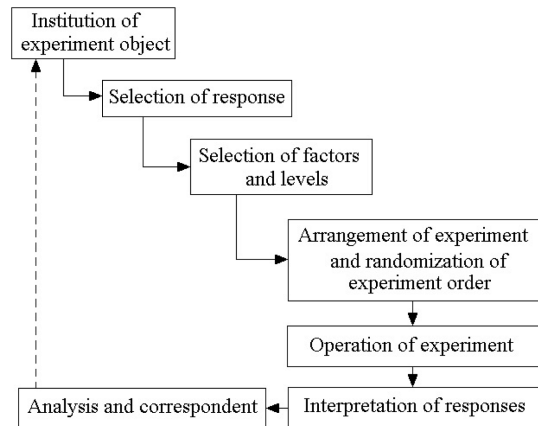


Fig. 2. Flow chart for experiment design.

Table 1. Experimental conditions

| Factor | Level | | |
|---------------------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Spindle speed (rpm) | 2,000 | 4,000 | 6,000 |
| Feed rate (mm/min) | 300 | 600 | 900 |
| Depth of cut (mm) | 0.05 | 0.10 | 0.15 |

검정을 하는 방법이다. 이는 특성치의 산포를 제공함으로써 나타내고 이를 인자마다의 제공함으로써 분해하여 오차에 비해 특히 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다. 따라서 분산분석을 이용하여 여러 인자들이 특성치에 줄 수 있는 영향에 대해 동시적인 연구를 할 수 있으며, 인자들 간의 상호작용에 대한 연구도 가능하다.

본 연구에서는 실험계획법에 의해 선택한 인자인 가공조건과 실험을 통해 얻은 특성치인 표면정도에 대해 분산분석을 함으로써 각 인자가 특성치에 미치는 주효과에 대해 분석하였다.

중회귀 분석은 종속변수와 여러 개의 독립변수 사이의 인과관계에 대하여 수학적인 관계식을 나타내는 것으로 종속변수 y 와 k 개의 독립변수 x_1, x_2, \dots, x_k 에 대하여 i 번째 종속변수 y_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (1)$$

여기서 i 는 각 인자에 대한 관찰점으로 $i=1, 2, \dots, n$ 이며, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 는 미지의 계수이다. 그리고 ε_i 는 오차 값을 나타낸다.

식 (1)을 최소제곱법에 의하여 최소화 시키려는 오차제곱의 합 S 를 행렬로 표현하면

$$S = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) = y'y - 2\beta'X'y + \beta'X'X\beta \quad (2)$$

가 되며, 이를 β 로 미분하여 0으로 두면 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (3)$$

여기서 $\hat{\beta}$ 은 β 의 최소제곱 추정 값의 벡터로서

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} & \dots & \sum x_{ki} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} & \dots & \sum x_{1i}x_{ki} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 & \dots & \sum x_{2i}x_{ki} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{ki} & \sum x_{1i}x_{ki} & \sum x_{2i}x_{ki} & \dots & \sum x_{ki}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \\ \dots \\ \sum x_{ki}y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \dots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

과 같은 행렬로 구할 수 있다.

Table 2. ANOVA for multiple regression models

| Factor | S | ϕ | V | F | P |
|----------------|-------|---------|-------|-----------|-------|
| Regression | SSR | k | MSR | MSR/MSE | P_r |
| Residual error | SSE | $n-k-1$ | MSE | - | - |
| Total | SST | $n-1$ | - | - | - |

따라서 이로부터 추정된 회귀 방정식은 다음과 같다.

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_k x_k \quad (5)$$

이와 같이 회귀 분석을 통해 추정된 회귀 방정식은 그 적합성을 검정할 필요가 있다. Table 2는 이의 정도를 측정하는 방법으로 많이 사용되는 분산분석에 의한 측도(measure)로써 유의확률 P 를 통하여 추정된 방정식을 검정할 수 있고, 결정계수(coefficient of determination) R^2 으로 신뢰도를 평가할 수 있다.

여기서 S 는 제곱합, ϕ 는 자유도, V 는 평균제곱, F 는 검정통계량 그리고 P 는 유의확률이다. 그리고 각 출력 값은

$$SSR(\text{Regression sum of squares}) = \hat{\beta}'X'y - n(\bar{y})^2,$$

$$SSE(\text{Residual sum of squares}) = y'y - \hat{\beta}'X'y,$$

$$SST(\text{Total sum of squares}) = y'y - n(\bar{y})^2,$$

$$MSR(\text{Regression mean square}) = SSR/k,$$

$$MSE(\text{Residual mean square}) = SSE/(n-k-1)$$

이고, 결정계수는

$$R^2 = SSR/SST \times 100 (\%) \quad (6)$$

이다.

일반적으로 추정된 회귀 방정식은 유의확률 P 가 0.05 이하일 때 유효하고 R^2 이 60% 이상이면 신뢰도가 높은 것으로 평가된다. 그러나 이와 같은 선형 회귀 방정식은 잔차(Residual; $\varepsilon_i = Y_i - \hat{Y}_i$)라고 하는 종속변수의 실제값과 예측값의 차이에 대하여 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

- ① 잔차의 합은 0이다.
- ② 잔차들은 동분산을 갖는다.
- ③ 잔차들은 서로 독립이다.
- ④ 잔차들은 정규분포를 따른다.

따라서 추정된 방정식이 유효하고 신뢰도가 높더라도 잔차에 대한 가정을 만족해야 사용할 수 있다. 이러한 잔차에 대한 가정은 일반적으로 관측점에 대해 잔차의 변화를 나타내는 잔차 확률도와 예측치에 대한 잔차 분포도를 통하여 분석한다[7,8]. 잔차 확률도에서 잔차

의 변화가 어떤 특정한 형태를 보이지 않으면 독립성 가정이 만족된다고 판정을 하고, 잔차 분포도에서 0을 중심으로 대칭적으로 ± 2 범위 내에 나타나면 동분산성의 가정이 만족된다고 본다. 특히, 잔차들의 동분산성이 위배되면 회귀분석이 의미가 없기 때문에 추정된 회귀 방정식에 의한 예측이 올바르게 되었다고 기대하기 힘들다. 이와 같이 잔차의 동분산성이 위배되는 경우는 종속변수와 독립변수가 비선형적인 관계를 가지고 있을 때이다. 그러므로 비선형적인 문제를 해결하기 위해서는 종속변수를 다른 형태로 바꾸는 변수 변환 방법을 사용할 필요가 있다. 이는 식 (1)의 종속변수 y_i 를 자료의 형태에 따라 $W_i = \log(y_i)$ 와 같이 잔차에 대한 가정을 만족시키도록 변환하여 회귀방정식을 추정하는 것이다.

본 연구에서는 특성치인 표면정도를 종속변수로 두고, 여기에 영향을 주고 있는 인자인 주축 회전수, 이송속도 및 절삭깊이를 독립변수로 두었다. 그리고 이를 중회귀 분석을 통해 함수적 관련성을 규명하고 적합한 수학적 모델을 제시하고자 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 가공조건과 표면정도의 상관관계

Table 3은 실험계획법의 인자로 선정된 가공조건에 따라서 알루미늄 합금 A17075 시험편을 평면 엔드밀 정삭 가공하여 가공면의 표면정도 Ra를 측정한 결과이다. 본 연구에서는 이 데이터를 이용하여 분산분석과 중회귀분석을 행하였으며, 이를 통해 인자와 특성치인 가공조건과 표면정도의 상관관계와 수학적 모델을 추정하였다.

Table 4는 가공조건에 대한 표면정도의 분산분석 결과를 나타낸 것으로 검정통계량 F와 유의확률 P를 통하여 각 인자들이 특성치인 표면정도에 미치는 영향을 평가할 수 있다. 여기서 유의확률 P가 0.05 이하이고 검정통계량 F 값이 큰 가공인자가 표면정도에 가장 영향을 많이 준다. 따라서 Table 4의 결과에서 A17075를 엔드밀로 평면 가공을 할 때에 주축 회전수와 이송속도가 표면정도에 가장 큰 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다.

3-2. 회귀분석에 의한 표면정도 예측

본 연구에서는 Table 3의 실험결과로부터 표면정도를 예측하기 위하여 회귀분석을 통해 선형 및 비선형

Table 3. Result of 3³ factorial experiment

| Standard order | Run order | rpm (rev/min) | feed (mm/min) | depth (mm) | Ra (μm) |
|----------------|-----------|---------------|---------------|------------|----------------------|
| 1 | 26 | 2000 | 300 | 0.05 | 0.611 |
| 2 | 7 | 2000 | 300 | 0.10 | 0.730 |
| 3 | 10 | 2000 | 300 | 0.15 | 1.140 |
| 4 | 5 | 2000 | 600 | 0.05 | 1.354 |
| 5 | 14 | 2000 | 600 | 0.10 | 1.339 |
| 6 | 2 | 2000 | 600 | 0.15 | 1.486 |
| 7 | 11 | 2000 | 900 | 0.05 | 1.774 |
| 8 | 18 | 2000 | 900 | 0.10 | 1.812 |
| 9 | 6 | 2000 | 900 | 0.15 | 1.837 |
| 10 | 27 | 4000 | 300 | 0.05 | 0.475 |
| 11 | 25 | 4000 | 300 | 0.10 | 0.600 |
| 12 | 19 | 4000 | 300 | 0.15 | 0.609 |
| 13 | 8 | 4000 | 600 | 0.05 | 0.735 |
| 14 | 16 | 4000 | 600 | 0.10 | 1.266 |
| 15 | 9 | 4000 | 600 | 0.15 | 1.152 |
| 16 | 13 | 4000 | 900 | 0.05 | 1.361 |
| 17 | 12 | 4000 | 900 | 0.10 | 1.147 |
| 18 | 17 | 4000 | 900 | 0.15 | 1.412 |
| 19 | 4 | 6000 | 300 | 0.05 | 0.475 |
| 20 | 22 | 6000 | 300 | 0.10 | 0.554 |
| 21 | 20 | 6000 | 300 | 0.15 | 0.526 |
| 22 | 15 | 6000 | 600 | 0.05 | 0.687 |
| 23 | 23 | 6000 | 600 | 0.10 | 0.911 |
| 24 | 3 | 6000 | 600 | 0.15 | 0.624 |
| 25 | 24 | 6000 | 900 | 0.05 | 1.212 |
| 26 | 21 | 6000 | 900 | 0.10 | 1.095 |
| 27 | 1 | 6000 | 900 | 0.15 | 0.995 |

회귀방정식을 구하였다. 그리고 추정된 회귀 방정식은 분산분석과 잔차분석을 통해 그 적합성을 검토하였으며, 주축회전수를 8000 rpm으로 하였을 때의 표면정도 예측치와 실측치를 비교하여 가장 적절한 수학적 모델을 선정하고자 하였다.

먼저 특성치와 인자들 사이의 관계가 선형적이라고 가정하여 종속변수 값을 표면정도 Ra, 독립변수 값을 가공조건으로 하여 회귀분석을 하면, 추정된 선형 회귀방정식은 다음과 같다.

Table 4. ANOVA of surface roughness for experiment condition

| Factor | S | ϕ | V | F | P |
|--------------------------------|---------|--------|---------|-------|-------|
| Spindle speed | 2.63282 | 2 | 1.31641 | 65.45 | 0.000 |
| Feed | 1.93168 | 2 | 0.96584 | 48.02 | 0.000 |
| Depth of cut | 0.04676 | 2 | 0.02338 | 1.16 | 0.360 |
| Spindle speed ×Feed | 0.08714 | 4 | 0.02179 | 1.08 | 0.426 |
| Spindle speed ×Depth of cut | 0.15921 | 4 | 0.03980 | 1.98 | 0.191 |
| Feed×Depth of cut | 0.07424 | 4 | 0.01856 | 0.92 | 0.496 |
| Error | 0.16091 | 8 | 0.02011 | - | - |
| Total | 5.09277 | 26 | - | - | - |

Table 5. ANOVA of Multiple linear regression model

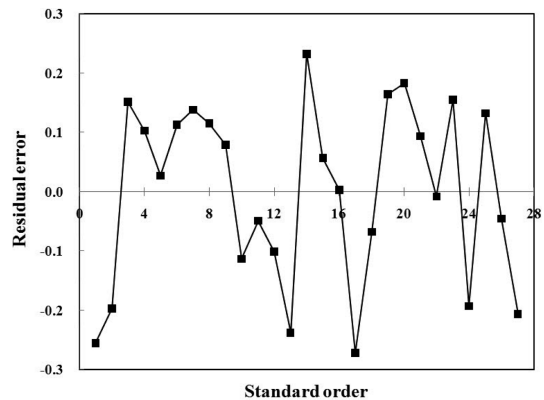
| Factor | S | ϕ | V | F ₀ | P |
|----------------|------|--------|-------|----------------|-------|
| Regression | 4.12 | 3 | 1.374 | 52.63 | 0.000 |
| Residual error | 0.6 | 23 | 0.026 | - | - |
| Total | 4.72 | 26 | - | - | - |

$$Ra = 0.6987 - 0.00014x_1 + 0.00128x_2 + 1.2189x_3 \quad (7)$$

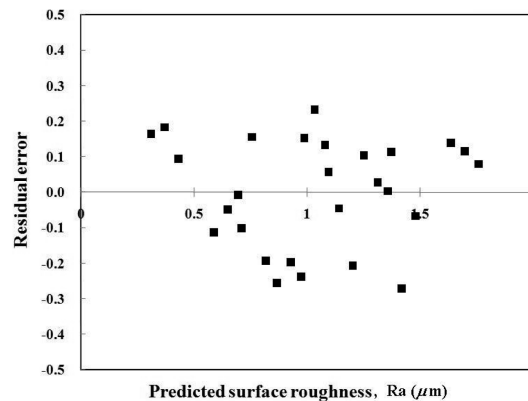
여기서 x_1 은 주축회전수, x_2 는 이송속도 그리고 x_3 는 절삭깊이 이다.

Table 5는 선형 회귀의 분산분석 결과로써 추정된 회귀방정식의 유효성을 평가할 수 있다. 알루미늄 합금의 엔드밀 가공을 위하여 추정된 회귀방정식 (7)은 Table 5의 유의확률 P가 0.05 이하의 값을 가지고 있기 때문에 유효하다고 할 수 있다. 그리고 결정계수 R^2 은 식 (6)을 이용하여 구한 결과 87.3%로 높은 신뢰성을 가지고 있다. 그러나 추정된 회귀방정식이 유효하다고 하더라도 잔차분석을 통해 잔차에 대한 가정을 만족하여야한다.

Fig. 3은 잔차에 대한 가정을 만족하는지 살펴보기 위한 잔차분석의 결과로써 (a)의 잔차 확률도에서는 관측점에 대해 잔차의 변화가 특정 형태를 나타내지 않기 때문에 잔차들은 서로 독립적이고 정규분포를 가지고 있다. 그러나 (b)의 예측치에 대한 잔차의 분포도에서는 잔차가 x 축에 대하여 비대칭 형태로 고르게 분포되지 못하고 역삼각형 분포형태를 하고 있다. 이는 잔차에 대한 가정 중에 동분산성에 위배되는 것으로 추정된 선형 회귀방정식이 분산분석결과에 의해 유효하



(a) Residual probability plot



(b) Residual distribution plot

Fig. 3. Result of residual error analysis on linear regression model.

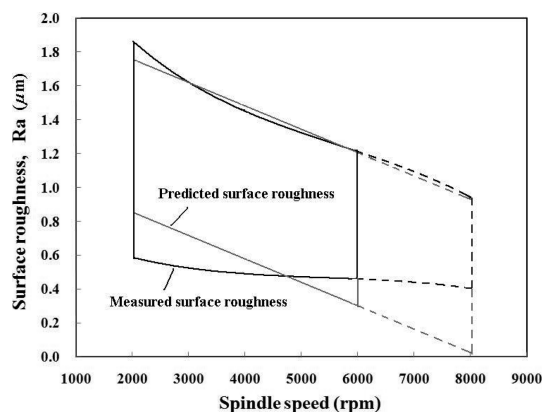


Fig. 4. Line fit plot of spindle speed on linear regression model.

더라도 표면정도를 예측하기 위한 수학모델로는 적합

Table 6. ANOVA of Multiple nonlinear regression model

| Factor | S | ϕ | V | F_0 | P |
|----------------|------|--------|-------|-------|-------|
| Regression | 4.26 | 3 | 1.419 | 53.53 | 0.000 |
| Residual error | 0.61 | 23 | 0.026 | - | - |
| Total | 4.87 | 26 | - | - | - |

하지 않다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 4는 이를 검증하기 위한 선형 회귀방정식의 주축회전수에 대한 선 적합도를 나타내었다. 그림에서 실측한 표면정도는 주축회전수가 증가함에 따라서 최대값과 최소값의 폭이 좁아지며 곡선 형태를 이루고 있지만 선형 회귀 방정식으로 예측한 표면정도는 폭이 일정하게 선형적으로 감소하고 있다. 그리고 수학적 모델의 검증을 위해 8000 rpm에서 예측한 표면정도는 실측한 값과 크게 동떨어져 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

따라서 추정된 선형 회귀 방정식은 알루미늄 합금 Al7075의 최적의 가공조건을 선정하기 위한 수학적 모델로는 부적합하다고 생각되며, 적합한 수학적 모델을 찾기 위해 종속변수 변수변환을 통한 비선형 회귀분석을 행하였다. 본 연구에서는 종속변수의 값을 $\log(Ra)$ 로 변환하여 식 (8)과 같이 비선형 회귀방정식을 추정하였으며, 이를 통해 추정한 표면정도 Ra의 회귀방정식은 식 (9)에 나타내었다.

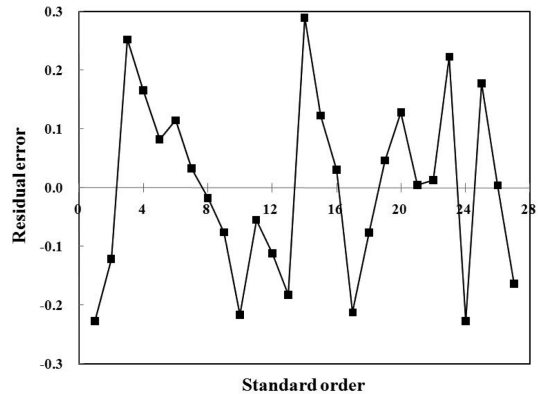
$$\log(Ra) = -0.47711 - 0.00013x_1 + 0.001342x_2 + 1.43867x_3 \quad (8)$$

$$Ra = \text{Exp}(-0.47711 - 0.00013x_1 + 0.001342x_2 + 1.43867x_3) \quad (9)$$

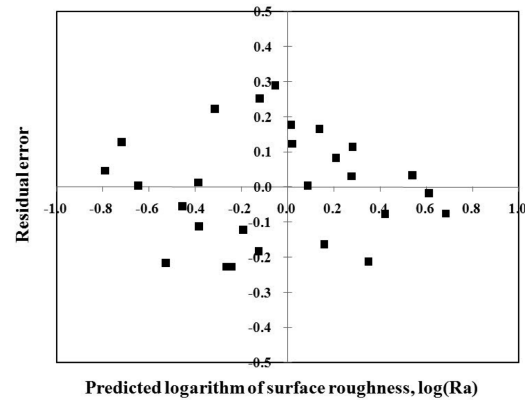
여기서 x_1 는 주축 회전수, x_2 는 이송속도 그리고 x_3 는 절삭깊이 이다.

이와 같이 추정한 비선형 회귀방정식은 Table 6의 비선형 회귀의 분산 분석 결과에서 볼 수 있듯이 유의 확률 P가 0.05 이하의 값을 가지고 있기 때문에 유효하다. 그리고 결정계수 R^2 은 87.5%로 선형 회귀방정식과 비슷한 신뢰성을 가지고 있다.

Fig. 5는 추정한 비선형 회귀식에 대한 잔차 분석 결과로 (a)잔차 확률도와 (b)예측치에 대한 잔차 분포도를 나타내었다. (a)에서 관측점에 대해 잔차의 변화가 특정 형태를 나타내지 않기 때문에 잔차들은 서로 독립적이고 정규분포를 가지고 있으며, (b)에서 잔차가



(a) Residual probability plot



(b) Residual distribution plot

Fig. 5. Result of residual error analysis on non-linear regression model.

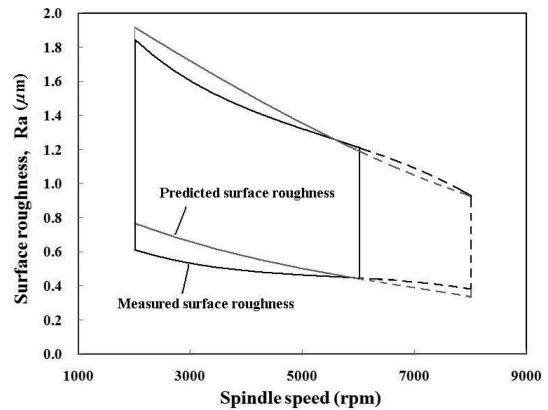


Fig. 6. Line fit plot of spindle speed on non-linear regression model.

x축에 대하여 대칭 형태로 고르게 분포되어 잔차들의

동분산성을 만족하고 있다. 그리고 Fig. 6의 주축회전수에 대한 선 적합도에서도 8000 rpm까지 실측한 표면정도와 유사한 형태를 가지고 있다.

이러한 결과로 볼 때, 본 연구에서 추정된 비선형 회귀방정식 (9)는 알루미늄 합금 AI7075의 가공조건인 주축회전수, 이송속도 및 절삭깊이의 변화에 따라 피삭재의 표면정도를 예측하기 위한 수학적 모델로 매우 적합하다고 판단되며, 이를 통해 양호한 표면정도를 얻을 수 있는 최적의 가공조건을 선정할 수 있다고 생각된다. 그리고 본 연구에서 추정된 비선형 회귀방정식은 비록 알루미늄 합금인 AI7075소재에 대하여 적용이 가능하지만 비선형 중회귀 분석에 의한 표면정도 예측 방법은 다른 소재의 고속 엔드밀 가공시 최적 가공조건 선정에도 매우 유용하게 적용할 수 있다고 생각한다.

4. 결 론

알루미늄 합금 AI7075의 평면 엔드밀 가공을 위한 가공조건에 따라 표면정도를 측정하여 분산분석과 회귀분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가공조건에 대한 표면정도의 분산분석 결과에서 AI7075를 엔드밀로 평면가공을 할 때 주축 회전수와 이송속도가 표면정도에 가장 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

(2) 선형 회귀분석을 통하여 추정된 선형 회귀방정식은 분산분석 결과 유의확률 P가 0.05 이하의 값을 가지고 있으며, 결정계수 R^2 은 87.3%로 유의하였지만 잔차의 동분산성 가정에 위배되므로 표면정도를 예측하기 위한 수학적 모델로는 적합하지 않다.

(3) 비선형 회귀분석을 통하여 추정된 비선형 회귀방정식 또한 유의확률 P는 0.05 이하이고 결정계수 R^2

은 87.5%로 유의 하였으며, 잔차 가정을 모두 만족하고 있다. 따라서 비선형 회귀 방정식이 가공조건 변화에 따라 AI7075의 표면정도를 예측하기 위한 수학적 모델로 매우 적합하다.

후 기

본 연구는 동아대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Sakuma. K., Taguchi. K., and Kinjo. S., "Study on Deep Hole Drilling with Solid Boring Tools, The Effect of Tool Material on the Cutting Performance," *Bulletin of the JSME*, Vol. 21, No. 153, pp. 532-539, 1978.
2. Youn J. W., Lee K. Y., Lee S. C., and Choi J. G., "Detection of Tool Wear using Force Measurement in Turning," *KSMTE*, Vol. 10, No 1, pp. 1-9, 2001.
3. Henriksen, E. K., "Chip Breaking-A Study of Three Dimensional Chop Flow," *ASME*, Vol. 9, pp. 53-59, 1994.
4. Nakamura S., "High-Speed Spindles for Machine Tools," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 30, No. 4, pp. 291-294, 1996.
5. Brown M. B. and Forsythe A. B., "Order Statistics and Their Uses in Testing and Estimation," *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 69, pp. 364-367, 1974.
6. Park S. H., *Modern design of experiment*, Minyung Co., 2002.
7. Draper N. R. and Smith H., "Applied Regression Analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 28-45, 1966.
8. Seber G. A. F., "Linear Regression Analysis," John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 35-89, 1977.