

완전요인계획에 의한 선삭가공시 표면거칠기 예측

양승한*, 이영문*, 배병중**

Surface roughness prediction with a full factorial design in turning

Seung-Han Yang*, Young-Moon Lee*, Byong-Jung Bae**

Abstract

The object of this paper is to predict the surface roughness using the experiment equation of surface roughness, which is developed with a full factorial design in turning. 3^3 full factorial design has been used to study main and interaction effects of main cutting parameters such as cutting speed, feed rate, and depth of cut, on surface roughness. For prediction of surface roughness, the arithmetic average (Ra) is used, and stepwise regression has been used to check the significance of all effects of cutting parameters. Using the result of these, the experimental equation of surface roughness, which consists of significant effects of cutting parameters, has been developed. The coefficient of determination of this equation is 0.9908. And the prediction ability of this equation was verified by additional experiments. The result of that, the coefficient of determination is 0.9718.

Key Words : Surface roughness (표면 거칠기), Full factorial design (완전요인계획), Analysis of variance (분산분석, ANOVA), Design of experiments (실험계획법), Stepwise regression (단계적 회귀)

1. 서 론

현대산업이 고도화됨에 따라 기계가공제품에 대한 높은 정밀도와 제품표면의 높은 품위를 요구하고 있으며 제품표면의 품위는 표면거칠기에 의해 평가된다. 이에 표면거칠기가 중요한 인자로 인식되고 있으며 이에 대한 연구가 행해지고 있다. 또한 일반적으로 절삭속도, 이송, 절삭깊이에 의해 제품가공결과가 달라지는 것으로 알려져 있다. 따라

서 이들 상호 - 표면거칠기와 절삭속도, 이송, 절삭깊이간의 관계에 대한 연구가 많이 이루어져 왔다¹⁾⁻⁵⁾.

하지만 이러한 기존의 연구들은 대부분 수학적, 통계학적 배경없이 한번에 하나의 인자만을 변화시켜 실험함으로써 많은 실험량이 요구되어 왔다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 대두된 방법이 실험횟수를 줄이면서 통계적인 방법을 사용할 수 있는 실험계획법(design of experiments)을 이용하는 것이다. Wu⁶⁾는 처음으로 공구수명연구에 실험계획법의 하나인

* 경북대학교 기계공학부

** 경북대학교 대학원 기계공학부

반응표면법(response surface methodology)을 이용하였다. Choudhury^[7]는 고정도강의 표면거칠기 예측 실험에서 2³요인계획법(2³ factorial design)을 이용하였다. 여기서 그는 1차의 회귀식으로는 표면거칠기를 예측할 수 없음을 보이고 추가의 실험을 통하여 2차의 회귀식을 만들어서 표면거칠기를 예측하였다. 또한 Yang^[9]은 다구찌방법(Taguchi method)을 이용하여 표면거칠기를 최소로 하는 최적 조건을 찾았으나, 이 방법은 실험에 사용된 조건 중에서 최적 조건을 찾는 것으로 표면거칠기의 경향을 알기에는 불충분하다.

이외 몇몇 연구자들^[8,10]이 표면거칠기 평가시 실험계획법을 이용하였다. 이들은 대부분 2n요인계획법을 이용하여 실험을 행하였으며, 실험식은 1차식을 시도하였다. 하지만 앞에서 밝힌 바^[7]와 같이 2n요인계획법에 의한 1차 회귀식은 부정확하였으며 이를 보완하기 위해 추가 실험을 하여 2차식을 만들었다. 또한 ANOVA 검정에서 유의하지 않은 것으로 나타난 인자들 역시 회귀식에 포함하여 실험식을 작성하여 불필요한 인자들이 포함된 회귀식이 되었다.

따라서 본 논문에서는 2차의 회귀식을 개발하기 위해 3n요인계획법(3ⁿ full factorial design)을 이용하였다. 또한 각각의 요인에 대해 효과별(각각의 주효과와 교호작용)로 구별하여 ANOVA검정을 하여 유의하지 않은 주효과와 교호작용들을 제거한 회귀식을 개발하였다 또한 이렇게 개발된 회귀식을 이용하여 다른 실험조건에서의 표면거칠기값을 예측하고, 실험치와 비교하여 예측능력을 알아보았다.

2. 이론적 배경

2.1 표면거칠기^[11]

모든 표면은 제조방법과 무관하게 고유한 특징들을 가지고 있으며, 이 특징을 표면조

직(surface texture), 표면정도(surface finish) 혹은 표면거칠기(surface roughness)라고 한다. 표면거칠기를 나타내기 위하여 일반적으로 가장 널리 사용되는 것은 산술평균(arithmetical mean value) Ra이다. Ra는 AA(arithmetic average) 또는 CLA(center-line average, 중심선 평균)로도 표시한다. 거칠기 곡선의 형태가 Fig.1과 같은 경우에 대해 Ra는 다음과 같이 정의 된다.

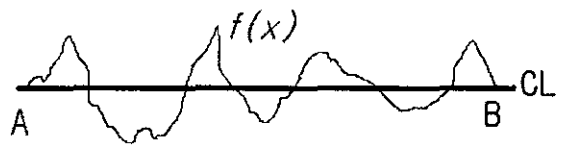


Fig. 1 Profile of surface roughness

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (1)$$

Fig.1에서 기준선 AB의 위치는 이 선의 위부분 면적들과 아래부분 면적들의 합이 같아지도록 정해진다.

2.2 요인계획법^[12]

실험계획법이란 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수로 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 만들었다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자(factor)를 선정하고, 실험방법을 택하였으며, 실험순서를 정하고, 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다. 실험계획법에서 많이 사용되는 데이터의 분석방법으로는 분산분석(analysis of variance, ANOVA), 상

관분석(correlation analysis), 회귀분석(regression analysis)등이 있다.

일반적으로 k^n 요인계획법(k^n factorial design)이란, 인자의 수가 n 이고 각 인자의 수준수가 k 인 실험계획법으로, 모든 인자간의 수준의 조합에서 실험이 이루어지는 실험이다. 요인계획법에 의한 실험을 요인실험(factorial experiment)이라고 하고, 요인실험을 통해서 모든 요인효과(인자의 주효과와 교호작용)를 추정할 수 있다.

kn 요인실험에서는 2수준계와 3수준계가 널리 쓰이고 있다. 즉 2^n 과 3^n 요인실험이 많이 사용된다. 2^2 요인실험이면 인자가 두 개로 A, B이고 각 인자의 수준이 2인 실험이다. 이러한 실험을 기초로 한 회귀모형(regression model)을 만들 경우 회귀식은 식(2)과 같이 된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times a + \beta_2 \times b + \beta_3 \times ab \quad (2)$$

만약 2^3 요인실험을 할 경우 회귀식은 (3)와 같이 된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times a + \beta_2 \times b + \beta_3 \times c + \beta_4 \times ab + \beta_5 \times bc + \beta_6 \times ac + \beta_7 \times abc \quad (3)$$

식(2)과 식(3)에서 보는 바와 같이 2^n 요인계획법을 기초로 한 회귀모형은 1차의 회귀식을 만들 수 있다. 만약 본 실험에서와 같이 2차의 회귀식을 원할 경우에는 3^n 요인계획법을 이용한다. 즉 3^2 요인실험을 기초로 한 회귀식은 식(4)과 같이 된다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \times a + \beta_2 \times a^2 + \beta_3 \times b + \beta_4 \times b^2 + \beta_5 \times ab + \beta_6 \times a b^2 + \beta_7 \times a^2 b + \beta_8 \times a^2 b^2 \quad (4)$$

3. 실험

3.1 실험조건

요인계획법에 의한 선삭가공시 표면거칠기를 평가하기 위해 다음과 같은 실험을 행하였다.

절삭실험은 범용선반(국내, 광주남선선반㈜)을 이용하였으며, 절삭공구로는 TPMP160408 인서트를 사용하였으며, 공구홀더로는 CTGPR 2525M16를 사용하였다. 피삭재로는 기계구조용 탄소강인 SM45C를 사용하였다.

실험조건은 앞에서 서술한 것과 같이 2차의 회귀식을 만들기 위해 각각의 인자(절삭속도, 절삭깊이, 이송)에 대해 3가지 수준으로 하였으며, 각각의 단계에 해당하는 값들은 Table 2와 같이 하였다. 또한 실험에 의한 오차를 줄이기 위해 임의의 순서로 실험을 행하였다.

그리고 실험을 통해 구해진 실험식의 예측능력을 검증하기 위해 추가의 실험을 실험식이 구해진 뒤 행하였다. 이 때 실험한 조건들은 Table 3에 나타난 바와 같이 절삭속도와 절삭깊이는 3단계로, 이송은 2단계로 하였다.

Table 1 Lathes specifications

Spindle speed	17~1200 rpm (12steps)
Feed	0.049~1.381 mm/rev (40steps)
Power	10 HP

Table 2 Cutting conditions for modeling

Cutting parameter	1	2	3
Cutting speed, V (m/min)	80	140	200
Feed, F (mm/rev)	0.098	0.296	0.493
Depth of cut, D (mm)	0.8	1.6	2.4

Table 3 Cutting conditions for prediction

Cutting parameter	1	2	3
Cutting speed, V (m/min)	80	140	200
Feed, F (mm/rev)	0.197	0.394	X
Depth of cut, D (mm)	0.8	1.6	2.4

절삭가공이 끝난 피삭재의 거칠기를 표면조도계(Mitutoyo, Surf-test-500)로 측정하였으며, 측정에 사용된 표면조도계의 사양은 Table 4에 나타내었다. 측정시 컷오프(cut-off) 값은 0.8mm 또는 2.5mm로 하였으며, 측정범위(measuring range)는 80 μ m 또는 600 μ m로 하였다.

Table 4 Surface roughness testers specifications

Model : Mitutoyo Surf-test-500
Measuring range [resolution] : 8 μ m[0.001 μ m], 80 μ m[0.01 μ m], 600 μ m[0.1 μ m]
Straightness : 0.3 μ m/100mm

3.2 실험결과 및 실험식

먼저 중회귀분석시 직교성을 유지하기 위해 인자들을 식(5)과 같은 방법을 이용하여 통계적 코딩(statistical coding)값으로 변환하였다.

여기서 D는 절삭깊이, V는 절삭속도, F는 이송이며, d1은 절삭깊이에 관해 정규화(normalization)한 1차식을, d2는 절삭깊이에 관한 2차식, d2v2f2는 절삭깊이에 관한 2차식과 절삭속도에 관한 2차식, 그리고 이송에 관한 2차식의 곱으로 이루어지는 인자이다.

그리고 변환된 통계적 코딩값을 이용하여 본 연구에서는 표면거칠기(Ra)를 식(6)과 같이 가정하였다.

$$d_1 = \frac{D-1.6}{0.8}, \quad d_2 = \left(\frac{D-1.6}{1.8}\right)^2,$$

$$v_1 = \frac{V-140}{60}, \quad v_2 = \left(\frac{V-140}{60}\right)^2,$$

...

$$d_1 v_1 = \left(\frac{D-1.6}{0.8}\right) \left(\frac{V-140}{60}\right),$$

$$d_1 v_2 = \left(\frac{D-1.6}{0.8}\right) \left(\frac{V-140}{60}\right)^2,$$

$$d_2 v_2 f_2 =$$

$$\left(\frac{D-1.6}{0.8}\right)^2 \left(\frac{V-140}{60}\right)^2 \left(\frac{F-0.296}{0.198}\right)^2 \quad (5)$$

$$R_a = \beta_0 + \beta_1 \times d_1 + \beta_2 \times d_2 + \beta_3 \times f_1 + \beta_4 \times f_2 + \dots + \beta_{26} \times d_2 f_2 v_2 \quad (6)$$

이때 총 변수의 수는 26개이며 $\beta_0 \sim \beta_{26}$ 은 구해야 할 계수 값들이다.

가정된 식을 기초로 하여 단계적 회귀법(Step-wise regression method)에 의해 유의한 변수를 찾았다. Table 5는 측정결과를 이용하여 $\alpha = 0.05$ 인 유의수준(95%유의수준)을 기준으로 하여 단계적 회귀를 행한 결과이다. Table 5에서 보는 바와 같이 $\alpha = 0.05$ 인 유의수준(95%유의수준)을 기준으로 할 경우 유의한 변수는 이송에 관련된 변수 2개(f_1, f_2)와 절삭깊이에 관한 2차식과 이송에 관한 2차식과 절삭속도에 관한 2차식의 곱으로 이루어진 변수($d_2 f_2 v_2$) 등 총 3개의 변수만 유의한 것으로 나타났다. Table 6은 이 3개의 변수를 이용하여 ANOVA-test를 한 결과이다.

Table 5 Stepwise regression method

Step	Variable	Partial R2	Model R2	F-value	Pr>F
1	f1	0.9367	0.9367	370.04	<0.0001
2	f2	0.0522	0.9889	112.93	<0.0001
3	d1f1v2	0.0019	0.9908	4.70	0.0408

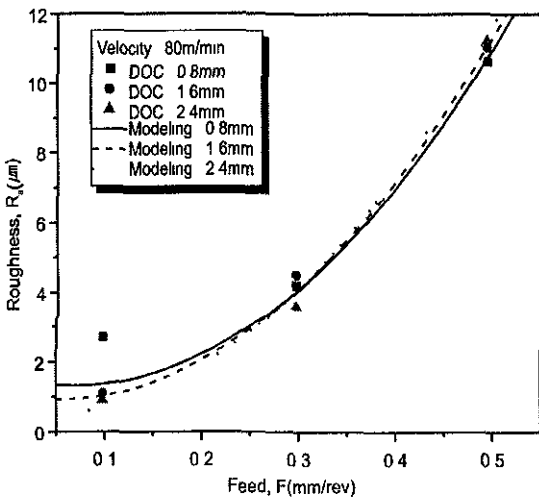
Table 6 ANOVA-test result

Source	D.F	S.S	M.S	F value	Pr>F
Model	3	476.1788	158.7263	824.74	<0.0001
Error	23	4.4265	0.1925		
Total	26	480.6053			

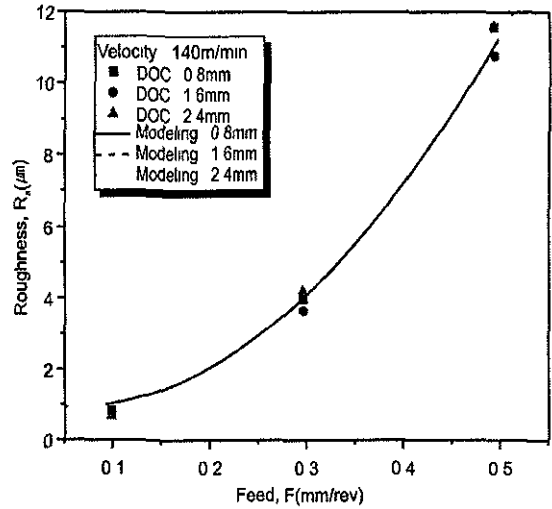
$$R_a = 3.98954 + 5.00278 \times f_1 + 2.04468 \times f_2 + 0.33626 \times d_1 f_1 v_1 \quad (7)$$

이들 유의한 변수들만을 이용하여 실험식을 구하면 식(7)과 같이 된다. 이 식은 처음 가정한 식(6)과 같이 26개의 변수들로 이루어진 식에 비해 매우 적은 수의 변수로 구성 되어 있으며 이 실험식의 결정계수(coefficient of determination, R^2) 또한 0.9908으로 매우 높은 값을 나타내고 있다.

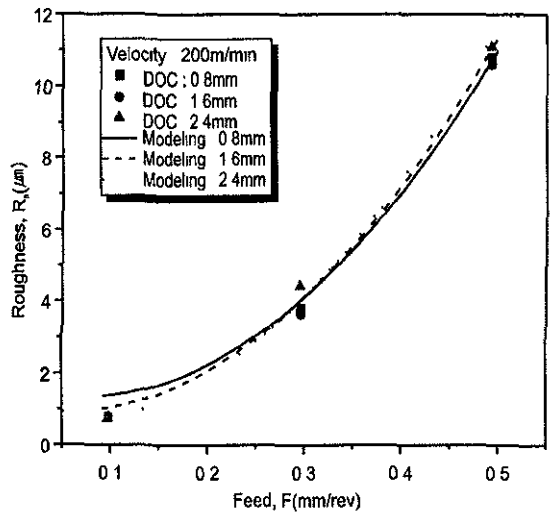
Fig.2는 실험을 통해 구해진 표면거칠기값(■, ●, ▲)과 실험식을 이용하여 구한 값(점선과 실선)을 나타낸 것이다. 결정계수에서도 알 수 있듯이 실제 실험값과 식에 의한 값이 매우 유사하다. 그리고 이송이 표면거칠기값에 가장 많은 영향을 미치고 있으며, 절삭속도와 절삭깊이의 경우 그 영향은 미미



(a) at velocity 80 m/min



(b) at velocity 140 m/min



(c) at velocity 200 m/min

Fig. 2 Measured(■, ●, ▲) and predicted(solid and dotted line) surface roughness in modeling experiment

한 것을 알 수 있다. 이는 Table 5에 나타난 바와 같이 이송에 관한 두 주효과(f_1, f_2)만으로도 결정계수 R^2 가 0.9889로 매우 높은 값을 나타내는 것에서도 알 수 있다.

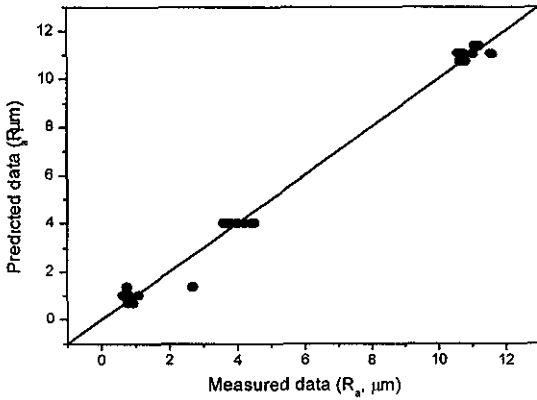
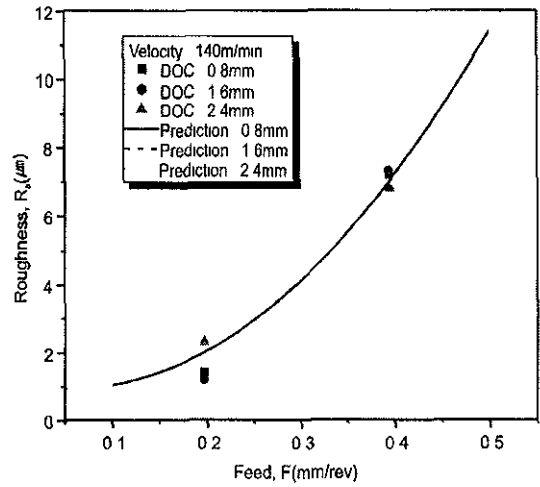


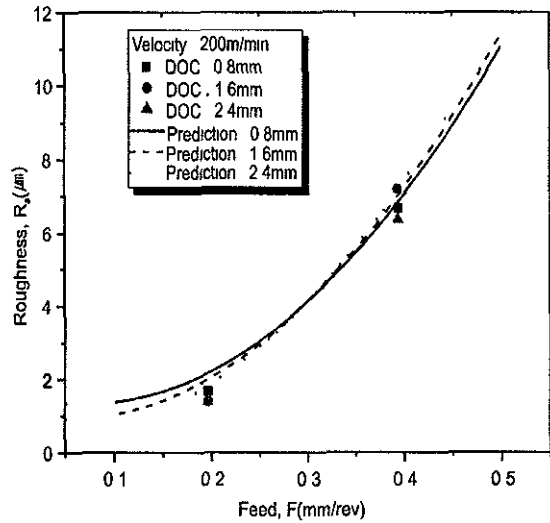
Fig. 3 Comparison of measured and predicted surface roughness in modeling experiment

3.3 예측능력에 대한 검증

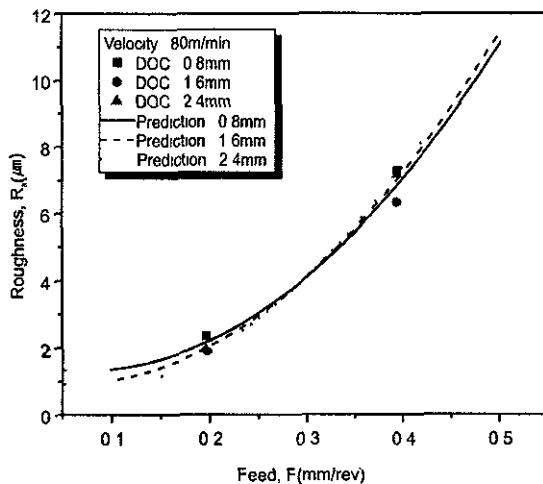
앞에서 구한 실험식의 예측능력을 알아보기 위해 추가의 실험을 행하였다. 이 때의 실험조건은 Table 3에 나타낸 것과 같다. 그리고 이 추가 실험에 의한 표면거칠기값과 실험식을 이용하여 구한 예측값을 비교하였다. 예측능력은 Fig.4 에 나타낸 바와 같이 예측능력은 매우 뛰어나며, 결정계수 R^2 또한 0.9718로 매우 높은 값을 나타내었다.



(b) at velocity 140 m/min



(c) at velocity 200 m/min



(a) at velocity 80 m/min

Fig. 4 Measured(■,●,▲) and predicted(solid and dotted line) surface roughness in prediction experiment

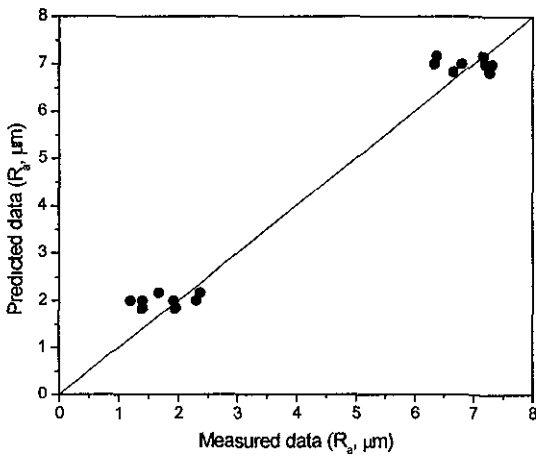


Fig. 5 Comparison of measured and predicted surface roughness in prediction experiment

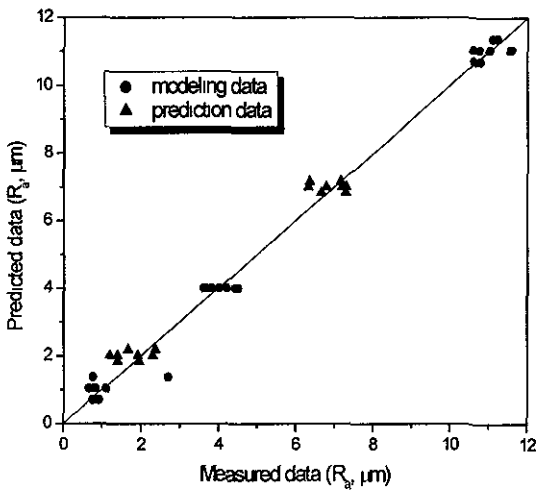


Fig 6 Comparison of measured(●) and predicted(▲) surface roughness in all (modeling and prediction) experiments

4. 결 론

본 연구에서는 위와 같은 실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 선삭시 절삭조건에 따른 표면거칠기를 예측하기 위해 요인계획법을 이용하였다.

- (2) 실험결과와 단계적 회귀법을 이용하여 유의한 변수들로 구성된 2차의 실험식을 개발하였다. 이 실험식은 변수의 수가 3개로 처음 가정한 모델의 26개 변수에 비해 매우 적은 수의 변수로 이루어졌으며 이 식의 결정계수 R2값은 0.9908로 매우 높은 정도를 나타낸다.
- (3) 본 연구에서 구한 실험식을 이용하여 다른 절삭조건에서의 표면거칠기값을 예측하였다. 이 때의 결정계수 R2값은 0.9718로 매우 높은 예측능력을 나타내었다.
- (4) 이러한 요인계획법을 이용한 2차의 실험식개발로 표면거칠기를 예측함에 있어서 높은 예측력을 가질 수 있고 표면거칠기를 향상시킴으로써 표면거칠기에 의해 평가되는 높은 정밀도와 제품표면의 높은 품위를 갖는 제품을 생산할 수 있다. 또한 이러한 실험계획법을 통해 많은 실험량을 줄임으로써 생산력 증대에 많은 효과를 기대할 수 있다.

참고문헌

- [1] N. Boubekri, M. H. Schneider and S. Asfour, Effects of Some Machining Variables in Lathe Facting using a Profilometer to Measure Surface Roughness, Quality Engineering, 5(2), pp.243-253, 1992.
- [2] W. Grzesik, A Revised Model for Predicting Surface Roughness in Turning, Wear, Vol. 194, No. 1, pp.143-148, 1996.
- [3] M. Thomas, Y. Beauchamp, Effect of Tool Vibrations on Surface Roughness during Lathe Dry Turning Process, Comput. Ind. Eng. Vol. 31, No. 3, pp.637-644, 1996.

- [4] E. Capello and P. Davoli, Residual Stresses and Surface Roughness in Turning, *J. eng. Mater. Technol.*, Vol. 121, No. 3 pp.346-351, 1999.
- [5] Y. Beauchamp, M. Tomas, J. Masounave and A. . Youssef, The Effect Investigation of Lathe Dry Turning Operation Variables on Surface Roughness, Technical report. ÉTS, Montréal(Canada), 1993
- [6] S. M. Wu, Tool Life Testing by Response Surface Methodology, Part I & Part II, *J. Eng. Ind.*, pp.105-116, 1964.
- [7] L. A. Choudhury, M. A. el-Baradle, Surface Roughness Prediction in the Turning of High-Strength Steel by Factorial Design of Experiments, *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 67, pp.55-61, 1997.
- [8] Y. Beauchamp, M. Tomas, J. Masounave and A. . Youssef, Investigation of Cutting Parameter Effects on Surface Roughness in Lathe Boring Operation by Use of a Full Factorial Design, *Computers ind. Engne.* Vol. 31, No. 3/4, pp. 645-651, 1996.
- [9] W. H. Yang and Y. S. Tarng, Design Optimization of Cutting Parameters for Turning Operations based on the Taguchi Mechod, *J. of Material Processing Technology*, Vol. 84, pp.122-129, 1998.
- [10] S. M. Darwish, The Impact of Tool Material and the Cutting Parameters on Surface Roughness of supermet 718 Nickel Superalloy, *J. of Material Processing Technology*, Vol. 97, Issues 1-3, pp.10-18, 2000.
- [11] S. Kalpakjian, *Manufacturing Process for Engineering Materials*, Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1991.
- [12] 박성현, 현대실험계획법, 민영사, pp. 347-383, 1997.