

밀링가공에서 표면거칠기에 대한 절삭인자의 정량적 분석과 예측모델에 관한 연구

장성민^{*,#}, 강신길^{**}

^{*}조선이공대학교 기계과, ^{**}동양미래대학교 기계공학부 기계과

A Study on the Quantitative Analysis of Cutting Parameters and Prediction Model for Surface Roughness in Milling

Sung-Min Jang^{*,#}, Shin-Gil Kang^{**}

^{*}Dept. of Mechanical Engineering, Chosun College of Science & Technology.

^{**}Dept. of Mechanical Engineering, Dongyang Mirae University.

(Received 4 May 2017; received in revised form 29 May 2017; accepted 1 June 2017)

ABSTRACT

In this study, the influence of various factors on surface roughness was investigated using the Taguchi experimental method through high-speed machining processing. Feed rate, pitch, tool diameter, and depth of cut are widely applied to high-speed machining conditions for mold production. Each of these factors was implemented and classified into three levels; then, after high speed machining, surface roughness was measured, the S/N ratio was analyzed, and the influence on the surface roughness of control factors was analyzed quantitatively by ANOVA. Using this information, a mathematical model for predicting surface roughness was derived from multiple regression analysis. This mathematical model enables the surface roughness value after high-speed machining to be predicted at the production stage, before machining, for a wide range of machining conditions.

Key Words : Surface Roughness(표면거칠기), Control Factor(제어인자), ANOVA(분산분석), Regression Analysis(회귀분석), Mathematical Model(수학적 모델)

1. 서 론

품질과 생산성 제고를 위한 연구는 지속되고 있다. 최근 레이저나 워터젯 가공 등을 응용한 다양한 기술들이 금형 등 기계가공 분야에 적용되고 있으나 여전히 절삭가공이 기본 공정이다. 절삭가공기술에서 최근 고속가공기술의 수요가 늘어나고 있다.

고속가공은 고속의 회전수로 주축이 회전하기 때문에 기존의 가공방법과 비교하여 날 당 절삭량이 매우 적다. 그러므로 작은 부하로 인해 이송속도를 증가시킬 수 있어 가공 생산성에 미치는 영향이 매우 크다. 또한 가공 중 공구의 변형을 적게 할 뿐만 아니라 가공 후 표면거칠기가 매우 좋아지기 때문에 후 공정에 소요되는 시간을 절감시키거나 때때로 후 공정의 생략이 가능하다는 대단히 중요한 특징이 있으므로 현장에서는 고속가공을 선호하고 있다. 특히 곡면가공을 포함한 가공면이

Corresponding Author : twkjsm@cst.ac.kr

Tel: +82-62-230-8203, Fax: +82-62-230-8200

매우 중요한 3차원 금형 제조현장에서는 매우 큰 생산 효율성을 발휘하고 있다. 정밀가공 부품의 품질과 생산성에 미치는 다양한 영향 중 작업자가 고려하는 일반적인 파라미터는 공구조건과 절삭조건 등이 있다. 생산가공에 적용되는 절삭 파라미터가 제품의 결과 데이터에 미치는 영향은 그 데이터가 갖는 특성에 따라 각각 달라질 수 있다. 예로서 공구수명, 공구변위, 재료 제거량, 표면거칠기 등과 같이 얻고자 하는 결과 데이터의 특성이 모두 다르기 때문에 생산에 적용된 절삭 파라미터의 영향은 모두 다르게 나타나는 것이다. 일반적으로, 절삭 파라미터는 피삭재와 공구의 특성에 따라 다르게 적용되어야 하고 공구 또는 피삭재에서 얻고자 하는 결과 데이터를 고려하여 각각의 다른 절삭 파라미터를 검토 후 적용할 필요가 있다. 그 이유는 결국 가공 제품의 품질과 생산성에 미치는 영향을 고려하여야 하기 때문이다. 본 연구는 가공성이 좋은 플라스틱 금형 합금강인 KP4를 대상으로 표면거칠기에 영향을 미치는 다양한 절삭 파라미터를 적용한 직교배열 조건의 밀링가공 후 분산분석에 의해 실험에 적용된 인자들이 특성치인 표면거칠기에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 다중회귀분석방법을 이용한 특성치의 예측 모델을 도출하여 분석하였다.

2. 실험계획 이론

KP4의 고속가공 후 표면거칠기에 미치는 영향의 정량적 분석을 위해 다구찌 실험계획법 이론 중 망소특성함수를 이용하여 S/N비 값을 도출하였다. 적용된 다구찌 실험계획법은 산업의 각 분야에서 적용이 가능한 이론으로써, 본 연구에서 분석하고자 하는 표면거칠기뿐만 아니라 다양한 특성치에 대하여 파라미터의 영향을 분석한 사례 등이 많은 논문을 통해 알려져 있다^[1~8].

다구찌 실험계획법에서 신호대 잡음의 비는 S/N비로 표현한다. 본 연구의 특성치인 표면거칠기는 그 값이 작을수록 고정밀 가공을 하였다고 할 수 있다. 이와 같이 특성치의 값이 작은 값을 요구할 경우, 다구찌 실험계획법에서는 그러한 손

실함수를 망소특성이라 한다. 신호 대 잡음비는 그 값이 크게 나타날수록 작업자가 제어할 수 없는 잡음에 둔감한 조건으로 가공하였다고 할 수 있다. 반복 측정된 데이터가 Y_1, Y_2, \dots, Y_n 일 경우 잘 알려진 것과 같이 MSD(mean squared deviation)는 식 (1)로 나타낸다.

$$MSD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i^2 \quad (1)$$

이때 N 은 실험의 수이며, Y_i 는 i 차 실험값이다. 식(1)은 특성치의 값이 Zero가 되는 것을 최종 목적으로 하므로 0으로부터의 MSD를 의미하며, 결국 잘 알려진 바와 같이 S/N비는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$S/N = -10 \log(MSD) \quad (2)$$

Fig. 1은 다구찌 실험계획법 적용에 의한 본 연구에서의 실험순서 및 분산분석 후 과정을 프로우차트로 나타낸 것이다^[9].

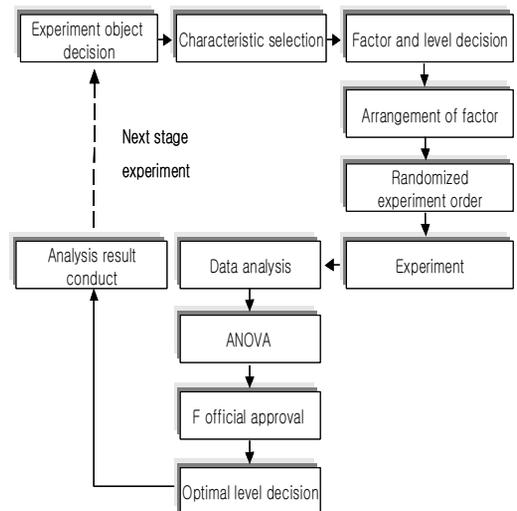


Fig. 1 Flow chart for the experimental design method

3. 실험조건 및 방법

제조현장에서 선삭과 밀링가공 등에 적용되는 절삭조건 중 가공면의 품위에 영향을 미치는 인자로는 공구의 기하학적 형상, 이송속도, 절삭깊이 등이 있다. 고정밀의 금형가공을 위한 공정으로써, 머시닝센터를 이용한 고속가공은 생산현장에서 이미 일반화 되었다. 일반적으로 금형의 형상에 곡면이 포함되어 있는 경우에는 황삭 후 정삭가공에 볼 엔드밀 공구를 사용한다. 볼 엔드밀 공구를 사용한 고속가공 후 가공 면의 상태는 많은 절삭 인자들에 의해 영향을 받는다. 그러나 실제 가공에 있어서 현장의 작업자가 모든 인자들을 제어하는 것은 매우 어려운 일이다. 직접적으로 제어할 수 있는 인자인 절삭조건 외에는 무시하는 것이 대부분이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 플라스틱 금형강인 KP4를 대상으로 곡면의 형태를 가공 후 가공면의 품질에 영향을 미치는 인자들을 정량적으로 분석하였고, 그 결과를 향후 곡면을 포함한 금형생산에 고려하고자 한다. 가공조건은 공구의 이송속도(m/min) Φ , 피치(mm) X , 공구의 직경(mm) Ψ , 절삭깊이(mm) Ω 으로 하였다. 이들 조건은 실제 현장의 작업자가 금형 가공 후 그 품질을 위해 제어할 수 있는 제어인자이다. 각 제어인자에 대하여 실험에 적용된 상세 조건은 Table 1에 나타내었다. 그리고 제어인자를 가공을 위한 실험에 적용하기 위해 채택된 $L_{27}(3^{13})$ 직교배열 테이블 조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Level of independent variables

Symbol	Parameter	Unit	Level		
			1	2	3
Φ	Feed rate	mm /min	500	1000	2000
X	Pitch	mm	0.025	0.05	0.1
Ψ	Tool diameter	mm	4	5	6
Ω	Depth of cut	mm	0.05	0.1	0.2

Table 2 Experiment layout using $L_{27}(3^{13})$ an orthogonal array

$L_{27}(3^{13})$ test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1	1
6	1	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

4. 실험결과 및 고찰

직교배열에 의한 밀링가공 후 분산분석을 실시하기 위하여 먼저 가공면에 대한 특성치인 표면거칠기 값을 측정하여야 한다. Fig. 2는 밀링가공 실험 후 가공면의 상태를 나타낸 사진이다. Table 3은 27번의 실험에 적용된 가공조건과 각각의 조건에 의한 가공 후 측정된 표면거칠기 결과 값을 나타낸 것이다.



Fig. 2 Photograph of workpiece after machining

Table 3 Experiment results for surface roughness

Test no	ϕ (mm/min)	X (mm)	ψ (mm)	Ω (mm)	Surface roughness
1	500	0.025	4	0.05	0.5429
2	500	0.025	5	0.1	0.3584
3	500	0.025	6	0.2	0.4358
4	500	0.05	4	0.1	0.4951
5	500	0.05	5	0.2	0.4308
6	500	0.05	6	0.05	0.4533
7	500	0.1	4	0.2	0.5406
8	500	0.1	5	0.05	0.5369
9	500	0.1	6	0.1	0.4817
10	1000	0.025	4	0.1	0.6388
11	1000	0.025	5	0.2	0.7615
12	1000	0.025	6	0.05	0.4705
13	1000	0.05	4	0.2	1.0799
14	1000	0.05	5	0.05	1.1019
15	1000	0.05	6	0.1	0.5954
16	1000	0.1	4	0.05	1.3194
17	1000	0.1	5	0.1	0.8803
18	1000	0.1	6	0.2	0.9874
19	2000	0.025	4	0.2	1.8856
20	2000	0.025	5	0.05	0.783
21	2000	0.025	6	0.1	0.9438
22	2000	0.05	4	0.05	1.4964
23	2000	0.05	5	0.1	1.1934
24	2000	0.05	6	0.2	1.4445
25	2000	0.1	4	0.1	2.1332
26	2000	0.1	5	0.2	2.169
27	2000	0.1	6	0.05	1.441

4.1 분산분석

직교배열에 의한 실험 후 그 결과를 분산분석함으로써 실험에 적용된 각 제어인자들이 특성치에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 응답성 결과를 도출할 수 있다. 본 연구의 실험에 적용된 제어인자는 공구의 이송속도(m/min), 공구간 거리인 피치(mm), 공구의 직경(mm), 절삭깊이(mm)이며 특성치인 표면거칠기에 미치는 이들의 영향을 분석하기 위한 분산분석 결과는 Table 4에 나타내었다. 그리고 각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향의 정량적 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그 결과, 특성치에 가장 크게 영향을 미치는 제어인자는 이송속도(ϕ)이며, 72.98%의 비율로 매우 크게 나타났다. 이송속도는 생산속도와 비례한다. 즉, 이송속도는 특성치와 생산성 측면에서도 영향을 크게 미치는 인자이므로 그 조건은 생산성을 고려하여 결정하여야 한다. 두 번째로 영향을 크게 미치는 인자는 피치(X)로 분석되었고, 그 비율은 9.97%이다. 피치는 공구와 공구간 거리를 의미하며, 그 값이 작을수록 가공면의 정밀도 향상에 기여한다. 반면 피치의 값이 지나치게 큰 경우에는 공구의 이동 경로 간 커슥(Cusp)의 높이를 크게 한다. 이것은 가공면의 품질을 악화시킬 수 있다. 그러므로 피치 또한 생산성을 떨어뜨리지 않는 조건에서 적절히 조절해야 할 필요가 있다. 본 연구에 적용된 공구의 피치는 0.025~0.1의 범위에서 적용되었고 그 값이 크지 않아 특성치에 미치는 영향이 결과적으로 다소 작게 나타난 것이라고 판단된다. 그러나 피치의 값이 생산성에 미치는 영향이 크다는 것을 고려하면 향후, 피치 값 변화에 따른 표면거칠기의 변화를 실험적으로 고찰하여 품질 및 생산성 제고에 기여할 수 있는 피치 값의 선정이 필요하다고 사료된다. 공구의 지름이 특성치에 미치는 영향은 5.75%로 제어인자 중 이송속도, 피치 다음으로 영향을 주는 것으로 분석되었다. 절삭깊이는 공작물의 표면에서 Z방향의 수직 깊이를 의미한다. 과도한 절삭깊이는 가공 시 공구 선단부에서 절삭력의 크기를 크게 증가시켜 공구 변위 발생을 초래할 수 있으므로 주의가 필요하다. 본 연구의 실험조건에 적용된 절삭깊이는 0.05~0.2mm로 그 값이 크지 않게 적용되었으므로

Table 4 Analysis of variable

Source	Sum of Squares	DOF	Mean Square	F0	F (0.05)
ϕ	414.86	2	207.43	89.43	4.1
X	56.68	2	28.34	12.22	4.1
ψ	32.68	2	16.34	7.04	4.1
Ω	16.24	2	8.12	3.5	4.1
$\phi * X$	12.4	4	3.1	1.34	3.48
$\phi * \psi$	12.42	4	3.1	1.34	3.48
Error	23.19	10	2.32		
Total	568.47	26			

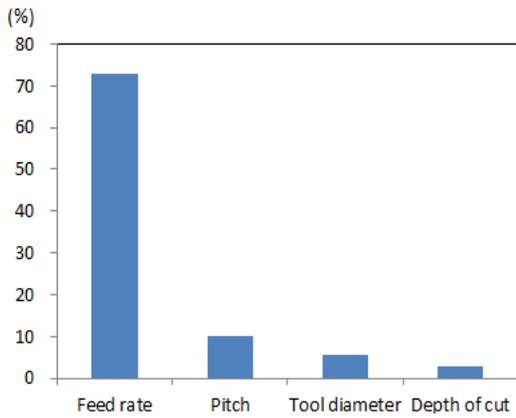


Fig. 3 Level of Contribution of control factors for surface roughness

로 표면거칠기에 미치는 영향은 2.86%로 매우 작게 나타난 것으로 판단된다.

4.2 특성치 모델

특정 데이터의 예측을 위해서는 축적된 실험 데이터를 기반으로 해야 한다. 실험 후 그 결과를 활용한 예측 가능한 식의 개발을 위해서는 그래프를 이용한 방법과 회귀분석을 이용한 방법을 적용할 수 있다. 그래프를 이용한 방법은 편리하고 직관적인 반면에 주관적 오차를 포함하고 높은 정밀도를 갖고 있지 않다는 단점이 있으나, 회귀분석을 이용한 방법은 그래프를 이용한 방법이 갖고 있는 이와 같은 단점을 해결할 수 있어 편리하다^[10]. 다구찌 실험계획 이론에 근거한 실험 후 다중

회귀분석 방법을 이용하여 특성치의 예측 가능한 식을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 $L_{27}(3^{13})$ 의 직교배열에 의한 밀링가공 실험 후 그 결과를 다중회귀분석 방법을 이용하여 특성치를 예측하기 위한 수학적 모델을 도출하였다. 고속 밀링가공에 적용된 각각의 인자들 즉, 공구의 이송속도 ϕ , 피치 X , 공구의 직경 ψ , 절삭깊이 Ω 그리고 상수 A, B, C, D, E 에 대하여 특성치는 다음과 같다.

$$R_a = A\phi^B X^C \psi^D \Omega^E \quad (3)$$

실험에 적용된 3수준 제어인자의 단순 계산을 목적으로 통계적 코딩 후 변환 식은 아래와 같다.

$$F_L = \frac{2(\ln f - \ln f_{\max})}{(\ln f_{\max} - \ln f_{\min})} + 1 \quad (4)$$

f : Each control factor

L : Level of control factor

f_{\max} : Maximum value of each control factor

f_{\min} : Minimum value of each control factor

식(4)를 식(3)에 대입 후 다음과 같은 식으로 변환된다.

$$P = a_0 + a_1 Q_1 + a_2 Q_2 + a_3 Q_3 + a_4 Q_4 \quad (5)$$

실험에 적용된 각각의 3수준 인자들을 대상으로 통계적 코딩 후 변환하여 나타낸 특성치에 대한 1차 모델은 다음과 같다.

$$\ln R_a = -0.19544 + 0.552662 Q_1 + 0.204283 Q_2 - 0.15189 Q_3 + 0.064455 Q_4$$

결과적으로 실험에 적용된 인자들의 통계적 다중 회귀분석 식은 다음과 같다.

$$R_a = 20.56\phi^{0.802} X^{0.372} \psi^{-0.242} \Omega^{0.093} \quad (6)$$

이와 같이 도출된 식은 결과적으로 이송속도, 피치, 절삭깊이는 작을수록 그리고 공구의 직경은 큰 것을 사용하여 가공할수록 우수한 품질의 표면 거칠기 결과를 얻을 수 있다는 것을 예측가능하게 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 직교배열 테이블 조건에서 볼 앤드밀을 사용한 고속밀링가공 후 표면거칠기에 대한 절삭인자의 정량적 분석과 다중회귀분석 방법을 적용한 수학적 예측모델에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 분산분석 후 표면거칠기에 미치는 인자는 이송속도가 92.98%의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 피치는 9.97%, 공구의 지름은 5.75%, 절삭깊이는 2.86%의 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
2. 직교배열 테이블을 이용한 실험 후 다중회귀분석 방법에 의한 표면거칠기 예측 모델을 도출하였다.
3. 예측 모델에 의하면 이송속도, 피치, 절삭깊이는 증가할수록 그리고 공구의 지름은 감소할수록 표면거칠기 값이 증가되어 품질을 저하시킨다는 것을 확인하였다.

REFERENCES

1. Davim, J. P., "Study of drilling metal-matrix composites based on the Taguchi Techniques," *Journal of a Materials Processing Technology*, Vol. 132, pp.250-254, 2003.
2. Lim, P. and Yang, G. E., "Optimal Cutting Condition of Tool in the High Speed Machining by Taguchi Design of Experiments," *J. of KSMPE*, Vol. 5, No. 4, pp. 59-64, 2006.
3. Im, S. H. and Kim, K. H., "The Improved Cutting Parameter Design of End-milling for SM25C Material," *J. of KSMPE*, Vol. 11, No. 4, pp. 31-38, 2012.
4. Chao, P. Y. and Hwang, Y. D., "An improved Taguchi's method in design of experiments of milling CFRP composite," Vol. 35, No. 1, pp.51-66, 1997.
5. Davim, J. P., "A note on the determination of optimal cutting condition for surface finish obtained in turning using design of experiments," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 116, pp. 305-308, 2001.
6. Su, Y. L., Yao, S. H., Wei, C. S., Wu, C. T and Kao, W. H., "Design of a titanium nitride-coated WC milling cutter," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, pp. 233-236, 1999.
7. Lee, E. J., Kim, H. K., Wang, D. H., Chung, H. S. and Lee, K. S., "A Study on the Electrical Discharge Machining Tap by using Cu Electrodes of the Cold-Work Tool Steel," *J. of KSMPE*, Vol. 15, No. 5, pp. 131-136, 2016.
8. Cho, S. J. and Kim, J. H., "A Study on Optimal Design for Linear Electromagnetic Generator of Electricity Sensor System using Vibration Energy Harvesting," *J. of KSMPE*, Vol. 17, No. 2, pp. 7-15, 2017.
9. Jang, S. M., Cho, M. W., Cho, W. S., Park, D. S., "Analysis of Cutting Parameters for Si₃N₄-hBN Machinable Ceramics using Tungsten Carbide Tool", *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 6, pp. 36-43, 2003.
10. Hong, M. S. and Lian, Z. M., "A Study on the Prediction Model of Surface Roughness by the Orthogonal Design for Turning Process," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 89-94, 2001.