

다구찌 방법을 통한 볼 엔드밀 절삭날 형상이 가공면 거칠기에 미치는 영향 분석

조철용^a, 류시형^{a*}

Analysis of Cutting Edge Geometry Effect on Surface Roughness in Ball-end Milling Using the Taguchi Method

Chul Yong Cho^a, Shi Hyoung Ryu^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeollabuk-do, 561-756, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 September 2014

Revised 11 November 2014

Accepted 24 November 2014

Keywords:

Ball-end mill

Taguchi method

Helix angle

Rake angle

Surface roughness

ABSTRACT

In this study, the effect of cutting edge geometry, such as helix and rake angles, on surface roughness in ball-end milling is investigated by using the Taguchi method. A set of experiments adopting the $L_{27}(3^{13})$ design with an orthogonal array are conducted with special WC ball-end mills having different helix and rake angles. Analysis of variance (ANOVA) is performed to analyze the effects of tool geometry and machining parameters, such as cutting speed, feed per tooth, and depth of cut, on surface roughness. The ANOVA results reveal that helix and rake angles are critical factors affecting surface roughness; the interaction of helix angle and cutting speed is also important. This research can contribute to novel cutting edge designs of ball-end mills and optimization of cutting parameters.

Nomenclature

- β_0 = nominal helix angle of ball-end mill
 β = helix angle at ball-end mill hemispheric part
 R_0 = nominal radius of ball-end mill
 R = cutting edge radius
 α = rake angle
 γ = clearance angle
 f_t = feed per tooth
 P_f = pick feed
 R_d = radial depth of cut

1. 서론

볼 엔드 밀링은 자유곡면의 가공에 널리 사용되며 제작되는 금형이나 기계부품의 치수정밀도, 형상정밀도, 표면거칠기 등을 결정하는 중요한 가공 공정이다. 볼 엔드밀 가공에서 절삭은 주로 반구부에 형성된 절삭날에 의해 이뤄지며 이 때 공작물과 절삭날의 접촉 위치에 따라 칩 생성 기구는 달라진다. 볼 엔드밀 가공에 관한 연구로는 절삭력 및 공구변형의 예측과 가공오차의 최소화^[1-6], 절삭조건에 따른 공구마모와 공구수명 변화^[7-9], 최적 공구경로의 생성을 통한 가공시간의 단축^[10,11], 고속가공에서의 절삭 특성 분석에^[12,13] 관한 연구들이 많이 보고되었다. 또한 볼 엔드밀의 반구부에 삽입날을 고정하고 세팅각 변화를 통하여 내마모성과 공구수명을 향상

* Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2325

Fax: +82-63-270-2315

E-mail address: ryu5449@jbnu.ac.kr (Shi Hyoung Ryu).

시키려는 시도가 있었다^{14,15)}. 그러나, 일부 공구 마모에 관한 실험적 연구를 제외하고는 볼 엔드밀 공구 기하가 가공 특성에 미치는 영향에 대한 연구 결과나 절삭날 형상 설계에 대한 연구는 미진한 실정이다¹⁶⁾. 최근들어 5축 공구 연삭기의 개발과 CAD/CAM 기술의 발전으로 공구설계 자유도가 높아짐에 따라, 볼 엔드밀 절삭날 형상과 가공 특성의 상관관계를 규명하는 연구가 체계적으로 수행될 필요성이 대두되고 있다.¹⁷⁾ 다구찌 방법은 실험 횟수를 최소화하면서 각 제어 인자들이 특성치에 미치는 영향을 효과적으로 분석하는 방법으로 밀링, 선삭 등에서 절삭 인자와 표면거칠기, 공구마모 등의 상관관계를 분석하는 기법으로 활용되고 있다^{18,19)}. 본 연구에서는 볼 엔드밀의 헬릭스각과 경사각을 변화시킨 특수 공구를 제작하여 실험을 수행하고, 절삭속도, 절삭깊이, 날 당 이송 등 절삭인자들이 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향을 다구찌 실험계획법을 적용하여 분석하였다.

2. 볼 엔드밀의 절삭 기구와 다구찌 방법

2.1 볼 엔드밀의 절삭 기구

볼 엔드밀은 반구부에 절삭날이 형성되어 위치에 따라 공구각 등 절삭날의 기하가 달라지고, Fig. 1에서 보듯이 절삭 방법과 조건에 의해 칩의 생성 기구가 변화한다. 볼 엔드밀 헬릭스각(helix angle)은 실린더부의 공칭 헬릭스각 β 를 반구부를 따라 볼의 정점부까지 연결하면서 형성된 것으로 절삭날의 위치에 따라 헬릭스각의 크기는 달라진다. 일반적으로 볼 엔드밀은 회전각에 대한 리드 피치(lead pitch)가 일정하도록 설계되기 때문에 공구의 정점부로 갈수록 헬릭스각은 작아지게 되며, 이 때 절삭날에서의 헬릭스각 β 는 식 (1)과 같이 표현된다²⁾. 임의의 절삭날 위치 P에서 공구경사각(rake angle, α)과 여유각(clearance angle, γ)은 공구경사면의 수직 벡터 N과 구의 중심에서 P를 잇는 벡터 K에 의해

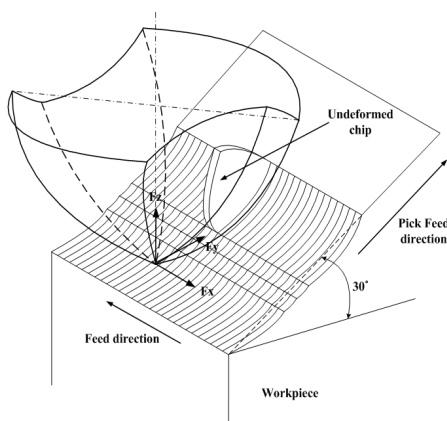


Fig. 1 Chip generation mechanism in horizontal upward down milling

서 형성되는 평면상에서 Fig. 2와 같이 정의된다. 공구경사면의 수직 벡터 N은 벡터 K와 절삭날 곡선상의 접선 벡터 T를 외적하여 구한다.

$$\tan\beta(z) = \frac{R(z)}{R_0} \tan\beta_0 \quad (1)$$

2.2 다구찌 실험계획법

다구찌 방법의 강건 설계(robust design)는 특성치의 변동이 잡음 요소에 둔감하면서, 특성치를 만족시키는 제어 인자들의 최적조건을 찾는 것이다. 반복적으로 측정된 데이터를 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 이라 할 때 MSD(mean squared deviation)는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$MSD = 1/n \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

특성치는 망목(the nominal the best), 망소(the lower the better), 망대(the higher the better) 특성의 3가지로 분류된다. 본 연구의 대상인 표면거칠기 값은 작을수록 좋은 특성을 가지므로 망소특성을 적용하여 분석한다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 S/N비(signal to noise ratio)를 사용하며, 망소특성의 경우 S/N 비는 식 (3)의 형태로 표현된다.

$$S/N = -10 \log \left[1/n \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

실험 결과로부터 제어 인자들이 표면거칠기에 미치는 영향을 통계적으로 분석하기 위해 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 수행하였다. 분산분석은 실험 결과에 대한 오차와 특성치 산포를 제곱 합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱 합을 실험과 관련된 인자들의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 큰 영향을 주는 인자들을 찾아내는 분석방법이다.

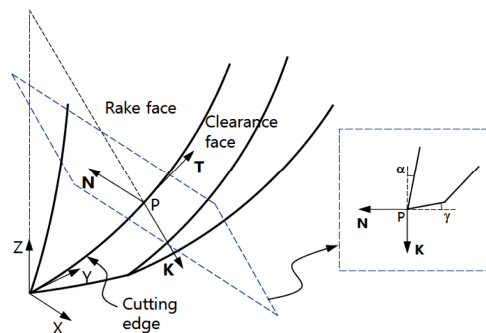


Fig. 2 Definition of tool rake and clearance angles

Table 3 Experimental design for L27(3¹³) an orthogonal array

No	Row No												
	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	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	3	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	3	1	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	1	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	2	1	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	2	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	1	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	2	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	3	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	1	2	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	2	3	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	3	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	2	1	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	3	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	1	1	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	2	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	3	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	2	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	2	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	3	1	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	1	3	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	3	2	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Table 4 Cutting parameters and levels

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Helix angle (deg), A_h	0	10	30
Rake angle (deg), A_r	0	3	6
Cutting speed (rpm), B	5,000	6,500	8,000
Feed per tooth (f_t , mm), C	0.1	0.15	0.2
Radial depth of cut (R_d , mm), D	0.2	0.3	0.4

3.3 표면거칠기 특성 분석

3.3.1 헬릭스각의 영향

Table 5는 헬릭스각을 포함한 제어 인자들에 대한 각각의 수준별 S/N 비 값을 나타낸 것이고, Fig. 6은 S/N 비 값을 그래프로 도식화한 것이다. 기울기 값이 가장 크게 나타난 헬릭스각 인자가 특성치에 미치는 영향이 가장 크다고 할 수 있다. 공칭 헬릭스각이 커질수록 표면거칠기가 나빠지는 이유는 절삭에 참여하는 절삭날의 상단부와 하단부 사이의 헬릭스각 편차가 커져 결과적으로 공구

Table 5 S/N ratio response for factors A_h , B, C, and D

Level	Helix angle (A_h)	Cutting speed (B)	Feed per tooth (C)	Depth of cut (D)
1	-12.72	-14.64	-14.15	-14.21
2	-13.96	-13.73	-14.23	-14.18
3	-16	-14.31	-14.29	-14.28
Delta	3.27	0.92	0.14	0.1
Rank	1	2	3	4

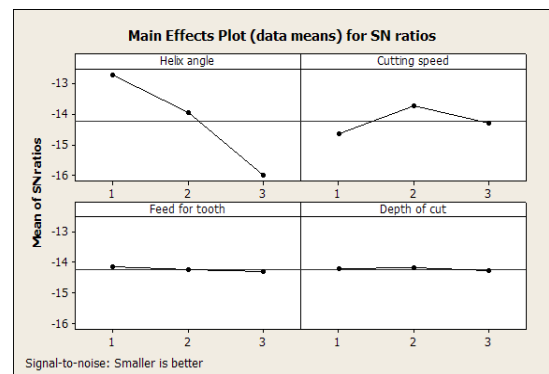


Fig. 6 S/N ratio response graph for factors A_h , B, C, and D

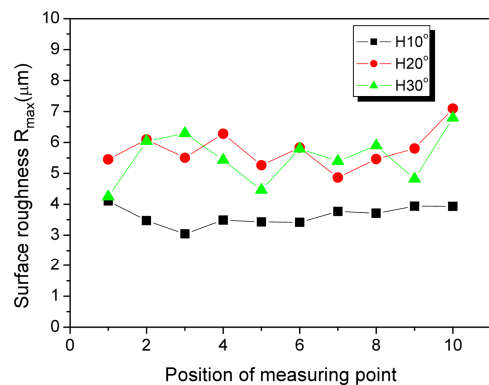


Fig. 7 Surface roughness variation with respect to helix angle

경사면에서 마찰을 키우는 작용을 하기 때문인 것으로 해석된다. 상대적으로 날 당 이송과 절입깊이는 특성치에 미치는 영향이 작다는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 헬릭스각의 크기에 따른 표면거칠기 변화를 나타낸 그래프이다. S/N비 분석 결과 S/N 비가 가장 크게 나타난 인자들의 수준조합은 $A_h1B2C1D2$ 이다.

Fig. 8(a), (b), (c)는 각각 교호작용(interaction) $A_h \times B$, $A_h \times C$ 및 $A_h \times D$ 에 대한 결과를 도시한 것이다. 최적의 특성값을 얻기 위해서는 $A_h \times B$ 의 교호작용에 대해서는 A_h1B2 가, $A_h \times C$ 에 대해서는 A_h1C1 가, $A_h \times D$ 에 대해서는 A_h1D3 가 우선되어야 함을 알 수 있다. 따라서 교호작용을 고려한 분석결과 $A_h1B2C1D3$ 의 조건이 S/N비가 가장 크게 되는 인자들의 수준조합으로 볼 수 있다.

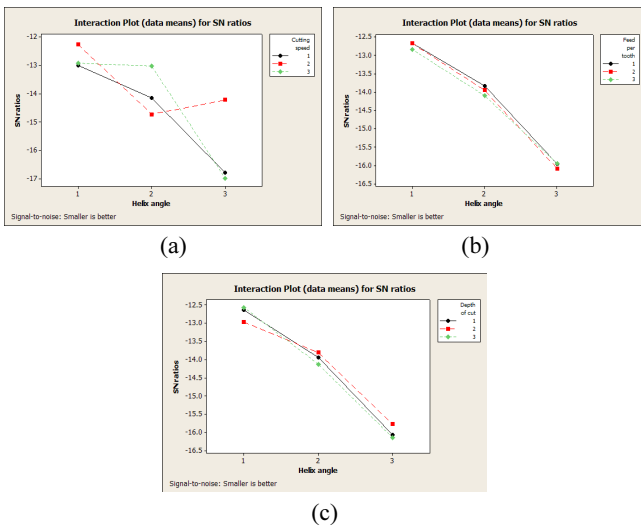


Fig. 8 Interaction graphs for factors (a) $A_h \times B$, (b) $A_h \times C$, and (c) $A_h \times D$

Table 6 ANOVA results for surface roughness including helix angle parameter

Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean sum of squares	F ₀	P (%)
A _h	19.521	2	9.761	402.23	0
B	1.6524	2	0.826	34.05	0.001
C	0.0201	2	0.01	0.41	0.678
D	0.0245	2	0.012	0.50	0.627
A _h ×B	6.6837	4	1.671	68.86	0
A _h ×C	0.0337	4	0.008	0.35	0.838
A _h ×D	0.2016	4	0.05	2.08	0.202
Error	0.1456	6	0.024	0.0243	
Total	28.283	26			

Table 7 ANOVA results for surface roughness after pooling

Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean sum of squares	F ₀	F (0.05)
A _h	19.522	2	9.761	402.23	3.74
B	1.6524	2	0.826	34.05	3.74
A _h ×B	6.6837	4	1.671	68.86	3.11
A _h ×D	0.2016	4	0.05	2.08	3.11
Error	0.1456	14	0.024	0.0243	
Total	28.283	26			

각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향을 조사하기 위해 분산분석(ANOVA)을 수행하였으며 그 결과를 Table 6에 나타냈다. 여기서 검정통계량 F₀ 값의 크기는 수행특성에 대한 인자의 중요도를 나타낸다.

각각의 인자들에 대한 분산분석 결과를 살펴보면 헬릭스각, 절삭속도, 절삭깊이, 날 당 이송의 순서로 가공면 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 헬릭스각과 절삭속도 간의 교호작용이 날 당

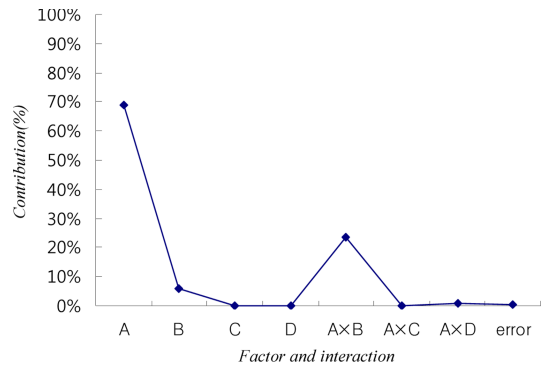


Fig. 9 Contribution of control factors including helix angle parameter

Table 8 S/N ratio response for factors A_r, B, C, and D

Level	Rake angle (A _r)	Cutting speed (B)	Feed per tooth (C)	Depth of cut (D)
1	-12.72	-15.04	-15.07	-15.24
2	-15.96	-14.74	-15.19	-14.90
3	-16.55	-15.44	-14.96	-15.08
Delta	3.82	0.70	0.22	0.34
Rank	1	2	3	4

이송 및 절삭깊이와의 교호작용보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. F₀ 값이 1이하인 날 당 이송, 절삭깊이 그리고 헬릭스각과 날 당 이송간의 교호작용은 유의성이 낮아 풀링(pooling)시켜 오차 자유도를 증가시켰다. Table 7과 같이 풀링 후 분산분석 결과를 다시 얻었다.

오차의 자유도가 증가함에 따라 헬릭스각, 절삭속도 그리고 헬릭스각과 절삭속도의 교호작용이 유의수준 95% 신뢰도내에서 유의 하였으며, 이는 헬릭스각과 절삭속도 및 이들의 수준조합이 가공면의 표면거칠기에 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다. 유의확률(p)의 판단 기준값이 0.05 이상이면 유의차가 없다고 보며 상호작용을 고려하지 않는다.

Fig. 9는 다구찌 실험계획법을 적용하여 도출된 실험결과에 대하여 적용된 모든 인자들의 작용이 특성치에 미치는 영향을 백분율로 나타낸 것이다. 인자들 가운데 헬릭스각의 기여도가 69.0%로 가장 컸으며, 절삭속도의 기여도가 5.8%로 나타났다. 제시된 절삭 인자들의 수준에서 헬릭스각의 크기와 헬릭스각과 절삭속도와의 교호작용이 표면거칠기에 지배적인 영향을 미치며, 따라서 볼 엔드 밀의 헬릭스각 설계가 중요함을 알 수 있다.

3.3.2 경사각의 영향

Table 8에 경사각을 포함한 제어 인자들에 대한 각각의 수준별 S/N 비 값을 나타냈으며, Fig. 10은 각각의 수준별 S/N 비 값을 그래프로 나타낸 것이다.

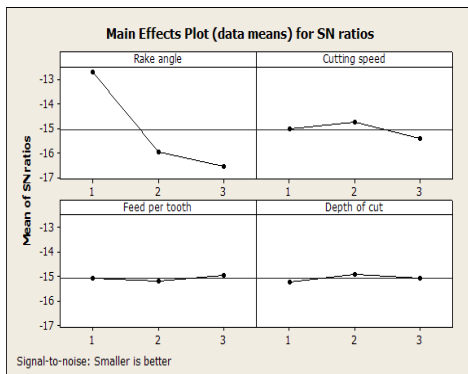


Fig. 10 S/N ratio response graph for factors A, B, C, and D

Table 9 ANOVA results for surface roughness including rake angle parameter

Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean sum of squares	F ₀	P (%)
A _r	29.2753	2	14.6377	241.47	0
B	1.0443	2	0.5222	8.61	0.017
C	0.154	2	0.077	1.27	0.347
D	0.345	2	0.1725	2.85	0.135
A _r ×B	1.0499	4	0.2625	4.33	0.055
A _r ×C	0.4584	4	0.1146	1.89	0.231
A _r ×D	0.5822	4	0.1455	2.4	0.162
Error	0.3637	6	0.0606		
Total	33.2728	26			

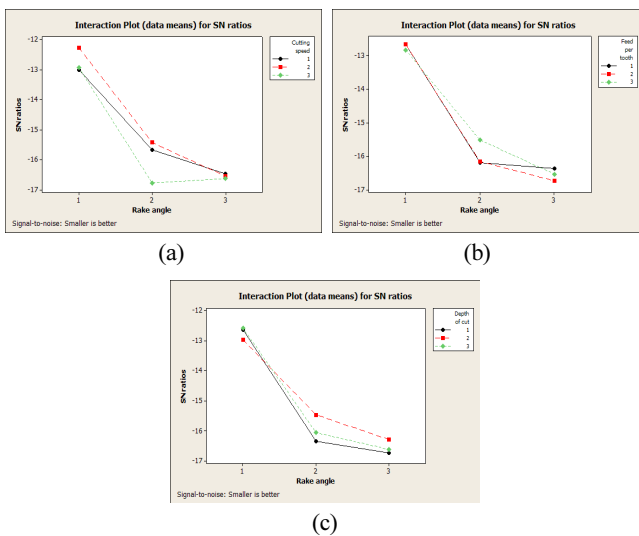


Fig. 11 Interaction graphs for factors (a) A_r×B, (b) A_r×C, and (c) A_r×D

가을기 값으로부터 경사각이 특성치에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다. 경사각이 작을 때 표면거칠기가 우수한 이유는 절삭날의 강성이 증가됨에 따른 것으로 이해될 수 있다. 상대적으로 선정된 수준에서 날 당 이송과 절입깊이는 특성치에 미치는 영향이 작았다. 각각의 인자들에 대한 S/N비 분석 결과, S/N 비가 가장 크게 나타난 인자들의 최적 수준조합은 A_r1B2C3D2인 것으로 나타났다.

Fig. 11(a), (b), (c)는 교호작용 A_r×B, A_r×C 및 A_r×D에 대한 결과를 도시한 것이다. 교호작용에 대한 분석결과 최적의 특성치를 얻기 위해서는 A_r×B의 교호작용에 대해서는 A_r1B2의 조합이, A_r×C에 대한 교호작용에 있어서는 A_r1C2의 조합이, A_r×D에 대한 교호작용에 있어서는 A_r1D3의 조합이 우선되어야 함을 알 수 있다.

Table 9는 각각의 인자들이 특성치에 미치는 영향을 나타낸 분산분석표이며, 경사각, 절삭속도, 절삭깊이, 날 당 이송의 순서로 특성치에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 경사각과 절삭속도 간의 교호작용이 경사각과 날 당 이송 또는 절입깊이와의 교호작용보다

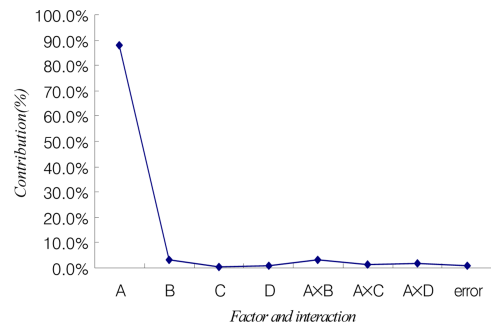


Fig. 12 Contribution of control factors including rake angle parameter

큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. Fig. 12는 적용된 모든 인자들의 작용이 특성치에 미치는 영향을 백분율로 나타낸 것이며, 검토된 인자들의 수준에서 경사각의 크기가 88.0%의 기여도로 표면거칠기에 미치는 영향이 가장 크다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

볼 엔드밀의 헬릭스각, 경사각 등 절삭날 형상과 절삭속도, 절삭 깊이, 날 당 이송 등의 절삭조건이 가공면의 표면거칠기에 미치는 영향을 살펴보기 위해, 헬릭스각과 경사각을 변화시킨 볼 엔드밀을 설계, 제작하고 다구찌 실험계획법을 적용하여 실험을 한 후, 최적 인자 분석을 수행하였다. 표면거칠기 특성치의 S/N 비와 분산분석을 수행하여 F-검정에 의한 유의인자를 탐색하고 최적조건을 선정하였다. 선정된 인자들의 수준에서 헬릭스각과 경사각이 각각 69%와 88%의 기여도로서, 볼 엔드밀 절삭날의 형상이 표면거칠기에 미치는 영향이 크며, 표면거칠기 측면에서 헬릭스각을 10° 이하로, 경사각을 3° 이하로 설계하는 것이 바람직하다는 결과를 얻었다. 전자는 공구경사면에서의 마찰력 감소, 후자는 절삭날의 강성 증가에 기여하기 때문인 것으로 판단된다. 가공조건 가운데

이송속도와 절삭깊이에 비해 절삭속도는 특히 헬릭스각과의 교호 작용에 있어 유의성이 크므로 공구 절삭속도를 고려하여 헬릭스각이 설계될 필요가 있다. 본 연구 결과는 볼 엔드밀 절삭날 형상 설계에 대한 기초 자료로 활용될 수 있다.

References

- [1] Yang, M. Y., Park, H. D., 1991, The Prediction of Cutting Force in Ball End Milling, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 31:1 45-54.
- [2] Lim, E. M., Menq, C. H., 1995, The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions Using The Ball End Milling Process, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 35:8 1171-1185.
- [3] Yucesan, G., Altintas, Y., 1996, Prediction of Ball End Milling Forces, *J. Eng. Ind.* 118:1 95-103.
- [4] Lee, P., Altintas, Y., 1996, Prediction of Ball End Forces from Orthogonal Cutting Data, *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 36:9 1059-1072.
- [5] Kim, G. M., Chu, C. N., 1998, Mean Cutting Force Prediction in Ball End Milling of Slanted Surface Using Force Map, *J. Korean Soc. Precis. Eng.* 15:12 212-219.
- [6] Feng, H. Y., Menq, C. H., 1996, A Flexible Ball-end Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction, *J. Manufact. Sci. Eng.* 118:4 461-469.
- [7] Sharman, A., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., 2001, Tool Life when High Speed Ball Nose End Milling Inconel 718, *J. Mat. Proc. Tech.* 118:1 29-35.
- [8] Ning, L., Veldhuis, S. C., 2006, Mechanistic Modeling of Ball End Milling Including Tool Wear, *J. Manufact. Proc.* 8:1 21-28.
- [9] Cho, C. Y., Mun, S. D., Ryu, S. H., 2006, Effect of Cusp on the Cutting Characteristics and Tool Wear of Semifinishing in Ball End Milling, *Trans. KSMTE* 15:5 79-84.
- [10] Yoon, J. H., 2007, Two dimensional Representation of Machining Geometry and Tool Path Generation for Ball end Milling of Sculptured Surfaces, *Int. J. Prod. Res.* 45:14 3151-3164.
- [11] Chen, T., Shi, Z., 2008, A Tool Path Generation Strategy for Three axis Ball end Milling of Free form Surfaces, *J. Mat. Proc. Tech.* 208:1 259-263.
- [12] Ng, E. G., Lee, D. W., Sharman, A. R. C., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K., Vigneau, J., 2000, High Speed Ball Nose End Milling of Inconel 718, *CIRP Ann.* 49:1 41-46.
- [13] Ning, Y., Rahman, M., Wong, Y. S., 2001, Investigation of Chip Formation in High Speed End Milling, *J. Mat. Proc. Tech.* 113:1 360-367.
- [14] Aoyama, H., Kisinami, T., Saito, K., 1987, Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill, *J. Japan Soc. Precis. Eng.* 53:3 461-466.
- [15] Jin, K., Tsukasa, K., Shunichi, K., Satoru, I., 2001, Wear Estimation of Ball End Mill and Its Application to Precision Machining of Curved Surface, *J. Japan Soc. Precis. Eng.* 67:9 1427-1431.
- [16] Lu, Y., Takeuchi, Y., Takahashi, I., Anzai, M., Kase, K., 2003, Fabrication of Ball End Mills for High Speed Milling and Their Cutting Characteristics, *J. Japan Soc. Precis. Eng.* 69:4 530-535.
- [17] Chen, F., Hu, S., Yin, S., 2012, A Novel Mathematical Model for Grinding Ball end Milling Cutter with Equal Rake and Clearance Angle, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 63:1 109-116.
- [18] Ghani, J. A., Choudhury, I. A., Hassan, H. H., 2004, Application of Taguchi Method in the Optimization of End Milling Parameters, *J. Mat. Proc. Tech.* 145:1 84-92.
- [19] Kivak, T., 2014, Optimization of Surface Roughness and Flank Wear Using the Taguchi Method in Milling of Hadfield Steel with PVD and CVD Coated Inserts, *Measurement* 50 19-28.