

다구찌 법을 이용한 볼 엔드밀 반구면 절인 형상 특성

Characteristics of Hemispheric Cutting Edge in Ball End Milling Using Taguchi Method

*조철웅¹, 이어해², 문상민³, 류시형²

*C. Y. Cho¹, Lihai Li², S. D. Moon³, #S. H. Ryu(ryu5449@chonbuk.ac.kr)²

¹군산대학교 자동차부품기술혁신센터, ²전북대학교 기계공학과, ³전북대학교 기계설계공학과

Key words : Ball end milling, Taguchi method, Helix angle, Surface roughness, ANOVA(analysis of variance)

1. 서론

볼 엔드밀은 자유곡면의 금형 가공에서 널리 사용되며, 치수정밀도, 형상정밀도, 표면거칠기, 가공면의 품위 등 금형의 품질을 결정하는 요소는 대부분 볼 엔드밀 가공 공정에 의해 결정된다고 할 수 있다. 절입 깊이가 상대적으로 작은 자유곡면의 고속가공 또는 정삭가공에 있어서 절삭은 볼 엔드밀의 반구면에서 주로 이뤄지며, 공작물과 접촉위치에 따라서 절삭 선속도는 달라진다. 볼 엔드밀 형상의 특성상 공구의 중심 날에서의 절삭속도는 0에 가깝고, 반구면의 최외각 날에서 절삭속도가 최대가 되는데, 절삭날의 위치에 따른 절삭속도의 변화와 절삭 기구의 불규칙한 형태는 공구 마모를 촉진하고 수명을 단축시킨다. 볼 엔드밀 가공에 관한 연구로는 공구경로의 개선을 통한 가공시간의 단축, 형상정밀도와 표면 거칠기의 개선, 절삭력 및 공구변형의 예측, 고속가공에서의 절삭 특성, 공구 형상 설계, 최적 절삭조건의 선정 등에 관한 연구가 주로 수행되었다.¹⁻³ 본 연구에서는 볼 엔드밀 반구면 절인의 헬릭스각 변화에 따라 각각의 절삭인자들이 표면거칠기에 미치는 영향의 정도를 분석하기 위해 다구찌 실험계획법을 적용하였다.

2. 볼 엔드밀의 절삭 기구 및 다구찌 법

자유 곡면을 정삭 가공하는 경우와 고속가공에서 절입 깊이를 작게 하여 고이송 가공을 하는 경우에 절삭은 대부분 볼 엔드밀의 반구부 절인을 통해 이뤄진다. 그리고 반구면에 형성된 절인의 형상은 측면부에 형성된 절인의 헬릭스 각(helix angle)을 이어 내려와 볼의 정점부에 연결하면서 형성된 것으로 절인이 공작물과의 접촉위치에 따라 절삭형태가 달라진다. 볼엔드밀 반구면 절인의 위치에 따른 절삭 형태와 칩 생성 기구는 Fig. 1과 같다.

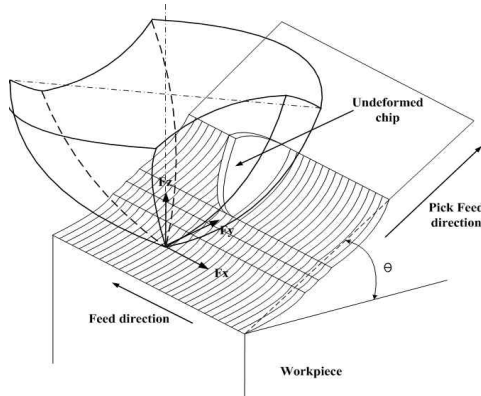


Fig.1 Chip generation mechanism in ball end milling

다구찌 방법의 강건 설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 반복적으로 측정된 데이터를 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$ 이라 할 때 MSD(mean squared deviation)는 아래와 같이 계산한다.

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

특성치는 망목(the nominal the better), 망소(the lower the better), 망대(the higher the better) 특성의 3가지로 분류된다. 본 연구의 경우에 표면거칠기 값이 작을수록 좋은 망소특성이므로 망소특성에 준하여 실행하였다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(Signal to noise ratio)를 사용하며, 망소특성의 경우 SN 비는 식(2)의 형태로 표현된다.

$$SN = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

절삭공정에 영향을 주는 각각의 인자들이 표면 품위에 미치는 영향을 통계적으로 분석하기 위해 분산분석(ANOVA; analysis of variance)을 하였다. 분산분석은 실험결과에 대한 오차와 특성치(표면거칠기, 진동 진폭의 RMS값) 산포를 제곱 합(sum of squares)으로 나타내고, 이 제곱 합을 실험과 관련된 요인들의 제곱 합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 요인을 찾아내는 분석방법이다.

3. 실험 방법 및 구성

3.1 실험 장치 및 측정시스템 구성

본 실험에서 사용한 공작물은 내마모성이 우수하고 조직이 균일하여 금형재료로 널리 쓰이는 냉간 금형강 SKD-11이며, 시험편은 경사각 30°로 일정하게 가공하여 사용하였다.

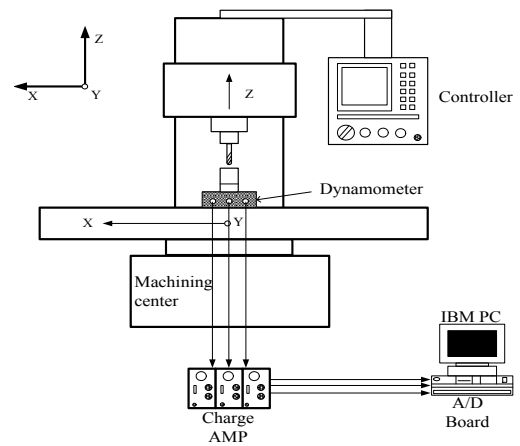


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

볼 엔드밀 반구면 절인부의 헬릭스 각 변화에 따른 절삭특성을 살펴보기 위해, Table 1과 같이 실린더부 헬릭스 각의 크기가 다른 공구를 제작하였다. 볼 엔드밀의 재질은 텅스텐 카바이드이며, 직경은 8mm, 공구 경사각(rake angle)은 0°로 일정하게 제작하였다. 절인형상에 따른 절삭력, 표면거칠기 및 진동 특성을 살펴보기 위해 Fig.2와 같이 시스템을 구성하였다. 고속가공기인 MAKINO V33 머시닝 센터를 이용하여 표면거칠기 분석을 위한 실험을 수행하였다. 이론적으로 최대표면거칠기(R_{max})를 동일하게 하기 위해 경로간 간격(P_f)은 일정하게 0.3mm로 설정하였다.

Table 1 Specifications of experimental apparatus

Experimental apparatus	Model
CNC milling machine	MAKINO V33
Tool dynamometer	KISTLER 9257A
Charge amplifier	KISTLER 5011
A/D converter	NI PCI-6110
Personal computer	Intel P-3 1.5GHz, Window XP
Frame grabber	NI PCI-1405
CCD camera	Hitachi KP-M20
Accelerometer	DYTRAN 3023A2
Optical Surface roughness tester	VEECO WYLO NT1100
Ball end mill	∅8, Helix angle 0°, 10°, 30°

3.2 가공 변수 설정

실험계획은 다구찌 기법을 이용하여 설계하였고, 실험을 통해 얻어진 결과로부터 헬릭스 각 20°와 30°의 표면거칠기 특성이 비슷하여 기존 상용제품에서 채용중인 30°를 선정하였으며, 절삭 속도, 날당 이송 및 절입 깊이의 영향을 고려하기 위해 Table 2와 같이 제어인자들의 수준을 선정하였다.

Table 2 Levels of independent variables

Levels	Low	Medium	High
Coding	1	2	3
Helix angle(°), A	0	10	30
Cutting speed (RPM), B	5,000	6,500	8,000
Feed for tooth (f _z), C	0.1	0.15	0.2
Radial depth of cut(A _d ,mm), D	0.2	0.3	0.4

4. 실험 결과 및 분석

각 인자에 따른 정량적인 분석을 위해서 Table 4에 분산분석표를 나타냈다. 검정통계량 F₀ 값의 크기는 수행특성에 대한 인자의 중요성을 나타낸다. 분산분석 결과를 살펴보면 헬릭스 각, 절삭 속도, 절삭 깊이, 날당 이송의 순서로 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 3 SN ratio response for factor A, B, C, and D

Level	Helix angle (A)	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

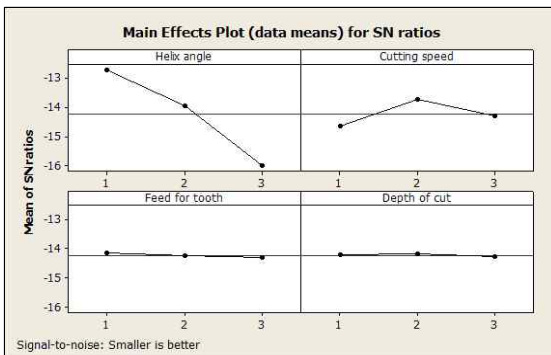


Fig. 3 SN ratio response graphs for factors A, B, C, and D

F-검정을 실시한 결과로부터 인자들 간의 유의성 정도의 차가 큰 것으로 나왔다. F₀ 값이 1이하인 날당 이송, 절입 깊이 및 헬릭스 각과 날 당 이송 간의 교호작용의 유의성이 낮아 풀링(Pooling)시켜 오차 자유도를 증가시켰다. Table 5와 같이 풀링 후 분산분석 결과를 다시 얻었다. 오차의 자유도가 증가함에 따라 헬릭스 각(A)과 절삭속도(B) 그리고 A×B가 유의수준 95%

신뢰도 내에서 유의하였으며, 이들이 절삭가공 후 표면거칠기에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Table 4 Analysis of variance result for surface roughness(R_{max})

Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean sum of squares	F ₀	P(%)
A	19.5217	2	9.7608	402.23	0
B	1.6524	2	0.8262	34.05	0.001
C	0.0201	2	0.01	0.41	0.678
D	0.0245	2	0.0122	0.50	0.627
A×B	6.6837	4	1.6709	68.86	0
A×C	0.0337	4	0.0084	0.35	0.838
A×D	0.2016	4	0.0504	2.08	0.202
error	0.1456	6	0.0242	0.02427	
Total	28.2834	26			

Table 5 Analysis of variance result for surface roughness(R_{max}) after pooling

Factor	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean sum of squares	F ₀	F(0.05)
A	19.5217	2	9.76085	402.23	3.74
B	1.6524	2	0.8262	34.05	3.74
A×B	6.6837	4	1.670925	68.86	3.11
A×D	0.2016	4	0.0504	2.08	3.11
error	0.1456	14	0.024267	0.02427	
Total	28.2834	26			

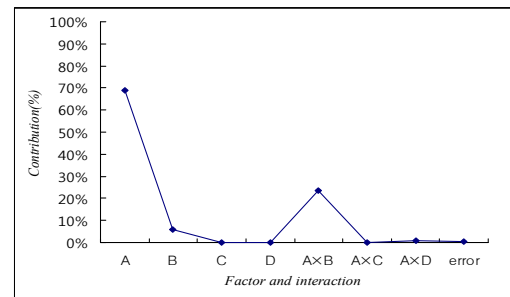


Fig. 4 Contribution of control factors

5. 결론

본 논문에서는 볼 엔드밀의 반구면 절입 형상 및 다양한 절삭조건에 따른 인자들 간의 영향을 분석하기 위해 통계적 방법인 다구찌 실험계획법을 적용하여 최적 인자 분석을 수행하였다. 표면거칠기 특성치의 SN비와 분산분석을 수행하여 F-검정에 의한 유의인자를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

볼 엔드밀 가공에서 헬릭스 각, 절삭속도, 절삭 깊이, 날당 이송의 순서로 표면거칠기에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 헬릭스 각의 기여도가 69%로 높게 나온 반면, 절삭속도는 5.8%, 날당이송 0.1%, 절입깊이 0.1%로 나왔다. 볼 엔드밀에 의한 정삭 가공에서 주로 반구면 절삭이 이뤄지는 점을 고려할 때, 상용의 헬릭스 각 30°로 가공된 가공면의 표면거칠기는 0°또는 10°의 경우에 비해 좋지 않았으며, 이와 같은 결과는 볼 엔드밀 절입형상의 최적설계에 이용될 수 있다.

참고문헌

1. H. Aoyama, T. Kisinami, and K. Saito, "Study on Development and Cutting Performance of Elliptic Ball End Mill", JSPE, Vol.53, pp. 461-466, 1987.
2. L. Yi, T. Yoshimi, M. Manabu, T. Ichiro, K. Kiwamu, and A. Masahiro, "Fabrication of Ball End Mills for High Speed Milling and Their Cutting Characteristics," JSPE, Vol 68, pp. 451-455, 2002.
3. S. H. Park, Modern Design of Experiments, Minyongsa, pp. 305-329, 2001.