

마이크로 엔드밀링 공정의 절삭계수 모델링 및 최적 공정설계

이광조*, 정성중⁺

(논문접수일 2009. 1. 16, 심사완료일 2009. 3. 4)

Modeling of Cutting Parameters and Optimal Process Design in Micro End-milling Processes

Kwang-Jo Lee*, Sung-Chong Chung⁺

Abstract

Micro end-milling process is applied to fabricate precision mechanical parts cost-effectively. It is a complex and time-consuming job to select optimal process conditions with high productivity and quality. To improve the productivity and quality of precision mechanical parts, micro end-mill wear and cutting force characteristics should be studied carefully. In this paper, high speed machining experiments are studied to construct the optimum process design as well as the mathematical modeling of tool wear and cutting force related to cutting parameters in micro ball end-milling processes. Cutting force and wear characteristics under various cutting conditions are investigated through the condition monitoring system and the design of experiment. In order to construct the cutting database, mathematical models for the flank wear and cutting force gradient are derived from the response surface method. Optimal milling conditions are extracted from the developed experimental models.

Key Words : Condition Monitoring(상태감시), Cutting Force Gradient(절삭력증가율), DB model(데이터 베이스 모델), Design of Experiment(실험계획법), Edge Detection(윤곽선 검출), Flank Wear(여유면 마멸), Machine Vision(머신비전), Micro Endmilling(마이크로 엔드밀링)

1. 서론

마이크로 밀링(micro-milling)공정 기술은 마이크로 다이(die), 몰드(mold), 시계, 베어링, 초소형기계 그리고 의료분

야 등과 같은 정밀 부품들을 가공하는데 널리 이용된다⁽¹⁻³⁾. 마이크로 엔드밀링 공정에서 마이크로 엔드밀의 마멸(wear)은 가공 정밀도와 생산성을 저하시키고 절삭력을 증가시키는 중요한 요인이다. 엔드밀링 공정에서 발생하는 공구마멸

* 한양대학교 기계공학과

+ 교신저자, 한양대학교 기계공학부 (schung@hanyang.ac.kr)
주소: 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

과 생산성에 대한 연구는 국내·외적으로 다양하게 이루어지고 있다. 1996년 Toshitaka 등⁽⁴⁾은 고속 엔드밀링 공정에서 금형강을 이용하여 절삭속도와 공구수명의 연관성을 규명하였고, 생산성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그 후, 점차적으로 생산성과 관련이 높은 공구마멸과 마멸메커니즘, 절삭력에 대한 연구가 진행되었다⁽⁵⁻⁷⁾. 그러나 대부분의 연구들이 $\varnothing 3$ 이상의 공구를 이용한 연구였으며, $\varnothing 0.5$ 이하의 마이크로 가공에의 적용에 어려움이 있었다. 그래서 2004년 Kapoor 등⁽⁸⁾과 2006년 Sim 등⁽⁹⁾은 엔드밀링 공정에서 칩의 메커니즘을 이용하여 절삭력을 추정하기 위한 모델을 연구하여 마이크로 엔드밀링 분야에도 적용 가능한 절삭력 모델을 제시하였다. 이 밖에도 밀링공정의 상태감시(condition monitoring)에 대한 다양한 평가^(10,11)가 이루어지고 있지만, 마이크로 엔드밀링 분야에서 공구마멸과 절삭력 특성을 동시에 고려한 연구는 미흡하다.

절삭력은 공구마멸에 간접적인 영향을 주며, 절삭력을 측정함으로써 공구상태를 감시하고 공구마멸을 간접적으로 추정할 수 있는 많은 연구가 이루어져왔다⁽²⁻¹¹⁾. 본 연구에서는 고경도 정밀금형 제작에 응용을 위한 마이크로 엔드밀링 공정의 상태감시와 최적 절삭계수 추정을 위해 효과적으로 공구마멸을 추정할 수 있는 절삭력증가율(cutting force gradient)을 정의하고, 공구동력계를 이용한 절삭력 측정시스템을 제안한다. 그리고 직접적인 방법으로 마이크로 엔드밀의 마멸을 정확히 측정하기 위해 정밀 서보스테이지와 연동된 머신비전시스템과 영상처리기술 및 윤곽선 검출(edge detection)기법⁽¹²⁻¹⁵⁾을 이용하여 절삭조건에 따른 마멸량의 상태감시와 정량화를 수행한다. 정량화된 절삭력증가율과 마멸량에 동일한 가중치를 적용하고, 다구찌 기법을 통해 공정의 효율성을 극대화 할 수 있는 최적 절삭조건을 산출한다. 또한, 마이크로 엔드밀링 공정에서 절삭력증가율과 마멸량을 분석하여 공구의 수명을 추정하고 생산성과 효율성을 증대할 수 있는 절삭 DB 모델을 구축한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실험장치의 구성과 실험조건에 대하여 서술하고, 3장에서는 실험계획법을 기술한다. 4장에서는 마이크로 엔드밀 가공의 상태감시에 필요한 마멸량과 절삭력증가율의 정량화에 대하여 기술하고, 5장에서는 실험결과를 분석하고 최적 공정조건과 가공 DB 구축을 위한 절삭력증가율 모델과 마멸량 모델을 제시한다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 고속가공 실험 장치

밀링공정에서는 절삭속도를 높일수록 고경도 고효율 가공

이 가능하다⁽⁴⁾. 마이크로 엔드밀 가공에서 고속가공을 구현하기 위해 밀링머신에 0.5MPa의 공기압으로 구동되는 150,000rpm 에어스핀들(HTS1501S, NSK)을 장착하고, 마이크로 단위의 가공 구현을 위해 이송분해능 1 μ m의 3축 CNC밀링머신 (Hi-Super 4, 화전기공)을 사용한다. 고경도 금형강인 공작물 STD61의 표면은 정밀연삭하고, 정밀바이스와 1 μ m 급의 전기 마이크로미터를 이용하여 공작물의 평면도를 150x150mm 내에서 2 μ m 이내로 유지한다. 고경도 금형강에 적용을 위해 TiAlN 코팅된 $\varnothing 0.5$ 초경 볼엔드밀을 이용하여 열처리된 STD61 (HRc51)을 30m씩 가공한다. Fig. 1에 고속가공 실험을 위한 장비구성을 보인다.

2.2 실험인자 및 수준 선정

고속가공 시 절삭공정에 직접적인 영향을 미치는 이송속도 (feedrate), 반경방향 절삭깊이(radial depth of cut, RDOC) 그리고 축방향 절삭깊이(axial depth of cut, ADOC)의 적절한 범위를 도출하기 위해 사전실험을 수행한다. 사전실험은 고속가공을 위해 주축 회전속도를 150,000rpm으로 고정하고, 반경방향 및 축방향 절삭깊이는 공구제작사의 추천 절삭

Table 1 Selected control factors and levels

Factor	Level		
	1	2	3
Feedrate (mm/min)	2000	2500	3000
Axial depth of cut (ADOC) (μ m)	50	75	100
Radial depth of cut (RDOC) (μ m)	100	125	150

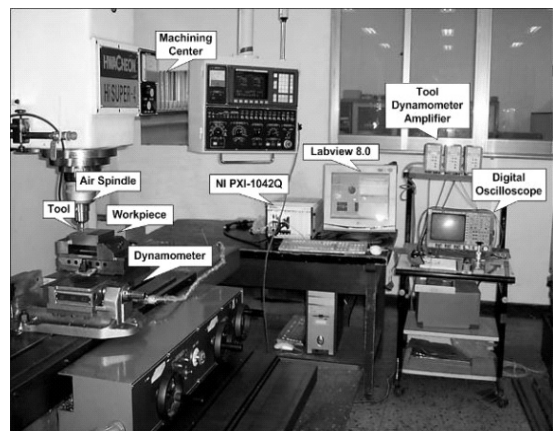


Fig. 1 Experimental set-up

조건과 경험적인 값을 통하여 선정한다. 이송속도는 실험에 사용하는 CNC 밀링머신의 사양을 고려하여 2500mm/min을 기준으로 비율적으로 증감한다. 반경방향 절삭깊이와 축방향 절삭깊이는 마멸과 절삭력의 측정 상태를 감시하여 각각 적절한 값인 125 μ m, 75 μ m를 기준으로 실험 수준을 결정하고 공구별 총 절삭길이는 각 실험조건에서 30m로 한다. Table 1은 선정된 공정변수 인자와 그들의 수준이다.

3. 실험계획법

최소한의 실험을 통하여 최적 가공조건을 찾기 위해 실험 계획법을 적용한다. 본 실험에서는 이송속도, 축방향 및 반경방향 절삭깊이를 실험인자로 하고, 가공환경과 작업자에 대한 오차를 포함하여 실험을 조합한다. 4인자 3수준의 경우 전조합실험법을 적용하는 경우 총 81회의 실험을 하여야 하나, L_93^4 직교배열표(table of orthogonal arrays)를 이용하면 총 9회의 실험으로 최적 가공조건과 절삭 DB 모델을 구축하는 실험을 구성할 수 있다^(16,17). 가공 중 발생하는 랜덤오차를 줄이기 위해 2번 반복실험을 수행한다.

최적절삭조건을 구하기 위해 신호대 잡음비(SN ratio)를 손실함수로 하는 다구찌 기법을 적용한다. 손실함수는 특성에 따라 망목, 망소, 망대 특성으로 나누어지는데⁽¹⁶⁾, 본 연구에서 대상으로 하는 특성치인 절삭력증가율과 여유면 마멸량에는 망소특성이 적합하므로, 식 (1)을 이용하여 망소 특성의 SN비를 손실함수로 정의한다.

$$SN = -10\log \left[\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} y_i^2 \right] \quad (1)$$

여기서 SN비의 단위는 데시벨(dB), n_s 은 특성값 측정 횟수, y_i 는 i 번째 특성값이다. 그리고 A 인자의 수준별 SN비 평균은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$M_{A_i} = \frac{1}{n_A} \sum_{j=1}^{n_A} [(SN)_{A_i,j}] \quad (2)$$

여기서 M_{A_i} 는 A 인자가 i 수준인 경우 SN비 평균이고, n_A 는 직교배열표 상에서 A 인자의 해당 수준 출현수이다. 식 (1)로부터 얻어진 SN비와 식 (2)를 이용하여 해당 인자의 각수준 중에서 오차에 가장 강건한 수준을 판별하고 최적 절삭계수의 수준을 도출한다. 그리고 실험과 관련된 요인이 특성치에 미치는 영향의 정도(percentage of contribution)를 구하고, 가공 DB를 도출하기 위한 수학적 모델을 산출하기 위해

Table 2 L_93^4 Orthogonal array

No.	Factors			
	Feedrate	ADOC	RDOC	Error
1	2000	50	100	2
2	2000	75	125	3
3	2000	100	150	1
4	2500	50	125	3
5	2500	75	150	1
6	2500	100	100	2
7	3000	50	150	1
8	3000	75	100	2
9	3000	100	125	3

Yoon등⁽¹⁷⁾의 방법을 이용하여 분산분석과 반응표면분석을 실시한다.

4. 특성치 정량화

4.1 마멸의 정의와 측정

엔드밀 가공에서는 여유면, 마진 그리고 경사면 마멸이 관찰된다. 일반적으로 경사면 마멸은 엔드밀의 절삭날 부분에서 높은 온도와 중하중(heavy load) 때문에 발생하며, 마진 마멸은 축방향 절삭깊이에 큰 영향을 받기 때문에 엔드밀 가공에서 그들의 양이 마멸에 미치는 영향은 여유면 마멸에 비하여 미미하다⁽¹⁸⁾. 특히, 마이크로 엔드밀 가공의 경우 공구 강성을 고려하여 축방향 절삭깊이를 종래의 엔드밀 가공에 비하여 상대적으로 작게 부여하기 때문에, 본 논문에서는 공구별 총 절삭길이를 각 실험조건에서 30m로 한정하는 경우 경사면 마멸과 마진 마멸을 무시하고 여유면 마멸로 마이크로 엔드밀의 마멸을 정의한다. Fig. 2는 볼엔드밀과 그의 절삭날에서 발생하는 여유면 마멸 형상을 보인 것이다. 마멸량(V_{BArea})은 여유면 마멸부위 상에 x 와 $f(x)$ 로 이루어진 곡면좌표계를 설정하면 식 (4)를 이용하여 정량화 된다⁽¹⁴⁾.

$$V_{BArea} = \int_{SP}^{EP} [f^U(x) - f^L(x)] dx \quad (4)$$

여기서, V_{BArea} 의 단위는 μm^2 이며, $f^U(x)$ 는 마멸부위 중심의 점 x 에서 $f(x)$ 의 최대값이고, $f(x)^L$ 는 점 x 에서 $f(x)$ 의 최소값이다. 그리고 SP 는 마멸이 시작되는 위치의

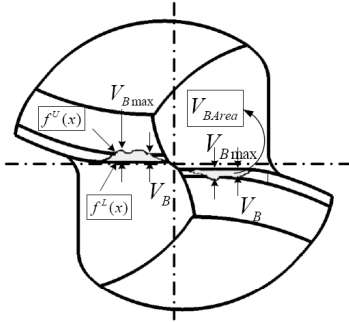


Fig. 2 Flank wear geometry of ball endmills

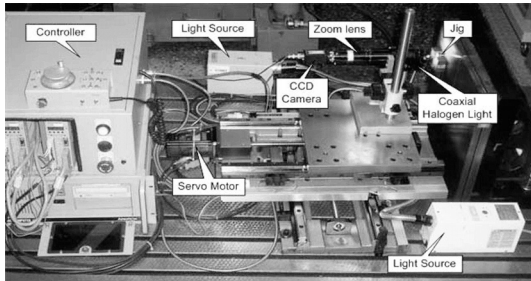


Fig. 3 Machine vision system

x 값, EP 는 끝나는 위치의 x 값이다.

Fig. 3은 정밀 서보스테이지와 연동된 마멸 측정용 머신비전 시스템을 보인다⁽¹⁴⁾. 이 시스템을 이용하여 획득한 영상으로부터 여유면에 생성된 마멸의 표면경계를 측정하여 Fig. 2와 같은 형태로 발생하는 마멸을 감시하기 위하여 윤곽선 검출 방법을 사용한다. 윤곽선 검출 방법에는 라플라시안(Laplacian), LoG(Laplacian of Gaussian), DoG(Difference of Laplacian), 그리고 소벨 연산자(Sobel operator) 등과 같은 방법들이 사용되는데⁽¹⁵⁾, 본 연구에서는 임의의 점 $(x, f(x))$ 에서 수평과 수직 방향의 기울기를 각각 계산하고 영상의 차이와 평활화 효과를 제공하는 소벨 연산자를 사용한다. 머신비전 시스템을 통해 얻은 Raw 영상 파일을 전처리 없이 바로 윤곽선 검출에 사용하면 여유면 마멸의 구분이 어려워진다. 이 문제를 해결하기 위해 소벨 윤곽선 검출방법을 적용하기 전에 문턱값(threshold value)을 사용하여 여유면의 마멸 영역을 이진화 전처리 작업을 수행한 후 윤곽선 검출을 적용하여 선명한 여유면 마멸 형상을 얻는다⁽¹⁴⁾.

4.2 절삭력증가율의 정의와 측정

절삭력은 공구마멸에 크게 영향 받으며 마멸이 진전됨에

따라 증가한다. 따라서 측정된 절삭력을 평가함으로써 공구마멸 상태를 추정할 수 있다. Toshitaka 등⁽⁴⁾의 연구결과에 의하면 고속 밀링공정에서 엔드밀의 초기 마멸이 진행되는 동안 발생하는 절삭력의 증가량이 낮을수록 엔드밀의 수명이 길어지고 생산성이 증대됨을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 가공길이 30m 가공 구간에서 절삭력 변화를 절삭력 증가율로 정의하고, 식 (5)를 이용하여 정량화한다. 그리고 이 계수 값을 이용하여 마이크로 엔드밀링 공정의 최적 절삭조건과 절삭력증가율 모델을 도출한다.

$$CF_G = \frac{CF_F - CF_I}{CF_I} \times 100 \quad (5)$$

여기서, CF_G 는 절삭력증가율, CF_I 초기 1m구간의 평균 절삭력, CF_F 최종 30m구간에서의 평균 절삭력이다.

절삭력은 밀링머신 테이블 상에 설치한 공구동력계(9257B, kistler)와 충전앰프(5011B, kistler)를 이용하여 측정하고(Fig. 1 참조), 오실로스코프(9314A, LeCroy)로 모니터링하고 DAQ 보드가 장착된 LabView 기반의 NI PXI-1042Q를 이용하여 정량화 한다. 추출된 절삭력 데이터는 Matlab를 이용하여 평가한다.

5. 실험 결과 및 고찰

5.1 마멸

Table 3은 공구별 총 절삭길이를 각 실험조건에서 30m로 한정하고, 반복실험을 통하여 엔드밀의 여유면 마멸을 측정하

Table 3 SN Values of flank wear

No.	Flank wear (μm^2)		
	1set	2set	SN_{FW}
1	25.4	24.3	-27.924
2	16.1	11.1	-22.671
3	9.2	14.3	-21.438
4	18.5	14.2	-24.270
5	15.0	12.2	-24.671
6	16.1	19.1	-24.910
7	16.8	12.8	-23.405
8	20.1	22.0	-26.486
9	22.0	18.6	-26.150

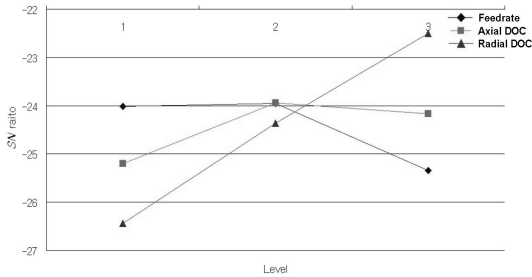


Fig. 4 Factor responses on flank wear

Table 4 ANOVA results of flank wear

Factor	SS	DOF	V	F ₀	P(%)
Feedrate	3.739	2	1.865	0.607	10.4
ADOC	2.698	2	1.349	0.439	7.5
RDOC	23.254	2	11.627	3.751	64.9
Error	6.149	2	3.075		17.2
Total	35.840	8	17.916		100

여 식 (4)를 통해 정량화를 시킨 후, 식 (1)에 적용하여 망소특성의 SN비(SN_{FW})를 구한 것이다. 그리고, Fig. 4는 식 (2)를 이용하여 인자의 수준별 분석을 실시한 결과이다. 이로부터 엔드밀의 여유면 마멸을 고려한 최적 절삭조건은 SN비가 최대가 되는 조건으로부터 이송속도 2500 mm/min, 축방향 절삭깊이 75 μ m, 반경방향 절삭깊이 150 μ m가 됨을 알 수 있다.

Table 4는 분산분석의 결과로서 각 공정변수별로 엔드밀의 여유면 마멸에 미치는 기여도를 나타낸다. 이 결과로부터 볼 엔드밀의 여유면 마멸은 반경방향 절삭깊이에 크게 영향 받음을 알 수 있다.

5.2 절삭력증가율

직교배열표의 조건에 따라 측정된 절삭력을 식 (5)를 이용하여 절삭력증가율로 정량화 한 후, Table 5에 각 조건별 결과 값을 정리한다. 계산된 절삭력증가율은 식 (1)에 의해 망소특성의 SN_{CF} 비로 구해지고, 식 (2)를 이용하여 각 인자의 수준별 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 5에 보인다. 절삭력증가율을 만들 고려한 경우 최적 절삭조건은 이송속도 3000mm/min, 축방향 절삭깊이 75 μ m, 반경방향 절삭깊이 125 μ m로 주어진다.

그리고 절삭력증가율에 영향을 미치는 공정변수의 기여도를 구하기 위하여 분산분석을 실시하고 그 결과를 Table

Table 5 SN Values of cutting force gradient

No.	Cutting force gradient		
	1set	2set	SN_{CF}
1	81.0	90.0	-38.720
2	35.3	31.5	-30.400
3	48.4	43.0	-33.141
4	38.3	39.3	-31.754
5	30.2	36.9	-30.553
6	41.3	46.0	-32.908
7	47.4	44.8	-33.198
8	33.5	39.0	-31.198
9	36.3	33.2	-30.423

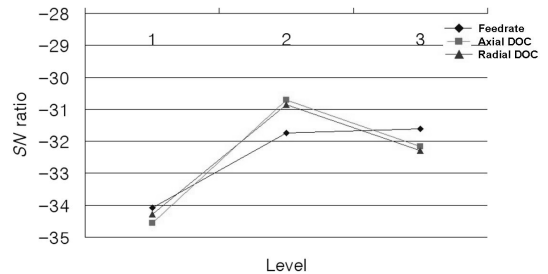


Fig. 5 Factor responses on cutting force gradient

Table 6 ANOVA results of cutting force gradient

Factor	SS	DOF	V	F ₀	P(%)
Feedrate	11.687	2	5.844	4.509	21.439
ADOC	22.583	2	11.291	8.712	41.425
RDOC	17.653	2	8.826	6.810	32.381
Error	2.592	2	1.296		4.755
Total	35.840	8	27.257		100

6에 보인다. 이로부터 마이크로 볼 엔드밀링 공정의 절삭력증가율은 선정된 공정변수들에 고르게 영향 받음을 알 수 있다.

5.3 여유면 마멸 모델

Table 2에 제시된 절삭조건 이외의 값에서도 공구별 총 절삭깊이를 30m로 한정하는 경우 공구의 마멸량을 추정하고 공구수명을 추정하기 위해서는 절삭조건과 여유면 마멸

Table 7 Comparisons of experimental and predicted values on flank wear

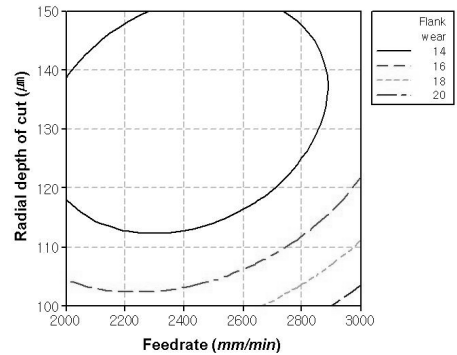
No.	Flank wear (μm^2)		
	experimental values		predicted values
	1set	2set	
1	25.4	24.3	24.9
2	16.1	11.1	13.6
3	9.2	14.3	11.8
4	18.5	14.2	16.4
5	15.0	12.2	13.6
6	16.1	19.1	17.6
7	16.8	12.8	14.8
8	20.1	22.0	21.1
9	22.0	18.6	20.3

량 사이의 수학적 모델이 필요하다. 분산분석을 통하여 Table 4에 주어진 바와 같이 이송속도와 축방향 절삭깊이의 기여도가 반경방향 절삭깊이에 비하여 낮음을 확인하였으나, 주어진 절삭조건 범위 내에서 수학적 모델의 오차를 줄이고 적합성을 높이기 위해 모든 인자를 고려하여 절삭조건에 대한 공구마멸 모델을 반응표면 분석법⁽¹⁷⁾을 사용하여 식 (6)과 같이 구하였다.

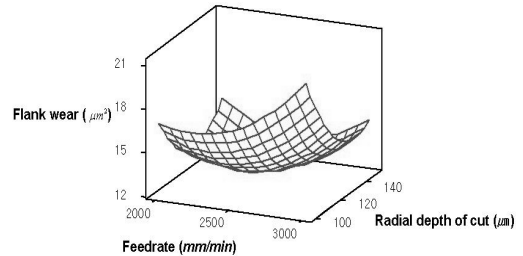
$$V_{BArea}^M = 190.467 - 5.03e^{-2}A - 1.418B - 0.917333C + 7.53333e^{-6}A^2 + 3.3333e^{-3}B^2 + 4.2667e^{-3}C^2 + 3.41333e^{-4}A \times B - 8.8e^{-5}A \times C \quad (6)$$

여기서, V_{BArea}^M 는 모델링된 여유면 마멸량(μm^2)이고, A 는 이송속도 (mm/min), B 는 축방향 절삭깊이 (μm), C 는 반경방향 절삭깊이(μm)를 의미한다. 식 (6)을 이용하면 이송속도 2000~3000 mm/min , 반경방향 절삭깊이 100~150 μm , 축방향 절삭깊이 50~100 μm 내의 임의의 절삭조건에서 마이크로 엔드밀의 마멸량을 구할 수 있고, 이를 이용하면 적절한 공구마멸 범위 내에서 가공DB를 구축할 수 있다.

Table 7은 마멸량의 실제 실험치와 모델을 이용한 추정치를 비교한 것이다. 실험치에 대한 마멸량 모델의 추정치 평균 오차는 1.7 μm^2 이며, 최소오차는 0.5 μm^2 , 최대오차는 2.6 μm^2 (28%)로 수학적 모델의 타당성을 확인할 수 있다. 여유면 마멸은 공구수명을 결정하는 중요한 요소이므로 이 마멸 모델을 통해 정밀 제품의 품질을 증대시킬 수 있으며, 사전실험 없이도 공구의 수명을 추정할 수 있으므로 공정



(a) Contour plot



(b) 3D plot

Fig. 6 Response surface model of flank wear

효율을 극대화시킬 수 있다.

Fig. 6은 상대적으로 여유면 마멸에 미치는 영향이 미약한 축방향 절삭깊이를 75 μm 수준으로 고정할 경우, 여유면 마멸량에 대한 반응표면 등고선(a)과 3D플롯(b)을 보인 것이다. Fig. 6의 모델을 이용하면 여유면 마멸량을 최소로 하는 최적 절삭조건 범위를 효율적으로 구할 수 있다.

5.4 절삭력증가율 모델

앞 절과 유사한 방법으로 반응표면 분석⁽¹⁷⁾을 통해 마이크로 엔드밀의 절삭력증가율에 대한 수학적 모델을 식 (7)과 같이 도출하였다.

$$CF_G = 1051.4 - 0.2416A - 5.70333B - 7.70533C + 3.12e^{-5}A^2 + 2.25867e^{-2}B^2 + 2.98133e^{-2}C^2 + 8.05333e^{-4}A \times B + 6.9333e^{-5}A \times C \quad (7)$$

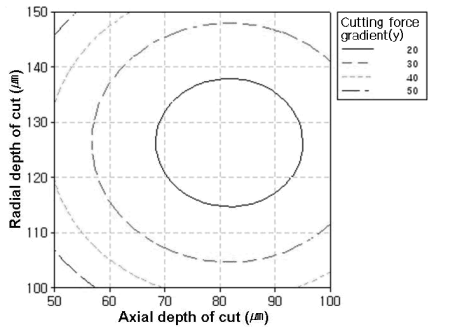
절삭력증가율 모델의 유효범위는 여유면 마멸 모델 범위와 동일하며, Table 8은 절삭력증가율의 실험치와 모델에 의한 추정치를 비교한 것이다. 절삭력증가율의 평균오차는 2.48, 최소오차는 0.4, 최대오차는 5.3(7%)으로 정확성이 높

고, 가공조건에 따라 절삭력증가율을 효과적으로 추정할 수 있다.

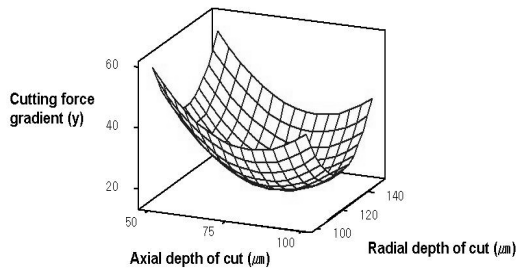
Fig. 7은 절삭력증가율에 대한 영향이 상대적으로 낮은 이송속도를 2500mm/min 수준으로 고정한 경우, 절삭력증가율

Table 8 Comparisons of experimental and predicted values on cutting force gradient

No.	Cutting force gradient		
	experimental values		predicted values
	1set	2set	
1	81.0	90.0	86.3
2	35.3	31.5	33.1
3	48.4	43.0	45.4
4	38.3	39.3	38.7
5	30.2	36.9	33.7
6	41.3	46.0	44.2
7	47.4	44.8	45.7
8	33.5	39.0	36.3
9	36.3	33.2	33.2



(a) Contour plot



(b) 3D plot

Fig. 7 Response surface model of cutting force gradient

에 대한 반응표면의 등고선(a)와 3D플롯(b)을 보인 것이다. Fig. 7에서 절삭력증가율을 최소로 하는 최적 가공 DB의 범위를 구할 수 있다. 절삭력증가율로는 공구수명을 직접적으로 결정할 수 없으나, 절삭공정 중에 간접적으로 마멸을 감시할 수 있고, Fig. 6과 비교하여 보면 간접적인 마멸평가 지표로 사용할 수 있기 때문에 최적 가공조건을 선정하기 위한 지표로 활용 할 수 있다.

5.5 두 가지 특성을 고려한 최적 가공조건

여유면 마멸량과 절삭력증가율에 대한 반응표면 모델로부터 여유 가공 범위 내에서 최적가공조건을 선정할 수 있다. 그러나 모델링된 식들은 각 특성에 대한 모델이므로 두 특성을 복합적으로 고려하기 어렵다. 이들의 두 가지 특성을 고려한 최적 가공조건을 선정하기 위해 두 가지 특성을 고려한 경우의 SN_T 는 식 (8)과 같이 여유면 마멸량 SN_{FW} 와 절삭력증가율 SN_{CF} 에 동일한 가중치를 고려한 평균치로 구한다.

$$SN_T = \frac{1}{2}(SN_{FW} - SN_{CF}) \tag{8}$$

Fig. 8은 식 (8)에서 얻어진 SNT 를 식 (2)에 적용하여 각 인자의 수준별 분석을 실시한 결과이다. 여유면 마멸과

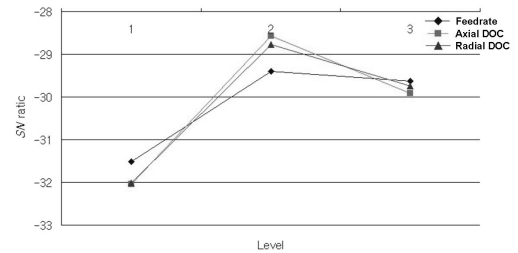


Fig. 8 Factor responses on two characteristics

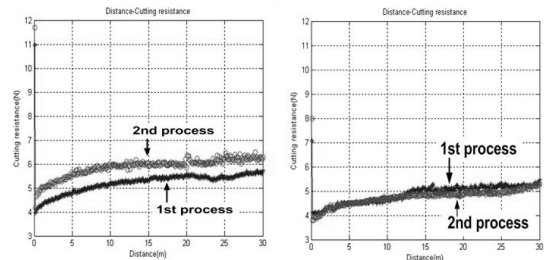


Fig. 9 Comparisons of cutting forces for optimal evaluation

절삭력증가율의 두가지 특성치를 고려하여 추정한 최적 가공조건은 Fig. 8로부터 이송속도 2500mm/min, 축방향 절삭깊이 75μm, 반경방향 절삭깊이 125μm임을 알 수 있다.

두가지 특성치를 고려하여 도출된 최적 가공조건을 검증하기 위하여 30m 가공길이에서 2회 검증실험을 실시한 후 SN비를 구하여 각각의 특성치에서 비교적 큰 SN비를 갖는 Table 2의 실험조건 2와 비교한다. Fig. 9와 Fig. 10은 검증실험의 결과로 공정 중 발생한 절삭력의 변화와 가공 후 생성된 여유면 마멸을 보인 것이다. 두 가지 특성치를 고려하여 선정된 최적가공조건에서 절삭력증가율과 여유면 마멸량이 실험조건 2의 경우에 비하여 적게 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 Table 9는 이들 경우의 SN비를 보인 것이다. 검증실험을 통하여 두가지 특성치를 고려한 최적 가공조건공정의 SN_T는 -24.6150이며, 이 결과값은 실험조건 2의 경우에 비하여 1.921만큼 개선되었고, 이 수치는 공구마멸의 개선 정도를 포함하는 것으로 도출된 최적 가공조건이 생산성을

항상 시킬 수 있는 최적 조건임을 입증한다.

6. 결론

본 연구에서는 TiAlN 코팅된 Ø0.5 마이크로 볼 엔드밀과 열처리된 금형공구강을 이용하여 마이크로 엔드밀의 고속가공에서 절삭깊이를 각 실험조건에서 30m로 한정하는 경우 여유면 마멸과 절삭력증가율을 상태감시하고 다루기 기법을 이용한 가공조건의 최적화에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 마이크로 엔드밀의 직접적인 공구마멸을 상태감시하기 위해 머신비전 시스템을 제작하였고, 간접적인 상태감시를 위해 절삭력 측정시스템을 구성하여 마멸량과 절삭력증가율의 정량화 시스템을 구축하였다.
- (2) 분산분석을 통하여 150,000rpm 고속 마이크로 엔드밀 공정에서 여유면 마멸은 공정변수(이송속도, 축방향 및 반경방향 절삭깊이) 중 축방향 절삭깊이에 주로 영향(64.9%) 받으며, 절삭력증가율은 공정변수들에 고른 영향을 받는다.
- (3) 반응표면 분석과 모델링을 통하여 공정변수에 대한 마멸량과 절삭력증가율의 수학적 모델을 도출하였으며, 이 모델들을 이용하면 관심영역(이송속도 : 2000~3000mm/min, 축방향 절삭깊이 : 50~100μm, 반경방향 절삭깊이 : 100~150μm) 내에서 가공조건에 부합하는 여유면 마멸량과 절삭력증가율을 추정할 수 있으며, 이를 통해 적절한 생산성과 효율성을 갖는 가공 DB 구축법을 제시하였다.
- (4) 제시된 모델의 적합성을 검증하기 위해 실험값과 추정값을 비교한 결과, 여유면 마멸량에 대한 실제 실험값과 모델을 이용한 추정값의 평균오차는 1.7μm², 최소오차는 0.5μm², 최대오차는 2.6μm²(28%)이고, 절삭력증가율의 평균오차는 2.48, 최소오차는 0.4, 최대오차는 5.3(7%)로 제시된 모델이 유효 가공범위 내에서 실용적인 가공 DB를 구축하는데 타당함을 검증하였다.
- (5) 유효 가공범위 내에서 여유면 마멸과 절삭력증가율의 두 가지 특성치를 고려하여 추정한 최적 가공조건은 이송속도 2500mm/min, 축방향 절삭깊이 75μm, 반경방향 절삭깊이 125μm이며, 실험을 통하여 직교배열표상의 최적 실험조건 보다 더 긴 공구수명을 가지며 생산성을 향상 시킬 수 있음을 검증하였다.

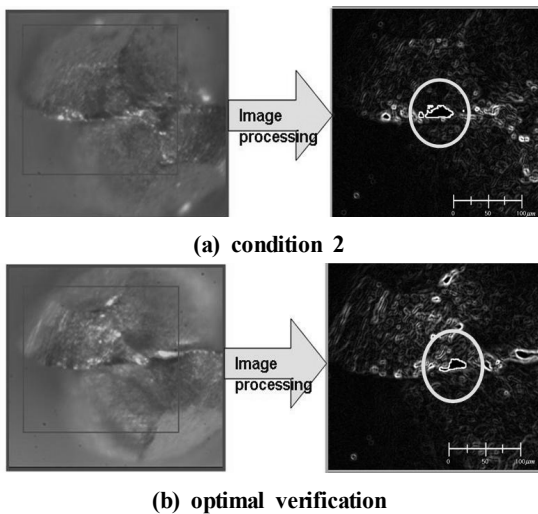


Fig. 10 Comparisons of flank wears for optimal evaluation

Table 9 Verification of optimal conditions

No.	Factors			SN _{FW}	SN _{CF}	SN _T
	Feed rate	ADOC	RDOC			
2	2000	75	125	-22.671	-30.400	-26.536
verification	2500	75	125	-19.181	-30.049	-24.615

참 고 문 헌

- (1) Xie, L., Brownridge, S. D., and Ozdoganlar, O. B., 2006, "The Viability of Micromilling for Manufacturing Mechanical Attachment Components for Medical Applications," *Trans. of NAMRI/SME*, Vol. 34, pp. 445~452.
- (2) Uhlmann, E. and Schauer, K., 2005, "Dynamic Load and Strain Analysis for the Optimization of Micro End Mills," *CIRP Annal-Manufacturing Technology*, Vol. 54, No 1, pp. 75~78.
- (3) Bissacco, G., Hansen, H. N., and De Chiffre, L., 2005, "Micromilling of Hardened Tool Steel for Mould Making Applications," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 201~207.
- (4) Masahiro, A., Ichiro, T., and Toshitaka, M., 1996, "Ultra High Speed Milling and Cutting Tools," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol. 30, No. 4, pp. 299~303.
- (5) Yang, J. S., Heo, Y. M., and Jung, T. S., 2006, "An Experimental Study on Tool Wear of Small Diameter Endmill for High Speed Milling of Hardened Mold Steel," *Trans. of Materials Processing*, Vol. 15, No. 1, pp. 57~64.
- (6) Dolinšek, S., Šuštaršič, B., and Kopač, J., 2001, "Wear Mechanisms of Cutting Tools in High-Speed Cutting Processes," *Wear*, 250, pp. 349~356.
- (7) Choi, J. G., Kang, Y. K., and Lee, J. J., 2003, "A Study on the Flexible Cutting Force Model in the Ball End Milling Process," *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 2, pp. 44~52.
- (8) Vogler, M. P., Kapoor, S. G., and DeVor, R. E., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling, Part II: Cutting Force Prediction," *Trans. of the ASME*, Vol. 126, pp. 695~705.
- (9) Sim, K. J. and Mun, S. D., 2006, "Analysis of Chip Thickness Model in Ball-end Milling," *Trans. of KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp. 73~80.
- (10) Kim, S. C. and Chung, S. C., 1998, "Cutting Force Estimation Using Spindle and Feed drive Motor Currents in Milling Processes," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 22, No. 11, pp. 2029~2038.
- (11) Thlustry, J. and Andrews, G. C., 1983, "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining," *CIRP Annals*, Vol. 32, No. 2, pp. 563~572.
- (12) Yoon, H. S. and Chung, S. C., 2004, "Vision Inspection of Micro-drilling Processes on the Machine Tool," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 28, No. 6, pp. 867~875.
- (13) Park, C. W. and Chung, S. C., 2006, "3D Wear Analysis of Valve Assemblies by Using the Machine Vision," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 30, No. 5, pp. 496~504.
- (14) Choi, Y. J. and Chung, S. C., 2006, "Monitoring of Micro-Drill Wear by Using the Machine Vision System," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 30, No. 6, pp. 713~721.
- (15) Gonzalez, R. C. and Woods, R. E., 2002, *Digital Image Processing*, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- (16) Park, S. H., 2005, *Modern Design of Experiments*, Minyongsa, Republic of Korea.
- (17) Yoon, K. W. and Chung, S. C., 2008, "Drilling Characteristics and modeling of diamond core drilling processes," *Trans. of KSMTE*, Vol. 17, No. 4, pp. 95~103.
- (18) Altintas, 2000, *Manufacturing Automation*, Cambridge University Press, Cambridge.