

마이크로금형 구배각 제어를 위한 절삭가공조건 예측모델에 관한 연구

조지현⁺, 송병욱⁺, 서태일^{*}

(논문접수일 2012. 05. 19, 수정일 2012. 06. 10, 심사완료일 2012. 06. 12)

A Study On Prediction Model of Cutting Conditions for Draft Angle Control

Ji-Hyun Cho⁺, Byeong-Uk Song⁺, Tae-il Seo^{*}

Abstract

It is very difficult to determine suitable cutting conditions in order to obtain accurate cutting profiles because machining errors caused by tool deflection depend upon cutting conditions. In this study the relationship between real cutting profiles (inclined shapes and machining errors) and cutting conditions was modeled in order to fabricate draft angle on micro molds. CCD (Central Composite Design) of DOE (Design Of Experiment) and RSM (Response Surface Method) were applied in order to model the relationship between cutting conditions and machining errors. In order to use CCD the range of radial depth of cut was chosen by 10-90 μ m and the range of feedrate was chosen by 200-300mm/min, and 9 points of cutting conditions were chosen inside determined ranges. Then, actual cutting processes were carried out as respect to 9 points of cutting conditions, draft angles and real cutting profiles were measured on cutting profiles, each response surface function was determined by conducting response surface analysis and the functions were represented by 3-dimensional graphs, contour lines and 101 \times 101 matrices. Consequently it is possible to determine suitable cutting conditions in order to obtain arbitrary given draft angles and cutting profiles by using modeling. To validate proposed approach in this study suitable cutting conditions were determined by modeling in order to obtain arbitrary given draft angle and cutting profile, and actual cutting processes were carried out. About 95% of good agreement between predicted and measured values was obtained.

Key Words : Micro end milling(마이크로 엔드밀링), Machining error(가공오차), Draft angle(구배각), Central composite design(중심합성 계획법), Response surface method(표면반응법)

1. 서론

산업사회가 날로 고도화 됨에 따라서 초소형 고정밀 가공품 생산이 날로 요구 되고 있다. 초소형 고정밀화 되는 가공 생산

품의 기술 개발과 더불어 이를 대량으로 생산하는 기술에 대한 연구도 같이 진행되고 있다⁽¹⁾. 대량생산을 위한 방법 중 가장 많이 사용되는 것으로는 금형을 꼽을 수 있으며, 이러한 금형을 초소형 제품에 적용시킨 마이크로 금형의 개발 또한 활발히 연

* 인천대학교 기계시스템공학부 (tiseo@incheon.ac.kr)

주소: 406-772 인천시 연수구 아카데미로 119

+ 인천대학교 대학원 기계시스템공학부

구되고 있다. 초소형 고정밀 금형을 제작하는 가장 흔한 방법에는 이 기계적 공구를 이용한 절삭가공 제작방법을 들 수 있다.

공구를 이용한 기계적 가공은 일반적인 정밀 가공에서 마이크로 단위의 정밀 가공까지 넓은 영역을 모두 소화 할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 이를 위한 공작기계의 제작도 비교적 효율적으로 제작할 수 있다⁽²⁾. 마이크로 가공은 500 μ m이하의 공구를 이용한 기계적 가공방법으로 인해 가공 범위가 작아짐에 따라서 최소 칩 두께와 같은 범용가공에서는 고려되지 않았던 많은 점들이 마이크로 가공에서는 크게 고려되는 점으로 부각되고 있다⁽³⁾. 이에 따라 공구변형에 대하여 과거부터 꾸준히 연구되고 있다. 엔드밀을 이용한 가공에서 Devor는 헬릭스 날과 가공속도, 이송속도에 따라서 절삭저항이 변화한다는 것을 연구 하였다⁽⁴⁾. 이와 더불어 엔드밀링 가공 동안 절삭력과 칩 두께의 변화에 대한 연구도 기존에 이루어져 왔다⁽⁵⁾.

이러한 연구에 기인하여 최근 이용되고 있는 정밀 가공의 방법으로는 가공 중 일어나는 오차 등을 실시간으로 모니터링하고 이를 바탕으로 가공상 보상값을 데이터로 전송하여 정밀한 가공을 구축하는 방법이 연구되고 있다⁽⁶⁾. 그러나 이를 이용할 경우 복잡한 모니터링 장치를 이용하여야 하므로 공작기계 이외의 부수적인 가공상 비용이 발생하며 생산효율 측면에서 단점으로 지적될 수 있다⁽⁷⁾. 이에 따라 가공오차 보상 이외에 새로운 시야로 가공 오차값을 바라보는 연구가 필요하다. Fig. 1은 금형에서의 구배각과 마이크로 엔드밀링에서 공구변형에 의하여 발생하는 절삭가공면의 이미지를 보여주며 Fig. 2에서는 구배각 구현을 위한 기존 방법을 보여주고 있다. 본 논문에는

서는 공구의 휨 현상에 의한 가공오차와 가공면의 기울기 즉 구배각(Draft Angle)을 측정하여 그 결과값을 마이크로 금형에서의 빼기구배(Draft Taper) 생성에 적용하여 그 실용성을 평가하며, 사용자가 요구로 하는 형상을 가공하기 위한 절삭 조건을 선정할 수 있도록 일정범위의 가공조건에 대한 전체적인 결과값을 데이터화 및 3차원 그래프화하여 표현하였다. 이를 구현하기 위하여 실험계획법인 중심합성법(Central Composite Design)을 적용하고 표면반응법(Response Surface Method)을 이용하여 가공조건과 가공오차와 구배각의 관계를 모델링하고 원하는 구배각을 가진 가공프로파일을 얻기 위한 가공조건을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 금형의 구배각

파팅라인(Parting Line)을 경계로 금형을 열어 성형품을 취출할 때, 수지의 열적수축과 부착력 때문에 성형품이 금형의 캐비티 부분에 부착하게 된다. 따라서, 이젝팅된 등으로 성형품을 이형 시키기 위해서는, 파팅라인에 직각의 방향으로 빼기구배각(Draft Angle)이 필요하게 된다. 빼기구배가 부족하면 성형품의 들출 시 표면에 긁힘이 생길 수 있고 휨이 발생할 수도 있으며, 또한 백화, 크래킹, 변형, 싸이클의 중단 등의 문제가 발생하게 된다. 구배각의 정도는 성형품의 형상, 재료의 종류, 금형의 구조, 성형품의 표면 요구조건에 따라 다르므로 정확히 1개의 값으로 규정하기는 곤란하고 대개는 경험치로서 결정하고 있다. 그러나 제품의 형상이나 기능에 지장이 없다면 가능한 크게 하는 것이 유리하다. 일반적인 빼기구배는 각 측면에 1°~2°가 보통이며, 실용 최소한도로서 0.5° 정도의 값으로 하는 경우도 있다. 일반적인 금형의 가공에는 절삭가공, 방전가공, 와이어가공, 연삭가공, 전주가공, 전해가공, 레이저가공 등 여러 가지 가공법이 사용된다. 이중 빼기구배의 제작을 위해서는 주로 엔드밀을 이용한 절삭가공이 이용된다. 볼엔드밀을 이용한 절삭가공이 주로 이용되고 있으며, 최근에는 테이퍼엔드밀을 이용한 빼기구배 제작방법도 이용되고 있다. 테이퍼 엔드밀의 경우 테이퍼 각이 가공 후의 빼기구배 각을 결정한다는 단점이 있으나 그 각이 정확하다면 한번에 가공할 수 있어 생산효율이 좋다. 3축 가공기에서 빼기구배를 제작하기 위해서는 다수의 공정을 계단식으로 수행해야 한다. 플랫폼엔드밀을 사용할 때와 볼엔드밀을 사용할 때 빼기구배 가공면의 표면 거칠기가 차이가 있음을 알 수 있다. 볼엔드밀은 엔드밀 끝이 반구의 형태로 되어있어 가공면의 품질이 매우 좋지만, 플랫폼엔드밀을 사용할 경우 표면이 계단형으로 나타나 구배각 가공이 사실상 불가능하다고 볼 수 있다. 5축 가공기를 이용하여 Z축의 각도를 빼기구배만큼 기울인 후 가공을 수행하는 방법이 이용되고 있다.

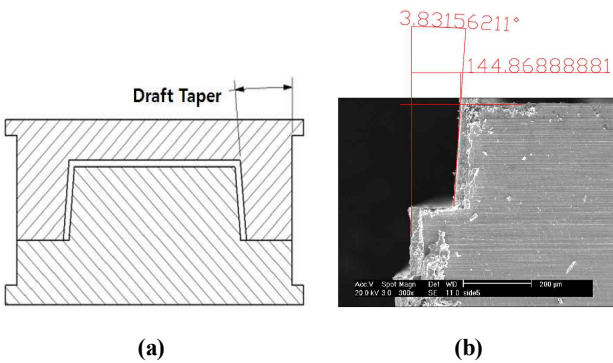


Fig. 1 Draft angle and machining errors

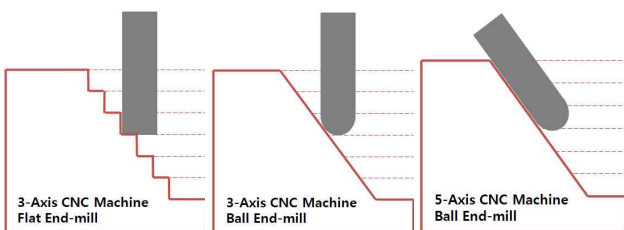


Fig. 2 Fabrication method of draft angles

3. 가공오차를 이용한 구배각의 구현

본 논문에서는 마이크로 엔드밀의 휨 현상에 의한 공구변형을 급형의 구배각으로 이용하고자 하는 것이 주요한 아이디어이다. 이론적인 절삭프로파일을 얻기 위한 공칭절삭깊이의 조건하에서 가공하여도 실제로는 공구변형에 의한 기울어진 절삭면을 얻게 되고 이를 보상하기 위한 새로운 절삭깊이를 찾아내어 보상을 할 수 있다. 그러나 원하는 구배각을 정확히 구현하기 위하여 구배각과 가공오차를 가공조건인 함수로 표현할 필요가 있다.

공구변형의 가장 큰 요인으로 뽑을 수 있는 축 방향절삭깊이(Axial Depth of cut, 이하 AD), 측면절삭깊이(Radial Depth of cut, 이하 RD) 그리고 이송량(Feedrate, 이하 FD)을 들 수 있다. 본 연구에서는 이들과 가공오차와 구배각과의 관계를 모델링하기 위하여 변수들을 조합하여 많은 경우의 수의 실험의 결과를 이용하여 전체적인 경향을 볼 수 있는 방법인 실험계획법에 중심합성계획법(Central Composite Design, 이하 CCD)을 이용하여 팩토리얼의 경우의 실험수를 9개로 줄이고 표면반응법(Response Surface Method, 이하 RSM)을 반응값을 가공오차와 구배각으로 정하고 입력값을 가공조건으로 정하여 그 관계를 규명하여 원하는 구배각과 가공면의 위치를 결정할 수

있는 절삭깊이를 예측하는 모델링을 제시하고자 한다. 전체적인 흐름도는 Fig. 3에 제시되었다.

실험적 검증을 위하여 가공조건중에서 AD는 300 μ m로 고정하고, RD는 10~90 μ m, FD는 200~300mm/min의 범위를 선정하였다. CCD와 RSM을 구현하기 위하여 전용소프트웨어인 VisualDOC를 이용하였다.

4. 실험적 연구

4.1 실험장비 및 실험조건

마이크로 머시닝에 의한 가공면의 프로파일을 분석하기 위하여 마이크로 머시닝 시스템을 이용하여 절삭 실험을 수행하였다(Fig. 4, Table 1).

가공면의 프로파일을 분석하기 위하여 가공면의 최상단부의 실제로 절삭된 깊이를 측정하고 이를 실제 절삭량(Real Cut, 이하 RC)로 정의하고 가공면의 구배각(Draft Angle, 이하 DA)과 같이 측정하였다. 가공면의 측정은 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 추출된 이미지를 통하여 측정하였다. 엔드밀의 경우 0.3mm의 직경을 갖는 초경엔드밀을 사용하였

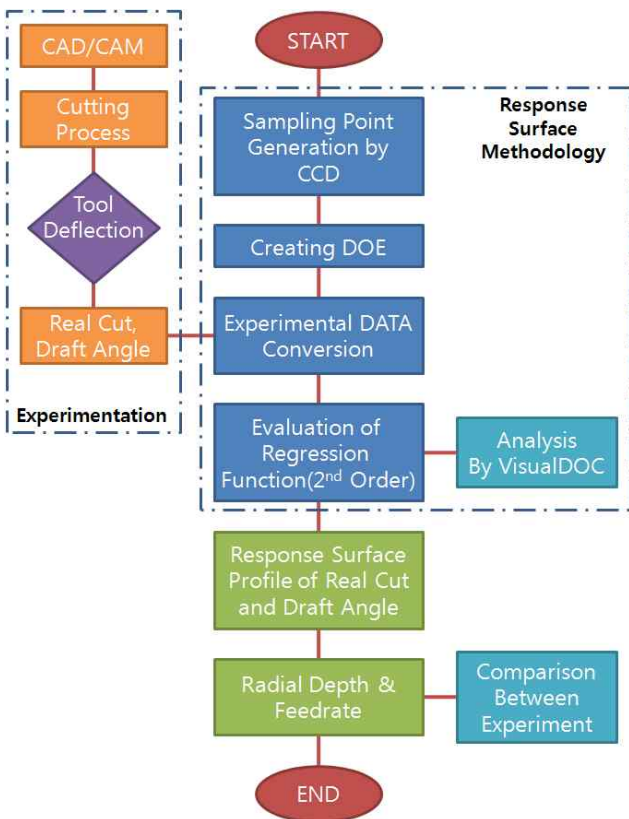


Fig. 3 Flowchart of modeling and experimental works

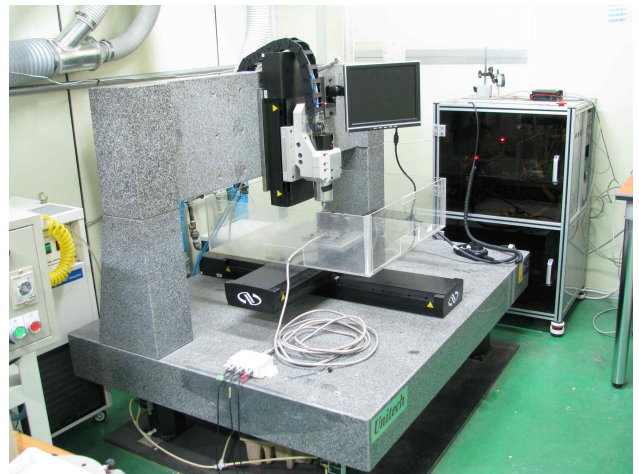


Fig. 4 Micro machining system

Table 1 Specification of micro machining system

Traveling Range	X, Y, Z-axis : 600×600×200mm
Resolution	X, Y, Z-axis : 0.1 μ m
Accuracy	X, Y-axis : 10 μ m, Z-axis : 5 μ m
Repeatability	X, Y, Z-axis : 0.2 μ m
Max. Velocity	X, Y-axis : 200mm/s, Z-axis : 100mm/s
Rotational Speed	Max. 100,000rpm
Spindle Run-out	Max. 0.6 μ m
Static Radial Load	Min. 6kgf
Workpiece Weight	Max. 45kgf

다(Fig. 5). 시편의 경우에는 금형강으로 사용되는 경도 HRC 54의 Stainless 합금 계열의 STAVAX를 사용하였다. 3축 방향의 마이크로 머시닝을 이용하여 주축의 회전수, AD, RD, FD 등의 가공 조건 중에 가공품질에 영향을 가장 많이 주는 AD, RD, FD 중 AD는 고정 변수로 선정하고 RD와 FD는 일정 범위의 유동 변수로 선정하였다. 일정 범위내의 모든 RC와 DA의 데이터를 획득하기 위해 중심합성계획법을 이용한 9개의 설계점을 선정하였으며, 획득된 데이터를 VisualDOC를 이용하여 반응표면합수를 도출하였다.

4.2 실험조건 및 방법

본 실험은 공구의 파손이 일어나 결과값을 얻지 못하는 등 돌발 경우가 발생할 수 있기에 각각의 9개 실험점에 대하여 2번의 실험을 수행하여 결과 데이터를 평균값 내어 사용하였다. 구배각의 측정시에 가공된 시편의 맨 윗면 끝에서부터 가공면의 1/2지점까지 선을 긋고, 그 선을 연장하여 각을 측정하였다. 공구변형에 의한 실제 절삭량 RC와 구배각 DA를 측정하기 위해 SEM을 이용하여 가공면을 캡처하였고, AutoCAD를 이용하여 측정 후 반응표면 함수 및 3차원 그래프와 전체적인 가공 조건 범위의 데이터를 얻기 위해 VisualDOC와 Matlab, Excel을 이용하여 데이터를 다루었다.

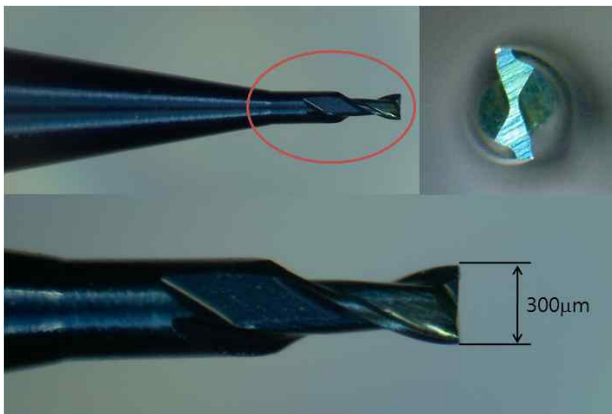


Fig. 5 Used micro end-mill

Table 2 Cutting conditions

Micro Cutting Shape	Side Cutting
Axial Depth(µm)	300
Radial Depth(µm)	10~90 (10, 22, 50, 78, 90)
Feedrate(mm/min)	200~300 (200, 215, 250, 285, 300)
Tool	300µm 2 Flute Flat End-mill
Workpiece	STAVAX (HRC 54)
Cutting Speed	40,000 rpm
Cutting Mode	Down Milling
Lubrication	Wet Cutting

Table 3 Chosen 9points for CCD

		FD (mm/min)				
		200	215	250	285	300
RD (µm)	10			●		
	22		●		●	
	50	●		●		●
	78		●		●	
	90			●		

Table 2는 실험한 가공조건을 보여주고 있고 Table 3은 CCD를 이용하여 선정한 9개의 실험점이다. 9개의 실험점의 경우 중심점(FD=250mm/min, RD=50µm)을 선정 후 동일한 반경에 위치한 나머지 8개의 점을 선정하였다.

4.3 실험결과와 분석

Fig. 6 은 SEM에서 600배의 배율로 촬영한 사진으로 9개의 점 중 FD=250mm/min이고 RD=50µm인 경우의 가공조건에 의한 가공면을 보여주는 것이다. 동일한 방법으로 나머지 8개의 실험점에 대한 실험이 수행되었고 측정되어 RC값과 DA값을 얻어내었다. 실험의 신뢰도를 높이기 위하여 같은 조건의 절삭실험을 두 번에 걸쳐 수행하였고 그 평균값을 RSM의 적용값으로 취했다.

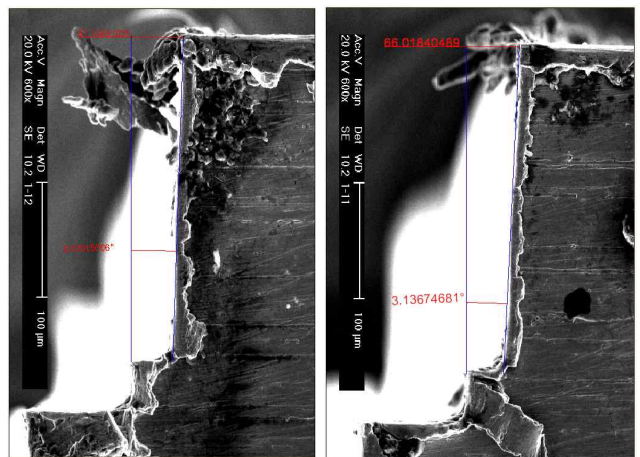


Fig. 6 Machined profile (FD=250mm/min, RD=50µm)

Table 4 Average of experiment real cut (µm)

		FD (mm/min)				
		200	215	250	285	300
RD (µm)	10			22.238		
	22		30.781		29.532	
	50	52.724		66.582		63.669
	78		89.376		101.530	
	90			116.174		

Table 5 Average of experiment draft angle(°, deg)

		FD (mm/min)				
		200	215	250	285	300
RD (μ m)	10			2.920		
	22		2.686		3.329	
	50	0.829		3.118		2.568
	78		3.152		4.431	
	90			6.538		

그러나 몇몇 실험점들의 절삭실험이 다른 외부 요인에 의하여 두 번의 실험이 불가능한 경우가 있었고 그런 실험점들은 첫 번째 실험결과를 중심으로 분석하였다. Table 4와 Table 5는 각각 RC와 DA값의 측정값을 보여주고 있다.

4.4 VisualDOC를 이용한 반응표면 함수의 도출

반응표면 분석을 위해 CCD에 의한 9개의 실험점 데이터로 VisualDOC 프로그램에서 반응표면 함수를 도출하였다. Fig. 7은 RC값과 DA값의 9개 실험점을 VisualDOC에 적용한 것을 나타낸 것이다. VisualDOC에서 반응표면 함수를 만드는

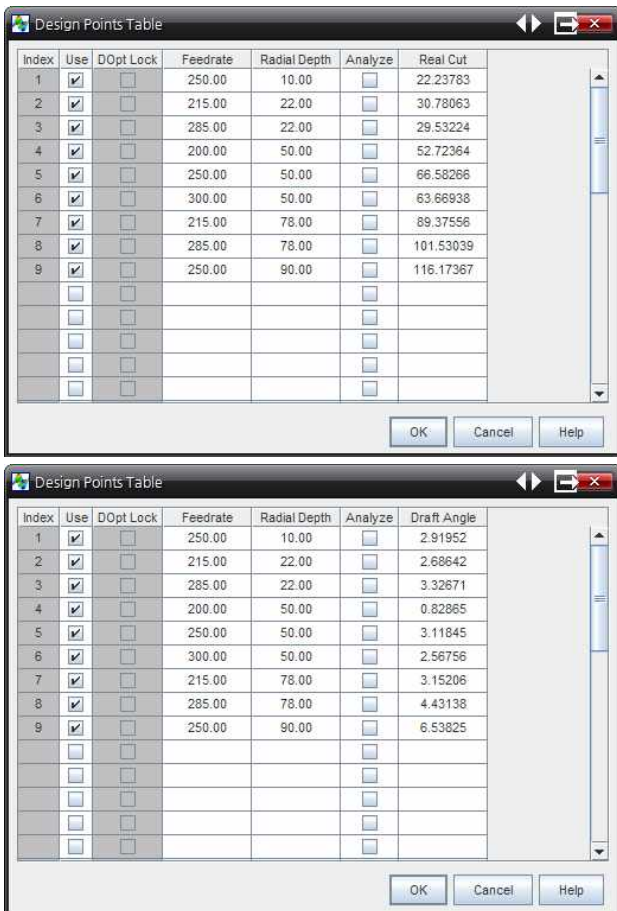


Fig. 7 Design points of real cut(top) and draft angle(bottom)

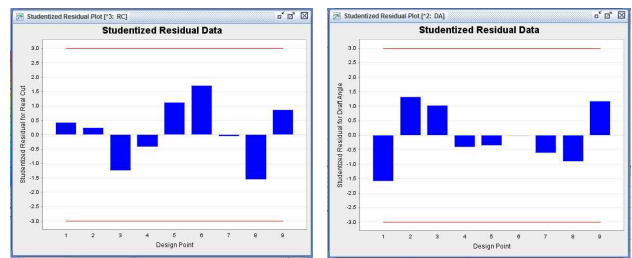
방법은 Linear방법, Linear와 Interaction방법, Linear와 Quadratic방법, Full Quadratic방법, Forward Stepwise Regression방법으로 5가지가 있으며, 이 중 Full Quadratic방법을 이용하여 표준잔차가 -3~3을 넘지 않고 함수의 오차값이 가장 적은 반응표면 함수를 도출하였다.

도출된 함수는 다음식과 같으며 Fig. 8는 각각의 반응표면 함수의 표준잔차가 -3~3을 넘지 않음을 보여주고, Fig.10는 반응표면 함수를 3차원 그래프로 표현한 것이다.

$$\begin{aligned}
 \text{Real Cut} = & (0.0013659 \times RD^2) - (0.0035295 \times FD^2) \\
 & + (0.0034192 \times FD \times RD) \\
 & + (0.17876 \times RD) + (1.6876 \times FD) - (189.86)
 \end{aligned}$$

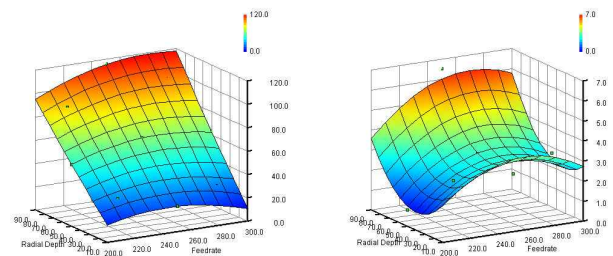
$$\begin{aligned}
 \text{Draft Angle} = & (0.0010603 \times RD^2) - (0.00053373 \times FD^2) \\
 & + (0.00016302 \times FD \times RD) \\
 & - (0.117 \times RD) + (0.27428 \times FD) - (30.925)
 \end{aligned}$$

Table 6는 9개의 실험점에 대하여 RSM에 의하여 예측된 RC와 DA값을 나타낸다. 각각의 셀에 상단은 RC값이고 하단은 DA값을 보여주고 있고 각각의 괄호값은 실험을 통해 측정된 데이터와 차이 값을 나타내는 것으로 표준잔차를 뜻한다. 여기서 유도된 반응표면함수를 이용하여 전체적인 RC와 DA값의 분포를 표현하기 위하여 등고선형태의 데이터분포를 표



(a) Real Cut (b) Draft Angle

Fig. 8 Analysis of variance standard residual



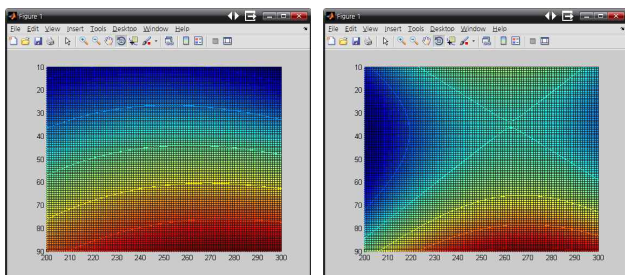
(a) Real Cut (b) Draft Angle

Fig. 9 Response surface profiles by using visualDOC

현하였다. Fig. 10은 반응표면함수를 등고선 형태로 표현한 것을 보여주고 있다. 이는 반응표면을 이용하여 임의의 주어진 RD값과 FD값에 따라 RC와 DA를 예측할 수 있음을 보여준다. 반대로 우리가 원하는 RC와 DA값을 갖는 절삭가공면을 얻기 위한 RD값과 FD값을 역산해내는 것도 가능하다는 것을 알 수 있다.

Table 6 RSM result of RC and DA

		FD (mm/min)				
		200	215	250	285	300
RD (μm)	10	RC		21.92 (-0.32)		
		DA		3.63 (0.71)		
	22		30.59 (-0.19)		30.45 (0.92)	
			2.08 (-0.61)		2.85 (-0.48)	
	50		53.02 (0.30)		66.54 (-0.04)	62.41 (-1.26)
			1.01 (0.18)		3.13 (0.01)	2.57 (0.00)
	78		89.42 (0.04)		102.68 (1.15)	
			3.63 (0.48)		4.84 (0.41)	
	90			115.53 (-0.64)		
				6.01 (-0.53)		



(a) Real Cut (b) Draft Angle

Fig. 10 Response surface profiles and contour line

본 연구에서는 수학적 해석을 하기보다 데이터표를 작성하여 좀 더 손쉬운 방법을 제시하고자 한다. 초기에 지정한 절삭가공조건의 전체영역인 RD=10~90 μm , FD=200~300mm/min의 범위를 각축으로 101의 데이터로 쪼개어 101 \times 101 행렬로 반응표면함수를 이용한 예측값의 데이터표를 얻어내었다. Fig. 11은 데이터표에서 9개의 CCD 적용점을 검은색으로 보여준다.

4.5 적용방법

상기에서 구하여진 데이터표를 이용하여 원하는 구배각을 구현하는 방법을 제시하고자 한다. 만약 임의의 사용자가 요구하는 절삭면 형상이 Fig. 12와 같다면 일정범위의 가공조건(200~300mm/min-FD, 10~90 μm -RD)내의 RC과 DA값을 찾을 수 있다.

Fig. 13는 요구된 80~82 μm -RC, 3.3~3.5 $^\circ$ -DA의 범위에 속하는 데이터를 각각 빨강 등고선과 녹색 등고선으로 표현하고 두 선의 교차점을 검은 박스로 표현한 것으로 RC과 DA의 등고선이 동일하지 않기에 교차점이 생김을 확인할 수 있다. Fig. 13에서 검은색으로 표현된 곳의 값들이 주어진 가공면을 얻을 수 있는 예측된 RD와 FD값을 보여준다.

이들 값중 하나를 선정하여 가공 실험을 수행하였다. 가공면의 프로파일은 Fig. 14과 같이 RC 84.4 μm , DA 3.68 $^\circ$ 의 평균값을 나타냈으며, 이는 반응표면 함수에서 도출한 RC 81.66 μm , DA 3.43 $^\circ$ 과 각각 2.74 μm , 0.25 $^\circ$ 의 차이를 보여 약 95%의 정확성을 보임을 알 수 있다.

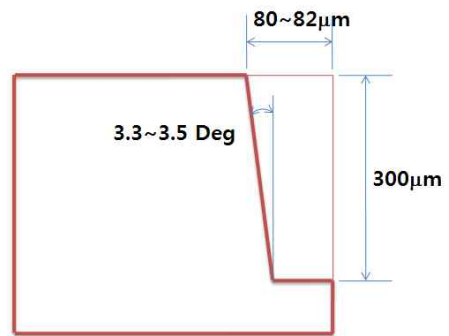


Fig. 12 Desired machined profile

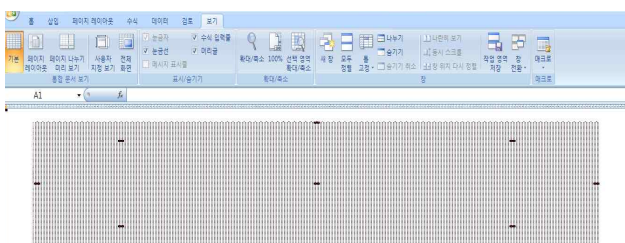


Fig. 11 9-points of experiment in excel

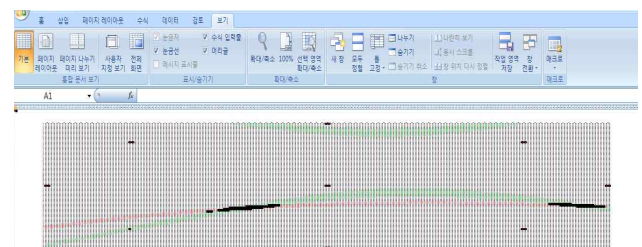


Fig. 13 Cross points of two contour line in excel

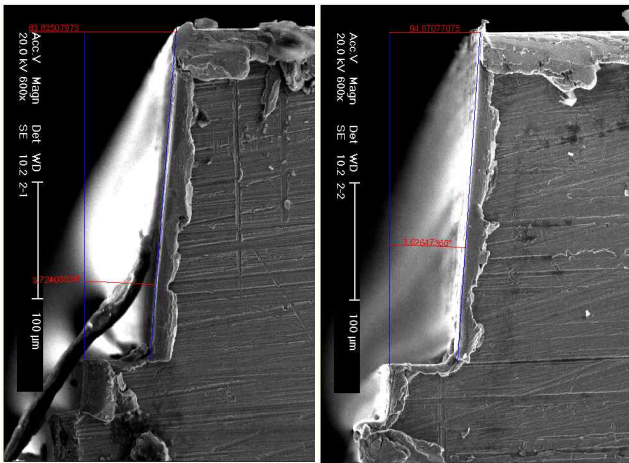


Fig. 14 Machined profile (FD=235mm/min, RD=75μm)

5. 결론

본 논문의 목적은 마이크로엔드밀링 가공 시 발생하는 공구 변형에 의한 가공오차를 이용하여 한번의 절삭가공으로 구배각을 구현하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 중심합성계획법을 이용한 9개의 실험점을 선정하였고 실험값을 토대로 반응표면법을 적용하여 가공조건과 가공면의 관계를 예측하는 모델을 수립하였다. 이 모델을 이용하여 임의의 원하는 구배각을 갖는 가공면을 얻기 위한 절삭깊이와 이송량을 예측할 수 있었으며 이들을 실험적으로 증명하였다. 실험에 의해 얻어진 결과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) VisualDOC를 이용하여 중심합성계획법에서 선정한 일정 범위(Feedrate200~300mm/min, Radial Depth 10~90μm) 내의 9개의 실험점으로 표준잔차 -5~5 사이의 반응표면 함수를 도출하였다.
- (2) Matlab을 이용하여 101×101 행렬로 반응표면 함수를 표현하였으며 이를 이용하여 Real Cut과 Draft Angle의 데이터를 도출하였다.
- (3) 도출된 가공조건을 검증을 위하여 Feedrate 235mm/min, Radial Depth 65.2μm의 조건으로 가공 실험을 수행하였으

며, 실험값과 반응표면 함수에서 도출된 값과 각각 Real Cut 2.74μm, Draft Angle 0.25°의 차이를 보여 약 95%의 정확성을 보였다.

후 기

인천대학교 2010년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Min, S. K., Lee, S. W., Lee, D. J., Lee, E. S., and Jae, T. J., 2002, "A Study on the Machining Characteristics for Micro Barrier Ribs by using Micro Endmilling," *Journa of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 14~20.
- (2) Donfeld, D., Min, S., and Takeuchi, Y., 2006, "Recent Advances in Mechanical Micromachining," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No. 2, pp. 745~768.
- (3) Chae, J., Park, S. S., and Freiheit, T., 2006, "Investigation of Micro-cutting Operations," *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 313~332.
- (4) Kline, W. A., DeVor, R. E., and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, No. 1, pp. 7~22.
- (5) Sabberwal, A. J. P., 1961, "Chip Section and Cutting Force during the Milling Operation," *Annals of CIRP*, Vol. 10, No. 3, pp. 197~203.
- (6) Lim, J. S., Cho, H. J., and Seo, T. I., 2010, "Tool Deflection Estimation in Micro Flat End-milling using Finite Element Method," *Journa of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 19, No. 4, pp. 489~503.
- (7) Lo, C. C., and Hsiao, C. Y., 1998, "CNC Machine Tool Interpolator with Path Compensation for Repeated Contour Machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 55~62.