

Z map 을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력예측

김 규 만*, 조 필 주*, 김 병 희**, 주 종 남***

Cutting Force Prediction in the Ball-End Milling Process of Various Cutting Area Using Z-map

G. M. Kim*, P. J. Cho*, B. H. Kim**, C. N. Chu***

ABSTRACT

In this study, a cutting force in the Ball-end milling process is calculated using Z-map. Z-map can describe any type of cutting area resulting from the previous cutting geometry and cutting condition. Cutting edge of a ball-end mill is divided into infinitesimal cutting edge elements and the position of the element is projected to the cutter plane normal to the Z axis. Also the cutting area in the cutter plane is obtained by using the Z-map. Comparing this projected position with cutting area, it can be determined whether it engages in the cutting. The cutting force can be calculated by numerical integration of cutting forces acting on the engaged cutting edge elements. A series of experiments such as contouring and upward/downward ramp cutting was performed to verify the calculated cutting force.

Key Words : Z-map(Z맵), cutter plane(공구평면), various cutting area(임의 절삭영역), upward/downward ramp cutting(상방향/하방향 경사면가공), contouring(윤곽가공)

Nomenclature

θ axial rotation angle of tool
 $\theta, (\theta, \varphi)$ axial rotation angle of cutting edge element
 φ positional angle of cutting edge element in the cutting tooth
 φ' positional angle of cutting edge element in the cutting tooth in $x'y'k'$ coordinate system
 ϕ_i rotational position angle of cutting edge element in $x'y'k'$ coordinate system
 ξ inclination angle of surface
 β helix angle
 n number of cutting teeth

Z_k vertical position of the k_{th} cutting edge
 $r(Z_k)$ tool radius at the position of Z_k
 f feed per tooth
 dF_t tangential cutting force of cutting edge element
 dF_r radial cutting force of cutting edge element
 $K_t(\varphi)$ cutting mechanism parameter(tangential direction)
 $K_r(\varphi)$ cutting mechanism parameter(radial direction)
 a, b_i coefficients of $K_t(\varphi)$ & $K_r(\varphi)$
 m_T, m_R model parameters characterizing the size effect of the workpiece material
 $F_x(\theta)$ x-directional cutting force at the rotational angle of θ
 $F_y(\theta)$ y-directional cutting force at the rotational angle of θ

* 서울대 대학원
 ** 강원대 정밀기계공학과
 *** 서울대 기계설계학과

1. 서 론

볼엔드밀은 공구선단의 형상이 가지는 여러가지 잇점으로 자유곡면의 금형가공에 많이 사용되고 있다. 절삭력으로 인한 공구의 변형은 형상오차를 가져오게 되며 이를 줄이기 위하여 대부분 수작업으로 재가공함으로써 가공 시간 및 단가가 증가하게 된다. 따라서 형상오차를 줄이기 위해서는 절삭력을 정확하게 예측하고 과도한 절삭력이 발생하지 않도록 가공조건을 조정하는 것이 필요하다. 일반적으로 공구축방향의 절삭력은 수직방향의 절삭력에 비하여 공구변형에 대한 기여도가 무시될 수 있으므로 공구축의 수직 방향으로의 절삭력의 예측이 주로 관심의 대상이 되고 있다. 볼엔드밀이 가지는 절삭기구의 복잡성 때문에 기존의 연구들은 비교적 절삭기구가 간단한 페이스밀이나⁽¹⁾ 평엔드밀에 의한 가공⁽²⁾에 집중되어 왔다. 그러나 실제 3차원 자유곡면의 가공에서는 볼엔드밀을 이용한 측벽의 윤곽가공(contour cutting)과 상방향/하방향측벽가공(upward/downward ramp cutting)이 추가되고 있으며 이러한 가공에서 절삭력을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모델의 개발이 필요한 실정이다. 또한 이전 공구경로에 의한 커스프, 구멍, 계단 등의 가공면의 형상에 따라서 공구와 가공물간의 접촉부위는 매우 다양하게 변하게 되며 이러한 영향을 고려할 수 있는 임의의 절삭영역에 대한 절삭력예측 모델이 필요하게 되었다.

양민양 등은 절삭속도와 칩유출속도로 이루어지는 평면 내에서 2차원 절삭이론을 적용하여 3차원 절삭으로 확장하는 방법을 제시하였다⁽³⁾. 또한 절삭력을 공구회전각과 미소절삭날 위치각의 함수로 무차원하여 최대절삭력이 걸리는 공구회전각을 구하여 이 위치에서의 절삭력을 구하는 방법을 제시하고, 개발한 모델을 시스템에 적용하기 위하여 공작물의 형상을 Z-map의 형태로 표현하여 접촉부위에 맞는 회전수와 이송속도를 결정하는 데에 사용하였다. 그러나 절삭력의 형태가 비슷하다는 가정은 슬로팅 절삭 중에서도 완전절입(full emmersion)의 경우에 국한되므로 자유곡면의 가공으로 적용하기에는 한계를 보였다⁽⁴⁾. Tai 등은 공구날 형상을 해석하고 3차원 절삭이론(oblique cutting model)을 도입하였다⁽⁵⁾. Feng 등은 실험적인 절삭계수를 미소절삭날(finite chip load element)의 위치함수로 가정하는 방법을 제시하였다⁽⁶⁾. 주종남 등은 Z-map 방법을 이용하여 절삭영역을 구하고 이를 이용하여 절삭력을 구하는 방법을 제시하였다⁽⁷⁾.

본 연구에서는 Feng의 방법을 바탕으로 실험적 절삭계

수를 미소절삭날의 함수로 가정하여 측벽가공 시의 미변형칩 형상을 해석하고, Z-map 데이터를 이용하여 얻어진 절삭영역과 미소절삭날의 위치를 비교하여 절삭에 참여하는 미소절삭날에 걸리는 절삭력을 합함으로써 공구회전각에 따른 절삭력을 예측하였다. 또한 여러 가지 각도의 측벽가공 실험을 통하여 절삭력예측 능력을 평가하였다.

2. 절삭력에 대한 절삭영역의 영향

자유곡면 가공은 Fig.1과 같이 슬로팅가공(plain cutting), 경사면가공(ramp cutting), 윤곽가공(contouring)으로 나눌 수 있다. 자유곡면 가공은 이들의 조합으로 나타나므로 각 가공에서의 절삭력 특성을 살펴봄으로써 측벽가공에서의 절삭특성을 알 수 있다.

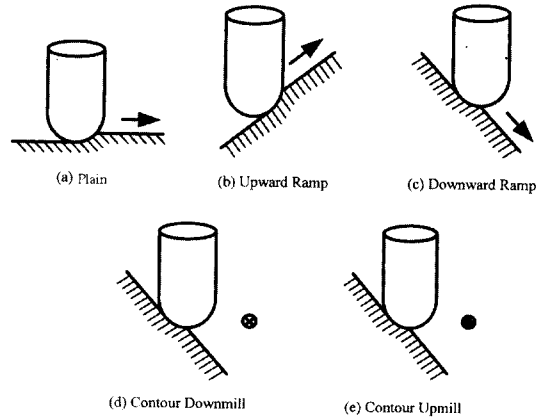


Fig.1 Cutting modes in free form surface machining

평엔드밀 가공은 측방향과 반경방향 절삭깊이로 절삭력 예측이 가능하다. 그러나 볼엔드밀 가공의 경우에는 절삭영역이 불규칙적으로 발생한다. 따라서 볼엔드밀 가공에서의 절삭력을 예측하기 위하여는 절삭영역에 대한 해석이 선행되어야 한다.

xy평면을 격자(lattice)로 나누고 그 위에 사각기둥(pillar)을 공작물의 표면 높이로 세워서 (x,y)위치에 있는 각각의 사각기둥의 높이 값 z를 저장함으로써 공작물을 표현하는 방법을 Z-map방법이라 한다⁽⁸⁾. 3축 밀링가공 공정에서는 공구가 공작물을 가공함에 따라 공구와 접촉하는 영역의 공작물의 높이는 공구의 높이만큼 감소하

게 되며, 따라서 공작물의 높이 정보만으로 가공 시 공작물 형상의 표현이 가능해진다⁹⁾. 또한 가공이 진행됨에 따라 공구와 공작물의 Z-map 데이터를 비교함으로써 공구와 공작물의 접촉위치를 얻을 수 있으며, 공구의 중심을 원점으로 하고 이송방향을 y축으로 하는 2차원 공구좌표계(이를 공구평면으로 정의한다.)를 설정하고 접촉영역을 이 좌표계로 변환함으로써 절삭가공중에 공구의 절삭영역을 쉽게 얻을 수 있다. Fig.2는 측벽가공 방법에 따른 대략적인 공구의 절삭영역을 표현하고 있다.

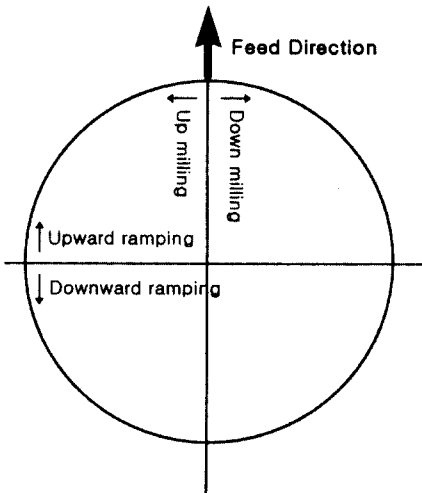
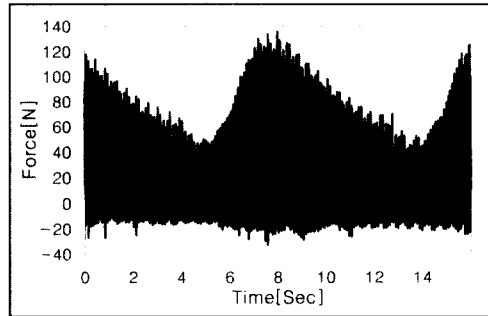
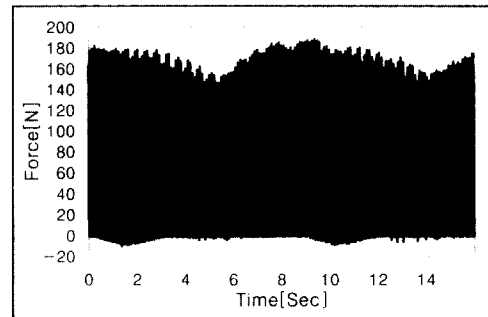


Fig.2 Cutting area of four cutting modes in the cutter plane

볼엔드밀 가공 후에 공작물에 남는 커스프는 절삭영역과 절삭력을 변화시킨다. 커스프는 이전가공의 가공경로에 따라 불규칙적으로 형성이 되어 수치적인 분석에 어려움이 있으므로 이에 의한 영향은 일반적으로 무시되어 왔다. 그러나 황삭가공과 같이 이전가공의 가공경로가 비교적 큰 경우에는 그 영향을 무시할 수 없어진다. Fig.3은 측벽기울기 각이 45도인 측벽을 공구경로간격 8.8mm인 상방향 경사면 가공한 후 이송속도 60mm/min, 공구경로간격 6mm인 상향밀링으로 윤곽가공을 수행한 경우 절삭력의 형태를 보이고 있으며, 전가공에서 발생한 커스프로 인하여 절삭력이 변화함을 알 수 있다. 이러한 영향은 Z-map 데이터를 사용함으로써 이전가공에 의한 임의의 절삭영역을 해석함으로써 절삭력의 예측이 가능해진다. 이 외에도 가공면의 구멍, 계단 등의 기하학적 형상에 따라서 변화되는 절삭력 예측도 가능하다.



a) X force



b) Y force

Fig. 3 Cutting force profile resulting from cusps of previous cutting (Previous path interval 8.8mm, Feed rate 60mm/min, Spindle speed 600rpm, Tool path interval 6mm, Surface normal depth of cut 1mm, Upmilling contouring)

3. 절삭력 예측 모델

3.1 절삭력 예측 알고리즘

DeVor등은 평엔드밀의 절삭날을 축 방향으로 여러 개의 미소절삭날로 나누고 각 미소절삭날에서 2차원 절삭기기로 근사하여 미소절삭력을 구한 후에 이들을 합하여 임의의 공구회전각에서 절삭력 예측방법을 제시하였다¹²⁾. 평엔드밀의 경우 미소절삭날은 그 위치에 무관하게 같은 절삭기구를 가지는 반면 볼엔드밀 가공에서는 공구선단에서의 미소절삭날의 위치에 따라 절삭기구가 다르므로 적용에 한계가 있다.

Feng등은 기존의 평엔드밀가공 모델에서 실험적 절삭기구 파라미터를 미소절삭날의 절삭위치의 함수로 가정

함으로써 미소절삭날에 따라 변화하는 절삭기구를 고려하였다^{6), (10-11)}. 그러나 이 방법은 평엔드밀 가공 모델을 기초로 하고 있으므로 슬로팅가공에서는 잘 맞았으나 측벽가공으로의 적용에는 모델의 검증으로 제시된 실험의 공구간경로가 공구직경의 반 이상으로 큰 경우에 한정되어 있고 절삭깊이도 매우 커서 커스프의 영향을 피할 수 없다. 본 연구에서는 Feng의 방법을 응용하여 슬로팅가공은 물론 측벽가공에도 적용이 가능하도록 절삭기구를 해석하고 이를 Z-map 데이터에서 얻은 절삭영역을 이용하여 절삭력예측 모델을 제안하였다.

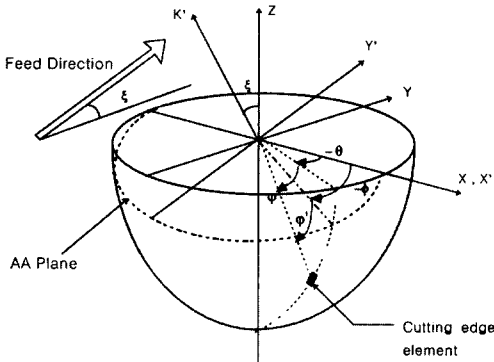


Fig.4 Coordinate system used in the model

미소절삭날의 위치를 나타내기 위하여 사용된 좌표계는 Fig.4와 같다. 여기서 θ 는 축방향으로의 회전위치각이고 공구선단에서의 미소절삭날의 위치각은 φ 로 나타내었다. 공구의 이송방향이 기울기 ξ 를 가지는 경우에는 ξ 만큼 기울어진 평면에서의 위치각 ϕ, ϕ' 로 표현한다.

하나의 절삭날을 φ 방향으로 미소절삭날로 나누어 절삭기구를 해석한다. n 개의 절삭날을 가진 공구에서 i 번 절삭날의 φ 의 위치에 있는 미소절삭날의 축방향회전 위치각은 다음과 같다.

$$\theta_i(\theta, \varphi) = -\theta - \sin \varphi \tan \beta + (i - 1) \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

여기서 θ 는 절삭날에서 $\varphi = 0$ 인 미소절삭날의 축방향회전 위치각이다.

Figure 5에서 측벽가공 시에 제거되는 미변형 칩의 형태는 AA평면 위를 따라서 슬로팅 절삭을 수행하는 경우와 같다. 따라서 xy평면과 ξ 의 각도를 가지고 가공하

는 경우에는 AA평면상에서 정의되는 공구의 회전각 ϕ 와 공구위치각 φ' 를 사용하면 측벽가공에서도 절삭력의 예측이 가능하다

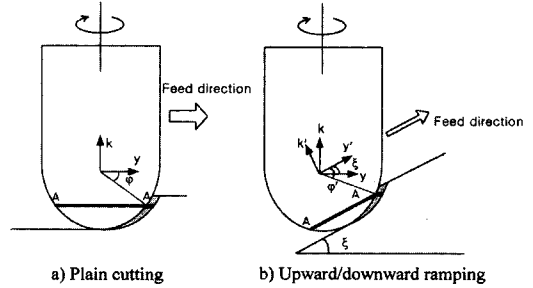


Fig.5 Comparison of undeformed chip geometry between ramping and plain cutting

공구는 z축을 중심으로 회전하므로 축방향 회전각 θ , 미소절삭날 위치각 φ 에 있는 미소절삭날을 $x'y'k'$ 좌표계의 위치각 ϕ, ϕ' 으로 변환하여야 한다. 미소절삭날 P가 축방향회전각 θ , 미소절삭날 위치각 φ 에 존재한다면 xyk좌표계에서의 P의 위치는 다음과 같다.

$$P = (R \cos \theta \cos \varphi, R \sin \theta \cos \varphi, -R \sin \varphi) \quad (2)$$

xyk좌표계를 x축을 중심으로 ξ 만큼 회전변환하면 $x'y'k'$ 좌표계에서 P의 위치는 다음과 같다.

$$P = (R \cos \theta \cos \varphi \cos \xi + R \sin \theta \cos \varphi \sin \xi - R \sin \varphi \sin \xi, -R \sin \theta \cos \varphi \sin \xi - R \sin \varphi \cos \xi) = (R \cos \phi \cos \varphi', R \sin \phi \cos \varphi', -R \sin \varphi') \quad (3)$$

식(3)에서 ϕ, φ' 는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \phi' &= \sin^{-1}(\sin \theta_i \cos \varphi \sin \xi + \sin \varphi \cos \xi) \\ \phi_i &= \cos^{-1}\left(\frac{\cos \theta_i \cos \varphi}{\cos \varphi'}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

슬로팅절삭의 경우 $\xi = 0$ 이므로 $\phi = \theta$ 이며 $\varphi' = \varphi$ 가 된다.

공구의 회전각이 θ 일 때 AA면에서 제거되는 미변형 칩 두께t와 절삭폭 dw는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} t &= f \sin \phi_i \\ dw &= R \cos \varphi' d\varphi \end{aligned} \quad (5)$$

미소절삭날에 작용하는 접선방향 미소절삭력과 반경방향 미소절삭력 dF_T, dF_R 은 미변형칩의 두께에 의한 치수 효과(size effect)를 고려하여 다음과 같이 절삭폭과 미변형칩의 지수 승의 곱으로 표현된다.

$$\begin{aligned} dF_T &= K_T(\varphi)[f \sin \phi_i(\theta, \varphi)]^{m_T} R \cos \varphi' d\varphi \\ dF_R &= K_R(\varphi)[f \sin \phi_i(\theta, \varphi)]^{m_R} R \cos \varphi' d\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 치수효과 특성을 나타내는 지수 m_T, m_R 은 공작물에 따라 결정되는 상수로 가정한다. K_T, K_R 는 절삭폭과 미절삭칩 두께 이외의 절삭기구 변수들의 영향을 포함하므로 미소절삭날 위치의 함수로 표현될 수 있으며, 본 연구에서는 K_T, K_R 를 미소절삭날 위치각의 3차식으로 근사하였다.

$$\begin{aligned} K_T(\varphi) &= a_0 + a_1\varphi + a_2\varphi^2 + a_3\varphi^3 \\ K_R(\varphi) &= b_0 + b_1\varphi + b_2\varphi^2 + b_3\varphi^3 \end{aligned} \quad (7)$$

따라서 임의 순간의 절삭력의 합을 구하기 위해 미소 접선방향, 반경방향 힘을 xy 좌표계로 환산한 후, 절삭에 참여한 미소절삭날에 걸리는 절삭력들을 합함으로써 절삭력의 합을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(\theta) &= \sum_{\varphi} \delta \{-K_T(\varphi)[f \sin \phi_i]^{m_T} \sin \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \phi_i]^{m_R} \cos \theta_i\} R \cos \varphi \Delta \varphi \\ F_y(\theta) &= \sum_{\varphi} \delta \{K_T(\varphi)[f \sin \phi_i]^{m_T} \cos \theta_i - K_R(\varphi)[f \sin \phi_i]^{m_R} \sin \theta_i\} R \cos \varphi \Delta \varphi \\ \delta &= \begin{cases} 1 & (\text{engaged}) \\ 0 & (\text{not engaged}) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2 절삭 영역의 해석

Z-map 데이터에서 얻어진 절삭영역과 미소절삭날들의 위치를 공구평면에서 비교하여 각 미소절삭날의 절삭참여 여부를 결정할 수 있다. k번째 미소절삭날의 Z방향 위치 Z_k 는 다음과 같다.

$$Z_k = R(1 - \sin(k\Delta\varphi + \Delta\varphi/2)) \quad (9)$$

Z_k 위치에서의 공구평면에서 반경 $r(Z_k)$ 과 미소절삭날의 위치 $(x_i(Z_k), y_k(Z_k))$ 은 다음과 같다. 이송방향은 y 방향으로 하였다.

$$\begin{aligned} r(Z_k) &= \sqrt{2RZ_k - Z_k^2} \\ x_i(Z_k) &= r(Z_k) \cos \theta_i(\theta, Z_k) \\ y_i(Z_k) &= r(Z_k) \sin \theta_i(\theta, Z_k) \end{aligned} \quad (10)$$

위에서 구한 미소절삭날의 위치가 Z-map 데이터로부터 얻은 절삭영역 안에 포함되면 절삭에 참여하는 것으로 판정한다.

4. 실험 및 절삭력 예측 모델의 검증

4.1 실험의 개요

본 연구에서는 모델에 사용되는 실험적 절삭기구 파라미터 K_T, K_R, m_T, m_R 을 구하기 위하여 다양한 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅 절삭을 수행하였으며, 구하여진 모델의 검증을 위하여 다양한 각도의 측면에서 상향/하향 밀링(up/down milling) 윤곽가공과 상방향/하방향 경사면 가공(upward/downward ramp cutting)을 수행하였다.

모든 가공은 대우중공업 vertical CNC machining center ACE-V30에서 수행하였다. 가공에 사용된 공구는 직경 12mm인 2날 볼엔드밀이며, 헬릭스각(helix angle)은 30°이다. 공작물의 재질은 금형의 시작품 제작용으로 많이 쓰이는 아연합금ZAS를 사용하였다. 주축 회전수는 600rpm으로 유지하였다. 절삭력은 Kistler사의 공구동력계 9257B를 사용하여 측정하였으며 측정된 절삭력 신호는 전하증폭기(charge amplifier) Kistler 5011A를 통하여 1000 Hz로 A/D 변환(A/D converting)하여 컴퓨터에 저장하였다.

4.2 슬로팅절삭을 통한 모델의 구축 (K_T, K_R 의 유도)

K_T, K_R 을 구하기 위하여 Table.1의 여러 가지 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅 절삭 실험을 수행하였다. 모든 조건에서의 평균절삭력을 계산하고 이를 계산된 값에 근사하도록 최소오차자승법을 이용하여 식(7)의 계수들을 계산하였다. 구하여진 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_T(\varphi) &= 321.7 + 803.1\varphi - 1165.5\varphi^2 + 550.7\varphi^3 \\ K_R(\varphi) &= 104.1 + 139.1\varphi - 213.1\varphi^2 + 69.3\varphi^3 \\ m_T &= 0.7053 \\ m_R &= 0.4788 \end{aligned}$$

Table.1 Slot cutting condition for model building

axial depth of cut[mm]	feed rate[mm/min]	feed per tooth[mm/th]
2-6	12	0.01
0.3-6	25	0.021
0.3-6	36	0.03
0.3-6	54	0.045
0.3-6	60	0.05
0.3-6	72	0.06
0.3-6	90	0.075

절삭날의 위치각 φ 에 따른 K_T 와 K_R 의 변화는 Fig.6 과 같다.

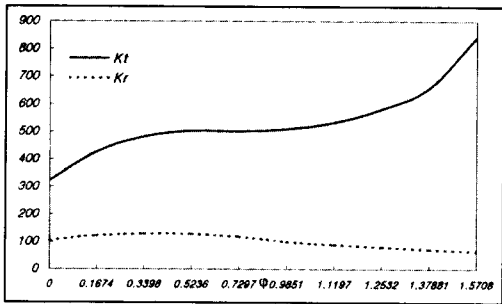


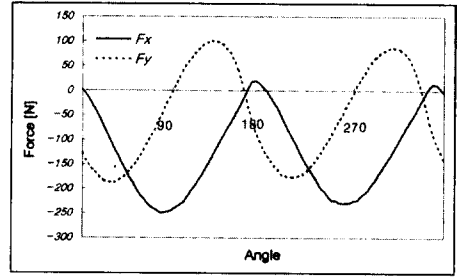
Fig.6 K_T, K_R , corresponding to position angle φ

볼랜드밀 절삭력 예측모델을 평가하기 위하여 다양한 축방향 절삭깊이에서의 슬로팅 절삭 시 실험값과 예측된 절삭력을 비교하였다. Figure 7 에서 실제 절삭력과 예측된 절삭력이 완전히 일치함을 보여준다.

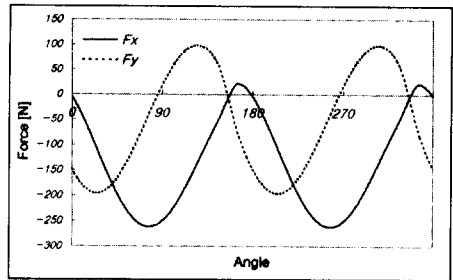
Figure 8은 슬로팅절삭에서 축방향 절삭깊이에 따른 최대절삭력과 최소절삭력의 실제값과 예측된 값과의 비교를 나타낸 것으로 상당히 근사한 결과를 보이고 있다.

4.3 축벽가공에서의 검증

일반적인 3차 자유곡면의 가공에서는 슬로팅 절삭보다는 축벽의 가공, 즉 윤곽가공(contouring)과 상방향, 하방향 경사면 가공이 주를 이루고 있으며 또한 이 과정에서 발생하는 공구의 변형이 공작물의 형상오차에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 축벽을 가공할 때에는 공구의 이송방향이 축벽을 따라서 기울기를 가지게 되므로 기존의 슬로팅 절삭 등의 평면가공과는 매우 다른 형태의 미변형칩을 가지게 된다. 축벽기울기각 45° 를 가지는 축

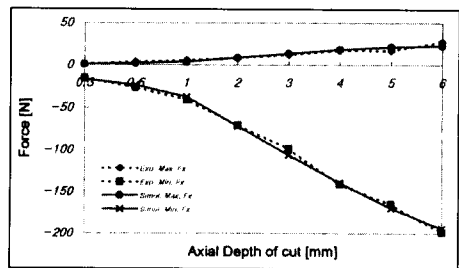


a) Experiment

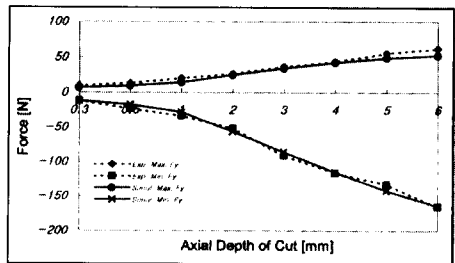


b) Simulation

Fig.7 Comparison of cutting force in slot cutting (Axial depth of cut 3 mm, Feed rate 90 mm/min, Feed per tooth 0.075mm)



a) X force



b) Y force

Fig.8 Max/min cutting forces corresponding to axial depth of cut in slot cutting (Axial depth of cut 0.3-6mm, Feed rate 25 mm/min, Feed per tooth 0.021mm)

벽을 윤곽가공, 상방향/하방향 경사면 가공을 수행하고 이때 공구에 작용하는 실제 절삭력과 본 연구에서 계산된 절삭력과 비교하였다.

Table.2 에는 측벽가공 실험에서 사용된 절삭 조건이 나타나 있다.

Table.2 Cutting condition of side cutting experiment

Type of cutting	Surface inclination angle [degree]	Feed per tooth [mm/th]	Surface normal depth of cut [mm]	Tool path interval [mm]
up milling	45	0.03,0.04,0.05	1.757	8.485
up milling	45	0.03,0.04,0.05	1	6
down milling	45	0.03,0.04,0.05	1.757	8.485
down milling	45	0.03,0.04,0.05	1	6
upward cutting	45	0.03,0.04,0.05	1.757	8.485
upward cutting	45	0.03,0.04,0.05	1	6
downward cutting	45	0.03,0.04,0.05	1.757	8.485
downward cutting	45	0.03,0.04,0.05	1	6
up milling	15,30,45,60,75	0.05	0.5	0.8
up milling	15,30,45,60,75	0.083	0.5	0.8
up milling	15,30,45,60,75	0.125	0.5	0.8
down milling	15,30,45,60,75	0.05	0.5	0.8
down milling	15,30,45,60,75	0.083	0.5	0.8
down milling	15,30,45,60,75	0.125	0.5	0.8
upward cutting	15,30,45,60,75	0.05	0.5	0.8
upward cutting	15,30,45,60,75	0.083	0.5	0.8
upward cutting	15,30,45,60,75	0.125	0.5	0.8
downward cutting	15,30,45,60,75	0.05	0.5	0.8
downward cutting	15,30,45,60,75	0.083	0.5	0.8
downward cutting	15,30,45,60,75	0.125	0.5	0.8

Figure 9는 측벽의 윤곽가공과 경사면 가공에서의 실제 절삭력과 계산된 절삭력을 비교한 것이다. 우선 공구 경로 간격 8.485mm로 전가공을 수행한 후에 표면 법선 방향 절삭깊이 1.757mm, 공구경로 간격 8.485mm로 가공하였다. 대체적으로 절삭력의 형상과 크기가 일치함을 보이고 있으므로 측벽가공에서도 완전한 절삭력의 예측을 구현하였음을 알 수 있다. Figure 10은 측벽가공의 방법에 따른 Z-map 데이터에서 얻어진 공구의 절삭영역을 보이고 있으며 가공모드에 따라 절삭영역이 확연히 다름을 알 수 있다.

4.4 측벽 기울기에 따른 절삭력의 영향

측벽가공에서 측벽의 기울기가 절삭력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 여러 가지 측벽 기울기에서 윤곽가공(contouring)을 모의가공하였다. 공구경로간격 1mm로 전가공한 후에 표면 법선방향 절삭깊이 1mm, 공구경로 간격 1mm로 상향/하향밀링 가공한 경우 절삭력의 최대

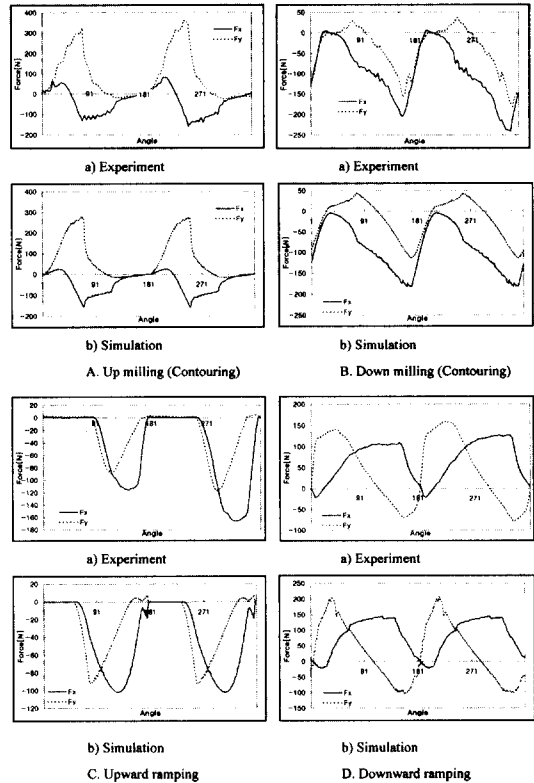


Fig.9 Comparison of cutting forces (Tool path interval 8.485mm, Surface normal depth of cut 1.757mm, Feed per tooth 0.05 mm/tooth)

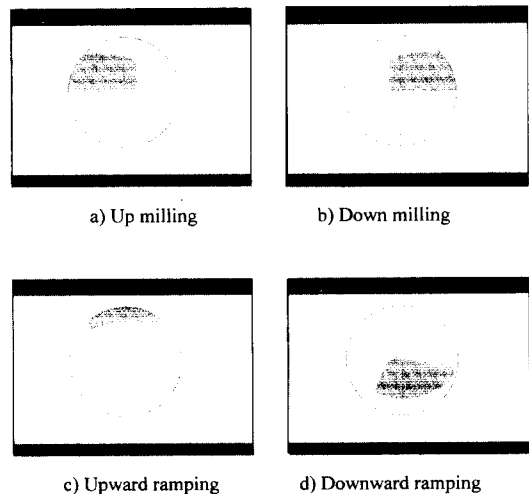


Fig.10 Cutting area in the cutter plane acquired from Z-map data

합력이 Fig.11에 나타나 있다. Figure.11 a)에서와 같이 측벽의 기울기 각도가 증가할 수록 절삭력의 최대합력은 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 측벽의 기울기가 급할 수록 공구의 변형에 대한 가공 후 표면의 형상오차의 민감도가 증가하기 때문에 기울기 각이 클 수록 측벽의 가공에서 공구변형에 의한 형상오차가 더욱 커질 것으로 예측된다. 상향밀링과 하향밀링간의 절삭력의 차이는 그다지 크게 나타나지는 않으나 Fig.11 b)와 같이 표면에 수직한 방향으로의 최대절삭력을 비교해보면 하향밀링의 경우에는 기울기가 증가할 수록 절삭력이 증가하지만 상향밀링의 경우에는 기울기의 증가와 더불어 절삭력이 감소하게 됨을 알 수 있다.

가공후 표면의 형상오차는 표면에 수직방향으로의 공구 변형에 관계하므로 표면에 수직한 방향으로의 최대절삭력만을 비교한다면 가공하고자 하는 표면의 기울기각이 큰 경우의 가공에 있어서는 상향밀링으로 가공하도록 가공공정을 계획하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

5. 결 론

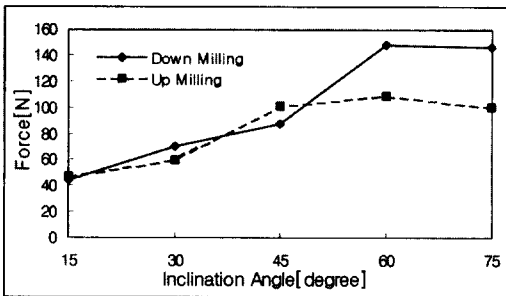
본 연구에서는 볼엔드밀을 이용한 슬로팅 절삭 및 측벽 가공에서의 절삭력 예측을 위하여 연구를 수행하였다. Feng의 모델을 바탕으로 측벽가공에서 발생하는 미변형 칩의 형태 변화를 분석하고 이를 보정하여 측벽가공에서 보다 정확한 절삭력 예측이 가능한 모델을 유도하였다. 또한 Z-map 방법으로부터 구하여진 절삭영역을 공구평면상에서 미소절삭날의 위치와 비교함으로써 가공면의 기하로부터 임의로 변화하는 절삭영역에서의 절삭력예측이 가능하였다. 다양한 절삭조건에서의 모델검증실험 결과로 슬로팅절삭 뿐만 아니라 측벽가공에서도 상당히 정확한 절삭력예측이 가능하였다. 동일 절삭조건에서 가공면의 기울기각이 커질수록 최대절삭합력은 증가하였다. 그러나 표면형상오차에 큰 영향을 주는 가공면에 수직한 방향으로의 최대절삭력은 기울기각의 증가에 따라 하향밀링에서는 증가하고 상향밀링에서는 감소하는 경향을 보였다. 그러므로 기울기각이 큰 측벽의 가공에 있어서는 상향밀링이 유리한 것으로 판단된다.

후 기

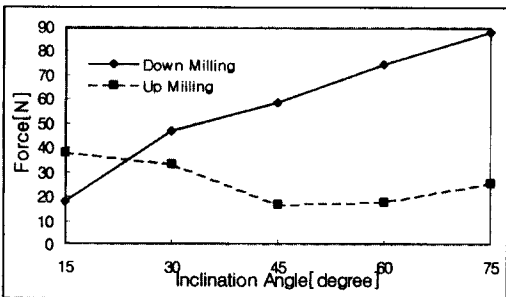
본 논문은 통상산업부와 과학기술처에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발 결과이며, 연구에 도움을 주신 (주)큐빅테크에 감사드립니다.

참고문헌

1. H.J. Fu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor, "A mechanistic model for the prediction of the force system in face milling operation", *J.of Eng. for Industry*, Vol.106, pp 81-88, 1984
2. W.A. Kline, R.E. DeVor, "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, 1982
3. M.Y. Yang, H.D. Park, "The prediction of cutting force in ball-end milling", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.31, No.1, pp 45-54, 1991
4. 김찬봉, 양민양, "볼엔드밀링의 절삭조건 검증시스템", *한국정밀공학회지*, 제12권, 제2호, pp 123-



a) Maximum resultant force



b) Maximum force perpendicular to surface

Fig.11 Variation of maximum force corresponding to surface inclination angle (Tool path interval 1mm, Surface normal depth of cut 1mm, Feed per tooth 0.05mm/tooth)

- 134, 1995.
5. C.C. Tai, K.H. Fhu, "Model for cutting forces prediction in ball-end milling", *Int.J.Mach.Tools Manufact*, Vol.35, No.4, pp 511-534, 1995.
 6. H.Y. Feng, C.H. Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process- I. Model formulation and model building procedure", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.34, No.5, pp 697-710, 1994.
 7. 김규만, 주종남 외, "Z-map을 이용한 임의의 절삭 영역에서의 볼엔드밀의 절삭력 예측에 관한 연구", *한국정밀공학회 96년도 춘계학술대회논문집*, pp 125-129, 1996.
 8. Y. Takeuch, M. Sakamoto, Y. Abe, R. Orita, "Development of personal CAD/CAM system for mold manufacture based on solid modeling techniques", *Ann. CIRP Vol.38*, No.1, pp 429-432, 1989.
 9. P-L Hsu, W-T Yang, "Real-time 3D simulation of 3-axis milling using isometric projection", *Computer Aided Design*, Vol.25, No.4, pp 215-224, 1993.
 10. H.Y. Feng, C.H. Menq, "The prediction of cutting forces in the ball-end milling process- II. Cut geometry analysis and model verification", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.34, No.5, pp 711-719, 1994.
 11. E.M. Lim, H.Y. Feng, et.al, "The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball end milling process. Part I: Chip geometry analysis and cutting force prediction", *Int.J.Mach.Tools Manufact.*, Vol.35, No.8, pp 1149-1169, 1995.