

절삭영역 해석을 통한 경사면 가공에서의 볼엔드밀 절삭력 예측

김규만*, 조필주*, 황인길*, 주종남**

Cutting Force Prediction of Slanted Surface Ball-End Milling Using Cutter Contact Area

G. M. Kim*, P. J. Cho*, I. K. Hwang* and C. N. Chu**

ABSTRACT

Cutting forces in ball-end milling of slanted surfaces are calculated. The cutting area is determined from the Z-map of the surface geometry and current cutter location. The obtained cutting area is projected onto the cutter plane normal to the Z-axis and compared with cutting edge element location. Cutting force is calculated by integration of elemental cutting forces of engaged cutting edge elements. Experiments with various slanted angles were performed to verify the proposed cutting force estimation model. It is shown that the proposed method predicts cutting force effectively for any geometry including sculptured surfaces with cusp marks and surfaces with pockets and holes.

Key words : Z-map, Cutter plane, Cusp mark, Slanted surface machining

1. 서 론

볼엔드밀은 다이캐스팅 금형과 주형 등과 같은 3차원 형상의 부품 가공에 널리 사용되고 있다. 이때 절삭력으로 인한 공구변형은 형상오차를 야기하며, 특히 측벽가공의 경우에는 그 영향을 무시할 수 없게 된다. 따라서 현장에서는 과도한 공구변형을 피하기 위하여 절삭조건을 작게 설정, 가공함으로써 가공시간과 생산단가가 증가하게 된다. 그러므로 볼엔드밀 가공 시 절삭특성에 대하여 충분히 고려하고 절삭력을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모델을 개발하는 것이 필요하다.

평엔드밀 가공에서 절삭특성이 미소절삭날의 위치에 무관하게 일정한 반면, 볼엔드밀 가공에서는 절삭기하가 복잡한 경우가 대부분이고 특히 공구선단의 구형부에서 절삭기구가 미소절삭날의 위치에 따라 연속적으로 변하기 때문에 절삭기구가 매우 복잡하다. 많은 연구자들은 '어떠한 복잡한 절삭과정도

선삭에서의 3차원절삭(oblique cutting)의 집합으로 이루어 진다'는 가정 아래 볼엔드밀 절삭력을 해석하는 모델을 제시하였다^{1,2)}. 이 모델들에서는 예측된 절삭력이 전단각(shear angle)과 마찰각(friction angle) 등의 입력정보에 민감하고 3차원 절삭이론을 적용함에 따라 모델이 복잡해진다. 한편, Feng 등은 절삭날을 따라서 나누어진 미소절삭날에서의 실험적 절삭계수를 미소절삭날 위치의 함수로 가정하여 절삭력을 계산하였다³⁾. 자유 곡면 가공에서는 공구가 경사면을 따라 가공하는 것이 대부분이며, 이 때의 절삭력을 정확히 예측하는 것이 중요하다. 그러나 기존의 모델에서는 모델검증 실험이 평면 절삭에 국한되어 있거나, 측벽에 대한 가공에서 예측된 절삭력이 실제 절삭력과 큰 차이를 보이고 있다. 또한 절삭력 변화의 중요한 요인인 공구 절삭 영역은 커스프(cusp) 등의 전가공면 형상에 따라 계속 변하게 된다. 특히, 공작물이 구멍, 계단형상 등을 포함하여 공작물 기하가 급격하게 변하는 경우에는 보다 효과적인 공구접촉 영역의 계산이 필요하다.

본 연구에서는 경사면 가공 시 연속적으로 변하는 공구접촉 영역을 보다 효과적으로 계산하기 위하여

*서울대 대학원

**서울대 기계설계학과

Z-map을 사용하였다. 실험적 절삭계수를 미소 절삭날의 위치각의 함수로 가정하여^[5] 절삭날의 축방향 위치에 따른 절삭기구의 변화를 표현하였다. 경사면 가공에서 미변형 칩 기하의 변화를 해석하여 절삭력을 계산하였다. 다양한 기울기각의 경사면에서의 가공과, 커스프와 구멍을 지닌 경사면의 가공 실험을 수행하여 모델을 검증하였다.

2. 공구접촉영역의 표현

Fig. 1에서와 같이 경사면 가공은 공구의 이송방향에 따라 경사 가공(ramping)과 윤곽 가공(contouring)으로 분류된다^[4], 절삭력 변화에 중요한 영향을 미치는 공구의 접촉영역은 가공이 진행됨에 따라 연속적으로 변화하며 가공모드에 따라 달라진다. 기존의 공구접촉영역 산출 방법들은 경우에 따라 다른 식을 사용하여 일반화 되기 어렵고 복잡한 계산 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 가공물과 공구의 Z-map을 비교하여 절삭영역을 구하였다. Z-map은 xy평면의 격자에서의 높이로 공작물의 기하를 표현하는 방법이다^[4]. 가공이 진행됨에 따라 공구위치로부터 계산된 공구의 Z-map과 공작물의 순간 Z-map을 비교하면 임의 순간에서의 공구접촉영역을 쉽고 빠르게 구할 수 있다. 공구의 절삭영역을 표현하기 위하여, 공구축에 수직이고 공구 이송방향을 Y축으로 하는 공구평면(cutter plane)을 정의하였다^[6]. Fig. 2는 가공 방법에 따라 경사면 가공에서 나타나는 절삭영역의 예를 보이고 있다. 공구평면에서의 미소절삭날 위치를 계산하고, 이를 Z-map에서 구하여진 공구접촉영역

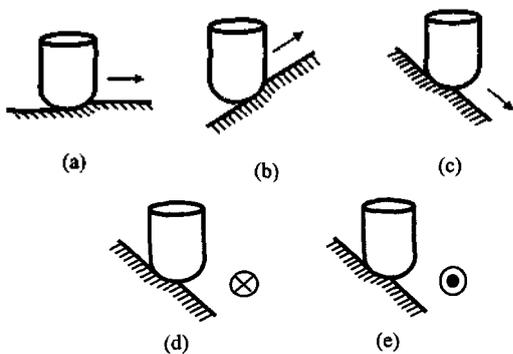


Fig. 1. Cutting modes of sculptured surface machining: (a) Plain cutting; (b) Upward ramping; (c) Downward ramping; (d) Up-cut contouring; (e) Down-cut contouring.

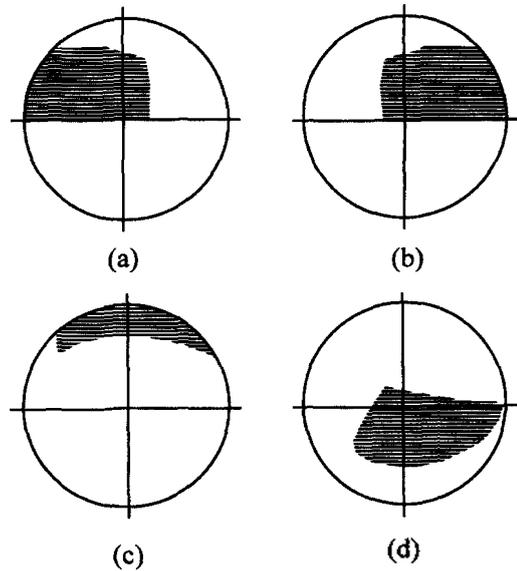


Fig. 2. Cutter contact areas on the cutter plane: (a) Up-cut contouring; (b) Down-cut contouring; (c) Upward ramping; (d) Downward ramping.

역과 비교하여 미소절삭날의 절삭참여 여부를 판정할 수 있다.

3. 절삭력 예측 모델

본 연구에서 미소절삭날의 위치를 나타내기 위해 사용된 변수와 좌표계는 Fig. 3과 같다. θ 는 축방향 회전위치각이고 공구선단에서의 미소절삭날의 위치각은 ϕ 로 나타내었다. 공구의 이송방향이 기울기 ξ 를 가지는 경우에는 ξ 만큼 기울어진 평면에서의 위치각 θ' , ϕ' 로 표현한다. 본 모델에서는 절삭날을 ϕ 방향으로 잘게 나누어진 미소절삭날에서 절삭력을

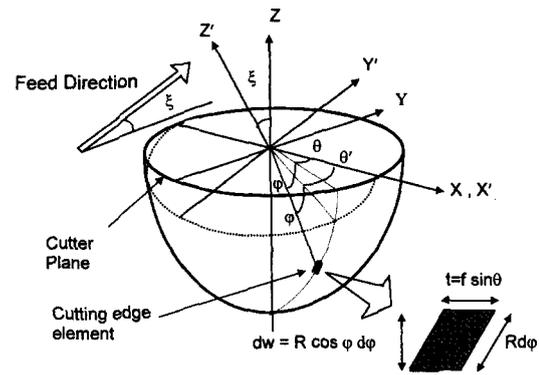


Fig. 3. Coordinate systems of cutting force model.

해석한다. n 개의 절삭날(flute)을 가진 공구의 공구회전각이 Θ 일 때, i 번째 절삭날의 φ 의 위치에 있는 미소 절삭날의 축방향회전 위치각 θ 는 다음과 같다.

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

where the cutting edge element position angle is φ ; the cutter helix angle is β ; cutter rotation angle is Θ ; and number of flutes is n .

상방향절삭에서 이송방향벡터는 공구회전축과 수직을 이루지 않는다. 따라서 Fig. 4와 같이 미소절삭날은 다른 미변형 칩두께를 가지게 된다.

XYZ좌표계로부터 이송방향벡터의 기울기 각 ξ 만큼 회전된 X'Y'Z' 좌표계를 정의하면, 상방향절삭에서 미변형 칩 형상은 X'Y'Z' 좌표계에서의 슬로팅 가공과 같음을 알 수 있다.

미소절삭날 P가 축방향회전각 θ , 미소절삭날 위치 각 φ 의 위치에 존재한다면 XYZ 좌표계에서의 P의 위치는

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

where R is the cutter radius.

이고 X축을 중심으로 ξ 만큼 회전 변환된 X'Y'Z' 좌표계에서 P의 위치는 다음과 같다.

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

식(3)에서 두 좌표값을 비교하면 θ' 와 φ' 는

$$\theta' = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta \cos \varphi}{\cos \varphi'} \right)$$

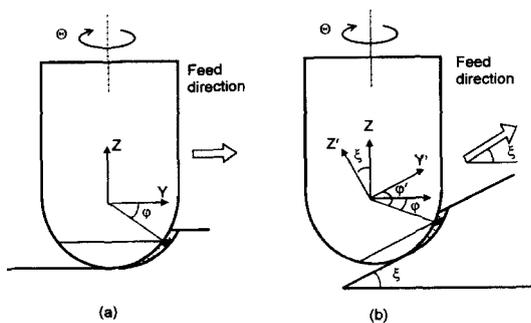


Fig. 4. Comparison of undeformed chip geometry between ramping and plain cutting: (a) Plain cutting; (b) Upward/Downward ramping.

$$\varphi' = \sin^{-1}(\sin \theta \cos \varphi \sin \xi + \sin \varphi \cos \xi) \quad (4)$$

이 때 제거되는 미변형 칩 두께 t 와 절삭폭 dw 는 다음과 같다

$$t = f \sin \theta' \\ dw = R \cos \varphi' d\varphi' \quad (5)$$

가공실험결과 이송속도에 따른 절삭력의 변화는 선형적인 관계가 아니라 이송속도의 지수승에 비례하는 관계를 보임을 관찰할 수 있었다. 이는 미변형 칩의 두께에 의한 치수효과(size effect)에 기인하는 것으로 가정할 수 있다^[3]. 따라서 이러한 특성을 표현하는 m_T, m_R 를 정의하면, 미소절삭날에 작용하는 접선 및 반경방향 미소절삭력 dF_T, dF_R 은 다음과 같이 표현된다.

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

K_T, K_R 는 절삭폭과 미절삭 칩 두께 이외의 절삭기구 변수들의 영향을 포함하므로 미소절삭날 위치의 함수로 표현될 수 있으며, 본 연구에서는 3차식으로 근사하였다.

$$K_T(\varphi) = a_0 + a_1 \varphi + a_2 \varphi^2 + a_3 \varphi^3 \\ K_R(\varphi) = b_0 + b_1 \varphi + b_2 \varphi^2 + b_3 \varphi^3 \quad (7)$$

절삭에 참여한 미소절삭날에서 절삭력을 XY방향으로 회전변환하고 이들을 합함으로써 임의의 공구회전각에서의 절삭력을 구한다.

$$F_x(\Theta) = \int \delta \{ -K_T(\varphi) [f \sin \theta']^{m_T} \sin \theta - K_R(\varphi) [f \sin \theta']^{m_R} \cos \theta \} R \cos \varphi' d\varphi' \\ F_y(\Theta) = \int \delta \{ K_T(\varphi) [f \sin \theta']^{m_T} \cos \theta - K_R(\varphi) [f \sin \theta']^{m_R} \sin \theta \} R \cos \varphi' d\varphi' \\ \delta = \begin{cases} 1 & \text{(engaged)} \\ 0 & \text{(not engaged)} \end{cases} \quad (8)$$

미소절삭날의 절삭참여 여부를 결정하기 위해 Z-map 데이터에서 얻어진 절삭영역과 미소절삭날들의 위치를 공구평면에서 비교한다. 공구평면에서 미소절삭날의 반경방향 거리 r 은 다음과 같다.

$$r(\varphi) = R \cos \varphi \quad (9)$$

미소절삭날의 X, Y방향 위치, (x, y) 는 r 과 θ 로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} x(\theta, \varphi) &= r(\varphi) \cos \theta(\theta, \varphi) \\ y(\theta, \varphi) &= r(\varphi) \sin \theta(\theta, \varphi) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\theta(\theta, \varphi)$ 는 식 (1)에서 계산된다. 위에서 구한 미소절삭날의 위치를 Z-map 데이터로부터 얻은 공구접촉영역과 비교하여 영역 안에 포함되면 절삭에 참여하는 것으로 판정하여 식 (6)에서 미소절삭력을 구한다. 식 (8)으로부터 절삭에 참여하는 미소절삭력들을 합하면 임의의 공구회전각에 따른 절삭력을 계산할 수 있다.

4. 경사면 가공 실험

4.1 실험 개요

실험적 절삭변수 K_T, K_R, m_T, m_R 을 구하기 위하여 축 방향 절삭깊이를 0.3에서 6 mm로, 날당이송을 0.01에서 0.075 mm/th로 바꾸어 가면서 슬로팅 절삭을 수행하였다⁶⁾. 절삭력 모델을 검증하기 위하여 45도 기울어진 경사면에서 윤곽가공과 경사가공을

수행하였다. 실린더면을 가공하여 다양한 기울기를 지닌 면을 윤곽 가공하였다. 또한 전가공에 의해 발생한 커스프와 구멍을 지닌 경사면을 윤곽 가공하였다.

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

구하여진 실험적 절삭계수는 다음과 같다.

$$m_T = 0.7053$$

$$m_R = 0.4788$$

$$K_T(\varphi) = 321.7 + 803.1\varphi - 1165.5\varphi^2 + 550.7\varphi^3$$

$$K_R(\varphi) = 104.1 + 139.11\varphi - 213.1\varphi^2 + 69.3\varphi^3$$

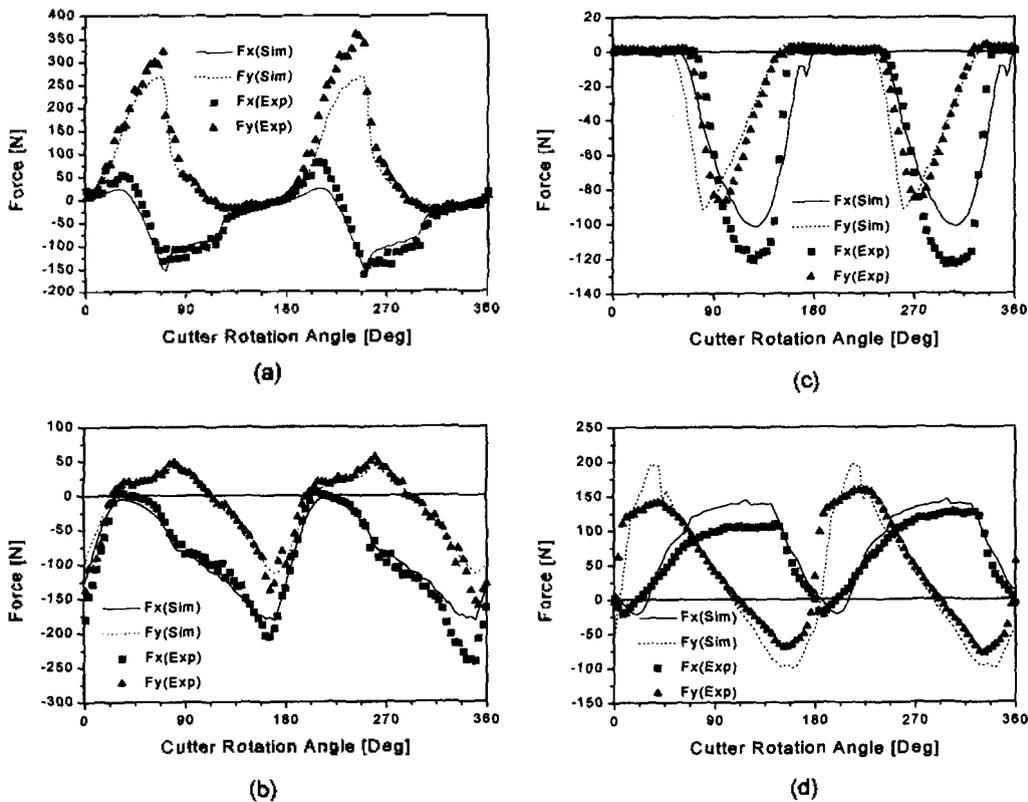


Fig. 5. Cutting force profile of slanted surface cutting: (a) Up-cut contouring; (b) Down-cut contouring; (c) Upward ramping; (d) Downward ramping (Path interval: 8.485 mm, Surface normal depth of cut: 1.757 mm, Feed: 0.05 mm/tooth)

4.2 결과 및 분석

경사면 가공에서 절삭력 모델을 검증하기 위하여 여러 가지 가공실험을 수행하였다. Fig. 5는 45도 경사면을 윤곽가공 및 경사가공한 경우 공구 한 회전당 절삭력을 비교한 것이다. 가공조건은 표면 법선 방향 절삭깊이 1.757 mm, 경로간격 8.485 mm이다. 가공에 앞서 가공과 같은 경로간격으로 전가공을 수행하였다. 대체적으로 절삭력의 형상과 크기가 일치함을 보이고 있다. Fig. 2는 가공 방법에 따른 Z-map 데이터에서 구하여진 공구의 절삭영역을 보이고 있으며 가공모드에 따라 절삭영역이 확연히 다를 수 있다.

경사면의 기울기 각이 다른 경우 공구 절삭 영역과 절삭력의 변화를 살펴보기 위하여 실린더 형상을 가공하였다(Fig. 6). 우선 직경 100 mm 실린더를 황삭 및 중삭 가공한 후 절삭깊이 1.5 mm, 경로간격 1.5 mm, 이송량 0.083 mm/tooth로 실린더 축 방향으로 윤곽 가공하였다. 경로의 진행 방향은 상향밀링에서 하향밀링으로 변화되게 진행하도록 설정하였다. Fig. 7은 경사면의 기울기 각에 따른 예측된 절삭력과 실제 절삭력의 최대치와 최소치의 변화를 비교한 것이며 예측된 절삭력과 실제 절삭력은 작은 차이를 보이고 있다.

상향밀링으로 가공하는 경우 기울기 각 -30도 부근에서 이송 수직방향 절삭력 F_x 의 방향이 바뀔 수 있다. 하향밀링의 경우 역시 기울기 각 30도 부근에서 이송 방향 절삭력 F_y 의 방향이 바뀌고 있다. 가공 후 표면의 형상오차에 상대적으로 영향이 큰 이송 수직방향 절삭력을 가공 방법에 따라 비교하면, 같은 기울기 각에서 상향밀링이 하향밀링에 비하여 작은 절삭력을 보이고 있으므로 공구변형에

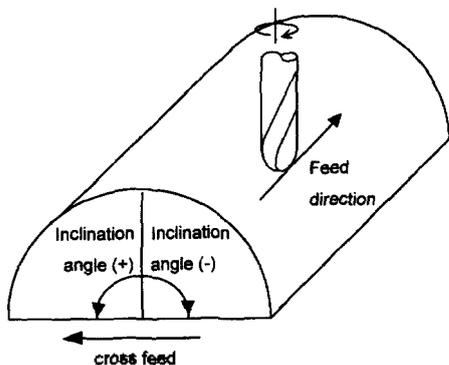


Fig. 6. Workpiece shape and machining scheme in cylinder machining

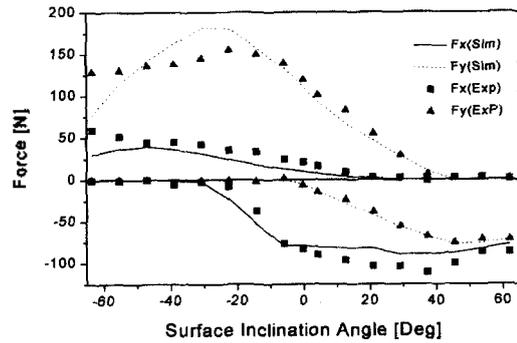


Fig. 7. Maximum and minimum cutting force variation due to surface inclination angle. (Contouring, Path interval: 1.5 mm, Surface normal depth of cut: 1.5 mm, Feed: 0.083 mm/tooth).

의한 형상오차를 줄일 수 있다. 그러나 상향밀링은 절삭력 방향 때문에 과절삭(over cut)이 일어날 수 있다. Fig. 8은 실린더 가공 시 공구의 절삭영역의 변화를 보이고 있다. 기울기 각이 증가함에 따라 절삭영역은 이송방향 기준으로 왼쪽에서 오른쪽으로 이동을 볼 수 있으며 경로이동 방향의 영향으로 가공면 기울기각이 영인 지점에서도 절삭영역은 왼쪽으로 치우쳐 있다. 따라서 절삭영역은 경로이동 방향이 바뀌면 절삭영역과 이에 따른 절삭력의 형태도 바뀌게 됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 기울기각이 45도이고 전가공에 의한 커스프와 구멍을 가진 경사면을 윤곽가공(하향밀링)을 한 경우 최대절삭력의 변화를 보이고 있다. 가공에 앞서 가공면을 경로간격 8.8 mm로 상방향절삭(upward ramping)하여 가공실험의 이송방향에 수직인 커스프를 만들고 경사면 중간의 커스프들 사이에 직경 12 mm의 구멍을 만들었다. 실험결과 이전 가공으로

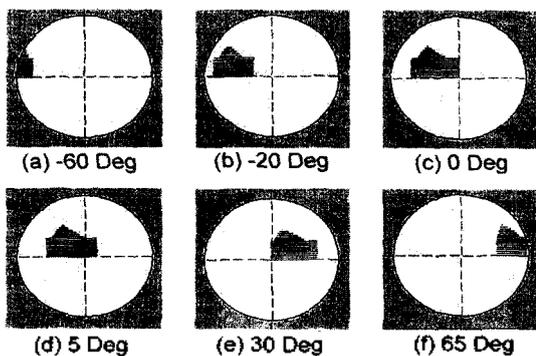


Fig. 8. Cutter contact area variation corresponding to surface inclination angle.

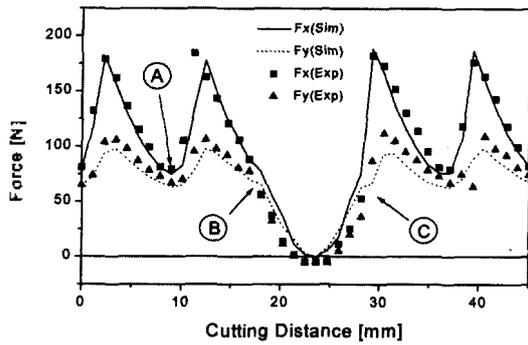


Fig. 9. Maximum cutting force variation resulting from pre-machined cusps and a hole (Path interval: 6 mm, Surface normal depth of cut: 0.707 mm, Feed: 0.05 mm/tooth).

생긴 커스프로 인하여 절삭력이 영향을 받아 크기가 두 배 이상으로 변화되고 있음을 보이고 있으며 계산된 절삭력은 실제 절삭력과 잘 일치하므로 제시된 모델이 이들 영향을 충분히 고려하고 있음을 보이고 있다. Fig. 10은 공구가 커스프를 지나갈 때 (A-B), 절삭

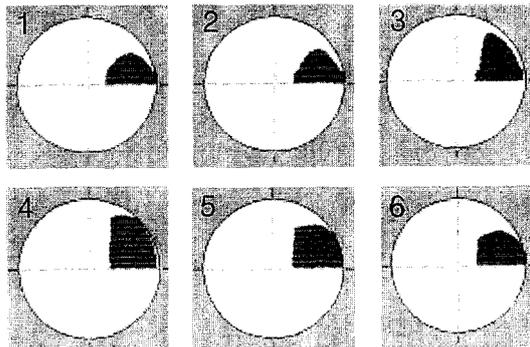


Fig. 10. Cutter contact area variation due to cusp effect (Region A-B).

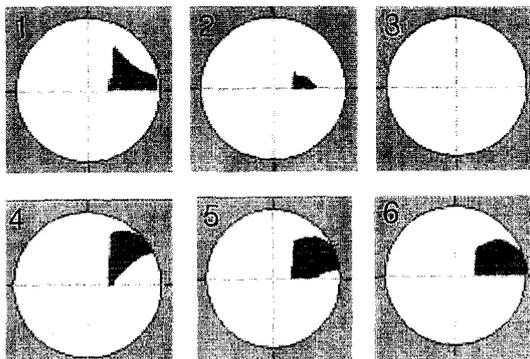


Fig. 11. Cutter contact area variation passing across a hole (Region B-C)

영역의 변화과정을 보이고 있다. 일반적으로 커스프가 절삭영역에 미치는 영향은 무시되어 왔으나, 황삭과 같이 경로간격이 큰 가공에서 발생한 커스프는 다음 가공에서 절삭영역 변화와 이로 인한 절삭력의 변화를 가져오게 됨을 알 수 있다. Fig. 11은 공구가 구멍을 지날 때 (B-C), 절삭영역의 변화를 보이고 있다. 절삭영역에서 구멍의 형상이 충분히 고려되고 있음을 알 수 있다. 구멍 이외에 계단형상, 급경사면 등 공작물의 형상이 급격히 변화하는 경우에도 절삭영역을 표현함으로써 간단하고 정확하게 절삭력의 예측이 가능하다.

5. 결 론

Z-map을 이용한 블랜드밀 절삭력을 예측하는 모델을 제시하였다. 이 모델에서는 절삭영역과 미변형 칩두께에 대한 해석은 통하여 경사가공과 윤곽가공에서 보다 정확한 절삭력 예측이 가능하였다. 절삭영역은 공구평면에서 광구 미소절삭날의 위치와 비교하여 미소절삭날의 절삭 참여 여부를 판단할 수 있고 절삭에 참여하는 미소절삭력을 합하여 공구회전각에 따른 절삭력을 계산하였다. 경사면 가공 실험에서, 본 모델을 사용하여 20% 이내의 오차에서 절삭력의 예측이 가능하였고 경사면의 기울기각에 따라 변하는 절삭영역과 절삭력을 충분히 예측할 수 있었다. 또한 커스프의 영향이 큰 경우나, 가공물 기하가 급격하게 변하는 경우에도 절삭영역과 절삭력의 변화의 정확한 예측이 가능하였다. 본 절삭력 모델은 공구변형과 형상오차 예측을 위한 도구로 사용될 수 있으며, 실제 현장에서 3차원 형상가공 시 모의가공을 통하여 과도절삭 회피를 위한 절삭조건 산출 등으로 응용될 수 있다.

Nomenclature

- Θ cutter rotation angle
- $\theta(\Theta, \varphi)$ cutting edge element rotation angle
- φ cutting edge element position angle
- φ' cutting edge element position angle in X'Y'Z' coordinate system
- θ' cutting edge element rotation angle in X'Y'Z' coordinate system
- ξ feed angle
- β cutter helix angle
- n number of cutter flutes

- f feed per tooth
- t undeformed chip thickness
- dw undeformed chip width
- dF_T tangential elemental cutting force
- dF_R radial elemental cutting force
- $K_T(\phi)$ tangential empirical cutting parameter
- $K_R(\phi)$ radial empirical cutting parameter
- a, b_i coefficients of $K_T(\phi)$ and $K_R(\phi)$
- m_T, m_R model parameters characterizing the size effect of the workpiece material
- $F_x(\Theta)$ x-directional cutting force at cutter rotation angle Θ
- $F_y(\Theta)$ y-directional cutting force at cutter rotation angle Θ

참고문헌

1. Yang, M.Y. and Park, H.D., "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, No. 1, pp. 45-54, 1991.
2. Tai, C.C. and Fuh, K.H., "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 4, pp. 511-534, 1995.
3. Feng, H.Y. and Menq, C.H., "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.
4. Chu, C.N., Kim, S.Y. and Lee, J.M., "Feed-Rate Optimization of Ball End Milling Considering Local Shape Features", *Annals of the CIRP*, Vol. 46, No. 1, pp. 433-436, 1997.
5. Takeuch, Y., Sakamoto, M., Abe, Y. and Orita, R., "Development of Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques", *Annals of the CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp. 429-432, 1989.
6. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z map을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력예측", 한국정밀공학회지, 제 14권, 제 3호, pp. 57-65, 1997.



김 규 만

1993년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1995년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1995년~현재 서울대학교 기계설계학과 박사과정
 관심분야: NC Machining, Micro Electrical Discharge Machining, MEMS



조 필 주

1995년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1997년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1997년~현재 서울대학교 기계설계학과 박사과정
 관심분야: Ball-End Milling Process, Micro EDM Circuit Design & Control



황 인 길

1997년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1997년~현재 서울대학교 기계설계학과 석사과정
 관심분야: Ball-End Milling Process, Chatter Dynamics



주 종 남

1979년 서울대학교 기계공학과 학사
 1982년 미국 MTI 공학석사
 1986년 미국 MTI 공학박사
 1986년~1992년 미국 Purdue University 조교수, 부교수
 1992년~현재 서울대학교 기계설계학과 조교수, 부교수
 관심분야: Precision Machining, Machine Tool Monitoring, Micro-Machining