

본 논문은 통상산업부와 과학기술처에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발 결과이며, 연구에 도움을 주신 ㈜큐빅테크에 감사드립니다.

볼엔드밀 경사면 가공에서 절삭력 맵을 이용한 평균절삭력 예측

김 규 만*, 주 종 남**

Mean Cutting Force Prediction in Ball-End Milling of Slanted Surface Using Force Map

G. M. Kim*, C. N. Chu**

ABSTRACT

During machining of dies and molds with sculptured surfaces, the cutter contact area changes continuously and results in cutting force variation. In order to implement cutting force prediction model into a CAM system, an effective and fast method is necessary. In this paper, a new method is proposed to predict mean cutting force. The cutter contact area in the spherical part of the cutter is obtained using Z-map, and expressed by the grids on the cutter plane orthogonal to the cutter axis. New empirical cutting parameters were defined to describe the cutting force in the spherical part of cutter. Before the mean cutting force calculation, the cutting force density in each grid is calculated and saved to force map on the cutter plane. The mean cutting force in an arbitrary cutter contact area can be easily calculated by summing up the cutting force density of the engaged grid of the force map. The proposed method was verified through the slotting and slanted surface machining with various inclination angles. It was shown that the mean force can be calculated fast and effectively through the proposed method for any geometry including sculptured surfaces with cusp marks and holes.

Key Words : Mean cutting force(평균절삭력), Z-map(지-맵), Force map(절삭력맵), Slanted surface machining(경사면 가공)

Nomenclature

Θ cutter rotation angle
 φ' modified cutting edge element position angle
 θ' modified cutting edge element rotation angle

ξ feed inclination angle
 n number of cutter flutes
 f feed per tooth
 R cutter radius
 t undeformed chip thickness

* 서울대학교 대학원
 ** 서울대학교 기계설계학과

- dw undeformed chip width
- dF_T tangential elemental cutting force
- dF_R radial elemental cutting force
- $K_T(\varphi)$ tangential empirical cutting parameter
- $K_R(\varphi)$ radial empirical cutting parameter
- m_T, m_R size effect model parameters
- F_x, F_y x and y directional instantaneous cutting force
- \bar{F}_x, \bar{F}_y x and y directional mean cutting force
- \hat{F}_x, \hat{F}_y mean force density in the grid of force map

1. 서론

평엔드밀은 포켓가공과 작은 곡률을 지닌 곡면가공에서 좋은 가공특성을 가지고 있으나 곡면의 곡률이 큰 3차원 자유곡면 가공의 경우에는 볼엔드밀이 필수적으로 사용되고 있다. 일반적으로 가공 시 발생하는 절삭력은 공구의 변형을 야기하여 결국 가공형상오차가 발생하게 된다. 이러한 이유로 과도한 절삭력의 발생을 피하고 가공품질을 높이기 위하여 보다 소극적으로 가공조건을 설정하는 경우가 많고, 이는 생산성 저하와 생산단가 증가의 주원인이 된다. 볼엔드밀 가공에서 절삭력을 정확히 예측할 수 있다면, 과도한 절삭을 피하고 보다 효율적인 절삭조건을 산출할 수 있다. 또한, 예측된 절삭력은 공구 변형과 가공형상오차 계산, 공구파손, 그리고 가공공정계획 등의 기초 데이터로 이용될 수 있다.

볼엔드밀은 공구 끝단의 볼부분에서의 기하로 인하여 복잡한 절삭기구를 가지므로 최근 들어서야 절삭력 예측에 대한 연구가 시작되었다. 발표된 절삭력 모델은 해석적 방법(analytical model)과 실험적 방법(empirical model)로 나눌 수 있다. 해석적 방법⁽¹⁻⁴⁾은 '모든 3차원 절삭은 2차원선삭(oblique cutting)들의 집합으로 표현할 수 있다'는 가정하에서 선삭이론을 볼엔드밀절삭에 적용하는 방법이다. 한편, Feng 등^(5,6)과 김규만 등⁽⁷⁾은 DeVor^(8,9)의 평엔드밀 절삭이론을 바탕으로 볼엔드밀 절삭력을 예측하기 위한 실험적 모델을 제시하였다. 그러나 기존의 연구들은 공구회전각도에 따른 순간절삭력을 예측하는 데에 초점을 두어 계산 알고리즘이 복잡하고 절삭력의 계산시간이 오래 걸리는 단점을 지니고 있다. 금형 생산 현장에서 가공물은 복잡한 형상을 지닌 경우가 많고, 제품 가공에 필요한 CL(cutter location) data의 개수는 제품 크기에 따라 수만 개에 이른다. 따라서, 주로 CAD/CAM 시스템에 적용되고 있는 절삭력에 관련된

모델은 비교적 계산이 간단한 공작물 제거 부피 등의 공작물 기하 해석을 바탕으로 단순한 형태로 근사하여 사용되고 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 이러한 공작물의 기하 해석(geometrical analysis)만을 기초로 한 방법은 절삭기구에 대한 해석이 고려되고 있지 않으므로 실제 절삭력과 차이를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 절삭기구해석을 기초로 하여 보다 효율적으로 절삭력을 계산하는 방법을 제시하였다. 공구의 선단 부분에서 변하는 절삭기구를 표현하기 위하여 실험적 절삭계수를 사용하였다. 단위 미소 절삭날에서의 절삭력을 계산하고 이를 저장하였다(force map). 공구와 가공물의 Z-map으로부터 구하여진 절삭영역에서 미리 저장되어있는 절삭력 값을 읽어 들이고 이들을 합산하여 평균절삭력을 구하였다. 그리고 슬롯가공(slotting)을 비롯하여 다양한 경사각에서 경사면 가공을 수행하여 모델을 검증하였다.

2. 절삭력 모델

Figure 1은 절삭력 모델의 개념도이다. 평균절삭력의 계산은 가공 기하 해석부(geometric simulation)와 절삭력 해석부(physical simulation)의 두 가지 부분으로 나누어 이루어진다. 기하해석부에서는 공작물과 공구의 기하와 공구위치 데이터(CL data)로부터 가공 기하를 해석하여 절삭영역과 공구이송각 등의 데이터를 얻게 된다. 절삭력 해석부에서는 주어진 공구와 공작물이 가지는 절삭 계수 정보로부터 공구의 미소절삭날의 위치에 따른 절삭력 정보를 지닌 force map을 작성하고 이를 데이터

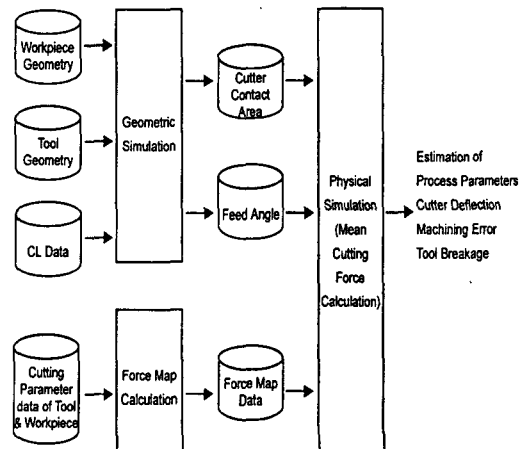


Fig. 1 Schematic diagram of cutting force model

로 저장, 보관하게 된다. 본 연구의 절삭력 해석부에서는 해석 정밀도를 높이기 위하여 기존의 순간절삭력 모델을 확장하여 평균절삭력을 구하였다. 가공 기하 해석부와 절삭력 해석부로부터 얻어진 데이터들을 이용하여 가공 중 공구 위치에 따른 평균절삭력을 구할 수 있으며, 구하여진 절삭력은 절삭조건 선정 작업, 과도 절삭회피 등의 여러 가지 가공해석의 기초데이터로 사용될 수 있다.

2.1 순간절삭력 모델(Instantaneous cutting force model)

김규만 등⁽⁷⁾은 볼랜드밀의 볼부분에서 절삭기구변화 해석을 바탕으로 순간절삭력 모델을 제안하였다. Figure 2는 모델에 사용된 좌표계이다. DeVor⁽⁸⁾는 미소절삭날에 가해지는 절삭력은 제거되는 칩단면적에 비례하며, 실험적 절삭상수 K를 이용할 수 있다고 가정하였다. 또한, Feng⁽⁹⁾의 관찰에 의하면 볼랜드밀은 미소절삭날의 위치에 따라 절삭기구가 연속적으로 변하며, 이 현상은 실험적 절삭상수 K를 미소절삭날 위치각 φ 의 함수로 가정함으로써 고려될 수 있다. 따라서 미소절삭날에 작용하는 순간절삭력 dF 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$dF_T = K_T(\varphi)[f \sin \theta]^{m_T} R \cos \varphi d\varphi \quad (1)$$

$$dF_R = K_R(\varphi)[f \sin \theta]^{m_R} R \cos \varphi d\varphi$$

상방향, 하방향 가공과 같이 공구가 이송각 ξ 을 가지는 경우에서 미변형칩 기하는 이송각이 없는 경우와 다르게 변화한다. 미소절삭날의 수정된 회전각과 위치각은 다음과 같다.

$$\theta' = \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta \cos \varphi}{\cos \varphi'} \right) \quad (2)$$

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

절삭에 참여하는 미소절삭날을 결정하고, Eq(1)과 Eq(2)를 이용하여 구하여진 미소 절삭날에 작용하는 절삭력을 XY성분으로 변환한 후 이들을 합하여 공구회전각 Θ 에서 공구에 작용하는 순간절삭력을 구한다.

$$F_x(\Theta) = \int \delta \{ -K_T(\varphi)[f \sin \theta']^{m_T} \sin \theta - K_R(\varphi)[f \sin \theta']^{m_R} \cos \theta \} R \cos \varphi' d\varphi'$$

$$F_y(\Theta) = \int \delta \{ K_T(\varphi)[f \sin \theta']^{m_T} \cos \theta - K_R(\varphi)[f \sin \theta']^{m_R} \sin \theta \} R \cos \varphi' d\varphi' \quad (3)$$

$$\delta = \begin{cases} 1 & (\text{engaged}) \\ 0 & (\text{not engaged}) \end{cases}$$

한편, 평균절삭력은 공구 한 회전 시 순간절삭력을 평균하여 구하므로, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{F}_x = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta} \int_{\varphi} \delta \{ -K_T(\varphi)[f \sin \theta']^{m_T} \sin \theta - K_R(\varphi)[f \sin \theta']^{m_R} \cos \theta \} R \cos \varphi' d\varphi' d\theta \quad (4)$$

$$\bar{F}_y = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta} \int_{\varphi} \delta \{ K_T(\varphi)[f \sin \theta']^{m_T} \cos \theta - K_R(\varphi)[f \sin \theta']^{m_R} \sin \theta \} R \cos \varphi' d\varphi' d\theta$$

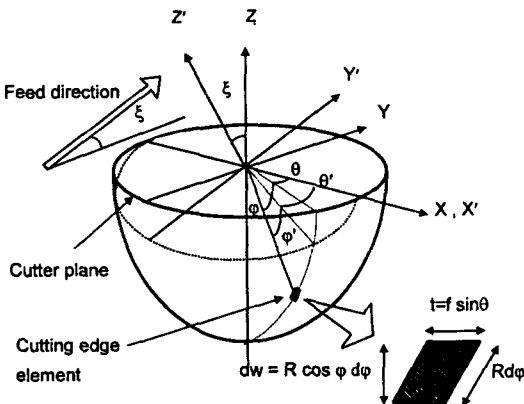


Fig. 2 Coordinate systems of instantaneous force model

2.2. Force map을 이용한 평균절삭력 계산

자유곡면 가공에서는 절삭영역 기하가 연속적으로 변화하게 된다. 본 연구에서는 공작물과 공구의 Z-map 으로부터 절삭영역을 구하였다. 또한 공구 축에 수직방향으로 공구평면 (cutter plane)을 정의하고, 이 평면에서 Force map과 공구절삭영역을 표현하였다. 진출한 바와 같이 순간절삭력은 절삭날을 따라서 절삭영역에 있는 미소절삭날의 절삭력을 적분하여 구하여 지고, 구하여진 순간절삭력들을 공구회전각에 따라서 적분하면 평균절삭력을 구할 수 있다. 따라서, 평균절삭력은 미소절삭날의 위치에 따라 변화하는 미소절삭력을 공구의 표면에서 이중 적분함으로써 구할 수 있다. 본 연구에서 절삭영역은 공

구평면에서 표현되므로, 공구평면의 절삭영역 데이터로부터 직접 평균절삭력을 구하는 것이 바람직하다. 그러기 위해서 우선 공구표면 좌표계와 공구평면 좌표계간의 관계를 구하여야 한다. 공구표면 좌표계에서 미소절삭날 길이 $Rd\phi'$ 는 공구평면에서 다음과 같이 변환된다.

$$Rd\phi' = \frac{dr}{\sin\phi} \quad (5)$$

또한 공구평면에서의 미소면적은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$dA = r dr d\theta = dxdy \quad (6)$$

공구평면에서의 좌표 x, y 와 공구표면 위치 좌표 θ, ϕ 간의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta &= \cos^{-1}\left(\frac{x}{r}\right) \\ \phi &= \cos^{-1}\left(\frac{r}{R}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

Eq. (5) 와 Eq. (6) 으로부터, Eq. (4) 의 평균절삭력은 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= \frac{1}{2\pi} \iint_{x,y} \delta \{-K_T(\phi)[f \sin\theta']^{m_T} \sin\theta \\ &\quad - K_R(\phi)[f \sin\theta']^{m_R} \cos\theta\} \frac{\cos\phi'}{r \sin\phi} dxdy \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \bar{F}_y &= \frac{1}{2\pi} \iint_{x,y} \delta \{K_T(\phi)[f \sin\theta']^{m_T} \cos\theta \\ &\quad - K_R(\phi)[f \sin\theta']^{m_R} \sin\theta\} \frac{\cos\phi'}{r \sin\phi} dxdy \end{aligned}$$

절삭상수 K 는 한 절삭날에서의 절삭기구를 표현하므로 Eq. (8) 은 한 절삭날로 인해 발생하는 평균절삭력을 의미한다. 따라서, n 개의 날을 가지는 공구의 경우에는 Eq. (8) 에 n 배를 해주어야 한다. 공구평면에서 그리드는 매우 작게 설정되어 있으므로 한 그리드내에서의 K 는 일정하다고 가정한다. 따라서 만약 (x, y) 위치에 있는 그

리드에서의 미소평균절삭력을 나타내는 절삭력밀도를 다음과 같이 가정한다면,

$$\begin{aligned} \hat{F}_x &= \frac{1}{2\pi} \{-K_T(\phi)[f \sin\theta']^{m_T} \sin\theta \\ &\quad - K_R(\phi)[f \sin\theta']^{m_R} \cos\theta\} \frac{\cos\phi'}{r \sin\phi} n \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{F}_y &= \frac{1}{2\pi} \{K_T(\phi)[f \sin\theta']^{m_T} \cos\theta \\ &\quad - K_R(\phi)[f \sin\theta']^{m_R} \sin\theta\} \frac{\cos\phi'}{r \sin\phi} n \end{aligned}$$

평균절삭력은 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{F}_x &= \sum_x \sum_y \delta \hat{F}_x dxdy \\ \bar{F}_y &= \sum_x \sum_y \delta \hat{F}_y dxdy \end{aligned} \quad \delta = \begin{cases} 1 & (\text{engaged}) \\ 0 & (\text{not engaged}) \end{cases} \quad (10)$$

Figure 3 은 상방향절삭과 하방향 절삭에서 계산된 절삭력 밀도의 force map 예를 보이고 있다.

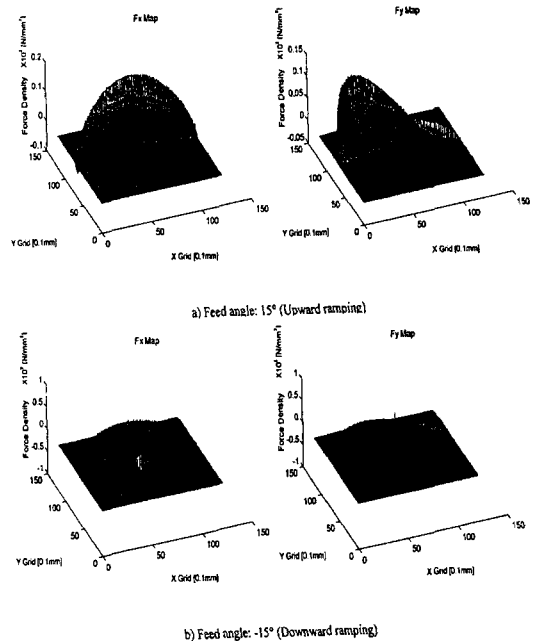


Fig. 3 Examples of force map in ramping (Feed: 0.05mm/th)

3. 실험 및 모델검증

3.1 실험개요

모델검증을 위해 슬롯팅, 경사면 가공 등의 절삭실험을 수행하여 예측된 절삭력과 비교하였다. 모든 가공은 대우 중공업 ACE-V30 vertical machining center에서 수행하였고, 2날, 헬릭스각(helix angle) 30°, 직경 12mm, 초경 볼엔드밀 공구를 사용하였다. 가공물로는 자동차 시작금형에 주로 사용되는 아연합금(ZAS, HB 110)을 사용하였고 주축속도는 600 rpm으로 고정하였다. 절삭력은 Kistler의 공구동력계 9257B를 사용하여 측정하였다.

3.2 실험결과

일련의 슬로팅 가공 실험으로부터 모델에 사용된 아연합금의 실험적 절삭계수 K 와 m 을 구하였다. K 는 절삭날의 위치각 φ 의 3차식으로 가정하였고 m 은 상수로 가정하였다. 구하여진 절삭계수들은 다음과 같다⁽⁷⁾.

$$m_T = 0.7053$$

$$m_R = 0.4788$$

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

$$K_R(\varphi) = 104.1 + 139.1\varphi - 213.1\varphi^2 + 69.3\varphi^3$$

3.2.1 Plain cutting

경사각이 없는 2차원 평면가공에서의 모델검증을 위하여 절삭실험을 수행하였다. Figure 4에 슬롯팅 절삭에서 축방향 절삭깊이에 따른 예측된 평균절삭력과 측정된 실

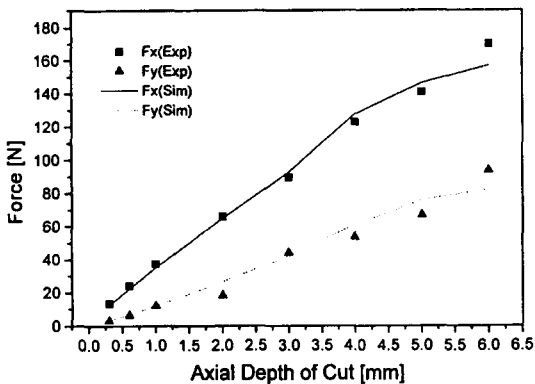


Fig. 4 Mean cutting force in slot cutting (Feed:0.045mm/th, Tool radius:12mm)

험치를 비교하였다. 축방향 절삭깊이는 0.3 mm 에서 6.0 mm 까지 변화시켰으며, 날당 이송량은 0.045 mm/tooth 로 설정하였다. Figure 5 는 반경방향 절삭 깊이에 따른 평균절삭력의 예측값과 실험결과를 비교한 것이다. 축방향 절삭깊이는 6.0 mm 이고 이송량은 0.057 mm/tooth로 설정하였다. 두 경우에서 모두 절삭력의 정확한 예측이 가능하였다.

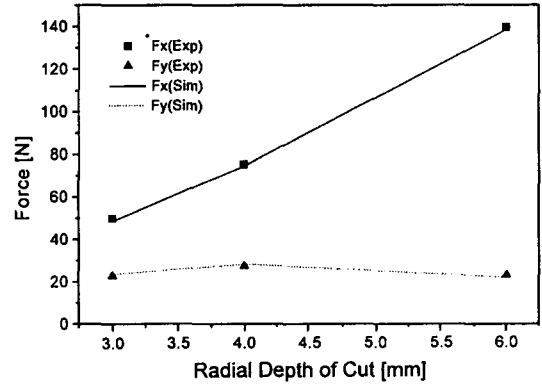


Fig. 5 Mean cutting force variation due to radial depth of cut in plain cutting

3.2.2 실린더면 가공(Cylinder machining)

3차원 자유곡면의 가공에서 절삭력을 정확하게 예측하기 위해서는 다양한 경사면에서 절삭력의 예측이 가능하여야 한다. 가공면의 경사각과 공구의 이송각이 연속적으로 변하는 실린더면을 가공하는 경우에서 절삭영역을 구하고 예측된 절삭력과 실험결과를 비교하였다. Figure 6 은 실험에 사용된 가공물 형상과 가공방법을 보이고 있다. 실린더 축을 따라서 가공하는 contouring과 실린더 원주방향으로 가공하는 ramping으로 나누어 가공하였다. 공구경로간격은 1.5 mm 이고, 가공면 법선방향 절삭깊이는 1.5 mm, 이송량은 0.085 mm/tooth로 설정하였다. Figure 7 은 contouring 가공에서 예측된 절삭력과 실험값을 비교한 결과이다. 가공면 경사각은 실린더 최고점에서 0° 이고 상향밀링(up-milling)으로 가공하는 경우의 경사각을 음으로, 하향밀링(down-milling)인 경우를 양으로 표현하였다. 실험결과 절삭력을 정확하게 예측하였음을 알 수 있다. 형상정밀도에 영향을 주는 가공면 수직방향 절삭력 F_x 는 가공면 경사각 -20° 를 전후하여 방향을 바꾸고 있으며 하향밀링의 경우가 상향밀링의 경우보다 평균절삭력이 큼을 보이고 있다.

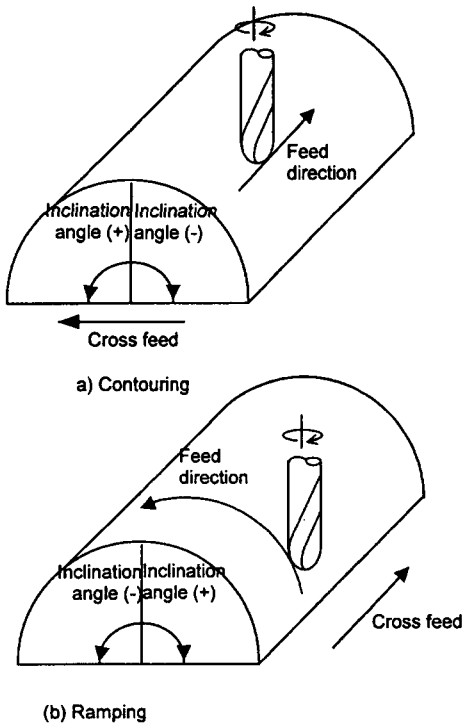


Fig. 6 Workpiece geometry and machining scheme of cylinder machining

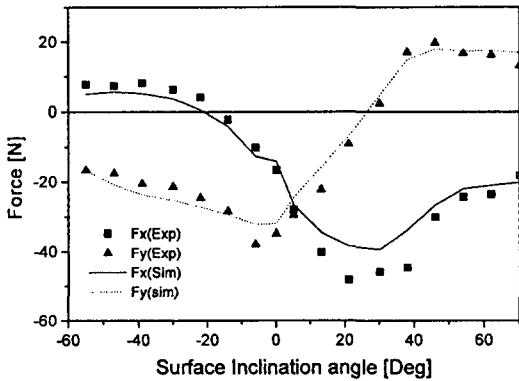


Fig. 7 Mean cutting force variation due to surface inclination angle (Contouring, Path interval: 1.5mm, Surface normal d.o.c: 1.5mm, Feed: 0.083mm/tooth)

Figure 8 은 ramping 가공에서의 예측된 절삭력과 실험값의 비교를 보이고 있다. 하향밀링(down-milling)으로 가공하였으며, 가공면 경사각은 상방향가공(upward

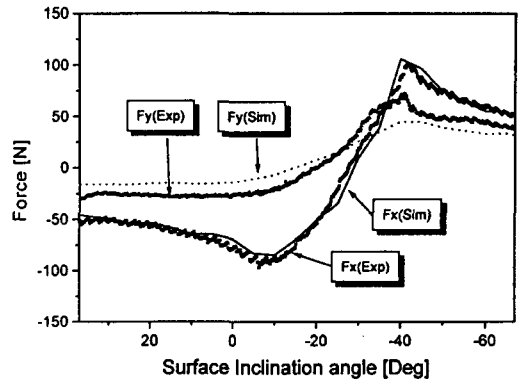


Fig. 8 Mean cutting force variation due to surface inclination angle (Ramping, Path interval: 1.5mm, Surface normal d.o.c:1.5mm, Feed:0.083mm/tooth)

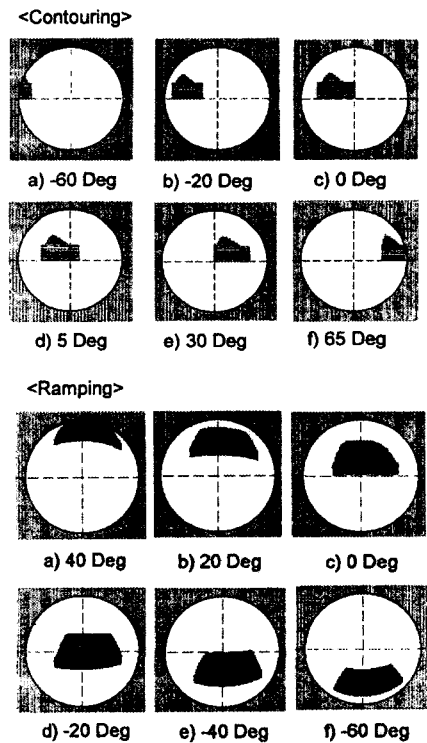


Fig. 9 Cutter contact area variation due to surface inclination angle (Path interval: 1.5mm, Surface normal d.o.c: 1.5mm, Feed: 0.083mm/tooth)

ramping)을 양으로, 하방향가공(downward ramping)을 음으로 표현하였다. 가공형상오차에 영향을 주는 Fy 는 -20° 부근에서 over-cut에서 under-cut 으로 방향을

바꾸고 있으며 하방향가공의 경우가 상방향가공보다 큰 절삭력을 보이고 있다.

Figure 9 는 실린더 가공에서 Z-map 데이터로부터 구하여진 절삭영역을 보이고 있다. 경사각 절대치가 커질수록 절삭영역은 공구 바깥 방향으로 이동하며, 절삭깊이와 공구경로의 방향에도 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한, 하방향가공의 경우, 경사각이 -40° 에서 -60° 로 기울기가 커지면서 절삭영역이 공구바닥면을 벗어나 Fig.8에서 절삭력이 감소하고 있음을 관찰할 수 있다.

3.2.3 복합형상 경사면 가공 (Complex geometry machining)

전가공에 의한 커스프와 구멍 등으로 인하여 공작물 기하에 급격한 변화가 발생하는 경우에는 절삭영역이 계속 변화하게 되어 절삭력 변화를 가져오게 된다. 커스프의 절삭력 변화에 대한 영향은 일반적으로 무시되어 왔으나, 황삭과 같이 경로간격이 큰 경우 가공면에 남아 있는 커스프는 상당히 크기 때문에 그 영향을 무시할 수 없게 된다. 복잡한 가공기하에서 절삭력 예측 특성을 알아보기 위하여 경사각 45° 경사면에 상방향 절삭으로 공구경로간격 8.8 mm 인 상방향 절삭으로 전가공하고 직경 12 mm 구멍을 내어 복합형상을 만든 후 이를 하향밀링으로 contouring 가공하여 예측된 절삭력과 비교하였다. Figure 10 은 실험에 사용된, 전가공 후의 가공물의 기하이다. Figure 11에 예측된 절삭력과 실험값을 비교하였다. 그림 중간의 오목한 부분은 공구가 구멍을 지나갈 때 절삭력이 감소하는 부분이다. 절삭력 형태가 차이를 보이는 이유는 실험과 모델에서 사용된 구멍의 위치가 약간 다르

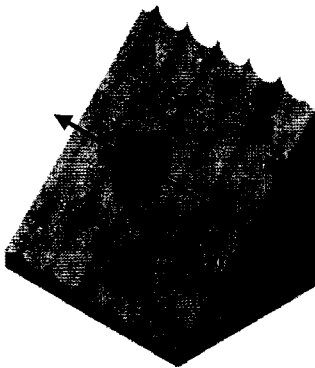


Fig. 10 Pre-machined workpiece geometry in complex geometry machining

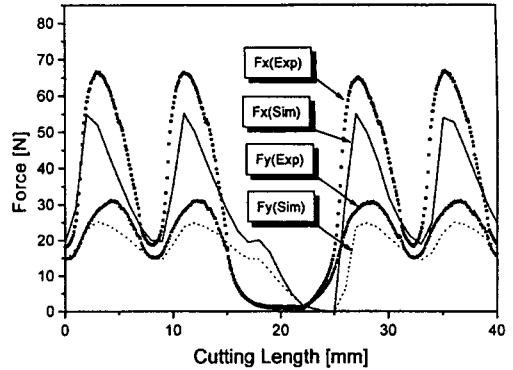


Fig. 11 Mean force variation resulting from pre-machined cusps and a hole (Path interval:6mm, Surface normal d.o.c: 0.707mm, Feed 0.05mm/tooth)

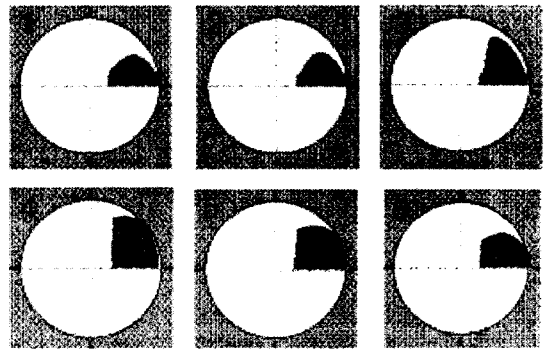


Fig. 12 Cutter contact area variation across a cusp

기 때문이다. 그 이외의 부분에서 절삭력이 변화하는 것은 커스프의 영향에 기인하고 있음을 보이고 있다. Figure 12 는 공구가 커스프 부위를 지나갈 때 절삭영역의 변화를 보이고 있으며, 경로간격이 큰 가공 이후에 발생한 커스프는 절삭 영역 및 절삭력 변화에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 실험 결과 제안된 모델은 절삭영역이 연속적으로 변하는 경우에서도 정확한 절삭력 예측이 가능함을 알 수 있었다.

3.2.4 모델의 계산 효율성

금형 생산 현장에서 제품가공에 필요한 CL(cutter location) data의 개수는 제품크기에 따라 수 만 개에 이른다. 따라서 가공 시 발생하는 절삭력의 계산 시간을 줄이기 위해서 절삭력 모델은 간단하고 효율적인 계산 알고

리즘을 지니는 것이 유리하다. 본 연구에서는 맵 방법을 사용하여 절삭력 계산시간을 단축할 수 있었다.

계산의 효율성을 평가하기 위하여 10000개의 공구위치 데이터(CL data)에서 절삭력을 계산할 때 순간절삭력 모델과 본 연구에서 사용된 평균절삭력 모델의 절삭력 계산시간을 비교하였다. 절삭력 계산은 Pentium 133MHz PC에서 수행되었다.

공구평면의 그리드 요소(grid element)의 크기는 0.1mm×0.1mm 이고, 직경 12mm 공구, 절삭깊이 0.5 mm, 날 당 이송량 0.05mm의 절삭조건을 사용하였다. 순간절삭력 모델의 경우, 절삭날 방향으로 90개의 미소절삭날로 나누어 공구회전각 1도마다 순간절삭력을 계산하였다. 계산 결과, 순간절삭력 모델에서의 절삭력 계산시간은 4시간 1분 24초가 소요되었다. 그 반면, 본 모델에서는 5분 12초 만에 계산을 완료함으로써 46배나 빠르게 절삭력 계산이 가능하였다. 이 이유는, 순간절삭력 모델에서는 모든 공구위치 데이터에서 절삭력을 계산하는 반면, 본 모델에서는 절삭력 밀도를 미리 계산하고 저장한 후에, 공구위치 데이터가 주어지면 저장되어 있는 절삭력 값들을 불러들여 합산하는 방법을 사용함으로써 계산시간을 현격하게 줄일 수 있는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 볼엔드밀 가공에서 평균절삭력을 예측하는 방법을 제안하고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 맵 방식을 이용하여 보다 빠르고 효율적인 절삭력 계산이 가능한 평균절삭력 계산 방법을 제안하였다. 우선, 공구평면 상의 그리드에서의 미소평균절삭력을 나타내는 절삭력밀도를 계산 및 저장하고, 저장된 절삭력 밀도값 들을 force map으로 정의하였다. 평균절삭력은 절삭영역에 포함되는 force map에 저장된 절삭력밀도 값들을 합하여 간단하게 구할 수 있다.

(2) 가공 중 연속적으로 변하는 절삭영역은 공구와 가공물의 Z-map 데이터로부터 구함으로써, 커슴과 구멍 등 복잡한 가공 기하로 인하여 절삭영역이 연속적으로 변하는 경우에서도 절삭영역의 표현과 절삭력 예측이 가능하였다.

(3) 모델검증 실험 결과, 다양한 경사면과 곡면에서 정확한 절삭력 예측이 가능하였다. 또한, 맵 방식을 사용함으로써 절삭력 계산 시간을 기존의 순간절삭력 모델보다 40배 이상 빠르게 단축할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. Y. Yang and H. D. Park, "The Prediction of Cutting Force in Ball-End Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 31, pp. 45-54, 1991.
2. C. Sim and M. Y. Yang, "The prediction of the cutting force in ball-end milling with a flexible cutter," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 33, pp. 267-284, 1993.
3. C. C. Tai and K. H. Fhu, "A predictive force model in ball-end milling including eccentricity effects," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, pp. 959-979, 1994.
4. C. C. Tai and K. H. Fhu, "Model for Cutting Forces Prediction in Ball-End Milling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, pp. 511-534, 1995.
5. H. Y. Feng and 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, pp. 697-710, 1994.
6. H. Y. Feng and 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, pp.711-719, 1994.
7. 김규만, 조필주, 김병희, 주종남, "Z map을 이용한 임의의 절삭영역에서 볼엔드밀의 절삭력예측," *한국정밀공학회지*, 제14 권, 제 3 호, pp. 57-65, 1997.
8. W. A. Kline and R. E. DeVor, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Cornering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, pp. 7-22, 1982.
9. W. A. Kline and R. E. DeVor, "The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 23, pp. 123-140, 1983.
10. P. Bertok, et al., "A System for Monitoring the Machining Operation by Referring to a Predicted Cutting Torque Pattern," *Annals of CIRP*, Vol. 32/1, pp. 439-444, 1983.