

수치해석법에 의한 면삭밀링 작업에서의 절삭력과 표면조도에 관한 연구

홍 민 성

아주대학교 기계 및 산업공학부

A Numerical Simulation Model for the Face Milling Operation

Hong, Min-Sung

ABSTRACT

The milling process is one of the most important metal removal processes in industry. Due to the complexities inherent to the cutter insert geometry and the milling cutter kinematics, these processes leave an analytically difficult to predict texture on the machined surface's hills and valleys. The instantaneous uncut chip cross sectional area may be estimated by the relative position between the workpiece and the cutter inserts. Furthermore, since the cutting forces are proportional to the instantaneous uncut chip cross sectional area, the cutting forces in face milling operations can not be estimated easily. A new simulation program which is based upon the numerical method has been proposed to estimate the cutting force components, with the ability to predict the machined surface texture left by the face milling operation.

Key words : face milling, cutting force, surface topography

I. 서론

밀링가공은 기계요소의 제조공정에서 가장 많이 쓰이는 방법중의 하나이다. 밀링에 있어서, 가공성의 향상과 가공 표면의 완성도의 증가, 가공시간을 감소, 그리고, 공구수명의 연장을 위해서는 순간절삭력과 가공 후 가공표면의 특성을 알아야 한다.

그러기 위해서는 가능한 모든 절삭작용의 영향을 분석한 올바른 밀링가공의 시뮬레이션이 절실히 요구된다. 이러한 시뮬레이션 모델은 가공시 예상되는 절삭력 요소 뿐만 아니라, 가공표면의 예측 또한 수반되어야 한다. 이를 위한 모델링 연구에서 가장 중요한 문제는 절삭가공의 기하학적인 면과 운동학적 면이 동시에 재고되어야 하므로, 매우 복잡하고, 또한 주축의 편심, 절삭 날의 반경방향 또는 축방향으로의 오차, 그리고 절삭 날의 여러 날 각도에 의한 영향 등을 고려해야 한다.

따라서, 본 논문에서는 새로운 표면가공법을 이용하여, 효과적이고 정확한 모델로써 이러한 절삭가공의 복잡한 문제들을 분석하여 보다 나은 방법을 제시하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1 이론 배경

Trochoid형의 밀링공구의 궤적이 Martellotti⁽¹⁾에 의해 처음 소개된 이후, 많은 학자들이 밀링가공에서의 절삭력에 대해 제각기 결론지었다. 특히 Sabberwal과 Koenigsberger⁽²⁾는 접선 방향의 절삭력을 공구의 이송 속도, 공구 날의 회전각, 그리고 평균 칩두께의 함수로 표시하였다.

또한, Tlusty와 Macneil⁽³⁾은 반경 방향의 절삭력이 접선 방향의 절삭력에 비례한다는 것을 증명하였다. 수치 해석적 방법을 이용하여, Kline⁽⁴⁾등은 절삭 날을 불연속의 얇은 디스크로 나누어 절삭 칩이 받는 하중을 칩두께와 절삭 날 디스크의 함수로 나타내었다.

최근에는 불연속 격자형태의 표면가공 모델이 연구되었는데^(5,6) 공작물을 그물 형태로 나누어 그 위를 불연속화된(discretized) 절삭 날이 지날 때, 그 순간의 가공 표면 조도와 절삭 칩의 두께를 평가하였다. Fig.1은 절삭 날과 공작물 격자사이의 관계를 시간에 따라 보여주고 있다.

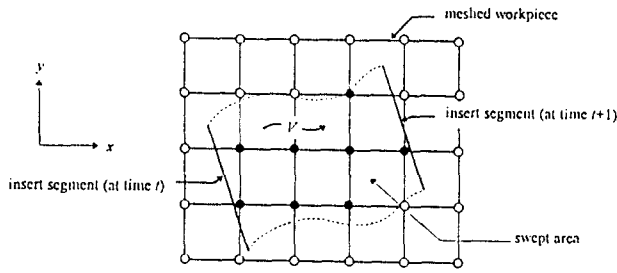


Fig.1 Swept area generated by an insert segment from time t to t+1

2.2 공작물의 기하학적 모델

일반적으로 쓰이는 공작물은 형태가 복잡하기 때문에 연속함수의 식으로는 표현이 어렵다. 따라서 이 연구에서는 불연속적인 격자 행렬의 형태로 공작물을 표현한다. 그러나 이 방법은 표면이 점들로 표현되기 때문에 점들에 의한 면적만 알 수 있다. 그러므로 공작물 표면을 완벽히 표현하기 위해서 bicubic surface generation 알고리즘을 이용하였다.⁽⁷⁾

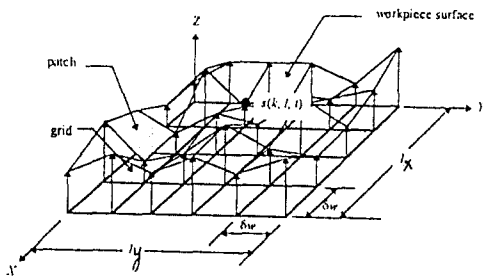


Fig. 2 Grid matrix model of the global workpiece

Fig. 2에서 l_x 와 l_y 는 x 와 y 방향의 공작물의 길이를 나타낸다. $s(k, l, t)$ 벡터는 시간 t 에서 표면상의 특정 점을 나타낸다. 그리고 공작물 표면의 작은 면적들은 patch로 정의된다. 각 격자점인 $s(k, l, t)$ 벡터를 조합하여 공작물을 나타내는 하나의 행렬(WP)을 만들어 낼 수 있다.

$$WP = \begin{bmatrix} s(1,1,t) & s(1,2,t) & \dots & s(1, \frac{l_y}{\delta w} + 1, t) \\ s(2,1,t) & s(2,2,t) & \dots & s(2, \frac{l_y}{\delta w} + 1, t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s(\frac{l_x}{\delta w} + 1, 1, t) & s(\frac{l_x}{\delta w} + 1, 2, t) & \dots & s(\frac{l_x}{\delta w} + 1, \frac{l_y}{\delta w} + 1, t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s(k, l, t) = ((k-1) \cdot \delta w, (l-1) \cdot \delta w, Z_{wp}(k, l, t)) \quad (2)$$

2.3 절삭 날의 기하학적 모델

공작물과 절삭날끝(insert's cutting edge)간의 상대적인 위치와 움직임은 매우 중요하기 때문에 이 절에서는 밀링날의 전체 모양 대신에 절삭날끝의 모양에 중점을 둔다. 각각의 절삭날끝의 표현을 명백히 하기 위하여 면삭밀링 날을 절삭 날의 그룹으로 처리하고 각각의 절삭날끝을 node의 그룹으로 나누었다. 그리고, insert의 날끝의 각 점들은 시간 t 일 때 i번째 insert상에 있는 점 j를 나타내고 있는 $p(i, j, t)$ 에 의하여 정의된다. m개의 조각(segment)으로 나뉘어져 있는 각각의 insert가 밀링공구에 n개가 있으므로 밀링공구(MC)는 공작물과 같이 $n \times (m+1)$ 의 행렬로 나타낼 수 있다.

$$MC = \begin{bmatrix} p(1,1,t) & p(1,2,t) & \dots & p(1,m+1,t) \\ p(2,1,t) & p(2,2,t) & \dots & p(2,m+1,t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p(n,1,t) & p(n,2,t) & \dots & p(n,m+1,t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

밀링공구의 형상은 위에 기술된 행렬에서 각 요소의 좌표로부터 얻어진다. 여기에서는 공구의 요소를 행렬로 지정하는 것 대신에 이들 요소들의 좌표계를 행렬로 정의한다. 이 방법으로써 $a_i - b_i - c_i$ 좌표계에서는 요소들을 고정된 점으로 처리할 수 있고 간단하게 X-Y-Z 좌표계로 변환시킬 수 있다. $a_i - b_i - c_i$ 좌표계와 X-Y-Z 좌표계의 관계는 Fig. 3에서 볼 수 있다.

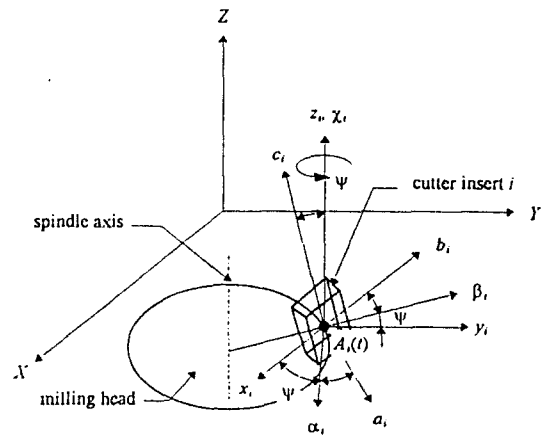


Fig. 3 Coordinate transformation relationships between the X-Y-Z and the $a_i - b_i - c_i$ coordinate system

Fig.3에서 두개의 local좌표계(moving reference frames)가 도입된다($x_i - y_i - z_i$ 와 $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$). i번째 insert에 부착되어있는 밀링헤드끝의 점인 $A_i(t)$ 는 모든 local좌표계의 원점이다. x_i 축은 X축과 평행하고, y_i 축은 Y 축과, 그리고 z_i 축은 Z축과 평행하다.

$\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 좌표계는 $x_i - y_i - z_i$ 좌표계에서 z 축을 중심으로 ϕ 만큼 회전시킨 것으로 정의한다. 그리고 $a_i - b_i - c_i$ 좌표계는 $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 좌표계를 다음과 같이 회전시킨 것으로 한다 (Fig. 4 참조).

1. x 축을 중심으로 γ_R 만큼 회전
2. α_i' 축을 중심으로 γ_L 만큼 회전
3. β_i'' 축을 중심으로 γ_A 만큼 회전

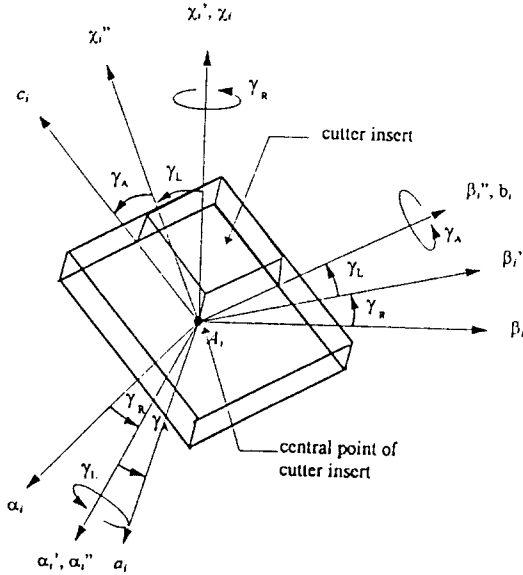


Fig.4 Coordinate transformation relationships between the $a_i - b_i - c_i$ and the $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ coordinate systems

이러한 좌표축으로써 날 끝점들의 좌표는 다음과 같이 정의된다.

$$p(i, j, t) = (X_{ij}(t), Y_{ij}(t), Z_{ij}(t)) = (a_j, b_j, c_j) \quad (4)$$

2.4 밀링가공의 운동학적 모델

일반적으로 밀링가공은 주축의 회전과 공구이송이 주 운동이다. 여기에 회전축의 편심과 또다른 회전운동을 줌으로써, 밀링작업과 연마과정에 있어서 공구의 마모와 시간을 줄이는 효과를 얻을 수 있다.^(5,6) Fig. 5에서, 축의 회전속도와 밀링가공의 이송속도는 기존 밀링가공에 이미 존재하는 움직임과 동일하다. 그러나, 표면가공시 편심된 축에 독립적으로 선회하는 축을 연결하였다. 이 두 가지의 회전과 더불어 조절이 가능한 편심(ϵ_c)을 갖고 있는 밀링공구가 공작물 표면에 수직하고 ω_2 의 속도로 선회하고 있는 축을 중심으로 회전한다. 이러한 움직임은 기존의 밀링 조건에서 표면에 남는 scallop의 상당량을 제거하는 데에 유용하다.

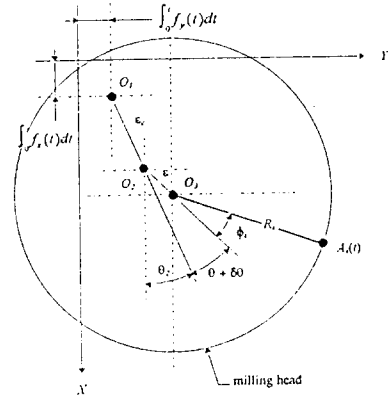


Fig.5 Cutter kinematic model with the spindle eccentricity and the cutter runout effects.

Fig. 5에서, O_1 은 선회하는 축 중심의 편심벡터의 원점을 나타내고, O_2 는 밀링헤드의 회전중심, 그리고, O_3 는 밀링헤드의 기하학적 중심을 나타낸다. 이 그림을 이용하여 절삭 날의 운동방정식을 구할 수 있다. 2.2절에서 소개한 바와 같이 i 번째의 insert는 $a_i - b_i - c_i$ 좌표계로 표현되는 배열로 만들었다. 이 $a_i - b_i - c_i$ 좌표계를 $X - Y - Z$ 좌표계로 변환시키기 위하여 좌표변환의 방법이 쓰여진다. 이 절에서는 $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 좌표계를 $X - Y - Z$ 좌표계로 변환할 것이고 좌표계변환에 관계되는 모든 요인을 묶어 $X - Y - Z$ 좌표계에 해당되는 insert의 순간위치를 풀 수 있을 것이다. $X - Y - Z$ 와 $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 의 관계는 아래의 변환에 의하여 알 수 있다.

1. $x_i - y_i - z_i$ 좌표계는 $X - Y - Z$ 좌표계와 평행하다. $x_i - y_i - z_i$ 좌표계의 순간 원점은 $X - Y - Z$ 좌표계의 $(X_A(t), Y_A(t), Z_A(t))$ 점이 된다.

2. $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 좌표계는 $x_i - y_i - z_i$ 좌표계를 z_i 축을 중심으로 $\psi(t)$ 만큼 회전하는 회전변환에 의해 만들어진다.

3. $a_i - b_i - c_i$ 좌표계는 $\alpha_i - \beta_i - \chi_i$ 좌표계를 x_i 축을 중심으로 γ_R 만큼, α_i' 축을 중심으로 γ_L 만큼, 그리고 β_i'' 축을 중심으로 γ_A 만큼 회전 변환하여 얻어진 것이다.

위의 좌표변환행렬을 $M(t)$ 라고 했을 때 절삭 날의 각 점들의 절대좌표는 다음과 같다.

$$\begin{cases} X(t) = X_A(t) + x_i(t) \\ Y(t) = Y_A(t) + y_i(t) \\ Z(t) = Z_A(t) + z_i(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} X(t) \\ Y(t) \\ Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_A(t) \\ Y_A(t) \\ Z_A(t) \end{bmatrix} + M(t) \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

즉, 식 (5)와 (6)은 밀링공구의 기하학과 운동학적 모델에 대한 $X-Y-Z$ 좌표계에서 insert의 순간 좌표를 나타낸다. 그러므로, 순간 가공전 칩(uncut chip)의 단면적을 계산하기 위해서는 순간 절삭 폭과 절삭깊이를 이 점들의 위치와 공작물 표면좌표의 상대적인 위치를 파악함으로써 정확히 얻을 수 있다.

2.5 순간 절삭 속도의 예측

절삭 면적은 insert의 순간 절삭 속도에 수직하기 때문에 모든 절삭날끝의 각 점들에서의 순간 절삭 속도를 살펴보려한다. 밀링작업에서 공구의 운동은 매우 복잡하기 때문에 절삭 날의 속도벡터를 Fig. 6에서와 같이 두개의 부분으로 나누었다.

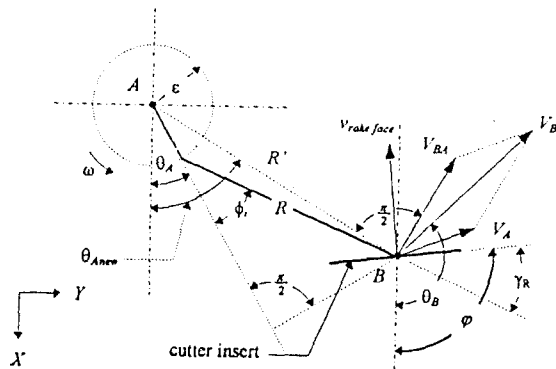


Fig. 6 Velocity vector of point B with respect to point A

위의 그림으로부터 B점의 속도벡터를 구하면

$$\begin{aligned} V_B(t) &= V_A(t) + V_{BA}(t) \\ &= (-\nu_0 \cdot \sin(\omega_2 t) - \omega \cdot R' \cdot \sin \theta_{Anew}(t) + f_x(t)) \hat{i} \\ &\quad + (\nu_0 \cdot \cos(\omega_2 t) + \omega \cdot R' \cdot \cos \theta_{Anew}(t) + f_y(t)) \hat{j} + f_z(t) \hat{k} \\ &= \nu_x(t) \hat{i} + \nu_y(t) \hat{j} + \nu_z(t) \hat{k} \end{aligned} \quad (7)$$

순간 절삭 면적은 순간 절삭 속도에 수직하다고 정의되었기 때문에 절삭속도에 수직한 평면에 측정된 절삭면적을 투영하여야 한다. 그러므로 insert의 rake face에 순간적으로 수직한 벡터, $\nu_{rake\ face}(t)$,는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \nu_{rake\ face}(t) &= \cos(\varphi(t) + \frac{\pi}{2}) \hat{i} + \sin(\varphi(t) + \frac{\pi}{2}) \hat{j} + \sin(\gamma_A) \hat{k} \\ &= \sin(\varphi(t)) \hat{i} - \cos(\varphi(t)) \hat{j} + \sin(\gamma_A) \hat{k} \end{aligned} \quad (8)$$

where

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \theta_A(t) + \phi_i + \gamma_R \\ &= \theta + \theta_2 + \delta\theta + \phi_i + \gamma_R \\ &= (\omega + \omega_2)t + \delta\theta + \phi_i + \gamma_R \end{aligned} \quad (9)$$

식(8)을 이용하여 $X-Y$ 평면 위의 절삭 속도와 insert rake face에 수직한 벡터, $\zeta(t)$,를 얻을 수 있다.

$$\zeta(t) = \varphi(t) + \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{\nu_y(t)}{\nu_x(t)} \right) \quad (10)$$

2.6 절삭력의 예측

절삭 날을 여러 조각으로 나누었기 때문에 각각의 날 조각마다의 국부 절삭력(local cutting area)을 계산해야 한다. uncut chip의 수직단면적은 절삭 날과 공작물간에 접하는 절삭 날의 폭과 같고 절삭깊이는 접하는 절삭 날의 깊이와 같다고 가정한다면 절삭 면적은 Fig. 7과 같이 나타난다.

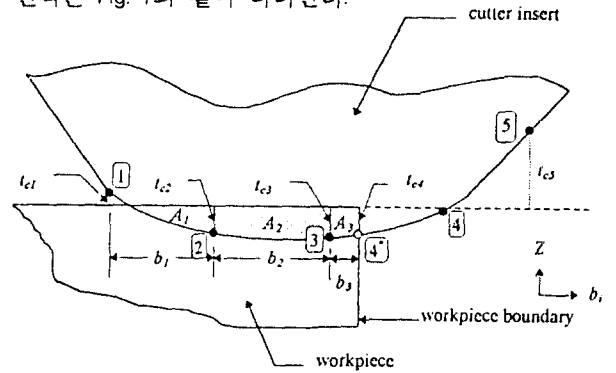


Fig. 7 Side view of the uncut chip cross sectional area

Fig. 7에서 빗금친 부분이 전체 절삭면적이다. 전체 절삭면적은 절삭 날의 조각(segment)에 의하여 몇 개의 국부 절삭 면적 A_i ($i = 1, 2, 3$)(local cutting area)로 나뉘어진다. 또한 Fig. 7에서 b_i ($i = 1, 2, 3$)와 t_{c_i} ($i = 1, 2, 3, 4$)는 각각 순간 절삭 폭과 절삭깊이이다. 절삭 폭은 공작물에 절삭 날이 물려있는 폭을 나타낸다. 가공전 칩의 수직 단면적의 폭(b_{true})은 절삭 날이 실제로 절삭한 폭을 나타낸다. Fig. 8에서 이들의 관계를 자세히 볼 수가 있다.

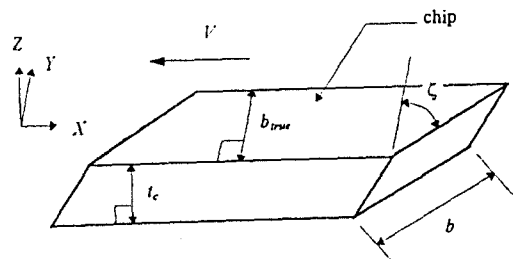


Fig. 8 A chip generated by the face milling process

Fig. 8은 밀링가공에 의하여 생긴 칩의 형상을 보여 준다. b 는 절삭 날과 칩사이의 표면에 접하는 폭이 된다. 가공 전 칩의 폭은 순간 절삭 속도에 수직하는 방향에서 측정된다.

절삭 폭은 절삭깊이 벡터($V_d(t)$) 방향으로 절삭 날의 돌출부와 공작물 표면 사이의 거리로 정의된다. Fig. 9는 공작물에 평행한 방향으로 한 개의 절삭 날로 평면을 가공할 때의 절삭 깊이에 대한 기본 개념을 나타낸다. $y(i, j, t)$, $s(k, l, t)$, $t_c(t)$, $V_d(t)$ 들은 각각 절삭날끝의 위치와 공작물 표면위치, 절삭속도, 절삭 깊이 벡터를 나타낸다.

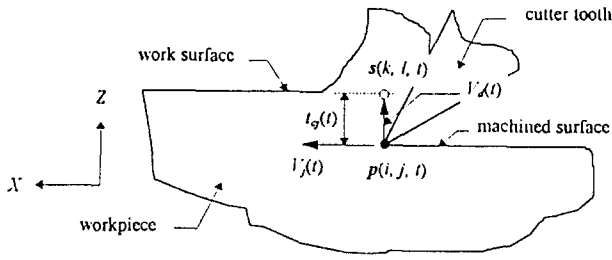


Fig. 9 Cutting depth in an ideal cutting model

Fig. 9로부터 절삭깊이($l_c(t)$)를 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$l_c(t) = (z_{work\ surface} - z_{cutter\ node}) \quad (11)$$

where

$$z_{work\ surface} = z - \text{coordinate of } s(k, l, t),$$

$$z_{cutter\ nose} = z - \text{coordinate of } p(i, j, t).$$

Fig. 9에서 $z_{work\ surface}$ 은 평면이나, 일반적으로 표면은 굴곡이 있고 표면 거칠기가 있기 때문에 완벽하지 않다. 밀링가공에서 i 번째 절삭 날이 가공할 공작물은 $i-1$ 번째 절삭 날이 이미 절삭을 하였기 때문에 원래의 표면은 아니다. 이러한 이유로 하여 공작물 표면은 매우 복잡하게 된다. 더구나, 실제 절삭깊이는 순간절삭속도에 수직인 방향으로 측정되어야 한다. Z방향의 속도가 없는 절삭 날의 운동에서 점 $s(k, l, t)$ 는 점 $p(i, j, t)$ 의 바로 위에 Fig. 9와 같이 위치하게 된다. 그리고 절삭 날이 Z방향의 속도를 가지고 있을 때 점 $s(k, l, t)$ 와 절삭깊이 $l_c(t)$ 는 Fig. 10과 Fig. 11과 같다.

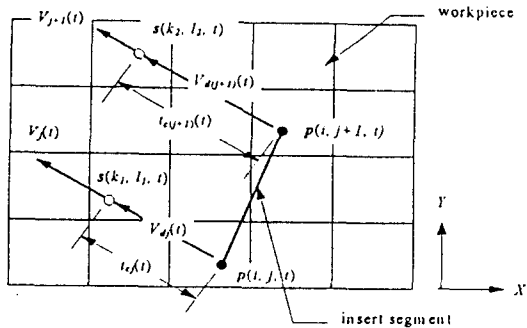


Fig. 10 Instantaneous cutting depth vector shown on the X-Y plane

이 그림들에서 벡터 $V_x(t)$ 와 $V_{j+1}(t)$ 는 insert segment node인 $p(i, j, t)$ 와 $p(i, j+1, t)$ 의 순간 절삭 속도를 나타내고 있다. 벡터 $V_d(t)$ 와 $V_{d(j+1)}(t)$ 는 $p(i, j, t)$ 와 $p(i, j+1, t)$ 의 절삭 깊이 벡터를 나타낸다.

이 절삭깊이벡터 $V_d(t)$ 는 상대절삭속도 $V_x(t)$ 에 수직하다. $s(k_1, l_1, t)$ 와 $s(k_2, l_2, t)$ 는 공작물 표면과 절삭 깊이 벡터의 교점이다. $l_c(t)$ 와 $l_{c(j+1)}(t)$ 는 점 $p(i, j, t)$ 와 $p(i, j+1, t)$ 에서의 절삭 깊이이다. 절삭 깊이 벡터는 절삭 속도와 관계가 있기 때문에 순간 절삭 속도의 값은 이 연구에서 매우 중요하게 된다.

식 (7)에 의해 정의된 것처럼 순간 절삭 속도 $V_B(t)$ 에 수직인 절삭 깊이를 찾기 위해 먼저 절삭 깊이 벡터 ($V_d(t)$)를 찾아야 한다. 이 벡터는 Fig. 12와 같이 $V_B(t)$ 와 Z축에 의하여 정의된 면상에 위치한다.

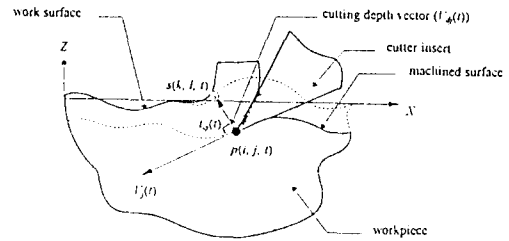


Fig. 11 Instantaneous cutting depth vector shown on the X-Z plane

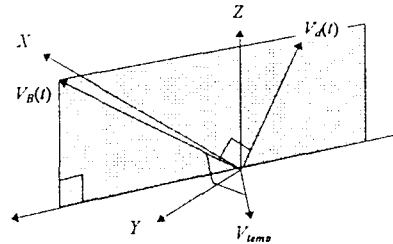


Fig. 12 Location of the cutting depth vector

식 (7)의 v_x 와 v_y 를 이용하면 새로운 벡터 \vec{V}_{temp} 와 절삭 깊이 벡터($\vec{V}_d(t)$)는 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\vec{V}_{temp} = -v_y \vec{i} + v_x \vec{j} + 0 \vec{k} \quad (12)$$

$$\vec{V}_d(t) = \vec{V}_B(t) \times \vec{V}_{temp} \\ = -v_x v_z \vec{i} - v_y v_z \vec{j} + (v_x^2 + v_y^2) \vec{k} \quad (13)$$

절삭 칩의 수직단면적은 절삭깊이($l_c(t)$)와 절삭 폭 (b_{true})으로 간단하게 구할 수 있다. 절삭 날이 공작물보다 낮거나 또는 높은 경우가 있으므로 단면적을 구하는 방법은 아래와 같이 여러 가지 경우가 있을 수 있다. 임의의 절삭 날 segment에서 양끝의 절삭깊이를 l_{c1} , l_{c2} 라 할 때 경우에 따른 수직 단면적 ($Area_{ij}$)은 다음과 같다.

1. $t_{c1} > 0, t_{c2} > 0$ 일 때

$$Area_{i,j} = \frac{(t_{c1}(t) + t_{c2}(t)) \cdot b_{true}}{2}$$

2. $t_{c1} < 0, t_{c2} < 0$ 일 때

$$Area_{i,j} = 0$$

3. $t_{c1} > 0, t_{c2} \leq 0$ 일 때

$$Area_{i,j} = \frac{t_{c1}^2(t) \cdot b_{true}}{2 \cdot (t_{c1}(t) - t_{c2}(t))}$$

4. $t_{c1} \leq 0, t_{c2} > 0$ 일 때

$$Area_{i,j} = \frac{t_{c2}^2(t) \cdot b_{true}}{2 \cdot (t_{c2}(t) - t_{c1}(t))}$$

여기서 $Area_{i,j}$ 는 절삭 날의 요소 면적을 나타낸다. i 번째 절삭 날의 총절삭면적은 각 요소 면적을 합한 것과 같다. 즉,

$$Area_{i,t} = \sum_{j=1}^n Area_{i,j} \quad (14)$$

일반적으로 접선방향 절삭력은 수직 단면적과 특정 절삭 강성의 곱으로 나타난다⁽²⁾. 절삭날끝에 작용하는 반경방향의 절삭력은 접선방향 절삭력과 실험적인 상수(K_R)의 곱으로 얻어진다. 공구의 형상(rake angle와 lead angle)을 무시했을 때 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$F_T(i, t) = K_T \cdot Area_{i,t} \quad (15)$$

$$F_R(i, t) = K_R \cdot F_T(i, t)$$

실험상수 K_R 과 K_T 는 서로 수직인 평균력($x-y$ 평면에서 F_{xm} 과 F_{ym})으로 결정할 수 있기 때문에 축방향의 절삭력(F_A : XY평면에 수직인 성분)은 Oblique절삭에서는 정확히 예측할 수 없다. F_A 를 계산하기 위해 실험상수 K_A (F_A 과 F_T 의 비)를 쓴다.

$$F_A(i, t) = K_A \cdot F_T(i, t) \quad (16)$$

그러므로, 각 $\theta_i(t)$ 만큼 회전한 i 번째 절삭 날의 X, Y, Z 방향의 절삭력은 접선방향, 반경방향, 그리고 축방향의 절삭력의 함수로 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_x(i, t) &= F_T(i, t) \cdot \sin(\theta_i(t)) - F_R(i, t) \cdot \cos(\theta_i(t)) \\ F_y(i, t) &= F_T(i, t) \cdot \cos(\theta_i(t)) + F_R(i, t) \cdot \sin(\theta_i(t)) \\ F_z(i, t) &= F_A(i, t) \end{aligned} \quad (17)$$

따라서 식(15)과 (16)을 식(17)에 대입하면, 시간 t 에서의 X, Y, Z 방향의 순간 절삭력 성분을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x(i, t) \\ F_y(i, t) \\ F_z(i, t) \end{bmatrix} = Area_{i,t} \begin{bmatrix} \sin \theta_i(t) & -\cos \theta_i(t) & 0 \\ \cos \theta_i(t) & \sin \theta_i(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_T \\ K_R \cdot K_T \\ K_A \cdot K_T \end{bmatrix} \quad (18)$$

X, Y, Z 방향의 총순간절삭력은 각 절삭 날에 누적된 절삭력의 합이므로 식(19)으로 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} F_x(i, t) \\ F_y(i, t) \\ F_z(i, t) \end{bmatrix} \quad (19)$$

그러므로, 식(19)을 통하여 절삭전 순간 칩단면적으로부터 순간절삭력을 구할 수 있다.

III. 시뮬레이션 모델

다음과 같은 순서로 컴퓨터 시뮬레이션은 수행된다.

1. 공작물 표면을 격자행렬로 형상모델을 만든다.
2. 절삭 날을 segments로 나눈다.
3. 절삭 날의 순간절삭속도를 계산한다.
4. 절삭 날의 순간위치를 계산한다.
5. 절삭 날 각각이 순간적으로 절삭하는 칩의 수직단면적을 계산한다.
6. 각 절삭날끝의 순간적인 절삭속도에 수직한 순간 절삭깊이를 계산한다.
7. 순간 총절삭면적은 계산한다.
8. 순간절삭력 성분을 예측한다.
9. 면삭밀링가공에 의해 생성된 가공표면의 조도를 예상한다.
10. (3-9) 단계를 가공시간에 따라 되풀이한다.

위의 과정으로부터 순간 절삭력 성분과 가공 면이 동시에 예측된다. Fig. 13은 시뮬레이션 모델의 Flow chart이다.

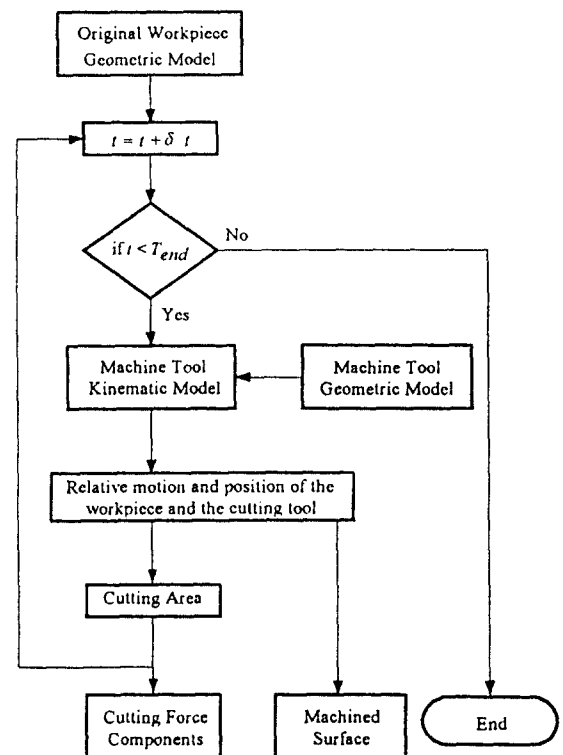


Fig. 13 Flow chart of the simulation model

IV. 시뮬레이션 결과 및 고찰

III장에 제시된 시뮬레이션 모델을 실제 면삭밀링 작업조건과 일치시키기 위해, Valentine face mill (MM-04-6SS75R-J)과 square insert(SPE-434)를 선택하였다. Fig. 14에서 보는 바와 같이, face mill은 6개의 insert로 구성되어 있고 유효직경(D_{eff})은 101.6mm, 최대직경(D_{max})은 108.5mm이다. 또한 square insert는 길이가 12.7mm이고, nose radius는 1.5748mm이다. 밀링헤드에 장착된 insert의 경사각들과 여러 가지 작업 조건 등이 Table 1에 상세히 나타나 있다.

Table 1 Nominal simulation processing setup

Milling cutter type	face mill
Cutter diameter	101.6 mm
Insert type	square insert
Insert size	$l = 12.7\text{mm}$, $r = 1.5748\text{mm}$
Insert angles ($\gamma_R, \gamma_A, \gamma_L$)	$0^\circ, 7^\circ, -15^\circ$
No. of inserts	6
No. of segments per insert	720
Workpiece	1095 Carbon Steel
K_T, K_R, K_A	2500, 0.67, 0.375
Workpiece size	60mm by 60mm
Grid matrix size	2000 by 2000
Milling type	Symmetric milling
Depth of cut	1mm
Cutting speed	1.778m/s
Spindle speed	368rpm
Feed per tooth	0.1778mm
Spindle axis eccentricity	0mm
Sampling time	0.0005s

Table 1에 주어진 기본 면삭밀링 작업 조건 외에 각각의 insert의 반경방향과 축방향의 오차 값들이 Table 2에 나타나 있다.

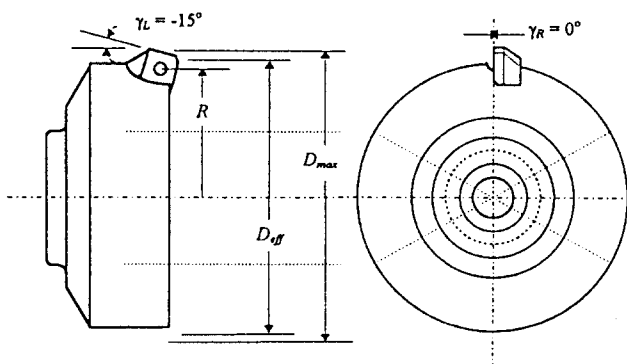


Fig. 14 Valentine face mill (MM-04-6SS75R-J)

Table 2 Insert's radial and axial position runouts

Insert #	Radial runout(mm)	Axial runout(mm)
#1	-0.045	0.002
#2	0.001	-0.030
#3	0.031	-0.080
#4	0.000	0.005
#5	-0.005	0.037
#6	0.064	0.003

위의 주어진 조건에 의한 시뮬레이션 결과를 Fig. 15와 Fig. 16에 각각 보였다. Fig. 15는 insert의 이상적인 면삭밀링 작업에 의해 가공된 표면(case 1)이고, Fig. 16은 Table 2에 주어진 insert의 오차를 생각했을 때의 가공표면(case 2)을 보여준다.

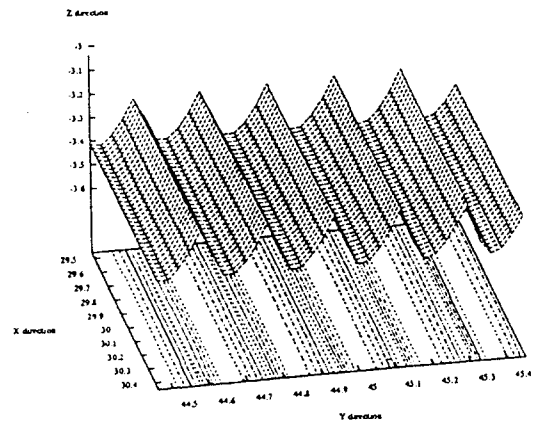


Fig. 15 Machined surface generated by the face milling operation of case 1

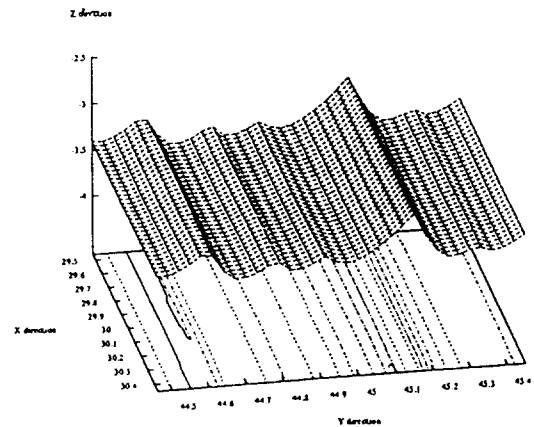


Fig. 16 Machined surface generated by the face milling operation of case 2

또한 각각의 경우에서의 절삭력요소(X , Y , Z 방향)를 Fig. 17 와 Fig. 18에서 비교하였다.

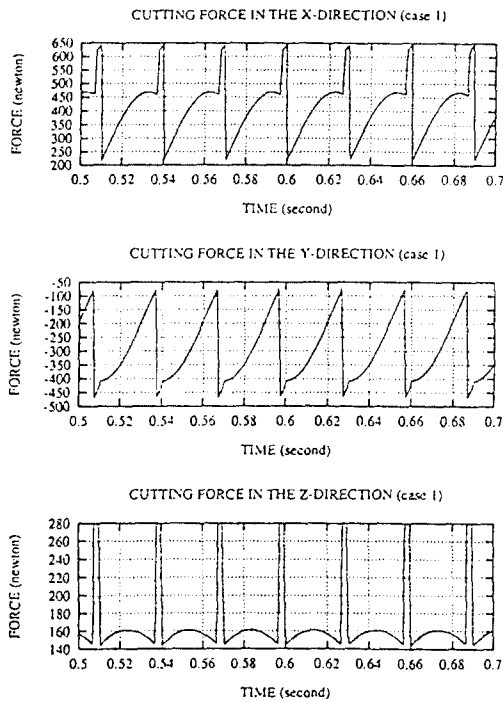


Fig. 17 Cutting force components of case 1 in the time domain

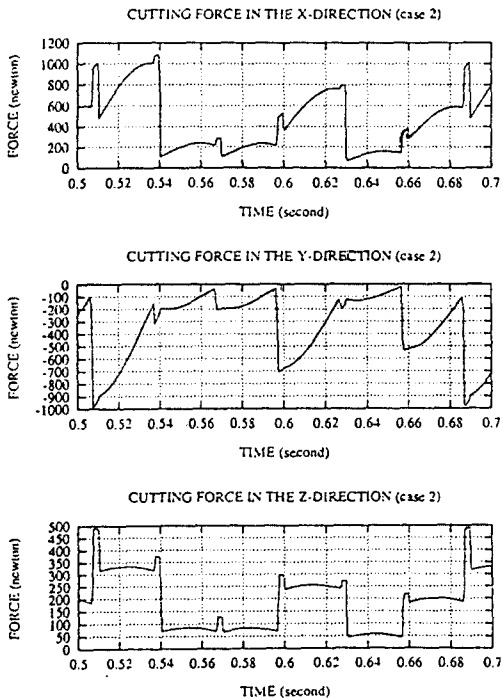


Fig. 18 Cutting force components of case 2 in the time domain

V. 결론

본 연구에서는 3차원 밀링가공에서 절삭력과 가공면의 예측을 위한 새로운 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 제안하였다. 시뮬레이션 모델은 수치학적으로 공작물의 기하학과 절삭공구의 기하학, 공작기계의 운동학을 포함한다. 공작물과 공구사이의 상대운동과 상대위치를 알면 가공된 표면과 절삭속도, 순간 절삭면적을 예측 할 수있다. 절삭력은 절삭 칩(chip)의 수직단면적에 비례하므로 순간 절삭면적을 계산하면 순간 절삭력요소를 동시에 얻을 수있다.

또한, 절삭 날의 오차에 의한 가공표면의 해석이 가능하며, 뿐만 아니라, 본 연구에 제시된 시뮬레이션 모델을 동력학적인 요소를 첨가시켜, 공구와 공작물 사이의 동력학적인 특성까지도 예측할 수있다.

참고 문헌

1. Martellotti, M.E., "An analysis of the milling process", Trans. of ASME, Vol. 63, pp. 677-700, 1945.
2. Sabberwal, A.J.P. and Koenigsberger, F., "Chip section and cutting force during the milling operation", CIRP Annals, Vol. 10, pp. 197-203, 1962.
3. Tlusty, J. and Macneil, P., "Dynamic of cutting forces in end milling", CIRP Annals, Vol. 24, pp. 21-25, 1975.
4. Kline, W.A., DeVor, R.E and Lindberg, J.R., "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.
5. You, S.J. and Ehmann, K.F., "Synthesis and generation of surfaces milled by ball nose end mills under tertiary cutter motion", J. of Eng. Ind., Vol. 113, pp. 17-24, 1991.
6. Ehmann, K.F. and Hong, M.S., "A generalized model of the surface generation process in metal cutting", CIRP Annals, Vol. 43, pp. 483-486, 1994.
7. Mortenson, M.E., Geometric Modeling, John Wiley & Sons Inc., 1985.