

절삭 계수 갱신을 이용한 상향 절삭력 모델 Cutting Force Models in Up Milling Using Methods updating Cutting Coefficients

*안일혁¹, #최우천²

*I. H. Ahn¹, #W. C. Choi (wcchoi@korea.ac.kr)²

¹ 고려대학교 기계공학과 대학원, ² 고려대학교 기계공학과

Key words : Cutting force, Up milling, Cutting coefficients

1. 서론

엔드밀 가공은 금형 가공, 슬롯, 포켓, 표면 가공 등 다양한 형상을 가공할 때 생산성과 경제성, 정밀도가 높아서 자동차, 항공 조선 등 다양한 기계 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 엔드밀 가공에 있어서 가장 중요한 연구 분야는 정확한 절삭력 예측이다. 절삭력에 대한 정확한 예측은 가공 시 발생하는 런아웃, 진동 현상, 공구 마모, 가공 정밀도 등과 같은 다양한 현상들을 설명할 수 있는 기본이 된다고 할 수 있다.

Martellotti¹는 공구의 형상을 기본으로 하여 절삭력 모델의 기본이 되는 수학적 모델을 제안하였고, Sabberwal 등²은 위에서 제한한 수학적 모델을 기반으로 한 역학적 가공 모델을 연구하였다. 최근, Wan 등³은 측정된 절삭력을 런아웃(runout)이 배제된 공칭 절삭력(nominal component forces)과 런아웃 효과에 의해서 발생하는 섭동 절삭력(perturbation component forces)으로 나누어서 절삭계수와 런아웃 변수들을 구한 모델을 제시하였다.

본 논문에서는, 동력계에서 측정된 절삭력을 공칭 절삭력과 섭동 절삭력으로 나누고, 공칭 절삭력의 최대 절삭력을 기준으로 하여 초기에 주어진 절삭계수를 제한한 알고리즘을 이용하여 갱신함으로써 최종적인 절삭계수를 구하는 모델을 제안하고자 한다. 갱신 알고리즘을 통하여 얻은 절삭계수를 구하고, 구한 절삭계수를 기본으로 하여 런아웃 변수들을 최소사승법(least square method)을 이용하여 구하였다.

2. 절삭력 모델

본 논문에서 제안하는 절삭력 모델은 주어진 절삭계수를 이용하여 절삭력을 계산하는 부분과 수직 절삭력 모델(orthogonal cutting force model)을 기반으로 한 절삭계수 갱신 부분으로 나누어 볼 수 있다.

2.1 역학적 절삭력 모델

기공의 형상을 기초로 한 역학적 절삭력 모델은 절삭계수가 주어졌을 때 절삭력을 구하였다.

Fig. 1은 공구를 하단에서 본 그림이다. 좌표계에서 i 번째 공구 회전 위치각에서 j 번째 날의 축 방향 디스크 요소에서 작용하는 절삭력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{i,j,k,t} &= K_t \cdot h_{i,j,k}(\varphi) \cdot dz \\ F_{i,j,k,r} &= K_r \cdot h_{i,j,k}(\varphi) \cdot dz \\ F_{i,j,k,a} &= K_a \cdot h_{i,j,k}(\varphi) \cdot dz \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 순간 미변형 칩두께 $h_{i,j,k}$ 는 역학적 절삭력 모델에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_{i,j,k} = f_z \cdot \sin \phi_{j,k}(\varphi) \quad (2)$$

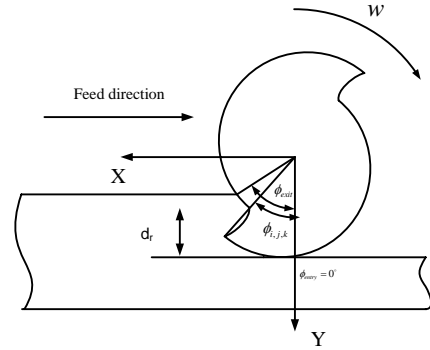


Fig. 1 Geometric model of the flat end mill and the cutting process

전체 절삭력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i,j,k} F_{i,j,k,X} \\ \sum_{i,j,k} F_{i,j,k,Y} \\ \sum_{i,j,k} F_{i,j,k,Z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 공칭 절삭력

Wan 등³은 측정된 평균 절삭력에서 런아웃 효과를 제외 시킨 절삭력을 공칭 절삭력이라고 정의하고, 공칭 절삭력을 이용하여 절삭계수를 계산하였다. 공칭 절삭력은 다음과 같이 구하였다.

$$\overline{F_s(\varphi)} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left[F_s^m \left(\varphi + \frac{2\pi(i-1)}{N} \right) \right] \quad (s = X, Y, Z) \quad (4)$$

여기에서, F_s^m 는 측정된 절삭력을 나타낸다.

2.3 갱신 알고리즘

수직 절삭력 모델은 절삭력이 공구의 회전각에 대한 함수로만 표현되기 때문에, 공구 회전각만 알고 있다면, 절삭력 변화량에 대한 절삭계수의 변화량을 쉽게 구할 수 있다. 그래서, 갱신 알고리즘에서는 앞에서와 달리 수직 절삭력 모델을 사용하였다.

절삭계수는 다음과 같이 갱신될 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{t_{new}} &= K_{t_{old}} + dK_t \\ K_{r_{new}} &= K_{r_{old}} + dK_r \\ K_{a_{new}} &= K_{a_{old}} + dK_a \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서, dK_t, dK_r, dK_a 는 수직 절삭력 모델로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

공구가 φ 만큼 회전하였을 때, 절삭력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \widetilde{h(\varphi)} \cdot da \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 \\ \sin(\varphi) & -\cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_t \\ K_r \\ K_a \end{bmatrix} \quad (6)$$

각각의 절삭력을 각각의 절삭계수로 미분을 하면 다음

같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = T_1 \cdot \begin{bmatrix} dK_t \\ dK_r \\ dK_a \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서,

$$T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & 0 \\ C_3 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\delta F_x}{\delta K_t} = -\widetilde{h}(\varphi) \cdot da \cdot \cos(\varphi), \quad C_2 = \frac{\delta F_x}{\delta K_r} = -\widetilde{h}(\varphi) \cdot da \cdot \sin(\varphi)$$

$$C_3 = \frac{\delta F_y}{\delta K_t} = \widetilde{h}(\varphi) \cdot da \cdot \sin(\varphi), \quad C_4 = \frac{\delta F_y}{\delta K_r} = -\widetilde{h}(\varphi) \cdot da \cdot \cos(\varphi) \quad (9)$$

$$C_5 = \frac{\delta F_z}{\delta K_a} = -\widetilde{h}(\varphi) \cdot da$$

식 (7)에서 dF_x, dF_y, dF_z 를 구할 수 있다면, T_1 행렬의 역행렬을 구하여 dK_t, dK_r, dK_a 를 구할 수 있을 것이다.

본 논문에서 제안하는 모델은 절삭계수의 갱신을 위해서 최대 공칭 절삭력을 사용하였고, dF_x, dF_y, dF_z 를 다음과 같이 계산하였다.

$$dF_s = F_{s_{\max}}(\varphi_{\max}) - \overline{F_{s_{\max}}} \quad (s = X, Y, Z) \quad (10)$$

이때, φ_{\max} 는 각 방향의 F_s ($s = x, y, z$) 가 최대 값을 가질 때의 회전 각도를 나타내며, $T_1 = T_1(\varphi_{\max})$ 로 계산하였으며, 갱신된 반복은 $dF_s \approx 0$ 일 때 종료하도록 하였다.

2.4 런아웃 계수

다중 날의 공구를 사용하여 가공할 경우 발생하는 런아웃에 의해서 다음과 같이 표현될 수 있다.⁴

$$h_{i,j,k} = m_i \cdot f_z \cdot \sin \phi_{i,j,k}(\varphi) + \left\{ -2 \cdot m_i \cdot \rho \cdot \sin\left(\frac{m_i \cdot \pi}{N}\right) \cdot \sin[\lambda - \psi(k) - \frac{(2 \cdot i - m_i - 2) \cdot \pi}{N}] \right\} \quad (11)$$

여기에서, f_z 는 날당 이동거리(mm/flute), ρ 는 축방향 옅셋 크기(mm), λ 는 옅셋 위치 각도(radian), m_i 는 현재 가공 날 i 가 m_i 번째 이전 날에 의해서 가공에 의해서 남아 있는 부분을 가공하고 있음을 나타낸다.

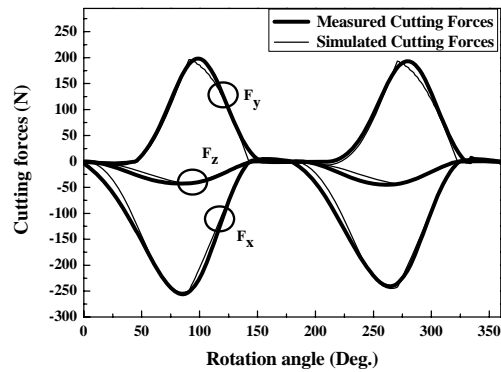
런아웃 계수는 식 (11)에서 구한 미변형칩두께를 역학적 절삭력 모델에 적용하여 구한 절삭력과 측정된 절삭력을 오차를 최소화하는 값으로 결정하였다.

3. 실험

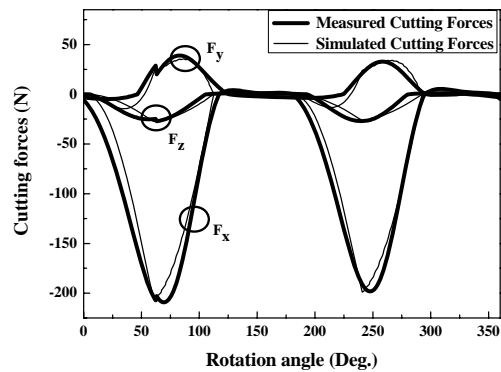
제안된 절삭력 모델을 검증하기 위해서 절삭실험을 수행하였다. 공구는 OSG 사의 직경 12mm, 비틀림각 30°, 경사각 11° 인 2 날 초경 평엔드밀을 사용하였다. 절삭력을 측정하기 위해서 공구동력계를 사용하였으며, AD 변화기를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 재료는 Al6061 을 사용하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

d_r, d_a 변화시켜서 얻은 측정 절삭력과 제안 모델을 이용하여 구한 절삭력을 비교하였으며, 기존의 절삭력 모델과 비교하여서 본 논문에서 제안한 모델을 검증하였다. Fig.2 는 실험결과와 제안 모델로 예측한 결과를 보여주고 있다. 절삭 초기에 있어서 오차를 보여주고 있을 뿐 전체적으로 일치하는 결과를 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 2 Comparison of measured and proposed model cutting forces in feed=100mm/min, (a) $d_r=6\text{mm}, d_a=6\text{mm}$ (b) $d_r=3\text{mm}, d_a=6\text{mm}$

4. 결론

본 논문에서는 절삭계수를 일정한 과정을 통하지 않고 측정 절삭력에 따라서 수치적으로 추정하고자 하였다. 그러기 위해서, 기존의 연구에서 제안되었던 역학적 절삭력 모델에 절삭계수 갱신 알고리즘을 추가한 새로운 절삭력 모델을 제안하였다. 이 모델을 이용하여 측정된 절삭력과 비교한 결과 상당히 일치하는 결과를 얻었다. 그러나, 제안된 모델이 수치적인 모델이기 때문에, 절삭 현상을 모두 반영하지 못하고 있어서 일정한 오차가 발생하였으므로 이는 차후에 연구에서 개선되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. M.E. Martellotti, "An Analysis of the Milling Process", Transaction of the ASME, Vol. 63, pp. 667-700, 1941
2. F. Koenigsberger, A.J.P. Sabberwal, "An investigation of the Cutting Force Pulsations during the Milling Process", Int. J. Machine Tool Design and Research, Vol. 1, pp. 15-33, 1966.
3. M. Wan, W.H. Zhang, G.H. Qin, G. Tan, "Efficient Calibration of Instantaneous Cutting Force Coefficients and Runout Parameters for General End Mills", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp. 1767~1776, 2007.
4. J.W. Sutherland, R.E. Devor, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in flexible End Milling Systems", AMSE Journal of Engineering for Industries, Vol. 38, pp. 45-49, 1986.