

# 치수효과를 고려한 평균 절삭력 Average Cutting Force Models Considering Size Effects

\*안일혁<sup>1</sup>, #최우천<sup>2</sup>

\*I. H. AHN<sup>1</sup>, #W. C. Choi (wwchoi@korea.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 고려대학교 기계공학과, <sup>2</sup> 고려대학교 기계공학과

Key words : Cutting force models, Size effects, Average uncut chip thickness,

## 1. 서론

엔드밀 가공은 금형 가공, 슬롯, 포켓, 펌프 가공 등 다양한 형상을 가공할 때 생산성과 경제성, 정밀도가 높아서 자동차, 항공, 조선 등 다양한 기계산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 엔드밀 가공에 있어서 가장 큰 주제는 일정 가공 조건에서 발생할 수 있는 절삭력의 정확한 예측에 있다고 할 수 있다. 절삭력 예측 모델에 있어서 가장 중요한 계수는 공구(Tool)와 공작물(workpiece) 사이의 관례를 나타내는 절삭 계수이다.

절삭 계수를 계산하는 방법에는 크게 두 가지 모델이 있다. 평균 절삭력 모델과 순간 절삭력 모델이 그것이다. 평균 절삭력 모델은 공구 회전에 따라 발생하는 절삭력을 평균하여 그에 해당하는 절삭계수를 구하는 모델이고[1-3], 순간 절삭력 모델은 일정 공구 회전각에서 발생하는 절삭력을 이용하여 절삭계수를 구하는 모델이다. [4,5].

그 중에서, 평균 절삭력 모델은 절삭계수를 일정한 상수로 가정하기 때문에 칩 두께 변화에 따라서 발생하는 치수효과를 반영하지 못하게 된다. 이는 측정된 절삭력에 비해서 예측된 절삭력이 크게 되는 결과를 낳는다.

본 논문에서는 평균 절삭력 모델에서 치수효과를 반영하여 보다 정확한 절삭력을 예측할 수 있는 모델을 제안하고자 한다.

## 2. 평균 절삭력 모델

그림 1은 공구의 형상을 나타낸 그림이다. 좌표계에서  $i$  번째 공구 날이  $j$  번째 공구 회전 위치에서  $z$  번째 디스크 요소의 작용하는 절삭력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dF_{i,t}(\phi_i(z)) &= K_t \cdot h_i(\phi_i(z)) \cdot dz \\ dF_{i,r}(\phi_i(z)) &= K_r \cdot h_i(\phi_i(z)) \cdot dz \\ dF_{i,a}(\phi_i(z)) &= K_a \cdot h_i(\phi_i(z)) \cdot dz \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서, 회전 위치각  $\phi_i(z)$ , 피치 각  $\phi_p$ , 래그각  $\psi(z)$ 은 각각 다음과 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} \phi_i(z) &= \phi + i \cdot \phi_p - \psi(z) \\ \phi_p &= \frac{2\pi}{N_f}, \quad \psi(z) = z \cdot \frac{\tan \beta}{R} \end{aligned}$$

(1)에서 구한 절삭력을 x,y,z 방향에 대한 절삭력으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} dF_{i,x}(\phi_i(z)) \\ dF_{i,y}(\phi_i(z)) \\ dF_{i,z}(\phi_i(z)) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_i(z) & -\sin \phi_i(z) & 0 \\ +\sin \phi_i(z) & -\cos \phi_i(z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} dF_{i,t}(\phi_i(z)) \\ dF_{i,r}(\phi_i(z)) \\ dF_{i,a}(\phi_i(z)) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

윗 식에서,  $dz = d_a$ ,  $\phi_i(z) = \phi$ ,  $\kappa_\beta = \frac{\tan \beta}{R} = 0$

하고 날 당 평균 절삭력을 구하면 다음과 같다.

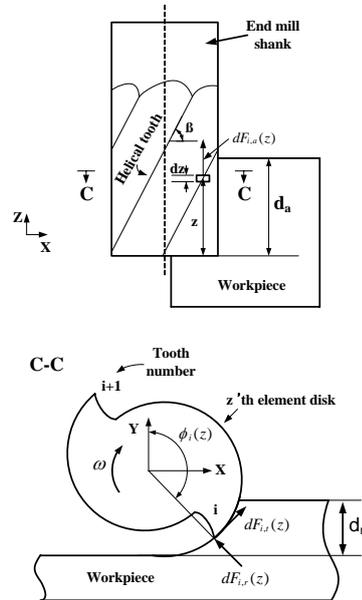


Fig. 1 End milling and coordinate systems

$$\bar{F}_x = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{8\pi} [K_t \cos 2\phi - K_r [2\phi - \sin 2\phi]] \right\}_{\phi_i}^{\phi_{i+1}} \quad (3)$$

$$\bar{F}_y = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{8\pi} [K_t [2\phi - \sin 2\phi] + K_r \cos 2\phi] \right\}_{\phi_i}^{\phi_{i+1}}$$

$$\bar{F}_z = \left\{ \frac{N_f \cdot d_a \cdot f_t}{2\pi} [-K_a \cos \phi] \right\}_{\phi_i}^{\phi_{i+1}}$$

(3)식으로부터 평균 절삭력을 이용하여 절삭계수를 구할 수 있다.

## 3. 치수효과 모델

평균 절삭력 모델에서 칩 두께 변화에 따른 치수 효과를 반영하기 위해서 다음과 같은 모델을 제안하고자 한다.

$$K_{s,mod}(\varphi) = B_1 \cdot K_{s,ave} (-1 + e^{-B_2 \cdot t_{cr}(\varphi)}) \quad (s = x, y, z) \quad (4)$$

여기에서, 각각의 변수들은 다음과 같다.

$$t_{cr}(\varphi) = \frac{t_c(\varphi)}{\tilde{t}_c}$$

$$\tilde{t}_c = -f_t \frac{\cos(\phi_{ex}) - \cos(\phi_{st})}{\phi_{ex} - \phi_{st}}$$

- $B_1, B_2$  Constants
- $K_{s,ave}$  Cutting coefficients using average cutting forces model
- $K_s(\varphi)$  Instantaneous cutting coefficients
- $\tilde{t}_c$  Average uncut chip thickness,
- $t_c(\varphi)$  Instantaneous average uncut chip thickness
- $t_{cr}(\varphi)$  none-dimensional instantaneous average uncut chip thickness

계수  $B_1, B_2$ 는 다음과 같이 구한다.

-  $B_1 = 1$  놓는다,  $F_y$ 가 최대 값을 가질 때의 공구의 회전 각도  $\phi_{max}$ 를 구하고 그 순간에 순간 절삭 계수 (instantaneous cutting coefficient, Wan's model [5])

-  $K_s(\phi_{max}) = K_{s,mod}(\phi)$  두고 다음 식으로부터  $B_2$  를 구한다.

$$B_2 = -\frac{1}{K_{s,ave}(\phi_{max})} \ln\left(\frac{K_s(\phi_{max})}{K_{s,ave}(\phi_{max})} + 1\right) \quad (5)$$

-이때,  $K_s(\phi_{max})$  값과  $B_2$ 를 알고 있기 때문에 다음 식을 이용하여  $B_1$ 를 구할 수 있다.

$$B_1 = \frac{K_{s,mod}(\phi_{max})}{K_{s,ave}(-1 + e^{-B_2 \cdot \phi})} \quad (6)$$

4. 실험

제안된 절삭력 모델을 검증하기 위해서 절삭실험을 수행하였다. 공구는 YG1 사의 직경 12mm, 비틀림각 42°, 경사각 11° 인 2 날 초경 평엔드밀(flat end mill)을 사용하였다. 절삭력을 측정하기 위해서 Kistler사의 9257B 공구 동력계를 사용하여 절삭력을 측정하였으며, 시편은 Vertical type-machining center를 이용하여 실험하였으며, 가공은 건식 방식으로 하였다. 실험에 사용된 재료는 Al6061을 사용하였다. Table 1에 실험 조건을 나타내었다.

5. 결과 및 토론

Table 1에 있는 조건에 1~6 실험을 이용하여 평균 미변형 칩두께에 대한 절삭계수의 변화를 보정한 결과는 Fig. 1에 나타내었다. 평균 미변형 칩두께가 작아짐에 따라서 절삭계수가 증가하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 2는 치수효과에 사용된 계수  $B_1, B_2$ 의 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보이듯이  $B_1, B_2$ 는 일정한 범위 안에서 존재함을 알 수가 있다. 이는 기존의 모델에서의 치수효과와 같이 일정한 상수로 사용할 수 있음을 보여준다. 여기에서는 실험 1~6까지를 통하여 구한 값을 평균하여 사용하였다. Fig.3은 최종적으로 보정한 절삭계수와 치수효과 계수를 사용하여 측정된 데이터를 예측한 결과를 비교한 것이다. 예측한 데이터는 치수효과를 반영한 것과 반영하지 않은 것을 모두 나타내었다. 치수효과를 반영한 결과가 조금 더 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수가 있다.

6. 결론

본 논문에서 제안한 치수효과 모델을 평균 절삭력 모델에 적용하여 그 결과를 보았다. 제안한 모델에서의 계수들이 순간 미변형 칩 두께 모델의 계수들과 같이 절삭 조건에 상관없이 일정한 값을 가짐을 알 수 있었으면, 단순 평균 절삭력 모델만을 이용하여 예측한 결과보다 치수효과를 반영한 평균절삭력 모델을 이용하여 보다 정확한 절삭력을 예측할 수 있었다.

참고문헌

1. W.A. Kline, R.E. DeVor, J.R. Lindberg, The prediction of cutting forces in end milling with application of cornering cuts, International Journal of machine Tool Design and Research, Vol. 22(1), pp.7~22, 1982.
2. J. W. Sutherland, R.E. DeVor, An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling system, ASME Journal of Engineering for Industry, vol. 108, pp. 269~279, Vol. 1986.
3. H.Y. Feng, C.H. Menq, The prediction of the cutting forces in the ball-end milling process-I. Model of formulation and model building procedure, International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 34, pp. 697~710, 1994.
4. J. Gradiš ek, M. Kalveram, K. Weinert, Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end

mill, International Journal of machine Tools and Manufacture, Vol. 44, pp.401~414, 2004.

5. M. Wan, W.H. Zhang, G.H. Qin, G. Tan, efficient

Table 1 Test conditions

Test #	Dr (mm)	Da (mm)	Ft (mm/flute)	Spindle (RPM)
1	15	10	0.05	1000
2	5	10	0.05	1000
3	10	5	0.05	1000
4	10	10	0.02	1000
5	10	10	0.1	1000
6	8	12	0.0294	850
7	12	8	0.0588	850

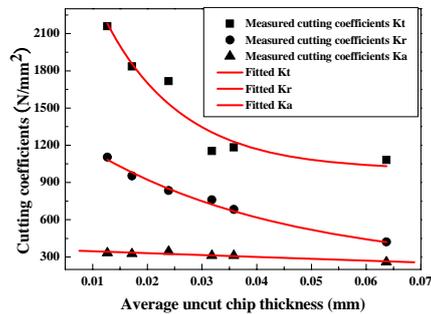


Fig. 2 Calibration of cutting coefficients in x, y, z direction

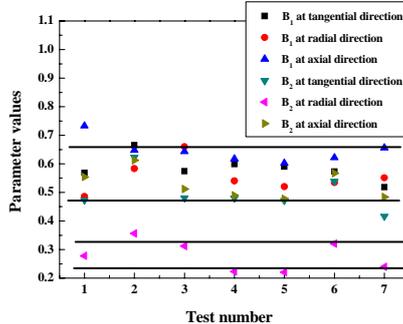


Fig. 3 B1, B2 parameters in x, y, z direction

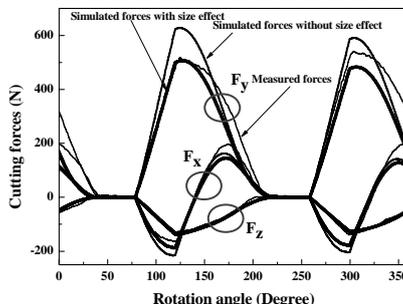


Fig. 4 Comparison of measured, simulated cutting forces with/without size effect

Calibration of instantaneous cutting force coefficients and runout parameters for general end mills, International Journal of machine Tools and manufacture, Vol. 47, pp. 1767~1776, 2007.