원호 가공에 대한 절삭력 모델

안일혁* · 최우천 †

Cutting Force Models in Circular Milling Processes

Il Hyuk Ahn and Woo Chun Choi

Key Words : Cutting force (절삭력), Circular milling (원호가공), Uncut chip thickness (미변형칩두께)

Abstract

Circular milling operations are used to enlarge die and cylinder bores, and machine airframe pockets. In this case, cutting force varies as cutting tool position relative to workpiece. This paper presents a mechanistic model of geometric uncut chip thickness by predicting time varying cutter-part intersection as the cutter travels along the circular path. Compared with experimental results, the suggested cutting force model shows a good agreement.

기호설명

ω : Spindle speed(rad/s)
Ω : Angular traverse speed along the tool path (rad/s)
N : Spindle speed(rmp)
N_p : Angular traverse speed along the tool path (rev/min)
t : descrete time intervals
θ_0, ϕ_{10} : Initial positions of the tool and the first tooth(rad)
ϕ_j : Instantaneous immersion angle of tooth j (rad)
ϕ_{st} , ϕ_{ex} : Cutting entry and exit angle(rad)
f_d : Feedrate(mm/flutes)
h_j : Uncut chip thickness

1. 서 론

엔드밀 가공은 금형 가공, 슬롯, 포킷, 표면가공 등 다양한 형상을 가공할 때 생산성과 경제성, 정밀도가 높아서 자동차, 항공, 조선 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 정확한 절삭력 예측 모델은 엔드밀 가공의 정밀도 향상에 크게 기여한다. 엔드밀 가공에 의한 정밀도 향상을 위해서 많은 연구자들은 다양한 절삭력 모델들은 제안하였다. Kline 등[1] 은 공구 중심의 옵셋을 고려한 절삭력 모델을 제안하였으며, Sutherland 와 Devor[2]는 공구 변형을 고려한 절삭력 모델을 제안하였다. Altintas 등[3] 은 진동과 공구의 강체운동을 고려한 절삭력 모델을 제시하였으며, Yun 와 Cho[4] 는 절삭조건에 독립적인 절삭력 모델을 제안하였다.

제안된 절삭력 모델들은 공구가 회전하면서 공구축의 수직방향으로 운동하기 때문에 미변형 칩 두께가 연속적으로 변하는 단속 절삭을 하는 것을 기본으로 하여 개발되었다. 그러나 실제 가공에 있어서는 공구는 다양한 방향으로 운동하면서 가공을 수행하게 되고 이는 수직방향 운동에 의해 발생하는 절삭력과 다른 경향을 보여주게 된다. 따라서 엔드밀 가공을 이용한 제품의 생산에 있어서 정밀도 향상을 위해서는 다양한 가공 형상에 따른 절삭력 예측 모델의 개발이 필요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 역학적 절삭력 모델을 이용해 원호 가공에 있어서의 절삭력 모델을 제안하고자 한다.

† 고려대학교 기계공학과
E-mail : WCChoi@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3361 FAX : (02)926-9290
* 고려대학교 기계공학과 대학원

2. 절삭력 모델

2.1 공구와 공작물 사이의 관계

공구와 공작물 사이의 형상관계는 Fig. 1 과 같다.

2.2 역학적 절삭력 모델

j 번째 절삭날에 i 번째 높이에 대한 순간 절입각은 다음과 같다.

$$\phi_j(k) = \phi_1(k) + (j-1)\frac{2\pi}{N_f} + dz \bullet i \bullet \frac{\tan\beta}{R_0} \tag{1}$$

$$\theta(k) = \theta_0 + \Omega k t$$

$$\phi_1(k) = \phi_{10} + \omega k t$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60}, \quad \Omega = \frac{2\pi N_p}{60}$$

미변형 칩두께는 다음과 같다.

$$h_j = f_d \bullet \sin(\phi_j(k)) \tag{2}$$

수직방향 분력과 반경방향 분력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_{tj} \\ F_{rj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tc} \bullet h_j + K_{te} \\ K_{rc} \bullet h_j + K_{re} \end{bmatrix} \bullet a \tag{3}$$

절삭날에 작용하는 분력들을 X-Y 좌표계로 변환하면 다음과 같다.

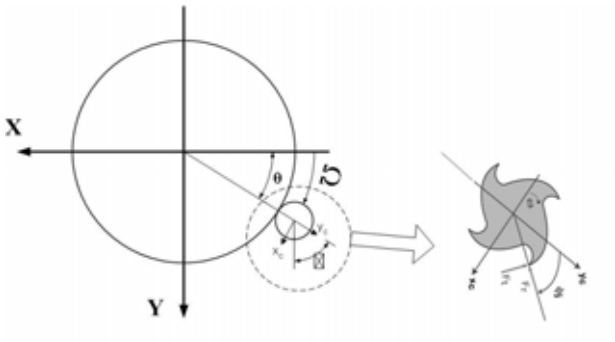


Fig. 1 Geometric of tool and workpiece and cutting forces in tangential and radial

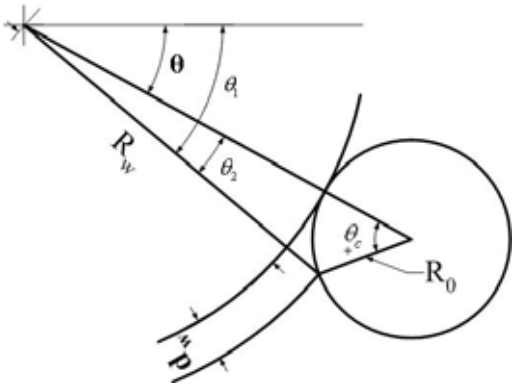


Fig. 2 Instantaneous immersion angle on workpiece

$$F_X(\theta,\phi) = \sum_{j=1}^{Nf} g(\phi_j)[-F_{tj} \bullet \sin(\delta(k)) - F_{rj} \bullet \cos(\delta(k))]$$
$$F_Y(\theta,\phi) = \sum_{j=1}^{Nf} g(\phi_j)[F_{tj} \bullet \cos(\delta(k)) - F_{rj} \bullet \sin(\delta(k))] \tag{4}$$

여기서,

$$\delta(k) = \theta(k) - \phi_j(k)$$

$$g(\phi_j) = \begin{cases} 1 & for\ \phi_{st}(\theta) < \phi_j(k) < \phi_{ex}(\theta) \\ 0 & for\ others \end{cases}$$

$\phi_{ex}(\theta)$ 는 Fig. 2 에 그림으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

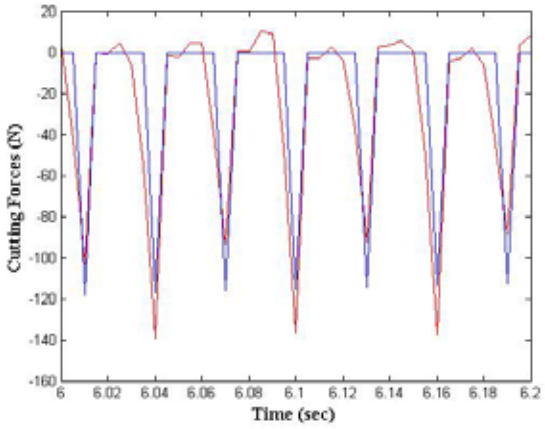
$$\theta_c = \frac{R_2^{\,2} + R_0^{\,2} - R_1^{\,2}}{2 \cdot R_2 \cdot R_0} \tag{5}$$

$$\phi_{st}(\theta) = \pi - \theta_c \tag{6}$$

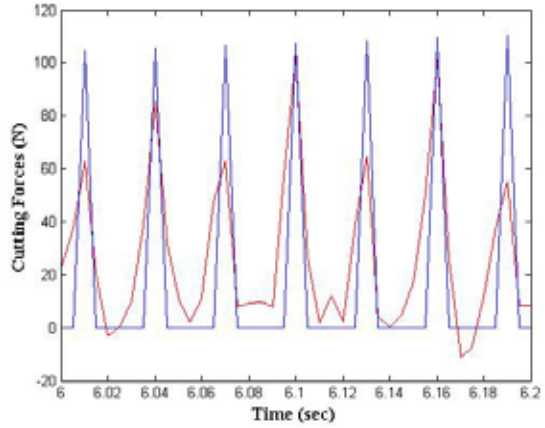
3. 절삭력 예측 결과

제안된 절삭력 모델의 검증하기 위해서 절삭실험을 수행하였다. 공구는 OSG 사의 직경 12mm, 비틀림각은 30°, 경사각은 11° 인 2 날 초경 평앤드밀을 사용하였다. 절삭력을 측정하기 위해서 공구동력계를 사용하였으며, AD 변화기를 이용하여 절삭력을 측정하였다. 공작물의 재질은 Al6061-T6 이다. 실험 조건은 Table 1 에 나타나있다.

3.1.1 절삭력 예측 결과

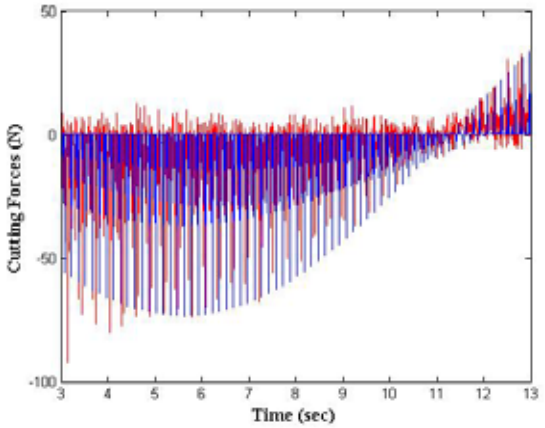


(a) Cutting forces in X direction

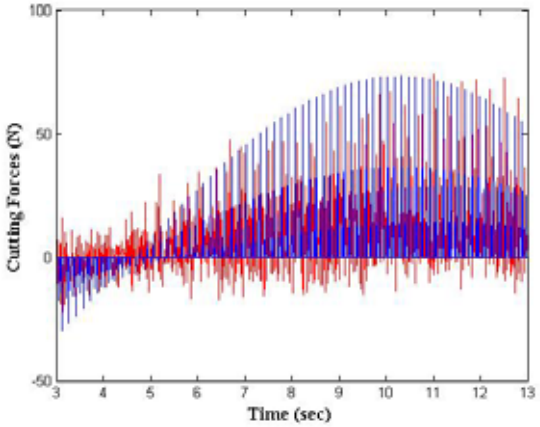


(b) Cutting forces in Y direction

Fig. 3 Comparison of measured and simulated cutting forces at a small time windows for test 3

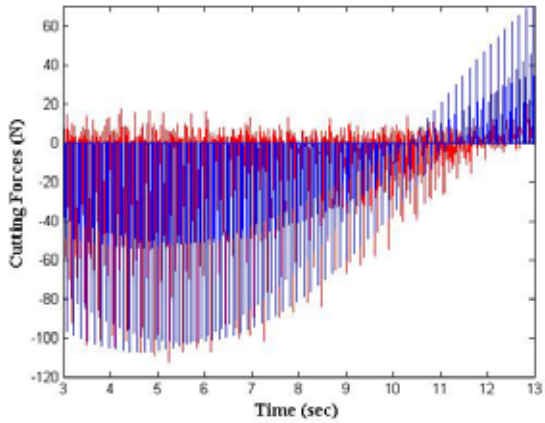


(a) Cutting forces in X direction

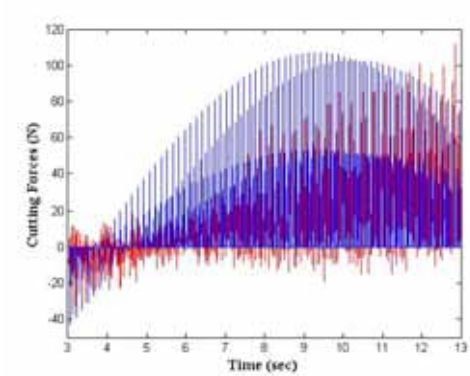


(b)) Cutting forces in Y direction

Fig. 4 Cutting forces for test 1 condition

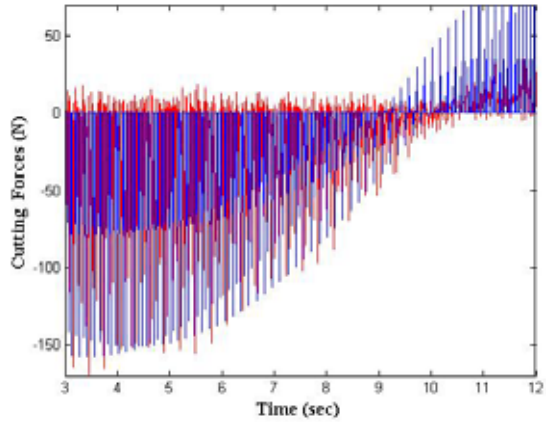


(a) Cutting forces in X direction

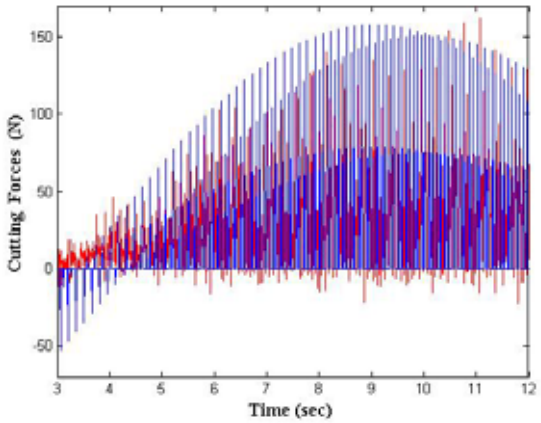


(b) Cutting forces in Y direction

Fig. 5 Cutting forces for test 2 condition



(a) Cutting forces in X direction



(b) Cutting forces in Y direction

Fig. 6 Cutting forces for test 3 condition

각각의 조건에 대한 예측된 절삭력과 측정된 절삭력과 절삭계수는 Fig. 3 - Fig. 5 와 Table 2 나타내었다. Geometric uncup chp thickness 모델을 적용하여 해석하였기 때문에 측정된 절삭력과 예측모델의 절삭력은 차이를 보여주고 있다. 특히 변곡점 부분에서의 큰 오차를 보여주고 있는데, 이것은 변곡점에서의 급격한 가속도의 방향 변화 때문인 것으로 생각된다.

Table 1 Test cut conditions

No	Spindle speed (rpm)	Axial depth (mm)	Radial depth (mm)	Feed (mm/flute)
1	1000	5	0.3	0.2
2	1000	5	0.5	0.2
3	1000	5	0.7	0.2

Table 2 Estimated cutting force coefficients

No	K_{tc} (N/mm^2)	K_{rc} (N/mm^2)	K_{te} (N/mm)	K_{re} (N/mm)
1	180	150	22	15
2	420	116	15	18
3	650	145	20	21

4. 결 론

기존에 제안되었던 역학적 절삭력 모델을 이용하여 원호가공을 할 때 공구에 작용되는 절삭력을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다. 실험을 통해서 얻은 결과와 예측 모델을 이용하여 구한 절삭력과 비교하여 보았다. 실험을 통하여 얻은 절삭력과 예측 모델을 이용하여 구한 절삭력은 특히 변곡점 구간에서 큰 오차를 보여주고 있는데, 이것은 변곡점에서의 급격한 가속도의 변화 때문인 것으로 생각된다. 차후 연구에서는 미변형 칩두께 모델을 공구 변형을 고려한 모델에 대한 연구와 변곡점에서의 절삭력을 보다 정확하게 예측할 수 있는 모델에 대해 연구할 예정이다.

참고문헌

(1) Kline, W.A., DeVor, R.E., 1982,"The Prediction of Cutting Forces n End Milling with Application to Cornering Cuts," Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, pp. 7-22.

(2) Kline, W.A., DeVor, R.E.,1983,"The Effect of Runout on Cutting Geometry and Forces in End Milling," Int, J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 23, pp. 123-140.

(3) Montgometry, D., and Altintas. Y., 1991," An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," ASME J. Eng. Ind., Vol. 113, No 2, pp. 160-168.

(4) Yun, W. S., Cho D. W., 2000,"An Improved Method for the Determination of 3D Cutting Force Coefficients and Runout Parameters in End Milling,"Int. J. Advan. Manfuc Tech., Vol. 16, pp. 851-858.