마이크로 엔드밀링에서 공구선단 반경을 고려한 절삭력 모델

*강익수[1], 김정석[2], 서용위[3]
[1] 부산대학교 대학원 정밀기계공학과, [2] 부산대학교 기계공학부, [3] 인제대학교 기계자동차공학부

Cutting Force Model considering Tool Edge Radius in Micro-end-milling

*I. S. Kang[1], J. S. Kim[2], Y. W. Seo[3]
[1] Dept. of Precision Mech. Eng., PNU, [2] School of Mech. Eng. PNU, [3] School of Mech. Automotive Eng., Inje Univ.

Key words : Cutting force, Tool edge radius, Micro-end-milling

1. 서론

마이크로 엔드밀링과 범용 엔드밀링 공정은 전체적으로 유사하지만, 날당이송 대 공구반경의 비가 범용에 비해 상당히 크기 때문에 가공조건이 적당하지 못하면 공구가 파손되기 쉽고, 작업자가 공구상태를 감지해 내기가 쉽지가 않다. 따라서 마이크로 엔드밀링에서 절삭력 해석(Cutting force analysis)은 공구마멸, 표면형상 등과 같은 절삭공정의 특성 파악, 조건선정 및 마이크로 공구설계에 있어 중요한 역할을 한다.

밀링공정에서 절삭력 해석은 Martellotti[1]에 의해 처음 시도되었고, 범용 엔드밀 공정의 해석적 절삭력에 관한 연구는 Tlusty et al.[2]이 처음 제안하였다. 그리고 마이크로 엔드밀링의 해석적 절삭력 모델은 Bao et al.[3]에 처음 소개되었다. 절삭깊이가 매우 작은 마이크로 절삭은 범용 절삭과는 달리 공구선단 반경의 효과를 무시할 수 없다. 2차원 직교절삭에서 공구선단 반경을 고려한 연구가 상당히 진행돼 왔지만, 엔드밀링에서 공구선단 반경을 고려한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문에서 마이크로 엔드밀링에서 공구선단 반경을 고려한 절삭력 모델을 제시하고, 실험을 통한 모델의 검증을 수행하고자 한다.

2. 마이크로 엔드밀링 절삭력 모델

마이크로 절삭에서는 공구선단 반경이 절삭 매커니즘에 영향을 미친다. 특히 여유면에서 공작물의 탄성회복(Elastic recovery)으로 공구-공작물의 접촉에 의한 슬라이딩(Sliding) 현상과 공구선단에 의한 플라우잉(Ploughing) 현상을 주요한 절삭 메커니즘으로 보고 있다.[4,5]

전단면에서 전단과 여유면의 슬라이딩을 고려한다면 전단면에 작용하는 전단력과 수직 성분의 힘은 식(1), (2)와 같다.

$$F_s = \bar{\sigma} \cdot b t_0 / \sqrt{3} \sin\phi \tag{1}$$

$$N_s = \bar{\sigma} \cdot b t_0 / \sin\phi \tag{2}$$

$$\bar{\sigma} = CK\bar{\varepsilon}^n$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, b는 절삭폭, t_0는 절입, ϕ는 전단각이다.

여유면에서 발생하는 탄성회복에 의한 재료의 스프링백(Springback)과 공구의 여유각으로부터 접촉길이 L_f를 구하였고[4], 슬라이딩으로 인해 추가되는 접촉마찰력은 재료의 항복강도 Y와 접촉길이로부터 식(3)과 (4)와 같이 표현할 수 있다[6].

$$F_{fc} = CY \cdot L_f \cdot b / \sqrt{3} \tag{3}$$

$$F_{ft} = CY \cdot L_f \cdot b \tag{4}$$

절삭깊이가 작을 때 $\bar{\sigma}$ 와 Y는 치수효과로 인해 실제값 보다 상당히 크게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 절삭실험을 통해 상수 C값을 결정하여 절삭력을 보상하였다.

공구선단반경 효과에 의한 공구-공작물의 접촉에 의한 슬라이딩과 전단면에서의 전단을 고려한 주절삭력(Principal cutting force)과 배분력(Thrust cutting force)은 식(5), (6)과 같다.

$$F_c = F_s \cos\phi + N_s \sin\phi + F_{fc} \tag{5}$$

$$F_t = -F_s \sin\phi + N_s \cos\phi + F_{ft} \tag{6}$$

2차원 직교절삭에서의 절삭깊이는 엔드밀링에서 칩두께로 볼 수 있으며, Tlusty et al.[2]의 절삭력 모델을 기초로 하여 마이크로 엔드밀링에서의 절삭력을 다음 식 (7), (8)과 같이 구하였다.

절삭깊이가 공구선단 반경 이하일 때 공구는 음의 경사각을 갖는다. 특히 엔드밀링에서는 날당이송이 공구선단 반경 이상일지라도 공구회전각에 따라 절삭깊이가 공구선단 반경 보다 작을 수 있다. 따라서 이 조건에서는 유효경사각을 적용하였다.

$$F_x = [C_1(\sin^2\theta_e - \sin^2\theta_s) + C_2(\sin 2\theta_e - \sin 2\theta_s) - C_4(\sin\theta_e - \sin\theta_s) + C_5(\cos\theta_e - \cos\theta_s) + C_3(\theta_e - \theta_s)] \tag{7}$$

$$F_y = [C_3(\sin^2\theta_e - \sin^2\theta_s) + 0.5C_1(\sin 2\theta_e - \sin 2\theta_s) - C_5(\sin\theta_e - \sin\theta_s) - C_4(\cos\theta_e - \cos\theta_s) - C_1(\theta_e - \theta_s)] \tag{8}$$

$$C_1 = -\frac{\bar{\sigma} f_t r\cos\phi}{2\sqrt{3}\sin\phi\tan\beta} - \frac{\bar{\sigma} f_t r}{2\tan\beta}, \quad C_2 = -\frac{\bar{\sigma} f_t r}{4\sqrt{3}\tan\beta} + \frac{\bar{\sigma} f_t r\cos\phi}{4\sin\phi\tan\beta}$$

$$C_3 = \frac{\bar{\sigma} f_t r}{2\sqrt{3}\tan\beta} - \frac{\bar{\sigma} f_t r\cos\phi}{2\sin\phi\tan\beta}, \quad C_4 = \frac{YL_f r}{\sqrt{3}\tan\beta}, \quad C_5 = \sqrt{3}\,C_4$$

여기서, f_t는 날당이송, r은 공구반경, β는 공구의 헬릭스각이다.

3. 마이크로 절삭 실험

실험은 고속 머시닝센터에 에어터빈 스핀들(Air-turbine spindle)을 부착하여 수행하였다. 마이크로 엔드밀로 그루브 가공을 하였고, 공작물은 알루미늄을 사용하였다. 공구동력계는 실험실에서 자체 개발한 고속용 공구동력계를 사용하였다. 이 공구동력계는 고주파수 영역에서 안정된 응답특성을 가지고 있어, 신뢰성 있는 절삭력을 획득할 수 있었다.

절삭력 신호는 전하증폭기와 디지털 오실로스코프를 통해 획득하였고, 공구의 직경이 상당히 작기 때문에 육안으로 직접 원점 세팅이 어려워 가공 원점은 CCD 카메라를 통해 이루어졌다. Table 1에 실험에 사용된 장비의 사양을 나타내었다.

Table 1 Specification of experimental instruments

Instrument	Specification
Machining center	Makino V55
Air-turbine spindle	BIG BBT40(Max. 80,000rpm)
Charge Amplifier	Kistler 5019A
Digital oscilloscope	LeCroy 9330A(200㎒)
Tool dynamometer	Built-in with force sensor Kistler 9251A
CCD camera	Neocom(×450)

절삭조건은 공구선단 반경이 약 1㎛ 정도이기 때문에 공구선단 반경 효과를 고려하기 위해 날당이송을 1.0-4.0㎛/tooth로 정하였고, 절삭조건은 Table 2에 자세히 나타내었다.

Table 2 Cutting conditions

Spindle revolution	62,000rpm
Feed per tooth	1.0~4.0㎛/tooth
Depth of cut	200㎛
Width of cut	20㎛
Micro tool	WC 2-flute flat endmill d=200㎛, $r_t \approx 1.0$㎛, β=30°
Workpiece	Al6061

3. 절삭력 예측 및 실험 결과

Fig. 1은 예측된 날당이송에 따른 주절삭력과 배분력의 변화를 보여주고 있다. 날당이송이 공구선단 반경인 1.0㎛이하에서는 주절삭력 보다 배분력이 크게 나타나는데, 이는 여유면에서의 슬라이딩에 의한 것이다. 그리고 날당이송이 약 1.5㎛ 이상에서는 주절삭력이 커지고 있다.

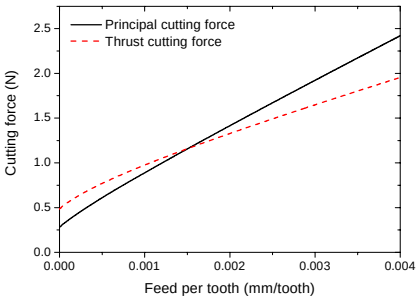

Fig. 1 Principal and trust cutting force according to feed per tooth

기존의 엔드밀링 절삭력 모델은 배분력이 주절삭력의 0.3배라고 가정하였다. 하지만 마이크로 엔드밀링에서는 여유면에서의 슬라이딩에 의해 배분력이 주절삭력 보다 커지는 현상이 발생한다. Fig. 2는 날당이송이 1.0㎛일 때 결과이다. 공구선단 반경 수준에서는 이송과 수직방향 절삭력의 차이는 크지 않다는 것을 알 수가 있다. 하지만 날당이송이 4.0㎛로 공구선단반경 수준 이상일 때는 수직방향 절삭력이 점차 커지고 있다. 그리고 예측된 절삭력은 공구런 아웃에 의한 영향을 제외하고 실험결과와 잘 일치하고 있으며, 마이크로 절삭 특성을 잘 보여주고 있다.

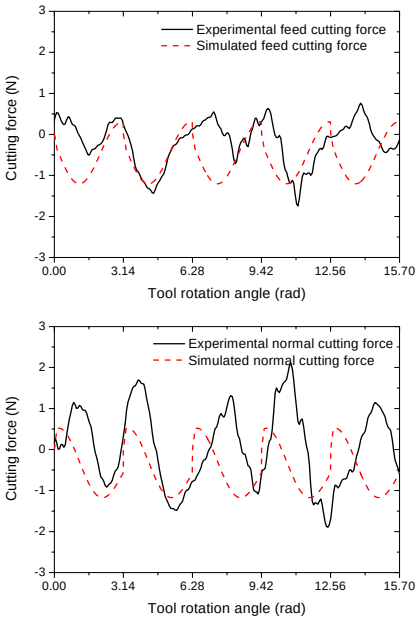

Fig. 2 Comparison of simulated and experimental cutting force for feed per tooth 1.0㎛

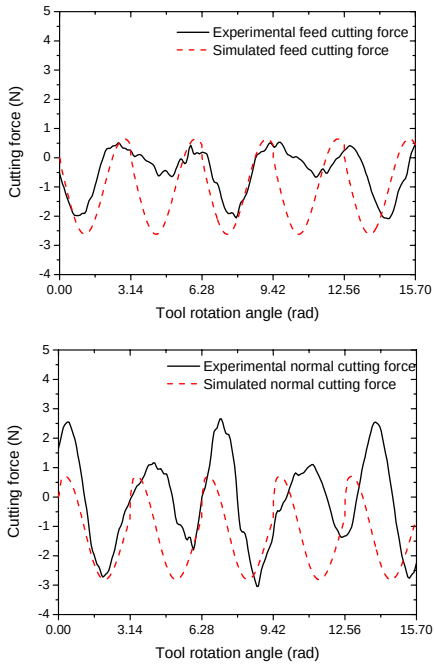

Fig. 3 Comparison of simulated and experimental cutting force for feed per tooth 4.0㎛

5. 결론

공구선단 반경의 효과를 고려한 마이크로 엔드밀링에서의 절삭력 모델을 새로이 제시하였다. 그 결과 날당이송이 공구선단 반경 수준에 도달했을 때, 기존의 모델에서 고려되지 않은 공구선단 반경효과에 의해 나타나는 절삭력 특성을 예측할 수 있었다. 또한 예측된 절삭력과 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 마이크로 엔드밀링에서는 공구마멸에 의해 공구선단 반경이 커져 절삭력 증가로 인해 공구파손이 발생하며, 가공면 표면에 악영향을 끼칠 수 있을 것이다. 따라서 이러한 절삭력 예측을 통해 절삭조건 선정 및 공구설계시 마이크로 절삭 특성을 고려할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Martellotti, M. E., "An Analysis of the Milling Process," Transaction of ASME 63, 677-700, 1941.
2. Tlusty, J. and Macneil, P., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling", Annals of CIRP 24(1), 21-25, 1975.
3. Bao, W. Y. and Tansel, I. N., "Modeling Micro-end-milling Operations. Part I: Analytical Cutting Force Model", Int. J. of Mach. Tools Manufact. 40, 2155-2173, 2000.
4. Arcona, C. and Dow Th. A., "An Empirical Tool Force Model for Precision Machining", J. of Manufact. Sci. and Eng. 120, 700-707, 1998.
5. Lucca, D. A., Seo, Y. W. and Rhorer, R. L., "Energies in the Ultra-precision Machining of Ductile Materials",Proceedings of the 1992 NSF Des. and Manufact. System Conference, Altanta Georgia, 123-129, 1992.
6. Kim, S. S., "A Study on the Mechanical Characteristics of the Machined Subsurface in Ultraprecision Machining," M. S. Thesis, pp. 20-24. 2000.