

미세가공 절삭력 예측기술 개발

Development of Cutting Force Prediction Method for Micro Pattern Machining

*이종민¹, 레두이¹, #김수진¹, 이석우², 제태진³

*J. M. Lee¹, D. Y. Le¹, #S. J. Kim(sujinkim@gnu.ac.kr)¹, S. W. Lee², T. J. Je³

¹ 경상대학교 기계항공공학부, ²한국생산기술연구원, ³한국기계연구원

Key words : Micro machining, Micro pattern, Cutting force, Prediction, Cutting depth, V-groove

기호설명

| |
|---|
| F_c : Cutting force of each path (N) |
| K : Specific cutting energy ($N/\mu m^2$) |
| A : Cutting area (μm^2) |
| C : Constant (from experiment) |
| n : Constant (from experiment) |
| t : Chip thickness (μm) |
| F_r : Real cutting force (N) |
| F_p : Predicted cutting force (N) |
| d_i : i-th cutting depth (μm) |
| α : Angle of tool (rad) |
| p : Pitch of pattern (μm) |
| w : Width of tool (μm) |

1. 서론

본 연구에서는 V형 공구를 이용한 프리즘 패턴과 사각형 공구를 이용한 사각 패턴의 미세가공에서 측정 절삭력을 기반으로 한 절삭력 예측 모델을 개발하고 이 모델을 기업에 적용하기 위해 일정 절삭력 가공조건 선정 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 절삭력 예측

2.1 절삭력 해석 모델

초정밀 가공에서는 일반적인 가공에서와 달리 임의의 절삭 깊이에서는 비절삭에너지에 의한 절삭저항이 급격히 증가하며 절삭깊이가 Fig 1. 과 같이 공구의 날끝 반경과 같아지거나 그 이하가 되어 일반적인 절삭현상과는 달리 공구의 날끝 부분에서는 공구의 경사각이 음의 경사각을 가지게 된다. 그리하여 비절삭에너지를 고려한 모델과 실험 데이터를 기반으로 한 절삭력예측 모델을 적용하였다.

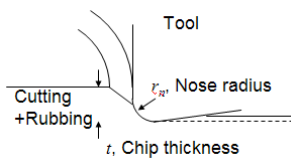


Fig 1. Micro machining and nose radius

2.2 미세 가공 절삭력 해석 알고리즘

미세 절삭력 측정 데이터와 미세 절삭 중에 발생하는 물리적 현상을 고려하여 미세 절삭 공정에 활용할 수 있는 절삭력 예측기술을 개발 하였다. 개발 알고리즘은 치수효과를 고려한 절삭력 예측모델과 측정 절삭력을 이용한 실험상수 계산 알고리즘으로 미세패턴 가공의 절삭력을 예측한다. 일반적으로 절삭력은 식 (1)과 같이 비절삭 에너지 (Specific cutting energy)와 절삭단면적으로 계산된다.

$$F_c = KA \tag{1}$$

미세 절삭은 칩 두께가 0.5~20 μm 로 일반 절삭에 비해 작아 칩 두께가 작아지면 비절삭 에너지가 커지는 치수효과(Size effect)를 고려한다.

식 (2)의 실험 상수는 측정 절삭력과 예측 절삭력의 오차가 최소가 되도록 식(3)과 같이 최소자승법(Least square method)으로 계산된다.

프리즘(Prism)패턴의 절삭력은 가공 폭이 피치보다 작은 경우 즉 원 소재의 윗면이 남아있는 경우 식 (4)로, 가공 폭이 피치 보다 큰 경우 즉 원소재의 윗면이 모두 가공된 경우 식 (5)로 예측된다.

사각(Rectangle)패턴의 경우 칩 두께가 큰 바닥과 작은 측면의 비절삭 에너지가 서로 다르므로 식 (6)과 같이 바닥과 측면의 절삭력을 각각 계산해 절삭력을 예측한다.

일반단면의 경우 식 (7)과 같이 각 단면의 절삭력을 계산하고 더해 절삭력을 예측한다.

$$K = Ct^{-n} \tag{2}$$

$$\min(\sum(F_{ri} - F_{pi})^2) \rightarrow C, n \tag{3}$$

$$F_c = C(d_i - d_{i-1}) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{-n} (d_i^2 - d_{i-1}^2) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right), \tag{4}$$

if $2d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) < p$

$$F_c = C(d_i - d_{i-1}) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{-n} (d_i - d_{i-1}) p, \tag{5}$$

if $2d \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \geq p$

$$F_c = C(d_i - d_{i-1}) \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)^{-n} 2d_{i-1} (d_i - d_{i-1}) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + C(d_i - d_{i-1})^{-n} (w + (d_i - d_{i-1}) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right))(d_i - d_{i-1}) \tag{6}$$

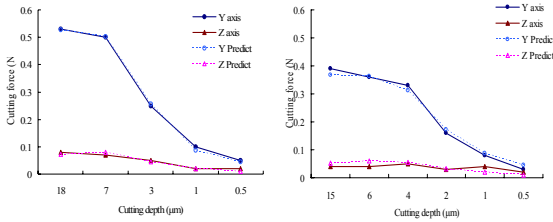
$$F_c = \sum K_i A_i \tag{7}$$

2.3 실험과 예측 결과 비교 검증

절삭력 해석 알고리즘과 Fig 2 (a)의 측정 데이터로부터 절삭력 예측모델을 완성하여 Fig 2 (b)와 (c)의 절삭력을 예측함으로써 실험과 모델의 예측 결과를 비교 검증하였다. 미세 가공 실험으로 완성된 예측 모델로 같은 공구와 재질을 이용한 다른 실험의 절삭력을 예측해 측정값과 비교하였다. Fig 2 (b)의 측정값과 예측 결과 사이의 오차는 0.02 N이고 Fig 2 (c)의 측정값과 예측 결과 사이의 오차는 0.04 N이다. 측정 값 사이에 오차도 있었는데 Fig 2 (d)는 세 실험의 공통된 가공 깊이에 대한 절삭력을 함께 표시한 것으로 측정값 사이에 0.04 N의 오차가 있음을 알 수 있다. 실험 (a)에서 얻은 실험상수를 실험 (b)와 (c)에 적용해 오차 0.04 N이하로 예측되어 미세 절삭력 예측 알고리즘이 프리즘 패턴의 미세가공에 적용 가능성을 보였다.

사각패턴의 미세 가공 실험에서 측정된 Fig 3 (a)의 절삭력으로 부터 최소자승법으로 실험 상수 C 와 n 을 얻어 Fig 3 (b) 실험의 절삭력을 예측 같은 공구와 같은 재질의 소재를 사용한 Fig 3 (b) 실험의 측정값과 예측 값의 오차

가 0.21 N으로 사각 패턴의 경우에도 미세 가공 절삭력 예측 알고리즘이 적용 될 수 있음을 보았다.

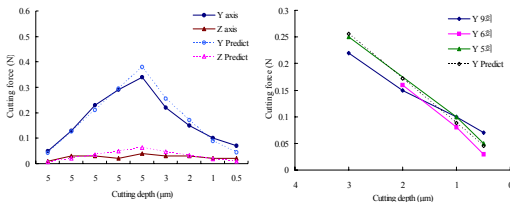


| | |
|---|---|
| KIMMExperiment - 5 Step cut Workpiece : 6:4 brass Tool : SCD, V 90° Pitch : 50 μm Cutting depth : 18+7+3+1+0.5 μm Cutting speed : 1,200mm/min | KIMMExperiment - 6 Step cut Cutting depth : 15+6+4+2+1+0.5 μm |
|---|---|

| | |
|---|-----------------|
| Least Square Method Constant : $C_y=0.00174$, $n_y=0.026$ Constant : $C_z=0.00035$, $n_z=0.172$ | Constant of (a) |
|---|-----------------|

Max. Error : $E_y=0.01$, $E_z=0.01$ N Max. Error : $E_y=0.02$, $E_z=0.02$ N

(a) (b)



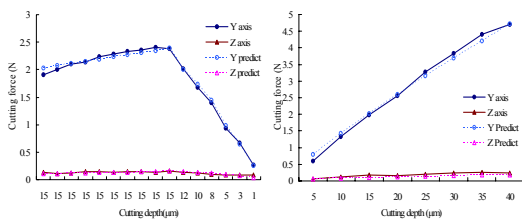
| | |
|--|--|
| KIMMExperiment-9 Step cut Cutting depth : 5*5+3+2+1+0.5 μm | KIMMExperiment - 정 값 비교 Cutting depth : 3+2+1+0.5 μm |
|--|--|

| | |
|-----------------|-----------------|
| Constant of (a) | Constant of (a) |
|-----------------|-----------------|

Max. Error : $E_y=0.04$, $E_z=0.03$ N 측정오차 $E_y : 0.03, 0.01, 0.02, 0.04$ N

(c) (d)

Fig 2. Cutting fore of prism pattern



| | |
|--|--|
| KIMMExperiment Workpiece : 6:4 brass Tool : SCD, $a=5.72^\circ$, $w=120 \mu\text{m}$ Pitch : 150 μm Cutting depth : 15*10+12+10+8+5+3+1 μm Cutting speed : 1,200 mm/min | KIMMExperiment Cutting depth : 5,10,15,20,25,30,35,40 μm |
|--|--|

| | |
|---|-----------------|
| Least Square Method Constant : $C_y=0.00168$, $n_y=0.149$ Constant : $C_z=0.00021$, $n_z=0.468$ | Constant of (a) |
|---|-----------------|

Max. Error : $E_y=0.12$, $E_z=0.05$ N Max. Error : $E_y=0.21$, $E_z=0.08$ N

(a) (b)

Fig 3. Cutting force of rectangular pattern

3. 일정 절삭력 가공조건 추천

3.1 일정 절삭력 가공조건 선정 알고리즘

일정한 절삭력 가공조건을 계산하는 알고리즘은 Fig. 4의 순서도와

$$F_{avg} = \frac{\sum_{i=0}^n F_i}{n} \quad (8)$$

$$d_{avg} = \frac{\sum_{i=0}^n d_i}{n} \quad (9)$$

$$d_i += (1 - \frac{F_i}{F_{avg}}) d_{avg} \quad (10)$$

$$F_{max} - F_{min} < 0.01 \quad (11)$$

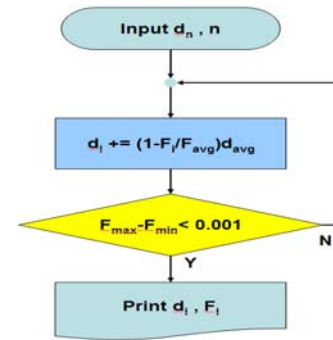
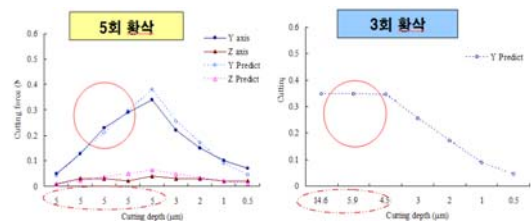


Fig 4. Cutting depth computation algorithm

Fig 5 (b)와 같이 절삭력이 약 3.5 N이 되도록 황삭 가공 깊이를 증가시키면 공구수명과 가공 품질을 유지하면서 깊이 단계를 5회에서 3회로 줄임으로써 생산성을 높일 수 있다.



| | |
|--|---|
| KIMMExperiment : 9회 절삭 Cutting depth : 5*5회+3+2+1+0.5 μm | 일정 절삭력 가공조건 : 7회 절삭 Cutting depth : 14.6+5.9+4.5+3+2+1+0.5 μm |
|--|---|

(a) 5 step roughing (b) 3 step roughing

Fig 5. Cutting depth for constant cutting force

4. 결론

절삭력해석 모델을 응용하여 일정한 절삭력을 가지는 절삭 깊이를 추천하는 프로그램을 개발함으로써 기업의 생산성향상에 도움이 되도록 하였다. 프리즘패턴 황삭을 일정 절삭력 가공깊이 선정을 통해 5단계에서 3단계로 가공 시간을 줄여 생산성의 향상이 예상된다.

후기

이 연구는 산업자원부 전략기술개발사업의 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

- (1) S.W. Lee, D.J. Lee, E.U. Lee, T.J. Je, 2001, "Micro-groove cutting experiments using micro-machining system", Spring conference of KSMTE 2001, pp.263~268.
- (2) J.W. Chung, J.G. Kim, T.J. Ko, H.S. Kim, J.K. Park, 2004, "Research on the machinability in micro machining", Spring conference of KSMTE 2004, pp.99~104.