미세가공 절삭력 예측기술 개발

Development of Cutting Force Prediction Method for Micro Pattern Machining

*이종민[1], 레두이[1], #김수진[1], 이석우[2], 제태진[3]
*J. M. Lee[1], D. Y. Le[1], #S. J. Kim(sujinkim@gnu.ac.kr)[1] , S. W. Lee[2] , T. J. Je[3]
[1] 경상대학교 기계항공공학부, [2]한국생산기술연구원, [3]한국기계연구원

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/μm^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_v : Predicted cutting force (N)
d_i : i-th cutting depth (μm)
a : Angle of tool (rad)
p : Pitch of pattern (μm)
w : Width of tool (μm)

1. 서론

현대사회의 차량에서 집안의 가전제품에 이르기까지 수많은 제품에 TFT-LCD의 사용이 점점 늘어가고 이러한 패널의 크기는 점점 크게 두께는 얇게 변해가고 있는 추세이다. 이러한 TFT-LCD 패널의 은 자체적인 발광 기능이 없기 때문에 뒷면의 백라이트 패널의 필요성이 있다. 좀 더 얇은 두께를 추구하고 있는 현재 도광판의 기능과 프리즘 시트의 기능을 합쳐 두께를 줄이기에 이르렀다. 이러한 기능을 가진 시트의 양산을 위하여 초정밀 미세가공의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 상황 속에서 시트의 제작에 필요한 대형 롤의 제작에서 능력을 향상시키기 위하여 제품 가공의 중요 인자중 하나로 인식되고 있는 절삭력을 해석하기 위한 노력이 이어지고 있다.

미세가공용 장비와 V형 다이아몬드 인서트 공구로 미세홈 가공이 가능하며[1,2], 가공 중 발생하는 미세 절삭력을 측정할 수 있게 되었다[3]. 절삭력 해석에 대한 연구로는 전단력과 마찰력의 합으로 절삭력을 계산하는 방법[4]과 비절삭에너지와 절삭단면의 곱으로 절삭력을 예측하는 방법[5,6]이 연구되었다.

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 증가하는 현상이 발생하게 된다. 이는 전단력을 기초로 한 절삭이론으로는 설명 되지 않음을 뜻한다. 본 연구에서는 비절삭에너지를 고려한 모델과 실제 측정된 절삭력을 기반으로한 절삭력예측 모델을 적용 하였다. 절삭공정 시 절삭 깊이는 Fig 1. 과 같이 공구의 날끝 반경과 같아지거나 그 이하가 되며 일반적인 절삭현상과는 달리 공구의 날끝 부분에서는 공구의 경사각이 음의 경사각을 가지게 된다. 이러한 이유로 초정밀 가공에서는 소재의 절삭과 동시에 문지름이 발생하게 되어 절삭력 해석 모델로 치수효과를 고려한 모델을 적용 하였다.

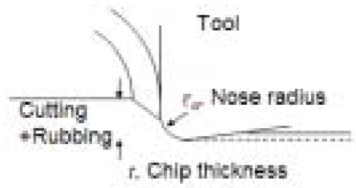


Fig 1. Micro machining and nose radius

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 프로그램은 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 μm로 일반 절삭에 비해 작아 칩 두께가 작아지면 비절삭 에너지가 커지는 치수효과(Size effect)를 고려한다.

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

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

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

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.

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin(\frac{a}{2}))^{-n}(d_i^2 - d_{i-1}^2)\tan(\frac{a}{2}),$$

$$\text{if } 2d\tan(\frac{a}{2}) < p \qquad (4)$$

$$F_c = C((d_i - d_{i-1})\sin(\frac{a}{2}))^{-n}(d_i - d_{i-1})p,$$

$$\text{if } 2d\tan(\frac{a}{2}) \geq p \qquad (5)$$

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

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

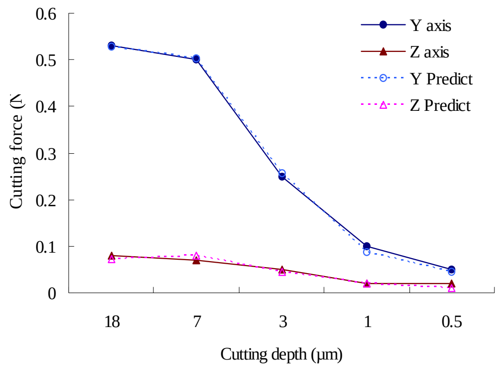
일반단면의 경우 식 (7)과 같이 각 단면의 절삭력을 계산하고 더해 절삭력을 예측한다.

$$F_c = \sum K_k A_k \qquad (7)$$

2.3 실험과 예측 결과 비교 검증

미세 가공 절삭력 해석 알고리즘과 Fig 2 (a)의 측정 절삭력으로 예측모델을 완성해 Fig 2 (b)와 (c)의 절삭력을 예측함으로써 실험과 모델의 예측 결과를 비교 검증하였다. Fig 2 (a)의 프리즘패턴 가공 절삭력으로 부터 최소자승법으로 실험 상수 C 와 n 을 계산하였다. 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 얻는 실험상수를 실험 (b)와 (c)에 적용해 오차 0.04 N이하로 예측되어 미세 절삭력 예측 알고리즘이 프리즘 패턴의 미세가공에 적용 가능함을 보았다.

사각패턴의 미세 가공 실험에서 측정된 Fig 3 (a)의 절삭력으로 부터 최소자승법으로 실험 상수 C 와 n 을 얻어 Fig 3 (b) 실험의 절삭력을 예측하였다. 같은 공구와 같은 재질의 소재를 사용한 Fig 3 (b) 실험의 측정값과 예측 값의 오차가 0.21 N으로 사각 패턴의 경우에도 미세 가공 절삭력 예측 알고리즘이 적용 될 수 있음을 보았다.

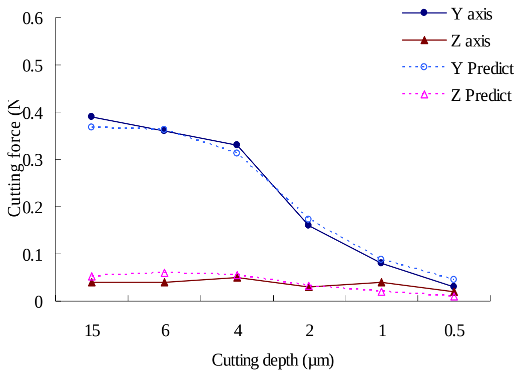


KIMMExperiment – 5 Step cut
Workpiece : 6:4 brass
Tool : SCD, V 90∘
Pitch : 50 μm
Cutting depth : 18+7+3+1+0.5μm
Cutting speed : 1,2000mm/min

Least Square Method
Constant : C_y=0.00174, n_y=0.026
Constant : C_z=0.00035, n_z=0.172

Max. Error : Ey=0.01, Ez=0.01 N

(a)

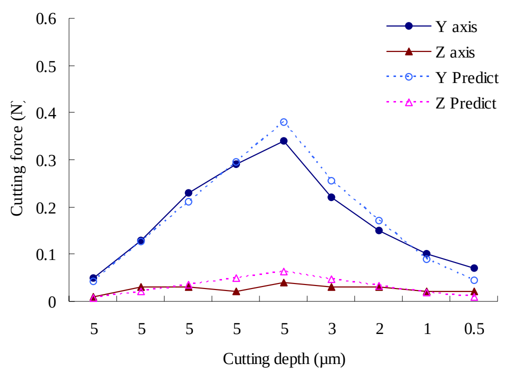


KIMMExperiment – 6 Step cut
Cutting depth : 15+6+4+2+1+0.5 μm

Cnstant of (a)

Max. Error : Ey=0.02, Ez=0.02 N

(b)

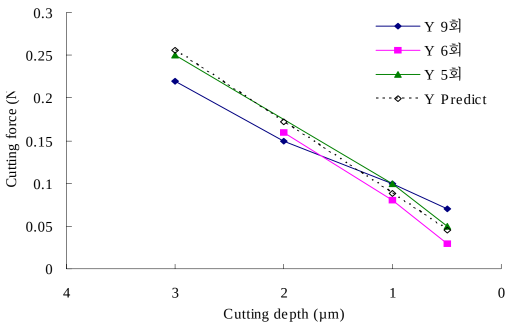


KIMMExperiment – 9 Step cut
Cutting depth : 5*5+3+2+1+0.5 μm

Constant of (a)

Max. Error : Ey=0.04, Ez=0.03 N

(c)



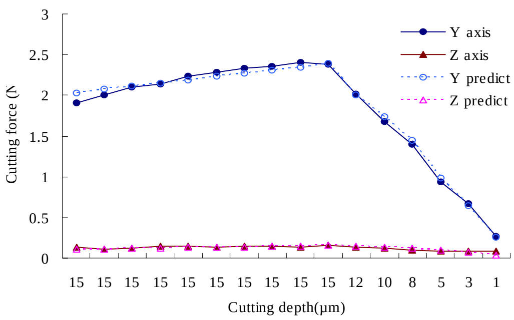
KIMM Experiment – 측정 값 비교
Cutting depth :3+2+1+0.5 ㎛

Constant of (a)

측정오차 Ey : 0.03, 0.01, 0.02, 0.04 N

(d)

Fig 2. Cutting fore of prism pattern

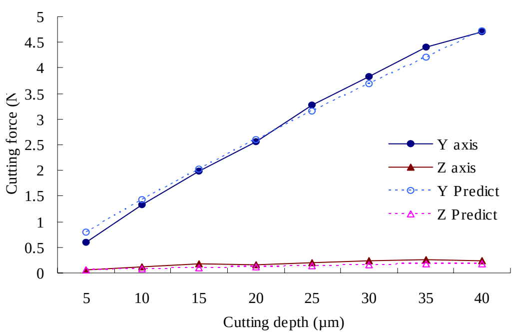


KIMM Experiment
Workpiece : 6:4 brass
Tool : SCD, a=5.72°, w=120 ㎛
Pitch : 150 ㎛
Cutting depth : 15*10+12+10+8+5+3+1 ㎛
Cutting speed : 1,200 mm/min

Least Square Method
Constant : C_y=0.00168, n_y=0.149
Constant : C_z=0.00021, n_z=0.468

Max. Error : Ey=0.12, Ez=0.05 N

(a)



KIMM Experiment
Cutting depth : 5,10,15,20,25,30,35,40㎛

Constant of (a)

Max. Error : Ey=0.21, Ez=0.08 N

(b)

Fig 3. Cutting force of rectangular pattern

3. 일정 절삭력 가공조건 추천

3.1 일정 절삭력 가공조건 계산 알고리즘

일정한 절삭력 가공조건을 계산하는 알고리즘은 Fig 4의 순서도와 같다. 사용자가 총 가공깊이와 절삭횟수를 입력하면 각 절삭 단계의 절삭력을 계산하여 편차에 평균 절삭 깊이를 곱해 각 가공 깊이를 보정하게 된다. 이 과정을 반복해 절삭력의 차이가 0.001 N 이하가 되면 일정 절삭력 가공조건을 출력한다.

초기 값인 최종깊이와 절삭횟수를 지정하여 절삭력공식 식 (6)로 부터 절삭력을 구하여 식 (8)로부터 절삭력의 평균을 구한다. 그리고 최종절삭 깊이와 절삭횟수로부터 식 (9)를 이용하여 평균 절삭 깊이를 구할 수 있게 된다. 이로부터 나온 값들을 식 (10)에 대입하여 각각의 깊이를 보정하고 절삭력의 값들이 판별 조건 식 (11)를 만족 하게 되면 최종 예측 절삭력은 오차 0.001 N 이내로 들어가게 되고 일정한 절삭력을 가지는 절삭 깊이를 도출하게 된다.

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

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

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

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

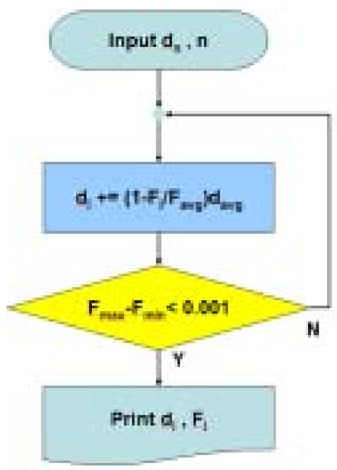
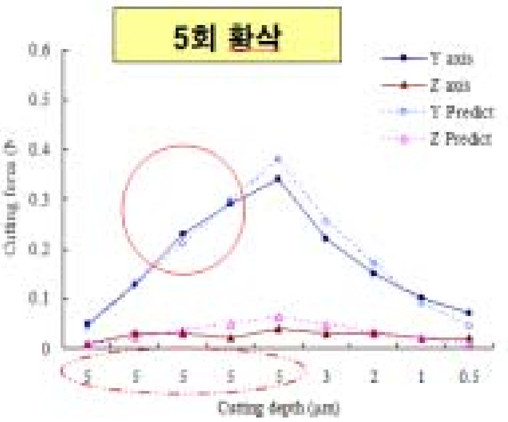


Fig 4. Cutting depth computation algorithm

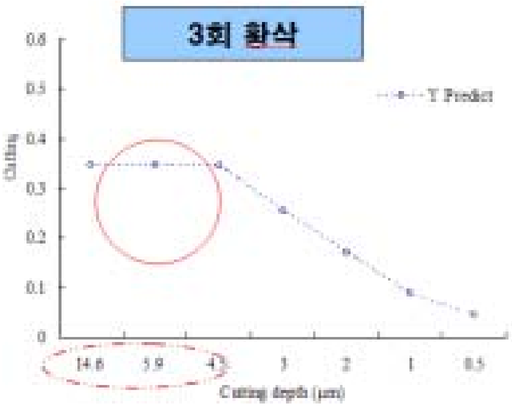
3.2 일정 절삭력 가공조건 선정

미세 가공에서 황삭 가공 깊이를 일정하게 증가시킬 경우 가공 단면적의 변화로 절삭력이 점점 증가하게 된다. Fig 5 (a)의 경우 5 ㎛씩 5회 가공하면서 절삭력이 약 0.5 N에서 3.5 N까지 7배 차이를 보이고 있다. Fig 5 (b)와 같이 절삭력이 약 3.5 N이 되도록 황삭 가공 깊이를 증가 시키면 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

(a) 5 step roughing



일정절삭력가공조건: 7회 절삭
Cutting depth : 14.6+5.9+4.5+3+2+1+0.5 μm

(b) 3 step roughing

Fig 5. Cutting depth for constant cutting force

4. 결론

본 연구에서는 초정밀 미세가공에서 발생하는 절삭력에 대한 연구로서 측정 절삭력을 이용한 절삭력 예측 모델을 이용하여 일정한 절삭력을 가지는 가공 깊이를 출력하는 알고리즘을 구현하였다. 개발된 모델의 예측 절삭력과 측정된 절삭력의 차이가 프리즘에서는 0.04 N, 사각 패턴에서는 0.12 N으로 모델이 실제 절삭력을 잘 반영함을 확인하였다.

절삭력해석 모델을 응용하여 일정한 절삭력을 가지는 절삭 깊이를 추천하는 프로그램을 개발함으로써 기업의 생산성향상에 도움이 되도록 하였다. 프리즘패턴 황삭을 일정절삭력 가공깊이 선정을 통해 5단계에서 3단계로 줄일 수 있을 것으로 예측된다.

후 기

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.

(3) S.M. Hong, T.J. Je, D.J. Lee, J.C. Lee, 2005, "Micro machining characteristics of v-shaped single crystal diamond tool with ductile workpiece", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4, pp. 28~33.

(4) Y.S. Yoon, S.J. Lee,1993, "Cutting force prediction in single point diamond turning", Jornal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 6, pp.1456~1464.

(5) S.M. Son, 2003, "The effect of friction coefficient on minimum cutting thickness in micromachining", Pusan National University, Ph. D. thesis.

(6) H.U. Lee, D.W. Cho, J.K. Pa, 2005, "Analysis of cutting characteristics in micro machining using cutting force coefficient", Spring conference of KSMTE 2005, pp. 483~488.