

대면적 미세 그루빙 머신의 변위 오차 예측 Displacement Error Estimation of a Large-Surface Micro-Grooving Machine

*이희범¹, 이원재¹, #김석일²

*H. B. Lee¹, W. J. Lee¹, #S. I. Kim (sikim@kau.ac.kr)²

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원, ² 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Key words : Micro-grooving machine, Large-surface, Structural characteristic analysis, Response surface methodology

1. 서론

LCD 도광판, 연료 전지의 분리판 등과 같은 미세 형상 부품들의 대형화 및 고집적화가 요구되면서 대면적 미세 형상을 보다 효율적으로 가공할 수 있는 기술에 대한 필요성이 점점증하고 있다. 최근에는 미세 형상을 미소 절삭 공구로 직접 가공하는 방법이 주목을 받고 있는데, 그 이유는 표면 조도가 우수하고, 가공 가능한 재료나 형상도 다양하며, 고속 가공이 가능하기 때문이다. 본 연구에서는 42 인치 수준의 LCD 도광판 금형 가공용으로 연구 개발 중인 대면적 미세 그루빙 머신의 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 구조 변형이 가공 정밀도와 관련된 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 유한 요소 해석법과 실험 계획법을 토대로 분석하였다.

2. 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 설계

본 연구의 해석 대상인 대면적 미세 그루빙 머신의 형상과 제원은 Fig. 1과 Table 1에서 볼 수 있다. X축 이송계는 컬럼(column)을 가로지르는 크로스 빔(cross beam) 위에서 좌우 이송을 수행하고, Y축 이송계는 베드 위에서 전후 이송을 수행하며, Z축 이송계는 X축 이송계의 전면에 탑재된 상태에서 상하 이송을 수행한다. 그리고 B축 이송계는 Z축 이송계에 탑재된 상태에서 공구 교환을 위한 터릿(turret) 공구대의 각도 분할 기능(indexing)을 담당하고 있으며, C축 이송계는 Y축 이송계에 탑재되어 공작물의 선회 기능을 담당하고 있다. 특히 Z축 이송계의 테이블, B축 이송계와 터릿 공구대의 자중을 보상하기 위해서 카운터 밸런스 웨이트(counter balance weight)를 X축 이송계의 후면에 위치시키고, X축 이송 테이블에 설치된 롤러를 지나가는 와이어 로프를 이용해서 Z축 이송계의 테이블과 연결하였다.

대면적 미세 그루빙 머신의 X축, Y축 및 Z축 이송계는 모두 유정압 안내면, 리니어 모터(linear motor), 그리고 피드백(feedback) 신호 검출을 위해서 분해능 10 nm의 레이저 스케일(laser scale)을 채용하였고, B축 및 C축 이송계는 브러쉬리스(brushless) DC 서보 모터(servo motor), 그리고 피드백 신호 검출을 위해서 각각 분해능 0.0001°와 0.001°의 엔코

Table 1 Specifications of the large-surface micro-grooving machine

Dimensions		42"(1,000×800)
X-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 900 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10 nm resolution
	Feedrate	Max. 18 m/min
Y-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 1,320 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10 nm resolution
	Feedrate	Max. 9 m/min
Z-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 116 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 10 nm resolution
	Feedrate	Max. 3 m/min
B-axis	Bearing	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feedback	Encoder with ±0.0001° resolution
	Speed	10 rpm
C-axis	Bearing	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feedback	Encoder with ±0.001° resolution
	Speed	300 rpm

더(encoder)를 채용하였다. 특히 대면적 미세 그루빙 머신의 X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리를 각각 900, 1,320 및 116 mm로 설정함으로써 42인치 수준의 LCD 도광판을 가공할 수 있도록 설계하였다.

3. 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 및 변위 오차 예측

Fig. 2는 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 특성을 평가하기 위해서 유한 요소법을 토대로 구축한 구조 해석 모델을 보여주고 있다. 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델은 175,942개의 절점, 645,213개의 솔리드 요소(solid element), 그리고 1,204개의 매트릭스 요소(matrix element)로 구성되었다. 매트릭스 요소들은 X축, Y축 및 Z축 이송계의 유정압 안내면의 강성, B축과 C축 이송계의 유정압 베어링의 강성, 그리고 리니어 모터의 축방향 강성 등을 표현하기 위해서 사용된 것이다. 베드의 지지점들은 수직 방향에

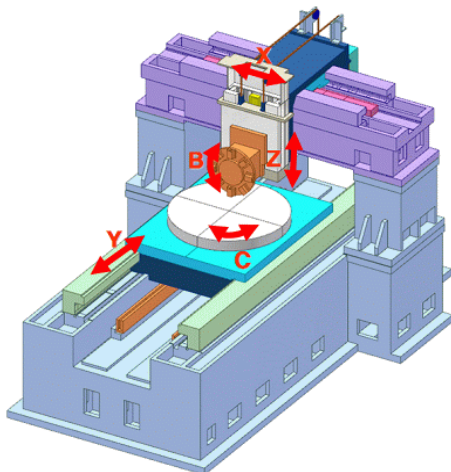


Fig. 1 Schematic diagram of a large-surface micro-grooving machine

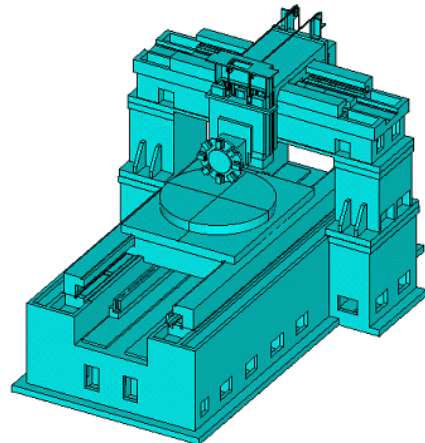


Fig. 2 Virtual prototype of the large-surface micro-grooving machine

대해서 구속하였고, 유정압 효과에 의한 구조 변형을 모사하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스 압력을 부하 조건으로 고려하였다.

Fig. 3은 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 모두 0 mm인 경우에 대한 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 변형 해석 결과를 나타낸 것이다. X축 이송계의 전면에 설치된 구조물들의 질량이 후면에 설치된 구조물들의 질량보다 크고, Z축 이송계에 연결된 와이어 로프의 연결 점이 Z축 이송계와 B축 이송계의 무게 중심을 통과하는 수직선 상에 위치하지 않기 때문에 X축, Z축 및 B축 이송계가 크로스 빔을 중심으로 선회하면서 공구 선단부가 아래로 처지는 것으로 나타났다. 이 때의 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 방향의 변위 오차는 각각 0.635, 82.312 및 -123.107 μ m이다.

본 연구에서는 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 조건들과 그에 대응되는 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값들로부터 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 도출하기 위해서 중심 합성 계획에 기반을 둔 반응 표면법을 이용하였다. X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치가 반응 표면법의 독립 변수에 해당하고, 공구 선단부의 변위 오차가 반응 변수에 해당한다. 정규화 독립 변수들을 이용해서 도출한 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델은 2차 회귀 모형의 형태를 갖는다.

Fig. 4는 공구 선단부의 변위 오차에 대한 측정값과 예측값을 각각 수평축 좌표값과 수직축 좌표값으로 활용해서 점들로 나타낸 것이다. 측정값과 예측값이 일치할수록 해당 점의 위치는 45°각도의 점선에 근접하게 되는데, 다양한 구조 해석 조건들로부터 얻은 점들이 45°각도의 점선에 근접하게 분포하고 있다는 사실로부터 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델의 신뢰도는 매우 높다고 판단된다.

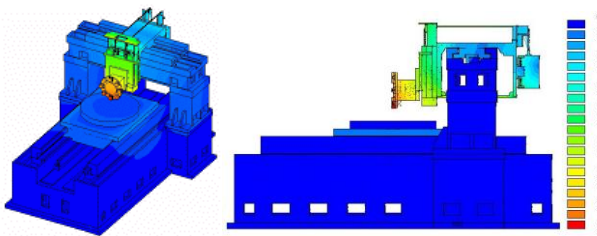


Fig. 3 Structural deformation of the large-surface micro-grooving machine

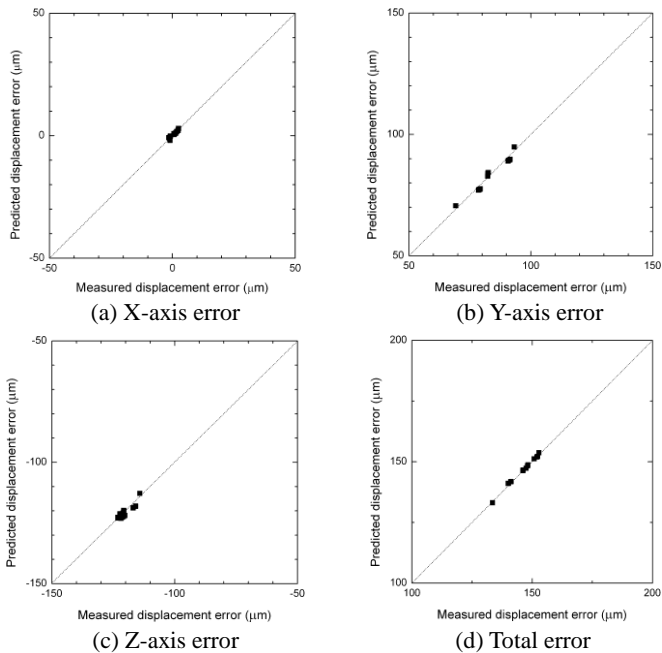


Fig. 4 Relation between measured and predicted displacement error at tool tip

Z축 이송계의 이송 위치를 고정시킨 상태에서 X축과 Y축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차는 X축에 대해서 점 대칭 형상이고, 다른 변위 오차들은 X축에 대해서 축 대칭 형상인데, 이것은 대면적 미세 그루빙 머신의 구조가 좌우 대칭이기 때문에 나타나는 현상이다. X축 이송계의 이송 위치를 고정시킨 상태에서 Y축과 Z축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 변위 오차는 모두 Y축에 대해서 축 대칭 형상이며, 이 경우에는 Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 그리고 Y축 이송계의 이송 위치를 고정시킨 상태에서 Z축과 X축 이송계의 이송 위치를 변화시켜가면서 산정한 공구 선단부의 X축 방향의 변위 오차는 Z축에 대해서 축 대칭 형상이고, 다른 변위 오차들은 X축에 대해서 축 대칭 형상이며, 이 경우에도 Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 대해서는 Z축 이송계의 이송 위치가 가장 큰 영향을 주고, 그 다음으로 X축 이송계의 이송 위치가 큰 영향을 주며, Y축 이송계의 이송 위치는 미미한 영향을 주는 것으로 나타났다. Z축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 영향을 주는 가장 큰 이유는 Z축 이송계의 이송 위치에 따라서 Z축 이송계의 구조 강성이 크게 변한다는 점에 있으며, X축 이송계의 이송 위치가 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차에 영향을 주는 가장 큰 이유는 X축 이송계의 이송 위치에 따라서 크로스 빔의 굽힘 변형 형태가 변한다는 점에 있다. 따라서 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차를 줄이기 위한 Z축 이송계와 크로스 빔의 고강성화 설계 대책이 필요하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 42인치 수준의 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 대면적 미세 그루빙 머신을 개발하는 과정에서의 시행착오를 줄이고, 체계적인 설계 기술의 축적과 성능 개선을 도모하기 위하여 초기 설계 단계에서 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치에 따른 구조 변형이 가공 정밀도와 관련된 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 검토하였다. 특히 구조 해석 모델을 이용한 구조 변형 해석 및 공구 선단부의 변위 오차의 예측 모델을 이용한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 이송 위치의 교호 작용 분석을 통해서 실험적으로 파악하기 어려운 공구 선단부의 변위 오차의 발생 원인을 규명하였다. 그리고 대면적 미세 그루빙 머신의 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 무엇보다도 공구 선단부의 변위 오차의 최대 편차를 줄이기 위한 Z축 이송계와 크로스 빔의 고강성화 설계 대책이 필요하다.

후기

본 연구는 지식경제부에서 주관하는 "대면적 미세 그루빙 머신 개발" 과제의 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Park, C.H. and Song, C.K., "Large-Surface Micro-Machining Machine Technology," Annual Report of KSME, 39-44, 2008.
2. Lee, W.J., Lee, H.B., Lee, H.D., and Kim, S.I., "Structural Characteristic Analysis and Error Estimation of a Large-Surface Micro-grooving Machine," Spring Conference of KSPE, 1031-1032, 2009.