

FEA 를 이용한 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 설계 개선 Structural Design Improvement of a Large-Surface Micro-Grooving Machine Based on a Finite Element Analysis

*이원재¹, 이희범¹, #김석일²

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

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

Key words : Structural design improvement, Large-surface, Micro-grooving, Finite element analysis

1. 서론

미세 그루빙 가공은 미소 절삭 공구로 미세 형상을 직접 가공하는 방법으로써 다양한 형태의 3차원 미세 형상을 다양한 소재에 신속하게 가공할 수 있다는 점에서 최근 많은 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 42인치급 LCD 도광판 급형을 가공할 수 있는 대면적 미세 그루빙 머신의 구조적 문제점을 검토하기 위해서 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델을 구축한 후 FEA 기법을 이용하여 X축, Y축 및 Z축 이송 테이블의 위치와 공구 선단부의 변위 오차 사이의 상관 관계를 파악하였다. 그리고 그 결과를 토대로 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 설계 개선 대책을 도출하였고, 구조 설계 개선의 유효성을 입증하였다.

2. 대면적 미세 그루빙 머신의 구조와 제원

본 연구의 해석 대상인 대면적 미세 그루빙 머신의 구조와 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 대면적 미세 그루빙 머신에서는 장시간의 그루빙 가공이 가능하도록 공구 교환을 위한 터릿(turret) 공구대가 B축 이송계에 장착되어 있다. 그리고 B축 이송계를 탑재한 상태에서 상하 이송을 수행하는 Z축 이송계는 컬럼(column)을 가로지르는 크로스빔(cross beam) 위에서 좌우 이송을 수행하는 X축 이송계의 전면에 위치하고 있다. 특히 상하 방향으로 움직이는 가동부(Z축 이송계의 테이블, B축 이송계와 터릿 공구대)의 자중을 보상하기 위해서 카운터 밸런스 웨이트(counter balance weight)를 X축 이송계의 후면에 위치시키고, 와이어 로프를 이용해서 Z축 이송계의 테이블과 연결하였다. Y축 이송계는 베드 위에서 전후 이송을 수행하고, 공작물의 선회를 담당하는 C축 이송계는 Y축 이송계에 탑재되어 있다.

대면적 미세 그루빙 머신의 X축, Y축 및 Z축 이송계는 모두 유정압 안내면, 리니어 모터(linear motor), 그리고 피드백(feedback) 신호 검출을 위한 분해능 10 nm의 레이저 스케일(laser scale)을 채용하고 있다. B축 및 C축 이송계에는 브러시리스 DC 서보 모터(brushless DC servo motor), 그리고 피드백 신호 검출을 위한 분해능 0.0001°와 0.001°의 엔코더(encoder)를 각각 적용하였다. 또한 X축, Y축 및 Z축 이송계의 행정 거리는 각각 900, 1,320 및 116 mm이다.

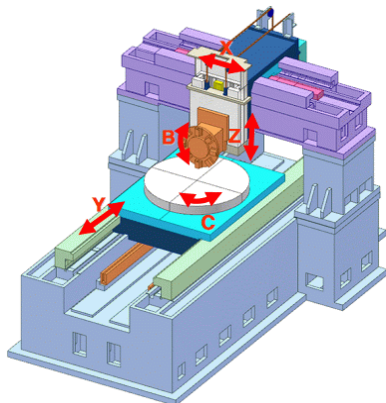


Fig. 1 Schematic diagram of a large-surface micro-grooving machine

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

3. 대면적 미세 그루빙 머신의 기존 모델 해석

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, B축 및 C축 이송계의 유정압 베어링의 강성, 그리고 리니어 모터의 축방향 강성 등을 표현하기 위해서 사용되었다. 베드의 지지점들은 수직 방향에 대해서 구속하였고, 유정압 효과에 의한 구조 변형을 모사하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스 압력을 부하 조건으로 고려하였다.

Fig. 2는 대면적 미세 그루빙 머신의 기존 모델이 기준 위치(X축, Y축 및 Z축 이송 테이블의 위치가 모두 0 mm인 상태)에 있을 때 기계 자중과 유정압 효과에 의해서 야기되는 구조 변형을 보여주고 있다. 이 경우에 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 변위 오차는 각각 0.635, -82.312 및 -123.107 μm로 예측되었다.

또한 기존 모델의 X축, Y축 및 Z축 이송이 가공 정밀도와 밀접한 관계를 갖는 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 분석하기 위해서 X축 이송 테이블의 위치가 -450, -225, 0, 225, 450 mm, Y축 이송 테이블의 위치가 -660, -330, 0, 330, 660 mm, 그리고 Z축 이송 테이블의 위치가 -58, 0, 58 mm인 경우에 대해서 구조 해석을 수행하였으며, 이송 테이블의 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향을 Fig. 3과 Table 2에 제시하였다. 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 변위 오차의 최대 편차는 X축 이송의 경우가 4.980, 0.121 및 2.236 μm, Y축 이송의 경우가 0.206, 0.231 및 0.809 μm, 그리고 Z축 이송의 경우가 0.466, 24.039 및 8.719 μm로 나타났다. 특히 Z축 이송의 경우에 공구 선단부의 Y축 변

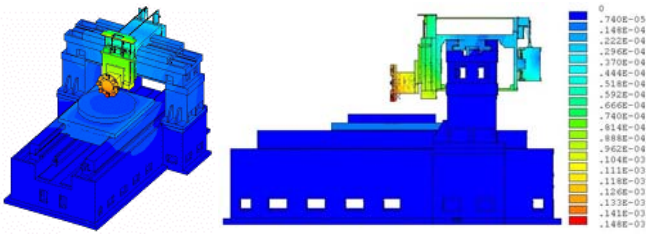


Fig. 2 Structural deformation of the original model of the large-surface micro-grooving machine

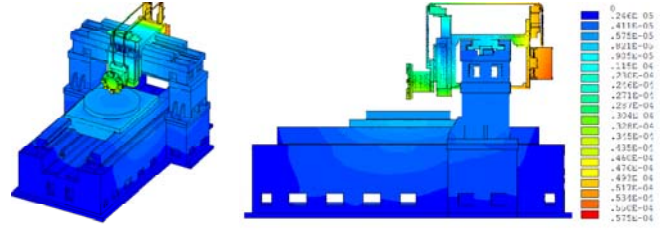


Fig. 5 Structural deformation of the improved model of the large-surface micro-grooving machine

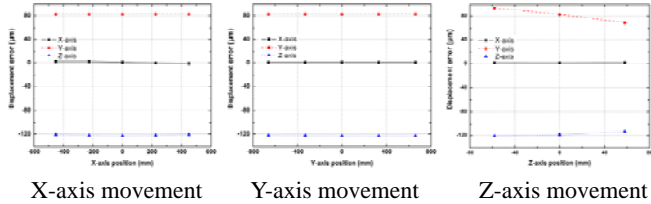


Fig. 3 Displacement errors of the tool post due to X-axis, Y-axis and Z-axis movement of the original model

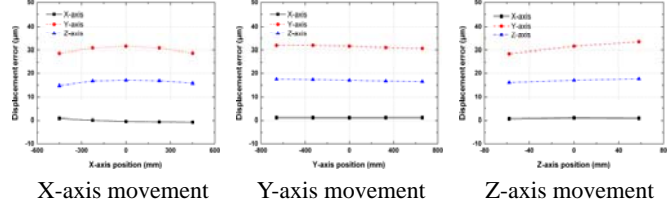


Fig. 6 Displacement errors of the tool post due to X-axis, Y-axis and Z-axis movement of the improved model

Table 2 Displacement error of the tool post due to X-axis, Y-axis and Z-axis movement of the original model

Movement	Displacement error (µm)		
	X-axis	Y-axis	Z-axis
X-axis	-2.478 ~ 2.502	82.305 ~ 82.426	-122.933 ~ -120.697
Y-axis	0.711 ~ 0.917	82.305 ~ 82.536	-123.120 ~ -122.311
Z-axis	0.916 ~ 1.382	69.173 ~ 93.212	-122.930 ~ -114.211

Table 3 Displacement errors of the tool post due to X-axis, Y-axis and Z-axis movement of the improved model

Movement	Displacement error (µm)		
	X-axis	Y-axis	Z-axis
X-axis	-0.705 ~ 0.809	28.761 ~ 31.558	14.817 ~ 17.014
Y-axis	1.101 ~ 1.119	30.601 ~ 31.885	16.433 ~ 17.474
Z-axis	0.631 ~ 1.001	28.572 ~ 31.557	16.009 ~ 17.588

위 오차의 최대 편차가 24.039 µm로 매우 크게 나타났는데, 이 현상은 상하 방향으로 움직이는 가동부의 자중을 보상하기 위해서 Z축 이송계의 테이블에 설치한 와이어 로프의 후크(hook)가 가동부의 질량 중심보다 91.8 mm 후방에 위치하고 있기 때문에 발생하는 것으로 확인되었다.

4. 대면적 미세 그루빙 머신의 개선 모델 해석

본 연구에서는 공구 선단부의 변위 오차에 대한 Z축 이송의 영향을 최소화하기 위해서 Z축 이송계의 테이블에 설치한 와이어 로프의 후크 위치를 최대한 가동부의 질량 중심에 근접시키는 구조 개선 설계를 수행하였다. 와이어 로프의 후크 위치와 가동부의 질량 중심은 일치하는 것이 가장 바람직하지만, 터릿 공구대와 구조적 간섭 때문에 후크는 가동부의 질량 중심보다 12.5 mm 전방에 설치하였다. 구조 설계 개선 전/후의 후크 위치와 가동부의 질량 중심 사이의 관계는 Fig. 4에 제시하였다.

Fig. 5는 대면적 미세 그루빙 머신의 개선 모델이 기준 위치에 있을 때 기계 자중과 유점압 효과에 의해서 야기되는 구조 변형을 보여주고 있다. 이 경우에 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 변위 오차는 각각 0.812, 32.811 및 17.014 µm로 나타났는데, 기존 모델에서의 공구 선단부의 X축, Y축, Z축 변위 오차가 각각 0.635, -82.312 및 -123.107 µm이라는 점을 고려하면 구조 설계 개선에 의해서 공구 선단부의 변위 오차가 상당 수준 감소함을 알 수 있다.

또한 X축 이송 테이블의 위치가 -450, -225, 0, 225, 450

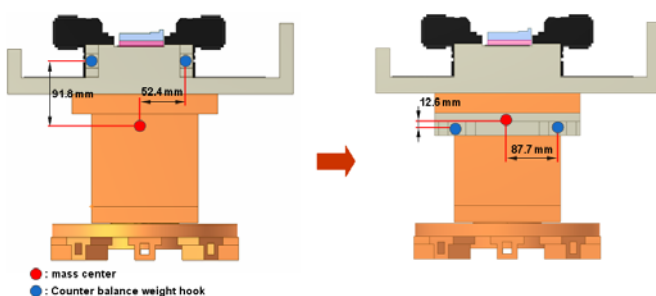


Fig. 4 Structural design improvement

mm, Y축 이송 테이블의 위치가 -660, -330, 0, 330, 660 mm, 그리고 Z축 이송 테이블의 위치가 -58, 0, 58 mm인 경우에 대해서 구조 해석을 수행하여 얻은 개선 모델의 이송 테이블의 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 미치는 영향은 Fig. 6과 Table 3에 제시하였다. 개선 모델의 공구 선단부의 X축, Y축 및 Z축 변위 오차의 최대 편차는 X축 이송의 경우가 1.514, 2.797 및 2.197 µm, Y축 이송의 경우가 0.018, 1.284 및 1.031 µm, 그리고 Z축 이송의 경우가 0.370, 2.985 및 1.579 µm로 나타났다. 특히 Z축 이송의 경우에 공구 선단부의 Y축 변위 오차의 최대 편차가 기존 모델이 24.039 µm이고, 개선 모델이 2.985 µm라는 사실로부터 구조 개선 설계의 효과를 다시 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 42인치급 LCD 도광판 금형을 가공할 수 있는 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 설계 개선을 도모하기 위해서 FEA 기법을 토대로 X축, Y축 및 Z축 이송 테이블의 위치와 공구 선단부의 변위 오차 사이의 상관 관계를 분석하였다. 특히 분석 결과로부터 Z축 이송계의 테이블에 설치한 와이어 로프의 후크 위치가 공구 선단부의 변위 오차에 큰 영향을 준다는 사실을 확인하였고, 공구 선단부의 변위 오차에 대한 Z축 이송의 영향을 최소화하기 위해서 후크 위치를 최대한 가동부의 질량 중심에 근접시키는 구조 개선 설계를 수행한 후 그 유효성을 입증하였다.

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., and Kim, S.I., "Displacement Error Estimation of a Large Surface Micro-Grooving Machine," Fall Conference of KSPE, 677-678, 2009.