

# 대면적 미세 그루빙 머신의 구조 특성 해석 및 오차 예측 Structural Characteristic Analysis and Error Estimation of a Large-Surface Micro-Grooving Machine

\*이원재<sup>1</sup>, 이희범<sup>1</sup>, 이형대<sup>1</sup>, #김석일<sup>2</sup>

\*W. J. Lee<sup>1</sup>, H. B. Lee<sup>1</sup>, H. D. Lee<sup>1</sup> and #S. I. Kim (sikim@kau.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원, <sup>2</sup> 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Key words : Ultra-precision machine, Large-surfaces, Micro-grooving, Structural characteristic analysis, Error estimation

## 1. 서론

차세대 성장 동력 산업 중에서 반도체, 디스플레이 및 차세대 전지 분야는 우리나라가 상당 수준의 시장 주도권을 확보하고 있다. 이들 분야에서 사용되는 미세 형상 부품들은 미세 방전 가공이나 마이크로 전자 에칭(etching) 가공에 의해서 대부분 제작되어 왔다. 그러나 2.5 차원 형상의 부품 가공에 적합한 미세 방전 가공이나 마이크로 전자 에칭 가공은 최근 시장에서 요구되고 있는 다양한 3 차원 형상의 부품들을 생산하는 데 적용하기 어려운 상황이다. 따라서 3 차원 형상 가공이 가능하고, 다양한 재료에 대응할 수 있으며, 미세 형상 부품을 유연하고 신속하게 가공할 수 있는 기계 가공 방식의 하나인 미세 그루빙 가공이 새로운 대안으로 주목을 받고 있다. 특히 본 연구에서는 대면적 미세 형상 부품을 가공하기 위해서 개발하고 있는 미세 그루빙 머신의 구조 특성과 오차를 설계 단계에서 예측함으로써 구조 설계에 대한 타당성을 검토하는 데 초점을 두었다.

## 2. 미세 그루빙 머신의 구조 설계

### 2.1 기계 구조

본 연구의 해석 대상인 미세 그루빙 머신의 형상과 제원은 Fig. 1 과 Table 1 에서 볼 수 있다. 미세 그루빙 머신은 터릿(turret) 공구대가 장착된 A 축 이송계의 각도 분할(indexing) 기능에 의해서 공구가 교환되는 구조이다. A 축 이송계를 탑재한 상태로 상하 이송을 수행하는 Z 축 이송계는 컬럼(column)을 가로지르는 크로스 빔(cross beam) 위에서 좌우 이송을 수행하는 X 축 이송계의 전면에 위치하고 있다. 특히 Z 축 이송계와 A 축 이송계의 자중을 보상하기 위해서 카운터 밸런스 웨이트(counter balance weight)를 X 축 이송계의 후면에 위치시키고, 로프를 이용해서 Z 축 이송계와 연결하였다. 그리고 공작물의 선화를 담당하는 C 축 이송계를 탑재한 Y 축 이송계가 베드 위에서 전후 이송을 하면서 대면적 미세 형상의 그루빙 가공을 수행하게 된다.

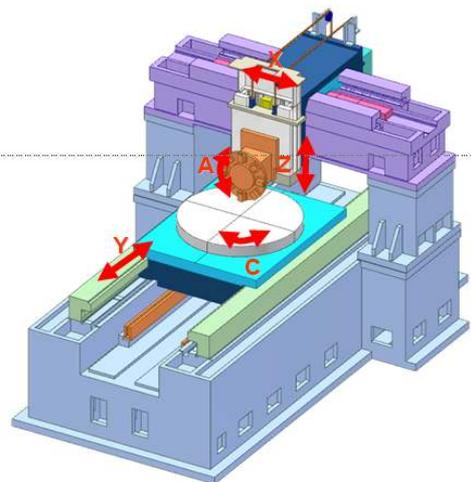


Fig. 1 Schematic diagram of a micro-grooving machine

Table 1 Specifications of the 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
A-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

### 2.2 이송계

미세 그루빙 머신의 가공 정밀도는 이송계들의 운동 정밀도와 강성에 의해서 큰 영향을 받기 때문에 이송계들에 대한 고정밀화와 고강성화 설계는 매우 중요하다. 이러한 점 때문에 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계는 모두 유정압 안내면, 리니어 모터(linear motor), 그리고 피드백(feedback) 신호 검출을 위해서 분해능 10 nm의 레이저 스케일(laser scale)을 채용하였고, A 축 및 C 축 이송계는 유정압 베어링, 브러쉬리스(brushless) DC 서보 모터(servo motor), 그리고 피드백 신호 검출을 위해서 각각 분해능 0.0001°와 0.001°의 엔코더(encoder)를 채용하였다.

미세 그루빙 머신의 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 행정 거리는 900, 1,320 및 116 mm이며, 최대 이송 속도는 18, 9 및 3 m/min 이다. 그리고 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스(recess) 압력은 모두 1 MPa로 설정하였다.

## 3. 미세 그루빙 머신의 구조 특성 해석 및 오차 예측

### 3.1 구조 해석 모델

미세 그루빙 머신의 구조 해석 모델은 175,942 개의 절점, 645,213 개의 솔리드 요소(solid element), 그리고 1,204 개의 매트릭스 요소(matrix element)로 구성되었다. 특히 매트릭스 요소들은 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 유정압 안내면과 리니어 모터의 강성, 그리고 A 축 및 C 축 이송계의 유정압 베어링의 강성 등을 표현하기 위해서 도입되었다. 특히 정위치 제어 상태의 리니어 모터는 가동자와 고정자 사이의 상대 운동이 없다고 볼 수 있기 때문에 본 연구에서는 리니어 모터의 축 방향 강성은 모두 무한 강성으로 가정하였다. 미세 그루빙 머신의 지지점들은 모두 구속하였고, 유정압 효과를 고려하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링에서의 리세스 압력을 모두 모델링하였다.

### 3.2 자중에 의한 구조 변형

Fig. 2 는 기계 자중과 유정압 효과에 의해서 야기되는 미세 그루빙 머신의 구조 변형을 보여주고 있다. Z 축 이송계와 A 축 이송계의 자중이 카운터 밸런스 웨이트에 의해서 보상되었음에도 불구하고 X 축, Z 축 및 A 축 이송계가 크로스 빔을 중심으로 선회하면서 공구대 선단이 하방으로 처지는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 X 축 이송계의 전면에 부착된 구조물들의 질량이 후면에 부착된 구조물들의 질량보다 크고, Z 축 이송계에 대한 로프의 연결점이 Z 축 이송계와 A 축 이송계의 무게 중심을 통과하는 수직선 상에 위치하지 않는 데 기인한다고 판단된다. 특히 이러한 상태에서 예측된 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향의 변위 오차는 각각 0.635, -82.312 및 -123.107  $\mu\text{m}$  이며, C 축 회전 테이블 상면의 평탄도는 1.341  $\mu\text{m}$  이다.

### 3.3 C 축 회전 테이블 상면의 중심 변위와 평탄도

공작물이 장착되는 C 축 이송계가 탑재된 Y 축 이송 테이블이 전후 방향으로 움직이면 그 위치에 따라서 다른 형태의 구조 변형이 야기되기 때문에 C 축 회전 테이블 상면의 중심 변위와 평탄도가 달라지게 된다. 본 연구에서는 Y 축 이송 테이블의 위치가 C 축 회전 테이블 상면의 중심 변위와 평탄도에 미치는 영향을 보여주고 있다. C 축 회전 테이블 상면 중심의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향 변위는 0.101 ~ 0.225  $\mu\text{m}$ , -0.279 ~ -0.094  $\mu\text{m}$ , -3.590 ~ -3.151  $\mu\text{m}$ , 그리고 C 축 회전 테이블 상면의 평탄도는 1.212 ~ 1.468  $\mu\text{m}$  로 예측되었다. 특히 C 축 회전 테이블 상면 중심의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향 변위의 최대 편차가 0.124, 0.373 및 0.439  $\mu\text{m}$  로 매우 작다는 사실은 C 축 회전 테이블의 변위에 큰 영향을 미치는 베드와 Y 축 이송계가 고강성 구조로 설계되었음을 보여준다.

### 3.3 공구대 선단의 변위

미세 그루빙 머신의 X 축, Y 축 및 Z 축 이송이 가공 정밀도와 밀접한 관계를 갖는 공구대 선단의 변위에 미치는 영향을 분석하기 위해서 X 축 이송 테이블의 위치가 -450, -225, 0, 225, 450 mm, Y 축 이송 테이블의 위치가 -660, -330, 0, 330, 660 mm, 그리고 Z 축 이송 테이블의 위치가 -58, 0, 58 mm 인 경우에 대해서 구조 해석을 수행하였다. 이러한 이송 테이블들의 위치가 공구대 선단의 변위에 미치는 영향은 Fig. 4 와 Table 2 에 제시하였다. 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향 변위의 최대 편차는 X 축 이송의 경우가 4.980, 0.121 및 2.236  $\mu\text{m}$ , Y 축 이송의 경우가 0.206, 0.231 및 0.809  $\mu\text{m}$ , 그리고 Z 축 이송의 경우가 0.466, 24.039 및 8.719  $\mu\text{m}$  로 나타났다. 특히 Z 축 이송의 경우에 공구대 선단의 Y 축 및 Z 축 방향 변위의 최대 편차가 매우 크게 나타나는데, 이러한 현상은 X 축 이송계의 전면부 부착 질량

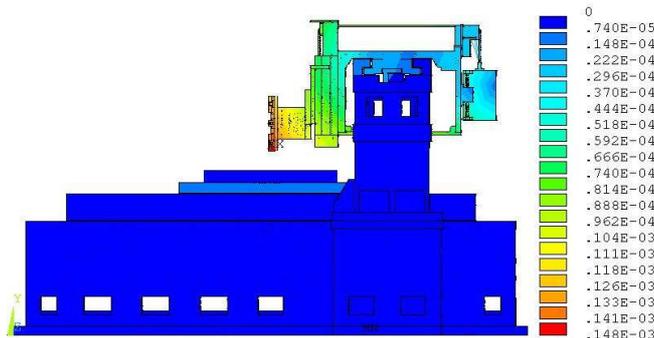


Fig. 2 Structural deformation of the micro-grooving machine

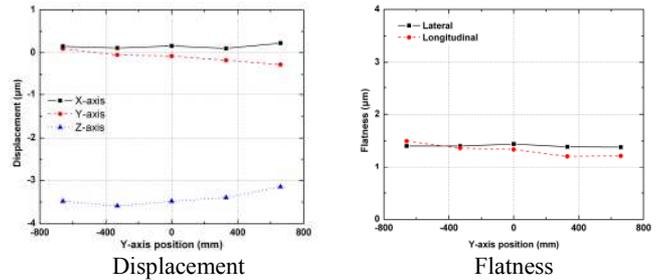


Fig. 3 Displacement and flatness of the C-axis table due to Y-axis movement

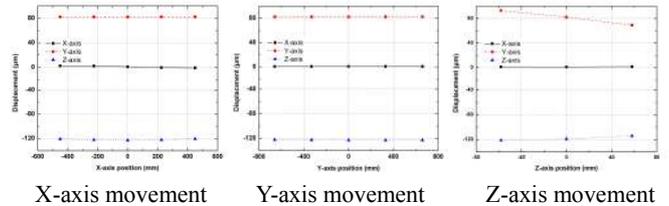


Fig. 4 Displacement of the tool post due to X-axis, Y-axis and Z-axis movement

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

Movement	Displacement ( $\mu\text{m}$ )		
	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

과 후면부 부착 질량의 차이, Z 축 이송계에 대한 로프의 연결점 위치 선정 오류, 그리고 Z 축 이송 테이블의 위치에 따른 Z 축 이송계의 강성 변화 등이 복합적으로 작용해서 야기되는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 대면적 미세 형상 부품을 유연하고 신속하게 가공할 수 있는 미세 그루빙 머신의 구조 특성과 오차를 설계 단계에서 예측함으로써 구조 설계의 타당성을 검토하였다. X 축 이송계의 전면부 부착 질량이 후면부 부착 질량보다 크고, Z 축 이송계에 대한 로프의 연결점 위치 선정에 오류가 있기 때문에 X 축, Z 축 및 A 축 이송계가 크로스 빔을 중심으로 선회하면서 공구대 선단이 하방으로 처지는 현상이 나타났다. Y 축 이송에 의해서 야기되는 C 축 회전 테이블 상면의 중심 변위의 최대 편차가 매우 작다는 사실로부터 베드와 Y 축 이송계가 고강성 구조로 설계되었음을 확인하였다. Z 축 이송이 공구대 선단의 Y 축 및 Z 축 방향 변위의 최대 편차에 큰 영향을 주는 현상은 X 축 이송계의 후면부 부착 질량의 증대, Z 축 이송계에 대한 로프의 연결점 위치 조정 등을 통해서 해결할 수 있다.

## 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, pp.39~44 2008.
2. Kim, S. I. and Lee, W. J., "Structural Characteristic Analysis of an Ultra-Precision Machine for Machining Large-Surface Micro-Features," Spring Conference of KSME, pp.2253~2258, 2007.