

초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 온도 상승 및 열 변형 해석 Analysis of Temperature Rise and Thermal Deformation of an Ultra-Precision Machine for Machining Large-Surface Micro-Features

*이원재¹, #김석일²

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

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

Key words : Ultra-precision machine, Large-surfaces, Micro-features, Temperature rise, Thermal deformation

1. 서론

최근 LCD(liquid crystal display)의 도광판, 연료 전지의 분리판 등과 같이 한 변의 길이가 수백 mm 정도이고, 가공 깊이가 수십 μm 수준인 대면적 미세 형상 부품의 수요가 급증하고 있다. 이러한 추세에 따라서 대면적 미세 형상 부품을 효율적으로 가공할 수 있는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기에 대한 연구 개발의 필요성이 국내외적으로 적극 제기되고 있는 실정이다. 특히 이와 같은 개념의 초정밀 대면적 미세 형상 가공기는 전세계적으로도 초기 연구 개발 단계에 있는 관계로 설계나 제작과 관련된 기술들이 아직 정립되어 있지 않은 상태이다. 따라서 설계 및 제작 단계에서의 시행착오를 최소화하기 위해서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 구조 특성과 열 특성에 대한 체계적으로 평가가 필요하다. 본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 열 특성을 초기 설계 단계에서 검토하기 위해서 설계 도면을 토대로 열 해석 모델을 구축하고, 운전 조건과 이송 조건이 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 온도 상승과 열 변형에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 초정밀 가공기의 구조 및 제원

본 연구의 해석 대상인 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 형상과 제원은 Fig. 1 과 Table 1 에 각각 제시하였다. 초정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계는 모두 유정압 안내면과 리니어 모터, 그리고 C 축 이송계는 유정압 베어링과 브러쉬리스 DC 서보 모터를 채용하고 있다. 특히 유정압 안내면의 구조로는 레일이 유정압 베어링을 감싸는 양면 지지형 패드 방식의 역 구속형을 적용하였다. 유정압 안내면과 유정압 베어링으로 공급하는 기름의 압력은 1 MPa 이고, 20 °C 에서의 동 점도는 5 cSt 이다.

3. 초정밀 가공기의 열 특성 해석

3.1 열 해석 모델

본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 온도 상승과 열 변형을 해석하기 위해서 153,491 개의 절점과

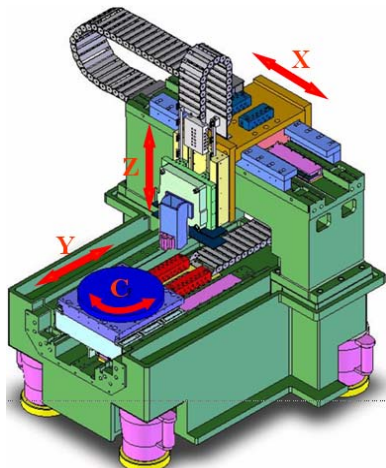


Fig. 1 Schematic diagram of an ultra-precision machine

Table 1 Specifications of the ultra-precision machine

Dimensions		1,300×1,200×1,200 mm (C-axis table ϕ 440)
X-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 550 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 5 nm resolution
	Accuracy	0.3 μm (straight), $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
Y-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 550 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 1 nm resolution
	Accuracy	0.3 μm (straight), $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
Z-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Linear motor with 120 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 1 nm resolution
	Accuracy	0.2 μm (straight), $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
C-axis	Bearing	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feedback	Encoder with $\pm 2''$ resolution
	Speed	Max. 1,000 rpm

645,295 개의 솔리드 요소(Solid70)로 구성된 열 해석 모델을 구축하였다. 또한 초정밀 가공기의 베드, 컬럼, 크로스빔, 테이블 등은 주철(GC300), C 축 회전축, 브래킷(bracket) 등은 강재(SCM440, SS400), 그리고 모터의 이동자와 고정자는 규소 강판 등으로 제작되었기 때문에 이러한 구조 재료들의 물성을 열 해석 모델에 모두 반영하였다. 유정압 안내면과 유정압 베어링의 유막, 그리고 리니어 모터와 브러쉬리스 DC 서보 모터의 고정자와 이동자 사이의 공기층에 의한 열 전달 효과와 함께, 대기 접촉면에서의 대류 열 전달에 의한 냉각 효과도 모델링과정에서 고려하였다.

열 특성을 해석하는 과정에서 대기 온도는 일정하고, 유정압 안내면과 유정압 베어링으로 공급되는 기름의 온도는 대기 온도와 같다고 가정하였다. 초정밀 가공기의 운전 조건으로는 X 축, Y 축 및 Z 축 테이블의 이송 속도가 모두 120 m/min 인 것으로 상정하였으며, 그 경우에 대한 X 축, Y 축 및 Z 축 유정압 안내면의 수평면 부분에서의 발열량은 3.6, 0.9 및 4.2 W, 그리고 수직면 부분에서의 발열량은 2.7, 0.5 및 2.1 W 로 예측되었다. 또한 X 축, Y 축 및 Z 축 리니어 모터의 발열량은 4.9, 4.5 및 3.7 W 로 산정되었다.

3.2 초정밀 가공기의 온도 상승

초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 온도 상승 분포는 Fig. 2 에서 볼 수 있으며, 최대 온도 상승은 1.49 °C 로 Y 축 리니어 모터에서 나타났다. 특히 Y 축 리니어 모터에서 발

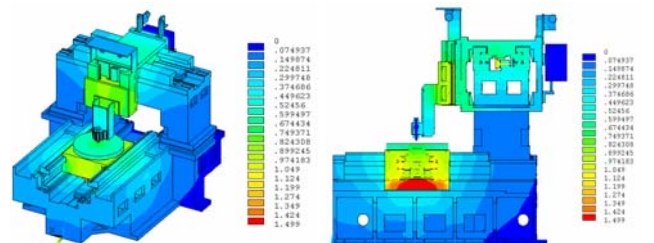


Fig. 2 Temperature rise of the ultra-precision machine

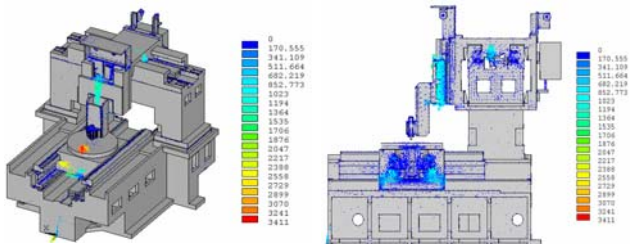


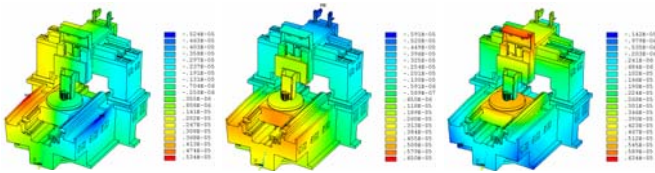
Fig. 3 Heat flux of the ultra-precision machine

생한 열은 테이블의 온도 상승을 상대적으로 높게 유발시키고 있는데, 이러한 현상은 Fig. 3에 제시한 열 유속의 해석 결과에서 알 수 있듯이 Y축 리니어 모터에서 발생한 열이 베드를 통해서 외부로 빠져나가기 어렵기 때문인 것으로 파악되었다. 그리고 초정밀 가공기의 최대 온도 상승이 1.49 °C로 매우 낮게 예측되었다는 사실로부터 초정밀 가공기의 열적 안정성은 매우 높을 것으로 판단된다.

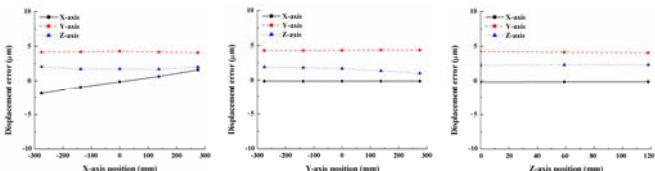
3.3 초정밀 가공기의 열 변형

본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 온도 상승에 대한 해석 결과를 토대로 열 변형 해석을 수행하였으며, 기준 위치에서의 열 변형 해석 결과는 Fig. 4에 제시하였다. 그리고 기준 위치에서의 공구대 선단의 X축, Y축 및 Z축 방향의 열 변위는 각각 -0.152, 4.272 및 1.665 μm로 평가되었다.

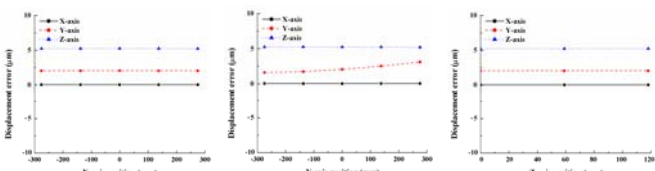
초정밀 가공기의 X축, Y축 및 Z축 이송이 가공 정밀도와 밀접하게 관련된 공구대 선단과 C축 테이블 상면의 열 변위에 미치는 영향을 규명한 결과는 Figs. 5와 6에 제시하였다. 그리고 그 결과들을 토대로 최대 열 변위 오차를 산정한 것은 Table 2에 나타내었다. 공구대 선단의 경우, X축 이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 3.442, 0.198 및 0.147 μm, Y축 이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 0.013, 0.250 및 0.911 μm, 그리고 Z축 이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 0.043, 0.022 및 0.060 μm로 나타났다. 또한 C축 테이블 상면의 경우, X축 이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 0.008, 0.027 및 0.0247 μm, Y축 이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 0.018, 0.514 및 0.056 μm, 그리고 Z축



(a) X-axis deformation (b) Y-axis deformation (c) Z-axis deformation
Fig. 4 Thermal deformation of the ultra-precision machine



(a) X-axis movement (b) Y-axis movement (c) Z-axis movement
Fig. 5 Thermal displacement of the tool post due to table movement



(a) X-axis movement (b) Y-axis movement (c) Z-axis movement
Fig. 6 Thermal displacement of the C-axis table due to table movement

Table 2 Max. displacement errors of the ultra-precision machine

		X-axis movement	Y-axis movement	Z-axis movement
Tool post	X-axis	3.442 μm	0.013 μm	0.043 μm
	Y-axis	0.198 μm	0.250 μm	0.022 μm
	Z-axis	0.147 μm	0.911 μm	0.060 μm
C-axis table	X-axis	0.008 μm	0.018 μm	0.001 μm
	Y-axis	0.027 μm	0.514 μm	0.004 μm
	Z-axis	0.024 μm	0.056 μm	0.003 μm

이송에 따른 X축, Y축 및 Z축 방향의 최대 열 변위 오차는 0.001, 0.004 및 0.003 μm로 얻어졌다.

이러한 결과로부터 X축 이송의 경우에는 공구대 선단의 X축 방향의 열 변위가 가공 정밀도에 가장 큰 영향을 주고, Y축 이송의 경우에는 공구대 선단의 Z축 방향의 열 변위와 C축 테이블 상면의 Y축 방향의 열 변위가 가공 정밀도에 비교적 큰 영향을 주지만, Z축 이송의 경우에는 열 변위가 가공 정밀도에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단된다. 특히 초정밀 가공기의 Y축 이송이 공구대 선단의 Z축 방향의 열 변위에 비교적 큰 영향을 미치는 이유는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 Y축 이송에 의한 Y축 유정압 안내면과 리니어 모터에서의 발열이 테이블 외에도 베드 상면의 온도 상승을 유발하고, 그로 인해서 야기되는 베드 상면의 열 변형이 컬럼의 자세 변화를 유발함으로써 궁극적으로 공구대의 자세 변화도 일어나기 때문인 것으로 파악되었다.

4. 결론

본 연구에서는 유정압 안내면과 리니어 모터를 채용한 X축, Y축 및 Z축 이송계, 그리고 유정압 베어링과 브러쉬리스 DC 서보 모터를 채용한 C축 이송계로 구성된 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 열 특성을 초기 설계 단계에서 검토하기 위해서 설계 도면을 토대로 열 해석 모델을 구축하고, 운전 조건과 이송 조건이 초정밀 가공기의 온도 상승과 열 변형에 미치는 영향을 평가하였다.

초정밀 가공기의 최대 온도 상승은 1.49 °C로 Y축 리니어 모터에서 발생할 것으로 나타났는데, 이와 같이 최대 온도 상승이 매우 낮게 예측되었다는 사실로부터 초정밀 가공기의 열적 안정성은 매우 높을 것으로 판단된다. 또한 초정밀 가공기의 X축 이송에서는 공구대 선단의 X축 방향의 열 변위가 가공 정밀도에 가장 큰 영향을 주고, Y축 이송에서는 공구대 선단의 Z축 방향의 열 변위와 C축 테이블 상면의 Y축 방향의 열 변위가 가공 정밀도에 비교적 큰 영향을 주지만, Z축 이송에서는 열 변위가 가공 정밀도에 미치는 영향이 미미할 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 "대면적 미세 형상의 초정밀/지능화 가공 원천 기술 개발" 과제의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Anorad Linear Motor Division, "Linear Motor System – Motor Integration Manual," 1999.
2. Park, C. H. and Song, C. K., "Ultra Precision Machine Tools for Machining the Large Surface Micro Feature," Journal of KSPE, Vol. 22, No. 5, pp. 7-15, 2005.
3. Kim, S. I. and Cho, J. W., "Thermal Characteristic Analysis of an Ultra-precision Centerless Grinding Machine for Machining Ferrules," Journal of KSPE, Vol. 23, No. 1, pp. 198-200, 2006.
4. Park, C. H. et al., "Core Technology Development for Ultra Precision and Intelligent Machining to Generate Micro Features on Large Surfaces (II)," Annual Report of Korea's Ministry of Commerce, Industry and Energy, 2006.7.