

<학술논문>

초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 구조 특성 해석

김 석 일[†] · 이 원 재^{*}

(2007년 7월 16일 접수, 2007년 11월 5일 심사완료)

Structural Characteristic Analysis of an Ultra-Precision Machine for Machining Large-Surface Micro-Features

Seok-Il Kim and Won-Jae Lee

Key Words : Ultra-Precision Machine(초정밀 가공기), Large-Surface(대면적), Micro-Feature(미세 형상), Linear Motor(리니어 모터), Hydrostatic Guideway(유정압 안내면), Hydrostatic Bearing(유정압 베어링), Structural Characteristic Analysis(구조 특성 해석), Loop Stiffness(루프 강성)

Abstract

In recent years, research to machine large-surface micro-features has become important because of the light guide panel of a large-scale liquid crystal display and the bipolar plate of a high-capacity proton exchange membrane fuel cell. In this study, in order to realize the systematic design technology and performance improvements of an ultra-precision machine for machining the large-surface micro-features, a structural characteristic analysis was performed using its virtual prototype. The prototype consisted of gantry-type frame, hydrostatic feed mechanisms, linear motors, brushless DC servo motor, counterbalance mechanism, and so on. The loop stiffness was estimated from the relative displacement between the tool post and C-axis table, which was caused by a cutting force. Especially, the causes of structural stiffness deterioration were identified through the structural deformation analysis of sub-models.

1. 서 론

미소 절삭 공구를 이용한 미세 형상의 절삭 가공 방법은 성형 가공에 의한 실리콘 에칭(silicon etching),⁽¹⁾ LIGA(lithography, galvanofarming and abformung)^(2,3) 공정 등에 비해서 가공 선평이 상대적으로 미세하지 않지만, 표면 조도가 우수하고, 가공 가능한 재료나 형상도 다양하며, 고속 가공이 가능하기 때문에 급속히 성장하는 미세 형상 가공 분야에서 많은 주목을 받고 있다. 또한 형삭, 선삭, 밀링 공정 등과 같은 전통적인 절삭 가공 메커니즘(mechanism)을 그대로 적용할 수 있기 때문에 비교적 용이하게 새로운 공정에 대응할 수

있다는 것도 장점의 하나이다.⁽⁴⁾

이러한 장점에도 불구하고 미세 형상의 절삭 가공이 미세 방전 가공이나 LIGA 공정 등을 대체하지 못하고 있는 이유는 미세 형상 가공을 수행할 수 있는 초정밀 가공기의 핵심 요소 기술이 아직 완전하게 정립되지 않았다는 데 가장 큰 원인이 있다. 특히 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 부품을 수십~수백 nm의 정밀도로 가공할 수 있는 초정밀 가공기에 대한 연구는 국내외적으로 초기 단계에 머물러 있는 실정이다.

미세 형상 부품을 가공할 수 있는 초정밀 가공기의 연구는 전세계적으로 1990년대 초부터 시도되었는데, 그 대표적 개발 사례로는 일본 FANUC의 마이크로 급형 가공기 ROBO nano Ui를 들 수 있다.⁽⁵⁾ ROBO nano Ui는 자유 곡면의 가공이 가능하도록 5축 제어 구조로 구성되었으며, 모든 운동 요소에 공

[†] 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : sikim@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0176 FAX : (02)3158-4231

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학부

기 정압 방식을 적용함으로써 서브 나노 미터의 운동 분해능을 얻고 있다. 일본의 Sanyu Precision은 강재 마이크로 급형을 $\pm 2\sim 5\ \mu\text{m}$ 의 공차로 가공할 수 있는 고속 초정밀 밀링 머신을 개발했는데, 2.6 mm의 외경과 24 개의 치형을 갖는 기어의 급형 가공이 가능한 것으로 알려졌다.⁽⁶⁾ 그리고 독일의 Fraunhofer IPT(Institute for Production Technology)는 30nm의 이송량으로 안정하게 공구를 움직일 수 있는 마이크로 밀링 머신을 개발하여 $10\ \mu\text{m}$ 수준의 미세 형상까지 가공한 것으로 보고하였다.⁽⁶⁾ 그러나 이러한 가공기들은 가공 가능한 공작물의 크기가 비교적 작기 때문에 한 변의 길이가 수백 mm 정도의 미세 형상 부품을 가공하는 것은 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 미세 형상 가공기와는 달리 한 변의 길이가 수백 mm에 달하는 대면적 미세 형상 부품을 가공하기 위한 초정밀 대면적 미세 형상 가공기를 개발하는 과정에서의 시행 착오를 최소화함과 동시에 체계적인 설계 기술의 축적 및 성능 개선을 도모하기 위한 목적의 일환으로 초정밀 가공기의 설계 단계에서 구조적 특성을 평가하고, 그 결과를 토대로 구조 설계의 타당성을 검토하는 데 초점을 두었다. 이를 위해서 유정압 안내 방식과 리니어 모터 구동 방식을 기반으로 하는 문형 구조의 초정밀 가공기의 구조 해석 모델을 구축하고, 자중 및 절삭력이 초정밀 가공기의 구조 변형에 미치는 영향을 해석하였다. 특히 절삭력에 의해서 야기되는 공구대 선단과 C축 회전 테이블 상면 사이의 상대 변위를 토대로 초정밀 가공기의 루프 강성을 평가하였고, 다양한 서브 모델들에 대한 구조 변형 해석 결과를 토대로 실험적으로 파악하기 어려운 구조 강성의 저하 원인 및 변위 오차의 발생 원인을 규명하였다.

2. 초정밀 가공기의 구조 및 제원

2.1 초정밀 가공기

본 연구의 해석 대상인 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 형상과 주요 제원⁽⁷⁾은 Fig. 1과 Table 1에 제시하였다. 초정밀 가공기는 공구대가 탑재되는 Z축 이송계가 컬럼(column)을 가로지르는 크로스 빔(cross beam) 위에 설치된 X축 이송계의 전방 측면에 위치하고, C축 이송계가 베드 위에서 전후 방향으로 이송하는 Y축 이송계의 테이블 내에 위치함으로써 형상 가공 외에도 선삭 가공이 가능한 문형 구조로 되어 있다. 또한 초정밀 가공기의 4군데 모서리에 에어 스프링(air spring)을 설치함으로써 외부 진동이 가공 정밀도에 미치는 영

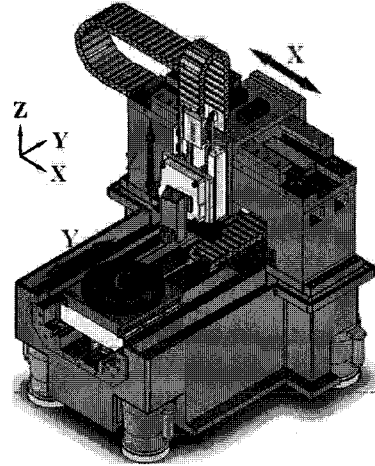


Fig. 1 Schematic diagram of an ultra-precision machine

Table 1 Specifications of the ultra-precision machine

Dimension	1,300×1,200×1,200 mm (C-axis table $\phi 440$)	
X-axis	Guideway	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 550 mm stroke
	Feedback	Laser scale with 5 nm resolution
	Accuracy	$0.3\ \mu\text{m}$ (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	$0.3\ \mu\text{m}$ (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	$0.2\ \mu\text{m}$ (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

향을 최소화하였고, 연직 방향으로 움직이는 Z축 이송 테이블과 공구대의 자중을 보상하기 위해서 X축 이송계의 후방 측면에 카운터밸런스 웨이트(counterbalance weight)를 추가하였다.

2.2 이송계

초정밀 가공기의 가공 정밀도는 이송계의 정밀도와 강성에 의한 영향을 많이 받기 때문에 X축, Y축 및 Z축 이송계에는 유정압 안내 방식과 리니어 모터 구동 방식을 적용하였고, C축 이송계에는 유정압 지지 방식과 브러시리스 DC 서보 모터 구동 방식을 사용하였다. 특히 초정밀 이송을 구현하기 위해서 X축 이송계는 분해능 5 nm의 레이저 스케일, Y축 및

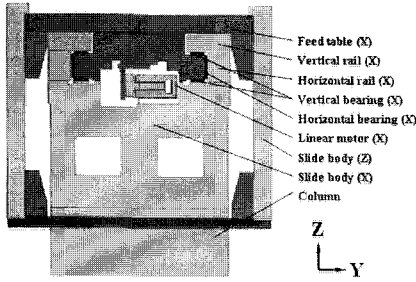


Fig. 2 Structure of X-axis feed system

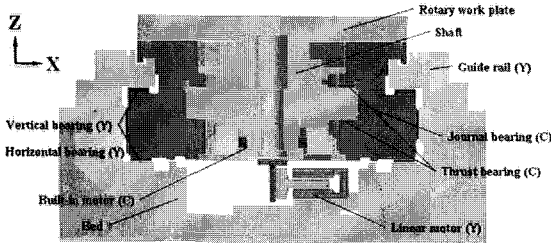


Fig. 3 Structure of Y-axis and C-axis feed systems

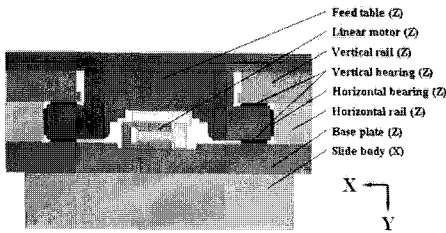


Fig. 4 Structure of Z-axis feed system

Z 축 이송계는 분해능 1nm 의 레이저 스케일, 그리고 C 축 이송계는 분해능 2"의 엔코더로부터 피드백 신호를 검출하도록 하였다. 또한 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 행정 거리는 각각 500, 500 및 60 mm 이고, 최고 이송 속도는 모두 120 m/min 이며, C 축 이송계의 최고 회전수는 1,000rpm 이다.

유정압 안내면의 범선 방향 강성은 이송 테이블에 설치되는 탐재물의 하중을 고려해서 설정해야 하고, 횡 방향 강성은 제품의 치수 정밀도에 큰 영향을 미치는 이송 테이블의 요(yaw) 오차가 작게 되도록 설정할 필요가 있기 때문에 유정압 안내면의 구조로는 레일이 유정압 베어링을 감싸는 양면 지지형 패드(double pad) 방식의 역 구속형⁸⁾을 채용함으로써 유정압 안내면의 강성과 조립성 향상을 도모하였다. 또한 이송 정밀도의 향상을 위해서 이송계의 좌우 대칭 구조 설계, 그리고 유정압 베어링의 리세스(recess) 압력에 의해서 발생하는 안내면 구조의 탄성 변형을 최소화하기 위한 레일의 고강성화 설계 등이 수행되었다. Figs. 2, 3 및 4 는 이러한 개념들을 반영해서 설계한 X 축, Y

Table 2 Specifications of the hydrostatic guideways and bearings

	Guideway	Normal/Radial	Lateral/Thrust
X-axis	Number of pads	4×2	3×2
	Stiffness	1,131 N/μm	758 N/μm
	Load capacity	8,393 N	5,621 N
	Supply pressure of oil	1 MPa	
Y-axis	Number of pads	4×2	3×2
	Stiffness	1,131 N/μm	758 N/μm
	Load capacity	8,393 N	5,621 N
	Supply pressure of oil	1 MPa	
Z-axis	Number of pads	4×2	3×2
	Stiffness	1,131 N/μm	758 N/μm
	Load capacity	8,393 N	5,621 N
	Supply pressure of oil	1 MPa	
C-axis	Number of pads	4	4
	Stiffness	325 N/μm	759 N/μm
	Load capacity	3,090 N	7,402 N
	Supply pressure of oil	1 MPa	

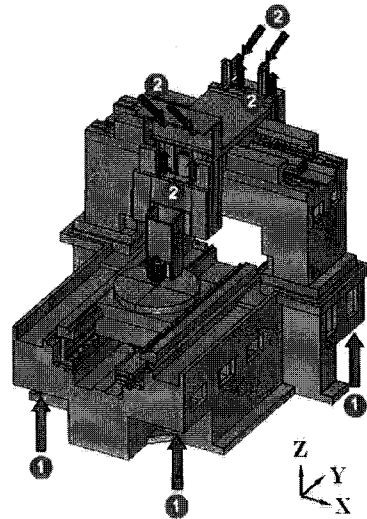


Fig. 5 Virtual prototype of the ultra-precision machine

축 및 Z 축 이송계의 유정압 안내면과 C 축 이송계의 유정압 베어링의 구조, 그리고 Table 2 는 그 재원을 보여주고 있다.

3. 초정밀 가공기의 구조 특성 해석

3.1 구조 해석 모델

본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 구조 특성을 평가하기 위해서 Fig 5와 같은 구조 해석 모델을 구축하였다. 초정밀 가공기의 구성을 이해하기 쉽도록 구조 해석 모델을 주요 모듈 별로 분해해서 나타낸 것은 Fig 6에서 볼 수 있다. 초정밀 가공기의 구조 해석 모델은 134,729 개의 절절, 그리고 534,911 개의 솔리드 요

Table 3 Material properties used for the virtual Prototype

Material	Density (kg/m ³)	Elasticity (GPa)	Poisson's ratio
GC300	7,300	90.0	0.25
SCM440	7,860	205.8	0.30
SS400	7,870	205.0	0.26
Fe-Si	7,700	21.3	0.30

Table 4 Displacement error of the tool post due to gravity

Movement	Displacement error (μm)		
	X-axis	Y-axis	Z-axis
X-axis	2.886 ~ -0.104	-30.636 ~ -30.923	-77.118 ~ -76.292
Y-axis	1.525 ~ 1.375	-30.762 ~ -31.053	-77.800 ~ -77.118
Z-axis	1.538 ~ 1.459	-29.227 ~ -33.799	-77.973 ~ -77.118

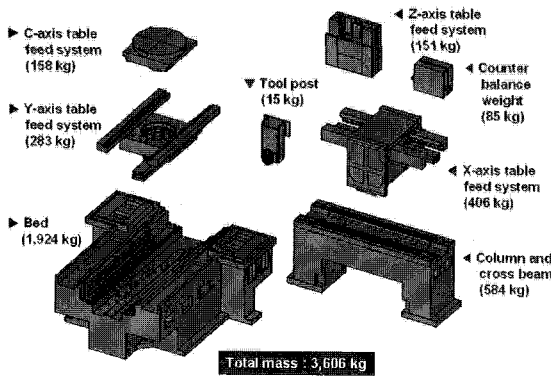


Fig. 6 Structural modules of the virtual prototype

소와 408 개의 매트릭스 요소로 구성되었다. 특히 매트릭스 요소들은 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 유정압 안내면의 강성, C 축 이송계의 유정압 베어링의 강성, 그리고 리니어 모터의 축 방향 강성 등을 표현하기 위해서 도입하였다. 본 연구에서는 리니어 모터의 위치가 페 루프 제어된다는 사실을 고려해서 리니어 모터의 축 방향 강성들을 무한 강성으로 가정하였다.

초정밀 가공기는 진동 절연을 위해서 설치한 에어 스프링에 의해서 4 군데 모서리가 지지되기 때문에 구조 해석에서는 Fig. 5 의 ①과 같이 에어 스프링의 지지점들을 연직 방향에 대해서만 구속하였다. 연직 방향으로 움직이는 Z 축 이송 테이블과 공구대의 자중을 보상하기 위해서 설치한 카운터밸런스 웨이트는 X 축 이송 테이블의 전방 측면과 후방 측면에 설치된 2 쌍의 롤러를 지나는 2 줄의 와이어를 통해서 Z 축 이송 테이블과 연결되는데, 이러한 자중 보상력 전달 경로 상에 존재하는 하중들의 작용 방향은 Fig. 5 의 ②와 같다. 또한 유정압 효과에 의한 구조 변형을 모사하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링의 리세스 압력을 해석 조건으로 고려하였다.

초정밀 가공기의 구조 해석에서 사용한 구조 재료의 물성은 Table 3 에 나타내었다. 또한 Fig. 6 에 나타낸 주요 모듈의 질량은 베드 1,924 kg, 컬럼과 크로스 빔 584kg, X 축 이송계 406kg, Y 축 이송계

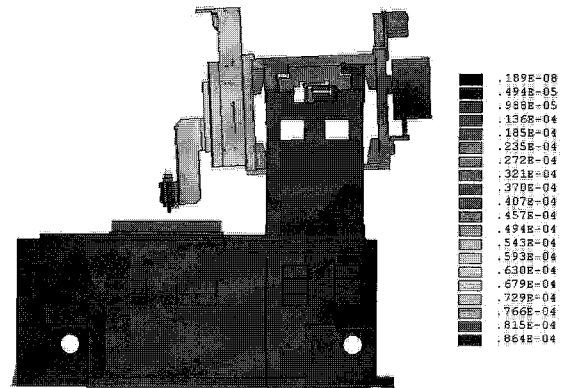


Fig. 7 Structural deformation of the virtual prototype due to gravity

283 kg, Z 축 이송계 151 kg, C 축 이송계 158 kg, 카운터밸런스 웨이트 85 kg, 공구대 15 kg 이며, 초정밀 가공기의 총 질량은 약 3,606kg 으로 평가된다.

초정밀 가공기의 구조 해석은 ANSYS 6.0 을 이용해서 수행하였고, 구조 해석에서의 기준 위치는 X 축 이송 테이블과 Y 축 이송 테이블이 행정 거리의 중앙, 그리고 Z 축 이송 테이블이 행정 거리의 하단에 있는 경우로 상정하였다.

3.2 자중에 의한 구조 변형

Fig. 7 은 자중과 유정압 효과를 고려해서 해석한 기준 위치에서의 초정밀 가공기의 구조 변형을 보여주고 있다. Fig. 7 에서 알 수 있듯이 연직 방향으로 움직이는 Z 축 이송 테이블과 공구대의 자중은 카운터밸런스 웨이트에 의해서 보상되지만, Z 축 이송 테이블 베이스의 자중은 보상되지 않기 때문에 그 영향으로 X 축 이송 테이블, Z 축 이송 테이블, 그리고 공구대가 X 축에 대해서 반시계 방향으로 선회하고 있다. 또한 기준 위치에서의 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 변위 오차는 1.485, -30.924 및 -77.118μm 이며, C 축 회전 테이블 상면의 평탄도는 2.012μm 로 나타났다.

공구대 선단의 변위 오차에 대한 축 이송의 영향은 Table 4 에 제시하였다. 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 변위 오차의 최대 편차는 X 축 이송의 경우 2.990, 0.287

및 0.826 μm , Y축 이송의 경우 0.150, 0.291 및 0.682 μm , 그리고 Z축 이송의 경우 0.079, 4.572 및 0.855 μm 로 나타났다. 이와 같이 이송에 따른 공구대 선단의 변위 오차의 최대 편차 들이 작다는 사실로부터 초정밀 가공기의 핵심 골격을 구성하는 베드, 컬럼 및 크로스 빔은 고강성 구조로 설계되었음을 확인할 수 있다.

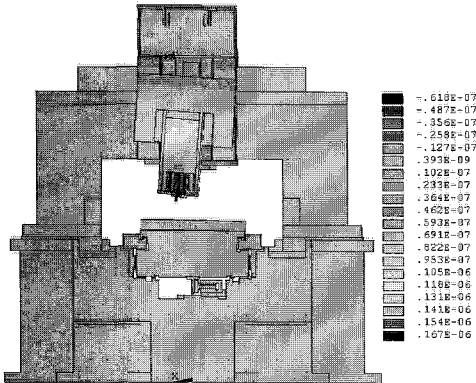


Fig. 8 X-axis structural deformation of the virtual prototype due to X-axis force

3.3 루프 강성

초정밀 가공기의 루프 강성은 공구대 선단과 C축 회전 테이블 상면에서 서로 반대 방향의 절삭력 1 N을 부가한 상태에서 해석한 공구대 선단과 C축 회전 테이블 상면 사이의 상대 변위 오차를 이용해서 예측하였다. 또한 C/Y축 이송계가 없는

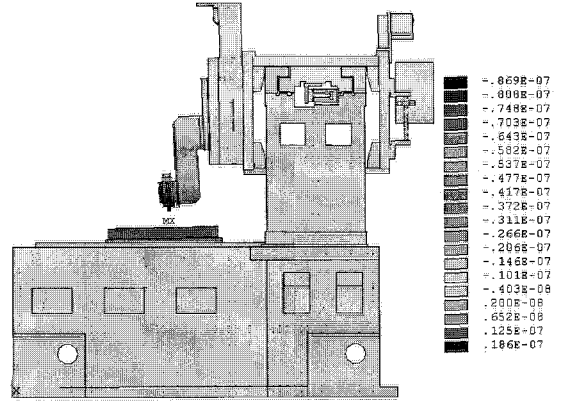
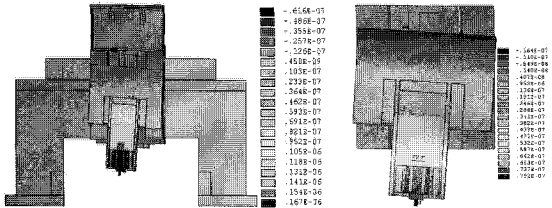
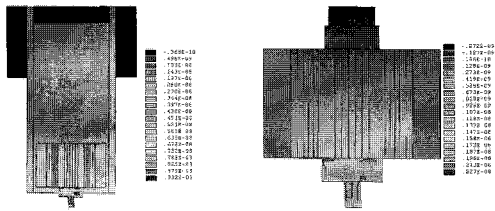


Fig. 10 Y-axis structural deformation of the virtual prototype due to Y-axis force

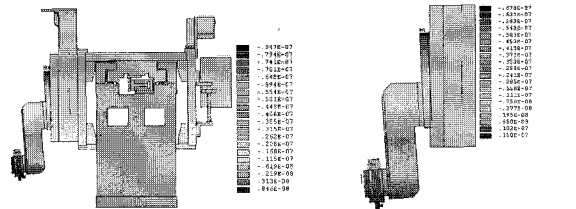


(a) Sub-model without C/Y axes (b) Sub-model without C/Y/X axes



(c) Sub-model without C/Y/X/Z axes (d) Sub-model with only tool post

Fig. 9 X-axis structural deformation of the virtual prototype due to X-axis force



(a) Sub-model without C/Y axes (b) Sub-model without C/Y/X axes

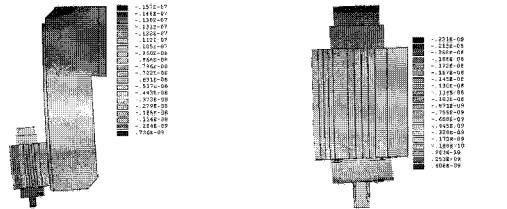


Fig. 11 Y-axis structural deformation of sub-models due to Y-axis force

Table 5 X-axis displacement error of the tool post due to X-axis force

Model	Disp. error ($\mu\text{m}/\text{N}$)	Ratio (%)
Full model	0.1639	100.0
Sub-model without C/Y axes	0.1637	99.8
Sub-model without C/Y/X axes	0.0770	47.0
Sub-model without C/Y/X/Z axes	0.0091	5.6
Sub-model with only tool post	0.0021	1.3

Table 6 Y-axis displacement error of the tool post due to Y-axis force

Model	Disp. error ($\mu\text{m}/\text{N}$)	Ratio (%)
Full model	0.0839	100.0
Sub-model without C/Y axes	0.0818	97.5
Sub-model without C/Y/X axes	0.0653	77.8
Sub-model without C/Y/X/Z axes	0.0154	18.4
Sub-model with only tool post	0.0020	2.4

서브 모델, C/Y/X 축 이송계가 없는 서브 모델, C/Y/X/Z 축 이송계가 없는 서브 모델, 그리고 공구대만으로 구성된 서브 모델에 대한 해석을 수행함으로써 이송계들이 루프 강성에 미치는 영향을 예측하였다.

Figs. 8, 10 및 12는 공구대 선단과 C 축 회전 테이블 상면에 서로 반대 방향의 절삭력 1 N 이 X

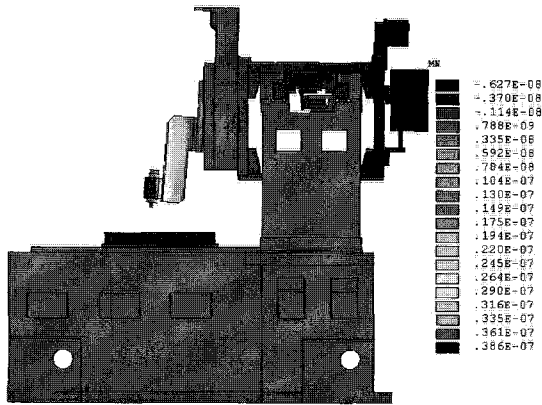


Fig. 12 Z-axis structural deformation of the virtual prototype due to Z-axis force

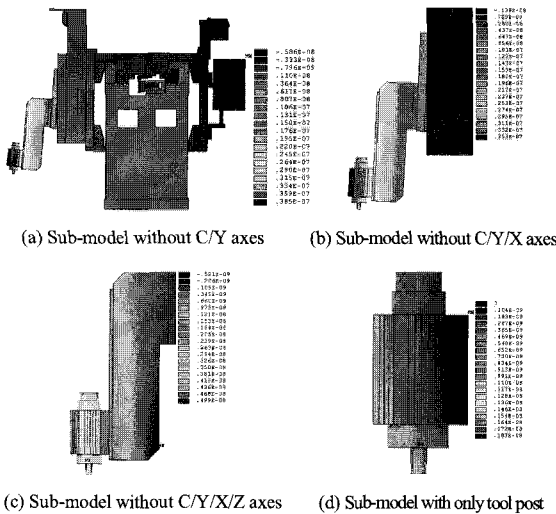


Fig. 13 Z-axis structural deformation of sub-models due to Z-axis force

Table 7 Z-axis displacement error of the tool post due to Z-axis force

Model	Disp. error (μm/N)	Ratio (%)
Full model	0.0349	100.0
Sub-model without C/Y axes	0.0347	99.4
Sub-model without C/Y/X axes	0.0319	91.4
Sub-model without C/Y/X/Z axes	0.0048	13.8
Sub-model with only tool post	0.0018	5.2

축, Y 축 및 Z 축 방향으로 작용할 때의 조정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향의 구조 변형을 기준 위치에 대해서 해석한 것이고, Figs. 9, 11 및 13은 공구대 선단에 절삭력 1 N 이 X 축, Y 축 및 Z 축 방향으로 작용할 때의 서브 모델들의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향의 구조 변형을 나타낸 것으로 좌측 상단에서부터 우측 하단으로 C/Y 축 이송계가 없는 서브 모델, C/Y/X 축 이송계가 없는 서브 모델, C/Y/X/Z 축 이송계가 없는 서브 모델, 그리고 공구대만으로 구성된 서브 모델에 대한 구조 변형을 보여주고 있다. 그리고 Tables 5, 6 및 7은 공구대 선단에 절삭력 1 N 이 X 축, Y 축 및 Z 축 방향으로 작용할 때의 서브 모델들의 X 축, Y 축 및 Z 축 방향의 구조 변형에 의한 공구대 선단의 변위 오차를 모델 별로 분석해서 제시한 것이다.

기준 위치에 대한 조정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 루프 강성은 각각 5.71, 9.86 및 25.36 N/μm으로 예측되었는데, 특히 X 축 루프 강성은 루프 강성의 설계 목표인 10 N/μm 보다 매우 낮게 평가되었다. 그리고 루프 강성에 지배적인 영향을 미치는 요소는 Tables 5, 6 및 7에서 알 수 있는데, X 축 루프 강성에 대한 영향도는 X 축 이송계와 Z 축 이송계가 각각 52.8%와 41.4%로 크게 나타났고, Y 축 루프 강성에 대한 영향도는 Z 축 이송계가 59.4%로 가장 크게 나타났으며, Z 축 루프 강성에 대한 영향도도 Z 축 이송계가 77.6%로 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서 조정밀 가공기의 루프 강성을 향상시키기 위해서는 X 축 이송계와 Z 축 이송계에 대한 고강성화 설계가 필요하며, 특히 다른 루프 강성들에 비해서 상대적으로 낮게 나타나는 X 축 루프 강성을 향상시키기 위해서는 X 축과 Z 축 이송 테이블의 요 운동을 억제하기 위한 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성에 대한 개선 대책이 요구되는 것으로 파악되었다.

Fig. 14는 X 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성, Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성, 그리고 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성이 각각 설계 강성의 50%부터 500%까지 변화하는 경우에 대한 조정밀 가공기의 X 축 루프 강성을 보여주고 있다. X 축 루프 강성은 X 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성을 설계 강성의 500% 수준까지 올렸을 경우 7.78 N/μm, Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성을 설계 강성의 500% 수준까지 올렸을 경우 7.00 N/μm로 나타나는데, 두 경우 모두 루프 강성의 설계 목표인 10 N/μm 보다 낮다. 또한 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성을 동시에 증가시키는 경우에는 설계 강성의 500% 수준에서

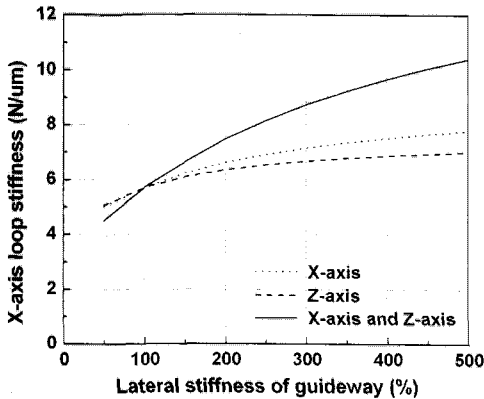


Fig. 14 Effect of the lateral stiffness of guideway on X-axis loop stiffness

X 축 루프 강성이 10.41 N/μm 로 얻어진다. 특히 루프 강성의 설계 목표인 10 N/μm 이상의 X 축 루프 강성을 얻기 위해서는 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성을 설계 강성의 440 % 수준 이상으로 향상시켜야 함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 리니어 모터와 유정압 안내면을 채용한 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계, 그리고 서보 모터와 유정압 베어링을 채용한 C 축 이송계로 구성된 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 구조 특성을 해석 및 평가하였다. 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과들을 정리하면 다음과 같다.

(1) 기준 위치에서 자중에 의해서 야기되는 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 변위 오차는 각각 1.485, -30.924 및 -77.118 μm 이며, C 축 회전 테이블 상면의 평탄도는 2.012 μm 이다.

(2) 연직 방향으로 움직이는 Z 축 이송 테이블과 공구대의 자중은 카운터밸런스 웨이트로 보상되지만, Z 축 이송 테이블 베이스의 자중은 보상되지 않기 때문에 그 영향으로 X 축 이송 테이블, Z 축 이송 테이블, 그리고 공구대가 X 축에 대해서 반시계 방향으로 선회한다.

(3) 공구대 선단의 X 축, Y 축 및 Z 축 변위 오차의 최대 편차는 X 축 이송의 경우 2.990, 0.287 및 0.826 μm, Y 축 이송의 경우 0.150, 0.291 및 0.682 μm, 그리고 Z 축 이송의 경우 0.079, 4.572 및 0.855 μm 이다. 이와 같이 공구대 선단의 변위 오차의 최대 편차에 미치는 이송의 영향이 작다는 사실로부터 초정밀 가공기의 핵심 골격을 구성하는 베드, 컬럼 및 크로스 빔이 고강성 구조로 설계되었음을 알 수 있다.

(4) 초정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 루프 강성

은 각각 5.71, 9.86 및 25.36 N/μm 로 예측된다. 특히 X 축 루프 강성은 X 축과 Z 축 이송계, Y 축 루프 강성은 Z 축 이송계, Z 축 루프 강성은 Z 축 이송계의 영향을 지배적으로 받는다.

(5) Y 축 및 Z 축 루프 강성에 비해서 상대적으로 낮게 나타나는 X 축 루프 강성을 향상시키기 위해서는 X 축과 Z 축 이송 테이블의 요 운동을 억제하기 위한 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성에 대한 개선 대책이 필요하다.

(6) 루프 강성의 설계 목표인 10 N/μm 이상의 X 축 루프 강성을 얻기 위해서는 X 축과 Z 축 유정압 안내면의 횡 방향 강성을 설계 강성의 440 % 수준 이상으로 향상시켜야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 핵심연구개발사업인 “대면적 미세 형상의 초정밀/지능화 가공 원천 기술 개발”의 세부 과제인 “고정밀 이송/제어 시스템 개발”의 지원으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Kovacs, G. T. A., Maluf, N. I. and Petersen, K. E., 1998, “Bulk Micromachining of Silicon,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 8, pp. 1536-1551.
- (2) Park, S. S., Hong, S. J., Jung, S. W., Cho, J. W. and Cho, N. K., 2000, “The Present State and Prospect of LIGA Technology,” *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 7, pp. 36-44.
- (3) Kathuria, Y. P., 2004, “L3: Laser, LIGA and Lithography in Microstructuring*,” *Journal of the Indian Institute of Science*, Vol. 84, pp. 77-87.
- (4) Park, C. H. and Song, C. K., 2005, “Ultra Precision Machine Tools for Machining the Large Surface Micro Feature,” *Journal of the KSPE*, Vol. 22, No. 5, pp. 7-15.
- (5) Inaba, S., 2001, “Achievements of the Micro-machine Project and the FANUC ROBOnano Ui Machine,” *Macromachine*, No. 37, p. 9.
- (6) Knights, M., 2002, “Micro Molds Make Micro Parts,” *Plastics Technology*, <http://www.ptonline.com/articles/200212fal.html>.
- (7) Park, C. H. et al., 2006, “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*.
- (8) Kim, S. I., Park, C. H. and Cho, S. J., 2004, “Structural Characteristic Analysis on the Hydrostatic Guide Way and Feeding System of a High-Precision Centerless Grinder for Machining Ferrules,” *Trans. of KSME (A)*, Vol. 28, No. 7, pp. 896-899.