

초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 유정압 안내면 및 리니어 모터의 강성 규명

Stiffness Identification of Hydrostatic Guideways and Linear Motors of an Ultra-Precision Machine for Machining Large-surface Micro-Features

*이원재¹, #김석일², 소상길¹

*W. J. Lee¹, #S. I. Kim (sikim@kau.ac.kr)², S. G. So¹

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

Key words : Ultra-precision machine, Large-surfaces, Micro-features, Stiffness identification, Hydrostatic guideways

1. 서론

공작기계의 구조 특성을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 구조 요소의 기하학적 모델, 구조 재료의 물성, 경계 조건 및 하중 조건 외에도 안내면, 베어링 등과 같은 결합부의 강성에 대한 설정이 정확해야 한다. 일반적으로 공작기계 결합부의 강성은 가공 오차나 조립 오차에 의해서 설계값과 상당히 많은 차이가 나타날 수 있으며, 이러한 경향은 표준화가 상당 수준 진행된 구름 안내면이나 구름 베어링보다 그렇지 않은 미끄럼 안내면이나 미끄럼 베어링의 경우가 더욱 두드러진다. 따라서 본 연구에서는 초정밀 가공기의 유정압 안내면 및 리니어 모터의 강성을 규명하기 위하여 그 특성이 잘 나타나는 위치와 민감한 방향(sensitive direction)에 대해서 하중을 부가하고, 그로 인해서 야기되는 변위를 측정된 후, 구조 해석 모델로부터 얻어지는 컴플라이언스의 예측값과 컴플라이언스의 측정값 사이의 오차를 최소화시키는 최적화 문제를 통해서 결합부의 강성을 규명하고자 하였다.

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 이다.

3. 초정밀 가공기의 유정압 안내면 및 리니어 모터의 강성 규명

3.1 초정밀 가공기의 컴플라이언스 측정

초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 X 축, Y 축, Z 축 및 C 축 이송계와 관련된 유정압 안내면, 유정압 베어링 등의

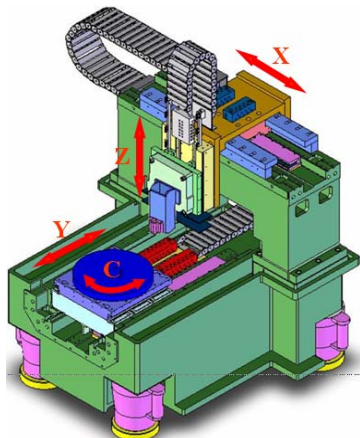


Fig. 1 Schematic diagram of an ultra-precision machine

Table 1 Specifications of the ultra-precision machine

Dimensions		1,300×1,200×1,200 mm (C-axis table φ440)
-a is	guide a	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 550 mm stroke
	Feed ac	Laser scale with 5 nm resolution
	ccurac	0.3 μm (straight), ±0.1 μm (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
-a is	guide a	Hydrostatic guideway
	Motor	Coreless linear motor with 550 mm stroke
	Feed ac	Laser scale with 1 nm resolution
	ccurac	0.3 μm (straight), ±0.1 μm (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
-a is	guide a	Hydrostatic guideway
	Motor	Linear motor with 120 mm stroke
	Feed ac	Laser scale with 1 nm resolution
	ccurac	0.2 μm (straight), ±0.1 μm (position / repeatability)
	Feedrate	Max. 120 m/min
-a is	bearing	Hydrostatic bearing
	Motor	Brushless DC servo motor
	Feed ac	Encoder with ±2" resolution
	peed	Max. 1,000 rpm

강성을 규명하기 위해서 필요한 컴플라이언스는 로드셀 CAS CI-5010A 에 의해서 측정되는 하중과 레이저 간섭계 Agilent 5519B 에 의해서 측정되는 변위로부터 도출하였다. 특히 지면과 접촉하는 베드에서 가까운 곳에서의 강성부터 규명하는 것이 용이하기 때문에 본 연구에서는 Y 축, C 축, X 축, 그리고 Z 축 이송계의 순으로 그 강성을 규명하였다.

초정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 법선 방향, 횡 방향, 그리고 리니어 모터의 축 방향 및 C 축 이송계의 축 방향 및 반경 방향 컴플라이언스는 각각의 테이블의 중앙 및 측면에 법선 방향, 횡 방향 그리고 축 방향 하중을 부가하고, 각 테이블 상에 위치한 각각 4 개의 측정점들로부터 측정된 변위의 평균값을 이용해서 평가하였다. 이러한 방식으로 도출된 X 축, Y 축, Z 축 유정압 안내면의 법선 방향, 횡 방향 그리고 리니어 모터의 컴플라이언스는 X 축의 경우 각각 0.0400, 0.3050, 그리고 0.0300 μm/N 로, Y 축의 경우 각각 0.0013, 0.0061 및 0.0000 μm/N 로, Z 축의 경우 각각 0.0509, 0.1121 그리고 0.0917 μm/N 로 나타났으며, C 축 이송계의 축 방향 및 반경 방향 컴플라이언스는 0.0031 및 0.0224 μm/N 으로 나타났다.

3.2 구조 해석 모델

초정밀 가공기의 구조 해석 모델은 134,729 개의 절점(node), 534,911 개의 솔리드 요소(solid element), 그리고 408 개의 매트릭스 요소(matrix element)로 구성되어 있다. 특히 매트릭스 요소들은 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 유정압 안내면과 리니어 모터의 강성, 그리고 C 축 이송계의 유정압 베어링의 강성 등을 표현하기 위해서 도입하였다. 또한 초정밀 가공기는 진동 절연용 에어 스프링에 의해서 지지되고 있는 4 군데 모서리에 대하여 수직 방향에 대해서 구속하였고 유정압 효과에 의한 구조 변형을 모사하기 위해서 유정압 안내면과 유정압 베어링의 리세스 압력을 해석 조건으로 고려하였다.

3.3 초정밀 가공기의 유정압 안내면 및 리니어 모터의 강성 규명

기계 구조물에 외력이 작용하면 필연적으로 구조 변형이 발생한다. 특히 정적 하중이 외력으로 작용하는 경우에는 기계 구조물의 강성 행렬, 변위 벡터 u , 그리고 외력 벡터 f 의 관계로 볼 수 있다.

기계 구조물의 강성 행렬에는 기하학적으로 입체 형태인 구조 요소들의 강성과 함께 구조 요소 사이에 존재하는 결합부들의 강성도 포함되어 있다. 특히 공작기계와 같은 기계 구조물의 구조 특성에 큰 영향을 주는 결합부의 형태로는 안내면과 베어링을 들 수 있다. 따라서 본 연구의 대상인 초정밀 대면적 미세 형상 가공기에 적용된 유정압 안내면과 유정압 베어링의 경우에는 미소한 가공 오차나 조립 오차에 의해서도 상당 수준의 강성 변화가 나타나게 된다.

본 연구에서는 초정밀 가공기의 X 축, Y 축 및 Z 축 이송계의 유정압 안내면의 법선 방향, 횡 방향 강성 및 리니어 모터의 축 방향 강성 그리고 C 축 이송계의 유정압 베어링의 축 방향 강성 및 반경 방향 강성을 규명하기 위해서 구조 해석 모델로부터 얻어지는 컴플라이언스의 예측값과 컴플라이언스의 측정값 사이의 오차를 최소화시키는 최적화 문제를 설정하고 풀고자 하였다. 여기서 구조 해석 모델로부터 얻어지는 컴플라이언스의 예측값은 X 축, Y 축, Z 축 및 C 축 이송계의 유정압 안내면 및 유정압 베어링 및 리니어 모터의 축 방향 강성의 함수이기 때문에 컴플라이언스의 예측값과 측정값의 오차도 X 축, Y 축, Z 축 및 C 축 이송계의 유정압 안내면, 유정압 베어링 및 리니어 모터의 축 방향 강성의 함수가 된다. 따라서 본 연구에서는의 최적화 문제를 수치적으로 풀기 위해서 Newton-Raphson 방법을 적용하였다.

컴플라이언스의 측정값을 이용하여 X 축, Y 축, Z 축 이송계의 유정압 안내면 및 리니어 모터의 축 방향 강성 그리고 C 축 이송계의 유정압 베어링의 강성을 규명하려면, 컴플라이언스를 측정할 때의 하중 작용점과 변위 측정점을 구조 해석 모델에서도 동일하게 설정하고 해석을 수행해야 한다. Figs. 2, 3, 4는 컴플라이언스 측정 조건들을 따라서 구조 해석 모델로부터 예측한 컴플라이언스의 해석 결과들을 보여주고 있으며, 예측값과 측정값의 비교는 Table 2에 나타내었다.

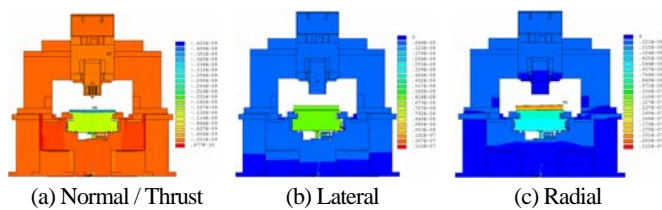


Fig. 2 Compliance predictions of the Y-axis feed systems

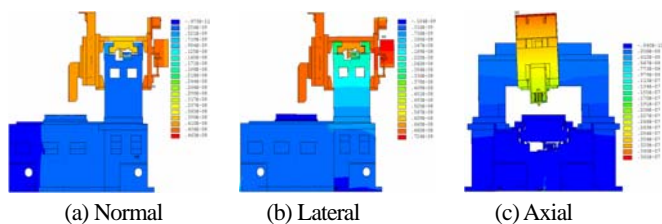


Fig. 3 Compliance predictions of the X-axis feed system

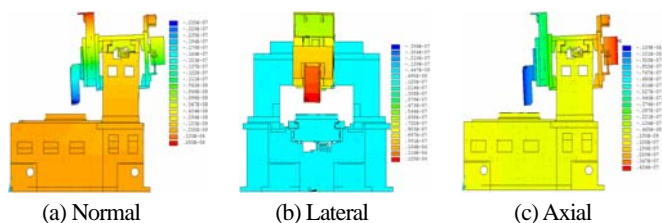


Fig. 4 Compliance predictions of the Z-axis feed system

Table 2 Comparison of the designed and identified joint stiffnesses

Axis	Joint	Designed (N/ μ m)	Identified (N/ μ m)	Ratio (%)
X-axis	Linear motor	∞	33	-
	Normal guideway	1,131	936	83
	Lateral guideway	758	1,419	141
Y-axis	Linear motor	∞	∞	100
	Normal guideway	1,348	2,700	200
	Lateral guideway	1,010	534	53
Z-axis	Linear motor	∞	11	-
	Normal guideway	1,350	1,405	104
	Lateral guideway	675	819	121
C-axis	Thrust bearing	759	451	60
	Radial bearing	325	72	22

초정밀 가공기의 X 축, Y 축, Z 축 이송계의 유정압 안내면의 법선 방향 및 횡 방향 강성 그리고 C 축 이송계의 유정압 베어링의 축 방향 및 반경 방향 강성의 규명값은 테이블 2에 나타난 바와 같이 X 축 이송계의 법선 방향 및 횡 방향 강성은 설계값의 83% 및 141% 수준인 936 및 1,419 N/ μ m로 나타났으며 Y 축 이송계의 법선 방향 및 횡 방향 강성은 설계값의 200% 및 53% 수준인 2,700 및 534 N/ μ m로 나타났다. 그리고 Z 축 이송계의 법선 방향 및 횡 방향 강성은 설계값의 104% 및 121%인 1,405 및 819 N/ μ m로 나타났다. C 축 이송계의 축 방향 및 반경 방향 강성의 경우 설계값의 60% 및 22% 수준인 451 및 72N/ μ m인 것으로 나타났으며 X 축, Y 축 및 Z 축 리니어 모터의 축방향 강성의 경우 설계값과 같은 무한 강성으로 나타난 Y 축 이송계의 리니어 모터의 축 방향 강성과는 달리 X 축 및 Z 축 이송계의 축 방향 강성의 경우 설계값에 비해 상당히 작은 33 및 11N/ μ m인 것으로 규명되었다.

4. 결론

본 연구에서는 초정밀 대면적 미세 형상 가공기의 구조 특성을 보다 정량적으로 평가하기 위한 노력의 일환으로 초정밀 가공기의 유정압 안내면, 유정압 베어링의 법선 방향 및 횡 방향 강성 그리고 리니어 모터의 축 방향 강성을 규명하였으며, 설계값과 차이가 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 강성 차이를 유발하는 주요 원인으로서는 유정압 안내면과 유정압 베어링의 경우 실제 간극(clearance)이 가공 오차와 조립 오차 외에도 자중과 유정압 효과에 기인한 구조 변형 등에 의해서 설계 간극보다 커지거나 작아짐으로써 실제 강성이 설계 강성에 비해서 작아지거나 커지기 때문인 것으로 판단되고 리니어 모터의 경우 페루프를 이루고 있는 제어계의 이득(Gain)의 설정이 잘못 되었기 때문인 것으로 판단된다.

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. 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.
2. 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.
3. 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