

내장형 모터와 리니어 모터를 적용한 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 특성 해석

김석일*, 조재완†

Structural Characteristics Analysis of a High-Speed Horizontal Machining Center with Built-in Motor and Linear Motors

Seok-II Kim*, Jae-Wan Cho†

Abstract

This paper presents the structural characteristics analysis of a high-speed horizontal machining center with spindle speed of 50,000rpm and feedrate of 120m/min. The spindle system is designed based on the built-in motor, angular contact ceramic ball bearings, oil-air lubrication and oil-jacket cooling method. The X-axis and Y-axis feeding systems are composed of the linear motor and linear motion guides, and the Z-axis feeding system is composed of the servo-motor, ball screw and linear motion guide. The structural analysis model of the high-speed horizontal machining center is constructed by the finite element method, and the validity of structural design is estimated based on the structural deformation of the high-speed horizontal machining center and spindle nose caused by the gravity and inertia forces.

Key Words : Structural characteristics analysis (구조 특성 해석), High-speed (고속), Horizontal machining center (HMC, 수평형 머시닝 센터), Built-in motor (내장형 모터), Linear motor (리니어 모터), Angular contact ceramic ball bearing (앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링), Oil-air lubrication (오일-에어 윤활), Inertia force (관성력)

1. 서론

최근에는 고속 절삭을 통한 생산성 및 가공 정밀도의 향상, 경합금 및 난삭재의 고능률 가공 등을 도모하기 위해서, 그리고 절삭과 연삭의 복합화 등을 구현하기 위해서 머시닝센터를 중심으로 한 공작기계의 고속화에 대한 필요성

이 급증하고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 이러한 추세에 따라서 국내·외 공작기계 업체들은 내장형 모터를 적용한 초고속 주축계 외에도 리니어 모터를 적용한 초고속 이송계의 도입을 적극 추진하고 있다.

공작기계의 고속 이송 장치로서 리니어 모터를 채용한 선도 기업으로는 독일의 Ex-Cell-O와 미국의 Ingersol을

* 주저자, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 (sikim@hau.ac.kr)

주소: 412-791 경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

† 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원

들 수 있다. 리니어 모터는 볼 스크류에 비해서 높은 이송 속도를 얻을 수 있고, 강성을 높게 할 수 있고, 높은 운동 정밀도를 얻을 수 있고, 비접촉 구조이기 때문에 고장 수리가 불필요하고, 이송 거리의 한계가 없고, 다수의 안내면을 동시에 작동시킬 수 있고, 청결하고, 진공 상태에서도 구동이 가능하고, 소음이 적고, 구조가 간단하다는 등의 장점을 가지고 있다.⁽⁷⁾ 그러나 안내면을 상승시키는 경우에는 중력의 영향을 상쇄시키기 위한 평형 기구(counterbalance mechanism)가 필요하고, 부하 변동을 조정하기 어렵고, 높은 자기력이 작용한다는 등의 단점도 있다.

화천기공(주)은 원격 운영이 가능한 초고속 수평형 머시닝센터를 개발하기 위한 노력의 일환으로 X축 및 Y축 이송계에는 리니어 모터, Z축 이송계에는 볼 스크류와 서보 모터, 주축계에는 내장형 모터, 앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링, 오일-에어 윤활 및 오일-자켓 냉각 방법을 적용해서 구조 설계를 수행하였다. 초고속 수평형 머시닝센터의 설계 목표는 X축 및 Y축 이송계의 이송 속도와 가속도가 120m/min과 1.2G, Z축 이송계의 이송 속도와 가속도가 40m/min과 0.6G, 그리고 주축 회전수가 50,000rpm이다.

본 연구에서는 화천기공(주)이 개발하고 있는 초고속 수평형 머시닝센터에 대한 구조 해석 모델을 구축한 후, 그 모델을 토대로 자중 및 관성력에 의한 구조 변형을 해석하여 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 설계에 대한 타당성을 검토하고, 성능 향상을 위한 설계·제작 단계에서의 고려 사항들을 도출하였다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 절삭 성능은 구조 특성과 밀접한 관련이 있기 때문에 이러한 노력들은 초고속 수평형 머시닝센터 개발에 필요한 시간, 비용, 노력 등의 절감에 크게 기여할 것이다.

2. 수평형 머시닝센터의 구조 및 제원

본 연구의 해석 대상인 초고속 수평형 머시닝센터는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 공작물로의 공구 접근성을 개선하기 위해서 문형 컬럼 상에서 X축, Y축 및 Z축 이송을 모두 구현하는 구조이다.

주축 직경 $\phi 45\text{mm}$, 회전수 50,000rpm의 주축계는 Fig. 2에서와 같이 주축이 각각 2개의 앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링들로 구성된 전반부 베어링(NSK 45BNR19H)과 후반부 베어링(NSK 40BNR19H)에 의해서 지지되고, 전반부 베어링과 후반부 베어링 사이에 위치한 정격 출력 13kW의 내장형 모터(Siemens)에 의해서 구동되는 구조이다. 또한 전반부/후반부 베어링의 윤활 방법으로는 오일-에어 윤활

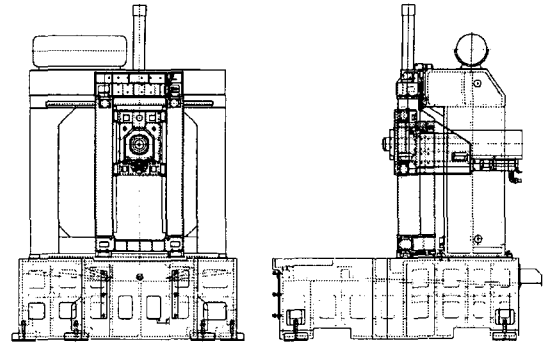


Fig. 1. High-speed horizontal machining center

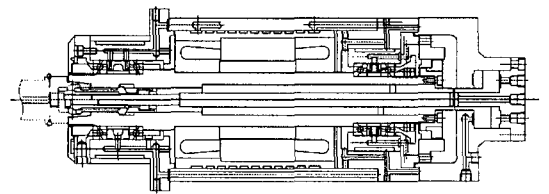


Fig. 2. High-speed spindle system with built-in motor

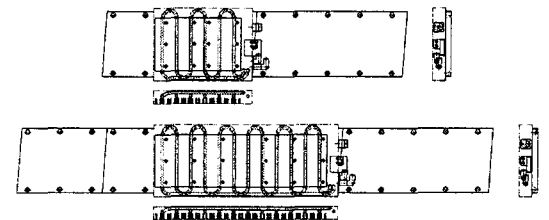


Fig. 3. Linear motors (lower/upper : X-axis/Y-axis)

방법을 적용하였고, 전반부/후반부 베어링의 외륜 부분과 내장형 모터의 고정자 부분에 냉각 자켓들을 설치하여 주축계의 온도 상승을 억제하고 있다.

이송 속도 120m/min, 가속도 1.2G의 X축과 Y축 이송계는 이송 운동의 안정성 향상을 위해서 상·하단 또는 좌·우측에 각각 1쌍씩 설치한 리니어 모터와 LM 가이드(linear motion guide)에 의한 양측 구동 방식을 채용하였다. Fig. 3은 X축과 Y축 이송계에 적용한 리니어 모터들을 보여주고 있는데, X축과 Y축 리니어 모터(FANUC)는 정격 출력이 9.6kW와 4.8kW, 최대 속도가 240m/min이며, 리니어 모터의 이동자 내부에는 리니어 모터의 온도 상승을 억제하기 위한 냉각 파이프가 설치되어 있다. 그리고 주축대의 퀴(Quill) 운동을 담당하는 이송 속도 40m/min, 가속도 0.6G의 Z축 이송계는 정격 출력이 4.5kW인 서보 모터

(FANUC), 볼 스크류(STAR 40×20R×6-3) 및 LM 가이드에 의한 구동 방식을 채용하였다.

3. 수평형 머시닝센터의 구조 특성 해석

3.1 구조 특성 해석 모델

(1) 유한 요소 모델 및 구조 재료

본 연구에서는 리니어 모터를 적용한 초고속 수평형 머시닝센터의 구조적 특성을 해석하기 위한 수단으로 상용 유한 요소 프로그램인 ANSYS⁽⁸⁾를 사용하였다. Fig. 4는 ANSYS를 이용해서 구축한 초고속 수평형 머시닝센터의 유한 요소 모델, Table 1은 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 해석 모델을 구성하는 절점 수와 요소 수를 보여주고 있다. 특히 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 해석 모델은 48,742개의 절점들과 19,831개의 요소들로 이루어져 있는데, 구성 요소의 종류로는 베드, 컬럼, Y축 베이스, 주축대, 주축 등과 같은 구조물들을 표현하기 위한 셸 요소와 슬리드 요소, 그리고 리니어 모터, 볼 스크류, LM 가이드, 주축 베어링 등과 같은 운동 요소들의 강성 및 감쇠계수를 표현

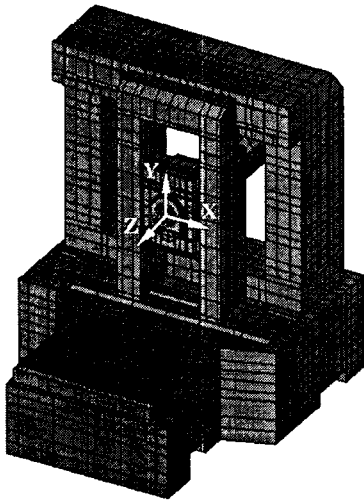


Fig. 4. FEM model of high-speed HMC

Table 1 Node and elements of FEM model

Node number		48,742
Element number	Shell element (Shell63)	8,686
	Solid element (Solid92)	11,037
	Matrix element (Matrix27)	108
	Summation	19,831

하기 위한 매트릭스 요소가 있다. 또한 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 재료에는 주축, LM 가이드, Y축 베이스 등의 재료인 강재(SCM440, S45C), 베드, 컬럼 등의 재료인 주철(GC300) 외에도 내장형 모터, 리니어 모터 및 세라믹 볼 베어링의 재료 등이 있는데, Table 2는 그 구조 재료들의 물성을 보여주고 있다.

(2) 운동 요소의 강성

초고속 수평형 머시닝센터에 대한 구조 특성을 체계적이고 정량적으로 평가하기 위해서는 리니어 모터, 볼 스크류, LM 가이드, 주축 베어링 등과 같은 운동 요소들에 대한 강성을 파악하고, 초고속 수평형 머시닝센터의 유한 요소 모델을 구축하는 단계에서 그 강성들을 모두 반영해야 한다.

초고속 수평형 머시닝센터의 좌표계는 Fig. 1에 제시한 바와 같이 주축계가 오른쪽으로 이동할 때가 +X축 방향, 위로 이동할 때가 +Y축 방향, 그리고 앞으로 이동할 때가

Table 2 Material properties of HMC

	Density	Young's modulus	Poisson's ratio
GC300	7,300 kg/m ³	90.0 GPa	0.25
SCM440	7,860 kg/m ³	205.8 GPa	0.30
S45C	7,817 kg/m ³	209.0 GPa	0.28
Fe-Si	7,833 kg/m ³	28.0 GPa	0.30
Cu	8,930 kg/m ³	122.6 GPa	0.34
SUJ2	7,860 kg/m ³	205.8 GPa	0.30
Si3N4	3,200 kg/m ³	31.4 GPa	0.25

Table 3 Axial stiffness of feeding mechanism

	Actuator	Axial stiffness
X-axis	Linear motor	2×800 MN/m
Y-axis	Linear motor	2×800 MN/m
Z-axis	Ball screw + Servo motor	781 MN/m

Table 4 Stiffness of LM guide

	Compressive load	Tensile load	Lateral load
X-axis	1,155 MN/m	1,000 MN/m	1,126 MN/m
Y-axis	1,231 MN/m	1,000 MN/m	1,126 MN/m
Z-axis	1,333 MN/m	1,199 MN/m	1,154 MN/m

Table 5 Stiffness and damping coefficient of bearing

	Stiffness	Damping coeff.
Front bearing	117 MN/m	0.90 kN·s/m
Rear bearing	101 MN/m	0.78 kN·s/m

Table 6 Mass and inertia force of feeding mechanism

	Max. feedrate	Max. acceleration	Moving mass	Max. inertia force
X-axis	120 m/min	1.2 G	863 kg	10,150 N
Y-axis	120 m/min	1.2 G	377 kg	4,430 N
Z-axis	40 m/min	0.6 G	183 kg	1,080 N

+Z축 방향으로 설정되어 있다. 또한 X축 및 Y축 이송계는 리니어 모터에 의해서 구동되고, Z축 이송계는 볼 스크류와 서보 모터에 의해서 구동되고 있다. 이러한 초고속 수평형 머시닝센터의 이송계에 적용된 리니어 모터와 볼 스크류의 축방향 강성들은 Table 3에 나타내었고, LM 가이드의 강성들은 Table 4에 제시하였다. 또한 초고속 수평형 머시닝센터의 주축계에는 앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링들이 적용되고 있는데, 그 강성과 감쇠계수들은 Table 5에서 볼 수 있다.

(3) 이송계의 운동체 질량과 관성력

초고속 수평형 머시닝센터의 이송 속도는 기존의 머시닝센터보다 매우 높기 때문에 그에 따른 가속 능력과 관성력도 절삭 성능에 큰 영향을 주게 된다. 해석 대상인 초고속 수평형 머시닝센터의 경우에는 X축 및 Y축 이송계의 최대 가속도가 1.2G이고, Z축 이송계의 최대 가속도가 0.6G이다. 따라서 본 연구에서는 이송계에 작용하는 관성력을 산정하기 위해서 이송계의 운동체 질량을 유한 요소 모델로부터 구하고, 그 값과 이송계의 최대 가속도를 곱하는 방법을 사용하였다. Table 6은 이러한 개념을 토대로 산출한 초고속 수평형 머시닝센터의 이송계에 대한 운동체 질량과 최대 관성력을 보여주고 있다.

3.2 자중에 의한 구조 변형

자중에 의한 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 변형 해석의 경계 조건으로는 베드와 지면이 만나는 지지점들의 자유도를 모두 고정시키는 방법을 사용하였으며, 각각의 이송계들이 모두 기준점(X축 0.0mm, Y축 0.0mm, Z축 0.0mm)에 위치하고 있는 경우에 대한 구조 변형을 해석하였다. 그리고 그 해석 결과는 Fig. 5, Table 7 및 8에 제시하였다.

Fig. 5와 Table 7에서 알 수 있듯이 자중에 의한 초고속 수평형 머시닝센터의 최대 총 변위는 39.8 μ m로 베드의 상면 중앙에서 발생하는 것으로 나타났는데, 그 부분에서의 Y축 변위가 -39.6 μ m라는 사실로부터 그 변위의 대부분은 -Y축 방향으로의 처짐임을 알 수 있다. 이와 같이 베드의

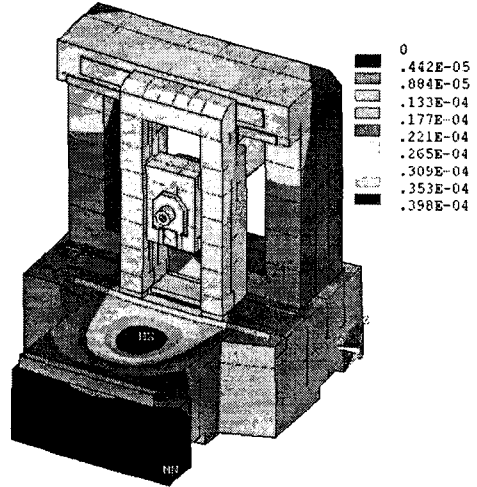


Fig. 5. Structural deformation caused by gravity force

Table 7 Structural deformation caused by gravity force

Max. total displacement	Max. Y-axis displacement	Max. Z-axis displacement	Max. Stress
39.8 μ m	-39.6 μ m	-5.6 μ m	10.9 MPa
(upper face of bed)	(upper face of bed)	(upper face of bed)	(Support point of bed)

Table 8 Deformation of spindle nose caused by gravity force

Total displacement	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement
28.6 μ m	-1.2 μ m	-28.5 μ m	-1.3 μ m

상면에서 처짐이 크게 발생하는 원인은 베드의 상면 자체가 리브나 격벽이 설치되지 않은 판 구조 형태를 이루고 있어서 상대적으로 구조 강성이 취약하다는 데 있다.

그리고 자중에 의한 초고속 수평형 머시닝센터의 최대 등가 응력은 10.9MPa이며, 베드 지지점에서 발생하는 것으로 예측되는데, 이 값은 주철의 허용 응력인 120~290MPa보다 작기 때문에 구조적으로 큰 문제가 없다고 판단된다.

또한 Table 8로부터 자중에 의한 주축 선단점의 총 변위는 28.6 μ m이고, 그 변위의 대부분은 -Y축 방향으로의 처짐 때문인 것을 알 수 있다. 특히 주축 선단점의 X축 및 Z축 변위가 1.2 μ m와 1.3 μ m에 불과하다는 사실은 초고속 수평형 머시닝센터의 좌우 균형과 전후 균형이 우수하게 설계되었다는 것을 의미한다.

3.3 관성력에 의한 구조 변형

Table 6에서 알 수 있듯이 초고속 수평형 머시닝센터의

X축 이송계에는 최대 10,150N의 X축 관성력, Y축 이송계에는 최대 4,430N의 Y축 관성력, 그리고 Z축 이송계에는 최대 1,080N의 Z축 관성력이 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관성력들에 의한 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 변형을 예측함으로써 이송계의 가감속 특성이 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 변형에 미치는 영향을 평가하였다.

관성력에 의한 구조 변형 해석의 경계 조건이나 이송계의 위치는 모두 자중에 의한 구조 변형 해석의 경우와 동일하게 설정하였으며, 관성력에 의한 영향만을 파악하기 위해서 자중 효과는 무시하였다. 그리고 관성력의 작용 방향이 구

조 변형에 미치는 영향을 알아보기 위해서 관성력의 작용 방향이 - 방향인 경우와 + 방향인 경우를 나누어서 해석하였다.

(1) X축 관성력에 의한 구조 변형

-X축 관성력(-10,150N)과 +X축 관성력(+10,150N)이 작용하는 경우의 구조 변형은 각각 Fig. 6과 7, 그리고 Fig. 8과 9에 제시하였으며, 두 경우에 대한 주축 선단점의 변위를 정리한 것은 Table 9에 나타내었다.

Fig. 6, 7, 8 및 9로부터 X축 관성력에 의한 주축 선단점의 변위는 Y축 베이스 및 컬럼의 굽힘 변형, 그리고 Y축 중심의 주축대 회전에 의해서 야기되고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 9에서 10,150N의 X축 관성력이 작용할 때 주축 선단점의 총 변위는 76.0~81.7 μ m이고, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 주축 선단점의 Y축 및 Z축 변위가 2.4~4.8 μ m 및 -1.0~1.8 μ m 수준이라 사실은 X축 관성력이 초고속 수평형

Table 9 Deformation of spindle nose caused by X-axis inertia force

X-Axis inertia force	Total displacement	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement
-10,150 N	81.7 μ m	-81.6 μ m	2.4 μ m	1.8 μ m
+10,150 N	70.6 μ m	75.8 μ m	4.8 μ m	-1.0 μ m

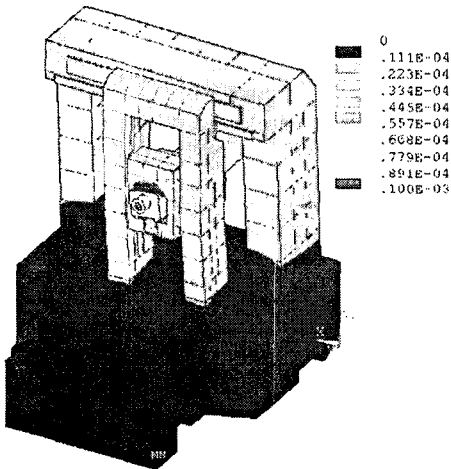


Fig. 6. Structural deformation caused by -X-axis inertia force

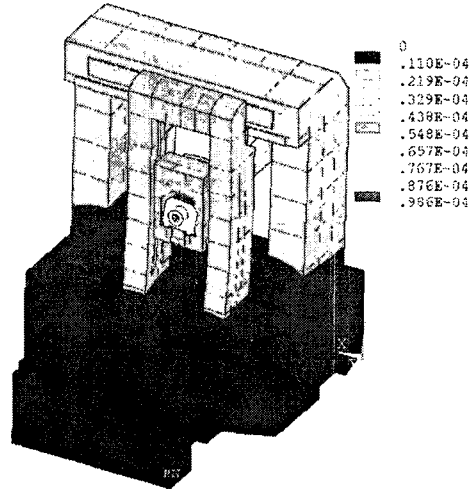


Fig. 8. Structural deformation caused by +X-axis inertia force

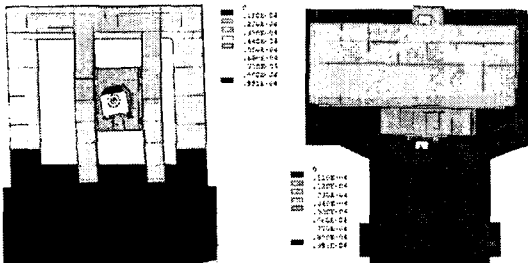


Fig. 7. X-axis deformation caused by -X-axis inertia force

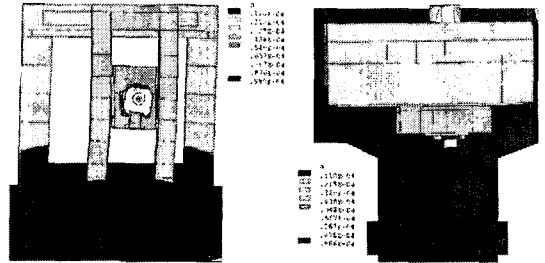


Fig. 9. X-axis deformation caused by +X-axis inertia force

머시닝센터의 Y축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

(2) Y축 관성력에 의한 구조 변형

-Y축 관성력(-4,430N)과 +Y축 관성력(+4,430N)이 작용하는 경우의 구조 변형은 각각 Fig. 10과 11, 그리고 Fig. 12와 13에 제시하였으며, 두 경우에 대한 주축 선단점의 변위를 정리한 것은 Table 10에 나타내었다.

Table 10 Deformation of spindle nose caused by Y-axis inertia force

Y-Axis inertia force	Total displacement	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement
-4,430 N	17.2 μm	0.1 μm	-16.8 μm	3.5 μm
+4,430 N	13.0 μm	-0.1 μm	12.9 μm	-1.9 μm

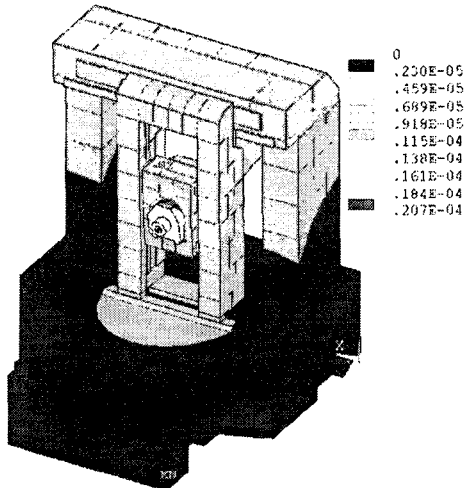


Fig. 10. Structural deformation caused by -Y-axis inertia force

Fig. 10, 11, 12 및 13으로부터 Y축 관성력에 의한 주축 선단점의 변위는 X축 중심의 주축대 회전에 의해서 주로 야기되고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 10에서 4,430N의 Y축 관성력이 작용할 때 주축 선단점의 총 변위는 13.0~17.2 μm 이고, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 주축 선단점의 X축 및 Z축 변위가 -0.1~0.1 μm 및 -1.9~3.5 μm 수준이라 사실은 Y축 관성력이 초고속 수평형 머시닝센터의 X축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

(3) Z축 관성력에 의한 구조 변형

-Z축 관성력(-1,080N) 및 +Z축 관성력(+1,080N)이 작용하는 경우의 구조 변형은 각각 Fig. 14와 15, 그리고 Fig.

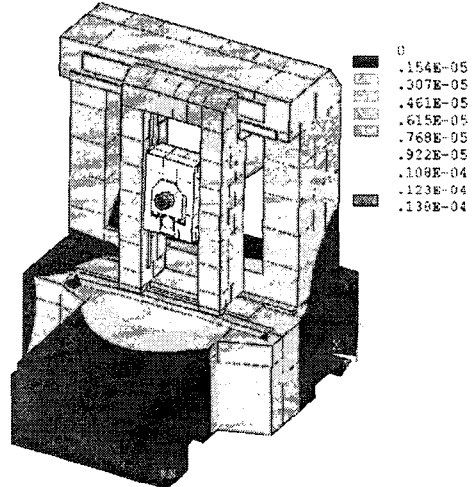


Fig. 12. Structural deformation caused by +Y-axis inertia force

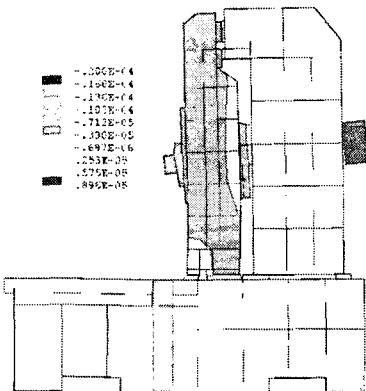


Fig. 11. Y-axis deformation caused by -Y-axis inertia force

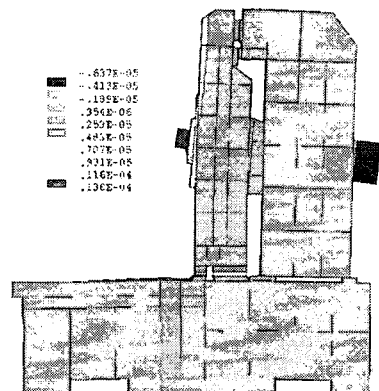


Fig. 13. Y-axis deformation caused by +Y-axis inertia force

16과 17에 제시하였으며, 두 경우에 대한 주축 선단점의 변위를 정리한 것은 Table 11에 나타내었다.

Fig. 14, 15, 16 및 17로부터 Z축 관성력에 의한 주축 선단점의 변위는 Y축 베이스 및 컬럼의 굽힘 변형에 의해서 야기되고 있음을 알 수 있다. 또한 Table 11에서 1,080N의 Z축 관성력이 작용할 때 주축 선단점의 총 변위는 3.7~5.3 μm 이고, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어

Table 11 Deformation of spindle nose caused by Z-axis inertia force

Z-Axis inertia force	Total displacement	X-axis displacement	Y-axis displacement	Z-axis displacement
-1,080 N	5.3 μm	0.1 μm	1.0 μm	-5.2 μm
+1,080 N	3.7 μm	-0.1 μm	-0.7 μm	3.6 μm

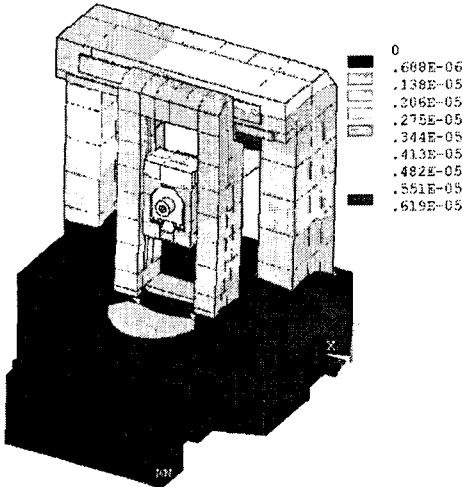


Fig. 14. Structural deformation caused by -Z-axis inertia force

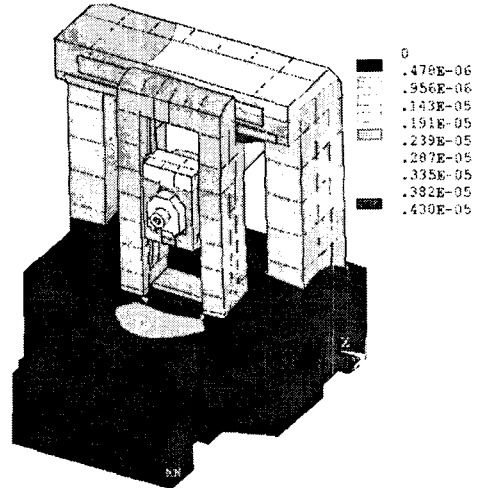


Fig. 16. Structural deformation caused by +Z-axis inertia force

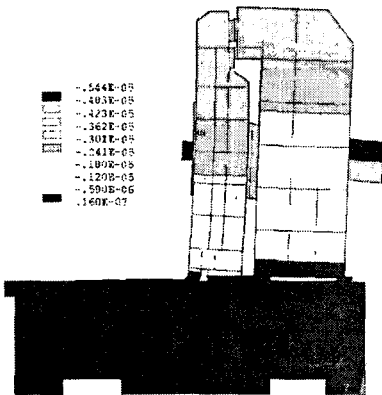


Fig. 15. Z-axis deformation caused by -Z-axis inertia force

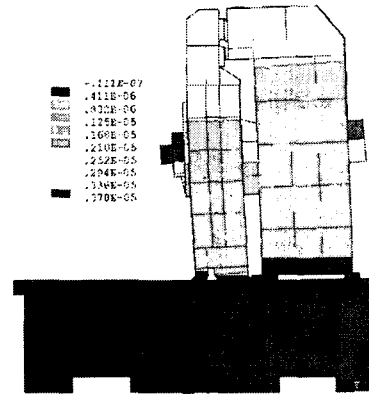


Fig. 17. Z-axis deformation caused by +Z-axis inertia force

나고 있음을 볼 수 있다. 그러나 주축 선단점의 X축, Y축 및 Z축 변위가 $-0.1\sim 1.0\mu\text{m}$, $-0.7\sim 1.0\mu\text{m}$ 및 $-5.2\sim 3.6\mu\text{m}$ 수준이라는 사실은 Z축 관성력이 초고속 수평형 머시닝센터의 X축, Y축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 리니어 모터, 내장형 모터, 앵글러 콘택트 세라믹 볼 베어링, 오일-에어 윤활 및 오일-자켓 냉각 방법 등을 적용해서 설계한 $f45\text{mm}\times 50,000\text{rpm}$ 급 초고속 수평형 머시닝센터의 구조 특성을 설계 단계에서 해석 및 평가하였다. 그 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- ① 자중에 의한 초고속 수평형 머시닝센터의 최대 총 변위는 39.8 μm 로 베드의 상면 중앙부에서 발생하며, 그 변위의 대부분은 -Y축 방향으로의 처짐이다. 그리고 그 원인은 베드의 상면 자체가 리브나 격벽이 설치되지 않은 판 구조 형태를 이루고 있어서 상대적으로 구조 강성이 취약하다는 데 있다.
- ② 자중에 의한 주축 선단점의 총 변위는 28.6 μm 이고, 그 변위의 대부분은 -Y축 방향으로의 처짐이다. 특히 자중에 의한 주축 선단점의 X축 및 Z축 변위가 1.2 μm 와 1.3 μm 에 불과하다는 사실로부터 초고속 수평형 머시닝센터는 좌우 균형과 전후 균형이 우수하게 설계되었음을 확인하였다.
- ③ 이송계의 운동체 질량을 유한 요소 모델로부터 구하고, 그 값과 이송계의 최대 가속도를 곱하는 방법으로 이송계에 작용하는 관성력을 산정하였다. 이러한 개념을 토대로 산출한 초고속 수평형 머시닝센터의 X축, Y축 및 Z축 운동체 질량은 863kg, 377kg 및 183kg이고, 그에 대응하는 최대 X축, Y축 및 Z축 관성력은 10,150N, 4,430N 및 1,080N이다.
- ④ 최대 X축 관성력에 의한 주축 선단점의 총 변위는 76.0~81.7 μm 이며, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어난다. 이러한 변위를 유발하는 원인은 Y축 베이스 및 컬럼의 굽힘 변형, 그리고 Y축 중심의 주축대 회전이다.
- ⑤ 최대 X축 관성력에 의한 주축 선단점의 Y축 및 Z축 변위가 2.4~4.8 μm 와 -1.0~1.8 μm 수준이라는 사실로부터 X축 관성력이 초고속 수평형 머시닝센터의 Y축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.
- ⑥ 최대 Y축 관성력에 의한 주축 선단점의 총 변위는 13.0~17.2 μm 이며, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어난다. 이러한 변위를 유발하는 원인은 X축 중심의 주축대 회전이다.
- ⑦ 최대 Y축 관성력에 의한 주축 선단점의 X축 및 Z축 변위가 -0.1~0.1 μm 와 -1.9~3.5 μm 수준이라는 사실로부터 Y축 관성력이 초고속 수평형 머시닝센터의 X축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.
- ⑧ 최대 Z축 관성력에 의한 주축 선단점의 총 변위는 3.7~5.3 μm 이며, 그 변위의 대부분은 관성력의 작용 방향으로 일어난다. 이러한 변위를 유발하는 원인은 Y축 베이스 및 컬럼의 굽힘 변형이다.

- ⑨ 최대 Z축 관성력에 의한 주축 선단점의 X축, Y축 및 Z축 변위가 각각 -0.1~0.1 μm , -0.7~1.0 μm 및 -5.2~3.6 μm 수준이라는 사실로부터 Z축 관성력이 초고속 수평형 머시닝센터의 X축, Y축 및 Z축 이송 정밀도에 큰 영향을 주지 않음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Nakamura, S. and Kakino, Y., 1994, "Performance Evaluation of a Preload Convertible Spindle," *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 60, No. 5, pp. 688-692.
- (2) Muramatsu, A., Nakamura, S., Yoneyama, H. and Iwasaki, O., 1994, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle," *NSK Technical Journal*, No. 658, pp. 32-39.
- (3) Kim, S.I., Choi, D. B. and Park, K. H., 1993, "Oil-Air Lubrication Characteristics of a High-Speed Spindle System for Machine Tools," *Trans. of the Korean Society of Mechanical Engineers(A)*, Vol. 17, No. 2, pp. 351-358.
- (4) Choi, D. B., Kim, S. I. and Song, J. B., 1994, "Air Cooling Characteristics of a High-Speed Spindle System for Machine Tools," *Trans. of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 123-128.
- (5) Ono, S., 1985, "Effects of Bearing and Oil-Air Lubrication for a High-Speed Spindle System of Machine Tools," *Practical Mechanical Engineering*, Taiga Shuppan, Vol. 26, No. 2, pp. 159.
- (6) Kim, S. I. and Kim, K. T., 2004, "Thermal Characteristics Analysis of a High-Speed Motor-Separated Spindle System Using Oil-Jet Lubrication Method," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 441-446.
- (7) Anorad Linear Motor Division, 1999, *Linear Motor Systems - Motor Integration Manual*.
- (8) Swanson Analysis Systems, Inc., 1999, *ANSYS Verification Manual*.