

◆ 특집 ◆ 고유연 머시닝센터의 설계기술

# 초고속 고정밀 머시닝 센터 설계 기술

## Design Technology of High Speed and Precision Machining Center

김법민<sup>1,✉</sup>, 최원선<sup>1</sup>, 이재용<sup>1</sup>, 김태형<sup>1</sup>  
Bup Min Kim<sup>1,✉</sup>, Won Sun Choi<sup>1</sup>, Jae Young Ha<sup>1</sup> and Tae Hyoung Kim<sup>1</sup>

1 두산인프라코어 공기자동화 BG (Doosan Infracore Machine tools & FA BG)

✉ Corresponding author: Bupmin.kim@doosan.com, Tel: 055-600-4685

Manuscript received: 2011.5.31 / Accepted: 2011.6.28

*In order to manufacture precision parts which are used for IT and BT Industry by machining, users need higher speed & precision machining center. So, for development of this kind of machine, we designed gantry type machining center which is piling of 3 axes on one moving body and the 2-axis rotary table is fixed on the base. It is applied linear motor that is instead of ball-screw and servo-motor combination and 50,000 rpm high-speed spindle. Composite material structure called mineral casting or resin concrete is applied also. This paper presents design technology and evaluated results of high speed and precision machining center.*

Key Words: High Speed Machining Center (고속 가공 머시닝 센터), Linear Motor (리니어 모터), Direct Drive (직접 구동), Mineral Casting (미네랄 캐스팅)

### 1. 서론

최근 휴대폰과 더불어 PMP, DMB 등의 휴대용 IT 기기와 점점 소형화되는 노트북 등의 수요가 증가함에 따라 이에 대한 사업군이 확대 추세이다. 이에 따라 공작기계를 사용하는 산업분야 중 초정밀 금형산업 및 IT 부품산업의 크기도 증가되고 있다. IT 부품 산업에서의 가공물의 특징은 난삭재 이면서 높은 가공 정밀도와 생산성을 요구한다. 이러한 IT 부품 시장의 요구에 대응하기 위해서는 고정밀 초고속 머시닝 센터 장비 필요성이 증대되고 있다.

본 연구에서는 난삭재인 IT 부품 생산에 적합한 장비인 초고속 고정밀 가공기 개발에 있어서 레이아웃 설계 단계에서부터 주요 유닛트의 설계에 필요한 기술 및 제작 후 성능 평가 결과를 서

술하였다.

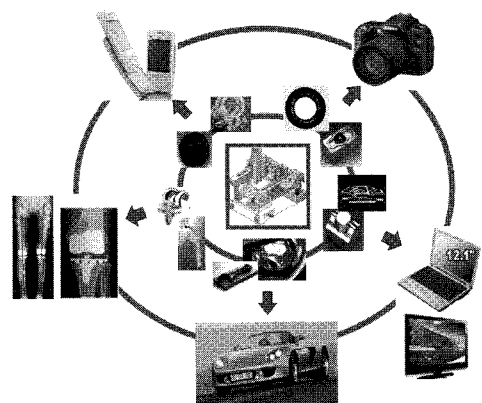


Fig. 1 Outline of application field of high speed machining center

Table 1 Specification of high speed and precision machining center

		Specification
Travel	X / Y / Z	400/600/300 mm
	A / C	240/360 deg
Feedrate	Rapid traverse rate (X/Y/Z)	80/80/80 m/min
	Rapid traverse rate (A/C)	100/200 rpm
	Max. acceleration	2 g
Spindle	Max. spindle speed	50,000 rpm
	Spindle taper	HSK 40E

2. 장비의 Lay-out 설계

2.1 개념 설계를 통한 lay-out 설계

여러가지 머시닝 센터의 구조 중 Fig. 2 가운데의 박스형상으로 표기한 형태의 구조는 장비의 경량화, 소형화, 접근성, 제작성 등에 상대적으로 유리하다. 이러한 구조는 공작물을 고정하는 테이블 장착에 있어서 3 축가공기를 위한 단순 고정 테이블과 5 축 가공을 위한 로터리 테이블을 자유롭게 변환이 가능하여 시장에서의 요구에 유연하게 대응할 수 있고 직선축의 성능이 공작물 무게에 독립적이어서 공작물 무게가 변화함에 따라 이송계

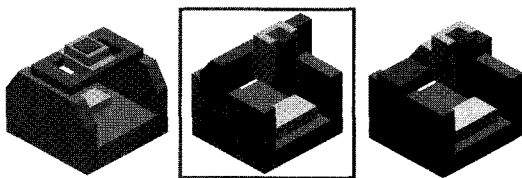


Fig. 2 Scheme of various machine structures

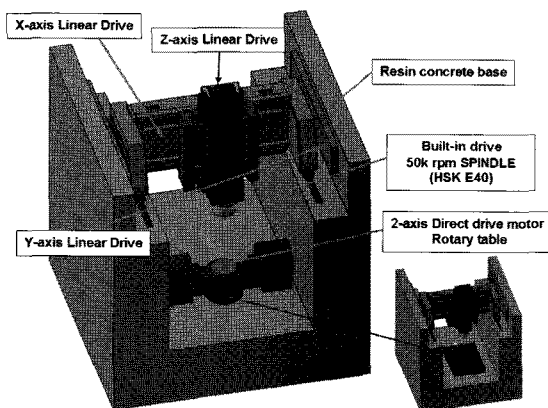


Fig. 3 Concept design of decided machine structure

의 특성이 변화하지 않는 장점이 있다. 리니어 모터의 특성을 최대한 살리기 위해 Fig. 3 과 같이 3 축이 집적되는 형태(Gantry type)를 선택하였다.

2.2 lay-out 구성 최적화 기술

현재까지의 통상적인 공작기계 설계 프로세스를 되짚어 볼 때, 장비의 시방 선정 후 기계 구조를 선정하게 되면 각 요소들을 배치하는 Layout 구조 설계 단계에서는 유한요소해석(F.E.M.)을 통하여 성능을 예측하고 요소들의 배치 최적화 및 부품 선정을 실시하고 있다. 하지만, 여러 설계변수들의 변화에 대한 유한요소해석을 모두 실시하게 되면, 구조적 차이에 의한 성능의 변화 추이를 판별하는 데에 상당한 시간이 필요하게 되고, 이것은 전체 제품 개발 시간을 지연시키는 요인이 되어, 최근의 시장수요를 만족시키기 위해 신속한 제품 개발을 하는 데에 걸림돌로 작용하게 된다.

그래서 Layout 구조 설계 단계에서는 설계변수들의 변화가 성능에 끼치는 영향을 신속하게 판단할 수 있는 도구가 요구된다.

이에 따라 머시닝 센터의 Layout 설계 단계에서 여러 가지 설계 변수들의 변화에 따른 최적화된 모델을 단시간에 제시해 줄 수 있는 툴을 개발하여 적용하였다.

Layout 설계 단계에서는 장비 구조의 핵심인 자인 이송계의 제원 및 구조물 치수를 이용하여 변수로서 설정한 뒤 Fig. 4 와 같이 Lumped parameter model 을 구성하였다. Lagrange's 방정식을

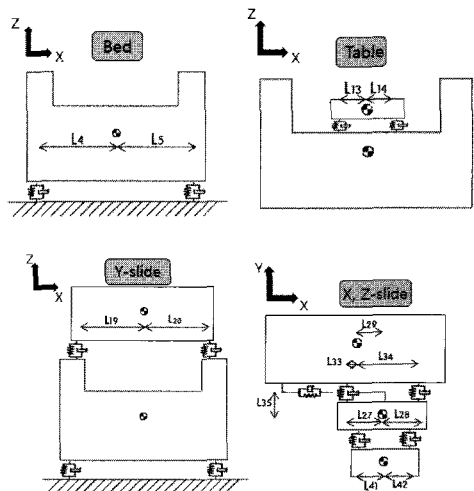


Fig. 4 3D Lumped parameter model

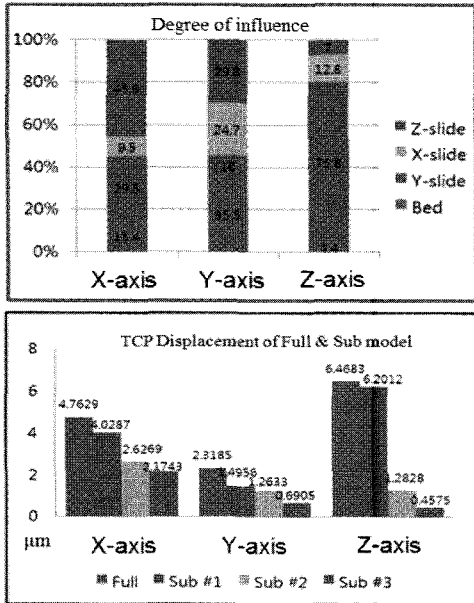


Fig. 5 Result of Loop stiffness

적용하여 각 변수들이 장비의 주요 특성인 강성 및 고유진동수에 미치는 영향을 파악하였다.

이러한 모델링 방법을 통해 최적 lay-out 을 구성하여 FEM 해석 시간을 단축하는 톨코써 활용하였다. 최종적인 최적화를 위해 Fig. 6 과 같이 CAD 모델링 통해 FEM 해석을 수행하였다. 로터리 테이블은 별도의 assembly 상태에서 정적, 동적 해석뿐만 아니라 열변위에 대한 해석을 수행하였다.

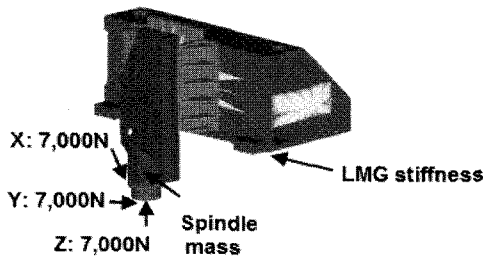


Fig. 6 Boundary condition for FEM analysis

최적화 수행 후 FEM 모델의 정적, 동적 특성은 ball screw 를 이용한 일반적인 공작기계에 비해 높게 나타났다.

로터리 테이블의 열해석 수행 결과로써 로터리 테이블의 C 축과 A 축에 임의의 동작 cycle 을 가정하여 운전했을 경우, 로터리 테이블의 온도분포와 열변위를 Fig. 7 에 나타내었다.

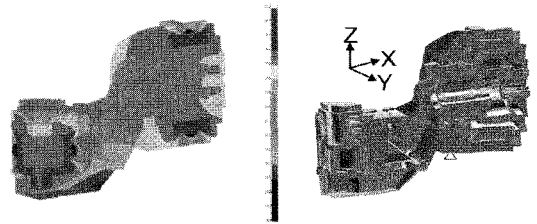


Fig. 7 Thermal analysis for rotary table

위에서 서술한 lay-out 구성 최적화 기술을 바탕으로 완성한 장비의 최종 상세 lay-out 을 Fig. 8 에 나타내었다.

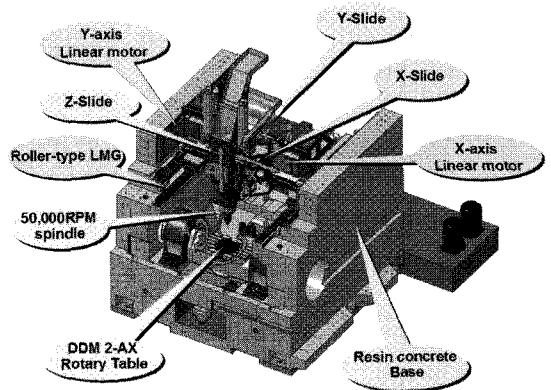


Fig. 8 The lay-out of Ultra high speed and precision machining center

### 3. 각 Unit 의 상세 설계

Unit 의 상세 설계 단계에서는 각 요소 부품 사양의 상세 선정 및 배치를 하면서 구조물의 형상을 현실화 하고, 부품들의 가공 방법, 제작 용이성 및 조립의 용이성을 고려하여 설계를 완성한다.

#### 3.1 미네랄 캐스팅 base 상세 설계

초고속 고정밀 머시닝 센터의 이송계에서는 높은 가감속으로 인해 이송시 일반 ball screw 장비보다 높은 진동과 충격을 발생시킨다. 고속, 고정밀 가공용 공작기계는 정적 강성이 높고 감쇠 효과가 뛰어나며 열적으로 안정화된 구조를 가져야만 한다. 공작기계의 정적 강성은 높은 강성을 갖는 재료를 사용함으로써 구현 가능하지만, 정적 강성이 높은 재료는 일반적으로 낮은 감쇠 성능을 갖기 때문에 진동에 취약하다는 문제점을 가지는

데, 장비의 진동은 공작물의 표면품위를 저해할 뿐만 아니라, 제어시스템의 고 Gain 화를 어렵게 하는 요소가 되기도 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 미네랄 캐스팅 소재를 적용하여 감쇠성능을 동시에 확보하였다. 또한, 고속 장비에 있어서 고정부의 고질량화는 장비의 제어 루프의 안정화를 위해서도 필수적으로 검토되어야 할 사항인데, 본 장비에서는 미네랄 캐스팅으로 base 를 하나의 mono block 형태로 가득 채워 이송체 질량 대비 고정체의 질량 비율을 증가시켜 안정화 하였다.

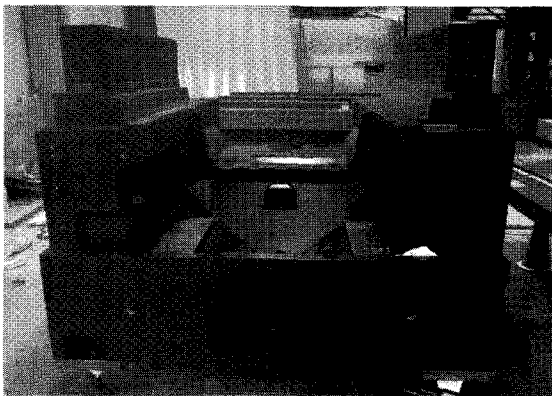


Fig. 9 Mineral casting base

Base 의 설계는 주물과 다른 미네랄 캐스팅의 제작 특성을 고려하여 공작기계 부품으로서의 역할을 할 수 있도록, 다른 부품 고정을 위한 나사부와 절삭유 및 chip 배출 공간을 고려하여 설계되었다.

미네랄 캐스팅 base 제작은 외관형상에 해당하는 금형을 제작한 뒤 적절한 크기의 자갈과 모래등을 resin 과 혼합하여 금형 속에 가득 채워서 제작하게 된다. 제작된 미네랄 캐스팅 base 를 Fig. 9 에 나타내었다.

**3.2 이송계 상세 설계**

Fig. 10 은 리니어 모터 이송 시스템의 제어 개념도를 나타낸 것인데, 리니어 모터 이송 시스템에서는 리니어 스케일에서 위치와 속도 feedback 을 동시에 받게 된다. 리니어 스케일의 위치와 부착하는 부품의 강성이 제어계에 영향을 미치기 때문에 스케일 위치는 리니어 모터와 이송체의 무게 중심간의 상관 관계를 잘 고려하여야 한다.

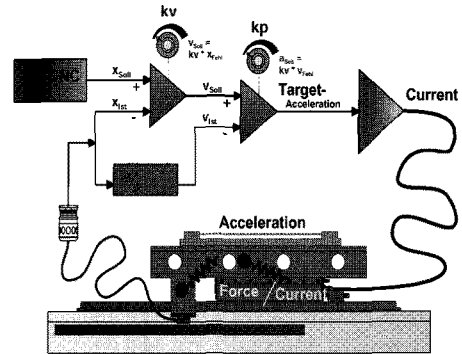


Fig. 10 Schematic diagram of linear motor feed system

추가적인 사항으로는 리니어 모터 조립시 영구 자석의 강력한 자력으로 인해 모터 조립이 용이할 수 있도록 공간 확보를 하여야 한다는 점이다.

**3.3 50,000rpm 고속 스피들 상세 설계**

난삭재면서 형상이 복잡한 IT 부품 가공을 위해서는 작은 공구경으로 공작물을 가공하는 경우가 많은데 이를 위해서는 빠른 이송 속도와 더불어 절삭 속도의 증가가 필수적이다. 주축의 회전수를 증가시켜 공구 날 당 이송 속도를 증가시키고 주축을 지지하는 베어링 강성의 증가를 통해 실현이 가능하다. 이를 위해서 본 장비에서는 세라믹 볼 베어링을 적용한 최대 회전수 50,000rpm 고속 주축을 개발하여 적용하였다. 고속에서의 진동 저감을 위해서 built-in 모터를 적용하고 베어링의 예압 증가에 의한 발열 억제제를 위하여 주축을 지지하는 베어링에 정압 예압 방식을 적용하였다. 개발된 주축의 사양을 table 2 에 나타내었다.

Table 2 Specification of 50,000rpm spindle unit

	Specification
Max. rotation speed	50,000 rpm (DmN Value : 3,000,000)
Type of bearing	Ceramic ball bearing
Type of lubricaton	Oil-air
Taper	HSK-40-E
Type of Preload	Constant preload
Spindle motor	Built-in Type

**3.4 직접 구동(Direct drive) 로터리 테이블 상세 설계**

초고속 고정밀 장비에서 높은 가감속을 가지는

직선 이송계의 특성 상 이에 상응하는 회전 로터리 테이블도 높은 가감속을 요구한다. 이를 달성하기 위해서는 테이블과 모터가 직접 연결된, 이른바 Direct drive 모터를 적용한 로터리 테이블 적용이 필수적이다. 본 장비에서는 로터리 회전축인 C 축과 킬팅 회전축인 A 축 모두 Direct drive 모터를 적용하였다.

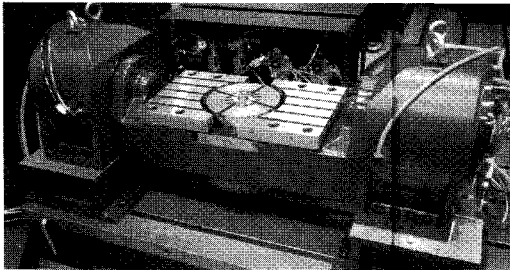


Fig. 11 2-axis direct drive rotary table

Direct drive 모터를 적용한 로터리 테이블에서는 모터의 발열이 테이블의 열변위에 직접적으로 영향을 미치기 때문에 이를 회피하는 설계가 필수적이다. 앞서 lay-out 설계 단계에서 서술한 바와 같이 열적 해석을 통해 얻은 열변위를 회피하기 위해 모터에 추가적인 cooling 장치를 추가하였고, A 축은 모터를 양쪽에서 구동하도록 하여 대칭 구조를 가지도록 하였다.

#### 4. 장비의 성능 평가

개발된 초고속 고정밀 머시닝 센터에 대해 성능평가를 시행하였다. 리니어 모터를 이용한 이송계의 가속도를 측정하였고, 주축의 회전 정밀도, 미네랄 캐스팅 base의 진동특성을 측정하여 감쇠특성을 확인하였다. 그리고 레이저 간섭계를 이용하여 이송축의 위치결정/반복 정밀도 측정하였다. 또한 테이블 상면에 Grid Encoder(제조사 : HEIDENHAIN / 제품명 : KGM 시리즈)를 각 평면으로 설치하여 이송축의 미세이송특성 및 이송축 원호보간 정밀도 등을 실험하였다. 즉 아래 5 가지 경우에 대해 실험 실시하여 금형가공 센터의 성능을 평가하였다.

- 1) 이송계 가속도 측정
- 2) 미네랄 캐스팅 base 진동 측정
- 3) 주축의 회전 정밀도 측정

- 4) 이송축의 정밀도
- 5) 이송축 원호보간 정밀도
- 6) 미세이송특성

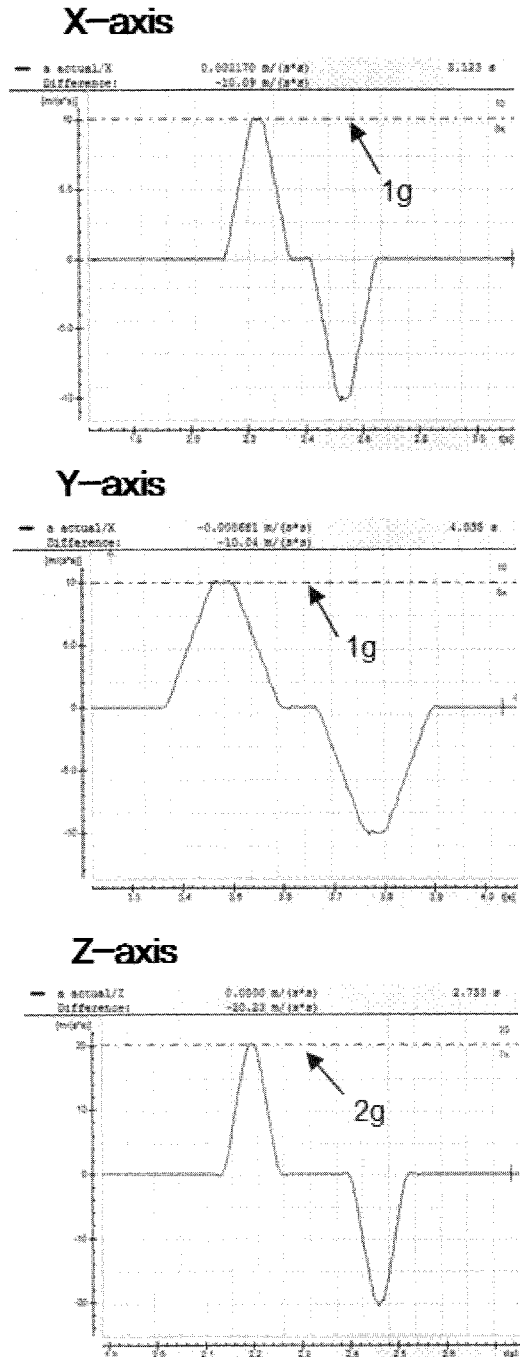


Fig. 12(a) The result of Max. acceleration of linear axis

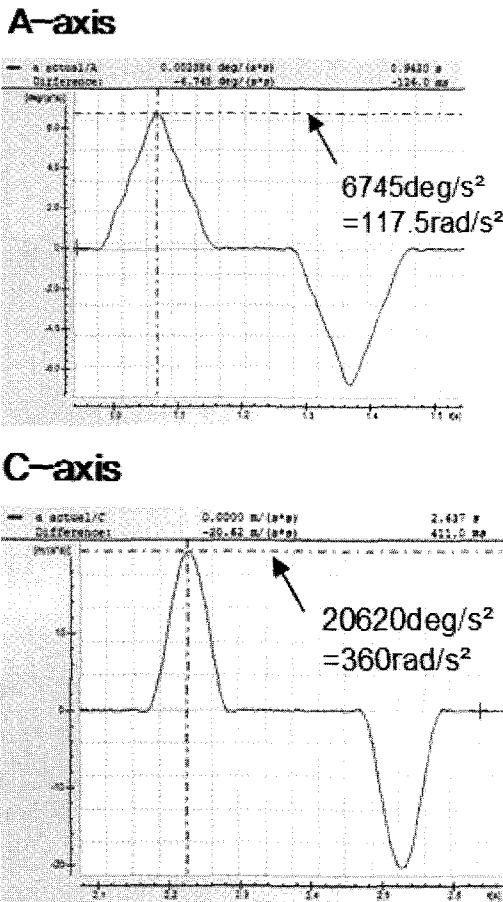


Fig. 12(b) The result of Max. acceleration of rotary axis

**4.1 이송계 가속도 측정**

최대 이송 속도로 X, Y, Z 축 방향으로 각각 400, 600, 350mm 왕복 이송하면서, 리니어 스케일의 가속도 신호를 측정하였다(Fig. 12). 가속도는 X, Y, Z 각각 1g, 1g, 2g 를 보이고 있다. 로터리 테이블의 회전 축에서는 A, C 축 각 회전 방향으로 240, 360 deg 를 왕복 이송하면서 각 가속도를 측정하였다. 각 가속도는 100 rad/s<sup>2</sup>, 350 rad/s<sup>2</sup> 이상으로 측정되었고 이 값은 모두 개발 목표치를 만족하고 있다.

**4.2 미네랄 캐스팅 base 진동 측정**

제작된 미네랄 캐스팅 base 의 진동 특성을 파악하기 위해 Free-free 조건 상태에서 모드 해석을 실시하였다.

실험 결과를 FEM 해석 결과와 비교할 때 1 차

와 2 차 모드의 순서는 차이 나지만 고유진동수 값은 2% 내외의 오차를 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 미네랄 캐스팅의 이론적 물성치가 실제와 매우 유사함을 나타낸다.

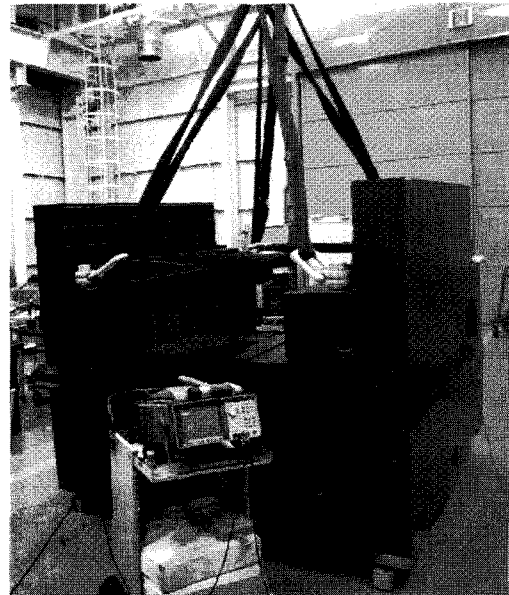


Fig. 13 Modal analysis of mineral casting base

Table 3 Comparison of mode shape


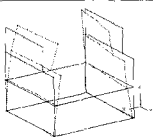

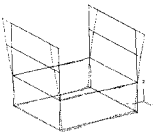
	Analysis	Test	Difference
Bending mode	 193Hz	 189Hz	2%
Torsion mode	 188Hz	 191Hz	2%

Fig. 14(a)는 미네랄 캐스팅의 감쇠 특성을 test 한 것이고 Fig. 14(b)는 일반적인 주물 소재로 된 Y 축 slide 구조물의 감쇠 특성을 test 한 것이다. 구조물의 형상과 크기의 차이로 직접적인 비교는 어렵지만 미네랄 캐스팅 소재의 감쇠특성이 일반 주물 소재보다 5 배 정도 우수한 것으로 실험적으로 나타났다.

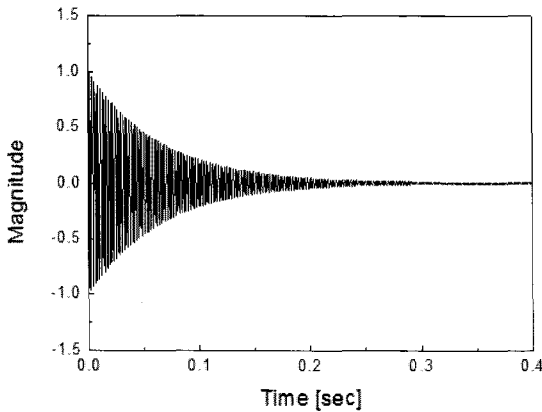


Fig. 14(a) Damping characteristic of mineral casting base

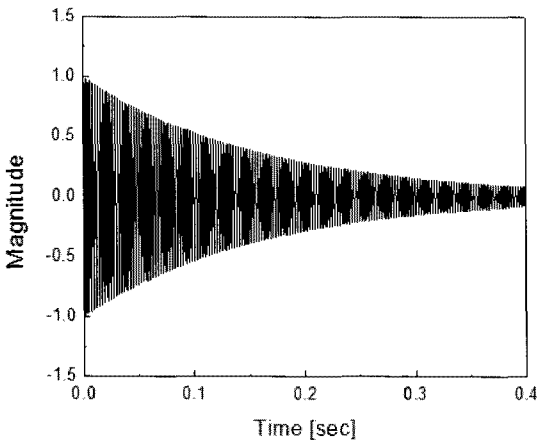


Fig. 14(b) Damping characteristic of cast iron structure

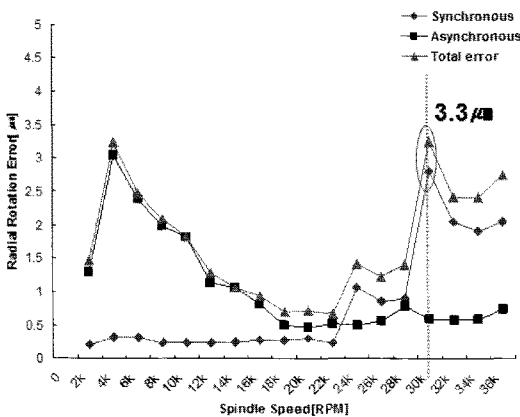


Fig. 15 Radial direction Error motion of spindle

4.3 주축의 회전 정밀도 측정

주축의 회전 정밀도는 ISO230-7 회전 축의 기

하학적 정확도 측정방법을 통해 실시하였다.

Fig. 15는 주축의 반경방향 회전 오차를 측정하는 것인데 전체 오차량은 3.5 μm 이내이고 저속 영역에서는 asynchronous 오차, 고속 영역에서는 unbalance 량에 의한 synchronous 오차가 지배적인 것으로 나타났다.

4.4 이송축의 정밀도 측정

이송축의 정밀도를 나타내는 방법에는 위치결정정밀도와 반복정밀도가 있다. 각 축의 최대 스트로크를 등 간격으로 나누어 임의의 위치에서 각 목표위치 방향으로 한 번씩 이송시킨 다음 양방향 측정을 한 후 목표 위치와 실제 위치와의 차이 중에서 최대값을 위치결정정밀도라 정의한다. ISO230-2 규격에서는 여러 번 이송시켜 통계적인 방법으로 계산한다. 반복정밀도는 7 회 양방향으로 이송시켜 이 때 최대 편차가 생기는 목표 위치에서 정의된다.

각 축에 대한 이송 정밀도를 레이저 간섭계를 사용하여 측정하였으며, 다음 그림은 그 결과를 나타낸다.

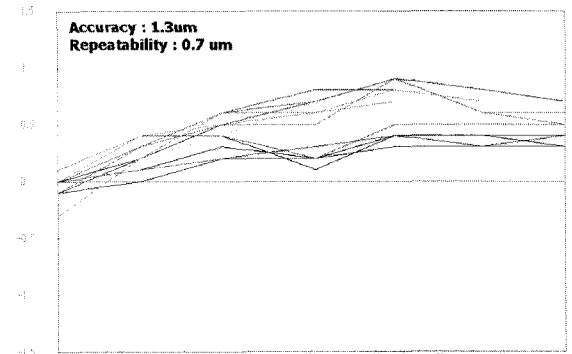


Fig. 16(a) Positioning accuracy of X-axis

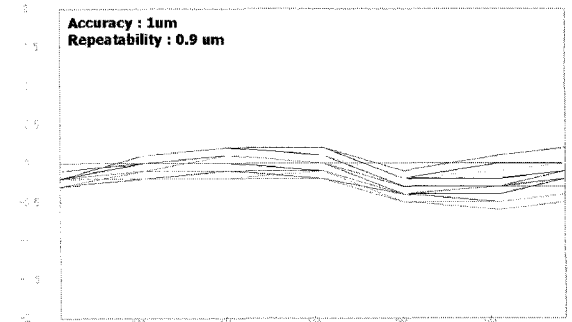


Fig. 16(b) Positioning accuracy of Y-axis

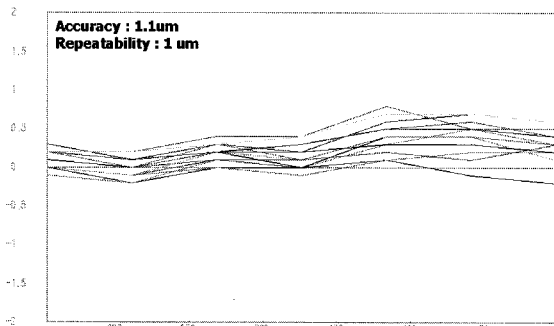


Fig. 16(c) Positioning accuracy of Z-axis

**4.5 이송축 원호 보간 정밀도**

XY 평면에서 원호 보간 정밀도를 측정하였다. Feed 속도 2000mm/min 에서 진원도 1.6  $\mu\text{m}$  의 매우 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

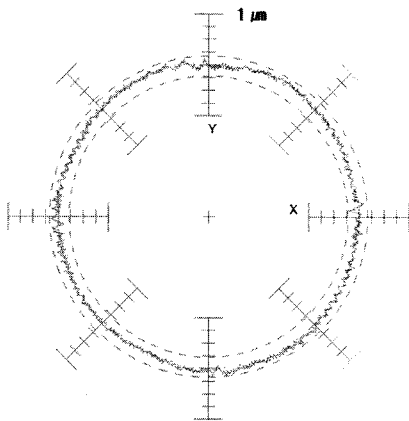


Fig. 17 Circularity test on XY plane

**4.6 미세 이송 특성**

각 축에 대한 미세 이송 지령(0.1  $\mu\text{m}$  및 0.0001 deg)에 대한 응답을 다음 그림에 나타내었다. 서브 마이크로 단위의 미세 이송 지령에 대해 충실하게 동작하고 있다.

**5. 결론**

본 논문에서는 초고속 고정밀 머시닝 센터 개발을 위한 설계 단계에서부터 장비 평가를 수행하였다.

1) 장비의 직선축 구성은 3 축 이송체를 집적하여 고속제어에 유리하고 공장물과 구동체가 완벽하게 분리되는 구조를 적용하였고, 미세랄 캐스팅

을 적용함으로써 장비의 감쇠 특성을 향상시켰다.

2) 장비의 lay-out 설계 단계에서는 각 요소들의 수학적 모델링을 통한 결과 도출로 반복적인 FEM 수행을 최소화 하였고, 최종 정, 동적 FEM 해석 및 열적 해석 수행을 통하여 상세 lay-out 을 도출하여 개발 소요 기간을 개선하였다.

3) 각 유닛트의 상세설계 단계에서는 요소 부품 선정, 조립 및 가공 용이성을 고려하여 목표 시방을 달성하였다.

4) 장비 성능 평가를 통해서 최대 2g 가속도, 주축 회전정밀도 3.5  $\mu\text{m}$ , 서브 마이크론의 미세 이송능력, 위치결정 정밀도 1  $\mu\text{m}$ 을 달성하였다.

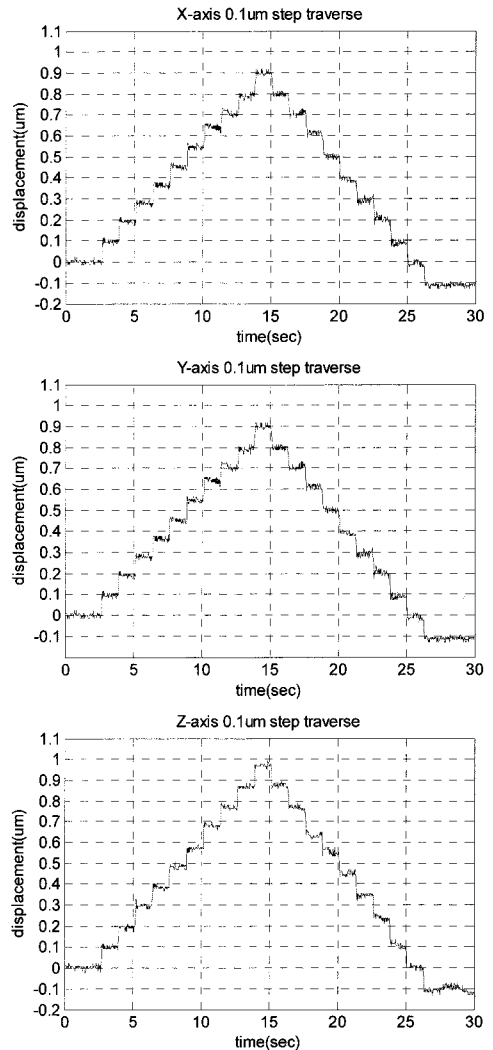


Fig. 18(a) Response to 0.1  $\mu\text{m}$  step commend for linear axis



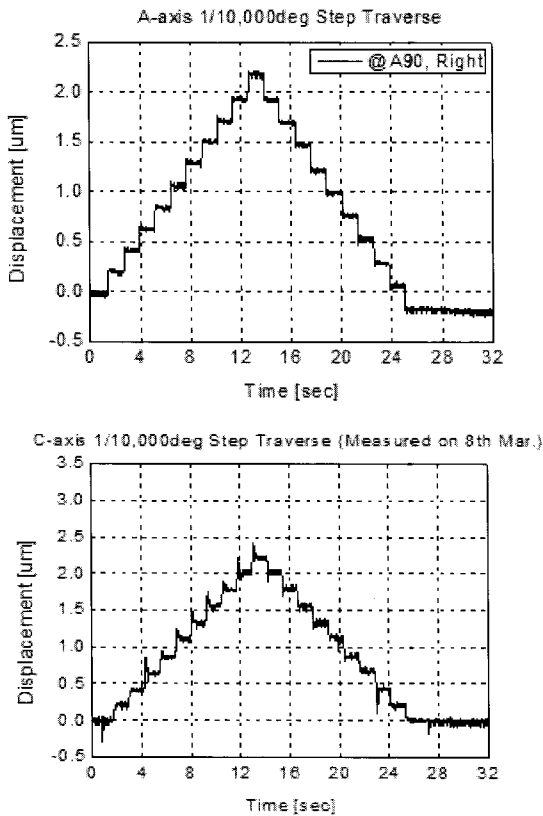


Fig. 18(b) Response to 0.0001deg step command for rotary axis

### 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 사업"의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. Lee, J. Y., Kim, T. H., Lee, D. W., Choi, Y. H. and Lee, D. G., "Development of High speed & Precision Machining Center for Mold & die," Ministry of Commerce, Industry and Energy, Final Report, 2002.
2. Weck, M., Kruger, P. and Brecher, C., "Limits for Controller Settings with Electric Linear Direct Drives," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 41, No. 1, pp. 65-88, 2001.
3. Jedrzejewski, J. and Modrzycki, W., "Supervision of Thermal Displacements in Machine Tools Based on

Predictive Model," VII Workshop on Supervising and Diagnostics of Machining System, pp. 104-110, 1996.

4. Kim, H. S., Park, K. Y. and Lee, D. G., "A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed," J. Materials Processing Technology, Vol. 48, No. 1, pp. 649-655, 1995.
5. ISO 230-7, "Test code for machine tools - Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation," 2006.
6. ISO 230-2, "Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes," 2006.