

# 레이저를 이용한 테이블 처짐 측정과 시뮬레이션에 관한 연구

박정보\*, 김민주\*\*, 전언찬\*\*\*

## A Study on the Measurement for Table Deflection using Laser Interferometer and Simulation

Jeong Bo Park\*, Min Ju Kim\*\*, Eon Chan Jeon\*\*\*

### Abstract

The acceleration of the performance of machine tools influences the development of the semi-conductor and optical technology as the development of NC and measurement technology.

Because the measurement has been done to unload condition without considering of mechanical stiffness in the case of machining center as we measure the quasi-static error of machine tools on general studys, people who works on the spot has many problems on the data value. Also there are no satisfiable results until now in spite of many studys about this because the deflections of the table and the shaft supporting a workpiece influence the accuracy of the workpiece. And there is doubt about the inspection method of measured error.

In this paper, Therefore, we will help working more accurately on the spot by measuring, analyzing, displaying the deflection of the table and support shaft when we load on the table and the support shaft of machining center using laser interferometer. Also we try to settle new conception of the measurement method and more accurate grasp of the deflection tendency by verifying the tendency of the error measured through the comparison of the simulated error using ANSYS, a common finite element analysis program, which is able to measure heat deformation, material deformation, and error resulted from this study.

**Key Words :** machine tool(공작기계), machining center(머시닝 센터), ANSYS(유한요소해석 프로그램), the quasi-static error (준 정적오차)

### 1. 서론

NC의 발전과 측정기술의 발전에 따라 공작기계의 성능

은 날로 가속화되어가고 그 영향에 의해 반도체 및 광학 기술의 발전은 눈부실 정도이다. 이와 같은 발전은 수요자의 요구수준이 점점 증대하고, 정밀도를 측정해 낼 수 있

\* 삼척대학교 기계공학과  
\*\* 동아대학교 대학원 기계공학과  
\*\*\* 동아대학교 기계공학과

는 측정기술의 급속한 발전이 전적으로 뒷받침하고 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이러한 측정기술로는 광간섭법 및 여러 가지 방법이 있다.<sup>11-3)</sup> 이러한 원리들을 이용하여 공작기계의 준정적오차를 측정한다. 일반적으로 머시닝 센터의 준정적오차에는 세 축의 길이방향 오차성분과 각 축에 대한 각오차, 그리고 축간결합오차 등 21가지의 기하학적 오차와 정적하중에 의한 오차, 열변형에 관련된 오차 등이 있으며 준 정적 오차인 기하학적 오차와 열변형 오차 등을 연구하는 팀으로는 문 등<sup>14)</sup>과 레이저를 이용하여 측정·분석하는 김 등<sup>15)</sup> 및 전 등<sup>16)</sup>을 비롯하여 여러 국가에서<sup>7-8)</sup> 연구가 진행중이다.

이러한 오차측정에 쓰이는 측정장비중 비교적 높은 코히런스(Coherency)를 나타내는 것이 레이저 인터페로메터(Laser interferometer)인데 이 장비는 평행도와 직각도 및 이송오차의 측정, 직선운동의 오차측정 등 다방면에 쓰인다. 미국 휴렛 팩커드사에서 NC공작기계의 정밀도를 측정하는데 레이저 인터페로메터를 이용한 레이저 측정장비를 개발하여 상품화하고 있다.<sup>9-11)</sup> 이 시스템의 특징은 광학 기기를 소형화할 수 있고, 하나의 레이저 건(gun)만으로도 6축 운동까지 동시에 측정할 수 있다는 것이다.<sup>12)</sup> 일반적인 연구들에서 공작기계의 준정적오차를 측정할 때 머시닝 센터의 경우 기계적 강성에 대한 문제는 고려하지 않고 측정을 무부하상태에서 행하기 때문에 실제 현장에서 가공을 하는 작업자에게는 데이터의 가치 측면에서 문제가 제기되고 있으며, 공작물을 지지하는 테이블과 지지축의 처짐은 공작물의 정밀도에 영향을 끼치기 때문에 여기에 관해서 많은 연구를 하여야 되지만 현재까지 만족할 만한 성과를 거두지 못하고 있다. 그리고 측정된 오차의 검증방법에 대한 의구심도 제기되고 있다.

따라서 본 연구에서는 레이저 측정장비를 사용하여 머시닝 센터의 테이블과 그 지지축에 하중을 가하였을 때의 테이블 및 지지축의 변형을 측정하여 분석하고, 이를 실제 생산현장에 적용시킴으로서 보다 정밀한 가공을 행할 수 있다. 또한 연구 결과에서 나타나는 오차와 재료의 변형 및 열변위를 측정할 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션한 것과 측정된 오차를 비교하여 경향을 파악함으로써 보다 정확한 처짐량을 구하는 것을 목적으로 한다.

## 2. 테이블 처짐의 이론적 해석

### 2.1 유한요소해석을 사용한 구조해석

#### 2.1.1 해석을 위한 리이드 스크류 및 리니어 가이드의 모델링

먼저 리이드 스크류 및 리니어 가이드의 전체형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 리니어 가이드는 리이드 스크류를 경계로 대칭형으로 위치하여 있고, 전체 길이가 450 mm이다. 또한 사각형의 형상을 취하고 있으며 아래 변의 길이가 22 mm, 옆 변의 길이가 50mm이다. (Fig. 4 a) 참고) 그리고 아래면이 베드에 접히 되어 있고, 재질은 기계구조용 탄소강인 SM55C로 되어 있다.

리이드 스크류는 지름 22 mm인 봉의 형태로써 길이가 450 mm이고, 양끝이 하우징에 고정되어 있다. 리이드 스크류의 재질은 리니어 가이드와 마찬가지로 SM55C로 되어 있으며, 유한요소해석 프로그램인 ANSYS에서는 SM55C의 물성치 및 특성치를 활용하여 구조해석을 수행하였다.

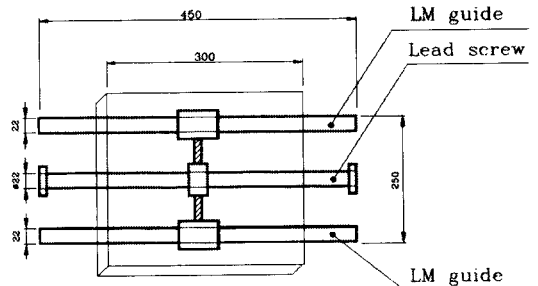


Fig. 1 Model of lead screw and LM guide

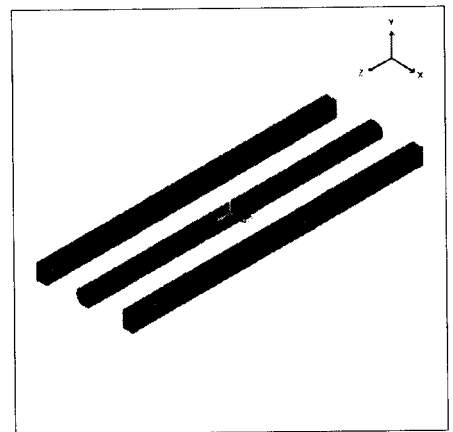


Fig. 2 The Finite element model of lead screw and LM guide

그리고 Fig. 2에는 리니어 가이드와 리이드 스크류의 유한요소모델을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 리니어 가이드는 사각형으로 메쉬를 하였고, 리이드 스크류도 사각형에 최대한 가깝게 메쉬를 취하였다.

본 실험에서는 그림상의 좌표계에서 Y축에 대한 변형에 중점을 두고 유한요소해석을 하였다.

### 2.1.2 하중조건

하중조건을 부여할 때 원점이 중요하다. 이것은 실제 측정에서 CNC이송중에 측정이 되는 것이 아니라 휴지기에 측정이 이루어지기 때문에 시뮬레이션 데이터와 측정데이터를 객관적으로 비교하기 위한 시도이다. 본 연구에서는 리니어 가이드와 리이드 스크류의 중심에서 좌측으로 150 mm 지점을 원점으로 설정하였다. 리니어 가이드와 리이드 스크류의 하중조건에서 작용하중 20, 40, 60, 80 및 100kgf를 원점에서 우측으로 50 mm, 100 mm, 150 mm 위치에 작용시킨다. Fig. 3은 여러 하중조건중 원점에서 우측으로 150 mm되는 지점에 하중이 작용하는 것을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 하중이 작용하는 위치에서의 면적을 짙은 색으로 나타낸 그림으로 리니어 가이드와 리이드 스크류 모두 상판에 하중이 작용하는 것으로 나타내었다. 이는 테이블을 지지하는 두 축이 테이블과 접촉하는 면적을 나타낸 것으로 아래 면을 하중위치로 하거나 윗면을 하중위치로 하거나 대등한 결과가 유도되므로 본 연구에서는 상판을 하중을 받는 면적으로 설정하였다. Fig. 4에서 하중이 작

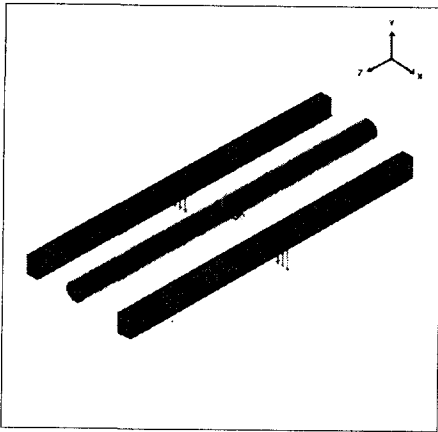


Fig. 3 Load condition for the FEA of lead screw and LM guide at 150 mm

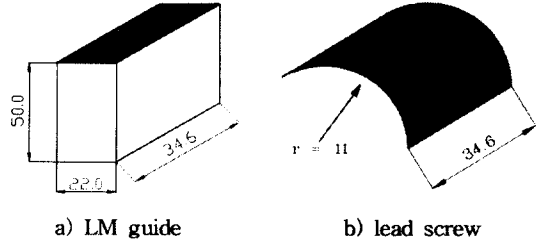


Fig. 4 The area on the position of loading

용하는 위치에서의 면적을 계산할 때, 리니어 가이드에서의 면적을  $a_1$ , 리이드 스크류에서의 면적을  $a_2$  라 하면, 식 (1)과 같이 구하여 진다.

$$a_1 = 22 \times 34.6 = 761.2 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

$$a_2 = r \cdot \theta \cdot l = 11 \times \pi \times 34.6$$

$$= 119.51 \text{ mm}^2 \quad (\pi \text{는 } 180^\circ \text{를 의미한다.})$$

또 실제 리드 스크류와 리니어 가이드가 받는 하중은 식 (2)에서 보는바와 같이 테이블의 자중과 지그무게, 그리고 공작물의 무게를 합한 값이다.

$$W_T = W_t + W_j + W_w \quad (2)$$

여기서,  $W_T$ : 리드 스크류와 리니어 가이드에 걸리는 하중

$W_t$ : 테이블의 자중

$W_j$ : 지그무게

$W_w$ : 공작물의 무게

윗 식에서 구해진 하중을 양쪽이 대칭인 구조이므로 절반만 하중조건을 부여하여 전체 길이에 대하여 해석한다. 이 때 중심부분, 즉 설정원점에서 150 mm되는 지점, 즉 리니어 가이드와 리드 스크류의 중심은 외란의 영향을 배제한 시뮬레이션이기 때문에 최대 처짐 량과 좌·우 대칭이 예상된다.

### 2.1.3 경계조건

Fig. 5는 본 실험에 사용된 유한요소모델의 경계조건을 나타낸 것으로서 그림에서 보는 바와 같이 리니어 가이드는 아랫면이 베드에 접지되어 있으므로 UX, UY, UZ의 직선방향성분과 회전성분 Rot X, Rot Y, Rot Z의 6방향성분이 0이므로 전체를 구속하였다. 그리고 리이드 스크류는 양단이 하우징에 고정되어 있으므로 리이드 스크류 끝쪽 노드를 구속하고, 정적해석을 하였다.

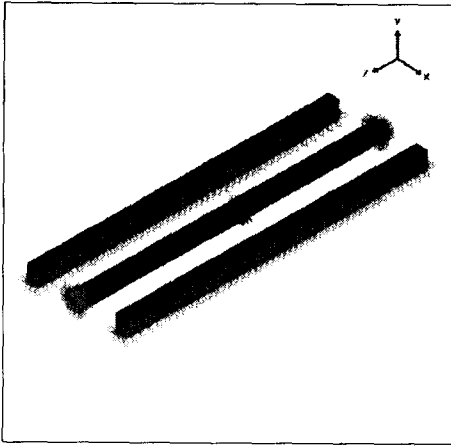


Fig. 5 Modeling of boundary condition

## 2.2 레이저 간섭계

### 2.2.1 레이저 간섭계를 이용한 각도 측정의 원리

Fig. 6은 레이저 간섭계의 각도 측정의 원리를 나타낸 것이다.<sup>(13-15)</sup> 그림에서 보는 것과 같이 레이저에서 지만 효과(자장에 의하여 스펙트럼이 분리되는 현상)에 의하여 서로 주파수가 다른  $f_1$ 과  $f_2$  성분이 광원으로 방사되어 앵글러 인터페로미터(Angular interferometer)를 통과할 때  $f_1$  성분은 굴절되고  $f_2$  성분은 굴절 없이 직진하여  $L_1$ 과  $L_2$  거리에 있는 앵글러 리플렉터(Angular reflector)에 각각 입사된다. 그리고  $L_1$  거리에서 반사되는 성분은 도플러 효과에 의해  $f_1 \pm \Delta f_1$ 으로 앵글러 인터페로미터에 입사되고,  $L_2$  거리에서 반사되는 성분은 마찬가지로의 효과에 의해  $f_2 \pm \Delta f_2$ 으로 앵글러 인터페로미터에 입사되어 두개의 성분은 광소자로 Photo detector에 입력된다. 이 과정에서 발생되어진 앵글러 인터페로미터의 각도  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 식(3)과 식(4)에 의하여 구하여진다.

$$\theta_1 = \arcsin \frac{L_1 - L_2}{5.239} \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{L_1 - L_2}{5.239} \quad (4)$$

(Infinite angle :  $\tan \theta \equiv \sin \theta$ )

여기서 5.239(단위 : cm)는 반사경의 규격에서 지원되는 거리이다.

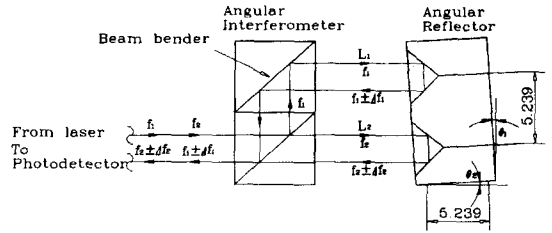


Fig. 6 Principle of the angle measurement for a laser interferometer

### 2.2.2 분위기의 변화에 의한 레이저 간섭계의 오차

레이저 간섭계는 기온이 1℃, 기압이 2.5 mmHg, 그리고 상대습도의 측정오차가 30% 변화할 때마다 측정길이의 변화는 1μm정도이다.<sup>(7-9)</sup> 즉, 측정 장소의 공기온도, 습도, 구성성분, 기압의 변화는 공기의 굴절을 변화를 유발하여 측정 정밀도에 직결되는 레이저 파장의 변화를 일으키고, 또한 피측정 물체를 신속시킴으로 이를 보정할 필요가 있다. 식(5)와 같은 굴절과 파장의 관계식<sup>(15)</sup>에서

$$n_0 \lambda_0 = n \lambda \quad (5)$$

여기서,  $n_0$  : 진공중의 굴절률

$\lambda_0$  : 진공중의 파장

$n$  : 측정 매질중의 굴절률

$\lambda$  : 측정 매질중의 파장

이다. 여기서  $n_0 = 1$  이므로

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (6)$$

이다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 실험의 실험장치는 Fig. 7에 나타난 바와 같다. ①은 레이저 측정장비인 휴렛 팩커드사의 HP5529A, ②와 ③은 측정 킷트인 앵글러 인터페로미터와 앵글러 리플렉터, 그리고 는 테이블에 작용하는 하중을 나타내었다. 는 측정 대상인 머시닝센터로서 기아중공업의 KV35C이다. 그리고 은 측정된 데이터를 분석, 저장, 디스플레이 할 수 있는 컴퓨터 시스템을 나타내고 있다.

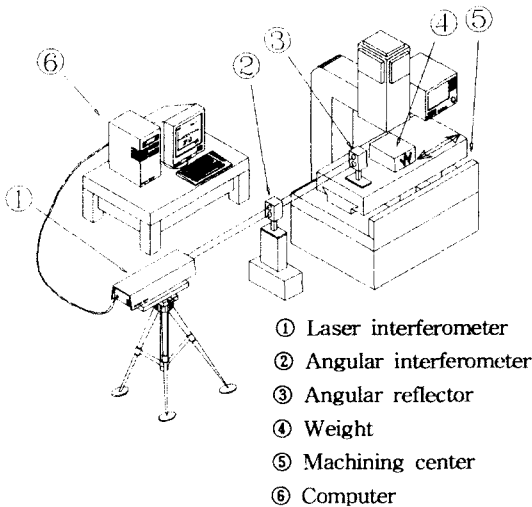
본 실험에 사용된 머시닝 센터는 X축의 스트로크

**Table 1 Chemical composition of the workpiece(wt. %)**

C	Si	Mn	P	S
0.54	0.25	0.75	0.025	0.023

**Table 2 Mechanical properties of the workpiece**

Yield strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation (%)	Hardness (HB)
539	735	10	252



**Fig. 7 Schematic of laser measurement system**

(Stroke) 400 mm, Y축의 스트로크 300 mm 및 허용하중이 200 kgf인 것을 사용하였고, 측정장비인 레이저는 분해능 10 nm, 정확도가 공기 중에서  $\pm 1.5$  ppm, 그리고 측정범위가 표준 상태에서 40 m 및 최대 속도  $\pm 0.7$  m/sec인 장비를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 유한요소해석 대상인 리드 스크류와 리니어 가이드의 재질은 기계구조용 탄소강인 SM55C이다. 이의 화학성분과 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. ANSYS에서는 이상과 같은 특성과 물성치를 고려하여 해석을 수행하였다.

### 3.2 실험방법

Fig. 7에 나타난 실험장치를 이용하여 머시닝센터의 X-

Y테이블에 레이저 측정장비의 앵글러 키트를 장치한 후 무부하 상태에서 머시닝 센터를 시운전하고, 20kgf, 40kgf, 60kgf, 80kgf 및 100kgf의 추를 X-Y테이블 위에 올려놓은 상태에서 테이블 중심을 리니어 가이드와 리이드 스크류의 중심에서 왼쪽으로 150 mm 이동한 다음 이 위치를 원점으로 잡고, 0 mm에서 300 mm까지 50 mm 간격으로 왕복운동을 실시하여 5회 순차적으로 테이블 처짐 값을 얻었다.(JIS B 6201 : 공작기계-시험방법 통칙의 공작기계의 위치결정에 관한 시험 및 측정방법의 항) 또한, 처짐의 경향을 보다 정확히 살펴보기 위하여 진직도를 보상하여 위치별에 따른 오차를 얻어내었다.

그리고 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS에서는 리니어 가이드와 리이드 스크류의 중심에서 왼쪽으로 테이블 중심을 이동시킨 다음 우측으로 50 mm, 100 mm 및 150 mm 되는 각각의 지점에 20kgf, 40kgf, 60kgf, 80kgf 및 100kgf의 하중을 작용시켜 유한요소해석을 수행하였다.

본 연구에서는 재료의 변형을 시뮬레이션 할 수 있는 ANSYS 프로그램을 사용하여 시뮬레이션한 오차의 경향과 실제 측정에서 구해진 오차의 경향을 비교 검토하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

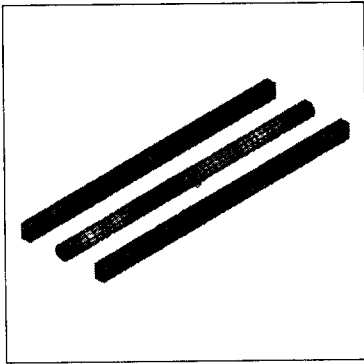
### 4.1 유한요소해석에 의한 X-Y테이블의 처짐

리드 스크류와 리니어 가이드에 대한 유한요소해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

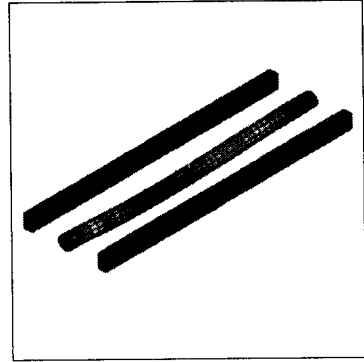
Fig. 8은 리드 스크류와 리니어 가이드의 중심부근에서 각각의 하중에 따른 처짐 량을 나타낸 그림으로 왼편에 위치한 그림은 해석결과를 1 : 1의 비율로 살펴본 것이며, 오른편의 그림은 처짐의 정도를 시각적으로 확인하기 위하여 스케일을 700 : 1의 비율로 조절하여 나타낸 것이다.

그림에서 리니어 가이드가 짙게 표시된 것은 변형이 거의 발생하지 않은 것을 나타내고 있는데, 이것은 리니어 가이드 아래면이 베드에 접지 되어 있으므로 변형이 거의 발생되지 않음을 나타낸다. 그리고 중심에 위치한 리드 스크류는 하우징에 의한 양단 지지보 형태이므로 중심부근에서 가장 심한 변형이 발생한 것을 나타내고 있다. 또한 동일위치에서 하중이 증가함에 따라 처짐 량이 증가함을 알 수 있다.

하중의 변화에 따른 처짐 량의 상관관계를 좀더 자세히 살펴보기 위하여 변형이 집중적으로 발생하는 리드 스크류의 150 mm 지점, 리드 스크류의 중심에서의 데이터를 도면 화한 것이 Fig. 9이다.

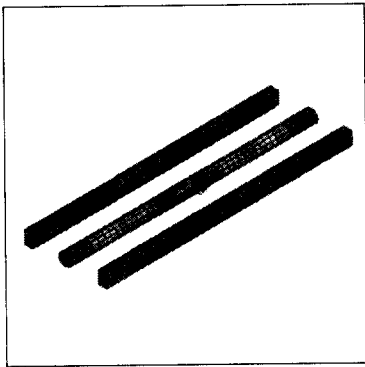


(1) scale 1:1

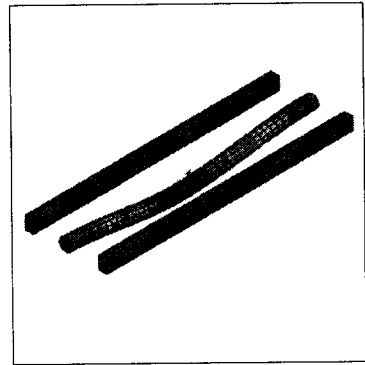


(2) scale 1:700

(a) 0 kg

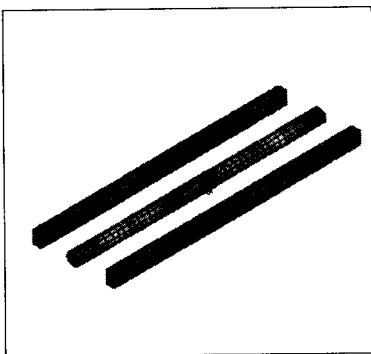


(1) scale 1:1

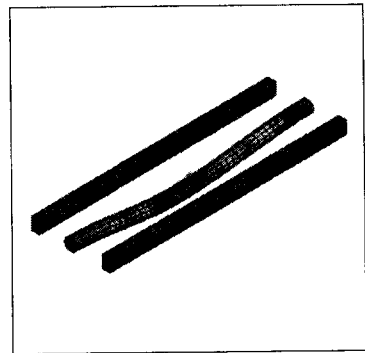


(2) scale 1:700

(b) 40 kgf



(1) scale 1:1



(2) scale 1:700

(c) 80 kgf

Fig. 8 The result of FEA at 150 mm measurement position

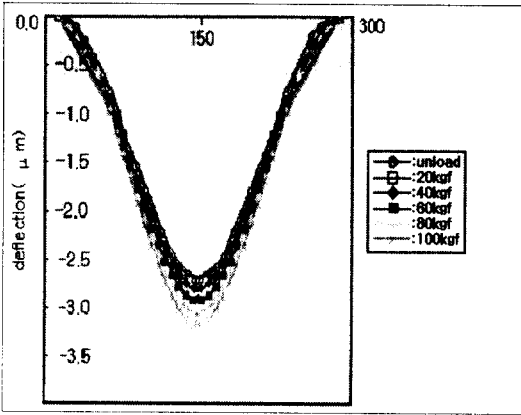


Fig. 9 Measurement of table deflection(load position : 150 mm)

그림에서 X축은 길이를 mm 단위로 나타내었고, Y축은 리니어 가이드와 리드 스크류의 처짐을  $\mu\text{m}$  단위로 나타내었다.

Fig. 9에서는 무부하시 약  $2.61\mu\text{m}$ , 40kgf의 하중이 작용할 때 약  $2.72\mu\text{m}$ , 그리고 100kgf의 하중이 작용할 때 약  $3.21\mu\text{m}$ 이 처졌다.

그림에서 알 수 있듯이 좌우 동형의 결과가 나오는데, 이것은 동일한 조건을 적용하여 시뮬레이션을 하였기 때문으로, 처음 유한요소 해석을 시행하면서도 예측된 결과이다. 그리고 리드 스크류의 중심부분, 즉 최대 처짐량을 비교해 볼 때 하중과 처짐량의 상관관계가 매우 선형적임을 알 수 있다.

그리고 무부하시 처짐이 발생하는 것은 지그와 테이블의 자중이 작용하였기 때문으로 판단된다.

#### 4.2 진직도 보상전 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐

Fig. 10은 위치의 변화에 따라 하중을 달리 하였을 때의 리니어 가이드와 리드 스크류의 처짐을 레이저를 사용, 측정하여 나타낸 그림이다.

그림에서 X축은 위치를 mm 단위로 나타내었고, Y축은 처짐량을  $\mu\text{m}$  단위로 나타내었다. 그리고 무부하시를 실선, 20, 40kgf의 하중이 작용할 때를 점선으로 나타내었고, 또한 60kgf의 하중이 작용할 때를 도트, 80kgf의 하중이 작용할 때를 일점 쇄선 및 100kgf의 하중이 작용할 때를 이점 쇄선으로 나타내었다.

Fig. 10에서 보는 것과 같이 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐은 불규칙적인 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 측정

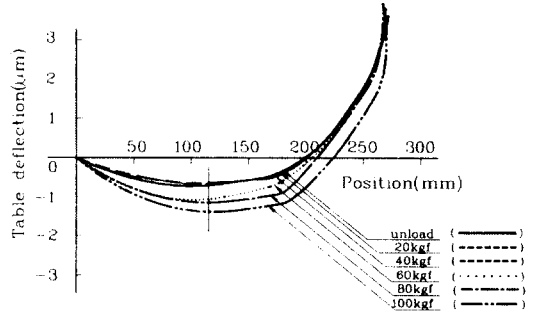


Fig. 10 Relation between table deflection and position for load(before compensation)

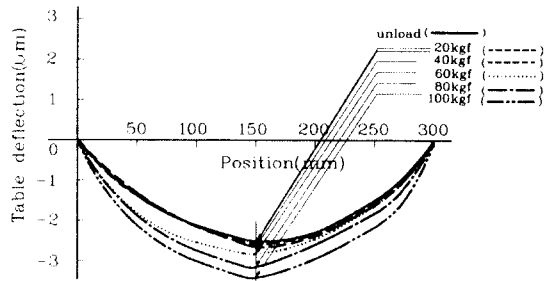


Fig. 11 Relation between table deflection and position for load(after compensation)

시 머시닝센터의 진직도가 틀어진 상태에서 측정을 한 결과이므로 보다 정확한 처짐의 경향을 얻기 위해서는 진직도를 보상할 필요가 있다. 그래서 본 실험에서는 각각의 위치별 데이터를 레이저 각도 측정기에서 측정된 데이터로 보정하여 Fig. 11과 같이 나타내었다.

#### 4.3 진직도 보상후 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐

Fig. 11은 Fig. 10에서 각각의 위치별 데이터를 레이저의 각도 측정기에서 측정된 데이터로 보정한 그림이다.

그림에서 X축은 위치를 mm 단위로 나타내었고, Y축은 처짐량을  $\mu\text{m}$  단위로 나타내었다. 그리고 무부하시를 실선, 20, 40kgf의 하중이 작용할 때를 점선으로 나타내었고, 또한 60kgf의 하중이 작용할 때를 도트, 80kgf의 하중이 작용할 때를 일점 쇄선 및 100kgf의 하중이 작용할 때를 이점 쇄선으로 나타내었다.

일반적으로 공작기계의 테이블은 대칭인 구조로 되어있다. 그렇다면 테이블을 지지하는 축의 처짐 역시 대칭의

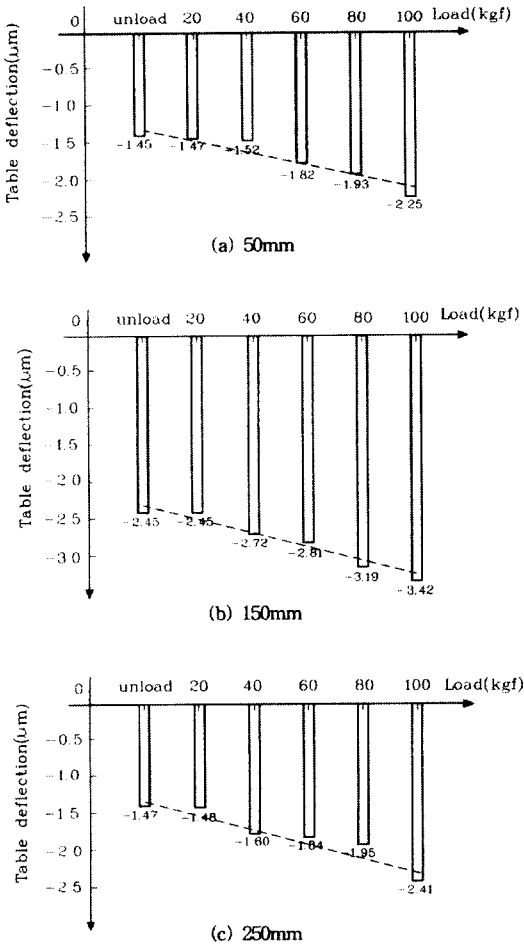


Fig. 12 Table deflection for load at 50 mm, 150 mm, 250 mm measurement position

구조를 나타내야 한다. Fig. 9의 시뮬레이션 데이터에서도 이러한 경향을 확인할 수 있었다. 그러나 실제 측정에서는 미소하게나마 리드 스크류의 중심인 150 mm 지점을 기준으로 우측으로 갈수록 조금 더 처지는 경향이 나타난다. 이와 같은 현상은 외란의 영향으로 판단되어 지며, 외란의 직접적인 요인으로 작용하는 것은 머시닝 센터로 작업을 할 때 원점 복귀 후 프로그램 원점을 주로 리니어 가이드와 리드 스크류의 중심을 기준으로 우측에 설정하기 때문으로 판단되어 진다.

따라서 중심을 기준으로 우측부분의 리드 스크류가 지그(jig) 및 공작물의 하중을 상대적으로 더 받기 때문에 일

어나는 현상으로 판단된다. 지그 하중을 제외한 공작물의 하중이 리니어 가이드와 리드 스크류에 미치는 영향을 알아보기 위하여 무부하, 20kgf, 40kgf, 60kgf, 80kgf, 100kgf의 추를 지그에 고정시켜놓은 상태에서 X-Y테이블의 처짐을 알아본 결과 지그만으로 측정된 리니어 가이드와 리드 스크류의 처짐은 최고 2.46µm이고, 하중이 100kgf인 상태에서는 3.42µm이다. 이러한 데이터를 Fig. 9의 시뮬레이션 데이터와 비교했을 때 최대 오차가 0.21 µm이므로 6.14%의 신뢰성을 가진다.

Fig. 11에서 하중이 증가할수록 리드 스크류의 처짐이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 부분적으로 역전되는 현상이 나타나지만 이는 실험상의 오차로 볼 수 있고, 전체적으로는 하중의 변화에 따라 선형적으로 오차가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향을 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 위치별 하중에 따른 오차를 나타내고, 하중의 증가에 대한 경향을 최소자승법으로 나타낸 것이 Fig. 12의 (a), (b) 및 (c)이다.

Fig. 12의 (b)는 최고의 기울기를 나타내고, (a)와 (c)의 기울기를 비교했을 때 (a) < (c)를 확인할 수 있다.

따라서 위에서 언급했던 실제 테이블의 처짐 측정에서 우측의 처짐이 좌측의 처짐보다 미소하게나마 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서 레이저 측정장비를 사용하여 머시닝 센터의 테이블과 그 지지 축에 하중을 가하였을 때의 테이블 및 지지축의 변형을 측정, 분석, Display하고, 실험 결과에서 나타나는 오차와 재료의 변형 및 열변위를 측정할 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션한 오차를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실제 측정에서 무부하시 최대 처짐량은 약 2.46µm 이고, 100kgf의 하중을 탑재한 경우 최대 처짐량은 약 3.42µm으로 하중이 증가할수록 처짐량이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 유한요소해석에서도 동일하게 나타났다. 따라서 처짐량은 하중에 비례하여 증가한다.
- (2) 유한요소해석에서 동일한 하중조건일 때 하중이 작용하는 위치를 변화시키면 최대 처짐의 위치 또한 동일한 방향으로 이동한다.



- (3) 리니어 가이드와 리이드 스크류의 중간지점을 기준으로 유한요소해석에서는 좌·우 대칭의 결과가 나타나지만 실제 측정에서는 우측지점으로 진행할수록 처짐이 더 많이 일어난다.

## 후 기

이 논문은 1997년도 동아대학교 학술연구조성비 (공모 과제)에 의하여 연구되었음

## 참 고 문 헌

- (1) 市ノ川竹男, "SEMとSTMの複合機", 精密工學會誌, pp. 1835~1840, 1987
- (2) 안근식, 장경영, 문희관, "광간섭법을 이용한 절 대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구", 韓國精密工學會 秋季學 術大會論文集, pp. 493~498, 1994
- (3) 植木正明, 大岩彰, "ヘテロタイン干渉法による油 マノメタの液位差の精密測定", 精密工學會誌, vol. 58, No. 1, pp. 120~126, 1992
- (4) 문준희, 김영삼, 박희재, 주종남, "기구불바를 이 용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술개발", 대한 기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 693~700, 1996
- (5) 김진상, 정성중, "레이저 광학장치를 이용한 5자 유도 오차측정에 관한 연구", 한국정밀공학회지, pp. 375~378, 1997
- (6) 全彦燦, 廣田康宏, 堤正臣, 周曉光, "CNC工作機 械の位置決め精度向上に關する研究", 日本精密工學會 第1回學生會員講演會講演論文集, pp. 95~98, 1994
- (7) Robert J.Hocken, Howard P.Layer, Russell D.Young, "Lasers for Dimensional Measurement", CIRP, Vol. 28, pp. 303~306, 1979
- (8) P.H.J.Schellekens, J.Koning, P.C.Veenstra, "Accuracy of Commercially Available Laser Measurement Systems", CIRP, Vol.31, pp. 427~429, 1982
- (9) C. R. Steinmetz, "Sub - micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometry", PRECISION ENGINEERING, January 1990, Vol. 12, No. 1, pp. 12~24
- (10) P. S. Lingard, "Length-Bar and Step-Gauge Calibration Using a Laser Measurement System with a coordinate Measuring Machine", Annals of the CIRP, Vol. 40, No. 1, pp. 515~517, 1991
- (11) G. Zhang, C. Wang, "A Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary Angles", Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, pp. 395~398, 1987
- (12) 강철희, "공작기계 기술의 현재와 미래<sup>14)</sup>" 한국정밀공학회지, 제13권, 제5호, pp. 15~29, 1996. 5
- (13) J. G. Mazlof, "Angle Measuring Interferometer", Rev. Sci. Instrum, Vol. 35, No. 9, 1964
- (14) Hu Xiaotang, "A Study on the Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary angle", Doctoral Dissertation, Tianjin University, China, 1986
- (15) 박준호, "정밀측정시스템공학", 야정출판사, pp. 205~206, 1993
- (16) Herrmann, L. K, and Campbell, D. M, "A Finite Element Analysis for the Shells", AIAA Journal, Vol. 6, No. 10, pp. 1842~1847, 1968
- (17) J. P. Jeusette, G. Laschet and P. Charpentier, "Finite Element Analysis of Composite Revolution Structures Wound by Wide Plies", pp. 221~237, 1987