

레이저 간섭계에 의한 테이블의 처짐측정과 FEA에 의한 이의 검증

A Study on the Measurement of Table Deflection using Laser Interferometer and It's Inspection using FEA

이승수*, 김민주(동아대 대학원), 김순경(동의공업대), 박정보(삼척대), 전언찬(동아대)
S. S. Lee, M. J. Kim, (Dong-A Univ. Graduated School), S. K. Kim(Dong-eui Tech. Univ.)
, J. B. Park(Samchdok. Univ), E. C. Jeon(Dong-A Univ.)

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.

We can mention that a traction role of the acceleration for the development like that depends on the development of the measurement technics Stylus instrument method, STM, SEM, Laser interferometer method which are used for measuring the the quasi-statio error of machine tools.

Because the measurment 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.

Therefor 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 measurment 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 deformaton, material deformation, and error resulted from this study.

Key words : Laser interferometer(레이저 간섭계), Table deflection(테이블 처짐), Machining center(머시닝 센터), Straightness(진직도), FEA(Finite element analysis:유한요소해석), Geometric error(기하학적 오차), Quasi-static error(준정적 오차)

1. 서론

공작기계의 성능이 날로 가속화되어가고 그 영향에 의해 반도체 및 광학기술의 발전은 눈부실 정도이다. 이와 같은 발전은 수요자의 높은 정밀도에 대한 욕구와 이를 반영하여 정밀도를 측정해 낼 수 있는 측정기술의 급속한 발전에 기인한다. 측정기술로는 Stylus instrument method, STM¹⁾, SEM¹⁾, 광간섭법^{2),3)} 등이 있고, 이러한 원

리들을 이용하여 공작기계의 준정적오차를 측정할 수 있다. 일반적으로 머시닝 센터의 준정적오차에는 21가지의 기하학적 오차와 정적하중에 의한 오차, 열변형에 관련된 오차 등이 있으며 준정적 오차인 기하학적 오차와 열변형오차 등을 연구하는 팀으로는 국내에서는 대표적으로 서울대 박희재 교수팀⁴⁾과 한양대 정성종 교수팀등이 있

다. 이러한 오차측정에 쓰이는 측정장비중 비접촉식으로 높은 코히런트(coherent)를 나타내는 것이 레이저 인터페로메터(Laser interferometer)인데⁵⁾ 이 장비는 평행도와 직각도 및 이송오차의 측정, 직선운동의 오차측정 등 다양한 방법에 쓰인다.

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 측정, 분석, Display함으로써 실제 생산현장에서 보다 정밀한 가공을 행할 수 있도록 할 것이며, 연구 결과에서 나타나는 오차와 재료의 변형 및 열변위를 측정할 수 있는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 시뮬레이션한 오차와의 비교를 통해 측정된 오차의 경향을 검증함으로써 보다 정확한 처짐의 경향 파악 및 측정의 방법에 대한 새로운 개념을 정립하고자 한다.

2. 이론적 해석

2.1 레이저 간섭계

2.1.1 레이저 간섭계를 이용한 각도 측정의 원리

레이저 간섭계의 각도 측정의 원리는 레이저에서 지만효과(자장에 의하여 스펙트럼이 분리되는 현상)에 의하여 서로 주파수가 다른 f_1 과 f_2 성분이 광원으로 방사되어 앵글러인터페로메터(Angular interferometer)를 통과할 때 f_1 성분은 굴절되고 f_2 성분은 굴절없이 직진하여 L_1 과 L_2 거리에 있는 앵글러리플렉터(Angular reflector)에 각각 입사된다. 그리고 L_1 거리에서 반사되는 성분은 도플러 효과(Doppler shift)에 의해 $f_1 \pm \Delta f_1$ 으로 앵글러인터페로메터에 입사되고,

L_2 거리에서 반사되는 성분은 마찬가지로의 효과에 의해 $f_2 \pm \Delta f_2$ 으로 앵글러인터페로메터에 입사되어 두개의 성분은 광소자로 Photo detector에 입력된다. 이 과정에서 발생되어진 앵글러인터페로메터의 각도 θ_1 과 θ_2 는 1)식과 2)식에 의하여 구하여진다.

$$\theta_1 = \arctan \frac{L_1 - L_2}{5.239} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \arcsin \frac{L_1 - L_2}{5.239} \quad (2)$$

(Small angle : $\tan \theta \cong \sin \theta$)

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

2.1.2 레이저 간섭계의 여현오차(Cosine error)

측정물의 운동 축과 레이저 광축이 평행하게 정렬되지 않고 어떤 각을 이룰 때 레이저에 의해 측정된 값과 실제 거리가 같지 않게 된다. 이때 생기는 오차 ΔL 을 여현오차라 부르며, 여현오차에 의하여 발생하는 각 θ 의 코사인에 비례하기 때문에 코사인오차라 부른다. 여현오차는 작은 거리를 측정할 때에는 문제가 되지 않으나 긴 거리를 측정할 때에는 정확한 광속 정렬이 필요하다.

2.2 머시닝 센터의 준정적오차

머시닝 센터의 준정적오차 성분은 3축에 대한 길이 방향의 오차와 축에 대한 각오차 및 축간 결합오차를 포함하여 총 21개의 기하학적 오차와 하중에 의한 오차, 열변형에 기인한 오차 등이 존재하는 것으로 밝혀지고 있다.

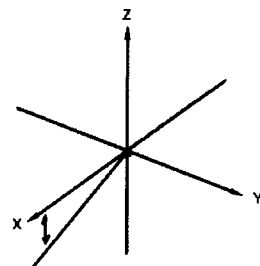


Fig. 1 Straightness error (Z axis)

Fig. 1은 레이저를 이용하여 측정할 머시닝 센터의 준 정적 오차중 하중에 의한 변형측정과 관계된 X축의 Z방향 진격도 오차를 나타낸 것이다.

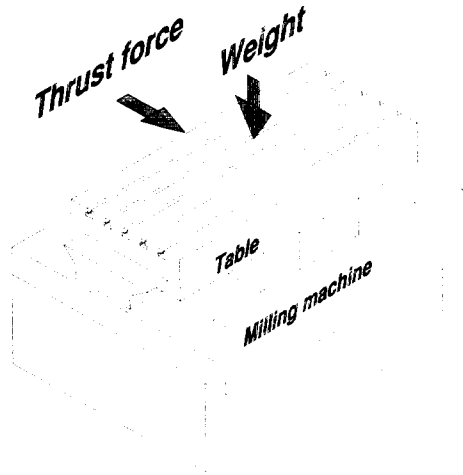


Fig. 2 The expected error factors of X-Y table on the loaded condition

그리고 본 실험에서는 무부하상태가 아닌 부하상태에서의 오차를 검출하고자 하므로 부하상태에서 테이블과 지지축의 변형을 발생시키는 가장 유력한 요소인 배분력과 하중의 작용방향을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보는 것과 같이 머시닝 센터에서 부하상태를 가정할 경우 하중에 의한 테이블의 처짐과 Z축 가공에서 발생하는 힘에 의한 오차를 예측할 수 있는데 본 연구에서는 하중에 의한 오차에 중점을 두고 연구하고자 한다.

2.3 유한요소해석을 사용한 구조해석

2.3.1 해석을 위한 볼 스크류 및 리니어 가이드의 모델링

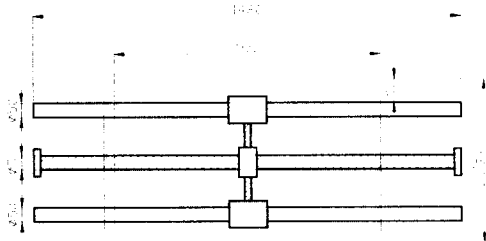


Fig. 3 Form dimension of ball screw and LM guide

먼저 볼스크류 및 리니어 가이드의 전체형상을 Fig. 3에서처럼 도면화하고 전체를 모델링하였으며, 또한 유한요소해석을 하기 위하여 단위를 mm와 MPa로 통일하여 사용하였다.

2.3.2 하중조건

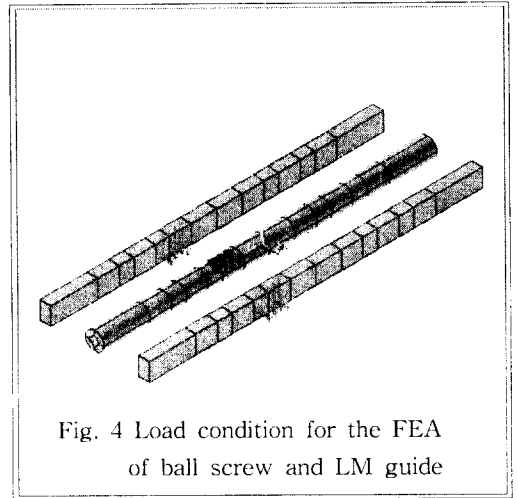


Fig. 4 Load condition for the FEA of ball screw and LM guide

리니어 가이드와 볼 스크류의 하중조건에서 하중의 작용위치는 볼 스크류와 리니어 가이드의 중심에서 좌측으로 300mm이동시킨 지점을 원점으로 잡았을 때 원점을 기준으로 우측으로 100mm, 200mm, 300mm지점이다. 그리고 작용하중은 40, 60, 80, 100kg을 각각의 위치에 작용시킨다. Fig. 4는 여러 하중조건중 원점에서 우측으로 200mm되는 지점에 하중이 작용하는 것을 나타낸 것이다.

2.3.3 경계조건

Fig. 5은 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 6방향 성분이 0이므로 전체를 구속하였다. 그리고 볼 스크류는 양단이 하우징에 고정되어 있으

므로 볼 스크류 양끝쪽 노드를 구속하고, 정적해석을 하였다.

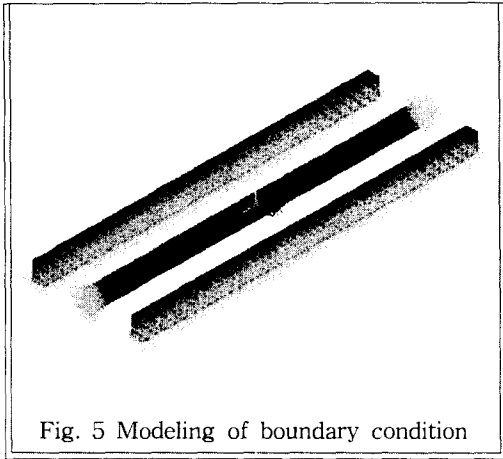


Fig. 5 Modeling of boundary condition

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

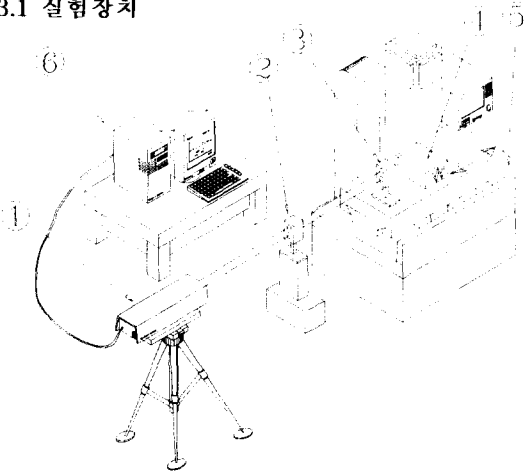


Fig. 6 Schematic of measurement system

본 실험의 실험장치는 Fig. 6에 나타난 바와 같고, 사용된 머시닝센터는 기아중공업의 KV35C이다. 그리고 실험장치의 설명을 Table 1에, 테이블의 제한은 Table 2에 나타내었다. 또한 측정레이저의 성능은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Description of a experiment equipment

No	Description
①	휴렛팩커드사의 헬륨-네온 지만효과 레이저
②	앵글러인터페로메터
③	앵글러리플렉터
④	하중(load)
⑤	머시닝 센터
⑥	데이터를 분석, 저장, Display 할 수 있는 컴퓨터

Table 2 The Spec. of Machining Center's Table

Item	Spec
1. Stroke of X axis	600mm
2. Stroke of Y axis	450mm
3. Allowable Load	300kgf

Table 3 The displacement of laser interferometer

Item	Displacement
Resolution	10nm (normal)
Accuracy	± 1.5ppm in air
Range	40m (standard)
Max velocity	± 0.7m/sec

본 연구에서 사용된 유한요소해석 대상인 볼 스크류와 리니어 가이드의 재질은 기계구조용 탄소강인 SM55C이며, 이의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Chemical composition of the workpiece

(wt. %)

C	Si	Mn	P	S
0.54	0.25	0.75	0.025	0.023

Table 5 Mechanical properties of the workpiece

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

3.2 실험방법

Fig. 6에 나타난 실험장치를 이용하여 머시닝센터의 X-Y테이블에 레이저측정장비의 앵글러리플렉터를 장치한 후 무부하 상태에서 머시닝 센터를 시운전하고, 40kg, 60kg, 80kg, 100kg의 추를 X-Y테이블 위에 올려놓은

상태에서 X-Y테이블의 중심을 기준으로 왼쪽으로 300mm 이동한 다음 이 점을 원점으로 잡고, 0mm에서 600mm까지 100mm 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 얻어내고, 재료의 변형을 시뮬레이션 할 수 있는 ANSYS 프로그램을 사용하여 실제 측정된 오차의 경향과 시뮬레이션한 오차의 경향을 비교 검토함으로써 데이터의 신빙성을 제고할 계획이다.

이러한 실험은 측정장비인 레이저에서 온도가 1℃ 변화할 때, 기압이 2.5mmHg 변화할 때, 그리고 상대 습도의 측정오차가 30% 변화할 때 측정길이의 변화가 1μm정도이므로 이를 고려하여 다음과 같이 실험 조건을 설정하였다. 기온은 20℃로 그리고 습도는 10%미만으로 에어컨디셔너를 사용하여 설정하고, 진동을 막기 위하여 측정장비의 받침으로 방진고무를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐

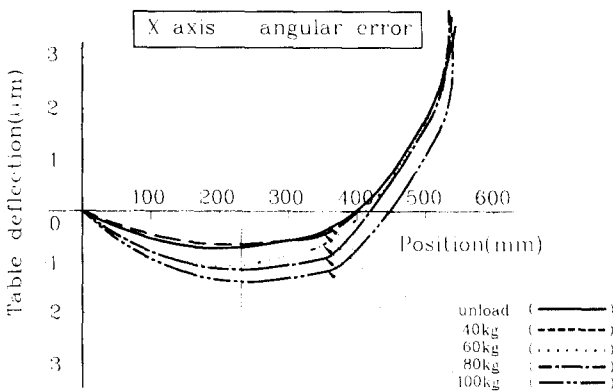


Fig. 7 Table deflection value by load at X axis before compensation of straightness.

Fig. 7에서 보는 것과 같이 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐은 불규칙한 경향을 보인다. 이와 같은 경향

은 측정시 M/C의 진직도가 틀어진 상태에서 측정한 결과이므로 보다 정확한 처짐의 경향을 얻기 위해서는 진직도를 보상할 필요가 있다. 그래서 본 실험에서는 각각의 데이터의 위치별 데이터를 진직도의 각도로 보상하여 데이터를 정의하였다.

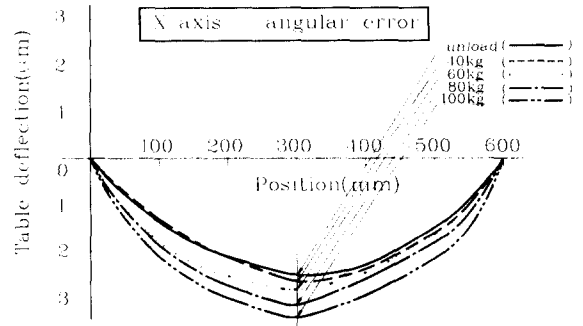


Fig. 8 Table deflection value by load at X axis after compensation of straightness.

하중에 의한 처짐의 정확한 경향을 살펴보기 위하여 진직도를 보상한 데이터로 나타낸 것이 Fig. 8이다. Fig. 8에서 첫째, 하중이 증가할수록 처짐량 또한 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 경향을 좀더 자세히 살펴보기 위하여 중심부근의 위치에서 하중을 증가시켰을 때의 처짐량을 나타내고, 이의 경향을 LSM으로 나타낸 것이 Fig. 9이다. Fig. 9에서 처짐의 경향이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그리고 일반적으로 테이블을 지지하는 축인 볼 스크류와 리니어 가이드가 대칭인 구조로 되어 있으므로 처짐 역시 대칭의 구조를 나타내야 하는데 Fig. 8에서 보면 미소하게나마 X-Y테이블의 중심을 기준으로 우측으로 갈수록 조금 더 처지는 경향을 얻을 수 있었다. 이와 같은 현상은 시뮬레이션에서는 나타나지 않으며 외란의 영향으로 볼 수 있다. 이는 머시닝 센터로 작업을 할 경우 원점복귀후 프로그램 원점을 설정할 때 주로 X-Y 테이블의 중심을 기준으로 우측에서 작업이 이루어지며, 우측부분의 리드스크류가 지그(jig) 및 공작물의 하중을 상대적으로 더 받기 때문에 일어나는 현상이라고 판단되어진다.

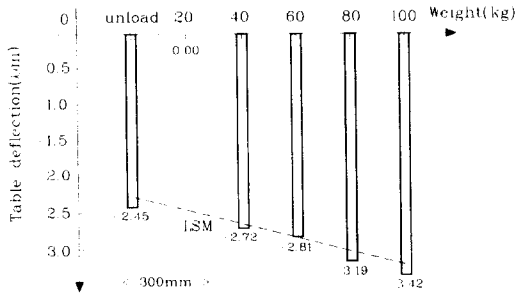


Fig. 9 Table deflection according to weight at 300mm measurement position

4.2 유한요소해석의 고찰

위에서 고찰한 측정된 값의 경향과 비교 검토하기 위하여 볼 스크류와 리니어 가이드에 대한 유한요소 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다.

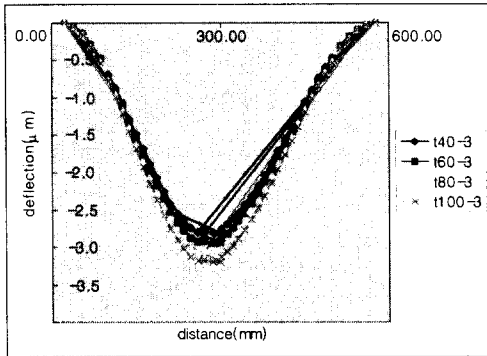


Fig. 10 Table deflection according to weight at 300mm measurement position

Fig. 10은 하중의 변화에 따른 처짐량의 상관관계를 좀더 자세히 살펴보기 위하여 데이터를 도면화한 것으로서 무부하시 최대 처짐량은 $2.73\mu\text{m}$, 100kgf의 하중이 작용할 때 최대 처짐량은 $3.21\mu\text{m}$ 으로 실제 측정치와 마찬가지로 하중이 증가할수록 처짐량 또한 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 실험에서 하중에 의한 머시닝센터의 테이블 처짐을 연구하고, 유한요소해석을 통해 시뮬레이션한 결

과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 측정의 경우 무부하시 최대 처짐량은 약 $2.46\mu\text{m}$ 이고, 100kgf의 하중을 탑재한 경우 최대 처짐량은 약 $3.42\mu\text{m}$ 으로 하중이 증가할수록 처짐량이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 유한요소해석에서도 동일하게 나타나며, 따라서 하중과 처짐량의 상관관계는 선형적임을 알 수 있다.
- 2) 실제 측정에서 무부하시 $2.46\mu\text{m}$ 이 처지는 이유는 테이블 자중과 지그무게가 상시로 계재되기 때문으로 판단된다.
- 3) 볼 스크류의 중간지점을 기준으로 유한요소해석에서는 좌·우 대칭의 결과가 나타나지만 실제 측정에서는 우측지점으로 진행할수록 처짐이 더 많이 일어나는 것을 알 수 있다. 이는 외란의 영향으로 보여지며, 외란의 요인으로는 작업시 테이블을 우측으로 이동시킨 상태에서 왼쪽 방향으로 가공이 이루어지고, 기계원점이 일반적으로 우측전면에 위치함으로써, 테이블과 지그무게가 상시로 볼 스크류와 리니어 가이드에 계재되기 때문으로 판단된다.

6. 참고문헌

- 1) 市ノ川竹男, "SEMとSTMの複合機", 精密工學會誌, pp. 1835~1840, 1987. 12
- 2) 안근식, 장경영, 문희관 "광간섭법을 이용한 절대 높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구", 韓國精密工學會 秋季學術大會論文集, 1994, pp. 493~498
- 3) 植木正明, 大岩彰, "ヘテロダイン干渉法による油マノメー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 "기구볼바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술개발", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, 1996, pp.693~700
- 5) G. Zhang, C. Wang, "A Laser Interferometric System for Measuring Arbitrary Angles" Annals of the CIRP, Vol. 36, No. 1, 1987, pp. 395~398