

하중에 의한 위치결정오차와 테이블 처짐에 관한 연구

박정보*, 전언찬**

A Study on the Positioning Accuracy and Table Deflection by Load

Jeong Bo Park*, Eon Chan Jeon**

Abstract

As the accuracy of manufactured goods needed high accuracy processing has made the efficiency of NC and measurement technology development, the innovation of machine tools has influence the development of the semi-conductor and optical technology.

The movement errors can be expressed in terms of yaw, roll and pitch etc. In the case of expanding the error range, static, dynamic and servo gain errors can be included.

Machining center might have twenty-one movement errors including three types of joint errors. Those errors have been measured on the condition of just loading of standard table.

Regarding these measuring methods, the mechanical compliance of the structure has not been considered.

In this paper, therefore, the influences of the additional load on the positioning accuracy are investigated. The results and the techniques proposed in this study can be considered very effective and useful to compensate more correctly the positioning motion.

Key Words : Positioning accuracy(위치결정 정밀도), Machine tool(공작기계), Machining center(머시닝 센터), Axes joint error(축간결합오차)

1. 서론

고정밀가공이 요구되는 제품의 수요가 증가함에 따라 공작기계의 성능은 날이 갈수록 가속화되고 있다. 그리고 그 영향에 의해 반도체 및 광학기술은 눈부시게 발전하였

다. 이와 같은 발전의 견인역할은 측정기술이 전적으로 뒷받침하고 있다고 해도 과언이 아닐 것이다. 이런 측정기술로는 Stylus instrument method, 광간섭법 등이 있다. 이런 방법들을 이용하여 공작기계의 운동정밀도를 측정할 수 있다. 운동정밀도에서는 한 축의 운동오차요소를

* 삼척대학교 기계공학과
** 동아대학교 공과대학 기계공학과

요(yaw), 롤(roll) 및 피치(pitch) 등으로 나타낼 수 있는데⁽¹⁾ 공작기계 중 머시닝 센터의 경우는 3축이므로 운동오차요인은 축간결합오차 3개를 포함하여 총 21가지의 오차가 있고, 오차의 범위를 확대할 경우 준정적, 동적, 진동 및 서보게인오차(servo gain error)와 같은 NC구동시스템오차까지 있다. 이와 같은 많은 오차의 요인들은 그 원인이 일부만 밝혀져 있으며, 준정적 오차(quasi-static error)인 기하학적 오차에 관해서는 여러 대학에서 연구를 수행 중에 있다.⁽²⁻⁶⁾ 국내에서는 서울대 및 한양대 등이 있으며, 일본 동경농공대학 堤正臣 교수팀도 동일한 연구를 하고 있다. 이와 같은 연구들에서 머시닝 센터의 경우 기계적 변형에 대한 문제는 고려하지 않은 채 무부하 상태에서 측정을 하고, 이의 보정을 하는 연구를 주로 하고 있는데, 이는 현장의 요구가 제대로 반영되었다고 볼 수 없다. 공작기계를 사용하여 작업을 할 때에는 공작물과 지그의 무게, 그리고 절삭력 및 배분력이 테이블에 작용한다. 그러므로 이에 관한 영향이 고려되어야 정확한 보상이 가능해 진다.

따라서 본 연구에서는 머시닝 센터의 테이블의 처짐에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 하중을 변화시켜 이것이 테이블의 위치결정정밀도에 미치는 영향 및 테이블과 그 지지축의 변형상태를 레이저 간섭계를 이용하여 측정, 분석하고자 한다.

2. 레이저 간섭계에 의한 측정원리

레이저 측정기에 의한 미소거리의 측정원리⁽⁸⁾를 Fig. 1에서 나타내었다. 광원인 파장 안정화 He-Ne 레이저로부터 주파수가 f_1, f_2 로 서로 약간 다르고 그 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선 편광광이 사출된다. 기준 비트신호를 얻기 위하여 광속분리기(beam splitter) BS로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수 차이 ($f_1 - f_2 = 2.204$ MHz)의 비트신호를 검출하고 증폭과정을 거친후 주파수 카운터에서 계수된다. 한편 광속 분리기를 통과하여 반사경이 부착된 간섭계(interferometer)로 향한 빔은 간섭계에서 편광방향에 대응하여 투과광(f_2 성분)과 반사광(f_1 성분)으로 분리되어 반사광은 C2(반사경)에서 반사되고, 투과광은 C1(간섭계)에서 반사된 후 광속은 서로 합쳐져서 광소자 D2에 입사된다. 이때 C2를 속도 V 로 이동시키면 주파수 f_1 의 빔은 도플러 효과(Doppler effect)에 의해 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되고, 이렇게 바뀐 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이에 맥놀이(beat)가 일어나

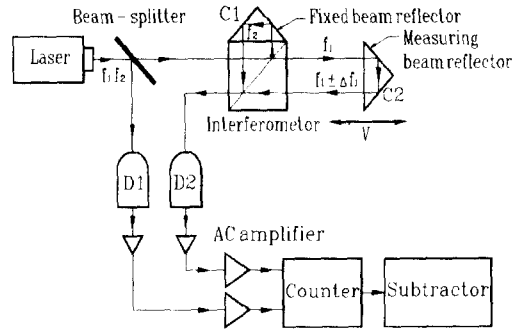


Fig. 1 Principle of the distance measurement for a laser interferometer

이 비트주파수 $|f_1 + \Delta f_1|$ 이 광소자 D2에서 검출된다. 여기서 검출된 신호는 증폭과정을 거쳐 주파수 카운터에서 계수된 후 기준 비트신호 f_1 과 비교하여 차이 Δf_1 을 구한다.

그런데 Δf_1 은 도플러 효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러 효과에서의 주파수와 속도에 대한 관계식은 식 (1)과 같다.

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도(beam speed)이다. 그리고 미소거리 L 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt \quad (2)$$

Fig. 2는 레이저 간섭계의 각도 측정의 원리⁽⁹⁻¹¹⁾를 나

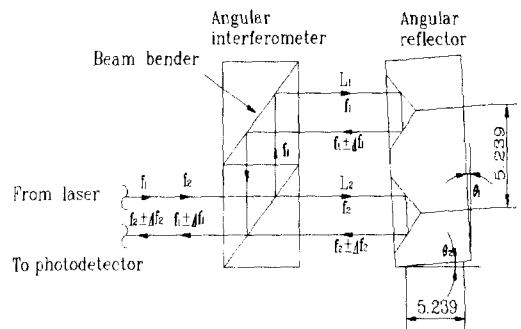


Fig. 2 Principle of the angle measurement for a laser interferometer

타낸 것으로 그림에서 보는 것과 같이 레이저에서 자장에 의하여 스펙트럼이 분리되는 지만효과(zeeman effect)¹⁵⁾에 의하여 서로 주파수가 다른 f_1 과 f_2 성분이 광원으로 방사되어 앵귤러 인터페로메터(angular interferometer)를 통과할 때 f_1 성분은 굴절되고 f_2 성분은 굴절없이 직진하여 L_1 과 L_2 거리에 있는 앵귤러 리플렉터(angular reflector)에 각각 입사된다. 그리고 L_1 거리에서 반사되는 성분은 도플러 효과에 의해 $f_1 \pm \Delta f_1$ 으로 앵귤러 인터페로메터에 입사되고, L_2 거리에서 반사되는 성분은 마찬가지로의 효과에 의해 $f_2 \pm \Delta f_2$ 으로 앵귤러 인터페로메터에 입사되어 두개의 성분은 광소자로 Photo detector에 입력된다. 이 과정에서 발생된 앵귤러 인터페로메터의 각도 θ_1 과 θ_2 는 식(3)과 식(4)에 의하여 구하여진다.

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

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

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

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

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 공작기계를 Fig. 3에 나타내었다. 그림의 X-Y테이블은 CNC제어가 가능하고, 여기에 레이저

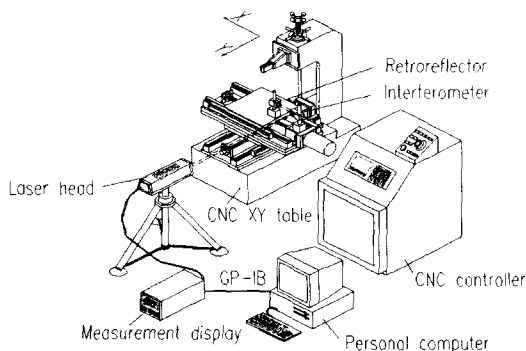


Fig. 3 Experiment Apparatus

간섭계를 부착시킨 실험장치를 이용하여 테이블의 X축 이동량에 관한 위치결정 정밀도 및 하중에 의한 테이블의 변형을 측정한다. 즉, AC 서보 모터로 구동되는 X-Y테이블의 서보 모터 측에 레이저 간섭계를 부착시키고, X-Y테이블에 레이저 반사경(리니어 리플렉터, 앵귤러 리플렉터)을 부착시켜 테이블의 위치결정 정밀도 및 테이블 처짐값을 컴퓨터에 입력시켜 분석하고 레이저 프린터로 출력한다.

본 실험에 사용된 X-Y테이블은 반 폐루프(semi-closed loop)제어와 폐루프(closed loop)제어를 할 수 있는 구조이다. 그리고 Table 1에는 X-Y테이블의 사양을 나타낸다.

Table 1 Specifications of X-Y table

| Item | Specification | |
|----------------------|-----------------------------|--------|
| Drive system | AC servo motor + ball screw | |
| Stroke | X axis | 400 mm |
| | Y axis | 300 mm |
| Servo motor | 4.5 kW AC servo motor | |
| Length of ball screw | X axis | 450 mm |
| | Y axis | 450 mm |
| Lead of ball screw | 10 mm | |
| BLU | 1 μ m | |

실험에 사용한 레이저 측정기는 오차를 정밀하게 분석하는 HP사의 He-Ne레이저로서 분해능은 10nm이며 그 제원은 Table 2와 같다.

Table 2 Characteristics of laser measuring system

| Item | Characteristics |
|----------------------|----------------------|
| Laser interferometer | HP 5529A |
| Laser source | He-Ne |
| Laser wavelength | 632.991 nm |
| Maximum power | 1 mW |
| Resolution | 10 nm(normal) |
| Maximum speed | ± 18000 mm/min |
| Range | 40m (standard) |
| Accuracy | ± 1.5 ppm in air |

Fig. 4는 레이저로서 X-Y테이블의 위치결정 정밀도를 측정하는 모습을 찍은 사진이다.



Fig. 4 Schematic diagram of laser measurement system

3.2 실험방법

본 실험에서는 레이저 간섭계를 이용하여 테이블의 위치결정 정밀도를 측정한다. 이는 Fig. 3과 같이 장비를 배치하고 CNC 콘트롤러에 ISO 230-2규격에 따른 이송 경로를 지정한 NC코드를 입력한다. 모든 장비를 기동 가능하게 초기화한 다음 실험하고자 하는 축의 절대원점으로 테이블을 이송시키고, 그 지점을 레이저 간섭계의 리셋 포인트(위치 0)로 지정한다. 그리고 테이블을 50mm 간격으로 움직이면서 정해진 기준에 따라 위치 데이터를 얻는다. 레이저 간섭계에 대한 모든 조작은 GPIB 인터페이스를 통해 PC에서 프로그램을 수행함으로써 이루어지게 한다.

온도, 습도, 압력 등의 조건들은 레이저 간섭계에 부착하는 센서를 통해 얻거나 기타 측정센서를 통해 얻고, 이에 따른 레이저의 파장 보정을 수행한다. 그리고, 머시닝 센터의 선형피치오차를 보정하는데 있어서는 기존의 보정 파라미터를 리셋 또는 영(0)으로 초기화한 다음 선형피치오차를 측정하고, 그 결과를 기존의 파라미터에 입력하여 보정한다. 그리고 보정한 결과를 다시 레이저 간섭계로 측정한다. 또, 위에서와 동일한 방법으로 머시닝 센터의 X-Y테이블에 리니어 키트를 장치한 후 무부하 상태에서 머시닝 센터를 시운전하고, 0~100kgf까지 20kgf단위로 추를 테이블에 올려놓아 하중이 테이블의 위치결정 정밀도에 어떠한 영향을 미치는가를 측정한다.

하중을 100kgf로 잡은 것은 테이블의 허용하중이 200kgf인데, 지그 무게 80kgf를 포함하여 허용하중을 넘기지 않기 위해서이다.

앞서와 동일한 방법으로 테이블 중심을 리니어 가이드와 리드 스크류의 중심에서 왼쪽으로 150mm 이동한 다음 이 위치를 원점으로 설정하고, 0mm에서 300mm까

지 50mm 간격으로 왕복운동을 실시하여 5회 순차적으로 테이블 처짐값을 얻는다. (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 얻어낸다.

이러한 실험은 측정장비인 레이저가 환경요인에 민감하므로, 이를 고려하여 다음과 같이 실험조건을 설정한다. 기온은 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 그리고 상대습도는 에어컨을 사용하여 10%미만으로 일정하게 제어하고, 진동을 막기 위하여 방진고무를 측정장치의 받침대에 설치한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 하중이 볼 스크류의 위치결정 정밀도에 미치는 영향

4.1.1. 위치결정 정밀도 측정과 선형피치오차 보정

일반적으로 테이블의 위치결정 정밀도를 보정하는 방법은 기존의 보정 파라미터들을 리셋한 후 이를 측정하고, 측정 한 데이터와 리ferenz를 비교하여 그 차이만큼을 보정 파라미터에 입력하는 순서를 거친다.

Fig. 5의 윗 그래프는 테이블의 위치결정 정밀도를 측정한 것으로 선형피치오차의 보정을 하기 위한 것이다. 그리고 각 위치에서의 오차의 경향을 좀 더 정밀하게 나타내기 위하여 최소자승법을 사용하였다. 다음으로 보정이 이루어진 후 그 결과를 측정함으로써 올바른 보정이 이루어졌는지를 확인한다. Fig. 5의 아래 그래프는 보정 후 위치결정 정밀도를 측정한 그림인데, 두 그림을 비교해 보면 보정 전과 보정 후 오차사이에 상당한 차이가 난다. 이는 두 위치결정 정밀도 오차의 기울기로 판별된다.

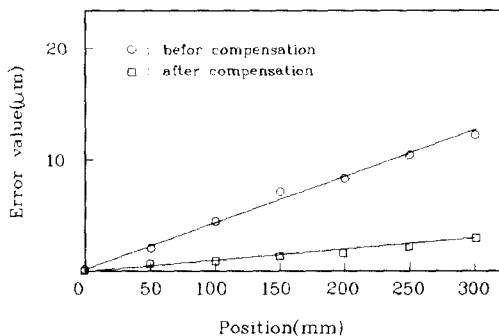


Fig. 5 X-axis pitch error

따라서 측정을 시행하기 이전에 오차의 보정은 기본적으로 이루어져야 하고, 기계를 사용하면서 기존의 보정 파라미터가 실제 기계의 이송운동과 일치하지 않고 있음을 알 수 있다.

4.1.2 하중을 가하였을 때의 위치결정 정밀도

Fig. 6은 머시닝센터의 X-Y테이블 위에 무게추를 올려 놓은 상태에서 측정시작점을 0mm에서 300mm 까지 5회 반복운동 시켰을 때 얻은 테이블의 위치정밀도를 나타낸 것이다.

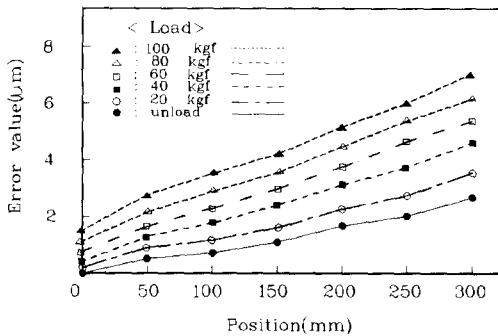


Fig. 6 The position errors on the loaded condition

Fig. 7은 다른 관점, 즉 측정지점 50, 150, 250mm에서의 하중에 따른 위치오차를 나타낸 것이다. 하중의 증가에 따라 위치오차의 값도 선형적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 예를 들면 50mm지점에서는 100kgf의 하중시 오차값에서 무부하시 오차값을 뺀 수치가 1.18 μ m인데, 150mm지점에서는 2.6 μ m, 250mm지점에서는 3.8 μ m의

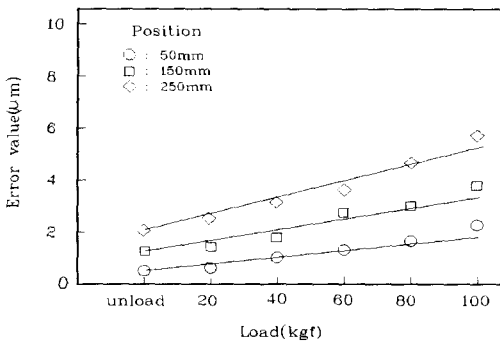


Fig. 7 Position errors for load at each measurement position

차이를 가진다. 이를 시각적으로 판별하기 위하여 최소 상승법을 적용하여 그림상에 실선으로 기울기를 나타내었는데, 기울기의 크기가 50mm < 150mm < 250mm의 순으로 되어 있음을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 고찰해 보면 오차의 누적과 하중에 의한 영향이 동시에 작용하는 것으로 판단된다.

4.2 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐

Fig. 8은 위치의 변화에 따라 하중을 달리 하였을 때의 리니어 가이드와 리드 스크류의 처짐을 레이저를 사용, 측정하여 나타낸 그림이다.

그림에서 보는 것과 같이 하중에 의한 X-Y테이블의 처짐은 불규칙적인 경향을 보인다. 이와 같은 경향은 측정시 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 보상하여 Fig. 9와 같이 나타내었다.

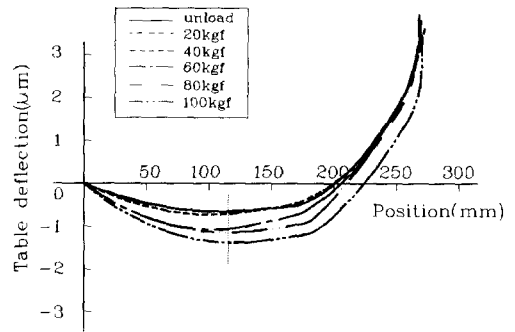


Fig. 8 Relation between table deflection and position for load (before compensation)

일반적으로 공작기계의 테이블은 대칭인 구조로 되어 있다. 그렇다면 테이블을 지지하는 축의 처짐 역시 대칭의 구조를 나타내야 한다. 그러나 실제 측정에서는 미소하게나마 리드 스크류의 중심인 150mm 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 때

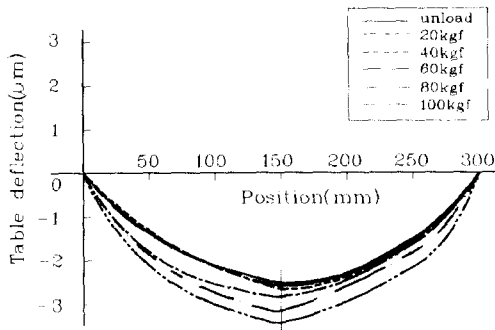
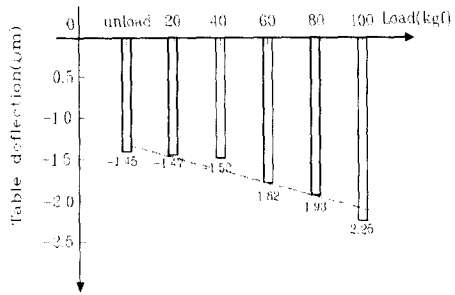
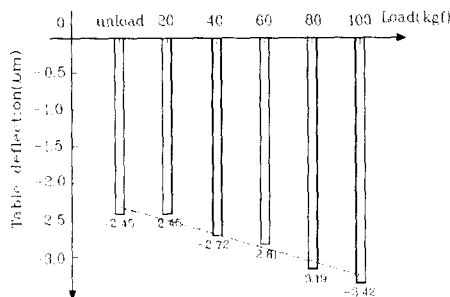


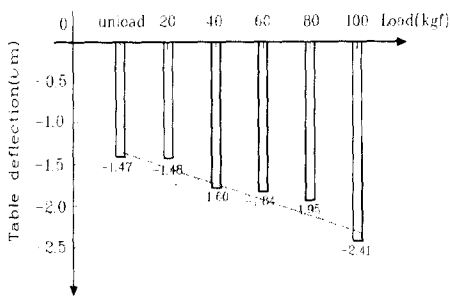
Fig. 9 Relation between table deflection and position for load (after compensation)



(a) 50mm



(b) 150mm



(c) 250mm

Fig. 10 Table deflection for load at each measurement position

문으로 판단되어진다. 따라서 중심을 기준으로 우측부분의 리드 스크류가 지그(jig) 및 공작물의 하중을 상대적으로 더 받기 때문에 일어나는 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 2.46 μ m이고, 하중이 100kgf인 상태에서는 3.42 μ m이다.

Fig. 9에서 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. 10의 (a), (b) 및 (c)이다. 그림에서 (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 연구에서는 레이저 간섭계를 사용하여 머시닝 센터 테이블의 위치결정 정밀도를 측정하고, 하중에 의한 위치결정 정밀도의 변화와 테이블의 처짐을 고찰해 보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 머시닝 센터의 위치결정 정밀도를 측정할 때 보정 전·후 최대 11.2 μ m 차이가 남으로 올바른 측정을 위해서는 보정이 필요하며, 보정 파라미터를 수정함으로써 정확한 측정을 실현할 수 있다. 그리고 하중과 오차의 관계를 최소자승법으로 살펴 본 결과 비례하는 것을 알 수 있다.
- (2) 테이블의 처짐량을 실제로 측정된 결과 무부하시 최대 처짐량은 약 2.46 μ m이고, 100kgf의 하중을 탑재한 경우 최대 처짐량은 약 3.42 μ m으로 하중이 증가할수록 처짐량이 증가하는 경향을 보인다.

참 고 문 헌

- (1) 박준호, "정밀측정시스템공학", 야정출판사, pp. 205~206, 1993
- (2) 문준희, 김영삼, 박희재, 주종남, "기구불바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp.693~700, 1996
- (3) 홍성오, 김병철, "CNC 선반에서 BALL SCREW의 열변위 보정에 관한 연구", 한국정밀 공학회 추계학술대회 논문집, pp. 181~186, 1994
- (4) 홍성오, 조규재, "불나사 열변형에 따른 반복정밀도 개선에 관한 연구", 한국공작기계기술학회 추계학술대회 논문집, pp. 31~36, 1997
- (5) 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関する研究", 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
- (6) 안근식, 장경영, 문희관, "공간섭법을 이용한 절대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 493~498, 1994