

하중 게재시 정지상태 및 이송속도에 따른 테이블 처짐에 관한 연구

이지용*(동아대 기계공학과 대학원), 김태호(동아대 기계공학과 대학원), 정영덕(동아대 기계공학과 산업대학원), 박정보(삼척대 기계자동차공학부), 김순경(동의공업대 자동차과), 전언찬(동아대 기계산업시스템공학부)

A Study on the Table Deflection by Stop State and Move Speed at Loaded Load

J. Y. Lee(Mech. Eng. Dept., DAU), T. H. Kim(Mech. Eng. Dept., DAU), Y. D. Jeong(Mech. Eng. Dept., DAU), J. B. Park(Mechanical Automobile Eng. Dept., SCU), S. K. Kim(Automobile. Dept., DIT), E. C. Jeon(Division of Mechanical, Industrial and Systems Engineering, DAU)

ABSTRACT

The paper on table deflection by stop state and move speed at loaded load, and the table deflection measured of static load. It is developed program for Data correction of LSM(Least Square Method). We experimented the method as following. The first a Laser setting and scan Experimental device measured curvature radius, The second A center of measurement object and curvature radius taking of LSC.

Key Words : LSM (최소자승법), Hysteresis error(히스테리시스 오차), roll(롤), pitch(피치), yaw(요), Laser(레이저)

1. 서론

최근 초정밀부품 가공이 요구되고 있으며 이에 따라 초정밀 공작기계의 수요가 늘어나고 있다. 공작기계의 정밀도 보장 및 유지를 위해서는 정밀 측정기술의 발달이 필연적이다.¹⁾ 이런 측정 기술로는 Stylus instrument method, STM, SEM, 광간섭법등이 있다.²⁻⁶⁾ 상기의 방법을 이용하여 공작기계의 운동정밀도를 측정한다. 운동정밀도를 평가할 때 주로 사용되는 것이 한 축 슬라이딩 구조의 운동정밀도인데 여기에는 각 축의 길이 변위 오차와 회전성분의 오차인 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)등을 포함하고 있다.⁷⁾ 이외에도 히스테리시스 오차(Hysteresis error), 진동오차, 열팽창 오차, 서보게인오차(Servo gain error) 등이 있으며 국내외의 연구실들에서 이와 같은 오차의 검증 및 보정을 위해 연구중이다. 그런데 국내 공작기계 메이커에서는 공작기계 정도 검사기준이 무부하 상태 즉, 공작물이 없는 상태에서 기계 구동상의 오차를 측정하는 것으로 정의되어 있기 때

문에 하중이 가해진 상태를 검증하기 위한 방법들이 제시되어야 한다고 판단되며, 하중에 의한 테이블의 처짐이 증가하는 양이 있다면 피치(pitch)오차에 직접적인 영향을 미침과 동시에 아베 오프셋(Abbe offset) 오차의 양이 증가하기 때문에 원하는 가공정밀도를 얻는 것은 불가능하게 된다.⁸⁾ 특히 고속가공의 경우 스펀들의 고속회전 및 테이블의 급송이송이 요구되기 때문에 테이블 처짐을 고려한 테이블 강성이 충분히 고려되어야 한다. 따라서 본 연구는 하중을 X-Y테이블에 가했을 경우 하중별에 따른 테이블의 처짐을 측정하여 위치별에 따른 오차를 구하고, 실제 테이블의 이송시 이송속도별에 따른 테이블의 처짐을 측정하여 정밀가공 측면에서 공작기계의 가공 조건을 개선하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 공작기계의 기하학적 오차와 레이저 간섭계

NC공작기계의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 테이블의 정밀도이다.

Fig. 1은 한 축 슬라이딩기구에서의 기하학적 오차를 나타낸 것으로 총 6개의 운동오차가 있으며 3축 공작기계의 경우는 축간 결합오차 3개를 포함한 총 21개의 운동오차가 있다.

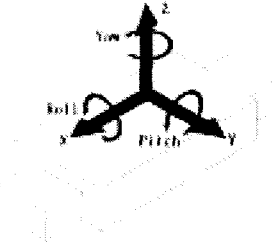


Fig. 1 Geometry error of sliding axis

공작기계의 불필요한 각도의 움직임은 리드(lead) 오차보다 큰 아베 오차 요인으로 되어, 공작기계나 각종의 정밀측정기계의 정도를 평가하는데 있어서, 각 이동축의 피치(pitch)나 요(yaw)의 오차 영향을 명확하게 할 필요가 있다. 각도측정 방법은 Fig. 2에 나타낸 것과 같으며, 그림에서 중간의 각도 간섭계(Angular interferometer)는 광속분리기(Beam-splitter)와 반사경으로 조합되어 있고, 우측의 각도반사경(Angular reflector)은 두 개의 코너큐브로 조합된 것이다. 이들은 광로가 모두 평행하게 할 수 있도록 정확하게 만들어져 있다. 각도간섭계 또는 각도반사경이 회전하면 f_1 과 f_2 두 광로의 상대적인 변화가 생긴다. 이를 이용하여 각도의 변화를 측정한다.

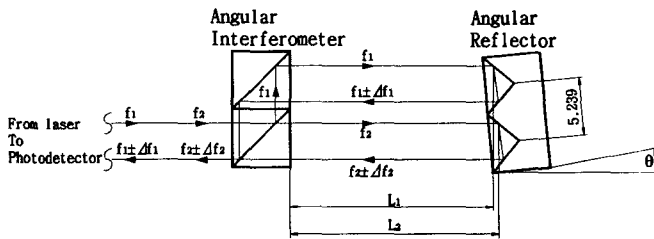


Fig. 2 Principle of laser interferometer applying to the measurement of differential angle

측정물의 운동 축과 레이저 광속이 평행하게 정렬되지 않고 어떤 각을 이룰 때 레이저에 의해 측정된 값과 실제 거리가 달라진다. 이때 생기는 오차를 여현오차(Cosine error)라 부른다. 측정시 이 코사인 오차의 효과를 줄이도록 정렬하여야 한다. Fig. 3에서와 같이 측정된 길이 L 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = L_S \cos \theta$$

여기서 L 은 측정된 거리이고, L_S 는 스케일의 거리이며, θ 는 여현오차에 의해 발생된 각도이다. 여현오차는 θ 와 L 에 비례하는 오차로 작은 거리를 측정할 때는 문제가 되지 않으나 긴 거리를 측정할 경우는 정확한 광속 정렬이 필요하게 된다.

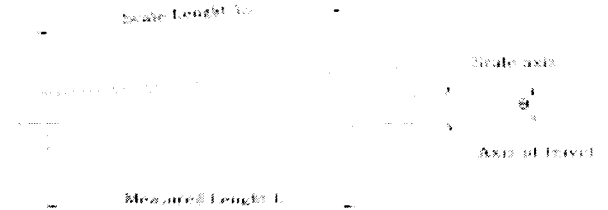


Fig. 3 Principle of cosine error

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

본 실험에 사용된 장치들을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 ①은 X-Y테이블, ②는 적용하중, ③은 각도 반사경, ④는 각도 간섭계이다.

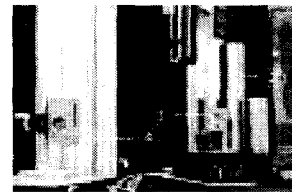


Fig. 4 Experimental device

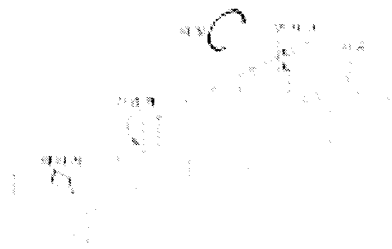


Fig. 5 Deflection measurement of stop state load table

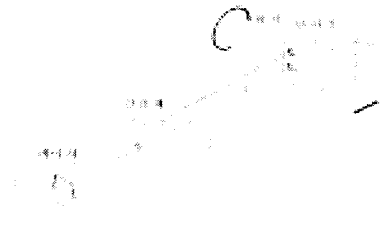


Fig. 6 Deflection measurement of move state load table

본 실험의 실험장치를 이용하여 조건에 따라 측정하는 모습을 Fig. 5, Fig. 6에 나타내었다. 실험에 사용된 X-Y테이블의 제원은 Table 1에 나타내었고, 레이저의 제원은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Specification of X-Y table

Item	Specification
1. Stroke of X axis	320mm
2. Stroke of Y axis	320mm
3. Allowable Load	100kg

Table 2 Specification of laser interferometer

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

3.2 실험방법

본 실험의 실험순서는 Fig. 7에 나타내었다. 우선 X-Y 테이블에 반사경을 올려놓고, 레이저의 광속정렬을 시킨다. 그리고 정지상태에서 10 ~ 50 Kg의 적용하중을 테이블 위에 올려놓은 상태에서 테이블의 처짐을 측정하기 위하여 X축의 행정을 0mm에서 240mm까지 설정한 다음 24mm 간격으로 직선 이송운동을 실시하여 테이블의 처짐량을 얻었다. 다음으로 설정된 저속, 중속, 고속 이송시 테이블의 처짐을 측정하기 위하여 10kg의 추를 테이블 위에 올려놓은 상태에서 이송속도를 3단계로 설정하여 저속이송은 10, 15, 20, 25mm/sec로 이송시키고 중속이송은 50, 60, 70, 80, 90mm/sec속도로 이송시키며, 고속이송은 100, 150, 200, 250, 300mm/sec로 이송시키는 과정에서 테이블의 처짐량을 얻었다. 이와 같이 부하별 정지상태 및 이송속도를 증가하는 실험방법을 토대로 어떤 상태가 테이블의 처짐에 가장 영향을 많이 미치는지를 실험하였다.

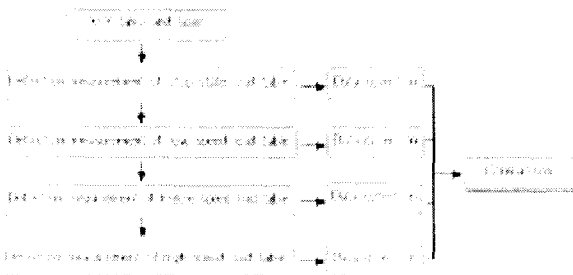


Fig. 7 Flowchart of experiment

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 정지상태 부하별 테이블의 처짐 비교

Fig. 8은 테이블이 정지한 상태에서 10kg, 15kg, 20kg, 25kg, 30kg, 35kg, 40kg, 50kg의 하중을 테이블에 올려놓은 상태에서 앵글러 인터파라미터를 사용하여 각도를 측정해 낸 값을 나타낸 것이다. 실험의 행정거리는 240mm로 하였고, 24mm씩 증가되는 11개 지점의 위치에서 처짐을 측정하였다.

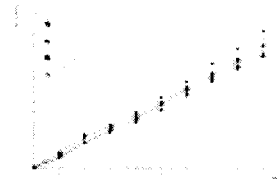
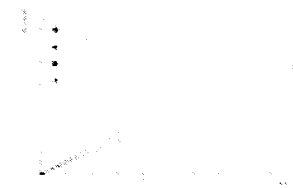
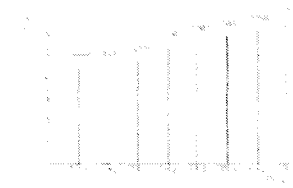


Fig. 8 Table deflection of static load

얻어진 데이터가 증가하는 모습을 보이는 것은 실험의 각 측정 위치에서 0점 보정을 하지 않고 얻어진 데이터를 누적한 값이기 때문에 증가하는 경향을 보인다. 보다 정확한 경향을 알기 위해서 하중조건에 따라 얻어진 값을 LSM(Least Square Method)을 적용하여 경향성을 살펴보았다. 이를 Fig. 9 (a)에 나타내었다. 하중에 대해 기울기 값이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 기울기 값만으로 데이터를 정리한 것이 Fig. 9 (b)이다. 하중이 증가할수록 기울기 값이 거의 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있다.



(a) Measurement value correction of LSM



(b) Angle value of data

Fig. 9 Data correction of LSM

Fig. 10은 정지상태에 의한 테이블 처짐 측정(누적오차각도)에서 실험의 각 측정 위치에서 0점 보정을 하기 위해 각 측정 점의 이전 값을 제거하고 난 값을 행정거리별로 표시한 것이다.

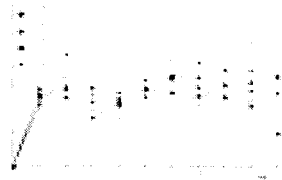


Fig. 10 Table deflection of static load

여기서 하중이 증가할수록 처짐 량이 증가하는 모습을 볼 수 있으며 본 실험에 사용한 실험 하중 폭인 $\Delta 40\text{kg}$ 에서는 약 $5 \sim 6 \text{ arc sec}$ 정도의 처짐을 나타낸다. 행정거리 72, 96mm 지점에서 측정각도의 대부분의 값이 미소하나마 처지는 이유는 본 실험에 사용된 측정장치를 지탱하고 있는 베이스의 구조가 힘을 정확히 분산시키지 못했기 때문으로 판단된다. 그리고 행정의 양끝점이 일치하지 않는 것은 측정장치의 테이블 행정거리를 수동으로 조작을 할 수 있으나, 본 실험에는 수동으로 조작할 수 있는 등간격의 최대 행정인 240mm로 설정하여 실험을 하였기 때문에 시작점의 오차각도와 끝점의 오차각도가 일치하지 않는 모습을 나타내고 있다. 또한 본 실험에 사용된 X-Y 테이블의 전체행정거리가 320mm 정도이기 때문에 본 실험에서 구한 값 중 160mm 지점이 이론적으로 가장 많이 처지는 부분이 되며 10kg의 하중에 의한 정적 처짐은 약 10 arc sec 정도이다. 따라서 160mm 지점에서의 처짐 량은 약 $7.76 \mu\text{m}$ 정도가 된다.

4.2. 이송속도에 따른 테이블의 처짐 비교

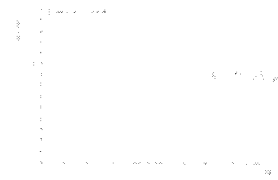
4.2.1 동일하중에 의한 이송속도별 테이블의 처짐 비교 (적용하중 : 10kg)

Fig. 11, 12는 하중 10kg을 게재한 상태에서 저속 이송속도($10 \sim 25 \text{ mm/sec}$), 고속이송속도($100 \sim 300 \text{ mm/sec}$)로 테이블을 설정된 행정구간으로 이송시켰을 때 하중에 의한 테이블의 처짐을 누적된 각도오차로 표현한 그림들이다. 그림에서 보는 값들의 추출은 저속구간에서는 *sampling rate*를 0.1로 하여 초당 100개의 데이터를 실시간으로 추출하였고, 고속구간으로 설정된 100 mm/sec 부터는 *sampling rate*를 0.05로 하여 초당 200개의 데이터를 실시간으로 추출하여 기록된 값을 최소자승법(Least Square

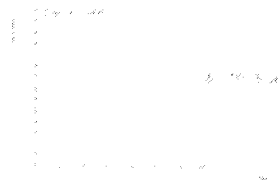
Method)으로 절편과 기울기 값을 구해서 기록하였다. 여기서 절편의 경우는 측정시의 오차의 요소로 작용하는 것이 대부분이기 때문에 Y축으로 오차보정의 의미로 좌표이동을 시켜 측정된 모든 조건의 절편값을 0으로 설정하여 표현하였다.



(a) 10 mm/sec



(b) 15 mm/sec



(c) 20 mm/sec



(d) 25 mm/sec

Fig. 11 Table deflection of low speed block (LSM)



(a) 100 mm/sec



(b) 150 mm/sec



(c) 200 mm/sec

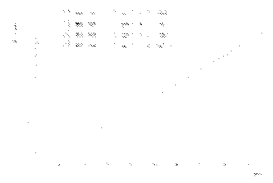


(d) 250 mm/sec



(e) 300 mm/sec

Fig. 12 Table deflection of high speed block (LSM)



(a) low speed section



(b) high speed section

Fig. 13 Table deflection comparison for moving speed

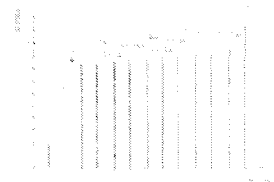


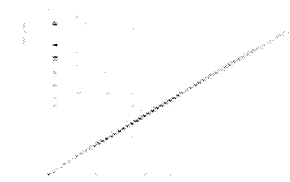
Fig. 14 Deflection degree of speed and static condition at 160mm

본 실험에서 사용된 X-Y 테이블의 전체 행정구간 중 중간위치가 본 실험의 행정조건의 160mm 지점이 된다. 따라서 160mm 지점의 처짐 각도를 각 속도별에 따라 나타내면 Fig. 14에서 보는 것과 같은 결과를 얻을 수 있었으며 여기서 나타난 값을 처짐량으로 환산을 한 결과를 Table 3에 나타내었다.

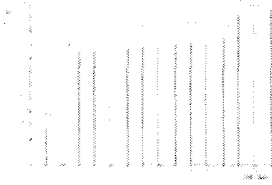
Table 3 Deflection volume of move speed or stop state at 160mm

Speed		Seging volume
Stop state		7.76 μm
Low speed	10 mm/sec	10.22 μm
	15 mm/sec	10.25 μm
	20 mm/sec	10.25 μm
	25 mm/sec	10.36 μm
Middle speed	50 mm/sec	10.38 μm
	60 mm/sec	10.45 μm
	70 mm/sec	10.45 μm
	80 mm/sec	10.50 μm
High speed	90 mm/sec	10.56 μm
	100 mm/sec	10.56 μm
	150 mm/sec	10.74 μm
	200 mm/sec	11.49 μm
	250 mm/sec	11.52 μm
	300 mm/sec	11.70 μm

4.2.2 정지상태 및 이송속도에 따른 테이블 처짐 비교



(a) Comparison of deflection degree



(b) Value of deflection degree

Fig. 15 Table deflection comparative of move speed or stop state

Fig. 15는 하중 10kg을 게재한 후 정지상태에서 테이블의 처짐을 측정한 값과 테이블에 10kg의 하중을 게재한 상태에서 설정된 3단계의 이송속도로 이송시켰을 때의 테이블 처짐을 측정한 값의 기울기 값을 비교하였다. 이론적으로 하중이 임의의 속도를 갖고 이송할 경우 수직방향으로 작용하는 힘의 크기는 정지상태보다는 크다. 본 실험에서는 측정된 값 역시 정지상태보다 하중을 게재한 상태에서 이송시켰을 때의 값이 크게 나옴을 확인할 수 있었으며, 특히 이송상태에서 속도를 증가할 경우 기울기 값이 선형적으로 증가하는 모습을 확인할 수 있었다.

5. 결론

하중게재 시 정지상태 및 이송속도에 따른 공작기계의 테이블 처짐에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 행정거리의 1/2지점인 테이블의 중앙부분이 10kg의 하중이 게재된 정지 상태의 경우는 7.76 μ m의 처짐으로 가장 많음을 확인할 수 있었다.
- 2) 하중이 증가하거나, 이송속도가 증가하면 처짐량이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 40kg의 하중이 게재된 정지상태의 160mm부근의 처짐량이 10.85 μ m이고, 10kg의 하중이 게재되고 속도가 150mm/sec인 상태에서 160mm부근의 처짐량이 10.74 μ m로 유사한 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 테이블의 처짐은 테이블 상부에 올려놓는 수직하중의 증가 및 테이블의 이송속도의 증가가 테이블 처짐에 직접적인 영향이 있다.

참고문헌

- 1) 강철희, “공작기계기술의 현재와 미래(4)”, 한국정밀공학회지, vol. 12, No 7, pp. 5~18, 1955.
- 2) 市ノ川竹男, “SEMとSTMの複合機”, 精密工學會誌, PP. 1835~1840, 1987. 12.
- 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精密測定”, 精密工學會誌, vol. 58,

No. 1, pp. 120~126, 1992

- 4) 안근식, 장경영, 문희관, “광간섭법을 이용한 절대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 493~498, 1994
- 5) 정중수, 신동수, “NC 공작기계를 위한 레이저 이용 자동오차 측정 및 보상”, 한양대학교 기계기술연구소 논문집, vol. 1, pp. 103~118, 1995.
- 6) C. R. Steinmets, "Sub-micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometry", Precision Engineering, vol.12, No. 1, pp. 12~24, 1990.
- 7) 박준호, “정밀측정시스템공학” 야정출판사, pp. 205~203, 1993
- 8) 이웅석, 박준호, 양종화, 조소형, "3차원 좌표 측정기의 Software에 의한 Volumetric 오차 교정" 한국정밀공학회지 vol, 11, No. 4, 1994, pp. 158~164