한국공작기계학회논문집 Vol.13 No.6 2004. 12.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

하중 적재시 정지상태 및 이송시 하중에 따른 테이블 처짐에 관한 연구

이승수*, 김민주+, 김순경++, 서상하+++, 전언찬++++

(논문접수일 2004. 2. 18, 심사완료일 2004. 7. 22.)

The Study on Table Deflection by Stationary State and Feedrate at Loaded

Lee Seung Soo*, Kim Min Ju+, Kim Soon Kyung++, Seo Sang Ha+++, Jeon Eon Chan++++

Abstract

This study is aimed to measure the deflection of loaded table on machine tool. The deflection rate is measured when the table is in a stationary state and is moved. In conclusion, we have found that the more load increases, the more the table deflections. Also, we have found that the deflection rate increases in accordance with the speed of movement. Therefore, we have concluded that inspection of machine tool should be done considering the weight of load and the speed of movement. However, since the condition of accuracy test for domestic brand of machine tool is defined as unloaded case, measures should be explored only for loaded case.

Key Words : Laser Interferometer(레이저 간섭계), LSM(최소자승법), Geometric Error(기하학적 오차), Cosine Error(여현오차)

1. 서 론

최근 초정밀부품에 대한 수요가 증가하고 있으며 이를 가공하는 초정밀 공작기계의 수요도 더불어 증가하고 있다. 이러한 초정밀 공작기계의 정밀도 보장 및 유지를 위해서는 정밀 측정기술의 발달이 필연적이다[1]. 정밀 측정 기술로는 Stylus instrument method, STM(Scanning Tunneling Microscope), SEM(Scanning Electron Microscope), 광간섭법, Circular Test법[2], Ball Bar법[3] 등이 있으며, 공작기계의 이송계인 테이블의 위치 결정 오차를 측정할 때는 레이저 간섭계가 사용된다.

레이저 간섭계는 광간섭의 원리를 이용하여 매우 정밀한 운동(motion)을 측정하는 시스템으로서 넓은 측정범위, 높은 측정분해능, 고정밀도를 갖는 장점을 가지고 있다[4].

* 동아대학교 기계공학과 (matisses@lycos.co.kr)
주소: 604-714 부산시 사하구 하단동 840번지
+ 동아대학교 대학원 기계공학과 정밀가공실험실
++ 동의공업대학 자동차과
+++ 동아대학교 기계공학과 교수
++++ 동아대학교 기계공학과

운동정밀도를 평가할 때 주로 한 축 슬라이딩 구조를 사용하는데 여기에는 각 축의 길이 변위 오차와 회전성분의 오차인 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 등을 포함하고 있다[5]. 이외에도 히스테리시스 오차(Hysteresis error), 진동오차, 열팽창 오차 및 서보게인오차(Servo gain error) 등이 있으며 국내외에서 이와 같은 오차의 검증 및 보정에 대하여 연구 중이다[6].

그런데 국내 공작기계 메이커에서는 공작기계 정도 검사 기준이 무부하 상태 즉, 공작물이 없는 상태에서 기계구동상의 오차를 측정하는 것으로 정의되어 있기 때문에 하중이 가해진 상태를 검증하기 위한 방법들이 제시되어야 한다고 판단되며, 하중에 의해 테이블의 처짐이 증가한다면 피치(pitch)오차에 직접적인 영향을 미침과 동시에 아베 옵셋(Abbe offset) 오차의 양이 증가하게 되므로 원하는 가공정밀도를 얻는 것은 불가능하게 된다[7]. 특히 고속가공의 경우 스핀들의 고속회전 및 테이블의 급속이송이 요구되기 때문에 테이블 처짐을 고려한 강성이 충분히 고려되어야 한다.

따라서 본 연구는 레이저 간섭계를 이용하여 하중을 X-Y 테이블에 가했을 경우 하중에 따른 테이블의 처짐을 측정하여 위치에 따른 오차를 구하고, 실제 테이블의 이송시 이송속도에 따른 테이블의 처짐을 측정하여 정밀가공 측면에서 공작기계의 가공조건을 개선하고자 한다.

2. 공작기계의 기하학적 오차

NC공작기계의 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 테이블의 정밀도이며 일반적으로 이송축의 운동은 기계가공의 오차, 조립에서의 오차 등에 기인하여 여러 자유도의 오차운동을 보이게 된다.

Fig. 1은 한 축 슬라이딩기구에서의 기하학적 오차를 나타낸 것으로 위치오차, 수평진직도오차, 수직진직도오차의 3개의 병진운동 오차성분과 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)

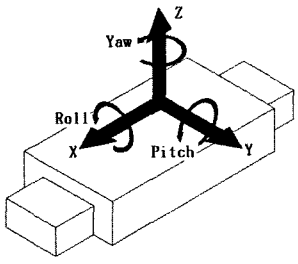


Fig. 1 Geometric error of sliding shaft

3개의 회전운동 오차성분, 총 6개의 운동오차가 있으며 3축 공작기계의 경우는 축간 결합오차 3개를 포함한 총 21개의 운동오차가 존재한다.

공작기계의 불필요한 각도 움직임은 리드(lead)오차보다 아베 오차(Abbe error) 요인이 크게 작용하므로, 공작기계나 각종의 정밀측정기기의 정도를 평가하는데 있어서, 각 이동축의 피치나 요의 오차 영향을 명확하게 할 필요가 있다.

3. 레이저 간섭계의 각도측정 원리

헤테로다인 간섭계를 사용하여 광경로차를 이용한 각도측정 방법은 Fig. 2에 나타낸 것과 같으며, 그림에서 중간의 각도간섭계(Angular interferometer)는 광속분리기(Beam-splitter)와 반사경으로 조합되어 있고, 우측의 각도반사경(Angular reflector)은 두 개의 코너큐브로 조합된 것이다. 이들은 광로가 모두 평행하게 될 수 있도록 정확하게 만들어져 있다. 레이저광이 각도간섭계에 입사되면 f_2는 통과되고 f_1의 빛은 반사된다. f_1은 다시 반사경에 의해 반사되어 코너 큐브를 향한다. 이때 두 코너큐브가 부착된 코너큐브마운트가 미소각도회전하게 되면 반사된 광은 도플러효과에 의해서 주파수 변화가 생기고 각도 간섭계에서 합성되어 간섭무늬를 형성하게 된다. 따라서 이 주파수 변화량을 검출함으로써 두 코너큐브의 광로차의 변화량 $(f_1 \pm \Delta f_1) - (f_2 \pm \Delta f_2)$을 구할 수 있다. 레이저간섭계를 이용한 각도측정은 큰 각도의 변화를 측정하는 것이 부적합하지만, 미소각도측정에는 높은 분해능을 가지고 있어 유용하다.

4. 여현오차(cosine error)

측정물의 운동축과 레이저 광속이 평형하게 정렬되지 않은 임의의 각을 이룰 때 레이저에 의해 측정된 값과 실제

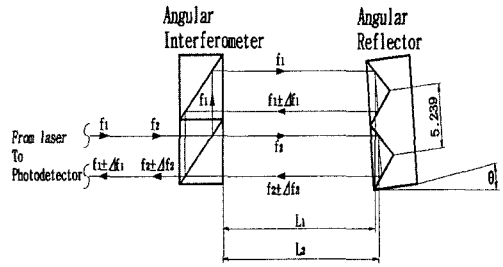


Fig. 2 Principle of laser interferometer applying to the measurement of differential angle

거리는 달라진다. 이때 생기는 오차를 여현오차(Cosine error)라 부른다. 측정시 이 여현오차의 효과를 줄이도록 정렬하여야 한다. Fig. 3에서와 같이 측정된 길이 L은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = L_S \cos\theta \tag{1}$$

여기서 L은 측정된 거리이고, L_S는 스케일의 거리이며, θ는 여현오차에 의해 발생된 각도이다. 여현오차는 θ와 L에 비례하는 오차로 작은 거리를 측정할 때는 문제가 되지 않으나 긴 거리를 측정할 경우는 정확한 광속 정렬이 필요하게 된다.

5. 실험장치 및 실험방법

5.1 실험장치

Fig. 4는 하중 적재시 정지상태 및 이송시 하중에 따른 테이블 처짐을 측정하기 위한 실험장치를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 최대 행정거리가 320mm인 X-Y 테이블과 He-Ne 광원을 사용하는 레이저(HP 5519A)를 사용하였다. 또한 실험조건은 공기 패드형의 방진 테이블 위에 실험 장치를 설치하였다.

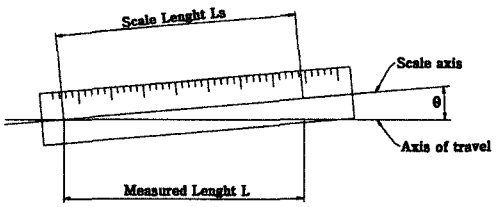
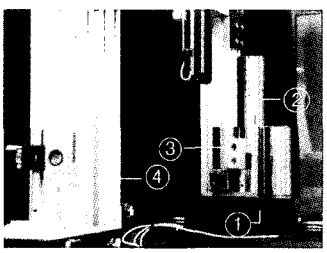


Fig. 3 Principle of cosine error



① X-Y Table ② Load
③ Angular reflector ④ Angular interferometer

Fig. 4 Overall view of experimental apparatus

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.

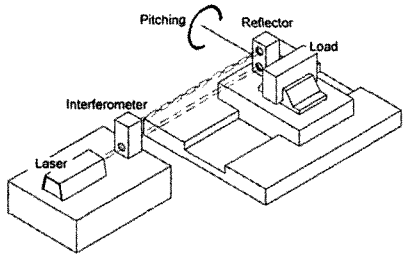


Fig. 5 Schematic diagram of measurement(at stationary state)

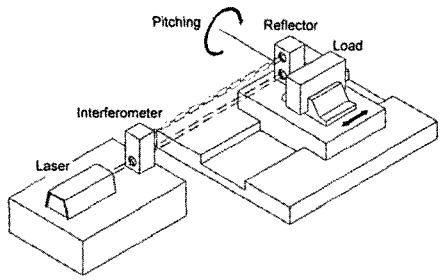


Fig. 6 Schematic diagram of measurement(during feed)

Table 1 Specification of X-Y table

Item	Specification
Stroke of X axis	320mm
Stroke of Y axis	320mm
Allowable Load	100kg

Table 2 Specification of laser(HP 5519A)

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

5.2 실험방법

본 실험의 실험순서를 Fig. 7에 나타내었다. 우선 X-Y 테이블에 반사경을 올려놓고, 레이저의 광속을 정렬한다. 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, 90 mm/sec 속도로 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.

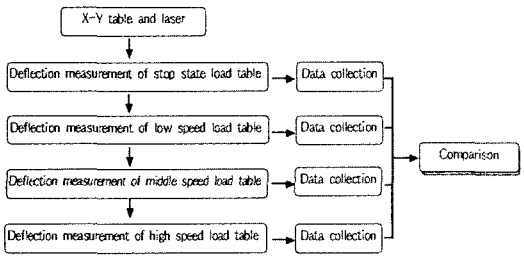


Fig. 7 Flowchart of experiment method

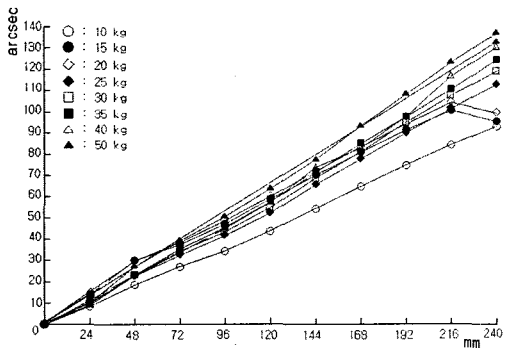


Fig. 8 Table deflection due to load change(at stationary state)

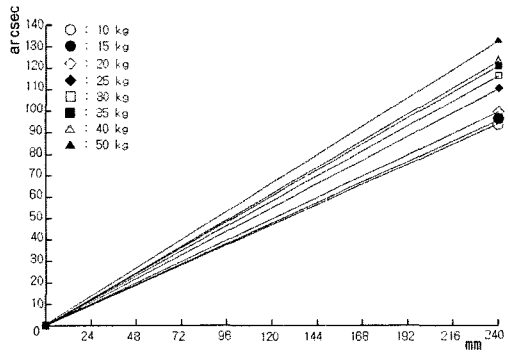
6. 실험결과 및 고찰

6.1 정지상태 부하별 테이블의 처짐 비교

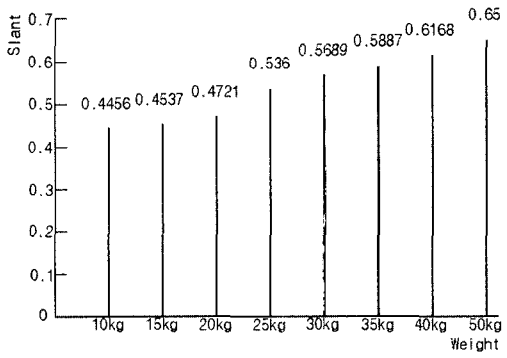
Fig. 8은 테이블이 정지한 상태에서 10kg, 15kg, 20kg, 25kg, 30kg, 35kg, 40kg, 50kg의 하중을 테이블에 올려놓은 상태에서 각도간섭계(angular interferometer)를 사용하여 각도를 측정해 낸 값을 나타낸 것이다. 실험의 행정거리는 240mm로 하였고, 24mm씩 증가되는 11개 지점의 위치에서 처짐을 측정하였다.

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 기울



(a) Table deflection due to load change(at stationary state)



(b) Value of slant

Fig. 9 Correction of graph using LSM

기 값이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 기울기값 만으로 데이터를 정리한 것이 Fig. 9(b)이다. 하중이 증가할수록 기울기 값이 거의 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있다.

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.

여기서 하중이 증가할수록 처짐량이 증가하는 모습을 볼 수 있으며 본 실험에 사용한 실험 하중 폭인 △40kg에서는 약 5~6 arc sec 정도의 처짐을 나타낸다. 행정거리 72, 96 mm 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,

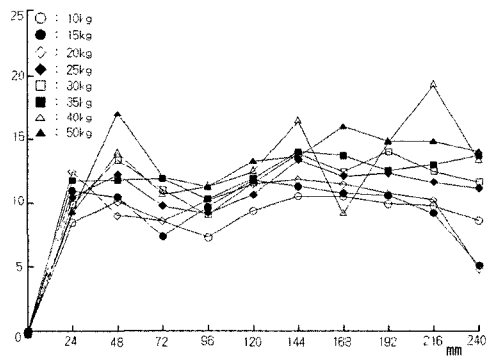


Fig. 10 Table deflection due to load change(at stationary state)

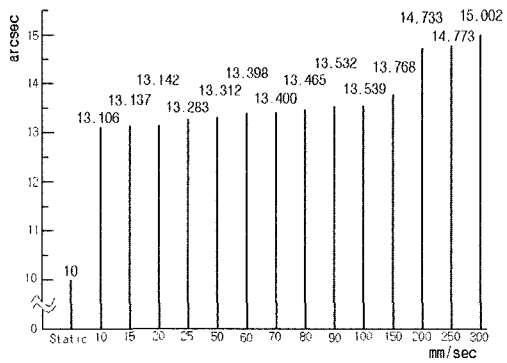


Fig. 11 Angle of deflection according to velocity(static condition at 160mm)

본 실험에는 수동으로 조작할 수 있는 등간격의 최대 행정을 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㎛ 정도가 된다.

6.2 이송속도에 따른 테이블의 처짐 비교

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

본 실험에서 사용된 X-Y 테이블의 전체 행정구간 중 중간위치가 본 실험의 행정조건의 160mm 지점이 된다. 따라서, Fig. 11은 160mm 지점의 처짐각도를 각 속도별에 따라 나타낸 것이다. 그래프에서 보는 값들의 추출은 저속구간에서는 sampling rate를 0.01로 하여 초당 100개의 데이터를 실시간으로 추출하였고, 고속구간으로 설정된 100 mm/sec부터는 sampling rate를 0.005로 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.

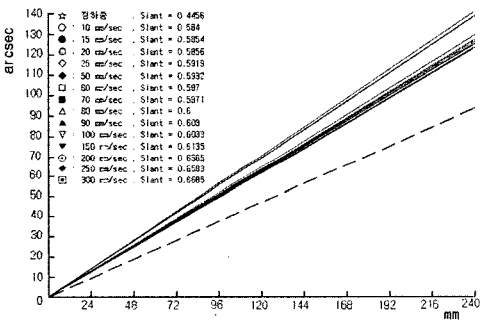
여기서 나타난 값을 처짐량으로 환산한 결과를 Table 3에 나타내었다.

6.2.2 정지상태 및 이송속도에 따른 테이블 처짐 비교

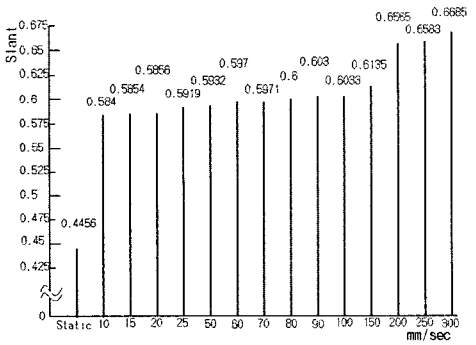
Fig. 12는 하중 10kg을 적재한 후 정지상태에서 테이블의 처짐을 측정한 값과 테이블에 10kg의 하중을 적재한 상태에서 설정된 3단계의 이송속도로 이송시켰을 때의 테이블 처짐을 측정한 값의 기울기를 비교하였다. 이론적으로 하중이 임의의 속도를 갖고 이송할 경우 수직방향으로 작용하는 힘의 크기는 정지상태보다는 크다. 본 실험에서는 측정된 값 역시 정지상태보다 하중을 게재한 상태에서 이송시켰을 때의 값이 크게 나옴을 확인할 수 있었으며, 특히 이송상태에서 속도를 증가할 경우 기울기 값이 선형적으로 증가하는 모습을 확인할 수 있었다. 이것은 속도가 증가함에 따라 가이드에 작용하는 마찰력 또는 공기저항의 영향이 커지는 것이 원인이다.

Table 3 Deflection volume by feedrate or stationary state at 160mm

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



(a) Comparison of angle of deflection



(b) Angle of deflection

Fig. 12 Comparison of table deflection by stationary state or feedrate

7. 결 론

하중적재 시 정지상태 및 이송시 하중에 따른 공작기계의 테이블 처짐에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 테이블의 중앙부분인 행정거리의 1/2지점에서 10kg의 하중이 게재된 정지 상태일 때 7.76㎛로 가장 많은 처짐이 생기는 것을 확인할 수 있었으므로 정밀가공의 경우는 반드시 고려해야 하는 항목으로 판단된다.

(2) 하중이 증가하거나, 이송속도가 증가하면 처짐량이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 특히 40kg의 하중이 게재된 정지상태의 160mm 부근의 처짐량이 10.85㎛이고, 10kg의 하중이 게재되고 속도가 150mm/sec인 상태에서 160mm 부근의 처짐량이 10.74㎛로 유사한 것으로 볼 때 하중과 이송속도가 테이블 처짐에 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다.

(3) 테이블의 처짐은 테이블 상부에 올려놓는 수직 하중의 증가 및 테이블의 이송속도의 증가가 테이블 처짐에 직접적인 영향이 있다.

따라서 초정밀가공기계 및 측정기구에서는 이와 같은 문제의 해결방안이 반드시 필요하다. 이런 문제를 해결할 수 있는 방안으로는 2가지를 제시한다.

첫 번째는 압전(Piezoelectric)을 이용하여 하중별, 속도별 조건하에서 테이블의 처짐을 실시간으로 측정하고, 테이블 밑면에 유공압 실린더를 설치하여 측정된 처짐량 만큼 수직으로 보상해주는 장비를 설치하는 방법.

두 번째는 압전 또는 각종센서로 측정된 데이터를 CNC 제어장치에 피드백(feed back)하여 테이블의 처짐량 만큼 Z축을 보상해주는 방법이 개발되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Kahng, C. H., 1995, "Machine Tool Technology; The present And The Future(4)," *KSPE*, Vol. 12, No. 7, pp. 5~18.

(2) Knapp, W., 1983, "Test of the Three Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors," *Annals. CIRP*, Vol. 32, No. 1 pp. 459~464.

(3) Bryan, J. B., 1982, "A Simple Method for Testing

Measuring Machines and Machine Tools, Part 1," *Principle and Application Precision Eng.*, Vol. 4, No. 2, pp. 197~203.

(4) Park, J. H., 1993, *Precision Measurement System Engineering*, Yajeongmunhwasa, pp. 201～209.

(5) Park, J. H., 1994, "Positioning Error Measurement and Compensation Using Laser Interferometer," *KSME(A)*, Vol. 34, No. 3, pp. 185~192.

(6) Pahk, H. J., 1994, "Development of Geometric Error Measurement System for Machine Tool Guideways Using Laser-Photo Diode," *KSME*, Vol. 34, No. 3, pp. 168~176.

(7) Park, J. H., Lee, E. S., Yang, J. H., and Cho, S. H., 1994, "Volumetric Error Compensation of a Coordinate Measuring Machine using a Software Method," *KSPE*, Vol. 11, No. 4, pp. 158~164.

(8) Eom, T. B., Lim, J. S., Won, J. W., and Chung, M. S., 1985, "The Development of the Small Angle Generator by using Laser Interferometer," *KSME*, Vol. 9, No. 3, pp. 373～378.

(9) Ahn, G. S., Jhang, K. Y., and Moon, H. K., 1996, "Improvement of Measurement Accuracy for Absolute Height by Using Two Types of Doppler and Heterodyne Optical Interferometer," *KSPE*, Vol. 13, No. 6, pp. 128～135.

(10) Steinmets, C. R., 1990, "Sub-micron Position Measurement and Control on Precision Machine Tools with Laser Interferometer," *Precision Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 12～24.

(11) Hewellet Packard, 1993, 5519A *Laser Measurement System User's Guide.*