

레이저간섭계를 이용한 길이오차 측정 및 보정기술

박 준 호

Positioning Error Measurement and Compensation Using Laser Interferometer

June-Ho Park



●박준호(대성산업(주) 중앙연구소)
●1953년생
●NC 공작기계의 성능 평가 및 측정
법을 전공하였으며, 정밀측정시스
템, 정밀공작기계, CAT에 관심을
가지고 있다.

1. 머리말

공작기계 및 측정기계에는 기하학적 관계에 의한 오차, 온도와 같은 환경적 요인에 의한 오차, 자중이나 외부부하같은 물리력에 의한 오차 등이 존재하게 된다.⁽¹⁾ 이들 요인에 의한 영향으로 시스템의 정밀도는 제한되지만 단지 이들만으로 결정되지는 않는다. 이는 측정 및 보정기술에 의해서 시스템상에 존재하는 보정 가능한 오차를 보정하여 사용되고 있기 때문이다. 이와 같이 측정은 시스템의 성능향상을 위해서 중요한 역할을 담당한다. 시스템에 대한 오차측정은 정밀도를 평가할 수 있는 근거가 되고, 오차요인에 대한 분석 가능한 데이터를 제공하여 주므로 재 설계시에는 오차요인을 개선할 수 있게 하여 준다. 결국, 오차의 측정 및 보정기술은 보다 높은 정밀도를 갖는 시스템의 개발을 가능하게 하므로, 공작기계는 부품 및 제

품의 공작정밀도를 향상시킬 수 있게 하고, 높은 정밀도를 갖는 측정기계를 만들 수 있게 한다.

현재까지 공작기계 및 측정기계의 운동정밀도 및 위치결정오차를 측정하는 방법으로는 Circular Test법,⁽²⁾ Ball Bar법,⁽³⁾ 레이저간섭계를 이용하는 방법^(4,5) 등이 있다. 운동정밀도를 측정할 때는 Circular Test법, Ball Bar법이 주로 사용되지만 정상상태의 위치결정정도를 측정할 때는 레이저간섭계가 주로 사용된다.

레이저간섭계는 광간섭을 이용하여 매우 정밀한 운동(motion)을 측정하는 시스템으로서 표준기의 길이측정 및 공작기계 및 측정기계의 오차측정을 위해 사용될 뿐만 아니라, 정밀기계에서는 내장되어 위치검출을 위한 표준기로 사용되고 있다. 이것은 비접촉 측정기로서 다른 종류의 길이측정 검출기보다 넓은 측정범위와 높은 측정분해능과 정밀도를 갖는 장점을 가지고 있다. 정밀도가 높

은 레이저간섭계는 현재 공작기계 및 측정기계의 정밀도평가 및 오차보정을 위한 표준기로서 많이 사용되고 있다.

따라서 이 글에서는 고정밀 측정기기로서 많이 사용되고 있는 레이저간섭계를 이용한 오차의 측정과 보정에 관해서 간략히 소개하고자 한다. 이를 위해 레이저간섭계의 측정원리, 측정방법, 응용에 대해서 소개한다. 응용 예에서는 본 연구소에서 개발하고 있는 제품을 대상으로 하였다.

2. 레이저간섭계의 측정원리

레이저간섭계에는 마이클슨간섭계와 헛로다인간섭계(Heterodyne Interferometer) 등이 있다. 그림 1은 마이클슨에 의해 1980년대에 개발된 마이클슨간섭계의 측정원리를 보여준다.⁽⁶⁾ 단파장의 동위상을 갖는 레이저광은 광분할기를 통해 두 개의 기준광속과 측정광속으로 나뉜다. 기준광속과 측정광속이 기준면과 측정면에 입사되고, 반사되는 두 광속을 광분할기로 합성하면 광경로차로 인해 보강 및 소멸간섭이 발생된다. 이동량은 간섭무늬 수를 계산하여 얻게 되는데, 이 시스템의 측정정밀도는 사용하는 레이저광의 파장길이 측정에 달려 있다. 실제적으로 광이 공기 중을 통과할 때, 주파수는 영향을 받지 않지만, 파장은 압력, 온도, 습도에 의해 변화한다. 따라서 이 시스템은 실제 응용분야에서 사용될 때 파장의 변화를 실시간 측정하여 보정하지 않는 한 정밀도를 보장하기가 어렵다.

이러한 단점을 보완하여 두 주파수를 갖는 편광레이저의 도플러효과를 이용한 헛로다인레이저간섭계가 개발되었다.⁽⁶⁾ 사용된 He-Ne 레이저의 두 주파수 f_1, f_2 는 5×10^{14} Hz에 인접한 주파수이다. f_1, f_2 의 차는 2 MHz 정도이며 반대방향으로 편광되어 있다. 이 간섭계는 Michlon 간섭계에 비해 상대적인 장점을 갖는다. 즉, 도플러효과를 이

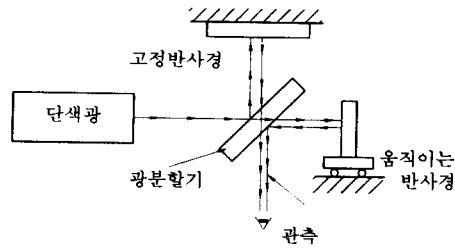


그림 1 마이클슨 간섭계의 측정원리

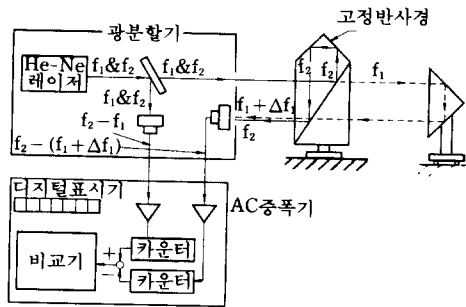


그림 2 헛로다인레이저간섭계의 측정원리

용함으로써 보다 간편한 사용과 신뢰할 수 있는 증폭이 가능하고, 정확히 운동방향을 구별할 수 있고, 속도나 거리를 측정할 수 있다. 또한, 고정빔분할기의 위치는 레이저 헤드로부터 기인되는 열변형 문제를 감소시켰고, 외부광학을 교체하면 길이, 각도, 진직도, 직각도, 평면도 등의 측정이 가능하다.

이 시스템의 길이측정원리는 그림 2와 같다. 레이저에서 나온 광속이 광분할기에 의해 둘로 나누어진다. 한쪽 반은 기준신호로서 바로 편광기와 수광소자에 들어가서 전기적 신호를 생성한다. 기준 수광소자의 빛은 2 MHz로 반짝거리고, 그 주파수의 전기적 신호를 생성한다. 나머지 반은 측정을 위해 외부광학으로 입사된다. 외부광학으로 나온 광속은 고정된 편광빔분할기를 통과하게 된다. 기준광속 f_2 은 코너큐브로 반사하고, 측정광속 f_1 성분은 측정코너큐브에 보낸다. 측정코너큐브가 운동을 하게 되면 반사된 광속

은 도플러효과에 의해 운동속도에 비례하는 주파수 변화가 발생된다. 이 $f_1 + \Delta f_1$ 의 광속은 고정된 빔분할기에서 재결합되어 수광소자에 입사된다. 여기에서도 속도에 비례하는 0.5~3.5 MHz의 간섭효과를 얻게 되고 이에 상당하는 전기적신호를 얻는다. 기준신호와 측정신호는 AC증폭되고, 두 신호에 대한 카운터의 차가 출력회로에서 계산된다. 만약 운동이 없으면 출력은 0으로 나타나고, 운동이 있으면 움직인 거리에 비례하는 값을 출력한다. 이것의 측정분해능은 5~10 nm 정도이다.

그림 3은 광경로차를 이용한 각도의 측정 원리를 보여준다.⁽⁷⁾ 레이저광속이 각간섭경에 입사되면 f_2 는 통과되고 f_1 의 빛은 반사된다. f_1 은 다시 반사경에 의해 반사되어 코너큐브를 향한다. 이때 두 코너큐브가 부착된 코너큐브마운트가 미소각도 회전하게 되면 반사된 광속은 도플러효과에 의해서 주파수 변화가 생기고 각간섭경에서 합성되어 간섭 무늬를 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. 이 광로차의 변화량은 광축방향에 따른 코너큐브 중심의 상대적인 위치변화이다. 레이저간섭계를 이용한 각도측정은 길이측정에 비해 정확도가 떨어지므로 큰 각도의 변화를 측정하는 데는 부적합하다. 반면 미소각도 측정에는 높은 분해능을 가지고 있어 유용하다.

그림 4는 진직도측정원리를 보여준다. 레이저에서 나온 광속은 진직도간섭경인 윌라스토프 프리즘(Wollaston Prism)에 입사된다. 이 윌라스토프 프리즘은 입사광의 편광에 따라 굴절률이 달라져 광속은 임의각(θ)을 이루면서 f_1, f_2 의 광속으로 각각 분리된다. 이 광속은 다시 내각이 $180 - \theta$ 로 만들어진 진직도반사경(straightness reflector)에 입사된다. 이때 진직도반사경이 광축에 수직방향으로 움직이게 되면 반사파는 각각 주파수 변

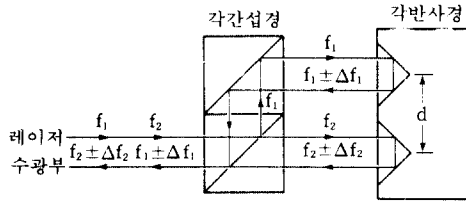


그림 3 각도 측정원리

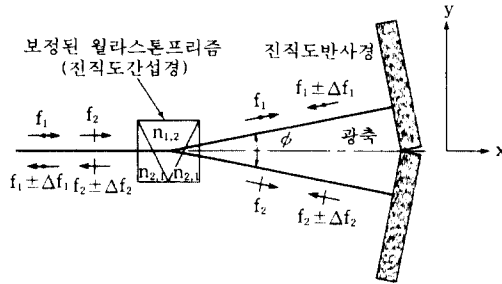


그림 4 진직도의 측정원리

화가 생기게 되고 이들은 다시 윌라스토프 프리즘을 통과하면서 합쳐져 레이저 광검출기에 들어간다. 반사경이 광속에 대하여 수직으로 이동하면 이동한 축의 광로는 길어지고 반대쪽은 짧아지는데 수직방향의 이동량은 광경로차를 측정하고 기하학적 관계에 의해서 수직방향의 변위를 구할 수 있다.

3. 측정종류

헤트로다인레이저간섭계는 외부광학을 교체하므로 여러 변수의 측정이 가능하다. 여기서는 일반적으로 많이 사용되는 길이, 각도, 진직도, 평면도의 측정에 관해 측정광학의 설치 및 측정방법에 관해 언급한다.

3.1 길이측정

길이측정은 일반적으로 시스템의 위치결정 정도를 측정하여 시스템으로부터 얻을 수 있는 정밀도를 예측하거나, 시스템의 계통오차를 측정하여 소프트웨어로 오차를 보정하기 위해 실시하고 있다. CNC제어기를 가지고

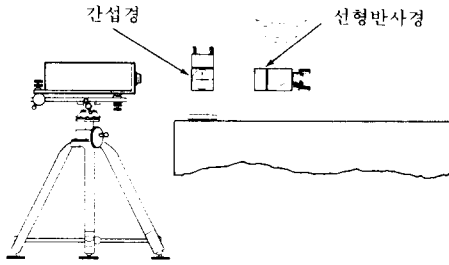


그림 5 길이측정을 위한 광학계 설치

있는 시스템은 일반적으로 소프트웨어로 오차를 보정하는 기능을 가지고 있어 오차를 측정하여 오차테이블에 입력하면 자동적으로 보정된 결과를 얻을 수 있다.

측방향의 변위를 측정하기 위해서는 그림 5(a)와 같이 간섭경과 반사경을 일직선상에 설치한다. 간섭경을 고정단에 설치하면 반사경은 측정하고자 하는 테이블상에 설치한다. 길이측정은 간섭경과 반사경의 상대변위를 측정하는 것이므로 이와 반대로 반사경을 고정하고 간섭계를 움직이며 측정하여도 무방하다. 수직방향의 변위를 측정할 경우에는 레이저헤드와 간섭경과 반사경을 그림 5(b)와 같이 90도되게 설치한다. 레이저간섭계의 출력은 바로 변위를 나타낸다.

속도를 측정할 경우의 광학계는 길이를 측정할 때의 광학계와 같으므로 콘트롤러상에서 측정변수로 속도를 선택하면, 속도출력값을 얻을 수 있다.

3.2 각도측정

구동축의 피칭(pitching), 요잉(yawing)과 롤링(rolling)은 바르지 못한 구동방법에 의해서 발생하기도 하며, 시스템의 가이드면 형상이나 자중에 의한 탄성변형에 의해 발생하는 오차변수이다. 따라서 이들 요소는 길이오차측정과 더불어 시스템의 오차요인을 분석하는 데 필요한 정보를 제공하여 준다. 단, 레이저간섭계는 측정원리상 축의 롤링은 측정할 수 없다.

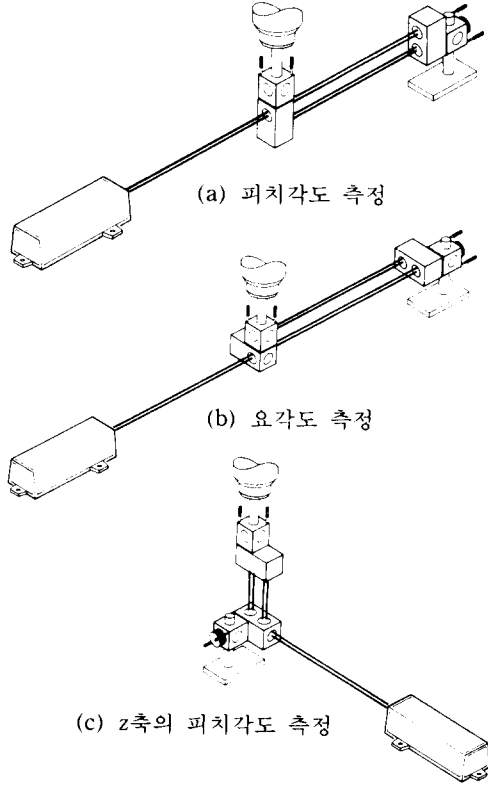


그림 6 각도측정을 위한 광학계 설치

측방향의 피치를 측정하기 위해서는 그림 6(a)와 같이 각간섭경과 각반사경을 설치한다. 측정되는 각도는 각반사경의 상대회전 각도를 의미한다. 요잉의 측정은 그림 6(b)와 같이 간섭경과 반사경을 수평으로 설치하면 가능하다. Z축에 대한 피칭이나 요잉의 각도변화를 측정하기 위해서는 그림 6(c)와 같이 레이저헤드와 간섭경과 반사경을 직각으로 설치한다. 레이저간섭계로부터 읽는 값은 바로 각도를 나타낸다.

3.3 진직도 측정

진직도를 측정하기 위해서는 그림 7(a)와 같이 외부광학계를 설치한다. 윌라스톤 프리즘인 진직도간섭경과 진직도반사경을 일직선상에 설치한 후 간섭경을 일정간격씩 움직이

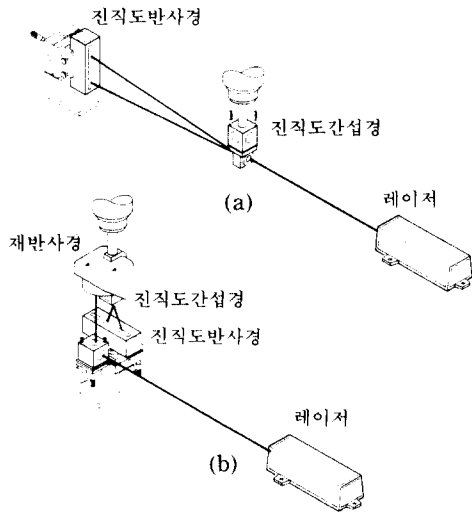


그림 7 진직도 측정을 위한 광학계 설치

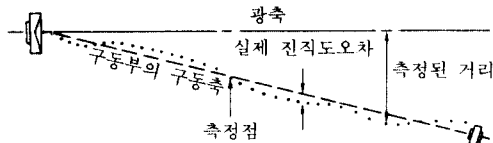


그림 8 광축과 구동축과의 설치오차를 고려한 진직도

며 레이저간섭계의 출력을 읽는다. 진직도의 측정은 레이저간섭계의 출력을 가지고 데이터처리를 하여 얻는다. 레이저간섭계의 광축 방향과 이동축의 방향이 정확히 일치한다면 출력데이터가 바로 이동축 방향에 대해 수직 방향의 변위를 나타내지만, 설치상의 이유로 광축과 이동축간의 오차가 존재하므로 레이저간섭계의 출력에는 이에 대한 영향이 반영되어 나타난다. 대부분의 경우 레이저간섭계에서 읽은 값은 그림 8과 같이 한쪽 방향으로 증가하거나 감소하는 경향을 나타낸다. 따라서 측정된 데이터를 일차로 곡선맞춤하여 광축과 구동축의 어긋난 각도를 계산하고 이에 대한 영향을 제거하여 순수히 구동축에 대한 수직방향의 변위를 측정한다.

Z축의 진직도를 측정할 경우에는 그림 7(b)와 같이 간섭경과 반사경을 고정단에 설

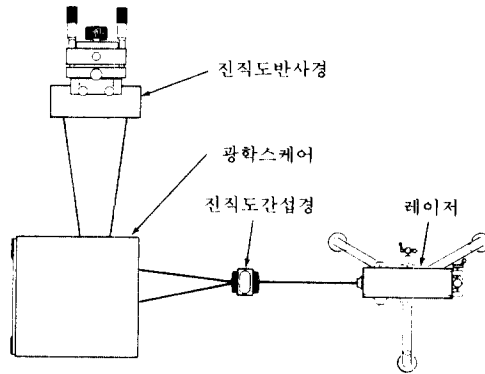


그림 9 직각도 측정을 위한 광학계 설치

치하고 Z축에 재반사경을 설치하여 Z축을 구동하며 진직도를 측정한다.

3.4 직각도 측정

그림 9는 직각도를 측정하기 위한 외부광학의 설치상태를 보여주는 그림이다. 외부광학으로는 진직도반사경과 진직도간섭경과 재반사경과 Optical Square를 사용한다. 먼저 한 축을 움직이며 진직도를 측정한다. 다음으로 Optical Square와 진직도간섭경을 이동하여 다른 한 축을 움직이며 진직도를 측정한다. 이때 진직도간섭경은 움직이지 않는다. 직각도는 레이저 인터페로 미터로부터 읽은 값을 연산하여 얻는다. X축의 경우 읽은 데이터로부터 최소자승법을 이용한 곡선맞춤을 통해 일차곡선을 구한다. 이 곡선의 기울기가 광축과 X축과의 어긋난 각도 θ_x 이다. 다음, Y축과 광축과의 어긋난 각도 θ_y 를 같은 방법으로 구한다. 이들의 차로부터 두 축의 직각도를 구할 수 있다.

3.5 평면도 측정

그림 10은 평면도를 측정하기 위해 외부광학의 설치상태를 보여주고 있다. 평면도는 각도측정을 이용한 방법으로 수준기나 오토콜리미터를 이용한 진직도 측정법과 같은 원리이다. 그림처럼 간섭계를 설치한 후 스트레

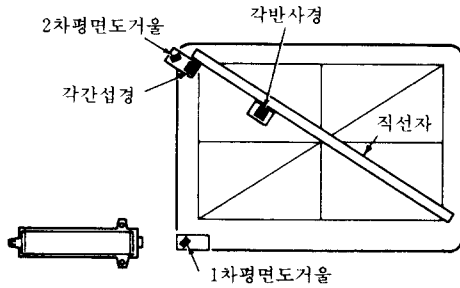


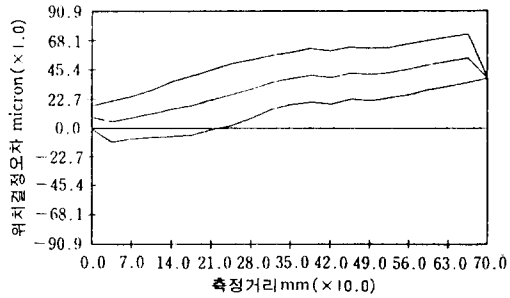
그림 10 평면도 측정을 위한 광학계

트 에지를 따라 코너큐브 마운트를 일정한 간격씩 광속에 평행되게 직선으로 이동시키면, 측정면의 상태에 따라 코너큐브 마운트가 미소각도 회전하게 된다. 이때 레이저가 읽는 광로차의 변화량은 발거리에 따라 달라지는데, 이것은 코너큐브의 발거리에 비례하고 코너큐브의 중심거리에 반비례하고 측정점 전후의 높이차에 비례한다. 일반적으로 발거리와 코너큐브의 중심간의 거리를 같게 하여 광경로차가 바로 높이차가 되도록 되어 있다. 평면도는 평면상의 여러 부분에 대해 진직도를 측정하여 이들을 적당히 계산하여 서로 조합시킴으로써 평면의 형상을 구할 수 있다.

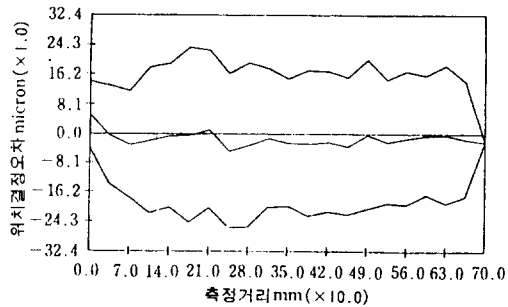
4. 측정 예

레이저간섭계를 가지고 실제 시스템에 적용하여 각 시스템의 오차에 대한 측정 및 보정을 실시하였다. 측정대상은 본 연구소에서 사용중인 밀링머신과 본 연구소에서 개발한 삼차원좌표측정기에 대해 적용하였다. 측정에 사용한 측정소프트웨어는 본 연구소에서 개발한 것이며 IBM PC와 레이저간섭계의 인터페이스는 GPIB를 이용하였다.

그림 11(a)는 본 연구소에서 사용하고 있는 밀링머신의 위치결정정도를 측정하기 위해 레이저간섭계를 사용하여 측정한 실예이다. 그림에서 X축은 측정거리이고, Y축은 위치결정오차를 나타낸다. 측정은 35 mm 간



(a) 보정전의 오차측정



(b) 보정후의 오차측정

그림 11 밀링머신의 오차측정 및 보정

격으로 700 mm구간에서 실시하였다. 콘트롤러에 오차보정 값이 입력되지 않은 이 경우에는 오차가 계속 증가하여 위치결정정도가 $72.7 \mu\text{m}/700 \text{ mm}$ 로 계산되었다. 이들 데이터로부터 표 1과 같이 보정을 위한 오차표를 작성하여 입력하고 다시 위치결정정도를 측정하였다. 그림 11(b)는 보정치를 콘트롤러에 입력한 후에 측정한 결과를 보여준다. 이때 밀링머신의 위치결정정도는 $25.9 \mu\text{m}/700 \text{ mm}$ 로 계산되어 전자의 경우보다 정밀도가 향상됨을 보여준다.

삼차원좌표측정기의 정밀도를 측정하기 위해 그림 12와 같이 삼차원좌표측정기의 기준점으로부터 레이저간섭계를 설치하여 측정공간의 각 모서리에서 일정한각으로 길이방향의 오차를 측정하였다. 길이방향 오차 측정은 백래쉬(backlash) 및 우연오차(random error)를 제거하기 위해 각 측정점에서 전방 및 후방으로 3번씩 측정하며 평균값을 취하

표 1 보정을 위한 입력치의 환산

번호	오차양	환산치	입력치
1	0.005	1	-1
2	0.008	2	-1
3	0.011	2	0
4	0.015	3	-1
5	0.017	3	0
6	0.022	4	-1
7	0.030	6	-2
8	0.030	6	0
9	0.035	7	-1
10	0.040	8	-1
11	0.040	8	0
12	0.040	8	0
13	0.043	9	-1
14	0.042	8	1
15	0.043	9	-1
16	0.046	9	0
17	0.050	10	-1
18	0.052	10	0
19	0.054	11	-1
20	0.039	8	3

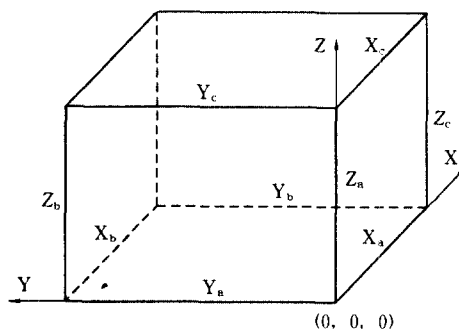
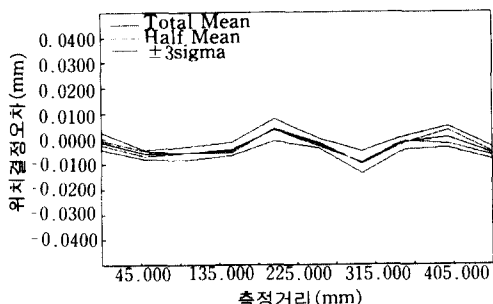


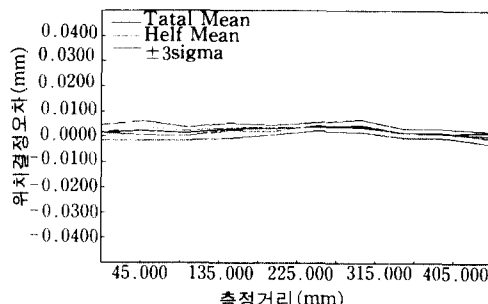
그림 12 삼차원 좌표측정기의 공간상의 오차 측정 방법

표 2 본 연구에서 사용된 3차원 좌표 측정기의 사양

측정범위	X, Y, Z: 920×700×300 mm	
이송방식	공기베어링 (X축:9개, Y축:8개, Z축:2개)	
공기사용조건	2.8 kg/cm ² , 50 Nl/min	
S/W 기능	측정기능	디지털이징 기능
	-수동측정	-선택적 구간설정
	-자동측정	-단방향, 양방향
	-학습측정	-3차원 반경보정
	-좌표시스템	-암수변환, 대칭변환
기하학적 요소	-치수변환기능	
기하학적 관계		



(a) 보정전의 오차측정



(b) 보정후의 오차측정

그림 13 삼차원 좌표측정기의 오차측정 및 보정

었다. 같은 방법으로 Y축과 X축의 오차를 측정하여 공간상의 오차테이블을 만들어 삼차원측정기의 콘트롤러에 입력하였다. 여기서 사용된 삼차원좌표측정기의 사양은 표 2에 나타낸 바와 같다. Y축의 위치결정정도를 비교하기 위해 $X=100\text{ mm}$, $Z=100\text{ mm}$ 위치에서 20 mm 간격으로 6회 반복 측정한 교정전후의 결과를 보여주고 있다. 그림 13(a)는 보상전의 오차정도를 나타내고, 그림 13(b)는 보상후의 위치결정정도를 보여준다. 이들 결과는 백래쉬가 $5.0\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ 로 줄었으며, 우연오차도 $21.6\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $9.6\text{ }\mu\text{m}$ 로 줄어든 것을 보여준다.

5. 맺음말

공작기계 및 측정기계 등은 여러가지 요인에 의해서 오차를 갖게 되지만, 이들이 갖는 계통오차는 정밀한 측정과 보정알고리즘에 의해 보정이 가능하다. 보정을 위한 측정방법은 여러가지가 있지만 측정정밀도가 높은 헤트로다인레이저간섭계가 가장 많이 사용되고 있다. 따라서 이 글에서는 헤트로다인레이저간섭계의 측정원리와 측정방법과 그 응용 예를 소개하였다.

헤트로다인레이저간섭계는 외부광학기를 교체하여 측정 가능한 길이, 각도, 진직도의 측정이 가능하므로 이들에 대한 원리와 사용 방법을 소개하였으며, 실례로 본 연구소에서 사용중인 제품과 개발한 제품에 적용하여 시스템 오차의 측정방법과 보정방법을 통해 시스템의 정밀도가 향상됨을 보여 주었다.

헤트로다인레이저간섭계를 이용하여 측정 시에도 측정기 자체가 갖고 있는 오차요인 즉, 빛의 속도가 일정하지 않고 공기의 습도, 온도 및 압력에 의해 결정되는 파장변화에 의한 오차와 피측정물의 온도변화에 의한

오차 등을 고려하여야 한다. 이런 이유로 측정 시에는 센서를 사용하여 현재 환경에 대한 영향을 자동으로 보상하든지 수동으로 온도 및 파장의 값을 기입하여 보정을 실시하여야 한다.

참고문헌

- (1) Lenz, K. J. and Merzenich, W., 1988, "Achievement of Accuracy by Error Compensation of Large CMMs," *Precision Eng.*, Vol. 10, No. 4, pp. 228~230.
- (2) Knapp, W., 1983, "Test of the Three Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and Its Relation to the Machine Errors," *Ann. 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) Yanezawa, H., Hirata, Y. and Sasai, H., 1980, "Positioning Table with High Accuracy and High Speed," *Ann. CIRP*, Vol. 39, pp. 433~436.
- (5) Wuerz, L. J. and Quenelle, R. C., 1983, "Laser Interferometer System for Metrology and Machine Tool Applications," *Precision Eng.*, Vol. 5, No. 3, pp. 111~114.
- (6) Ernest, Q. Poehelin, *Measurement Systems-Application and Design*, McGraw-Hill Book Company, pp. 276~279.
- (7) Hewellett Packard, 5528A *Laser Measurement System User's Guide*. ■