

<論 文>

# 레이저 간섭계를 이용한 미소각도형성기의 개발

엄태봉\* · 임재선\* · 원종욱\* · 정명세\*\*

(1985년 3월 12일 접수)

## The Development of the Small Angle Generator by using Laser Interferometer

Tae-Bong Eom, Jae-Sun Lim, Jong-Wook Won and Myung-Sai Chung

**Key Words:** Autocollimator(시준기), Laser(레이저), Interferometer(간섭계), Angle(각도), Small Angle Generator(미소각도형성기)

### Abstract

A small angle generator is developed for calibration of the precision autocollimator. The device using laser interferometer is designed to minimize the systematic errors caused by movement of the axis(rotation, thermal expansion, pitch and roll).

The resolution of the device is 0.01 second of arc, and the accuracy is better than  $\pm 0.03$  second of arc within the measuring range of  $\pm 20$  minute of arc. A newly developed method for measuring the distance between two corner cubes is also reported.

### 1. 서 론

미소각도형성기는 수준기 또는 시준기(level, autocollimator) 등의 정밀 각도 교정<sup>(1-3)</sup>, 정밀기계 및 정밀 광학기기의 제작과 조립, X선 회절장치(X-ray diffractometer)의 회절각도 측정<sup>(4)</sup>, 천체운동의 측정 등에 널리 사용되고 있다. 각도는 길이의 비로 나타내어지는 부기본 단위로서 미소각도의 형성과 측정은 미소길이의 형성과 측정시 사용되는 방법과 유사한 방법이 사용되고 있다. 현재 널리 사용되고 있는 미소각도형성기를 보면 다음의 세 방법이 주로 이용되고 있다.

첫째, 사인바(sine bar)의 원리를 이용한 것<sup>(1)</sup>으로 사인바의 한 쪽 로울러를 마이크로미터로 밀어주거나 게이지블록(gage block)을 끼워 넣어 높이를 조절

시킴으로써 미소각도를 형성시킬 수 있다. 이 방법은 비교적 장치 제작이 간단하고 넓은 측정범위를 갖고 있어 수준기나 범용시준기의 교정에 사용되고 있다. 그러나, 이 장치는 분해능이 낮고 정밀 정확도가 떨어져 자동시준기(automatic autocollimator)의 교정이나 고정도의 각도형성에는 부적합하다.

둘째, 탄성변형을 이용한 것<sup>(5,6)</sup>으로 알루미늄 합금이나 황동으로 2중 혹은 3중의 탄성변형지렛대(elastic deformation lever)를 제작하여 초미소각도를 형성시킬 수 있다. 이 장치는 높은 분해능을 갖고 있으나, 재질의 비선형적인 변형으로 정확도가 떨어지고 측정범위가 좁은 단점이 있다.

셋째, 광파간섭을 이용한 것<sup>(7-10)</sup>으로 간섭무늬의 변화량을 읽음으로써 회절각도를 측정할 수 있다. 이 방법은 장치가 복잡하고 사용이 어려운 단점이 있었으나 레이저 간섭계의 개발로 사용이 용이하게 되었으며 높

\* 한국표준연구소 길이표준연구실

\*\*정회원, 한국표준연구소 길이표준연구실

은 정밀 정확도, 높은 분해능, 비교적 넓은 측정범위를 갖고 있어 X선 회절장치의 회절각도 측정 및 고정도의 자동시준기 교정에 사용되고 있다. 특히 이 방법은 전술한 두 방법에 비해 회전축의 흔들림에 의한 오차를 제거할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 He-Ne 레이저를 광원으로 하는 시준기 교정용 레이저 각도 간섭계를 설계 제작하였으며 이 장치의 계통적 오차(systematic error)를 분석하였다. 또 간섭계의 반사경으로 사용된 두 코너큐브(corner cube) 중심 사이의 간격측정을 위한 새로운 방법을 연구하였으며 이 측정의 정확도를 실험적으로 검사하였다.

### 2. 미소각도형성기의 원리 및 장치제작

본 미소각도형성기의 원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 길이를 알고 있는 막대 AB를 회전 축 O를 중심으로  $\theta_0$ 만큼 회전시켰을 때 막대의 한 끝 A가 그리는 원호의 수직발  $d_1$ 과 다른 한 끝 B가 그리는 원호의 수직발  $d_2$ 를 측정하여 아래의 식을 이용하여 회전각  $\theta$ 를 구하자는 데 있다.

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{(d_1 + d_2)}{(l_A + l_B)} \right\} \quad (1)$$

(여기서  $l_A$ 는 회전축 O에서 막대의 한 끝 A까지의 거리이고  $l_B$ 는 회전축 O에서 막대의 다른 한 끝 B까지의 거리이다.)

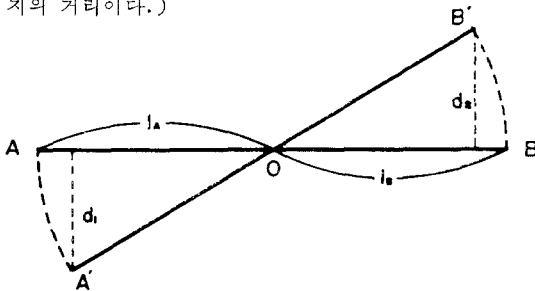
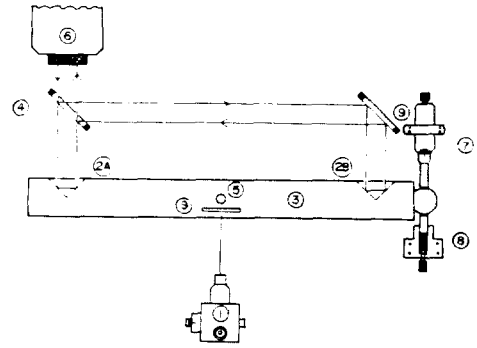


Fig. 1 Principle of the small angle generator

Fig. 2는 제작된 미소각도형성기의 개략도이다. 본 장치에 사용된 레이저는 지만분리(Zeeman splitting)를 이용하여 안정화한 레이저(H.P. model 5526 A)로 오른쪽 원편광(right circular polarization)과 왼쪽 원편광(left circular polarization)의 두 주파수 출력 성분을 갖고 있으며 각각의 원편광 출력은  $\lambda/4$  판에 의해 수직 및 수평 방향으로 진동하는 선형편광이 된다.

주파수가 각각  $f_1, f_2$ 이고 선형편광이 되어 있는 레이저의 광속은 서로 수직으로 편광이 되어 있어서 광



- ① Autocollimator
- ②A, ②B Corner cubes
- ③ Rotating arm
- ④ Beam splitter
- ⑤ Rotating axis
- ⑥ Laser and detector
- ⑦ Motorized micrometer
- ⑧ Restoring spring
- ⑨ Mirror

Fig. 2 Schematic diagram of the small angle generator

속분리기(beam splitter)에 입사하면  $f_1$ 의 광속은 반사되고  $f_2$ 의 광속은 투과된다. 이와 같이 분리된  $f_1, f_2$ 의 광속은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 코너큐브 ②A와 ②B에서 각각 반사된 후 입사경로와 나란한 경로를 거쳐 레이저에 있는 동일한 검출기에서 검출된다. 만약 회전막대를 마이크로미터로 미소각도 회전시키면 두 코너큐브에서 반사된 광속들은 도플러효과(Doppler effect)에 의해 주파수 변화가 생기게 되고 이를 검출하므로써 두 코너큐브 사이의 광로차의 변화량, 즉 코너큐브 ②A와 ②B의 상대적인 위치변화량( $d_1 + d_2$ )을 구할 수 있다<sup>(11)</sup>(Fig. 1 참조). 이 광로차의 변화량은 회전각도를  $\theta$ 라 할 때  $\sin \theta$ 에 비례하는 양이 된다.

사용된 마이크로미터는 DC 모터가 부착되어 있어 속도 조절과 정확한 위치에서의 정지가 가능하며 또한 원격조정을 할 수 있게 되어 있다. 이 마이크로미터의 위치결정정도는 약  $0.1 \mu\text{m}$ 이며 최대이동속도는  $0.2 \text{ m/m}$  초로 레이저의 최대측정속도( $0.3 \text{ m/초}$ )보다 훨씬 작기 때문에 자유롭게 속도 조절을 할 수 있다.

회전에 의한 각도형성기에서는 회전축의 흔들림이 가장 큰 오차 요인이 된다. 그러나, Fig. 2와 같은 장치에서는 이 오차가 상쇄된다. 즉 회전축의 미끄러진 길이를  $s$ , 회전축에서 왼쪽 코너큐브 ②A의 중심까지 거리를  $l_A$ , 오른쪽 코너큐브 ②B의 중심까지 거리를  $l_B$ , 회전각도를  $\theta$ 라 할 때 광로차의 변화량  $d$ 는

$$d = (l_A \cdot \sin \theta + s) + (l_B \cdot \sin \theta - s) = l \cdot \sin \theta \quad (2)$$

(여기서  $l(l_A + l_B)$ 은 두 코너큐브 중심사이의 간격이다.)

가 되어 회전축의 미끄러진 길이  $s$ 와는 관계없이  $\sin \theta$ 에 비례하게 된다.

일반적으로 각도표준기로 사용되는 자동시준기는 측정범위가 좁은 반면( $\pm 5$  분 이내)에 분해능(0.1 초)은 좋다. 한편 공작물의 설치나 검사에 사용되는 범용시준기는 넓은 측정범위( $\pm 15$  분)에 낮은 분해능(0.5 초)을 갖고 있다. 본 연구에서 제작된 각도간섭계는 위 두 사항을 고려하여 측정범위가  $\pm 20$  분이고 분해능이 0.01 초가 되도록 설계되었다.

### 3. 코너큐브 중심사이의 간격측정

본 미소각도형성기에서 가장 큰 문제점은 코너큐브 중심사이의 간격측정이다. 즉, 이 간격의 정확한 측정이 본 장치의 정확도에 직결된다. 그러나, 현재까지 이에 대한 정확한 측정방법이 연구 보고된 바 없고 다만 설계 치수를 그대로 사용하거나 만능측장기(universal measuring machine)를 이용하여 간격을 측정하였었다. 그러나, 전자의 경우 제작오차를 피할 수 없으며, 후자의 경우 또한 코너큐브 중심선의 넓은 선폭 때문에 간격측정의 불확도가 크게 된다. 또한 이 방법으로 정확하게 간격을 측정하였다고 하여도 두 코너큐브의 축과 회전막대의 회전축과의 직각도, 회전막대에 조립된 코너큐브의 상호위치 등에 의해 이 간격측정치가 실제 간격과 달라질 수 있다.

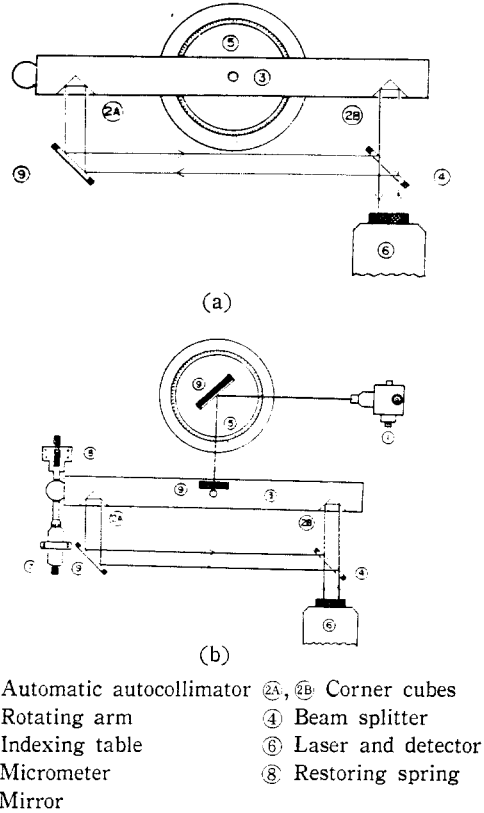
따라서, 본 연구에서는 회전눈금원판(indexing table)을 이용한 새로운 측정방법을 모색하였다. Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이  $\pm 0.2$  초 이내의 오차로 0.25 도씩 정확한 각도회전이 가능한 회전눈금원판 위에 회전막대를 설치한 후 회전눈금원판을 일정각도  $\phi$  만큼 회전시켜 두 코너큐브 사이의 광로차의 변화량  $D$ 를 레이저 간섭계로 측정하므로써

$$l = D / \sin \phi \quad (3)$$

로부터 코너큐브 중심사이의 간격  $l$ 을 구할 수 있다.

또 다른 방법은 회전눈금원판과 회전막대를 Fig. 3 (b)처럼 설치하여 시준기의 지시값을 읽은 후 회전눈금원판을 시계방향으로  $\phi$ 만큼 회전시켜 시준기의 지시값이 처음과 같도록 한 후 레이저간섭계로 광로차의 변화량  $D$ 를 측정하므로써 역시 식 (3)에 의해 간격  $l$ 을 구할 수 있다. 이렇게 구한  $l$ 에는 회전눈금원판의 오차( $\Delta\phi$ )와 광로차 변화량의 측정오차( $\Delta D$ )에 의한 오차( $\Delta l$ )가 내포되어 있다.

$\Delta\phi$ 에 의한  $\Delta l$ 을 살펴보면,  $l$ 을 설계 치수 500mm,  $\phi$ 를 0.5도로 했을 때  $\Delta D$ 는  $\pm 0.2$  초 이내이므로 간격측정치  $l$ 은  $500 \pm 0.055$  mm 범위 내에 있게 된다. 그



① Automatic autocollimator ②A, ②B Corner cubes  
③ Rotating arm ④ Beam splitter  
⑤ Indexing table ⑥ Laser and detector  
⑦ Micrometer ⑧ Restoring spring  
⑨ Mirror

Fig. 3 Setup for measuring the distance between two corner cubes

런데, 회전눈금원판의 연속된  $n$ 개의 구간을 설정했을 때 이 전구간에 대한 오차도  $\pm 0.2$  초 이내에 있게 된다. 따라서  $n$ 개의 구간에 대해  $n$ 회 측정하여 각각의 간격을 구한 후 그 평균치를 구하면  $l$ 은  $500 \pm 0.055/n$  mm 범위 내에 있게 된다. 따라서,  $n$ 이 커지면 오차값  $\Delta l$ ( $0.055/n$  mm)은 무시할 수 있으며 단지 회전눈금원판의 반복성(0.05 초)과 시준기의 반복성(0.05 초)에 의해 약 0.028 mm의 간격측정 불확도를 갖게 된다.

$\Delta D$ 에 의한 간격측정오차  $\Delta l$ 은 레이저 파장측정의 부정확도와 파장안정도(frequency stability)에 의해 발생된다. 본 연구에 사용된 레이저간섭계의 파장은 국가표준기인 육소 안정화 헬륨 네온 레이저( $^{127}\text{I}_2$  stabilized He-Ne laser)에 비교하여 교정이 완료되었으며<sup>(12)</sup>, 이 레이저의 파장안정도는 약  $2 \times 10^{-7}$  정도<sup>(13)</sup>이기에 의한 간격측정오차  $\Delta l$ 은 약 0.1  $\mu\text{m}$ 가 되어 이 양은  $\Delta\phi$ 에 의한  $\Delta l$ 에 비해 무시될 수 있다. 따라서, 이 방법에 의한 간격측정은  $l$ 을 500 mm로 가정했을 때 대략  $\pm 0.028$  mm의 불확도를 갖게 된다.

4. 장치의 오차분석

회전막대를  $\theta$  만큼 회전시켰을 때 각  $\theta$  는 다음 식으로 표시된다.

$$\theta = \arcsin(d/l) \tag{4}$$

즉  $d$  를 측정하므로써  $\theta$  를 구할 수 있다. 그런데 여기서  $d$  의 측정오차와  $l$  의 오차로 인하여  $\theta$  의 측정에 오차가 발생되며 그 양은  $\theta$  가 미소각도일 경우 아래와 같다.

$$\Delta\theta \cong \frac{\Delta d}{l} + \frac{d}{l^2} \cdot \Delta l \tag{5}$$

(여기서  $\theta$  는 라디안 값이다)

$d$  의 측정오차, 즉 광로차 변화량의 측정오차  $\Delta d$  는 레이저 광장의 부정확도와 코너큐브 측과 레이저 광축과의 부정확한 정렬에 기인된다. 전자는 레이저 자체의 안정도 및 공기굴절율의 부정확한 측정에 의한 파장보정의 오차이다. 공기의 굴절율은 대기압, 온도, 습도의 함수<sup>(14)</sup>로 본 레이저 측정장치에 부착된 기압계, 온도계, 습도계로 이들을 측정하여 공기의 굴절율을 구한 후 대기 중의 파장을 자동보정하도록 되어 있다. 이 파장보정의 오차는 약  $2 \times 10^{-7}$ 의 불확도를 갖는데<sup>(13)</sup> 이 값을 각도로 환산했을 경우, 회전각 20 분에 대해  $\Delta\theta$  는 약 0.0002 초이므로 이 양은 각도간섭계에서 무시할 수 있다. 다만 레이저 자체의 분해능 한계( $\pm 0.02 \mu\text{m}$ )에 의하여 약  $\pm 0.01$  초의 오차 요인을 갖게 된다.

후자의 경우, 만일 광축과 코너큐브 측과의 정렬각이 90 도에서  $\alpha$  만큼 벗어났다면 레이저가 검출한 거리  $d'$  는 코너큐브의 이동거리  $d$  와 다르게 되고 그 차이가  $\Delta d$  는 여현오차(cosine error)로 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta d &= d - d' = d(1 - \cos\alpha) \\ &\cong \frac{1}{2}d\alpha^2 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 숙달된 측정자는  $\alpha$  를  $\pm 15$  분 보다 적게 정렬시킬 수 있다.  $l$  을 500 mm  $\theta$  를 20 분이라 가정하면 광로차의 변화량  $d$  는 2.9089 mm 가 되고  $\alpha$  값  $\pm 15$  분에 대해  $\Delta d$  는  $\pm 0.03 \mu\text{m}$  이고 이로 인해  $\Delta\theta$  에 미치는 오차는 약  $\pm 0.01$  초가 된다[식 (5) 참조].

코너큐브 중심사이 간격  $l$  은 앞에서 기술한 바와 같이 회전 눈금원판과 시준기를 사용하여 측정했을 경우 약  $\pm 0.028 \text{ mm}$  의 불확도가 있고 이로 인해  $\theta$  는 회전각 20 분에 대해  $\pm 0.06$  초의 오차가 발생된다. 따라서 본 장치에서 예상되는 최대측정오차  $\Delta\theta_{\text{max}}$  은 회전각 20 분에 대해 약  $\pm 0.08$  초이다.

5. 실험 및 성능검사

제작된 회전막대에 간격이 대략 500 mm 가 되도록 두 코너큐브 (A), (B) 를 부착한 [후 앞에서 기술한 세 방법(방법 1 : 만능측장기와 현미경의 사용, 방법 2 : 회전눈금원판의 사용, 방법 3 : 회전눈금원판과 자동시준기의 사용)에 따라 코너큐브 중심사이 간격을 각각 측정하였다. 비교에 의한 성능을 검사할 목적으로 Fig. 4 와 같이 회전막대에 코너큐브 한 쌍을 추가로 부착하였으며 이 간섭계에 대해서도 세 방법으로 간격을 측정하였으며 각 방법에 따른 간격측정치들을 Table 1 에 실었다.

Table 1 Measured distances of two corner cubes

Method of measurement	Interval between A and B (Interferometer 1)			Interval between A' and B' (Interferometer 2)		
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 1	Method 2	Method 3
Measured value (mm)	499.308	499.207	499.261	500.200	500.218	500.329

Method 1 : Used an universal measuring machine and a microscope

Method 2 : Used an indexing table

Method 3 : Used an indexing table and an automatic autocollimator

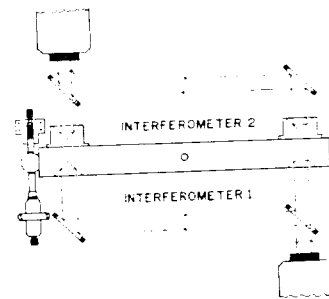
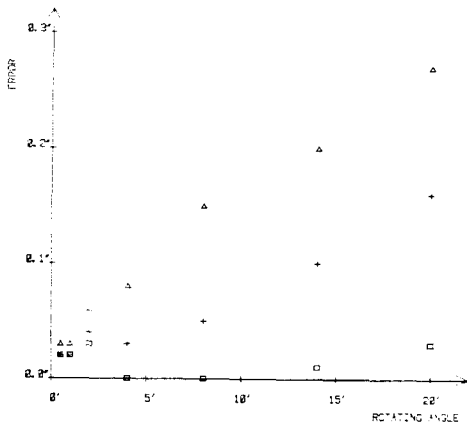


Fig. 4 Setup for testing the accuracy of the small angle generator

다음에는 위에서 측정된 간격의 정확도 및 이 각도 간섭계의 정확도를 검사하기 위해 Fig. 4 와 같이 간섭계 1 과 간섭계 2 의 두 간섭계를 구성하였다. 실험은 회전막대를 마이크로미터로 밀어주어 일정각도씩 회전하도록 한 후 두대의 레이저에 의해 광로차의 변화량을 각각 구했다. 다음 이 값과 Table 1 에 주어진

**Table 2** Angles calculated with the variances of optical path differences and the distances of corner cubes measured by 3 different methods(The methods are the same as in Table 1)

Method of measurement Displacement of micrometer ( $\mu\text{m}$ )	Interferometer 1			Interferometer 2		
	Method 1	Method 2	Method 3	Method 1	Method 2	Method 3
51	29.95''	29.96''	29.95''	29.98''	29.98''	29.97''
102	59.90''	59.91''	59.91''	59.93''	59.93''	59.93''
204	1', 59.80''	1', 59.82''	1', 59.81''	1', 59.86''	1', 59.86''	1', 59.84''
408	4', 00.01''	4', 00.06''	4', 00.03''	4', 00.09''	4', 00.09''	4', 00.03''
816	8', 00.04''	8', 00.12''	8', 00.07''	8', 00.19''	8', 00.17''	8', 00.07''
1428	13', 59.89''	14', 00.00''	13', 59.92''	14', 00.12''	14', 00.11''	13', 59.93''
2040	19', 59.97''	20', 00.11''	20', 00.02''	20', 00.23''	20', 00.22''	20', 00.05''

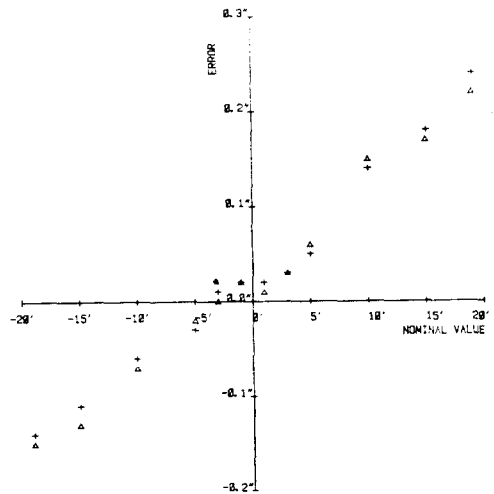


$\Delta$  : Method 1, + : Method 2,  $\square$  : Method 3  
**Fig. 5** Differences between the values of the rotating angles measured with two interferometers depending on the data of the corner cube distances(The method are the same as in Table 1)

간격측정치를 식 (4)에 대입하여 구한 회전각도들이 Table 2에 주어졌다. 마이크로미터의 이동치 2040 $\mu\text{m}$  (이 양은 약 20 분의 회전각에 해당된다.)에 대해 각 간격측정방법 사이에 간섭계 1 은 0.14 초, 간섭계 2 는 0.18 초의 편차가 있었으며, 간섭계 1, 2 전체에 대해서는 0.26 초의 편차가 있었다(Table 2 참조).

Fig. 5 는 간격측정 방법에 따른 간섭계 1 과 2 의 회전각도 측정치의 편차를 나타낸 그림으로 약 20 분의 회전각에 대해 방법 1 은 0.26 초, 방법 2 는 0.11 초, 방법 3 은 0.03 초이었다. 처음 예상했듯이 만능측장기를 이용한 방법이 가장 부정확했으며 방법 3 보다

약 9 배의 큰 측정오차가 있었다. 방법 2 의 경우 방법 3 과는 달리 시준기를 사용하지 않아 시준기의 반복성에 의한 간격측정오차가 제거되리라 예상했었으나 이와는 반대로 방법 3 보다 약 4 배의 측정오차가 있었다. 이는 방법 2 로 간격을 측정할 때 회전눈금원판의 회전축과 회전막대의 회전축과 평행하지 않은 데서 오는 여현오차 때문에 일어난 것으로 사료된다. Fig. 5 에서 보면 두 간섭계의 회전각도 측정치의 차들이 직진성에서 벗어나는데 이는 레이저의 안정도 및 분해능의 한계에서 기인된 것으로 생각된다. 결론적으로 여러 간격측정법 중 방법 3 이 가장 정확하고 이 장치의



+ : Errors determined by interferometer 1  
 $\Delta$  : Errors determined by interferometer 2  
**Fig. 6** Errors of an automatic autocollimator measured by the small angle generator

정확도는 앞에서 기술했던 예상 최대 불확도값( $\pm 0.08$  초)보다 훨씬 적음을 알 수 있다.

또 회전대의 회전정도를 알아보기 위하여 피치(pitch)와 로링(rolling)을 전기레벨(electronic level)로 측정하였다. 회전각 20분에 대하여 피치는 6.0 초, 로링은 1.3 초이었으며 이 양이 본 장치에 미치는 오차는  $2.4 \times 10^{-5}$  정도로 무시될 수 있다.

Fig. 6은 제작된 장치를 사용하여 자동시준기를 교정한 결과이다. 측정은 Fig. 4처럼 두 개의 간섭계를 동시에 사용하였고 방법 3으로 구한 간격  $l$ 을 적용하였다. 그림에서 볼 수 있는 두 교정치의 차이는 모두 표준편차 내에 있었다.

## 6. 결 론

제작된 시준기 교정용 미소각도형성기는 종래의 장치에서 문제가 되었던 회전축의 흔들림에 의한 오차를 제거한 장치로 측정에서 문제가 되는 회전대의 온도를 자동측정하여 열팽창에 의한 회전막대의 길이 변화를 자동보정할 수 있도록 하였다.

성능검사에서 알 수 있듯이 이 장치의 정확도는 코너큐브 중심사이 간격의 정확한 측정에 달려있다. 여러 측정법 중 회전눈금원판과 자동시준기를 사용하여 측정한 간격이 가장 정확하며 이 방법에 의한 간격측정의 정확도는  $2.6 \times 10^{-5}$  이하이다.

이 장치에 대한 성능검사 결과 측정범위  $\pm 20$ 분에서 정확도는  $\pm 0.03$  초로 최대예상치 보다 좋은 결과를 얻었다.

## References

- (1) Sc Bottomley "Applying Angular Measurement to Engineering", Measurement & Inspection Technology, November, pp.19~21, 1981
- (2) M.J. Saunders, "Interferometer for Determinating Autocollimator Errors", Rev. Sci. Instr., 39, 11, p.1744, 1968
- (3) Jablonski, A. Toyama, "Calibration of Photoelectric Autocollimator with a Laser Interferometer System and Microcomputer", Bulletin P.M.E., 43, pp.29~32, 1979
- (4) H.M.B. Bird; "A Computer Controlled Interferometer System for Precision Relative Angle Measurements", Rev. Sci. Instr., 42, 10, pp. 1513~1520, 1971
- (5) Nobuhiro Tsuda, Kenichi Nakano, Masaji Sawabe, "Super Microscopic Displacement and Angle Adjusting Instrument", Transactions of the ASME, 102, 3, pp.195~200, 1980
- (6) Chr. Hoffrogge, H-J. Rademacher, "Eine Doppel Parallel Feder Als Präzisionsführung", PTB-Mitteilungen, 83, 6, pp.78~82, 1973
- (7) D. Malacara, O. Harris, "Interferometric Measurement of Angles" Optics, 9, 7, pp.1630~1633, 1970
- (8) W. Beyer, R. Wittekopf, "Kalibriereinrichtung für Fotoelektrische Autocollimationsfernrohre und Laser-winkel Interferometer", PTB-Mitteilungen, 92, 6, pp.393~397, 1982
- (9) 清野昭一, "角度測定用干渉計" 精密機械, 44, 5, pp.39~43, 1978
- (10) R.E. Sugg, "An Improved Angle Interferometer", N.B.S. Circ., 581, p.61, 1957
- (11) HP "5526 A Laser Measurement System Manual", H.P., 1977, pp.42.
- (12) 서호성, 임재선, 정명세, "육소안정화 헬륨네온 레이저를 이용한 Zeeman 레이저의 출력파장 측정과 안정도 평가", New Physics, 23, 4, pp.392~399, 1983
- (13) J.D. German, J.J. Corcoran, "Principles of Automatic Compensation", H.P. Laser Measurement System Application Note, 156-3, pp.2~5, 1972
- (14) Thomas M. Hoffer, "Calibration of a Machine Tool", H.P. Laser Measurement System Application Note, 156-4, pp.23~27, 1975