한국정밀공학회지 제 22 권 제 9 호 (2005 년 9 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, September 2005

레이저 간섭계의 진직도 측정오차 보상

김경호#, 김태호*, 이후상**, 김승우***

Compensation of the Straightness Measurement Error in the Laser Interferometer

Gyungho Khim#, Tae-Ho Keem*, Husang Lee**, Seung-Woo Kim***

ABSTRACT

The laser interferometer system such as HP5529A is one of the most powerful equipment for measurement of the straightness error in precision stages. The straightness measurement system, HP5529A is composed of a Wollaston prism and a reflector. In this system, the straightness error is defined as relative lateral motion change between the prism and the reflector and computed from optical path difference of two polarized laser beams between these optics. However, rotating motion of the prism or the reflector used as a moving optic causes unwanted straightness error.

In this paper, a compensation method is proposed for removing the unwanted straightness error generated by rotating the moving optic and an experiment is carried out for theoretical verification. The result shows that the unwanted straightness error becomes very large when the reflector is used as the moving optic and the distance between the reflector and the prism is far. Therefore, the prism must be generally used as the moving optic instead of the reflector so as to reduce the measurement error. Nevertheless, the measurement error must be compensated because it's not a negligible error if a rotating angle of the prism is large. In case the reflector must be used as the moving optic, which is unavoidable when the squareness error is measured between two axes, this compensation method can be applied and produces a better result.

Key Words : Laser interferometer (레이저 간섭계), Straightness measurement (진직도 측정), Angular error (각도 오차), Error compensation (오차 보상), Precision stage (정밀 스테이지)

1. 서론

초정밀 스테이지에 요구되는 운동정밀도가 높아짐에 따라, 이를 정확하게 측정할 수 있는 측정기술 또한 매우 중요한 요소로 자리잡아가고 있다. 스테이지의 운동정밀도는 계획된 경로대로 얼마나 정확하게 움직이는가를 나타내는 것으로, 일반적으로 이송축의 위치결정오차를 제외한 나머지 5 성

☞ 접수일: 2005 년 1 월 12 일; 게재승인일: 2005 년 7 월 11 일
교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail tonuri@kaist.ac.kr Tel. (042) 868-7105
* 삼성코닝정밀유리 설비개발그룹
** 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 공작기계그룹
*** 한국과학기술원 기계공학과

분, 즉 수직, 수평방향의 진직도(straightness) 오차와, 피치(pitch), 요(yaw), 롤(roll)의 각도오차를 의미한다. 이 중에서 진직도 오차는 스테이지의 진행방향에 대한 수직, 수평방향의 변위를 측정하는 것으로, 현재 진직도 오차의 측정을 위해서는 레이저 간섭계(laser interferometer), 오토콜리메이터(autocollimator), 스트레이트 엣지(straight edge) 등을 이용한 방법이 사용되고 있다.[1] 특히, 레이저 간섭계는 사용이 편리하고 넓은 측정범위와 고 분해능을 얻을 수 있어 가장 널리 이용되고 있다. 진직도 측정을 위한 레이저 간섭계는 HP 나 Renishaw 등에서 시판되고 있으며, 헬륨-네온 레이저 광원을 헤테로다인(heterodyne) 방식으로 처리하느냐, 아니면 호모다인(homodyne)으로 처리하느냐의 차이만 있을 뿐 기본적인 측정원리는 같다. 여기서는 HP 레이저 간섭계를 대상으로 한다.

HP 의 진직도 측정시스템은 레이저 광을 편광방향에 따라 둘로 나누어주는 월라스톤 프리즘(Wollaston prism)과 이를 반사시켜 프리즘으로 되돌아오게 하는 반사경(reflector)을 이용하여 측정하게 되는데, short range optic 을 사용하는 경우 3 m 의 범위에서 0.01 μm 의 고분해능으로 측정이 가능하다.[2] 그러나 측정하고자 하는 스테이지는 기본적으로 진직도 오차와 더불어 각운동 오차를 동시에 수반하므로, 진직도 오차 측정 시 원래의 진직도 오차뿐 아니라 테이블에 설치된 optic 의 회전에 기인한 각운동 오차까지 포함되어 측정된다. 따라서 스테이지가 지니고 있는 각운동 오차가 크다면 진직도 오차가 상당히 왜곡되어 측정될 것이며, 이는 고정밀도가 요구되는 초정밀 스테이지일수록 큰 문제가 된다.

본 논문에서는 HP 의 운동정밀도 측정시스템인 HP5529A 를 이용하여 진직도 오차를 측정할 때 각운동 오차에 의해 발생하는 진직도 측정오차를 이론적으로 분석하였으며, 실험을 통해 이를 검증하였다. 이로부터 각운동 오차에 의해 왜곡되어 측정되어지는 진직도 오차를 제거할 수 있는 보상방법을 제시하였다.

2. 진직도 오차 측정 원리

2.1 진직도 측정장치

Fig. 1 은 HP5529A 의 진직도 측정 원리를 나타내고 있다. 헬륨-네온 레이저 헤드에서 약 3 MHz 의 차이가 나는, 편광방향이 서로 직교하는 두 주파수 f_1, f_2 의 레이저 빔이 분할기를 통해 기준광과 월라스톤 프리즘에 입사하는 측정광으로 나누어진다. 월라스톤 프리즘은 편광방향에 따라 굴절률이 달라서 이를 통과한 광은 어떤 각(θ_{sep}, short range optic 인 경우 1.59°)을 이루면서 두 빔으로 나누어져 각각 반사경에 수직 입사하게 된다. 이때 프리즘과 반사경 사이에 상대적인 직교방향 변화가 생기면 도플러 효과에 의해 주파수 변화가 일어나고 이들이 다시 월라스톤 프리즘을 통과, 합쳐지면서 기준광과의 간섭으로 광경로차가 계산된다. 이로부터 프리즘과 반사경의 상대적인 직교방향 변위, 즉 진직도 오차가 측정되는 것이다.[1,3,4] 따라서 진직도 측정원리상 프리즘과 반사경의 어느 것이 moving optic 으로 사용되더라도 진직도 오차 측정에는 문제가 없으며, 이에 대해 자세한 것은 2.3, 2.4 절에서 다룬다.

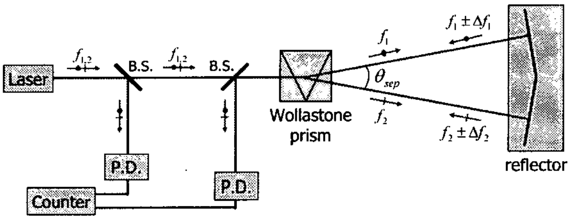

Fig. 1 Principle of the straightness error measurement

2.2 월라스톤 프리즘의 특성

HP 진직도 측정시스템에서 간섭계로 사용되는 것은 월라스톤 프리즘이다. 월라스톤 프리즘은 편광방향이 서로 직각인 두 광에 대해 서로 다른 굴절 특성을 보이는 복굴절(birefringent) 물질로서 수정(quartz)으로 되어 있다.

Fig. 2 에서 편광방향이 서로 직각인 두 광, 즉 정상광선(ordinary ray, 이하 o-ray)과 이상광선(extra-ordinary ray, 이하 e-ray)이 프리즘을 통과할 때 프리즘은 편광방향에 따라 굴절률이 각각 n_o(=1.5443), n_e(=1.5534)인 값을 갖는다.[5] 따라서 프리즘을 통과하는 두 광은 프리즘의 꼭지각(θ_{prism}, 37.348°)에 의해 결정되는 두 광 사이의 분리각(θ_{sep})을 이루면서 진행하게 된다. Fig. 2 에서는 편의상 윗 방향으로 휘는 광을 o-ray, 아랫 방향으로 휘는 광을 e-ray 라 둔다.

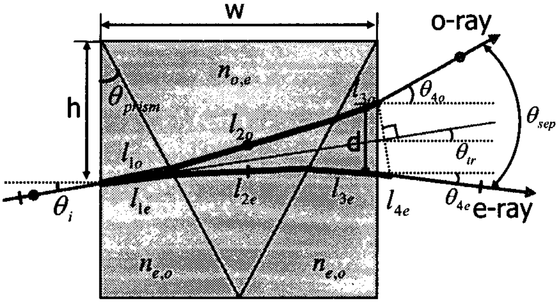

Fig. 2 Configuration of a Wollaston prism in HP5529A

이 때, 두 광 사이의 분리각(θ_{sep}) 및 평균각 (θ_{tr}), 광경로차(OPD) 등 광이 월라스톤 프리즘을 통과할 때 발생하는 특성들을 알아보기 위해서 월라스톤 프리즘의 각 구간내의 광경로와 출사각을 스넬의 법칙과 기하학적 관계를 이용하여 나타내면 식 (1), (2)와 같다.

$$l_{1o,e} = \frac{h\tan\theta_{prism}}{(\cot\theta_{1o,e} + \tan\theta_{prism})\sin\theta_{1o,e}}$$

$$l_{2o,e} = \frac{w(\cot\theta_{1o,e} + \tan\theta_{prism}) - 2h\cot\theta_{1o,e}\tan\theta_{prism}}{(\cot\theta_{1o,e} + \tan\theta_{prism})[\cos(\theta_{prism} - \theta_{2o,e}) - \tan\theta_{prism}\sin(\theta_{prism} - \theta_{2o,e})]}$$

$$l_{3o,e} = \frac{\tan\theta_{prism}[h\cot\theta_{1o,e} - l_{2o,e}\sin(\theta_{prism} - \theta_{2o,e})(\cot\theta_{1o,e} + \tan\theta_{prism})]}{\cos(\theta_{3o,e} - \theta_{prism})[\cot\theta_{1o,e} + \tan\theta_{prism}]}$$

$$l_{4e} = \frac{[l_{2o}\sin(\theta_{prism} - \theta_{2o}) - l_{2e}\sin(\theta_{prism} - \theta_{2e})]\sin\theta_i}{\cos\frac{\theta_{sep}}{2}} + \frac{[l_{3o}\sin(\theta_{3o} - \theta_{prism}) - l_{3e}\sin(\theta_{3e} - \theta_{prism})]\sin\theta_i}{\cos\frac{\theta_{sep}}{2}} \quad (1)$$

$$\theta_{1o,e} = \sin^{-1}(\frac{\sin\theta_i}{n_{e,o}}) \quad (2)$$

$$\theta_{2o,e} = \sin^{-1}(\frac{n_{e,o}}{n_{o,e}}\sin(\theta_{prism} - \theta_{1o,e}))$$

$$\theta_{3o,e} = \sin^{-1}(\frac{n_{o,e}}{n_{e,o}}\sin(2\theta_{prism} - \theta_{2o,e}))$$

$$\theta_{4o,e} = \sin^{-1}(n_{e,o}\sin(\theta_{3o,e} - \theta_{prism}))$$

여기서 $l_{io,e}$ 는 입사광이 o-ray 와 e-ray 광으로 분리되어 월라스톤 프리즘을 통과할 때 각 구간 내에서의 광경로를 나타내며, $\theta_{io,e}$ 는 각 경계면에서의 출사각을 의미한다. h 는 입사광의 월라스톤 프리즘 윗면으로부터의 거리(입사높이), w 는 프리즘의 너비로써 18.315 mm 의 값을 갖는다.

이때 레이저 광이 프리즘을 통과한 후의 두 광의 분리각(θ_{sep})은 o-ray 와 e-ray 의 출사각을 더한 값으로 식 (3)과 같이 나타나며, 프리즘에 입사되는 각 θ_i 에 따른 두 광의 분리각의 관계는 Fig. 3 의 상단 그래프에 나타내었다. 입사각에 관계없이 분리각이 거의 1.592° 정도로 일정한 것을 알 수 있다.

$$\theta_{sep} = |\theta_{4o}| + |\theta_{4e}| \quad (3)$$

한편, 프리즘을 통과한 후의 두 광의` 평균각 (θ_{tr})은 식 (4)와 같으며, 입사각에 따른 관계는 Fig. 3 의 하단 그래프에서 나타내었다.

$$\theta_{tr} = \frac{\theta_{4o} + \theta_{4e}}{2} \quad (4)$$

Fig. 3 의 하단 그래프는 입사각과, 프리즘을 통과하는 두 광의 평균각이 같다는 것을 말해주며, 이것은 프리즘의 회전에 관계없이 입사되는 광은 입사되는 광의 연장선을 중심으로 하여 두 광이 퍼져 나간다는 것을 의미한다.

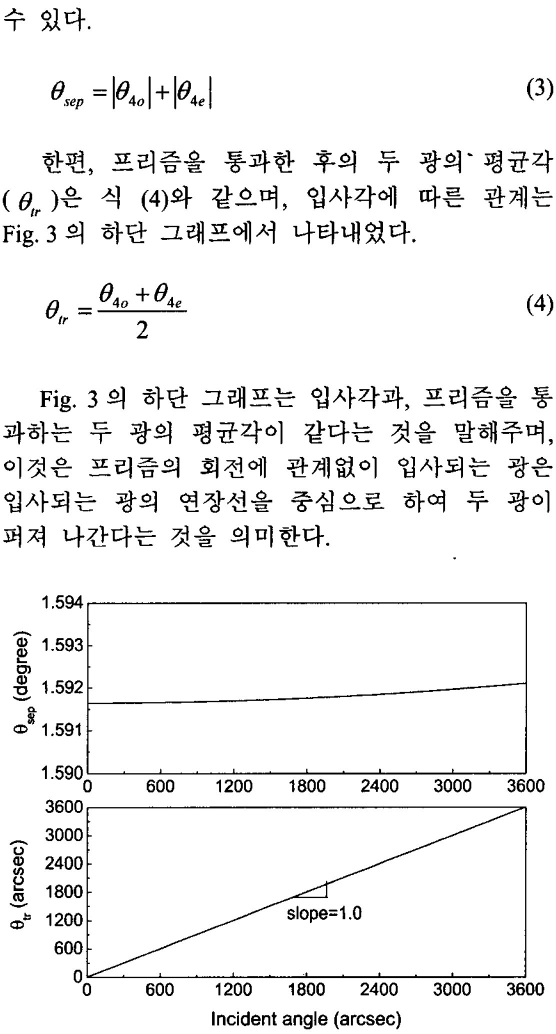

Fig. 3 Separation angle and average angle of two transmitted beams with an incident angle

한편, 프리즘 끝 단에서의 두 광 사이의 거리 d 는 식 (5)와 같이 계산할 수 있으며, 입사각과 입사높이에 따른 프리즘을 통과하는 두 광 사이의 거리를 그래프로 나타내면 Fig. 4 와 같다.

$$d = l_{4e}\cos(\frac{\theta_{sep}}{2})/\sin\theta_i \qquad (5)$$

레이저 광의 초기 입사높이와 입사각이 변화더라도 이에 의한 거리차는 3 μm 미만으로, 반사경에 도달하는 광의 위치가 거의 변화지 않을 것으로 예상할 수 있다. 그렇지만, 만약 d 의 거리차가 크게 발생하여 반사경에 입사되는 두 광의 위치가 변한다 하더라도 진직도 오차 계산에는 영향을 주지 않는다. Fig. 3 에서 두 광 사이의 평균각이 입사각과 같고, 프리즘에 입사되는 레이저 광과 반사경은 고정되어 있으므로 반사경에 입사되는 두 광의 위치가 변한다 하더라도 두 광이 동시에 길어지거나 짧아지는 것이기 때문에 상대적인 광경로차를 통해 계산되어지는 진직도 오차에는 영향을 주지 않는 것이다.

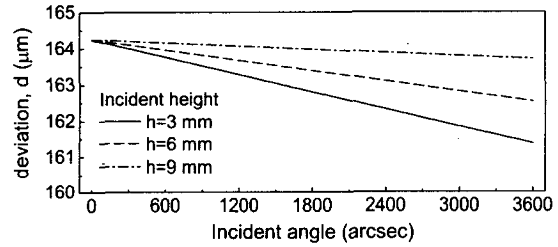

Fig. 4 Relation between deviation distance and an initial incident angle according to an incident height

2.3 Moving Optic 이 반사경일 때 측정원리

Fig. 5 는 월라스톤 프리즘이 테이블 외부에 고정되고 반사경이 테이블 위에 놓여서 이동하는 경우, 즉 반사경이 moving optic 일때의 진직도 측정원리를 나타낸다. 처음에 ①의 위치에 있던 반사경이 테이블의 진직도 오차에 의하여 수직방향으로 X 만큼 이동하여 ②의 위치에 오게 되면, 광경로는 중심선의 윗부분에서는 a 만큼 길어지며 아랫부분에서는 b 만큼 짧아지게 되어, 총 광경로차는 식 (6)으로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} OPD &= 2(a+b) \\ &= 2(X\sin\frac{\theta_{sep}}{2} + X\sin\frac{\theta_{sep}}{2}) = 4X\sin\frac{\theta_{sep}}{2} \end{aligned} \qquad (6)$$

따라서 두 광 사이의 광경로차를 알면, 진직도 오차는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$X = \frac{OPD}{4\sin\frac{\theta_{sep}}{2}} \qquad (7)$$

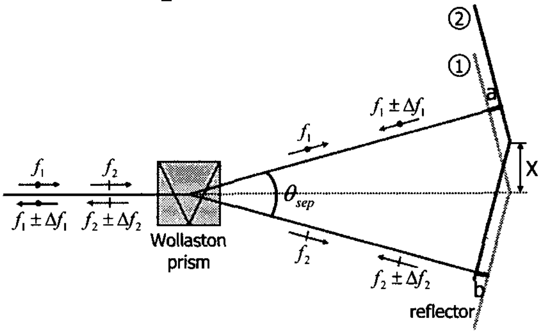

Fig. 5 Principle of the straightness error measurement when a reflector is a moving optic

2.4 Moving Optic 이 월라스톤 프리즘일 때 측정원리

Fig. 6 은 moving optic 으로써 월라스톤 프리즘을 사용되는 경우이다. 이때는 반사경이 테이블 밖에 고정되어 있고 프리즘이 테이블 위에 놓여 이들의 상대적인 변위로써 진직도 오차를 측정하게 된다. 이때 프리즘을 통과하는 두 광이 프리즘 외부에서 발생하는 광경로차는 없으므로, 진직도 오차 계산시, 프리즘 내부에서의 광경로차만 계산하면 된다. 그러나 Fig. 6 의 구조에서는 두 광의 광경로차를 구하기가 어려우므로 이를 Fig. 7 과 같이 바꿔 생각하고, 대신에 프리즘 내부에서의 광경로차만 계산하면 된다. 이때 발생하는 두 광 ①, ②의 광경로차는 식 (8)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} OPD &= (a-c)-(b-d) \\ &= (a-b)+(d-c) = 4X\sin\frac{\theta_{sep}}{2} \end{aligned} \qquad (8)$$

따라서 2.3 절에서 반사경이 moving optic 일 때와 마찬가지로 진직도 오차는 동일한 식 (9)로 계산된다.

$$X = \frac{OPD}{4\sin\frac{\theta_{sep}}{2}} \qquad (9)$$

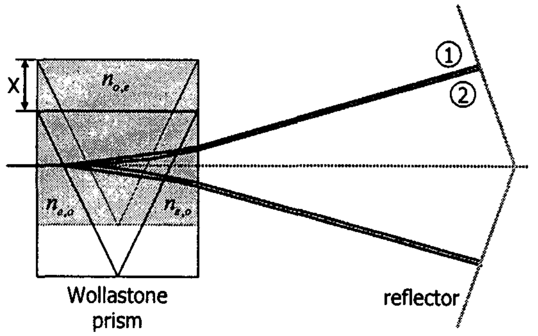

Fig. 6 Principle of the straightness error measurement when a Wollaston prism is a moving optic and an incident angle is a right angle

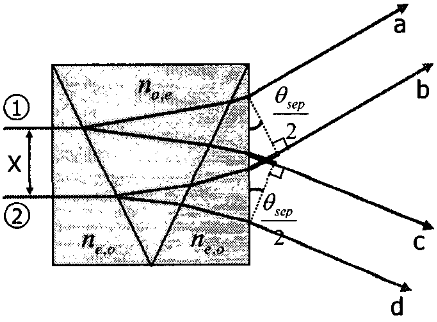

Fig. 7 Alternative figure of Fig. 6

한편, 윌라스톤 프리즘이 moving optic 이면서 입사각이 직각이 아닐 때, 진직도 측정원리는 Fig. 8 과 같다. 이때, 두 광의 광경로차는 식 (10)와 같이 되며, 윌라스톤 프리즘이 처음에 입사광에 대해 직각으로 설치되지 않아도 진직도 오차 측정 원리는 같음을 확인할 수 있다.

$$OPD = 2[\frac{X}{\cos\theta_i}\sin(\frac{\theta_{sep}}{2}+\theta_i) - X\tan\theta_i + X\tan\theta_i + \frac{X}{\cos\theta_i}\sin(\frac{\theta_{sep}}{2}-\theta_i)] = \frac{2X}{\cos\theta_i}2\sin\frac{\theta_{sep}}{2}\cos\theta_i = 4X\sin\frac{\theta_{sep}}{2} \quad (10)$$

$$X = \frac{OPD}{4\sin\frac{\theta_{sep}}{2}} \quad (11)$$

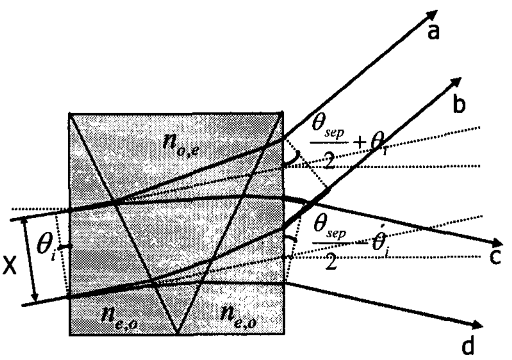

Fig. 8 Principle of the straightness error measurement when a Wollaston prism is a moving optic and an incident angle isn't a right angle

3. 진직도 측정오차 보상 방법

3.1 Moving Optic 이 반사경일 때

2 장에서 설명하였던 진직도 측정원리는 모두 윌라스톤 프리즘과 반사경의 상대적인 회전운동이 없으면서 진직도 오차가 존재하는 경우로 제한된다. 그러나 프리즘과 반사경이 상대적인 회전운동을 갖게 되면 이에 의한 영향이 진직도 오차로 계산되어 원치 않는 진직도 값이 측정되게 된다.

Fig. 9 는 반사경을 moving optic 으로 사용하는 경우에 진직도 측정오차 보상방법을 설명하고 있다. 반사경이 원래인 위치인 ①에서 진직도 오차 X 에 의해 ②의 위치로 움직이게 된다. 이때 만약 테이블에 θ 만큼의 각운동이 발생한다면, 테이블에 고정된 반사경도 θ 만큼의 회전이 발생하여 ③의 위치로 바뀌게 된다. 따라서 중심선을 기준으로 윗부분에서는 a 만큼의 광경로가 늘어나고 아랫부분에서 b 만큼이 줄어들게 되어 결국 원하는 않는 광경로차가 2(a+b) 만큼 생기게 된다. 여기서 a 와 b 의 값은 식 (12)로 나타낼 수 있고, l 은 프리즘과 반사경 사이의 거리를 나타내는 변수로써, 테이블이 이동함에 따라 변하는 값이다.

$$a = (l\cdot\tan\frac{\theta_{sep}}{2} - X)\cos\frac{\theta_{sep}}{2}\cdot\tan\theta$$
$$b = (l\cdot\tan\frac{\theta_{sep}}{2} + X)\cos\frac{\theta_{sep}}{2}\cdot\tan\theta \quad (12)$$

따라서 반사경의 회전에 의해 추가로 발생한 광경로차는 식 (13)과 같고, 이를 진직도 값으로

환산하면 식 (14)와 같다. 즉, 반사경의 회전 θ에 의해 원치 않는 진직도 오차가 $l \cdot \tan\theta$만큼 발생하므로 이를 보상해 주어야 하는 것이다.

$$OPD_{unwanted} = 2(a+b) = 4l \cdot \sin\frac{\theta_{sep}}{2}\tan\theta \qquad (13)$$

$$X_{unwanted} = \frac{OPD_{unwanted}}{4\sin\frac{\theta_{sep}}{2}} = l\tan\theta \qquad (14)$$

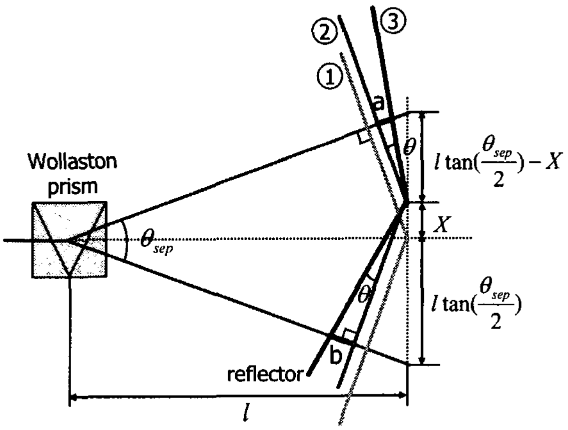

Fig. 9 Unwanted straightness error when a reflector is rotated by angular error of table

3.2 Moving Optic 이 월라스톤 프리즘일 때

월라스톤 프리즘이 moving optic 으로 사용되고 반사경에 대해서 회전운동을 갖게 되면, 이 또한 진직도 오차로 나타나게 된다. Fig. 10 에서 두 광의 광경로차는 ①과 ②의 차이로써 식 (15)와 같이 나타낼 수 있으며, 각 변수에 대한 자세한 수식은 이미 식 (1), (2)에서 나타내었다.

$$\begin{aligned} OPD &= 2(OPD_o - OPD_e) \\ &= 2(n_o l_{1o} + n_e l_{2o} + n_o l_{3o} \\ &\quad - n_e l_{1e} - n_o l_{2e} - n_e l_{3e} - l_{4e}) \end{aligned} \qquad (15)$$

이때 프리즘의 회전에 의해 발생한 원치 않는 광경로차는 프리즘의 입사각 θ_i에서 구한 광경로차인 OPD_{θ_i}와 프리즘의 회전각 θ(입사각 $\theta_i+\theta$)에서 구한 광경로차인 $OPD_{\theta_i+\theta}$의 차이로써 나타나게 된다. 따라서 프리즘의 회전에 의해 추가로 발생한 진직도 오차는 식 (17)과 같이 계산할 수 있다.

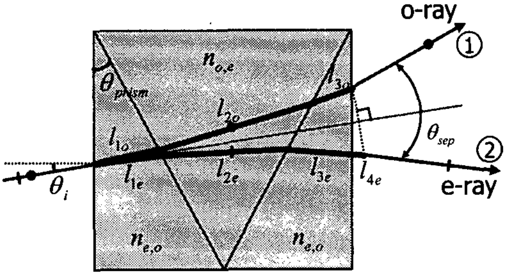

Fig. 10 Unwanted straightness error when a Wollaston prism is rotated by angular error of table

$$OPD_{unwanted} = OPD_{\theta_i+\theta} - OPD_{\theta_i} \qquad (16)$$

$$X_{unwanted} = \frac{OPD_{unwanted}}{4\sin\frac{\theta_{sep}}{2}} \qquad (17)$$

4. 실험 결과

4.1 Moving Optic 이 반사경일 때

테이블의 각운동 오차에 기인한 HP 레이저 간섭계의 진직도 측정오차에 대한 실험은 회전테이블 위에 반사경과 월라스톤 프리즘을 각각 놓고 회전테이블을 회전시켰을 때 발생하는 진직도 오차를 측정함으로써 수행하였다. 반사경이 moving optic 일 때는 반사경과 프리즘 사이의 거리가 진직도 측정오차에 영향을 미치는 변수이므로 이 값을 다르게 하여 실험을 실시하였다. Fig. 11 은 반사경을 moving optic 으로 하여 테이블의 회전각을 0 arcsec 에서 서서히 증가시키면서 진직도 오차를 측정한 것으로, 반사경과 프리즘 사이의 상대적인 직교 방향 변위가 없음에도, 반사경의 회전으로 인한 원치 않는 진직도 값이 측정된 것을 알 수 있다. 반사경과 프리즘 사이의 거리 l 이 644 mm 일 때에는 반사경의 회전각이 420 arcsec 이상 되었을 때 반사경에서 반사되는 광이 프리즘으로 들어가지 못하여 간섭이 일어나지 못하였으며, 이때 발생한 진직도 오차는 1520 μm 에 달하였다. 한편, 거리 l 이 1144 mm 때에는 측정 가능한 회전각이 더 작아져 240 arcsec 정도 되자 간섭이 일어나지 않았으며 이때의 진직도 오차는 1450 μm 였다.

일반적으로 반사경을 테이블에 고정할 때 마그네틱 스탠드를 이용하여 고정하게 되는데, 이 경우 반사경은 반사경의 중심에서 회전하는 것이 아니라 스탠드의 중심에서 회전하게 되어 이에 의한 추가적인 진직도 오차도 이론적인 수식에서 고려해 주어야 한다. 가장 간단한 방법은 프리즘에서 반사경까지의 거리를 프리즘에서 반사경이 고정된 스탠드의 중심까지 확장하는 것이다. Fig. 12 에서는 측정결과와 더불어 3.1 절에서 계산한 이론적인 값인 식 (14)를 비교하여 나타냈는데, 반사경의 고정위치를 보정한 이론적 수식은 실험결과와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

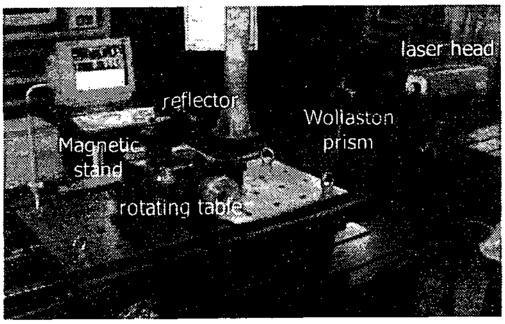

Fig. 11 Experimental setup when a reflector is a moving optic

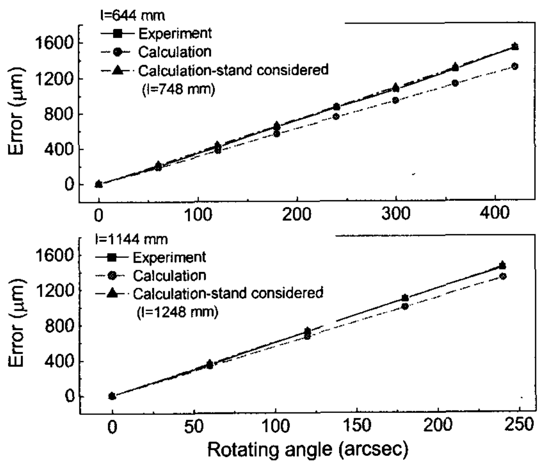

Fig. 12 Comparison of theoretical and measured data

4.2 Moving Optic 이 월라스톤 프리즘일 때

Moving optic 을 월라스톤 프리즘으로 바꾸어 같은 실험을 수행하였다. 이 경우에는 반사경과 프리즘 사이의 거리가 측정오차에 영향을 주지 않으나 실험적인 검증을 위하여 거리를 달리하고 프리즘을 회전시키면서 진직도 오차를 측정하였다. 프리즘의 회전각을 3600 arcsec 로 했을 때 간섭이 일어나지 않았으며, 이때의 진직도 오차는 102 μm 로 나타났다. 또한 측정값과 이론적인 계산값인 식 (17)은 잘 일치하고 있으며, 프리즘과 반사경 사이의 거리에 의해서는 진직도 오차가 영향을 받지 않음을 확인할 수 있다.

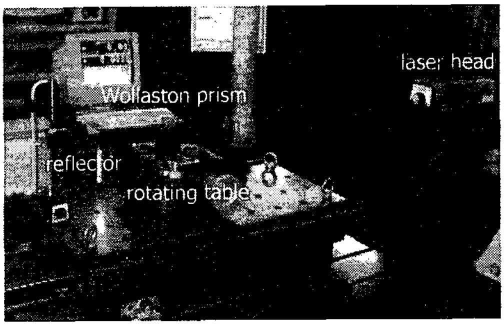

Fig. 13 Experimental setup when a Wollaston prism is a moving optic

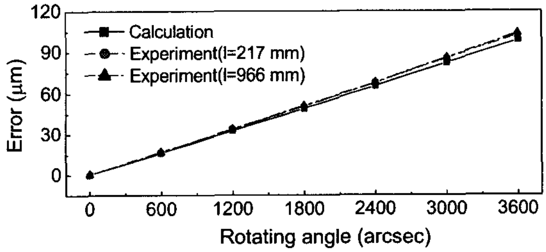

Fig. 14 Comparison of theoretical and measured data

4.3 분석 및 고찰

Moving optic 으로써 반사경이나 월라스톤 프리즘의 어느 것을 사용하더라도 진직도 오차를 측정하는 데에는 아무런 문제가 없다. 그러나 이것은 진직도 오차를 측정하는 중에 moving optic 의 회전운동이 일어나지 않음을 전제로 한 것으로, 만약 반사경이나 프리즘의 회전이 발생한다면 이에 의한 원치 않는 진직도 오차가 측정될 것이다.

3 장과 4 장으로부터 moving optic 의 회전에 의해 발생하는, 원하지 않는 진직도 오차를 이론적으로 보상할 수 있음을 알 수 있었으며, 이를 실험을 통해서도 검증해 보았다. 특히, 반사경을 moving optic 으로 사용하는 경우에는 반사경의 회전에 기인한 오차가 매우 크고, 반사경과 프리즘 사이의 거리가 진직도 보상시 변수가 되므로 moving optic 으로써는 프리즘을 사용하는 것이 타당할 것이다. 그러나 프리즘을 moving optic 으로 사용하는 경우라도 36 arcsec 마다 1 μm 정도의 측정오차가 발생하므로 측정테이블의 각운동 오차가 크다면 반드시 보상을 해주어야 한다. 보상식은 식 (17)의 이론적 수식을 일차 근사화한 식 (18)에 의해 각운동 오차의 방향을 고려하여 이루어져야 한다.

$$X_c = X_m - 2.74 \times 10^{-2} \times \theta \tag{18}$$

where,

X_c : Compensated straightness error [μm]

X_m : Measured straightness error [μm]

θ : Measured angular error [arcsec]

한편, 두 축에 대한 직각도(squareness) 오차를 측정할 때에는 측정 원리상, 어느 한 축에서는 반드시 반사경을 moving optic 으로 사용해야만 한다. 이처럼 불가피하게 반사경을 moving optic 으로 사용하는 경우에는 이론적인 식 (14)를 이용하여 식 (19)와 같이 보정해주어야 한다. 식 (19)에서 프리즘과 반사경 사이의 거리를 의미하는 l 은 테이블이 움직임에 따라 이들 사이의 거리가 변화하는 이송거리의 함수이다.

$$X_c = X_m - l \times \tan(\theta / 3600) \tag{19}$$

where,

X_c : Compensated straightness error [μm]

X_m : Measured straightness error [μm]

l : Distance between a Wollaston prism and a reflector [μm]

θ : Measured angular error [arcsec]

5. 결론

본 논문은 HP 레이저 간섭계를 이용한 진직도 측정장치에서 moving optic 의 회전에 의해 발생하는 원치 않는 진직도 측정오차를 보상하는 방법을 다루고 있으며 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) Moving optic 으로 사용되는 월라스톤 프리즘이나 반사경의 회전에 의해 발생하는 원치 않는 진직도 오차를 이론적으로 계산하였으며, 실험적으로도 이를 확인하였다.
2) 이때 발생하는 진직도 오차는 월라스톤 프리즘보다는 반사경을 moving optic 으로 사용하는 경우가 훨씬 크며, 이 경우에는 반사경의 회전각뿐 아니라 반사경과 월라스톤 프리즘 사이의 거리에도 영향을 받는다.
3) Moving optic 의 회전에 의한 진직도 측정오차를 줄이기 위해서는 월라스톤 프리즘을 moving optic 으로 사용하여야 하며, 이 경우에도 프리즘이 설치된 테이블의 36 arcsec 회전당 1 μm 정도의 진직도 측정오차가 발생하므로 식 (18)에 의해 보상을 해 주어야 한다.
4) 직각도 측정과 같이 불가피하게 반사경을 moving optic 으로 사용해야 하는 경우에도 식 (19)에 의해 보정을 해줌으로써, 반사경의 회전에 의한 원치 않는 진직도 오차를 제거할 수 있다.

참고문헌

1. Park, J.H., "Precision measurement system engineering," Yajeong Munhwasa, 1993 (in Korean).
2. "HP 5529A Dynamic Calibrator Measurements Reference Guide," Hewlett Packard.
3. Richard, R., "Interferometer system for measuring straightness and roll," United States Patent US 3,790,284, 1974.
4. "Laser and Optics User's Manual 7Y," Agilent Technologies.
5. Hecht, Eugene., "Optics," Addison-Wesley, 2002.