

## 레이저 간섭계의 진직도 측정오차 보상

김경호\*(KAIST 기계공학과), 김태호(KAIST 기계공학과),  
송창규(KIMM 자동화연구부), 이후상(KIMM 자동화연구부), 김승우(KAIST 기계공학과)

### Straightness Measurement Error Compensation of the Laser Interferometer

K. H. Kim(KAIST), T. H. Keem(KAIST),  
C. K. Song(KIMM), H. S. Lee(KIMM), S. W. Kim(KAIST)

#### ABSTRACT

HP Laser Interferometer Measurement System [HP5529A] is one of the most powerful equipment for measurement of the motion accuracy. The straightness measurement system of the HP5529A is composed of wollastone prism and reflector. In this system, straightness error is measured by relative lateral motion between prism and reflector. But rotating motion of prism or reflector as moving optic causes not real straightness error but additive straightness error. Especially unwanted straightness error as this becomes very large when reflector is used as moving optic and an interval between reflector and prism is distant. In this paper, the compensation method is proposed for removing additive error and experiment is carried out for theoretical verification.

**Key Words** : Straightness error (진직도 오차), Laser interferometer (레이저 간섭계), Motion error measurement (운동오차 측정), Error compensation (오차보상), Precision machine system (정밀기계시스템)

#### 1. 서론

초정밀 공작기계의 고정도화에 따라 정밀이송기구의 직선운동정밀도와 이를 측정할 수 있는 측정기술이 매우 중요한 요소로 자리잡아가고 있다. 직선운동정밀도는 통상 이송축의 위치결정오차를 제외한 5 성분, 즉 수직, 수평 진직도 오차, 피치, 요, 롤 오차 성분을 말하는 것으로 이들 오차의 정확한 측정기술을 기반으로 한 고정밀도 이송기구의 설계가 이루어져야 할 것이다.

직선운동오차 중 진직도 오차는 안내면의 진행방향에 대한 측방향의 범위를 측정하는 것으로, 현재 진직도 측정용으로는 레이저 간섭계를 이용한 측정 시스템, 오토콜리메이터, 스트레이트 엷지 등을 이용한 방법이 있다. 이 중에서 HP 사의 레이저 간섭계 [HP 5529A]는 사용이 편리하고 넓은 측정범위와 고 분해능을 얻을 수 있어 가장 널리 사용되고 있다. 또한 진직도 오차뿐 아니라 길이 오차와 각운동 오차, 평행도 오차등 여러오차를 측정할 수

있기도 하다.

HP 사의 진직도 측정시스템은 광을 편광방향에 따라 둘로 나누어주는 윌라스톤 프리즘과 이를 반사시켜 프리즘으로 되돌아오게 하는 반사경을 이용하여 측정하게 되는데 30 m 의 범위에서도 0.1  $\mu\text{m}$  의 분해능으로 측정이 가능하다고 알려져 있다.

안내면은 근본적으로 진직도 오차와 각운동 오차를 동시에 수반하며 이들 성분은 서로 커플링되어 있다. 즉, 측방향 오차뿐 아니라 moving optic 으로 사용되는 프리즘이나 반사경의 회전 에 기인한 오차도 포함되어 측정되는 것이다.

따라서 이 논문에서는 HP 사의 운동정밀도 측정 시스템 [HP 5529A]을 이용하여 진직도를 측정할 때 발생하는 각도와의 커플링 문제를 제시하였으며 이를 보상할 수 있는 방법에 대해 알아보았다.

#### 2. 진직도 오차 측정 원리

##### 2.1 진직도 측정 장치

Fig 1 은 진직도 측정의 원리를 나타내고 있다 레이저 헤드에서 약 3 MHz 의 차이가 나는, 편광방향 이 서로 직교하는 두 주파수  $f_1, f_2$  의 레이저 빔 이 빔 스플리터를 통해 기준광과 윌라스톤 프리즘에 입사하는 광으로 나누어진다. 윌라스톤 프리즘은 편광방향에 따라 굴절률이 달라서 이를 통과한 광 은 어떤 각(HP 5529A 의 경우  $1.6^\circ$ )을 이루면서 두 광속으로 나누어져 각각 반사경에 수직 입사하게 된다 이때 프리즘과 반사경 사이에 상대적인 측방향 변위가 생기면 도플러 효과에 의해 주파수 변화 가 일어나고 이들이 다시 윌라스톤 프리즘을 통과 하면서 합쳐지고 기준광과의 간섭으로 광경로차가 계산된다 이로부터 프리즘과 반사경의 상대적인 측방향 변위, 즉 진직도 오차가 측정되는 것이다

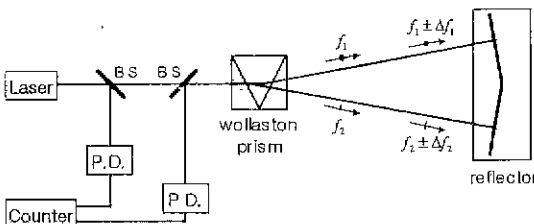


Fig. 1 Schematic drawing of showing the principle of straightness error measurement

## 2.2 윌라스톤 프리즘

HP 레이저 간섭계에서 인터페로미터(간섭계)로 사용되는 것은 윌라스톤 프리즘이다. 윌라스톤 프리즘은 편광방향이 다른 두 광에 대해 서로 다른 굴절 특성을 보인다 Fig. 2 에서 편광방향이 서로 직각인 두 광, 즉 extra-ordinary ray 와 ordinary ray 가 프리즘을 통과할 때 프리즘은 편광방향에 따라 굴절률이 각각  $n_1, n_2$  인 값을 갖는다. 따라서 프리즘을 통과하는 두 광은 어떤 각을 이루면서 나가게 된다.

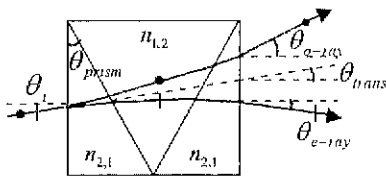


Fig 2 윌라스톤 프리즘

이때 프리즘에 입사되는 각  $\theta_i$  에 대한 투과되는 두 광의 중심선의 각  $\theta_{trans}$  의 관계를 스넬의 법칙을 이용하여 그래프로 나타내면 Fig. 3 과 같다. Fig. 3 은 입사각과 투과광의 중심선의 각이 같다는 것을 말해주며, 이것은 프리즘의 회전에 관계없이 입사되는 광은 입사되는 광의 연장선을 기준으로 어떤 각을 이루면서 투과된다는 것을 알 수 있다

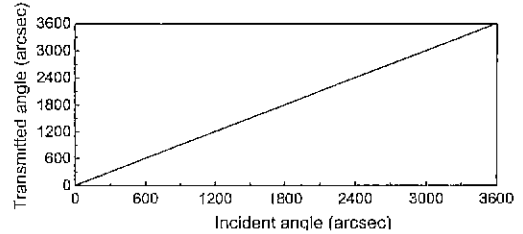


Fig 3 Relation between incident angle and middle angle of two transmitted beams

## 2.3 Moving Optic 이 반사경일때

Fig. 4 는 윌라스톤 프리즘이 고정되고 반사경이 테이블 위에 놓여서 움직이는 경우에 진직도 측정 원리를 나타낸다 처음에 보라색 위치에 있던 반사경이 측방향 변위인 X 만큼 이동하게 되면 반사경은 초록색 위치에 오게 된다. 이때 발생하는 광경로는 중심선의 윗부분에서는 a 만큼 길어지며 아랫부분에서는 b 만큼 짧아지게 된다 결국 광경로차는 다음의 식으로써 나타낼 수 있다.

$$OPD = 2(a+b)$$

$$= 2(X \sin \frac{\theta_{sep}}{2} + X \sin \frac{\theta_{sep}}{2}) = 4X \sin \frac{\theta_{sep}}{2}$$

따라서 반사경의 측방향 변위를 나타내는 진직도 오차는 광경로차를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = \frac{OPD}{4 \sin \frac{\theta_{sep}}{2}}$$

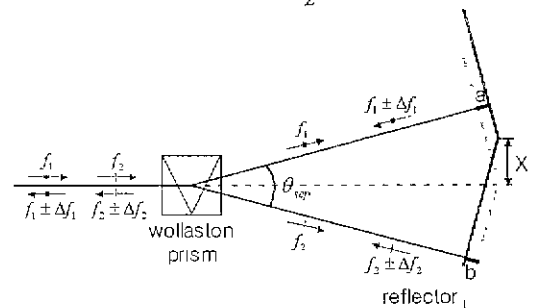


Fig. 4 Schematic drawing showing the principle of straightness measurement when reflector moves.

## 2.4 Moving Optic 이 윌라스톤 프리즘일때

Fig 5 는 moving optic 으으로써 윌라스톤 프리즘을 사용하는 경우이다. 이때는 반사경이 고정되어 있고 프리즘이 테이블 위에 놓여 측방향으로 움직이므로써 진직도를 측정할 수 있다. 단, Fig 5 와 같이 생각하면 두 빔의 광경로차를 구하기가 어려우므로 이를 Fig. 6 과 같이 바꿔 생각할 수 있다. 이 그림

에서는 프리즘이 고정된 광에 대해 움직이는 대신에 입사하는 광이 고정된 프리즘에 대해 움직인다고 생각한 것이다. 이때 발생하는 청색광과 적색광의 광경로차는 다음식과 같이 쓸 수 있다.

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

따라서 2.3 절에서 반사경이 움직일때와 마찬가지로 진직도는 다음식으로써 나타내어진다.

$$X = \frac{OPD}{4 \sin \frac{\theta_{sep}}{2}}$$

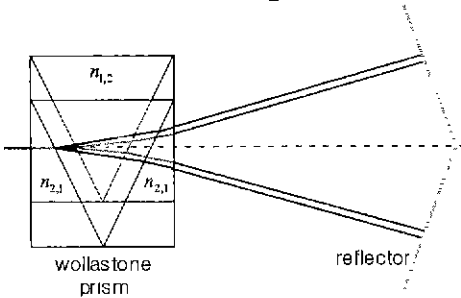


Fig. 5 Schematic drawing showing the principle of straightness measurement when wollaston prism moves.

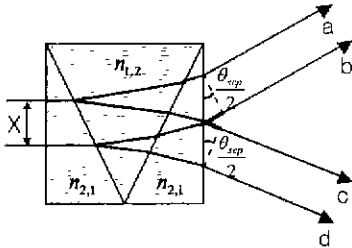


Fig. 6 Optical path difference when the incident angle is right angle

한편, Fig. 7 은 윌라스톤 프리즘이 moving optic 이면서 입사각이 90°가 아닐 때 진직도 측정원리를 나타낸 것이다. 이때, 두 광의 광경로차는 다음과 같이 되며 이 식으로부터 진직도 오차는 전과 마찬가지로 식으로써 나타낸다는 것을 확인할 수 있다

$$\begin{aligned} OPD &= 2 \left[ \frac{X}{\cos \theta_i} \sin \left( \frac{\theta_{sep}}{2} + \theta_i \right) - X \tan \theta_i \right. \\ &\quad \left. + X \tan \theta_i + \frac{X}{\cos \theta_i} \sin \left( \frac{\theta_{sep}}{2} - \theta_i \right) \right] \\ &= \frac{2X}{\cos \theta_i} 2 \sin \frac{\theta_{sep}}{2} \cos \theta_i = 4X \sin \frac{\theta_{sep}}{2} \end{aligned}$$

$$X = \frac{OPD}{4 \sin \frac{\theta_{sep}}{2}}$$

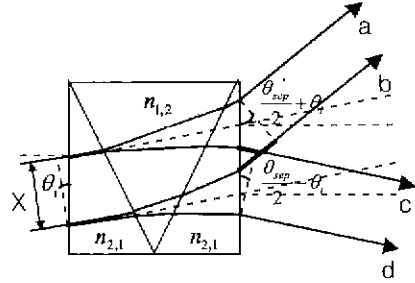


Fig. 7 Optical path difference when the incident angle isn't right angle

### 3. 진직도 오차 보상 방법

#### 3.1 Moving Optic 이 반사경일때

2 장에서 설명하였던 진직도 측정원리는 모두 윌라스톤 프리즘과 반사경의 회전운동이 없는 경우로 제한된다. 그러면 만약 프리즘과 반사경이 서로에 대해 회전운동을 갖는다는 어떻게 될까? 우선 반사경을 moving optic 으로써 사용하는 경우부터 생각해 보자.

Fig. 8 에서 반사경이 원래인 위치인 보라색에서 측방향 운동으로 인해 초록색 위치로 움직이게 된다. 이때 만약 테이블의 각운동으로 인하여  $\theta$  만큼의 회전이 일어나게 되면 반사경은 청색으로 그 위치가 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 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있고,  $l$  은 프리즘과 반사경 사이의 거리를 나타내는 변수이다.

$$a = (l \cdot \tan \frac{\theta_{sep}}{2} - X_o) \cos \frac{\theta_{sep}}{2} \cdot \tan \theta$$

$$b = (l \cdot \tan \frac{\theta_{sep}}{2} + X_o) \cos \frac{\theta_{sep}}{2} \cdot \tan \theta$$

따라서 추가로 생긴, 원치 않는 광경로차를 구할 수 있고 이를 진직도 값으로 환산하면 다음식이 된다

$$\begin{aligned} OPD_{unwanted} &= 2(a+b) \\ &= 4l \sin \frac{\theta_{sep}}{2} \tan \theta \end{aligned}$$

$$X = \frac{OPD_{unwanted}}{4 \sin \frac{\theta_{sep}}{2}} = l \tan \theta$$

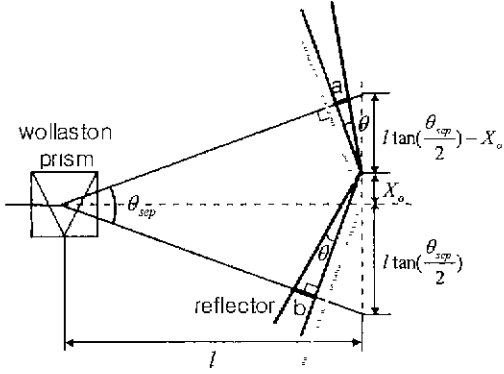


Fig. 8 Additive OPD when reflector has the rotating angle relative to wollaston prism

### 3.2 Moving Optic 이 윌라스톤 프리즘일때

이번에는 moving optic 으로서 윌라스톤 프리즘 이 사용되고 윌라스톤 프리즘이 반사경에 대해서 축방향 운동 이외에 테이블에 의한 회전운동을 갖는 경우이다. 이 때 발생하는 두 광의 광경로차는 파란색과 노란색 광의 차이로써 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} OPD &= 2(OPD_o - OPD_e) \\ &= 2(n_2 d_{1o} + n_1 d_{2o} + n_2 d_{3o} \\ &\quad - n_1 d_{1e} - n_2 d_{2e} - n_1 d_{3e} - d_4) \end{aligned}$$

여기서 각 변수의 값들을 정리하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} d_{1o,e} &= \frac{h \tan \theta_{prism}}{(\cot \theta_{1o,e} + \tan \theta_{prism}) \sin \theta_{1o,e}} \\ d_{2o,e} &= \frac{w(\cot \theta_{1o,e} + \tan \theta_{prism}) - 2h \cot \theta_{1o,e} \tan \theta_{prism}}{(\cot \theta_{1o,e} + \tan \theta_{prism})[\cos(\theta_{prism} - \theta_{2o,e}) - \tan \theta_{prism} \sin(\theta_{prism} - \theta_{2o,e})]} \\ d_{3o,e} &= \frac{\tan \theta_{prism} [h \cot \theta_{1o,e} - d_2 \sin(\theta_{prism} - \theta_{2o,e})(\cot \theta_{1o,e} + \tan \theta_{prism})]}{\cos(\theta_{3o,e} - \theta_{prism})[\cot \theta_{1o,e} + \tan \theta_{prism}]} \\ d_{4o,e} &= \frac{[d_{2o} \sin(\theta_{prism} - \theta_{2o}) - d_{2e} \sin(\theta_{prism} - \theta_{2e})] \cos \theta_e}{\cos \frac{\theta_{sep}}{2}} \\ &\quad - \frac{[d_{3o} \sin(\theta_{3o} - \theta_{prism}) - d_{3e} \sin(\theta_{3e} - \theta_{prism})] \cos \theta_e}{\cos \frac{\theta_{sep}}{2}} \\ \theta_{1o} &= \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_e}{n_2} \right) & \theta_{1e} &= \sin^{-1} \left( \frac{\sin \theta_e}{n_1} \right) \\ \theta_{2o} &= \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \sin(\theta_{prism} - \theta_e) \right) & \theta_{2e} &= \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin(\theta_{prism} - \theta_e) \right) \\ \theta_{3o} &= \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin(2\theta_{prism} - \theta_{3o}) \right) & \theta_{3e} &= \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \sin(2\theta_{prism} - \theta_e) \right) \\ \theta_{2e} &= \sin^{-1} (n_2 \sin(\theta_{1e} - \theta_{prism})) & \theta_{4e} &= \sin^{-1} (n_1 \sin(\theta_{3e} - \theta_{prism})) \end{aligned}$$

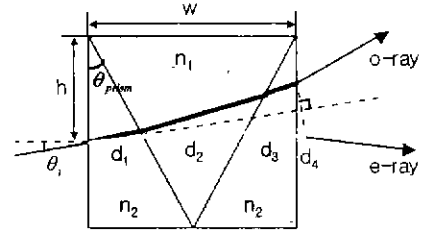


Fig. 9 Additive OPD when wollaston prism has the rotating angle relative to reflector

이때 원치 않는 광경로차는 입사각  $\theta_1$ 에서 구한 광경로차인  $OPD_{\theta_1}$ 에서 입사각이  $\theta^{\circ}$ 에서 구한 광경로차인  $OPD_0$ 을 뺀 값으로 나타나게 된다. 물론 원치 않는 진직도 오차는 이 광경로차를 이용하여 쉽게 구할 수 있다.

$$OPD_{\text{unwanted}} = OPD_{\theta_1} - OPD_0$$

$$X = \frac{OPD_{\text{unwanted}}}{4 \sin \frac{\theta_{sep}}{2}}$$

## 4. 실험결과

### 4.1 Moving Optic 이 반사경일때

3장에서 설명한 진직도 측정오차 보상에 대한 실험은 회전테이블 위에 반사경과 윌라스톤 프리즘을 각각 놓고 테이블을 회전시켰을 때 발생하는 오차의 양을 측정하였다. 반사경이 moving optic 일때는 반사경과 프리즘 사이의 거리가 오차에 영향을 미치는 변수이므로 이 거리를 다르게 하여 실험을 실시하였다. Fig 10은 반사경을 moving optic 으로서 테이블의 회전각을 0 arcsec에서 서서히 증가시키면서 진직도 오차를 측정하는 것이다. Fig 11은 실험결과를 보여주는 그래프로써, 반사경과 프리즘 사이의 상대적인 축방향 변위가 없으므로 진직도 오차는 0이 되어야 하나 반사경의 회전에 의하여 원하지 않는 진직도 값이 나오는 것을 알 수 있다. 반사경과 프리즘 사이의 거리  $l$ 이 644 mm 일때에는 회전각을 420 arcsec로 하자 반사경에서 반사되는 광이 프리즘으로 들어가지 못하여 간섭이 일어나지 못하였다. 이 때 발생하는 진직도 오차는 무려 1550  $\mu\text{m}$ 에 달하였다. 한편, 거리  $l$ 이 1144 mm 일때에는 측정가능한 회전각도가 더 작아져 240 arcsec 정도 되자 간섭이 일어나지 않았으며 이때의 진직도 오차는 1450  $\mu\text{m}$  정도였다. Fig. 11에서는 이러한 실험결과를 이론적으로도 계산하여 같이 나타냈는데 실험치와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

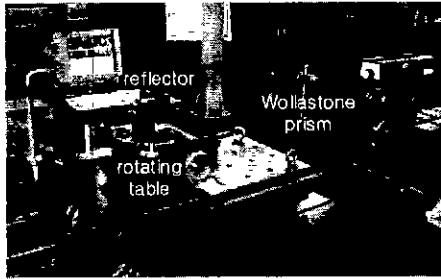


Fig. 10 Experimental setup when the reflector is moving optic

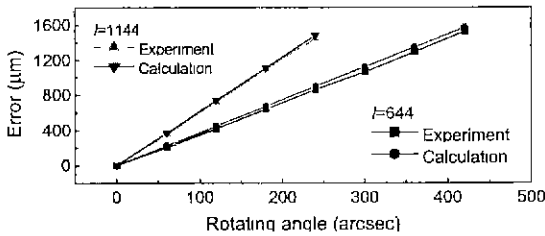


Fig. 11 Comparison of theoretical and experimental result

#### 4.2 Moving Optic 이 월라스톤 프리즘일때

이번에는 moving optic 을 월라스톤 프리즘으로 바꿔 같은 실험을 수행하였다. 이 경우에는 반사경과 프리즘 사이의 거리가 측정오차에 영향을 주지 않으며 단지 프리즘의 회전에 의해서만 진직도 오차가 발생하였다. 프리즘의 회전각을 3600 arcsec 까지 했을 때 비로소 간섭이 일어나지 않았으며, 이때의 진직도 오차는 102 μm 로 나타났다.

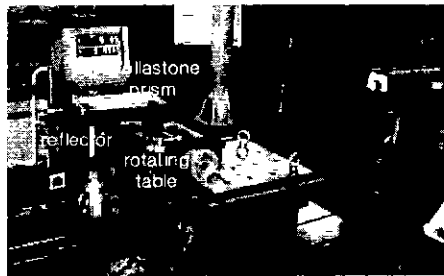


Fig. 12 Experimental setup when the wollstone prism is moving optic

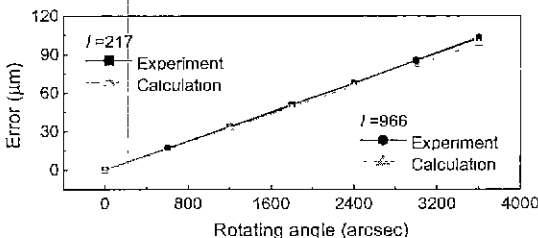


Fig. 13 Comparison of theoretical and experimental result

3 장과 4 장의 결과로부터 moving optic 으로서 반사경이나 프리즘의 어느 것을 사용하더라도 진직도 오차를 측정할 수 있었고 보상할 수 있었다. 그러나 반사경을 moving optic 으로 사용하는 경우에는 반사경의 회전에 기인한 오차가 매우 클 뿐더러, 반사경과 프리즘 사이의 거리가 진직도 보상시 변수가 되므로 moving optic 으로서는 프리즘을 사용하는 것이 타당해 보인다. 그러나 이때에도 다음의 식에 의해 진직도 오차를 보상해 주어야 한다.

$$X_c = X_m - 0.02737 \times \theta$$

where  $X_c$  : Compensated straightness error  
 $X_m$  : Measured straightness error  
 $\theta$  : Measured angle error

#### 5. 결론

본 논문은 HP 레이저 간섭계를 이용한 진직도 측정장치에서 moving optic 의 회전에 의해 발생하는 진직도 측정오차를 보상하는 방법을 다루고 있으며 다음과 같이 결론지을 수 있다.

- 1 Moving optic 으로 사용되는 월라스톤 프리즘이나 반사경이 회전하는 경우에 발생하는 원치 않는 진직도 오차를 이론적으로 계산하였으며 실험적으로도 이를 확인하였다.
- 2 이때 발생하는 오차는 월라스톤 프리즘보다는 반사경을 moving optic 으로서 사용하는 경우가 훨씬 크게 나타났다.
- 3 따라서 HP 레이저 간섭계를 사용할 때에는 월라스톤 프리즘을 moving optic 으로 사용하여야 하며, 이 경우에도 테이블의 36 arcsec 회전당 약 1 μm 정도의 진직도 측정 오차가 발생하므로 반드시 보상을 해 주어야 한다.

#### 참고문헌

- 1 Richard R Baldwin, "Interferometer system for measuring straightness and roll", United States Patent [3790284], 1974
- 2 "5529A Laser Measurement System User's Guide", Hewlett Packard
- 3 박준호, "정밀측정시스템공학", 야정문화사