

레이저 간섭계를 활용한 직각도 측정에 대한 연구

A Study on the Squariness Measurement using Laser Interferometer

*이동목¹, 이훈희², #양승한²

*D. M. Lee¹, H. H. Lee², #S. H. Yang(syang@knu.ac.kr)²

¹경북대학교 기계연구소, ²경북대학교 기계공학부

Key words : Squariness Measurement, Laser Interferometer, Optical Square, Abbe's error, Best Fit

1. 서론

레이저 간섭계와 광학 스퀘어(Optical square)로 구성된 시스템은 고분해능 측정시스템으로서 정밀 직선이송계의 직각도 평가에 많이 사용된다.^{1,2} 펜타프리즘 원리의 광학 스퀘어는 측정 구조상 필연적으로 아베 옵셋을 가지고 있어 아베 오차를 유발한다. 또한 광학 스퀘어가 두 직선축의 교차 지점에 고정되어야 하기 때문에 진직도 측정 간섭계(Straightness interferometer)의 설치 가능 영역이 제약을 받게 되며 이는 전체 영역에 대한 측정을 제한하게 된다.

본 연구는 광학 스퀘어를 이용한 직각도 측정 시 두 축의 진직도 데이터에 포함되는 아베 오차의 제거 방법 및 광학 스퀘어를 사용하지 않은 진직도 데이터를 이용하여 전체 영역에 대한 직각도 추정 방법을 제안한다.

2. 직각도 측정 시 주요 고려사항

레이저 간섭계를 이용한 직각도 측정은 광학 스퀘어가 두 측정 좌표계의 일치시키는 역할을 담당한다. 하지만 광학 스퀘어가 차지하는 공간으로 인해 두 축의 진직도 초기 위치는 항상 일치될 수 없게 되며 이러한 제약은 진직도 측정에서 아베 옵셋을 포함하게 되어 각도 오차가 결합된 아베 오차를 유발시킨다. 또한, 광학 스퀘어 설치 시 두 축의 전체 영역에 대한 진직도 측정을 위한 공간을 확보한 후 고정하여야 하는데 이를 위해 추가적인 고정물(Jig) 설계를 필요로 하는 등 까다로운 작업이 요구된다. 따라서 국소

영역에 대해 측정된 데이터를 전체 영역에 대해 추정하는 방법을 사용하면 편리하다.

3. 아베 오차 제거 및 전체 영역에 대한 직각도 추정 방법

앞 절에서 언급한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 측정 데이터에서 아베 오차를 제거한 후 전체 이송 영역에 대해 직각도를 추정하는 절차를 따르며 Fig. 1 과 같다. 광학 스퀘어를 사용한 두 축의 진직도 데이터는 아베 오차 $\mathbf{e}_j = [e_{xj} \ e_{yj} \ e_{zj}]^T$ 를 포함하고 있으며, 이는 기준좌표계에 대해 j 축이 가지는 아베 옵셋 $\mathbf{a}_j = [a_{xj} \ a_{yj} \ a_{zj}]^T$ 와 식(1)의 각도 오차(\mathbf{E}_j)에 의해 식(2)로 계산된다.

$$\mathbf{E}_j = \begin{bmatrix} 1 & -\varepsilon_{xj} & \varepsilon_{yj} \\ \varepsilon_{xj} & 1 & -\varepsilon_{zj} \\ -\varepsilon_{xj} & \varepsilon_{yj} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{e}_j = (\mathbf{I} - \mathbf{E}_j)\mathbf{a}_j \quad (2)$$

XY 평면의 직각도일 경우, 첫 번째 측정 축(X)의 진직도 데이터(r_{yx})에서 아베 오차가 제거된 데이터(m_{yx})는 ISO230-1 의 정의에 따라 α 의 기울기를 가진 대표직선과 진직도 오차(δ_{yx})로 분리한다.³ 한편 측정 좌표계가 동일하다면 광학 스퀘어를 사용하여 측정된 국소 영역의 진직도 데이터(m_{yx})는 광학 스퀘어 없이 측정된 전체 영역의 진직도 데이터($m_{yx,n}$)와 같은 구간에 대해 정확히 일치해야 하므로 두 데이터 간 최적 맞춤(Best fit)을 통해 측정좌표계를 일치시킬 수 있다. Fig. 2(a)에서와 같이 전체 이송 영역의 진직도 데이터에서 국소 영역(x_i)만큼 데이터($m_{yx,i}$) 발

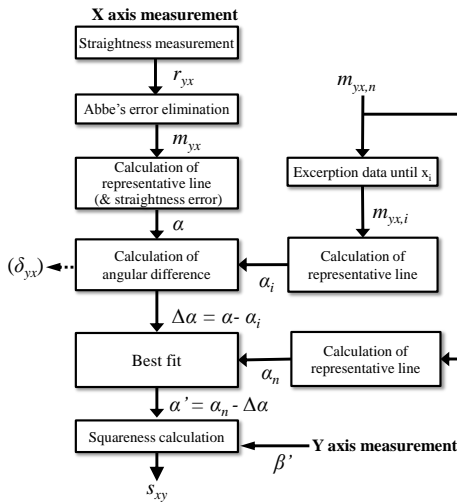


Fig. 1 Squareness analysis procedure for full range

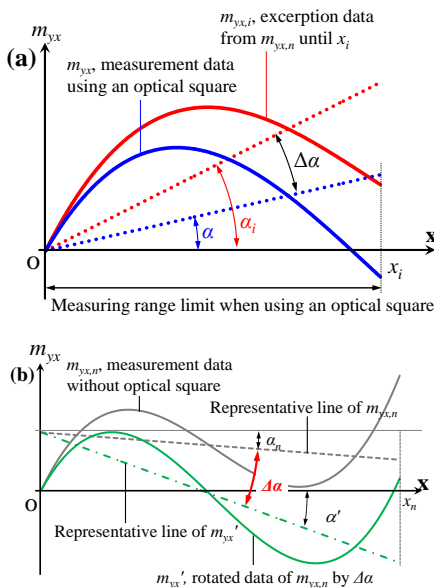


Fig. 2 Best fit of straightness measurement data for full range when using optical square

체 및 대표직선 기울기(α_i) 계산하고, 두 기울기의 차이($\Delta\alpha$)만큼 전체 영역의 진직도 데이터를 회전시킨다. 결국 Fig. 2(b)와 같이 변환된 진직도 데이터(m_{yx}')의 대표직선 기울기(α')는 광학 스퀘어를 사용하지 않은 전체 영역의 진직도($m_{yx,n}$)의 대표직선 기울기(α_n)에서 기울기 차이($\Delta\alpha$)를 뺀 값과

Table 1 Results of squareness analysis

	Range(mm)	Squareness
Measurement	x:0~200, y:0~200	4.08 $\mu\text{m}/\text{m}$
Abbe's error elimination	x:0~200, y:0~200	39.21 $\mu\text{m}/\text{m}$
Estimation for full range	x:0~450, y:0~250	18.41 $\mu\text{m}/\text{m}$

같게 된다. Y 축에 대한 진직도 분석은 X 축과 동일한 방법으로 진행할 수 있고 전 범위에 해당하는 직각도는 식(3)과 같이 계산한다.

$$s_{xy}' = -(\alpha' + \beta') \quad (3)$$

4. 실험 및 결론

3 축 공작 기계를 대상으로 Renishaw 社의 레이저 시스템(XL80)과 직각 스퀘어를 사용하여 실험을 수행하였고 그 결과는 Table 1 과 같다. 측정 데이터 원본을 사용한 직각도 계산 결과와 아베 오차를 제거 후 직각도 계산 결과는 35 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이상의 차이를 보이며, 최적 맞춤을 통해 전체 영역으로 추정된 직각도는 국소 영역 대비 10 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이상의 차이를 보였다. 이러한 결과는 국소 영역에서 측정된 직각도 데이터만으로 오차 보정을 하지 않도록 주의해야 한다는 것을 보여준다.

후기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0020445), (No. 2012-0005856).

참고문헌

- Chen, G., Yuan, J. and Ni, J., "A Displacement Measurement Approach for Machine Geometric Error Assessment," International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 149-161, 2001.
- 김기훈, 양승환, "반구상의 나선형 볼바측정을 통한 공작기계 오차해석의 역기구학적 접근," 한국 정밀공학회지, 18, 143-151, 2001.
- ISO 230-1, "Test code for machine tools-Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions," ISO, 1996.