

정전용량센서를 이용한 레이저 간섭계 오차보정

Error Correction of Laser Interferometer Using Capacitive Sensor

김재천*, 서석현**, 전재욱***, 박기현****, 유관호*****
 Jaecheon Kim*, Sukhyun Seo**, Jaewook Jeon***, Kiheon Park****, Kwanho You*****

Abstract - During last years, large investments have been directed to development and research of nano-technological products like semiconductor, display panel, optic-fiber communication components, life technology, and ultra-precision components. All quantitative measurements at nanometre scale should guarantees accurate results and high quality.

Laser interferometer is one of most famous nanometre scale devices to be able to measure metre-scale distance with nanometre scale resolution, but it is easily affected by various error causes like geometrical, instrumental and environmental factor. On the other side, capacitive sensor is robust to above error factors, but it is able to measure relatively shorter distance, under $100\mu\text{ m}$, than laser interferometer. New error correction method for laser interferometry using capacitive sensor will be introduced in this paper.

Key Words : Laser Interferometer(레이저 간섭계), Capacitive Sensor(정전용량센서), Error Correction(오차 보정)

1. 서 론

나노 측정기술은 초정밀 미세가공, 반도체, 디스플레이, 광통신 부품, 광자기 디스크, 생명공학, 각종 정밀 부품분야 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 최근에는 반도체나 LCD와 같은 첨단 분야가 전체 산업을 주도하고 있다. 이 분야는 제작기술이 측정 기술보다 앞서가고 있어서 향후에도 지속적으로 새로운 측정 기술을 적용한 장비 수요가 창출 되고 있다. 특히 디스플레이 산업분야에서는 패널크기의 대형화에 따라 각 생산 공정에서 새로운 측정기술을 적용한 장비수요가 급증하고 있다.

표1과 같이 나노 스케일 측정 장치로는 대표적으로 레이저 간섭계, 정전용량 센서, 레이저 스케일(리니어 스케일) 및 LVDT 등이 있다.

그 중 넓은 측정범위와 나노미터 급의 정밀도가 필요한 경우에는 레이저 간섭계가 단연 널리 사용되고 있다.

그러나 레이저 간섭계를 이용한 측정 시 여러가지 오차 요인이 발생한다. 환경적인 요인으로는 온도, 습도, 공기 굴절 등이 있다. 장비 고유의 오차로는 레이저 안정도, 편광 오차, 위상 측정 전자회로의 오차 등이 있으며, 기하 광학적 오차 혹은 간섭계 설치상 오차로는 코사인 오차 및 아베(Abbe) 오차 등이 있다.

이에 따른 기존의 오차 보정 방법으로는 주로 Edlen 공식

을 이용한 공기 굴절을 측정을 통한 보정이 주로 이용되었다. 그러나 이 방법은 환경 변화에 따라 재보정을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 짧은 거리($100\mu\text{ m}$ 이내)에서 상대적으로 정밀한 정전용량 센서를 이용하여 외부 환경 변화에 관계없이 레이저 간섭계의 정밀한 측정이 가능하도록 보정하는 방법을 개발하고자 한다.

표 1. 위치 검출 센서의 종류 (참고 문헌 5.에서 인용)

	레이저간섭계	정전용량센서	리니어스케일	LVDT
최대범위	> 1m	> $300\mu\text{ m}$	< 1m	< 10mm
분해능	0.3nm	0.05nm	1nm	1nm
크기	> 500mm	< 50mm	0.01~1m	< 100mm
제작사항	Mirror mount	Metal	Abbe error	Contact force

2. 본 론

2.1 레이저 간섭계의 오차 요인

레이저 간섭계의 오차 요인으로는 기하 광학적 오차(geometric errors), 장비 고유의 오차(instrument errors) 및 환경 오차(environmental errors) 등이 있다.

2.1.1 기하 광학적 오차

기하 광학적 오차는 주로 간섭계 설치상의 오차로서 코사인 오차(cosine error)와 아베 오차(abe error)가 대표적이다. 코사인 오차는 그림 1과 같이 측정 레이저 광속과 모션 축과의 정렬 오차(alignment error)로 인해 기인한다.

저자 소개

- * 김재천: 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程
- ** 서석현: 成均館大學 情報通信工學部 碩士課程
- *** 전재욱: 成均館大學 情報通信工學部 教授·工博
- **** 박기현: 成均館大學 情報通信工學部 教授·工博
- ***** 유관호: 成均館大學 情報通信工學部 副教授·工博

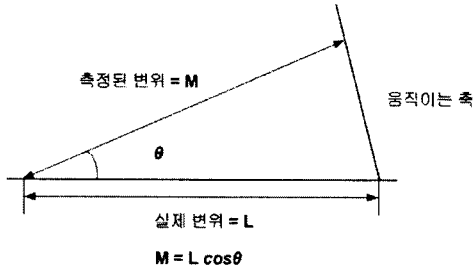


그림 1. 코사인 오차

아베 오차는 그림 2와 같이 측정 레이저 광축과 모션 축과의 오프셋으로부터 기인한다. 즉, 실제 측정이 되어야 할 축이 실제로 측정된 축과의 오프셋이 있을 때 아베 오차가 발생한다.

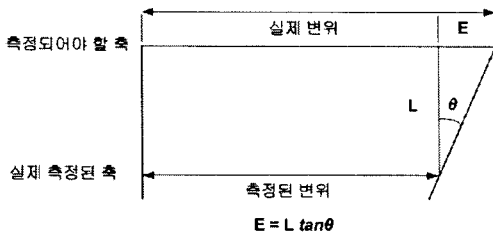


그림 2. 아베 오차

타겟 거울은 스테이지의 축에 평행하게 정렬해야만 하는데 이 타겟 거울의 기울어짐은 광학 경로차의 변화를 유도한다. 이 오차는 간섭계와 타겟 거울과의 공간 거리에 비례하게 나타나는데 이 경사각에 따라 비선형성을 유도한다.

실세계의 모든 물체는 탄성을 지니고 있는데, 타겟 광학 기구와 측정 대상의 물리적 관계가 측정 시간동안 움직인다면 실제 모션으로부터 구별할 수 없게 된다.

2.1.2 장비 교유의 오차

측정 장비 교유의 오차는 사용자가 제어할 수 부분이 아니라 공급하는 시스템 파라미터에 기초한다.

레이저 간섭계의 기초가 되는 것은 레이저 파원의 파장이다. 레이저 헤드 내에 안정화 회로가 내장되어 고정된 값으로 레이저 튜브의 출력 주파수를 제어한다. 하지만 이 전자 회로의 불확성은 측정보드의 전자적 정밀도 및 간섭계의 광학 분해능에 직접 영향을 주게 된다.

편광 혼합 오차는 광학 장치들과 그들의 코팅의 불완전성에 의해 야기되는데, 단일 광학 장치의 정렬 오차(alignment error)로 인해 입사 광선이 입사면에 수직으로 놓이지 못하게 된다면 이 편광 혼합 오차는 더욱 증가할 것이다. 유전체 코팅이 된 광학 부품들은 편광에 매우 민감할뿐더러 최적 정렬이 되어있지 않다면 추가적인 오차를 유발할 것이다.

따라서 간섭계 내의 레이저 주파수 요소의 편광 혼합은 측정된 변위와 실제 변위의 비선형적 관계를 유발한다.

2.1.3 환경 오차

간섭계 오차 중에서 가장 큰 요인 중 하나로 대표적인 환

경오차로는 공기 굴절율의 변화에 따른 오차이다. 공기 굴절율의 변화는 레이저 광원의 파장을 변화시키며 광학 경로의 거리를 변화시킨다. 이는 온도, 압력 및 습도에 의해 영향을 받는다.

사경로(dead path)는 간섭계 구성에 있어서 기준 경로와 측정 경로 상의 공기 중의 경로의 차를 일컫는다. 이는 측정 중 환경의 변화에 의해 오차가 발생한다.

공기 섭동(air turbulence)은 광축 경로를 통한 열증감도의 이동을 나타낸다. 특별한 예방책이 없다면 공기 섭동으로 인한 오차는 커질 수 밖에 없다.

2.2 정전용량 센서를 이용한 레이저 간섭계의 오차보정 실험

2.2.1 실험 장치 구성

본 연구에서 실험을 위해 사용하는 시스템의 구성은 그림 3과 같다. 수 백 mm의 장거리 변위를 구동하기 위해 PI (Physik Instrumente GmbH)사의 최대 구동 범위 306mm, 분해능 0.1um의 리니어 스테퍼 모터와 컨트롤러(M-531.5i)를 사용하여 마이크로 스테이지를 구성하였고, 수 nm에서 μ m의 단거리 변위를 구동하기 위해 PI사의 최대 구동 범위 100 μ m, 분해능 0.2nm인 PZT 컨트롤러 (E-509.C1A)와 분해능 0.1nm인 정전용량 센서(D-100.x0)를 사용하여 나노 스테이지(P-621.1CL)를 구성하였다. 외부 장치로는 PZT에 인가되는 전압을 증폭하기 위한 전력 증폭기(E-505)와 입력 전압과 변위를 모니터링하고 컴퓨터와 인터페이스하기 위한 장치(E-516)로 구성되어 있다.

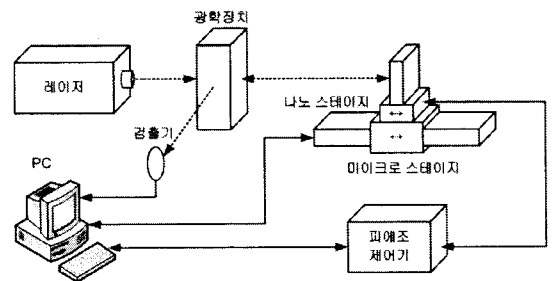


그림 3. 실험 장치 구성도

2.2.2 실험 방법

본 연구에서 레이저 간섭계의 측정 오차를 줄이려는 방안의 핵심적인 내용은 레이저 간섭계를 통해 얻은 변위 값과 정전용량 센서를 통해 측정된 변위 값의 상관관계를 이용하는 것이다. 이를 위해 마이크로 스테이지를 임의의 한 기준으로 이동시킨 뒤, 나노 스테이지의 PZT를 10 μ m에서 100 μ m까지 10 μ m 단위로 이동시킨 후 정지 상태로 유지했을 때의 레이저 간섭계로 측정된 값과 정전용량 센서로 측정된 값을 각각 측정하여 값을 저장한다. 이 측정된 값의 차의 평균치를 통해 오차비(error ratio)를 구하고 이 값을 레이저 측정값의 보정 상수로 사용한다. 각 구간에서 구한 보정 상수를 레이저 간섭계로부터의 측정값에 곱하여 정전용량 센서로부터의 측정값과 비교한다.

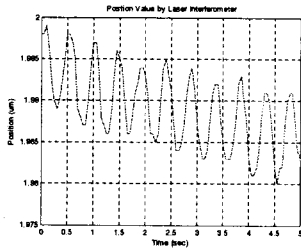


그림 4. 변위 10 μm 에서의 측정오차

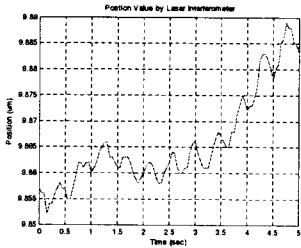


그림 5. 변위 50 μm 에서의 측정오차

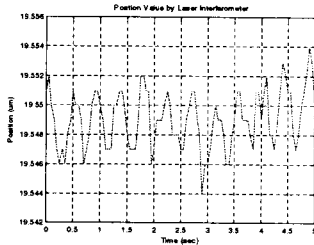


그림 6. 변위 100 μm 에서의 측정오차

2.2.3 오차 보정을 위한 관계식

$x_c(k)$ 을 임의의 시간 k 에서의 정전용량 센서의 측정값이라 하고, $x_l(k)$ 을 임의의 시간 k 에서의 레이저 간섭계의 측정값이라 하면 다음과 같은 비례식을 구할 수 있다.

$$\Gamma(k) = \frac{x_c(k)}{x_l(k)} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\Gamma(k)$ 는 임의의 이산 시간 k 에서의 정전용량 센서의 측정값과 레이저 간섭계의 측정값의 단순 비를 나타낸다. 이 오차비를 다음과 같이 N 개의 샘플에 대해 평균을 취하면

$$\hat{\Gamma} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Gamma(n), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

의 형태가 된다. 이 때 $\hat{\Gamma}$ 는 단순 비례 상수로서 실제 레이저 간섭계로부터 측정되는 값에 바로 적용하여 실시간으로 보정한 값을 바로 얻을 수 있다. 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\bar{x}_l(k) = \hat{\Gamma} \times x_l(k) \quad (3)$$

식 (3)에서 $\bar{x}_l(k)$ 는 임의의 이산 시간 k 에서의 레이저 간섭계를 통해 측정된 값의 보정된 값이다.

2.3 결과 및 고찰

그림 4, 5, 6에서 보는 바와 같이 변위가 증가하면 정전용량 센서와 레이저 간섭계를 통한 측정 값 또한 증가함을 알 수 있다. 표 2와 같이 측정 결과 정전용량 센서와 레이저 간섭계를 통한 측정 값의 비는 거의 일정한 값을 나타낸다. 정전용량 센서로 측정할 수 있는 최대 변위인 100 μm 에서의 오차비를 보정에 적용했을 때가 가장 큰 효과를 보인다. 보정 후 최대 오차는 120nm 이내로 줄이게 되었다. 또한 진동 효과는 한 위치에 대해서 여러 번 측정해서 평균 값을 취해서 줄일 수 있는데 본 방법을 통해서 자연스럽게 수행이 되는 장점이 있다.

표 2. 실험 결과

변위 (μm)	Cap.	Lascr	$\hat{\Gamma}$	$\bar{x}_l @ 10\mu$	$\bar{x}_l @ 50\mu$	$\bar{x}_l @ 100\mu$
10	9.91819	7.92899	1.2508	9.9176	9.8978	9.8748
20	19.8345	15.8706	1.2497	19.8510	19.8113	19.7653
30	29.7576	23.8213	1.2492	29.7958	29.7362	29.6671
40	39.6832	31.7662	1.2492	39.7332	39.6538	39.5617
50	49.6003	39.7343	1.2482	49.6997	49.6004	49.4851
60	59.5303	47.6829	1.2484	59.6418	59.5226	59.3843
70	69.4534	55.6701	1.2475	69.6322	69.4930	69.3316
80	79.3675	63.7065	1.2458	79.6841	79.5249	79.3401
90	89.2876	71.6685	1.2458	89.6430	89.4638	89.2560
100	99.2108	79.6617	1.2454	99.6409	99.4417	99.2107

3. 결 론

레이저 간섭계의 측정 오차는 정전용량 센서를 기준으로 한 측정값과의 단순 오차 상수의 보정만으로도 상당히 줄일 수 있음을 실험 결과를 통해 알 수 있다. 또한 변위를 크게 해서 측정된 오차 상수를 보정에 적용했을 때 작은 변위에 비해 상대적으로 큰 보정 효과를 얻게 됨을 알 수 있었다. 본 연구는 정전용량 센서를 이용한 레이저 간섭계의 측정오차를 보정하여 실험한 결과 120nm 이내로 줄임으로써 향후 환경 오차나 기타 다른 오차에 대한 연구를 계속 진행하는 밑바탕을 제공하는 계기를 마련하게 되었다.

참 고 문 헌

- [1] "A Primer on Displacement Measuring Interferometers", Zygo, 1999
- [2] 이계호, 김승현, 정준홍, 박기현, "정전용량 센서를 이용한 나노급 이송장치의 시스템 식별에 관한 연구", 2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2005. 7. 18-20
- [3] N. Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry", Meas. Sci. Technol., vol. 4, pp. 907-926, 1993.
- [4] S. Topcu, L. Chassagne, D. Haddad, Y. Alayli and P. Juncar, "Heterodyne interferometric technique for displacement control at the nanometric scale", Rev. Sci. Instrum., vol. 74. 11, Nov. 2003.
- [5] 한창수, "나노 위치결정기술", 機械와 材料 14권 1호, 2002. 春