

# 레이저 간섭계를 이용한 이동형 미세 변위 측정에 관한 연구 A Study on the Portable Micro Displacement Measurement Using Laser Interferometer

최경현 · 양형찬

K. H. Choi and H. C. Yang

**Key Words** : Heterodyne Laser Interference(헤테로다인 레이저 간섭계), Micro displacement measurement(미세 변위 측정), Portable laser interferometer(이동형 레이저 간섭계), Real time measurement(실시간 측정)

**Abstract** : The laser interferometer has been used for measurement of the micro displacement error. Although the laser interferometer is widely accepted as a tool for measurement of motion accuracy, the set-up procedure is time-consuming because of the strict requirement on alignment between a laser head and optic units. This paper addresses the development of a laser interferometer to measure the micro displacement for a micro machine. The portable laser interferometer which integrates a laser probe and optics, is developed for the convenient measurement. For the experiment, moving mirror set up on the micro stage. The velocity decoding board is also added to calculate doppler shift frequency directly. The output signal is obtained and analyzed by LabView. Finally experiments are found out the relation between micro displacement and output signal.

## 1. 서 론

정밀 가공기술의 급속한 발달과 더불어 정밀 측정기술은 산업전반에 걸쳐서 그 중요성이 인식되고 있다. MEMS를 활용한 미소 가공의 경우 일반적인 금형 가공에 비해서 미세한 기계적 변위가 성형물의 성형 오차에 큰 영향을 미칠 수 있고 이러한 기계적 변위들로 인하여 고정도의 가공물을 얻을 수가 없다. 그러므로 미소변위를 측정하여 비정상 변위에 대한 데이터를 확보함으로써 오차 조정 등에 활용하여 가공 정밀도를 확보할 수 있다.

여러 가지 측정기술중 레이저광을 이용한 변위측정은 비접촉적이고 측정영역이 크며, 측정분해능이 높고 측정대역이 넓은 편이다. 또한 평면거울을 사용할 경우 이차원 및 삼차원 측정이 가능하고, 각도 및 진직도 측정이 가능한 장점을 가지고 있어 많이 사용되고 있다.<sup>(1)</sup>

현재 개발된 상용 레이저 측정기의 경우 AOM(Acousto Optic Modular)을 이용하여 주파수 천이

를 일으키고, 고주파 신호처리하기 위하여 RF대역의 신호처리 회로 설계가 필요하다는 단점이 있다.<sup>(2)</sup> 그밖에 삼각측정방식에 기초한 측정 장치의 경우 현장 활용성이 용이하고, 실용성이 좋은 반면에 계측시 레이저광이 미치지 않는 오버행부가 존재하며 대상물의 전면투과, 빛이 흡수되는 색이 존재함으로 계측이 어렵다는 단점이 있다.<sup>(3)</sup>

이러한 단점들을 해결할 수 있는 방법으로 헤테로다인 간섭계를 사용하는 방법이 있다. 헤테로다인 간섭계는 비접촉성, 수  $\mu m$ 단위의 우수한 정밀도와 광학계의 정렬이 쉽다는 장점을 가지고 있으며 현재 공작기계의 교정, 초정밀 가공기, 리소그래피 스테퍼의 위치 센서 등 산업전반에 광범위하게 사용되고 있는 방식이다.<sup>(4, 7)</sup>

이 연구에서는 광원은 안정화된 632.8nm의 HeNe 레이저를 Zeeman방식으로 수직 편광된 빔과 수평 편광된 빔을 이용하였고 광학계와 편광판, 반사경 및 광검출기를 축소시켜 모듈로 만들어 Laser Probe에 설치하도록 함으로써 이동 가능한 레이저 간섭계를 개발하였다. 기존의 스테이지에 수동으로 설치하고 실험했던 방식에서 벗어나서 Laser Probe만 간편하게 이동하여 설치함으로 미소변위를 측정할 수 있도록 하였다. 얻어진 신호의 처리를 위하여 속도 디코딩 보드와 A/D컨버터를 이용하였으며 PC

접수일 : 2005년 12월 25일  
최경현(책임저자) : 제주대학교 메카트로닉스공학과  
E-mail : khchoi@cheju.ac.kr Tel. 064-754-3713  
양형찬 : 제주대학교 메카트로닉스공학과 대학원

로 들어온 신호는 LabView를 이용하여 파형을 재 생성하여 이송거리를 구하였다. 속도 디코딩 보드와 A/D컨버터, 전원장치를 추가로 모듈화시켜 Laser Probe와 결합시킨다면 이동성 및 활용성이 뛰어난 미세측정기가 될 것이다. 최종적으로 이 연구는 미세변위측정에 있어서 헤테로다인 간섭계를 활용하였을 때의 우수한 성질과 더불어 추가로 이동성을 부여함으로써 현재 개발된 장비와 차별성을 가지는 미세측정 장비를 개발하고자 하였다.

## 2. 헤테로다인 레이저 간섭계

헤테로다인 레이저 간섭계에서는 두 개의 주파수를 가진 레이저 광원이 필요하며 두개의 광원의 맥놀이 주파수 사이의 위상 차이를 측정하여 이동 목표물의 거리를 측정할 수 있다. 이는 목표물의 이동에 따른 도플러 편이(doppler shift)에 따라 주파수의 변화로 계산할 수 있다. 또한 두 주파수의 차이를 측정하여 거리를 계산하므로 노이즈에 노출이 심하지 않고 광학계의 정렬이 비교적 쉽다는 장점이 있다. 그러나 신호처리 장치가 복잡하며 도플러 편이에 의한 측정 속도에 제한이 있다.<sup>(8-10)</sup> Fig. 1는 헤테로다인 간섭계를 이용한 측정의 기본 구조를 나타내고 있다.

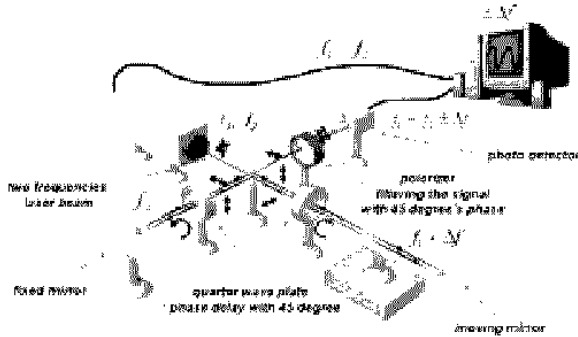


Fig. 1 Schematic of Heterodyne Laser Interferometer

빛의 횡파를 증명하는 도구인 편광판을 통과한 빛은 어느 특정한 방향으로만 진동하는 전기장을 갖고 공간을 나가게 되는데, 이러한 빛을 선형편광된 빛이라고, 이빛의 특성을 선형편광성 이라한다.

레이저 빔은 두 파장이 발생되고 서로 직교된 선형편광성을 유지하는 빔의 특성을 갖는다. 두 파장간의 주파수 차를 기준주파수로 정의하고 이 주파수는 매우 안정적으로 유지되어야한다. 이 연구에서 사용된 헤테로다인 간섭계의 광원은 Zeeman 효과

를 이용하여 선형 편광이 서로 수직하며 편광분리기(PBS : Polarized Beam Splitter)를 통해서 하나의 광( $f_1$ )은 고정된 반사경으로 다른 하나의 광( $f_2$ )은 이동 반사경으로 분리되어 다시 45° 기울어진 편광판을 통하여 두 개의 광이 간섭을 일으켜 맥놀이 현상이 발생한다. 이 맥놀이 주파수(beat frequency) 신호를 이용하여 변위를 계산하게 된다.

$f_1$ 의 광경로가  $d_1$ ,  $f_2$ 의 광경로가  $d_2$ 라고 할 때, 기준 신호( $V_R$ )와 광 검출기로부터 얻어진 측정 신호( $V_M$ )는 다음과 같다.

$$V_R = A \cos[2\pi(f_1 - f_2)t] \quad (1)$$

$$V_M = B \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + 2\pi n d_1 / \lambda_1 - 2\pi n d_2 / \lambda_2] \quad (2)$$

여기서  $A, B$ 는 진폭,  $n$ 은 공기 굴절률이며  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 광의 파장이다. 이렇게 측정된 신호의 위상값은 중요하지 않으며 두 신호의 상대적인 위상차가 필요하다. 다음 식은 두 신호의 위상차를 나타낸다.

$$\phi(t) = 4\pi n(d_1 - d_2) / \lambda \quad (3)$$

여기에서  $\lambda$ 는 두 파장의 평균 파장을 나타낸다. 이동 반사경이 속도  $v$ 로 움직일 때 측정 신호는 도플러 효과에 의해서 주파수 편이가 생기며 이는 위상차를 미분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

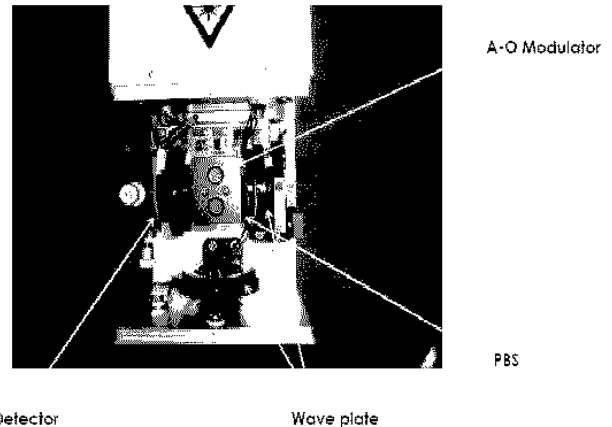


Fig. 2 Inteferometer optics and detector

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = 2m v(t) / \lambda_1 \quad (4)$$

식 (4)를 시간에 대한 적분을 취하면 변위를 구할 수 있다.

Fig. 2에 보이는 것이 이 연구에서 개발되어진 이동형 레이저 간섭계이다. 그림에서 보이는 바와 같이 광검출기, 거울, PBS와 wave plate들을 모듈화하여 기존 레이저에 장착하였다.

Fig. 3과 Fig. 4에서 기존 레이저 간섭계와 이 연구에서 개발되어진 이동형 레이저 간섭계가 보이고 있다. 기존의 간섭계는 stage에 장착되어 있다. 그러므로 측정에 있어서 좀 더 유연성을 가지고 있지만, 이동형 레이저 간섭계는 광학계의 정렬에 있어서 더 용이함을 가지게 된다. 그리고 이동이 간편할 뿐 아니라, 측정 시 셋업 시간을 줄일 수 있다.

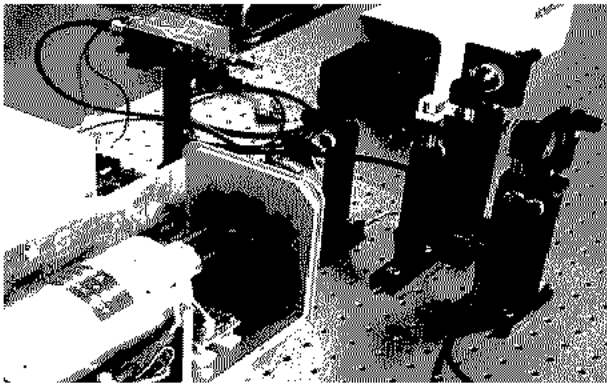


Fig. 3 Existing system

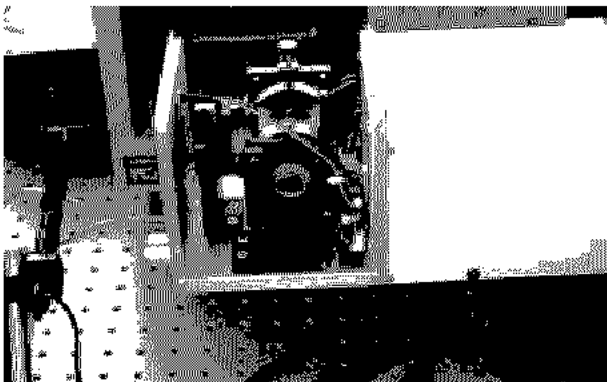


Fig. 4 Portable laser interferometer

### 3. 미세 변위 측정

#### 3.1 실험 장치의 구성

이 실험을 수행하기 위하여 미세 변위를 발생시킬 수 있는 장치로 마이크로 스테이지를 선정하였다. 실험에 이용된 마이크로 스테이지는 1 펠스당 100 $\mu$ m를 이동하게 설계되어 있다. 마이크로 급의 변위를 발생시키기에는 충분한 정밀도라고 판단된다. 미세 변위의 측정은 Fig. 5에서 보여지는 바와 같이 광학테이블 위에서 실험되었다.

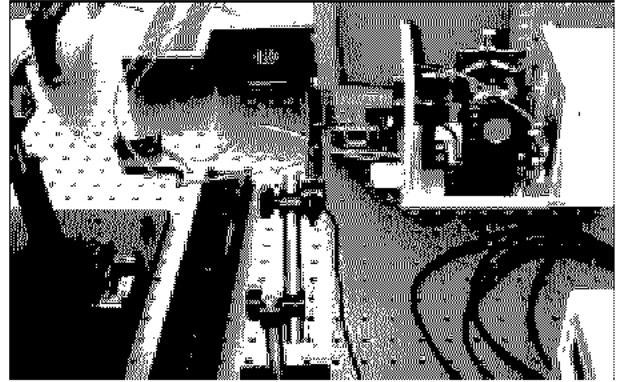


Fig. 5 Micro displacement measurement System

마이크로 스테이지를 광학테이블 위에 올려놓고 이동형 레이저 간섭계를 장착한 후 정렬작업을 수행하였다.

정렬할 때의 중요한 조건은 레이저광의 초점이 일치되는 것인데, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 6에서 보여지는 바와 같고, 수학적으로 계산하면 다음과 같다.

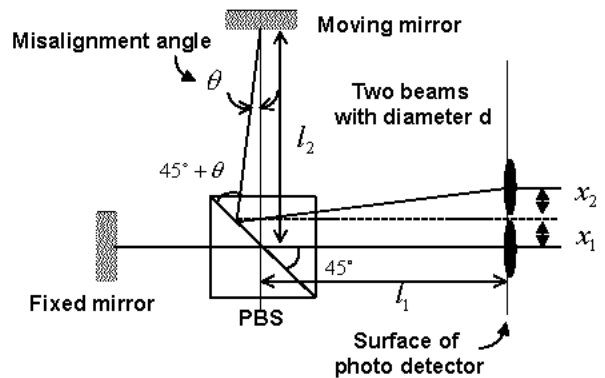


Fig. 6 Misalignment between two beams

$$x_1 = \frac{l_2 \cdot \tan \theta}{1 + \tan \theta} \quad (5)$$

$$x_2 = \left( l_1 + \frac{l_2 \cdot \tan \theta}{1 + \tan \theta} \right) \cdot \tan \theta \quad (6)$$

$$x_1 + x_2 = (l_1 + l_2) \cdot \tan \theta \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{x_1 + x_2}{l_1 + l_2} \right) \quad (8)$$

식 (5), (6)을 통하여 고정거울과 이동거울에서 들어온 거리를 알 수 있으며, 식 (7), (8)을 통하여 각도를 구할 수 있다. 고정거울과 이동거울에서 반사된 레이저광이 간섭을 발생시키려면 최소한  $x_1$ 와  $x_2$ 의 합이 레이저 광의 반지름보다 작아야 한다.

이동거울은 마이크로 스테이지위에 올려 고정하였다. 마이크로 스테이지의 변위 발생은 마이크로 스테이지를 PC에 연결함으로써 원하는 변위를 원하는 횟수만큼 발생시키게 하였다. 또한 속도 디코딩 보드를 이용하여 기준 신호와 측정 신호의 차를 전압값으로 변환하게 하였다. 변환된 전압값은 A/D컨버터에서 변환하여 LabView로 받아들이게 하였다.

### 3.2 실험 결과

실험은 크게 두 가지로 나누어서 진행되었다. 첫 번째는 동일한 속도와 가속도에서 변위를 바꾸어가면서 전압을 측정하여 전압값에 대한 보정식을 찾는 실험을 하였고, 두 번째는 첫 번째 실험에서 얻어진 보정식을 가지고 실제 변위를 계산하는 실험이다.

첫 번째 실험은 변위를 동일한 속도와 가속도에서 변위를 10 $\mu\text{m}$ 씩 증가시키면서 변위의 증가량과 출력되는 전압값 사이의 관계를 해석하기 위한 실험이다. Fig. 7은 10  $\mu\text{m}$ 에서 60  $\mu\text{m}$  구간 사이의 변위값과 출력되는 전압값과의 관계를 보여주고 있다. 실험의 결과는 출력되는 전압값과 변위가 선형적인 관계를 가지고 있으며, 둘 사이의 관계를 일차식으로 표현하면 식 (9)와 같이 구할 수 있다. 이 보정식을 이용하면 출력된 전압값을 이용하여 변위를 계산할 수 있다.

$$y = 0.1672 \times x - 60.384 \quad (9)$$

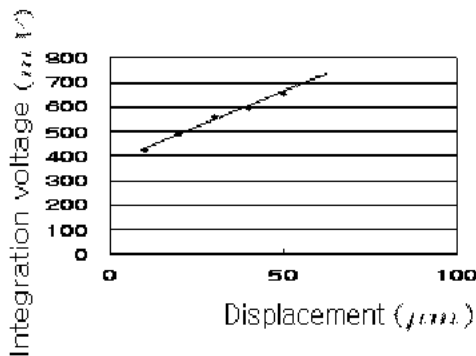


Fig. 7 Calibration of measurement data

두 번째 실험은 첫 번째 실험에서 얻어진 보정식을 가지고 동일한 속도와 가속도를 가지고 임의의 변위를 발생시켰을 때 구해진 변위가 마이크로 스테이지에서 발생된 변위와 일치하는가를 확인한 실험이다. Fig 8은 60 $\mu\text{m}$ 의 변위를 발생시켰을 때 전압값의 변화모습과 전압값의 적분값, 그리고 보정식

으로부터 변위가 계산되는 것을 보여주고 있다.

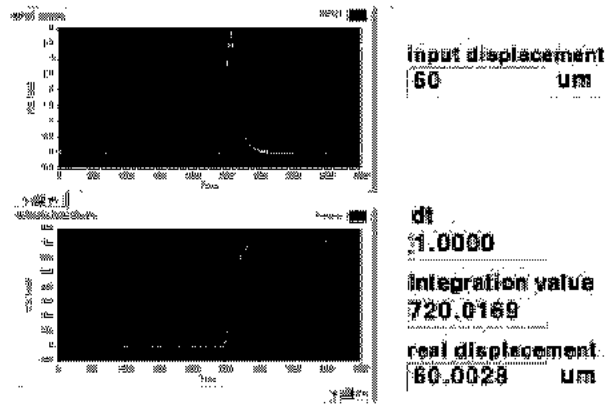


Fig. 8 Measurement of displacement in LabView

실험 결과의 오차는 간섭계의 불확도 요인에서 비롯되는데, 불확도를 야기시키는 요인들은 공기 굴절율의 변화, 공기의 유동, 온도 변화, 광학적 비선형성을 들 수 있다. 그 밖에 레이저 자체의 비선형성에 의한 오차, 기하학적인 오차 요인 등이 있다. 이런 오차값을 고려한다면 보정식으로부터 얻어진 변위값은 마이크로 스테이지에 발생된 변위에 대하여 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 결론적으로 첫 번째 실험에서 구해진 보정식이 변위를 계산함에 있어 적합하다고 할 수 있다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 미세 변위를 측정할 수 있는 실험 장비를 개발하였다. 개발한 장치는 비접촉이며 비교적 미세한 변위인 마이크로 급의 변위까지의 측정이 가능하다. 그리고 레이저 간섭계를 직접 레이저 헤드에 장착함으로써 이동형 레이저 간섭계를 개발하였다. 기준 신호와 측정 신호의 차를 전압값으로 받아서 그 전압값을 다시 변위값으로 환산함으로써 실시간으로 변위의 값을 구할 수 있다. 마이크로 가공에서 발생할 수 있는 변위는 수백 마이크로에서 수 마이크로의 범위가 될 것이며 그 변위를 개발된 장비로 측정하게 된다면 오차를 발생시키는 환경적인 요인을 제거할 수 있을 것이다. 그리고 이동형으로 개발됨으로써 정렬하는 시간과 오차를 줄일 수 있고, 미세변위의 측정에 있어 어떠한 경우에도 측정을 가능하게 할 것이다.

## 참고 문헌

1. 김승우, 2000, “광계측의 기술동향”, 한국정밀공학회지, 제17권 제6호, pp. 7-16.
2. 라종필, 최현승, 박기환, 2004, “Zeeman 안정화 He-Ne 레이저 및 One-shot FV 변환기를 이용한 헤테로다인 진동측정기”, 한국정밀공학회 04 춘계학술대회논문요약집, pp. 168-168.
3. 안재웅, 강영준, 백성훈, 2003, “선형 레이저빔을 이용한 비접촉 치수측정장치 개발”, 한국정밀공학회 03추계학술대회논문요약집, pp. 117-117.
4. 엄태봉, 2002, “Nanometrology를 위한 기반기술 확보 및 나노측정기개발”, 과학기술부 연구보고서, pp. 41-71.
5. 김민석, 김승우, 2002, “헤테로다인 변위 측정 간섭계의 고속, 고분해능 위상 측정”, 한국정밀공학회지, 제19권 제09호, pp. 172-178.
6. 김대현, 최재원, 최경현, 2004, “미세 변위 측정기 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회 04춘계학술대회논문요약집, pp. 124-124.
7. C. R. Steinmetz, 1990, “Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry,” *Prec. Eng.* Vol.12, pp. 12-24.
8. D. Royer, E. Dieulesaint, X. Jia, and Y. Shui, 1988, “Optical generation and detection of surface acoustic waves on a sphere,” *Applied Physics Letters*, Vol. 52, No. 9, 706-708.
9. Christophe Barriere and Daniel Royer, 2001, “Optical measurement of large transient mechanical displacements,” *Applied Physics Letters*, Vol. 79, No. 6, 878-880.
10. Christophe Barriere and Daniel Royer, 2001, “Measurement of large ultrasonic displacements with an optical probe,” *IEEE Ultrasonics Symposium in Atlanta*, pp. 1-4.