

레이저 간섭계를 이용한 마이크로 시스템의 미소변위 측정에 관한 연구

최경현[#], 김창종^{*}, 조수정^{**}

A Study of Micro Displacement Measurement of Micro System using the Laser Interferometer

Kyung-Hyun Choi[#], Chang-Jong Kim^{*}, Su-Jeong Cho^{**}

ABSTRACT

This paper addresses the development of a laser interferometer to measure micro displacement for a micro system. The laser interferometer is able to measure micro displacement during a few micro seconds with non-contact. In order to employ the interferometer, the displacement calibration experiment should be required. For the experiment, a laser probe installed on the optical table with optical devices and a micro stage. The velocity decoding board is also added to calculate doppler shift frequency directly. The output signal is processed by LabView. Finally experiments are found out the relation between displacement and output signal.

Key Words : Micro System(마이크로 시스템), Heterodyne Laser Interference(헤테로다인 레이저 간섭계), Micro Displacement Measurement(미세 변위 측정), Displacement Calibration(변위 보정)

1. 서 론

최근 MEMS공학의 발전으로 미소 가공물과 그 미소 가공물을 가공하는 공작기계의 발전이 두드러지고 있다. 마이크로 성형기는 이러한 미소 가공물을 만드는 공작기계들 중의 하나이다. 마이크로 성형기(Micro Former)는 마이크로 홀(Micro Hole)을 만드는 성형기로써 크랭크축의 회전에 의한 펀치의 직선 운동으로 마이크로 홀을 뚫는 성형기이다^[1]. 마이크로

홀을 성형할 때에는 상하, 좌우의 미세한 변위가 생길 수 있다. 이러한 미세한 변위는 전통적인 가공기에서는 무시할 수 있었으나 미세한 마이크로 홀을 뚫는 일련의 작업에서는 무시할 수 없다.

가공기의 미세한 변위에 의하여 마이크로 홀에 버(burr)가 생길 수도 있으며, 미세한 변위가 또 다른 예기치 않은 불량률의 원인이 될 수도 있다. 이런 미세한 변위를 측정함으로써 미소한 변위가 미세 성형에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 더 나아가 미세 성형기의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다^[2].

미세 변위 진동을 측정하기 위하여 비 접촉식 레이저 간섭계에 관한 연구가 수행되어 왔다. Xuefeng^[3]은 위상변조 레이저 다이오드 간섭계를 이용하여 레이저

교신저자 : 제주대학교 기계에너지시스템공학부

E-mail : amm@cheju.ac.kr

* 제주대학교 메카트로닉스공학과 대학원

** 제주대학교 메카트로닉스공학과 대학원

다이오드의 광파장에서의 진동에 의한 측정 에러 및 광학기기에서 발생하는 진동에 의한 측정 에러를 feedback 제어를 통해서 보상하였다. Pek 등^[4]은 로봇의 end-effector와 같은 동적 시스템의 실시간 위치를 측정하기 위해 LIST(Laser Interferometry-based Sensing and Tracking) 기술을 이용하였다. Badami 등^[5]은 heterodyne 레이저 간섭계에서 정렬이 제대로 이루어지지 않았을 때 발생하는 optical mixing에 대해서 수학적으로 분석하였으며 이를 실제 실험을 통하여 검증하였다. Cosjins 등^[6]은 일반적인 헤테로다인 레이저 간섭계에서 발생하는 에러 요인을 Babinet Soleil 보상기를 이용하여 이러한 수학적 모델링을 검증하였다. Jenq 등^[7]은 CNC 다축 머신의 기하학적 오차를 수정하기 위해서 자동 정렬 레이저 간섭계를 개발하여 적용하였다.

이러한 연구들에 사용된 헤테로다인 간섭계(Heterodyne Laser Interferometer)는 호모다인 간섭계(Homodyne Laser Interferometer)와 비교해 볼 때 비교적 공기의 영향을 덜 받으며 간섭계의 정렬 등에서 유리하고, 측정할 수 있는 영역 또한 마이크로 성형기가 가지는 미소 변위를 측정하기에 적합하다고 판단된다^[8-11].

본 연구에서 쓰인 헤테로다인 레이저 간섭계는 안정화된 632.8nm의 He-Ne 레이저를 Zeeman 방식으로 수직 편광된 빔과 수평 편광된 빔을 이용하였으며 미세 변위 측정을 위한 보정 실험으로 해상도가 100 nm인 마이크로 스테이지를 이용하여 미소변위를 발생시켰다. 또한 얻어진 신호의 처리를 위하여 속도 디코딩 보드와 A/D 컨버터를 이용하였으며 PC로 들어온 신호는 랩뷰(LabView)를 이용하여 파형을 재생성하여 보정식을 구하였다.

2. 레이저 간섭계

레이저를 이용하여 변위를 측정하는 방법 중 가장 일반적으로 사용되는 방법은 레이저의 간섭현상을 이용하여 측정하는 것이다. 간섭현상을 이용한 레이저 길이 측정기는 nm 수준의 길이 측정에도 가장 널리 사용되는 방법임에 의심할 여지가 없다. 레이저 간섭계에 이용되는 광원은 높은 출력과 우수한 광학적인 특성을 가진 633nm 파장의 주파수 안정화

He-Ne 레이저를 이용한다. 간섭계 종류로는 호모다인 레이저 간섭계와 헤테로다인 레이저 간섭계가 사용되고 있다. 과거 호모다인이 헤테로다인 레이저 간섭계보다 비선형오차가 적었으나, 현재는 필터 등의 개발에 인하여 헤테로다인의 비선형오차가 많이 줄어들었다. 본 연구에서는 이런 점들을 감안하여 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 변위를 측정하였다.

헤테로다인 레이저 간섭계에서는 두 개의 주파수를 가진 레이저 광원이 필요하며 두 광원의 맥놀이 주파수 사이의 위상 차이를 측정하여 이동 목표물의 거리를 측정할 수 있다. 이는 목표물의 이동에 따른 도플러 편이(Doppler Shift)에 따른 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^[12-14]. Fig. 1은 헤테로다인 간섭계를 이용한 측정의 기본 구조를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하려면 2개의 주파수를 갖는 광을 내보내야 한다. 이 두광은 각각 서로 수직선형 편광이어야 한다. 이런 광을 만들어 내기 위해서는 이득물질에 자장을 걸어 2개의 주파수를 만들어내는 Zeeman 효과를 이용한 방법과 음향-광변조기(Acousto-Optic Modulator)를 이용한 방법이 있다. Zeeman 효과란 자장이 가해지면 원자의 스펙트럼이 2개로 나누어지는 현상으로 단일 모드로 동작하는 레이저에 자장을 가하면 Zeeman 효과에 의해 서로 편광이 직교하는 2개의 주파수 광이 나오게 된다.

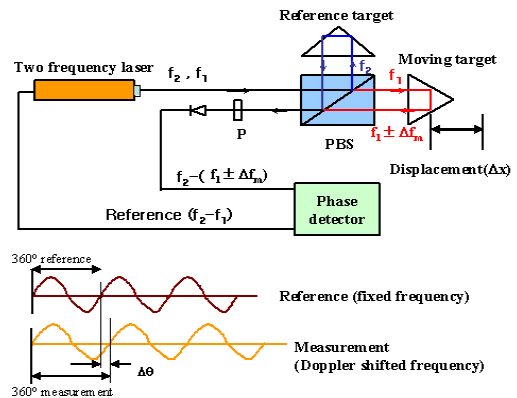


Fig. 1 Schematic diagram of heterodyne interferometer

본 연구에서 개발된 헤테로다인 간섭계의 광원은 Zeeman 효과를 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.

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

$$V_M = B \cos [2\pi (f_1 - f_2)t + 2nd_1/\lambda_1 - 2nd_2/\lambda_2] \quad (2)$$

여기서 A , B 는 진폭, n 은 공기 굴절률이며 λ_1 , λ_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 Λ 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.

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

식 (4)를 시간에 대한 적분을 취하면 변위를 구할 수 있다.

3. 미세 변위 측정 실험

3.1 실험 장치의 구성

본 실험을 수행하기 위하여 미세 변위를 발생시킬 수 있는 장치로 마이크로 스테이지를 선정하였다. 실

험에 이용된 마이크로 스테이지는 1 펄스당 $100\mu\text{m}$ 를 이동하게 설계되어 있다. 마이크로 급의 변위를 발생 시키기에는 충분한 정밀도라고 판단된다. 미세 변위의 측정은 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 모두 광학 테이블 위에서 실험되었다. 마이크로 스테이지와 레이저 광원, 그리고 광학계를 광학테이블 위에 올려놓고 수동으로 정렬작업을 수행하였다. 정렬할 때의 중요한 요소는 레이저광의 초점이 일치되는 것인데, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 3에서 보여지는 바와 같이, 수학적으로 계산하면 다음과 같다.

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

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

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

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

식 (5), (6)을 통하여 고정거울과 이동거울에서 들 어온 거리를 알 수 있으며, 식 (8)을 통하여 각도를 구할 수 있다. 고정거울과 이동거울에서 반사된 레이저 광이 간섭을 발생시키려면 최소한 x_1 과 x_2 의 합이 레이저 광의 반지름보다 작아야 한다.



Fig. 2 Schematic of micro displacement measurement system

이동거울은 마이크로 스테이지위에 올려 고정하였다. 마이크로 스테이지의 변위 발생은 마이크로 스테

이지를 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 랩뷰로 받아들이게 하였다.

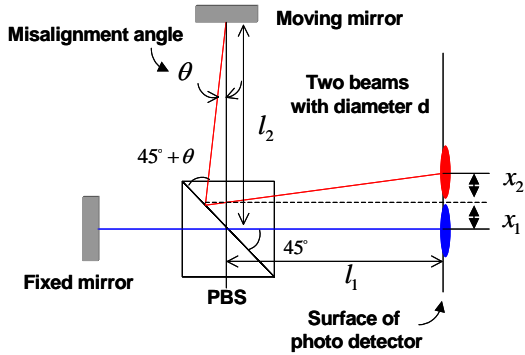


Fig. 3 Misalignment between two beams

3.2 실험 결과

실험은 크게 세가지로 나누어서 진행되었다. 첫 번째는 같은 변위를 주었을 때 발생하는 파형과 그 적분값을 비교하는 실험이고, 두 번째는 변위를 점점 증가시키거나 감소시키면서 발생하는 전압과 변위와의 관계를 검증한 실험이다. 마지막 실험은 두 번째 실험에서 얻어진 보정식을 가지고 임의의 변위를 발생시키고 난 후 그 변위의 값을 계산하는 실험이다.

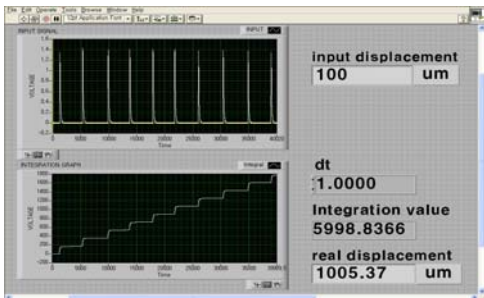


Fig. 4 Measurement of repeatability in LabView

미세 변위 측정 실험 중 첫 번째 실험은 실험 장치의 반복정밀도를 검증해볼 수 있는 실험으로써 일

정한 변위가 발생될 때 출력되는 전압값은 항상 일정하다는 것을 확인하고자 하였다. Fig. 4은 100 μ m의 변위를 10번 반복해서 주었을 때 발생하는 전압값과 그 적분값을 랩뷰에서 확인한 모습이다.

두 번째 실험은 변위를 10 μ m씩 증가시키면서 변위의 증가량과 출력되는 전압값 사이의 관계를 해석하기 위한 실험이다.

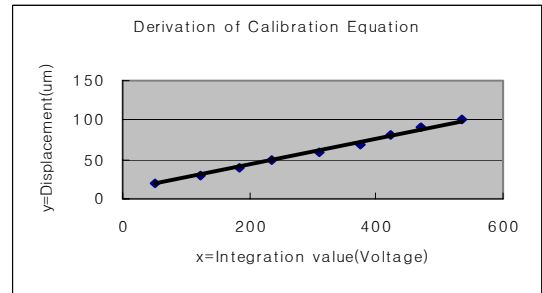


Fig. 5 Calibration of measurement data

실험의 결과 Fig. 5에서 보여지는바와 같이 출력되는 전압값과 변위는 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.

$$y = 0.1659x + 10.163 \quad (9)$$

세 번째 실험은 두 번째 실험에서 얻어진 보정식을 가지고 임의의 변위를 발생시켰을 때 구해진 변위가 마이크로 스테이지에서 발생된 변위와 일치하는가를 확인한 실험이다. Fig. 6은 50 μ m의 변위를 발생시켰을 때 전압값의 변화모습과 전압값의 적분값 그리고 보정식으로 부터 변위가 계산되는 것을 보여주고 있다.

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 보정식으로 부터 얻어진 변위값은 마이크로 스테이지에 발생된 변위에 대하여 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 결론적으로 두 번째 실

험에서 구해진 보정식이 변위를 계산함에 있어 적합하다고 할 수 있다.

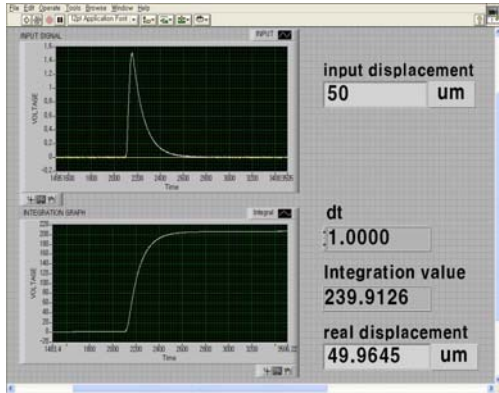


Fig. 6 Measurement of displacement in LabView

4. 결 론

본 연구에서는 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 미세 변위를 측정하기 위한 변위 보정 실험을 수행하였다. 레이저 간섭계 기반의 미세 측정 장치는 비접촉식이며 비교적 미세한 변위인 마이크로급의 변위까지의 측정이 가능하다. 마이크로 스테이지를 이용한 미세 변위를 생성하고 측정하여 레이저 간섭계의 변위 보정식을 구하였다. 마이크로 성형기에서 발생할 수 있는 변위는 수백 마이크로에서 수 마이크로의 범위이므로 레이저 간섭계를 이용한 변위의 측정이 가능하다. 정확한 변위 측정을 위해서는 오차를 발생시키는 환경적인 요인을 제거하고 광학시스템의 정렬오차 등을 줄이는 노력이 필요하다.

향후 과제는 미세변위의 측정에 있어 어떠한 경우에도 측정을 가능하게 하기 위해서 옵틱들과 광원의 이동이 자유로운 측정기를 개발하는 것이다.

후 기

본 논문은 산업자원부가 지원하고 있는 ‘디지털 3차원 실물복제기 개발’ 과제 지원으로 연구되었습니다.

참고 문헌

1. 나경환, 박훈재, 조남선, “소성가공에 의한 미세 부품 성형기술,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제7호, pp. 14-19, 2000.
2. 신용승, 김병희, 김현영, 오수익, “박판 전단시의 버 형성에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제9호, pp. 166-171, 2002.
3. Wang, X., Wang, X., Lu, H., Qian, F. and Bu, Y., “Laser diode interferometer used for measuring displacements in large range with a nanometer accuracy,” Optics & Laser Technology, Vol. 33, pp. 219-223, 2001.
4. Teoh, P. L., Shirinzadeh, B., Foong, C. W. and Alici, G., “The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique,” Measurement, Vol. 32, pp. 135-150, 2002.
5. Badami, V. G. and Patterson, S. R., “A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry,” Precision Engineering, Vol. 24, pp. 41-49, 2000.
6. Cosijns, S.J.A.G, Haitjema, H., and Schellekens, P.H.J., “Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry,” Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 26, pp. 448-455, 2002.
7. Chen, J. S., Kou, T. W. and Chiou, S. H., “Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer,” Precision Engineering, Vol. 23, pp. 243-252, 1999.
8. 김승우, “광계측의 기술동향,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp. 7-16, 2000.
9. 한국표준과학연구원, Nanometrology를 위한 기반 기술확보 및 나노측정기개발.
10. 김민석, 김승우, “2-종모드 레이저를 이용한 고분해능 헤테로다인 간섭계,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제4호, pp. 195-201, 2002.
11. 김민석, 김승우, “헤테로다인 변위 측정 간섭계의 고속, 고분해능 위상 측정,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제9호, pp. 172-178, 2002.