

碩士學位論文

마이크로 성형기를 위한
미세 변위 측정에 관한 연구

濟州大學校 大學院



金 大 鉉

2004 年 12 月

마이크로 성형기를 위한
미세 변위 측정에 관한 연구

指導教授 崔 劉 賢

金 大 鉉

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金大鉉의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2004 年 12 月

A Study on Measurement of Micro Displacement for Micro Former

Dae-Hyun Kim

(Supervised by professor Kyung-Hyun Choi)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2004. 12.

목 차

| | |
|--------------------------------|----|
| NOMENCLATURE | 1 |
| SUMMARY | 2 |
| I. 서 론 | 3 |
| 1.1 연구배경 | 3 |
| 1.2 국내외 연구 동향 | 4 |
| 1.3 연구목표 | 12 |
| II. 변위 센서 | 14 |
| 2.1 접촉식 변위 센서 | 14 |
| 2.2 비접촉식 변위 센서 | 15 |
| 2.3 레이저 간섭계 | 21 |
| III. 실험 장치 및 방법 | 26 |
| 3.1 도플러 편이 측정 장치 | 26 |
| 3.2 도플러 주파수의 측정 | 29 |
| 3.3 미세 변위 측정 장치 | 31 |
| 3.4 미세 변위 측정 | 37 |
| IV. 실험 결과 및 고찰 | 39 |
| 4.1 미세 변위 측정 시스템의 정밀도 분석 | 39 |
| 4.2 측정 변위의 오차 요인 | 48 |
| V. 결론 | 50 |
| VI. 참고 문헌 | 52 |

NOMENCLATURE

| | |
|------------|---------------------------------------|
| V_R | : Reference signal voltage |
| V_M | : Measurement signal voltage |
| f | : Frequency |
| Δf | : Doppler frequency |
| A, B | : Amplitude |
| λ | : Wave length |
| d_1, d_2 | : Displacement |
| n | : Air refraction index |
| ϕ | : Phase difference |
| t | : Time |
| θ | : Misalignment angle |
| l_1 | : Distance from PBS to photo detector |
| l_2 | : Distance from PBS to mirror |
| x | : Laser spot radius |
| PBS | : Polarized beam splitter |
| REF | : Reference signal |



SUMMARY

Micro former has been known as a useful tool for machining micro parts. It fabricates micro holes automatically with punches, a hole-shape die and material by rotation of crank shaft synchronously. Micro displacement in micro forming affects the performance of machining because micro forming size is similar with its mechanical displacement. Therefore, the measurement of this micro displacement is essential to be guaranteed to obtain high forming precision in the whole machine as well as its devices.

This paper addresses the development of a laser interferometer to measure micro displacement for a micro former. The laser interferometer is able to measure micro displacement during a few micro seconds with non-contact. For the experiment, a laser probe is installed on the optical table with optical devices and a micro displacement generating device. The velocity decoding board is also added to calculate doppler shift frequency directly. Finally simple experiments are conducted to confirm its functional operation.

I. 서 론

1.1 연구 배경

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 성형기로서 크랭크 축의 회전에 의한 펀치의 직선 운동으로 마이크로 홀을 가공하는 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. 이러한 미세한 변위를 측정함으로써 미세한 변위가 미세 성형에 미치는 영향을 파악할 수 있으며, 더 나아가 마이크로 성형기의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다[2].

본 연구에서는 이러한 마이크로 성형기에서 발생하는 미세 변위를 측정하기 위하여 헤테로다인 레이저 간섭계를 사용하여 변위를 측정하고자 한다. 헤테로다인 레이저 간섭계(Heterodyne Laser Interferometer)는 호모다인 레이저 간섭계(Homodyne Laser Interferometer)에 비교하여 비교적 공기의 영향을 덜 받으며 간섭계의 정렬 등에서 유리하고, 측정할 수 있는 영역 또한 마이크로 성형기가 가지는 미세 변위를 측정하기에 적합하다고 판단된다[3].

본 연구에서 쓰인 헤테로다인 레이저 간섭계는 안정화된 632.8nm의 He-Ne 레이저를 Zeeman방식으로 수직 편광된 빔과 수평 편광된 빔을 이용하였으며 마이크로 성형

기의 미소변위를 모의 실험하기 위하여 해상도가 100 nm인 마이크로 스테이지를 이용하여 미세 변위를 발생시켰다. 또한 얻어진 신호의 처리를 위하여 속도 디코딩 보드와 A/D 컨버터를 이용하였으며 PC로 들어온 신호는 랩뷰(Lab View)를 이용하여 파형을 재생성하여 이송 거리를 구하였다.

1.2 국내외 연구 동향

레이저 간섭계에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 특히 국내에서는 카이스트를 중심으로 많은 발전을 하고 있다.

김 등[4]은 두 개의 종모드간의 맥놀이 주파수를 이용한 2-종모드 레이저에 대한 연구를 수행하였다. 이들은 종모드간의 맥놀이 주파수는 공진기의 FSR(Free Spectral Range)값과 비슷한 600~1000MHz로 속도에 제한이 없으며 인접하는 두 모드는 모드 경쟁에 의해 편광이 서로 직교하므로 헤테로다인 간섭계의 광원으로 사용이 가능하다. RF-헤테로다인 기법을 이용하여 맥놀이 주파수를 낮춤으로써 2-종모드간의 맥놀이 주파수가 너무 커 위상 측정이 곤란한 문제를 해결하였으며 또한 맥놀이 주파수 변화를 이용하여 레이저 주파수를 안정화 시켰다. 다만 헤이저처럼 이중 주파수 레이저를 만들기 위해 자장을 가하지 않아도 되며 맥놀이 주파수의 크기에 의해 속도 제한을 받지 않는다는 장점이 있다. 또한 광의 출력이 2mW 이상으로 다축 측정이 가능하다. 즉, 2-종모드 레이저 간섭계는 고속, 고정 및 다축 측정에 적절하다고 판단된다. 결과적으로 맥놀이 주파수 안정도 4.0×10^{-6} 와 레이저 주파수 안정도 2.0×10^{-9} 의 결과를 얻었고 위상오차가 0.1° 이내로 나왔다.

김 등[5]은 고정도이면서 고속측정이 가능한 헤테로다인 변위 측정 간섭계를 개발하였다. 이는 고속 측정에서는 기준 신호의 주파수를 높이므로 가능한데 이런 경우 분해

능, 즉 고정도 측정이 어렵게 되며 이를 해결하기 위해 시간 분해능을 높일 경우 회로의 복잡해짐에 따라 높은 비용이 요구된다. 이를 해결하기 위하여 시간 분해능을 높이지 않고 슈퍼 헤테로다인 기법을 이용하여 고속 고정도의 측정 하였다. 이는 기준 신호와 측정 신호의 위상을 바꾸지 않고 주파수를 낮추는 방법으로 맥놀이 주파수가 크더라도 쉽게 위상 분해능을 높일 수 있는 방법이다. 결과적으로 100MHz의 클럭으로 샘플링 주파수 1MHz에 $\pm 1.58\text{nm}$ 의 정밀도와 2.35m/s 이상의 측정속도를 가지는 위상 측정기를 제작하였다.

국외의 레이저 간섭계에 관한 연구는 크게 레이저 간섭계를 이용하여 다축 정렬과 같은 장치의 자동 정렬에 관한 논문과 변위측정 및 오차 보정에 관한 논문이 있다.

K.-C. Fan 등[6]은 X-Y 스테이지의 6 자유도 이송 에러를 동시에 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. Fig. 1과 같이 L-shape mirror과 right-angle mirror를 스테이지에 부착하고 4개의 LDS(Laser Doppler Scale)을 사용하여 6자유도 에러를 측정하였다. 각각의 LDS에서의 입사 및 반사된 광의 경로차에 의한 수학적 계산을 통해서 각 자유도에 대한 에러를 측정하였다. 이 시스템에서 사용된 간섭계는 HP5528A이며 개발된 시스템의 선형 위치 정밀도는 200mm의 범위에서 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 이상이며 수직 진직도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 의 범위에서 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 이내이다. yaw와 pitch 에러는 $\pm 50\text{arcsec}$ 구간에서 $\pm 1\text{arcsec}$ 이고 roll 에러는 $\pm 3\text{arcsec}$ 이다.

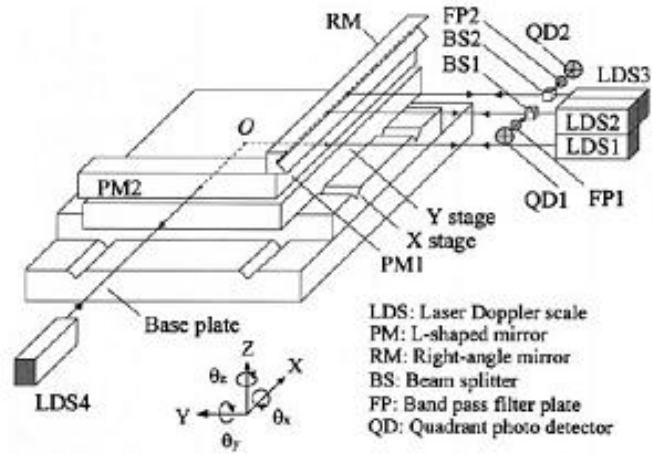


Fig. 1 Schematic diagram of the measurement system for the motion accuracy of X-Y stage

J. Kemp 등[7]은 Fig. 2에서와 같이 wollaston prism을 이용하여 2개의 정상광 (ordinary beam)과 2개의 비정상광(extraordinary beam)이 발생한다. 이러한 4개의 광을 간섭시켜 간섭광의 fringe 무늬를 CCD로 읽어 들인 간섭무늬의 fringe의 개수와 CCD 영상에서의 fringe 사이의 거리 및 기준광의 파장과의 수학적 계산을 통하여 실제 거리를 도출하였다.

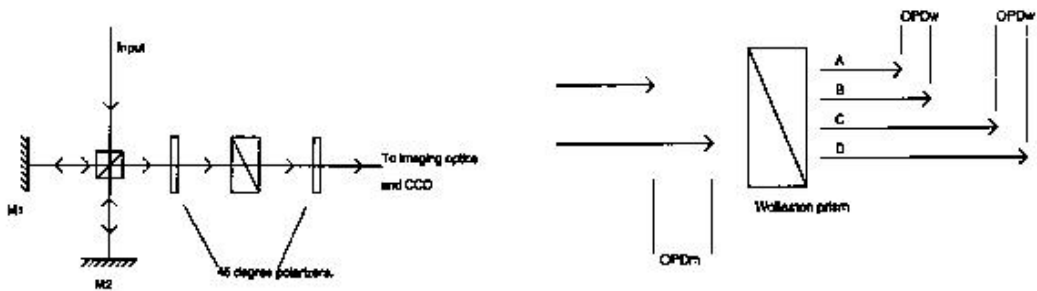


Fig. 2 Experimental arrangement and wollaston output schematic

Shyh-Tsong[8]은 Fig.3 과 같이 광원으로부터 입사된 광을 Wollastorn prism을 이용하여 2개의 광으로 분리시킨 후 corner cube와 retroreflector를 이용하여 반사시킨 후 다시 재결합 시킴으로 간섭을 발생시키고 간섭무늬의 fringe 개수로부터 변위를 구하였다. 이로부터 스테이지의 strainghness 측정 실험을 수행하고 유도된 수학적 ($d_x = \lambda / 8 \sin \theta$, N : fringe count, λ : wave length, θ : wollaston angle)과 비교 검토를 하였다.

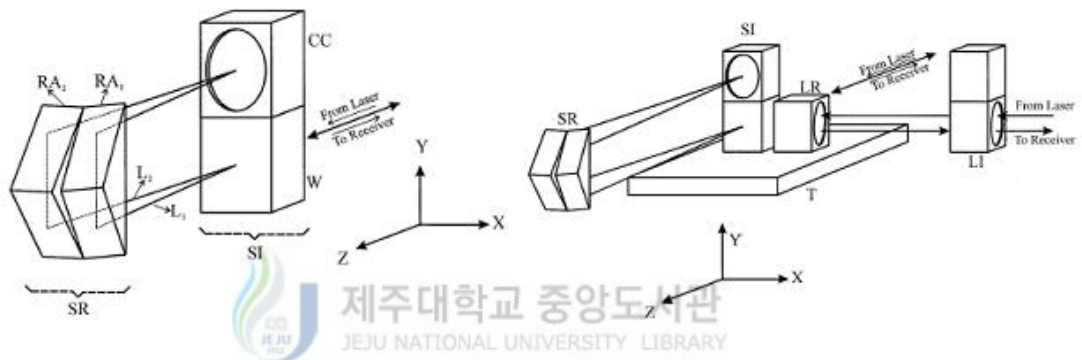


Fig. 3 The optical setup and experiment

Hans-Jurgen[9]는 fringe-counting 으로 변위를 측정하는 방법에 대한 이론 및 실험적인 연구를 수행하였다. Fig. 4와 같이 변위 및 측정 에러에 대해서 이론적으로 해석하였으며, 이를 저주파, 중주파, 고주파 표준 가속기 및 표준 각가속기와 더불어 실험을 수행하였다.

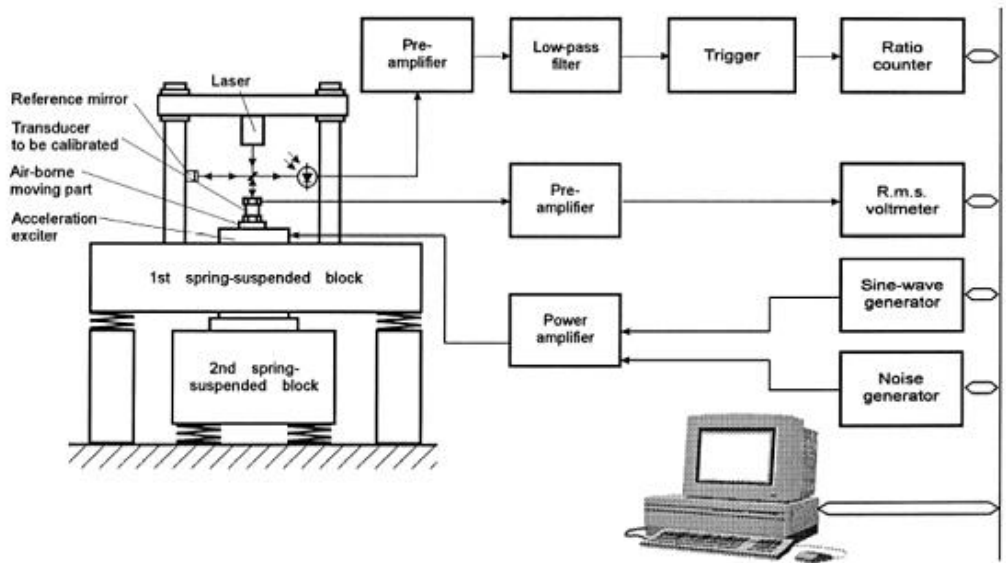


Fig. 4 Simplified block diagram of the low-frequency acceleration standard

Xuefeng[10]은 위상변조 레이저 다이오드 간섭계를 이용하여 레이저 다이오드의 광파장에서의 진동에 의한 측정 에러 및 광학기기에서 발생하는 진동에 의한 측정 에러를 Fig. 5와 같이 feedback 제어를 통해서 보상하였다.

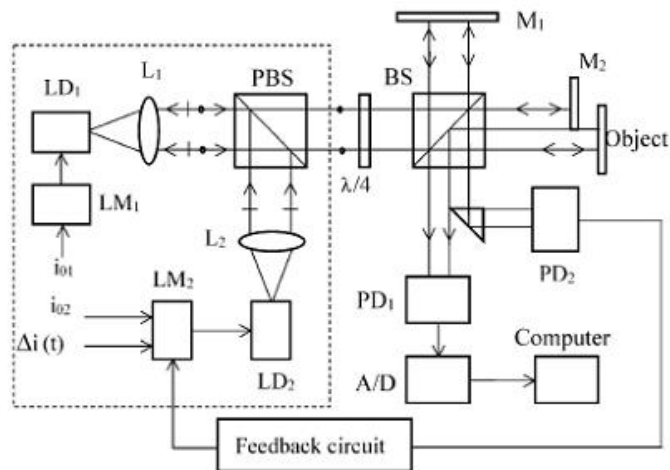


Fig. 5 The sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer

또한 측정 범위를 파장의 1/2에서 $125\mu m$ 까지 확대하였으며 측정 정도는 1nm이다.

Pek 등[11]은 로봇의 end-effector와 같은 동적 시스템의 실시간 위치를 Fig. 6 과 같은 방법으로 측정하기 위해 LIST(Laser Interferometry-based Sensing and Tracking) 기술을 이용하였다. 이는 레이저 헤드에서 발사된 빔이 광분할기를 거쳐서 Beam Steering Mechanism으로 인하여 반사경이 달려 있는 로봇의 end-effector를 추종하게 되고 이로 인하여 발생한 간섭 신호를 PSD에서 읽어들이므로 변위를 계산한다. 또한 에러를 발생시키는 요인에 따른 불확도(uncertainty)를 레이저 간섭계, PSD, 모터 및 엔코더, 회전축에 대해서 규명하였으며 이에 대한 실험을 통하여 수행하였다.

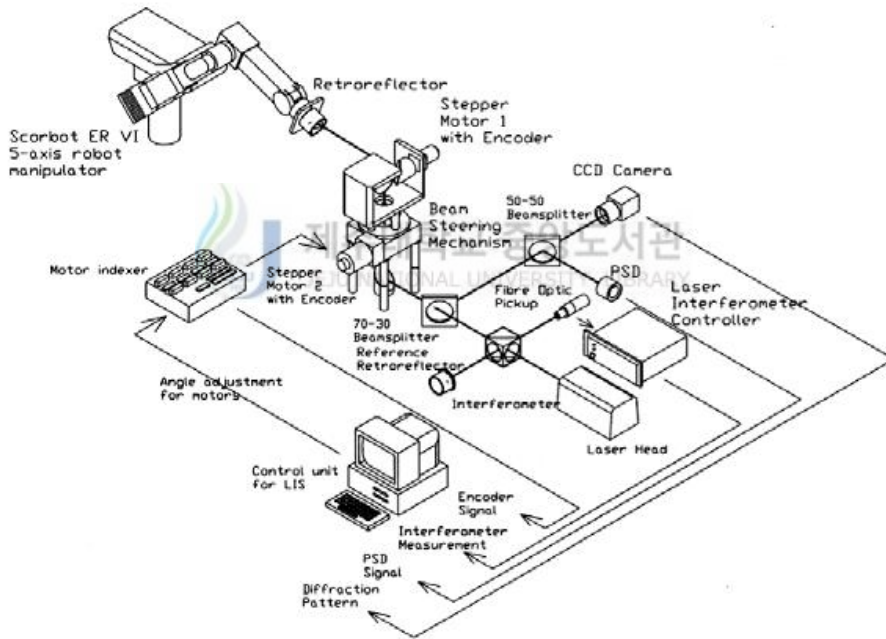


Fig. 6 Functional layout of the LIST technique

Badami 등[12]은 heterodyne 레이저 간섭계에서 정렬이 제대로 이루어지지 않았을 때 발생하는 optical mixing에 대해서 수학적으로 분석하였으며 이를 실제 실험을 통하여 검증하였다. optical mixing은 광분할기(beam splitter)가 정렬이 되지 않아 수직 및

수평 방향으로 다른 방향의 성분들이 합쳐져서 발생한다. 광분할기가 회전되어질 수 있고 리니어 모터에 의해서 반사경(retroreflector)이 움직일 수 있게 Fig. 7 과 같이 실험 장치를 구성하였다.

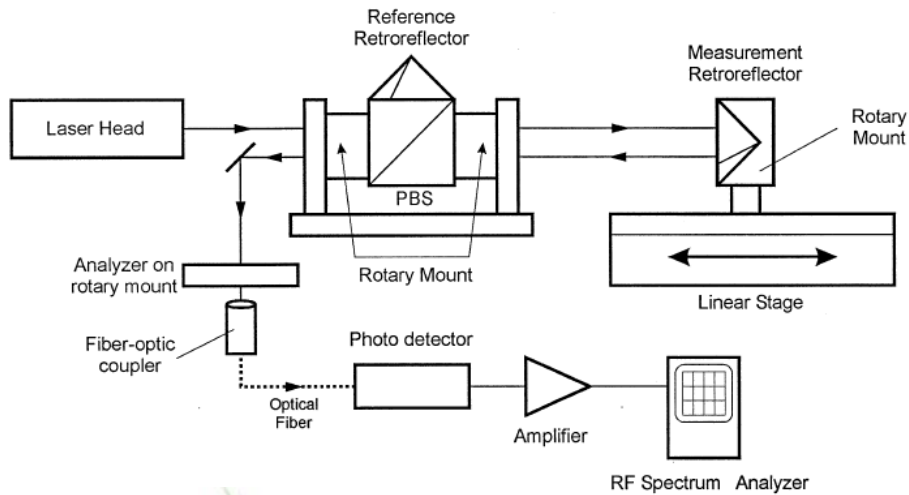


Fig. 7 Experimental of measurement system

Cosijns 등[13]은 일반적인 헤테로다인 레이저 간섭계에서 발생하는 에리 요인, Fig. 8에서 보여지는 것처럼 레이저 광의 찌그러짐(타원 편광), 두 편광의 비직교성, 레이저 빔과 광 분할기 간 정렬에서의 비틀어짐 오차, 편광기(polarizer) 정렬에서의 비틀어짐 오차, 광분할기에서의 다른 광진행 계수에 대하여 수학적으로 모델링하고 Babinet Soleil 보상기를 이용하여 이러한 수학적 모델링을 검증하였다.

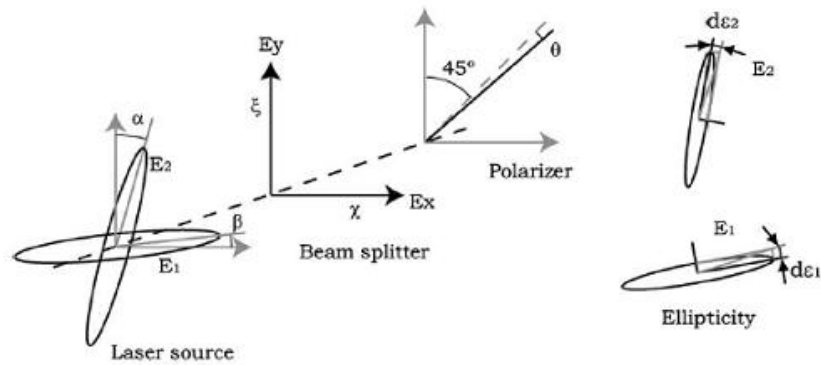


Fig. 8 Schematic representation of the parameters influencing the non-linearity in a laser interferometer

Jenq 등[14]은 CNC 다축 머신의 기하학적 오차를 수정하기 위해서 자동 정렬 레이저 간섭계를 Fig. 9 와 같이 개발하고 적용하였다.

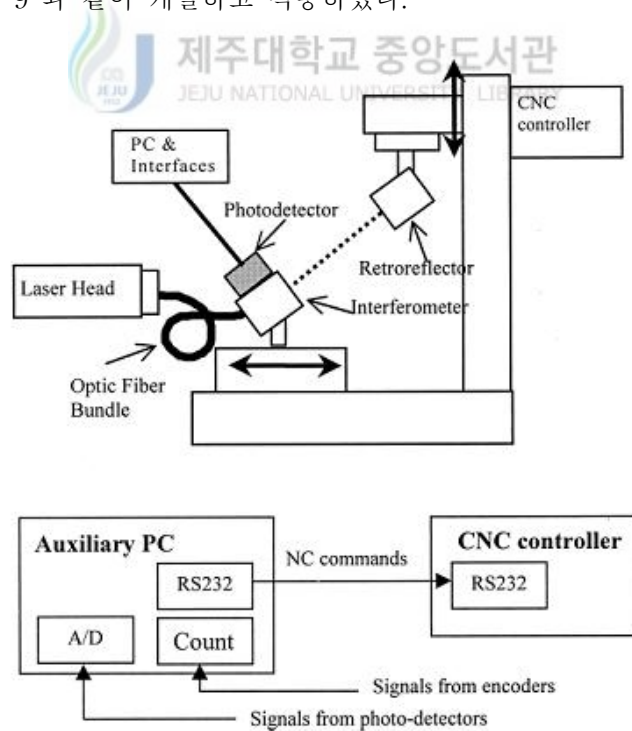


Fig. 9 Configuration of the auto-alignment laser interferometer

자동 정렬 레이저 간섭계는 HP사의 HP5529A 레이저 간섭계를 이용하여 구현되었고 반사경과의 자동 정렬을 하기 위해서 미리 입력된 대각 방향으로의 검사 위치를 CNC 머신의 반사경으로 보내어져 포토 디텍터에서 받아들인 신호를 계산하여 변위만큼 NC 코드로 작성되어 CNC 제어기로 보내고 보정이 이루어진다. 이러한 과정으로 pitch, yaw, squareness, straightness 보정이 이루어지게 된다.

1.3 연구 목표

기존의 레이저 변위 측정 장비들은 상당히 고가이며 대부분 nm 급의 변위를 측정하는데 주안점을 두고 있었다. 본 연구에서는 비교적 저가이면서 마이크로 성형기가 발생될 수 있는 수 μm 에서 수십 μm 까지 측정할 수 있는 변위 측정 시스템을 개발하는 것이다.

마이크로 성형기에서의 발생할 수 있는 변위들은 여러 가지 요인들에 의하여 발생할 수 있다. 이를 분석함으로써 보다 우수한 제품을 생산할 수 있게 된다. 마이크로 성형기에서 발생될 수 있는 변위들은 크랭크 축이 회전함으로써 편치가 움직이는 과정 동안 연속적으로 발생되어 질 것이다. 그 때의 마이크로 성형기 각 부분들의 변위를 측정함으로써 마이크로 홀을 가공하는데 있어 최적의 조건을 찾아내고, 데이터화 하는 것에 주안점을 갖는다.

마이크로 성형기의 변위를 측정하기 위해서는 우선적으로 실험실 수준에서의 변위 측정이 선행되어야 한다. 마이크로 성형기에서 발생될 수 있는 변위는 마이크로 스테이지를 통하여 재형상화하고 변위를 측정하였다. 변위의 측정 범위는 수 μm 에서 수십 μm 범위에서 실제 실험을 통하여 변위 값을 도출하는 것을 본 연구의 궁극적 연구 목표로 삼는다.

본 연구에서는 마이크로 성형기의 정밀도를 확보하고, 정밀도 향상을 목적으로 하는

수 μm 까지의 변위를 측정할 수 있는 측정 장치의 개발 하고자 한다. 이것은 주파수 안정화가 된 633 nm 의 파장을 가진 He-Ne 레이저를 이용하고, Zeeman 효과를 이용해서 두개의 주파수를 생성한다. 또한 맥놀이 주파수가 2.5MHz이며 최대 200KHz의 도플러 주파수를 측정한다. 그리고 간섭 광학계, 위상 측정기 등을 조립하고 광 검출기로부터 들어오는 전기신호를 읽고 속도 디코딩(velocity decoding) 보드를 통해서 도플러 주파수를 정형화하여 전압신호로 바로 얻음으로써 변위를 구한다.



II. 변위 센서

변위를 측정하기 위해서는 변위 센서가 필요하다. 변위 센서는 여러 가지 종류가 있으며 사용 목적과 측정 방법에 따라 센서의 종류 또한 달라지게 된다. 이 장에서는 현재까지 사용되는 변위센서를 접촉식과 비접촉식으로 나누고 대략적인 설명을 통하여 마이크로 성형기에서 가장 적합한 변위 센서가 어떤 센서인지를 판단할 수 있게 하였다.

2.1 접촉식 변위 센서

접촉식 변위 센서에는 전기 마이크로미터와 LVDT 등이 있다. 이들은 사용하기 쉽고 환경 영향을 받지 않으나 분해능이 떨어지고 응답성이 낮다. 또한 고속 변위 측정이 곤란하고 피측정물에 강성이 요구되어진다.

전기 마이크로미터(Electro micrometer)의 측정 원리는 전기적 임피던스인 전기저항, 전기용량, 전자유도 등의 회로요소를 변위에 의하여 변화하도록 접촉하고 그 회로에 발생하는 전류, 전압의 변화를 이용하여 변위를 측정한다. 측정 범위는 최대 수 밀리미터이며, 측정 분해능은 $0.02 \mu\text{m}$ 에서 수백 μm 이며 측정 범위에 따라 달라진다. 감도가 높고 감도 전환이 용이하며 검출기가 비교적 작고, 구조가 비교적 간단하며, 원격지시나 자동측정에 용이하게 이용할 수 있다. 특히 데이터 처리에 쉽게 이용할 수 있다는 장점이 있다.

LVDT(Linear Variable Differential Transformer)의 모습은 Fig. 10 과 같으며, 측정 원리는 코어(Core)와 코일(Coil)의 이동으로 말미암아 생기는 전압을 가지고 변위를 측정하는 센서이다.

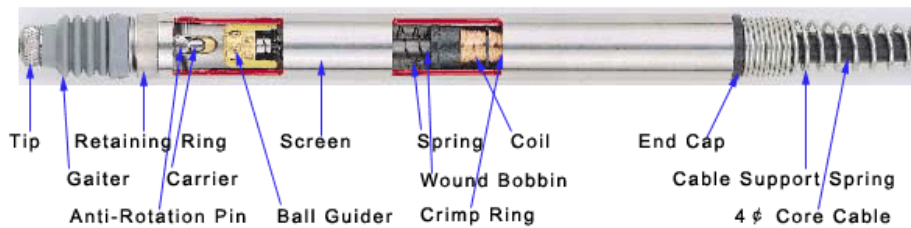


Fig. 10 Structure of LVDT

2.2 비접촉식 변위 센서

비접촉식 변위 센서에는 와전류 변위 센서, 광학식 변위 센서, 정전 용량식 변위 센서, 초음파 변위 센서 등이 있다.

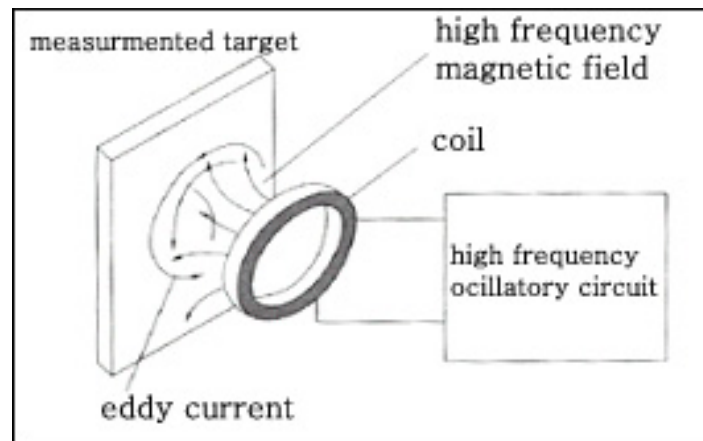


Fig. 11 Structure of Eddy Current Displacement Sensor

와전류 변위 센서는 Fig. 11 에서 보는 바와 같이 센서와 측정대상물 사이에 자계를

발생시켜 인덕턴스 변화량으로부터 변위량을 측정한다. 피측정물 표면에 물, 기름이 묻어 있어도 측정가능하나, 비금속 물질의 변위 측정은 불가능하며, 대상물의 재질 차이에 의한 영향을 받는다. 분해능은 $0.1 \mu\text{m}$ 이며, 응답성은 40 kHz 이다. 결론적으로 nm 측정에는 곤란하다고 볼 수 있다.

광학식 변위 센서는 Fig. 12 과 같이 삼각 측량법을 이용한다. 레이저 광을 피측정물에 쏘여 그 반사광의 이동량으로부터 변위량을 측정한다. 측정 직경 크기가 작기 때문에 미소한 피측정물의 변위 측정이 가능하며, 피측정물과의 거리를 10 nm 정도 띄울 수 있다. 분해능 $0.01 \mu\text{m}$ 이며, 고속 응답성을 가지고 있다. 피측정물의 반사율이나 공기 유동에 의한 영향을 받는다. 직경 크기가 작아서 표면 거칠기의 영향을 받는다. 정밀 스테이지의 위치제어 같은 정적변위 측정에 적합하지만 측정면이 끊임없이 이동하는 동적변위 측정에는 부적합하다.

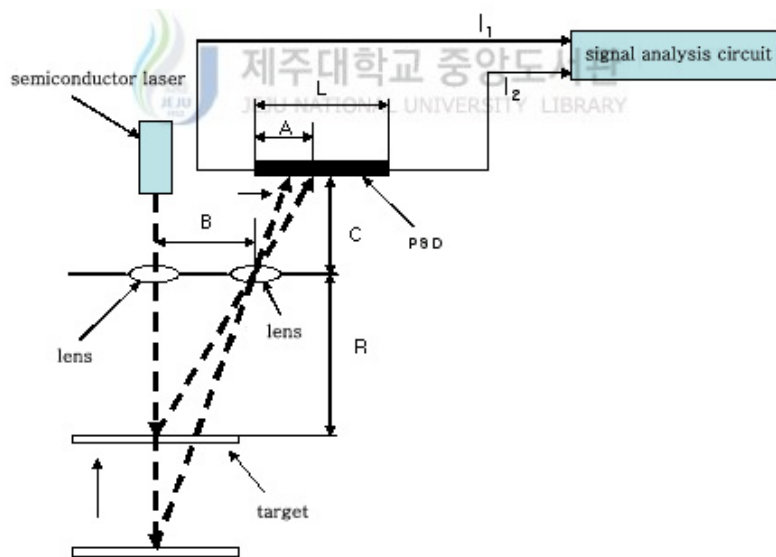


Fig. 12 Measurement Principal of Laser Displacement Sensor

마이켈슨 간섭계는 Fig. 13에서 보는 바와 같이 동일 레이저광을 두 개로 분리해 전파시켜 각각의 전파경로에 길이 차이가 있으면 수신부에 검출되는 두광 사이에 위상차

로 인해 간섭무늬가 생긴다. 변위는 이 간섭 펄스(pulse)의 개수로 측정하며, 식은 다음과 같다. $\Delta\psi = 4\pi \cdot (L_2 - L_1) / \lambda$ 분해능은 0.3 nm (HP사, VMEbus 형), 0.62 nm (Zygo사, ZMI-1000형)이며, 10~100 m 정도 장거리 측정 가능하다. 간섭계에는 단일 주파수를 이용하여 변위 측정하는 호모다인 레이저 간섭계와 지만 효과(Zeeman Effect) 혹은 광분할 방식(AOM : Acousto-Optic Modulator)를 이용하여 이중주파수를 발생하여 거리 측정하는 헤테로다인 레이저 간섭계가 있다. 측정 영역이 크고, 측정 분해능이 높으며, 측정대역이 넓고, 아베의 오차를 줄일 수 있으며, 평면거울을 사용할 경우 이차원 및 삼차원 측정이 가능하고, 각도 및 진직도 측정이 가능하다.

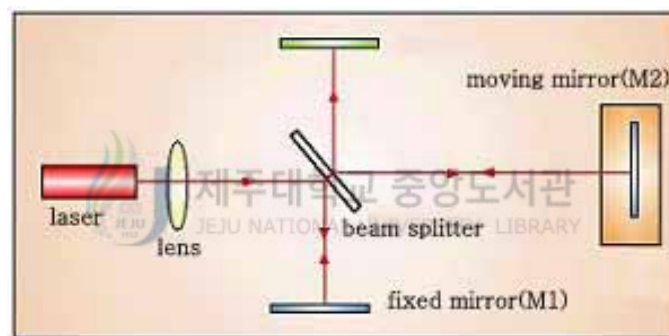


Fig. 13 Michelson Interferometer

패브리 페로(Fabry-Parot) 간섭계는 Fig. 14 에서와 같이 간섭계의 레이저에서 투과된 빛은 움직이는 거울(M1)을 지나 최초 거울(M2)에 와서 닿을 때 투과되는 경로와 반사되는 경로를 따르게 되고 이와 같은 과정은 움직이는 거울(M1)과 거울(M2) 사이에서 무수히 많이 일어나게 된다. 그림의 모든 경로를 간단히 A와 B로 대표되는 두 경로의 중첩으로 대변할 수 있고 $N(N=0, 1, 2, 3, \dots)$ 의 반사 회수를 거쳐 거울(M2)를 빠져나가는 경로를 A라고 하면 이와 다른 반사 회수 N' 의 과정을 지나온 경로를 B라고 할 수 있다. 이 A와 B의 경로가 스크린 위의 임의의 점 S에서 만날 경우 경로차에 대

한 파장 λ 의 위상 관계에 의해 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)에서와 같은 간섭 무늬를 관찰할 수 있다. 동일하게 움직일 수 있는 거울(M2)을 전후로 움직여 경로차의 변화를 주든지 아니면 거울(M1)과 움직이는 거울(M2)사이 에 매질을 삽입하여 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)에서와 같이 변위를 관찰할 수 있다. 이론적으로 수 백 μm 의 측정영역을 수십 pm의 정확도로 측정할 수 있으며, He-Ne 레이저의 파장을 직접 이용하여 변위 측정이 가능하다.

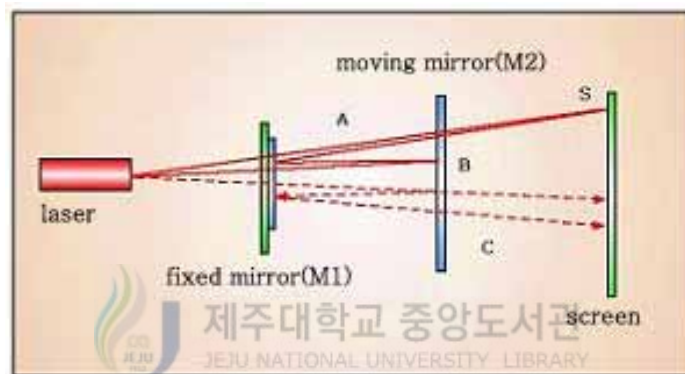


Fig. 14 Febry-Perot Interferometer

Fig. 15는 정전용량식 변위 센서로써 센서와 피측정물 사이에 고주파 전계를 발생시켜 콘덴서(정전용량)의 변화로부터 변위를 측정한다. 금속 피측정물일 때 재질 차이에 의한 영향은 없다. 점측정이 아니고 면측정이므로 표면상태에 의한 영향은 없다. 금속 재료 외 유리, 세라믹, 고무라도 약간만 보정하면 측정가능 전계를 발생시키기 때문에 센서와 피측정물의 거리를 근접시켜야 하고, 피측정물 표면에 물이나 기름이 묻어 있으면 측정이 곤란하다. 분해능은 $0.001 \mu\text{m}$ 정도이며, 고 응답성을 가진다. 정밀도가 높고, 사용하기 쉬우며, 응용이 자유롭다. 동적 정밀 측정에 가장 적합하다.

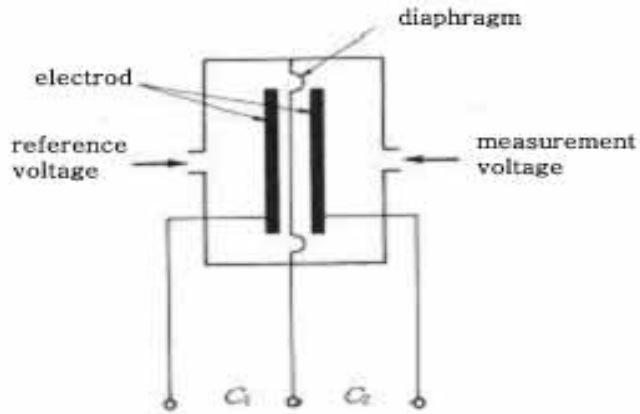


Fig. 15 Capacitive Displacement Sensor

초음파 변위 센서의 내부 구조는 Fig. 16 과 같으며, 압전소자(piezoelectronic material)의 공진을 이용하여 초음파를 발생하여 물체에 반사되어 오는 초음파를 검출하여 시간 지연차로 변위를 측정한다. 측정 범위는 0.5~10 mm이며, 정밀도는 0.1 mm 이하이다. 그러나 온도, 습도에 대한 보정 필요하고, 발진 방향성 고려해야 한다.

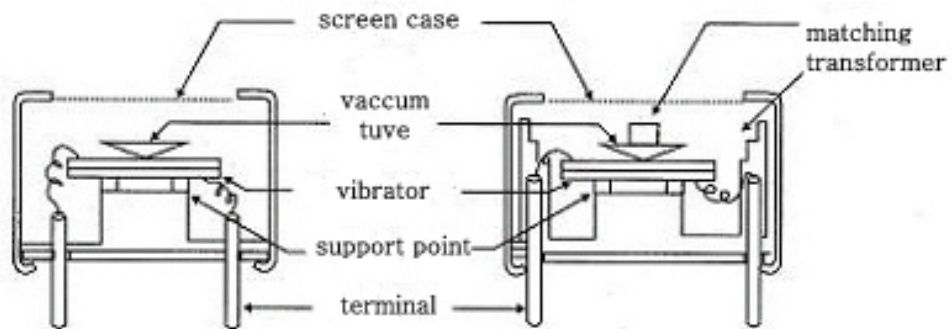


Fig. 16 Ultrasonic Displacement Sensor

지금까지 설명한 변위 센서들의 특징을 정리하여 비교하면 아래의 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of characters each displacement sensor

| Contents | Eddy current | Optical | Ultrasonic | Contact |
|---------------------------------|--------------|------------|-----------------|-----------------|
| Measurement body | Metal | Everything | Most everything | Most everything |
| Measurement distance | Short | Normal | Long | Short |
| Precision | High | High | Low | Low |
| Response rate | Past | Past | Slow | Slow |
| Response of measurement surface | Strong | Normal | Normal | Weak |
| Effect of color | No | Yes | No | No |

위 표에서 도시된 바와 같이 변위를 측정하는 방법에는 여러 가지 방법들이 있다. 그러나 마이크로 성형기라는 특정적인 상황을 고려할 때 비접촉이면서 비교적 고속이며 고정도의 측정이 가능한 레이저 간섭계가 적합하다고 판단된다. 레이저 간섭계는 마이켈슨 간섭계(Michelson inteferometer)의 원리를 이용한 방법으로 이는 하나의 동일한 레이저로부터 나온 광원을 광분할기에 의해 두 개의 별도 광속으로 분리한 후, 고정 목표물과 이동 목표물에 각각 반사된 광의 가간섭성을 이용하여 이동 목표물의 거리를 측정한다[3,4].

2.3 레이저 간섭계

레이저 간섭계에는 단일주파수를 이용하는 호모다인 간섭계(homodyne interferometer)와 두개의 주파수를 이용하는 헤테로다인 간섭계(heterodyne interferometer)가 있다[5]. 본 연구에서는 헤테로다인 간섭계를 이용하여 변위를 측정하고자 한다.

간섭현상을 이용한 레이저길이 측정기는 nm 수준의 길이측정에도 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 호모다인 레이저 간섭계가 헤테로다인 레이저 간섭계보다 비선형오차가 적었으나, 현재는 필터 등의 개발에 인하여 헤테로다인의 비선형오차가 많이 줄어들었다.

호모다인 레이저 간섭계는 단일 광원이기 때문에 광원제작이 용이하고 높은 분해능을 가지며 신호처리가 간단하여 실험실 차원에서 쉽게 구현하여 이용할 수 있다. 간섭무늬의 세기 자체를 신호로 이용하기 때문에 여러 가지 노이즈에 노출되기 쉽고 광학계의 정렬상태에 따라 민감한 반응을 보인다. Fig. 17은 호모다인 레이저 간섭계의 기본 원리를 나타낸다. 45° 방향으로 선형 편광된 단일 주파수의 광속이 광속분리기(BS)에서 둘로 분리되어 고정코너큐브(fixed corner cube, 기준팔)와 이동코너큐브(moving corner cube, 측정팔)로 향한다. 이 두 빛은 각각 코너큐브에서 반사된 후 다시 BS에서 합쳐지면서 간섭되어 그 간섭신호의 세기가 광검출기(photodiode)에서 얻어진다. 고정코너큐브에서 반사된 빛은 $\lambda/4$ 판을 통과하면서 원형편광으로 바뀌는데 이것은 검출기의 두 신호 사이에 90°의 위상차를 주기 위해 사용된다. BS에서 합쳐진 두 빛은 PBS에서 수직, 수평 선형편광 방향으로 분리된다. 여기서 X성분은 PBS에서 반사된 성분, Y는 통과된 성분을 의미한다.

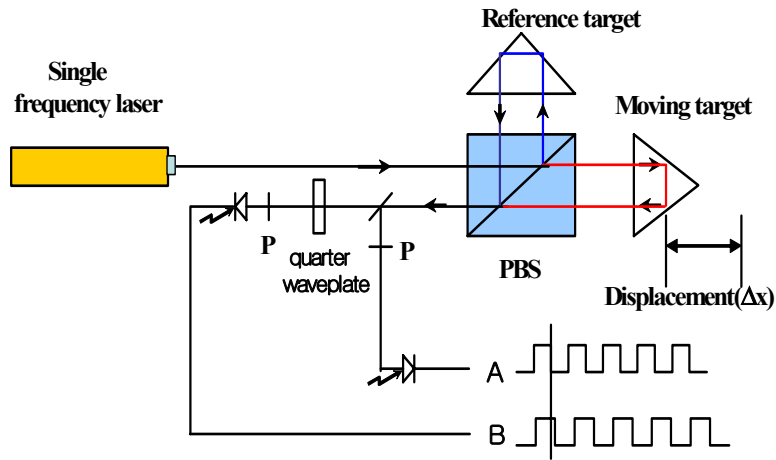


Fig. 17 Schematic diagram of homodyne interferometer

헤테로다인 레이저 간섭계는 두 개의 주파수를 가진 레이저 광원이 필요하며 두개의 광원의 맥놀이 주파수 사이의 위상 차이를 측정하여 이동 목표물의 거리를 측정할 수 있다. 이는 이동 목표물의 이동에 따른 도플러 편이(doppler shift)에 따른 주파수의 변화로 계산할 수 있다. 그리고 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. 두개의 주파수를 생성하는 방법에는 Zeeman 효과를 이용하는 방법과 음향편향장치(acousto-optic modulator)를 이용하는 방법 등이 있다[3,4,5]. 그러나 헤테로다인 간섭계는 단일 주파수를 사용한 호모다인 간섭계에 비해 우선 외부 노이즈에 강하고 광학 부품의 정렬이 쉽다는 장점 때문에 상용 레이저길이 측정기의 주류를 이루고 있는 방법이다.

Fig. 18은 헤테로다인 간섭계를 나타내고 있다. 레이저에서는 서로 직교하고 선형편광을 가지는 두 주파수의 레이저가 발진된다. 이 레이저 광속은 광분리기에 의해 둘로 분리되는데, 이는 기준광과 측정광으로 사용된다. 광분리기에 의해 반사 분리된 기준광은 레이저 편광축에 대하여 45°로 놓은 편광판을 통과한 후 광 검출기에 입사하게 된다. 이러한 광 검출기의 출력은 두 레이저 광속의 간섭신호로 검출되게 된다. 한편,

광분리기를 통과한 레이저 광속은 편광광속분리기에 의해 완벽하게 둘로 분리되어 주파수 혼합(frequency mixing)없이 일반적으로 코너큐브 프리즘(corner cube prism)을 사용하는 거울로 각각 진행하게 된다. 이 레이저 광속은 고정 거울과 이동 거울에서 각각 반사된 후 다시 편광 광속 분리계에서 혼합되어 간섭된다. 이러한 광검출기의 출력은 두 레이저 광속의 간섭신호로 검출되는데, 이는 위상측정에 있어 측정신호로 사용된다.

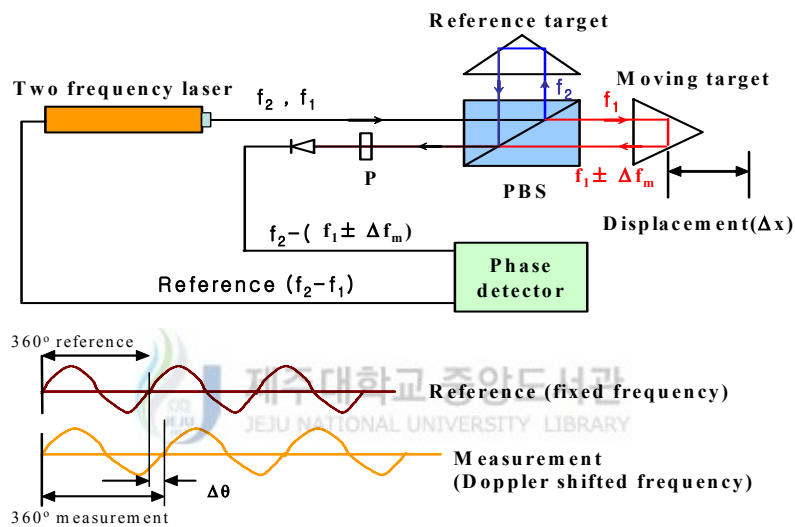


Fig. 18 Schematic diagram of heterodyne interferometer

본 연구에서 개발된 헤테로다인 간섭계의 광원은 Zeeman 효과를 이용하여 선형 편광이 서로 수직하며 편광분리기(Polarized Beam Splitter : PBS)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 얻어

진 측정 신호(V_M)는 다음과 같다[4][5].

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

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

여기서 A, B 는 진폭, n 은 공기굴절률이며 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.

Table 2 는 지금까지 설명한 호모다인 레이저 간섭계와 헤테로다인 레이저 간섭계의 장단점을 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 거의 모든 면에서 헤테로다인 레이저 간섭계가 우수한 성능을 가지고 있음을 알 수 있다. 본 연구에는 이러한 자료를 토대로 헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 변위 측정 시스템을 구성하게 되었다.

Table 2 Comparison of homodyne and heterodyne laser interferometer

| | Homodyne | Heterodyne |
|------------------------------|------------|-------------|
| Always measuring | No | Yes |
| Direction sensing | Quadrature | Always |
| Quadrature output | Available | Available |
| Error detection | Ambiguous | Unambiguous |
| Intensity sensitivity | Yes | No |
| Sensitivity to ambient light | Yes | No |
| Multi-axis | Limited | Yes |
| Complexity of receiver | Complex | Simple |
| Easy to align | No | Yes |

Ⅲ. 실험 장치 및 방법

3.1 도플러 편이 측정 장치

마이크로 성형기의 성형 가공시 발생하는 미세 진동 및 변위를 전체 시스템과 각 모듈별로 측정 하여 가공의 정확도를 높이는 목적으로 측정을 사용한다. 구성요소로는 He-Ne 안정화 레이저, 간섭계, 고속 데이터 획득 시스템, 데이터 분석 소프트웨어 등이다.

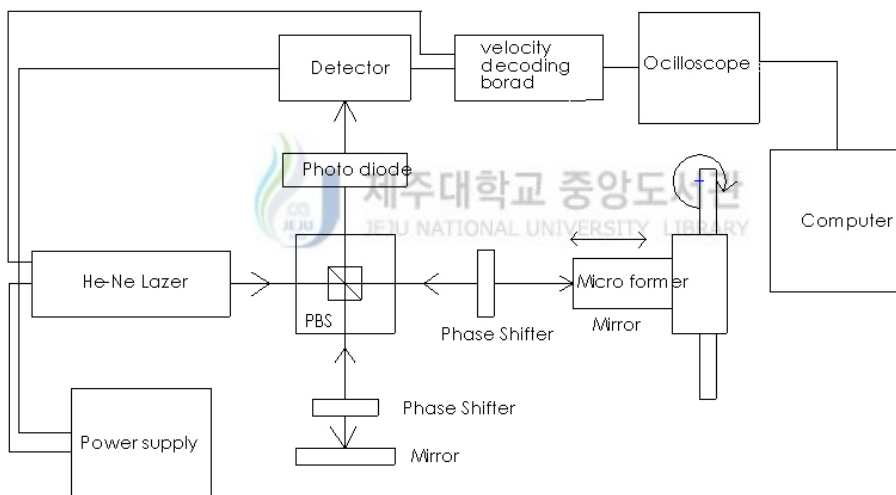


Fig. 19 Schematic diagram of measurement system

Fig. 19 는 미세 변위 측정을 위한 레이저 측정시스템의 구성을 보여주고 있다. He-Ne 레이저에서 나온 두 수직, 수평방향의 레이저가 PBS를 거쳐 두 방향으로 나누어진다. 수평방향 성분은 고정된 미러 쪽으로, 수직성분은 마이크로 포머 쪽으로 향하게 된다. 마이크로 포머 쪽의 미러에 반사된 직성분은 위상 편이(Phase Shifter)에 의해 위상이 90° 바뀌게 된다. 위상이 바뀐 레이저는 광검출기에서 검출되어진다. 마찬가지로

지로 PBS에서 나누어진 수평방향성분도 90°도 위상에 변하여 광 검출기(Photo diode)에서 검출되어진다. 속도 디코딩 보드(velocity decoding board)에서는 기준이 되는 신호를 비교하여 한 신호로 내보내어주게 된다. 데이터 획득보드에서 아날로그를 디지털화 하여 검출된 파형을 재생하여 그 면적을 적분하여 마이크로 포머의 변위를 측정할 수 있게 된다. 변위를 측정하기 위해서는 도플러 편이를 측정해야 한다. 도플러 편이의 측정을 위하여 Fig. 20 과 같이 실험 장치를 구성을 하였다.

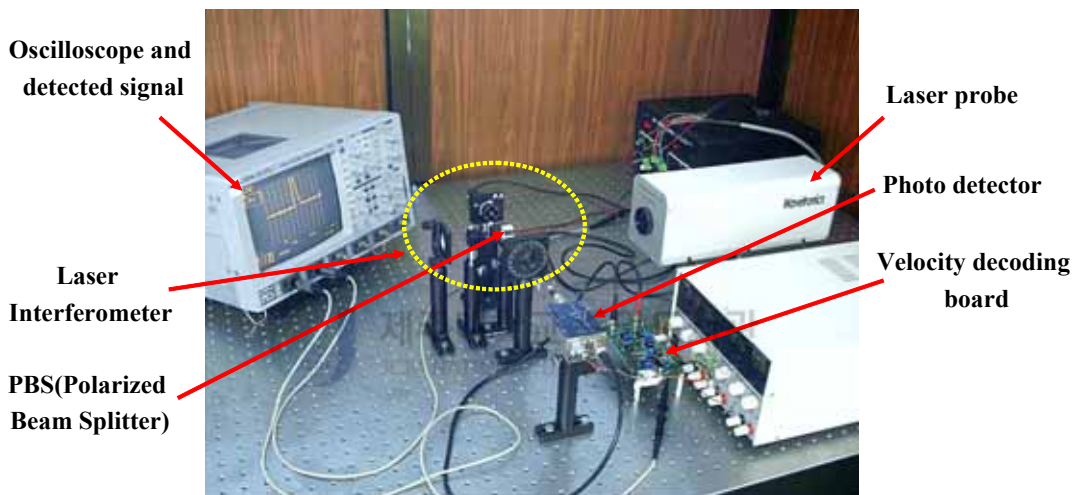


Fig. 20 Developed laser interferometer and velocity decoding board

레이저 광원과 광학계를 광학 테이블 위에 올려놓고 수동으로 정렬 작업을 수행하였다. 측정 대상에 아무런 입력이 없을 때의 전기 신호를 오실로스코프로부터 측정하면서 편광판 및 반사경을 정렬 하였다. 또한 얻어진 신호는 속도 디코딩 보드를 통하여 주파수를 전압으로 곧바로 변환하여 도플러 신호를 관찰할 수 있게 하였다.

실험에서 구성한 속도 디코딩 보드는 한쪽방향만을 고려하여 설계되었다. 왜냐하면 마이크로 성형기에서 만약 X방향으로 선형적으로 이동한다고 가정한다면, Y방향은 고려할 필요가 없기 때문에 속도 디코딩 보드에서는 한쪽방향신호만을 받아들이고 나머

지 방향의 성분들은 제거시켰다.

Fig. 21 는 속도 디코딩 보드의 블록 선도를 나타내며 Fig. 22 는 개발된 보드를 나타낸다.

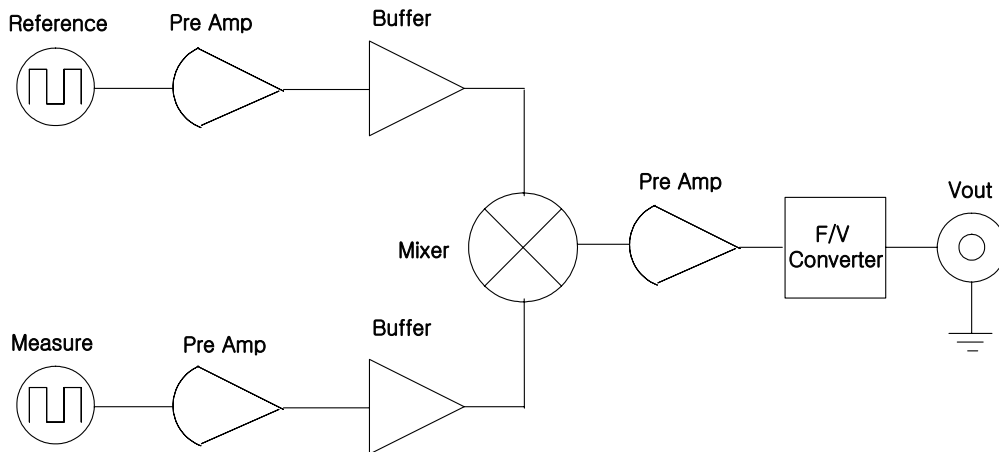


Fig. 21 Block diagram of velocity decoding board

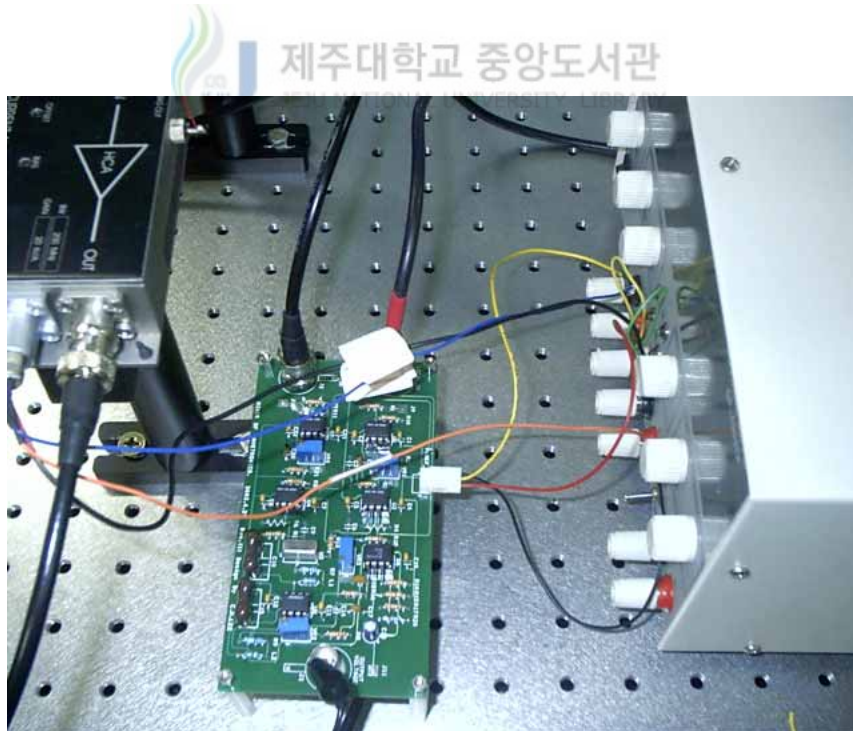


Fig. 22 Developed velocity decoding board

속도 디코딩 보드는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 즉 REF의 입력부와 측정부분의 입력부로 나눌 수 있다. Fig. 23의 블록 다이어그램에서 보는 것처럼 REF에서 들어오는 신호와 측정부분에서 들어오는 신호를 증폭시키고 mixer를 통하여 합친 후 F/V Converter(Frequency to Voltage Converter)로 보내준다. F/V Converter의 역할은 이 두 신호를 비교하여 그 위상차를 출력하는 것이다. 즉, F/V Converter에서는 두 신호에 대한 위상차를 전압값으로 출력시키게 된다.

3.2 도플러 주파수의 측정

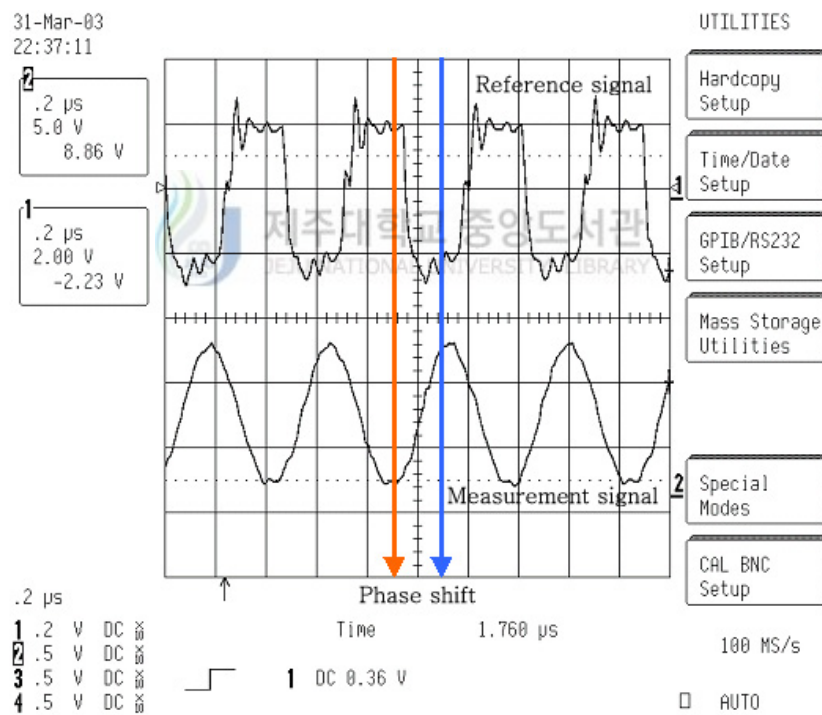


Fig. 23 phase shift of reference and detected signal

도플러 주파수의 측정은 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. He-Ne 레이저에서 나온 신호를 오실로스코프의 CHANNEL 1에 연결하고 간섭계를 거쳐 광검출기로 얻어

진 신호를 오실로스코프의 CHANNEL 2에 연결하여 측정면 Fig. 23 과 같이 나오게 된다. 이 때 CHANNEL 1에서 나오는 기준 신호와 CHANNEL 2에서 나오는 신호 사이에 위상천이(phase shift)가 발생함을 알 수 있다. Fig. 23에서 나타낸 위상천이는 변위를 주었을 때 REF는 변화가 없지만 간섭계에서 들어오는 신호는 진동에 따른 미세 변위에 비례하여 위상천이가 생기는 것을 보여주고 있다. 진동이 크면 클수록 위상천이는 더 크게 발생된다. 오실로스코프에 나타나는 신호가 부드럽지 않은 것은 레이저의 안정화와 주위환경, 즉 공기의 유동 및 굴절률 등에 의하여 노이즈가 발생한 것이다.

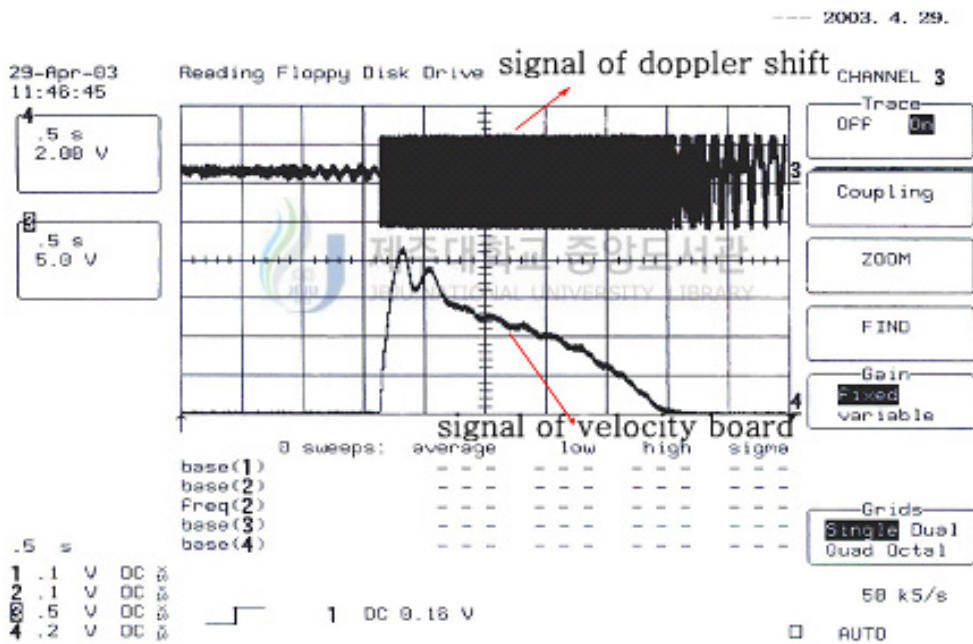


Fig. 24 doppler signal and signal-processed signal by velocity decoding board

그러나 매우 미세한 변위에 대해서는 time delay가 워낙 작기 때문에 육안으로는 위상천이를 분별할 수 없다. 얻어진 신호로부터 변위를 계산하기 위해서는 기준신호에 대한 측정신호의 차만이 필요하다. 따라서 두 신호에 대해서 속도 디코딩 보드를 이용하

여 도플러 신호를 얻음으로써 이를 구현할 수 있다.

Fig. 24 는 REF(CHANNEL 1)와 간접계 신호(CHANNEL 2)에서 발생된 위상천이를 속도 디코딩 보드를 이용하여 도플러 신호를 추출한 것을 나타낸다. 오실로스코프의 CHANNEL 3에는 REF와 간접계 신호의 위상천이를 신호처리 하여 도플러 신호를 나타나게 하였고, CHANNEL 4는 CHANNEL 3의 신호를 속도 디코딩 보드의 F/V Converter에 의해 신호 처리된 것을 나타나게 하였다. CHANNEL 4에서 보여지는 신호는 변위가 발생되었다가 정지해 가는 모습을 보여주고 있다.

3.3 미세 변위 측정 장치

실험을 수행하기 위하여 미세 변위를 발생시킬 수 있는 장치로 마이크로 스테이지를 선정하였다. 실험에 이용된 마이크로 스테이지는 미국의 Parker사에서 제조한 MX80 스테이지이다. 이 스테이지는 1 펄스 당 100 나노미터를 이동하게 설계되어 있다. 측정하고자 하는 변위가 수 마이크로미터에서 수십 마이크로미터이기 때문에 1 펄스 당 100 나노미터의 정밀도라면 수 마이크로미터 급의 변위를 발생시키기에는 충분한 정밀도라고 판단된다. 또한 보다 정확한 측정과 오차의 요인들을 제거하기 위하여 모든 변위 측정 실험은 광학테이블 위에서 실험되었다.

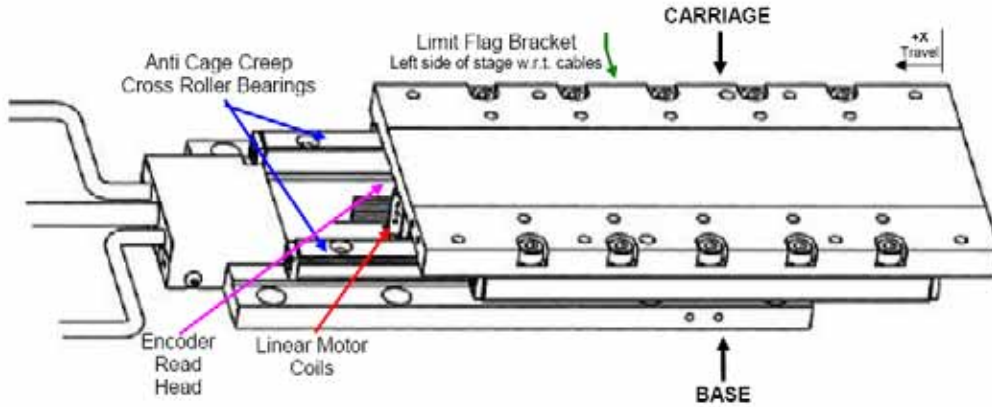


Fig. 25 Schematic of MX80 Stage

마이크로 스테이지의 모습은 Fig. 25 에 표시하였다. 마이크로 스테이지는 펄스를 인가함으로써 변위가 발생하는 형식을 취하며 보이는 바와 같이 베이스를 광학테이블 위에 고정하고, 이동 거울을 마이크로 스테이지의 상부에 장착함으로써 거울을 움직일 수 있게 하였다. 마이크로 스테이지의 자세한 사양은 Table 3에 표시하였다. 마이크로 스테이지의 사양을 분석한 결과 거울을 장착했을 때도 거울의 하중을 충분히 견딜 수 있고 원하는 변위를 발생시키는데 아무런 문제가 없음을 확인하였다. 또한 실험을 통해서도 가능하다는 것을 확인하였다.

Table 3 Specification of MX80 stage

| | |
|------------------------------|------------------------------------|
| Travel | 50mm |
| Motor Model | 4Pole |
| Normal Load Capacity | 8kg |
| Maximum Acceleration | 5Gs |
| Maximum Velocity | 300mm/sec |
| Maximum resolution | 0.1 μm |
| Positional Accuracy | 15 μm (50mm travel) |
| Bi-directional Repeatability | +/-0.8 μm (50mm travel) |
| Peak Force | 12N |
| Continuous Force | 4N |
| Carriage Weight | 213g |
| Unit Weight | 475g |



실제 마이크로 스테이지와 레이저 간섭계를 수동으로 정렬한 다음의 모습을 Fig. 26에서 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 마이크로 스테이지와 광학테이블 간의 고정성이 원활하지 않아 외주를 통하여 광학 테이블과 마이크로 스테이지 사이를 고정할 수 있는 플랜트를 제작하여 마이크로 스테이지를 광학 테이블 위에 고정 장착하였다. 또한 도플러 주파수를 측정했던 실험에서 썼던 포토 디텍터는 추후 이동이 가능한 레이저 측정 장치에 적합하지 않아 Fig. 26에서 보는 것처럼 보다 소형인 것으로 대체하여 실험하였다. 광 검출기는 도플러 주파수를 측정했던 실험과 동일한 대역을 측정할 수 있는 장치로 재구성 하였다.

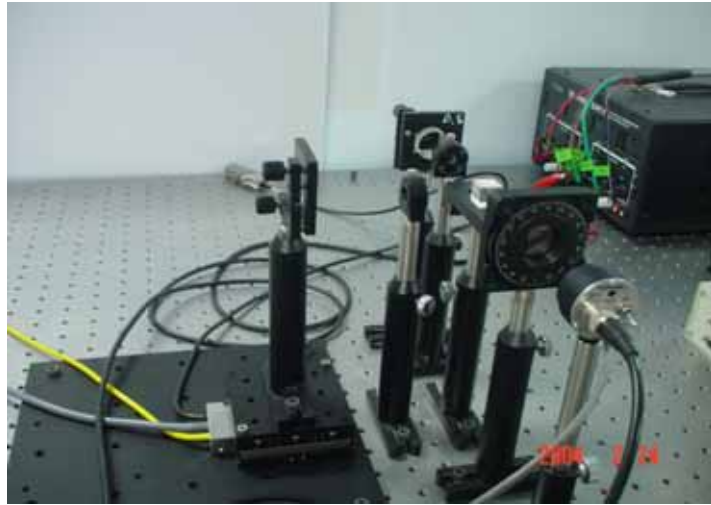


Fig. 26 Laser interferometer and micro stage

실험 장치를 재구성 한 후 마이크로 스테이지와 레이저 광원, 그리고 광학계를 광학 테이블 위에 올려놓고 수동으로 정렬작업을 수행하였다.

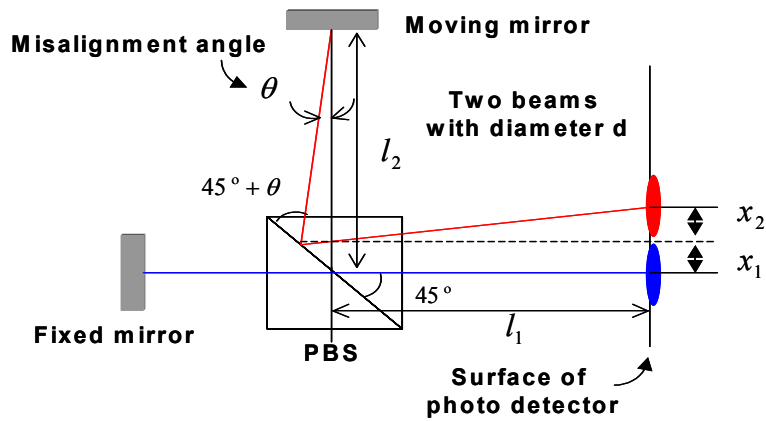


Fig. 27 Misalignment between two beams

정렬할 때의 중요한 요소는 레이저광의 초점이 일치되는 것인데, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 27 과 같고 수학적으로 계산하면 다음과 같다.

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

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

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

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

식 (5), (6)을 통하여 고정거울과 이동거울에서 들어온 거리를 알 수 있으며, 식 (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 랩뷰로 받아들이게 하였다.

랩뷰는 보통 데이터를 받고 분석하는 프로그램으로써 본 연구에서는 속도 디코딩 보드에서 들어온 신호를 받고, 그 신호를 분석하는데 쓰였다. 프로그램은 두 가지 모델로 짜여졌다. 하나는 속도 디코딩 보드에서 출력되는 신호를 받아와서 화면에 출력하고 데이터화 시켜서 저장하는 프로그램, 다른 하나는 저장된 데이터를 읽어와서 적분된 그래프 화면에 출력시켜 적분된 값을 얻고, 그 적분값에서 변위값을 도출하는 프로그램이

다.

데이터를 받고 저장시키는 랩뷰 프로그램의 GUI는 차트와 그래프를 통하여 현재 진행되는 상황과 이전의 상황을 비교할 수 있도록 구성되었으며 데이터의 저장은 Fig. 28 에서 보여지는 논리의 순서로 저장시켰다.

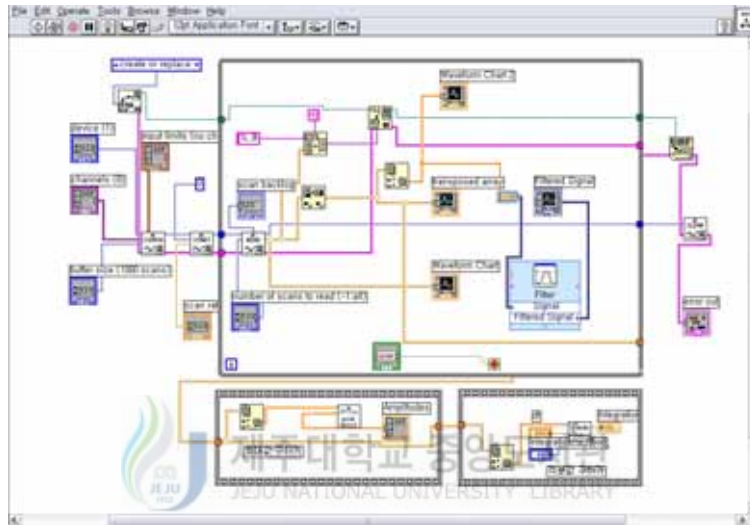


Fig. 28 Diagram of data acqirement program in LabView

데이터 저장 프로그램을 통하여 받은 데이터들은 데이터를 화면에 그래프로 표시하고 그 그래프를 적분하여 변위를 구하는 프로그램으로 보내주게 된다. Fig. 29 는 실제 랩뷰 프로그램이 데이터를 어떻게 화면에 표시하는지 논리적인 순차를 보여주고 있다.

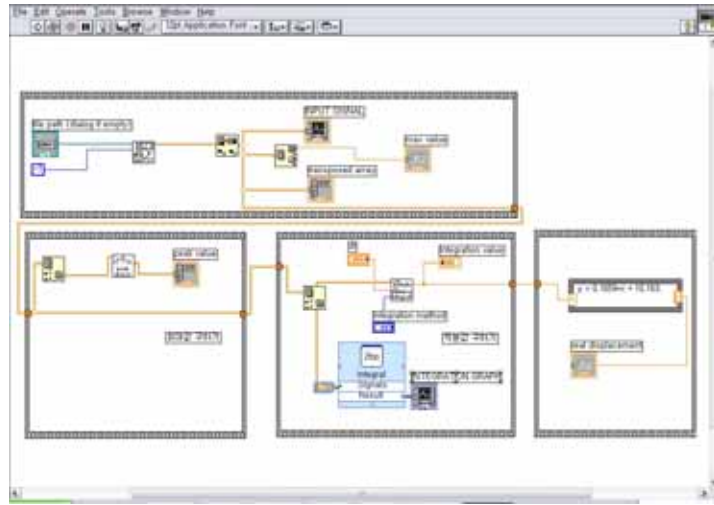


Fig. 29 Diagram of data analysis program in LabView

3.4 미세 변위 측정



실험에 앞서 짜여진 랩뷰 프로그램이 원활히 작동하는지와 마이크로 스테이지가 변위를 발생시킬 때 어떤 그래프의 모습을 출력하는지 알아보기로 하였다.

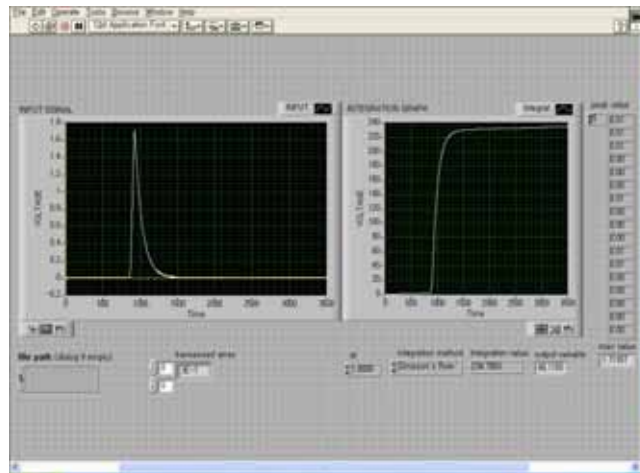


Fig. 30 Measurement 50 μm in 10 mm/s in LabView

50 μm 의 변위를 발생시켰을 때의 모습을 Fig. 30 에서 보여주고 있다. 변위가 비교적 작기 때문에 상부가 뾰족한 형태를 취하고 있으면 적분값은 가파른 모습을 보여주고 있다.

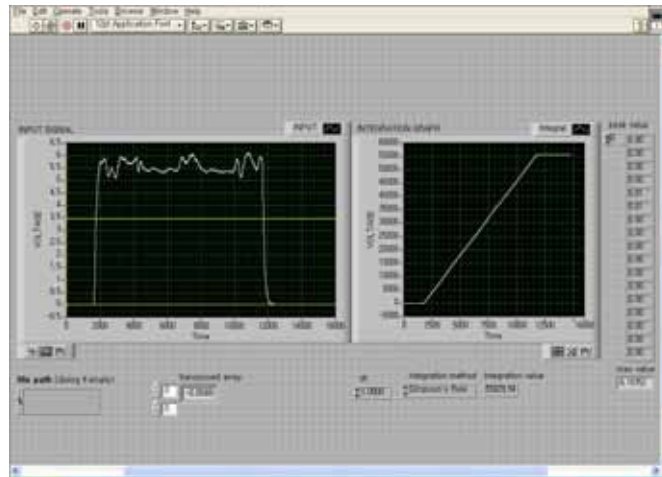


Fig. 31 Measurement 1000 μm in 1 mm/s in LabView

Fig. 31는 비교적 큰 변위인 1000 마이크로미터를 주고 측정 한 모습이다. 그래프에서 보여지는 바와 같이 마이크로스테이지가 비교적 장시간에 걸쳐 이동하기 때문에 비슷한 전압값을 일정시간 유지하고 있는 모습을 볼 수 있다. 하지만 전압값이 조금씩 흔들리는 모습은 실험한 조건이 진공이나 클린룸이 아니었기 때문에 그런 흔들림이 발생하였으며, 또한 마이크로 스테이지 자체의 변수값인 계인값들에 의한 영향으로 판단된다.

위 실험을 통하여 스테이지가 변위를 줬을 때 정확하게 작동하고 있음을 확인하였고 짜여진 랩뷰 프로그램 또한 올바른 작동을 하고 있다고 판단하였다.

실험은 크게 세 가지로 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 보정식(calibration equation)을 가지고 임의의 변위를 발생시키고 난 후 그 변위의 값을 계산하는 실험이다.

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1 미세 변위 측정 시스템의 정밀도 분석

도플러 주파수를 측정하는 실험에서 CHANNEL 3에서 나온 신호는 Fig. 24 에 보여지는 것과 같이 변위 발생 초기 간격이 매우 좁다. 그러나 변위 발생 후기가 될 수록 간격이 커짐을 것을 볼 수 있다. 이것은 위상천이의 발생이 커졌다가 서서히 줄어들음을 의미한다. CHANNEL 4는 CHANNEL 3과 다른 방식으로, 즉 Y축으로 신호를 처리한 것을 보여주고 있다. 측정자는 CHANNEL 4의 신호를 이용하여 최대 전압을 구하고 변위의 크기를 계산할 수 있다.

정렬이 완료된 측정 장치에서 레이저 간섭계의 정상 작동 여부를 검증하기 위하여 이동 목표물에 대하여 임의의 입력을 가하여 적절한 신호가 오실로스코프로부터 검출이 되는지 여부로써 판별하였다. 이동 목표물에 임의의 입력을 가했을 때 기준 광 신호와 광 검출기로부터 검출된 광 신호는 식 (1)과 식 (2)에서와 같이 코사인 형태를 가진다. 이는 각 신호가 가지는 절대적인 값으로써 변위를 구하기 위해서는 단지 식 (3)의 두 신호의 위상차만이 필요하다. Fig. 26은 기준 신호와 측정 신호에 대한 위상차, 즉 도플러 편이 주파수를 전압값으로 속도 디코딩 보드를 이용하여 정형화시켜서 나타낸 것이다. 세로축은 도플러 주파수에 의한 전압을 나타내고 가로축은 시간을 나타낸다. 임의의 입력이 가해졌을 때만 주파수의 편이를 일으키고 입력이 없을 경우에는 변화가 없음을 관찰할 수 있다.

Fig. 32 는 임의의 진동을 주고난 후 정상상태로 돌아가기 전 연속하여 진동을 주었을 때의 파형이다. Fig. 32 에서처럼 파형 중간에 다시 상승하는 파형을 볼 수 있다. 이는 이전 진동이 정상상태로 되돌아 오기 전에 다시 변위가 발생함에 따라 기존의 변위와 다음 변위의 크기가 합해져 더 큰 모양의 진동이 발생한 것을 나타낸다.

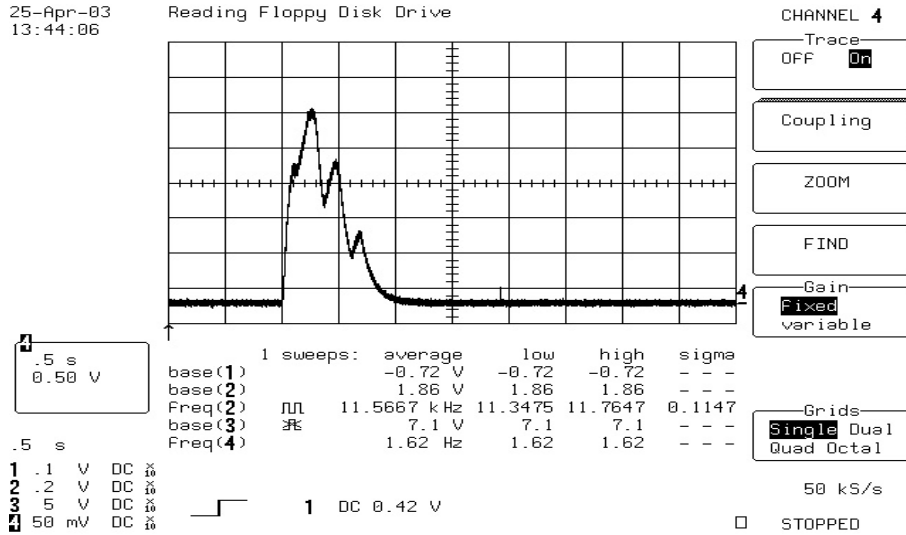


Fig. 32 Detected signal under continuous vibration

Fig. 33 은 일정 시간의 간격을 주고 반복된 변위를 발생시켰을 때의 속도 디코딩 보드에서 출력되는 전압값을 나타내고 있다.

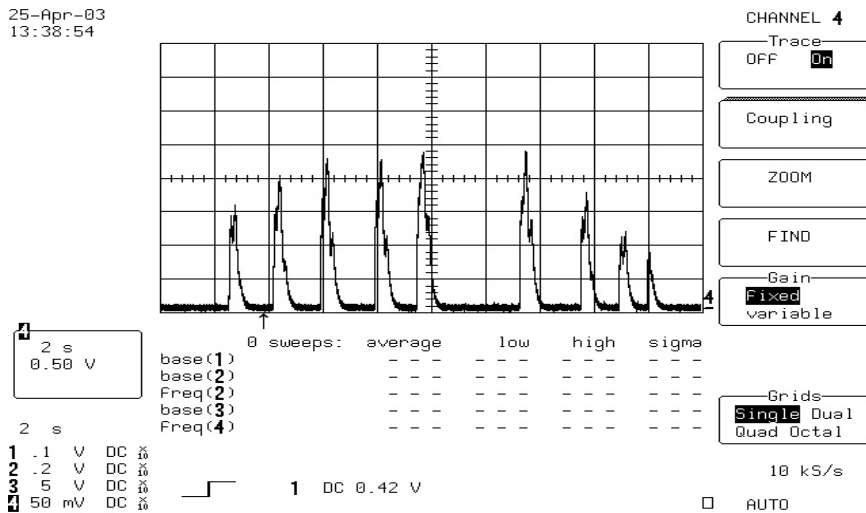


Fig. 33 Detected signal under repeated vibration

변위의 크기가 크면 클수록 변위에 해당하는 파형의 진폭도 커지게 되고, 변위가 작으면 파형의 진폭 또한 작아지는 것을 관찰할 수 있다.

도플러 주파수의 측정 실험에서는 마이크로 성형기에서 발생하는 미세 변위를 측정하기 위하여 레이저 간섭계를 개발하고 간의 측정 실험을 수행하였다. 개발된 장치를 통해 미세 변위를 측정하고 오실로스코프를 통하여 변위의 신호를 주파수로 받고 있음을 확인하였다. 오실로스코프에 들어오는 노이즈들은 속도 디코딩 보드나 주위에서 발생할 수 있는 변위로 인하여 발생되었다고 생각된다. 2 단계에서 보완해야 할 것은 레이저 간섭계는 공기 굴절률 및 미세한 진동에도 영향을 받으므로 이러한 노이즈가 측정하고자 하는 원신호에 커플링되지 않도록 해야 하며, A/D 변환기를 포함하는 데이터 획득 시스템 및 얻어진 신호에 대해서 신호처리가 가능한 프로그램을 개발하여야 한다.

미세 변위 측정 실험에서 레이저 간섭계는 미세변위를 측정하기 위해서는 옵티컬 테이블 위에 스테이지를 구성하고 Mirror를 이용하여 반사되어지는 신호를 측정함으로써 미세 변위를 측정할 수 있다. 측정되어진 신호는 속도 디코딩 보드를 통하여 결국 A/D Converter로 보내지게 되고 PC에서 프로그램을 이용하여 미세 변위를 구할 수 있게 된다.

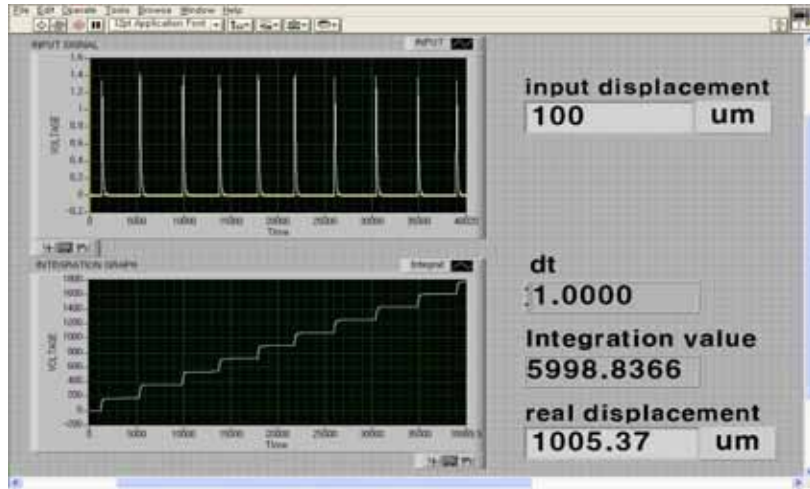


Fig. 33 Measurement of repeatability in LabView

미세 변위 측정 실험 중 첫 번째 실험은 실험 장치의 반복정밀도를 검증해볼 수 있는 실험으로써 일정한 변위가 발생될 때 출력되는 전압값은 항상 일정하다는 것을 확인하고자 하였다. Fig. 33 은 100 μm 의 변위를 10번 반복해서 주었을 때 발생하는 전압값과 그 적분값을 랩뷰에서 확인한 모습이다.

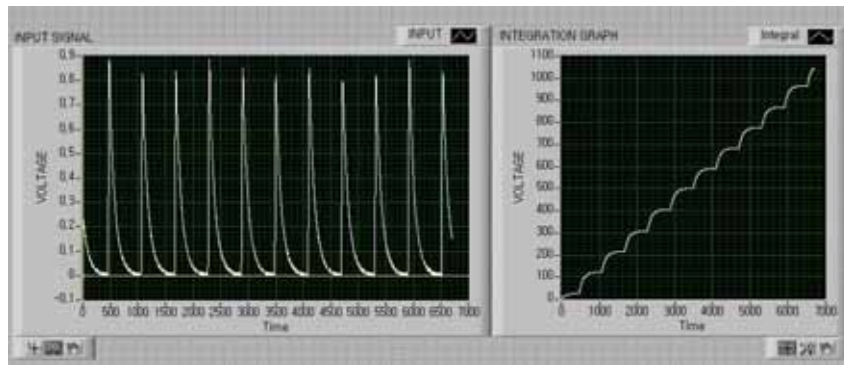


Fig. 34 Measurement of repeatability in LabView

Fig. 34 는 100 μm 보다 작은 50 μm 의 반복 정밀도를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 마이크로 스테이지의 반복 정밀도는 매우 우수하고 본 실험에서 사용하기에 별다른 무리가 없다고 판단되어 진다.

두 번째 실험은 변위와 속도 그리고 가속도를 바꾸어 가면서 변위와 출력되는 전압값에 대한 보정식을 찾는 실험이다. 실험 결과 가속도와 속도가 일정 범위에서 동일한 값을 얻었으나 너무 느린 경우와 너무 빠른 경우에는 측정값이 예상했던 값과 다르게 나왔다. 생각되어지는 이유는 속도 디코딩 보드에서 하드웨어적으로 신호를 처리하는데 문제가 발생되었다고 생각된다. 레이저 간섭계에서는 레이저를 반사하고 두 과정을 받는 작용밖에 하지 않음으로 문제될 것이 없다. 하지만 광 검출기에서 받은 신호는 속도 디코딩 보드를 통하여 A/D 컨버터로 들어간다. A/D 컨버터는 입력되어지는 신호만을 받음으로 결론적으로 속도 디코딩 보드가 문제임을 확인할 수 있었다. 이 부분에 대해서는 속도 디코딩 보드의 재구성이 필요하다고 생각되며, 다른 방법으로는 속도 디코딩 보드를 쓰지 않고 두 신호를 A/D 컨버터에서 받아서 처리하는 방안이 있다.

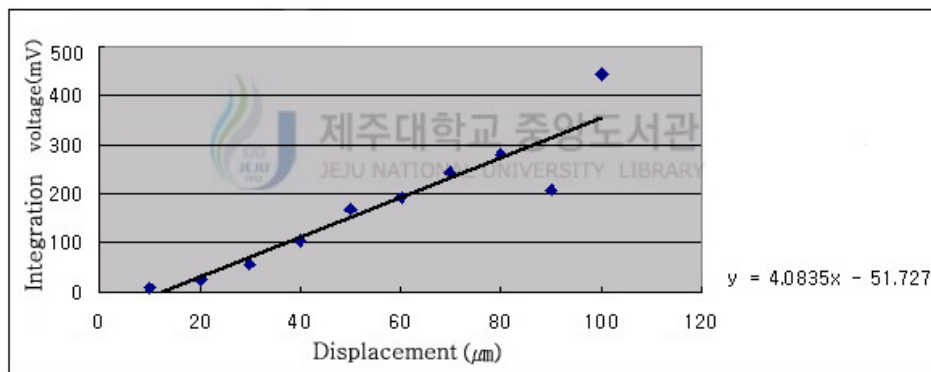


Fig. 35 Calibration of measurement data

Fig. 35 는 10 μm 에서 100 μm 구간 사이의 변위값과 출력되는 전압값과의 관계를 보여주고 있다. 90 μm 와 100 μm 에서 발생하는 오차는 실험적 요인과 마이크로 스테이지 등의 변수값들에 대한 설정 미숙에 의한 것으로 판단된다.

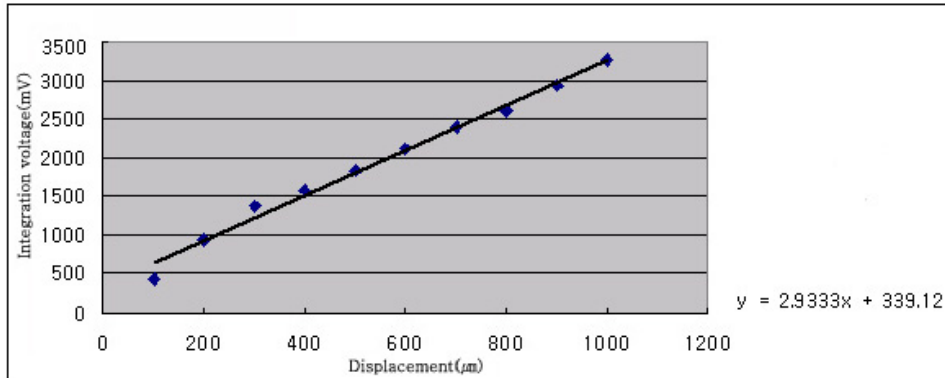


Fig. 36 Calibration of measurement data

Fig. 36 은 100 μm 에서 1000 μm 까지의 변위와 출력되는 전압값과의 관계를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 변위와 전압값은 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 출력되는 전압값을 받고나면 역으로 변위를 보정식을 통하여 구할 수 있음을 확인시켜 준다.

하지만 전 구간에 걸쳐 보정식을 산출한다면 Fig. 37에서 보는 것처럼 일차식보다는 삼차식에 가까운 형상을 얻는데 이는 실험 과정의 오차에 의한 요인이라 판단된다.

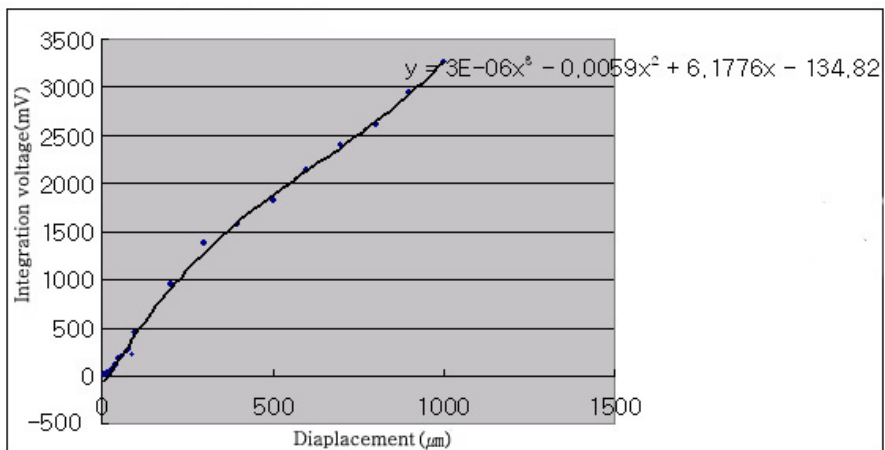


Fig. 37 Calibration of measurement data

세 번째 실험은 두 번째 실험에서 얻어진 보정식을 가지고 실제 변위값을 계산하는 프로그램이다.

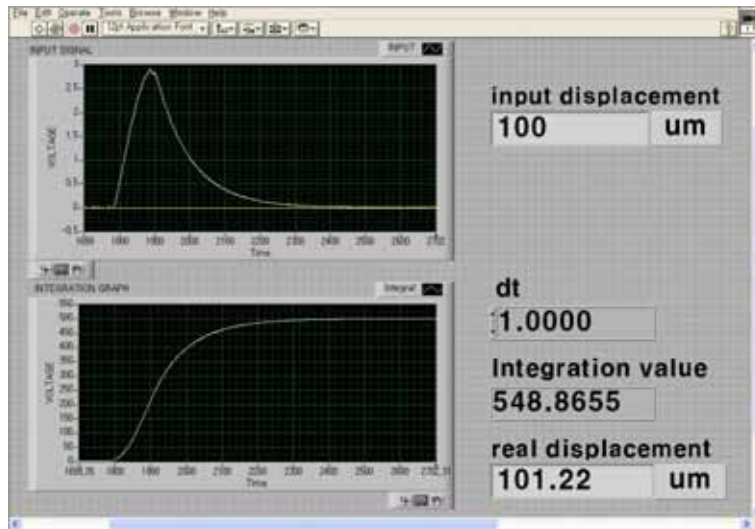


Fig. 38 Measurement of displacement in LabView (10 mm/s)

Fig. 38과 Fig. 39는 변위값은 100 μm 로 동일하나 속도를 다르게 하여 측정 한 모습이다.

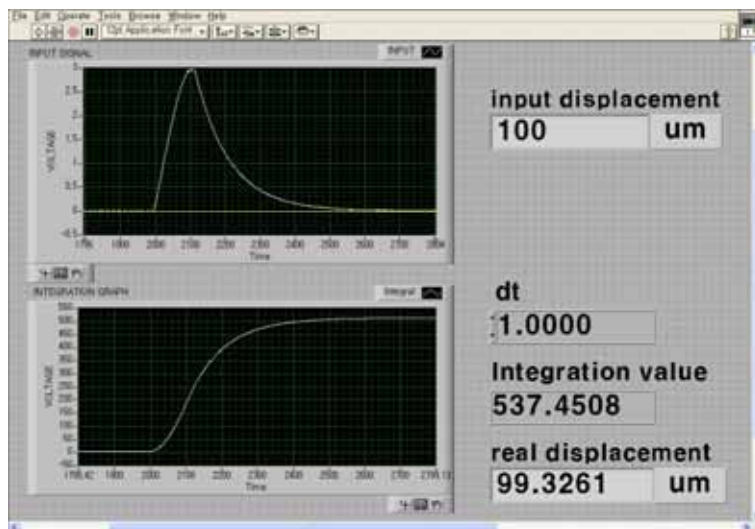


Fig. 39 Measurement of displacement in LabView (100 mm/s)

Fig. 40과 Fig. 41 또한 변위를 60 μm 로 고정시키고 속도를 변화하여 측정한 결과이다.

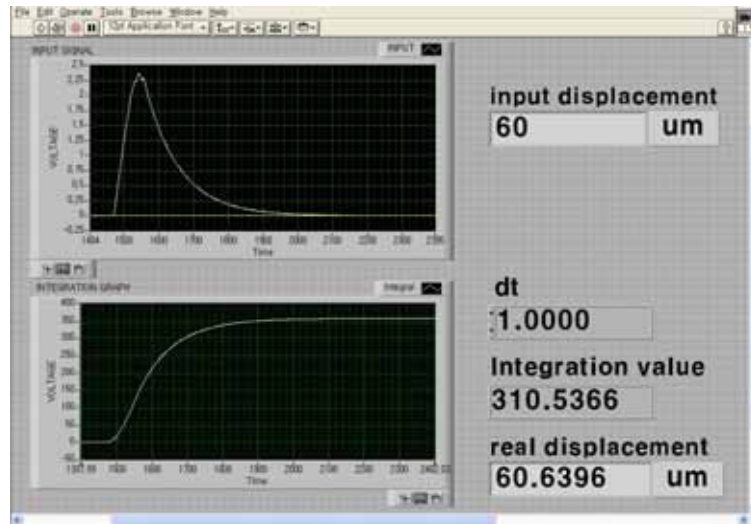


Fig. 40 Measurement of displacement in LabView (10 mm/s)

보는 바와 같이 실제 변위와 거의 일치하는 변위값을 도출하고 있음을 확인할 수 있었다.

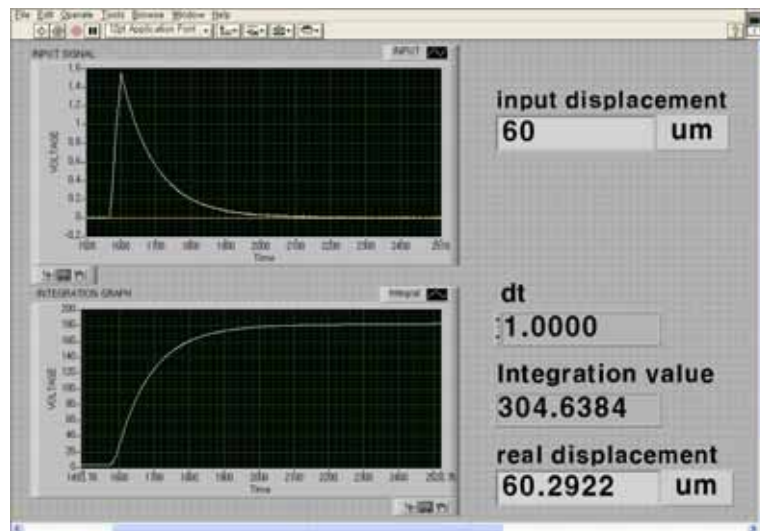


Fig. 41 Measurement of displacement in LabView (100 mm/s)

미세 변위 측정 실험에서 변위를 10 μm 씩 증가시키면서 변위의 증가량과 출력되는 전압값 사이의 관계를 해석하였다. 실험의 결과 Fig. 42 에서 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.

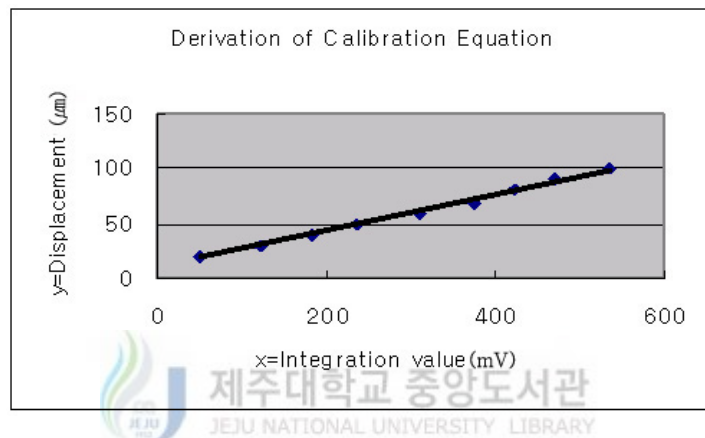


Fig. 42 Calibration of measurement data

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

얻어진 보정식을 가지고 임의의 변위를 발생시켰을 때 구해진 변위가 마이크로 스테이지에서 발생된 변위와 일치하는가를 확인하면, Fig. 43 과 같이 50 μm 의 변위를 발생시켰을 때 전압값의 변화모습과 전압값의 적분값, 그리고 보정식으로부터 변위가 비교적 적은 오차내에서 계산되어짐을 알 수 있다.

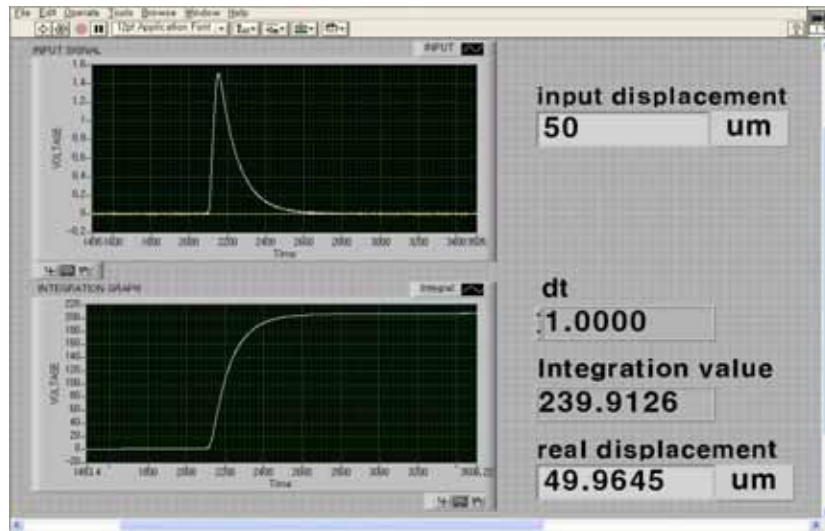


Fig. 43 Measurement of displacement in LabView

4.2 미세 변위 측정 시스템의 오차 요인

실험 결과의 오차는 간접계의 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. 또한 실험 조건이 광학 테이블 위에서 행하였겠다고 하지만 μm 급의 단위를 측정하기 위해서는 청정룸(clean room)과 같은 조건이 만들어져야 하고 진공인 환경에서 실험을 해야만 보다 정확한 값을 얻을 수 있으리라고 판단된다. 더군다나 실험 당시 주위에서 발생하는 미세한 진동들도 있기 때문에 이런 점까지 감안한다면 실험에서 보여준 오차는 충분히 발생할 수 있는 값이라 생각된다. 이런 오차값을 고려한다면 보정식으로부터 얻어진 변위값은 마이크로 스테이지에 발생된 변위에 대하여 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 결론적으로 미세 변위 측정 실험에서의 두 번째 실험에서 구해진 보정식이 변위를 계산함에 있어 적합하다고 할 수 있다.

실험 결과에서 보듯이 개발한 미세 변위 측정기는 수십 μm 터에서 수백 μm 에서 가장 정확한 변위값을 계산하고 있다. 기존에 상용화되어 있는 레이저 변위 측정 장비들은 AOM방식을 이용하여 상당히 고가이고 부수적인 장치들도 많이 들어가야 했다. 하지만 Zeeman방식을 이용한 레이저 변위 측정기는 비교적 저가이면서 레이저가 측정할 수 있는 영역의 변위를 충분히 측정 가능하다. 개발한 레이저 측정기를 조금 더 소형으로 개발한다면 이동 가능한 레이저 변위 측정기를 개발할 수 있다고 생각된다. 이 개발된 레이저 변위 측정기는 마이크로 포머와 같이 μm 단위의 제품을 생산하는데 생길 수 있는 변위를 측정하고 그 변위와 제품 품질의 관계를 해석하는데 중요한 장치가 될 것이라고 생각된다.



V. 결 론

미세 변위 측정 실험에서 궁극적으로 추진해 나가야 할 부분은 이동이 가능한 미세 변위측정 장치를 개발하는 것이다. 이동이 가능한 레이저 측정 장비는 들고 다니면서 원하는 곳에서 측정대상에 레이저를 발진시켜 발진된 레이저가 반사되어 나온 신호를 받으면 진동의 크기를 측정할 수 있게 된다.

또한, 속도 디코딩 보드의 회로를 바꿈으로써 X축과 Y축의 진동을 동시에 측정할 수도 있고, 표면의 조도등도 측정할 수 있으리라 기대된다. 도플러 주파수 측정 실험에서 간섭계와 속도 디코딩 보드는 옵티컬 테이블위에 위치하게 되고, A/D Converter만이 PC의 슬롯형식으로 삽입할 수 있었다. 하지만 레이저 간섭계를 기존의 He-Ne 레이저 장치 안에 장착하고 측정 부분만 밖에 설치한다면 이동 가능한 레이저 간섭계를 개발할 수 있으며 원하는 위치에서 미세 변위를 측정할 수 있다.

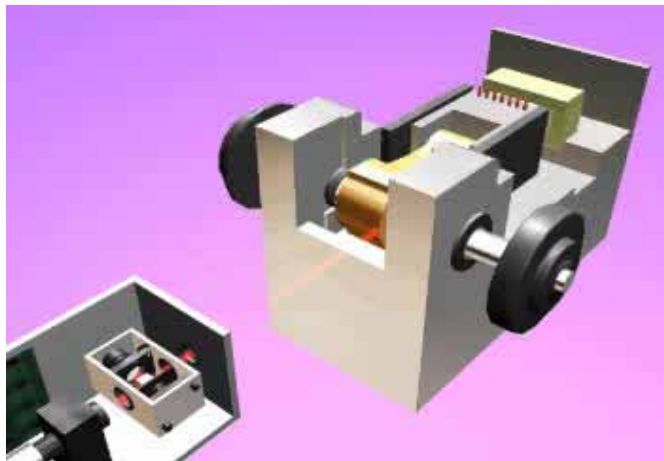


Fig. 44 Micro displacement measuring System in Micro Former

속도 디코딩 보드는 레이저 안에 장착할 수도 있고, PC안에 장착할 수도 있으나 속도 디코딩 보드를 작동시키기 위해서도 전원이 필요하기 때문에 레이저 안에 장착시킴으로써 다른 장치들과 동시에 전원을 공급하게 하는 것이 더욱 효과적이다. 또한 레이저에서 나온 신호를 PC로 보내주기만 하면 바로 얼마만큼의 미세 변위가 생겼는지 측정할 수도 있다. Fig. 44 은 개발된 미세 변위 측정기가 이동 가능하게 만들어졌을 때 마이크로 포머의 변위를 측정하는 가상의 모습이다. 이처럼 비접촉으로 변위를 측정해야 하는 경우 레이저 변위 측정기는 상당한 효율과 이점을 가져다 줄 것으로 사료된다.



VI. 참고문헌

- [1] 나경환, 박훈재, 조남선, 2000. “소성가공에 의한 미세부품 성형기술,” 한국정밀공학 회지, 제17권, 제7호, pp. 14-19
- [2] 신용승, 김병희, 김현영, 오수익, 2002. “박판 전단시의 버 형성에 관한 연구,” 한국 정밀공학회지, 제19권, 제9호, pp. 166-171
- [3] 김승우, 2000. “광계측의 기술동향,” 한국정밀공학회지, 제17권, 제6호, pp. 7-16
- [4] 김민석, 김승우, 2002. “2-중모드 레이저를 이용한 고분해능 헤테로다인 간섭계,” 한 국정밀공학회지, 제19권, 제4호, pp. 195-201
- [5] 김민석, 김승우, 2002. “헤테로다인 변위 측정 간섭계의 고속, 고분해능 위상 측정,” 한국정밀공학회지, 제19권, 제9호, pp. 172-178
- [6] Kuang-Chao Fan, Mu-Jung Chen ,2000. “A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages,” Precision Engineering, Vol. 24, pp. 15-23
- [7] J. Kemp, X.Q. Jiang, Y.N. Ning, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan, 1998. “A displacement measurement system, utilizing a Wollaston interferometer,” Optics & Laser Technology, Vol. 30, pp. 71-75
- [8] Shyh-Tsong Lin, 2001. “A laser interferometer for measuring straightness,” Optics & Laser Technology, Vol. 33, pp. 195-199
- [9] Hans-Jurgen von Martens, 1999. “Generalization and analysis of the fringe-counting method for interferometric measurement of motion quantities,” Measurement, Vol. 25, pp. 71-87
- [10] Xuefeng Wang, Xiangzhao Wang, Hongbin Lu, Feng Qian, Yang Bu, 2001. “Laser diode interferometer used for measuring displacements in large range

- with a nanometer accuracy," *Optics & Laser Technology*, Vol. 33, pp. 219-223
- [11] Pek Loo Teoh, Bijan Shirinzadeh, Chee Wei Foong, Gursel Alici, 2002. "The measurement uncertainties in the laser interferometry-based sensing and tracking technique," *Measurement*, Vol. 32, pp. 135-150
- [12] V.G. Badami, S.R. Patterson, 2000. "A frequency domain method for the measurement of nonlinearity in heterodyne interferometry," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 41-49
- [13] S.J.A.G Cosijns, H. Haitjema, P.H.J. Schellekens, 2002. "Modeling and verifying non-linearities in heterodyne displacement interferometry," *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol. 26, pp. 448-455
- [14] Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou, Shen Hwa Chiou, 1999. "Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer," *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 243-252