

이 논문은 1995년도 교육부 기계공학 학술연구조성비 연구비에 의해 연구되었음

도플러방식과 헤테로다인 방식의 공간섭법을 병용한 절대높이 측정 정밀도 향상

안근식*, 장경영**, 문희관***

Improvement of Measurement Accuracy for Absolute Height by Using Two Types of Doppler and Heterodyne Optical Interferometry

Geun-Sik Ahn*, Kyung-Young Jhang** and Heui-Kwan Moon***

ABSTRACT

This paper proposes a high precision measurement technique to obtain the height of gage block with a few millimeter height. The proposed technique is consisted of two steps : In the first step, laser position transducer and electric micrometer are adopted to obtain a coarse value of the height of gage block, and then, in the second step, heterodyne laser interferometry is adopted to acquire the precision value. A new kind of phase detector is constructed in the low cost for the heterodyne interferometer and its linearity with $\pm 1\%$ is confirmed by experiment. Also measurement error factors due to enviroments are discussed and methodology to reduce such errors is proposed. Preliminary experiments are carried out for the gage blocks of as high as a few millimeter.

Key Words : Heterodyne laser interferometry (헤테로다인 레이저 간섭계), Phase detector (위상검출기), Zeeman He-Ne laser (지만 헬륨-네온 레이저), Laser position transducer (레이저 위치검출기)

1. 서 론

반도체산업을 비롯한 첨단산업분야에서는 현재의 정밀도를 훨씬 뛰어넘는 초정밀기술이 요구되고 있으며 시스템의 소형화, 고기능화에 따라 부품의 정밀한 가공 및 측정기술이 필요하게 되었다. 가공부품을 서브미크론 order를 넘어서 나노미터(nm) order로 정밀하게 측정하는 기술은 Stylus instrument method, STM, AFM 등

의 발달에 따라 현저한 진보를 이루었다. (1-3)

그러나 이 방법들은 공통적으로 가격이 매우 고가이고 측정범위가 매우 좁으며, 측정환경에 민감하고 복잡한 데이터 처리등으로 비숙련자는 측정하기 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

따라서 3차원적으로 넓은 영역, 나노미터 order의 높은 절대정도, 설비비용의 저렴화, 숙련을 요하지 않는 손쉬운 계측, 복잡한 데이터 처리의 불필요등의 요구에 부합

* 한양대학원 정밀기계공학과
** 한양대학교 정밀기계공학과
*** 국립공업기술원 계량측정과

되는 방법은 매우 적은 실정이다.

본 논문에서는 위의 요구범위를 만족하는 동시에 해석적으로 불연속적인 큰 치수의 고정도 가공부품등을 비교적 손쉽고 정밀하게 측정하는 방법으로서 분해능이 서로 다른 두가지의 광간섭법을 이용하는 방법에 대하여 검토한다. 여기서 두가지의 광간섭법이란 도플러방식 간섭법과 헤테로다인 간섭법으로서, 전자는 비교적 큰 치수의 변위나 길이 측정에 유리하며, 후자는 레이저파장의 1/2 이하의 변위나 길이를 nm order의 고정밀도로 측정하는데 유리한 것으로 알려져 있다. (4-6)

본 논문의 목적은 이 두 방식을 결합하는 광학계를 구성하고, 그 기본특성을 00급 블록게이지에 대한 실험을 통하여 검증하는데 있다. 즉, 제1단계로 레이저측정기와 전기마이크로미터를 이용하여 블록게이지의 대략적인 높이를 구하고, 1단계에서 판단하기 어려운 미소 치수를 제2단계의 헤테로다인 간섭법을 이용하여 비트파의 위상변화를 검출함으로써 구하고자 하는 것이다.

또한 헤테로다인 간섭계에서는 비트신호의 위상검출이 필요한데 이 부분에 대한 기존 상품의 경우 장치가 매우 복잡하고 고가인데 비하여 본 연구에서는 설비비용의 저렴화, 복잡한 데이터 처리의 불필요, 숙련을 요하지 않는 손쉬운 계측등의 요구에 부합되는 위상검출기의 자체 개발을 시도하였으며, 실제로 제작 실험한 결과 ±1.5nm 이내의 선형성을 확인하였다.

한편, 고정밀 광학계측에 있어서는 진동, 공기유동, 온도습도 등 주위환경의 영향이 오차로서 작용하게 된다. (7-9) 여기서는 이러한 계측오차의 발생요인에 대하여 검토하고 이를 저감시킬 수 있는 방법에 대하여 논하였으며, 이를 실제 광학계에 적용함으로써 주위환경에 의한 계측오차가 1nm이하로 억제될 수 있는 광학계의 구성을 실현하였다.

2. 계측원리

2.1 간섭무늬 합치법의 기본원리

본 절에서는 본 논문에서 제안하는 계측법의 기본이 되는 간섭무늬 합치법의 기본 원리를, 뒤의 실험에서 사용된 블록게이지의 높이측정을 예로 들어 간단히 소개한다. Fig.1에서와 같이 광원으로 부터 나온 광파는 렌즈 L1으로 평행하게되고 프리즘 P에 의해 파장 λ1으로 방출되어 Twinman-Green형의 간섭계로 입사된다. 간섭계의 한

쪽은 광학평면거울(plane mirror) M1과 그위에 밀착시킨 게이지블록을 비추고 다른 한쪽은 참조면 M2를 비춘다. L2의 렌즈를 통하여 광학평면 M1과 게이지블록의 단면사이의 간섭무늬를 관측한다. 간섭무늬는 그림과같이 횡으로 서로 어긋난 평행등간격의 무늬가 얻어지고 이 무늬의 횡편차를 측정한다. 간섭무늬 차수를 N1, 횡편차에 의한 차수의 단수를 ε1으로 하면, 게이지블록의 길이 L은 다음과 같이 구할 수 있다. (10)

$$L = \frac{\lambda_1}{2} (N_1 + \epsilon_1) \quad (1)$$

여기서, $\epsilon_1 = d/D$

그러나, 이와같은 합치법에 의한 길이측정에서는 피측정물체의 길이가 짧으면 올바른 합치를 얻을 수 있지만 피측정물체의 길이가 긴 경우에는 합치를 얻기가 곤란하며 측정에 많은 시간과 노력이 필요하고 온도분포의 영향을 크게 받기때문에 단일성이 좋은 재질로 측정장치를 차폐시키는 것이 중요하므로 장치가 크고 복잡해지는 단점이 있다.

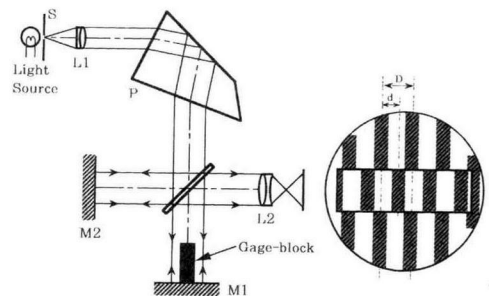


Fig.1 Measurement of height by using interference fringe matching method.

2.2 2단계 측정법의 원리

일반적으로 광간섭에 의해 나타내어지는 길이(h)와 파장λ사이의 관계식은 다음과 같다.

$$h = \frac{1}{2} \lambda N + \epsilon \quad (2)$$

여기서 N은 앞에서 언급된 간섭무늬의 차수에 해당된다.

본 논문에서는 이 h를 구하기 위하여 서로 다른 특징을

갖는 두가지의 광간섭법을 병용하는 방법을 제안하는 것이다. 즉, 제1단계에서는 레이저측정기와 전기마이크로미터를 이용하여 N 을 구함으로써 $\pm\lambda/4$ 의 정밀도로 게이지블록의 대략적인 높이를 측정하고, 제2단계에서는 헤테로다인 간섭법을 이용한 간섭계로부터 얻은 비트파의 위상변화를 측정하여 정확한 ϵ 값을 구한 후 $(\lambda/2)N$ 값과 ϵ 값을 서로 합산하여 게이지블록의 최종길이 계산하는 것이다. 각각의 방법에 대한 상세한 설명은 다음 절에서 논한다. Fig.2는 이와 같은 2단계 계측방식의 순서를 나타낸 것이다.

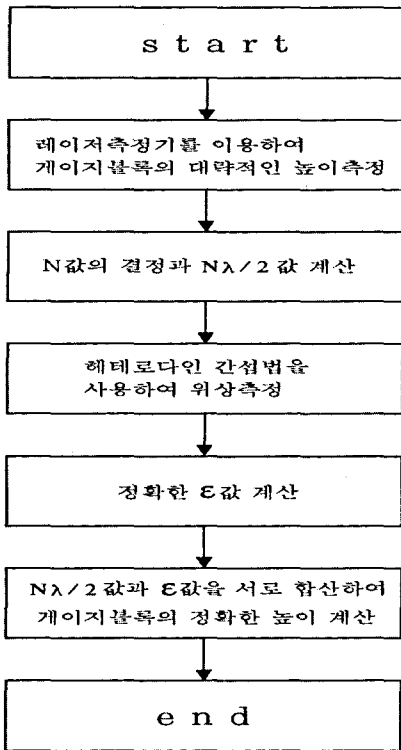


Fig. 2 Flow-chart for measurement.

2.3 레이저측정기와 전기마이크로미터를 이용한 높이 측정원리

여기서는 1단계의 계측으로서 레이저측정기와 전기마이크로미터를 이용하는 방법에 대하여 논한다. Fig.3은 그 측정원리를 나타낸 것이다. 광원은 파장안정화 He-Ne 지만 레이저로부터 주파수가 f_1 , f_2 로 서로 약간 다르고 그 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선편광광이 방출된다. 기준비트신호를 얻기위해 광속분리기(Beam

Splitter) BS로 광속의 일부분을 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시켜 두 주파수 차이 $(f_1-f_2 = 2.204\text{MHz})$ 의 비트신호를 검출하고 증폭과정을 거친후 주파수 카운터에서 계수된다. 한편 광속분리기를 통과하여 PBS (Polarizing Beam Splitter)로 향한 빔은 PBS에서 편광방향에 대응하여 투과광(f_2 성분)과 반사광(f_1 성분)으로 분리되어 반사광은 Retro-Reflector (Cube-Corner) C2에서 반사되고, 투과광은 Retro-Reflector C1에서 반사된 후 두 광속은 서로 합쳐져서 광소자 D2에 입사된다. 이때 C2를 속도 V 로 이동시키면 주파수 f_1 의 빔은 도플러효과(Doppler shift)에 의해 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되고, 이렇게 바뀐 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이에 맥놀이 현상이 일어나 이 비트주파수 $|f_1 - f_2 + \Delta f_1|$ 가 광소자 D2에서 검출된다. 이 검출된 신호는 증폭과정을 거쳐 주파수 카운터에서 계수된후 기준비트신호 $|f_1 - f_2|$ 와 비교하여 차이 Δf_1 을 구한다.

그런데 Δf_1 은 도플러효과에 따라 발생한 변조량이므로 도플러효과에서의 주파수와 속도에 대한 관계식을 고려하면 다음과 같다. ⁽¹⁰⁾

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \tag{3}$$

여기서, c 는 빛 속도이다.

만약 C2가 t 초동안에 움직인 거리를 L 이라하면, L 은

$$\begin{aligned} L &= \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{c}{2f_1} \Delta f_1 dt \\ &= \int_0^t \frac{\lambda_1}{2} \Delta f_1 dt \end{aligned} \tag{4}$$

가된다. 따라서, t 초동안 Δf_1 을 계수하여 적분한 다음 $\lambda/2$ 를 곱하여 L 을 구할 수 있으며, 이에 상응하는 N 값을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$N = INT[(2/\lambda) \times L] \tag{5}$$

여기서 INT는 소수 첫째자리에서 반올림한 정수를 의미한다.

또한, 실제 계측에 있어서는 Retro-Reflector C2밑에는 전기마이크로미터가 설치되게 되며, (4)에서 구한 L 은 전기마이크로미터의 이동거리가 된다. 이에 대한 것은 4.2절에서 설명된다.

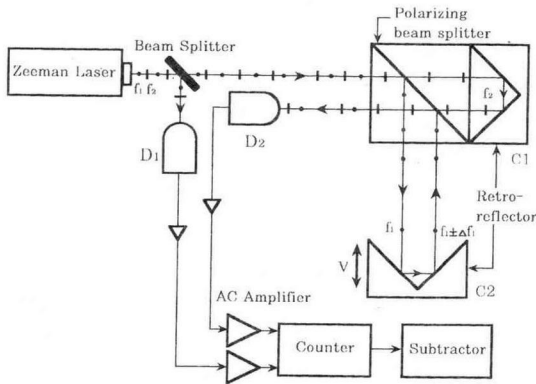


Fig. 3 Schematic diagram of height measurement system using laser doppler interferometer and electric micrometer.

2.4 헤테로다인 간섭법을 이용한 위상/높이 검출원리
 여기서는 제2단계 계측으로서 헤테로다인 간섭법을 이용하는 방법에 대하여 설명한다. Fig. 4에 헤테로다인 간섭법을 이용한 위상/높이 검출원리를 나타내었다. 광원은 파장안정화 He-Ne 지만레이저로부터 주파수가 f_1, f_2 (Zeemann 주파수 $f_1 - f_2 = 2.204\text{MHz}$)로 약간 다르고 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선편광광이 방출된다. 먼저 beam splitter에서 빔의 일부가 분리되어 광검출기 D1으로 입사되어 기준비트신호를 발생시킨다. 비트신호의 기본주파수는 Zeemann주파수에 해당된다. beam splitter를 통과하여 편광 beam splitter으로 향한 빔은 편광방향에 대응하여 투과광과 반사광으로 분리되어 각각 평면 mirror와 게이지블록에서 2회 반사하고 편광 beam splitter를 2회 거친 후 투과광과 반사광이 합쳐져서 측정비트신호를 만들게 되며 이것이 광검출기 D2에서 검출된다. 여기서 $\lambda/2, \lambda/4$ 판은 각 경로의 편광면과 위상을 보정하기 위하여 사용되었다. 이때 각각의 빔이 전파한 경로차에 따라 각 검출기 D1, D2에서의 검출된 출력신호는 Fig.5에 보이는 바와 같은 위상차를 갖게 되며 이 위상차는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} f\Delta z = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z \quad (6)$$

여기서, $\lambda = c/f$: 중심파장 (중심주파수 f 는 약500THz)
 Δz : 광경로차

그런데, 헤테로다인 간섭법에서 구하고자 하는 Δz 는 $\pm\lambda/4$ 이내이며, 따라서 위상차 $\Delta\varphi$ 는 $\pm\pi/2$ 이내에 있게 된다.

한편, Δz 는 다음과 같이 표면높이 Δh 로 표시될 수 있다.

$$\Delta z = 2\Delta h \quad (7)$$

따라서, 측정된 위상변화로 부터 Δh 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta\varphi}{\pi} \quad (8)$$

이렇게 구한 Δh 가 식(2)의 ϵ 에 해당되며, 따라서 최종높이는 (5)와 (8)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$L = (\lambda/2)N + \Delta h \quad (9)$$

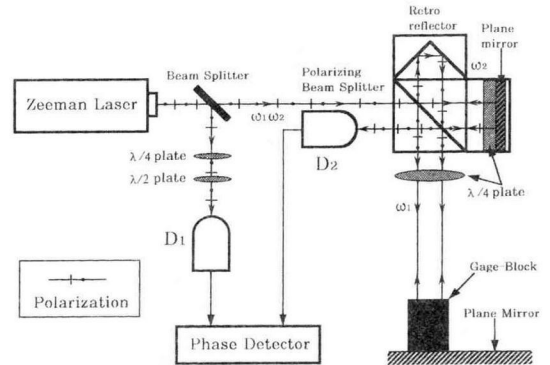


Fig.4 Schematic diagram of height measurement system using heterodyne interferometer.

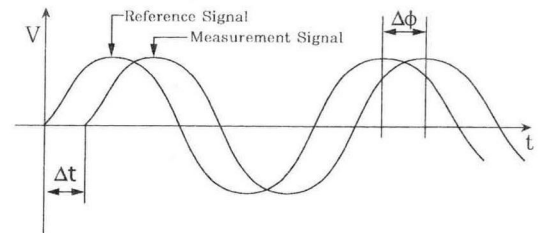


Fig.5 Phase of reference bit signal and object bit signal.

2.5 위상검출기의 구성

본 실험에서 사용하는 위상검출기의 원리는 Fig. 6에서

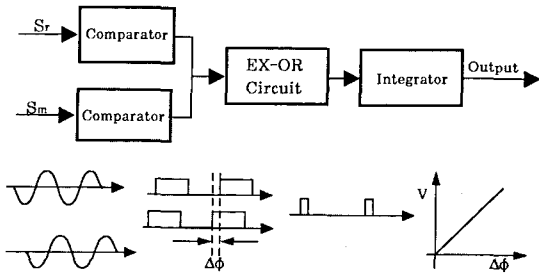


Fig. 6 Block diagram of phase detector.

보는 바와같이 기준비트신호와 측정비트신호를 각각 비교기에 넣어 디지털신호로 만든다음 이를 EX-OR회로에 넣어 같은 부분을 서로 제거한 후 이를 적분하여 위상차가 0° 일때는 출력값이 0 V로 나오게 하고 위상차가 180° 일때는 최대값이 나오게하도록 하는 방법으로서 실험결과 간단하고 정확하게 위상값에 비례한 출력값을 얻을 수 있었다.

3. 계측오차의 검토

3.1 바닥진동의 영향

바닥의 진동은 크게 나누어 10~200Hz 주파수 영역의 수직방향 진동과 1~10Hz 주파수 영역의 수평방향 진동으로 나눌 수 있다. 이 2가지 진동성분중에서 수직방향의 진동저감이 중요한 문제이므로 바닥으로부터 전해지는

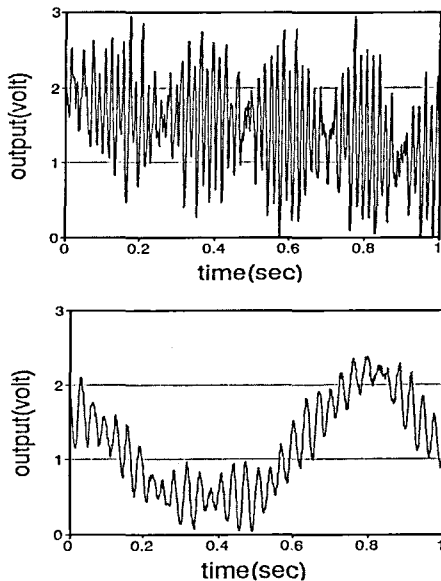


Fig. 7 Output signal of phase detector. (a) without air table and (b) with air table.

수직방향의 진동의 영향을 제거하기위하여 광학계 전체를 방진광학테이블 위에 설치하여 각종 진동의 영향을 없앨 수 있었다. 이 결과 광검출신호의 S/N비의 향상과 Drift의 축소가 보여졌고 위상검출기 출력신호의 안정성이 증가하였다. Fig.7은 방진광학테이블의 사용유무에 대한 위상검출기의 출력신호이다.

3.2 공기의 유동 및 음압의 변화

실험실 내부의 온도, 습도등을 일정하게 유지하기 위하여 air conditioner등과 같은 각종 공기조기기와 컴퓨터등 측정장비를 냉각시키기위한 각종 팬등 여러가지 장비로 인한 공기의 유동과 음압의 변화(소음)가 크기때문에 광학계가 가진되어 검출신호의 S/N비 저하를 초래한다. 그래서 이를 방지하기 위하여 비닐커버로 광로계 전체를 차폐시켜 공기의 유동과 음압변화의 영향을 큰 폭으로 감소시켰다. Fig.8은 광로계를 차폐한 후의 위상검출기의 출력신호이며, 그림에서의 0.89nm는 출력노이즈의 최대레벨을 길이로 환산한 값이다. 이 결과로 보아 환경적 요인에 의한 오차는 측정결과에 거의 영향을 미치지 않을 정도로 개선되었음을 알 수 있다.

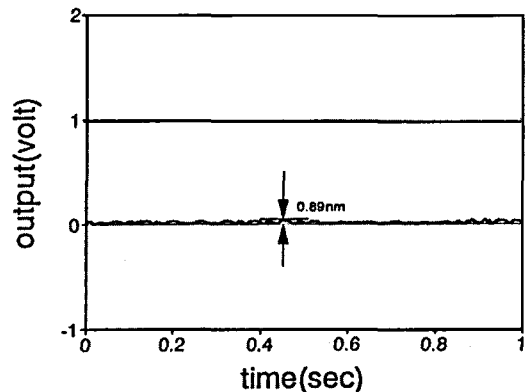


Fig. 8 Output signal of phase detector after covering optical path.

3.3 대기조건(온도, 습도, 기압)의 변화

측정장소의 공기온도, 습도, 구성성분, 기압의 변화는 공기의 굴절률 변화를 유발하여 측정정도에 직결되는 레이어 파장의 변화를 일으키고, 또한 피측정물체를 신속시키므로 이를 보정할 필요가 있다.

먼저, 굴절과 파장의 관계

$$n_0 \lambda_0 = n \lambda \tag{10}$$

여기서, n_0 : 진공중의 굴절률 (=1)
 λ_0 : 진공중의 파장
 n : 측정매질중의 굴절률
 λ : 측정매질중의 파장

로부터

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (11)$$

이며, 굴절률 n 은 Edle식에 의하여 (12)식과 같이 하여 구할 수 있으므로, 정확한 파장을 구할 수 있다. 이 때 He-Ne레이저의 진공중의 파장 $\lambda_0 = 0.632991401\mu\text{m}$ 를 이용한다.

$$(n-1) \times 10^6 = [51.1475 \cdot P \times \left\{ \frac{1 + 1.33322 \times 10^{-4} \cdot P(0.817 - 0.0133 \cdot T)}{1 + 0.0036610 \cdot T} - 7.47715 \cdot f_0 \cdot H \cdot 10^{-2} \right\}] \quad (12)$$

여기서, P : 기압(Pa), T : 온도(°C),
 f_0 : 포화수증기압 (Pa), H : 상대습도(%)

한편, 온도에 의한 피측정물의 신축은 다음식으로 보정할 수 있다.

$$L_0 = L_T \{1 - \alpha(T - 20)\} \quad (13)$$

여기서, L_0 : 20°C에서의 길이
 L_T : T°C에서의 길이
 α : 재질의 선팽창계수

3.4 지만레이저의 발진 불안정과 주파수 오차

지만레이저는 표준과학연구원의 옥소안정화 He-Ne레이저 i선과의 주파수 비교측정에서 주파수 안정화와 절대 오차가 3.8×10^{-8} 이내에 있다는 것이 이미 시험되었으므로 계측정도에서의 영향은 무시될 수 있었다.

3.5 위상검출기의 선형성평가

위상검출기의 선형성을 검증하기 위하여 C-MOS Inverter를 사용한 지연회로를 제작한후, Fig. 9와 같이 실험장치를 구성하여 1MHz의 정현파를 대상으로 실험하였다. Fig. 10은 실험결과를 나타내며 변동성분이 거의

없는 안정된 출력전압 신호를 보이고 있다. 여기서 500nsec는 위상으로는 π 에 해당된다. 선형성은 $\pm 1\%$ 이내로 이는 높이 측정오차로 환산하면 약 $\pm 1.5\text{nm}$ 에 해당되는 것으로 매우 만족할 만한 결과이며, 따라서 이 관계를 이용하여 위상검출기의 출력전압을 측정함으로써 위상차를 구할 수 있다.

한편, 본 연구에서 제작된 위상검출기는 그 원리상 π 이상의 위상차를 검출할 수 없다. 그러나, 헤테로다인 간섭기에서 검출하는 길이가 $\lambda/2$ (또는 $\pm\lambda/4$) 이내이며, 이것은 위상으로는 π (또는 $\pm\pi/2$)이내에 해당되므로 π 이상의 위상검출은 불필요하다.

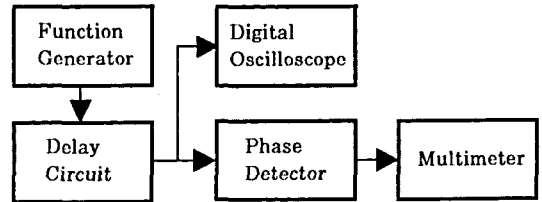


Fig. 9 Block diagram of phase detector tester.

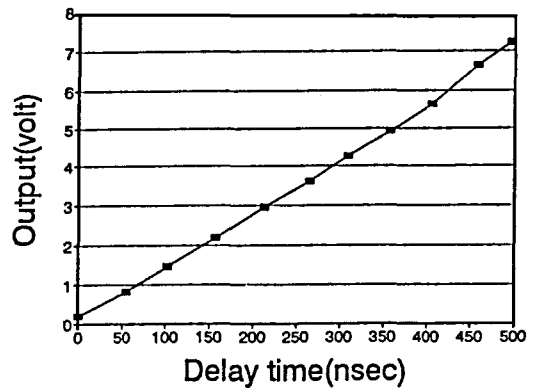


Fig. 10 Linearity test result for phase detector.

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장치의 구성

Fig. 11은 게이지블록의 높이를 측정하기 위한 실험장치의 구성을 나타낸다. 진동의 영향을 감소시키기 위하여 1, 2단계의 간섭계는 방진광학테이블위에 설치하였으며, 레이저는 출력이 1mW인 지만레이저 (HP사의 HP5517B)를 사용하고 있다. 레이저에서 방출된 빔은

50% beam splitter에서 2등분되어 1, 2단계의 실험장치로 입사된후, 각각의 경로에서 다시한번 2등분되어 반사된 빔은 wave length tracker (HP10717A)와 기준비트신호를 검출하는 receiver (HP10780B)에 입사되고 투과한 빔은 레이저측정기의 간섭계와 헤테로다인 간섭계로 입사된후 기준비트신호와 측정비트신호가 각 receiver에서 검출된다. 레이저측정기의 간섭계와 wave tracker에서 검출된 신호는 레이저측정기 컨트롤러와 컴퓨터에서 처리된다. 헤테로다인 간섭계에서 검출된 기준비트신호와 측정비트신호는 위상검출기로 들어가서 위상신호에 해당하는 전압신호로 바뀌어지고 A/D 변환기를 거쳐 컴퓨터에서 처리되어 높이로 환산된다.

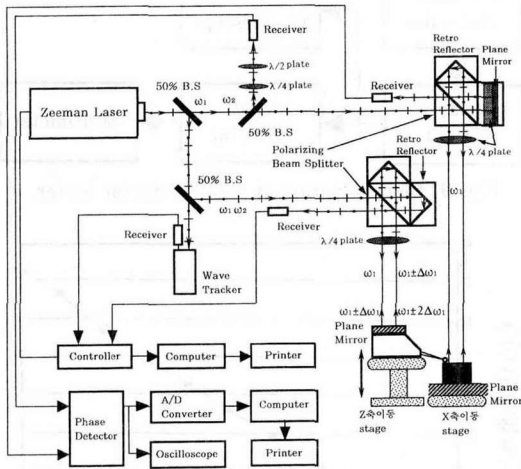


Fig. 11 Schematic diagram of total measurement system including 1st and 2nd steps.

4.2 실험방법

실험장치를 공기제진대 위에 구성하고 각 방향에 대하여 레이저 빔을 정렬시킨후 receiver의 출력을 통하여 레이저 빔이 정확하게 정렬되었는지를 확인한다. 계측오차의 요인을 저감시키기 위하여 공기제진대를 가동하고 비닐커버등으로 광학계 전체를 차폐시켜 공기의 유동이나 음압의 변화를 방지하고 대기조건의 영향을 최소화하기 위하여 온도(20℃), 습도(50%)가 정확하게 유지되도록 하였으며 온도와 습도를 측정하여 보정식에 의거하여 보정을 행하였다. 헤테로다인 간섭법을 이용하여 위상을 측정할때, 광학평면에서 반사한 측정 비트신호와 기준비트신호 사이의 위상차가 제로가 되도록 기준비트신호의 receiver 앞에 있는 λ/2 plate를 회전시킨후 위상검출기

나 리사주 도형으로 이를 확인하고 고정한다.

먼저 1단계로서 레이저측정기와 전기마이크로미터 (Mitutoyo 519-312)를 이용한 간섭계에서 전기마이크로미터를 광학평면에 위치시킨 상태를 제로값으로 세팅(setting)한 다음 광학평면위에 게이지블록을 밀착시켜 놓고 전기마이크로미터를 이동시켜 게이지블록의 윗면에 대어 그 이동량을 레이저측정기로 측정함으로써 게이지블록의 대략적인 높이를 측정한다.

그 다음 2단계로 헤테로다인 간섭법을 이용한 간섭계로 게이지블록의 윗면과 광학평면에서 반사시켜서 얻은 측정비트신호와 기준비트신호를 위상검출기에 입력하여 위상차를 구한다.

5. 실험결과 및 고찰

Table 1은 시험대상물로 1mm에서 5.5mm사이의 00급 게이지블록을 측정한 결과로서 제1단계 측정값과 제2단계 측정값 그리고 신축보정량을 모두 합산한 결과가 게이지블록의 최종높이가 된다. 이것은 3절에서 살펴본 바와같이 대기조건(온도, 습도등)에 따른 레이저의 파장을 보정하고 온도에 따른 시험대상물의 신축량을 고려한 결과이다. 또한 측정시 온도는 20.7℃이며, 이 때의 λ는 0.6325350μm이다.

최종결과를 보면 sample 3.5mm에서 오차 30nm의 매우 정밀한 측정결과를 보여주는 이외에는, sample 4.5mm를 제외하고는 모두 +140~+340nm사이의 오차를 보이고 있다. 여기서 특징적인 것은 이들 샘플에 대한 1단계 측정의 오차가 같은 범위의 +100~+300nm의 오차를 갖는다는 점이다. 이것은 본 측정방법의 기본원리상 제1단계의 측정오차가 ±λ/4 보다 작을 때 이것을 제2단계측정에서 보정하고자 하는 것인데, 측정결과에서도 알 수 있듯이 최종결과의 오차가 큰 것은 제1단계의 측정오차가 크기 때문이며, 1단계측정의 오차가 최종 측정오차에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

따라서 1단계 측정의 오차를 줄이는 것이 본 방법의 중요한 전제조건이 된다고 하겠다. 본 실험에서의 제1단계 측정의 오차는 진동, 공기유동, 온습도등 광학계 자체에 영향을 미치는 요인은 충분히 억제된 상태이므로, 주로 외부기기인 전기마이크로미터와 수직방향 이동stage의 진작도 오차, 게이지블록과 평면 mirror 사이의 밀착불량등의 기계적인 오차에 기인한다고 생각할 수 있다.

한편 sample 3.5와 4.5를 제외한 8개 데이터의 오차

분포가 한 쪽으로 쏠려있는 것은 계측계 고유의 오차가 존재하는 것으로 생각할 수 있는데, 실제로 오차의 평균값인 0.228 μ m를 고유오차로 보아 이를 교정할 경우, 위의 8개데이터에 대한 오차범위는 -80~+100nm정도로 되고 표준편차는 60nm이하로 된다. 이는 전기마이크로미터의 분해능이 100nm이고, 00급 게이지블록의 허용편차가 60nm인 것을 감안하면, 수용할 수 있는 오차범위로 생각되며, 제안하는 방법의 타당성을 검증하기에 만족할 만한 결과라고 볼 수 있다.

따라서 1단계 측정방법으로 접촉식 전기마이크로미터 대신에 백색간섭계와 레이저측정기를 조합한 비접촉 측정법을 사용하고, 또한 진직도 오차가 매우 적은 수직방향이송 stage를 사용하며 게이지블록과 평면 mirror사이의 밀착상태를 개선한다면 1단계오차를 크게 줄일 수 있어, 더욱 정확한 측정값을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

Table.1 Experimental results for gage blocks.

sample (mm)	제 1단계측정			제2단계측정	신속보정법	①+②+③
	측정값 (μ m)	N	($\lambda/2$)N (μ m) ①	헤테로다인 간섭법(μ m) ②	게이지블록의 신속량(μ m) ③	게이지블록의 확률높이(μ m)
1.0	1000.1	3162	1900.0378	+0.1284	-0.0043	1900.1619
1.5	1500.2	4743	1500.0567	+0.1377	-0.0065	1500.1879
2.0	2000.2	6324	2000.0756	+0.1307	-0.0087	2000.1976
2.5	2500.1	7905	2500.0945	+0.0642	-0.0108	2500.1479
3.0	3000.3	9487	3000.4297	-0.1495	-0.0130	3000.2381
3.5	3500.1	11067	3500.1324	-0.1465	-0.0152	3499.9707
4.0	4000.2	12648	4000.1513	-0.1466	-0.0174	4000.2805
4.5	4500.5	14230	4500.4965	-0.0239	-0.0195	4500.4909
5.0	5000.2	15810	5000.1891	+0.0756	-0.0217	5000.2429
5.5	5500.3	17391	5500.2080	+0.1480	-0.0239	5500.3321

6. 결 론

본 논문에서는 절대높이 측정 정밀도 향상을 위하여 2 단계의 광간섭법을 이용하는 방법에 대하여 논하였는데, 이론적, 실험적 검토결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 도플러방식 레이저측정법과 헤테로다인 간섭법을 병용하여 mm order의 높이를 가진 시험편을 nm order의 고정도로 계측할 수 있는 광학계의 구성방법을 제안하였으며, 실제로 계측계를 구성하고, 00급 게이지블록을 이용하여 실험한 결과 제안한 방법의 유효성을 확인할 수 있었다.

2. nm order 계측에서 발생할 수 있는 환경에 의한 계측 오차 요인을 검토한 결과, 온, 습도를 일정하게 유지시키더라도 진동과 공기유동의 영향이 큰 것으로 판명되었으며,

진동절연과 광학계차폐에 의해 이의 영향을 길이측정오차로 1nm이하까지 대폭 저감시킬 수 있음을 확인하였다.

3. 기존의 헤테로다인 간섭법에 새로운 형태의 위상차 검출 방법을 적용하고, 이를 매우 저렴한 전자부품으로 구성하였으며, 본 연구에서 자체 개발 제작한 위상검출기의 성능평가결과 ± 1.5 nm이내의 좋은 선형성을 얻을 수 있었다. 이는 기존의 헤테로다인 간섭법에서 채택하고 있는 카운터방식이 매우 복잡하고 고가인데 비하여 대등한 성능을 저가격으로 구현할 수 있음을 보여준 것이다.

참 고 문 헌

1. Paul K. Hansma and Jerry Tersoff, "Scanning tunneling microscope", Appl. Phys., Vol.61, No.2, part R1, 1987.
2. G. Binning and C. F. Quate, "Atomic force microscope", Phys. Rev. Lett., Vol. 56, No.9, p930, 1986.
3. 橋康英, "光干渉法による大段差のナノメートル計測", 精密工學會誌, vol. 59, No. 5, pp. 755~760, 1993.
4. 計量管理協會光應用計測技術調査研究委員會, "光計測のニーズとツーズ", コロナ社, 1987.
5. 植木正明, 大岩 彰, "ヘテロダイン干渉法による油マノメータの液位差の精密計測", 精密工學會誌, vol. 58, No. 1, pp. 120~126, 1992.
6. Gary E. Sommargren, "Optical heterodyne profilometry", Appl. Opt. vol. 20, No. 4, pp. 610~618, 1981.
7. 植松 茂, "精密計測による微振動の絶縁技術", 精密工學會誌, vol. 55, No. 12, pp. 2141~2145, 1989.
8. Norman Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and non-linearity", Appl. Opt. vol. 25, No. 13, pp. 2676~2682, 1987.
9. 谷村吉久, 藤沼慧機, 櫻井好正, "干渉計レーザ測長する場合の誤差要因", 精密機械, 4巻, No.9, pp. 1106~1112, 1977.
10. 谷田見豊彦, "應用光學, 光計測入門", 丸善株式會社, p107, p167, 1988.