

공간섭법을 이용한 절대높이 측정 정밀도 향상에 관한 연구

안근식*, 장경영**, 문희관***

* 한양대학교원 정밀기계공학과, ** 한양대학교 정밀기계공학과

*** 국립공업기술원 계량측정과

Abstract

This paper proposes a high precision measurement technique to obtain the height of gage block. 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, second, heterodyne laser interferometry is adopted to acquire the precision value. The experiment results show that accuracy in the order of a few nanometer is achieved for the gage blocks of as high as a few millimeter.

key word : Heterodyne laser interferometry, Zeeman He-Ne laser, Phase detector, Laser position transducer, Polarizing beam splitter

1. 서론

반도체산업을 비롯한 첨단산업분야에서는 현재의 정밀도를 훨씬 뛰어넘는 초정밀기술이 요구되고 있으며 시스템의 소형화, 고기능화에 따라 부품의 정밀한 가공 및 측정기술이 필요하게 되었다. 가공부품을 마이크로 order를 넘어서 나노미터(nm) order로 정밀하게 측정하는 기술은 Stylus instrument method, STM, AFM, 공간섭법의 발달에 따라 현저한 진보를 이루었다. 그러나 이 방법은 공통적으로 가기가 매우 고가이고 측정범위가 매우 좁으며, 측정환경에 민감하고 복잡한 데이터 처리 등으로 비숙련자는 측정하기 곤란하다는 단점을 가지고 있다.

따라서 3차원적으로 넓은 영역, 나노미터 order의 높은 절대정도, 설비비용의 저평화, 숙련을 요하지 않는 손쉬운 계측, 복잡한 데이터 처리의 불필요 등의 요구에 부합되는 방법은 매우 적은 실정이다.

본 연구에서는 위의 요구범위를 만족하는 동시에 해석적으로 불연속적인 큰 치수의 고정도 가공부품들을 비교적 손쉬운 고정도 분해능을 가진 공간섭법을 서로 조합하여 정밀하게 측정하는 방법을 연구하고 시험하였다. 1단계에서는 레이저측정기와 전기 마이크로미터를 이용하여 대략적인 높이를 구하고, 2단계에서는 헤테로다인 간섭법을 이용한 간섭계로 미트파의 위상변화를 검출하여 나노미터 order의 고정도로 길이를 측정하는 방법을 이

용하였다. 또한 설비비용의 저평화, 복잡한 데이터 처리의 불필요, 숙련을 요하지 않는 손쉬운 계측 등의 요구에 부합되는 위상 검출기를 개발·제작하였으며 계측오차의 발생요인을 검토하고 이를 지각시켜 신뢰할 수 있는 측정값이 얻어지도록 하였다.

2. 이론

2.1 합치법의 기본원리

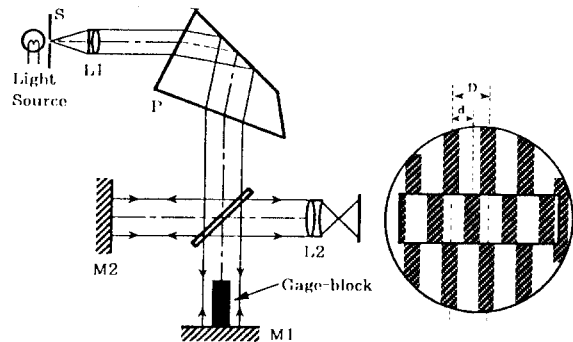


Fig. 2.1 합치법에 의한 길이측정의 원리

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

이거시, $\epsilon_1 = d/D$

합치법에 의한 길이측정에서는 피측정물체의 길이가 짧으면 올바른 합치를 얻을 수 있지만 피측정물체의 길이가 긴 경우에는 합치를 얻기가 곤란하며 측정에 많은 시간과 노력이 필요하고 온도분포의 영향은 크게 받기때문에 단원성이 좋은 재료로 측정장치를 차폐시키는 것이 중요하므로 장치가 크고 복잡해지는 단점이 있다.

2.2 2단계 측정법의 원리

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

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

제1단계에서는 레이저측정기의 전기마이크로미터를 이용하여 $\pm \lambda/4$ 의 정밀도로 게이지블록을 측정하여 대략적인 높이측정하고 제2단계에서는 헤테로다인 간섭법을 이용한 간섭계로부터 얻은 비트파의 위상변화를 측정하여 정확한 ϵ 값을 구한 후 $(\lambda/2)N$ 값과 ϵ 값을 서로 합산하여 게이지블록의 최종길이 계산한다.

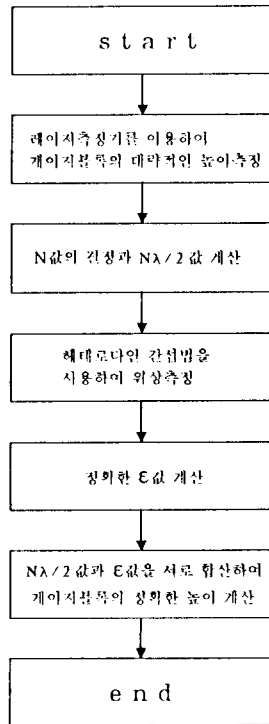


Fig. 2.2 계측의 순서도

2.3 레이저측정기와 전기마이크로미터를 이용한 높이측정원리

레이저측정기에 의한 높이차 측정원리를 Fig. 2.3에 나타내었다. 광원은 파장안정화 He-Ne 지만 레이저로부터 주파수가 f_1, f_2 로 서로 약간 다르고 그 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선 편광광이 시출된다. 기준비트신호를 얻기위해 광속분리기(Beam Splitter) BS로 광속의 일부분은 반사시키고 이를 광검출기 D1에 입사시키 두 주파수차이($f_1 - f_2 = 2.204\text{MHz}$)의 비트신호를 검출하고 증폭회로를 거친후 주파수 카운터에서 계수된다. 한편 광속분리기를 통과하여 PBS (Polarizing Beam Splitter)로 향한 빛은 PBS에서 편광방향에 대응하여 투과광(f_2 성분)과 반사광(f_1 성분)으로 분리되어 반사광은 C2에서 반사되고, 투과광은 C1에서 반사된 후 두 광속은 서로 합쳐지서 광소자 D2에 입사된다. 이때 C2를 속도 V로 이동시키면 주파수 f_1 의 빛은 도플러효과(Doppler shift)에 의해 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되고, 이렇게 마편 주파수 $f_1 + \Delta f_1$ 과 f_2 사이에 맥놀이(beat)가 일어나 이 비트주파수 $|f_1 - f_2 + \Delta f_1|$ 가 광소자 D2에서 검출된다. 이 검출된 신호는 증폭회로를 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 주파수의 속도에 대한 관계식을 고려하면 다음과 같다.

$$\Delta f_1 = \frac{2Vf_1}{c} \quad (2-3)$$

이거시, C : 빛 속도

$$\begin{aligned} L &= \int_0^t V dt = \int_0^t \frac{C}{2f_1} \Delta f_1 dt \\ &= \int_0^t \frac{\lambda_1}{2} \Delta f_1 dt \end{aligned} \quad (2-4)$$

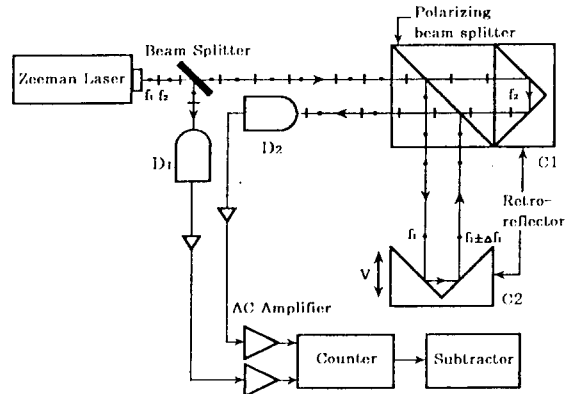


Fig. 2.3 레이저측정기에 의한 높이측정의 원리

2.4 헤테로다인 간섭법을 이용한 위상/높이 검출원리

Fig. 2.4에 헤테로다인 간섭법을 이용한 위상/높이 검출원리를 나타내었다. 광원은 피징인정화 He-Ne 지만레이저로부터 주파수가 ω_1, ω_2 로 약간 다르고 편광면이 서로 직교하는 2개의 직선편광광이 사출된다. 먼저 beam splitter에서 빔의 일부가 분리되어 광검출기 D₁으로 위사되어 기준신호로 쓰이고, beam splitter를 통과하여 편광 beam splitter으로 향한 빔은 편광방향에 대응하여 투과광과 반사광으로 분리되어 평면 mirror와 게이지분쪽에서 반사되어 다시 beam splitter로 되돌아가서 광검출기 D₂로 향한다. 이때 각각의 빔이 진퇴한 경로차에 따라 각 검출기 D₁, D₂에서의 검출된 출력신호의 위상차.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{c} f \Delta z = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta z \quad (2-5)$$

여기서, $\lambda = c/f$: 중심파장

Δz : 경로차

$$\Delta z = 2\Delta h \quad (2-6)$$

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\lambda}{4} \frac{\Delta\varphi}{\pi} \quad (2-7)$$

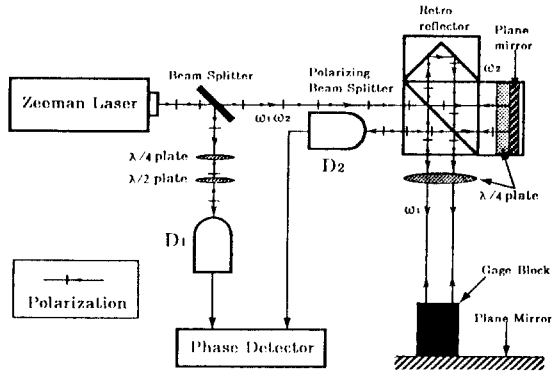


Fig. 2.4 헤테로다인 간섭법을 이용한 위상/높이 검출원리

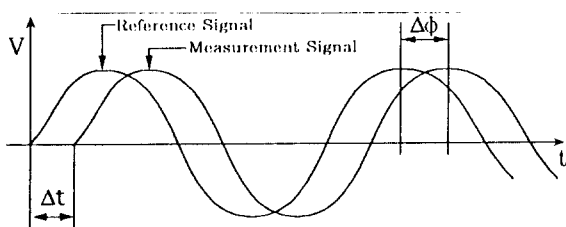


Fig. 2.5 기준비트와 측정비트신호에서의 위상신호형태

2.5 위상검출기의 구성

본 실험에서 사용하는 위상검출기의 원리는 Fig. 2.6에서 보는 바와같이 기준비트신호와 측정비트신호를 각각 비교기에 넣어 디지털신호로 만든다음 이를 EX-OR회로에 넣어 같은 부분을 서로 제기한 후 이를 지분하여 위상차가 0° 일때는 출력값이 0

V로 나오게 하고 위상차가 180° 일때는 최대값이 나오게하도록 하는 방법으로서 실험결과 간단하고 정확하게 위상값에 비례한 출력값을 얻을 수 있었다.

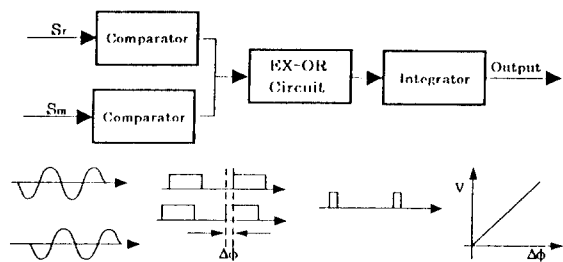


Fig. 2.6 위상검출기의 내부 Block diagram

3. 계측오차의 검토

3.1 바닥진동의 영향

바닥의 진동은 크게 나누어 10~2000Hz 주파수 영역의 수직방

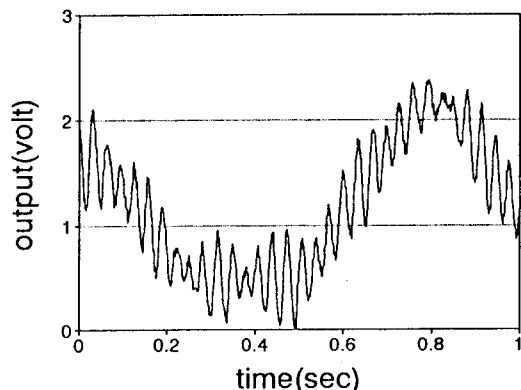
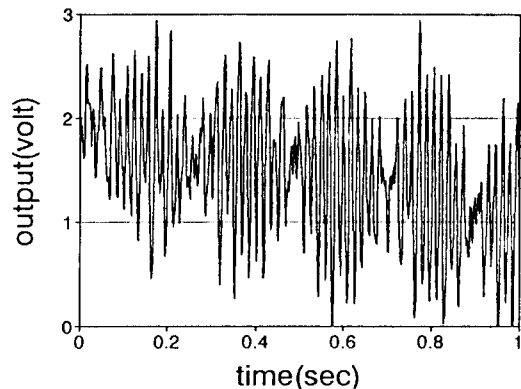


Fig. 3.1 공기제진대 사용유무에 대한 위상검출기의 출력신호

향 진동과 1~10Hz 주파수 영역의 수평방향 진동으로 나눌 수 있다. 이 2가지 진동성분중에서 수직방향의 진동지점이 중요한 문제이므로 바닥으로부터 전해지는 수직방향의 진동의 영향을 제거하기 위하여 광로개 진체를 공기제진대위에 설치하여 각종 진동의 영향을 없앨 수 있었다. 이 결과 광검출신호의 S/N비의 향상과 Drift의 축소가 보이었고 위상검출기 출력신호의 안정성이 증가하였다.

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 광로개가 가진되어 검출신호의 S/N비 지하를 초래한다. 그래서 이를 방지하기 위하여 미넨키 바로 광로개 진체를 차폐시켜 공기의 유동과 음압변화의 영향을 큰 폭으로 감소시켰다.

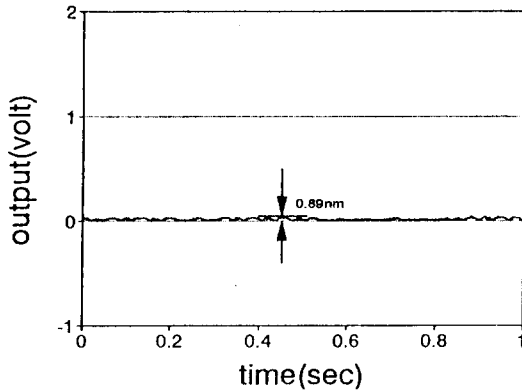


Fig. 3.2 광로개 진체를 차폐한 후의 위상검출기의 출력신호

3.3 대기조건(온도, 습도, 기압)의 변화

측정장소의 공기온도, 습도, 구성성분, 기압의 변화는 공기의 굴절률 변화를 유발하여 측정정도에 직결되는 레이저 파장의 변화를 일으키고, 또한 피측정물체를 신축시키므로 이를 보정할 필요가 있다. 굴절과 파장의 관계식에서

$$n_0 \lambda_0 = n \lambda \quad (3-1)$$

- 여기서, n_0 : 진공중의 굴절률
- λ_0 : 진공중의 파장
- n : 측정매질중의 굴절률
- λ : 측정매질중의 파장

으로 나타내어진다. 여기서 $n_0 = 1$ 이므로

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (3-2)$$

이다. He-Ne레이저의 진공중의 파장 $0.632991401 \mu\text{m}$ 로부터 Edle식에 의한 굴절률 n 은

$$(n - 1) \times 10^6 = [51.1475 \cdot P \times \left\{ \frac{1 + 1.33322 \times 10^{-4} \cdot P(0.817 - 0.0133 \cdot T)}{1 + 0.0036610 \cdot T} \right\} - 7.47715 \cdot f_0 \cdot H \cdot 10^{-2}] \quad (3-3)$$

여기서, P : 기압(Pa), T : 온도(°C),

f_0 : 포화수증기압(Pa) H : 상대습도(%)

로 구할 수 있다. 그리고 온도에 의한 피측정물의 신축은 다음 식으로 보정할 수 있다.

$$L_0 = L_T (1 - \alpha(T - 20)) \quad (3-4)$$

여기서, L_0 : 20°C에서의 길이

L_T : T°C에서의 길이

α : 재료의 선팽창계수

3.4 지만레이저의 발진 불안정과 주파수 오차

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

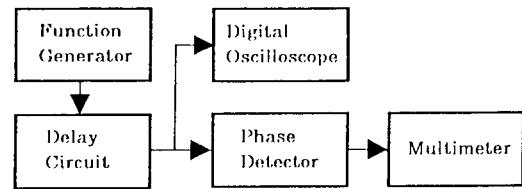


Fig. 3.3 위상검출기의 실험성 검증장치 구성도

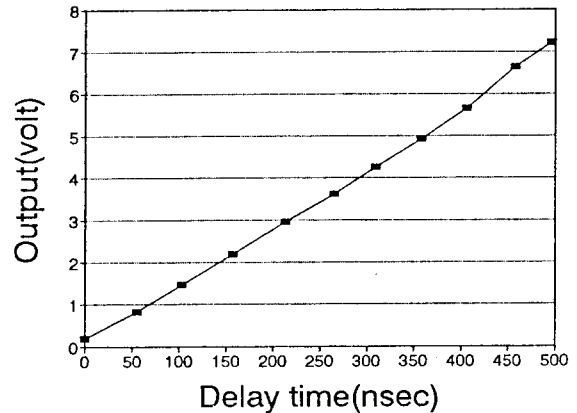


Fig. 3.4 위상검출기의 실험성 검증결과

3.5 위상검출기의 비선형성과 변동오차

위상검출기의 비선형성은 검증하기위하여 C-MOS Inverter를 사용한 지연회로를 제작한후, Fig. 3.3과 같이 실험장치를 구성하여 실험한 결과 Fig. 3.4에서 보는 바와같이 만족한 만한 결과를 얻었고 변동성분도 거의 없는 일정한 출력전압 신호를 얻을 수 있었다.

4. 실험장치 및 방법

Fig. 4.1은 게이저분류의 높이를 측정하기위한 1, 2단계의 실험장치 구성도이고 Photo 1과 Photo 2는 각각 실험에 사용된 광학계와 신호처리장치의 사진이다.

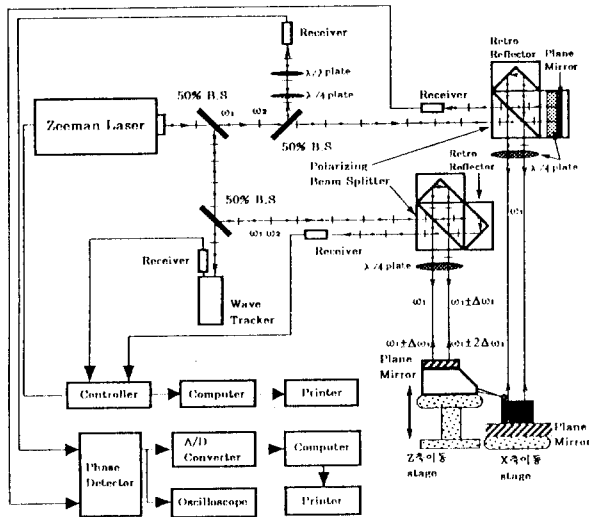
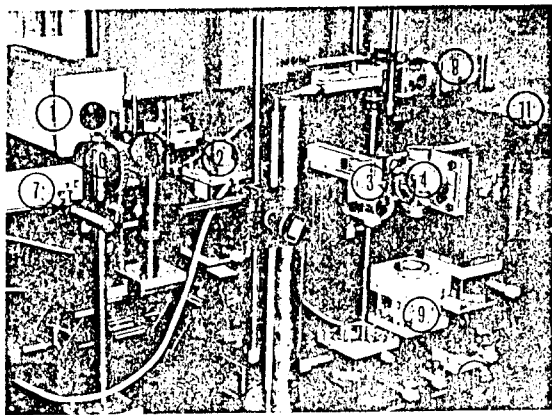
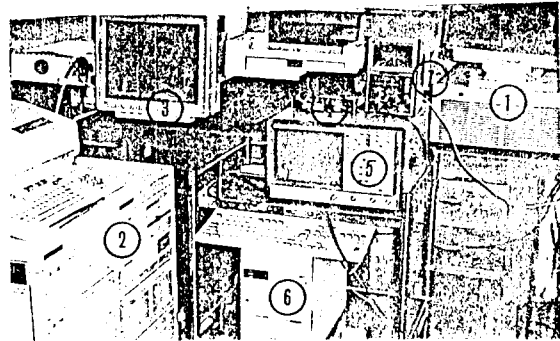


Fig. 4.1 제1,2 단계 통합 실험장치의 구성도



NO.	ITEM
①	Zecman He-Ne Laser Head
②	50% Beam Splitter
③	High Stability Plane Mirror Interferometer
④	Plane Mirror Interferometer
⑤	Quarter Wave Plate
⑥	Half Wave Plate
⑦	Receiver
⑧	Wave Tracker
⑨	MU-Checker Gage Head
⑩	Optical Table
⑪	Optical Breadboard

Photo 1 실험에 사용된 광학계



NO.	ITEM
①	Laser Position Transducer Electronics
②	Workstation
③	Monitor
④	Phase Detector
⑤	Digital Oscilloscope
⑥	IBM PC
⑦	Digital Differential MU-Checker

Photo 2. 실험에 사용된 신호처리장치

실험방법은 Fig. 4.1과 같이 실험장치를 공기제진대 위에 구성하고 각 방향에 대하여 레이저 빔을 정렬시킨후 receiver의 출력력을 통하여 레이저 빔이 정확히 고정되었는지를 확인한다. 게측오차의 요인을 지각시키기 위하여 공기제진대를 가동하고 비닐키비등으로 광학계 전체를 차폐시켜 공기의 유동이나 음압의 변위를 방지하고 대기조건의 영향을 최소화하기 위하여 온도(20℃), 습도(50%)가 정확하게 유지되도록 하였으며 온도와 습도를 측정하여 보정식에 의거하여 보정을 행하였다. 헤네로다인 간섭법을 이용하여 위상은 측정할때, 광학평면에서 반사한 측정

비트신호와 기준비트신호 사이의 위상차가 제로가 되도록 기준 비트신호의 receiver 앞에 있는 $\lambda/2$ plate를 θ 만큼 회전시킨후 위상검출기나 리사주 도형으로 이를 확인하고 고정한다. 먼저 1 단계로서 레이저추정기와 전기미크로미터를 이용한 간섭계에서 전기미크로미터를 광학평면에 위치시킨 상태를 제로값으로 세팅(setting)한 다음 광학평면에 게이지블록을 밀착시키 놓은 후 전기미크로미터를 이동시켜서 게이지블록의 윗면에 데이 이동량을 레이저추정기로 측정하여 게이지블록의 내라지인 높이를 측정한다. 2단계로 헤테로다인 간섭법을 이용한 간섭계로 게이지블록의 윗면과 광학평면에서 반사시켜서 얻은 측정비트신호와 기준비트신호를 위상검출기에 넣어서 위상차를 구한다.

5. 실험결과 및 고찰

표1은 시험대상물로 1mm에서 6.5mm 사이의 00급 게이지블록을 측정한 결과이다. 게이지블록의 최종높이는 00급 게이지블록의 오차범위를 벗어나고 있는데, 이것은 제1단계추정에서 수직방향 이송stage의 진지도 오차, 게이지블록과 평면 mirror 사이의 밀착불량등으로 나타나는 오차라고 볼 수 있다. 그러므로 진지도 오차가 매우 작은 수직방향 이송 stage를 사용하고 게이지블록과 평면 mirror사이의 밀착상태를 개선한다면 충분히 제거할 수 있는 오차라고 생각되고, 또다른 방법으로서 백색간섭계와 레이저추정기를 조합한 비직접 측정법을 사용하면 더욱 오차가 적은 측정값을 얻을 수 있다. 따라서 실험결과 나타난 게이지블록의 최종높이는 제1단계추정법이 조금 더 보완된다면 정확한 측정값으로 될 수 있다고 생각된다.

표1. 게이지블록의 측정결과

sample (mm)	제 1단계추정			제2단계추정	계측오차	①+②+③
	측정값 (μm)	N	$(\lambda/2)N$ (μm) ①	헤테로다인 간섭법(μm) ②	게이지블록의 신축량(μm) ③	게이지블록의 최종높이(μm)
1.0	1000.1	3162	1000.0378	+0.1284	-0.0043	1000.1619
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	-0.1486	-0.0130	3000.2681
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	4500.4865	+0.0239	-0.0195	4500.4909
5.0	5000.2	15810	5000.1891	+0.0735	-0.0217	5000.2429
5.5	5500.3	17391	5500.2080	+0.1480	-0.0239	5500.3321
6.0	5999.8	18971	5999.9100	-0.1344	-0.0260	5999.7496
6.5	6499.9	20552	6499.9296	-0.0930	-0.0282	6499.8084

여기서, $\lambda = 0.6325350 \mu\text{m}$ (측정온도 : 20.7°C)

6. 결론

1. 레이저추정기와 전기미크로미터를 이용한 측정법과 헤테로다인 간섭법을 채용하여 mm order의 높이를 가진 시험편을 nm order의 고정도로 계측가능하다는 것을 시험했다.
2. nm order 계측에서 발생할 수 있는 계측오차 요인을 검토하여 이의 영향을 지감시킬 수 있었다.
3. 자체 개발·제작한 위상검출기의 성능평가결과 좋은 실험성을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. 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, pp. 31, 136, 137
2. 橋康英, "光干涉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, 1993, pp. 755
3. 植本正明, 大岩 彰, "ヘテロダイン干涉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, 1992, pp. 121
4. Gary E. Sommargren, " Optical heterodyne profilometry", Appl. Opt. vol. 20, No. 4, 1981, pp. 610
5. 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, 1989, pp. 2141
6. Norman Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity", Appl. Opt. vol. 25, No. 13, 1987, pp. 2676
7. 谷村吉久, 藤沼慧機, 櫻井好正, "干涉計レーザー測長する場合の誤差要因", 精密機械, 4卷, 9, 1977, pp. 1106