

레이저를 이용한 정밀 길이 측정시스템 개발

Development of a Precision Length Measuring System by using Laser

°김진상*, 정성중**

*한양대학교 대학원 기계설계학과(Tel:+82-2-290-0444; Fax:+82-02-298-4634)

** 한양대학교 기계공학부(Tel:+82-2-290-0444; Fax:+82-02-298-4634; E-mail:schung@email.hanyang.ac.kr)

Abstracts An accurate length measuring system has been developed by a modified Michelson interferometer. A frequency stabilized laser source and a 20 fold frequency interpolation and digitizing circuit were applied to the system. Resolution of $\lambda/40$, 16 nm, was achieved from the discrete length measuring system. In order to obtain a resolution of $1\mu\text{m}$ a decimalizing module was designed for the $0.016\mu\text{m}$ resolution system. The refractive index of the ambient air was calibrated on the decimalizing module through the Edlen's formula. Performance of the system was evaluated on the machining center in short and long length measurements.

Key Words Decimalizing module, He-Ne laser, Length measurement, Michelson Interferometer, Photo diode

1. 서 론

반도체 제조공정이나 초정밀 가공이 요구되는 첨단 산업 분야에서 필수적인 각종 조립 및 검사 장비와 공작기계 서보계에서는 고정도, 고속 위치측정 시스템의 중요성이 날로 커지고 있다.^[2]

레이저를 이용한 정밀 길이 측정에서는 마이켈슨(Michelson) 간섭법과 헤테로다인(Heterodyne) 간섭법, 도플러(Doppler) 법 등이 연구되어 왔다.^[7] 헤테로다인 간섭법은 서로 다른 주파수의 광원을 필요로 하며, 고속측정이 어렵고, 주파수 안정화의 문제가 따른다.^[6,7,9] 도플러법은 고정도를 얻을 수 있으나 고속측정이 어렵다.^[3,7,9,10] 마이켈슨 간섭법의 변형된 형태인 Twyman-Green 간섭계를 이용한 간섭무늬 합치법이 있는데, 이는 길이 측정범위가 짧고, 측정에 많은 시간과 노력을 요한다는 단점이 있다.^[4,7,9]

길이 측정시 간섭무늬의 처리 방법에는 모아레 무늬 기법(Fringe Following Technique)과 위상 측정 기법(Phase Measuring Technique)이 있는데, 후자가 전자에 비하여 광학적인 위상 변화를 통해 안정한 신호를 얻을 수 있기 때문에 보다 정확하고, 정밀하게 간섭무늬를 해석할 수 있다.^[7]

본 연구에서는 정밀서보계에 응용가능한 미소 길이는 물론 긴 길이 측정용 길이측정 시스템에 대하여 연구하였다. Tanimura와 Kurosawa^[5]에 의해 연구된 바 있는 마이켈슨 간섭법에 기초하여 광학계를 구성하였고, 간섭무늬 처리 방법으로는 간섭 위상 측정법^[3]을 이용하였다. Tanimura와 Kurosawa의 길이측정기가 10 mm 범위내의 미소 길이 측정용인데 비하여 10 m 범위의 긴 길이 측정에 응용할 수 있도록 하였고, 공기굴절률 보상법과 측정속도가 향상된 길이 측정 시스템의 설계, 제작 및 평가법을 제안하였다.

또한 광간섭법을 이용한 길이 측정 시스템을 정밀 서보계에 적용시키기 위해서는 파장단위로 되어 있는 측정값을 미터단위로 십진화시키는 것이 요하며, 이 과정에서 발생하는 오차를 최소화하는 것은 중요하다.본 연구에서는 $\lambda/40$ 의 최소

측정단위를 갖는 디지털식 길이 측정시스템^[8]에 공기의 굴절률 변화에 관계없이 십진화 처리를 수행할 수 있는 연산장치를 개발, 도입함으로써 누적오차를 제거하는 방법을 개발하였고, $1\mu\text{m}$ 의 길이 측정 분해능을 획득하였다. 고속(40 MHz)으로 동작하는 계수기를 이용하여 최대 측정속도는 632.8 mm/s (38 m/min), 길이 측정범위는 10 m가 되도록 설계, 제작하였으며, 상용 레이저 측정기와와의 길이 측정 비교를 통해 미소길이 측정에서는 $\pm 500\text{ nm}$ 이내의 95% 측정 신뢰도를 갖고 있음을 검증했고, 공작기계상에서의 긴 길이 측정에서는 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 공작기계 위치결정도 범위내의 측정 정도를 확인할 수 있었다.

2. 측정 원리

두개 이상의 파동이 중첩될 때 진폭이 보강 또는 소멸되는 현상을 간섭이라 한다. 일반적인 간섭 현상을 수식으로 표현하면 식(1)과 같이 된다. 식(1)에서 오른쪽 변의 세 번째 항은 간섭이 일어날 때 상대적인 위상차(δ)에 의한 광도 변화를 나타낸다

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta \quad (1)$$

여기서, I: 중첩광의 광도

I₁: 기준광의 광도

I₂: 측정광의 광도

마이켈슨 간섭계에서는 광원을 기준광속과 측정광속으로 분리하고, 각각 기준면과 측정면에서 반사되어 되돌아 오는 광을 중첩시켜 상대적인 위상차로부터 만들어지는 간섭무늬를 계수하면, 측정면의 위치를 측정할 수 있다.^[3-7,9,10] Fig 1은 광센서에서 얻어진 간섭무늬수로부터 길이를 구하는 원리를 보인 것이다. 임의의 X 위치에서 길이는 X₀가 주어진 경우

다음식과 같이 된다.

$$X = X_0 + N \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

여기서, X: 측정위치
 X_0 : 초기위치
 N: 간섭무늬수

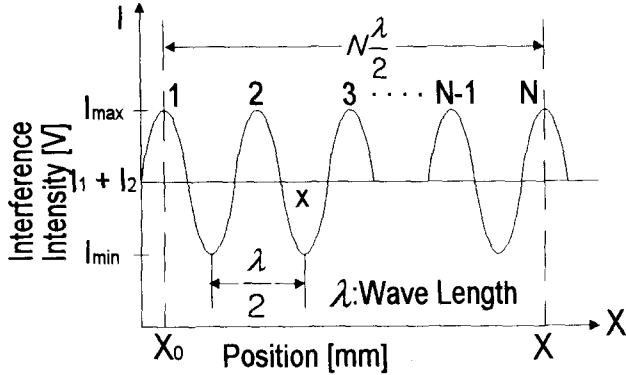


그림 1 간섭무늬와 위치
 Fig. 1 Interference fringes vs. Position

3. 시스템의 구성 및 동작

3.1 광학계

길이측정 시스템의 광학 부분은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 주파수 안정화 레이저헤드 (Laser Head), 편광기 (Polarizer), 분광기 (Beam Splitter; BS), 기준 Retroreflector, 측정 Retroreflector, 편광분광기 (Polarizing Beam Splitter; PBS), 광센서 (Photo Diode; PD) 등으로 구성된다.

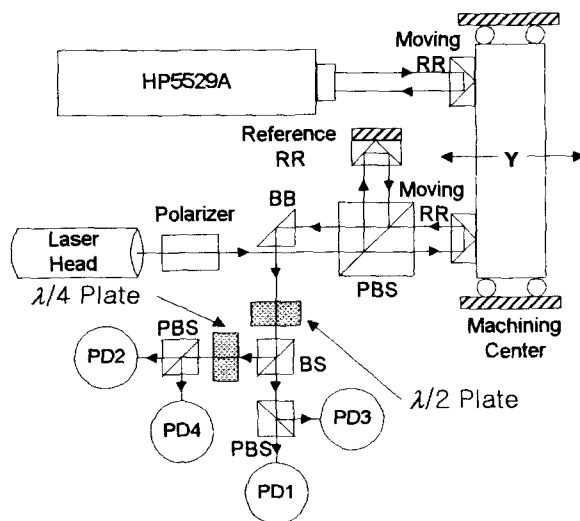


그림 2 광학계의 개략도

Fig. 2 Schematic diagram of optical system

편광기에서 편광된 광원은 기준광속과 측정광속으로 분리되고, 각각 기준면 Retroreflector와 측정면 Retroreflector에서 반사되어 되돌아와 간섭계에서 중첩된다. 중첩으로 만들어진 간섭광은 $\lambda/2$, $\lambda/4$ 위상지연판 (Retardation Plate)을 거치면서 90°씩 상대적인 위상차를 가지고 4개의 광센서(PD1, PD2, PD3, PD4)로 입사된다.

3.2 위상 신호처리기

Fig. 3은 Fig. 2의 광센서 (PD1-PD4)로부터 얻어진 위상 신호를 처리하기 위한 회로의 개략도이다.

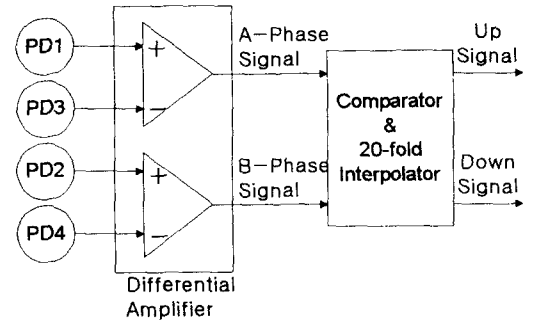


그림 3 위상 신호처리기의 개략도

Fig. 3 Schematic diagram of signal processor

위상 신호처리기는 서로 역위상인 신호를 감산함으로써 DC 성분과 레이저광의 잡음효과를 제거하고, 각각 90° 위상차를 갖는 2개의 정현파 신호 (A상 및 B상 신호)를 생성시키는 차동증폭기를 가지고 있다. A상이나 B상의 하나의 광간섭 정현파 신호는 주파수 보간기 (Frequency Interpolator)^[8]와 비교기를 거치면서 레이저 파장(λ)의 1/40 분해능 갖는 up/down 신호로 변환된다.

3.3 십진화 모듈 설계

Fig. 4는 위상 신호처리기에서 출력되는 파장 단위의 길이 신호(up/down signal)를 미터단위로 변환시켜주는 십진화 모듈의 개략도이고, Fig. 5는 마이크로 컴퓨터를 이용하여 누적오차를 제거하는 원리를 보인 것이다.

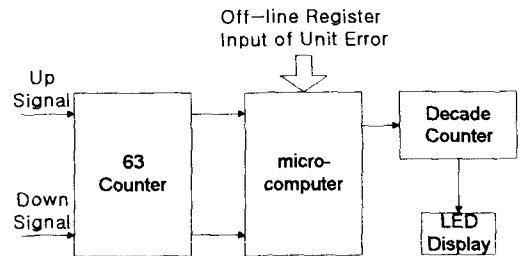


그림 4 십진화 모듈의 개략도

Fig. 4 Schematic diagram of decimalizing module

파장의 1/40의 길이에 해당하는 up/down 신호가 63진 계수를 거쳐 약 1 μ m에 해당하는 신호로 변환된다. 이 과정에서 생기는 오차가 계속 누적되지 않도록 마이크로 컴퓨터는 단위오차 (Unit error) 값을 적산하여 0.5 μ m를 넘을 때 한 펄스

를 소개한다. 예를 들어 레이저광의 파장이 $0.6327612 \mu\text{m}$ 일 때 단위 오차값은 $0.00340111 \mu\text{m}$ 이며, $148 \mu\text{m}$ 인 지점에서 누적오차가 $0.5 \mu\text{m}$ 를 넘고, 이 때 한 펄스를 소거하면 누적오차는 $-0.49663572 \mu\text{m}$ 가 된다. 즉 긴 길이에 대해서도 오차의 범위가 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 이내임을 알 수 있다.

실제로 레이저의 파장은 공기 굴절률에 따라서 변하기 때문에^{[1],[6]} 기압, 온도, 상대습도, 포화수증기압 등을 측정하여 파장을 계산한 후 이 때의 단위 오차값을 오프라인 (Off-line)으로 마이크로 컴퓨터의 레지스터에 저장시켜 줌으로써 파장 변화에 대비할 수 있도록 하였다.

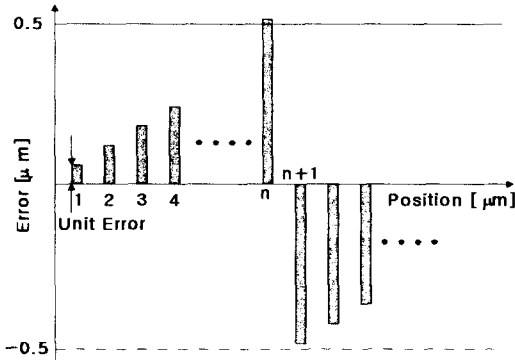


그림 5 누적오차와 위치
Fig. 5 Accumulation error vs. Position

4. 시스템의 특성

4.1 오차요인

광간섭법을 이용한 정밀 길이 측정시 정밀도에 직결되는 것은 레이저광의 파장에 대한 신뢰도이다. 실제로 측정을 수행하는 장소의 대기조건(온도, 습도, 기압)의 변화는 공기의 굴절률 변화를 일으키고, 이는 식(3)에서 보는 것처럼 파장의 변화를 가져온다.^[1]

$$n\lambda = n_0\lambda_0$$

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

여기서 n_0 : 진공 중의 굴절률 (=1)
 λ_0 : 진공 중의 파장 (=632.991401 nm)
 n : 측정 매질의 굴절률
 λ : 측정 매질 중의 파장

굴절률 n 은 기압 (P, Pa), 온도 (T, °C), 상대습도 (H, %), 포화수증기압 (f_0 , Pa)이 주어진 경우 다음의 Edlén 경험식으로부터 구할 수 있다.

$$(n-1) \times 10^6 = 51.1475P \times \left(\frac{1+A}{B} \right) - C \quad (4)$$

여기서 A: $1.33322 \times 10^{-4}P(0.817-0.0133T)$
 B: $1+0.003661T$
 C: $7.47715 \times 10^{-2}f_0H$

4.2 측정정밀도

3절에서 설계 제작된 길이측정기의 분해능을 검증하기 위해 10 nm의 분해능을 갖는 상용 변위 측정기 (HP5529A)와의 동기 실험을 수행하였다.

Fig. 6은 미소길이인 60 mm 측정범위에서 31점의 길이측정 결과를 보인 것이다. 무작위로 움직이는 동안 31개소에서 위치값 획득후 HP5529A와의 편차를 도시한 것이다. 이경우 제작된 길이측정기에서는 HP5529A용 HP10751A/B (Air Sensor)를 이용하여 식(4)에 필요한 공기중의 온도, 습도, 압력을 측정 후 굴절률을 보정하였고, 그에 따른 레이저광의 파장은 식(3)을 이용하여 보정하였다. 이렇게 계산된 파장값에 따라서 단위 오차를 얻을 수 있으며 이는 마이크로 컴퓨터의 레지스터 입력이 된다.

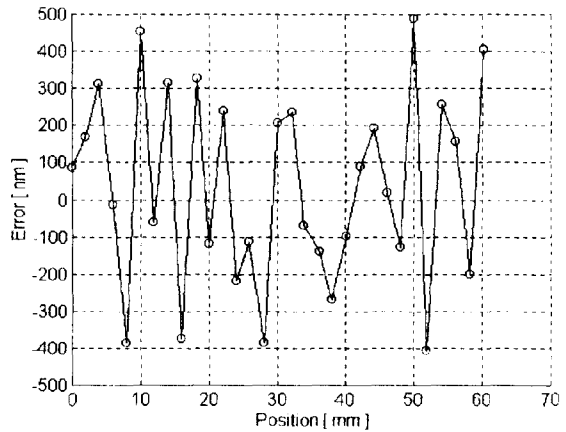


그림 6 짧은 길이 측정에서 위치오차

Fig. 6 Displacement error for short length measurement

Fig. 7은 오차값들의 확률분포함수를 나타내며 95.5% 신뢰도일 때 최대 측정오차는 -491nm에서 554nm임을 알 수 있다. 오차값들이 표준정규분포의 형태가 아닌 균일분포 형태를 나타내는 것은 심진화하는 과정에서 단위오차값을 적산하였기 때문이다. 이 측정오차에는 진동의 영향은 물론, 양계측기에서 길이결과를 읽어낼 때 사람이 갖는 우연오차 (Random Error)도 포함되어 있다.

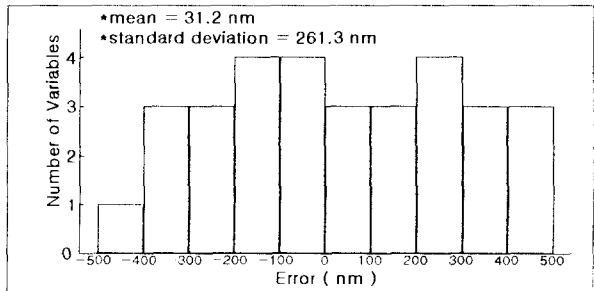


그림 7 오차의 확률밀도함수

Fig. 7 Probability density function of the error

4.3 측정범위 및 최대 측정속도

본 연구에서 고안한 심진계수기의 계수 범위는 7자리이다.

즉 최소 측정단위인 분해능이 1 μ m 이므로 측정 범위는 10 m 이다. 또한 계수가 회로의 최대 작동 주파수가 40MHz 이므로 최대 측정 가능 속도는 632.8 mm/s 이다.

Table 1 과 Fig. 8 은 수직형 머시닝 센터 (화천기공(주) ; VMC430)에서 빠르고 긴 거리를 이송할 때 길이 측정을 수행한 결과이다. 급속이송모드(G00)에서 최대 이송속도는 200mm/s 이며, 이 속 도로 정방향 250 mm, 역방향 200 mm 로 왕복시켜 가면서 400mm 범위를 측정했다. 동작기계가 가지는 위치결정도 (NMTBA 규격) 가 $\pm 12 \mu$ m 임을 감안하면 오차 발생 원인은 동작기계로부터 기인한다고 할 수 있다.

Table 1. Deviation for long length measurement

표 1 긴 길이 측정에서 측정값의 차이

M/T Position (Moving Length)	Measuring Value	Deviation
250(250)	249.997	-0.003
50(-200)	50.007	0.007
300(250)	299.990	-0.010
100(-200)	100.004	0.004
350(250)	350.002	0.002
150(-200)	149.995	-0.005
400(250)	400.011	0.011
200(-200)	200.009	0.009

(speed : 200 mm/s, length : 400 mm, unit : mm)

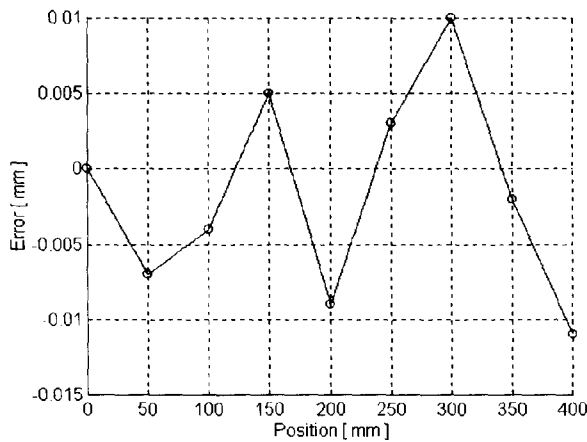


그림 8 긴 길이 측정에서 위치오차

Fig. 8 Displacement error for long length measurement

5. 결 론

1) 마이켈슨 간섭계에 기초한 위상지연법을 이용하여 분해능 1 μ m, 측정속도 632.8 mm/sec, 길이 10 m 까지 측정가능 하며, 각종 서보계의 정밀 위치 및 길이 측정에 응용할 수 있는 심진화된 길이측정 시스템을 설계, 제작 및 검증하였다.

2) 주파수 안정화 He-Ne 레이저를 이용하고, 온도, 습도, 압력에 따른 공기중에서의 레이저광의 굴절률을 보정함으로써 레이저광의 파장 변화를 보정하였다.

3) 차동앰플을 이용하여 서로 역위상의 신호를 감산함으로써 레이저광의 강도 변화나 잡음 효과를 상쇄할 수 있었으며, 20 배 주파수 보간 회로 개발과 디지털 신호처리를 이용함으로써 길이 측정의 정도를 확보하였다.

4) 동작기계 및 정밀 서보계의 위치검출 센서로 적용가능하도록 심진화 모듈을 설계하였다.

5) 60 mm 범위 내의 미소길이 측정에서는 개발된 측정기를 상용 HP5529A 길이 측정기와 비교한 결과, 각각 95% 신뢰도 구간에서 ± 500 nm 의 오차를 가짐을 확인하였다.

6) 개발된 길이 측정 시스템을 CNC 동작기계의 위치오차 측정에 응용한 결과 400 mm 범위의 긴 길이 측정에서 동작기계 오차 범위인 $\pm 12 \mu$ m 이내의 측정 결과를 얻었다.

7) 향후 각종 서보계에의 실용화를 위해서는 개발된 길이 측정 시스템의 절대적인 오차보정에 관한 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

1. N.Bobroff, "Residual errors in laser interferometry from air turbulence and nonlinearity", *Applied Optics*, Vol.26, No.13, pp.2676-2682, 1987
2. P.A.Mckeown, "The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future", *Annals of the CIRP*, Vol.36, No.2, pp.495-501, 1987
3. C.Miyazaki, et al., "A Laser Measurement System for Fast and Precise Positioning", *JSME International Journal, Series III*, vol.33, No.1, pp.49-54, 1990
4. F.L.Pedrotti and L.S.Pedrotti, *Introduction to Optics*, Prentice Hall, 1993.
5. Y.Tanimura and T.Kurosawa, "Small Laser interferometer Linked to Laser Source with an Optical Fiber", *JSPE*, Vol.55, No.12, pp.2157-2162, 1989
6. W.Tyler, "High-accuracy Displacement Interferometry in Air", *Applied Optics*, Vol.24, No.6, pp.808-815, 1985
7. E.Wagner, et al., *Sensors (Optical Sensors) ; Optical Phase-Sensitive Detection*, Vol.6, Chapter 13, VCH, 1992.
8. 김진상, 정성종, "공간섭법을 이용한 정밀 위치측정 시스템 설계", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp.145-149, 1997
9. 안근식, 장경영, 문희관, "도플러방식과 헤테로다인 방식의 공간섭법을 병용한 절대높이 측정 정밀도 향상", 한국정밀공학회지, Vol.13, No.6, pp.128-135, 1996
10. 양운원, 조동우, 김무환, "레이저광의 도플러 효과를 이용한 진동측정에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp.362-365, 1991