

헤테로다인 변위 측정 간섭계의 고속, 고분해능 위상 측정

김민석*, 김승우*

High-speed, High-resolution Phase Measuring Technique for Heterodyne Displacement Measuring Interferometers

Min-Seok Kim*, Seung-Woo Kim*

ABSTRACT

One of the ever-increasing demands on the performances of heterodyne interferometers is to improve the measurement resolution, of which current state-of-the-art reaches the region of sub-nanometers. So far, the demand has been met by increasing the clock speed that drives the electronics involved for the phase measurement of the Doppler shift, but its further advance is being hampered by the technological limit of modern electronics. To cope with the problem, in this investigation, we propose a new scheme of phase-measuring electronics that reduces the measurement resolution without further increase in clock speed. Our scheme adopts a super-heterodyne technique that lowers the original beat frequency to a level of 1 MHz by mixing it with a stable reference signal generated from a special phase-locked-loop. The technique enables us to measure the phase of Doppler shift with a resolution of 1.58 nanometer at a sampling rate of 1 MHz. To avoid the undesirable decrease in the maximum measurable speed caused by the lowered beat frequency, a special form of frequency up-down counting technique is combined with the super-heterodyning. This allows performing required phase unwrapping simply by using programmable digital gates without 2π ambiguities up to the maximum velocity guaranteed by the original beat frequency.

Key Words: heterodyne interferometer (헤테로다인 간섭계), phase meter (위상 측정기), super-heterodyne technique (슈퍼 헤테로다인 기법)

1. 서론

헤테로다인 변위 측정 간섭계는 우수한 정밀도, 비교적 쉬운 측정 방법, 그리고 비접촉이라는 여러 장점 때문에 동작기계의 교정이나 초정밀 가공기와 리소그래피 스테퍼의 위치 센서 등 산업계 전반에서 광범위하게 사용되고 있다⁽¹⁻³⁾. 헤테로다인 간섭계는 일반적으로 주파수 안정화 이중 주파

수 HeNe 레이저, 간섭 광학계 그리고 위상 측정기로 이루어져 있으며 이중에서 위상 측정기는 기준 광검출기와 측정 광검출기에서 나온 두 전기 신호의 위상차를 검출하는 장치로 헤테로다인 간섭계의 측정 속도와 분해능을 결정짓는 중요한 요소이다. 전자공학의 발전에 힘입어 위상 측정기의 성능은 크게 향상되어 왔지만 생산성과 정밀도에 대한 요구가 점점 높아감에 따라 수 m/s 정도의 속

^{*)} 2002년 4월 3일 접수
* 한국과학기술원 기계공학과

도로 움직이는 물체를 나노 미터 이하의 분해능으로 측정해야 할 필요성이 대두되었다. 이와 같이 다른 간섭계의 위상 측정과는 달리 높은 측정 대역과 분해능을 동시에 만족시켜야 하므로 위상 측정기의 개발은 큰 부담으로 작용하여 왔다. 이런 이유로 위상 측정기의 개발은 상용 업체들이 주도하게 되었으며 현재 평면 거울 간섭계를 사용했을 때, 최대 측정 속도 2.1 m/s, 분해능 0.31 nm 를 구현하는 위상 측정기를 개발하였다⁽⁴⁾.

두 전기 신호의 위상을 측정하는 방식은 여러 가지가 있으나 측정 대역과 분해능을 동시에 높으려면 시간 분해능을 높여야 되며 주파수 대역 20 MHz 에 위상 분해능 0.1°를 구현하려면 약 10 ps 의 시간 분해능이 필요하다⁽⁵⁾. 시간 분해능이 올라가면 올라갈수록 회로를 구성하기가 더욱 힘들어지고 비용도 기하급수적으로 증가하는 문제가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 물체가 빠르게 움직일 때와 느리게 움직이는 경우를 나누어 위상을 측정하는 방식이 제안되었다⁽⁶⁻⁷⁾. 하지만 빠르게 움직이는 동안(높은 대역이 필요한 구간)에는 낮은 분해능으로 측정함으로써 움직인 총 변위는 높은 분해능으로 측정할 수 있지만 빠르게 움직이는 순간에서의 변위는 높은 분해능으로 측정하기 어렵다. 본 논문에서는 슈퍼 헤테로다인(super heterodyne) 방식을 사용해 시간 분해능을 높이지 않고도 측정대역과 분해능을 모두 향상시키며 빠르게 움직이는 동안에도 높은 분해능으로 측정할 수 있는 위상 측정기를 제안하고 그 성능을 검토한다.

2. 헤테로다인 간섭계

Fig. 1 은 헤테로다인 변위 측정 간섭계를 간략하게 도시한 것이다. 헤테로다인 간섭계의 광원은 HeNe 레이저로 선형 편광의 서로 수직인 2 개의 주파수를 갖는 광을 내보낸다. 이 광의 일부분을 각 광의 편광축에 45° 기울어진 편광판을 이용하여 간섭시키면 광검출기에는 맥놀이 현상에 의해 두 광의 주파수 차이에 해당하는 성분만 검출이 된다. 광검출기의 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 A 는 신호의 진폭이고 f_1, f_2 는 각각 광의 주파수이다. 이 신호를 기준신호로 사용한다. 맥놀이 주파수의 크기는 레이저에 따라 다르나 250 kHz ~ 700 MHz 정도이다.

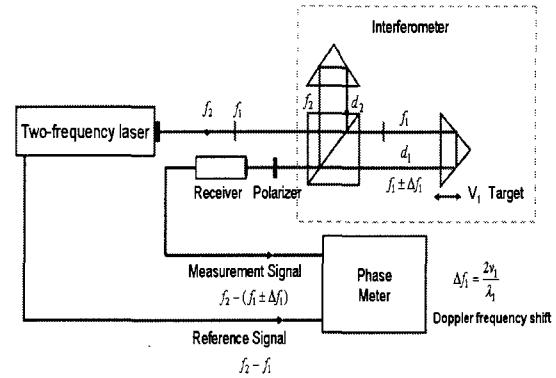


Fig. 1 Block diagram of a typical heterodyne interferometer system. f_1 and f_2 are the frequencies of the two-frequency laser source. Polarization states perpendicular to the plane of the page, \bullet , and parallel to the plane of the page, $|$, are indicated

한편 나머지 광은 편광방향에 따라 편광 광분할기(PBS)에서 나뉘어져 주파수 f_1 의 광은 움직이는 반사경에 f_2 의 광은 고정된 반사경에 반사되어 마찬가지로 45° 기울어진 편광판에서 합쳐져 간섭 신호를 만든다. 이 신호를 측정 신호로 사용한다. f_1 의 광경로가 $2d_1$, f_2 의 광경로가 $2d_2$ 이라면 측정 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 B 는 신호의 진폭, n 은 공기굴절률 그리고 λ_1, λ_2 는 각각 광의 파장이다. 간섭계에서 절대적인 위상값은 중요하지 않으므로 두 신호의 위상차는 다음과 같다.

$$\varphi \cong 4\pi m(d_1 - d_2)/\lambda_m \quad (3)$$

여기서 λ_m 은 평균 파장이다.

기준 신호와 측정 신호와의 위상을 측정하면 변위를 알 수 있다. 0.1 nm 의 분해능을 얻기 위해서는 $2 \times 360^\circ \times 0.1 \text{ nm} / (633 \text{ nm}) \approx 0.1^\circ$ 의 위상 측정이

분해능이 필요하다. 반사경이 v 라는 속도로 움직이면 측정 신호는 도플러 효과(Doppler effect) 의해 주파수 편이가 생기며 이 양은 식(3)을 시간에 대해 미분함으로써 얻을 수 있다. 도플러 주파수는 다음과 같다.

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

반사경이 1 m/s 로 움직이면 이로 인한 도플러 주파수는 3.16 MHz 이며 광이 반사경에 두 번 맞는 평면 거울 간섭계의 경우, 도플러 주파수는 두 배 6.32 MHz 가 된다.

3. 위상 측정기

대부분 위상 측정기는 기준 신호의 주기와 두 신호의 영점을 지나는(zero crossing) 시간차의 비를 측정하여 위상 값을 구한다. Fig. 2 에 나타나듯이 두 신호의 위상은 다음과 같이 정의된다⁽⁵⁾.

$$\phi = 360^\circ \times \frac{T_+}{T_R} \quad (5)$$

여기서 T_R 은 기준신호 V_r 의 주기이며, T_+ 는 V_r 과 V_m 이 영점을 지나는 시간차이다. 위상 측정기는 T_+ 와 T_R 의 시간 동안 내부의 클럭을 계수하여 위상 값을 구한다. 따라서 위상 측정기의 분해능은 기준 신호의 주기와 위상 측정기의 시간 분해능에 의해 결정지게 된다.

위상측정기의 시간 분해능이 1 nsec 이고 기준 신호의 주파수가 10 MHz 이면 위상 분해능은 3.6° 가 되며 기준 신호의 주파수가 1 MHz 인 신호의 위상 분해능은 0.36° 가 된다. 이처럼 기준 신호의 주파수가 낮을수록 위상 분해능은 높아지지만 측정 속도에 제약을 받게 된다. 일반적으로 위상 측정은 기준 신호의 한 주기 단위로 이루어지므로 기준 신호의 주파수가 곧 위상 값의 샘플링 주파수가 된다. 하나의 샘플링 기간 동안 위상 변화량이 $2\pi/3$ 이상이 되면 위상복원(phase unwrapping)에 어려움이 있다⁽⁸⁾. 즉 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\Delta\phi| < 2\pi/3 \quad (6)$$

여기서 $\Delta\phi$ 는 샘플링 기간 동안의 위상 변화량이다.

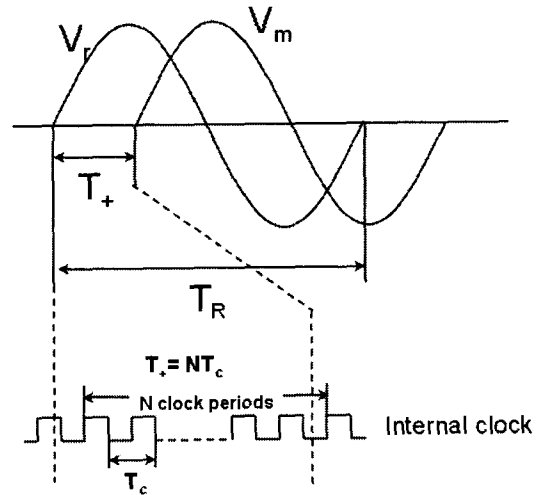


Fig. 2 Diagram illustrating how a phase meter works. T_+ is the time difference between two zero-crossings of reference and measurement signals, and T_R is the period of reference signal. T_c is the timing resolution of the phase meter

측정할 수 있는 도플러 주파수의 한계는 식(6)의 양변을 샘플링 시간, 즉 기준 신호의 반주기로 나누어 주면 얻을 수 있다.

$$|\Delta f| = \left| \frac{\Delta\phi}{2\pi(T_R/2)} \right| < \frac{2}{3} f_R \quad (7)$$

여기서 f_R 은 기준 신호의 주파수 $f_1 - f_2$ 이다.

기준 신호의 주파수가 1 MHz 이고 평면 거울 간섭계를 사용할 경우 측정 가능한 최대 이송속도는 식(4)와 (7)로부터 약 ± 104 mm/s 이다. 최대 이송 속도는 기준 신호의 주파수에 비례하므로 빠르게 움직이는 물체를 측정하려면 기준 신호의 주파수를 크게 해야 하지만 분해능이 낮아지게 된다. 두 가지 성능을 모두 개선하려면 시간 분해능을 높여야 하지만 이송 속도 2 m/s 에 분해능 0.3 nm 를 구현하려면 평면 거울 간섭계를 사용할 경우 최소한 약 100ps 의 시간 분해능이 필요하므로 구현하기 힘들다.

4. 슈퍼 헤테로다인 위상 측정 (Super Heterodyning Phase Measurement)

슈퍼 헤테로다인 기법은 UHF 나 VHF 수신기에 많이 사용하는 방법으로 원하는 대역으로 신호를 얻기 위해 두 개의 주파수를 가진 광을 간섭시켜 얻은 맥놀이 신호를 전기적으로 생성한 국부 발진기 신호와 믹서에서 곱해주면 맥놀이 신호와 국부 발진기 신호의 주파수 차에 해당하는 신호를 얻을 수 있다. 이 방법을 이용하면 기준 신호와 측정 신호의 위상을 바꾸지 않고 주파수를 낮춤으로써 맥놀이 주파수가 크더라도 쉽게 위상 분해능을 올릴 수 있다. 하지만 Fig. 3 에서 알 수 있듯이 기준 주파수를 낮추면 도플러 주파수가 음의 부호일 때 측정 대역폭이 좁아지는 문제가 있다.

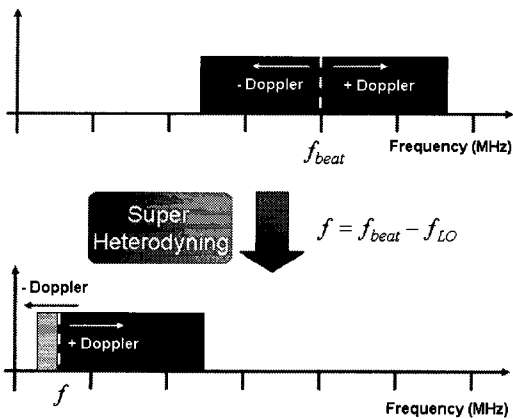


Fig. 3 Detection Bandwidth which is directly related to the maximum measurable slew rate. Super heterodyning method enhances the phase resolution but limits the detection range of negative Doppler shift. f_{beat} and f_{LO} are frequencies of optically heterodyned beat signal and electrically generated local oscillator signal, respectively

이를 해결하기 위해 Fig. 4 와 같이 2 개의 국부 발진기를 이용하여 도플러 주파수의 부호에 관계없이 즉, 물체의 운동방향에 관계없이 같은 대역폭을 갖도록 하였다. 도플러 주파수가 양의 부호일 경우 측정신호 A 를 사용하고, 음의 부호일 경우 측정 신호 B 를 사용하면 물체의 운동방향에

관계없이 도플러 주파수는 항상 양의 값이 된다.

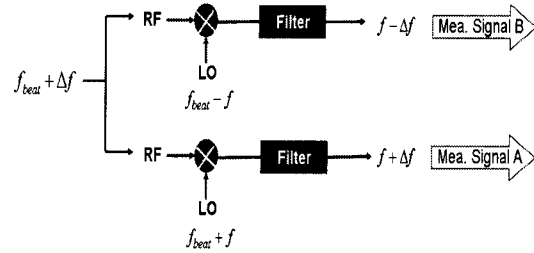


Fig. 4 Two-way heterodyning method. Two local oscillator signals with different frequencies are generated; the frequency of one signal is higher than f_{beat} as f and the other is lower than f_{beat} as f

운동 방향에 따라 측정 신호가 달라지므로 2 개의 위상 측정기를 사용하고 물체의 운동 방향이 바뀔 때 위상 측정기도 같이 변경되도록 하였다. 위상 측정기가 변경될 때 속도가 영에 근접하므로 두 위상 측정기 모두 측정 대역에 들어온다. 이때 위상 측정기 상호간에 위상 값이 교환되어 측정 방향이 바뀌더라도 위상 손실은 없게 된다.

앞서 언급하였듯이 최대 측정속도는 2π 모호성(ambiguity) 때문에 기준 신호의 주파수에 비례한다. 2 차 헤테로다인에 의해 기준 주파수가 낮아졌으므로 기존의 방법으로는 측정 속도를 높일 수 없다. 따라서 본 연구에서는 위상 측정기에 위상이 2π 만큼 바뀔 때 이를 측정하는 2π 카운터를 설계하여 추가하였다. 물체가 빠른 속도로 움직이면 기준 신호의 한 주기 안에 측정 신호의 위상이 2π 이상 변하게 되는데 위상의 차수는 2π 카운터로 측정하고 나머지 2π 미만의 위상의 측정은 고분해능 위상측정기가 맡게 된다. 2π 카운터의 값을 N , 주기 내 위상 측정기의 측정 값을 ϕ_T 라 하면 한 주기 동안의 위상 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta\phi = 2\pi N + \phi_T \quad (8)$$

5. 위상 측정기의 제작

앞장에서 언급했듯이 위상 측정기는 위상의 차수를 측정하는 2π 카운터와 고 분해능 위상 측

정기로 이루어져 있다. 위상 측정기의 구조를 Fig. 5 에 나타내었다. 헤테로다인을 통해 1 MHz 로 주파수를 낮춘 기준 신호와 측정 신호를 위상 측정기의 입력으로 받는다. 고 분해능 위상측정기는 100 MHz 시스템 클럭으로 동작하는 8 bit 카운터로 구성되어 있으며 위상 분해능은 1 MHz/ 100 MHz × 360° = 3.6°이다. 2π 카운터는 24 bit 카운터로 구성되어 있고 기준 신호가 High 일 때 카운트를 하도록 설계되어 있다.

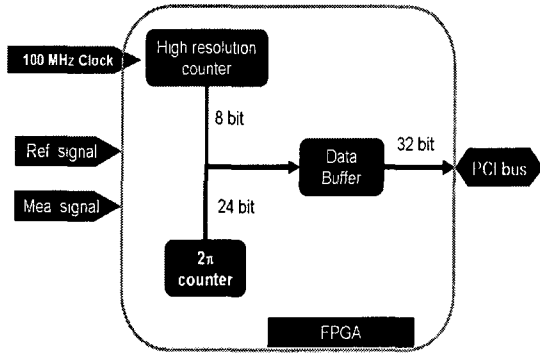


Fig. 5 Block diagram of the phase meter

최종적으로 얻어지는 위상 측정 데이터는 32 bit 데이터 형식으로 기준 신호의 한 주기마다 위상 측정기 내부의 버퍼(buffer)에 저장되며 외부 호출이 있을 경우, PCI I/O 카드를 통해 PC 로 전송된다. 이 모든 위상측정기의 디지털 회로는 Programmable gate array(FPGA)를 사용하여 하나의 칩 속에 간단하게 구현하였다. 하나의 위상 측정기에서 다른 위상 측정기로 그 측정 역할이 바뀌게 되는 경우, 현재 측정 역할을 수행하고 있는 위상 측정기의 위상 값을 다음 위상 측정기로 넘겨 주어야 하는데 이러한 역할 교대의 판단은 위상 측정기 외부의 PC 에서 이루어 지게 되며, 현재 측정된 속도 값과 과거 속도 값의 변화를 통해 위상 측정기 역할 교체의 판단을 하게 된다.

6. 위상 측정기의 검증

제작된 위상 측정기는 위상 조절이 가능한 두 대의 신호 발생기로 가상의 기준 신호와 측정 신호를 생성하여 검증하였다. 사용한 신호 발생기는 (Agilent 33120A) 위상을 0.01° 단위로 조절할 수

있으며 기준 클럭을 공유하여 신호 발생기의 두 신호를 동기 시킨다. 위상 측정기의 검증은 크게 세가지로 측정 물체가 거의 정지하였을 때를 나타내는 정적 테스트, 물체가 움직이고 있을 때를 나타내는 동적 테스트 그리고 물체의 방향이 바뀔 때를 나타내는 변환 테스트로 나누어서 실시하였다.

정적 테스트는 두 신호 발생기의 주파수를 1 MHz 로 같게 맞추고 위상을 1°의 간격으로 0°에서 360°까지 조절하면서 위상 측정기의 출력과 비교하였다. 아래 Fig. 6 에 결과를 나타내었다. 위상 오차를 변위 오차로 환산하여(평면 거울 간섭계 기준) 표시하였으며 100 번 측정하여 이를 평균하였다. 평균하지 않은 데이터도 모두 ± 1 LSB (3.6°) 이내 존재하며, 변위 오차로 환산하면 ± 1.58 nm 해당 한다.

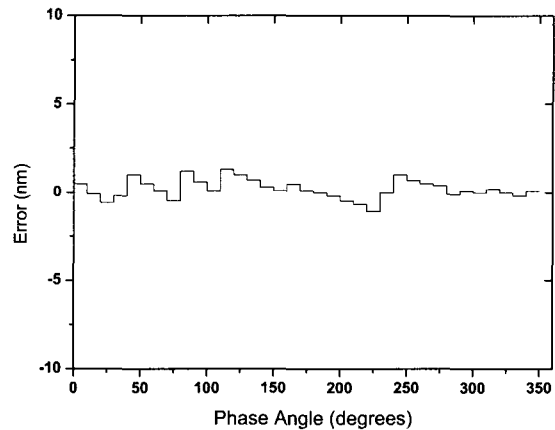


Fig. 6 Results of static test. Each point represents an average of 100 measurements

동적 테스트는 하나의 신호 발생기 출력 주파수를 1 MHz 로 고정하고, 다른 하나의 신호 발생기의 주파수를 바꿈으로써 측정 물체가 일정한 속도로 움직이는 상황을 재연하였다. 측정 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 마찬가지로 위상 오차를 변위 오차로 환산하였으며 각 점마다 100 개의 위치와 시간 데이터를 받아 시간과 위치를 각각 X 축, Y 축으로 하여 그래프를 그린 다음 선형회귀를 통해 직선 맞춤을 한 후, 각 점이 직선으로부터 떨어진 양의 표준편차를 구하였다.

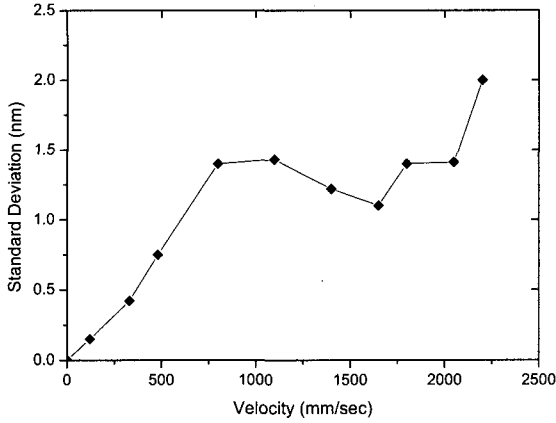


Fig. 7 Results of dynamic test. Each point represents an standard deviation of error in the 100 samples

신호 발생기의 최대 출력 주파수가 15 MHz 로 제한되어 그 이상의 성능은 평가하지 못했지만 14.9 MHz 의 측정 신호 주파수를 물체의 이송 속도로 환산하면 약 2.35 m/s 로 2 m/s 이상으로 빠르게 움직이는 물체도 측정 가능함을 알 수 있다. 이 때 최대 오차는 2 nm 이하이다.

두 위상 측정기의 변환 테스트는 신호 발생기의 출력 주파수 한계로 광학적인 방법을 이용하여 부호가 서로 반대인 도플러 주파수를 가진 두 개의 측정 신호를 만든 후⁽⁹⁾ 직접 스테이지의 움직임을 측정하여 평가하였다. 광학적인 구성과 측정 결과를 각각 Fig. 8 과 Fig. 9 에 나타내었다.

스테이지를 왕복운동 시켰을 때, 운동 방향에 따라 각기 다른 위상 측정기로 측정했음에도 초기 위치로 0.5 μm 이내로 복귀함을 알 수 있었다.

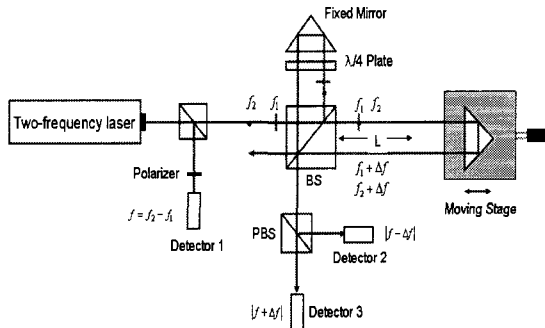


Fig. 8 Optical configuration for phase meter switching test⁽⁹⁾

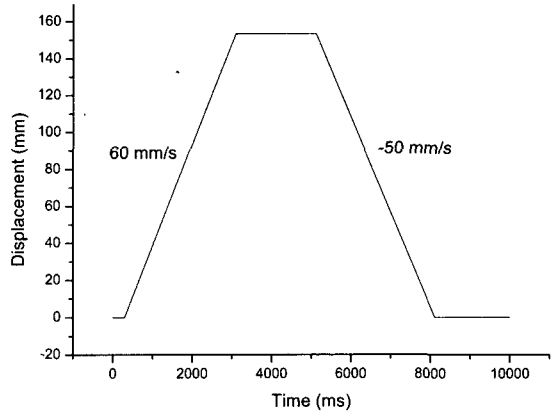


Fig. 9 Results of phase meter switching test. The moving reflector returned to its starting position within the error of 0.5 μm

스테이지에 장착된 센서의 분해능이 0.5 μm 이어서 더 이상의 정밀도를 확인할 수는 없었지만 변환은 큰 오차 없이 이루어짐을 알 수 있었다.

7. 결론

헤테로다인 변위 측정 간섭계에 쓰이는 위상 측정기의 분해능과 측정 속도를 모두 높이기 위해 기존의 시간 분해능을 높이는 방식이 아닌 슈퍼헤테로다인 방식을 제안하여 이를 구현하였다. 제작된 위상 측정기는 100 MHz 의 클럭으로도 샘플링 주파수 1 MHz 에 $\pm 1.58 \text{ nm}$ 의 정밀도와 2.35 m/s 이상의 측정 속도를 가지며 Programmable gate array 를 사용하여 간단하게 제작되었다. 빠른 물체를 측정하기 위해 위상 측정기 내부에 2π 카운터를 추가하였으며 속도 방향에 따라 위상 측정기가 변환되도록 하였다.

본 연구에서 개발된 위상 측정기는 고속으로 움직이는 나노 스테이지의 움직임을 측정하는데 충분히 활용할 수 있을 것이라 판단되며 추후 지속적으로 성능을 개선시킬 계획이다.

후 기

본 연구는 2001 년도 창의적연구진흥사업의 재정지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌

1. C.R. Steinmetz, "Sub-micron position measurement and control on precision machine tools with laser interferometry," *Prec. Eng.* Vol. 12, pp. 12-24, 1990.
2. Norman Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 4, pp. 907-926, 1993.
3. 안근식, 장경영, 문희관, "도플러 방식과 헤테로 다인 방식의 공간섭법을 병용한 절대 높이 측정 정밀도 향상," *정밀공학회지* Vol. 13, pp. 128-135, 1996.
4. Frank C Demarest, "High-resolution, high speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 9, pp. 1024-1030, 1998.
5. N.M. Oldham, J.A. Kramar, P.S. Hetrick, and E.C. Teague, "Electronic limitations in phase meters for heterodyne interferometry," *Prec. Eng.* Vol. 15, pp. 173-179, 1993.
6. Sadao Mori, Toshio Akatsu, and Chuichi Miyazaki, "Laser measurement system for precise and fast positioning," *Optical Eng.* Vol. 27, pp. 823-829, 1983.
7. Noh-Bin Yim, Cheon Il Eom, and Seung-Woo Kim, "Dual mode phase measurement for optical heterodyne interferometry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 11, pp. 1131-1137, 2000.
8. K Oka, M Tsukada, and Y Ohtsuka, "Real-time phase demodulator for optical heterodyne detection processes," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 2, pp. 106-110, 1991.
9. S. Yokoyama, "A high-speed and high-resolution heterodyne interferometer," *Proc. of SPIE*, Vol. 1319, pp. 212, 1990.