

# 두 파장 고속 위상천이간섭계를 이용한 단차 측정 Step Height Measurement Using Two Wavelength High Speed Phase Shifting Interferometry

\*장로마<sup>1</sup>, #김재완<sup>2</sup>, 김종안<sup>2</sup>, 강주식<sup>2</sup>, 김재은<sup>1</sup>, 박해용<sup>1</sup>  
\*R. Jang<sup>1</sup>, #J. W. Kim (jaewan@kriss.re.kr)<sup>2</sup>, J.-A. Kim<sup>2</sup>, C.-S. Kang<sup>2</sup>, J.-E. Kim<sup>1</sup>, H. Y. Park<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 한국과학기술원 물리학과, <sup>2</sup> 한국표준과학연구원 길이시간 센터

Key words : Phase shifting interferometry

## 1. 서론

최근 디스플레이나 반도체, MEMS(Microelectromechanical Systems)등의 산업 분야에서 미세 가공 영역이 늘어나면서, 제품의 공정 및 제품검사 시 미세 형상을 측정하는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라 미세 형상을 반복적으로 측정하는 속도는 생산량에 영향을 미치기 때문에 측정의 정밀도와 함께 고려되어야 할 중요한 요소로 부각되고 있다.

미세 형상을 측정하는데 광학적 방식으로 공간섭 방식이나 공초점현미경 방식 등이 사용되었는데 그 중 간섭신호를 이용한 형상 측정 방식은 높은 수직분해능과 비접촉 측정 특성으로 미세형상의 높이 측정에 유용하다.[1-3] 이러한 공간섭 방식에는 크게 백색광주사간섭계를 이용한 방식과 위상천이간섭계를 이용한 방식 있는데 백색광주사간섭계의 경우 넓은 단차 영역을 측정할 수 있지만 측정영역을 기계적인 구동으로 스캔해야 한다. 위상천이간섭계는 백색광주사간섭계보다 분해능이 높지만 간섭신호의  $2\pi$  모호성 때문에 측정할 수 있는 영역이 매우 제한적이다. 우리는 이러한 공간섭 방식 중, 고속의 측정을 위해 기계적인 이송이 없도록 하기 위하여 위상천이간섭계를 이용하여 고속으로 미세형상을 측정하는 방식을 개발해 왔다. 위상천이간섭계에서 광원의 주파수에 변화를 주어 위상을 이동시켜 고속으로 형상을 측정하는 방식을 제안한 바 있다.[4]

이 논문에서는 이러한 고속형상측정 방식에서 주파수가 다른 두 개의 광원을 사용하여  $2\pi$  모호성 없이 측정가능한 영역을 확장하여 언랩핑 없이 수 마이크로 미터의 단차를 측정할 것을 보였다. 이 과정에서 언랩핑 과정을 제거함으로써 간섭신호 처리 시 소요되는 시간을 줄이면서도 수 마이크로미터 영역 정도의 단차 측정 가능하게 하였다.

## 2. 고속 위상천이 간섭계

위상천이간섭계를 이용한 형상측정은 위상이 다른 3 장 이상의 간섭신호를 얻어, 이를 분석하여 측정 대상의 높이를 구하는 방식이다. 위상천이 간섭계를 이용하여 고속으로 미세형상을 측정하기 위해서는 위상을 빠르게 옮길 수 있으면서 위상 이동 간격의 반복도가 좋아야 한다. 위상을 이송하는 방식에는 기계적인 방식으로 OPD 를 변화시켜 위상을 이동시키는 방식과 전기적인 방식으로 주파수를 변화시켜 위상을 이동시키는 방식이 있는데 후자가 고속 측정에 유리하다. 위상천이간섭계를 고속측정에 적합하도록 하기 위해서는 광원의 주파수를 빠르게 변화시킬 수 있으면서도 주파수 간격의 반복도를 높일 수 있는 광원이 필요하다.

이러한 조건을 만족하도록 구성된 광원을 장착하여 기계적인 구동부 없이 구성되는 위상천이간섭계를 고속위상천이간섭계(High speed phase shifting interferometry, HSPSI)라 하였다.[4] HSPSI 에 대한 개략도는 Fig. 1 과 같다. 고속측정을 가능하게 하는 핵심 부분인 광원부는 전기적인 제어와 광학적 피드백을 이용하여 간섭신호를 고속으로 얻을 수 있도록 구성된다. 광원으로 전류의 스캔하여 주파수 조절

이 가능한 LD 를 장착하여 전기적인 방식으로 주파수를 조절하여 위상을 이동할 수 있다. 위상 간격의 반복도를 높이기 위해서 공초점 패브리-페롯 공진기(confocal Fabry-Perot Cavity, CFPC)의 일정한 간격의 공진 모드와 이 공진기에 의한 광 주입식 모드 잠금현상이 이용된다. CFPC 는 열팽창 계수가 아주 낮은 유리(Ultra-low-expansion glass, ULE®) 제작되었고 TEM00 모드의 FSR 이 5 GHz 가 되도록 하였다. 이러한 공진기는 일정한 FSR 를 유지하며 안정적인 주파수 기준 공진기 역할을 한다. 또한, 이 공진기를 Fig. 1 에서와 같이 진행하는 빛에 약간 비스듬하게 정렬하게 되면 공진기의 앞면에서 반사된 빛은 배제되고 공진기의 공진모드에 해당하는 빛만 LD 로 주입되어 이 공진 모드에 주파수 잠금이 발생한다. 따라서 위상을 옮겨주기 위하여 전류를 빠르게 스캔하는 중에도 수동적인 방식의 광학적 피드백인 주파수 잠금 현상에 의하여 CFPC 의 공진 주파수 주변에서 주파수가 안정적인 구간이 생성된다. 이는 고속으로 위상을 이동시키면서도 높은 반복도로 등간격의 위상 구간을 형성하므로 이를 간섭계에 연결하여 위상천이간섭방식으로 형상을 측정하면 고속 측정이 가능해진다.

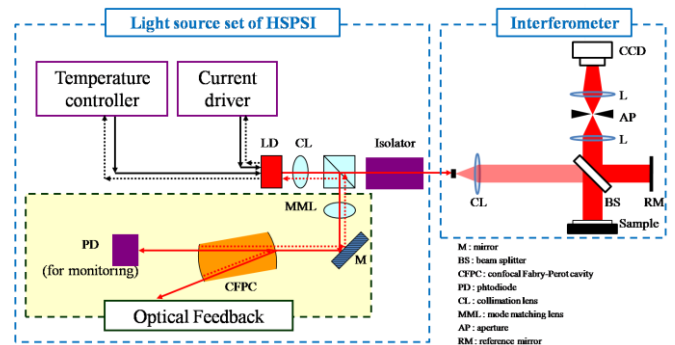


Fig. 1 Schematic diagram of HSPSI

## 3. 단차 측정

단일 광원을 이용한 위상천이간섭계에서 측정 가능한 단차의 한계는 파장의 1/4 높이이다. 따라서 하나의 광원으로 측정할 수 있는 대상은 매우 제한적이다. 파장이 637 nm 인 광원을 사용한다면 160 nm 도 채 안 되는 단차 내의 대상만 측정가능한 것이다. HSPSI 를 이용한 적용범위를 확대하기 위해서 측정할 수 있는 단차의 크기를 확대할 필요가 있다. 위상천이간섭방식에서 측정 가능한 영역을 확장하는 한 가지 방법으로 서로 다른 두 개의 파장으로 측정하는 방식이 있다.[5,6] 하지만 이 방식은 사용되는 두 파장의 등가 파장을 확장 시키면 측정 가능한 단차가 넓어지지만 노이즈 또한 확대되어 제대로 형상을 측정할 수가 없는 한계점이 있다. 따라서 우리는 HSPSI 를 이용한 높이 측정에서 측정 가능 단차 범위를 늘리기 위하여 두 파장의 광원을 이용하되 노이즈 레벨을 낮추어 한 파장으로 측정하는 경우와 같은 정밀도로 단차를 측정할 수 있도록 하였다.

또한 HPSPI 를 이용하여 간섭신호를 빠르게 얻을 뿐만 아니라 언랩핑을 하지 않고 각 픽셀에서 얻은 위상값만으로 위상을 복원할 수 있게 하여 신호를 처리하는 데 걸리는 시간도 단축하였다.

단차 시편을 측정하기 위한 장치는 Fig. 1 의 광원부 (light source set)와 동일한 세트를 하나 더 설치하여 두 광원부의 출력단이 광스위치로 연결되어 두 파장의 광원이 연속적으로 전환할 수 있도록 하였고, 이 스위치를 통과한 빛이 간섭계로 입력 되도록 하였다. 각각의 광원에 사용되는 LD 는 중심 파장이 635 nm 인 HL6344G(10 mW Hitachi Laser Diode) 와 658 nm 인 DL6147-040(40 mW Sanyo Laser Diode)을 장착하였다. 실제로 간섭신호를 취득할 때 사용된 각각의 광원의 중심 파장은 사용된 CFPC 의 공진 주파수의 평균값에 해당하는 636.57 nm 와 657.02 nm 로 등가파장이 20.5  $\mu\text{m}$  이다. 우리는 5 장의 간섭신호로 하나의 위상을 구하는 알고리즘을 사용하였는데 각 광원 별로 간섭신호 5 장씩, 총 10 장으로 각 픽셀에서의 위상을 구한다. 우리는 픽셀 간 OPD 를 합해가는 방식 대신 각 픽셀에서의  $2\pi$  나 머지 위상 값만으로 위상을 복원하였다. 이 방식은 오차가 누적되지 않고 계산처리 속도를 향상시킬 수 있다. 언랩핑을 하지 않기 위해 측정 대상의 전체 영역을 등가파장의 반인 10.2  $\mu\text{m}$  내에 들어오도록 대상을 두고 알고리즘 상에서 OPD 의 분석을 통한 각 위상의 오프셋 값을 고려하여 반올림 오차를 줄여 위상을 복원하였다. 이와 같이  $2\pi$  모호성이 없는 구간을 확장시켜 수 마이크로미터 영역을 고속이면서 한 파장의 정밀도로 측정할 수 있었다. 따라서 단차의 높이가 1  $\mu\text{m}$ , 2  $\mu\text{m}$ , 5 $\mu\text{m}$  이 단차시편으로 총 8  $\mu\text{m}$  의 구간을 언랩핑 없이 측정할 수 있었는데 그 결과가 Fig. 2 와 같다.

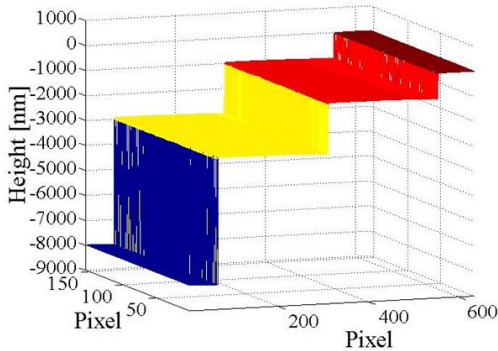


Fig. 2 The profile of the step height gauge block

이는 1 Hz 로 측정한 결과이다. 고안한 측정방식의 측정 정밀도를 확인하기 위하여 한 파장과 두 파장으로 평면 거울을 측정한 결과를 비교하면 그 값의 차이가 없다. 즉, 반올림 오차를 보정하여 광경로차에 해당하는 파장의 차수를 올바르게 결정하여 한 파장으로 측정한 경우와 같은 정밀도를 갖게 된 것이다. 또한 측정속도를 높여 30 Hz 로 측정한 결과와 비교해 보면 단차의 높이나 반복도 면에서 1 Hz 와 거의 같음을 확인하였다.

4. 결론

HPSPI 의 광원으로 파장 간격이 좁은 두 개의 파장을 사용하여 단차 측정 가능 범위를 넓혀 8  $\mu\text{m}$  영역의 단차 시편을 측정하였다. 언랩핑을 하지 않고 두 파장광원으로 부터 측정된 각 픽셀의 위상값만으로 형상을 복원하는 방법을 고안하여 이웃 픽셀간 OPD 를 구하여 합하는 방식에서 오차가 누적되는 문제에서는 자유로워질 수 있었으며

데이터처리 시간도 현저히 줄일 수 있게 하였다. 또한 각 파장으로 광경로차를 결정하는 과정에서 차수 결정시 반올림 오차를 줄이기 위하여 위상의 오프셋 개념을 도입하고 적용하여 그 측정의 정밀도를 한 파장을 이용한 측정과 같게 할 수 있었다. 이 방식으로 30 Hz 의 속도로 측정하여도 0.3  $\mu\text{m}$  의 반복도로 안정적으로 측정이 되는 것을 확인하였다.

이와 같이 측정된 결과의 빠른 처리가 수반된 고속의 정밀한 높이 측정 기술은 높이의 균일도가 제품의 특성과 불량률에 직접적인 영향을 주는 LCD 스페이서(spacer)나 반도체 웨이퍼 범프 등의 검사 장비와 같이 다양한 분야에 활용될 가능성이 기대된다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 과학재단이 지원하는 나노원천기술개발사업 중 하나로 수행되었음 (2009-0082848).

참고문헌

1. J. C. Wyant, C. L. Koliopoulos, B. Bhushan, D. Basila, "Development of a three-dimensional noncontact digital optical profiler," J. Tribology, **108**, 1-8, 1986.
2. D. K. Hamilton and T. Wilson, "Three-dimensional surface measurement using the confocal scanning microscope," Appl. Phys. B, **27**, 211-213, 1982.
3. A. Harasaki, J. Schmit, J. C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry," Appl. Opt., **39**, 2107-2115, 2000.
4. C-S Kang, J-A Kim, T. B. Eom, R. Jang, H. Y. Park, and J. W. Kim, "High speed phase shifting interferometry using injection locking of the laser frequency to the resonant modes of a confocal Fabry-Perot cavity," Opt. Exp., **17**, 1442-1446, 2009.
5. Y-Y. Cheng, and J. C. Wyant, "Two-Wavelength Phase Shifting Interferometry," Appl. Opt., **23**, 4539, 1984.
6. K. Creath, "Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry," Appl. Opt., **26**, 2810-2816, 1987.