

## 정밀 삼차원 측정을 위한 백색광 간섭 광학 프로브 개발.

김승우, 진종한\*, 강민구 (KAIST 기계공학과)

### Optical Probe of White Light Interferometry for Precision Coordinate Metrology

S. W. Kim, J. H. Jin, M. Kang (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

#### ABSTRACT

Demand for high precision measurement of large area is increasing in many industrial fields. White-light Scanning Interferometer(WSI) is a well-known method for 3D profile measurement. However WSI has some limitations in a measurement range because of the sensing mechanism. Therefore, in this paper we use a heterodyne laser interferometer to get over the limitations of a short measurement range in WSI. We suggest a new WSI system combined with heterodyne laser interferometer. This system is aimed at eliminating Abbe error with measuring the focus point directly. With the use of triggering functionality of WSI, we can use this system as a probe of a precision stage such as a probe of CMM. The suggested system gives a repeatability of 87 nm in the absolute distance measurement test under the laboratory environment.

**Key Words :** Optical Probe(광학식 프로브), WSI(백색광 주사 간섭계), Heterodyne laser interferometer(헤테로다인 레이저 간섭계), 3D profile Measurement (3 차원 형상 측정)

#### 1. 서론

표면 형상 측정은 항공우주산업의 인공위성에 쓰이는 대구경 렌즈(lens)나 미러(mirror)와 같은 전문적인 분야에서 뿐만 아니라 반도체 디스플레이 부품, 자동차 부품, 휴대용 카메라와 복사기의 부품과 같이 생활에 밀접한 분야에 걸쳐 품질 검사 방법으로 광범위하게 활용되어진다. 이런 형상 측정 방법들 중에서 표면에 결함을 주지않는 비접촉식 방법이 많이 쓰이고 있으며, 여기에는 광학적 원리를 이용한 피조 간섭계(Fizeau Interferometer), 층밀리기 간섭계(Lateral Shearing Interferometer, LSI), 백색광 간섭계(White-light Scanning Interferometer, WSI)등이 있다<sup>[1]</sup>. 이들은 수 nm의 아주 좋은 수직 방향 분해능을 갖지만, 고분해능으로 대영역을 측정하기에는 나뉠대로의 한계를 가지고 있다.

피조간섭계와 층밀리기 간섭계는 대영역을 측정하는 데에는 적합하나 수평방향의 분해능이 수십  $\mu\text{m}$  이상으로 수평분해능을 높이는데 한계가 있으며, 무엇보다도 측정물의 표면상태가 거울과 같이 매우 매끄러운 표면이 아니면 측정이 불가능하다는 제한점을 가지고 있어서 주로 광학부품의 성능평가에만

이용되고 있다. 반면에 백색광 간섭계는 수 nm의 수직분해능과 사용되는 대물렌즈의 배율에 따라 비교적 높은 1  $\mu\text{m}$ 의 수평분해능을 얻을 수 있어 고분해능의 측정이 가능하나 측정영역이 대물렌즈의 배율관계로 제한되어 있어 대영역 측정에는 용이하지 않은 실정이다<sup>[2]</sup>.

한편 최근 산업계의 동향을 보면, 앞서 언급한 피측정물의 대형화로 인해 고분해능으로 대영역을 측정하는 것이 불가피한 실정이다. 일반적으로 여러 점들의 값으로 대영역의 형상을 측정하는 방법으로 CMM(Coordinate Measuring Machine)이 대표적으로 사용되고 있다. CMM은 대영역을 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 영역(area) 측정이 아닌 점(point) 측정이며 수직 분해능이 수  $\mu\text{m}$  정도로 낮다는 단점이 있다. 이러한 점을 해결하기 위해 AFM(Atomic Force Microscope)을 프로브로 사용하는 정밀 스테이지를 이용하여 대영역을 고분해능으로 측정할 수 있는 방법이 개발되었는데<sup>[3]</sup>, 이 방법 또한 점 측정의 연속이므로 영역 측정에 있어서는 측정 범위가 제한적이고 시간이 오래 걸리는 단점을 갖고 있다. 이와 같은 실정에서 대영역을 고분해능으로 측정하는 방법으로써 정밀스테이지에 백색광 간

섭계를 프로브(Probe)로 결합시키는 방법을 고려할 수 있다. 이렇게 구성할 경우 AFM 보다는 분해능이 낮지만 측정영역과 측정시간 면에서 상대적으로 유연하며 또한 AFM 으로는 측정하지 못하는 수십  $\mu\text{m}$  이상의 단차모양을 측정할 수 있다는 장점을 가지므로 높은 활용성을 예상할 수 있다.

본 논문에서는 백색광 간섭계를 정밀스테이지에 결합하기 위한 초기연구로서, 백색광 간섭계의 수직(z 축)방향의 측정 범위를 넓히기 위해 백색광 간섭계에 길이측정의 표준으로 사용되는 헤테로다인 레이저 간섭계를 통합하는 연구를 수행하고자 한다. 이렇게 함으로써 레이저 간섭계만으로는 얻을 수 없는 높은 수평 분해능을 얻으면서 백색광 간섭계의 수직 측정영역을 확대할 수 있고 게다가 측정결과와 '미터소급성'(traceability to meter definition)을 얻을 수 있다. 또한 백색광 간섭계의 구동축과 레이저 간섭계의 측정 축을 일치시키고, 광학계를 통합함으로써 아베오차(abbe error)를 최소화 시킨 시스템의 구성이 가능하다.

## 2. 전체 측정 시스템

### 2.1 시스템의 구성

전체 측정 시스템은 크게 백색광 간섭계와 헤테로다인 레이저 간섭계 두 부분으로 구성되어 있다. 그 구성도는 Fig. 1 과 같고, 실험 장치는 Fig. 2 와 같다.

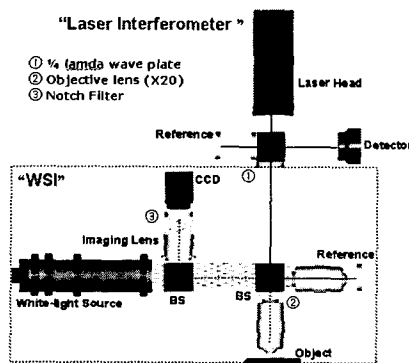


Fig. 1 Configuration of the total system

백색광 간섭계는 리닉(LINNIK)간섭계 형태이며, 백색광 광원에서 나온 빛이 백색광 간섭계의 기준면과 측정면으로 나누어진 뒤 각각 반사되어 간섭을 일으키며, 이 간섭신호는 CCD 를 통해 얻어진다.

헤테로다인 레이저 간섭계의 경우, 레이저 헤드(head)에서 나온 레이저 빔(beam)이 백색광 간섭계

의 기준면과 레이저 간섭계의 기준면으로 나누어지며, 되반사되어 간섭을 일으킨다. 이 간섭신호는 수광부(detector)를 통해 얻어지며, 위상측정기(phase meter)를 통해 백색광 간섭계의 기준면의 위치 정보를 가진다.

이 때, 두 간섭계를 통합함으로써 생기는 문제는 Fig. 1 의 점선 같이 레이저 빔이 원치 않는 방향으로 입사 된다는 것이다. CCD 로 들어간 레이저 빔은 CCD 를 포화 시켜 백색광 간섭무늬를 얻을 수 없게 하기 때문에 레이저 중심 파장인 632.8 nm 부근의 20 nm 폭만을 막아주는 노치 필터(notch filter)를 사용하여, 레이저 빔이 CCD 로 들어가지 못하게 한다. 측정 물체쪽으로 들어가는 레이저 빔은 막음점(blocking spot)을 사용하여 막아준다.

조명계의 경우, 피 측정물에 일정한 광강도를 가지도록 하는 간섭성 조명인 켈러 조명(Köhler illumination)을 사용한다<sup>[4]</sup>.

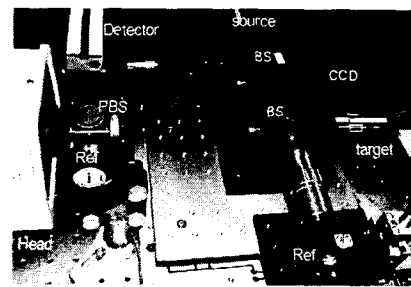


Fig. 2 Experimental Setup

### 2.2 작동원리 및 장점

백색광 간섭계를 이용한 표면형상 측정의 작동원리는 다음과 같다. Fig. 1 의 백색광 간섭계가 있는 사각형 부분 전체가 측정물체에 대해 수직방향으로 아주 작은 구동 간격으로(대략 60 nm 정도) 움직일 때, 각 프레임(frame)에서의 간섭무늬의 변화와 각 프레임에서의 실제 구동변화 값을 각각 CCD 와 레이저 간섭계를 이용해 읽어 들인다. 이때 CCD 카메라로 획득되는 간섭무늬는 Fig. 3 과 같은 모양인데, 수직방향의 위치 변화에 따라 일부 국부적인 부분에서만 간섭무늬가 잠깐 나타나고 그 이외의 위치에서는 간섭무늬가 나타나지 않는다. 이는 백색광 간섭계의 여러 파장성분으로 인한 간섭현상이 중첩되어 나타난 결과이며, 이와 같이 간섭무늬가 나타날 수 있는 영역을 '가간섭 영역'(coherence region)이라 부른다. 이러한 가간섭 영역은 광선분할기(Beam Splitter, BS)에서 백색광 간섭계의 기준면과 측정면까지의 거리가 일치하는 부분에서 존재하며 보통 수  $\mu\text{m}$  로 매우 짧은 영역이 된다<sup>[5][7]</sup>.

그러므로 백색광 간섭계를 측정물체에 대해 이

동시키면서 간섭무늬가 강하게 발생하면 마치 CMM 에서 트리거(trigger) 신호를 내는 것과 같이 취급할 수 있게 되어, 그때의 레이저 간섭계의 값을 측정점의 높이 값으로 취급할 수 있게 되는 것이다. 또한 이러한 계산과정을 CCD 로 획득하는 영역 내의 모든 측정점에 대해 동시에 수행하면 대물렌즈가 형성하는 배율에 따라 최고 1  $\mu\text{m}$  의 높은 수평분해능을 갖는 영역 측정을 수행할 수 있게 된다. 현재까지 간섭무늬가 가장 강하게 발생하는 위치를 구분해 내기 위한 여러 가지 알고리즘이 개발되어 있으며 최근은 서브 나노미터의 분해능까지 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다<sup>[8]</sup>.

여기서 정확한 측정을 위해서는 백색광 간섭계의 측정점에서 변위를 구해야 하며, 이를 위해 본 시스템에서는 백색광 간섭계의 기준면이 측정면과 공액(conjugate) 관계임을 이용한다. 즉, 레이저 간섭계로 백색광 간섭계의 기준면을 측정하게 되면 백색광 간섭계의 공액점인 물체면을 측정하게 되는 효과를 갖는 것이다. 이렇게 함으로써 측정에 있어서 가장 큰 오차요인 중 하나인 아베오차를 제거할 수 있다.

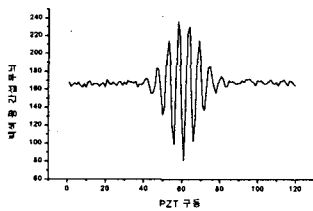


Fig. 3 Interference signal of WSI

### 2.3 측정 알고리즘

측정을 수행하기 위해서는 백색광 간섭 무늬 최대점을 찾는 알고리즘과 레이저 간섭계의 위치 정보를 백색광 간섭계의 간섭무늬에 적용하는 과정이 필요하다. 먼저 백색광 간섭계의 간섭 무늬 최대점(envelope peak)을 찾는 방법으로 주파수영역 분석법(Frequency Domain Method)<sup>[6]</sup>을 사용하였다. 이는 얻어진 간섭 무늬의 DC 를 없애고, 푸리에 변환(Fourier Transform)을 함으로써 주파수영역에서의 위상값의 기울기가 측정물의 높이와 비례한다는 성질을 이용하여, 측정물의 높이를 구하는 방법이다. 그 절차는 Fig. 4 에 나타나 있다. 여기서의 계산 결과의 단위가 구동 프레임이므로 각 프레임에서의 레이저 간섭계의 위치정보를 선형보간(linear fitting)하여 최종적인 측정결과를 얻는다.

본 연구에서는 백색광 간섭계를 평균 간격 57 nm 로 180 프레임을 움직여서 백색광 간섭무늬와 레이저 간섭계의 위치정보를 획득하였다.

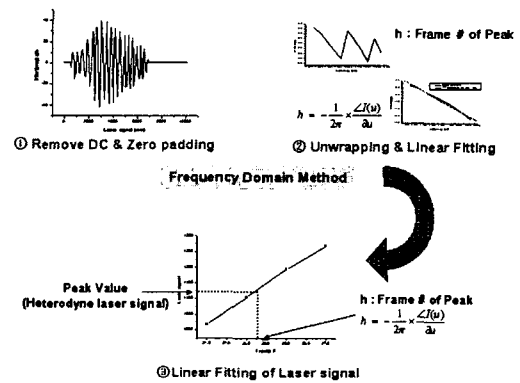


Fig. 4 Measurement Alogrism

## 3. 측정 결과 및 오차 분석

### 3.1 측정 결과

영역 형상 측정을 위해 평면 미러를 10 번 측정하였다. 형상 측정의 반복능(repeatability)은 80.6 nm(PV value)이며, Fig. 5 는 평면 미러 형상을 공간 필터링(spatial filtering)한 측정의 예를 보여준다.

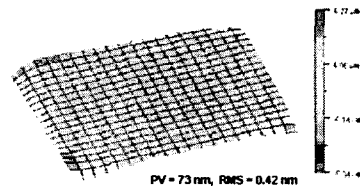


Fig. 5 3D Profile measurement result(Plane mirror)

또한 백색광 간섭계를 트리거 프로브처럼 사용하기 위한 방안으로 CCD 의 중앙점의 위치를 연속 측정하여 반복능을 구하였다. 이러한 측정결과는 표면측정의 상대적인 높이 측정과는 다른 3 차원 공간상에 고정된 점의 절대위치 측정의 개념이 들어있다. 실험결과는 절대위치 측정의 반복능이 87 nm 이며, Fig. 6 에 나타내었다.

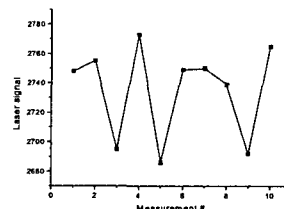


Fig. 6 Measurement result of triggering

### 3.2 측정 오차 분석

측정에 있어서 생기는 오차는 프레임 수에 영향을 주는 오차요소와 레이저 간섭계 거리 정보에서 생기는 오차요소로 크게 나눌 수 있다.

먼저, 프레임 수에 영향을 주는 오차요소들은 다음과 같다. 백색광 간섭 무늬에서 최대점을 찾는 알고리즘에서 오차가 생기게 되면, 정확한 최대점의 위치를 찾을 수 없다. 알고리즘에서 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하는데, 이는 등간격 구동을 가정으로 하고 있다. 하지만, 구동간격은 레이저 간섭계로 측정된 결과  $57.04 \pm 26.12 \text{ nm}$  이며, 구동간격이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 이런 불규칙한 구동간격이 백색광 간섭 무늬 최대점을 찾는 데 오차요인으로 작용했다. 그 뿐만 아니라 CCD의 비선형성, 백색광 광원의 대역폭등도 오차요인으로 작용했다.

레이저 간섭계 거리 정보에서 생기는 오차요소들을 보면 다음과 같다. 우선 광원의 주파수 변화에 따른 오차는 제조업체<sup>[9]</sup>(ZYGO™)에서 제공하는 자료에 의하면 0.2 p.p.m.이며, 본 시스템의 데드 패스(dead pass)가 165 mm 이므로 광원의 주파수 변화에 의해 생기는 오차는  $2 \times 10^{-3} \text{ nm}$  이다. 공기 굴절률 변화는 공기의 조성비와 유동, 주위의 온도, 압력과 습도등에 따라 생기며, 23 nm 의 오차가 발생한다. 또, 레이저 간섭계의 위상검출기에서 위상을 계산하면서 오차가 발생하는데 이는 최소 분해능인 2.5 nm 이다. 온도 변화에 따라 광학 부품들과 간섭된 빔 사이의 광경로차가 변화게 되어 생기는 오차, Thermal drift 는 38 nm 이다. 이는 실험 환경에서 온도가 0.076 °C 변하는데 기인한다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 두 개의 편광된 빔을 사용하는데, 광학적 정렬이 잘못됨으로 인해 생기는 편광 섞임(polarization mixing) 오차가 최대 10 nm 생긴다.

전체 트리거의 반복능은 87 nm 이며, 본 측정 시스템의 레이저 간섭계에 의해 생길 수 있는 오차는 최대 78.5 nm 이다. 이를 분석해 보면, Fig. 7 과 같다.

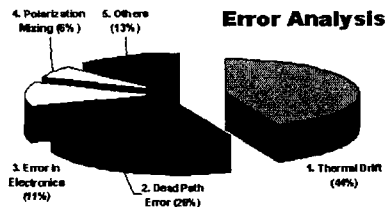


Fig. 7 Error Analysis (Trigger)

### 4. 결론

본 연구는 백색광 간섭계와 헤테로다인 레이저 간섭계를 사용하여 프로브 끝을 직접 측정할 수 있는 측정 시스템을 제안, 설계하고, 구현된 측정시스템에 대한 결과와 오차 분석을 수행하였다.

이렇게 개발된 백색광 간섭계는 정밀스테이지의 프로브로 간주할 수 있으므로 대영역을 고분해능으로 측정할 수 있다. 또한 길이측정의 표준으로 사용되는 헤테로다인 레이저간섭계를 결합함으로써 z 축 방향의 측정범위도 원하는 사양에 맞추어 자유로이 설계할 수 있는 장점이 있다.

오차를 분석한 결과를 보면, 온도, 압력, 습도등과 같은 환경변화가 레이저 간섭신호에 영향을 주어 전체 시스템의 큰 오차요인으로 작용하는 것을 알 수 있다.

측정 결과는 영역 형상 측정의 경우 10 회 실험에 의한 반복능이 80.6 nm(P.V. value)이며, 트리거의 경우에는 10 회 실험에 의한 반복능이 87 nm 이다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적 연구 과제(CRI)의 지원을 받아 수행하였습니다.

### 참고문헌

1. Daniel Malacara, Optical Shot Testing, pp.18-36,103-108, 1992.
2. 강민구, "백색광 주사 간섭계를 이용한 표면 형상 측정 알고리즘에 관한 연구," 한국과학기술원 박사학위논문, 1999.
3. Veeco product brochure, "Dimension Vx : Atomic force profiler for CMP metrology," Veeco Corporation CA, U.S.A., 1999.
4. 이상수, "기하광학", pp.92-97, 교학연구사, 1995.
5. P. J. Caber, "Interferometric profiler for rough surfaces," Appl. Opt. 32, 3438-3441, 1993.
6. L. Deck and P. de Groot, "High-speed noncontact profiler based on scanning white-light interferometry," Appl. Opt. 33, 7334-7338, 1994.
7. P. de Groot and L. Deck, "Surface profiling by analysis of white-light interferograms in the spatial frequency domain," J. Mod. Opt. 42, 389-401, 1996.
8. A. Harasaki, J. Schmit, and J. C. Wyant, "Improved vertical-scanning interferometry," App. Opt. 39, 2107-2114, 2000.
9. Zygo, "AXIOM 2/20 Operation/Reference Manual", Ch4, 1991.