

광위상간섭을 이용한 표면측정 기술현황

"State-of-the-Art of the Surface Metrology using Optical Phase Measuring Interferometry"

김승우

한국과학기술원 기계공학과

swk@kaist.ac.kr

1. 광위상간섭의 기본원리

빛은 공간상에서 전파되는 특성상 전자기파(electromagnetic wave)로 규정될 수 있다. 빛의 파동성은 여러 형태의 간섭을 유발한다. 이중 정밀 길이측정에는 광위상간섭(phase measuring interferometry)의 원리가 대표적으로 이용된다. 그림1은 광위상간섭의 기본원리를 Michelson 광학계를 이용하여 설명하고 있다. 하나의 동일한 광원으로부터 출발된 광속(optical beam)은 광분할기(beam splitter)에 의해 두 개로 별도 광속으로 분할 된다. 각각의 광속은 서로 다른 광경로를 거쳐 반사물체인 거울에 입사되고 다시 반사된 후 광분할기에 의해 합성된다. 이때 합성되는 각각의 광속은 서로 다른 광경로에 의해 위상차(phase difference)를 갖게된다. 광위상차에 의한 간섭현상은 합성된 광속의 광강도(intensity)를 수광소자를 통해 측정함으로써 관측하게 된다. 합성광속은 위상차가 0일 경우 진폭이 처음 광속의 2배가 되며 이로부터 감지되는 광강도는 4배가 된다. 이를 보강간섭(constructive interference)라 한다. 반면 합성되는 두 개의 광속이 180도의 위상차를 갖게되면 서로 상쇄되어 합성광속의 광강도는 0이 된다. 이 경우를 상쇄간섭(destructive interference)이라 한다. 일반적인 경우로 위상차가 0에서 360 도 사이의 임의의 값을 갖게되면 그림 1에서와 같이 합성광속의 광강도는 원래 광속이 갖는 파장의 1/2을 주기로 하는 조화함수로 표현된다.

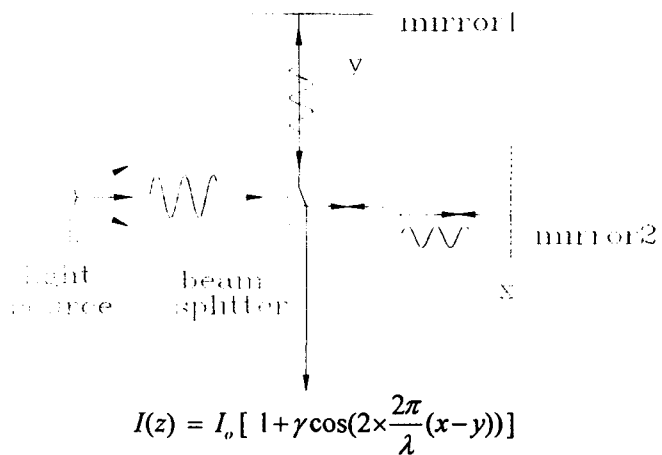


그림 1: 마이클슨 간섭계에 의한 광위상간섭의 원리를 설명한다. 광분할기에 의해 분할, 합성된 광속들은 각각 다른 광경로차에 의한 다른 위상을 갖는다. 이로부터 합성된 광은 간섭을 일으키게 된다.

합성광속의 광강도는 원래 광속이 갖는 파장의 1/2을 주기로 하는 조화함수로 표현된다.

광위상간섭에 의한 길이측정은 합성광속의 광강도를 측정하고 이로부터 위상차를 추정하는 과정을 통해 이루어진다. 그리고 추정된 위상차로부터 두 개의 광속이 갖는 광경로차를 앞서 설명한 합성광의 광강도 조화함수를 역으로 계산하여 얻게 된다. 광경로차는 광분할기로부터 각각의 광속에 대한 거울까지의 왕복거리의 차를 의미한다. 이때 하나의 거울을 고정하면 계산된 광경로차는 다른 하나의 광속의 경

로에 의해서만 결정된다. 이로부터 광분할기로부터 고정되지 않은 반사거울까지의 거리를 구할 수 있게 된다. 일반적으로 광위상간섭을 통해 추정할 수 있는 광의 위상차에 대한 정밀도는 사용되는 광학계의 정도와 수광소자를 포함하는 전자회로의 안정도에 의해 결정된다. 현재 광위상차의 측정 분해능은 파장의 1/20 - 1/100 수준이며, 특별한 고려를 한 극한의 경우에는 1/2000 까지 가능한 것으로 보고되고 있다. 일반적인 1/100 수준의 측정정밀도를 얻을 경우 0.6 마이크로미터 파장을 갖는 광원을 사용하면 6 나노미터의 분해능의 위상차를 얻을 수 있으며 측정광속이 광분할기와 반사거울을 왕복하는 점을 고려하면 반사거울의 상대거리를 3나노미터의 분해능으로 측정할 수 있다. 이는 광위상간섭을 통한 길이측정에 있어 손쉽게 나노미터 범위의 측정분해능을 얻을 수 있음을 보여준다.

2. 광위상간섭 표면측정

광위상간섭의 길이측정이 갖는 기본원리를 적절히 이용하면 가공표면의 미세한 삼차원 형상에 대한 표면측정(surface metrology)이 가능하다. 이를 위한 구체적인 광학계에 대한 연구는 오랜 역사를 갖고 있으며 많은 종류의 광학계가 각각의 장단점을 갖고 제안되어 있다. 그림2은 표면측정을 위한 대표적인 Twyman-Green 광학계를 보여준다. 이는 Michelson 광학계의 길이측정을 단순히 표면측정으로 확장한 예로 볼 수 있다. 광원으로는 일반적으로 단색광 레이저 광을 이용한다. 표면측정의 범위를 증대하기 위해 레이저 광속은 직경 폭이 확대한 후 광분할기를 거쳐 두 개의 물체표면에 입사된다. 이때 두 개의 표면중 하나는 이상적으로 평활화 된 기준 거울면이고, 다른 하나는 측정하고자 하는 대상표면이 된다. 각 표면에서 반사된 빛은 다시 광분할기에 역으로 입사되어 합성된 후 수광소자에 의해 관찰된다. 수광소자는 일반적으로 CCD 카메라와 같은 작은 광소자를 2차원 직교형태의 일정 간격으로 배열한 집합체를 사용한다. 이때 각각의 수광소자에서는 그림 1에서 설명한 광위상간섭이 발생된다. 각 수광소자로부터의 광강도로부터 해당 측정표면까지의 거리를 계측할 수 있다. 각 수광소자들에서부터 얻어진 거리들을 측정표면에 대해 횡방향으로 종합할 경우 측정표면의 삼차원 형상을 얻게된다. 앞서 설명한 바와 같이 광위상간섭의 분해능은 나노미터 수준이며, 결과적으로 이는 측정표면의 수직방향에 대한 측정분해능에 직접적으로 반영된다. 반면 측정표면의 횡방향에 대한 측정분해능은 CCD 수광소자의 간격과 결상렌즈의 배율에 의해 결정된다. 일반적으로 횡방향의 분해능은 수십 또는 수 마이크로미터의 수준으로 결정된다. 그림 3에는 실제적으로 측정된 광강도의 분포와 이로부터 측정된 물체의 미세형상의 삼차원 결과를 보여주고 있다.

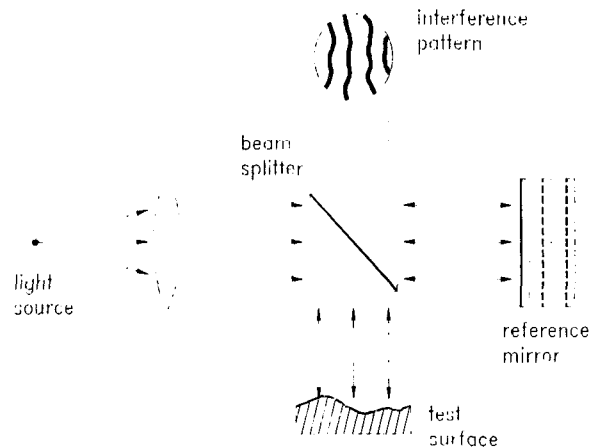


그림 2. 트와이만-그린 간섭계에 의한 표면측정을 보여준다. CCD의 수광소자 집합체로부터의 간섭신호를 합성하여 표면형상을 구성한다.

광위상간섭을 이용한 표면측정은 연삭, 연마, 그리고 폴리싱된 가공면의 미세한 삼차원 형상이 갖는 표면거칠기와 삼차원 형상의 직접적인 추출에 유용하게 사용될 수 있다. 광위상간섭을 이용한 미세표면의 측정에서 식각등을 통한 미세 단차가 있는 표면의 경우에는 특별한 주의를 요한다. 이는 광위상간섭으로는 측정할 수 있는 단차의 최대값이 제한되기 때문이다. 그림 4에 도시된 바와 같이 표면의 연속된 두 개의 측정점간의 단차가 큰 경우 실제보다 작은 값이 측정된다. 이는 수광소자에 측정된 광강도로부터 위상차의 값을 결정할 때 발생된다. 실제적인 위상차의 값이 2π 보다 작거나 큰, $\phi \pm 2\pi n (0 \leq \phi < 2\pi)$

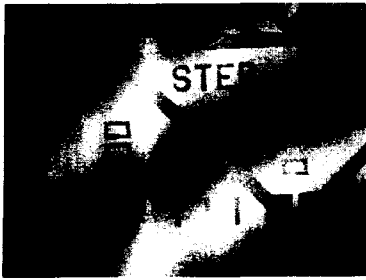
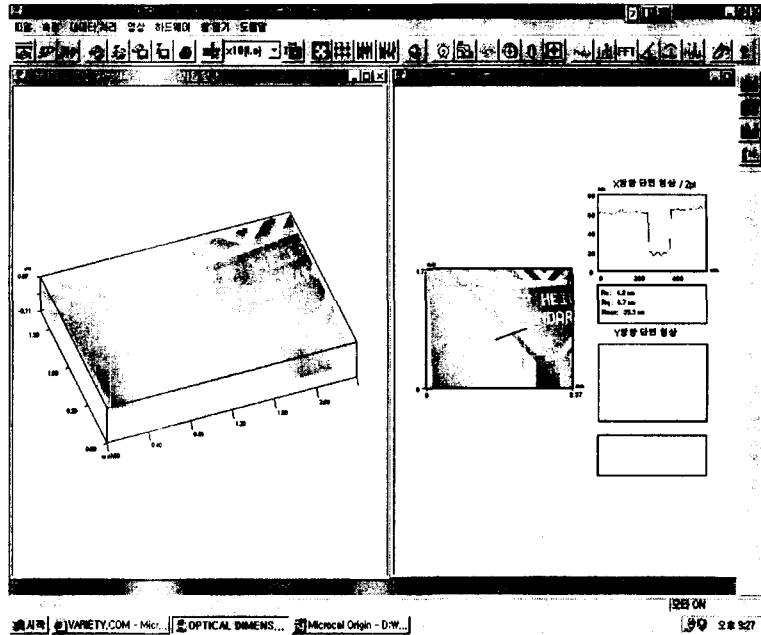


그림 3. 좌편의 그림은 측정시편으로부터 얻은 광위상 간섭무늬를 보여준다. 이를 해석하여 각 점에서 높이정보를 추출할 수 있으며 우측의 그림에서와 같이 시편의 삼차원 미세형상을 컴퓨터 그래픽을 통하여 재현할 수 있다. 뿐만아니라 컴퓨터 편집기술을 이용 각 단면의 형상을 추출하고 이에 대한 표면거칠기 산출을 위한 각종 통계학 처리가 가능하다.



n 은 정수인 경우, 얻어지는 광강도는 조화함수의 특성상 ϕ 의 단차의 경우와 같게되며, 결과적으로 n 의 값을 정할 수 없게 된다. 이로 인해 위상차는 ϕ 로 정할 수 밖에 없게되며, 단차값은 실제값보다 작게 나타나게 된다. 이를 광위상간섭의 2π -모호성(ambiguity)라 칭한다. 그러므로 광위상간섭은 표면의 미세 형상이 급격한 단차가 없는 경우에 국한되는 제한점을 갖게된다.

3. 백색광 주사간섭

백색광간섭계(white light interferometry)는 광위상간섭이 갖는 2π -모호성에 의한 단차 측정의 한계를 극복하기 위한 새로운 표면측정의 원리이다. 기본적인 원리면에서는 광위상간섭에 근거하나, 광원으로 레이저를 대신하여 시가간섭거리(temporal coherence length)가 짧은 백색광을 사용한다. 이때 광원의 시가간섭거리란 광위상간섭을 일으킬 수 있는 최대 광경로차로 정의된다. 이론적으로 단일 파장의 광원인 경우 무한대 거리의 시가간섭거리를 갖는다. 레이저의 경우 단일파

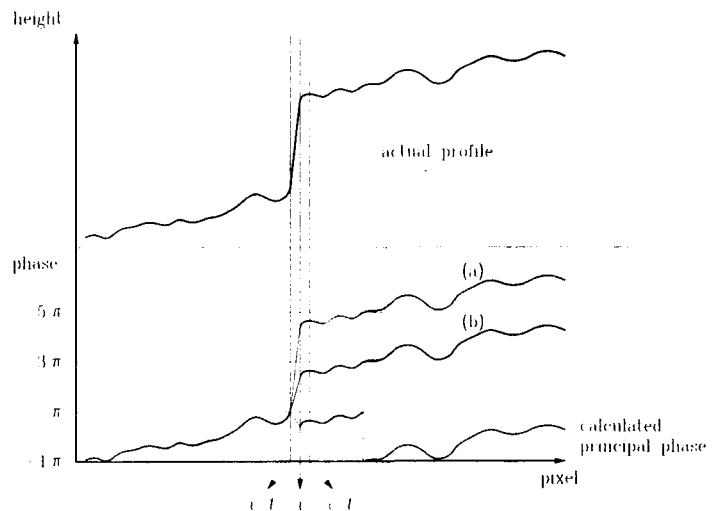


그림 4. 위상결정의 모호성을 도식적으로 보여준다. 단차의 높이가 파장의 1/2이 넘으면 이에 대한 실제값의 결정이 어려워진다.

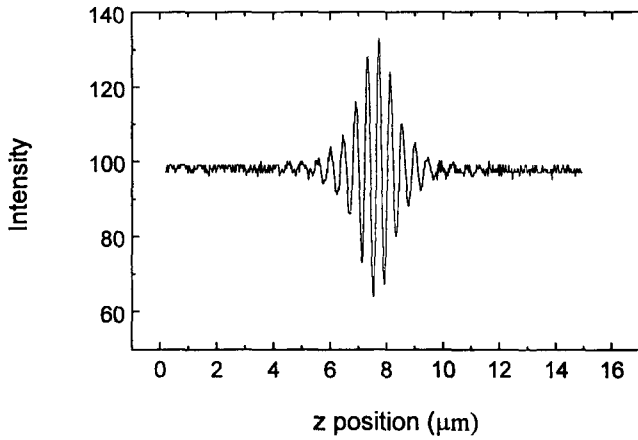


그림 5. 백색광 사용할 때 얻어지는 간섭무늬를 보여준다. 제한된 시가간섭성에 의해 간섭무늬는 수 마이크로미터 범위의 짧은 구간에서만 발생하며 간섭의 진폭도 급격히 증가 감소한다. 백색광주사간섭에서는 간섭무늬의 최대점을 찾는 방법으로 삼차원측정을 구현한다.

정물체를 광축의 방향으로 연속적으로 움직이게 하는 이송메카니즘이 요구된다. 측정물체가 이송되면 각각의 수광소자에서 얻어지는 광강도는 Sinc함수에 싸여진 조화함수이며, 이때 광강도가 최대가 되는 점을 감지하게 된다. 측정의 정밀도를 위해 측정물체의 이송에는 대단히 정교한 이송장치와 위치검출센서가 사용된다. 이송장치로는 일반적으로 압전구동기 (piezoelectric actuator)가 사용되며 나노미터 분해능의 이송이 가능하다. 위치검출기는 정정용량형이나 LVDT(linear variable differential transformer)가 널리 사용된다. 또한 별도의 위치검출기가 없이 압전구동기에 인가되는 입력전압으로부터 압전구동기의 위치를 추정하는 방법도 널리 사용되며, 이 경우 압전구동기가 갖는 이력현상 (hysteresis)에 대한 적절한 보

장의 광원에 가까우나 완전한 단일파장의 광원에는 미치지 못해 수 십 미터의 시가간섭거리를 갖게된다. 반면 백색광은 넓은 주파수 대역을 갖는 광원으로 수 마이크로미터의 짧은 시가간섭거리를 갖는다. 그림 5는 백색광을 사용하였을 경우 광위상차에 의해 관측되는 광강도의 변화를 보여준다. 이때에 측정되는 광강도는 레이저의 조화함수 형태에서 Sinc함수에 싸여져 간섭의 거리가 제한되는 짧은 시가간섭성의 특이한 형태를 나타내게 된다. 이론적으로 백색광의 간섭무늬는 중앙에서 최대값을 갖고며 이를 중심으로 진폭이 감소하며 주기는 증가하는 경향을 갖는다.

그림 6은 백색광을 이용한 표면측정의 원리를 보여준다. 기본적인 광학계의 구성은 레이저의 경우와 유사하나 이때 측

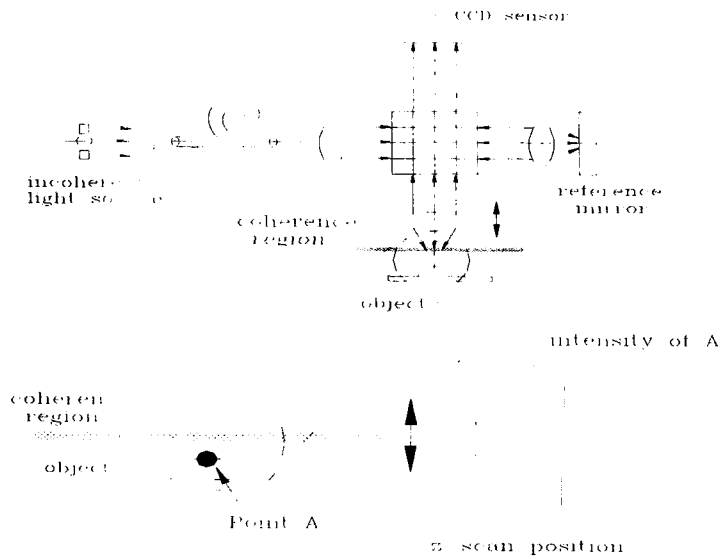


그림 6. 백색광주사간섭계의 원리를 트와이만-그린 간섭계를 통해 보여준다. 대물렌즈와 측정시편간의 거리는 압전구동기에 의해 주사되며 각 수광소자의 진폭이 최대가 되는 점이 기록되어 최종적으로 삼차원 미세형상 표면측정을 구현한다. 이때 광위상간섭이 갖는 위상결정의 모호성으로부터 제한받지 않게 되어 큰 단차의 표면에 대한 측정이 가능하다.

정이 요구된다. 각각의 수광소자로부터 최대 광강도가 발생하는 점에서의 위치검출기로 부터의 거리를 이용하여 조합하면 측정물체의 삼차원 미세형상을 구성할 수 있다. 이상에서와 같이 백색광을 이용하면 측정물체의 단차에는 제한을 받지 않고 압전구동기의 행정범위내에서의 모든 단차를 포함한 형상측정이 가능하다. 반면 측정물체의 정밀한 이송이 요구되어 이를 백색광주사간섭계(white light scanning interferometry)라 칭한다. 그림 7에는 백색광주사간섭계를 이용한 표면측정의 예를 보여준다. 일반적으로 압전구동기의 이송 행정은 100 마이크로미터 수준이다.

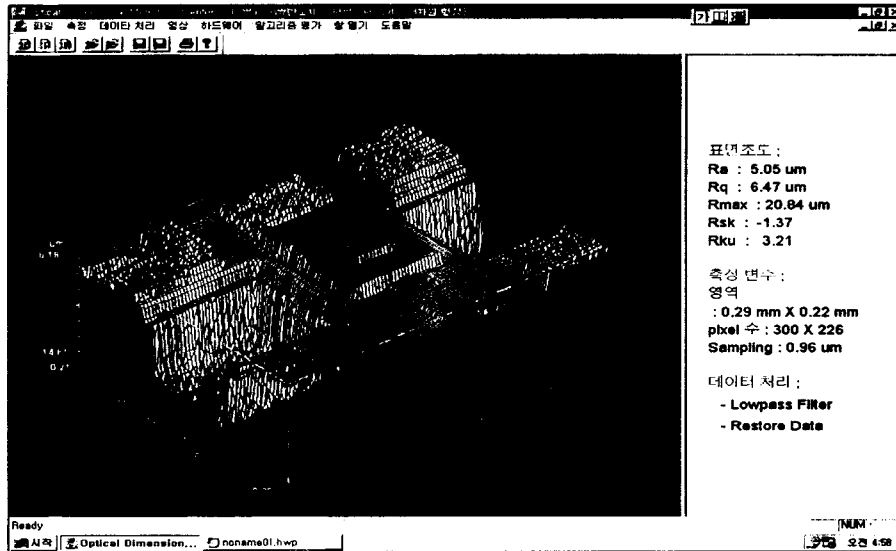


그림 7. 백색광주사간섭계의 측정예를 보여준다. 레이저 간섭계와는 달리 단차가 큰 표면의 측정이 가능하다.

4. 맺음말

오늘날 표면가공기술의 수요가 급격히 증가하고 있다. 이에 부응하여 전통적인 연삭, 연마 그리고 폴리싱 방법들에 있어서 경면가공에 대한 많은 발전이 이루어 지고 있다. 이와 더불어 다이아몬드 공구를 이용한 절삭기술은 초정밀 형상의 경면의 가공을 가능하게 하고 있다. 또한 반도체 분야에서의 미세패턴 생성기술은 식각, 증착 등과 같은 새로운 표면가공기술의 발전을 유도하고 있다. 이러한 표면가공기술의 발전과 더불어 표면측정기술에 대한 수요도 급격히 증가하여 다양한 발전을 이루고 있다. 특히 최근에는 기존의 측정방법을 혁신적으로 개선한 전자주사현미경(scanning tunneling microscopy), 원자력현미경(atomic force microscopy), 그리고 근접장광학현미경(near-field optical microscopy) 기술들은 원자단위의 분해능을 갖는 표면측정을 가능하게 하고 있다. 이러한 제반기술들의 발전에서 광위상간섭의 기술은 원리상으로는 오랜 역사를 갖고 있으며, 최근들어 급속한 발전을 보인 광전자 및 컴퓨터 기술의 도움으로 산업현장에서 널리 쓰이는 기술로 자리매김을 하고 있다. 다른 표면측정기술과 비교하여 광위상간섭기술은 넓은 범위의 측정표면을 빠른속도로 측정할 수 있는 장점을 가지고 있다. 수직방향의 분해능은 이미 나노미터의 수준에 도달하였으며 향후 급속한 발전을 유지할 것으로 전망된다.

참고문헌

1. S.W. Kim, M.G. Kang, and G.S. Han, "Accelerated Phase-Measuring Algorithm of Least Squares for Phase-Shifting Interferometry, Optical Engineering, Vol.36, No.11, 1997, 3101-3106.