

광계측 기반기술 발전현황

김 승 우*

(*한국과학기술원 기계공학과 정밀측정연구실)

1. 서 론

광을 이용하여 계측할 수 있는 물리량은 길이, 힘, 온도 등 매우 다양하다. 이들 많은 물리량들 중에서 광계측에 가장 기본이 되는 것이 길이(length)이다. 길이의 표준(standardization)을 살펴보면 1859년 J. C. Maxwell이 나트륨의 황색선의 파장을 이용하여 길이 계측을 할 것을 추천한 이후 Michelson 간섭계를 이용한 길이표준에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 그 결과 1960년도에는 국제도량형학회에서 크립톤(krypton) 동위원소를 이용한 길이 표준이 채택되었으며, 그 후 HeNe을 중심으로 다양한 레이저들에 대한 파장 안정성 연구가 진행되었다. 그리고 최종적으로는 1983년 길이의 정의로 특정 광원이 아닌 진공중의 빛의 속도가 측정매질의 상대속도에 영향을 받지 않는다는 상대성원리에 근거하여 "1 미터는 진공 중에서 빛이 1초 동안 진행한 거리의 $1/299,792,458$ 로 한다"라는 표준정의가 채택되어 오늘에 이르고 있다. 이를 기반으로 주파수 안정화 정도가 높은 레이저의 개발이 활발히 진행되고 있으며 현재에는 길이 표준의 불확도(uncertainty)가 $\pm 2.5 \times 10^{-11}$ 에 이르고 있다[1].

빛의 파장을 근거로 한 길이표준에서 출발하여 광계측 기술은 다양한 물리량을 대상으로 광범위한 발전을 거듭하고 있다. 이와 더불어 광계측 기술은 광학을 중심으로 기계, 전기적 원리를 포함하여 레이저 간섭계를 중심으로 한 파동광학에서부터 양자광학에 이르기까지 다양한 물리적 원리들에 근거하여 발전되고 있다. 본 글에서는 전체적인 구성을 측정 대상 물리량에 따라 크게 변위측정(2장), 형상측정(3장), 그리고 표면측정(4장)으로 분류하여 설명한다. 먼저 변위측정은 가공기의 위치결정 정확도를 유지하기 위한 가장 기본적인 구성요소로서 가공기가 달성할 수 있는 총괄적인 정밀도의 한계를 결정한다. 이런 관점에서 나노미터 이하의 분해능을 갖으며 10^6 이상의 상대불확도를 갖는 초정밀 길이 측정에서 대표적으로 사용되는 레이저 간섭계와 광스케일에 대하여 원리 및 특징에 대하여 설명한다. 다음의 형상측정은 가공된 물체의 기하학적 표면형상을 정량적으로 정의한다. 이는 크게 삼차원 좌표측정과 광간섭에 근

거한 비교 검사로 나누고 이들의 일반적인 원리와 정확도에 영향을 주는 여러 요인들을 설명한다. 끝으로 표면측정에서는 초정밀가공에서 조도(roughness)로 대표되는 표면측정이 갖는 중요성을 기술하고 측정방식을 접촉식, 비접촉식 그리고 주사촉침식으로 나누어 설명한다.

2. 변위측정

변위측정(displacement measurement)에서 변위(displacement)란 공간상에서 이동하는 물체의 움직인 길이로 정의된다. 공간상의 변위는 강체의 경우 세 개의 직교된 직선변위와 또 다른 세 개의 각도변위의 측정이 요구된다. 변위 측정의 정밀도(precision, accuracy)는 불확도(uncertainty)의 개념을 통해 표현한다. 불확도는 다시 절대(absolute)불확도와 상대(relative)불확도의 두 가지 개념으로 설명된다[1]. 먼저 절대불확도란 측정되는 치수에 대한 참값으로부터의 신뢰도 구간을 의미하며, 일반적으로 측정값이 갖는 표준편차(σ)의 $\pm 2\sigma$ 값을 기준으로 정의한다. 또한 상대불확도란 절대불확도를 공칭측정값으로 나눈 비를 뜻하는 값으로 무차원의 수가 된다. 예를 들어 1 m의 변위를 측정함에 있어서 $1 \mu\text{m}$ 의 절대불확도를 갖는다면 이에 해당하는 상대불확도는 $1 \mu\text{m}/1 \text{m} = 10^{-6}$ 가 된다.

2.1 레이저 간섭계

빛을 이용한 변위 측정은 약 100여년전 마이켈슨(A. A. Michelson)이 카드늪 등을 광원으로 사용한 간섭계를 통해 처음으로 구현되었다. 그 후 직진성 및 가간섭성이 우수한 레이저가 개발되면서 변위 측정을 위한 간섭계의 광원으로 널리 쓰이게 되었다. 그림 1은 레이저를 이용한 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)의 원리를 보여준다. 하나의 동일한 레이저 광원으로부터 출발한 광은 광분활기에 의해 두 개의 별도 광속으로 분리된 후, 하나의 광속은 고정된 거울 M1에서 반사되고 또 다른 하나의 광은 움직이는 물체에 고정된 거울 M2에서 반사된다. 이들 두 광속들은 광분활기에 의해 다시 하나의 광속으로 합쳐지게 되며 이

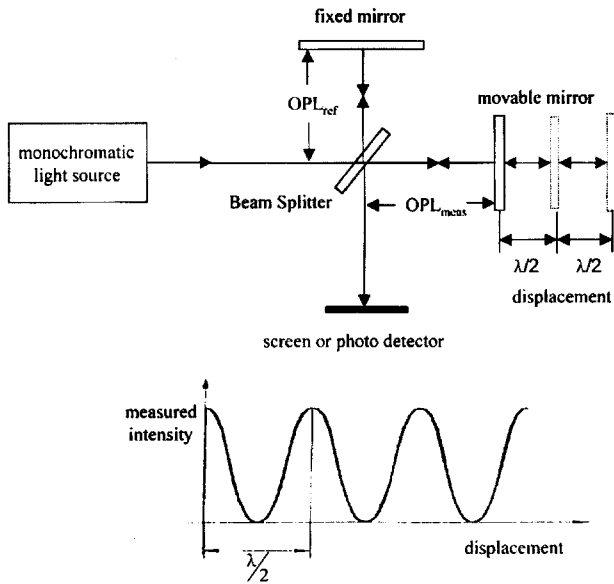


그림 1. 마이켈슨 간섭계

때 레이저 광원의 가간섭성에 의해 간섭이 발생되게 된다. 먼저 M1로부터 반사된 광속은 시간 t 와 변위 l 의 함수로 $u_1(l, t) = U_1 \cos(l_1 + \omega t)$ 로 표현된다. 여기서 U_1 과 ω 는 각각 진폭과 주파수이다. 동일한 방법으로 M2로부터의 광속은 $u_2(l, t) = U_2 \cos(l_2 + \omega t)$ 로 표기된다. 이상의 두 광속이 합하여져 하나의 광속이 될 경우 강도는 $I = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos(l_1 - l_2)$ 로 구해진다[2]. 결과적으로 간섭광의 강도 I 는 그림 1에서와 같이 두 거울의 거리 차 $l_1 - l_2$ 에 대해 주기가 $\lambda/2$ 인 코사인 함수의 형태를 갖는다. 마이켈슨 간섭계를 이용한 길이 측정의 정밀도는 일반적으로 강도 I 의 측정에 따른 정밀도에 의해 좌우된다. 이론적으로 수광소자로부터 측정된 강도를 8-비트의 아나로그-디지털 변환기를 이용하여 분해할 경우 $\lambda/512$ 의 거리 측정분해능이 가능하다. 광원으로 HeNe 레이저를 사용하면 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ 이므로 1.2 나노미터의 거리 측정 분해능을 얻게 된다. 그러나 실제적으로 전자회로의 교란신호와 주변의 공기유동 등을 고려할 때 마이켈슨 간섭계의 측정분해능은 $\lambda/10 - \lambda/20$ 의 수준에 머무르게 되는 것이 일반적인 경우이다. 이 경우 측정의 불확도는 사용하는 레이저 파장의 안정성에 의해 결정되며 일반적으로 10^{-5} 의 상대불확도가 일반적이다.

광간섭을 이용한 변위 측정은 1970년도 미국의 Hewlett Packard사가 이중주파수에 의한 헤테로다인 레이저 간섭계 (heterodyne laser interferometer)를 개발하면서 획기적인 발전은 거듭하게 되었다. 그림 2는 이의 기본 측정원리를 보여준다. 광원은 주파수 안정화된 He-Ne 레이저를 사용하며 이중 주파수를 만들기 위해 Zeeman 효과를 이용한다. 생성된 두 개의 광들의 편광방향은 서로 수직이고 이들은 편광광속분할기에 의해 분리된다. 이들의 광속은 각각의 코너큐브 프리즘을 향하고 이로부터 반사된 광이 간섭하여 맥놀이 신호를 만든다. 이때, 한쪽의 코너큐브 프리즘을 속

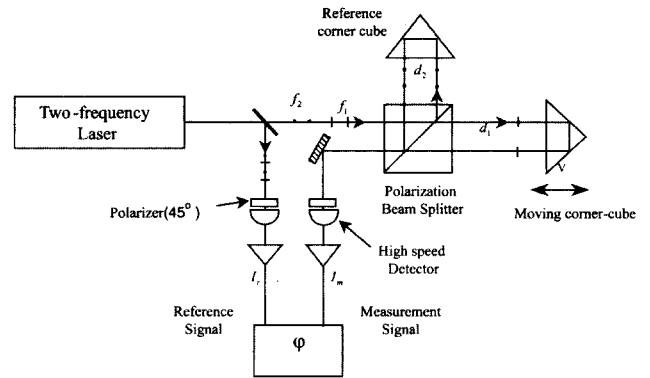


그림 2. 헤테로다인 간섭계

도 V 로 이송시키면 광주파수는 도플러 변화 $\Delta f = 2Vf_2/c$ 에 의해 이송방향에 따라서 $f_2 \pm \Delta f$ 로 변하게 된다. 이 Δf 값을 이송한 시간 t 동안 적분하면 거리가 $L = \frac{\lambda_2}{2} \int_0^t \Delta f dt$ 로 산출된다. 이 측정법은 광검출기에서 검출된 신호중 맥놀이 신호에 해당하는 교류신호만을 이용하기 때문에 외부 교란신호에 의한 영향을 적게 받고 주파수를 디지털 회로로 적산하여 거리를 산출하므로 광강도 변화에 영향을 받지 않는 장점이 있다.

헤테로다인 광간섭 변위측정 기술은 최근에 들어 급격한 발전을 보이고 있다. 대표적인 예로 광원의 안정화기술, 음향편향장치(acousto-optical modulation)에 의한 이중 주파수 생성기술, 그리고 간섭맥놀이 신호의 위상검출 기술의 획기적인 도약을 이루었다. 1983년 제 17차 국제 도량형 총회에서는 길이의 정의로 “미터는 빛이 진공에서 299 792 458 분의 1초 동안 진행한 경로의 길이이다”를 채택하였다. 그리고 실제적 길이 표준의 구현은 요오드 이온의 흡수선에 안정화시킨 주파수 안정화 레이저를 사용하도록 추천하였다. 그 후 주파수 안정성이 더욱 뛰어난 레이저 광원들을 개발하고 있어 실험실에서 10^{-8} 이하의 상대불확도를 갖는 헤테로다인 레이저 간섭계의 구현이 가능하게 되었다.

레이저광을 이용한 변위 측정은 비접촉이며, 측정영역이 크고, 측정분해능이 높으며, 측정대역이 넓고, 아베의 오차를 줄일 수 있으며, 평면거울을 사용할 경우 이차원 및 삼차원 측정이 가능하고, 각도 및 진직도 측정이 가능한 장점을 갖는다. 한 예로 최근에 상용화된 제품들의 경우 측정분해능은 0.3 nm ($\lambda/2000$)이고 측정의 최대속도를 나타내는 대역은 ± 13.9 MHz(최대 속도: ± 2.2 m/s)이다. 헤테로다인 레이저 간섭계의 측정 오차는 크게 레이저 간섭계가 본질적으로 가지고 있는 광학계의 오차, 측정 주변의 온도 및 공기 유동 등 환경에 의한 오차, 간섭계의 설치 장착에 의한 오차로 나눌 수 있다. 그 중에서 가장 큰 오차의 요인은 사용환경에서의 레이저의 파장길이 변화에 의한 오차이다. 특히 측정영역이 클 때에는 더욱 주의를 요하게 된다. 따라서 레이저 간섭계의 성능을 최대한 활용하기 위해서 측정 광속이 지나가는 주변의 환경을 잘 조절해야 하며, 공기 굴절율계를 장착하여 온도와 압력 그리고 습도에 대한 굴절

을 보상을 하는 것도 중요하다.

2.2 광학스케일

초정밀 길이측정에 있어서 광학스케일은 앞서 설명한 헤테로다인 레이저 인터페로미터와 더불어 선택할 수 있는 다른 대안이다.[3] 광학스케일(optical scale)은 기본적으로 인덱스 격자(index grating), 검출헤드, 그리고 전자분할 입력회로로 구성되어 있다. 인덱스 격자는 빛을 투과 혹은 반사하는 부분과 못하는 부분이 똑같은 간격과 폭의 격자를 형성하고 있다. 검출회로는 빛을 보내는 광원(LED), 인덱스 슬릿(index slit), 투과하거나 반사된 빛을 검출하는 수광소자로 구성되어 있다. 전자분할 입력회로는 인덱스 격자와 검출헤드의 상대운동이동방향의 판정 및 측정분해능을 증대하기 위한 위상분할을 구현할 수 있도록 구성되어 있다. 범용 공작기계에 사용되는 광학스케일의 경우에는 광위상 간섭 모아레(Moire) 원리를 구현하며 이 경우 측정분해능은 $0.5 \mu\text{m}$ 가 한계로 되어있다. 초정밀 길이 측정에서는 보다 정밀한 측정분해능이 필요하며 이를 위해 빛의 회절(diffraction)을 이용하여 분해능을 10 nm 미만으로 향상시켰다. 본 절에서는 현재 대표적으로 사용되어지는 두 가지 방식에 대해 설명한다[3,4] 첫 번째는 광의 편광을 이용한 스케일로서 그림 3에서와 같이 레이저 다이오드(laser diode)에서 나온 빛은 곧바로 격자(optical grating)위에 입사된다. 격자의 주기는 1 마이크로 이하로 빛의 회절현상을 유발하며 이로부터 회절된 빛의 ± 1 차 성분은 거울에 반사하여 간섭을 일으키게 된다. 간섭된 빛은 다시 $\lambda/2$ 와 $\lambda/4$ 거울에 의해 각각 90° 의 위상차를 갖는 네 개의 빛으로 분할된 후 거리의 방향과 크기를 수광소자(photo detector)와 전자회로에 의해 결정된다. 스케일이 1 피치(pitch)를 갖을 때 회절되어진 ± 1 차의 쌍의 빛의 위상은 $\pm 2\pi$ 의 값을 갖게 된다. 2회에 걸쳐 들어오는 빛에 대해서 전체적인 위상거리는 $\pm 4\pi/\text{pitch}$ 의 값을 갖게 된다. 결과적으로 피치당 4개의 정현파 주기를 갖는 신호가 된다. Sony의 광학식 스케일의 분해능은 격자 피치가 $1.6 \mu\text{m}$ 일 경우 수광소자에서는 $0.4 \mu\text{m}$ 의 주기를 갖는 정현파 신호를 갖는다. 이 신호를 4개로 나누면 $0.01 \mu\text{m}$ 의 분해능을 이룰 수 있다.

두 번째는 편광을 이용하지 않는 것으로서 Heidenhain에서 개발되어진 방식으로 그림 4에 그 방식에 대한 원리를 보여준다. 이 주사신호는 스케일과 동일한 격자주기를 갖는 투과형 위상격자를(Transmitted-light phase grating, index grating)갖고 있는 scanning head에 생성된다. 간섭측정의 원리는 측정신호가 생성되어진 격자에서 빛의 회절을 이용한다. 스케일이 그림과 같이 움직일 때 그것에 비례하게 회절된 빛의 고차성분은 위상변화를 겪게 된다. 중첩되어 간섭을 일으키는 회절된 빛의 다른 고차항들에 의하여 위상변화를 평가할 수 있다. 주사망(scanning reticle)은 중첩되어지는 회절된 빔성분들을 생성하여주는 주사 투과 위상격자로 구성된다. 스케일자체는 반사형 위상격자이다. 여기서 광원은 LED와 광집광장치(condenser)로 구성이 된다.

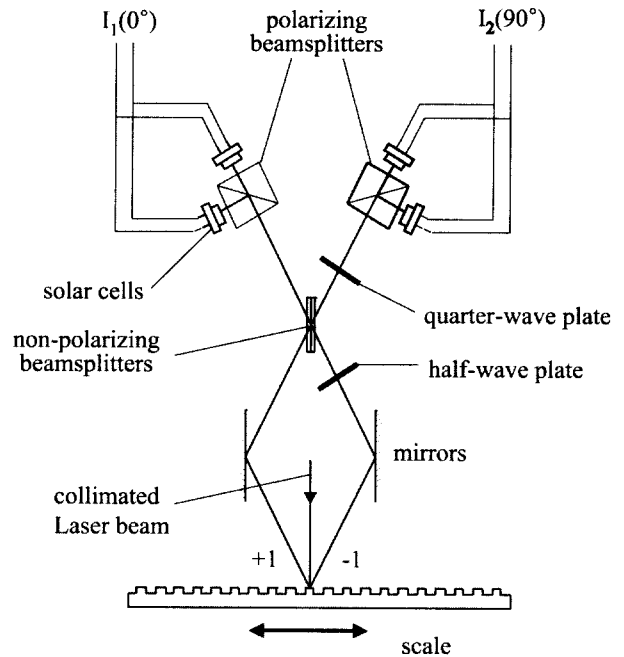


그림 3. 편광을 이용한 광학스케일의 개념도

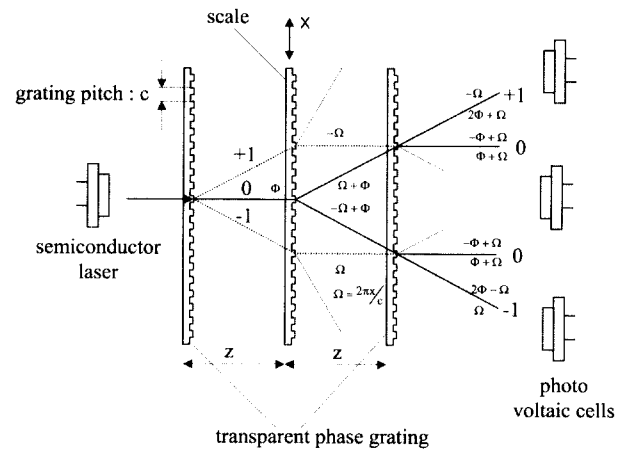


그림 4. Heidenhain식 광학 스케일의 개념도

인덱스격자에서 간섭 주사(Interferential scanning)은 0, +1, -1차의 회절성분에 의해 생성된다. 빔의 성분들은 다시 한번 스케일의 위상격자에서 회절되어지고 0차항은 제거된다. 스케일로부터 반사되어진 +1, -1차의 빛은 위상거리안에 거리변화의 정보를 함유하여 인덱스격자 안에서 간섭을 일으킨다. 빛의 변조로부터 120° 씩 이동되어진 위상변위신호를 생성시키고 이 신호를 두 개의 90° 위상변위신호로 바꾸게 된다. 이 정현파들에 대한 해석을 통하여 길이를 구할 수 있다.

광스케일과 레이저 간섭계의 가장 큰 원리적 차이는 길이측정의 기준(reference)이다. 광스케일의 경우 기준은 광격자이고 레이저 간섭계의 경우에는 사용하는 환경에서의 레이저의 파장이 된다. 길이측정의 불확도는 기준의 안정성

에 의해 좌우되는 만큼 이를 안정되고 정확하게 확보함으로써 보다 불확도를 증가시킬 수 있다. 일반적으로 요구되는 상대불확도가 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 이고 분해능이 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 의 수준의 경우 레이저 간섭계보다는 광스케일이 보편적으로 간편하다. 이유는 광스케일의 경우 스케일이 부착되는 재료의 열팽창과 동일하게 온도에 대한 자동적으로 보상이 되어지고 장착 전에 필요한 정밀도 보정이 가능한 반면, 레이저 간섭계에서는 공기 굴절율을 보상하기 위한 보상기를 따로 장착하여야 하기 때문이다. 반면 요구되는 상대불확도가 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 수준이고, 측정 분해능이 $10 \sim 100 \text{ nm}$ 의 경우에는 레이저 간섭계와 광스케일이 동등하게 사용될 수 있다. 그리고 상대불확도가 10^{-7} 이상으로 필요한 극초정밀 측정의 경우에는 광스케일의 경우에는 기준 격자의 정밀도의 한계에 의하여 사용이 어려워진다. 이 경우 레이저 간섭계만이 현 단계에서는 대안이 될 수 있으며, 기준과장이 극도로 안정화된 광원을 사용하여야 한다. 특히 가능하면 측정 환경을 진공으로 조성함으로써 온도, 습도, 공기의 유동장 변화에 따른 공기굴절을 불안정에 의한 측정의 정밀도 저하를 근원적으로 제거하는 것이 바람직하다.

3. 형상 측정

형상측정은 가공물의 삼차원 형상 정밀도(form accuracy)에 대한 기하학적 측정을 목표로 한다. 일반적으로 초정밀에서 요구되는 형상측정의 분해능은 1 나노미터의 수준이며 불확도는 $10 \sim 100$ 나노미터의 수준이다. 특히 최근에는 가공물의 크기가 증대됨에 따라 10^{-6} 이하의 상대불확도가 절실히 요구되고 있다. 현재 초정밀 형상측정에는 삼차원 좌표측정과 광학식 비교간섭계가 널리 사용되고 있다. 본문에서는 이들의 기본 원리와 측정의 불확도에 영향을 주는 제반 요인들과 이에 대한 대처 방안에 대해서 소개한다.

3.1 삼차원 좌표측정

삼차원 좌표측정(coordinate measurement)은 임의의 형상을 갖는 물체에 가장 범용으로 적용되는 측정기술이다.[5] 삼차원 좌표측정에는 접촉식 또는 비접촉식 프로브를 장착하여 측정형상의 표면에서의 점 군을 획득하는 방식이다. 현재 상용으로 판매되는 범용 삼차원 좌표측정기의 최소분해능은 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 이고 상대불확도는 10^{-5} 수준이 일반적이다. 접촉식 프로브는 다시 순간접촉감지형(trigger type)과 연속형(continuous type)으로 나뉜다. 순간접촉감지형은 프로브 선단의 접촉구가 곡면에 접촉되어 접촉력 또는 상대변위가 감지되면, 이때 측정기를 구성하고 있는 각 축의 위치검출기에서 축 좌표를 읽어 접촉점의 공간상의 삼차원 좌표를 알아낸다. 보편적으로 사용되는 방법이나 프로브가 접촉방향에 따라 이탈위치가 틀러지게 되어 측정정밀도를 저하시키고 연속적인 측정을 할 수 없다는 단점이 있다. 이에 비해 연속형 접촉식 프로브는 상대변위가 스타일러스에 작용하는 외력을 비례하여 프로브의 위치를 제어하므로써

접촉을 유지하면서 측정을 할 수 있어 상대적으로 고속의 측정을 할 수 있으며 접촉방향에 대한 오차를 줄일 수 있어 정밀한 삼차원측정기에 사용된다. 비접촉식 프로브는 광전자(optoelectronic) 기술을 바탕으로 연구가 활발히 진행되고 있는 측정기술로서, 접촉식 프로브와 같이 부착되어 광삼각법이나 광축심을 이용한 레이저 센서가 있다. 일반적으로 비접촉식 프로브의 분해능은 접촉식 보다 떨어지며 $0.5 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 정도이다.

일반적인 삼차원 측정기를 이용한 3차원 형상측정에서 정밀도를 감소시키는 가장 큰 요인은 접촉팁에 대한 보상이 정확하지 않기 때문이다. 접촉식 프로브를 이용하여 측정 물체의 표면형상을 측정하는 경우 측정에 사용하는 프로브 팁이 유한한 반경을 가지고 있기 때문에 측정 데이터는 실제 표면형상에 대하여 일정한 거리를 갖는 결과가 얻어진다. 따라서 실제 표면의 형상을 얻기 위해서는 프로브 팁이 접촉하는 곳의 좌표를 구하는 작업이 필요하게 된다. 이러한 작업을 프로브의 반경보정이라고 한다. 그림 5는 실제 표면형상에 대하여 측정되어지는 측정 프로파일간의 관계를 도식화하였다.

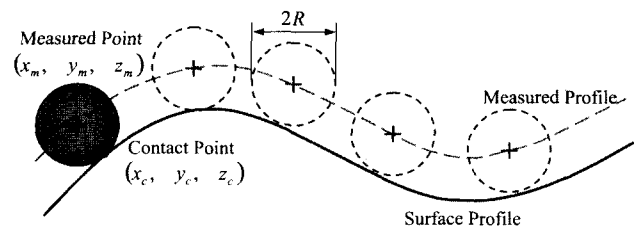


그림 5. 접촉식 측정에서의 반경보정

측정점 (x_m, y_m, z_m) 과 실제 측정 표면과의 접촉점 (x_c, y_c, z_c) 사이에는 측정 표면의 법선 벡터 방향으로 프로브 팁의 반경 R 만큼의 거리차이가 존재한다. 따라서 측정값으로부터 실제 표면의 접촉점을 얻는 방법은 이러한 법선 방향으로 R 만큼 보상해 주어야 한다.

서브마이크로의 형상공차를 갖는 측정물에 대해서는 접촉식 삼차원 측정기는 전체 측정시뎀 구조 및 프로브의 측정분해능에서 한계를 갖는다. 초정밀 3차원 측정에서 형상 데이터는 측정프로브의 신호와 측정기의 위치센서 신호의 합으로 나타난다. 그러므로 측정프로브가 정밀하게 값을 읽더라도 측정기의 위치신호에 오차성분이 있다면 정밀한 측정은 불가능하다. 이러한 관점에서 미세 측정 프로브를 이용하여 대영역을 측정하기 위해서는 측정 프로브의 분해능과 같이 정밀하게 움직일 수 있는 기계장치가 필요하다. 정밀한 기계장치가 갖추어야 할 요구사항은 고 분해능의 위치센서, 고 분해능의 구동기, 구동 각 축의 정렬, 환경에 대한 3차원적인 안정성 등이 필요하다. 이 중에서 필요한 3축에 대한 직각도(Orthogonality)와 각 축이 갖는 6자유도 성분의 오차성분에 대해서는 만족한 정도를 이루는 것이 매우 어렵고 또한 온도, 진동, 습도, 기압 등의 여러 환경요건

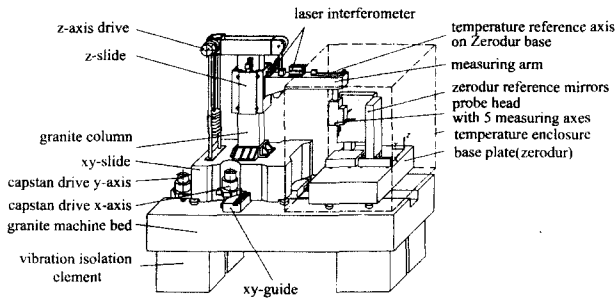


그림 6. 초정밀 삼차원 측정기 구조도(M-400).

의 변화가 직접적으로 측정정도에 영향을 주게 된다. 앞에서 설명한 문제점을 해결하고 서브 마이크로의 측정 분해능을 가지면서 넓은 영역을 측정하기 위한 초정밀 측정기에 대한 연구는 1986년 Carl Zeiss의 M-400 모델을 시작으로 하여 독일, 일본을 중심으로 하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 그림 6은 M-400모델의 구조도를 보여준다.[6] M-400은 평면유리의 삼차원 형상을 측정하기 위하여 제작되었으며, 기존의 삼차원측정기와 다른 점은 레이저 간섭계를 이용하여 프로브의 끝단을 5축으로 측정을 하여 측정구조물(Metrology Frame), 이동구조물(Carriage)에서 발생하는 오차를 원천적으로 방지하여 시스템 전체의 측정 정확도가 측정센서의 정확도와 동일하게 되도록 설계되었다. 또한 온도에 의한 영향을 최소화하도록 설계되어 있다. 이 구조에서 사용되어진 측정구조물, 프로브의 정확한 위치측정을 위하여 이후에도 많은 연구가 되고 있다. 1987년 일본의 National사에서는 M-400과는 달리 정밀 프로브에 대한 관심을 갖고 기계를 제작하였다. 비접촉식으로 레이저 간섭계를 이용하여 비구면 렌즈를 측정하였는데 경사진 면에 대한 측정을 위하여 측정물을 회전시키는 방법이 도입되었다.[7] 또한 1993년 동사에서 원자력간의 힘을 이용하여 측정 정도 10 nm 의 극초정밀 3차원 측정기를 개발하여 상용화하였다. National에서는 측정프로브에 관심을 갖고 기존의 AFM(Atomic Force Microscopy) 프로브와 동일한 원리의 프로브를 제작하였다. 이는 Panasonic에서 상품화되어 많은 비구면 생산업체에서 사용되어지고 있다.[8] 1995년 Canon사에서는 CSSP(Cannon Super-Smooth Polisher)를 개발하여 $\phi 500$ mm 인 비구면 렌즈 측정에서 9 nm RMS의 반복능을 나타내었다고 발표하였다.[9] CSSP에서 특이할 점은 레이저 간섭계를 14개를 사용하여, 프로브 선단을 정확하게 측정하며, M-400에서 문제가 될 오차요인이 발생할 수 있는 측정 기준틀(Metrology Frame)을 항상 보정할 수 있다는 것이다. 또한 National과 Canon에서 발표한 논문에서는 이들 설계에 M-400의 제작관점이 포함되어 있으며 프로브의 개선과 측정구조물의 측정 오차를 줄이는 방향으로 연구가 되고 있다. 앞의 삼차원 측정기와는 다르게 1995년에 미국의 표준과학연구소(NIST)에서는 분자단위 크기정도의 분해능을 갖는 초정밀 측정기를 개발한다는 목적으로 M-Cube(Molecular Measuring Machine)를 개발하였다.[10]

M-Cube는 우선 환경적 요소에 의한 오차요인을 줄이는 연구를 하였으며, 정확한 오차 분석(error analysis)에 의해 총 불확도(Total Uncertainty) 40 nm를 보장하고 있으며, 현재 계속해서 그 불확도를 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다. 결국 상대불확도가 10^{-7} 이상이고 측정정밀도가 수나노미터 수준인 3차원 측정기를 제작하는데 가장 큰 관심은 초정밀 프로브, 측정 기준틀을 이용한 전체 시스템 보정 그리고 환경요인에 대한 보상에 있다.

3.2 광학적 비교검사

간섭계를 이용하여 제품 표면에서 반사 또는 투과되는 빛의 파면수차로 3차원 형상을 측정할 수 있다. 이 경우 측정되어지는 3차원 형상은 기준에 대한 형상오차에 의해 구해진다. 간섭계를 이용한 파면수차 측정방법은 수 nm의 측정분해능과 짧은 측정시간 및 측정결과를 입체적으로 제시해 줄 수 있는 장점이 있으나, 가장 중요한 측정의 신뢰도가 작업자 또는 측정장치에 따라서 크게 영향을 받는다. 이것은 파면수차와 표면형상을 측정하는데 있어서 표준시편이 존재하지 않는다는 사실로부터 발생하는 결과이며, 광학계의 특성상 측정을 위하여 구성되는 광학부품들 각각의 정렬오차가 측정결과에 크게 영향을 미쳐서 반복성(repeatability)의 확보가 매우 어렵기 때문이다.

초정밀 가공에서 가장 중요한 비구면 렌즈 및 금형코어의 측정에 사용되는 간섭계는 다음과 같이 두 가지로 분류된다. CCD 카메라를 통하여 획득된 간섭무늬의 해석으로부터 얻어지는 결과가 위상(phase)의 정보를 제공하는 위상간섭계(phase interferometry)와 위상의 기울기(slope)에 대한 정보를 제공하는 증밀리간섭계(shearing interferometry)가 있다.[11] 위상간섭계의 경우 계산된 위상값은 측정하고자 하는 파면수차(w_a) 또는 표면형상(p)에 해당되는 것으로 Twyman-Green 간섭계, Newton Ring 간섭계, Fizeau 간섭계[12] 등이 여기에 속한다. 이들 간섭계는 기본적으로 측정하고자 하는 물체와 기준물체로부터 반사된 두 개의 파면을 중첩시켜서 간섭무늬를 형성한다. 따라서 측정물체에 따라서 매우 정확하게 제작된 기준물체를 필요로 하게 된다. 또한 비구면의 경우에는 얻어지는 간섭무늬의 분포가 매우 조밀하게 되고, 심하면 간섭무늬를 얻기 위하여 영상면으로 사용되는 CCD 카메라의 분해능으로 간섭무늬가 구분되지 않는 한계를 초과하는 문제가 발생하게 된다.[13] 이외에도 기준물체와 측정물체 사이의 광경로차(optical path difference : OPD)가 사용된 광원의 파장 길이(λ)보다 크게 되면 측정이 불가능해지는 2π 모호성(ambiguity)문제가 발생되기도 한다. 그림 7의 (a)는 현재 렌즈의 파면수차 측정에 가장 많이 이용되고 있는 Fizeau 간섭계의 기본구조를 나타내고 있다. 측정장치의 구성상 렌즈와 같은 투과형의 물체를 측정하는데 있어서 매우 정확하게 제작된 표준미러(master mirror)를 이용하여 측정파면을 측정장치로 되돌려 보내야 하기 때문에 정확한 측정을 위해서는 각각의 구성요소를 정확히 정렬해 줄 수 있는 보조장치가 필요하고, 많

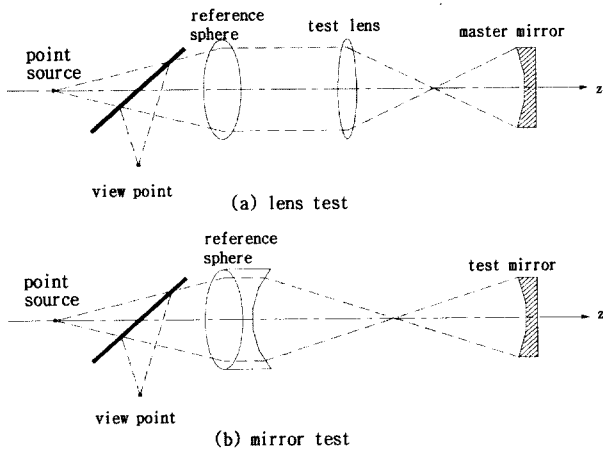


그림 7. Mirror 측정을 위한 간섭계

은 측정 경험을 요구한다. 특별히 그림 7의 (b)와 같은 광학계를 구성하면 간섭무늬의 상태로부터 표면형상의 형상 정확도를 정성적으로는 파악할 수 있다.

층밀리기간섭계에 속하는 Ronchi법, Mach-Zehnder 간섭계, 모아레 간섭계, 홀로그래프 간섭계 등은 그림 8에서와 같이 측정물체를 통과한 파면(w_0)을 광분할기(beam splitter) 또는 별도의 구성요소를 이용하여 두 개의 파면으로 분리시키고, 하나의 파면(w_1)을 다른 하나의 파면(w_2)에 대해서 상대적으로 이동 또는 회전시킨 뒤에 두 개의 파면을 중첩시켜서 간섭무늬를 형성시킨다. 따라서 이와 같이 형성된 간섭무늬는 측정하고자 하는 파면수차 또는 표면형상의 기울기 정보를 제공한다. 결국 층밀리기간섭계로부터 얻어지는 값이 기울기(derivative) 값이기 때문에, 위상의 기울기로부터 측정하고자 하는 파면수차 또는 표면형상을 복원하는 추가적인 절차가 요구되고, 이 때 삼차원의 위상을 복원하기 위해서는 서로 직각을 이루는 두 방향의 기울기를 필요로 하게 된다. 따라서 일반적으로 층밀리기간섭계를 통하여 삼차원의 위상정보를 얻기 위해서는 층밀리기 방향을 변화시켜 줄 수 있는 구동부가 필요하게 된다. 그러나 측정물체에 따라서 기준물체를 제작할 필요가 없고, 일반적으로 간섭무늬의 위상을 추출할 때 발생하는 2π 모호성(ambiguity) 문제가 발생하지 않는 장점을 가진다. 이외에도 투과율을 가지는 이진화격자(binary grating)를 이용하여 입사된 파면을 층밀리기(shearing)시키는 론키법(Ronchi test)도 있다.[14,15] 서로 수직인 두 방향의 기울기를 필요로 하는 층밀리기 광학계를 구성하는데 있어서 단순히 회절격자만을 필요로 한다는 장점이 있다.

4. 표면측정

표면측정(surface metrology)은 표면을 구성하고 있는 미세 조직(structure)의 삼차원 형상의 측정을 목적으로 한다. 이는 용어의 정의 관점에서 보면 앞서 설명한 형상측정에서는 대상물체의 전체적 형상에 대한 측정을 수행하는 반

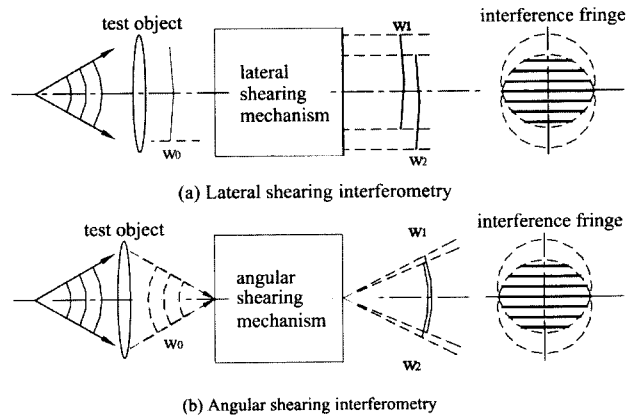


그림 8. 층밀리기 간섭계의 구성도

면에 표면측정에서 관심을 갖는 부분은 측정대상이 되는 표면결(surface texture)의 공간주파수로 구별하여 고주파수의 성분을 지칭한다. 하지만 두 측정의 구별에 대한 기준이 되는 특정 주파수의 값은 정해져 있지 않다. 표면측정에서 관심을 갖는 대표적인 예가 되는 표면거칠기(surface roughness)는 중요하게 관리되어야 하는 표면특성이다.[16] 가공된 표면이 광학적 기능을 수행하는 미러나 렌즈일 경우 표면거칠기는 빛의 반사율과 투과율에 직접적인 영향을 갖는다. 또한 가공된 표면이 접촉에 의한 기계적 기능을 수행할 경우에는 마모, 마찰, 그리고 윤활의 성능을 결정짓는 중요한 표면 인자이다. 최근에는 미세가공기술의 발달에 따라 가공 표면에 식각 또는 절삭된 미세구조물의 삼차원 형상에 대한 수요가 증가하고 있다. 이 경우 측정대상이 전통적인 표면거칠기의 범주에는 속하지 않으나 측정의 관점에서는 많은 유사성을 갖고 있다. 이렇듯 고주파수 성분의 표면성분에 대한 초정밀 측정기술을 국한하여 표면측정(surface metrology)라 한다. 본 장에서는 표면측정에 정통적으로 사용되어 오고 있는 축침법과 광간섭법에 대해 설명한다. 그리고 최근의 원자 단위의 미세측정을 가능하게 하고[17,18] 있는 주사탐침법의 기술발전 동향에 대해서도 현재 사용되고 있는 기술의 원리와 한계에 대해 기술한다.

4.1 축침식 표면측정

그림 9는 일반적인 축침(stylus)식 표면측정의 기본원리를 보여준다. 축침으로는 자연 다이아몬드를 이온빔가공에 의해 구(sphere)형의 미세 침으로 만든다. 일반적으로 측정에 사용되는 축침의 형상은 그림 10에서와 같이 반경이 10~0.1 마이크로미터의 수준이고 경사각은 가공의 제한으로 60°에서 90° 사이의 값을 갖는다. 측정은 가공된 축침을 대상물체에 접촉시킨 후 특성의 직선방향으로 일정한 속도로 주사하게 된다. 이때 축침은 물체표면의 미세 구조가 갖는 요철에 의해 상하로 움직이게 되며, 이러한 미세한 움직임을 변위센서로 읽게된다. 축침의 변위는 측정분해능이 0.01 이하 0.1 마이크로미터의 수준인 기전력(inductive)과

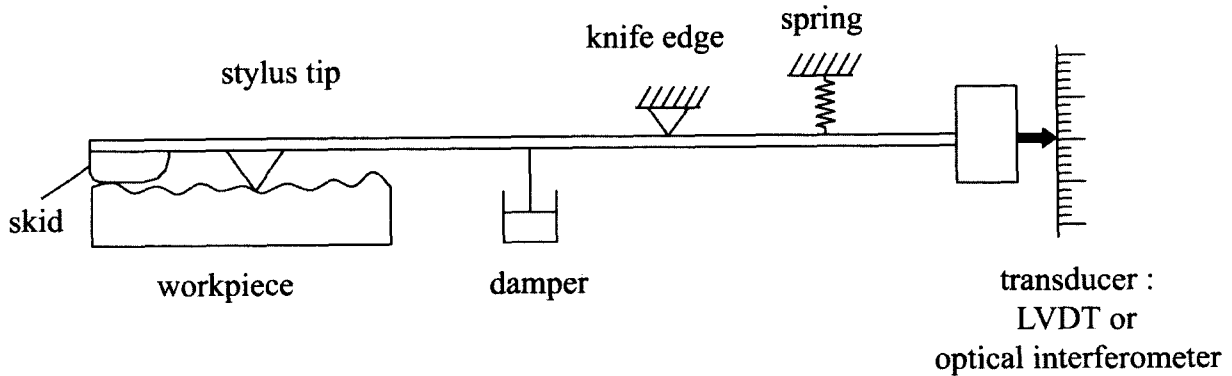


그림 9. 접촉식 표면 측정기의 개념도

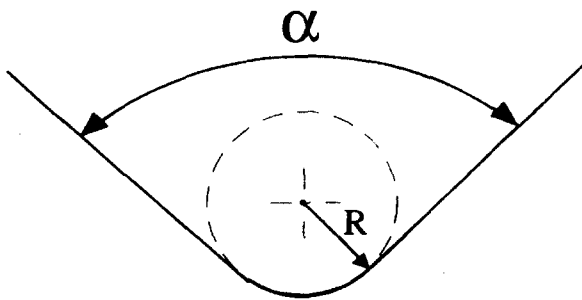


그림 10. 촉침의 형상



그림 11. 촉침의 형태 변경에 대한 표면형상의 변화

———— : 촉침반경 2.5 μm 일 경우
 - - - - : 촉침반경 12.5 μm 일 경우

정전용량(capacitive) 형의 전기적 센서나 앞서 설명한 헤테로다인 레이저 간섭계가 널리 사용된다.

촉침식 측정에서 촉침의 형상은 측정결과로부터 측정표면을 재구성하는데 많은 영향을 미치게 된다. 촉침의 반경에 의해 획득한 전단 주파수(cut-off frequency)가 결정되어 지므로 촉침은 측정하는 표면의 상태와 해석하고 싶은 정도에 따라 결정되어야 한다. 그림 11은 촉침의 반경에 의하여 같이 표면을 측정하였을 경우에도 촉침의 형상에 의하여 전혀 다르게 해석될 수 있음을 보여준다.[19] 표면의 성분을 고분해능으로 해석하기 위해서는 촉침의 반경을 작게 하여야 한다. 그러나 촉침의 반경이 작아지면 같은 접촉력에서도 촉침에서 받는 압력은 크게되어 촉침의 손상을 가져오게 되므로 접촉압력을 일정하게 유지하기 위하여 접촉력을 감소시켜야 한다. 서브 마이크로의 해석을 위해서는 1 μN 미만의 작은 측정력을 이용하여야 한다.

촉침식 표면측정기에서는 촉침의 수직변위를 측정에 대한 기준을 마련하기 위하여 기계적으로 스킨드(skid)라는 기준장치를 두게 된다. 스킨드는 측정표면의 저주파성분을 기준으로 측정할 수도 있고 스킨드의 접촉면을 외부에 설치하여 독립적인 기준선을 마련할 수 있다.

촉침식 측정기는 많은 발전을 하였으며 지속적인 필요증가에 따라 여러 방법에 대한 연구가 진행중이다. 현재까지의 개발방향을 종합해보면 다음과 같은 3가지 방향으로 진행이 되었다. 첫 번째는 고정밀도의 센서의 채용으로 인한

넓은 영역에 대한 고정밀도의 분해능에 대한 측정으로 상대불확도를 증가시키는 것이고 둘째는 영역에 대한 주사방식에 대한 것이고 셋째는 현장에서 쉽게 사용할 수 있도록 간편한 휴대형으로 사용할 수 있게 만드는 방향이다. 이 중에서 측정영역을 높여 표면의 조도에서 벗어나 형상을 측정할 수 있는 장비로 개발이 되어왔는데 이를 위하여 스타일러스 촉침의 위치를 스테핑모터에 의하여 형상과 일치되게 구동하며 형상과의 미세한 차이를 기록하여 표면의 조도뿐 아니라 파동성분까지 측정하도록 개발되어 표면의 형상이 정확하게 정의되어 있는 비구면의 측정에서 많이 사용되어 진다.

4.2 광위상간섭

삼차원 측정에서 설명하였던 광위상간섭을 이용한 현미경은 삼차원표면의 형상을 나노미터 수준의 고정도 수직분해능으로 측정할 수 있는 방법으로 보편화되고 있다. 광위상간섭법을 이용한 측정에는 PSI(Phase Shift Interferometry)와 WSI(White Light Scanning Interferometry) 등이 있다. 현재 광위상간섭계의 사용분야는 매우 다양하며, 특히 비구면 형태의 표면, 반도체웨이퍼, 컴퓨터의 하드디스크 등과 같은 경면을 빠른 시간에 비접촉식으로 3차원 형상을 측정하는데 특히 유리하다.

광위상 간섭법을 이용한 측정은 프로브를 용도에 맞게 변경하여 사용할 수 있다. 광간섭을 이용한 측정방식은 그림 12는 간섭렌즈별로 광간섭을 이용한 프로브의 개념도를 나타낸다. 일반적으로 미라우간섭계는 측정물 표면과 CCD 화소면사이의 배율이 10~50배에서 사용되고 이보다 고배

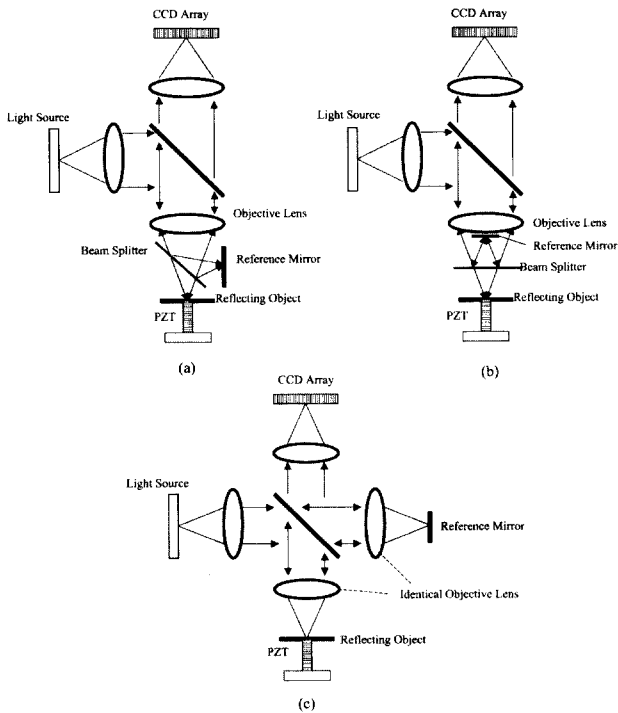


그림 12. 간섭계의 개념도 그림

(a) 마이켈슨 간섭계, (b) 미라우 간섭계, (c) 리닉 간섭계

에서는 리닉간섭계(Linic Interferometer)가 저배율에서는 마이켈슨 간섭계(Michelson Interferometer)가 사용된다.

그림 13은 광위상 간섭계의 기본적인 측정 원리를 보여 준다. 광원으로부터 단색 파장(monochromatic)의 광이 조사되며, 광분할기(beamsplitter)를 통과하면서 두개의 광으로 분리된다. 이 중 기준 미러(mirror)로 입사하는 광을 기준광이라 하고 측정물로 입사하는 광을 측정광이라 한다. 기준 광은 평탄도가 보장되는 기준 미러(reference mirror)에서 반사되어 다시 광분할기로 입사한다. 측정광은 물체면에서 반사되어 광분할기로 입사한다. 광분할기에서 합쳐지는 두 광은 광분할기에서 기준 미러와 측정점까지의 거리차로 인하여 광경로 차를 겪게 되고 이로 인하여 그림에서 보듯이 물체 영상 위에 겹쳐져 보이는 간섭무늬가 발생한다. 즉 간섭무늬의 위상 정보는 기준 미러와 측정점들간의 상대적인 거리차를 의미하므로, 간섭무늬의 위상을 정확히 해석하면 물체의 표면 형상을 측정할 수 있다.

백색광주사간섭계(white light scanning interferometry)는 백색광의 넓은 주파수 영역으로 인한 짧은 가간섭거리(temporal coherence length)를 활용하여 미세표면의 삼차원 형상측정에 널리 응용되고 있다. 형상측정의 기본원리는 측정표면 또는 기준거울의 위치를 광축 방향으로 정밀 이송하면서, 이때 얻어진 간섭무늬의 정점을 검출함으로써 이루어진다. 단색의 레이저 광원과 비교하여 백색광의 가간섭 거리는 수 μm 범위로 한정되며, 가시도의 최대정점의 위치가 분명하여 측정표면의 절대위상의 산출시 2-도호성의 문제점으로부터 자유롭게 된다. 또한 중간 광학계로부터의 불

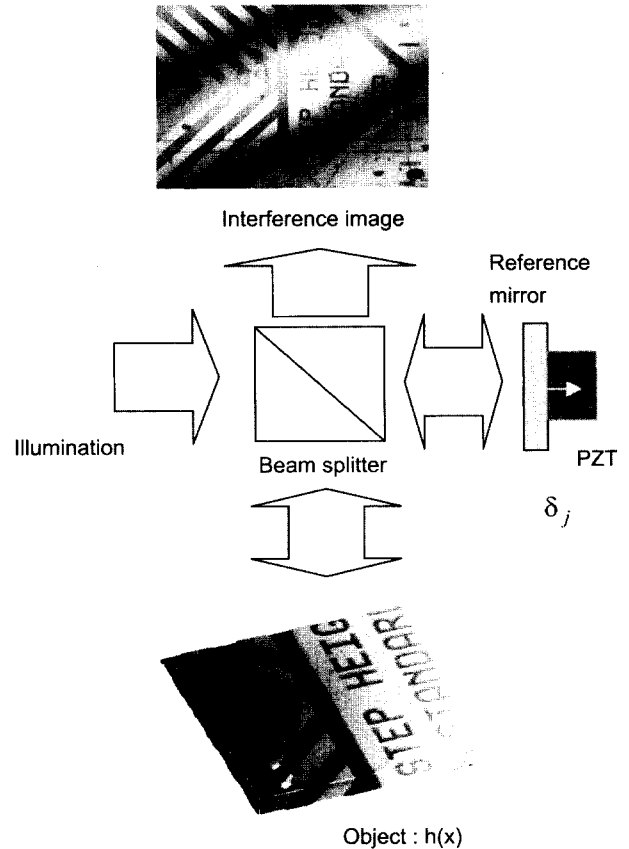


그림 13. 광위상 관섭계의 개념도

필요한 회절에 의한 잡간섭(stray diffraction)이 제거된 측정표면과 기준거울만의 우수한 간섭무늬를 얻을 수 있다. 이러한 백색광주사간섭계는 최근의 마이크로컴퓨터의 연산 능력의 급진적인 향상을 바탕으로 사용이 점차 확대되고 있다.[20,21]

4.3 촉침주사방법(SPM: Scanning Probe Microscopy)

SPM은 Scanning Probe Microscope의 약자로서 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 새로운 개념의 현미경을 총칭하는 말이다.[22,23] 우리나라에서는 원자현미경이라고 불리워진다. 원자 또는 분자단위의 정도를 갖는 측정의 발달은 STM, AFM 등의 SPM방식의 개발로 가능하게 되었다. 이들은 앞에서 설명한 촉침식 측정기와 유사하지만 측정원리에서 고전적인 역학을 뛰어넘는 양자역학적 효과(quantum-mechanical effects)에 의한 신호에 의존하는 측정으로 촉침의 형상을 극한으로 작게 하여 표면과의 접촉을 필요치 않으므로 접촉식으로 분류되지는 않는다. 이들 기술을 표면의 형상(topography)을 직접적으로 측정하는 것은 아니라 STM의 경우에는 전하밀도(charge density), AFM의 경우에는 원자간에 발생하는 힘(force)의 특징(feature)에 의하여 측정을 수행하는 것이다. SPM 기술의 잇점은 앞에서 설명하였던 기술 접촉식, 비접촉식 측정의

한계를 뛰어넘을 수 있다는 것이다. 즉 광학식 방식에서 광원의 상대적으로 큰 파장에 의한 회절에 의한 제한과 stylus가 갖는 유한한 크기의 probe 형상에서 오는 제한을 극복하여 나노미터 수준을 뛰어넘는 측정을 가능하게 하였다는 것이다.

SPM에는 원자현미경 계열 중 처음으로 등장한 STM (Scanning Tunneling Microscope), 부도체 시료의 측정을 가능케 한 AFM (Atomic Force Microscope), 물질의 형상이외에 다른 특성들을 측정할 수 있는 MFM(Magnetic Force Microscope), LFM(lateral Force Microscope), FMM (Force Modulation Microscope), EFM(Electrostatic Force Microscope), SCM(Scanning Capacitance Microscope), 그리고 EC-SPM(Electrochemistry SPM) 등이 있다. 이러한 원자현미경 외에도 물질의 광학적 특성을 빛의 파장보다 훨씬 작은 분해능(~50 nm)으로 알아내는 NSOM(Near-field Scanning Optical Microscope), 시료표면의 온도분포를 재는 SThM(Scanning Thermal Microscope) 등의 원자현미경이 있는데 아직은 널리 사용되고 있지 않으나 앞으로 발전, 응용 가능성이 많다.

이중 일반적인 재료에 대해서도 측정이 가능한 AFM에 대한 원리는 그림 14에 나타나 있다. AFM에서는 텅스텐으로 만든 바늘 대신에 마이크로머시닝으로 제조된 캔틸레버(Cantilever)라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 100 μm , 폭 10 μm , 두께 1 μm 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또한 캔틸레버 끝 부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 STM의 탐침처럼 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근시키면 탐침 끝의 원자와 시료표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나(인력) 밀치는 힘(척력)이 작용한다. AFM은 접촉모드와 비접촉모드로 사용할 수 있다.

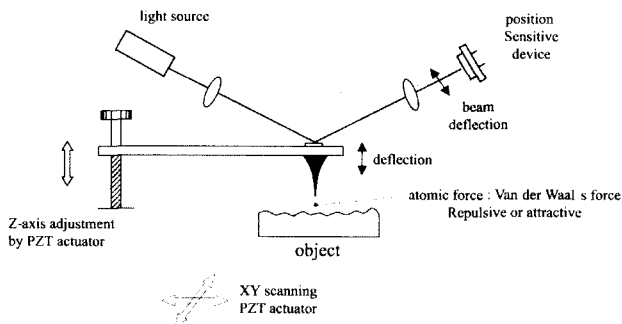


그림 14. AMF의 개념도

접촉모드의 AFM에서는 척력을 사용하는데 그 힘의 크기는 1~10 nN 정도로 아주 미세하지만 캔틸레버 역시 아주 민감하므로 그 힘에 의해 휘어지게 된다. 이 캔틸레버가 아래위로 휘는 것을 측정하기 위하여 레이저 광선을 캔틸레버에 비추고 캔틸레버 윗면에서 반사된 광선의 각도를 포토다이오드(Photodiode)를 사용하여 측정한다. 이렇게 하면

바늘 끝이 0.01 nm 정도로 미세하게 움직이는 것까지 측정해낼 수 있다. 바늘 끝의 움직임을 구동기에 역피드백(feedback)하여 AFM의 캔틸레버가 일정하게 휘도록 유지시키면 탐침 끝과 시료사이의 간격도 일정해지므로 이 시료의 형상을 측정해낼 수 있다. 비접촉 모드의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN 정도로 시료에 인가하는 힘이 접촉모드에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 비접촉 모드에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동시킨다. 시료표면에 다가가면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 lock-in amp로 측정한다. 원자간에 상호 작용하는 힘은 시료의 전기적 성질에 관계없이 항상 존재하므로 도체나 부도체 모두를 높은 분해능으로 관찰 할 수 있다.

현재 SPM은 주로 연구용과 산업용 분석, 측정기로 쓰이고 있다. 연마된 광학 렌즈나 증착막의 두께 및 굴곡도 측정에서부터 천연 광석의 표면분석에 이르기까지 종래 보다 더 작은 단위로 측정하려는 모든 곳에 활용되고 있다. 산업용으로는 반도체의 표면 계측, defect 분석, 콤팩트 디스크, 자기 디스크나 광 자기 디스크 등에 쓰인 비트(bit)의 모양새 조사 등에 쓰이고 있으며 최근 큰 성장을 보이고 있는 FPD(Flat Panel Display)의 제조 공정 분석 장비로도 활용되고 있다. 원자현미경은 진공 상태나 대기중 뿐 아니라 액체 내에서도 작동하므로 살아있는 세포내의 구조나 세포 분열 등을 관찰할 수 있다. 전자현미경이 진공 상태에서만 가능하다는 것을 감안하면 원자현미경의 응용범위가 대단히 넓다고 할 수 있다. 원자현미경은 관찰, 측정에 그치지 않고 초소형 로봇의 기능도 할 수 있어서 나노리소그라피(Nanolithography; 사진묘사), 나노머시닝(Nanomachining; 절삭), 나아가 분자의 합성 등의 연구에 사용되고 있다.

5. 결 론

초정밀 가공을 위한 측정기술에 대하여 변위측정, 형상측정, 표면측정으로 나누어 설명을 하였다. 변위측정에서는 초정밀 가공 및 시스템에 필요한 변위측정의 상대불확도 및 정밀도에 대해 정의하고 나노미터 이하의 분해능을 갖으며 10^{-6} 이상의 상대불확도를 갖는 초정밀 길이 측정에서 대표적으로 사용되는 레이저 인터페로미터와 광학스케일에 대하여 원리 및 특징점에 대하여 설명을 하였다. 3차원 형상측정에서는 측정방법을 크게 3차원 좌표측정기 방식과 간섭계를 이용한 Null검사방식으로 나누고 일반적인 원리와 오차를 주는 요인들, 그리고 이들의 발전방향에 대하여 설명을 하였다. 마지막으로 표면측정에서는 초정밀 가공에서 표면측정이 중요한 이유를 설명하고 측정방식을 접촉식, 비접촉식, 그리고 SPM으로 나누고 각각의 원리 및 특징을



설명하였다. 전체적으로 본문의 내용은 각 측정 방법에 대한 최소한의 이해를 목적으로 기술하였으며 정밀 측정을 수행하는 사람의 입장에서 각 방법에 대해 중요하다고 생각되어지는 사항에 대해서 강조하여 설명을 하였다.

참 고 문 헌

[1] H. Kunzmann, Today's limits of accuracy in dimensional metrology, Proc. of 2nd IMEKO TC14 Int. Symposium on metrology for quality control in production, Beijing, China May, 1989.

[2] B. E. A. Saleh et al., Fundamentals of photics, First Edition, Wiley Interscience, p. 65, 1991.

[3] H. Kunzmann et al., Scales vs. laser interferometers performance and comparison of two systems, Ann. CIRP, Vol. 42/2, p. 753, 1993.

[4] A. Teimel, Technology and application of grating interferometers in high precision measurement, Pro. of the 6th Int. Precision Engineering Seminar, Braunschweig, Germany, p. 15, 1991.

[5] 엄태봉 외, 3차원 측정 및 레이저응용 측정, 정밀측정 교재, 한국표준과학연구원, 1992.

[6] Becker K and Heynacher E, A high resolution coordinate measuring machine for the testing of X-ray mirrors, SPIE vol. 733(Bellingham, WA: SPIE), p. 149, 1986.

[7] K. Yoshizumi. et al., Ultrahigh accuracy 3-D profilometry , Appl. Opt. 26, p. 1617, 1987.

[8] K. Yoshizumi, et al., Ultrahigh accuracy 3-D profilometer using atomic force probe, National Technical Report, Vol. 39, No. 4, p. 116, 1993.

[9] Mahito Negishi et al., A high-precision coordinate measuring system for super-smooth polishing , Nanotechnology, Vol. 6, p. 139, 1995.

[10] E. C. Teague, The National Institute of Standards and Technology Molecular Measuring Machine Project: Metrology and Precision Engineering Design, J. Vac. Sci. Technol., B7, P. 1898, 1989.

[11] Daniel Malacara, "Optical shop testing," Second Edition, Wiley Interscience.

[12] Chunsheng Huang, "Propagation error in precision Fizeau interferometry," Appl. Opt. Vol. 32, No. 34, p. 7016, 1993.

[13] Y. J. Fan, K.G. Struik, P. C. Mulders, C. H. F. Velzel, "Stitching inteferometry for the measurement of aspheric surfaces," Annals of the CIRP Vol. 46, No. 1, p. 459 1997.

[14] Toyohiko Yatagai, "Phase measuring Ronchi test," Appl. Opt. 27(3), p. 523, 1988.

[15] 이호재, 일반화된 론기법을 이용한 비구면 측정, 박사 학위논문, 한국과학기술원, 1999.

[16] D J Whitehouse, Review article: Surface metrology, Meas. Sci. Technol., 8, p955, 1997.

[17] Chin Y. Poon et al., Comparison of surface roughness measurements by stylus, AFM and non-contact optical profiler, Wear, 190, p76, 1995.

[18] T H McWaid et al., Methods divergence between measurements of micrometer and sub-micrometer surface features, Nanotechnology, 5, p33, 1994.

[19] 정명세 외, 표면거칠기, 정밀측정교재, 한국표준연구소, 1984.

[20] J. C. Wyant and Creath, Advances in interferometric optical profiling, Int. Int. J.Mach. Tools. Manufact, Vol.1/2, No.5-10, 1992.

[21] K.. Creath, Phase-measurement interferometry: beware these errors, Proc. SPIE 1553, 1991.

[22] R. Wiesendanger, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy, Cambridge University Press, 1994..

[23] Rebecca Howland et al., A Practical Guide : To scanning probe microscopy, Park Scientific Instruments, 1997.

저 자 소 개



김 승 우(金 承 佑)
 1978년 서울대 공대 기계설계학과 졸업.
 1980년 한국과학기술원 기계공학과 졸업 (석사). 1984년 영국 Cranfield Inst. of Tech.(공박). 1980년 3월~1981년 8월 한국과학기술원 기계공학과 연구조교. 1984년 9월~1985년 2월 한국과학기술연구원 기계공학부 선임 연구원. 1985년 3월~현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수, 부교수, 교수.