

제 6 장 초정밀 변위 측정

6.1 개요

1) 소규모 치수/변위의 정밀 측정

광파형 간섭 (interferometry) - 파동의 간섭 이용
영상확대 - 볼록 렌즈 사용 (Autocollimator)

Interferometry 방법:

- Optical flat
- Fringe counting interferometer
- Polarization interferometer
- Heterodyne interferometer

2) 대규모 치수 측정

투영시스템 (Projection)

3) 장거리 측정

- Beam modulation ; 장거리 측정
- Pulse echo ; 장거리 측정

	Laser	Range	Accuracy	Application
Beam Modulation	He-Ne, GaAs	100 m ~ 50 km	10^{-6}	survey
Pulse echo	Q-switched Nd-glass, CO ₂	10 km ~	10^{-6}	Satellite Military

6.2 광학 일반

1) 전자기파

빛은 전자기 파동으로서 전기장과 자기장이 진동을 하면서 전파되는 것이다. 이때 전기장이나 자기장은 서로 수직하면서 역시 진행방향에 수직으로 진동을 하게 되므로 횡파의 일종이다.

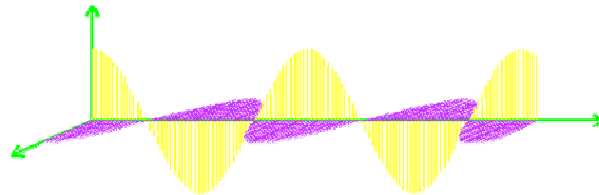


그림 6.1 빛의 전파

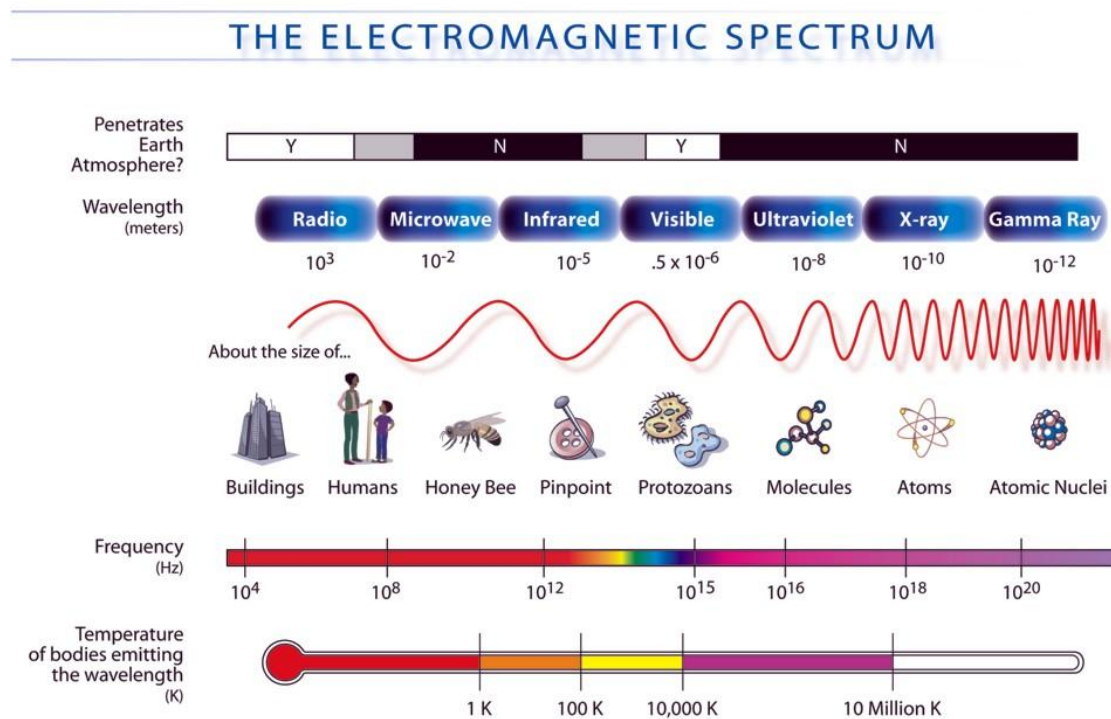
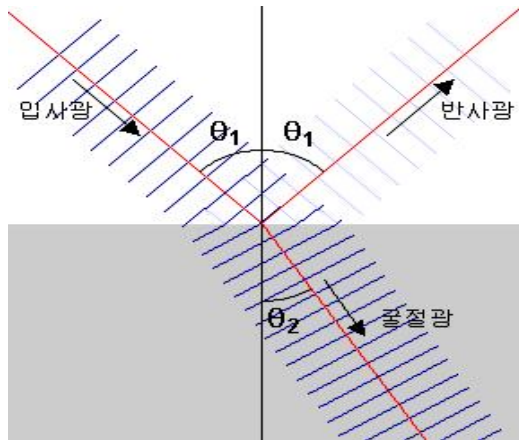


그림 6.2 전자기파 스펙트럼

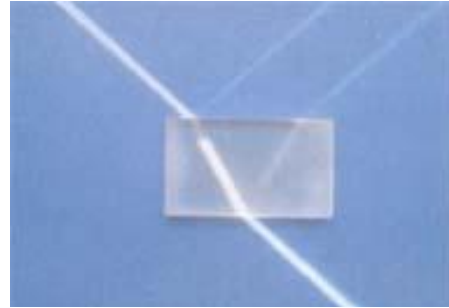
2) 빛의 성질

(1) 굴절 (refraction)

매질 중을 나아가는 파동이 경계면을 지나서 전파 속도가 서로 다른 매질 속으로 나아갈 때, 그 방향이 변화하는 현상. 광선이 경계면에 수직으로 입사한 경우를 제외하고는 모든 경계면에서 광선의 진행방향은 항상 바뀐다. 이 현상은 모든 종류의 파동에서 발생함.



(a)



(b)

그림 6.3 유리평면에 의한 입사광선의 반사와 굴절 (굴절률은 파장에 따라서도 미세하게 변화함)

입사각 θ_1 , 반사각 θ_1' , 굴절각 θ_2 들은 경계면에 수직인 방향과 광선사이의 각도로 정의됩니다.

반사법칙

반사광선은 입사평면 안에 놓여 있으며 다음의 관계식을 만족한다.

$$\theta_1' = \theta_1$$

굴절법칙 (Snell의 법칙)

굴절광선은 입사평면에 놓여 있으며 다음의 관계식을 만족한다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

여기서 n_1 은 차원이 없는 상수이며, 첫 번째 매질의 굴절률이고, n_2 는 두 번째 매질의 굴절률이다.

굴절률 (refractive index)

- 굴절률은 매질에 따라 다르다.
- 굴절률은 파장에 따라 다르다.

어떤 물질의 굴절률은 c/v 와 이다. 여기서 c 는 진공에서의 빛의 속도이고 v 는 물질에서의 빛의 속도입니다. 진공과 여러 물질들의 굴절률은 다음과 같습니다.

표 6.1 여러 매질의 굴절률

매질	매질 굴절률 ^a	매질	매질 굴절률 ^a
진공	1.00	보통유리	1.52
공기(STP) ^b	1.00029	소금결정	1.54
물	1.33	폴리스틸렌	1.55
아세톤	1.36	특수유리	1.65
에틸알콜	1.36	사파이어	1.77
설탕물(30%)	1.38	고밀도유리	1.89
비결정수정	1.46	다이아몬드	2.42
설탕물(80%)	1.49		

a; 파장 598nm 빛(나트륨등의 노란색 빛), b; STP: 표준상태, 0°C이고 1기압인 상태

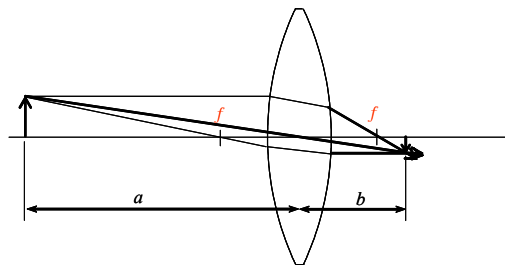
- 진공에서는 굴절률이 1.0으로 정의되어 있고 공기 중에서는 1에 매우 가깝다. (많은 경우 근사적으로 1을 쓰기도 한다.) 어떤 물질도 1보다 작은 값을 가지지 못한다.

- 파장에 짧은 빛이 파장이 긴 빛보다 굴절률이 크다.

*** lens 의 굴절**

(thin lens)

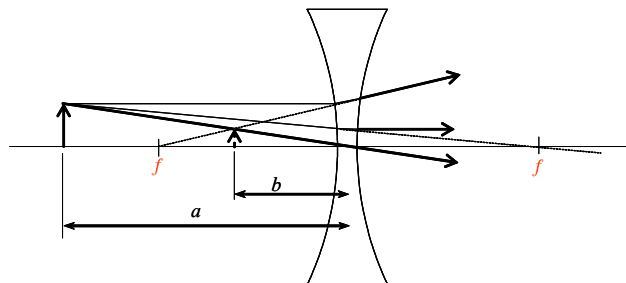
볼록렌즈 (convex lens)



$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

그림 6.4 볼록렌즈의 굴절

오목렌즈 (concave lens)



$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

그림 6.5 오목렌즈의 굴절

*** 광학식 측정방법에서 사용되는 렌즈가 갖는 오차**

spherical aberration (구면수차); 근축광선은 가깝게 외곽의 광선은 멀게 초점이 다르게 맺힘
coma (혜성형 수차); 빛이 렌즈 면에 수직이 아니고 비스듬히 입사될 때 (물체가 근축위에 있지 않을 경우) 상에 꼬리가 생김

astigmatism (비점수차);

field curvature (상의 곡률);

distortion (왜곡):

pin cushion distortion 오목 일그러짐,

barrel distortion 배럴 디스토션 볼록 일그러짐

chromatic aberration (색수차);

Seidel aberrations:

aberration 수차 收差

단색광의 경우 구면수차, 코마(coma), 비점수차(非點收差), 상의 곡률, 일그러짐의 5가지가 있다. 거울이 아닌 렌즈의 경우 단색광이 아닌 빛에서는 색수차가 포함된다.

(2) 횡파의 보강 간섭과 상쇄 (소멸) 간섭 (interference)

두 개의 파동이 겹쳐질 때 세기가 커지거나 감소하는 현상

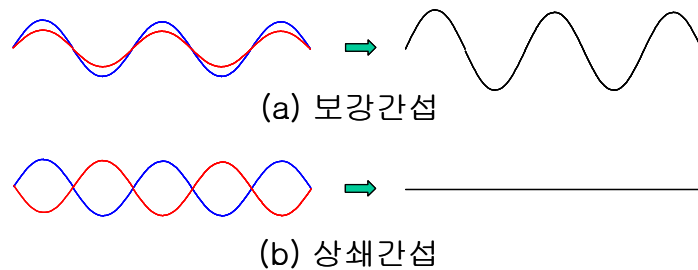


그림 6.6 파동의 간섭

(3) 회절 (diffraction)

파동이 장애물 넘어 장애물 뒤쪽에도 전파되는 현상.

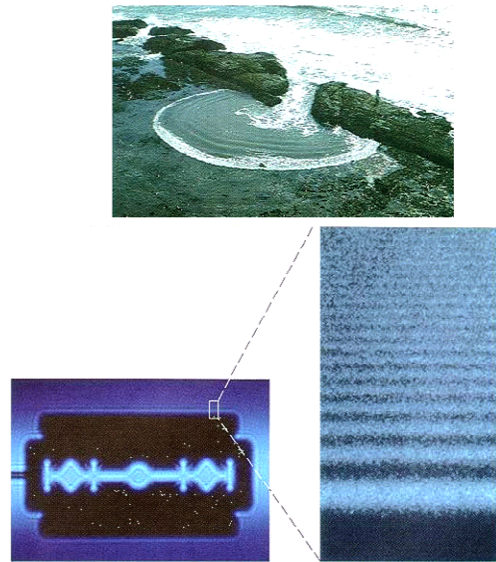
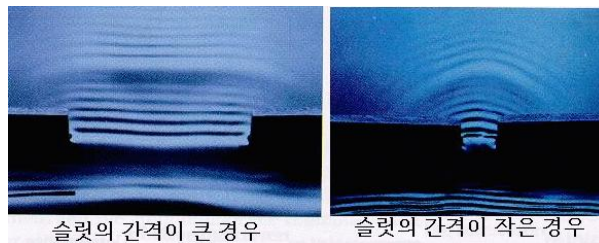


그림 6.7 회절

(a) 수면파가 진행하다가 장애물을 만나면 수면파의 가장자리에서 파면이 휘는 것을 볼 수 있다.

(b) 예리한 면도날의 구멍을 통과한 레이저 빛의 그림자에서 나타나는 회절무늬.

회절은 슬릿이나 구멍에서만 관측되는 것이 아니라 모든 그림자에서 볼 수 있다. 가장 뚜렷한 그림자라도 그 가장자리에서 희미하게 흐려져 있음을 볼 수 있다.



슬릿의 간격이 큰 경우

슬릿의 간격이 작은 경우

그림 6.8 파동의 회절은 슬릿의 폭과 파장에 따라 달라짐

- 파동의 회절은 슬릿의 폭과 파장에 따라 달라진다.
- 파장이 짧을 때보다는 파장이 긴 경우 회절은 잘 일어난다.

* Young의 이중 슬릿 - Young's Double Slit

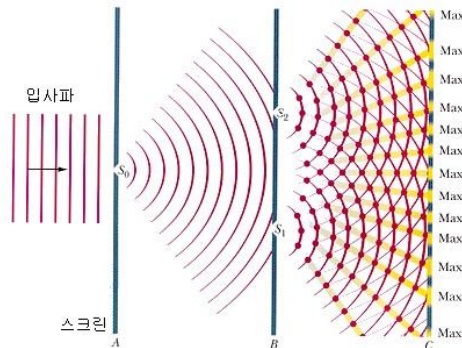


그림 6.9 Young의 간섭 실험

스크린 A의 작은 구멍 S_0 에서 회절된 빛이 스크린 B에 있는 작은 구멍 S_1 과 S_2 를 지나게 된다. 두 개의 작은 구멍을 지난 빛이 스크린 B와 C사이에서 중첩되어 스크린 C에 간섭무늬를 만든다.

(4) 편광

회파의 경우, 방향이 진행방향에 수직인 진동방향은 2차원 면 위에 놓여 있을 수 있어 서로 수직인 두 성분으로 분해할 수 있다. 공간의 한 지점에서의 파는 그 평면상에서 같은 진동수로의 규칙적인 행동을 보이는데 그 양식을 파의 편광상태라 한다.

특히 빛의 경우는 전기장과 자기장 중, 물질에 더 큰 영향을 주는 전기장의 진동하는 방향을 편광방향이라 한다. 빛은 짧은 길이의 무수히 많은 파동줄기(wave train)가 모여서 형성된 것이므로 하나하나의 편광상태가 어떻게 집합되어 있는가를 고려해야 하므로 통계적인 처리가 필요하다.

한 줄기의 빛은 근본적으로 흑체복사나 전자의 전이에 의해 방출되므로 지속시간동안은 조화파의 모습을 하고 있고, 주로 편광방향이 변하지 않는 선형편광의 상태로 있다.

빛은 물질과 반응하여 편광상태가 바뀔 수 있다.

- 편광의 종류

앞에서 보인 두 가지 파동은 그 진동방향이 변하지 않으므로 선형편광이라 한다. 전기장이 x 방향으로 진동하는 경우를 x 선형편광, y 방향 진동의 경우 y 선형편광이라 한다.

한편 이 x, y 선형편광을 적절히 조합하면 임의의 방향의 선형편광이나, 원형편광도 만들어 낼 수 있다.

- 자연광과 편광 되지 않은 빛

우리의 주위의 광원은 그 광원의 수많은 원자들이 원자를 이루는 전자의 배치가 바뀌면서 빛을 내게 된다. 이 경우 원자들은 무질서한 상태에 있으면서 빛을 내기 때문에 각각의 빛의 줄기는 제멋대로의 선형편광과 원형편광이 어우러져 있다. 또한 원자가 내는 빛의 줄기의 길이도 수 cm 정도에 불과하고, 또한 지속시간도 10⁻⁸초 미만이 된다.

이렇게 완전하게 제멋대로의 편광상태의 빛의 집단을 편광되지 않은 빛(무편광광 : unpolarized light)라고 한다.

그러나 광원에 따라 발광원자가 어떤 질서를 이룰 수도 있어 특별한 편광의 빛이 약간 포함되어 있거나 100%일 수 있다. 편광 되지 않은 빛과 특별한 편광상태가 혼합된 편광을 부분편광의 빛(partially polarized light)라고 한다.

6.3 파동의 간섭을 이용한 측정 I

1) 단색광과 광학평판 (Optical flats)의 응용

- 단색광 (Monochromatic light)
(참고문헌 1; 표 11.2, 11.3)

- 광학 평판

Flatness

1st surface: $\lambda/20$, 2nd surface: $\lambda/2$

Diameter

25.0 ~ 100 mm

Thickness

6.0 ~ 19 mm

Material

Pyrex, Fused Silica

마이크로미터, 블록게이지등과 같이 비교적 작고, 정밀도가 높은 것
평행평면판(수정, 유리) - 측정면에 겹쳐서 이면을 통하여 빛이 반사되게 함

(1) 치수 비교를 위한 광학 평판과 단색광의 이용

두개의 이웃하는 간섭무늬의 행로차: $\lambda/2$

간섭무늬의 세기분포: sinusoidal

간섭무늬의 중심의 위치 측정 정밀도: $\lambda/10$

air wedge

작업물 표면은 반사되는 것

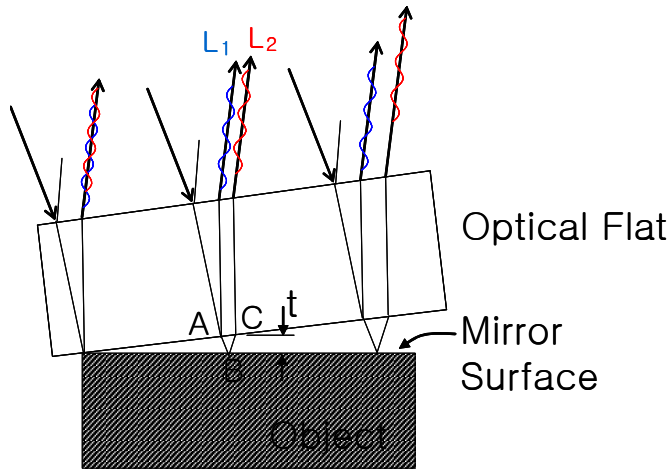
점, 선 접촉

내면반사; 입사파와 반사파의 위상차; 0

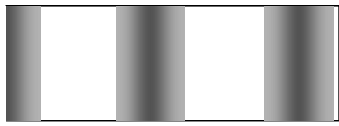
외면반사; 입사파와 반사파의 위상차; $\frac{\lambda}{2}$

그림 6.10에서 광학평판을 물체의 경면위에 놓았을 경우, 그 사이의 공기층에 의하여 간섭무늬가 관찰됨.

내면 반사된 빔 L_1 과 외면 반사된 빔 L_2 의 광경로차;

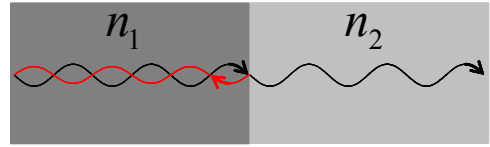


(a) side view

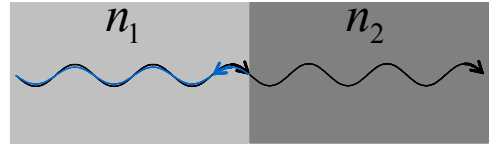


(b) top view

그림 6.10 광학평판을 사용할 경우 간섭무늬 발생원리



(a) internal reflection $n_1 > n_2$



(a) external reflection $n_1 < n_2$

그림 6.11 내면반사와 외면 반사의 차이

$$L_2 - L_1 = (\overline{AB} + \overline{BC}) + \frac{\lambda}{2}$$

$$= 2t + \frac{\lambda}{2}$$

그러므로 $2t$ 가 λ 의 정수배이면 상쇄간섭이 발생한다.

(2) 피조 (Fizeau) 간섭계

기본적인 구조는 등고도 무늬 간섭계의 원리를 이용한 것이며, 간섭에 관여하는 두 면이 다 같이 이상적인 평판일 경우에는 직선형 무늬들을 얻을 수 있으며 각 어두운 띠들 사이의 높이 차이는 반파장인 것이 이 간섭계의 특징이라 할 수 있다. 피조 간섭계는 그림 6.12와 같은 배치를 하게 된다.

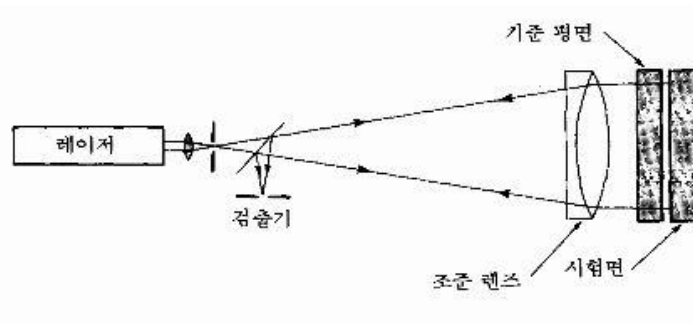


그림 6.12 상용 Fizeau 간섭계

Newton ring 간섭계도 이와 유사한 용도로 사용할 수 있는데, 이 경우에는 시료가 이상적인 평판일 경우 밖으로 갈수록 간격이 좁아지는 동심원 모양의 고리 무늬가 얻어진다. 이것도 시험용 렌즈가 오목인가 볼록인가를 무늬만으로 판정할 수 없는 단점이 있다

만약, 이상적인 평면일 경우에는 그림 6.12 (a)와 같이 평행인 무늬가 나타난다. 그러나 이들 면 중 하나에 요철이 있는 경우 그림 6.13 (b)와 같은 형태의 무늬가 얻어진다. 이 그림에서도 두 간섭 면의 열린 방향을 알 수 없으면 요철의 방향을 판단할 수 없기 때문에 약간의 추가 정보가 필요하게 된다. 그림 6.13 (b)에서는 켜기형 공간의 열린 방향이 오른쪽으로 주어져 있기 때문에 무늬가 흰 부분은 사이 간격이 더 늘어난 곳, 즉 함몰 부분이 됨을 알 수 있다.

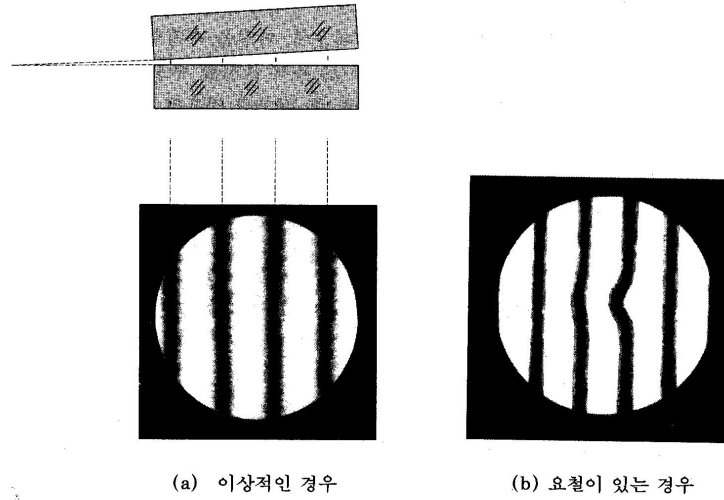


그림 6.13 Fizeau 간섭계의 간섭무늬

6.4 파동의 간섭을 이용한 측정 II

1) 레이저를 이용한 변위/거리 측정

(1) 레이저의 특성

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

레이저는 일반적으로 높은 시간적 가간섭성을 갖는다.

레이저는 그 종류마다 여러 가지 특성이 있지만, 3가지의 기본적이고 공통적인 특징이 있다.

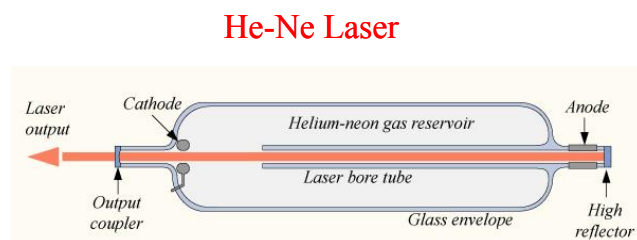
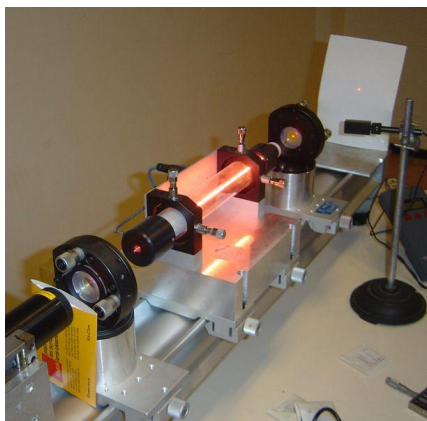
- highly monochromatic (단색성)
- coherence (가간섭성)
- highly directional (직진성)

* Coherence (가간섭성)

파장이 시간적 또는 공간적으로 잘 변하지 않는 성질.

- spatial coherence (공간적 가간섭성)
Young의 이중 슬릿
- temporal coherence (시간적 가간섭성)
Michelson interferometer

(2) He-Ne 레이저



He:Ne = 5:1 ~ 20:1 ratio
50 Pa per cm of cavity length

그림 6.14 He-Ne Laser

2) 간섭계 (Interferometer)

(1) Fringe counting interferometer

Michelson interferometer

Albert A. Michelson (1852-1931)

두 거울 사이의 광행로차가 $\lambda/2$ 의 짝수배; 보강
홀수배; 상쇄

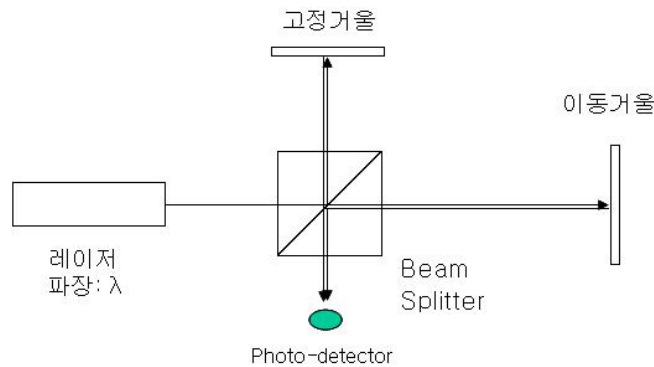


그림 6.15 Michelson interferometer의 구성도

거울의 이동거리; δ

$$2\delta = N\lambda$$

N; Fringe 의 count 수

(2) 양방향 두 주파수 레이저를 이용한 간섭계

맥놀이 현상과 도플러 효과를 이용함.

Zeeman Laser Interferometer

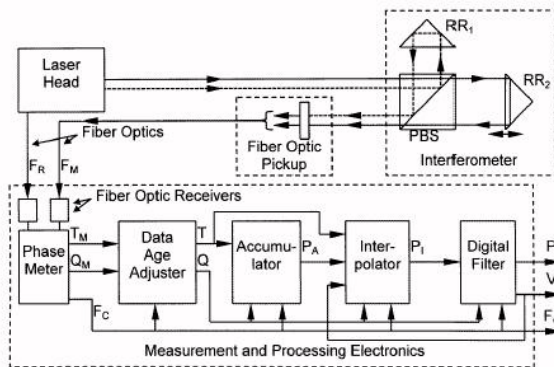
대표적인 예로서 그림 6.15에 보였으며, 이를 이용하여 설명하면 다음과 같다.

- ① 두 주파수 레이저에서 f_1 , f_2 의 레이저를 발진시키고, 이 광속의 일부를 광파이버 리시버2 에서 맥놀이 신호 $f_1 - f_2$ 를 검출함.
- ② 두 주파수레이저 빔을 PBS에서 f_2 는 반사시켜 Retroreflector (corner cube) RR1에 의하여 반사되게 하고, f_1 은 PBS에서 통과시켜, 이동하는 Retroreflector RR2에서 반사되게 한다. 이때 도플러 효과에 의하여 $f_1 + \Delta f_1$ 으로 주파수가 바뀐다. 이 빛을 다시 PBS에서 f_2 와 합쳐서 광파이버 리시버 1에서 맥놀이 신호 $f_1 + \Delta f_1 - f_2$ 를 검출함.
- ③ 앞의 검출된 ①과 ②에서 검출된 신호를 비교하여 Δf_1 을 검출함.

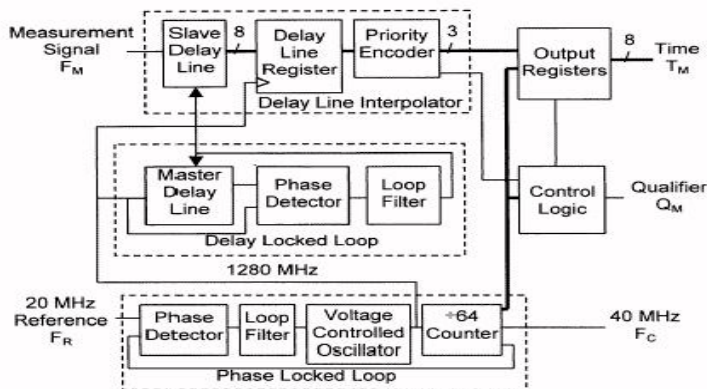
Coner cube C1이 이동한 거리 S는

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^t v dt \\
 &= \int_0^t \frac{c}{f_1} \Delta f_1 dt \\
 &= \lambda_1 \int_0^t \Delta f_1 dt
 \end{aligned}$$

* 상용 변위측정용 레이저 interferometer의 예



(a) Zygo Laser 구성품 (b) Zygo Laser 체계도



(c) 신호처리 구성도 (d) 신호처리보드

그림 6.15 Zygo Laser interferometer ZMI 2000

ZMI 2000 System Performance

	4 Pass PMI*	2 Pass PMI	1 Pass LI**
Position Resolution	$\lambda/4096$ (0.15 nm)	$\lambda/2048$ (0.31 nm)	$\lambda/1024$ (0.62 nm)
Position Range	± 5.3 m	± 10.6 m	± 21.2 m
Velocity Limit	1.05 m/s	2.1 m/s	4.2 m/s
Maximum Acceleration	980 m/s ² , (100 g)		

ZMI 2000 System Laser Head

Type	HeNe, cw, two frequency
Power Minimum / Typical	425 μ W / 600 μ W
Lifetime	>50,000 hrs, 18 month warranty
Frequency split	20 MHz \pm 1600 Hz
Vacuum Wavelength Accuracy	\pm 0.1 ppm (lifetime)
Vacuum Wavelength Stability	\pm 0.01 ppm (24 hrs)
Reference Signal	Fiber Optic

* 참고사항

i) 맥놀이 현상

주파수 혼성 간섭법의 원리

두개의 간섭파가 서로 다른 주파수를 갖고 있을 때

$$A_1(t) = a_1 \exp(-i\omega_1 t)$$

$$A_2(t) = a_2 \exp(-i(\omega_2 t + \phi))$$

중첩된 빛; $A = A_1 + A_2$

검출기의 발생전류;

$$I = A \cdot A^*$$

$$= \{a_1 \cos(\omega_1 t) + a_2 \cos(\omega_2 t + \phi) - i[a_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \sin(\omega_2 t + \phi)]\} \cdot \\ \{a_1 \cos(\omega_1 t) + a_2 \cos(\omega_2 t + \phi) + i[a_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \sin(\omega_2 t + \phi)]\} \\ = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 [\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t + \phi) + \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t + \phi)]$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \phi]$$

따라서 한 지점에서의 신호의 세기가 $f_2 - f_1$ 의 차이로 sinusoidal로 변화

고정검출기와 스캐닝 검출기 사용

고정검출기로 지정된 위치에서 신호 검출, 스캐닝 검출기를 이동시키면서 신호를 검출하여, 고정된 검출기의 신호와 비교

ii) Doppler 효과

빛을 움직이는 물체에 입사시켰을 때, 반사되어 나오는 빛의 주파수 f'

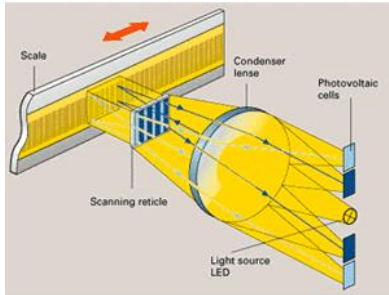
$$f' = f \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}} \\ \simeq f (1 + \frac{v}{c})$$

$$\Delta f \simeq \frac{v}{c} f$$

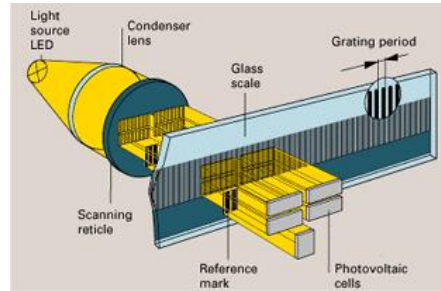
6.5 파동의 간섭을 이용한 측정 III

광 회절을 이용한 변위 측정
참고; Young의 이중 슬릿 실험

예) 리니어 엔코더



(a)



(b)

그림 6.16 Linear Encoder

제 7 장 Scanning Probe Microscope (SPM)

7.1 개요

SPM은 Scanning Probe Microscope의 약자로서 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 새로운 개념의 현미경을 총칭하는 말이다. 우리나라에서는 원자현미경이라고 한다. 원자는 너무 작아서(0.1-0.5 nm) 아무리 좋은 현미경로도 볼 수 없다는 기존의 통념을 깨뜨린 원자현미경은 제1세대인 광학현미경과 제2세대인 전자현미경 다음의 제3세대 현미경으로 자리 잡아가고 있다. 광학현미경의 배율이 최고 수천 배, 전자현미경(SEM)의 배율이 최고 수십 만 배인데 비해 원자현미경의 배율은 최고 수천만 배로서, 개개의 원자를 관찰할 수 있다. 투과식 전자 현미경인 TEM도 수평방향의 분해능은 원자단위이나 수직 방향의 분해능은 훨씬 떨어져 개개의 원자를 관찰할 수는 없다. 원자현미경의 수직방향의 분해능은 수평 방향보다 더욱 좋아서 원자지름의 수십분의 일(0.01nm)까지도 측정해낼 수 있다.

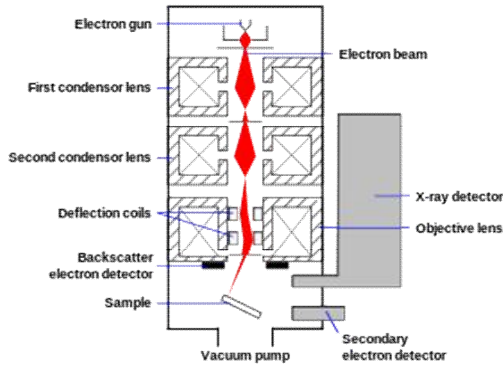
SPM에는 원자현미경 계열 중 처음으로 등장한 STM (Scanning Tunneling Microscope), 반도체 시료의 측정을 가능케 한 AFM (Atomic Force Microscope), 물질의 형상이외에 다른 특성들을 측정할 수 있는 MFM (Magnetic Force Microscope), LFM (lateral Force Microscope), FMM (Force Modulation Microscope), EFM (Electrostatic Force Microscope), SCM(Scanning Capacitance Microscope) 그리고 EC-SPM (Electrochemistry SPM)등이 있다. 이러한 원자현미경 외에도 물질의 광학적 특성을 빛의 파장 보다 훨씬 작은 분해능(~50nm)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.

현재 원자현미경은 주로 연구용과 산업용 분석, 측정기기로 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. 특히 미국 SIA (Semiconductor Industry Association)에서 발행하는 National Technology Roadmap에 발표되어 있듯이 반도체 산업에서는 원자현미경을 차세대 정밀 계측 장비로 인정하기에 이르렀다. 원자현미경은 진공 상태나 대기 중 뿐만 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 나노리소그래피(Nanolithography;사진묘사), 나노머시닝 (Nanomachining;절삭), 나아가 분자의 합성 등의 연구에 사용되고 있다.

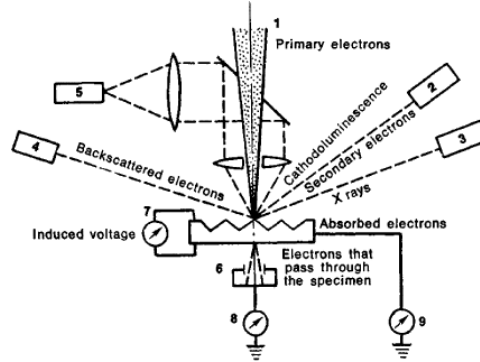
7.2 SEM (Scanning Electron Microscope)

* 참고: Wikipedia, the free encyclopedia

전자를 고전압으로 가속하여 시편 위에 충돌시켜서 시편의 형태 및 성분을 분석하는 기기



Schematic of an SEM



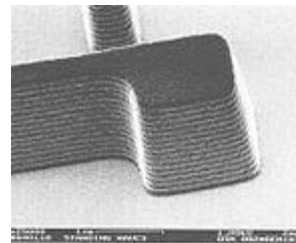
검출 부분

Backscattered electrons detector: PIN diode 또는 scintillator detector (형광물질)
 Secondary electrons detector: Evehart-Thornley (E-T) Detector (형광물질, PMT)
 X-ray detector: silicon or germanium doped with lithium: Si(Li) or Ge(Li)
 Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS, EDX, or XEDS),
 물질 원소 분석

배율: $x10 \sim x500,000$ 이상 ($x250$ 광학현미경)

SEM 이미지 예

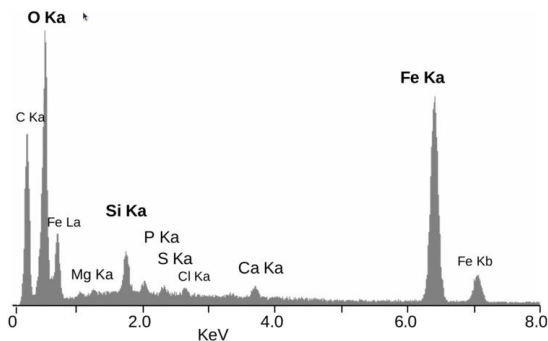
Secondary electrons detector이용
 평면: 어둡게
 경사진 면: 밝게



SEM image of a photoresist layer (field emission SEM)

성분 분석 예

X-ray detector 이용



심해새우 껍질의 성분 분포

7.3 AFM (Atomic Force Microscope)

1) AFM의 기본원리

van der Waals force (or van der Waals interaction)에 기초하여 측정함.

(네덜란드 (Dutch)과학자 “Johannes Diderik van der Waals”)

판데르발스 힘은 원자, 분자, 그리고 표면간의 인력을 포함한다.

판데르발스 힘이 근처의 입자에 의한 편극에 의해 발생되기 때문에 전자의 공유에 의한 공유결합이나 전자의 과부족에 의한 이온결합과는 다르다.

분자간 힘은 네 가지 주요 원인이 있다. 대개 분자간 위치 에너지는 서로 가까이 다가가면 작용하여 분자의 붕괴를 막는 반발 성분과 세 가지 요인으로 이루어진 인력 성분을 갖는다.

1. 전하(이온의 경우), 쌍극자(반전 중심이 없는 분자의 경우), 사중극자(입방체보다 대칭성이 떨어지는 모든 분자), 그리고 일반적으로 영구적 다중극 간의 정전기적 상호작용. 정전기적 상호작용은 가끔 윌렘 헨드릭 키슈의 이름을 따서 키슈 상호작용 혹은 키슈 힘이라 불린다.
2. 인력의 두 번째 원인은 한 분자의 영구적 다중극과 다른 분자의 유도된 다중극 간의 상호작용인 분극화현상이다. 이 상호작용은 피터 J.W. 디바이의 이름을 딴 디바이라는 단위로 측정되기도 한다.
3. 세 번째 인력은 그것을 분산력이라 불렀던 프리츠 런던의 이름을 따서 런던 힘(London force)이라 붙여졌다. 이것은 무극성 원자에서만 보여지는 인력이지만 대칭성에 상관 없이 어떤 분자 간에도 작용한다.

AFM에 의하여 측정되는 힘들;

mechanical contact force, van der Waals forces, capillary forces, chemical bonding, electrostatic forces, magnetic forces (see magnetic force microscope, MFM), Casimir forces, solvation forces, etc.

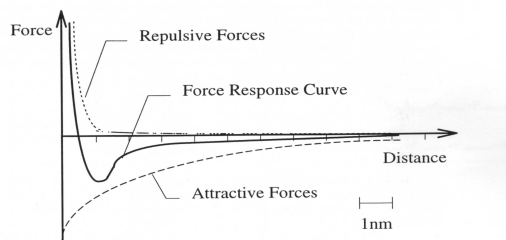
In AFM, a tip (most commonly made of silicon or silicon nitride (Si_3N_4) approaches the sample to within interatomic distances (approximately 10 Å). The tip (3-15 microns in length) is mounted at the end of a spring cantilever (approximately 100-500 microns in length).

The spring constant (between 0.10-0.34 N/m for Contact-Mode Silicon tips) of such a tip is less than the equivalent spring between atoms of the samples. As the tip is rastered across the sample, it fluctuates with respect to the surface features of the sample.

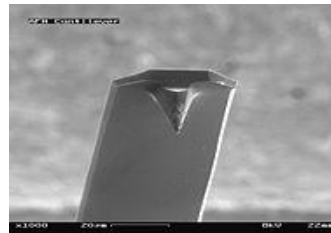
As the atoms of the tip and sample are brought together they initially weakly attract each other. This attractive force increases until the interacting atoms are so close that their electron clouds begin to repel one another electrostatically. This electrostatic repulsion continues to weaken the attractive force as the separation distance decreases. The attractive force goes to zero (i.e., approaches the limit of zero) when the distance

comes within the length of a chemical bond (a few Angstroms). Once the total Van der Waals forces (repulsive forces) are positive, the atoms are in contact.

Notice that the slope of the Van der Waals forces curve is quite steep in the contact region. As a result, the van der Waals forces dominate almost any other force that attempts to push the atoms closer together. Thus, in AFM, the cantilever bends when it pushes the tip against the samples surface, rather than probing it further into the sample



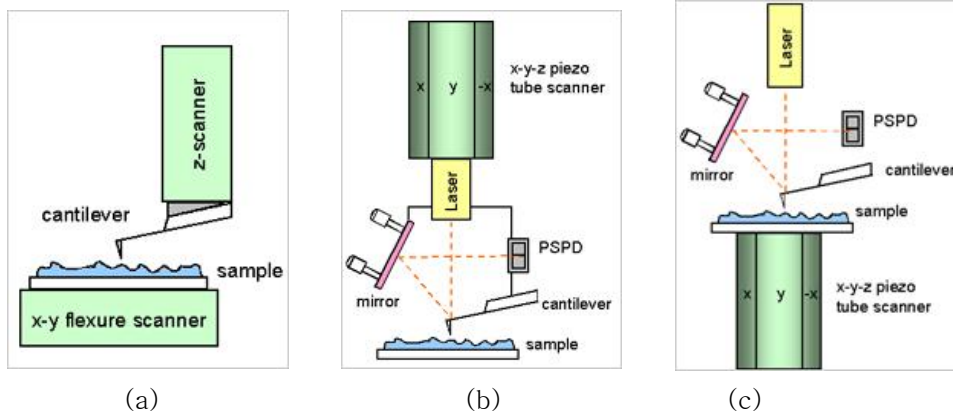
Displacement - Force relation



AFM cantilever tip image
(width ~100 micrometers.)

* 참고: WIKIPEDIA (The Tree Encyclopedia)

2) AFM 의 구성 및 동작



3) 측정 예

NC-AFM image of STI patterns on a 6 inch photomask taken with an XE-150 (5×5μm scan, 70nm z range). 3-D rendering of un-processed raw data. The AFM probe traced both upper and lower terraces faithfully and almost imaged the side walls.



AFM 측정 이미지 예