

## 제 7 장 초정밀 변위 측정

\* 참조: 참고문헌 (5, 6, 7) \*

### 7.1 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

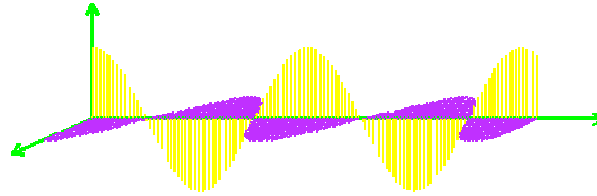
Beam modulation ; 장거리 측정  
Pulse echo ; 장거리 측정

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

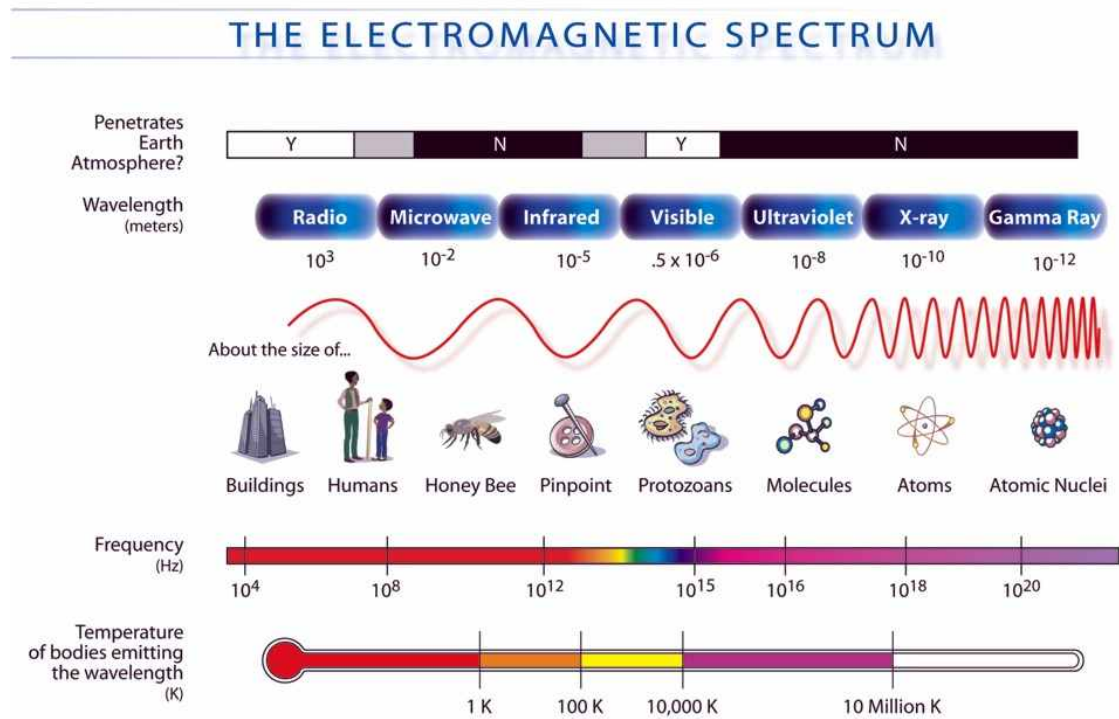
## 7.2 광학 일반

### 1) 전자기파

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



빛의 전파

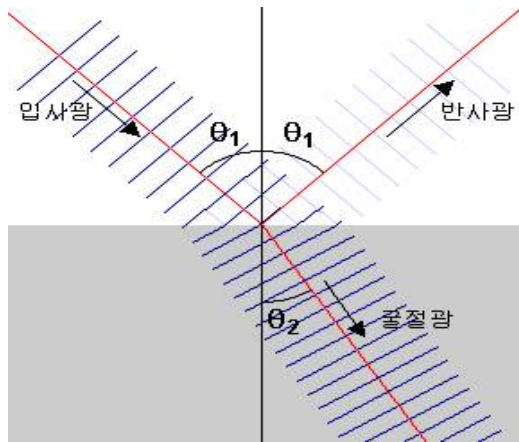


전자기파 스펙트럼

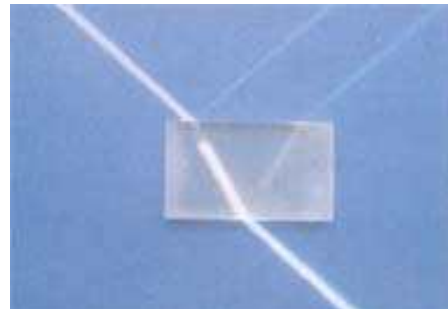
## 2) 빛의 성질

### (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)

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

입사각  $\theta_1$ , 반사각  $\theta_1'$ , 굴절각  $\theta_2$  등은 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.

여러 매질의 굴절률

매질	매질 굴절률 <sup>a</sup>	매질	매질 굴절률 <sup>a</sup>
진공	1.00	보통유리	1.52
공기(STP) <sup>b</sup>	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

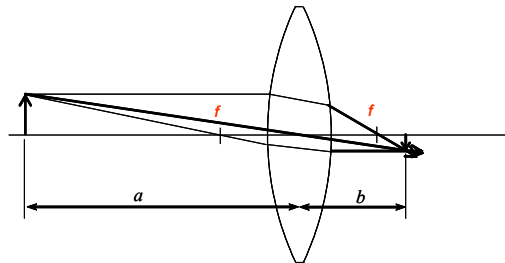
- 진공에서는 굴절률이 1.0으로 정의되어 있고 공기 중에서는 1에 매우 가깝다. (많은 경우 근사적으로 1을 쓰기도 한다.) 어떤 물질도 1보다 작은 값을 가지지 못한다.

- 파장에 짧은 빛이 파장이 긴 빛보다 굴절률이 크다.

\* lens 의 굴절

(thin lens)

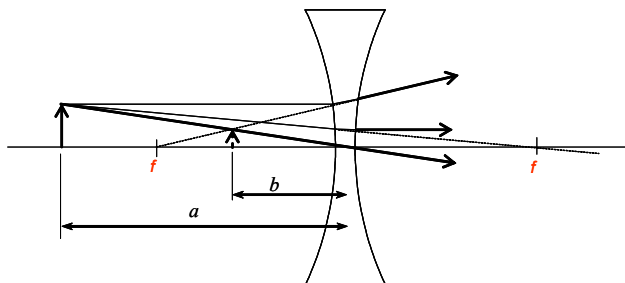
볼록렌즈 (convex lens)



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

볼록렌즈의 굴절

오목렌즈 (concave lens)



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

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):

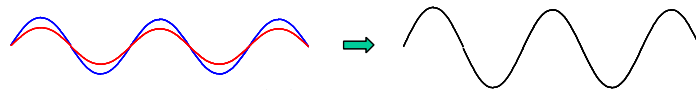
Seidel aberrations:

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



(a) 보강간섭

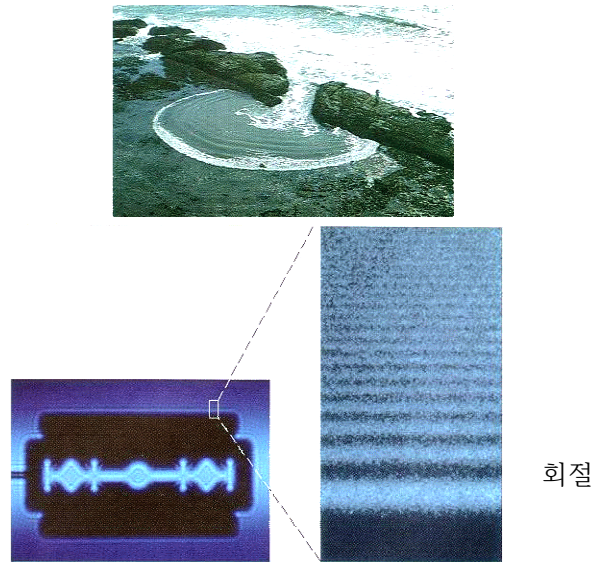


(b) 상쇄간섭

파동의 간섭

(3) 회절 (diffraction)

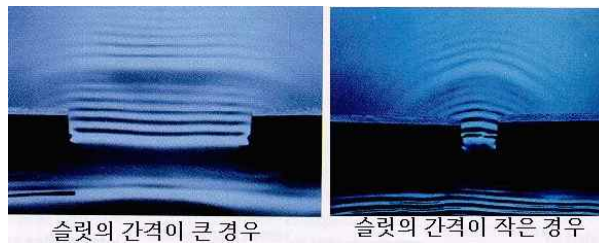
파동이 장애물 넘어 장애물 뒤쪽에도 전파되는 현상.



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

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

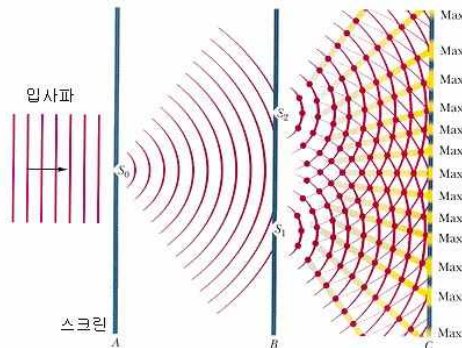
회절은 슬릿이나 구멍에서만 관측되는 것이 아니라 모든 그림자에서 볼 수 있다. 가장 뚜렷한 그림자라도 그 가장자리에서 희미하게 흐려져 있음을 볼 수 있다.



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



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

횡파의 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 편광 방향이라 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 cm정도에 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.

### 7.3 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, 블록케이지등과 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

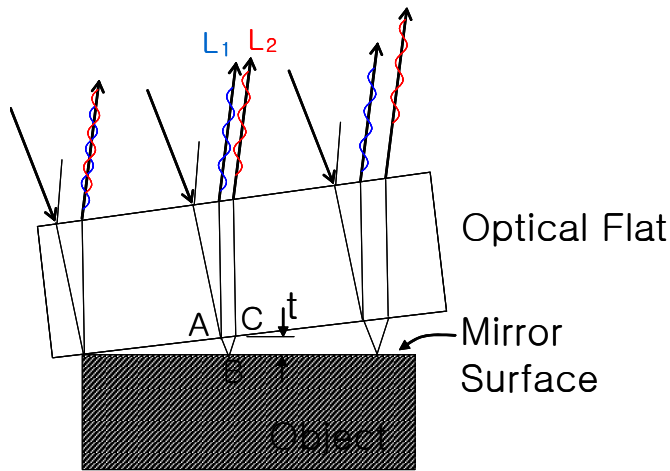
내면반사; 입사파와 반사파의 위상차: 0

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

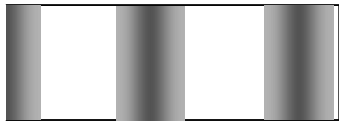
그림 6.10에서 광학평판을 물체의 경면위에 놓았을 경우, 그 사이의 공기층에 의하여 간섭무늬가 관찰됨.

내면 반사된 빔  $L_1$  과 외면 반사된 빔  $L_2$  의 광경로차;





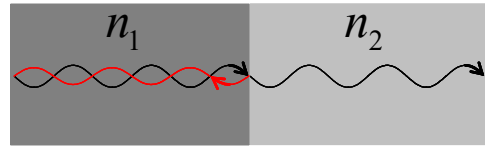
(a) side view



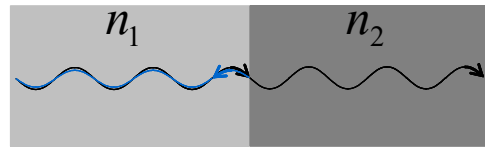
(b) top view

N=0                  N=1                  N=2

광학평판을 사용할 경우 간섭무늬 발생원리



(a) internal reflection  
 $n_1 > n_2$



(a) external reflection  
 $n_1 < n_2$

내면반사와 외면 반사의 차이

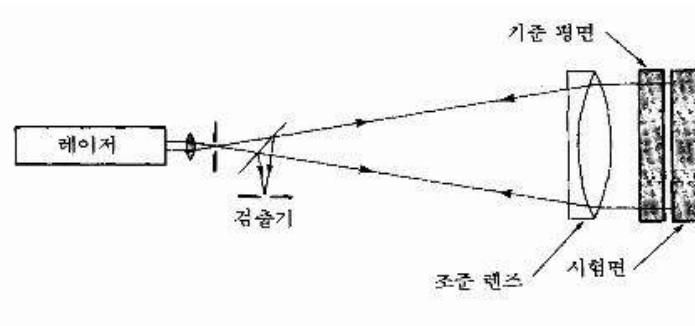
$$L_2 - L_1 = (\overline{AB} + \overline{BC}) + \frac{\lambda}{2}$$

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

그러므로  $2t$  가  $\lambda$  의 정수배이면 상쇄간섭이 발생한다.

## (2) 피조 (Fizeau) 간섭계

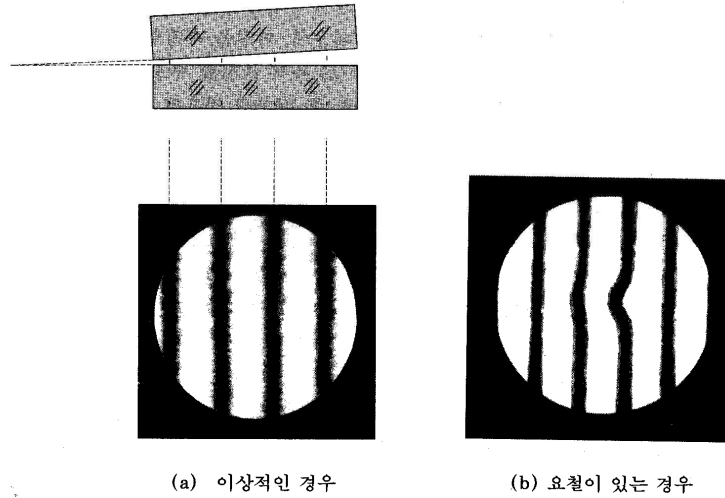
기본적인 구조는 등고도 무늬 간섭계의 원리를 이용한 것이며, 간섭에 관여하는 두 면이 다 같이 이상적인 평판일 경우에는 직선형 무늬들을 얻을 수 있으며 각 어두운 띠들 사이의 높이 차이는 반 파장인 것이 이 간섭계의 특징이라 할 수 있다. 피조 간섭계는 그림 6.12와 같은 배치를 하게 된다.



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 썩기형 공간의 열린 방향이 오른쪽으로 주어져 있기 때문에 무늬가 흰 부분은 사이 간격이 더 늘어난 곳, 즉 함몰 부분이 됨을 알 수 있다.



(a) 이상적인 경우

(b) 요철이 있는 경우

### Fizeau 간섭계의 간섭무늬

## 7.4 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.

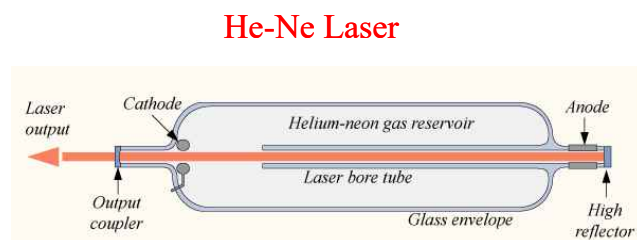
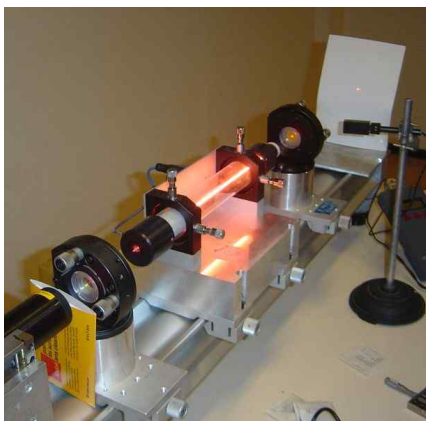
- highly monochromatic (단색성)
- coherence (가간섭성)
- highly directional (직진성)

#### \* 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**

He-Ne Laser

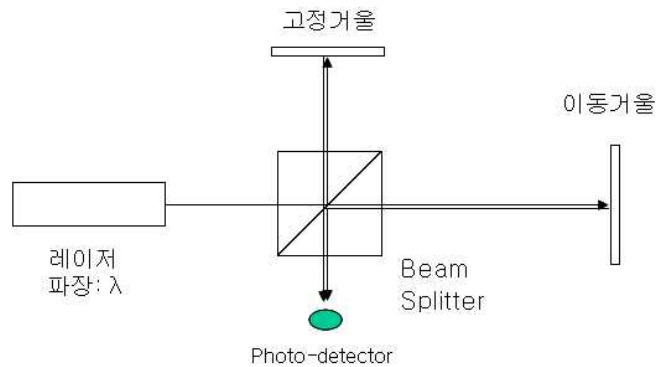
## 2) 간섭계 (Interferometer)

### (1) Fringe counting interferometer

Michelson interferometer

Albert A. Michelson (1852-1931)

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



Michelson interferometer의 구성도

거울의 이동거리:  $\delta$

$$2\delta = N\lambda$$

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.

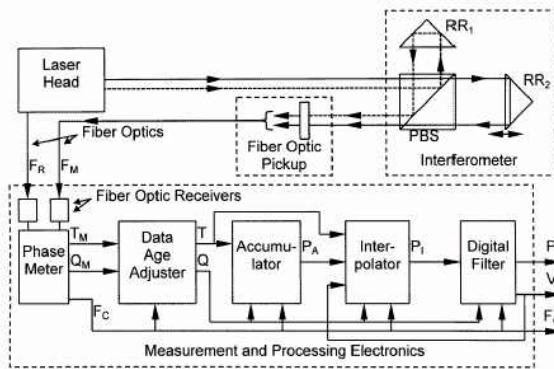
② 두 주파수레이저 빔을 PBS에서  $f_2$ 는 반사시켜 Retroreflector (coner cube) RR1에 의하여 반사되게 하고,  $f_1$  은 PBS에서 통과시켜, 이동하는 Retroreflector RR2에서 반사되게 한다. 이때 도플러 효과에 의하여  $f_1 + \Delta f_1$ 으로 주파수가 바뀐다. 이 빛을 다시 PBS에서  $f_2$ 와 합쳐서 광파이버 리시버 1에서 맥놀이 신호  $f_1 + \Delta f_1 - f_2$ 를 검출함.

③ 앞의 검출된 ①과 ②에서 검출된 신호를 비교하여  $\Delta f_1$ 을 검출함.

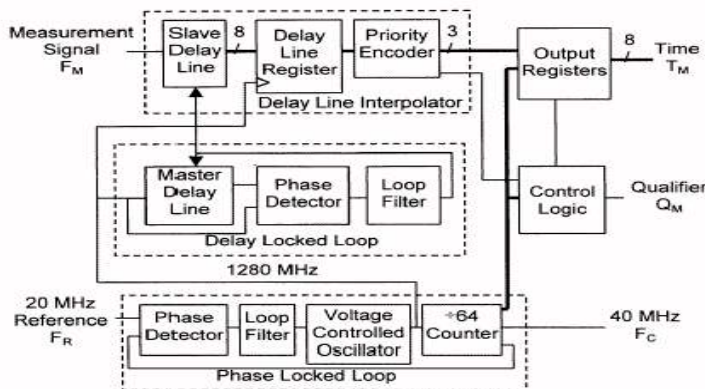
Coner cube C1이 이동한 거리 S는

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

\* 상용 변위측정용 레이저 interferometer의 예



(a) Zygo Laser 구성품 (b) Zygo Laser 체계도



(c) 신호처리 구성도 (d) 신호처리보드  
Zygo Laser interferometer ZMI 2000

### ZMI 2000 System Performance

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

## ZMI 2000 System Laser Head

Type	HeNe, cw, two frequency
Power Minimum / Typical	425 $\mu$ W / 600 $\mu$ W
	Will support up to 8 axes
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

$$A_1(t) = a_1 \exp(-i w_1 t)$$

$$A_2(t) = a_2 \exp(-i(w_2 t + \phi))$$

중첩된 빛:  $A = A_1 + A_2$

검출기의 발생전류;

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

$$= \{a_1 \cos(w_1 t) + a_2 \cos(w_2 t + \phi) - i[a_1 \sin(w_1 t) + a_2 \sin(w_2 t + \phi)]\} \cdot \\ \{a_1 \cos(w_1 t) + a_2 \cos(w_2 t + \phi) + i[a_1 \sin(w_1 t) + a_2 \sin(w_2 t + \phi)]\}$$

$$= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 [\cos(w_1 t) \cos(w_2 t + \phi) + \sin(w_1 t) \sin(w_2 t + \phi)]$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(w_2 - w_1)t + \phi]$$

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  $f'$

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

$$\simeq f (1 + \frac{v}{c})$$

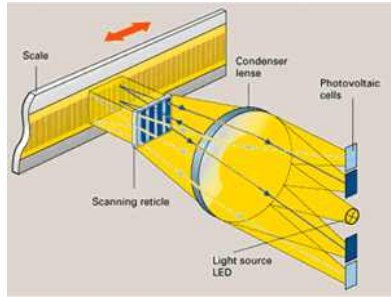
$$\Delta f \simeq \frac{v}{c} f$$

### 7.5 파동의 간섭을 이용한 측정 III

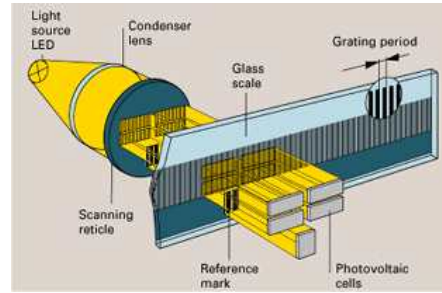
광 회절을 이용한 변위 측정

참고: Young의 이중 슬릿 실험

예) 리니어 엔코더



(a)



(b)

Linear Encoder