

# 레이저 간섭계와 X-선 간섭계의 원리 및 응용

엄 천 일

한국표준과학연구원 길이연구실



● 1957년생.  
●  $\gamma$ -선 분광학을 전공 하였으며, 초정밀 측정 분야 특히, X-선을 이용한 정밀 측정 분야에 관심을 가지고 있다.

## 1. 머리말

간섭계를 이용하는 측정방법은 길이나 변위의 측정, 광학 부품이나 광학계의 검사, 표면 형상이나 거칠기의 측정 등에 널리 사용되어 왔다. 이러한 간섭법(interferometry)의 장점은 무엇보다 측정이 빛의 파장을 단위로 하여 이루어진다는 데 있으며, 따라서 측정의 분해능이 높다는 것이다. 일반적으로 빛의 파장의 몇분의 일에 해당되는 분해능은 쉽게 얻을 수 있다.

간섭법은 결국 두 파면(wave front) 사이의 광행로차(optical path difference)를 측정하는 것인데, 광행로차는 변위에 의해서 또는 파면이 이상적 파면으로부터 벗어난 정도에 의해서 주어질 수 있다. 간섭계에서의 측정결과는 간섭 무늬(interference pattern)로 나타난다. 변위 측정의 경우에는 간섭 무늬를 해석할 필요 없이 단지 간섭 무늬상의 한 점을 지나는 무늬의 개수를 세면 되지만, 다른 경우에는 간섭 무늬에 대한 해석이 필요하게 되어 좀더 복잡해지게 된다. 간섭 무늬를 이루고 있는 각각의 무늬(fringe)는 행로차(또는 위상차)가 같은 선(contour)을 나타내는데, 두 개의 이웃하는 무늬 사이의 행로차는 보통  $\lambda/2$ 이며 간섭 무늬의 세기 분포는 사인곡선적(sinusoidal)이다. 간섭 무늬의 중심 위치를 알면 광행로차 지도

(optical path difference map)를 얻을 수 있는데 이러한 방법을 간섭 무늬 간섭법(fringe interferometry)이라고 한다. 간섭 무늬의 중심을 찾는다는 대략  $\lambda/10$  정도의 오차가 수반된다. 따라서 간섭 무늬 간섭법에서 광행로차 지도의 정확도는 대략  $\lambda/10$  정도로 제한되게 된다.

정밀 측정용 간섭계의 광원으로는 레이저가 가장 널리 쓰이고 있다. 그러나 나노미터 이하의 짧은 길이를 높은 정확도로 측정하기 위해서는 더욱 짧은 파장의 광원이 요구되기도 한다. 이러한 요구를 충족시키는 것이 바로 X-선 간섭계이다. 이 글에서는 레이저 간섭계와 X-선 간섭계에 대하여 간략하게 서술하고자 한다.

## 2. 레이저 간섭계

레이저를 이용하여 길이를 측정하는 방법에는 간섭계를 이용한 방법(interferometry), 선속 변조(beam modulation) 방법, 펄스 메아리(pulse echo) 방법 등이 있다. 후자의 두 방법은 주로 장거리 측정에 이용되고 있으며 정확도에 있어 간섭계 방법보다 떨어진다. 표 1에 각 방법의 특성이 비교되어 있다. 간섭계 방법은 변위를 검출하는 방식에 따라 간섭무늬 헤아림 방법(fringe counting interferometer), 편광을 이용한 간섭무늬 헤아림 방법(polariza-

표 1 레이저를 이용한 길이 측정 방법

	레이저	측정범위	정확도	응용
간섭법	He-Ne, CO <sub>2</sub>	~100m	10 <sup>-7</sup> ~10 <sup>-8</sup>	정밀 길이 측정
선속변조법	He-Ne, GaAs	100m~50km	10 <sup>-6</sup>	측지학
펄스메아리법	Q-switched Nd-glass, CO <sub>2</sub>	10km~	10 <sup>-6</sup>	군사, 천문 (인공위성, 달)

tion interferometer), 주파수 혼성 간섭법(heterodyne interferometry) 등으로 나눌 수 있다.

## 2.1 간섭무늬 헤아림 방법의 레이저 간섭계

그림 1은 기본적인 마이켈슨 간섭계(Michelson interferometer)로서 단색광을 광속분할기(beam splitter)에 의하여 둘로 분리시켜 입사광의 반은 움직이는 거울로 가게 하고 나머지 반은 고정된 거울로 가게 한다. 두 거울에서 반사된 빛은 다시 광속분할기에서 합쳐져 간섭이 일어나게 된다. 움직이는 거울이 단색광의 반파장만큼 쉼 움직일 때 전체 광행로차는 한 파장이 변하게 되므로  $2\pi$ 만큼 위상차가 생기게 된다. 즉, 두 거울 사이의 광행로차가 반파장( $\lambda/2$ )의 짝수 배이면 보강간섭이 일어나지만 광행로차가 반 파장의 홀수 배이면 간섭광이 상쇄되어 어두운 무늬가 나타나게 된다. 거울이 반 파장씩 움직이는 것과 간섭무늬의 명암이 변하는 주기가 일치하므로 이 주기를 계수하면 거울이 움직인 거리를 측정할 수 있게 된다.

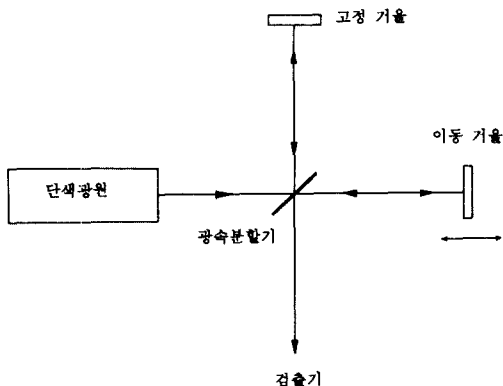
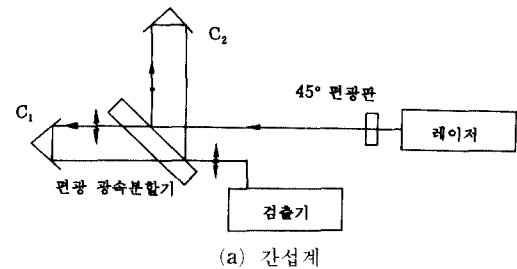


그림 1 기본적인 마이켈슨 간섭계

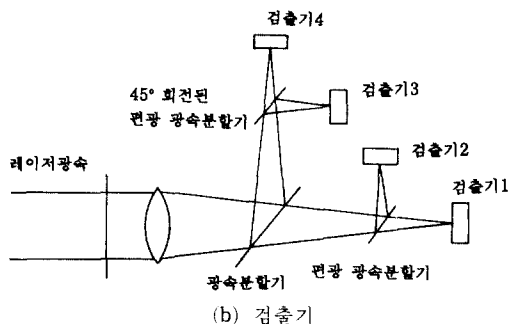
이 방법은 레이저가 개발되기 이전부터 알려져 있었으나 레이저가 아닌 광원을 사용할 경우 간섭성 길이가 수 mm에서 1m 정도에 불과하였다. 한편, 레이저를 이용할 경우 간섭성 길이는 수십 m에 이른다. 이 방식은 비교적 장치의 제작이 간단하다는 장점이 있는 반면 간섭무늬를 얻기 위하여는 두 거울의 축조정이 필요하며, 거울이 움직일 때 심한 회전운동을 하면 간섭무늬의 헤아림이 불가능하게 된다는 단점이 있다. 따라서 특정한 길이 측정장치에 고정시켜 사용하고자 할 때 이 방식이 편리하다.

## 2.2 편광 레이저 간섭계

편광 간섭계는 Dyson에 의해 처음 개발되어



(a) 간섭계



(b) 검출기

그림 2 편광 간섭계

250mm 길이의 회절격자 제작장치에 적용되었으며 현재 다양한 형태의 편광 간섭계가 연구 보고되어 있다. 그림 2에는 전형적인 편광 간섭계의 개략도가 나타나 있으며, 마이켈슨 간섭계와 동일한 광학계를 형성하고 있다.

레이저에서 발진된 빛은 수직방향에 대하여 45° 회전된 편광판에 의해 수직, 수평의 두 선형 편광으로 분리된 후, 편광 광속분할기에서 수평 편광의 광속은 반사되고 수직 편광의 광속은 통과되어 각각 코너큐브 C<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>에서 반사된다. 이 두 광속은 편광 광속분할기에서 다시 합쳐져서 검출기로 들어간다. 두 광속은 서로 다른 행로를 거치기 때문에 위상차가 발생되는데 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>까지의 거리를 d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>라 하면 위상차는 2(d<sub>1</sub>-d<sub>2</sub>)/λ가 된다.

검출기의 입사되는 두 광속, 즉 두 편광 성분  $\vec{A}_1, \vec{A}_2$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{A}_1 = \hat{y} a_1 \cos (wt - 2kd_1 + \phi) \quad (1)$$

$$\vec{A}_2 = \hat{x} a_2 \cos (wt - 2kd_2 + \phi) \quad (2)$$

여기서,  $\hat{x}$ 과  $\hat{y}$ 는 단위 벡터이고,  $w$ 는 주파수,  $k$ 는 파수(wave number),  $\phi$ 는 위상을 나타낸다.

만일  $a_1 = a_2 \equiv a$ 라면, 두 편광 성분의 합  $\vec{A}$ 는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \vec{A} &= \vec{A}_1 + \vec{A}_2 \\ &= a \{ \hat{y} \cos (wt - 2kd_1 + \phi) \\ &\quad + \hat{x} \cos (wt - 2ki_2 + \phi) \} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 해석해 보면, 검출기에 입사되는 빛이 위상차에 따라 λ/2의 주기로 선형편광, 타원편광, 원형편광으로 변한다는 것을 알 수 있다. 따라서 검출기에 입사된 빛의 편광성을 알면 d<sub>1</sub>-d<sub>2</sub>가 λ/2의 정수배보다 얼마나 더 큰가를 알 수 있는 것이다.

$$d_1 - d_2 = n \cdot \lambda / 2 + f) \quad (4)$$

검출기 앞에 λ/4판(quarter-wave plate)을 놓으면 이 λ/4판을 통과한 빛은 모두 선형 편광이 된다. 이 때 λ/4판의 이상 광축(extraordinary axis)으로부터 얼마만큼 회전된 선형

편광이 되어 나오느냐 하는 것은 d<sub>1</sub>-d<sub>2</sub>에 달려 있다. 즉, 위상차가 λ/2만큼 변하면 편광 상태는 180° 변하게 된다. 따라서 λ/4 판 뒤에 편광판을 놓으면, 이 편광판을 통과한 빛의 세기는 λ/2의 주기를 갖는 사인파(sine wave)가 된다. 이 사인파를 계수하면 코너큐브의 이동량이 λ/2의 몇 배인가를 측정할 수 있는 것이다.

### 2.3 주파수 혼성 간섭법(Hetrodyne Interferometry)

#### (1) 주파수 혼성 간섭법의 원리

두 개의 간섭파가 서로 다른 주파수를 가지고 있을 때 주파수 혼성 간섭법을 적용할 수 있다. 이러한 두 파를 A<sub>1</sub>(t), A<sub>2</sub>(t)라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_1(t) = a_1 \exp(-iw_1t) \quad (5)$$

$$A_2(t) = a_2 \exp[-i(w_2t + \phi)] \quad (6)$$

여기서,  $\phi$ 는 위상차,  $w_1 = 2\pi f_1$ 과  $w_2 = 2\pi f_2$ 는 각주파수,  $a_1$ 과  $a_2$ 는 진폭, 그리고  $f_1$ 과  $f_2$ 는 주파수를 나타낸다. 두 파를 중첩시키면 식 (7)이 된다.

$$A(t) = A_1(t) + A_2(t) \quad (7)$$

그리고 검출기에는 전기장이 발생된다. 검출기의 출력은 전류로 나타나고, 이 전류는 다음 식과 같이 주어지는 세기  $I = A(t) \cdot A(t)^*$ 에 비례한다.

$$\begin{aligned} I(t) &= \frac{1}{2} a_1^2 + \frac{1}{2} a_2^2 + \frac{1}{2} [a_1^2 \cos (2w_1t) \\ &\quad + a_2^2 \cos (2w_2t + \phi)] + a_1 a_2 \cos \\ &\quad [(w_1 + w_2)t + \phi] + a_1 a_2 \cos \\ &\quad [(w_2 - w_1)t + \phi] \end{aligned} \quad (8)$$

윗 식 우변의 세째 항과 네째 항은, 실제 검출기로 검출되기에는 너무 높은 주파수 성분인 2w<sub>1</sub>, 2w<sub>2</sub>, 그리고 w<sub>1</sub>+w<sub>2</sub>에 대응하므로, 검출기의 출력은 식 (9)에 비례하게 된다.

$$I(t) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \phi] \quad (9)$$

여기서, 처음 두 항은 상수로서 각각 한 광속의 세기를 나타낸다. 세째 항은 각주파수  $\omega_2 - \omega_1$ 을 가지는 전기적 신호를 나타내는데,  $\omega_2 - \omega_1$ 에 해당되는 주파수 차이  $f_2 - f_1$ 은 보통 MHz 영역에 있게 된다. 따라서 주파수가  $10^{14}$  Hz인 광파의 위상  $\phi$ 에 대한 정보가 이제는  $10^6$  Hz 정도의 전기적 신호 속에 포함되어 있다는 사실을 알 수 있다. 이 전기 신호의 위상 즉, 두 간섭파 사이의 위상차는 적절한 기준 신호의 위상과 비교함으로써 직접 측정할 수 있다.

주파수 혼성 간섭법에서 간섭 무늬는 실제로 관측되지는 않으며, 단지 어떤 한 점에서의 신호의 세기가  $f_2 - f_1$ 의 주파수로 사인곡선적으로 변하는 것이다. 신호 세기의 이러한 변동은 사람의 눈으로는 관측되지 않지만 적절한 검출기를 사용한다면 검출할 수 있는 것이다. 한 점에서 검출기 신호의 위상은 광파의 위상  $\phi$ 와 같게 된다. 광행로차 지도나 위상 지도를 얻기 위하여는 두 개의 검출기가 사용되는데 간섭 무늬상에 있는 고정된 검출기로부터의 신호가 기준 신호로 사용된다. 스캐닝 검출기는 간섭 무늬를 훑으면서 검출되는 신호의 영점 교차 시간(zero crossing time)을 기준 신호의 그것과 비교하여 그 점에서의 위상을 알 수 있게 해준다. 스캐닝이 완료되면, 측정 데이터가 컴퓨터에서 분석되어 광행로차 지도를 비롯한 여러 정보를 얻게 되는 것이다.

## (2) 도플러 효과를 이용한 이동 적분 방법의 레이저 간섭계

빛을 움직이는 물체에 입사시켰을 때 반사되어 나오는 빛의 주파수  $f'$ 는 입사된 빛의 주파수  $f$ 와 차이가 있다. 이러한 주파수의 변화(frequency shift)는 움직이는 물체의 이동 속도에 따라 다르게 나타나는데 이러한 현상을 도플러 효과(Doppler effect)라고 한다. 이때 달라진 주파수  $f'$ 는 식 (10)으로 표현된다.

$$f' = f \frac{1 + \frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (10)$$

여기서,  $c$ 는 광속도,  $v$ 는 움직이는 물체의 속도이다.  $v$ 의 부호는 광원과 물체 사이가 가까워지면 플러스(+)가 되고, 그 반대이면 마이너스(-)가 된다. 따라서 주파수의 변화를 측정할 수 있으면 물체의 이동속도를 얻을 수 있다.

식 (5)에서  $v$ 가  $c$ 에 비해 아주 작다면  $f'$ 는 대략 식 (11)과 같이 되어 주파수 변화  $\Delta f$ 는 식 (12)와 같이 된다.

$$f' \approx f \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (11)$$

$$\Delta f \approx \frac{v}{c} f \quad (12)$$

그림 3은 상용화된 이동적분 방법의 지만 레이저(Zeeman laser) 간섭계의 개략도를 나타낸 그림이다. 이 간섭계에는 물체의 이동 방향을 판별하기 위하여 두 주파수 출력을 갖는 지만 레이저가 사용되었다.

레이저에서 발진된, 서로 직교하도록 선형편광된, 두 주파수( $f_1, f_2$ ) 광속의 일부를 광속분할기 BS<sub>1</sub>으로 반사시켜 광소자(photo diode) D<sub>1</sub>으로 두 주파수 차이( $f_1 - f_2$ )인 맥놀이 신호(beat signal)를 검출한다. 이 때 검출된 신호는 주파수 계수기 FC<sub>1</sub>에 의해 계수된다. 한편

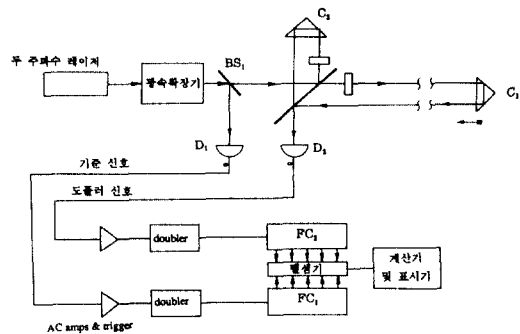


그림 3 이동적분 방법의 지만 레이저(Zeeman laser) 간섭계

광속분할기  $BS_1$ 을 통과한 광속은 편광 광속분할기 PBS에서 두 성분으로 분리되며  $f_2$ 의 성분은 반사되어 코너큐브  $C_2$ 에 입사되고  $f_1$ 의 성분은 통과되어 코너큐브  $C_1$ 에 입사된다. 두 코너큐브에서 반사된 빛은 다시 편광 광속분할기 PBS에서 합쳐져서 광소자  $D_2$ 에 의해 검출된다. 이때 코너큐브  $C_1$ 을 속도  $v$ 로 이동시키면 여기에서 반사된 빛은  $f_1 + \Delta f_1$ 으로 변조되기 때문에 광소자  $D_2$ 에서는 맥놀이 주파수  $f_1 - f_2 + \Delta f_1$ 이 검출된다. 이 신호는 다시 주파수 계수기  $FC_2$ 에 의해 계수된 후 기준신호와 비교되어  $\Delta f_1$ 이 구하여 진다. 코너큐브  $C_1$ 이 움직인 거리  $S$ 는 식 (13)과 같으므로 식 (14)가 된다.

$$S = \int_0^t v dt \quad (13)$$

$$S = \int_0^t \frac{c}{f_1} \Delta f_1 dt = \lambda_1 \int_0^t \Delta f_1 dt \quad (14)$$

따라서 펄셈기에서  $\Delta f$ 를 일정한 시간 동안 계수하여 적분한 다음 대기중의 파장  $\lambda_1$ 을 곱하여 코너큐브  $C_1$ 이 이동한 길이를 구하게 된다. 이 방법을 거울의 축조정을 쉽게 할 수 있고, 측정할 수 있는 코너큐브  $C_1$ 의 이동속도 범위가 상당히 넓은 장점이 있는 반면 광원으로 사용하는 레이저를 다만 안정화시켜야 하는 어려움이 있다. 또한 맥놀이 신호를 계수하여 이동 길이를 구하기 위한 전자장치가 복잡하고 일정 시간 동안 맥놀이 신호를 계수한 후 코너큐브가 이동한 길이를 계산하기 때문에 길이 측정에 있어 시간지연이 발생하게 된다. 따라서 이러한 간섭계는 빠른 속도로 이동하는 공

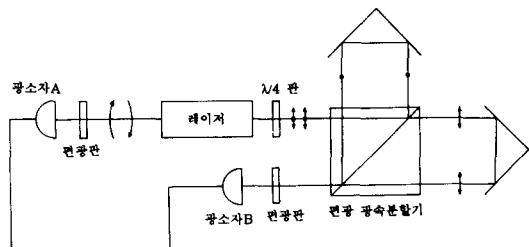


그림 4 두 주파수 레이저를 이용한 주파수 혼성 간섭계

작기계의 동적인 위치제어를 하는데는 적합하지 않다.

(3) 두 주파수 레이저를 이용한 간섭계

그림 4는 두 주파수 레이저를 이용한 주파수 혼성 간섭계의 구성을 나타낸 그림이다. 다만 안정화된 He-Ne 레이저의 뒷거울에서 발진된 두 원형 편광성분  $f_1, f_2$ 는 편광판에서 혼합되어 광소자 A에서 두 성분의 맥놀이 신호인  $f_1 - f_2$ 가 검출되어 기준 신호로 사용된다. 이 기준 신호의 세기는 다음 식으로 표현된다.

$$I_r(t) = \frac{1}{2} a_{r1}^2 + \frac{1}{2} a_{r2}^2 + a_{r1} a_{r2} [\cos(2\pi \Delta f t)] \quad (15)$$

여기서,  $\Delta f$ 는  $|f_1 - f_2|$ 이다. 한편 앞거울에서 나온 빛은  $\lambda/4$ 판을 통과하면서 수직·수평의 두 편광성분으로 바뀌어 편광 광속분할기에서 수직의 성분은 반사되고 수평의 성분은 통과된 후 각각 코너큐브를 거쳐 다시 편광 광속분할기에서 혼합되어 편광판을 지나 광소자 B에서

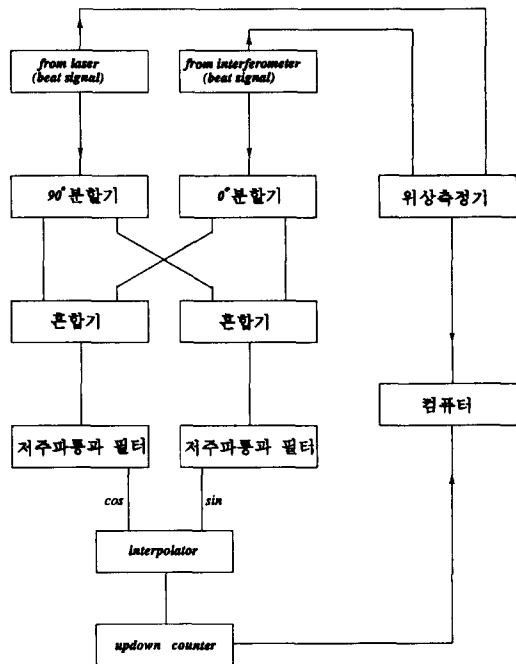


그림 5 간섭계의 신호 처리계

맥놀이 신호가 검출되는데 그 신호의 세기는 다음 식으로 표현된다.

$$I_m(t) = \frac{1}{2}a_{m1}^2 + \frac{1}{2}a_{m2}^2 + a_{m1}a_{m2}[\cos(2\pi\Delta ft) \cos \delta - \sin(2\pi\Delta ft) \sin \delta] \quad (16)$$

여기서,  $\delta$ 는 위상차로  $2\pi|l_1 - l_2|/\lambda$ 이며,  $l_1$ 과  $l_2$ 는 간섭계에서의 두 광행로이다. 따라서  $\delta$ 의 변화를 누적하면 두 코너큐브의 상대적인 변화를 알 수 있다. 즉, 식 (16)에서  $\sin \delta$ 의 신호를 계수하면 이동 코너큐브의 움직임을 파악할 수 있는데 이 경우 코너큐브가 한 방향으로 움직여야 한다. 따라서 이동 코너큐브의 움직임 방향과 관계없이 계수하기 위해서는  $\cos \delta$ 의 신호가 필요한데 이것은 그림 5와 같은 신호처리계를 이용하면 얻을 수 있다.

레이저 자체의 맥놀이 신호인 기준신호(A)는  $90^\circ$  분할기(divider)에 입력되고 간섭계에서 검출된 맥놀이 신호(B)는  $0^\circ$  분할기에 각각 입력되어 네 신호로 분리된다. 고주파신호인  $\cos(2\pi\Delta ft)$ 와  $\sin(2\pi\Delta ft)$ 는 혼합기(mixer)와 저주파통과 필터(low pass filter)에 의하여 제거되어 다음과 같은 신호를 얻게 된다.

$$\begin{aligned} X &= A \cos \delta \\ Y &= A' \sin \delta \end{aligned} \quad (17)$$

이  $\sin \delta$ ,  $\cos \delta$ 신호는 인터플레이터를 통과한 후 앞 다운 카운터에 입력되어 코너큐브의 이동거리를 계수하게 된다. 일반적으로 앞 다운 카운터는 사인, 코사인 신호를  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  혹은  $360^\circ$  간격으로 나누어 읽을 수 있다. 따라서 그림 4의 간섭계에서 이동 코너큐브가  $\lambda/2$ 만큼 움직일 때마다  $\sin \delta$ 가 한 주기씩 변하기 때문에  $\lambda/8$ ,  $\lambda/4$ , 혹은  $\lambda/2$ 만큼 움직일 때마다  $\sin \delta$ 가 한 주기씩 변하기 때문에  $\lambda/8$ ,  $\lambda/4$ , 혹은  $\lambda/2$  씩 앞 다운 카운터에서 계수할 수 있다. 그림 5의 신호처리계에는 측정 분해능을 높이기 위하여 저주파통과 필터와 앞 다운 카운터 사이에 인터플레이터를 삽입하였다. 그러나 인터플레이터를 이용하는 분해능 향상 방법은 전자적으로 처리하는 방법이기 때문에 입력신호

에 잡음이 내포되었을 경우 계수에 오차가 발생된다. 이런 문제를 감소시키고 분해능을 향상시키는 방법으로서  $I_r$ 과  $I_m$  두 신호의 위상차  $\delta$ 를 위상측정기(phase meter)로 측정하는 방법이 있다. 즉  $I_r$ 의 교류항은  $\cos(2\pi\Delta ft)$ 이고  $I_m$ 의 교류항은  $\cos(2\pi\Delta ft + \delta)$ 가 되므로 후자의 신호에  $\delta$ 만큼 위상 지연이 생긴다. 따라서 초기의 위상차  $\delta$ 를 측정하고, 후의 위상차  $\delta'$ 를 측정한다. 이 경우 총 광행로차  $L$ 은 식 (18)이 된다.

$$L = \frac{\lambda}{4} \left[ N + \frac{\delta' - \delta}{2\pi} \right] \quad (18)$$

여기서,  $N$ 은 앞 다운 카운터에서  $\lambda/4$  씩 계수한 값이다.

### 3. X-선 간섭계

광학 간섭계의 역사는 백년이 훨씬 넘었으나, X-선 간섭계는 레이저의 개발보다 5년이나 늦은 1965년에 Bense와 Hart<sup>(1)</sup>에 의하여 처음 알려지게 되었다. 이렇게 늦은 이유는 X-선의 파장이  $10 \text{ \AA}$  이하인 관계로 굴절률이 거의 1에 가까워 X-선용 렌즈를 제작할 수 없었기 때문이다. 또 다른 문제는  $\mu\text{m}$  단위가 아닌  $\text{\AA}$  단위의 안정도가 유지되어야 한다는 것이었다. 그러나 반도체 산업의 발달과 더불어 실리콘, 게르마늄 등 고순도의 거의 완전한 결정체가 생산됨에 따라 X-선의 동역학적 회절을 이용한 X-선 간섭계가 등장하게 된 것이다.

나노미터 이하의 길이측정과 나노라디안의 각도측정이 오늘날 여러 분야에서 요구되고 있다. 이러한 측정을 위해서 여러 측정기기들이 개발되어 있지만, 이들 모두는 오차를 줄이기 위하여 별도의 교정절차를 필요로 한다. X-선 간섭법(X-ray interferometry)을 사용하면  $10 \mu\text{m}$  ( $10^{-12} \text{ m}$ )까지의 길이에 대하여 길이표준에 직접 소급될 수 있는 절대측정이 가능하다는 연구결과가 보고된 바 있다.<sup>(2)</sup> 일반적으로 X-선

간섭계는 X-선의 동역학적 회절이론(dynamical diffraction theory)<sup>(3)</sup>으로 설명이 되는데, 이는 복잡한 계산을 필요로 하기 때문에 이 글에서는 다루지 않기로 한다.

3.1 결정에 의한 X-선의 회절

X-선 측정법(X-ray metrology)은 거의 완전한 실리콘 결정에 의해서 일어나는 X-선의 회절현상에 그 기초를 두고 있다. X-선의 회절은 많은 수의 원자가 관여하는 탄성 산란현상이다. 결정 격자내의 원자들이 주기적으로 배열되어 있기 때문에 산란파들의 위상은 서로 관련되어 있다. 빛의 회절이론에서와 마찬가지로, 이웃하는 파면(wave front) 사이의 행로차가  $n\lambda$ ( $n$ 은 정수,  $\lambda$ 는 X-선 파장)일 때 보강 간섭이 일어나게 된다. 즉, Bragg의 법칙으로 일컬어지는 다음의 관계식 (19)가 만족되어야 한다.

$$n\lambda = 2d \sin \theta_B \quad (19)$$

여기서,  $d$ 는 격자면 사이의 거리,  $\theta_B$ 는 입사파와 반사면 사이의 각도를 나타낸다. 식 (19)에 나타나 있지는 않지만, X-선 회절현상을 X-선을 이용한 측정에 응용하는데 있어서 중

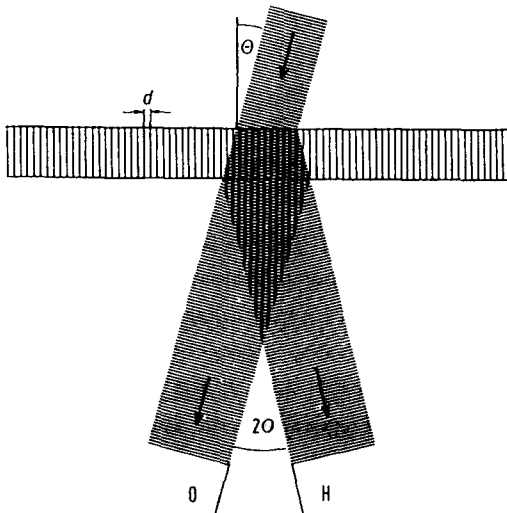


그림 6 단결정에 의한 X-선의 회절

요한 몇 가지 사항을 살펴보면 다음과 같다.

1) 결정 내부에 파동 벡터의 차이가 Bragg 반사면에 대응하는 역격자 벡터(reciprocal lattice vector)와 꼭 같은 두 개의 파가 존재하면, 정상파가 형성된다. 이 정상파의 주기(간격)와 방향은 회절면의 그것과 같다. 바로 이 정상파가 그림 6과 같이 X-선을 회절시키는데, 이로 인하여 작은 길이와 각도를 측정할 수 있는 간섭법이 가능하게 되는 것이다.

2) Bragg 반사곡선은 약 1" 정도의 각도폭을 가지고 있다. 높은 차수의 Bragg 반사를 이용하거나 짧은 파장의 X-선을 이용하면 폭을 더욱 줄일 수 있다. 특히 두 개의 결정을 이용한 실험(double-crystal arrangement)에서 얻어지는 X-선 반사곡선(rocking curve)은 파장에 따른 Bragg 각도나 X-선· $\gamma$ -선의 에너지를 극히 높은 분해능으로 측정하는데 매우 중요한 수단이 된다.

3) 순도가 아주 높은 단결정(single-crystal)에서 격자면 사이의 각도는 완전 결정에서의 각도와 거의 같다. 입방체의 한 면에 투영된 단위포 내의 원자들의 위치가 그림 7에 나타나

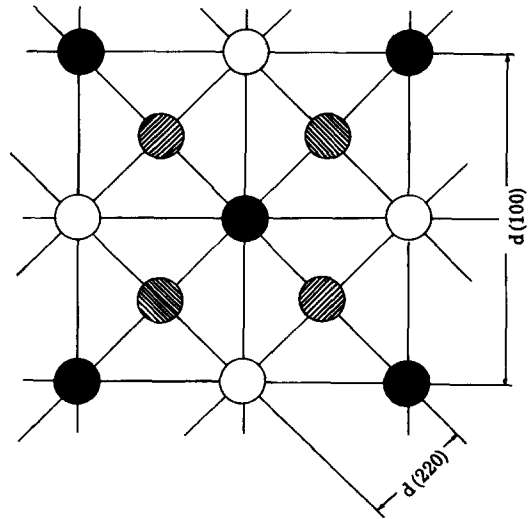


그림 7 실리콘 결정의 원자 배열.

\*세 종류의 명암은 밀면으로부터 원자들이 각기 다른 높이에 있음을 나타낸다.

있다. 실제의 실리콘 결정에서는, 불순물 원자들이 실리콘 원자의 위치에 있기도 하고, 또는 실리콘 원자 사이에 즉, 격자간에 위치하기도 하는데 이에 따라 원자 간의 거리가 약간 변하게 되지만, 이 변화량은 이상적인 결정의 경우와 비교하였을 때 거의 무시할 수 있을 정도이다.

### 3.2 간섭계의 X-선 광학

X-선 간섭계에는, 그림 8에 나타낸 것과 같이, 방향과 간격이 같은 세 개의 얇은 판 모양의 실리콘 결정이 사용된다. 처음 두 개는 고정되어 있고 세번째 판은 격자면에 대하여 수직 방향으로 움직일 수 있게 되어 있다. 단색의 X-선 선속(**beam**)은  $n\lambda = 2d \sin \theta_B$ 로 주어지는 Bragg 각으로 첫번째 결정(**splitter** 즉, 분할기라 부르고, S로 나타냄)에 입사한다. 결정의 두께를 올바르게 선택하면 단색의 입사 선속이 두 개의 회절 선속으로 갈라진다. 하나는 전방으로 진행하고 다른 하나는 회절된 방향(즉, 전방 선속과  $2\theta$  떨어진 방향)으로 진행한다. 이 두 선속들이 거울과 같은 작용을 하는 두번째 결정(**mirror** 즉, 거울이라 부르고, M으로 나타냄)에 의해 다시 회절되는데, 이때 원하지 않는 발산 선속들을 슬릿으로 차폐시키고 나면 나머지 두 선속들은 세번째 결정(**analyzer** 즉, 분석기라 부르고, A로 나타냄)에서 만나게 된다. 이 위치에서, 처음 두 결정에 의해 회절된 파들은 두 결정의 결정면 주기와 같은 주기를 가지면서 공간에 고정되어 있는 X-선 정상파(**standing X-ray wave field**)를 형성한다. 이 X-선 정상파의 배(**antinode**)가 세번째 결정의 전자장(**electron field**)의 배와 일치할 때(즉, 세 개의 결정면이 모두 다 정렬될 때) X-선은 강하게 회절된다. 이와 반대로, 한 장(**field**)의 배가 다른 장의 마디와 일치할 때 X-선은 약하게 회절된다. 세번째 결정이 격자면에 대하여 수직 방향으로 움직임에 따라 출력 X-선의 세기는 격자면과 같은 주기로 사인곡선적으로 진동하게 된

다. 다시 말해서, 결정이 격자간격  $d$ 만큼 움직일 때마다 X-선 간섭무늬가 하나씩 얻어지는 것이다. 여기서 X-선의 파장은 계산에 들어가지 않는데, 단지 발생하는 회절이 일어나도록 맞춰지면 된다. 따라서 우리는 결정면의 선택에 따라 약 0.2~0.3nm의 무늬 간격을 얻을 수 있을 뿐더러 훨씬 더 작은 값으로 간섭무늬 나누기를 할 수 있는 가능성을 지닌 측정 시스템을 가지게 되는 것이다.

이 측정 시스템에는 증분 엔코더(**incremental encoder**)나 Michelson 유형의 간섭계와 비슷한 점도 있지만, 여기에는 X-선 간섭무늬 나누기의 정밀·정확도를 보다 좋게 해주는 몇 가지 중요한 차이점이 있다.

- 간섭계를 제작할 때 생기는 대부분의 오차는 무늬의 대조(**contrast**)에만 영향을 미칠 뿐 사인곡선적 성질에는 영향을 미치지 않는다.
- X-선에 대한 모든 물질의 굴절률은 1에서  $10^{-6}$ 만큼밖에 벗어나지 않기 때문에 광학 간섭계의 정확도에 영향을 미치는 공기 굴절률의 변화 따위는 전혀 문제가 되지 않는다.
- X-선 세기는 상대적으로 낮은 10,000 counts/s 이하이다. 이 사실은 측정속도가 광학적 방법에서 만큼 빠르지는 않다는 것

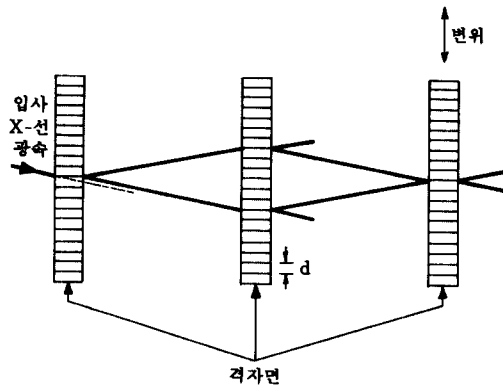


그림 8 X-선 간섭계에서 X-선의 행로



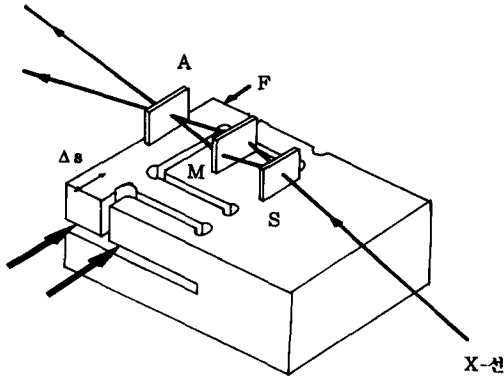


그림 9 미세이동장치와 간섭계가 하나의 실리콘 단결정으로 만들어진 X-선 스캐닝 간섭계

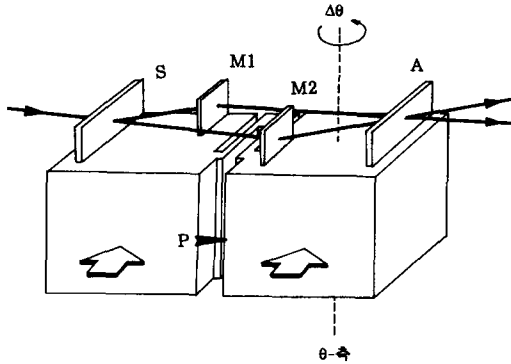


그림 10 X-선 각도 간섭계. P; 회전 구동력

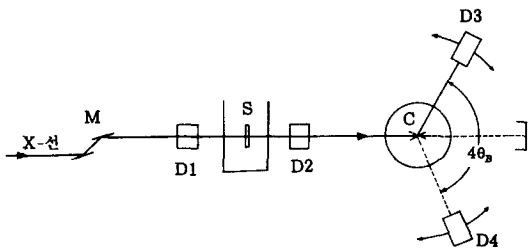


그림 11 X-선의 파장을 측정하기 위한 실험장치.  
\* M: 단색화장치, S: 표본, D1, D2, D3, D4: 검출기, C: 실리콘 결정

을 의미하기도 하지만, 한편으로는 검출기가 전류를 측정하지 않고 계수하는 것이기 때문에 본질적으로 측정이 선형적이라는 것을 의미한다.

측정에 있어서 유일하게 중요한 잡음원은 X-선 관으로부터 나오는 광자의 통계적 분포인데, 이는 Poisson 분포를 이루는 것으로 잘 알려져 있어 수학적으로 계산할 수 있다.

### 3.3 X-선 간섭계의 응용

X-선 간섭계는 격자상수 정밀측정, 나노미터 영역의 변환기(transducer)의 교정 및 특성조사, 레이저 간섭계의 교정, 초정밀 각도 측정, 격자상수의 비교, 단결정의 내부결함 연구, X-선 산란 인자 측정, X선 위상대조 현미경, X선 굴절률 측정 등의 여러 분야에 응용되고 있으며, X-선 간섭계에 쓰이는 여러 기법들은 중성자 간섭계를 만드는데 사용되기도 한다.

그림 9에는 미세이동장치와 간섭계가 하나의 실리콘 단결정으로 만들어진 X-선 스캐닝 간섭계(monolithic X-ray scanning interferometer)가 나타나 있다. 이 간섭계는 레이저 간섭계와 함께 사용되어 격자상수의 측정을 비롯한 여러 종류의 측정에 응용될 수 있다. 레이저 간섭계로부터의 레이저 광속을 짧은 화살표 위치에 맞추고 구동력 F에 의해 분석기 A에 변위  $\Delta s$ 를 발생시키면, X-선 신호와 함께 레이저 간섭계로부터 광학 신호를 얻게 되는데, 이 두 가지 신호를 사용하여 실리콘의 격자상수를 측정하는 것이다.

그림 10은 X-선 각도 간섭계의 한 예를 나타낸 그림인데, 이러한 종류의 간섭계를 사용하면 0.001" 정도의 미세 각도를 약  $10^{-7}$ 의 정확도로 측정할 수 있다. 또한 격자상수를 알고 있는 실리콘 결정을 사용하여 X-선의 파장을 측정할 수 있는데, 이를 위한 실험장치는 그림 11에 나타나 있다. 이외에도, X-선을 이용한 정밀 측정 기술은 실리콘 결정면 사이의 각도를 각도 표준물로 이용하는 등의 여러 분야에 응용되고 있지만, 아직까지는 개발이 덜 되어 있는 기술로서 많은 잠재력을 지니고 있다고 할 수 있다.

#### 4. 맺음말

이 글에서는 길이의 정밀 측정에 널리 사용되고 있는 여러 종류의 레이저 간섭계에 대하여 그 작동 원리 및 응용 예를 간략하게 살펴 보았다. 아울러, 나노 영역에서의 길이 및 각도를 높은 정확도로 측정할 수 있는 X-선 간섭계의 원리 및 응용에 대하여도 간략히 기술하였는데, 이러한 X-선 간섭계를 이용한 정밀 측정기술은 앞으로도 개발의 여지가 많은 새로운 분야이며, 따라서 그 응용 범위도 점차 널리 확대되리라 예상된다.

#### 참고문헌

- (1) Bonse, U. and Hart, M., 1965, "An X-ray Interferometer," Appl. Phys. Lett. Vol. 6, pp. 155~156.
- (2) Becker, P., Dorenwendt, K., Ebeling, G., Lauer, R., Lucas, W., Probst, R., Rademacher, H.J., Reim, G., Seyfried, P. and Siegert, H., 1981, Phys. Rev. Lett. Vol. 46, pp.1540~1543.
- (3) Tanner, B.K., 1976, X-Ray Diffraction Topography, Pergamon Press, pp.1~23. 