

Elongated Circular Grating의 Talbot 결상을 이용한 무아레 무늬 발생과 응용

이상일 · 조재홍[†] · 장 수 · 임천석

한남대학교 자연과학부

Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

(2000년 12월 21일 받음, 2001년 1월 31일 수정본 받음)

1차원 이동 변위를 격자의 피치 p 보다 $1/10$ 이하의 작은 정밀도로 측정이 가능한 elongated circular grating(EC 격자)를 가간섭 광원으로 조명하여 Talbot 거리에서 일어나는 Talbot 효과를 실험적으로 확인하였다. 그리고 서로 다른 주기를 갖는 렌즈없이 결상된 EC 격자의 Talbot 상과 고정된 EC 격자의 상호 변위시 이들의 중첩에 의한 Talbot 무아레 무늬를 만들었으며, 이를 이용한 한 예로 경사진 평행판의 경사각 정도를 측정하였다. 그리고 한 EC 격자의 Talbot 상과 그 자체의 EC 격자와의 무아레 현상을 이용하여 거울정렬시 미세한 회전각을 가시적으로 매우 쉽게 측정하는 방법을 제안하고 실험하였다.

Keywords : DI.010, DI.020, SM.030.

I. 서 론

계측분야에서는 동일하거나 유사한 두 개의 격자를 겹쳤을 때 만들어지는 무아레 무늬를 널리 이용하고 있다.^[1-3] 이러한 격자들 중에서도 특히 미소한 변위나 각도 변위 등을 측정하는데 직선격자나 원형격자를 널리 이용하고 있다.^[4-7] 또한, 이러한 변위 측정 및 회전방향 측정 등에 프레넬 윤대판 형태의 무아레 무늬를 만드는 격자,^[8] 윤대판에 의한 무아레 무늬,^[9] evolute 격자,^[10] radial 격자,^[11] skew radial 격자,^[12] 그리고 elongated circular(EC) 격자^[13-15]와 matched radial-parallel 격자^[16-18]들을 사용하는 연구가 지속적으로 국내외에서 있어 왔다. 그러나 공간이 매우 협소하거나 마이크로 크기로 소형화된 무아레 계측장치에서는 무아레 무늬를 만들기 위하여 이동용 격자를 렌즈로 결상하여 고정용 격자에 투영시킨다거나, 또는 두 장의 격자를 서로 겹쳐놓기가 어렵기 때문에 무아레 무늬의 편리성 및 가시성에도 불구하고 사용하기가 어려워진다. 그러나 이러한 경우에는 렌즈없이 결상하는 Talbot 효과를 사용하면 이러한 문제를 해결할 수 있다.

파장이 λ 인 가간섭 광을 격자주기가 L 인 주기적인 격자에 평행하게 비추면, 이 회절격자로부터 $2L^2/\lambda$ 의 정수배에 해당하는 거리에 격자와 동일한 상이 렌즈없이 순수하게 회절효과만으로 물체인 격자와 동일한 상이 형성되는데, 이 현상을 Talbot 결상 또는 자체결상(self-imaging), 렌즈없는 결상(lensless-imaging)이라고 한다.^[19,20] 이러한 Talbot 효과는 영상처리 분야,^[21] 이미지 합성 분야,^[22,23] 광학 부품의 생산,^[24,25] 광학적 시험,^[26-28] 또는 길이 측정 등의 광학적 계측^[29,30]에 응용되고 있다.

본 논문에서는 1차원 이동 변위를 격자의 피치 p 보다 $1/10$

이하의 작은 정밀도로 측정이 가능한 직선격자와 원형격자가 합쳐진 EC 격자^[13]에서 Talbot 효과가 가능한가를 확인하고, 이 EC 격자의 Talbot 거리에서 만들어진 Talbot 상과 또 다른 EC 격자와의 중첩에 의하여 무아레 무늬가 발생할 수 있는지를 확인하고자 한다. 그리고 이러한 EC 격자의 Talbot 무아레 무늬를 이용하여 경사진 평행판의 경사각 및 거울의 직각 정렬시 미세한 회전각을 정밀하게 가시적으로 측정하는데 응용하고자 한다.

II. 이 론

2.1. Talbot 효과에 대한 이론

그림 1과 같이 일차원 형태의 입사 광학장 $U(x_0)$ 에 대한 거리 z 에서의 프레넬 회절장 $U(x)$ 는 다음과 같이 convolution 형태로 기술할 수 있다.^[19]

$$U(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} U(x_0)h(x-x_0)dx_0 \quad (1)$$

여기에서, impulse response는 $h(x) = (e^{ikz}/i\lambda z) \cdot \exp(ikx^2/2z)$ 이다. 여기에서 λ 는 입사파의 파장이며, k 는 입사파의 파수(wave number)이다. 그림 1과 같이 주기가 p 이고, y 축에 평행한 직선 격자의 투과율 $t_G(x_0)$ 는 원래 사각함수(square function) 형태로 기술하여야하나, 이를 Fourier 급수로 전개할 때 나타나는 주파수가 가장 작은 기본 주파수를 갖는 sine 함수나 cosine 함수로 근사하여도 전체적인 물리적 의미에서는 변화가 거의 없다. 그러므로 직선 격자의 투과율 $t_G(x_0)$ 를 간단히 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$t_G(x_0) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi x_0}{p}\right) \right] \quad (2)$$

이 투과도 함수가 (1)식에서 언급한 입사장 $U(x_0)$ 에 대응한다.

[†]E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr

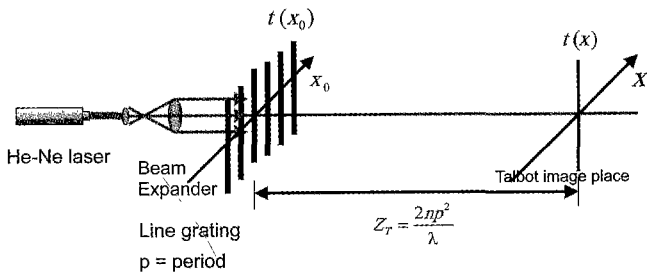


그림 1. 일차원 형태의 입사 광학장 $U(x_0)$ 에 대한 Talbot 거리 $z = Z_T$ 에서의 프레넬 회절장 $U(x)$ 를 나타내는 모식도.

이 격자로부터 z 만큼 떨어진 거리에서의 광학장 $U(x)$ 의 Fourier 변환 결과는 convolution 정리에 의하여 (2)식의 직선 격자 투과율 $t_G(x)$ 와 $h(x)$ 를 Fourier 변환으로 계산한 후, 이를 서로 곱하면 된다. 그리고 이 격자로부터 거리 z 만큼 떨어진 곳의 회절장 $U(x)$ 는 $t_G(x)$ 와 $h(x)$ 를 Fourier 변환한 결과들을 곱한 값의 역 Fourier 변환하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U(x) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \left[\frac{1}{2} \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-i\lambda\pi z}{p^2}\right) \cos\left(\frac{i2x\pi}{p}\right) \right\} \right] \propto \frac{1}{2} \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-i\lambda\pi z}{p^2}\right) \cos\left(\frac{i2x\pi}{p}\right) \right\} \quad (3)$$

이때 회절상을 세기로 나타낼 때, (3)식의 $\exp(ikz)/i\lambda z$ 는 큰 의미가 없기 때문에 이를 생략할 수 있다. 원래의 격자로부터 거리 z 가

$$z = \frac{2n p^2}{\lambda} \quad (\text{단, } n \text{은 정수}) \quad (4)$$

일 때 (3)식은 (2)식의 입력상의 광학장과 같은 형태가 되기 때문에 격자 뒤에서 나타나는 재현되는 상을 Talbot 상이라 하며, 이러한 (4)식에서 계산된 Talbot 상이 보이는 거리를 Talbot 거리($z = Z_T$)라고 부른다. 또한 $z = (2n+1)p^2/\lambda$ 일 때는 회절면에서 관측되는 상은 (3)식에 따르면, 앞서 설명한 Talbot 상과는 음영이 뒤집힌 위상반전 Talbot 상이 나타난다.^[20]

2.2. EC 격자의 버니어 무아레 무늬에 대한 이론

한 피치 이하의 횡변위량을 확대하여 보여주는, 즉 직선 버니어 효과를 주는 EC 격자(두 격자는 반경이 똑같이 R이지만 격자수가 다름)의 직선격자 부분만을 본다면, 이동하는 직선격자의 피치는 P_1 , 총 격자의 수는 $2N+2$ 이고, 고정된 직선격자의 피치는 P_2 , 총 직선격자의 수는 $2N+1$ 이고 여기에서 아래첨자 1은 움직이는 격자를, 아래첨자 2는 고정된 격자를 의미한다. 두 격자의 이동된 거리 차가 d 이면 어두운 무늬의 좌표는 고정된 격자의 좌표인 x_2

$$x_2 = 2 mR + 2d(N+1) \quad (5)$$

이고,^[13] N 은 정수이다. 이 경우 직선격자 부분에서 생기는 무아레 무늬의 어두운 무늬의 위치를 추적하면 이동하는 직선격자의 피치 P_1 의 1/10 단위로 정확히 이동변위를 알 수 있

다. 즉 어두운 무늬가 중앙에 있으면, 마치 길이를 재는 버니어 캘리퍼스의 아들자 같은 역할로 인하여 변위가 P_1 의 정수배에 해당하고 이는 바깥쪽의 원형격자들에 의한 무아레 무늬로부터 측정하여야 한다. 그리고 어두운 무늬가 직선격자 부분의 좌우 끝에서 동시에 나타나면, 이동변위 $P_1/2$ 가 발생했음을 알 수 있다. 마찬가지로 직선격자 부분에서 중앙과 오른쪽 끝 사이의 가운데 어두운 무늬가 나타나면, 이동변위 $P_1/4$ 이 생기고, 중앙과 왼쪽 끝 사이의 가운데 어두운 무늬가 나타나면, 이동변위 $3P_1/4$ 이 생긴 것으로 측정할 수가 있다. 이와 마찬가지로 직선격자가 움직이는 방향으로 변위하는 EC 격자의 원형격자 부분과 고정된 EC 격자의 원형부분들이 서로 d 만큼 변위되었다면, 격자수 1개 차이가 나는 이 두 부분들의 어두운 무아레 무늬의 좌표는 극좌표 r 과 θ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.^[13,31]

$$r_2 = 2 mR + 2d(N+1) \cos\theta_2 \quad (6)$$

(6) 식에서 $\theta_2 = 0$ rad인 경우, 이 식은 1차원 직선격자의 어두운 무늬를 나타내는 버니어 무아레 무늬의 좌표를 나타내는 (5)식과 일치함을 알 수 있다. (6)식에 따라 변위 d 를 이동격자의 피치 P_1 의 단위로 보여주면, 원형격자 부분의 중앙부분에서 시작하는 어두운 무늬가 확실히 $2n$ (n 은 정수)개가 보이며, 마치 버니어 캘리퍼스의 어미자 눈금과 같이 P_1 의 정수배, 즉 nP_1 만큼 이동하는 격자가 변위되었음을 알 수 있다. 이러한 EC 격자에서의 자세한 변위에 대한 내용과 EC 격자의 무아레 무늬에 대한 전산모의 결과는 참고문헌 [13]에 자세히 나와 있다.

III. EC격자의 Talbot 결상

EC 격자는 직선격자와 원형격자를 합친 격자^[13]로 마이크로 영역에서의 버니어 무아레 무늬를 측정하여 미소 변위에 대한 변화를 알 수 있도록 격자의 총 폭이 2mm가 되게 필름으로 제작하였다. Talbot 결상용 EC 격자(G_1 ; 그림 2(a))는 움직이

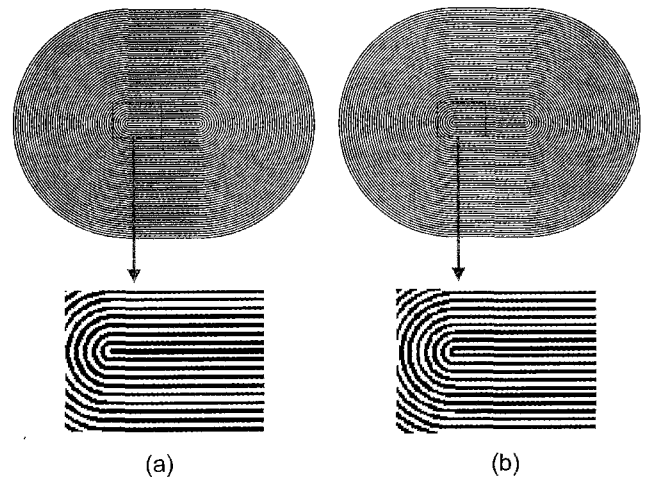
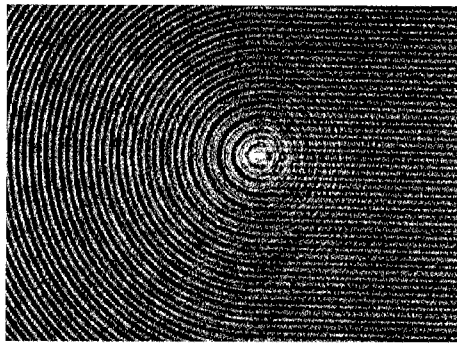
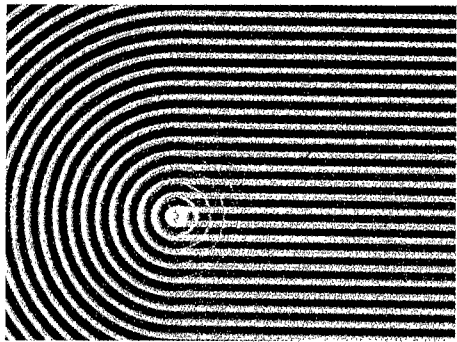


그림 2. (a) Talbot 결상용 EC 격자($P_1=198 \mu\text{m}$, $N_1=100$ 개), (b) 버니어 무아레 무늬를 관찰하기 위한 고정용 EC 격자($P_2=200 \mu\text{m}$, $N_2=99$ 개).



(a)



(b)

그림 3. (a) $z = Z_T/4 = 3.16$ cm에서 측정된 주파수 2배의 EC 격자의 subimage, (b) $z = Z_T = 12.64$ cm인 Talbot 거리에서 관찰된 EC 격자의 Talbot 상.

는 격자에 해당하며, 이 격자 간격이 $P_1 = 198 \mu\text{m}$ 이고 격자수는 $N_1 = 100$ 개이며, 중앙부분이 어두운 부분으로 되어 있다. 그리고 버니어 무아레 무늬를 관찰하기 위한 고정용 EC 격자 (G_2 ; 그림 2(b))는 격자간격이 $P_2 = 200 \mu\text{m}$ 이며, 격자수는 $N_2 = 99$ 개이고, 중앙부분은 밝은 부분으로 제작되어 있다. G_1 격자의 Talbot 거리는 직선격자 부분을 기준으로 생각할 경우, 헬륨-네온 레이저(파장 $\lambda = 6328 \text{ \AA}$)를 사용하는 본 실험에서는 (4)식에 따라 Talbot 거리가 $Z_T = 12.64$ cm이 된다. 이러한 EC 격자의 Talbot 효과를 보는 실험장치는 그림 1에 그려져 있는 것과 같다. 헬륨-네온 레이저(Uniphase, 1135P)를 광속 확대기로 확대시켜 평행광을 만든 후, 이 평행광을 그림 2(b)와 같은 G_2 격자에 입사를 시키면 이 격자로부터 Talbot 거리인 $z = Z_T = 12.64$ cm에서 Talbot 상이 생긴다. 이 상을 렌즈 없는 CCD 카메라((주)삼성전자, BW-360ED)와 image board (DATA TRANSLATION, DT-3155)를 이용하여 컴퓨터로 상을 관측하였다.

그림 3은 그림 2(a)에서 주어진 격자간격이 $198 \mu\text{m}$ 이고 격자수가 100개인 EC 격자의 Talbot 상을 CCD 카메라로 촬영한 결과를 보여주는 것으로 전체 격자의 크기가 너무나 크고, 격자간격이 좁은 관계로 중앙 일부분의 영상만을 보여준다. 그림 3(a)의 경우 $z = Z_T/4 = 3.16$ cm에서 측정된 주파수 2배의 EC 격자의 subimage이며, (b)는 $z = Z_T = 12.64$ cm인 Talbot 거리에서 관찰된 EC 격자의 Talbot 상이다. Talbot 상은 이론에서 예측한대로 Talbot 거리의 정수배에서 원래의 EC격자 형

태로 잘 복원되고 있다. 그러나 원형격자의 절반 형태와 직선격자 형태가 만나는 중앙부분에서는 반원형 부분의 나머지 부분이 일부 복원되어 나타나는 경향을 보였으며, 중앙에서 거리가 먼 곳에서는 반원형격자에 의한 회절성분이 충분히 도착하지 못하는 관계로 원형의 복원된 무늬가 아닌 반원형의 격자형태로 무늬가 나타나고 있다.

IV. 경사진 경사판의 경사각 측정

그림 4는 그림 2(a)에서 주어진 격자수 100개의 EC격자를 이용하여 만든 Talbot 상과 그림 2(b)의 격자수 99개인 고정용 EC 격자를 서로 겹쳐서 발생시키는 무아레 무늬를 이용하여 두 격자 사이에 놓인 경사진 평행판의 경사각을 가지적으로 측정하는 장치도이다. 앞서 사용한 헬륨-네온 레이저와 광속확대기를 이용하여 직경 10 cm로 확대한 레이저 광속을 그림 2(a)에서 주어진 EC 격자 G_1 에 평행하게 조명하면 이 격자의 Talbot 상 G_1' 이 $z = Z_T = 12.64$ cm에 생긴다. 이 G_1' 은 그림 2(b)에서 주어진 고정용 EC 격자인 G_2 와 겹치고, 이로부터 EC 격자에 대한 버니어 무아레 무늬가 발생한다. 이 무아레 무늬는 G_1 과 G_2 사이에 설치한 경사각을 알고 싶은 극히 미세하게 경사진 평행판의 경사각 때문에 생기는 G_1 의 횡변위로 인하여 발생한다. 이러한 G_2 상에서 생기는 무아레 무늬는 결상렌즈 L 로 CCD 카메라에 결상하여 image board를 통하여 관찰한다. 경사각을 정확히 측정하기 위하여 경사진 평행판을 $G_2(W_0 = 0)$ 에서 G_1 방향으로 광축방향을 따라 중변위 $W_i (i = 1, 2, 3 \dots)$ 씩 움직이면서 나타나는 무아레 무늬를 관찰

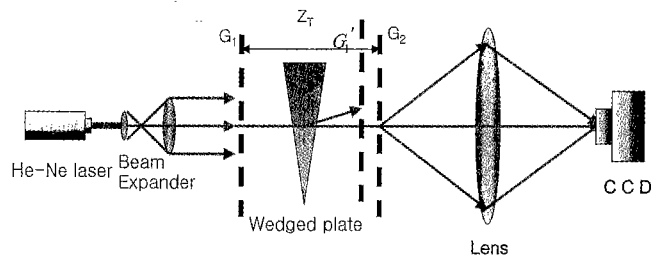


그림 4. Talbot 무아레 무늬를 이용한 경사진 평행판의 경사각 측정 장치도.

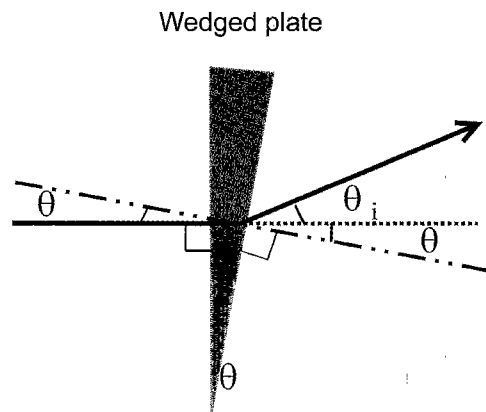


그림 5. 편이각 (deviation angle) θ 와 경사진 평행판의 경사각 θ 와의 관계를 나타내는 그림.

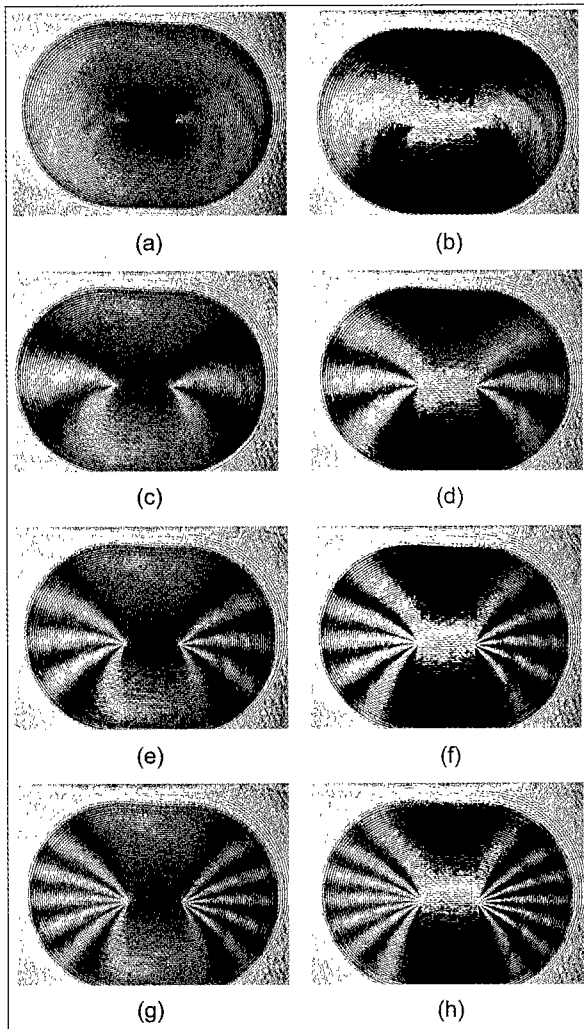


그림 6. 경사진 평행판에 의하여 만들어지는 EC 격자의 Talbot 무아레 무늬들. (a) $W_0=0.00$ mm, (b) $W_1=9.20$ mm, (c) $W_2=18.55$ mm, (d) $W_3=27.75$ mm, (e) $W_4=37.05$ mm, (f) $W_5=46.40$ mm, (g) $W_6=55.35$ mm, (h) $W_7=65.00$ mm.

한다. 그러면 경사진 평행판의 종변위 W_i 와 무아레 무늬로부터 측정된 Talbot 무아레 무늬의 횡변위 S 를 사용하여 그림 4에서 보여주는 광속의 편이각(deviation angle) $\theta_i = \tan^{-1} S/W_i$ 를 결정할 수 있다. 즉, 편이각은 경사진 평행판이 없을 때 직진한 광속을 기준으로 경사진 평행판이 있을 때 생기는 광속의 굴절에 의한 꺾인 각도를 의미한다. 그림 5와 같이 첫면에 수직으로 광속이 입사할 경우, 스넬의 법칙에 의하여 이 값은 경사진 평행판의 경사각 θ 와는 $n \sin\theta = \sin(\theta + \theta_i)$ 와 같은 관계가 성립한다. 여기에서 $\theta \ll 1$ 이라면, θ 와 θ_i 은

$$\begin{aligned} \theta &\cong \frac{\theta_i}{n-1} \\ &= \frac{1}{n-1} \tan^{-1} \frac{S}{W_i} \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다. 여기에서 n 은 경사진 평행판의 재료인 BK-7의 굴절률로 파장 6238 Å에서 1.5165를 선택하였다.

그림 6은 그림 4와 같은 장치도에서 측정된 경사진 평행판에 의하여 만들어지는 EC 격자의 Talbot 무아레 무늬들로 각각 (a) $W_0=0.00$ mm, (b) $W_1=9.20$ mm, (c) $W_2=18.55$ mm, (d) $W_3=27.75$ mm, (e) $W_4=37.05$ mm, (f) $W_5=46.40$ mm, (g) $W_6=55.35$ mm, (h) $W_7=65.00$ mm의 경우들이다. 그림 6(a)는 경사진 평행판이 없는 경우로 참고문헌 [13]의 그림 3(a)와 일치하며, $S=0$ 가 된다. 그리고 경사진 평행판을 G_2 (좌표: $W_0=0$ mm)에서 G_1 방향으로 광축방향을 따라 종변위 W_i ($i=1, 2, 3 \dots$)씩 움직이면서 나타나는 무아레 무늬인 (b), (c), (d), (e)는 참고문헌 [13]의 그림 3의 (c), (e), (g), (i)에 대응하는 결과들이다. 즉 (5)식과 (6)식을 사용하면 이들은 그림 2(a)인 Talbot 결상용 EC 격자의 격자 간격 $P_1=198 \mu\text{m}$ 의 단위로 표기할 수 있는데, 각각 그림 6 (b)~(h)는 $S=P_1/2, P_1, 3P_1/2, 2P_1, 5P_1/2, 3P_1, 7P_1/2$ 이다. W_i ($i=1\sim7$) 값들과 이들에 상응하는 S 값들을 (7)식에 대입하여 경사진 평행판의 경사각들의 측정하면 각각 $1.194^\circ, 1.184^\circ, 1.187^\circ, 1.186^\circ, 1.183^\circ, 1.190^\circ, 1.183^\circ$ 이며, 이들의 평균값을 구하면 $\bar{\theta}=1.187^\circ$ 이다. 이러한 경사각은 1/3600도의 정밀도를 갖는 goniometer (Möller-Wedel, Gonoometer-Spectrometer II)로 측정된 값 $\theta_w=1.190^\circ$ 과 99.75%로 일치한다. 이는 Talbot 무아레 무늬에 의한 S 의 측정이 움직이는 격자의 격자간격 $198 \mu\text{m}$ 의 1/10까지 읽을 수 있기 때문이다.

V. 거울의 미세 회전각 측정

그림 7은 거울의 정렬시 미세한 회전각 θ 를 Talbot 무아레 무늬를 이용하여 가시적으로 측정하는 장치도이다. III절과 IV절에서 사용한 헬륨-네온 레이저와 광속확대기를 이용하여 확대된 레이저 광속을 50:50의 광속분할기 (beam splitter)로 90° 반사시킨다. 이 반사된 광속은 EC 격자(그림 2(a))를 수직으로 조명한다. 이 EC 격자는 IV절에서 배치한 것과는 달리 직각방향으로 배치하여 EC 격자의 직선격자 부분이 지면의 수

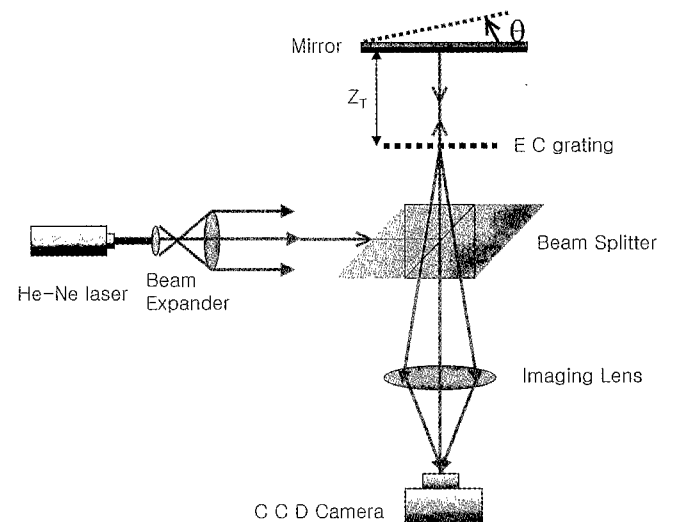


그림 7. 거울의 미세 회전각 θ 를 Talbot 무아레 무늬를 이용하여 가시적으로 측정하는 장치도.

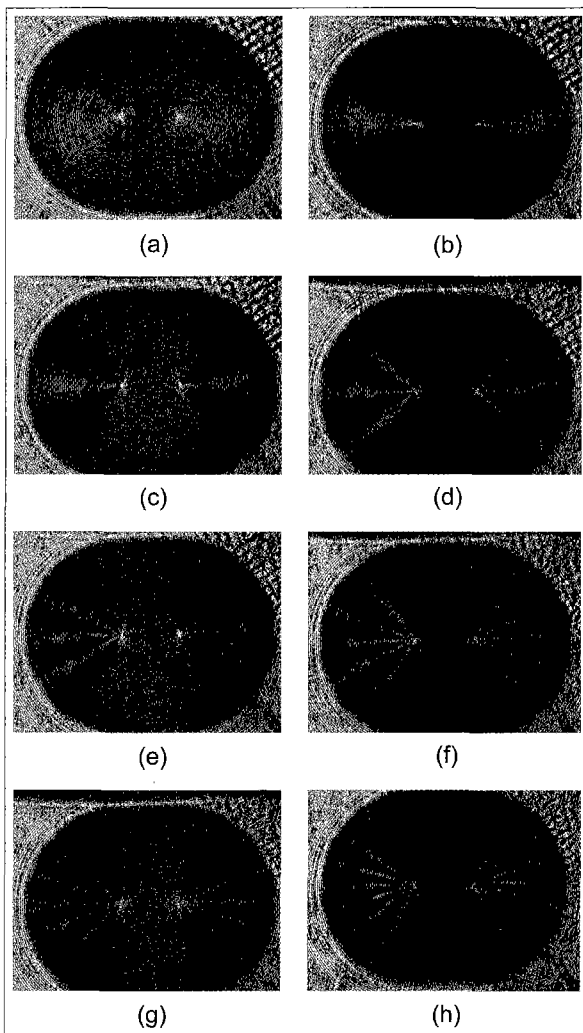


그림 8. 거울의 기울어진 각도를 Talbot 무아레 무늬를 이용하여 가시적으로 측정된 결과(단, $P_1 = 198 \mu\text{m}$ 임.); (a) $L = 0$, (b) $L = P_1/2$, (c) $L = P_1$, (d) $L = 3P_1/2$, (e) $L = 2P_1$, (f) $L = 5P_1/2$, (g) $L = 3P_1$, (h) $L = 7P_1/2$.

직방향으로 배치되도록 한다. 이 EC 격자로부터 Talbot 거리인 $z = Z_T = 12.64 \text{ cm}$ 에 거울을 놓아 반사한 빛이 $z = 2Z_T$ 에서 원래의 EC 격자와 겹칠 때 거울의 미세한 각 변위에 따른 무아레 무늬가 나타난다. 이때 나타나는 Talbot 무아레 무늬를 광속분할기를 거쳐서 초점거리 $f = 17 \text{ cm}$ 인 결상렌즈(imaging lens)로 CCD 카메라에 결상하여 측정한다. 이때 생기는 Talbot 무아레 무늬와는 약간 다르다. 앞서의 Talbot 무아레 무늬는 그림 2(a)와 (b)가 서로 겹쳐져서 나타나는 것이지만, 이 경우는 그림 2(a)에서 보여준 EC 격자의 Talbot 상과 이 EC 격자가 서로 겹쳐져서 생기는 것이다. EC 격자에 의한 무아레 무늬에서 원형격자 부분의 어두운 무늬가 2의 정수 배로 관찰되면 이 격자의 격자간격 P_1 의 정수배에 해당하는 변위가 두 격자들 사이에 생겼음을 뜻한다.^[8] 그리고 무아레 무늬의 가운데 직선격자 부분이 제대로 보이면 추가적인 변위가 없고 직선격자부분이 겹게 나타나면 $1/P_1$ 만큼의 추가적인

변위가 생겼음을 의미한다.^[11] 그러므로 거울이 광속의 직각방향에서 미세 회전각 θ 만큼 틀어졌다면 이로 인하여 Talbot 상이 EC 격자 위에서 횡적으로 변위 L 만큼 움직이며, 이로 인하여 거울의 미세 회전각은

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{L}{2Z_T} \right) \quad (8)$$

이 된다.

그림 8은 거울의 기울어진 각도를 Talbot 무아레 무늬를 이용하여 가시적으로 측정된 결과로 (a) $L = 0$, (b) $L = P_1/2$, (c) $L = P_1$, (d) $L = 3P_1/2$, (e) $L = 2P_1$, (f) $L = 5P_1/2$, (g) $L = 3P_1$, (h) $L = 7P_1/2$ 인 경우를 보여주며, $P_1 = 198 \mu\text{m}$ 이다. 그리고 그림 8의 (a), (c), (e), (g)들에서 볼 수 있는 무아레 무늬의 원형격자 부분은 참고문헌 [6]의 그림 3(a), (b), (c), (d) 결과와 잘 일치한다. 그림 8의 결과들을 (8)식에 대입하면, 미세 회전각 θ 는 각각 0.022° , 0.045° , 0.135° , 0.180° , 0.224° , 0.269° , 0.314° 들이다.

VI. 결 론

1차원 이동 변위를 격자의 피치 p 보다 $1/10$ 이하의 작은 정밀도로 측정이 가능한 EC 격자(격자간격 $198 \mu\text{m}$, 격자개수 100개)를 가간섭 광원으로 조명하여 Talbot 거리 $z = Z_T = 12.64 \text{ cm}$ 에서 Talbot 결상이 되는 것과 $z = Z_T/4 = 3.16 \text{ cm}$ 에서 Talbot subimage가 발생하는 것을 실험적으로 확인하였다. 그리고 이 EC 격자의 Talbot 상과 고정된 EC 격자(격자간격 $200 \mu\text{m}$, 격자개수 99개)가 경사진 평행판에 의하여 상호 변위가 일어날 때, 이들의 중첩에 의한 Talbot 무아레 무늬를 만들 수 있고, 이러한 방법을 사용하여 한 예를 측정된 결과 경사각의 평균값이 $\theta = 1.187^\circ$ 임을 확인하였다. 이러한 경사각은 $1/3600$ 도의 정밀도를 갖는 goniometer-spectrometer로 측정된 값 $\theta_w = 1.190^\circ$ 과 99.75% 로 일치하였다. 그리고 Talbot 결상용 EC 격자와 그 자체의 Talbot 상이 거울의 미세한 회전각 θ 에 의하여 횡변위 됨으로 인하여 Talbot 무아레 무늬가 만들어지며 이로부터 미세 회전각 θ 를 측정할 수 있게 되었다. 그러므로 결상렌즈를 사용할 수 없는 무아레 무늬의 계측시 EC 격자의 Talbot 상을 이용하면 이를 해결할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2000-1-11100-003-2) 지원으로 수행되었습니다. 그리고 EC 격자를 제작하는데 도움을 준 김영란과 송중섭에게 감사드리고, 논문 그림을 작성하는데 도움을 준 이환선에게 감사를 드립니다.

참고문헌

[1] P. S. Theocaris, *Moiré Fringes in Strain Analysis* (Pergamon, London, UK, 1969) Chapter 2, 3.

- [2] K. C. Yuk, J. H. Jo, and S. Chang, "Determination of the absolute order of shadow-type moire fringes by using two differently colored light sources," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 1, pp. 130-132, 1994.
- [3] J. H. Jo, K. C. Yuk, and S. Chang, "Colored shadow moire topography using colored light sources: Red, Green, and Blue," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 33, no. 11A, pp. L1565-L1567, 1994.
- [4] O. Kafri and I. Glatt, *The Physics of Moire Metrology* (John Wiley & Sons, New York, USA, 1990) Chapter 1,2.
- [5] L. O. Vargady, "Moire fringes as visual position indicators," *Appl. Opt.*, vol. 3, no. 5, pp. 631-636, 1964.
- [6] 김일환, 육근철, 조재홍, 장 수, "두 원형 격자의 무아레(moire) 간섭무늬를 이용한 회전자 측정," *새물리*, 제32권 5호, pp. 674-678, 1993.
- [7] 김종수, 조재홍, 장 수, 육근철, "원형격자를 이용한 투사식 무아레 간섭법에 의한 광의 횡변위 측정 및 이를 이용한 나이트로벤젠의 굴절률 측정," *새물리*, 제34권 2호, pp. 148-153, 1994.
- [8] S. Bara, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, and V. Moreno, "Determination of basic grids for subtractive moire patterns," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 10, pp. 1258-1262, 1991.
- [9] H. H. M. Chau, "Moire pattern resulting from superposition of two zone plates," *Appl. Opt.*, vol. 8, pp. 1707-1712, 1969.
- [10] P. Szwaykowski and K. Patorski, "Moire fringes by evolute gratings," *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 21, pp. 4679-4681, 1989.
- [11] G. T. Reid, "A moire fringe alignment aid," *Opt. Laser Eng.*, vol. 4, pp. 121-126, 1983.
- [12] B. Sandler, E. Keren, A. Livnat, and O. Kafri, *Appl. Opt.* "Moire patterns of skewed radial gratings," vol. 26, no. 5, pp. 772-773, 1987.
- [13] Jong Sup Song, Young Ho Lee, Jae Heung Jo, Soo Chang, and Keun Cheol Yuk, "Moire patterns of two different elongated circular gratings for fine visual measurement of linear displacements," *Opt. Commun.*, vol. 154, pp. 100-108, 1998.
- [14] 송종섭, 김봉진, 김지택, 조재홍, 장 수, 육근철, "Elongated Circular Grating의 무아레 무늬를 이용한 액체의 굴절률 측정," *새물리*, 제36권 5호, pp. 456-472, 1996.
- [15] 이영호, 김봉진, 조재홍, 장 수, 육근철, "Elongated Circular Grating의 무아레 무늬를 이용한 영팽창 측정기 제작," *응용물리*, 제10권 2호, pp. 94-100, 1997.
- [16] B. J. Kim, J. S. Song, J. T. Kim, J. H. Jo, S. Chang, and K. C. Yuk, "Determination of small angular displacement by moire fringes matched radial-parallel gratings," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 13, pp. 2848-2855, 1997.
- [17] 김봉진, 송종섭, 김지택, 조재홍, 장 수, 육근철, "회전자 측정용 Matched Radial-Parallel 격자가 만든 무아레 무늬의 해석," *새물리*, 제36권 6호, pp. 577-583, 1996.
- [18] 문일규, 육근철, 조재홍, 장 수, "MRP 격자에 의해서 만들어진 Moire Fringe를 이용한 직선 도선 주위의 자기장 측정," *물리교육*, 제17권 2호, pp. 125-130, 1999.
- [19] K. Patorski and M. Kujawinska, *Handbook of The Moire Fringe Technique* (Elsevier Science Publishing Co., New York, USA, 1993) pp. 70-79.
- [20] 김영란, 주기적인 위상물체의 자체결상연구 (한남대학교, 대전, 2001) 석사학위청구논문.
- [21] B. Packross, R. Eschbach, and O. Bryngdahl, "Image synthesis using self imaging," *Opt. Commun.*, vol. 56, no. 6, pp. 394-398, 1986.
- [22] J. F. Ebersole, "Optical image subtraction," *Opt. Eng.*, vol. 14, no. 5, pp. 436-447, 1975.
- [23] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973.
- [24] Z. Jaroszewicz, and A. Kolodziejczyk, "Application of self-imaging to the production of gratings with asymmetric groove profile," *Opt. Commun.*, vol. 55, no. 2, pp. 73-76, 1985.
- [25] V. V. Aristov, S. Aoki, A. I. Erko, S. Kiluta and V. V. Martynov, "Observation of Fourier images in soft X-ray radiation," *Opt. Commun.*, vol. 56, no. 4, pp. 223-225, 1985.
- [26] T. H. Niemeier, and R. Ulrich, "Quadrature outputs from fiber interferometer with 4x4 coupler," *Opt. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 677-679, 1986.
- [27] H. Kaijun, J. Jahns and A. W. Lohann, "Talbot interferometry with a vibrating phase object," *Opt. Commun.*, vol. 45, no. 5, pp. 295-300, 1983.
- [28] M. C. King and D. H. Berry, "Photolithographic mask alignment using moire techniques," *Appl. Opt.*, vol. 11, no. 11, pp. 2455-2459, 1972.
- [29] A. W. Lohmann, "An array illuminator based on the Talbot effect," *Optik*, vol. 79, no. 1, 41-45, 1988.
- [30] J. R. Leger and M. A. Snyder, "Real-time depth measurement and display using Fresnel diffraction and white-light processing," *Appl. Opt.*, vol. 23, no. 10, pp. 1655-1671, 1984.
- [31] Y. C. Park and S. W. Kim, "Determination of two-dimensional planar displacement by moire fringes of concentric circle gratings," *Appl. Opt.*, vol. 33, no. 22, pp. 5171-5176, 1994.

Moiré fringes generated by the superposition of the elongated circular grating and its Talbot image and their applications

Sang Il Lee, Jae Heung Jo[†], Soo Chang, and Cheon Seog Rim
School of Natural Sciences, Hannam University, Taejon 306-791, KOREA
[†]*E-mail: jhjo@mail.hannam.ac.kr*

(Received December 21, 2000 ; Revised manuscript received January 31, 2001)

The Talbot effect of an elongated circular (EC) grating composed of a line grating and two semicircular gratings with well matched pitches is experimentally presented. As the relative positions between the fixed EC grating and the moving Talbot image of another EC grating or a self Talbot image are one-dimensionally deformed, we can visually observe moiré fringes generated by their superposition. Two examples of their applications, that is, the measurement of the wedged angle of a wedged prism and of the fine rotational angle of a mirror are described.

Keywords : DI.010, DI.020, SM.030.