

정밀한 선형 횡변위 측정용 elongated circular 격자의 자체결상을 이용한 무아레 무늬의 신호처리법

이상일 · 백승선 · 조재홍[†]

한남대학교 자연과학부 광 · 전자물리학 전공
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

(2004년 3월 16일 받음, 2004년 8월 27일 수정본 받음)

직선격자와 원형격자의 혼합형태인 EC(Elongated circular) 격자의 무아레 무늬로 수 μm 의 선형 횡변위를 보기 위하여 자체결상법으로 무아레 무늬를 형성하고 이를 신호처리하여 횡변위를 정밀하게 측정하였다. CCD 카메라로 측정한 무아레 무늬의 직선격자 부분을 고주파 필터링(filtering)과 스무딩(smoothing) 및 2차함수 피팅(fitting)하고, 이 결과의 1차 미분으로부터 영점교차의 위치를 세어서 직선격자 부분의 밝은 무늬의 위치를 측정하였다. 그리고 EC격자의 원형격자 부분에 의한 무아레 무늬는 고주파 필터링과 스무딩으로 구한 결과의 1차 미분에서 나온 영점교차 개수로부터 원형격자의 밝은 부분의 개수를 셈으로써 선형 횡변위의 EC격자 피치에 대한 정수배의 선형이동량을 정확히 계측하였다. 이 결과 80 μm 이하의 횡변위에 대해서 지금까지 무아레 무늬로부터 가시적으로 구한 선형 횡변위량보다 훨씬 정확한 3% 이하의 정확도로 횡변위를 구할 수 있었다.

주제어 : Moire method, self-imaging, elongated circular grating, automatic measurement, filtering and smoothing.

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] 이러한 변위 측정 및 회전방향 측정 등에 직선격자나 원형격자 외에도 프레넬 운대판 형태의 무아레 무늬를 만드는 격자^[8], 운대판에 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], herical 격자^[19], crossed-line 격자^[20]들을 사용하는 연구가 지속적으로 국내외에서 있어 왔다.

그러나 공간이 매우 협소거나 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 격자만의 회절효과에 의하여 특별한 자체결상거리에서 격자가 결상하는 자체결상(self-imaging; Talbot 효과라고도 함)을 사용하면 이러한 문제를 해결할 수 있다.^[21-23] 이러한 자체결상은 영상처리 분야^[24], 이미지 합성 분야^[25], 광학 부품의 생산^[26], 광학적 시험^[27], 또는 길이 측정 등의 광학적 계측^[28]에 응용되고 있다. 특히 최근에는 선형변위의 미소이동량을 측정하는 EC 격자

의 자체결상에 대한 논문이 본 연구팀에 의하여 연구되었으며^[29], 그 결과 일반적인 광학결상계를 설치할 수 없는 수 mm 이하의 매우 좁은 공간에서 EC 격자의 자체결상에 의한 무아레 무늬를 형성하여 가시적으로 수 μm 의 선형변위를 측정하였다.^[30]

본 논문에서는 선형 횡변위를 격자의 피치 p 보다 1/10 이하의 작은 정밀도로 측정이 가능한 직선격자와 원형격자가 합쳐진 EC 격자의 횡변위를 결상렌즈없이 자체결상에 의하여 얻어진 무아레 무늬로부터 가시적으로 횡변위를 구하는 기존의 방법^[13,30]을 개선하고자 무아레 무늬에서 배경 잡음을 제거하고 일차미분을 이용하여 계량적으로 선형 횡변위를 구하는 방법을 제안한다. 이를 위하여 관찰된 무아레 무늬의 직선격자부분과 반원격자 부분들에서의 잡음처리와 변위 위치측정에 필요한 데이터 처리법을 제안하고 이를 이용하여 횡변위를 쉽고 정밀하게 측정하고자 한다.

II. EC 격자에 대한 자체결상 이론

EC 격자의 직선격자 부분을 표현하는 일차원 형태의 입사광학장 $U(x_0)$ 에 대한 거리 z 에서의 프레넬 회절장 $U(x)$ 는 다음과 같이 convolution 형태로 기술할 수 있다.^[31]

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

여기에서 impulse response $h(x)$ 는 $h(x) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \exp\left\{\frac{ik}{2z}x^2\right\}$ 이고, λ 는 입사파의 파장이며, k 는 입사파의 파수(wave number)

[†]E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

이다. 주기가 p 이고, y 축에 평행한 직선 격자의 투과율 $U(x_0)$ 는 원래 사각함수(square function)형태로 기술하여야 하나, 이를 Fourier 급수로 전개할 때 나타나는 주파수가 가장 작은 기본 주파수를 갖는 sine 함수나 cosine 함수로 근사하여도 전체적인 물리적 의미는 변화가 거의 없다. 그러므로 직선 격자의 투과율 $U(x_0)$ 를 간단히 $U(x_0) = \frac{1}{2} [1 + \cos(\frac{2\pi x_0}{p})]$ 로 기술할 수 있다. 이 격자로부터 z 만큼 떨어진 거리에서의 광학장 $U(x)$ 의 Fourier 변환 결과는 convolution 정리에 의하여 식 (1)의 직선 격자 투과율 $U(x_0)$ 와 $h(x)$ 를 Fourier 변환으로 계산한 후, 이를 서로 곱하면 된다. 최종적으로 $U(x)$ 를 구하기 위해서는 이 값을 다시 역 Fourier 변환하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U(x) \propto \frac{1}{2} \left\{ 1 + \exp\left(\frac{-i\lambda pz}{p^2}\right) \cos\left(\frac{i2\pi x}{p}\right) \right\} \quad (2)$$

이때 회절상을 세기로 나타낼 때, (1)식의 $\exp(ikz)/i\lambda z$ 는 큰 의미가 없기 때문에 이를 생략할 수 있다. 원래의 격자로부터 거리 z 가

$$z = \frac{2n p^2}{\lambda} \quad (\text{단, } n \text{은 정수}) \quad (3)$$

일 때 식 (2)는 식 (1)의 입력상의 광학장과 같은 형태가 되기 때문에 격자 뒤에서 나타나는 재현되는 상을 자체결상(self-imaging, 또는 Talbot 상)이라 하며, 이러한 식 (3)에서 계산된 자체결상된 상이 보이는 거리를 Talbot 거리($z = Z_T$)라고 부른다. 이러한 EC 격자의 반원격자부분에 대한 자체결상은 직선격자부분과 같이 단순하게 해석적으로 표현할 수가 없으며 프레넬(Fresnel) 회절의 개념 하에서 참고문헌^[29]에서 취급하였듯이 수치해석적으로 분석할 수 있는데, 그 결과는 직선격자의 자체결상과 거의 비슷하게 나온다.

이러한 고정용 자체결상된 EC 격자와 실제로 선형 횡변위가 일어나는 물체에 부착한 이동용 EC 격자에 의하여 이 횡변위가 증폭된 형태로 나타나는 무아레 무늬를 통하여 횡변위를 측정한다.^[13] 이를 위하여 같은 크기의 격자에서 이동용 EC 격자의 격자수가 고정용 EC 격자의 격자수보다 1개가 더 많아야 하며, 고정용 EC 격자의 직선격자 간격인 P_2 의 값을 기준으로 이동량을 측정하게 된다. 또한 EC 격자의 직선격자 부분에서 생기는 밝은 무아레 무늬의 위치가 좌우 대칭으로 격자 양끝에서 나타나면 이 P_2 의 정수배(n)에 해당하는 횡변위가 있다는 것이고, 밝은 무늬가 가운데 부분에서 나타나면 P_2 의 n 배에 $P_2/2$ 만큼 더 횡변위가 되었다는 것이다.^[13-15] 이러한 횡변위의 정수 n 은 EC 격자의 반원격자 부분에서 생기는 무아레 무늬의 개수로부터 구할 수 있는데, 밝은 무늬의 개수가 2개 이하이면 P_2 이하의 변위를, 밝은 무늬의 개수가 4개 이하이면 $2P_2$ 이하의 변위를 나타낸다.

III. 실험장치 및 방법

그림 1은 실험에 사용한 한 쌍의 EC 격자의 형태이다. 그림 1 (a)는 자체결상을 하는 고정용 EC 격자(G_1)로 격자간격이 $40 \mu\text{m}$ 이고 격자수가 99개이며, 그림 1 (b)는 이동용 EC 격자(G_2)로 격자간격이 $39.6 \mu\text{m}$ 이고 격자수는 100개이다. 이러한 격자들은 유리판위에 반도체 lithography 공정으로 그렸으며, 그림 1에서는 EC 격자의 형태를 보기 위하여 직선격자 부분의 격자수를 각각 41개와 42개로 줄인 격자형태로 보여주고 있다. 이렇게 배치하면 EC 격자의 무아레 무늬의 직선격자 및 반원격자부분에 의하여 선형변위를 측정하는 기준이 격자수가 많은, 즉 격자간격이 좁은 이동용 격자의 피치간격 P_2 에 대하여 계산된다.^[13,30]

그림 2는 선형 횡변위를 보통의 결상광학계를 설치할 수 없는 매우 좁은 공간에서 측정하기 위하여 그림 1에서 보여준 고정용 기준 EC 격자인 G_1 의 자체결상을 이동용 격자인

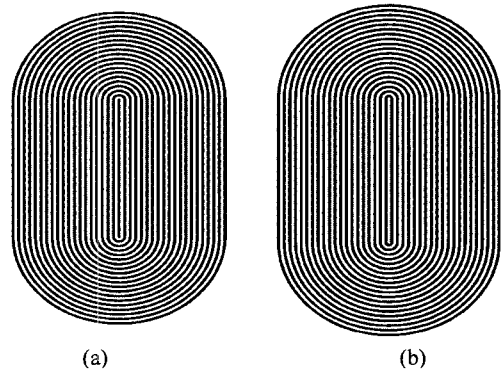


그림 1. 실험에 사용한 한 쌍의 EC(elongated circular) 격자 형태. (a) 자체결상을 하는 고정용 EC 격자 G_1 으로 격자간격이 $40 \mu\text{m}$ 이고 격자수가 99개임, (b) 이동용 EC 격자 G_2 로 격자간격이 $39.6 \mu\text{m}$ 이고 격자수는 100개임. (본 그림에서는 EC 격자의 형태를 보기 위하여 직선격자 부분의 격자수를 각각 41개와 40개로 줄여서 그렸음.)

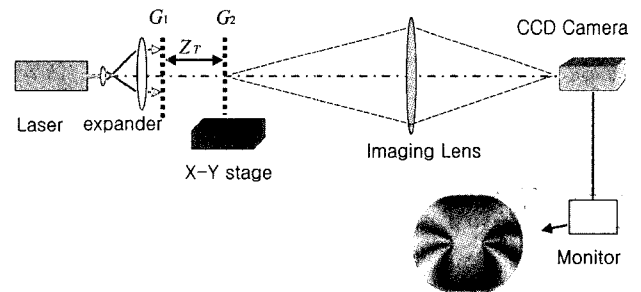


그림 2. 그림 1에서 제작한 이동용 EC 격자 G_2 의 선형 횡변위를 보통의 결상광학계를 설치할 수 없는 매우 좁은 공간에서 측정하기 위하여 고정용 G_1 격자의 자체결상과 이동용 EC 격자인 G_2 격자에 겹쳐서 발생시킨 무아레 무늬를 관찰하는 실험장치.

G_2 에 겹쳐서 발생시킨 무아레 무늬를 관찰하는 실험장치도이다. 파장 6328 Å 인 He-Ne 레이저(Uniphase, 1135P)를 광속화대기로 직경 10 cm로 확대한 후 G_1 에 비추면 이 격자로부터 식 (3)에 따라 $n=2$ 에서 계산된 자체결상거리 $Z_T=5.00\text{ mm}$ 에서 자체결상이 된다. 이 위치에 그림 1(b)의 이동용 EC 격자인 G_2 를 본 연구실에서 제작하여 교정한 DC 모터로 작동하는 분해능이 1 μm 인 x-y stage에 설치하여 고정시킨다. 자체결상된 고정용 EC 격자와 이동용 EC 격자가 서로 겹쳐져서 만들어지는 무아레(moire)무늬를 초점거리 25 cm인 결상렌즈(imaging lens)로 가능한 한 1:1로 CCD 카메라(삼성, BW-360ED)에 결상시켜서 관찰한다. 여기에서 CCD 카메라의 화소크기는 9.9 $\mu\text{m} \times 9.6\ \mu\text{m}$ 이며, 화소수는 640×480개이다. 이들 무아레 무늬들의 상은 image board(Data Translation, DT-3155)로 $2^8=256$ 의 gray level로 디지털화하여 복사조도의 크기를 컴퓨터에 나타낸다.

IV. 선형 횡변위 계산을 위한 신호처리법

그림 3은 그림 2의 실험장치에서 자체결상된 고정용 기준격자 G_1 을 기준으로 이동용 격자 G_2 에 20 μm 의 횡변위를 인가했을 때의 무아레 무늬를 보여준다. 그림에서 보듯이 EC 격자의 반원격자 부분에서 생기는 무아레 무늬의 복사조도 분포는 초기 화면에서 무아레 무늬가 가장 잘 나타나는 (a) 부분을 선택하였다. 직선격자 부분에서 생기는 무아레 무늬의 복사조도 분포는 (b) 부분을 선택하였는데, 이 부분에서는 1개의 어두운 무아레 무늬만이 횡변위에 따라 위치를 달리 하므로 쉽게 위치를 잡을 수 있다. CCD 카메라에서 잡은 이들 부분들의 복사조도 분포는 각각 그림 3의 아래의 (a)와 (b)와 같다. CCD면 전체에서의 이들 영역에 해당하는 직선격자 부분과 반원격자 부분들에서 화살표로 표시하였고,

그 부분들의 1차원 영역은 그림 아래의 (a)와 (b)에 표기한 화살표들 사이가 된다.

그림 4는 횡변위를 20 μm 이동한 상태의 그림 3의 (b) 부분인 직선격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 잡음 처리 및 횡변위 이동량을 구하는 일차미분 과정을 차례대로 보여준다. 그림 4(a)의 중축(x축)은 640개의 CCD 화소의 번호이며, 횡축(y축)은 각 CCD 화소의 밝기를 256 gray level로 나타낸 것이다. 이 무아레 무늬에서 높은 공간주파수로 요동이 심하게 진동하는 잡음 같은 신호들은 무아레 무늬를 만드는 EC 격자의 원래 격자형태인 배경잡음(background noise)을 나타낸다.^[13] 이러한 배경잡음을 없애고 무아레 무늬의 신호만을 추출하기 위하여 그림 4(a)의 신호를 고속 푸리에 변환(FFT: fast Fourier transform)하여 차단주파수(cut-off frequency) $f_c=2.02\text{ lp/mm}$ 이상의 공간주파수를 필터링(filtering)한 결과가 그림 4(b)이다. 이때 차단주파수는 그림 4(c)의 스무딩(smoothing)시에 근접평균하는 CCD 화소수 50개에 1개 화소간 간격인 9.9 μm 를 대입하여 구하는 495 μm 의 역수에 해당하는 FFT시 데이터 추출하는 샘플링 주파수 해당한다.^[32] 그러나 이러한 고주파 필터링만으로는 그림에서 보듯이 무아레 무늬의 공간주파수보다는 높고 배경잡음보다는 매우 작은 공간주파수의 성분이 아직도 남아있게 된다. 차단주파수를 너무 낮게 강제로 설정할 시에는 무아레 무늬의 공간주파수의 주성분도 필터링되므로 신호가 작아지게 된다. 그러므로 고주파 필터링된 그림 4(b)의 데이터를 다시 50개씩의 화소에 대한 신호들을 근접평균(adjacent averaging)하여 무아레 무늬의 공간주파수를 제외한 고주파 필터링으로도 없어지지 않은 저주파의 배경잡음을 모두 없애버린다. 이러한 근접평군을 스무딩(smoothing)이라고 하며, 근접평군의 화소수는 정확히 횡변위가 교정된 값(본 논문에서는 20.00 μm)에 맞추어서 정하였는데 이렇게 정한 근접평군의 화소수는 50에서 53개로 다른 모든 횡변위에 대해서도 교정하여 맞추어본 결과 잘 일치함을 알 수 있었다. 본 논문에서는 50개를 편의상 잡았는데, 근접평군의 수가 너무 적으면 배경잡음이 작게라도 존재하게 되며, 너무 크면 무아레 무늬의 화소수를 추출하는 양쪽 경계에서 완벽한 근접평군이 안되는 영역이 넓어지므로 경계에서 무아레 무늬의 위치를 정확히 찾는 데 어려움을 수반한다. 그림 4(c)의 결과에서 보듯이 EC 격자의 직선격자의 중첩에 의한 무아레 무늬의 위치를 전체 x축의 중앙부근에서 확인할 수 있지만, 정확한 위치를 확인하기 위하여 원형 점선 부근을 2차 함수로 곡선 피팅(fitting)(붉은 곡선)하여 그 최대값의 위치를 무아레 무늬의 정확한 위치로 판정할 수 있다. 2차 함수로 곡선 피팅하는 이유는 광학적 정렬이 이상적으로 정확하게 되어서 자체결상으로 겹쳐지는 두개의 EC 격자가 광축에 수직으로 정확히 겹쳐질 경우에는 무아레 무늬는 좌우 대칭으로 삼각함수의 모양을 따라가지만, 삼각함수는 푸리에 급수전개시 코사인 함수로 전개되고 이 푸리에 급수전개에서 삼각함수의 주파수의 1승에 관여하는 코사인 함수가 가장 큰 성분이며 이 코사인 함수 성분의

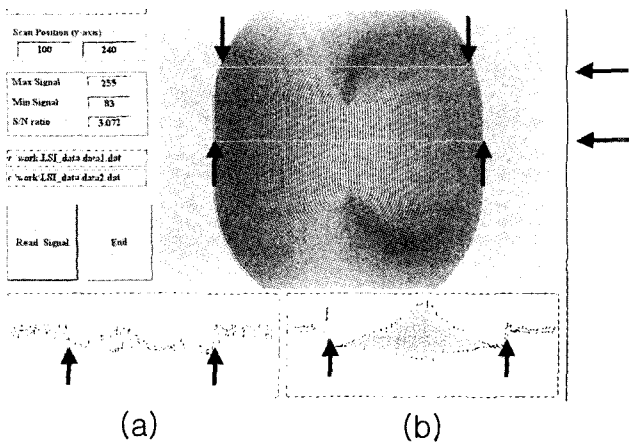


그림 3. 자체결상된 고정용 기준격자 G_2 에 대해서 이동용 격자 G_1 에 20 μm 의 횡변위를 인가했을 때의 무아레 무늬와 (a) 원형격자 부분의 복사조도 분포를 측정된 영역과 (b) 직선격자 부분의 복사조도 분포를 측정된 영역.

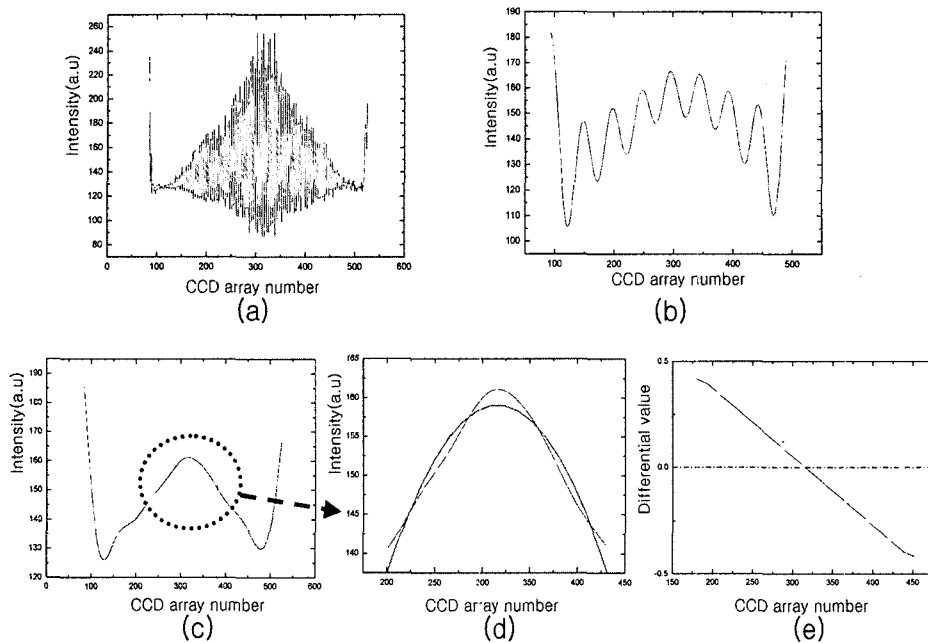


그림 4. 횡변위가 20 μm 인 경우에 얻어진 그림 3의 (b)부분인 직선격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 잡음 처리 및 횡변위 이동량을 구하는 일차미분 과정. (a) 무아레 무늬의 신호, (b) (a)를 $f_c = 2.02 \text{ lp/mm}$ 이상에서 고주파 필터링(high frequency filtering)하여 구한 무아레 무늬 신호, (c) (b)의 결과로부터 50개의 화소에 대한 신호로 스무딩(smoothing)한 무아레 무늬 신호, (d) (c)의 결과를 2차 함수로 곡선 피팅(fitting)한 결과, (e) (d)의 결과를 1차 미분하여 영점교차의 위치로부터 무아레 무늬의 위치를 찾는 과정.

최대값 근처에서는 2차 함수로 근사시켜도 문제가 없기 때문이다. 횡변위가 피치의 정수배에 가까운 경우에는 어두운 무늬의 위치로 변위를 잡는 것이 좋은데, 이는 50개의 근접 평균시 무아레 무늬 좌우 양 끝에서 무아레 무늬 신호가 아닌 배경의 밝은 신호가 들어가서 측정오차가 증가할 수 있기 때문이다. 그래서 이 경우에는 밝은 무아레 무늬가 아닌 중앙에 위치한 어두운 무아레 무늬에 대한 2차 함수 피팅을 한다. 그림 4 (d)의 결과에서 최대값의 위치를 정확하고 쉽게 판별하기 위하여 (d)의 신호를 1차 미분하여 영점교차의 위치를 판정하여 EC 격자의 직선격자 부분들의 중첩에 의한 무아레 무늬의 위치를 정확히 측정할 수 있도록 한 것이 그림 4 (e)이다. 이 결과로부터 20 μm 의 변위의 경우, 밝은 무늬의 영점교차 위치는 CCD array number로 316이고, 이는 그림 4 (a)의 초기 신호가 나오는 CCD array number 90부터 시작하여 226 번째 CCD array number라는 것을 의미한다. 직선격자의 시작은 CCD array number로 90이고 끝나는 CCD array number는 630이므로 EC 격자의 직선격자 부분의 길이는 440개 화소로 결상되었고, 중심인 $90 + 440/2 = 310$ 번째 CCD array에서 신호가 나온다면 이는 $P_2/2 = 19.8 \mu\text{m}$ 의 횡변위를 의미하므로 316번째에서 신호가 나온 경우를 비례관계로 계산해보면 20.2 μm 에 해당한다는 것을 알 수 있다. 이 값은 20 μm 의 횡변위에 대해서 1%의 오차에 해당하는 매우 정밀한 값이다.

그림 5는 이동용 EC 격자의 횡변위를 다양하게 변화시켜서 무아레 무늬를 쉽게 판별할 수 있음을 보여주기 위하여

(a) 0 μm , (b) 5 μm , (c) 10 μm , (d) 15 μm , (e) 20 μm , (f) 25 μm , (g) 30 μm , (h) 35 μm , (i) 40 μm 까지 횡변위를 이동시켜서 그림 4에서 제안한 EC 격자의 직선격자 부분들에서 나타나는 초기 무아레 무늬의 신호에 대한 고주파 필터링과 스무딩한 후에 이를 2차함수로 피팅하고나서 1차 미분한 결과들이다. 이 1차 미분된 신호의 영점교차 위치를 판정하여 최종적으로 직선격자 부분에 대한 무아레 무늬의 위치를 계산한다. 그림 5에서 보듯이 일반적으로 EC 격자의 선형변위는 이론적으로 무아레 어두운 무늬의 위치로 구하지만^[13-15], 본 연구에서는 앞서 그림 4에서 설명하였듯이 피치의 정수배로 횡변위가 생기는 경우에 오차를 줄이기 위하여 밝은 무늬의 위치와 어두운 무늬의 위치를 모두 사용하여 계산한다. 즉 그림 5(a)와 (i)와 같이 어두운 무늬의 중심이 가운데 오면, 이 어두운 무늬를 신호처리하여 음에서 양으로의 영점교차하는 지점의 위치가 중앙에 있음을 확인하는데, 이는 P_2 의 정수배에 해당하는 횡변위가 있었음을 의미한다. 그러므로 이 경우에는 어두운 무늬의 중심을 찾아서 그 중심이 가운데 있는 지를 계산하면 된다. 그리고 반면에 나머지의 경우에는 밝은 무늬에 대한 영점교차의 위치를 찾아서 그림 4의 경우와 같이 계산하면 된다.

그림 6은 그림 4와 같이 횡변위를 20 μm 이동한 상태의 그림 3의 (a) 부분인 반원격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 잡음 처리에서 일차 미분까지의 과정을 차례대로 보여준다. 그림 6(a)는 초기 반원격자부분의 무아레 무늬의 신호이며, (b)는 이를 그림 4의 경우와 같이 고주파 필터링한 결과

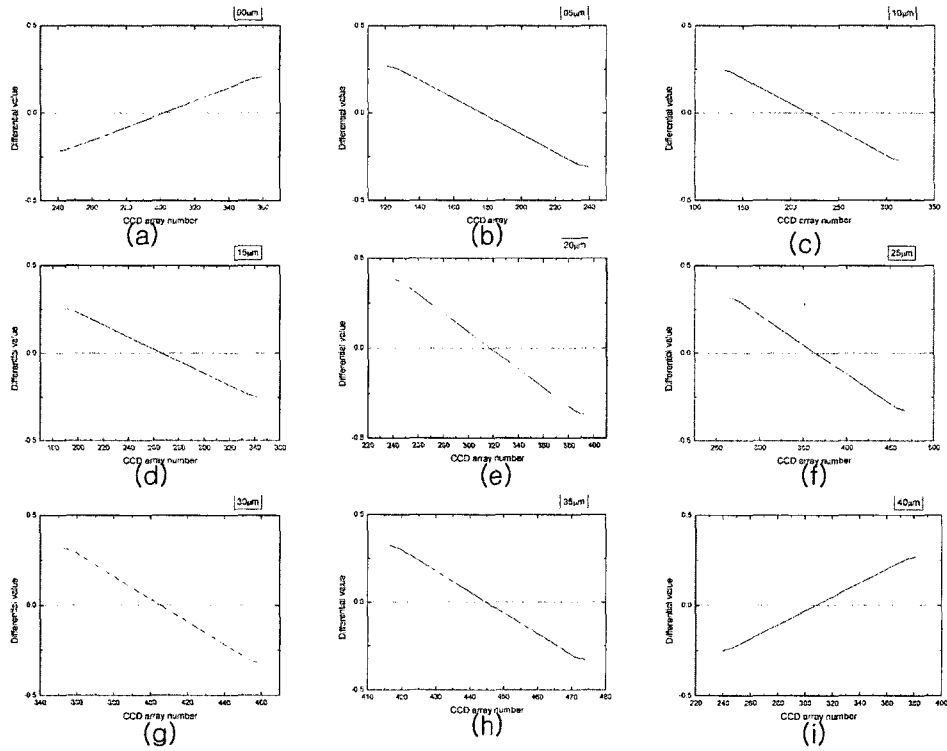


그림 5. 이동용 EC 격자의 횡변위를 다양하게 변화시켜서 무아레 무늬를 쉽게 판별할 수 있음을 보여주기 위하여 (a) $0 \mu\text{m}$, (b) $5 \mu\text{m}$, (c) $10 \mu\text{m}$, (d) $15 \mu\text{m}$, (e) $20 \mu\text{m}$, (f) $25 \mu\text{m}$, (g) $30 \mu\text{m}$, (h) $35 \mu\text{m}$, (i) $40 \mu\text{m}$ 까지 횡변위를 이동시켜서 그림 4에서 제한한 EC 격자의 직선격자 부분들에서 나타나는 초기 무아레 무늬의 신호에 대한 고주파 필터링과 스무딩한 후에 2차 함수로 피팅하고나서 1차 미분하여 얻은 영점교차 지점의 결과들.

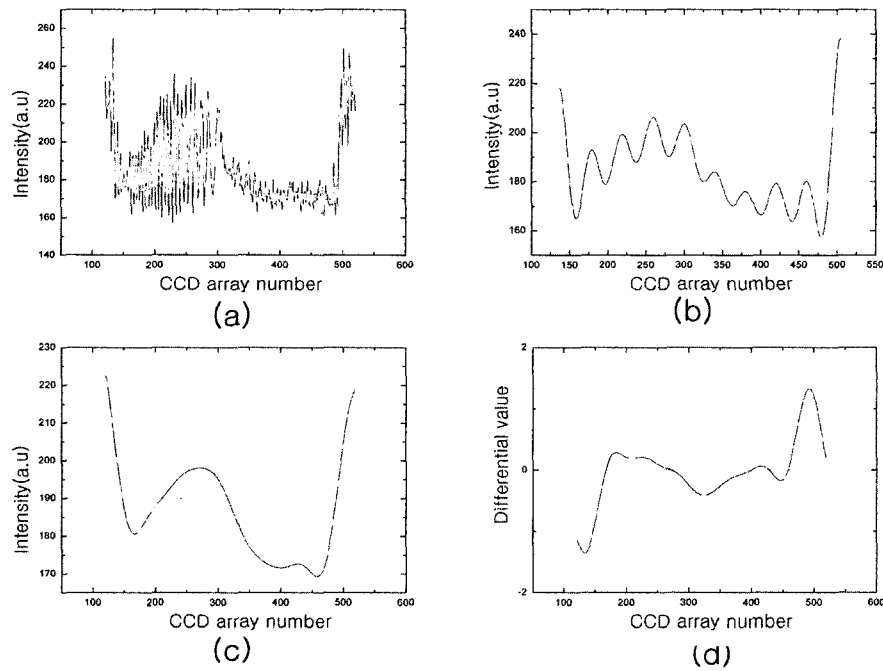


그림 6. 횡변위를 $20 \mu\text{m}$ 이동한 상태의 그림 3의 (b) 부분인 반원격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 잡음 처리 및 횡변위 이동량을 구하는 일차 미분 과정.

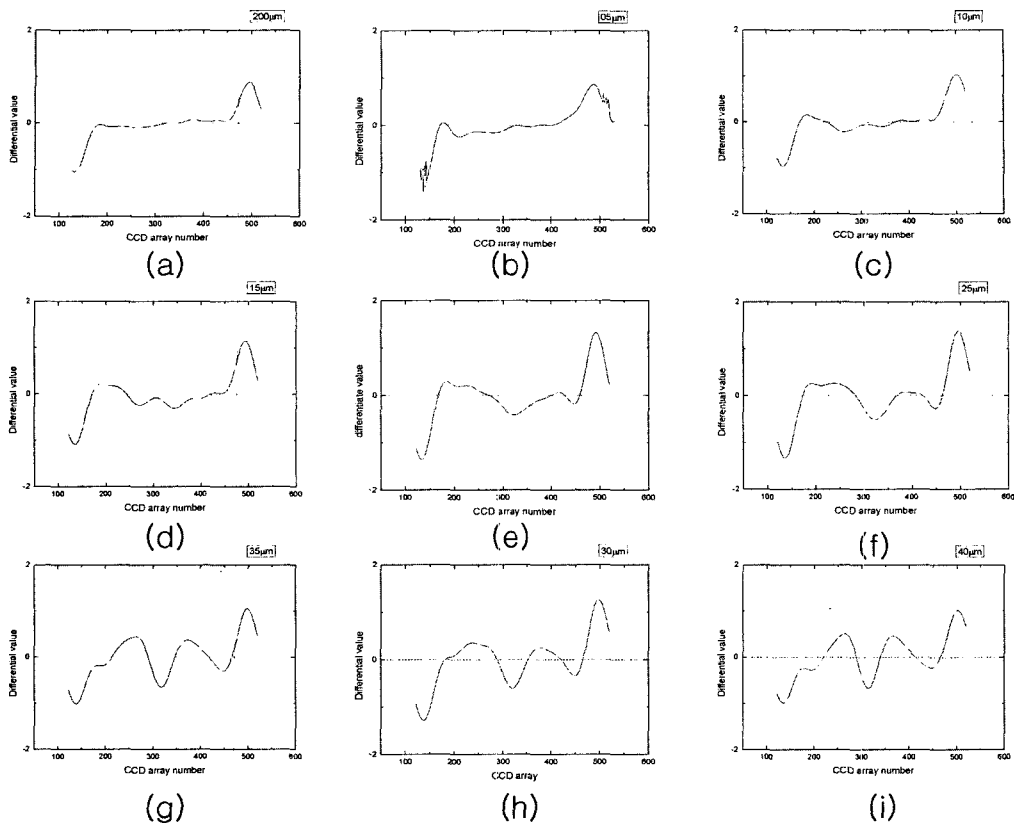


그림 7. (a) 0 μm , (b) 5 μm , (c) 10 μm , (d) 15 μm , (e) 20 μm , (f) 25 μm , (g) 30 μm , (h) 35 μm , (i) 40 μm 까지 횡변위를 이동시켰을 경우, 이동용 EC 격자의 반원격자 부분들에서 나타나는 초기 무아레 무늬들의 신호에 대한 고주파 필터링과 스무딩한 후에 1차 미분하여 양에서 음으로 교차하는 영점교차의 개수의 결과.

이고, (c)는 이를 다시 근접평균하여 스무딩한 결과이며, (d)는 이를 1차 미분하여 양에서 음으로 교차하는 영점교차(밝은 무늬의 극대값 위치를 의미함)의 개수를 세는 것이다. 이 결과는 이미 이론에서 말하였듯이 단지 P_2 의 정수배에 해당하는 횡변위를 알아내는 것이므로 그림 4에서 하였던 2차 함수 피팅은 하지 않고 필터링, 스무딩, 그리고 1차 미분에 의한 영점교차 등의 방법에 의하여 최종적으로 반원격자 부분에 대한 밝은 무아레 무늬의 개수만을 측정하는 것이다. 이러한 영점교차하는 지점의 개수가 0개이면 횡변위가 없는 것이고, 1~2개이면 P_2 이하의 횡변위가 있는 것이므로 그림 5의 결과를 보아야한다. 그리고 양에서 음으로 영점교차하는 지점이 3~4개이면 횡변위가 P_2 보다는 크고 $2P_2$ 보다는 작은 영역에 있는 것이므로 그림 5의 결과에 1 피치 (P_2)의 횡변위값만을 더해주기만 하면 된다.

그림 7은 (a) 0 μm , (b) 5 μm , (c) 10 μm , (d) 15 μm , (e) 20 μm , (f) 25 μm , (g) 30 μm , (h) 35 μm , (i) 40 μm 까지 횡변위를 이동시켰을 경우, 이동용 EC 격자의 반원격자 부분들에서 나타나는 초기 무아레 무늬들의 신호에 대한 고주파 필터링과 스무딩한 후 이를 1차 미분하여 영점교차의 개수를 본 결과들이다. 그림 6의 (c)와 (d)의 결과를 사용하면, 양에서 음으로 교차하는 영점교차의 개수, 즉 밝은 무늬의 극대값이 (a)는 0개, (b)~(d)는 1개, (e)~(i)는 2개이므로 (a)는 횡변위

가 없음을 의미하고, 나머지는 1피치 이하의 횡변위만이 있었다는 것을 나타내므로 EC 격자의 직선격자 부분들의 횡변위를 측정된 그림 5의 결과를 관찰하여야 한다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 2에서 이동용 EC 격자의 횡변위를 x-y stage로 0~80 μm 까지 5 μm 씩 움직였을 때 무아레 무늬를 신호처리하여 횡변위를 구한 결과들(그림 5와 그림 7)을 그래프로 그려놓은 것이다. 실선은 이들 실험결과를 직선피팅(linear fitting)한 결과로 $y=1.029x-0.422$ 인 직선이다. 이 기울기는 이론적인 값 1에서 3% 정도 벗어났을 뿐이며, 횡변위가 전혀 없는 $x=0$ 에서 EC 격자의 무아레 방법으로 구한 횡변위가 -0.44 μm 이므로 $P_2 = 39.6 \mu\text{m}$ 의 1.1%에 불과하다는 것을 알 수 있다. 이 직선피팅된 결과를 사용한 경우, 20 μm 의 횡변위에서는 1%, 40 μm 의 횡변위에서 1.8%, 80 μm 의 횡변위에서는 2.4%의 오차를 갖는다. 즉 EC 격자의 자체결상에 의한 무아레 무늬의 필터링, 스무딩, 2차 함수 피팅, 1차 미분 등의 방법을 차례로 적용할 경우 EC 격자를 사용하여 횡변위를 구하는 방법이 2 피치 이하의 실제의 횡변위에서 3% 미만의 값으로 정확히 측정할 수 있음을 알 수가 있다.

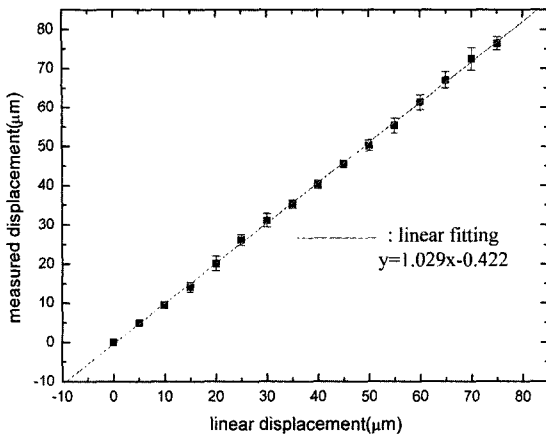


그림 8. 이동용 EC 격자의 횡변위를 x-y stage로 0~80 μm 까지 5 μm 씩 움직였을 때 무아레 무늬의 결과인 그림 5와 그림 7들로부터 측정된 횡변위를 그래프로 그려놓은 것임. 실선은 이들 실험결과를 직선피팅(linear fitting)한 결과로 $y=1.029x-0.422$ 의 직선이다.

V. 결 론

본 논문에서는 선형 횡변위를 격자의 피치 P_2 보다 1/10 이하의 작은 정밀도로 측정이 가능한 직선격자와 원형격자가 합쳐진 EC 격자의 자체결상에 의하여 얻어진 무아레 무늬로부터 횡변위를 가시적으로 구하는 기존의 방법^[13,30]을 개선하여 무아레 무늬에서 배경 잡음을 제거하고 일차미분을 이용하여 계량적으로 선형 횡변위를 구하는 개선된 방법을 제안하였다. 즉 EC 격자의 직선격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 2.02 lp/mm 이상의 고주파 필터링과 50개 화소의 신호로 근접평균하여 잡음을 없애고 이를 다시 2차 함수에 피팅하였으며 이를 일차 미분하여 영점교차 위치를 찾음으로써 횡변위량을 1피치($P_2 = 39.6 \mu\text{m}$) 이하의 변화를 정확히 측정할 수 있도록 하였다. 동시에 횡변위의 EC 격자의 반원격자 부분에서 만들어진 무아레 무늬의 고주파 필터링, 스무딩, 1차 미분을 통하여 양에서 음으로 교차하는 영점교차의 개수를 측정함으로써 P_2 의 정수배에 해당하는 이동량을 알아낼 수 있었다. 이러한 방법이 실제의 2 피치 이하의 횡변위에서 3% 이하의 정확도로 가시적으로 구한 무아레 무늬로부터 횡변위를 구할 수 있음을 확인하였다. 앞으로는 광학적 정렬의 오차 및 이 처리방법들의 문제점들을 좀 더 세밀하게 분석하여 이 신호처리법을 사용한 경우의 측정의 한계를 구하고자 한다.

참고문헌

[1] P. S. Theocaris, *Moire 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] 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.
 [7] 김종수, 조재홍, 장 수, 육근철, "원형격자를 이용한 투사식 무아레 간섭법에 의한 광의 횡변위 측정 및 이를 이용한 나이트로벤젠의 굴절을 측정," *새물리*, 제 34권 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, "Moire patterns of skewed radial gratings," *Appl. Opt.* 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, 장수, 육근철, "Elongated Circular Grating의 무아레 무늬를 이용한 액체의 굴절을 측정," *새물리*, 제 36권 5호, pp. 456-472, 1996.
 [15] 이영호, 김봉진, 조재홍, 장수, 육근철, "Elongated Circular Grating의 무아레 무늬를 이용한 영팽창 측정기 제작," *응용물리*, 제 10권 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, 장수, 육근철, "회전각 측정용 Matched Radial-Parallel 격자가 만든 무아레 무늬의 해석," *새물리*, 제 36권 6호, pp. 577-583, 1996.
 [18] 문일규, 육근철, 조재홍, 장수, "MRP 격자에 의해서 만들어지는 Moire Fringe를 이용한 직선 도선 주위의 자기장 측정," *물리교육*, 제 17권 2호, pp. 125-130, 1999.

- [19] Keun Cheol Yuk, Hee Bok Lee, Jae Heung Jo, and Soo Chang, "Helicity dependence of moire fringes formed by a helical grating," *Proceedings of SPIE*, vol. 3573, pp. 532-535, 1998.
- [20] Keun Cheol Yuk, Jae Heung Jo, and Soo Chang, "Crossed-line grating method determining the absolute order of shadow moire fringes," *Proceedings of SPIE*, vol. 3573, pp. 528-531, 1998.
- [21] K. Patorski and M. Kujawinska, *Handbook of The Moire Fringe Technique* (Elsevier Science Publishing Co., New York, USA, 1993) pp. 70-79.
- [22] 김영란, 이승복, 조재홍, 장수, "주기적인 진폭격자들에 의한 Talbot 결상 및 가시도 분석," *한국광학회지*, 제 12권 2호, pp. 83-90, 2001.
- [23] 백승선, 김영란, 이상일, 조재홍, "위상형 직선격자의 자체결상과 가시도 분석," *한국광학회지*, 제 14권 6호, pp. 606-612, 2003.
- [24] B. Packross, R. Eschbach, and O. Bryngdahl, "Image synthesis using self imaging," *Opt. Commun.* vol. 56, no. 6, pp. 394-398, 1986.
- [25] O. Bryngdahl, "Image formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 63, no. 4, pp. 416-418, 1973.
- [26] Z. Jaroszawicz, 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.
- [27] M. C. King and D. H. Berry, "Photolithographic mask alignment using moire techniques," *Appl. Opt.* vol. 11, no. 11, pp. 2455-2459, 1972.
- [28] 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.
- [29] J. S. Kang, M. S. Lee, S. Chang, B. J. Kim, and K. C. Yuk, "Characterization of Fresnel images of an elongated circular grating," *Optik*, vol. 113, no. 7, pp. 285-292, 2002.
- [30] 이상일, 조재홍, 장수, 임천석, "Elongated Circular Grating의 Talbot 결상을 이용한 무아레 무늬 발생과 응용," *한국광학회지*, 제 12권 1호, pp. 25-31, 2001.
- [31] Joseph W. Goodman, *Introduction to Fourier Optics; 2nd ed.* (MacGraw Hill, New York, USA, 1996) pp. 23-26.

The signal processing of moire fringes obtained by the superposition of a fixed self-imaging elongated circular(EC) grating and a moved EC grating for the precise measurement of linear transverse displacements

Sang Il Lee, Seung Sun Baek, and Jae Heung Jo[†]

Applied Optics and Electromagnetics, School of Natural Sciences, Hannam University, Ojung-dong 133, Taejeon 306-791, KOREA

[†]*E-mail: jhjo@hannam.ac.kr*

(Received March 16, 2004, Revised manuscript August 27, 2004)

We obtained precise linear transverse displacements from the results of signal processing on moire fringes measured by the superposition of a fixed self-imaging elongated circular(EC) grating and a moved EC grating. The linear displacement less than one pitch of the moving EC grating was calculated from the position of a bright moire fringe generated on the linear grating part of the EC gratings. The moire signals were high-frequency-filtered, smoothed, curve-fitted, and first-differentiated moire signals in sequence. Also the linear displacement created by movement by the unit of integer times of a pitch was readily measured by the count of the even number of zero-crossing points corresponding to bright moire fringes obtained by the above same processing without curve fitting. Then we can measure linear transverse displacements with the accuracy of better than 3 %, which are more accurate values than those by the traditional visual method within the displacement of 80 μm .

OCIS Codes : 120.4120, 070.6760, 150.0150.