

버니어 무아레 무늬를 이용한 백색광의 시준 검사 및 렌즈의 색수차 측정

송종섭 · 조재홍 · 장 수

한남대학교 물리학과

이윤우 · 조현모 · 이인원

한국표준과학연구원 영상그룹

육근철

공주대학교 물리교육학과

(2000년 2월 21일 받음, 2000년 7월 14일 수정본 받음)

백색 시준광의 시준 정도를 정밀하게 측정하기 위하여 두 직선격자나 원형격자에 의한 버니어(vernier) 무아레 무늬를 이용하는 새로운 시준 방법을 제안하였다. 버니어 무아레 무늬의 피치 간격을 측정함으로써 렌즈의 초점 종이동 오차(Δf), 발산각(θ) 및 종색수차(L_{ch})를 구하였다. 초점 길이가 120.0 mm이고 F/2.4인 렌즈를 사용하여 측정한 결과 $\Delta f = 21.9$ mm이고, $\theta = 0.0038^\circ$ 가 되었다. 그리고 중심 파장이 각각 $\lambda_1 = 480$ nm와 $\lambda_2 = 640$ nm인 band pass filter를 사용하여 초점 거리가 65.0 mm이고 F/1.6 그리고 아베수가 64.1인 렌즈의 종색수차를 버니어 무아레 무늬를 이용하여 측정하였다. 자동초점방법을 이용하여 측정한 결과, $L_{ch} = 1.58$ mm (± 0.01 mm)와 무아레 간섭법을 이용하여 측정한 결과인 1.59 mm (± 0.1 mm)와 거의 일치함을 알 수 있었다.

OCIS codes : 080.2740, 120.4120.

I. 서 론

백색광을 사용하여 공간적으로 주기성을 갖는 반사판 또는 투과판을 서로 겹쳐 놓을 때 발생하는 물결 형태의 간섭 무늬를 무아레(moiré) 간섭 무늬라고 한다.^[1] 이러한 무아레 현상은 비가간섭성 광원을 사용한 강도(intensity) 간섭 효과로 이해할 수 있다. 무아레 무늬는 표면 형상 측정(topography)^[2-6]과 굴절을 및 회절각 측정^[7,8]을 비롯한 여러 가지 계측 분야^[9-12]에서 널리 이용하고 있다. 근본적으로 이 방법은 서로 겹치게 하거나 투영시킬 두 개의 주기적인 또는 준 주기적인 격자 구조가 필요하다. 특히 격자 간격이 미소하게 다른 두 격자를 사용하는 버니어(vernier) 무아레 무늬를 이용한 변위, 회전 상태, 변형 등의 측정은 미소한 물리적 변화량을 확대하는 효과를 갖고 있으며, 이를 이용할 경우 보다 물리적 계측이 쉬워진다.^[13, 14]

광학계의 변수를 측정하거나 평가하기 위하여 광선을 평행하게 시준시키는 시준장치를 사용한다. 광선의 시준 측정법에는 크게 레이저와 같은 가간섭성 광원을 사용하는 방법과 백색광과 같은 비가간섭성 광원을 사용하는 방법으로 나누어진다. 현재까지 백색광이 아닌 가간섭성 레이저를 이용하여 광선의 평행 정도를 측정하거나 확인하는 방법들은 크게 두 종류로 분류할 수 있다. 그 첫 번째 방법이 Talbot 결상 방법^[15, 16]으로 평행 광선을 선형 혹은 원형 회절 격자에 입사시키면 이때 만들어지는 격자의 상과 격자 간격이 동일한 또 다른 회절 격자와 서로 겹쳐지면서 무아레 무늬가 만들어지는데, 이 무

늬를 보고 시준하는 방법이다. 그리고 다른 방법은 Ronchi 회절 격자, 평행 평판, 그리고 쉼기판 등을 이용한 층밀리기 간섭 방법이다.^[17, 18] 이러한 방법들은 가간섭성 광원인 레이저광의 간섭 및 회절 효과를 이용하는 것으로 가간섭성이 떨어지는 백색광 시준에는 좋은 방법이 아니다.

특히 결상 광학계의 성능평가용 OTF(Optical Transfer Function) 측정 방법은 주로 칼날을 미세 이동 장치에 부착시켜 렌즈의 상을 주사함으로써 상의 광도 분포를 측정하는 주사(scanning)에 의한 방법이다. 여기에서 측정된 상의 강도 분포와 물체의 강도 분포가 선형적인 관계를 갖게 하기 위해 비가간섭성 백색광원으로 시준장치를 구성하고 있다.^[19] 이러한 경우 기존의 레이저 광을 이용한 시준 방법은 적절하지 않다. 그리고 현재 산업계에서 품질평가지 빠른 시간내에 생산하고자 하는 광학계의 성능평가를 하기 위한 CCD 카메라가 장치된 OTF 장치에서는 생산성을 위하여 보다 빠르고 가시적인 백색광 시준장치가 필요하다. 이러한 비가간섭 광원의 시준 측정법으로는 기준 평면 거울을 이용한 자동시준(auto-collimation)법 등이 있다. 그러나 시준 광원의 직경이 커지게 되면 기준 평면 거울의 크기가 커야되는 단점이 있다.

본 연구에서는 시준 장치의 시준 정도를 측정하기 위하여 가간섭광에 사용하던 무아레 방법을 비가간섭광에 적용하기 위하여 버니어 무아레 방법을 제안하고자 한다. 즉, 피치(pitch) 간격이 동일한 두 직선 격자와 원형 격자들을 각각 사용하여, 시준 정도에 따라 만들어지는 버니어 무아레 무늬를 분석하고, 이를 이용하여 백색 광원을 정밀하게 시준하기 위

한 새로운 정렬 방법을 제안하고자 한다. 또한 버니어 무아레 무늬를 이용하여 시준 렌즈의 미소한 초점 종이동 오차로 인해 생기는 발산각을 계산하고, band pass 필터를 이용하여 시준 렌즈의 색수차를 측정하고자 한다.

II. 이 론

2.1. 버니어 무아레 무늬에 대한 분석

피치 간격이 각각 P_1 과 P_2 인 두 직선 격자들의 투과도를 직선 좌표 x 에 대한 사인(sine) 함수로 근사하여 표기하면 각각 다음과 같이 된다.

$$T_1 = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{P_1} \right) \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{P_2} \right) \quad (2)$$

(1)식과 (2)식으로 표현한 두 직선 격자들을 서로 겹쳤을 때의 총 투과도 T 는 다음과 같이 된다.

$$T = T_1 \cdot T_2$$

$$= \frac{1}{4} \left[1 + \cos \frac{2\pi x}{P_1} - \cos \frac{2\pi x}{P_2} - \frac{1}{2} \cos \left\{ 2\pi x \left(\frac{1}{P_1} + \frac{1}{P_2} \right) \right\} \right]$$

$$- \frac{1}{2} \cos \left\{ 2\pi x \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right) \right\} \quad (3)$$

(3)식의 항 중에서 다섯 번째 항이 공간 주파수가 가장 낮은 항으로 무아레 무늬를 의미한다. 그러므로 무아레 무늬의 투과도 T_{moire} 는

$$T_{moire} \propto -\frac{1}{8} \cos \left\{ 2\pi x \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2} \right) \right\} \quad (4)$$

이 된다.^[13] 여기에서 각각의 직선격자의 피치 간격 P_1 , P_2 와 무아레 무늬의 피치 간격 P 와의 관계는

$$P = \left| \frac{P_1 P_2}{P_2 - P_1} \right| \quad (5)$$

로 나타낸다.^[12-14] 그러므로 피치 간격이 약간 다른 두 개의 격자를 겹쳤을 때 만들어지는 무아레 무늬를 버니어 무아레 무늬라 한다.^[20] 그림 1은 이러한 버니어 무아레 무늬들을 보여주는 것으로 그림 1(a)와 같은 직선 격자가 피치간격을 약간 달리하여 2장을 겹쳤을 때 만들어지는 버니어 무아레 무늬가 그림 1(b)이고, 직선격자대신에 그림 1(c)와 같은 원형격자들을 겹쳤을 때 만들어지는 원형 버니어 무아레 무늬가 그림 1(d)이다.

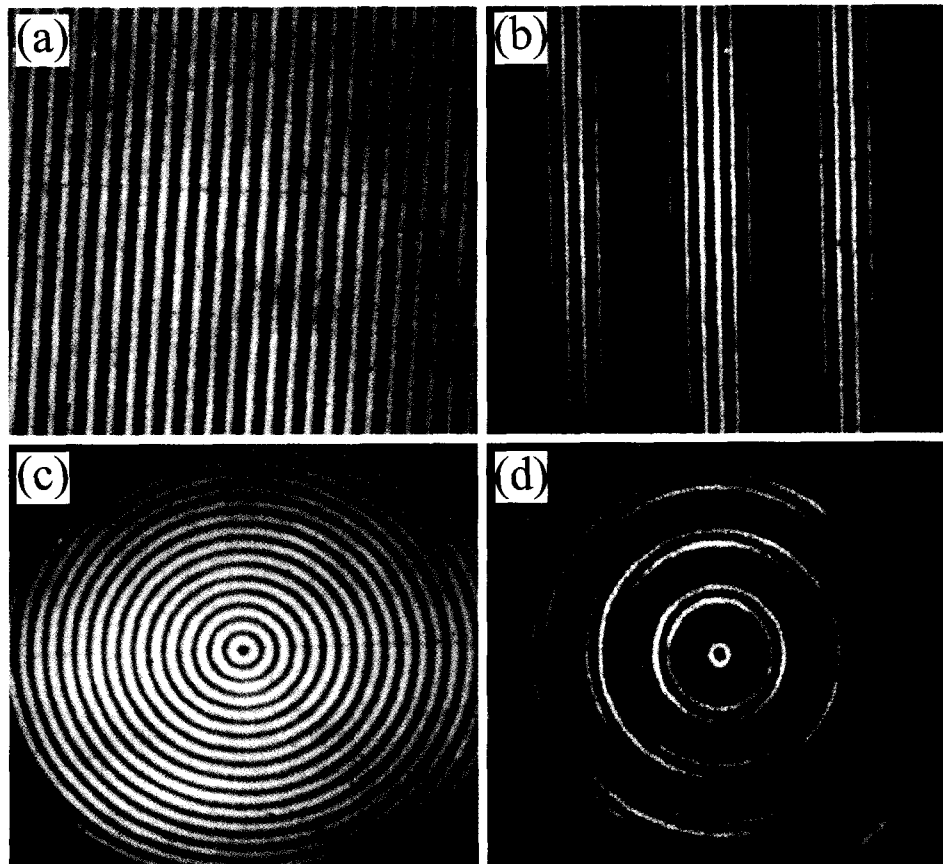


그림 1. 피치가 서로 다른 두 개의 격자를 겹침으로 만들어지는 버니어 무아레 무늬들. (a)는 직선격자, (b)는 그것들의 겹침으로 만들어지는 버니어 무아레 무늬이다. 그리고 (c)는 원형격자, (d)는 그것들의 겹침으로 만들어지는 버니어 무아레 무늬이다.

2.2. 초점의 종이동 오차

렌즈 초점의 종이동 오차에 의해 버니어 무아레 무늬가 만들어지는 원리를 그림 2에 나타내었다. 시준렌즈 초점거리(f)의 위치(s 점)에 광원이 있을 때는 렌즈를 지난 광선은 평행하게 전파되므로 렌즈 바로 뒤에 설치한 무아레용 격자 G_1 의 피치 간격 P_1 이 일정하게 되지만, Δf 만큼 초점의 종이동 오차를 갖는 위치(s^* 점)에 광원이 있을 때는 G_1 격자로부터 두 번째 격자 G_2 까지의 거리인 L 에 대한 변화에 따라 격자 G_1 의 그림자 G_1^* 는 G_2 에서 피치 간격이 P_2 로 변하게 된다. 그리고 피치 간격이 G_1 과 같은 P_1 인 격자 G_2 를 거리 L 의 지점에 놓으면 피치 간격이 P_2 로 변한 격자 G_1 의 그림자 G_1^* 와 겹침으로써 버니어 무아레 무늬가 만들어진다. 따라서 버니어 무아레 무늬의 피치 간격 P 를 측정하면 렌즈 초점의 종이동 오차가 얼마나 되는지를 알 수 있다.

버니어 무아레 무늬의 피치 간격과 렌즈 초점의 종이동 오차와의 관계를 이론적으로 살펴보면 다음과 같다. 우선 렌즈 초점의 종이동 오차로 인해 생기는 발산각 θ 는 θ 가 아주 작다는 가정 하에서 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\theta = \frac{\theta}{2R} = \frac{D(P_2 - P_1)}{2(LP_1)} = \frac{D}{2L} \left(\frac{P_1}{P - P_1} \right) \tag{6}$$

여기에서 삼각형 닳은꼴에 의한

$$R = \frac{L(P - P_1)}{P_1} \tag{7}$$

을 사용하였다. (6)식에서 R 은 그림 2와 같이 s^* 점에 광원이 놓일 때, 렌즈에 의하여 발산하는 광이 그 연장선상에서 가상적으로 만나는 곳부터 렌즈까지의 거리이며, D 는 렌즈의 직경이다. 그리고 렌즈 초점의 종이동 오차로 인해 만들어진 파면의 곡률 반경 R 은 Gauss상공식과 $l = -(f \pm \Delta f)$ 및 $l' = R$ 이라는 결과를 사용하면,

$$R \approx \pm \frac{f^2}{\Delta f}$$

로 표현할 수 있다. 여기에서 l 과 l' 은 각각 물체 거리와 상 거리를 나타내며, \pm 에서 $+$ 는 수렴하는 그리고 $-$ 는 발산하는

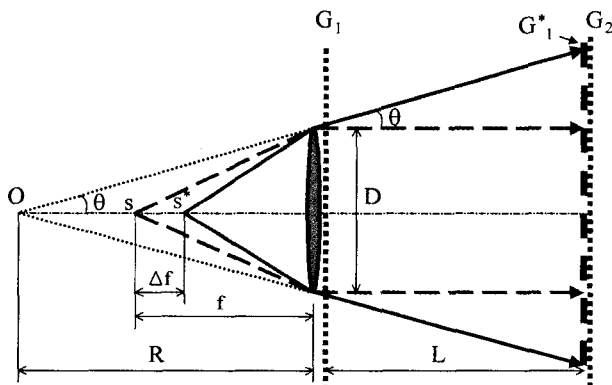


그림 2. 렌즈 초점의 종이동 오차에 의해 버니어 무아레 무늬가 만들어지는 원리를 보여 주는 기하학적인 개략도.

광에 대한 표현이다. 무아레 간섭법을 이용하여 측정할 경우 발산과 수렴하는 광에 대한 결과가 같기 때문에 $R = \frac{f^2}{\Delta f}$ 와 같이 쓸 수 있다.^[21] 그리고 이 관계식과 (7)식으로부터 렌즈 초점의 종이동 오차 Δf 는

$$\Delta f = \frac{f^2}{L} \left(\frac{P_1}{P - P_1} \right) \tag{8}$$

로 표현할 수 있다. 따라서 시준렌즈의 초점에 대한 종이동 오차는 그림 1과 (5)식에서 주어진 버니어 무아레 무늬의 피치 간격 P 를 측정함으로써 구할 수 있다.

버니어 무아레 무늬의 경우 실제 측정할 수 있는 무늬의 최대 간격은 겹쳐진 부분 전체에서 한 개의 무늬만 나타났을 경우로 생각할 수 있다. 따라서 측정할 수 있는 렌즈의 초점거리에 대한 초점의 종이동 오차의 비율 중 최소값을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta f}{f} \right)_{min} \approx \frac{f}{L} \left(\frac{P_1}{D - P_1} \right) \tag{9}$$

예를 들어, 초점거리가 65 mm이고 F/1.6인 렌즈를 피치 간격이 0.2 mm인 두 개의 동일 격자를 이용하여 거리 10 mm에서 버니어 무아레 무늬를 이용할 경우 렌즈 초점거리에 대한 초점의 종이동 오차의 비율을 최소 3%까지 측정할 수 있다. 그리고 인공위성 광학계와 같은 대구경 광학계의 결상 능력을 OTF를 이용하여 평가할 경우 렌즈의 직경이 큰 시준 장치를 사용하게 되는데 위의 (9)식에서와 같이 렌즈의 직경(D)이 커지면 $\frac{\Delta f}{f}$ 값은 더욱더 작은 범위에서 측정할 수 있다.

2.3. 렌즈의 색수차

버니어 무아레 무늬를 이용하여 파장이 다른 두 빛이 렌즈에 평행하게 입사했을 때 생기는 종색수차를 간단하게 구할 수 있다. 이러한 종색수차는 한 개의 파장에 대한 렌즈의 초점을 기준으로 잡았을 때, 다른 파장에 의해 생기는 렌즈 초점의 종이동 오차와 같은 원리로 구할 수 있다. 그림 3에서와 같이 파장 λ_F 와 파장 λ_C 에 대한 초점거리가 $f_F = A + \Delta f_F$ 와 $f_C = A + \Delta f_C$ 인 렌즈에 대해서 임의의 s^* 점을 기준으로 했을 때, 다음과 같이 두 파장에 의해서 생기는 렌즈 초점의 종이동

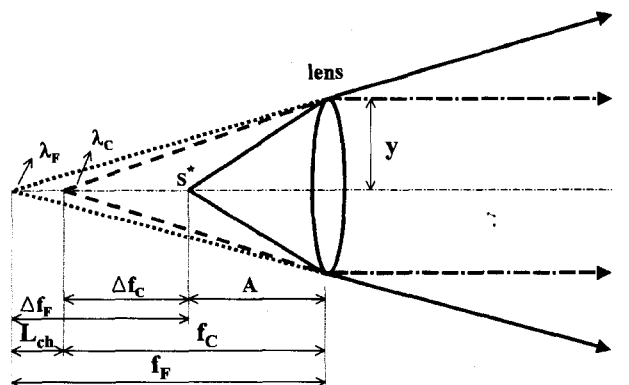


그림 3. 파장이 다른 두 빛이 렌즈에 평행하게 입사했을 때 생기는 종색수차를 보여 주는 기하학적인 개략도.

오차들(Δf_F 와 Δf_C)의 차이로 종색수차 L_{ch} 를 구할 수 있다.

$$L_{ch} = f_F - f_C = \Delta f_F - \Delta f_C \quad (10)$$

보통 무한 물체에 대한 렌즈의 종색수차를 측정하기 위해서는 Sodium-d(or D) line에 대해 기준점을 잡고 λ_F 와 λ_C 에 의한 초점위치를 각각 구하고 그 차이를 구하는 것이 옳다. 이러한 방법은 defocus 시키기 위한 정밀한 translator가 필요하다. 그리고 각각의 파장에 대해 정확한 초점위치를 측정해야 한다. 그러나 본 연구에서는 그러한 translator가 필요치 않으며, 각각의 파장에 대한 정확한 초점위치를 측정하지 않아도 쉽게 초점의 종이동 오차를 측정할 수 있는 방법을 제안한다. 위에서 언급했듯이 임의의 한 파장에 대해 렌즈의 물체점을 임의로 정할 경우 그 점이 정확하게 초점의 위치에 있지 않아서 초점의 종이동 오차로 인한 무아레 간섭무늬가 나타난다. 그 간섭무늬를 역으로 계산하면 그 파장에 대한 초점의 종이동 오차를 구할 수 있다. 마찬가지로 다른 파장을 갖는 광원을 동일한 물체점을 통과하게 한다면 그 파장에 대한 초점의 종이동 오차를 구할 수 있다. 따라서 각각의 파장에 대한 초점의 종이동 오차를 구하면 그 파장들에 의한 종색수차를 측정할 수 있다. 그러므로 각 파장에 대한 정확한 초점위치를 측정하지 않아도 간단하게 파장만 바뀌며 만들어지는 무아레 간섭무늬의 차이를 이용하여 종색수차를 측정할 수 있다.

III. 실험장치 및 방법

백색광원을 사용한 시준 장치의 시준 정도를 측정하기 위해 그림 4와 같은 실험장치를 구성하였다. 광원으로는 2800 K 이상의 색온도를 갖는 텅스텐 필라멘트 램프와 집광 렌즈 그리고 간유리를 이용하여 비가간섭성 광원을 만들고 대물렌즈(40X/0.65)의 초평면에 공간필터링을 하기 위해 핀홀(pinhole)을 사용하여 점광원을 만들었다. 이렇게 만들어진 점광원을 시준시키기 위해 초점거리가 120.0 mm이고 F/2.4인 렌즈(Spindler & Hoyer, #311159)를 사용하였다. 이때 시준 정도를 측정하기 위해서 0.2 mm의 동일한 피치 간격을 갖는 두 개의 격자를 거리를 10.0 mm만큼 띄우고 사용하였다. 그리고 두 개의 격자 중에서 뒤쪽의 격자에는 버니어 무아레 무늬를 쉽게 관찰할 수 있도록 기름종이로 만든 스크린을 부착하였다. 정렬을 쉽게 하기 위해 격자 두 개와 스크린을 하나의 몸체로 제

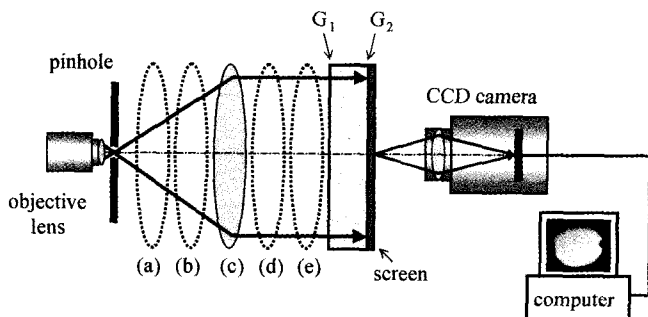


그림 4. 백색광원을 사용한 시준 장치의 시준 정도를 측정하기 위한 실험 장치도.

작하였으며, 격자는 직선격자쌍과 원형격자쌍들을 각각 사용하였다. 그리고 렌즈의 시준정도를 관찰하기 위하여 시준렌즈를 그림 4의 (a)-(e)까지 움직이면서 스크린에 나온 버니어 무아레 무늬를 2차원 CCD 카메라(삼성항공, BW-360ED)로 관찰하였다. 그리고 시준렌즈가 원형대칭을 이루고 있으므로 시준렌즈의 정렬정도에 의한 버니어 무아레 무늬를 보다 쉽게 분석하기 위하여 앞서 언급한 직선격자 대신에 동일한 피치의 원형격자쌍을 사용하였다. 관찰한 버니어 무아레 무늬의 피치 간격을 측정하여 (8)식을 사용한다면 시준렌즈의 초점에 대한 종이동 오차를 구할 수 있다.

그리고 버니어 무아레 무늬를 이용하여 서로 다른 파장의 빛이 렌즈에 입사할 때 나타나는 렌즈의 색수차를 측정하기 위하여 각각 $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$ 와 $\lambda_2 = 640 \text{ nm}$ 를 중심파장으로 통과시키는 band pass filter를 사용하였다. 그리고 색수차를 측정하기 위해 초점 거리가 65.0 mm이고 F/1.6 그리고 아베수가 64.1인 렌즈(Spindler & Hoyer, #311141)를 사용하였다. 색수차의 정도에 따라 버니어 무아레 무늬를 만들기 위해 피치 간격이 0.2 mm인 동일한 직선 격자를 10 mm 사이에 두고 평행하게 설치하였다. 이 때 두 직선격자는 시준장치(탈산각 10° 이내)를 이용하여 미리 정렬을 시켜 고정된 상태이다. 앞에서와 같이 측정을 용이하게 하기 위해 두 개의 격자와 스크린을 하나의 몸체로 제작하였다. 서로 다른 파장에 대한 렌즈의 색수차는 (10)식에서처럼 각각에 대한 렌즈의 초점 종이동 오차의 차이를 측정하면 된다.

IV. 측정결과 및 논의

그림 5의 사진들은 그림 4의 정렬에서 두 개의 동일한 직선 격자를 사용하였을 때, 렌즈 초점의 종이동 오차에 의해 만들어지는 버니어 무아레 무늬들을 보여준다. 그림 4(c), (b), (a)의 순서대로 시준렌즈가 대물렌즈 쪽으로 가까이 가면, 뒤쪽 스크린에 만들어지는 버니어 무아레 무늬의 그림자가 점점 커

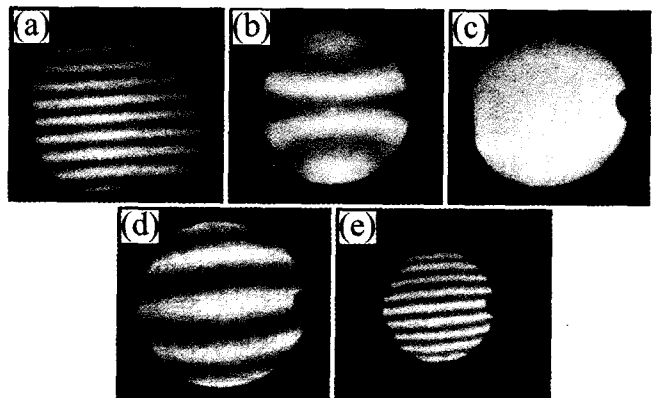


그림 5. 두 개의 동일한 직선 격자를 사용하였을 때, 렌즈 초점의 종이동 오차에 의해 만들어지는 버니어 무아레 무늬들. (a)와 (b)는 시준렌즈가 대물렌즈 쪽으로 이동하여 정렬됨으로써 초점의 종이동 오차가 생겼을 때의 결과이며, (c)는 시준되었을 때의 결과이고, (d)와 (e)는 대물렌즈로부터 시준렌즈가 멀어졌을 때의 결과이다.

짐을 알 수 있다. 반대로 그림 4(c), (d), (e)의 순서대로 시준 렌즈가 대물렌즈로부터 멀어지게 되면 버니어 무아레 무늬의 그림자가 점점 작아짐을 알 수 있다. 그리고 시준렌즈의 초점이 대물렌즈의 초점 위치에 놓이게 되면 버니어 무아레 무늬가 사라지면서 백색 광원이 시준되는 것을 알 수 있다. 또한 대물 렌즈의 초점으로부터 시준 렌즈까지의 거리가 시준 렌즈의 초점 거리보다 크거나 작아지면 버니어 무아레 무늬의 간격이 점점 좁아짐을 알 수 있다. 그리고 발산하는 경우와 수렴하는 경우에 시준렌즈의 가장자리에서 보이는 직선격자의 버니어 무늬가 서로 반대 방향으로 구부러져 있음을 알 수 있으며, 이로부터 초점거리 근방에 놓인 렌즈가 대물렌즈쪽으로 다가갔는지 또는 스크린쪽으로 다가갔는지를 구별할 수도 있다. 그림 5(a)-(e)까지에서 관찰된 버니어 무아레 무늬의 피치 간격을 측정하면, 앞의 (8)식에서의와 같이 렌즈 초점의 종이동 오차를 구할 수 있다. 그리고 버니어 무아레 무늬가 나타나지 않게 정렬하면 백색 광원을 쉽게 시준시킬 수 있다.

그리고 시준렌즈가 원형대칭인 시준렌즈의 정렬정도에 따라 생기는 버니어 무아레 무늬를 보다 쉽게 분석하기 위해서 앞서 언급한 직선격자 대신에 동일한 피치의 원형격자쌍을 사용하여 이 무늬들을 측정한 결과가 그림 6이다. 그림 6에서 (c)는 시준렌즈가 잘 시준되었을 때의 결과이며, (a)와 (b)는 시준렌즈가 대물렌즈 쪽으로 이동하여 정렬됨으로써 초점의 종이동 오차가 생겼음을 나타낸다. 반대로 (d)와 (e)는 대물렌즈로부터 시준렌즈가 멀어졌음을 나타낸다. 직선격자를 사용한 그림 5의 경우와는 다르게 그림 6(b)와 (d)의 버니어 무아레 무늬는 거의 동일하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 버니어 무아레 무늬의 피치 간격을 측정하면 앞에서 언급한 (6)식과 (8)식을 이용하여 발산각과 렌즈 초점의 종이동 오차를 구할 수 있다. 여기에서 측정한 결과 발산각(θ)은 0.0038° 이며, 시준렌즈의 초점에 대한 종이동 오차(Δf)는 21.9 mm 이었다. 마찬가지로 그림 6(a)와 (e)도 거의 동일한 버니어 무아레 무늬를 보여주며, 이들의 경우에 있어서 발산각과 렌즈초점의 종이동 오차는 각각 0.066° 와 38.0 mm 이었다. 특히 원형격자를

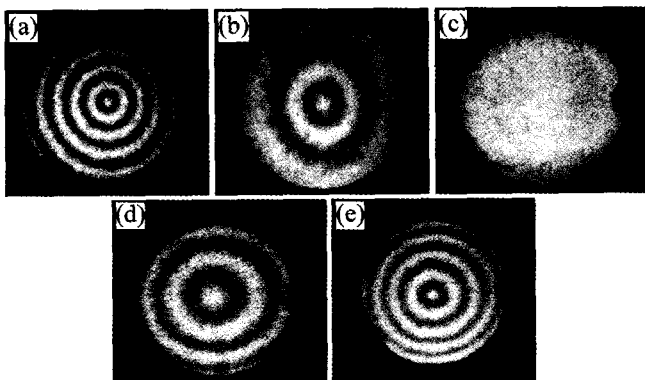


그림 6. 두 개의 동일한 원형 격자를 사용하였을 때, 렌즈 초점의 종이동 오차에 의해 만들어지는 버니어 무아레 무늬들. (a)와 (b)는 시준렌즈가 대물렌즈 쪽으로 이동하여 정렬됨으로써 초점의 종이동 오차가 생겼을 때의 결과이며, (c)는 시준되었을 때의 결과이고, (d)와 (e)는 대물렌즈로부터 시준렌즈가 멀어졌을 때의 결과이다.

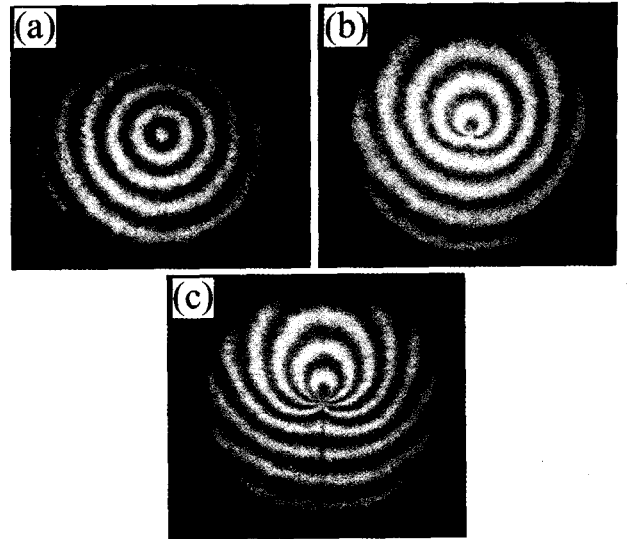
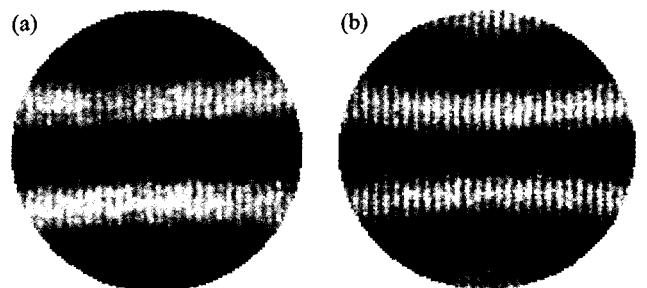


그림 7. 시준 렌즈가 광축으로부터 위 쪽 방향으로 벗어났을 때의 결과를 보여 주는 버니어 무아레 무늬들이다. (a)는 시준 렌즈의 중심이 광축상에 정렬되었을 때의 버니어 무아레 무늬이고, (b)는 광축으로부터 약간 위쪽으로 벗어났을 때이며, (c)는 (b)보다 더 많이 벗어났을 때의 무늬이다.

사용한 경우에는 직선격자를 사용할 때보다 시준렌즈가 광축에서 수직으로 벗어난 정도를 쉽게 알 수 있다. 그림 7은 그림 6의 (a)의 경우에 있어서 시준렌즈가 광축으로부터 위쪽 방향으로 벗어남에 따라 그림 7(a), (b), (c)와 같이 위쪽으로 버니어 무아레 무늬의 방향이 휘어져 있음을 알 수 있다. 이러한 원형격자의 무아레 무늬에 대한 해석은 이미 참고문헌 [7]과 [8]에 자세히 해석되어 있다. 따라서 한 쌍의 원형격자를 사용하면 그림 7과 같은 버니어 무아레 무늬를 통하여 광축상에서 백색광원을 정밀하고 쉽게 정렬시킬 수 있으며, 그림 6과 같은 버니어 무아레 무늬들로부터 이 시준렌즈의 초점거리에 정확히 백색광원을 정렬할 수가 있다.

그림 8은 초점거리가 65 mm 이고 $F/1.6$ 그리고 아베수가 64.1 인 렌즈의 경우에 있어서 직선격자를 사용하였을 때의 버니어 무아레 무늬로부터 색수차를 측정할 결과들이다. 그림 8



$P = 7.45 \text{ mm}$ (파장 480 nm) $P = 6.58 \text{ mm}$ (파장 640 nm)

그림 8. 초점거리가 65 mm 이고 $F/1.6$ 그리고 아베수가 64.1 인 렌즈의 경우에 있어서 버니어 무아레 무늬로부터 색수차를 측정할 결과들이다. (a)는 파장이 $\lambda_1 = 480 \text{ nm}$ 일 때 나타난 버니어 무아레 무늬이며, (b)는 파장이 $\lambda_2 = 640 \text{ nm}$ 일 때 나타난 버니어 무아레 무늬이다.

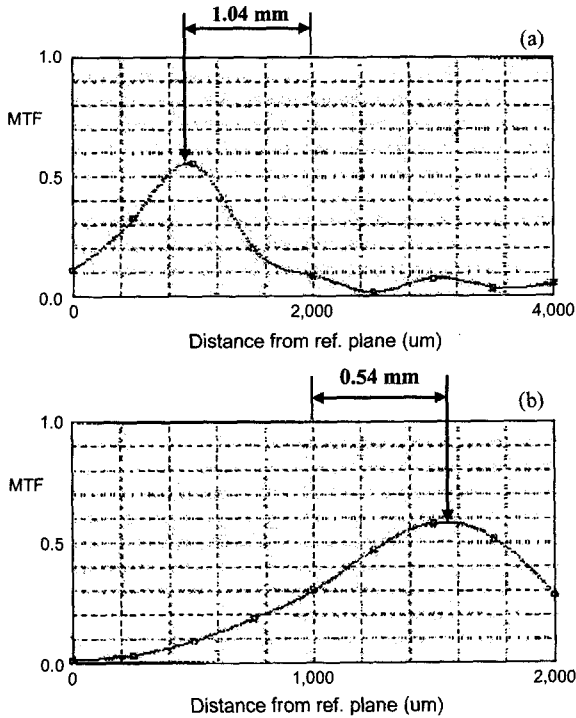


그림 9. 초점거리가 65 mm이고 F/1.6 그리고 아베수가 64.1인 렌즈의 경우에 있어서 자동 초점방법을 이용하여 종색수차를 측정된 결과들이다. (a)는 파장 $\lambda = 546$ nm를 기준으로 파장 $\lambda_1 = 480$ nm의 초점 종이동오차이며, (b)는 파장 $\lambda = 546$ nm를 기준으로 파장 $\lambda_2 = 640$ nm의 초점 종이동오차이다.

의 (a)는 파장이 $\lambda_1 = 480$ nm일 때 나타난 버니어 무아레 무늬이며, 그림 8(b)는 파장이 $\lambda_2 = 640$ nm일 때 나타난 버니어 무아레 무늬이다. 버니어 무아레 무늬의 피치 간격 P 를 측정된 결과, 각각 7.45 mm와 6.58 mm이다. 그리고 그 결과를 (8)식에 대입하면 렌즈 초점의 종이동 오차를 구할 수 있는데, 각각 11.66 mm와 13.25 mm이었다. 따라서 파장이 480 nm와 640 nm에서 렌즈의 종색수차는 (10)식에 따라서 이 값들의 차이인 $L_{ch} = 1.59$ mm (± 0.1 mm)이었다. 렌즈에 의한 종색수차를 구하기 위해 무아레 간섭법을 이용하여 측정된 값과 비교할 수 있는 다른 측정 방법을 찾아 측정하였다. 임의의 공간 주파수에서 임의의 파장에 대한 렌즈의 결상 능력을 평가하는 OTF(Optical Transfer Function) 측정 방법을 이용하여 최대 MTF(Modulation Transfer Function)값을 갖는 위치인 최적초평면(Best Focal Plane)을 찾는 자동초점방법(Autofocus Method)이 있다.^[19] 그림 9는 초점거리가 65 mm이고 F/1.6 그리고 아베수가 64.1인 렌즈의 경우에 있어서 자동초점방법을 이용하여 종색수차를 측정된 결과들이다. (a)는 파장 $\lambda = 546$ nm를 기준으로 파장 $\lambda_1 = 480$ nm의 초점 종이동오차이며, (b)는 파장 $\lambda = 546$ nm를 기준으로 파장 $\lambda_2 = 640$ nm의 초점 종이동오차이다. 파장이 480 nm와 640 nm에서 렌즈의 종색수차는 $L_{ch} = 1.04$ mm + 0.54 mm = 1.58 mm (± 0.01 mm)이었다. 그러므로 자동초점방법을 이용하여 측정된 결과와 무아레 간섭법을 이용하여 측정된 결과인 1.59 mm(± 0.1 mm)와 거의

일치함을 알 수 있었다.

V. 결 론

본 연구에서는 버니어 무아레 무늬를 이용하여 백색 광원을 사용한 시준 장치의 시준 정도를 측정하기 위한 방법을 제안하였다. 피치 간격이 동일한 직선격자 쌍과 원형격자 쌍들을 각각 사용하여, 시준 정도에 따라 만들어지는 버니어 무아레 무늬를 분석하였다. 직선격자 쌍들을 사용한 경우에는 시준의 정도와 발산 또는 수렴의 정도를 예측할 수 있었다. 그리고 원형 격자를 사용한 경우에는 직선격자를 사용한 경우와 같이 시준렌즈의 시준정도도 측정할 수 있었으며, 동시에 시준렌즈가 광축에서 수직으로 벗어났을 때의 결과를 버니어 무아레 무늬를 통하여 쉽게 볼 수 있었다. 즉, 시준렌즈가 광축으로부터 벗어난 방향으로 버니어 무아레 무늬의 방향이 휘어져 있음을 알 수 있었다. 그리고 이를 이용하여 백색광원을 정밀하게 시준하기 위한 정렬 방법을 제안하였다. 또한 버니어 무아레 무늬를 이용하여 시준 렌즈의 미소한 초점 종이동 오차 뿐만 아니라 그때의 발산각을 계산하였다. 그리고 마지막으로 버니어 무아레 무늬를 이용한 또 다른 응용으로 중심 파장이 각각 $\lambda_1 = 480$ nm와 $\lambda_2 = 640$ nm인 band pass filter를 사용하여 초점 거리가 65.0 mm이고 F/1.6 그리고 아베수가 64.1인 렌즈의 종색수차를 버니어 무아레 무늬를 이용하여 측정하였다. 자동초점방법을 이용하여 측정된 결과, $L_{ch} = 1.58$ mm (± 0.01 mm)와 무아레 간섭법을 이용하여 측정된 결과인 1.59 mm (± 0.1 mm)와 거의 일치함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. Patorski, *Handbook of the Moiré Fringe Technique* (Warsaw University of Technology, Poland, 1993).
- [2] K. C. Yuk, J. H. Jo, and S. Chang, *Appl. Opt.* **33**, 130 (1994).
- [3] J. H. Jo, K. C. Yuk, and S. Chang, *Jpn. J. Appl. Phys (Part 2)* **33**(11A), L1565 (1994).
- [4] 육근철, 조재홍, 장 수, *새물리* **33**, 166 (1993).
- [5] 김종수, 조재홍, 장 수, 육근철, *새물리* **35**, 312 (1995).
- [6] 육근철, 최완해, 조재홍, 장 수, *응용물리* **10**, 108 (1997).
- [7] 김일환, 육근철, 조재홍, 장 수, *새물리* **32**, 674 (1993).
- [8] 김종수, 조재홍, 장 수, 육근철, *새물리* **34**, 146 (1994).
- [9] 이영호, 김봉진, 조재홍, 장 수, 육근철, *응용물리* **10**, 94 (1997).
- [10] 조선미, 육근철, 조재홍, 장 수, *한국광학회지*, **9**, 9 (1998).
- [11] 문일규, 육근철, 조재홍, 장 수, *물리교육* **17**, 125 (1999).
- [12] 육근철, 손영택, 김봉진, 조재홍, 장 수, *물리교육* **17**, 131 (1999).
- [13] B. J. Kim, J. S. Song, J. T. Kim, J. H. Jo, S. Chang, and K. C. Yuk, *Appl. Opt.* **36**, 2848 (1997).
- [14] J. S. Song, Y. H. Lee, J. H. Jo, S. Chang, and K. C. Yuk, *Opt. Commun.* **154**, 100 (1998).
- [15] J. C. Fouér and D. Malacara, *Appl. Opt.* **13**, 1322 (1974).
- [16] M. P. Kothiyal and R. S. Sirohi, *Appl. Opt.* **26**, 4046 (1987).

- [17] D. Malacara, *Optical Shop Testing* (John Wiley and Son, New York, 1978) Chapter 4, 9.
- [18] Y. W. Lee, H. M. Cho, and I. W. Lee, *Opt. Eng.* **32**, 2837 (1993).
- [19] 이윤우, 조현모, 이인원, 홍경희, *응용물리*, **3**, 153 (1990).
- [20] L. O. Vargady, *Appl. Opt.* **3**, 631 (1964).
- [21] J. C. Fouéré and D. Malacara, *Appl. Opt.* **13**, 1322 (1974).

Collimation testing of a white light beam and measurement of chromatic aberration of a lens by using vernier Moiré fringe patterns

J. S. Song, J. H. Jo, and S. Chang

Dept. of Physics, Hannam University, Taejon 306-791, Korea

Y. W. Lee, H. M. Cho, and I. W. Lee

Image Tech. Group, KRISS, Taejon 305-600, Korea

K. C. Yuk

Dept. of Physics Education, Kongju National University, Kongju 314-701, Korea

(Received February 21, 2000, Revised manuscript received July 14, 2000)

The new collimation testing technique of a white light beam using vernier Moiré fringes of two line or circular gratings with different pitches is presented. We can visually measure the defocusing (Δf), the divergence angle (θ), and the longitudinal chromatic aberration (L_{ch}) of a collimating lens by using the technique. For example, we obtained $\Delta f = 21.9$ mm and $\theta = 0.0038^\circ$ for a testing lens with the focal length $f = 120.0$ mm and F-number of F/2.4. The longitudinal chromatic aberration L_{ch} of another testing lens with $f = 65.0$ mm, F/1.6, and the Abbe number $V = 64.1$ for the incident wavelengths of $\lambda_1 = 480$ nm and $\lambda_2 = 640$ nm is easily measured by same technique. It is found that the measured value $L_{ch} = 1.59$ mm (± 0.1 mm) is well agreed with $L_{ch} = 1.58$ mm (± 0.01 mm) obtained by the autofocus method.

OCIS codes : 080.2740, 120.4120.