《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 16, Number 3, June 2005

Dual-Beam Shearography를 이용한 물체의 내부결함 측정

함효식 · 최성을†

인천대학교 자연과학대학 물리학과

㉾ 402-749 인천광역시 남구 도화동 177 번지

(2005년 3월 15일 받음, 2005년 6월 13일 수정본 받음)

본 연구에서는 물체의 내부 결함 측정을 위해서 레이저 스페클에 바탕을 둔 dual-beam shearography 기술을 이용하였다. 층 밀림을 만들기 위해서는 여러 가지 간섭계 중에서 마이켈슨 층 밀림 간섭계를 사용하였다. 열전도도가 낮은 아크릴 판 내부에 인위적인 결함을 만들어서 시료로 사용하였다. 시료에 레이저 beam을 조사하여 산란된 빛을 마이켈슨 층 밀림 간섭계를 통하여 스페클 간섭무늬를 얻었으며, 위상이동기술을 통하여 위상도를 얻었다. 단일 beam을 시료에 조사할 경우, 물체의 변형의 in-plane과 out-of-plane 성분이 혼합된 상태로 측정되기 때문에 결함에 대한 정확한 분석이 불가능하다. 따라서 두 성분을 분리하기 위해서 dual-beam shearography 기술을 도입하였다. 내부 결함이 있는 시료에 이중 beam을 조사하여 변형 전의 간섭 스페클을 얻고, 약간의 전기 열을 가하여 미세한 변형을 가한 후의 간섭스페클을 얻은 후 의 위상도를 얻은 후 LS filtering과 unwrapping 처리를 통하여 내부 결함 부위를 쉽게 알아볼 수 있도록 하였을 뿐 아니라, 외력에 의한 물체의 미세 변형에 따른 결함 부위에서의 in-plane과 out-of-plane 변형성분의 위상도와 대략적인 변형 정도를 알아낼 수 있었다. 전기 열에 의한 내부결함이 있는 아크릴 판의 변형은 주로 z 방향 (out-of-plane)으로 일어났으며 이것은 낮은 열전도도 때문이라는 예측과 잘 일치하였다.

주제어 : Dual-beam shearography, Michelson shearing interferometer, Inner defects, Phase map, LS filtering

I. 서 론

표면 변위의 미분 측정을 위한 shearography 기술은 Leendertz와 Butters[1] 그리고 Hung과 Taylor[2]에 의해 각각 독립적으로 제시되었다. ESPI (electronic speckle pattern interferometry)는 주변의 미세한 진동이나 온도 변화, 기압 변화 등의 요소에도 많은 영향을 받기 때문에 조건이 맞추어져있는 실험실을 떠나서는 사용하기가 매우 힘들었다. 이러한 단점은 shearography의 방법이 개발되면서 어느 정도 보완되었다.

Shearography는 응력 (strain) 분포의 전 영역에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 공동의 optical path를 사용하는 장치의 특성과 측정되는 phase가 변위의 미분 값을 준다는 점에서 강체의 운동이나 그 밖의 진동 등에 의해 발생되는 noise에 덜 민감하다는 장점을 갖고 있다. 그러나 shearography 방법에 의해 얻어지는 무늬는 상당한 수학적 해석이 필요하다고 할 수 있다.

층 밀림의 방법에는 Michelson shear interferometer, Hung의 biprism shearing technique, double-aperture shear interferometer, three-aperture shear interferometer, 그리고 dual-beam illumination technique 등 다양한 shearing 기술들[3]이 있지만 모두가 위상이동에 적용되지는 않는다. 현재까지는 Michelson shear interferometer[4]가 위상의 이동에 가장 적합하다고 알려져 있으며 본 연구에서도 이 방법을 채택하여 실험 장치의 일부로 사용하였으며, 특히 dual-beam에 의한 방법[5]을 적용하여 dual-beam shearing interferometer를 구성하였다.

†E-mail: schoi@incheon.ac.kr

이것은 서로 다른 두 방향 beam에 의한 산란광이 Michelson shear interferometer에 의하여 층 밀림이 일어날 때 간섭 스페클을 형성하는 원리를 이용한 것이다.

물체의 한 점으로부터 나오는 빛이 층 밀림에 의해 마치 다른 두 점에서 나오는 것처럼 보이는데 이 두 빛의 광 경로차에 따른 위상차는 위상이동 방법으로 구할 수 있다.

이 위상이동 방법을 적용하여 그 물체의 다른 두 상태, 즉 변형 전과 변형 후에 해당하는 두 간섭된 스페클 무늬를 서로 빼서 비교할 때, 층 밀림의 방향과 같은 방향의 변위 즉 in-plane에서의 위상도가 형성된다. 또 두 간섭된 스페클 무늬를 서로 더해서 비교할 때, 층 밀림의 방향과 수직 방향의 변위 즉 out-of-plane의 위상도가 형성된다. 이와 같이 상관 fringe를 층 밀림 방향에 대하여 편미분을 적용함으로써 내부 결함에 따른 표면의 상태 및 변화에 대한 정보를 얻어낼 수 있다.

본 논문에서는 내부에 구멍을 뚫은 아크릴 판을 내부 결함이 있는 시료로 사용하여 dual-beam shearography 기술을 통하여 시료의 내부 결함 부위를 찾아내고 외력에 의한 물체의 미세 변형에 따른 결함 부위에서의 in-plane과 out-of-plane 변형 성분의 위상도와 변형 정도를 알아보고자 한다.

II. 이 론

2.1. Shearography 이론

Shearography에 관한 이론[6,7]은 잘 알려져 있고 또 여러 책[8,9]에도 기술되어 있다. 시료 위의 한 점 $P(x, y)$와 층 밀림에 의한 이동점 $P(x+\Delta x, y)$에서 나온 빛이 CCD 위의 한 점

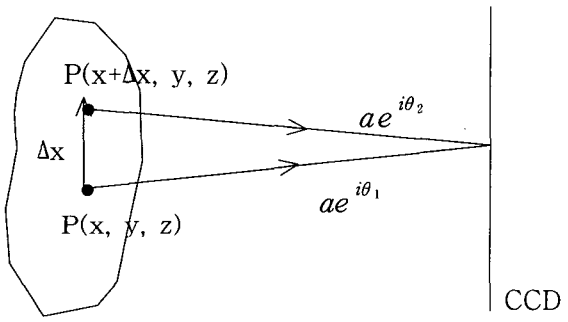
에 간섭상을 맺는다. 여기서 Δx는 시료 면에서의 층 밀림에 따른 이동변위를 나타낸다. 이 경우 별도의 기준 파를 만들어줄 필요가 없다. 왜냐하면 한 점에서 나온 빛은 또 다른 점에서 나온 빛에 대해서 기준파가 되기 때문이다. 그림 1 (a)은 물체가 변형되지 않은 경우 층 밀림에 의한 간섭을 나타낸 그림이며, 그림 1 (b)은 물체가 변형되었을 때의 층 밀림에 의한 간섭을 나타낸 그림이다. 물체가 변형되기 전의 층 밀림에 의한 간섭무늬의 밝기분포 (I_1)는 다음과 같다.

$$I_1 = a_1^2(x,y,z) + a_2^2(x+\Delta x,y,z) + 2a_1(x,y,z)a_2(x+\Delta x,y,z)\cos\theta \tag{1}$$

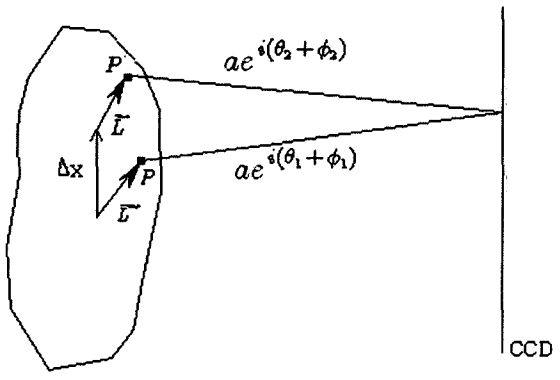
만일 두 파가 서로 같은 진폭을 가질 경우에는 $a_1(x,y,z)$과 $a_2(x+\Delta x,y,z)$는 같으므로 위의 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_1 = a^2(x,y,z) + a^2(x+\Delta x,y,z) + 2a(x,y,z)a(x+\Delta x,y,z)\cos\theta \tag{2}$$

여기서 $a(x,y,z)$과 $a(x+\Delta x,y,z)$는 물체의 한 점에서 나온 빛과 그 점의 층 밀림(Δx)에 의해 이동된 점으로부터 나오는 각각의 빛의 진폭이며, θ는 두 파의 위상차 즉 $\theta_2-\theta_1$을 나타낸다.



(a)



(b)

그림 1. 변형 전 물체의 한점에서 나온 빛과 그 점이 층밀림 (Δx)으로 인하여 이동된 점으로부터 나온 빛의 간섭 (a)과 두 점이 변형 ($\vec{L}$)으로 인하여 이동된 두 점으로부터 나온 빛의 간섭 (b).

물체가 변형된 후 진폭이 같은 두 빛에 의한 간섭무늬의 밝기분포(I_2)는 다음과 같다.

$$I_2 = a^2(x,y,z) + a^2(x+\Delta x,y,z) + 2a(x,y,z)a(x+\Delta x,y,z)\cos(\theta+\phi) \tag{3}$$

여기서 ϕ는 변형에 의한 추가적인 위상 차이, 즉 $\phi_2-\phi_1$을 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$\phi = \phi_2-\phi_1 = (k_2-k_1)L(x+\Delta x,y) - (k_2-k_1)L(x,y) \approx (k_2-k_1)\frac{dL(x,y)}{dx}\Delta x \tag{4}$$

여기서 $L(x,y)$와 $L(x+\Delta x,y)$은 각각 층 밀림 되지 않은 물체의 한 점 $P(x,y)$와 층 밀림 된 물체의 한 점 $P(x+\Delta x,y)$에서 변형에 의해 이동된 두 점의 변형벡터를 나타내고, k_2와 k_1은 각각 빛의 관측 방향과 조사 방향을 나타내는 벡터이다. 이 두개의 전파 벡터는 모두 xz 평면상에 놓여 있다고 가정하고 시료의 오른쪽과 왼쪽에서 입사하는 beam에 의한 위상차 ϕ_R, ϕ_L을 각각 구하면 다음과 같이 주어진다.[10]

$$\phi_R = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{\sin\theta_i\frac{\partial u}{\partial x} + (1+\cos\theta_i)\frac{\partial w}{\partial x}\right\}\Delta x \tag{5}$$

$$\phi_L = \frac{2\pi}{\lambda}\left\{-\sin\theta_i\frac{\partial u}{\partial x} + (1+\cos\theta_i)\frac{\partial w}{\partial x}\right\}\Delta x \tag{6}$$

여기서 u,v,w는 변형벡터 $L=(u\hat{i}+v\hat{j}+w\hat{k})$의 성분이며, θ_i는 입사광과 물체에 수직인 방향이 이루는 각을 나타낸다. 그리고 물체는 결상광학계의 광축에 대하여 수직으로 놓여있다. 따라서 위의 식 (5)과 (6)에서 위상차는 in-plane의 x방향의 성분 u와 out-of-plane의 z방향의 성분 w의 x에 대한 미분의 합의 형태로 주어짐을 알 수 있다.

z축 방향의 변형의 층 밀림 방향 x에 대한 미분 값, 즉 $\frac{\partial w}{\partial x}$는 식 (5)과 (6)의 합으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_R+\phi_L = 2\frac{2\pi}{\lambda}(1+\cos\theta_i)\frac{\partial w}{\partial x}\Delta x \tag{7}$$

또한 x축 방향의 변형의 층 밀림 방향 x에 대한 미분 값, 즉 $\frac{\partial u}{\partial x}$는 식 (5) 와 (6)의 차로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi_R-\phi_L = 2\frac{2\pi}{\lambda}(\sin\theta_i)\frac{\partial u}{\partial x}\Delta x \tag{8}$$

2.2. 위상이동방법 이론

위상이동방법에서는 변형 전 두 점의 위상차 θ는 위상을 $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$로 변화시키면서 식 (9)과 같이 각각의 간섭무늬의 밝기를 구한 후 식 (10)을 이용하여 구하면 된다. 각 위상에서의 밝기 분포로 다음과 같다.

$$I_1 = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta)$$
$$I_2 = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\frac{\pi}{2})$$
$$I_3 = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\pi)$$
$$I_4 = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\frac{3\pi}{2}) \quad (9)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}\right) \quad (10)$$

또, 변형 후의 위상의 변화는 $\theta+\phi$이므로 변형 후의 위상차 $\theta+\phi$도 마찬가지 방법으로 구하면 다음과 같다.

$$I_1' = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\phi)$$
$$I_2' = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\phi+\frac{\pi}{2})$$
$$I_3' = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\phi+\pi)$$
$$I_4' = a^2(x,y) + a^2(x+\Delta x,y) + 2a(x,y)a(x+\Delta x,y)\cos(\theta+\phi+\frac{3\pi}{2}) \quad (11)$$

마찬가지로 식 (11)에서 위상차 $\theta+\phi$는 다음과 같다.

$$\theta+\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_2' - I_4'}{I_3' - I_1'}\right) \quad (12)$$

따라서 변형으로 인한 위상의 변화 ϕ는 식 (10)과 (12)로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_2' - I_4'}{I_3' - I_1'}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{I_2 - I_4}{I_3 - I_1}\right) \quad (13)$$

III. 장치구성 및 실험결과

3.1. 이중 beam 층 밀림 간섭계의 장치 구성

본 연구에서 사용된 이중 beam 층 밀림 간섭계의 실험장치도는 그림 2와 같다. 광원으로는 최대 출력 20 mW, 파장 632.8 nm의 선편광 He-Ne 레이저(Uniphase사의 1135P)를 사용하였다. 간섭무늬를 얻기 위한 CCD 카메라(Pulnix사의 TMC-7)

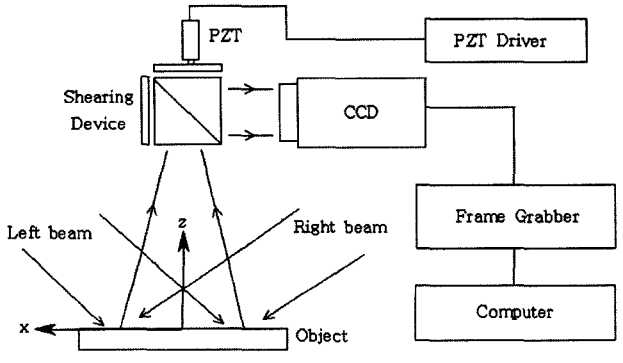


그림 2. Dual-beam shearing interferometer의 구성도.

는 640 × 480픽셀의 해상도를 갖는다.

레이저 beam이 광선 분할기(BS_1)에서 좌우 각각 50:50으로 나뉘어 진다. 좌우로 나누어 진 빛은 각각 좌우의 거울(M_1과 M_2)에서 반사되고 광선 확대기(BE_1, BE_2)를 지나서 약 45°의 각으로 물체에 조사된다. 물체에서 산란된 빛 중 일부가 중앙의 Michelson 층 밀림 장치로 들어가면 광선 분할기(BS_2)에 의해 다시 두 beam으로 나누어진다. 두 beam 중 하나는 약간 기울어진 거울(M_4)에서 반사되어 나오고 다른 하나는 PZT(Spindler & Hoyer의 P3-150)가 부착되어있는 이동 거울(M_3)에서 반사되어 광선 분할기(BS_2)에 의해 두 beam은 함께 CCD를 향하게 된다. 이때, 기울인 거울(M_4)에 의해 반사된 빛과 이동 거울(M_3)에 의해 반사된 빛은 CCD 면에서 조금 어긋나서 겹쳐지게 되는데 이를 층 밀림 되었다고 한다. 층 밀림에 의한 두 beam은 CCD 면에서 서로 간섭을 일으키게 된다. CCD에 의해 기록된 간섭무늬는 PC 안에 내장되어있는 frame grabber(Metrox사의 Meteor I)에 의해 디지털 신호로 처리되어 PC에 저장된다.

간섭무늬를 획득하기 위한 program으로는 Metrox사의 Inspect(ver. 2.1)를 사용하였고, 상을 처리하여 위상을 얻어내는 작업은 Mathworks사의 Matlab(ver. 5.3) Image Processing Tool을 사용하였다.

한쪽 거울(M3)에는 PZT를 부착하여 $\frac{\lambda}{8}$ 만큼씩 움직일 수 있게 하였으며, 다른 쪽 거울(M_4)은 optical mount에 부착하여 기울기를 마음대로 조절할 수 있도록 하였다. 거울(M_3)의 이동을 보다 미세하게 조절하기 위해 PZT driver의 dial knob에 원통형의 보조 대를 장착한 후 보조 대와, 반경이 작고 눈금자가 달린 조정나사를 belt에 연결하여 사용하였다.

PZT 장치를 보정하기 위하여 M_4를 기울이지 않은 상태인 일반적인 Michelson 간섭계로 만들어 간섭무늬를 얻는다. 다음으로 PZT driver의 전압을 조절하는 dial을 시계방향으로 돌려주면 digital display의 수치가 변하면서 전압이 올라간다. 전압이 올라감에 따라 PZT는 아주 미세하게 CCD 방향으로 움직이게 되는데, 이때 PZT에 부착된 거울 M_3도 같이 움직이면서 한 쪽 beam의 광 경로가 조금씩 줄어들게 된다. 광 경로의 변화에 의해 간섭무늬가 반복적으로 변하게 되는데 같은 간섭무늬의 반복된 횟수(n)와 PZT에 부착된 mirror (M_3)의 이동거리 (d)의 관계는 $2d = n\lambda$이다.

본 장치에서는 보조 조정나사에 부착된 scaler의 눈금이 22만큼 움직일 때 2π의 위상이동이 생겼고, $\frac{\pi}{2}$의 위상이동을 위해서 조정나사의 눈금을 5.5만큼 돌려주었다.

3.2. 시료 제작

시료로는 내부 결함이 있는 아크릴 판을 시료로 사용하였다. 아크릴 판 시료는 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 가로 90 mm, 세로 50 mm, 두께 10 mm의 아크릴 판을 사용하였다. 내부 결함을 만들기 위해서 판의 중앙에 앞면으로부터 3 mm 위치에 세로 방향으로 구멍을 뚫는다. 구멍의 크기는 직경 1.5 mm, 깊이 25mm 정도이다. 그리고 그 구멍 속으로 직경 0.3

mm의 니크롬선을 넣은 후, 빈 공간은 시안화 아크릴레이트로 채워서 니크롬선과 아크릴 판이 접착되도록 하였다.

시료 앞면에 beam이 조사되는 영역 전체에서 빛이 균일하게 산란되게 하기 위해 그림 3 (b)과 같이 시료의 앞면에 스프레이를 고르게 뿌려주었다. 스프레이는 Diffu-therm사의 비파괴검사 전용 스프레이인 Developer BEA (EN ISO 3452)를 사용하였다.

6V의 직류전원에 니크롬선을 연결하여 전기 열을 발생시키도록 하였다. 시료를 이렇게 만든 이유는 두 가지를 들 수 있다. 하나는 니크롬선에서 발생하는 열이 시료와 니크롬선이 직접 닿는 부분에 집중적으로 가해지고 점차 이웃한 다른 부분까지 열전달이 일어나면서 시료에 열적 미세변형을 주기 위해서이고, 다른 하나는 니크롬선과 시안화 아크릴레이트가 채워진 구멍이나 뒷면의 홈은 일종의 결함부분의 역할을 하기 때문이다.

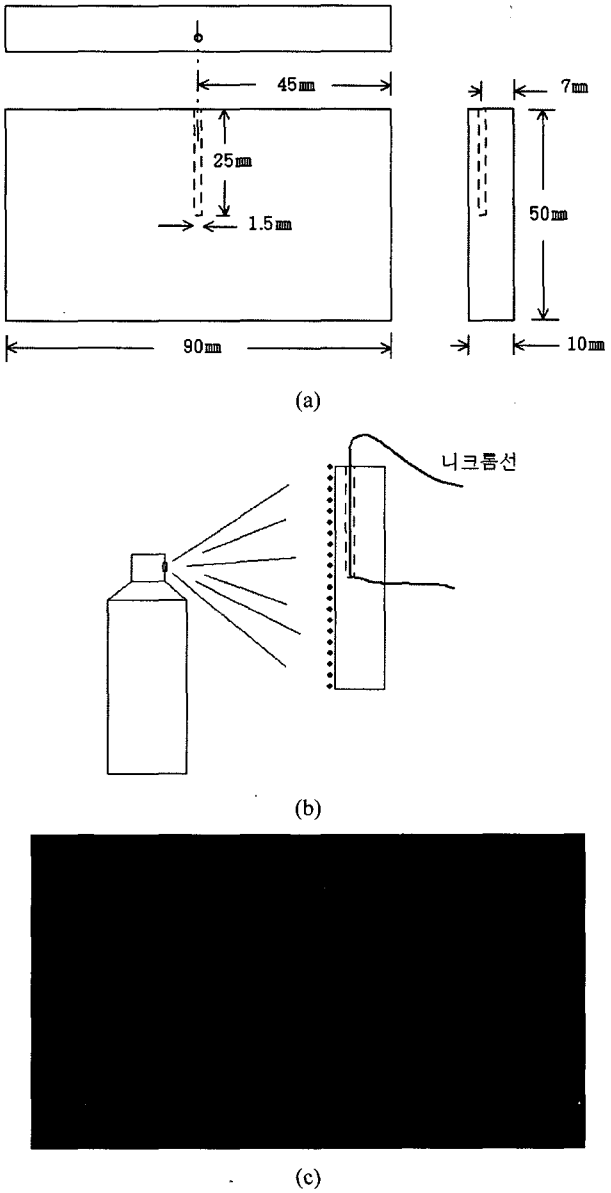


그림 3. 아크릴 판 시료의 크기 (a), 시료 표면에 빛 산란용 스프레이 작업 및 니크롬선 삽입도 (b), 그리고 실제 아크릴 판 시료의 사진 (c).

3.3. 내부 결함측정 및 결과 분석

Single beam을 이용하여 변형에 의한 내부 결함을 측정하는 경우 결함의 위치와 대략적인 형태를 알아낼 수 있다. 그러나 측정한 위상 도에는 in-plane과 out-of-plane에 대한 위상성분이 겹쳐서 나타나기 때문에 변형에 대한 정확한 분석은 어렵다. Single beam을 이용하여 phase를 측정하는 경우에는 식 (5)나 (6)에서 보는 바와 같이 한 phase map에 in-plane과 out-of-plane에 대한 두 위상정보가 겹쳐서 나타난다는 것을 알 수 있다. 이 위상 도에는 x축 방향에 대한 변형정보($\frac{\partial u}{\partial x}$: in-plane)와 z축 방향에 대한 변형정보($\frac{\partial w}{\partial x}$: out-of-plane)가 미분형태로 모두 들어있다.

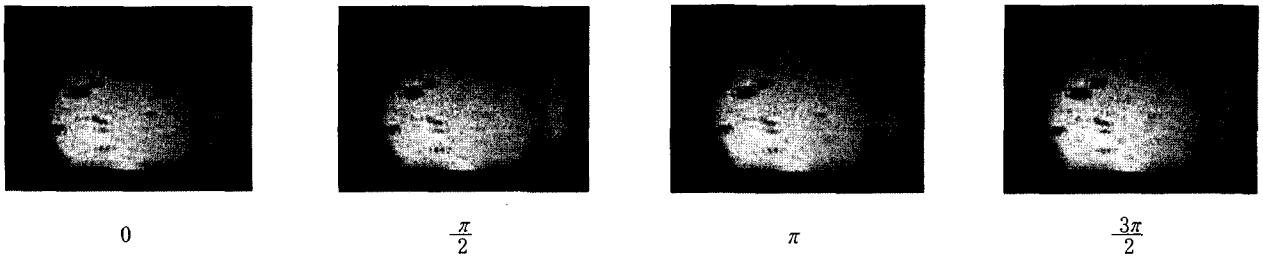
보다 정확한 분석을 위해서는 이 두 방향성분을 분리해내어야 한다. 그러나 single beam을 이용하여 측정하게 되면 ϕ_R이나 ϕ_L의 하나의 phase만 얻을 수 있고, 하나의 phase에서 in-plane에 대한 변형 정보와 out-of-plane에 대한 변형 정보를 분리해 내는 것은 불가능하다. 하지만 ϕ_R과 ϕ_L의 두 data를 모두 얻을 수 있으면 이 둘을 서로 더하거나 빼서 이 두 변형 정보의 성분을 분리해 낼 수가 있다.

물체의 변형을 정확하게 분석하기 위해서는 이 두 성분을 분리하여 해석할 필요가 있다. In-plane과 out-of-plane에 대한 위상정보를 분리하기 위해서는 서로 다른 두 방향에서 beam을 조사하여 측정한 두 개 이상의 phase가 있어야 한다. Beam을 조사하는 방향을 달리하면 이 때 측정되는 위상도 다른 값을 갖게 된다. 이렇게 측정된 phase를 연산에 의해 한 쪽 성분만 남게 하는 것이다.

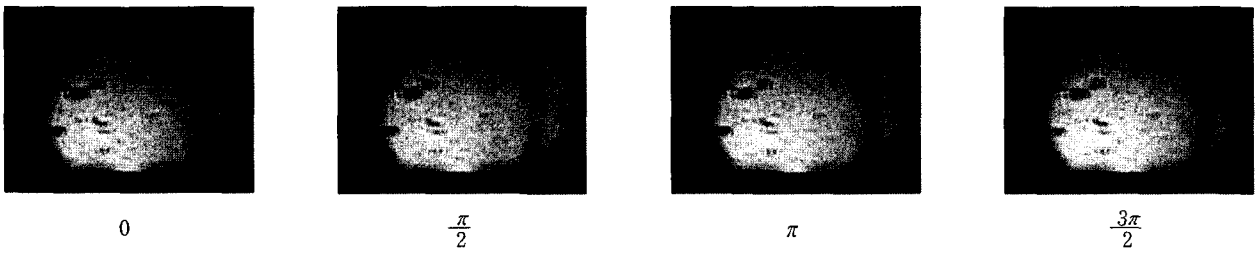
그림 2에서 보는 바와 같이 z축에 대해 양쪽으로 같은 각도로 beam을 조사하게 되면 이 두 beam에 의해 측정된 위상은 서로 공액 관계를 갖게 되는데, 이러한 방법을 택하게 되면 두 개의 단일 beam에 의한 위상만을 가지고 있어도 가감연산에 의해 식 (7), (8)과 같이 각각 z축과 x축에 대한 성분을 분리해 낼 수가 있다.

그림 4와 5는 각각 오른쪽 beam과 왼쪽 beam에 의한 아크릴판 시료의 변형 전과 후의 두 점에서 나온 빛의 위상차 즉 θ와 $\theta+\phi$을 구하기 위해 phase shifting technique에 의해 $\frac{\pi}{2}$씩의 위상차를 주면서 얻은 간섭무늬들이다. 그림 4(a)는 오른 쪽 beam으로 물체의 변형 전의 간섭무늬이고 그림 4(b)는 변형 후의 간섭무늬이다.

마찬가지로 그림 5 (a)는 왼 쪽 beam으로 얻은 변형 전의 간섭무늬이고, 그림 5 (b)는 형 후의 간섭무늬이다. 그림 4 (a)의 간섭무늬들로부터 식 (10)을 이용하면 θ_R을 구할 수 있고, 4 (b)의 간섭무늬들로부터 식 (11)을 이용하면 $(\theta+\phi)_R$을 구할 수 있으며, 식 (13)으로부터 ϕ_R을 구할 수 있다. 마찬가지로

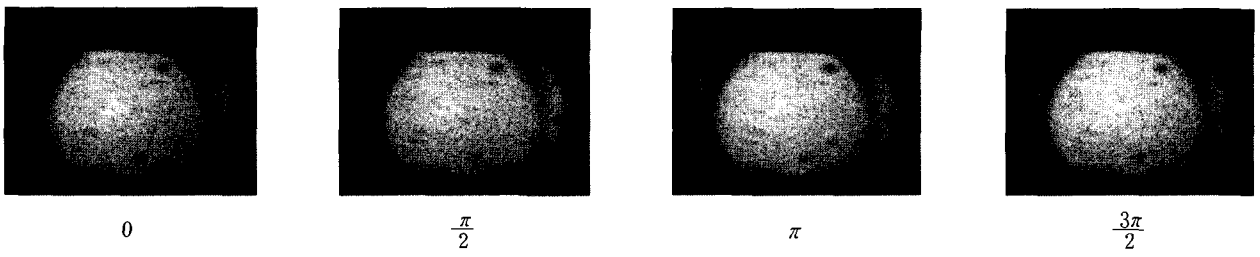


(a)

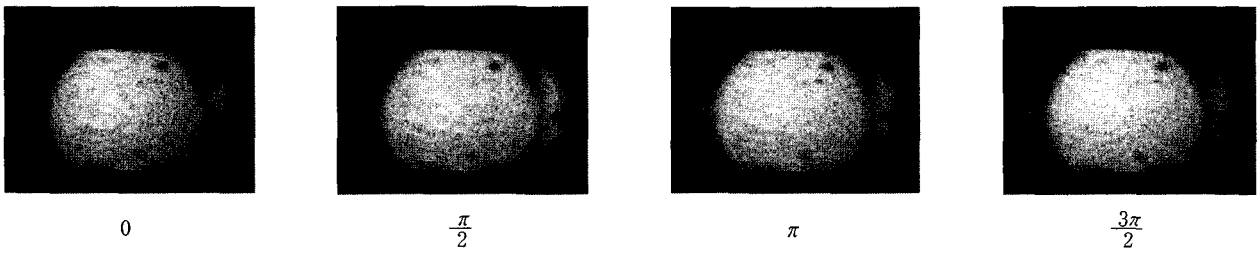


(b)

그림 4. 오른 쪽 beam에 의한 아크릴 판의 변형 전(a)과 변형 후(b)의 images.



(a)



(b)

그림 5. 왼쪽 beam에 의한 아크릴 판의 변형 전(a)과 변형 후(b)의 images.

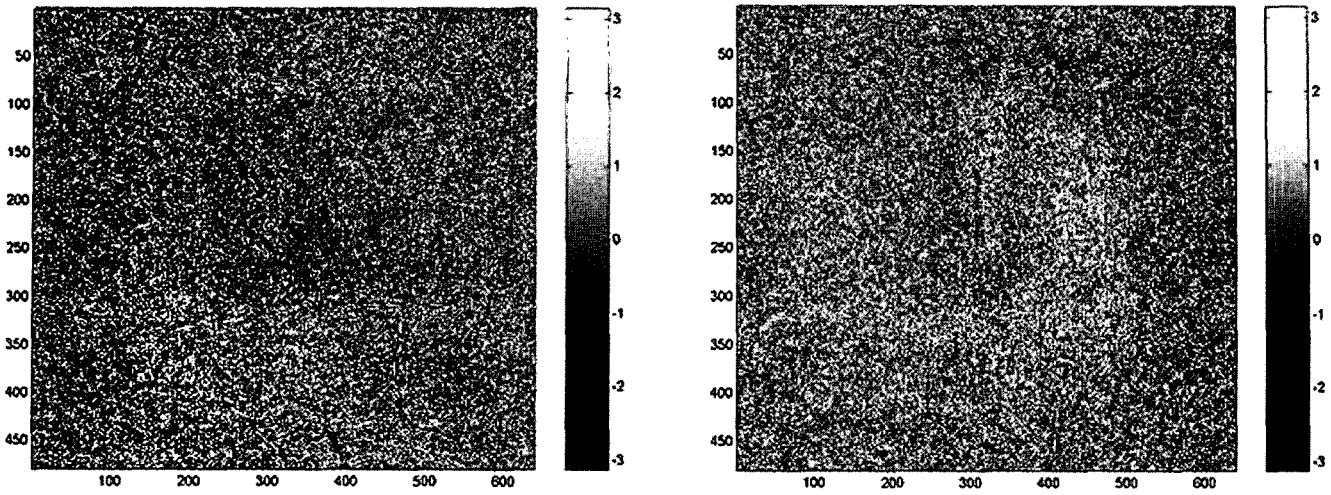
그림 5 (a)와 5 (b)로부터 ϕ_L을 구할 수 있다.

그림 6은 이들 ϕ_R와 ϕ_L을 나타내는 위상도이다. 이 위상도의 noise를 제거하기 위해 LS (least square) filtering 시키면 그림 7과 같은 LS 위상 도를 얻고, 다시 unwrapping을 통해서 LS 위상도가 가지고 있는 2π (-3.14 ~ +3.14)의 주기성을 제거하면 그림 8과 같은 위상 도를 얻는다.[11, 12]

그림 7과 8을 보면 아크릴 판 시료 내부의 결함부위를 또렷이 발견할 수 있다. 그러나 이 두 위상 도에는 in-plane과 out-of-plane에 대한 위상변화가 중첩되어 들어있다. 이를 나누어 분석하기 위해 좌우 양쪽 각각의 beam에 의한 phase의 변화 ϕ_R과 ϕ_L을 구한다.

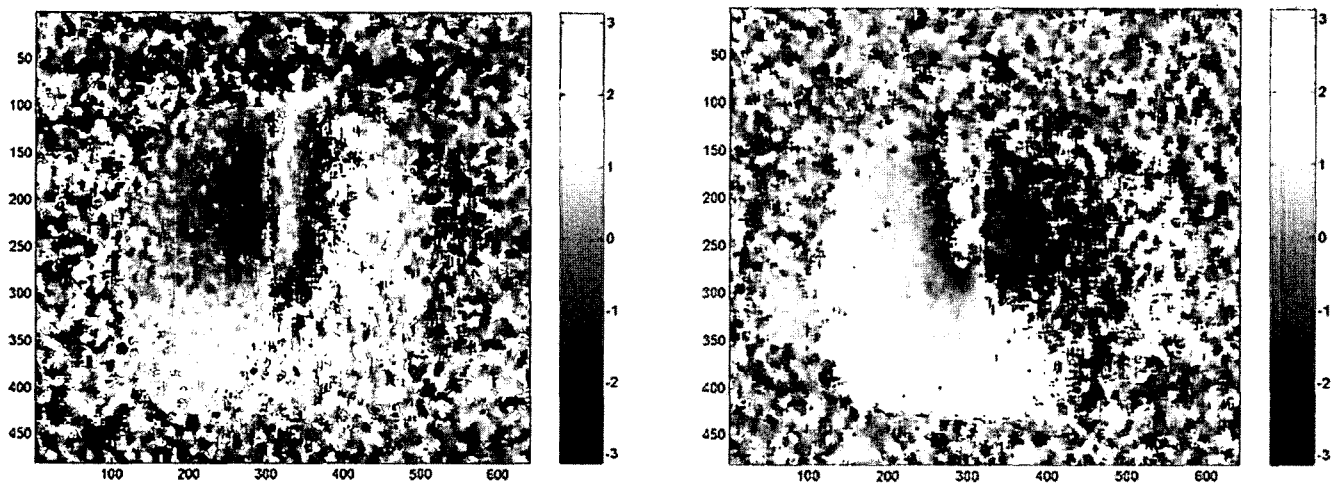
위상도의 크기는 가로 640 pixel, 세로 480 pixel 이고 오른쪽 세로축에 나와 있는 gray level bar는 위상의 크기를 나타내며 단위는 radian이다. 위상 도에서 가장 어두운 곳과 가장 밝은 곳의 위상차는 2π (-3.14 ~ +3.14) radian이며 이것은 한 파장에 해당한다.

그림 8에 나타난 결과를 분석하여 보면 0에서 3.5π(0 ~ +10.99)radian 사이의 크기로 변형이 일어난 것을 알 수가 있다. 그러나 phase map에 나타난 변형은 in-plane 방향으로의



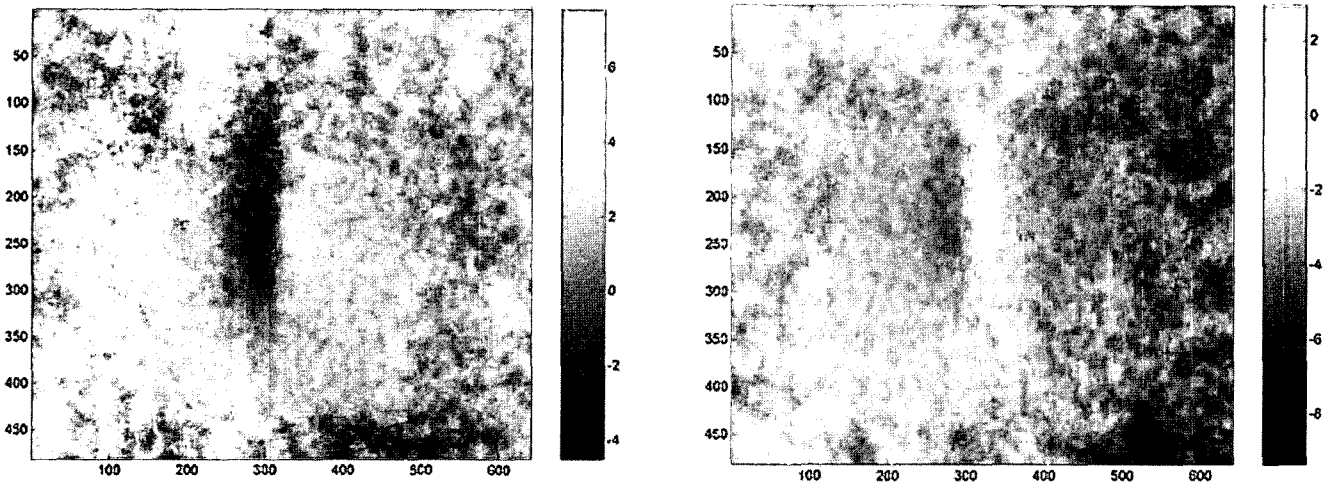
(a) (b)

그림 6. 아크릴 판의 오른쪽 beam에 의한 위상도 (a)와 왼쪽 beam에 의한 위상도 (b).



(a) (b)

그림 7. 아크릴 판의 오른쪽 beam에 의한 LS filtering을 적용한 위상도 (a)와 왼쪽 beam에 의한 LS filtering을 적용한 위상도 (b).



(a) (b)

그림 8. 그림 7 (a)을 unwrapping 처리를 한 위상도 (a)와 그림 7 (b)을 unwrapping 처리를 한 위상도 (b).

변형과 out-of-plane 방향으로의 변형이 한꺼번에 중첩되어 기록이 되어 있기 때문에 정량적으로 분석하기에는 무리가 따른다.

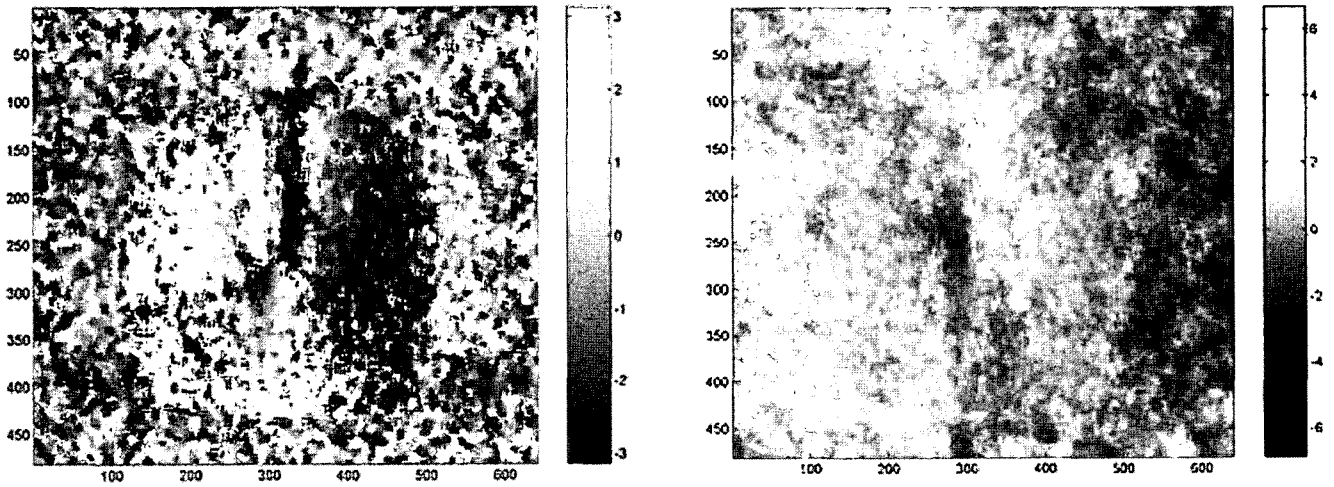
이러한 이유로 좌우 두 beam에 의하여 측정한 phase map을 가감연산을 이용하여 in-plane에 대한 성분 ($\frac{\partial u}{\partial x}$)과 out-of-plane에 대한 성분 ($\frac{\partial w}{\partial x}$)을 분리해 내는 과정을 거쳐야 한다. 그림 9와 10은 각각 in-plane과 out-of-plane의 성분만으로 된 위상도이다.

그림 9를 통하여 in-plane에 대한 위상변화를 분석하여보면 2π이내의 크기로 변형된 것을 알 수 있다. 또한 이 위상 도에서 결함의 위치가 세로 100~28 0pixel, 가로 310~335 pixel 사이에 위치한다는 것을 알아낼 수 있다. 그림 10에는 out-of-plane에 대한 변형 정보가 나타나 있다. 이를 통하여 phase의 변화를 분석하여 보면 in-plane 방향의 변형보다 큰 값인 4.6π (-10.2 ~ +4.2)이내의 변형을 일으킨 것을 알 수 있다.

Matlab의 Image processing toolbox를 사용하여 그림 6의 위상 도를 얻을 수가 있다. 그러나 이렇게 얻어진 위상 도에는 noise가 심하여 분석하기가 매우 어렵거나 불가능 할 때도 있다. 이러한 이유로 인하여 noise를 제거하는 과정이 반드시 필요하다. 이 noise를 제거해 주기 위한 방법으로 least square filtering (LS filtering) 방법이 있다.

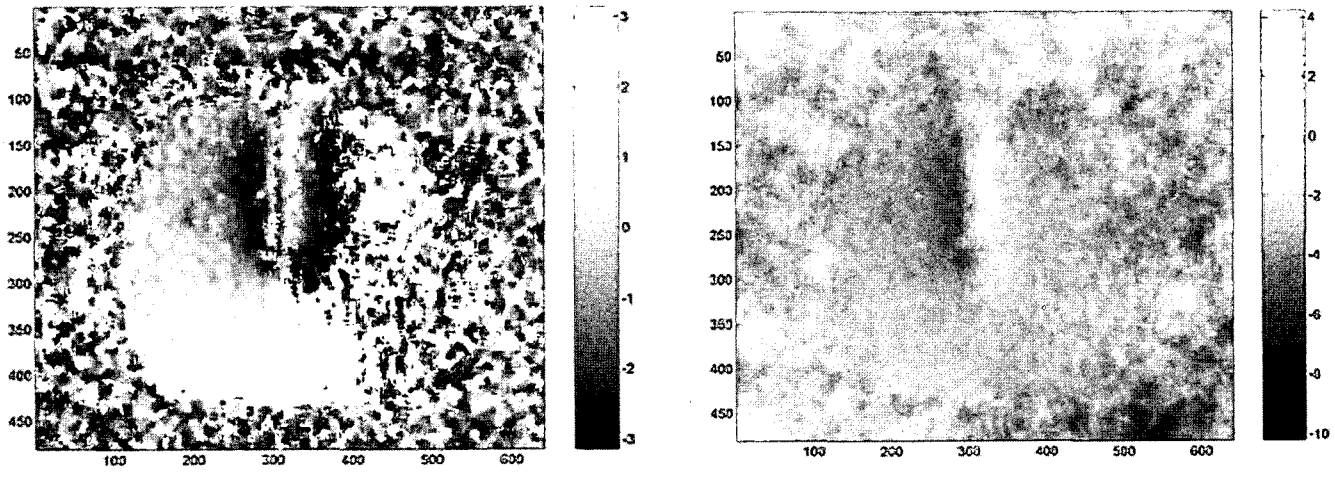
그림 7은 LS filter 처리를 한 위상 도를 보여주고 있다. 이들 위상도은 2π (-3.14 ~ +3.14)의 주기성을 가지고 있기 때문에 이들 주기성을 없애주는 unwrapping의 과정이 필요하다. Unwrapping 후에 얻어진 image는 그림 8과 같이 나타난다. 그림8, 9, 10에서 스케일이 통일되지 않은 것은 unwrapping algorism의 결과로 나타나기 때문이다.

LS phase map이나 unwrapped phase map을 보면 니크롬선



(a) (b)

그림 9. In-plane의 변형 성분을 나타내는 LS 위상도 (a)와 unwrapping 처리를 한 위상도 (b).



(a) (b)

그림 10. Out-of-plane의 변형 성분을 나타내는 LS 위상도 (a)와 unwrapping 처리를 한 위상도 (b).

이 직접 닿은 부분이 다른 곳과는 다른 변형을 보인 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

Shearography는 물체의 한 점에서 나온 빛을 shearing의 기술을 이용하여 간섭시켜 물체의 변형이나 결함을 측정하는 기술이기 때문에 ESPI보다는 주면의 미세한 진동 등에 의한 주변의 변화요소에 덜 민감한 장점을 가지고 있다. 이러한 장점은 그동안 실험실 내에서만 행해지던 스페클을 이용한 제품의 결함 검사나 건물의 구조 테스트 등이 받던 공간적인 제약이 사라져 이용성이 늘고 활용분야를 넓힐 수 있다. 또한 진동 등을 없애기 위한 보강구조물이 필요 없어진다.

본 연구에서는 주로 기존의 single beam에 의해 행해지던 shearography를 dual-beam을 이용하여 single beam이 가지고 있던 단점인 in-plane 방향의 변형과 out-of-plane 방향의 변형이 중첩되어 해석되는 문제점을 해결하였다. Shearing의 방법으로는 Michelson interferometer의 lateral shearing을 토대로 구성하여 측정하고자 하는 물체의 위치 크기 CCD camera의 위치 등에 따라 적절한 양만큼 shear angle을 임의로 줄 수 있게 하였다.

물체의 변형에 의한 phase를 측정하여 분석하는 방법으로는 phase shifting 기술을 이용하여 변형된 위상을 측정하였다. 그리고 이렇게 측정된 위상의 noise를 없애고 분석하기 쉽게 하기위해 LS filtering과 unwrapping 처리를 하였다.

시료의 내부에 구멍을 뚫어 인공적인 결함을 만든 후 전기열을 가하여 실험한 결과, single beam의 경우에서도 결함 부위의 변형이 다른 곳과는 차이가 나 쉽게 결함의 형태와 위치를 판가름 할 수 있었다. 그러나 오른쪽 beam에 의해 얻어진 위상도와 왼쪽 beam에 의해 얻어진 위상도가 다른 양상을 보였고, x축과 z축 방향의 변형 즉 in-plane의 변형 성분과 out-of-plane의 변형 성분이 겹쳐져서 분석이 되기 때문에 각 방향으로 변형된 정도를 정확하게 분석하기에는 무리가 따른다. 이러한 단점은 좌우 두 방향에서 같은 각으로 입사하는 dual-beam shearography 기술을 이용하여 측정된 두 phase를 서로 더하거나 뺌으로서 각각 out-of-plane과 in-plane의 두 성분을 나누어 분석할 수 있었다.

아크릴판 시료를 사용하였을 때, 실험 결과 in-plane 방향의 변형은 위상이 0에서 2π 사이에서 일어났고, out-of-plane 방향으로는 0에서 5π rad 사이에서 변형이 일어났다. 특히 결함 부분에 의한 변형이 전기 열을 가해주었을 때도 국부적으로 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이런 결과는 아크릴판의 열전도도가 낮아서 니크롬선이 닿는 부분이 집중적으로 열팽창이 일어났음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] J. A. Leendertz and J. N. Butters, "An image-shearing speckle pattern interferometer for measuring bending moments," *J. Phys.* E6, pp. 1107-1110, 1973.

[2] Y. Y. Hung and C. E. Taylor, "speckle-shearing interferometric camera -- a tool for measurement of derivatives of surface displacement," *Proc. SPIE*, vol. 41, pp. 169-175, 1973.

[3] R. S. Sirohi, C. J. Tay, H. M. Shang and W. P. Boo, "Shear ESPI with small-objects," *Int. Conference on Applied Optical Metrology*, P. K. Rastogi, F. Gyimesi, Ed., Proc. of SPIE, vol. 3407, pp. 332-337, 1998.

[4] P. K. Rastogi "Techniques of Displacement and Deformation Measurements in Speckle Metrology," *Swiss Federal Institute of Technology*, Lausanne, Switzerland, pp. 76, 1993.

[5] Y. Y. Hung and J. Q. Wang, "Dual-beam Phase Shift Shearography for Measurement of In-plane Strains," *Optics and laser in Engineering*, vol. 24, no. 5-6, pp. 403-413, 1996.

[6] Y. Y. Hung, "Shearography and Applications in Experimental Mechanics," *Proc. of SPIE*, vol. 2921, pp. 2-28, 1997.

[7] Y. Y. Hung, "Shearography : a novel and practical approach for nondestructive testing," *J. of Nondestructive Testing*, vol. 8, no. 2, pp. 55-67, 1989.

[8] R. S. Sirohi, *Speckle Metrology* (Marcel Dekker Inc, New York, 1993), pp. 99-155.

[9] R. S. Sirohi, *Speckle Metrology* (Marcel Dekker Inc, New York, 1993), pp. 74-75.

[10] K. Patorski, A Olszak, Ed., "Digital in-plane electronic speckle pattern shearing interferometry," *Optical Engineering*, vol. 36, no. 7, pp. 2010-2015, 1997.

[11] M. Owner-Petersen and P. D. Jensen, "Computer-aided electronic speckle pattern interferometry(ESPI): Deformation analysis by fringe manipulation," *Non-Destr. Test(Int)*, vol. 21, no. 6, pp. 422, 1988.

[12] W. W. Macy, "Two-dimensional fringe pattern analysis," *Applied Optics*, vol. 22, pp. 3898, 1983.

Measurements of Inner Defects of the Plate using Dual-beam Shearography

Hyo Shick Ham and Sung Eul Choi†

Department of Physics, University of Incheon, 177 Dohwa-dong, Nam-gu, Incheon 402-749, KOREA

†*E-mail: schoi@incheon.ac.kr*

(Received March 15, 2005, Revised manuscript June 13, 2005)

In this study, we have used newly developed dual-beam shearography which is based on laser speckle that includes various information about an object. Among the several shearing techniques, we used Michelson shearing interference technique which is the most powerful. Acrylate plate was used as a sample, which has inner defects and low thermal conductivity. Michelson shearing interferometer was used for obtaining speckle fringes. We also used phase shifting technique to get a phase map. Using single beam illumination, we could obtain mixture of deformation components of both in-plane and out-of-plane. In order to separate the two components, we have used dual-beam shearography technique. We have obtained a speckle pattern of both before and after deformation. Through LS filtering and unwrapping processes, we could find a position and a shape of the inner defects easily. Deformation of the acrylate plate due to thermal heating has occurred mainly in z-direction(out-of-plane) because it has low thermal conductivity. The acrylate plate was deformed only at the restricted area where the electrical heat applied.

OCIS Codes : 120.4290. 120.4630. 120.6160.