

레이저 스페클간섭법에 있어서 스페클크기와 측정 한계에 관한 연구

윤성운*, 김경석**, 양승필***, 정현철****, 김정호****, 이도윤****

A study on speckle size and measurable limitations
in laser speckle interferometry method

Sung-woon Yoon*, Koung-suk Kim**, Seung-pil Yang***,
Hyun-chul Jung****, Jung-ho Kim****, Do-yun Lee****

Abstract

The high coherence of laser beam has made it possible to observe interference effects even in the light scattered from rough surfaces. That's why, when object with a scattering surface is illuminated with laser light, we do see a speckled appearance due to random interference.

This sort of unique property of laser speckle has brought into existence the new noncontacting techniques such as speckle metrology method of measuring deformation, displacement, and vibration etc of objects with high optical sensitivity. The measurable range of speckle metrology especially used to measure in-plane information, however, is limited by some factors, the so-called strain, rotation, tilt of surface and out of displacement perpendicular to the plane of analysis. This restrictions severely limits the measurable range of speckle metrology by causing the decorrelation of speckle patterns. It is the purpose of this paper to give a survey on the measurable limitation of speckle photography method that is one of speckle metrology. Namely we will discuss the mutual relationships and problems of each limitations adding the restriction on the largest and smallest displacement measurable with speckle methods.

* 조선대학교 기계공학과
** 조선대학교 기계설계공학과
*** 동아전문대 금형설계과
**** 조선대학교 대학원

1. 서 론

레이저 광의 우수한 가간섭성으로 인해서 거친 표면으로부터 확산된 광에서도 자체적인 간섭 현상을 볼 수가 있다. 이와 같은 레이저광의 독특한 특성으로 인해 나타나는 스페클은 광학적인 간섭계를 사용하여 광을 확산적으로 반사시키는 물체의 변형과 변위, 진동 등을 비접촉적으로 측정할 수 있게 되었으며, 현재에 있어서는 위상 구배의 계산을 통한 결함의 유무와 위치 크기 등을 검사할 수 있는 비파괴적인 계측기법으로서 그 가능성을 더욱 높혀가고 있다. 이와 같은 레이저를 이용한 측정법으로는 홀로그래피 간섭법, 스페클 간섭법, 스페클 사진법등이 있으며, 비록 이러한 측정법들이 독립적으로 발전되었다 할지라도 기본적인 광학적인 배치와 함수들에 있어서는 서로 유사한 특징을 가지고 있다.

초기의 실험들은 Speckle pattern을 촬영한 negative 필름을 원래의 위치에 재배치하고 물체의 변형을 관측하는 방법으로 행해졌으며, 물체의 변형이 스페클의 휘도 분포를 변화시키고 그 결과로서 negative 필름에 형성되는 간섭줄무늬를 관측하는 것이었다.

스페클응용계측법은 여러 가지 변수들에 의해서 측정 가능한 범위와 한계성을 가지고 있다. 일반적으로 변형(deformation), 회전(rotation), 병진운동(translation)등은 스페클패턴 사이의 상관상태를 깨뜨리기 때문에 줄무늬의 생성에 있어서 큰 장애적인 요소가 되며, 주로 면내변형 측정을 위한 스페클응용계측법에 있어서 측정 범위의 제한성을 부여하는 주요한 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 주로 면내 변형을 측정하기 위한 스페클간섭법의 하나인 스페클사진법에 있어서의 스페클 크기와 그에 따른 측정 한계를 확인하고자 한다.

2. 스페클 사진법

2.1 스페클사진법의 기록계

광학적으로 거친 표면에 레이저와 같은 공간적·시간적인 coherence가 우수한 광을 조사하게 되면, Fig. 1에서와 같은 알갱이 모양들이 불규칙하게 흩어져 있는 것을 볼 수 있는데 이와 같은 현상을 간섭효과라고 한다. 레이저로 물체 표면을 조사할 경우 물체표면으로부터 레이저가 확산되며, 물체표면의 불규칙성 때문에 확

산된 광 벡터들은 서로 간섭을 하게 된다. Fig. 1에서는 그러한 확산광 자체내부의 간섭현상으로 인해 나타나는 알갱이 모양의 전형적인 스페클패턴을 나타내고 있다.

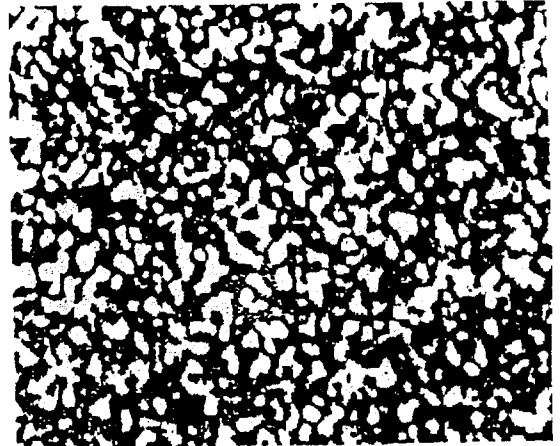


Fig. 1 Speckle image of a rough object formed with coherent light

Fig. 2에서는 이와 같은 스페클을 기본적으로 관찰할 수 있는 스페클 두가지 종류를 나타내고 있다. Fig. 2(a)를 Objective Speckle Pattern이라고 하며, (b)는 그림에서 알 수 있는바와 같이 렌즈를 이용하여 물체 표면을 결상시켜 스페클패턴을 발생시키는 경우로서 Subjective speckle pattern이라고 한다. 스페클사진법에서는 이러한 Subjective speckle pattern system이 기록계로 이용되며, 이러한 기록계에서는 물체표면의 스페클 상이 결상되어지는 부분에 건판을 두어 물체의 스페클상을 기록한다. 따라서 물체에 변형이 가해지면, 이중노광을 통하여 물체표면에 존재하는 변형전의 스페클의 기준화상과 변형후의 화상이 기록되어 물체면상의 각점의 변위가 스페클의 변위로서 건판위에 기록된다. 이와 같은 절차를 통하여 만들어진 것을 Specklegram이라고 한다.

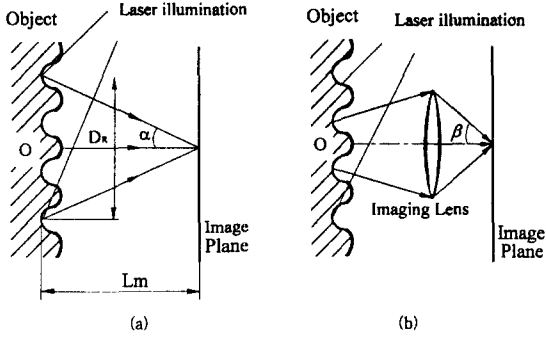


Fig. 2 Speckle formation in (a) objective case and (b) subjective case

2.2 스페클사진법의 해석계

변형 전후의 이중노광에 의해 만들어진 Specklegram을 해석하기 위해서 본 연구에서는 Young's fringe method를 사용하였다. 스페클의 이동을 기록한 Specklegram에 레이저빔을 조사하면, 광륜과함께 그 내부에 줄무늬 모양이 나타난다.

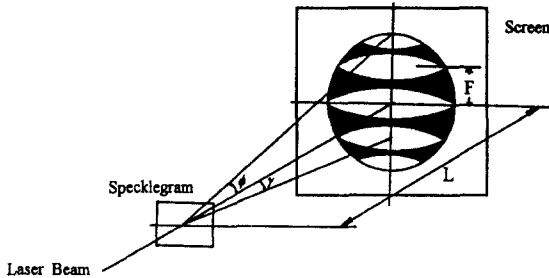


Fig. 3 Young's fringe formation with Laser beam for Specklegram analysis

광륜이 이루는 각 ϕ 는 스페클의 크기에 따라 결정되어 $\sin \phi = 2\sin \beta$ 로 주어진다.

$SS_1 = SS_2$ 라고 하면, 두개의 Slit S_1 과 S_2 를 동시에

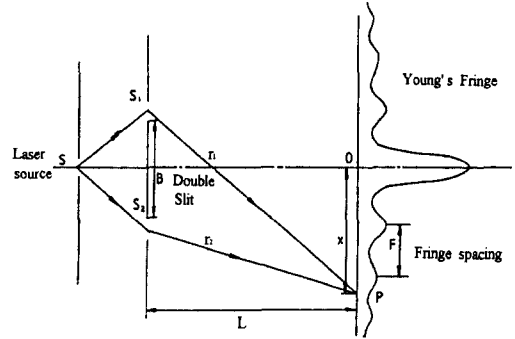


Fig. 4 Geometry of Young's fringe caused by Double slit

통과한 2개의 광은 같은 위상 상태에 있음을 알 수 있다. 또한 스크린이 double slit에서 충분히 떨어져 있다면, S_1 과 S_2 로부터 나온 광의 진폭은 스크린의 임의의 점에서 같다고 볼 수 있다.

Double slit을 통과한 각각의 Wave에 대한 방정식은 다음과 같으며,

$$E_1 = a \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_1) \quad (1)$$

$$E_2 = a \sin(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} r_2) \quad (2)$$

동일 평면에서 진동하고 있는 2개의 Wave에 의한 최종적인 Wave vector의 크기(E)는

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 \\ &= 2a \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} \sin[\omega t - \frac{\pi(r_1 + r_2)}{\lambda}] \end{aligned} \quad (3)$$

이고, 따라서 최종적인 Wave의 합성진폭은 다음과 같다.

$$A = |2a \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda}| \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} = m\pi$$

($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)일 경우에는 가장 진폭이 최대이고,

$$\frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} = \frac{(2m+1)\pi}{2}$$

($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)인 경우에는 최소가 된다. 이러한 위치는 공간적으로 일정한 궤적을 이룬다.

$$r_1^2 = L^2 + (x + \frac{B}{2})^2 \quad (5)$$

$$r_2^2 = L^2 + (x - \frac{B}{2})^2 \quad (6)$$

$$\therefore r_1^2 - r_2^2 = (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = 2Bx \quad (7)$$

$B \ll L$, $x \ll L$ 라고 하면, $r_1 + r_2 \approx 2L$ 따라서 $r_1 - r_2 = \frac{Bx}{L}$ 로 쓸 수 있다. 따라서 다음과 같은 곳에서는 밝은 줄무늬를 나타내고,

$$\frac{Bx}{L} = m\lambda, \quad x = \frac{m\lambda L}{B} \quad (8)$$

($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

$$\frac{Bx}{L} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad x = (2m+1)\frac{\lambda L}{2B} \quad (9)$$

($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

에서는 어두운 줄무늬를 나타내게 된다. 따라서 두 줄무늬 사이의 간격 F 는 다음과 같이 계산된다.

$$F = \frac{\lambda L}{B} \quad (10)$$

또한 두개의 Slit 사이의 거리 즉 스펙클의 이동량 B 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{N_a \lambda}{\sin \gamma} \quad (11)$$

여기서 N_a 는 최대 줄무늬의 차수이다. 이와 같이 Specklegram에 Laser 빔을 조사하면 변형전과 변형후의 스펙클이 두개의 slit S_1 과 S_2 에 의해 줄무늬가 발생된다.

촬영 배율을 M , 시험편 표면상의 변위량을 D 라고 한다면, 스펙클의 이동량 B 는 $B = MD$ 로 주어지고, 이것을 (10)식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\therefore D = \frac{\lambda L}{MF} \quad (12)$$

3. 스펙클사진법에 의한 측정 한계

3.1 이론적인 검토

스펙클을 이용한 측정법의 측정 범위와 정밀도·정확도에 영향을 주는 여러가지 원인이 있다. 이와같은 원인들은 스펙클사진법에 있어서 Young's 줄무늬의 가시도를 저하시키기 때문에 측정의 정밀도와 정확도를 떨어뜨리는 장애적인 요소가 되고 있다. 측정상의 장애적인 원인을 부여하는 것들로는 다음과 같다.

(a) 변위

Specklegram에 레이저빔을 조사할 경우, Young's 줄무늬와 함께 beam 지름을 조사영역으로하는 회절시스템(diffraction system)의 스펙클이 발생되어 Young's fringe에 대한 noise가 된다. 그러므로 변위가 커질 수록 줄무늬 간격은 작아지기 때문에 Speckle noise와의 비 즉 S/N비는 작게 되어 줄무늬의 가시도가 저하된다

(b) 변위 구배

변위구배가 존재하면 Specklegram에 조사된 지름내에서 변위가 달라지고 다른 Young 줄무늬와 겹쳐져 줄무늬의 가시도가 저하된다.

(c) 표면 조직구조의 변화

스펙클패턴은 광학적으로 거친 표면의 미시적인 형상에 따라 달라지기 때문에, 소성변형등으로 인하여 표면 조직구조에 변화가 발생한다면, 변형전 후의 스펙클패턴은 서로 상관 상태를 유지하지 못하기 때문에, Young 줄무늬는 발생되지 않는다.

(d) 면 외 변위

광축방향의 면내변위가 스펙클크기를 초과할 정도로

크게 된다면, 스페클의 상관 상태가 유지되지 못하게 된다. 따라서 Young 줄무늬를 관찰할 수 없게 되며 배울의 변화에 따라서도 큰 오차가 발생된다.

(e) 경사

레이저가 조사되어 스페클패턴을 이루는 측정 표면에 경사가 발생하게 되면, 스페클에 상당하는 물체 표면상의 영역에서 임의의 위상 변화가 일어나게 된다. 그러므로 그에 따른 각각의 산란광의 위상 또한 상대적으로 변화하기 때문에 물체의 변형 전후에 기록된 두개의 스페클은 서로 상관 상태를 잃어버리게 된다. 표면 경사에 대한 허용정도는 실험적으로 약 $2.5 \sim 10 \times 10^{-3}$ rad 이 내 정도가 되었다.

3.2 스페클사진법의 측정한계

① 변위의 측정 한계

Young 줄무늬는 물체 변형 전후의 물체 표면상의 스페클패턴을 기록한 Specklegram에 레이저 빔을 조사하여 나타나는 줄무늬이다. 여기서 Specklegram에는 물체의 변형으로 인해 물체표면이 이동함에 따라서 이동하는 스페클의 이동된 정보가 기록되어 있다. 그러한 스페클의 크기는 $\sigma = 1.2 \frac{L\lambda}{b}$ 로 주어진다. 그러므로 $F = \frac{\lambda L}{MD}$ 를 이용하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{b}{1.2MD} \tag{13}$$

Fig. 5 에서 F/σ 는 한 개의 줄무늬 간격 사이에 포함된 스페클의 수로서 Young's fringe의 가시도를 결정하는 변수 중의 하나가 된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 F/σ 가 작게 되면, 줄무늬의 가시도가 저하한다는 사실이 기하학적으로 밝혀졌다. 윗식을 통하여 F/σ 는 3~5정도가 한계임이 실험적으로 증명되었다. 그러므로 변위의 측정 한계는 다음과 같은 관계에 있음을 알 수 있다.

$$D \leq \frac{b}{6M} \tag{14}$$

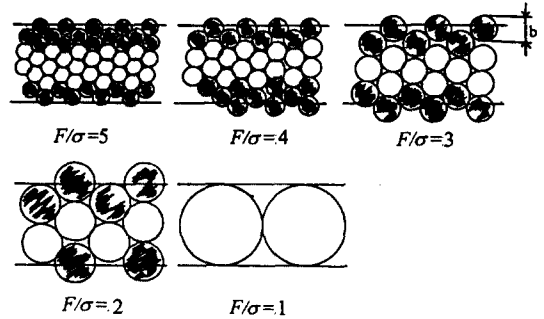


Fig. 5 Relationship between speckle size and visibility of Young's fringe

② 변위구배의 측정 한계

변위구배가 있는 경우에는 beam 지름내에서 변위의 크기가 달라지고, 다른 줄무늬 간격을 가지고 있는 Young 줄무늬가 겹쳐지게 됨으로서 줄무늬의 가시도가 저하된다.

$$F_{\min} = \frac{\lambda L}{MD_{\max}} \tag{15}$$

$$F_{\max} = \frac{\lambda L}{MD_{\min}} \tag{16}$$

여기서 $n = \frac{F_{\max}}{\Delta F} = \frac{F_{\max}}{F_{\max} - F_{\min}} \tag{17}$

으로 정의하면, F_{\min} 의 n 차와 F_{\max} 의 $(n-1)$ 차가 일치하게 됨을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 윗식을 통하여 n 이 클 수록 고차의 줄무늬까지 잘 볼 수 있게 되므로 n 은 다음과 같이 얻어진다.

$$n = \frac{D_{\max}}{D_{\max} - D_{\min}} \tag{18}$$

물체면상의 Beam지름 b/M 는 게이지 길이로서 변위구배의 변화에 대해 충분히 작아 변위구배 또는 b/M 에서 일정하게 되어 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$D_{\max} = D_{\min} + \frac{b\epsilon}{M} \tag{19}$$

식(19)를 식(18)에 대입하면,

$$n = \frac{MD_{\max}}{b\epsilon} \quad (20)$$

이 된다. 따라서 변위구배의 최대 측정 한계는 다음과 같다.

$$\frac{MD}{bn} \geq \epsilon \quad (21)$$

더욱이 diffraction halo내에서 줄무늬를 관찰할 수 있는 범위는 강체변위때에 보이는 줄무늬의 갯수 n_a 와 의 비 n/n_a 로 평가할 수 있다. n_a 는 diffraction halo의 크기로서 결정되며, $\sin \gamma = \sin \phi$ 이고, 따라서 다음의 관계식이 성립한다.

$$\sin \gamma = 2 \sin \beta \quad (22)$$

여기서 $\sin \gamma = \frac{N_a \lambda}{MD}$ 이며, N_a 는 최대 줄무늬의 차수로서 $2N_a + 1 = n_a$ 이지만, N_a 가 클 경우에는 $2N_a \approx n_a$ 로서 $\sin \gamma = \frac{n_a \lambda}{2MD}$ 로 할 수 있다.

그러므로 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\therefore \frac{n_a \lambda}{2MD} \leq 2 \sin \beta, \quad n_a \leq \frac{4MD \sin \beta}{\lambda} \quad (23)$$

또한 $n = \frac{MD}{b\epsilon}$ 으로부터

$$\frac{n}{n_a} = \frac{\lambda}{4b\epsilon \sin \beta} \quad (24)$$

임을 알 수 있다.

4. 실험 방법 및 결과

본 연구에서는 면외변위와 경사에 의한 영향을 무시할 수 있도록 하기위해 자체적으로 시험편을 제작하여 변위와 변위구배의 상한 측정 한계 그리고 표면 성상의 영향만을 고려하여 조사할 수 있도록 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 시험편에 대한 일정한 변형으로서 강체변위, 강체회전 그리고 스트레인을 주었으며, 강체변위에서는 측정의 정밀도와 정확도에 대하여 조사하였고, 강체회전에서는 변위와 변위구배의 최대 측정한계를 조사

하였으며, 표면성상변화에 따른 영향을 살펴보았다.

4.1 강체변위의 측정

먼저 가장 단순한 강체변위에 대하여 측정하였다. 그 결과 첫째로 Fig. 6에 나타낸바와 같이 렌즈의 수차에

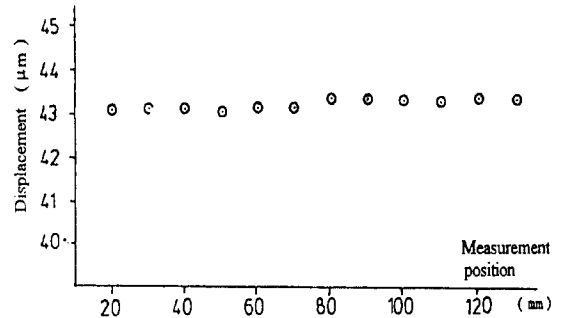


Fig. 6 Measuring results obtained with objective speckle pattern in rigid body translation testing

대한 영향이 있음을 알 수 있었다. 둘째로 Fig. 7에서는 렌즈의 중심으로부터 바깥쪽으로 갈수록 변위가 크게 나타남을 볼 수 있었으며, 이것은 Fig. 6의 결과와 비교해 볼 때 상당히 오차가 크게 나타남을 알 수 있다.

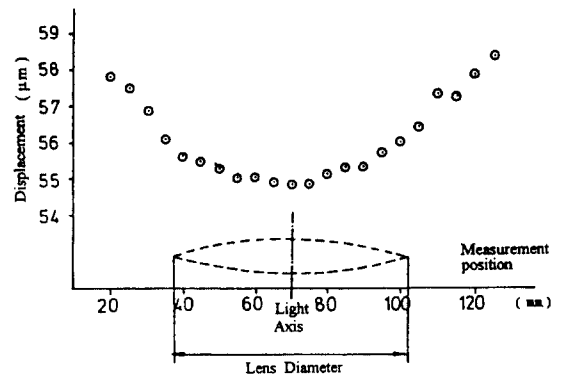


Fig. 7 Measuring results obtained with subjective speckle pattern showing that effects of lens aberration within lens diameter in rigid body translation testing

강체변위에서는 강체상의 어느 위치에서 측정하든지 상관없이 변위는 일정해야만 한다. 따라서 정밀도와 정확도에 있어서는 Recording system에 따라 문제가 있다. 다음 Fig. 8은 본 실험에서의 Young의 줄무늬를 해석하기위한 해석계의 개략도를 나타내고 있다.

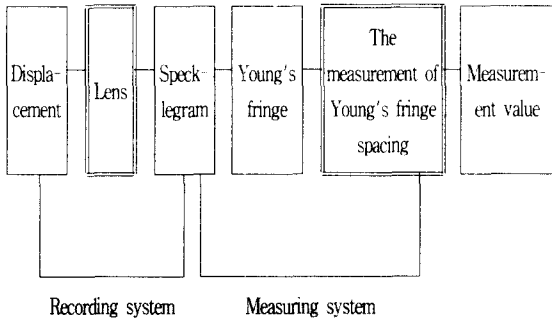


Fig. 8 Schematic diagram of speckle photography for the Young's fringe analysis of specklegram

4.2 강체회전의 측정

본 연구에서는 광축과 평행한 축에 대하여 강체회전 실험을 통해 측정을 하였으며, 경사 면의변위가 발생되지 않도록 면내에 대한 강체회전을 주기 위해서 강체회전변위 장치를 제작하였다. 본 강체회전변위 실험장치에서는 강체회전변위로서 면내변위를 주기 위해 Fig. 9와 같이 최소 눈금 1/1000mm의 마이크로미터를 부착하였고, 이 마이크로미터에 의해 원반 회전 중심의 회전축에서 90mm의 위치에 접선방향의 미소변위를 주어 원반을 미소량만큼 회전시키도록 하였다. 강체회전에 있어서는 회전각 ω 는 다음과 같다.

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

여기서 u, v 는 x 와 y 좌표에 대한 변위성분으로서 강체회전변위 실험에서는 변위구배가 항상 일정하다.

Table. 1은 본 실험의 측정 결과로서 회전변위를 각 각 다르게 주고 그에 상당하는 최대한 측정할 수 있는

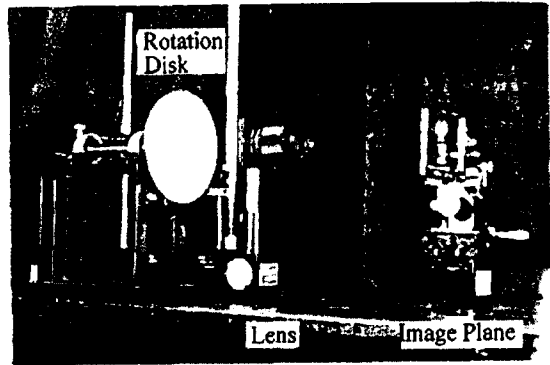


Fig. 9 Recording system for rigid body rotation testing

변위의 최대상한값과 하한값을 나타낸것이다. 여기서 가시적으로 볼 수 있는 줄무늬의 수 n 은 식(20)를 이용하여 구하였다.

Table.1 Measuring results in rigid body rotation testing

Strain $\epsilon (\times 10^{-2})$	Minimum displacement at inner of beam diameter $D_{min} (\mu m)$	Visible fringe number n	Maximum displacement at inner of beam diameter $D_{max} (\mu m)$	$\frac{F}{\sigma}$	Beam diameter $b (mm)$
2.2	4.78	2.17	192	4.25	1
3.3	8.46	2.56	275	3.04	1
6.6	20.92	1.58	488	3.42	2
8.8	35.99	2.04	272	6.13	2
11.1	73.82	3.33	379	4.40	2

위의 결과에서 알 수 있듯이 변위구배가 커짐에 따라서 변위의 최대값은 커지게 되지만, n 은 대체로 일정하게 된다. 이것은 앞서 설명하였던 이론적인 변위구배의 최대값과 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다. 또한

$\sigma = 1.2 \frac{L\lambda}{b}$ 를 이용한 변위의 최대 측정값에 대한 이론에서 ' F/σ 는 3~5 정도에서 한계로 될 것이다.'라는 예상과도 잘 일치하고 있다

Beam 지름 2mm에서는 1.11% 정도가 변위구배의 최대값이다. F/σ 와 n 으로부터 고려해 보면, 매우 큰 변위구배도 변위가 큰 부분에서는 측정 가능하지만, 앞서 설명한바와 같이 줄무늬가 보이는 범위가 좁아져서 실제로는 측정을 할 수가 없다.

이 때 n/n_a 의 비는 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{n}{n_a} &= \frac{\lambda}{4b\epsilon \sin\beta} \\ &= \frac{0.5145 \times 10^{-3}}{4 \times 2 \times 0.0111 \times 0.13} \\ &= 0.05 \end{aligned}$$

따라서 강제회전실험에서 n/n_a 는 0.05 정도가 한계임을 알 수 있었다.

$$\therefore 0.05 \leq \frac{\lambda}{4b\epsilon \sin\beta} \quad (25)$$

본 연구에서는 파장(λ)이 $0.5145\mu\text{m}$ 인 레이저를 광원으로 사용하였다.

그러므로 $\sin\beta = 0.13$ 일 경우 $b \leq \frac{0.02}{\epsilon}$ 이며, 스트레인에 대한 b 의 최대 한계 정도를 다음 Fig. 10과 같이 볼 수 있다.

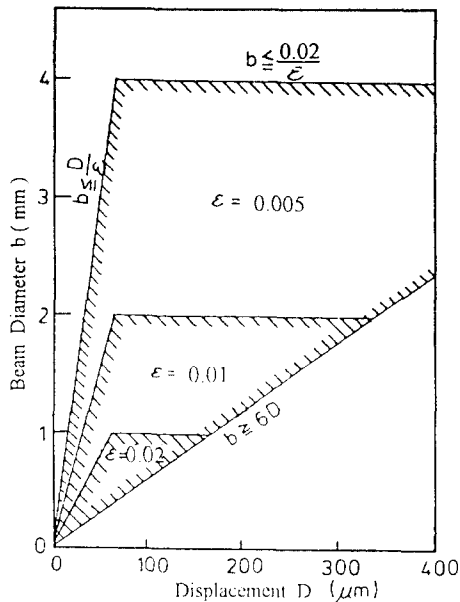


Fig. 10 Relationship between strain and upper limit of beam diameter

4.3 스트레인의 측정

본 실험에서는 중앙에 균열이 있는 인 청동의 시험편을 사용하여 일축인장실험을 행하였다. 실험에 사용한 인장시험기에서는 면외변형으로 인한 영향을 막기 위해서 시험편을 가이드에 끼워 고정하였으며, 시험편의 폭 전체에 균등한 하중이 걸리도록 하였다. 시험기의 위쪽은 고정되어 있고 worm과 worm wheel에 의해 하부축에 인장하중을 주어 시험편이 인장되는 구조로 구성하였다. 기어 장치의 레버를 회전시킴으로서 시험편에 약 30kgf 간격으로 인장력을 증가시켰으며, 각 간격마다 2중노광을 하여 기록함으로써 초기에 발생하는 오차를 줄이도록 하였다. Fig. 11은 스트레인 측정을 하기 위해 본 실험에서 사용된 전체적인 시스템을 나타내고 있다.

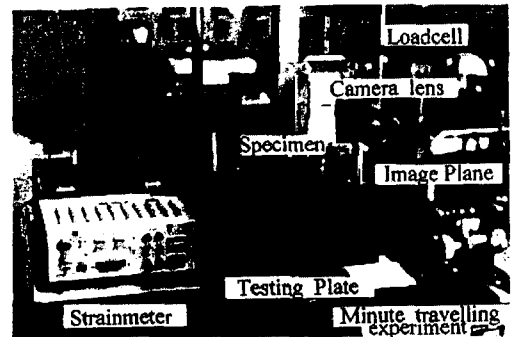


Fig. 11 Experimental set-up for speckle photography in tensile testing

본 실험의 결과로서 균열 부근의 동일한 측정점에서 beam지름을 2mm부터 1mm까지로 바꾸면, 높은 차수의 줄무늬를 관찰할 수 있었고, 시험편의 균열쪽에 가까울수록 고차의 줄무늬가 발생하여 contrast가 낮아졌다. 이것은 변위구배에 의한 가시도의 저하라고 사료된다.

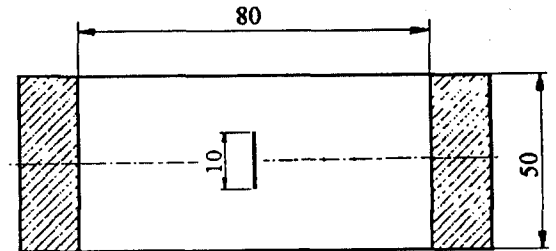


Fig. 12 Specimen with crack

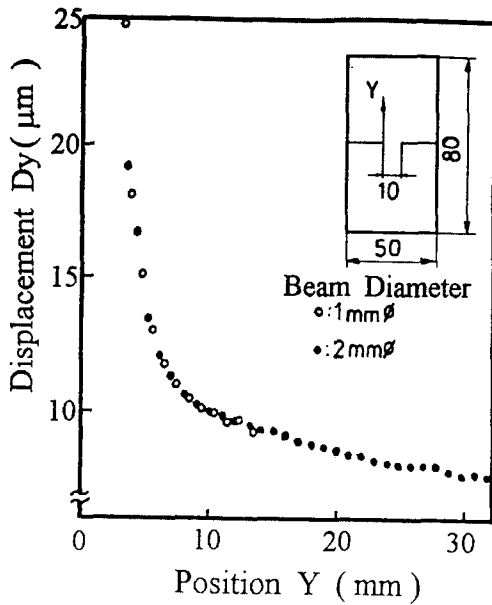


Fig. 13 Experimental displacement relative to crack

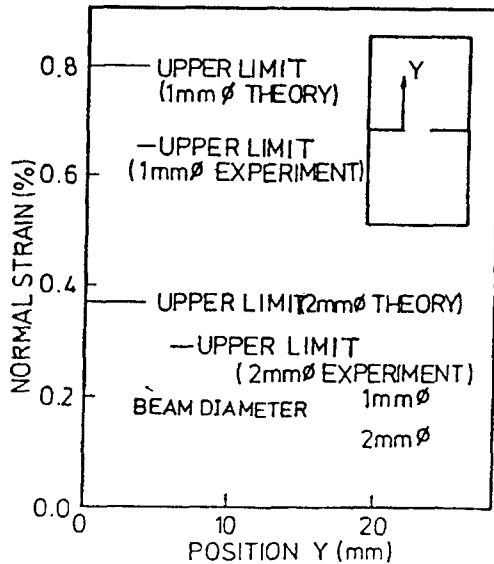


Fig. 14 Comparison of theory and experimental value of upper limit obtained with speckle photography

5. 고 찰

$b = 2mm$ 에서는 $Y = 2.75mm$, $b = 1mm$ 인 경우에는 $Y = 2mm$ 한계로서 측정되었다. 앞서의 이론적인 검증에서 각각에 대한 이론적인 최대한계는 $\epsilon \leq MD/bn$ 의 관계를 통하여 다음과 같다.

$$\epsilon \leq 0.7973\% \quad (b = 1mm \quad D = 23.92\mu m)$$

$$\epsilon \leq 0.3667\% \quad (b = 2mm \quad D = 22.14\mu m)$$

실험결과에서 알 수 있듯이 측정의 최대한계는 잘 일치하고 있고, 이러한 측정의 최대한계는 beam의 지름에 의존하고 있음을 알 수 있다. 또한 beam의 지름내에 발생하는 줄무늬의 가시도는 변위구배의 최대한계에 따라 좌우된다는 것을 볼 수 있으며, 표면성상의 변화보다는 변위구배에 따른 영향이 측정한계를 부여하는 원인이 된다.

여기에서 측정의 최대한계가 이론적인 한계보다는 약간 낮게 나타나는 것은 주 스트레인의 방향과 이동된 직선의 방향이 일치하고 있지 않기 때문에 실제 beam지름내의 최대변위구배는 더욱 크다고 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 스펙클응용계측법중의 하나인 스펙클사진법에 있어서 Young의 줄무늬의 가시도를 저하시킴으로서 측정상의 한계적인 원인을 제공하고 있는 변수들이 상호 어떠한 관계를 가지고 있는지를 조사하고, 그에 따른 스펙클의 크기와 측정의 한계를 확인함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) S/N 비와 F/σ 를 크게 하여 변위의 최대측정한계를 결정하기 위해서는 beam의 지름을 크게해야 하고, 측정이 가능한 줄무늬의 수 n 을 크게 하여 변위구배의 상한을 결정하기 위해서는 반대로 beam의 직경을 작게 해야 하는 서로 상충되는 제한을 주고 있기 때문에 측정의 한계가 존재함을 알 수 있었다.
- 2) 이론적인 식에 의한 스트레인의 측정 상한과 일치함에 따라서 표면조직구조의 변화에대한 영향보다는 변위구배의 상한이 더 큰 제한을 받고 있음을 확인하였다. 따라서 레이저를 이용한 스펙클응용계

측법에 있어서 측정 가능한 최대 한계는 변위구배의 상한 정도에 따라 결정됨을 확인하였다.

- 3) 본 연구의 실험결과를 통하여 F/σ 는 최대한 3~5 정도가 됨을 알 수 있었으며, 두 줄무늬 사이의 간격은 스페클크기의 5배 정도는 되어야 최적의 줄무늬 패턴을 관찰할 수 있음을 확인하였다.

〈후기〉 본 논문은 1995년도 조선대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 연구 되었습.

7. 참고 문헌

- 1) O. J. Lokberg, J. T. Malmo and G. A. Slettemoen, "Interferometric Measurements of High Temperature Objects by Electric Speckle pattern Interferometry", Applied Optics, Vol. 24, No. 19, pp.3167-3172, 1985.
- 2) O. J. Lokberg and J. T. Malmo, "Deformation measurements at Very High Temperatures by ESPI and Moire Methods" Applied Optics, Vol.1, No. 2, pp. 62 - 68, 1986.
- 3) Denby, D. and Leendertz, J.A. : Plane-Surface Strain Examination by Speckle-Pattern Interferometry Using Electronic Processing, J. Strain Analysis, Vol.9, No.1, 1974, pp.17-25
- 4) 角誠之助, 金庚錫, 山崎正秀, 韓應教 : CW 레이저 스펙클寫眞法による高温下の 面内變位測定にする研究, 日本非破壊検査, 第 37卷 第 2號 (1988), pp. 64-70
- 5) B. Ineichen, P. Eglin and R. Dandliker, "Hybrid Optical and Electronic Image Processing for Strain Measurement by Speckle Photography", Applied Optics, 19(13), pp. 2191-2195, 1980.
- 6) 김 경석, "CW-레이저 Speckle 寫眞法에 의한 고온하에서의 面内變位測定에 관한 研究", 漢陽大學校 博士論文, 1988.
- 7) Archbold, B. E. and Bruch, J. M. and Ennos, A. E. "Recording of In-plane Displacement by Double Exposure Speckle Photography", Optics Acta, Vol. 19, pp. 253-271, 1972
- 8) 角誠之助, 金庚錫, 山崎正秀, 志自岐雄介 : 레이저 스펙클寫眞法による高温下の 面内變形測定, 日本航空宇宙學會西部支部講演會 (1987), pp. 17-20.
- 9) S. Sumi, "Speckle Pattern Correlation Method for Measurement of Surface Structural Changes caused by Fatigue", The Society of Materials Science, Japan, pp. 17-21, 1976
- 10) 山口一郎, "레이저 스펙클히즈미計による高温下の히즈미測定", 非破壊 検査, 32(9), pp. 676-682, 1983.
- 11) 角誠之助, "構造強度解析における 레이저의應用", 日本宇宙航空學會誌, 第 25 卷, 第 281 號, pp. 259-267, 1977.
- 12) 志自岐雄介, "스펙클패턴干涉法による 高温下の變形測定", 九州大學 修士論文, 1989.
- 13) 山口秀穗, "스펙클패턴干涉法を用いた高温下での面内變位測定に關する研究", 九州大學 修士論文, 1990.
- 14) B. Ineichen, P. Eglin and R. Dandliker, "Hybrid Optical and Electronic Image Processing for Strain Measurement by Speckle Photography", Applied Optics, 19(13), pp. 2191-2195, 1980.