

레이저 스펙클간섭법에 있어서  
스페클 크기와 측정한계에 관한 연구

김 경 석 (조선대학교 기계설계공학과)

양 승 필 (동아전문대 금형설계과)

정현철, \*김정호, 이도윤 (조선대학교 대학원)

## 1. 서 론

레이저광의 우수한 간섭성으로 인해서 거친표면으로부터 확산된 광에서도 간섭현상을 볼 수가 있다. 이와 같은 레이저광의 독특한 특성으로 인해 나타나는 스펙클은 광학적인 간섭계를 사용하여 광을 확산적으로 반사시키는 물체의 변형과 변위, 진동 등을 비접촉적으로 측정할 수 있게 되었다. 이와 같은 측정법으로서 Holography 간섭법, Speckle 간섭법, Speckle 사진법 등이 있으며 비록 이러한 측정법들이 독립적으로 발전되었다 할지라도 기본적인 광학적인 배치와 함수들에 있어서는 유사한 특징을 가지고 있다.

초기의 실험들은 Speckle pattern을 활용한 negative 필름을 원래의 위치에 재 배치하고 물체의 변형을 관측하는 방법으로 행해졌으며, 물체의 변형이 스펙클의 회도분포를 변화시키고 그 결과로서 negative 필름에 형성되는 간섭줄무늬를 관측하는 것이었다. 이러한 스펙클을 용계측법은 여러가지 변수들에 의해서 그 측정 가능한 범위와 한계성을 가지고 있다. 일반적으로 Deformation, Rotation, Translation등은 스펙클패턴의 상관상태를 깨뜨리기 때문에 줄무늬의 생성에 있어서 큰 장애가 되며, 이러한 문제들은 주로 면내변형측정을 위한 스펙클용 계측법에 있어서 측정의 제한을 부여하는 주요한 원인이 된다.

따라서 본 연구에서는 주로 면내변형을 측정하기 위한 스펙클간섭법에 있어서의 스펙클 사이즈와 그에 따른 측정한계를 확인할 것이다.

## 2. Speckle사진법

### 1) Speckle사진법의 기록계

광학적으로 거친 표면에 Laser와 같은 공간적이고 시간적인 coherence가 우수한 광을 조사하게되면, Fig. 1에서와 같은 알갱이 모양들이 불규칙하게 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 현상을 간섭효과라고 한다. 이와 같은 현상은 Laser로 물체 표면을 조사할 경우 그 표면으로부터 Laser가 확산되며, 물체표면의 불규칙성 때문에 그 확산된 광 벡터들은 서로 간섭을 하게 된다. 바로 그러한 확산광 자체내부의 간섭현상으로인해 알갱이 같은 모양이 나타나는데 그것을 바로 그것을 Speckle이라고 한다. Fig. 2(b)에서와 같이 렌즈를 이용하여 물체표면을 결상시켜 발생되는 스펙클패턴을 Subjective speckle pattern이라고 한다. Speckle사진법에서는 이러한 Subjective speckle pattern system이 기록계로 이용되며, 이러한 기록계에서는 물체표면의 Speckle 상이 결상되어지는 부분에 건판을 두어 기록된다. 따라서 물체에 변형이 가해지면, 이중노광을 통하여 물체표면에 존재하는 변형전의 Speckle의 기준화상과 변형후의 화상이 기록되어 물체면상의 각점의 변위가 Speckle의 변위로서 건판위에 기록된다. 이와 같은 절차를 통하여 만들어진 것을 Specklegram이라고 한다.

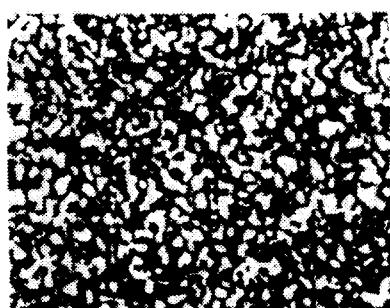


Fig. 1 Speckle image of a rough object formed with coherent light

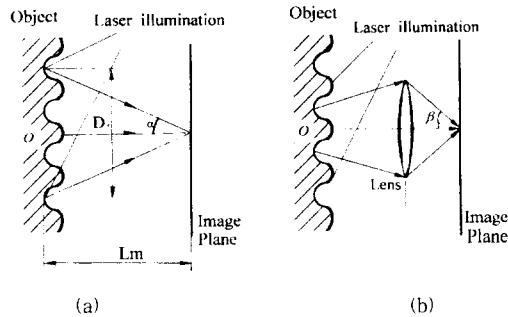


Fig. 2 Speckle formation in (a) objective case  
and (b) subjective case

## 2) Speckle 사진법의 해석법

변형 전후의 이중노광에 의해 만들어진 Specklegram을 해석하기 위해서 본 연구에서는 Young's fringe method를 사용하였다. Speckle의 이동을 기록한 Specklegram에 Laser빔을 조사하면, 광률과 함께 그 내부에 줄무늬모양이 나타난다.

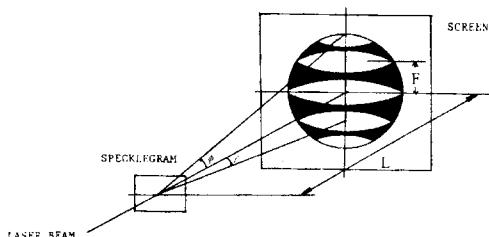


Fig. 3 Young's fringe formation with laser beam  
for specklegram analysis

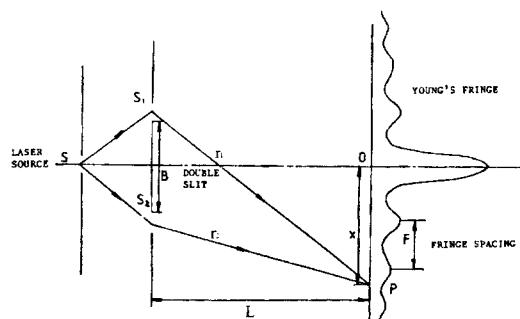


Fig. 4 Geometry of Young's fringe caused  
by double slit

Fig. 4에서는, double slit를 이용한 Young's fringe의 형성에 대하여 나타내고 있다. 여기에서  $SS_1 = SS_2$ 라고 하면, 두개의 Slit  $S_1$ 과  $S_2$ 를 동시에 통과한 2개의 광은 같은 위상상태에 있음을 알 수 있다. 또한 스크린이

double slit에서 충분히 떨어져 있다면,  $S_1$ 과  $S_2$ 으로부터 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 Wave에의 한 쪽 종적인 Wave vector의 크기( $E$ )는

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

이고, 따라서 최종적인 Wave의 합성진폭은 다음과 같다.

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

$$\text{여기서 } \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} = m\pi \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

일 경우에는 가장진폭이 최대이고,

$$\frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} = \frac{(2m+1)\pi}{2} \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

인 경우에는 최소가 된다. 이러한 위치는 공간적으로 일정한 궤적을 이룬다. Fig. 4에서  $\overline{S_1S_2}$ 의 수직 2등분선과 스크린의 교점을 O, 그리고  $\overline{S_1S_2}$ 면과 스크린과의 거리를 L,  $\overline{S_1S_2} = B$ ,  $\overline{OP} = x$ 라고 하면,

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

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

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

$B \ll L$ ,  $x \ll L$ 라고 하면,  $r_1 + r_2 \approx 2L$  따라서

$$r_1 - r_2 = \frac{Bx}{L} \text{로 쓸 수 있다.}$$

그러므로 다음과 같은 곳에서는 밝은 줄무늬를 나타내고,

$$\frac{Bx}{L} = m\lambda, \quad x = \frac{m\lambda L}{B} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (8)$$

다음의 위치에서는 어두운 줄무늬를 나타낸다.

$$\frac{Bx}{L} = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, \quad x = (2m+1)\frac{\lambda L}{2B} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (9)$$

따라서 두 줄무늬사이의 간격  $F$ 는 다음과 같이 계산된다.

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

또한 두개의 Slit 사이의 거리 즉 Speckle의 이동량  $B$ 는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

이와 같이 Specklegram에 Laser 빔을 조사하면 변형전과 변형후의 Speckle이 두개의 slit  $S_1$ 과  $S_2$ 에 의해 줄무늬가 발생된다. 활영배율을  $M$ , 시험면 표면상의 변위량을  $D$ 라고 한다면, Speckle의 이동량  $B$ 는  $B = MD$ 로 주어지고, 이것을 (10)식에 대입하면

$$F = \frac{\lambda L}{MD} \quad (12)$$

$$\therefore D = \frac{\lambda L}{MF} \quad (13)$$

과 같이 된다. 그러므로 줄무늬 간격  $F$ 를 측정하면, Beam 지름 내의 변형량  $D$ 를 구할 수 있고, 줄무늬는 Speckle의 이동방향, 다시 말해서 물체면상의 점의 변위방향에 대하여 직각인 방향으로 나타나기 때문에 줄무늬의 경사정도를 측정함으로서 변위방향도 구할 수 있다.

## 2. Speckle사진법에 의한 측정한계

### 1) 이론적인 검토

Speckle을 이용한 여러 가지 측정법의 측정범위와 정밀도·정확도에 영향을 주는 여러가지 원인이 있다.

Speckle사진법에 있어서 Young's 줄무늬의 가시도가 저하하기 때문에 측정정밀도 정확도가 낮아지게 됨으로서 측정이 불가능해진다. 이와 같은 측정상의 장애적인 원인을 부여하는 것들로는 다음과 같다.

#### (a) Displacement

Specklegram에 Laser빔을 조사할 경우, Young's 줄무늬와 함께 beam 지름을 조사영역으로 하는 diffraction system의 Speckle이 발생되어 Young's fringe에 대한 noise가 된다.

그러므로 변위가 커질 수록 줄무늬 간격은 작아지기 때문에 Speckle noise와의 비 즉 Signal to Noise ratio는 작게 되어 줄무늬의 가시도가 저하된다.

#### (b) 변위구배

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

#### (c) 표면성상의 변화

Speckle패턴은 광학적 조면의 미시적인 형상에 따라 달라지기 때문에, 소성변형등으로 인하여 표면성상에 변화가 발생한다면, 변형전 후의 Speckle패턴은 서로 상관상태를 유지하지 못하기 때문에, Young 줄무늬는 발생되지 않는다.

#### (d) 면외 변위

광축방향의 면내변위가 Speckle크기를 초과할 정도로 크게 된다면, Speckle의 상관상태가 유지되지 못하게 된다. 따라서 Young 줄무늬를 관찰할 수 없게 된다. 또한 배율의 변화에 따라서 큰 오차가 발생된다.

#### (e) 경사

Laser가 조사되어 Speckle패턴을 이루는 측정표면에 경사가 발생하게 되면, Speckle에 상당하는 물체표면상의 영역에서 임의의 위상변화가 일어나게 된다. 그러므로 그에 따른 각각의 산란광의 위상 또한 상대적으로 변화하기 때문에 물체의 변형전후에 기록된 두개의 Speckle은 서로 상관상태를 잃어버리게 된다. 표면경사에 대한

허용정도는 실험적으로 약  $2.5 \sim 10 \times 10^{-3}$  rad 이내 정도가 되었다.

## 2) Speckle사진법의 측정한계

### ① 변위의 측정한계

Young 줄무늬는 물체 변형전후의 물체표면상의 Speckle패턴을 기록한 Specklegram에 Laser 빔을 조사하여 나타나는 줄무늬이다. 여기서 Specklegram에는 물체의 변형으로 인해 물체표면이 이동함에 따라서 이동하는 Speckle의 이동된 정보가 기록되어 있다. 앞서 설명한 바와같이 그려한 Speckle의 크기는  $\sigma = 1.2 \frac{L\lambda}{b}$

로 주어진다. 한편 식  $F = \frac{\lambda L}{MD}$ 를 이용하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{b}{1.2MD} \quad (14)$$

$\frac{F}{\sigma}$ 는 한 개의 줄무늬 간격사이에 포함된 Speckle의 수로서 Young's fringe의 가시도를 결정하는 변수중의 하나가 된다.

Fig. 5에서 나타낸 바와 같이  $F/\sigma$ 가 작게 되면, 줄무늬의 가시도가 저하한다는 사실이 기하학적으로 밝혀졌다. 윗식을 통하여  $F/\sigma$ 는 3~5정도가 한계임이 실험적으로 증명되었다. 그러므로 변위의 측정한계는 다음과 같은 관계에 있음을 알 수 있다.

$$D \leq \frac{b}{6M} \quad (15)$$

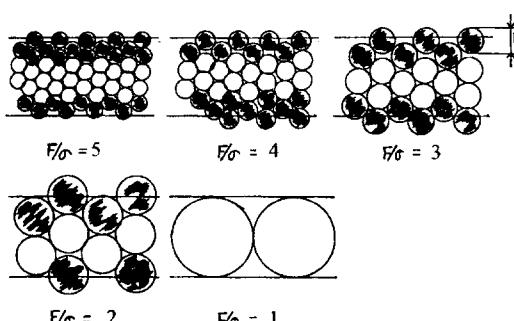


Fig. 5 Relationship between specklesize and visibility of Young's fringe

### ② 변위구배의 측정한계

변위구배가 있는 경우에는 beam 지름내에서 변위의 크기가 달라지고, 다른 줄무늬 간격을 가지고 있는 Young 줄무늬가 겹쳐지게 됨으로서 줄무늬의 가시도가 저하된다. Beam 지름내의 최대변위를  $D_{\max}$ , 최소변위를  $D_{\min}$ 으로 하면, 각각에 해당하는 줄무늬간격  $F_{\min}$ 과  $F_{\max}$ 는 다음과 같다.

$$F_{\min} = \frac{\lambda L}{MD_{\max}} \quad (16)$$

$$F_{\max} = \frac{\lambda L}{MD_{\min}} \quad (17)$$

$$\text{여기서 } n = \frac{F_{\max}}{DF} = \frac{F_{\max}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (18)$$

정의로 하면,  $F_{\min}$ 의  $n$ 차와  $F_{\max}$ 의  $(n-1)$ 차가 일치하게 됨을 알 수 있다. 따라서  $n$ 이 클 수록 고차의 줄무늬까지 잘 볼 수 있게 된다. 식(16), 식(17)을 식(18)에 대입하면,

$$n = \frac{D_{\max}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (19)$$

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

$$D_{\max} = D_{\min} + \frac{b\varepsilon}{M} \quad (20)$$

식(20)을 식(19)에 대입하면,

$$n = \frac{MD_{\max}}{b\varepsilon} \quad (21)$$

이 된다. 따라서 변위구배의 최대 측정한계는 다음과 같다.

$$\frac{MD}{bn} \geq \varepsilon \quad (22)$$

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

$$\sin \gamma = 2 \sin \beta \quad (23)$$

여기서  $\sin \gamma = \frac{N_a \lambda}{MD}$ 이며,  $N_a$ 는 최대 줄무늬의 차수로

서  $2N_a + 1 = n_a$  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.

$$\therefore \frac{n_a \lambda}{2MD} \leq 2 \sin \beta, \quad n_a \leq \frac{4MD \sin \beta}{\lambda} \quad (24)$$

한편  $n = \frac{MD}{b\varepsilon}$ 으로 부터

$$\frac{n}{n_a} = \frac{\lambda}{4b\varepsilon \sin \beta} \quad (25)$$

임을 알 수 있다.

본 연구에서의 강체회전실험에서는  $n/n_a$ 는 0.05 정도가 한계임을 알 수 있었다.

$$\therefore 0.05 \leq \frac{\lambda}{4b\varepsilon \sin \beta} \quad (26)$$

본 연구에서는 파장( $\lambda$ )이  $0.5145\mu\text{m}$ 인 Laser를 광원으로 사용하였다. 그러므로  $\sin \beta = 0.13$ 일 경우  $b \leq \frac{0.02}{\varepsilon}$ 이며,

스트레인에 대한  $b$ 의 최대 한계정도를 Fig. 6과 같이 볼 수 있다.

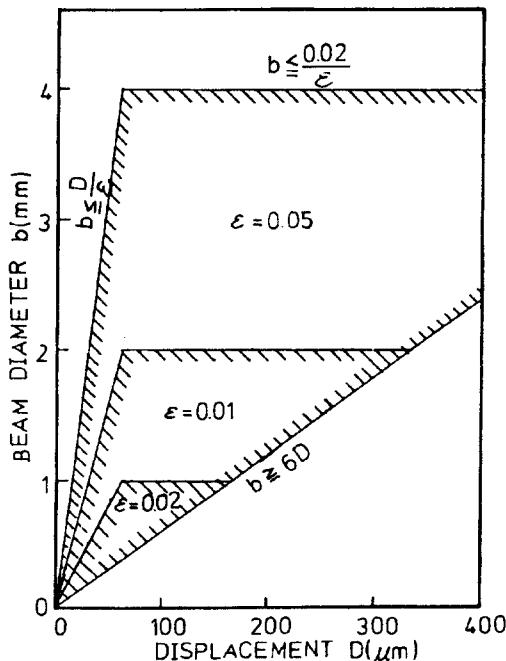


Fig. 6 Relationship between strain and upper limit of beam diameter

### 3. 실험방법 및 결과

앞서 언급하였듯이 Young's fringe의 가시도를 저하시키는 원인에는 5가지가 있으며, Ennos등에 의해 면외변형과 경사에 의한 그 측정한계에 대한 검토가 이루어졌다. 따라서 본 연구에서는 면외변위와 경사에 의한 영향이 고려되지 않도록 시험편을 제작하여 변위와 변위구배의 상한 측정한계 그리고 표면성상의 영향을 조사하도록 하였다.

따라서 본 연구에서는 시험편에 대한 일정한 변형으로서 강체변위, 강체회전 그리고 스트레인을 주었으며, 강체변위에서는 측정의 정밀도와 정확도에 대하여 조사하였고, 강체회전에서는 변위의 최대 측정한계를 그리고 변위구배에 대한 최대 측정한계를 조사하였으며, 표면성상변화에 따른 영향을 살펴보았다.

#### 1) 강체변위의 측정

먼저 가장 단순한 강체변위에 대하여 측정하였다. 그 결과 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타낸바와 같이 렌즈의 수차에 대한 영향이 있음을 알 수 있었다. Fig. 7는 렌즈를 사용하지 않은 경우 즉 Objective Speckle Pattern에서의 강체변위를 측정한 결과이며, Fig. 8는 일반적인 Speckle 사진법의 Recording system를 이용한 강체변위의 측정결과이다. Fig. 8에서는 렌즈의 중심으로부터 바깥쪽으로 갈수록 변위가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 7의 결과와 비교해 볼 때 상당히 오차가 크게 나타남을 알 수 있다.

강체변위에서는 강체상의 어느위치에서 측정하든지 상관없이 변위는 일정해야만 한다. 따라서 정밀도와 정확도에 있어서는 Recording system에 따라 문제가 있다. 본 연구에서는 Young's fringe를 해석하기 위해서 화상처리 장치를 사용하였다.

#### 2) 강체회전의 측정

본 연구에서는 광축과 평행한 축에 대하여 강체회전 실험을 통해 측정을 하였으며, 경사 면외변위가 발생되지 않도록 면내에 대한 강체회전을 주기 위해서 강체회전변위 장치를 제작하였다. 본 강체회전변위 실험장치에서는 강체회전변위로서 면내변위를 주기 위해 다음 사

진과 같이 최소 눈금 1/1000mm의 마이크로미터를 부착하였고, 이 마이크로미터에 의해 원반 회전중심의 회전축에서 90mm의 위치에 접선방향의 미소변위를 주어 원반을 미소량만큼 회전시키도록 하였다.

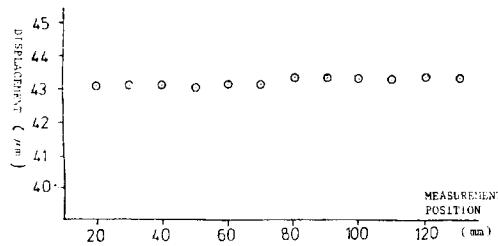


Fig. 7 Measuring results obtained with objective speckle pattern in rigid body translation testing

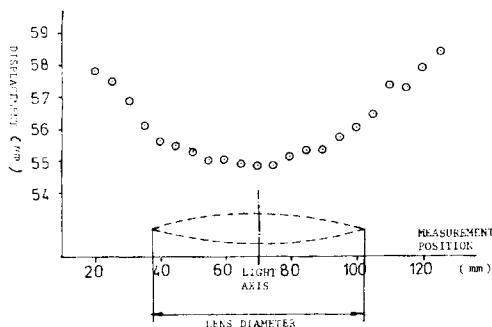


Fig. 8 Measuring results obtained with subjective speckle pattern showing that effects of lens aberration within lens diameter in rigid body translation testing

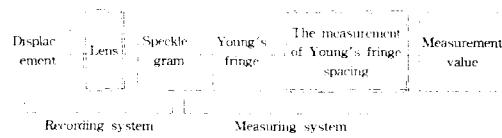


Fig. 9 Schematic diagram of speckle photography for the Young's fringe analysis of specklegram

강체회전에 있어서는 회전각  $\omega$ 는 다음과 같다.

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

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

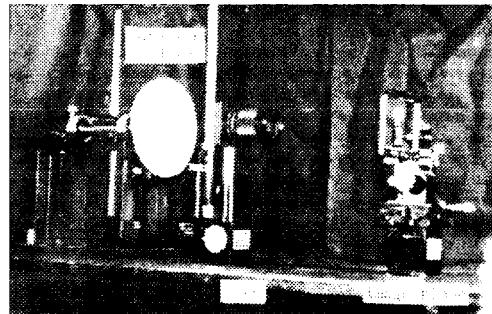


Fig. 10 Recording system for rigid body rotation testing

Table. 1에서는 본 실험의 측정결과로서 회전변위를 각각 다르게 주고 그에 상당하는 본 실험에서 최대한 측정할 수 있는 변위의 최대상한값과 하한값을 나타내고 있다. 여기서 가시적으로 볼 수 있는 줄무늬의 수  $n$ 은 식(21)와 식(14)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 이

론에서  $F/\sigma$ 는 3~5 정도에서 한계로 될 것이다라는 예상과도 잘 일치하고 있다.

Beam 지름 2mm에서는 1.11% 정도가 변위구배의 최대값이다.  $F/\sigma$  와  $n$ 으로부터 고려해보면, 매우 큰 변위구

배도 변위가 큰 부분에서는 측정가능하지만, 앞서 설명한바와 같이 줄무늬가 보이는 범위가 좁아져서 실제로는 측정을 할 수가 없다.

이 때  $n/n_a$ 의 비는 다음과 같이 얻어진다.

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

### 3) 스트레인의 측정

본 실험에서는 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 중앙에 균열이 있는 인청동의 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. 기어장치의 레버를 회전시킴으로서 시험편에 약 30kgf 간격으로 인장력을 증가시켰으며, 각 간격마다 2중노광을 하여 기록함으로서 초기에 발생되는 오차를 줄이도록 하였다.

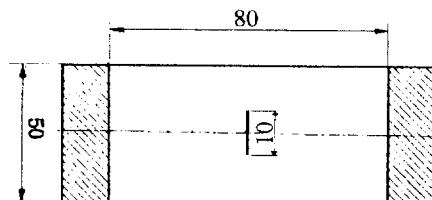


Fig. 11 Specimen with crack

본 실험의 결과로서 균열부근의 동일한 측정점에서 beam지름을 2mm부터 1mm까지로 바꾸면, 높은 차수의 줄무늬를 관찰할 수 있었으며, 시험편의 균열쪽에 가까울수록 고차의 줄무늬가 발생되기 때문에 contrast가 낮아진다. 이것은 변위구배에 의한 가시도의 저하라고 사료된다. Fig. 12, Fig. 13에서는 본 실험의 측정결과를 나타내고 있다.

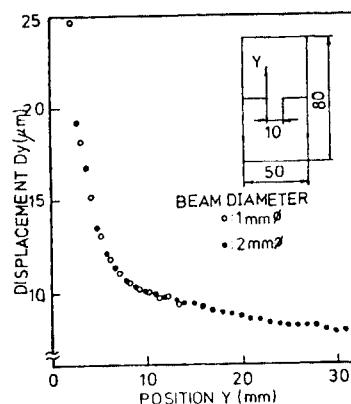


Fig. 12 Experimental displacement relative to crack

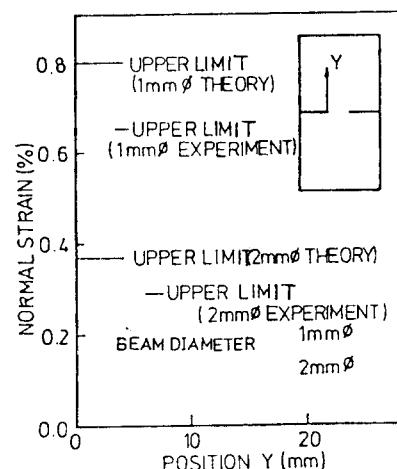


Fig. 13 Comparison of theory and experimental value of upper limit obtained with speckle photography

### 4. 고찰

Fig. 12에 나타낸 바와 같이  $b = 2mm$ 에서는  $Y = 2.75mm$ ,  $b = 1mm$ 인 경우에는  $Y = 2mm$ 한계로서 측정되었다. 앞서의 이론적인 검증에서 각각에 대한 이론적인 최대한계는  $\varepsilon \leq MD/bn$ 의 관계를 통하여 다음과 같다.

$$\varepsilon \leq 0.7973\% \quad (b = 1mm \quad D = 23.92\text{cm})$$

$$\varepsilon \leq 0.3667\% \quad (b = 2mm \quad D = 22.14\text{cm})$$

Fig. 13에서 나타낸 바와 같이 측정의 최대한계는 잘 일치하고 있으며, 이러한 측정의 최대한계가 beam의 지

틈에 의존하고 있고, 앞서 설명한 바와 같이 beam의 지름내에 발생하는 줄무늬의 가시도는 변위구배의 최대한 계에 따라 좌우된다는 것을 알 수 있다. 즉 표면의 성상의 변화보다는 변위구배에 따른 영향이 측정한계를 부여하는 원인이 된다는 것이다.

측정의 최대한계가 이론적인 한계보다는 약간 낮게 나타나는 것은 주스트레인의 방향과 이동된 직선의 방향이 일치하고 있지 않기 때문에 실제 beam지름내의 최대변위구배는 더욱 크다라고 사료된다.

받고 있음을 확인하였다. 따라서 Laser를 이용한 Speckle-옹용계측법에 있어서 측정가능한 최대 한계는 또한 스트레인의 측정상한과 일치함에 따라서 표면성상 변화의 영향보다는 변위구배의 상한이 더 큰 제한을 받고 있음을 확인하였다. 따라서 Laser를 이용한 Speckle-옹용계측법에 있어서 측정가능한 최대 한계는 변위구배의 상한 정도에 따라 결정됨을 확인하였다.

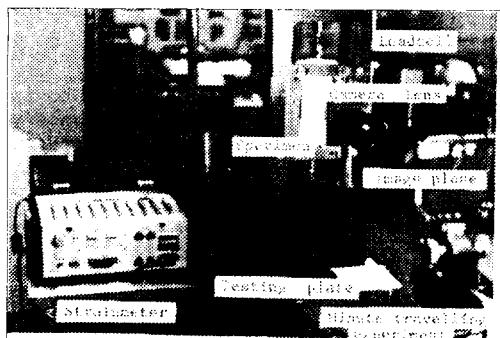


Fig. 14 Experimental set-up for speckle photography in tensile testing

### 5. 결 론

본 연구에서는 Young's fringe의 가시도를 저하시키는 원인들이 상호간에 어떠한 관계를 가지고 있는가 또는 어떤 원인들이 가장 중요한 Speckle-옹용계측의 측정한계를 부여하고 있는가를 알아보는데 그 목적을 두었으며, 변위, 변위구배, 표면성상 변화에 대한 것들이 Speckle-옹용 계측법에 있어서 그 측정한계를 결정짓는 장애적인 요소임을 확인할 수 있었다.

변위의 최대측정 한계를 결정하는  $S/N$  ratio와  $F/\sigma$ 를 크게하기 위해서는 beam의 지름을 크게하고 변위구배의 상한을 결정하는 가시적으로 측정이 가능한 줄무늬의 수  $n$ 을 크게 하기 위해서는 작게 해야한다. 이와 같이 변위의 상한과 변위구배의 상한은 beam지름에 대해 서로 상충되는 제한을 주고 있기 때문에 측정의 한계가 존재한다. 여기에서 변위의 상한은 전판을 이동시킴에 따라서 해결할 수 있기 때문에 변위구배의 상한이 보다 엄격한 제한을 받게된다.

또한 스트레인의 측정상한과 일치함에 따라서 표면성상변화의 영향보다는 변위구배의 상한이 더 큰 제한을