

CW 레이저 스페클 寫眞法에 의한  
스트레인 測定에 관한 研究

金 庚錫\*, 金 忠源\*\*, 李 承建\*\*\*

A study of strain measurement by continuous wave  
Laser speckle photography

Kim Koug Suk, Kim Choong Won, Lee Seung Keon

ABSTRACT

Speckle photography is a simple non-contacting method for analysing surface displacement. In its basic form, the object to be studied is illuminated with a beam of laser light from any convenient direction, and a double exposure photography of the surface recorded on the fine-grain film, the object is undergone the displacement to be measured between exposures. Like this, it allows the strain field to be evaluated in two dimensions. A direct experimental comparison of speckle photography with theoretical value on a notched tensile test specimen showed that serious errors could, however, occur due to local surface tilting and due to aberrations of the imaging lens. Methods of minimising these effects and those of the speckle de-correlation which occurs by the various conditios are discussed.

\* 朝鮮大學校 工科大學 機械設計工學科

\*\* 朝鮮大學校 工科大學 컴퓨터工學科

\*\*\* 朝鮮大學校 工科大學 造船工學科

## NOMENCLATURE

<p><math>A_r</math> : Distance between photographic plate and screen,</p> <p><math>B</math> : Speckle displacement on the photographic plate</p> <p><math>b</math> : Beam diameter.</p> <p><math>D_{max}</math> : Maximum displacement at inner of beam diameter</p> <p><math>D_{min}</math> : Minimum displacement at inner of beam diameter.</p> <p><math>D</math> : Lateral displacement of the object surface.</p> <p><math>F</math> : Spacing of fringes.</p> <p><math>F'</math> : Spacing of fringes in picture cell plane.</p> <p><math>F_{max}</math> : Maximum spacing of fringes at inner of beam diameter.</p>	<p><math>F_{min}</math> : Minimum spacing of fringes at inner of beam diameter.</p> <p><math>F_n</math> : Aperture ratio of Lens.</p> <p><math>f</math> : Focal length.</p> <p><math>M</math> : Magnification of photographic system.</p> <p><math>N_a</math> : Maximum degree of Young's fringe.</p> <p><math>n</math> : Visible fringe number.</p> <p><math>n_a</math> : Visible fringe number in rigid body translation testing.</p> <p><math>\lambda</math> : Wavelength of Laser.</p> <p><math>\sigma</math> : Speckle size.</p> <p><math>\sigma_n</math> : Individual speckle diameter.</p> <p><math>\epsilon</math> : Normal strain.</p>
---	---

### 緒 論

레이저광을 擴散反射面に 照射시킬 때 그 反射面안에, 또는 結像된 物體面の 像内に 나타나는 작은 粒狀의 斑點모양을 Speckle이라고 한다. 이것은 서로 不規則하며 또한 時間的으로는 定常의 位相關係에 있는 多數의 光波가 干涉하여 발생하는 것이다. 이 Laser Speckle은 이미 實用化되고 있는 Holography 等에는 Noise가 되기도 하지만 逆으로 이것을 利用하여 物體表面의 面內變位를 測定하는 方法이 最近 注目을 받고 있다.<sup>3) 4) 5)</sup> 이 中 代表的인 것이 Speckle 寫眞法<sup>6)</sup>으로 이 方法의 장점은 거친 表面을 가진 物體의 非接觸 測定이 가능하고 全視野의 變位 情報가 한 장의 寫眞필름인 寫眞眞광판에 記錄되며 測定感度は 그 때의 結像倍率에 의하여 廣範圍로 調節이 가능하고, 더우기 光學系가 아주 單純한 것이 특징이다. 이 方法으

로 어떤 點의 面內變位의 情報, 즉 變位の 크기와 方向을 求하는 데에는 擴散 레이저光으로 照明된 物體面을 變形前後로 二重露光攝影하고, 現象된 음판(Specklegram)에 레이저 빔을 照射하여 그 때 發生하는 Young의 줄무늬라 불리는 平行等間隔의 干涉 줄무늬의 間격과 方向을 測定한다. 그러나 얻어지는 것은 빔이 照射된 Specklegram 上의 點에 對應하는 物體面位 點의 變位情報<sup>7)</sup>이므로 物體의 전체 變位分布를 구하는 데는 Specklegram에서 빔을 상세하게 走査하면서 測定을 할 必要가 있고 또한 많은 時間을 必要로 한다. 또한 줄무늬의 間격은 變位量이 크게됨에 따라 逆으로 작게 되므로 肉眼에 의한 測定으로는 精密正確度面에서 문제가 있고 더우기 變位方向을 表示한 줄무늬方向을 精密正確도가 좋게 測定하는 것은 容易하지 않다.

어떠한 方法에 의한 것이라도 Speckle法에 의한 測定에서는 變形과 스트레인이 발생하면 Speckle pattern의 相關관계가 유지된다고 하는 것이 前提로 되고 있다.

最近 Parks<sup>(10)</sup>의 論文에서 볼 수 있는 것 같이 Speckle을 利用하는 경우 各種 測定法の 測定範圍와 精密正確도에 影響을 주는 要因에는 여러가지가 있다.

Speckle 寫眞法에 있어서는 Young의 줄무늬의 可視도가 低下하기때문에 測定 精密正確도가 低下되어 測定이 不可能하게 된다. 이 主要 原因으로서는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

(a)變位 (b)變位勾配 (c)表面性狀의 變化 (d)面外變位 (e)傾斜

앞에서 서술한 바와 같이 Young의 可視도를 低下시키는 要因에 5가지가 있지만, 面外變位, 傾斜에 대해서는 Ennos<sup>(7,9)</sup> 등이 限界에 대하여 詳細한 檢討를 하고 있다. 따라서 本 研究에서는 面外變位, 傾斜가 發生하지 않도록 試驗片을 제작하여 그 條件下에서 變位上限, 變位勾配上限 그리고 表面性狀의 影響을 調査하였다.

物體의 變形에는 岡體變位, 岡體回轉, 그리고 스트레인이 있지만 岡體變位에서는 精密正確도에 대하여 岡體回轉에서는 變位上限, 變位勾配上限 그리고 表面性狀變化의 影響에 대하여 調査하였다.

## 2. 스페클 寫眞法の 測定限界

### 2-1 變位の 測定上限

Young의 줄무늬는 빔 지름을 照射領域으로 하는 回折界 (Objective Speckle pattern) Noise로써 發生된다.

그 Speckle 크기  $\sigma$ 는

$$\sigma = 1.2 \frac{\lambda A_r}{b} \text{로 주어진다.}$$

$$\text{한편 } F = \frac{\lambda A_r}{DM} \text{ ..... (2.1)}$$

$$\frac{F}{\sigma} = \frac{b}{1.2MD} \text{ ..... (2.2)}$$

로 된다.

이  $F/\sigma$ 는 1개의 줄무늬 間隔에 包含된 Speckle 數로서 Young의 줄무늬의 可視도를 決定하는 파라메타의 하나이다.

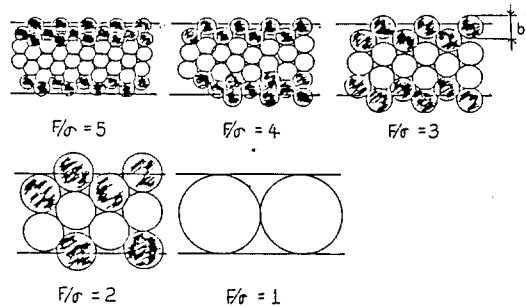


Fig. 1 Relationship between specklesize and visibility of Young's Fringe.

Fig. 1에 表示된 것같이  $F/\sigma$ 가 작게되면 줄무늬의 可視도가 低下하는 것이 幾何學的으로 밝혀졌다. 式(2-2)에서 檢證한 結果  $F/\sigma$ 는 3~5에서 限界로 된다.

$$\text{따라서 변위 } D \leq \frac{b}{6M} \text{ ..... (2.3)}$$

이다.

이것이 變位の 測定上限이다.

### 2-2 變位勾配의 測定上限

變位勾配가 있는 경우 빔지름內에서 變位の 크기가 달라지고 다른 줄무늬 間隔의 Young의 줄무늬가 겹쳐짐에 따라 무늬의 可視도가 低下된다.

빔 지름內의 最大變位를  $D_{max}$  最小變位를  $D_{min}$ 으로 하면 各各에 해당하는 줄무늬 間隔  $F_{min}$  와  $F_{max}$ 는 다음式

$$F_{min} = \frac{\lambda A_r}{MD_{max}} \text{ ..... (2.4)}$$

$$F_{max} = \frac{\lambda A_r}{MD_{min}} \dots\dots\dots (2.5)$$

주어진다.

$$\text{여기서 } n = \frac{F_{max}}{\Delta F} = \frac{F_{max}}{F_{max} - F_{min}} \dots\dots\dots (2.6)$$

로 定義하면

이것은  $F_{min}$ 의  $n$ 次와  $F_{max}$ 의  $(n-1)$ 次가 一致한다고 하는 것을 意味한다. 따라서  $n$ 이 클 수록 高次의 減무늬까지 잘 보이게 된다.

3.2장의 剛體回轉에서 대략  $n$ 이 보이는 減무늬 갯수와 一致하는 것을 알 수 있다. 여기서 (2.4)式, (2.5)式을 (2.6)式에 代入하면

$$n = \frac{D_{max}}{D_{max} - D_{min}} \dots\dots\dots (2.7)$$

이 된다.

物體面上的의 빔지름  $b/M$ 는 개이지 길이로서 變位勾配의 變化에 대하여 充分히 작아 變位勾配 또는  $b/M$ 에서 一定하게 되어

$$D_{max} = D_{min} + \frac{b\epsilon}{M} \dots\dots\dots (2.8)$$

이 成立하고

式(2.8)을 式(2.7)에 代入하면

$$n = \frac{MD_{max}}{b\epsilon} \dots\dots\dots (2.9)$$

이 된다.

따라서 變位勾配 上限은

$$\frac{MD}{bn} \geq \epsilon \dots\dots\dots (2.10)$$

로 주어진다.

더우기 回折光輪内에서 減무늬가 보이는 範圍量 剛體變位때에 보이는 減무늬의 갯수  $n_a$ 와의 比  $n/n_a$ 로서 評價된다.

$n_a$ 는 回折光輪의 크기로서 決定되며

$$\sin \gamma = \sin \phi \dots\dots\dots (2.11)$$

이고

따라서

$$\sin \gamma = 2 \sin \beta \dots\dots\dots (2.12)$$

로 成立한다.

한편

$$\sin \gamma = \frac{N_a \lambda}{MD} \text{ 이며}$$

$N_a$ 는 最大 減무늬 次數로서  $2N_a + 1 = n_a$  이지만,  $N_a$ 가 클때  $2N_a = n_a$ 로서

$$\sin \gamma = \frac{n_a \lambda}{2MD} \text{ 으로 쓸 수 있다.}$$

$$\therefore \frac{n_a \lambda}{2MD} \leq 2 \sin \beta$$

$$n_a \leq \frac{4MD \sin \beta}{\lambda} \dots\dots\dots (2.13)$$

한편  $n = \frac{MD}{b\epsilon}$  로 부터

$$\frac{n}{n_a} = \frac{\lambda}{4b\epsilon \sin \beta} \dots\dots\dots (2.14)$$

이다.

3.2 장의 剛體回轉에서  $n/n_a$ 는 0.05가 限界이다.

$$\therefore 0.05 \leq \frac{\lambda}{4b\epsilon \sin \beta} \dots\dots\dots (2.15)$$

$\lambda = 0.5145 \mu m$ ,  $\sin \beta = 0.13$  일때

$$b \leq \frac{0.02}{\epsilon}$$

이것에 따라 스트레인에 대한  $b$ 의 上限이 Fig. 2과 같이 決定된다.

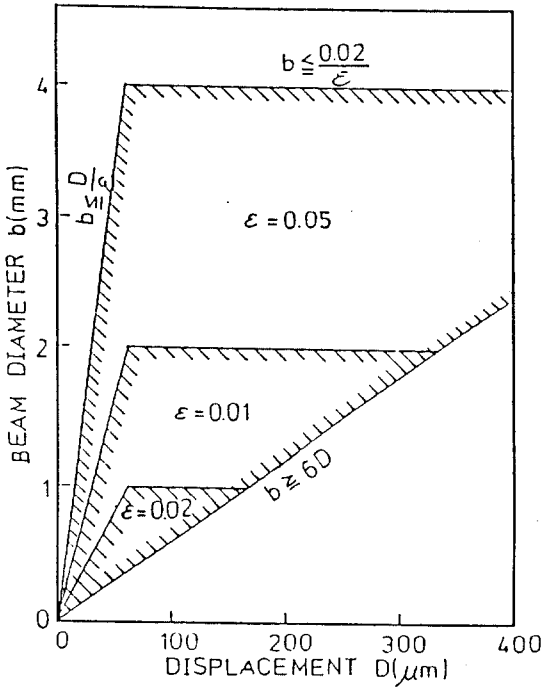


Fig. 2 Relationship between strain and upper limit of beam diameter.

### 3. 스페클 寫眞法에 있어서 測定限界의 實驗的 檢證

앞에서 서술한 바와 같이 Young의 줄무늬 可視度를 低下시키는 要因에 5가지가 있지만, 面外變位, 傾斜에 대해서는 Ennos<sup>7)9)</sup> 등이 限界에 대하여 詳細한 檢討를 하고 있다.

따라서 本 研究에서는 面外變位, 傾斜가 發生하지 않도록 試驗片을 제작하여 그 條件下에서 變位 上限, 變位 勾配 上限 그리고 表面性狀의 影響을 調査하였다.

物體의 變形에는 岡體變位, 岡體回轉, 그리고 스트레인 이 있지만 岡體變位에서는 精密正確度에 대하여 岡體回轉에서는 變位 上限, 變位 勾配 上限 그리고 表面性狀變化의 影響에 대하여 調査하였다.

### 3-1 實驗裝置와 方法

實驗裝置는 強體移動 및 強體回轉 試驗板을 마이크로메타(최소눈금 1/1000mm)가 붙은 微動裝置의 上部에 수직으로 달아서 面內岡體變位를 가한 前後의 二重露光 스페클그램(Specklegram)을 아르곤 레이저를 사용하여 Agfa-Gevaert 10F56의 乾板에 撮影기록하였다. 이 기록한 二重露光 스페클그램에 레이저 빔을 照射하였을 때에 發生되는 Young의 줄무늬의 줄무늬 間隔과 줄무늬 方向으로부터 面內變位 내의 크기와 方向을 얻을 수가 있지만 그러한 것들을 程度 좋게 구하기 위하여 TV카메라와 컴퓨터에 의한 2차원 畫像解析 시스템을 이용하였다[11]. 스페클그램에 레이저빔을 비치면, 스크린에 發生한 Young의 줄무늬는 TV카메라를 통하여 컴퓨터에 보내져, 다음과 같은 순서로써 畫像處理되어 解析된다. 우선 變位의 方向 즉 줄무늬의 方向을 구하기 위하여 Young의 줄무늬 輝度分布를 임의의 方向으로 반복 합하여 일차원 輝度分布를 만든다. 이 輝度分布에서 인접점의 휘도와의 차를 供給하여 합한 것을 콘트라스트 평가량으로 하여, 이것이 最大로 되는 반복 합한 方向을 구하면 그 方向에 垂直하는 方向으로서 變位 方向을 구할 수 있다. 또한, 그 輝度分布의 power-Spectrum을 FFT로 分析하여 變位量을 구하였다.

### 3-2 岡體變位의 測定

먼저 가장 簡單한 岡體變位에 대하여 測定하였다. 그 結果 Fig. 3과 Fig. 4 과 表示한 것같이 렌즈 收差의 影響이 나타나 있다. Fig. 3는 렌즈를 使用하지 않은 Objective Speckle Pattern內에서 乾板을 變位시킨 것이며 Fig. 4는 一般的인 Speckle 寫眞法에 의한 岡體變位의 測定이다. Fig. 4에서는 렌즈의 中心에서 外側으로 갈수록 變位가 크게된다. 이것은 Fig. 3의 誤差보다도 훨씬크다. 岡體變位에서는 測定位置에 의하지 않고 一定해야만 한다. 따라서 精密正確度에 있어서는 解析系보다도 結像系에 問題가 있다. (Fig. 5)

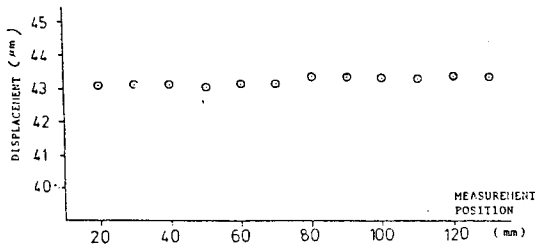


Fig. 3 Measured displacement caused by rigid body translation in objective speckle pattern.

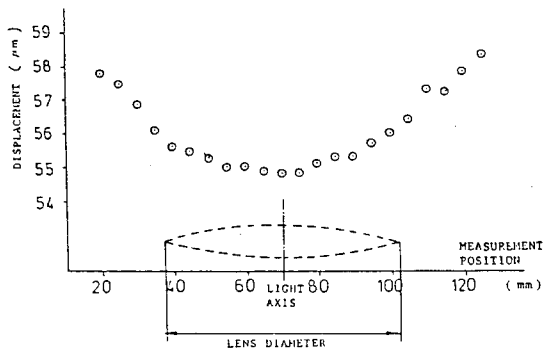


Fig. 4 Effect of Lens aberrations in subjective speckle pattern.

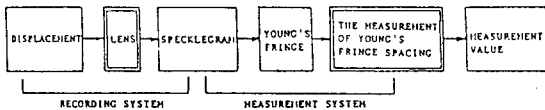


Fig. 5 Block diagram of speckle photography measurement testing.

解析系로서는 스크린위에 나타난 Young의 줄무늬를 화상처리에 의한 방법에 의하여 解析하였다.

### 3-3 岡體回轉의 測定

Photo. 1에 表示한 것 같이 光軸과 平行한 軸에 關하여 岡體回轉을 測定하였다.

이때 傾斜 面外變位가 發生되지 않는 面內에 回

轉을 주어야만 한다. 그 때문에 Photo. 1과 같은 岡體回轉裝置를 製作하였다.

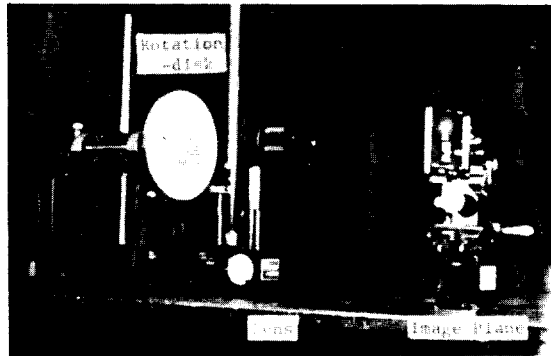


Photo. 1 Photograph of recording system in rigid body roation testing.

回轉中心에서 90mm인 곳을 마이크로미터로써 微動시켜 回轉을 주는 構造로 되어 있다.

또 岡體回轉에 있어서는

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

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

여기서  $w$  : 回轉角

$x, y$  : 任意의 直角座標

$u$  :  $x$ 方向 變位

$v$  :  $y$ 方向 變位

즉 어떤 곳을 移動시켜도 變位勾配는 一定하다.

### 3-4 <實驗結果>

回轉을 (2.2, 3.3, 6.6, 8.8, 11.1)  $\times 10^{-3}$  rad을 주고 各各에 대하여 測定이 가능한한 測定하여 變位上限과 變位下限을 구하였다. 그 결과는 다음

Table 1 Results of measurement in rigid body rotation testing

Strain $\epsilon (\times 10^{-2})$	Minimum displacement at inner of beam diameter $D_{min} (\mu m)$	Visible fringe 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

Table 1과 같다.

여기서 Visible fringe number n은 式(2 9)와 式(2 2)로부터 算出하였다.

이와같이 變位勾配가 크게됨에 따라 變位下限은 크게 되지만 n은 대개 一定하다. 이것은 2.2장의 變位勾配上限의 理論과 잘 一致한다.

또  $\sigma = 1.2 \frac{A_r \lambda}{b}$  의 變位上限의 理論에서  $F/\sigma$  는 3~5에서 限界로 되는것이 像想 되므로 이것도 잘 一致하고 있다.

또 빔지름 2mm에서는 1.11%가 變位勾配上限이다.  $F/\sigma$ 와 n으로부터 생각하면 매우 큰 變位勾配도 變位가 큰 곳에서는 測定可能하지만 2.2장에서 설명한 것 같이 줄무늬가 보이는 範圍가 좁아서 實際로는 測定할 수 없다.

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

이다. 이 값을 本 論文의 데이터로 使用하였다.

#### 4-1 균열판의 一軸引張

Fig. 6에 表示한 試驗片을 一軸引張하였다. 試

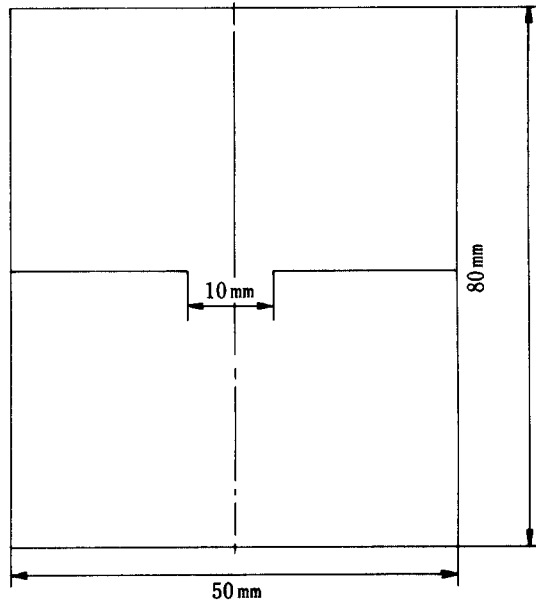


Fig. 6 Tensile test specimen.

驗片은 인靑銅으로 두께 0.3mm이다. 試驗機는 기어로서 強制變位를 주었다. 面外變位를 방지하는 가이드가 붙어있다. 試驗片의 하중을 30kgf의 간격으로 증가시켜가며 각 간격마다 二重露光을 하였다. 이것은 初期에 발생하는 오차를 줄여주기 위한

것이다.

〈測定結果〉

上記의 實驗에 의하여 觀察한바에 의하면 均일부근의 같은 測定點에서 빔지름을 2mm부터 1mm로 바꾸면 高次的 줄무늬까지 보이게 된다.

위의 實驗에 使用한 實驗裝置가 Photo. 2에 나타나 있다.

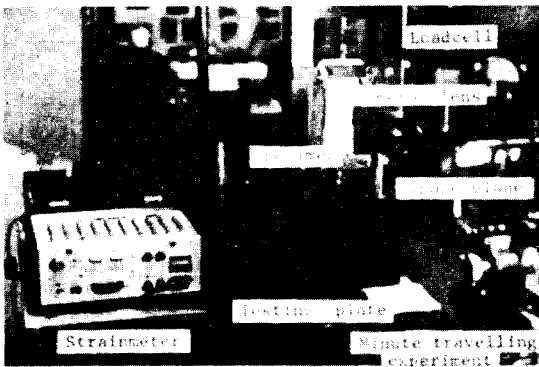


Photo. 2 Experimental set-up for speckle photograph in tensile testing.

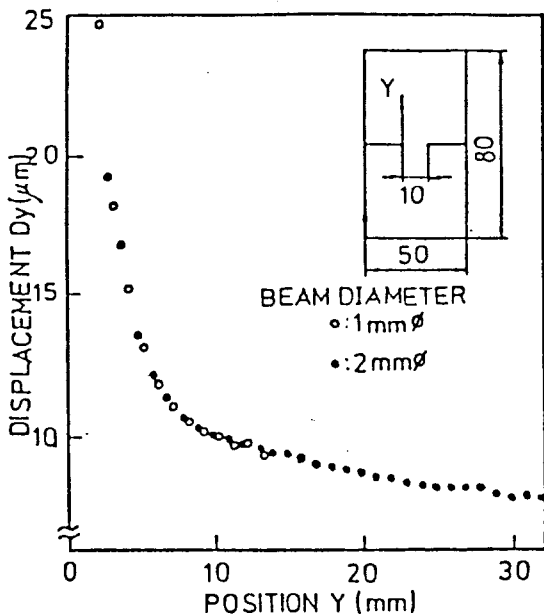


Fig. 7 Experimental displacement relative to crack, measured by speckle photography.

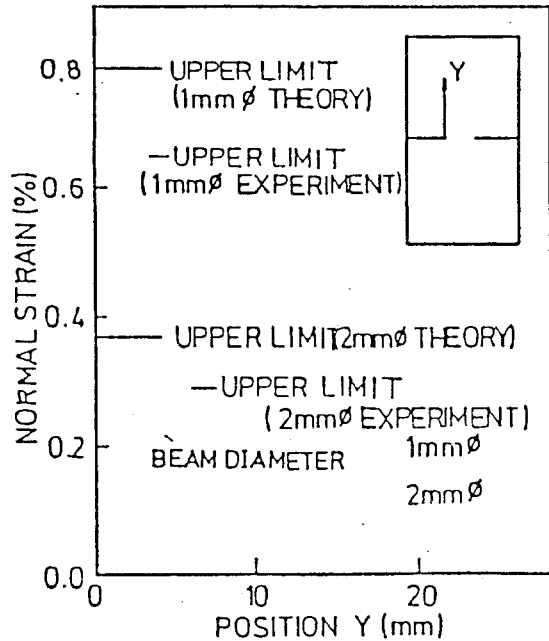


Fig. 8 Comparison between theory and experiment value of upper limit in speckle photography measurement.

試驗片의 均열端에 가까울수록 高次的 영의 줄무늬가 발생되므로 Contrast가 低下된다. 이것은 2. 2 章에 서술된 變位勾配에 의한 可視度의 低下라고 생각할 수 있다. 다음에 解析結果가 Fig. 7, Fig. 8에 표시되어 있다.

5 實驗的 考察

Fig. 7에 표시된 것같이  $b=2mm$ 에서는  $Y=2$ ,  $75mm$ ,  $b=1mm$ 에서는  $Y=2mm$ 가 限界이다. 이때의 各各의 變位勾配의 理論上限은  $\epsilon \leq MD/bn$ 에 의하여

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

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

이다. Fig. 8에 表示한 것 같이 測定上限과 잘 一致하고 있으며 또 測定上限이 빔지름에 의존하고 있다. 앞에서 前述한 것 같이 이 빔지름에 있어서 줄무늬의 可視度가 左右되어 이 경우 變位勾配上限



에 의하여限界가 결정된다고 말할 수 있다. 즉 表面性狀變化보다도 變位勾配上限의 쪽이 더욱 엄격한制限으로 되고 있다.

測定上限이 理論上限보다 약간 밀돌고 있는 原因으로는 主스트레인 方向과 移動된 直線의 方向이 一致하고있지 않기 때문에 實際의 빔지름內의 最大 變位勾配는 더욱 크다고 생각할 수 있다. 二次元的으로 解析을 하면 主스트레인 方向도 알 수 있지만 줄무늬가 局部的으로 發生되었다 혹은 發生되지 않았다 하는 不安定한 狀態이기 때문에 불가능하다. 全面에 있어서 주무늬가 發生되기 위해서는 試驗機와 試驗片의 改良이 필요하다.

## 6 結 論

本 研究에서는 Young의 줄무늬 可視度를 低下시키는 7가지 要因이 相互間에 어떠한 關係가 있는 지, 또는 어떠한 要因이 가장 重要한 制限으로 되는 가를 알아보는 것을 目的으로 하였는데 變位, 變位勾配, 表面性狀變化에 대한 要因이 큰 것임을 確認하였다.

變位上限과 變位勾配上限은 빔지름에 대하여 역의 制限을 주기때문에 測定의 限界가 存在하고 變位上限은 乾板을 移動시킴에 따라 解消되기 때문에 變位勾配上限쪽이 보다 엄격한 制限을 받는다.

또한 變位勾配上限이 스트레인 測定上限과 一致함에 따라 表面性狀變化 影響보다도 變位勾配上限쪽이 보다 엄격한 制限을 받는다는 것이 밝혀졌다. 따라서 스트레인 測定上限은 變位勾配上限에 의해 決定된다.

## 參 考 文 獻

1. Groh, G : The Engineering Uses of Holography, edited by E. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge Univ. Press, 1970 pp. 483.
2. 角誠之助 : 構造強度解析におけるレーザの應用, 日本航空宇宙學會誌, 第25卷, 第281號 (1977) pp. 259~268.
3. 角誠之助, 山崎正秀, 室園昌彦, 金庚錫 : スペックルホトグラフィと量像處理による面内變位計測, 九州大工學集報, 60(2), pp. 201~206, (1987)
4. R. K. Erf : Application of Laser Speckle to Measurement, Laser Application, VoL. 4, Academic Press(1980).
5. 角誠之助 : 構造と材料強度のレーザ應用計測, 日本機械學會誌, 第82卷, 第733號(1979), pp. 1320~1325.
6. 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).
7. Archbold. E, Ennos. A. E : Displacement Measurement from Double-Exposure Laser Photographs, Optica, 19(4), pp. 253~271, (1972).
8. 山口一郎 : スペックル寫眞の自動解析装置の開発と應用, 第15回・ひずみ測定シンポジウム講演集, pp. 37~40(1982)
9. Archbold. E, Ennos. A. E, Virdee. M. S : Speckle Photography for Strain Measurement-A Critical Assessment, S. P. L. E., 136, pp 258~264, (1977).
10. V. J. Parks : The Range of Speckle Metrology, Experimental Mechanics, 20(6) pp. 181~191, (1980)
11. 山口一郎 : レーザー・スペックルひずみ計による高温下のひずみ測定, 非破壊検査, 32(9) pp. 676~682, (1983).