

<논문> SAE NO. 933757

# ESPI법에 의한 강체 회전 변위 측정에 관한 연구

## A Study on the Rotating Displacement Measurement of Rigid Body by ESPI Method

김 경 석\*    홍 명 식\*\*  
K. S. Kim,    M. S. Hong

### ABSTRACT

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) using a CW laser, a video system and image processor was applied to the rotating displacement of rigid body. ESPI require no special surface preparation or attachments and displacements between any two arbitrary points on the surface can be measured.

The characteristic speckle pattern formed when imaging a scattering surface illuminated by laser light retains phase information, which can be used for interferometric measurement of surface displacement. The application of this principle to measuring in-plane displacement resolved in one direction is described, together with the novel use of television equipment to detect and process the information contained in the speckle pattern. This is faster, and more convenient and versatile than customary photographic methods.

주요기술용어 : ESPI(전자처리 스펙클 패턴 간섭), Continuous Wave(CW : 연속파), Photographic Method (사진법), Image Processor(화상처리기)

### 1. 서    론

Laser Speckle은 Laser 광을 물체의 확산면에 조사할 때 그 반사광의 중앙에 혹은 조사면의 결상 중앙에 발생하는 작은 불규칙한 입자모양의 반점으로서 물체 표면에 있는 불규칙한 격자로 간주할 수 있다. 이와같은 Speckle보다 널리 알려진 입자 모양을 Speckle Pattern<sup>1,2)</sup>이라 한다. Speckle은 물체의 변형에 따라 이동하고 그 Pattern도 변한다.

본 연구에서는 Speckle Pattern의 이와 같은 성질을 이용하여 물체의 변형을 측정하고자 한다. 이 측정법은 비접촉법이고, 측정부 전체의 변형 상태를 한번에 기록할 수 있으며, 미소 변형의 측정이 가능하고, 면의 변형의 영향이 적으며, 등변위선을 직접 얻을 수 있으며, 화상처리에 의해 간섭 줄무늬의 Contrast를 높일 수 있고, Real Time에 의해 간섭 줄무늬의 관찰이 가능하다는 잇점이 있다<sup>3)</sup>. 또한 Pattern측정의 대표적인 광탄성 피막법과 모아레법<sup>4)</sup> 등과 비교해 볼 때 본

\* 조선대학교 기계설계공학과

\*\* 정회원, 조선대학교 기계공학과

실험방법은 측정물에 처리를 할 필요가 없으며 완전한 비접촉 측정법이며 감도 또한 매우 높은 방법이다. 본 연구실에서도 스페클 사진법<sup>6)</sup>과 Holography법 등에 의한 변위측정을 했었으나 전자처리에 의한 측정방법의 적용으로 보다 정밀한 측정이 가능하리라 생각된다.

본 연구는 이 Speckle Pattern 간섭법의 적용을 TV Camera와 화상처리장치를 조합한 장치에 의해 행하는 ESPI<sup>6)</sup>법을 강제 회전 변위에 적용하여 그 가능성과 문제점을 파악하고자 하는 것이다.

## 2. Speckle 사진법과 Speckle Pattern 간섭법

Laser 광에 의해 조사되는 확산 반사면의 상으로써 Speckle Pattern이라 불리우는 반점 모양이 관찰된다. 이 모양은 확산 반사면에서 반사광의 불규칙한 간섭에 의해 발생한다. 이 Speckle Pattern에는 반사면의 정보가 포함되어 있고 반사면의 변형 전후에는 Pattern을 간섭시키므로 면내 변위를 알 수 있다.

본 연구에서는 Speckle Pattern 간섭법에 의해 측정 실험을 하지만 우선 종래의 Speckle 사진법과 비교함으로써 두가지 방법의 차이점을 명백히 하고자 한다.

Speckle 사진법은 측정면에 비접촉이고, 광학계가 비교적 간단하며, 전시아의 변위 정보를 한번에 얻을 수 있는 잇점이 있는 반면 면의 변형이 존재할 경우 측정이 곤란하며, Speckle 크기의 5~6배의 변위량이 측정되며, 흩어져 있는 점의 변위와 변위 방향밖에 알 수 없으므로 측정면 전체의 변위 분포를 알기 위해서는 많은 점을 측정·해석해야만 하며 이때 측정 위치의 결정이나 Beam 직경의 크기에 의한 측정오차가 발생하기 쉽다는 결점이 있다. 또한 Speckle Pattern 간섭법은 측정면에 비접촉이며, 면의 변형에 강하고 임의의 위치 방향의 변위 분포를 얻을 수 있으며, Speckle 크기 이하의 매우 미소한 변위량을 측정할 수 있는 반면 공기 요란의 영향을 크게 받는 결점이 있다<sup>7)</sup>.

이들 두가지 방법에는 각기 일장일단이 있고 어느쪽이 좋은 방법이라고는 할 수 없다. 따라서 Speckle 사진법이나 Speckle Pattern 간섭법 중 어느쪽이든 적당한 방법을 선택함으로써 다양한 변위의 측정이 가능하리라 생각한다.

여기에서는 Speckle 사진법과 Speckle Pattern 간섭법의 원리를 비교하여 두가지 방법의 차이를 밝히고자 한다.

### 2.1 Speckle 사진법

Speckle 사진법은 결상계와 해석계로 구성되어 있으며 Fig.1에서 상면을 건판 또는 Film으로 바뀌 놓은 것이 Speckle 사진법의 결상계이다. 측정할 물체에 Laser 광을 조사하고 이것을 건판 위에 결상한다. 이것은 Laser를 조사한 면을 Camera로 촬영하는 것에 불과하다. 이때 건판 위에서는 물체상과 함께 Speckle이 찍혀진다는 의미이지만 이 Speckle은 물체상의 한점 한점에 대응하고 있고 물체가 이동하면 그에 따라 Speckle도 이동한다. 따라서 물체가 변형하기 전과 변형 후에서 2중 노광하게 되면 건판에는 물체의 변형이 Speckle의 이동으로 기록된다. 이 건판을 현상해서 만들어진 Nega를 Specklegram이라 한다.

해석계는 Fig.2와 같은 것으로 앞에서 만들어진 Specklegram에 가는 Laser Beam을 조사한다. 그러면 이동한 Speckle이 이중 Slit으로 작용하고 뒷쪽의 Screen상에 Young의 줄무늬라 불리우는 평행 등간격의 줄무늬가 나타난다. 이 Young의 줄무늬는 건판상의 Beam을 조사한 위치에 대응되는 물체 표면 위의 점의 변위를 나타내며 Young의 줄무늬에 수직한 방향이 변위의 방향을 나타내며 줄무늬의 간격이 변위량과 대응된다.

줄무늬의 간격 F와 실제 변위량 D 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$D = \frac{\lambda \cdot L}{F \cdot M} \quad (1)$$

여기에는  $\lambda$ 는 Laser의 파장, L은 Specklegram과 Screen 사이의 거리, F는 촬영배율이다.

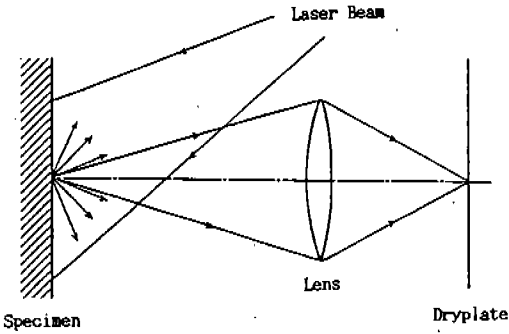


Fig.1 The Basic Optical System of Speckle Photographic Method.

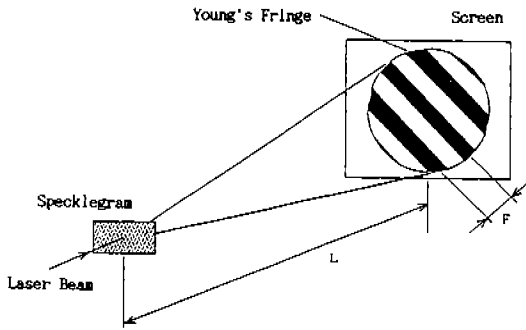


Fig.2 The Analyzing System of Speckle Photographic Method.

2.2 Speckle Pattern 간섭법

2.2.1 기본원리

Speckle Pattern 간섭법은 앞에서 설명한 Speckle 사이의 간섭을 이용해 측정하는 것으로서 Speckle 크기 이하의 매우 미세한 변위를 측정하는 것이다. 확산 반사를 일으키는 물체 표면에 Laser 광을 조사할 때 반사광을 Vector량이라하면 그 진폭은 대부분 일치하지만 위상은 불규칙하다. Speckle Pattern을 간섭 측정법으로 이용할 수 있는 것은 이 Speckle의 휘도가 주어진 Speckle의 위상관계에 의해 결정되기 때문이다.

Fig.3과 같이 어떤 Speckle  $\vec{a}_s$ 와 참조광  $\vec{a}_R$ 을 생각해 보자. 여기에서 Speckle의 크기는 휘도를 나타내며 방향은 위상을 나타내고 있다.  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$ 의 초기상태에서의 위상차를  $\delta_1$ 이라하고  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$

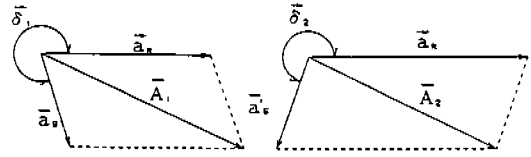


Fig.3 The Basic Principle of Speckle Pattern Interferometry System.

의 간섭에 의해  $\vec{A}_1$ 이 발생되면 발생된  $\vec{A}_1$ 의 휘도  $I_1$ 은 다음과 같이 된다.

$$I_1 = |\vec{A}_1|^2 = |\vec{a}_R|^2 + |\vec{a}_s|^2 + 2|\vec{a}_R| |\vec{a}_s| \cos\delta_1 \quad (2)$$

여기에서 참조광  $\vec{a}_R$ 은 일정하게 물체 표면이 미소량만큼 변해서  $\vec{a}_s$ 를 발생시킨다. 단 변위량은 광의 파장보다 적고  $\vec{a}_s$ 를 발생시키는 전반사광은 같은 진폭을 유지하는 것으로 한다. 물체 표면의 변위에 의해 광로 길이가 변하고 이 반사광은 모두 같은 양만큼 위상차가 발생하기 때문에 결과적으로  $\vec{a}_s$ 의 휘도는 변하지 않으며 위상만 변한다. 이때 새롭게 발생한 Speckle을  $\vec{a}_s$ 로 하고  $\vec{a}_R$ 과의 위상차는  $\delta_2$ 가 된다면  $\vec{a}_s$ 와  $\vec{a}_R$ 의 간섭에 의해 발생하는 광의 Speckle  $\vec{A}_2$ 의 휘도  $I_2$ 는 다음과 같다.

$$I_2 = |\vec{A}_2|^2 = |\vec{a}_R|^2 + |\vec{a}_s|^2 + 2|\vec{a}_R| |\vec{a}_s| \cos\delta_2 \quad (3)$$

이 식으로부터 다음과 같은 것을 알 수 있었다. 확산 반사면의  $|\delta_1 - \delta_2|$ 가  $2\pi$ 가 될때까지 연속적으로 이동한다면 휘도는 다시  $I_1$ 과 같게 된다. 즉 위상의 증가와 함께 Speckle의 휘도는  $2\pi$ 의 주기로 변한다.

물체 표면에 하중을 가해 변형이 발생될 경우 물체면상에서 발생하는 위상변화는 전체 Speckle Pattern에 영향을 미친다. 따라서 변형 전후의 Speckle Pattern을 감산하므로 전시에야 걸쳐 변위를 볼 수 있다. 이동하지 않거나 파장  $\lambda$ 의 정

수배만큼 광로 길이가 변한 경우 양쪽 Pattern에서의 Speckle의 휘도는 같으므로 감산에 의해 휘도는 0이 된다. 광로 길이의 변화가  $\lambda$ 의 정수배가 되지 않는 경우 휘도는 2개 Speckle의 감산에 의해 얻어진다. 결과적으로 전체적인 모양은 결국 휘도의 주기적인 변화로 나타난다. 이 줄무늬는 간섭 줄무늬이지만 휘도의 비교에 의해 발생한 것이므로 일종의 모아레 줄무늬라 생각할 수 있다. 또한 물체의 변위량이 Speckle 크기를 넘는다면 휘도 사이의 차가 일어질 수 없으므로 줄무늬를 얻을 수 없게 된다. 따라서 Speckle Pattern 간섭법의 측정범위의 한계는 Speckle의 크기이다.

2.2.2 기본 광학계

Fig4에 Speckle Pattern 간섭법의 기본 광학계를 나타내고 있다. Laser 광 1, 2를 같은 각도  $\theta$ 로 피측정면에 조사한다. Laser 광을 조사시킨 면을 Lens에 의해 물체면 상에 결상한다. 이 경우 2개의 Laser 광을 포함한 면과 측정면과의 교선 방향 즉 그림중의 x방향이 변위를 측정하는 방향이다.  $\alpha$ 는 관측 방향과 z축이 이루는 각이다. 하나의 Laser 광에 의해서도 물체면상에 Speckle Pattern이 결상될 수 있지만 2개의 광속에 의한 각각의 Speckle Pattern에 의해 새로운 Speckle Pattern이 발생한다. 이 Speckle Pattern의 강도는 2

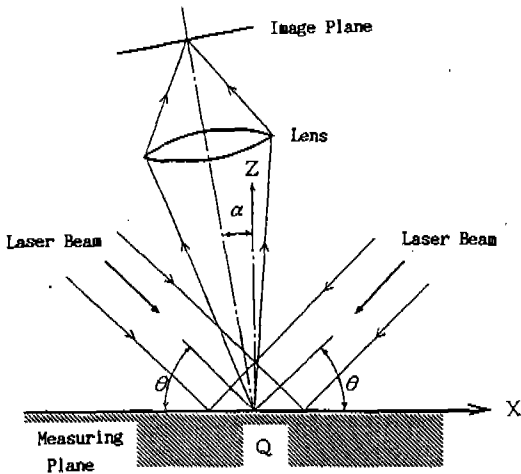


Fig.4 The Basic Optical System of Speckle Pattern Interferometry System.

개의 Speckle Pattern 간섭에 의해 결정된다. 따라서 하나의 광을 물체광으로 생각하면 다른 하나의 광은 기준광으로 작용하는 것이다.

Fig5와 같이 측정면 상의 점 Q가 극히 일반적인 변위 d만큼 변위가 생긴 경우를 생각해 보자. u는 변위 d의 x방향 성분, w는 z방향 성분이다. 이 경우 광 1과 관측 방향에서 이루는 광로 변화량  $L_1$ 은

$$L_1 = u \cos\theta - u \sin\theta - w \sin\theta - w \cos\theta \quad (4)$$

로 생각할 수 있다. 마찬가지로 광 2와 관측 방향에서 이루는 광로 변화량  $L_2$ 는

$$L_2 = -u \cos\theta - u \sin\theta - w \sin\theta - w \cos\theta \quad (5)$$

가 된다. 하나의 Laser 광은 다른 광의 기준광으로 작용하기 때문에 줄무늬의 명암은  $L_1$ 과  $L_2$ 의 차에 의해 결정된다. 줄무늬의 차수를 n이라 하면

$$L_1 - L_2 = 2u \cos\theta = n\lambda \quad (6)$$

가 된다. 줄무늬의 명암은 면의 변형 w나 관측 방향  $\alpha$ 와는 무관하고 면내 변위 u만에 의존하고 있음을 알았다. 이때 줄무늬의 밝기

$$u = \lambda / (2 \cos\theta) \quad (7)$$

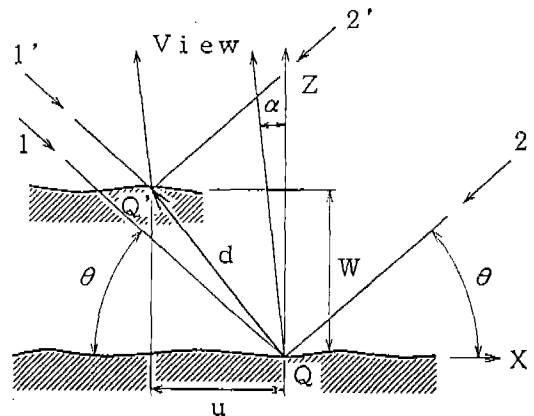


Fig.5 The State of Displacement.

가 되는 변위에 대응하여 주기적으로 변화한다.  
 이상에서와 같이 x방향의 등변위 줄무늬를 얻을 수 있지만 앞에서 언급한바 있는 2개의 광을 포함한 면과 물체 표면과 이루는 교선의 방향을 변화시킴으로 임의 방향의 등변위 줄무늬를 얻을 수 있다.

### 3. 광학계 및 해석계

#### 3.1 광학계의 배치

본 실험에서 사용한 광학계의 평면 배치도를 Fig.6에, 광학계의 배치 사진을 Photo.1에 나타냈다. Mirror 2와 Mirror 4는 상하에 배치되고 윗부분과 아랫부분에서 각각 같은 각도로 시험편에 조사하고 있다. Beam Splitter에서 시험편까지의 2개의 광로는 그 길이가 거의 같도록 배치하고 두 광의 광량은 ND Filter에 의해 같도록 조절하여

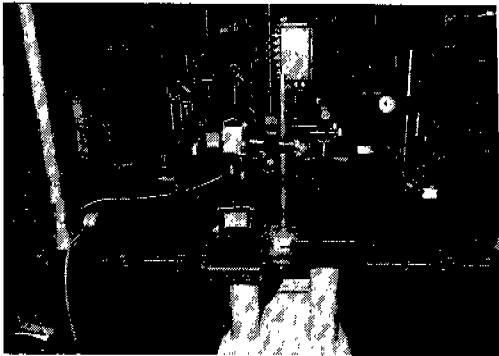


Photo.1 The Optical System.

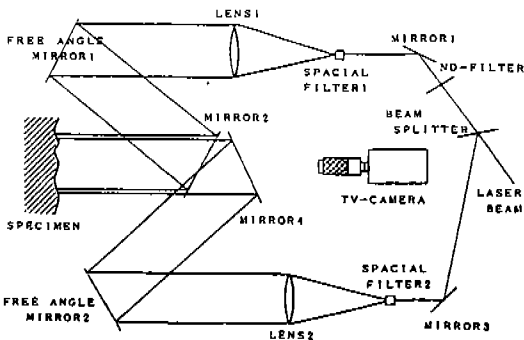


Fig.6 The Optical System.

보다 좋은 Contrast의 줄무늬를 얻을 수 있었다.

#### 3.2 화상 처리 장치

본 실험에서는 변형 전후의 Speckle Pattern을 간섭시키므로 Fig.7과 Photo.2의 화상처리장치 (NEXUS社 QUBE)를 사용하였다.

측정면에 두방향에서 Laser 광을 조사하고 이것에 의해 발생하는 Speckle Pattern을 TV Camera에 의해 촬영하고, 해상도 640×560, 각 화소당 256계조의 2차원 Digital 화상 Data로 화상처리장치의 Memory에 수록한다. 이것을 기준화상으로 해서 TV Camera에서 차례로 수록한 화상과 각각 감산하여 그 절대치를 나타내게 되므로 시간이 지남에 따라 변하는 간섭 줄무늬를 약 1/4초마다 Real Time으로 볼 수 있다. 이들중 상태가 좋은 줄무늬만을 Floppy Disk에 수록하고 화상 처리 장치에 의해 해석했다.

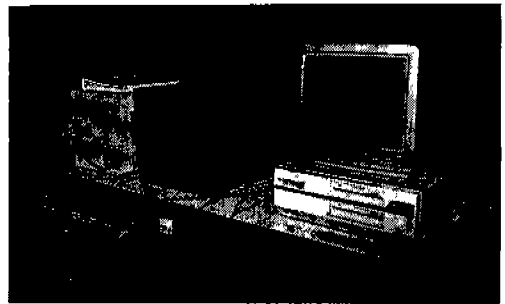


Photo.2 The Image Processing System.

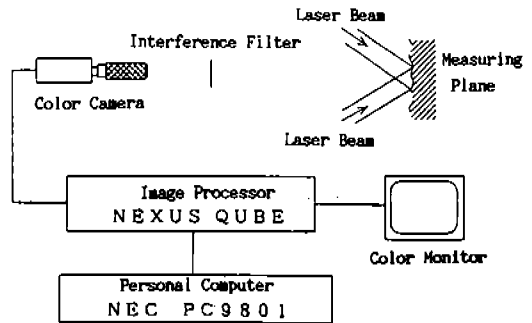


Fig.7 The Composition of Image Process Apparatus.

4. 강제회전변위 측정

강제회전변위 측정실험장치를 Photo.3에 나타냈다. 이 장치는 가로로 최소눈금 1/1000mm의 Micrometer가 부착되어 있고 이 Micrometer에 의해 원반 회전중심의 회전축에서 90mm의 위치에 접선 방향의 미소 변위를 주어 원반을 미소량만큼 회전시킨다. 이 회전에 의한 줄무늬 간격을 측정하고 그 측정치에서 변위를 구하고 그 값과 Micrometer에 의한 실제 변위와 비교함으로써 본 실험의 정밀도를 검증했다. 줄무늬 간격의 측정은 NEXUS QUBE의 Program에 의해 TV Monitor 상에서 구할 수 있었다.

Fig.8과 같이 원반 상의 임의의 점 P가 P'로 미소 변위된 것이다. 이때 회전각을  $\Delta\phi$ 라 하면 점 P의 Y방향 변위 V는

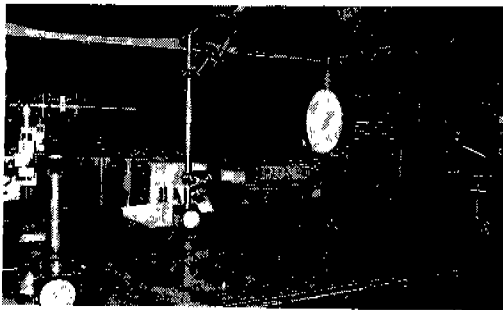


Photo. 3 The Optical System and Rotating Displacement Apparatus.

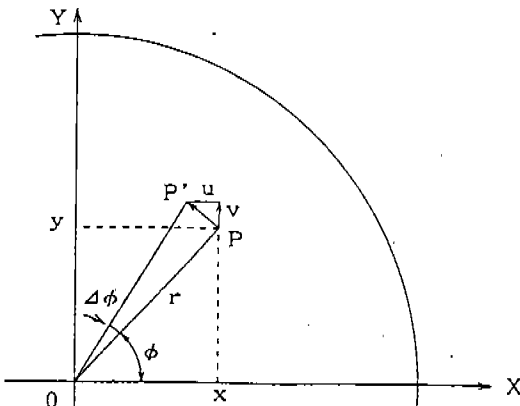


Fig.8 The State of Rotating Displacement.

$$V=r \Delta\phi \cos\phi \tag{8}$$

가 된다.

$$r \cos\phi=X \tag{9}$$

라 놓으면

$$V=X \Delta\phi \tag{10}$$

가 된다.  $\Delta\phi=\text{constant}$ 이므로 X가 일정하다면 V 또한 일정하게 된다. 즉 이 강제 실험에 의해 얻어진 Y방향 변위의 등변위선은 Y축과 평행한 직선이 되는 것이다.

5. 결과와 고찰

ESPI법과 Micrometer에 의해 강체를 회전 변위시킨 결과를 Table.1과 Fig.9, 10, 11, 12에 나타냈으며 줄무늬 사진을 Photo.4에 나타냈다. 실험에서는 상온에서 시험편을 Micrometer에 의해 접선 방향으로 강체를 회전시키면서 실험했다.

그 결과 상온에서의 측정에 있어서도 Laser 광로중의 공기의 요란이나 미세한 진동의 영향을 받을 수 있었으며 이러한 외란의 영향이 제거된다면 더욱 정밀한 측정이 이루어질 수 있으리라 생각된다. 본 실험에 이용된 ESPI법은 측정물에 어떠한 처리도 필요없고 Laser Beam을 조사할 수만 있으면 그 물체의 Strain, Stress 및

Table 1 The Measuring Results of Rotating Displacement.

1st	Micrometer	5	10	15	20	25
	ESPI	6.09	9.61	14.7	20.2	25.2
2nd	Micrometer	5	10	15	20	25
	ESPI	5.20	10.2	15.4	20.2	25.8
3rd	Micrometer	5	10	15	20	25
	ESPI	5.46	9.97	15.4	20.1	26.2
4th	Micrometer	5	10	15	20	25
	ESPI	5.01	9.63	15.7	20.8	25.2

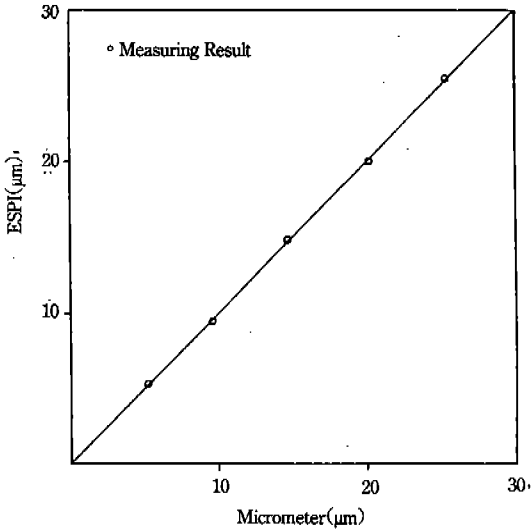


Fig.9 The 1st Measuring Results of Rotating Displacement.

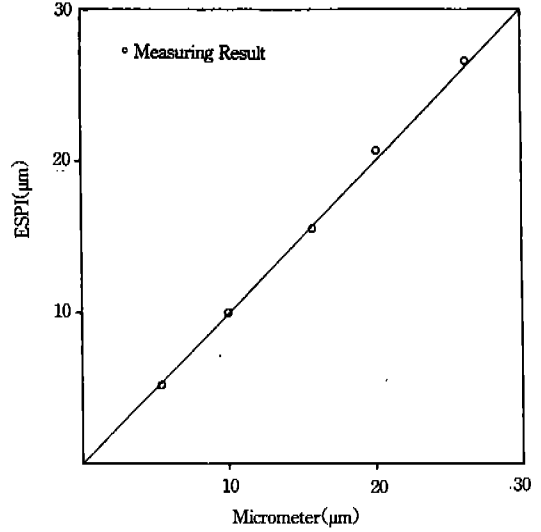


Fig.11 The 3rd Measuring Results of Rotating Displacement.

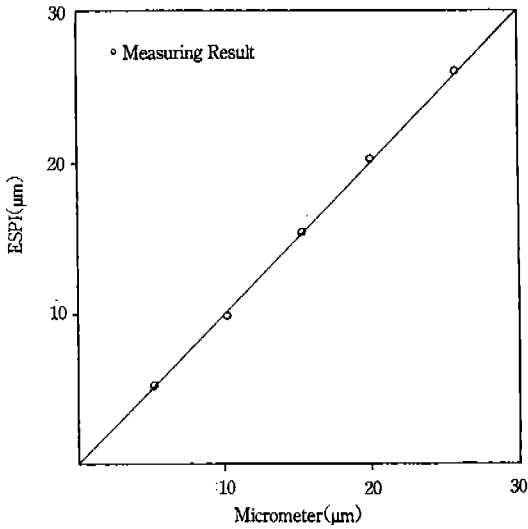


Fig.10 The 2nd Measuring Results of Rotating Displacement.

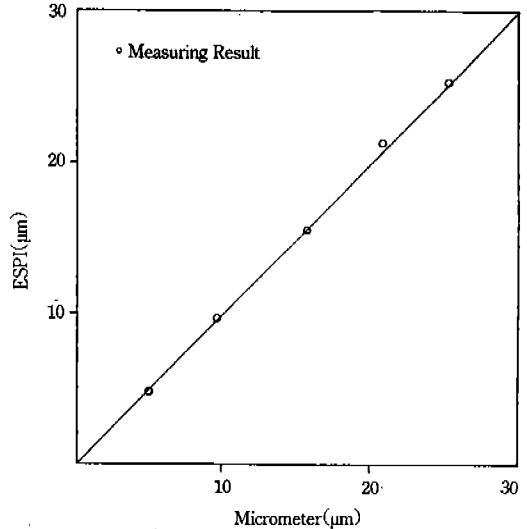


Fig.12 The 4th Measuring Results of Rotating Displacement.

변위를 측정할 수 있는 완전 비접촉 측정방법으로 매우 유용한 측정법이라 생각되며 Fig.9, 10, 11, 12에서 Data의 오차는 ESPI법의 정확성이 문제시된 것이라기 보다는 Micrometer의 수조작에 있어서의 오차라고 생각된다.

Fig.9, 10, 11, 12에 있어서 좌표축은 회전 중

심에서 90mm 위치에 있는 Micrometer에 의해 나타내지는 접선 방향 변위를 나타내고 있고 실험점은 Micrometer에 의한 변위에 대한 ESPI법에 의한 같은 위치에서의 측정 변위를 나타내고 있다. Fig.9, 10, 11, 12에서는 ESPI법과 Micrometer에 의한 결과가 일치한 상태를 직선으로 나타냈으며

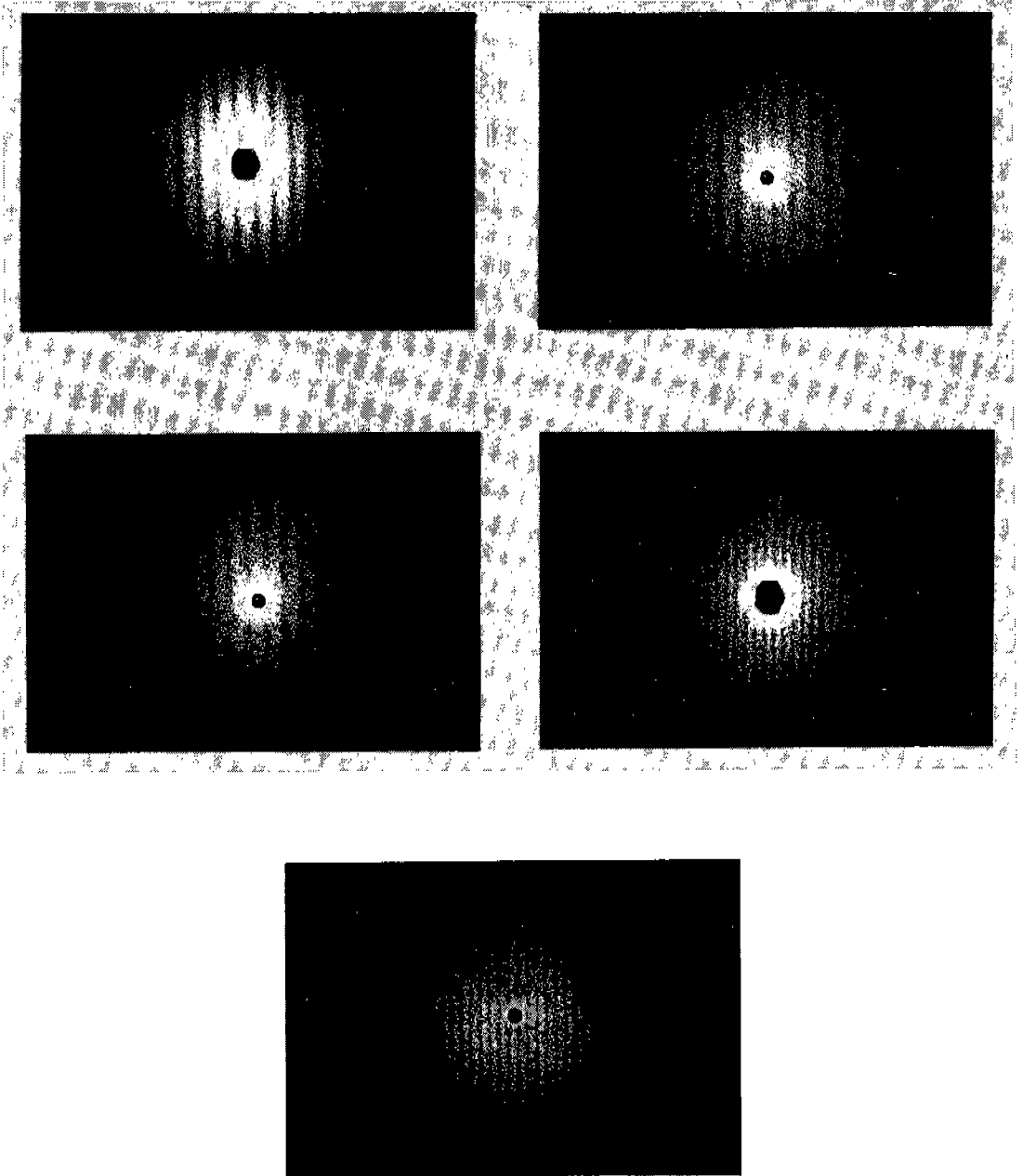


Photo. 4 The Image Process Fringe Pattern



그 위에 ESPI법에 의한 실제적인 결과를 ○표  
 시로 나타냈다.

Micrometer의 조작에 있어서의 오차나 처리  
 과정중의 오차, 그리고 공기 요란으로 인한 오  
 차등을 고려한다면 Micrometer와 ESPI법에 의한  
 결과는 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

## 6. 결 론

물체상에 중첩된 변형 전후의 Speckle Pattern  
 을 TV Camera로 촬영하고 이 화상을 감산 처  
 리하므로 Speckle Pattern을 간섭시켜 ESPI법을  
 강제 변위 측정 실험에 적용한 결과 다음과 같은  
 것을 알 수 있었다.

- 1) ESPI법에 의한 강제 변위 측정 결과는 Micrometer에 의해 회전 변위시킨 결과와 잘 일치함을 알 수 있었으며 ESPI법은 완전한 비접촉 측정방법으로써 고온이나 시험편에 접근할 수 없는 상황에서도 측정이 가능한 매우 유용한 방법이라 사료된다.
- 2) 물체의 변형으로 발생한 간섭 줄무늬를 ESPI법에 의해  $\pm 0.3325\mu\text{m}$ 의 오차로 측정할 수 있었으며 줄무늬 간격의 측정에 Computer에 의한 화상처리장치를 이용함으로 목적 측에 의한 Human-Error를 줄일 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 角誠之助, 山岐正秀, 韓應教, 金庚錫: CW 레-  
 가스펙클르호트브라이による高温下の

面内變位測定に関する講演集. pp.384-387(1987).

2. 韓應教, 角誠之助, 金庚錫: 스페클포토그라파와 畫像處理에 의한 面内變位計測, 韓國非破壞檢査學會論文集 6卷. pp.37-45(1987).
3. Goodmann. J. W., Statistical Properties of Laser Speckle Pattern. Topics in Applied Physics, Vol. 9, pp.876-879(1975).
4. 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).
5. 金庚錫: CW-레이저 스페클 寫眞法에 의한 高温下에서의 面内變位測定에 關한 研究, 博士論文, 漢陽大學校(1988).
6. 角誠之助, 山岐正秀, 韓應教, 金庚錫: CW 레-가스펙클르寫眞法と 畫像處理による 高温下の 面内變位測定に関する研究, 日本非破壞檢査協會論文集. 1988年 1月號.
7. F. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty and J. Adachi. Thermal Strain Measurement by One-beam Laser Speckle Interferometry, Applied Optics 19(16). pp.2701-2704(1980).
8. 角誠之助: 構造強度解析における 레-자의 應用, 日本航空宇宙學會志, 第25卷. 第281卷. pp. 259-268(1977).
9. Groh. G., The Engineering Uses of Holography. edited by E. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge Univ. Press, pp.483(1970).