

〈論 文〉

# 전자처리 Speckle Pattern 간섭법에 의한 균열평판의 Strain 해석에 관한 연구

김경석\* · 양승필\*\*

(1994년 3월 22일 접수)

## A Study on the Strain Analysis of Cracked Plate by Electronic Speckle Pattern Interferometry

J. S. Kim and S. P Yang

**Key Words** : Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI: 전자처리 스펙클패턴 간섭법), CW(연속파), Image Processor(화상처리장치), In-plane Displacement(면내변위)

### Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) with a CW laser, a video system and an image processor was utilized to measure the in-plane displacement. Unlike traditional strain gauges or Moire method, ESPI method measure the in-plane displacement on real time without any surface preparation or surface attachment. The specimen has a crack of  $10 \times 0.1$  mm in the middle of plate and strain gauge was also attached on that surface to compare with ESPI method. This study reveled the ESPI method to measure the displacement and distribution of strain in the specimen. It was shown in tensile tests that the measurement by ESPI method was comparable with strain gauge.

### 1. 서 론

공업기술의 발전에 따라 구조재료가 다양한 조건 하에서 사용되는 경우가 많아지고 구조재료의 강도 해석을 해야할 필요가 증가하고 있다. 이러한 강도 해석의 기본이라할 수 있는 재료의 strain, stress 및 변위의 측정법으로 여러가지 측정법이 사용되고 있지만 대부분 재료에 gauge를 직접 부착해야 하는 strain gauge법에 그치고 있으며 비접촉에 의한 측정방법은 아직도 미진한 상태에 머물러 있다.

주파수 안정도가 매우 높은 laser의 개발로 인해 1983년 국제 도량형총회에서 파장에 의한 meter의

정의가 광속도에 의한 meter의 정의로 바뀐 것에서도 알 수 있듯이 광을 이용한 측정법은 정밀도가 매우 높은 측정법이라 할 수 있다. 또한 laser의 우수한 성질을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으며 많은 분야에서 Laser 응용의 새로운 기술이 개발되고 있다.

Laser광은 (1) 단색성, 가간섭성(coherency)이며, (2) 지향성, 집속성이 좋고, (3) energy의 공간적 시간적인 집중, 짧은 pulse광의 발생이 가능하다는 등의 특징이 있다. Laser 응용은 주로 이러한 성질을 이용한 것들이며 주요 응용분야로는 측정, 정보처리, 통신, 재료가공, 분광 등이 있지만 특히 측정분야에 있어서 눈부신 발전을 하였으며 매우 넓은 범위를 포함하고 있다.<sup>(1)</sup>

지금까지 Laser Holography법, Speckle 사진법<sup>(2)</sup>

\*정회원, 조선대학교 기계설계공학과

\*\*동아전문대학 금형설계과

등에 의한 연구가 진행되어 왔으며 최근에는 Speckle Pattern 간섭법(SPI법)을 이용한 연구<sup>(3)</sup>가 진행되고 있다.

본 연구에서는 laser speckle 현상을 이용하여 재료의 strain을 측정하고 strain gauge법에 의한 결과와 비교·검토하였다. Laser speckle은 laser를 물체의 확산면에 조사할 때 그 반사광의 중앙 또는 조사면의 결상 중앙에 발생하는 불규칙한 격자로 간주할 수 있다. 이러한 speckle에 의해 이루어진 불규칙한 입자모양을 speckle pattern이라 한다. Speckle은 물체의 변형에 따라 이동하며 이러한 speckle pattern이 변하는 성질을 이용하여 물체의 변형이나 strain을 측정하는 방법이 speckle 법이다.<sup>(4)</sup>

Strain gauge법에 비해 speckle법은 측정부 전체의 변형상태를 한번에 기록할 수 있으며, 온도보상에 관한 문제도 필요없다. 또한 pattern 계측의 대표적인 광탄성 피막법이나 moire법 등과 비교하면 speckle법은 측정물에 아무런 처리도 필요없으며, 완전한 비접촉 측정이 가능하며, 감도 또한 높다는 특성을 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 한 방향의 변위성분에 대한 분포를 직접 얻을 수 있는 speckle pattern 간섭법(speckle pattern interferometry : SPI)에 화상처리 장치를 조합한 전자처리식 speckle pattern 간섭법(electronic speckle pattern interferometry : ESPI)을 이용하여 인장하중을 받는 균열평판의 면내 변위를 측정하고 아울러 면내변위 분포를 구하여 ESPI법의 측정 정밀도와 가능성 및 문제점에 대해 검토하고자 한다.

## 2. SPI와 ESPI

Laser 광속을 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 조사하고 Fig. 1과 같이 Lens에 의해 결상하면 결상면에 작은 불규칙한 입자모양의 반점이 생긴다. 이 반점을 speckle이라 하며 이 speckle에 의해 만들어진 불규칙한 반점모양을 speckle pattern이라 한다. 다수의 광파의 간섭에 의해 발생하는 speckle의 크기는

$$\sigma = 1.2(1 + M)\lambda f \tag{1}$$

이며, 여기에서  $\lambda$ 는 laser의 파장,  $M$ 은 촬영배율,  $f$ 는 Lens의  $f$  number이다.<sup>(5)</sup>

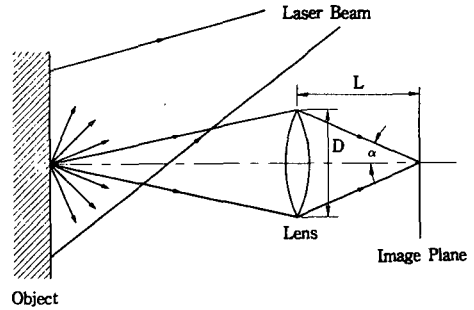


Fig. 1 The basic optical system of speckle photographic method

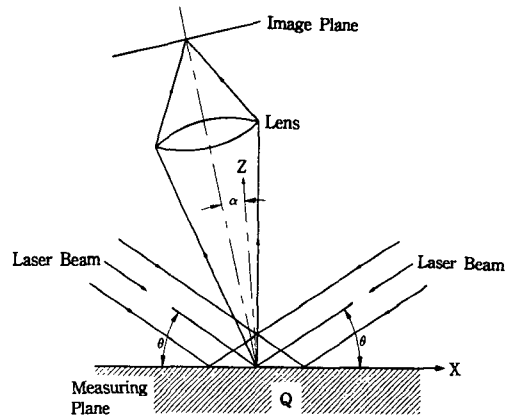


Fig. 2 The basic optical system of speckle pattern interferometry

Fig. 2에 나타낸 SPI의 광학계와 같이 광량이 같은 laser 광속을 조사면에 대해 같은 각도  $\theta$ 로 두 방향에서 조사한다.  $\alpha$ 는 관측방향과 측정면에 수직인  $Z$ 축과 이루는 각이다. 변위의 측정방법은 2개 laser 광속을 포함한 면과 조사면과의 교선방향, 즉  $X$ 축 방향이다. 측정면에 laser 광속을 조사하면 Lens에 결상시킨 조사면상에는 speckle pattern이 생긴다. 한 방향의 laser 광속만을 조사해도 speckle pattern은 생기지만<sup>(6)</sup> 2개 광속을 조사하면 각각의 pattern이 간섭하여 새로운 speckle pattern이 생긴다. 따라서 한쪽 방향의 laser 광속을 물체광이라 하면 다른쪽 방향의 광속은 참조광이라 생각할 수 있다.

Fig. 3과 같이 측정면상의 임의의 점  $Q$ 가 미소 변위  $d$ 만큼 변하여 점  $Q'$ 로 이동한다고 하자. 여기에서  $u$ 는 변위  $d$ 의  $X$ 방향성분,  $w$ 는  $Z$ 방향 성분이다. 한쪽 방향의 조사광속을 다른 방향의 광속

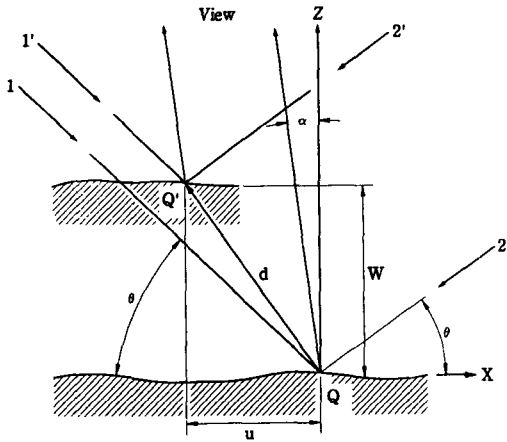


Fig. 3 The relationships between displacement and optical system

에 대해 참조광이라 간주하였으므로 변형전후의 광로길이 변화량의 차  $\Delta$ 는

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2ucos\theta \quad (2)$$

위의 식에서  $\Delta$ 는 변위에 대해  $u$ 만에 의해 결정되며 면의 변위성분  $w$ 와 관측방향  $\alpha$ 에는 영향을 미치지 않음을 알았다. 또한 줄무늬의 차수를  $n$ 이라 하면 변위  $u$ 의 크기는

$$u = n\lambda / (2cos\theta) \quad (3)$$

speckle의 위상변화에 의해 speckle의 휘도가 변하며 speckle 휘도를 감산하여 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다. 변형에 의해 확산 표면을 지나는 광로길이 파장  $\lambda$ 의 정수배만큼 변한 경우 감산에 의해 speckle 휘도는 0이 된다. 줄무늬는 휘도의 비교에 의해 발생하므로 물체의 변위량이 speckle size를 넘으면 휘도의 차를 구할 수 없으며 줄무늬를 얻을 수 없으므로 변위의 한계 측정범위는 speckle size이다.

ESPI는 변형 전후의 speckle 휘도를 감산하여 발생한 간섭 줄무늬를 TV camera와 화상처리장치를 이용하여 해석하는 방법이다. 어떤 초기상태 물체의 speckle pattern을 camera로 촬영하여 화상처리장치의 memory에 digital data로 기억시킨 뒤 변형후 물체의 speckle pattern을 별도의 memory에 기억시킨다. 화상처리장치 내에서 변형전후의 2개의 speckle pattern의 휘도를 감산하여 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다.

SPI는 speckle size 이하의 미소 변위량을 측정

할 수 있으며, 완전한 비접촉 측정법이며, 면의 영향을 받기 어려우며, 관측방향에 따른 감도가 변하지 않는다는 장점이 있으며 ESPI는 이에 더하여 real time으로 간섭 줄무늬를 관찰할 수 있으며, 구하여진 간섭 줄무늬를 사용하여 다양한 digital 화상처리를 할 수 있는 잇점이 있다.

### 3. 실험장치 및 측정방법

본 연구에 사용된 평판과 균열판 시험편의 형상 및 치수를 Fig. 4에 나타냈다. 평판의 치수는 50 mm×100 mm×0.4 mm이며, 균열판은 같은 시험편 중앙에 10 mm×0.1 mm의 slit을 두었다. 평판은 인장시험기가 올바른 기능을 하고 있는지 조사하기 위해 사용했다. Strain gauge 값과 비교하기 위해 평판에 있어서는 Fig. 4(a)와 같이  $P_1 \sim P_5$ 의 5개의 strain gauge를 부착하였으며, 균열판에 있어서는 Fig. 4(b)와 같이  $G_1 \sim G_3$ 의 3개 strain gauge를 부착하였다. 또한 측정면의 금속 광택을 제거하기 위해 측정면에 백색 도료를 칠했다. 사용한 gauge는 모두 단축이고 gauge 길이는 1 mm이다.

실험에 사용한 인장 시험기를 Fig. 5에 나타냈으며 시험편은 guide로 끼우고 시험편 폭 전체에 균등한 하중이 걸리게 했다. 이 시험기의 상부 축은 고정되어 있고 worm과 worm wheel에 의해 하부 축에 인장하중을 가해 시험편에 강제 변위를 주는 구조로 되어 있으며 시험편을 인장할 때 걸리는 하중은 loadcell에 의해 계측했다.

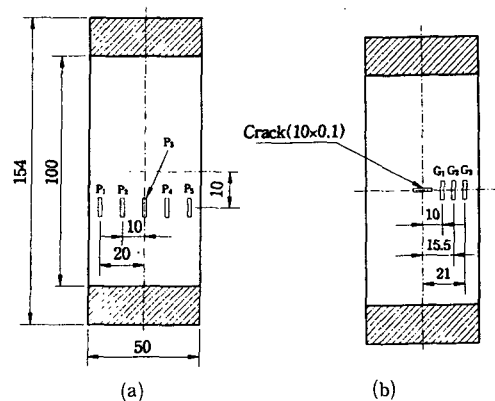


Fig. 4 The specimens of plate(a) and cracked plate (b)

Fig. 6에 본 연구에서 사용한 광학계의 평면 배치도를 나타냈다. mirror 3과 mirror 6는 상하로 배치되어 있고 laser 광속을 상하에서 조사하여 변위성분을 측정했다. 사용된 laser는 CW Ar laser 이고 출력은 0.2 W, 파장은 514.5 nm이다. 화상처리 장치는 화소수 480×512, 256계조의 NEXUS사

QUBE를 사용했다.

시험편에 적당한 하중을 가하고 여기에서 구한 화상을 기준화상으로 하여 화상처리장치의 memory 에 수록한다. 여기에 하중을 더하면서 변형 도중의 화상을 연속하여 화상처리장치에 수록하고 real time으로 줄무늬 변화를 관찰하면서 비교적 대칭인 줄무늬가 얻어질 때 disk에 수록했다.

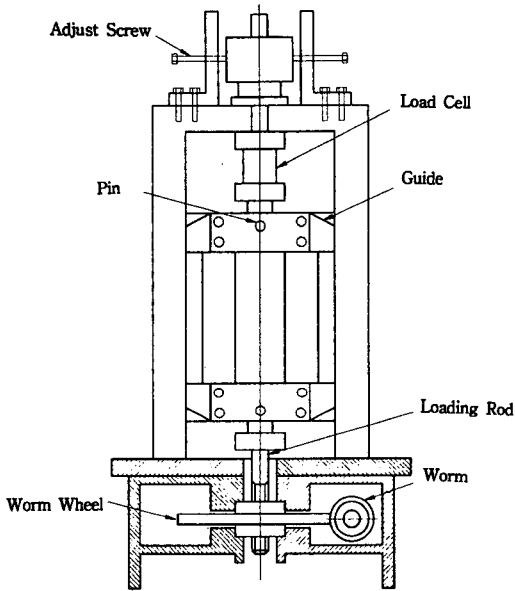


Fig. 5 The tensile device of specimen

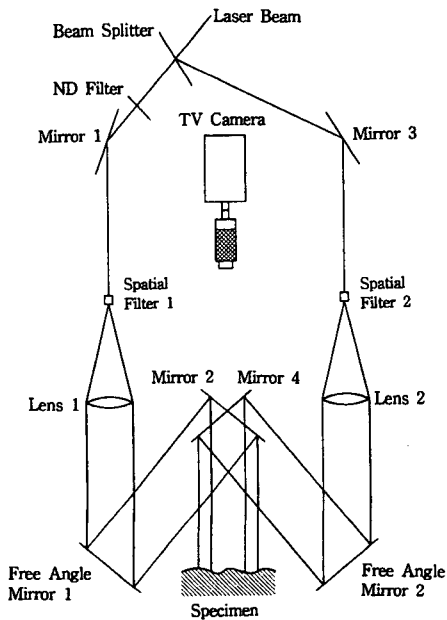


Fig. 6 The optical system of ESPI

#### 4. 화상처리에 의한 해석방법

이상에서 구한 줄무늬는 일정한 폭을 가지고 있으므로 이러한 상태에서는 줄무늬 간격을 측정하기 어렵다. 따라서 구한 줄무늬를 세선화하여 줄무늬 간격을 계산하고 strain을 계산한 후 strain 분포도를 그리는 순서로 해석했다.

줄무늬 간격을 측정하고 strain을 계산하기 위해 해석에 앞서 구한 줄무늬에 대해 다음과 같은 세선화 처리를 했다.

##### 4.1 화상의 강조

줄무늬 가운데는 휘도의 Contrast가 나쁜 것들이 있으므로 화상의 명암을 보다 확실히 하기 위해 Photo 1과 같이 화상의 강조처리를 했다.

##### 4.2 평활화

줄무늬는 조잡하기 때문에 그 상태로 세선화하게 되면 세선화한 줄무늬는 매끄럽지 못하게 된다. 따라서 화상의 휘도 분포를 매끄럽게하기 위해

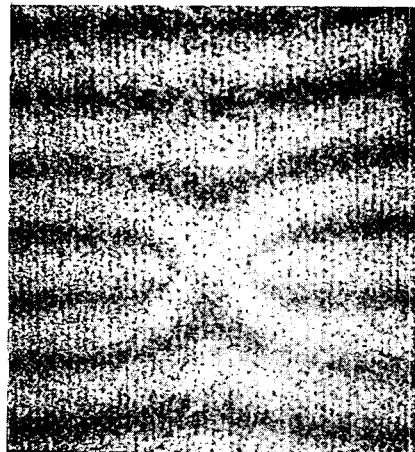


Photo 1 The emphasis of image



Photo 2 The smoothing

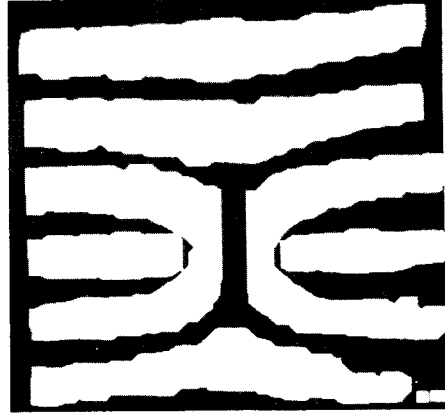


Photo 4 The diffusion and contraction



Photo 3 The binarization

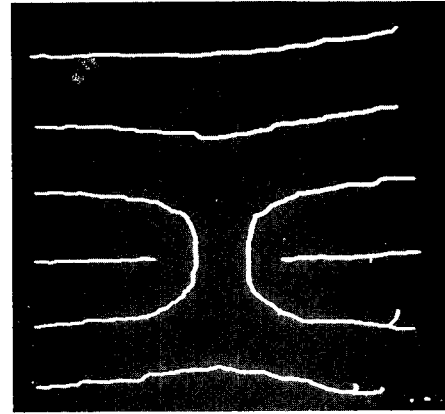


Photo 5 The thinning

Photo 2와 같이 평활화 처리를 했다.

#### 4.3 2치화 처리

원래의 화상이 2치화상이더라도 화상 data는 대개 3치 이상의 농담화상인 경우가 많다. 따라서 정밀도가 좋은 2치화상을 얻기 위해서는 다치 정보를 흑과 백의 2치정보로 변환해야 할 필요가 있다. 따라서 Photo 3과 같은 2치화처리를 했다.

#### 4.4 수정

2치화한 화상에서 각각 독립인 줄무늬의 밝은 부분이 연결되어 있는 경우가 있다. 밝은 부분이 연결된 상태로 세선화하게 되면 최종적인 단계에서 서로 다른 줄무늬가 연결되어 줄무늬가 급격히 상승 또는 하강하게 되며 이 상태로 strain을 측정하면 전혀 다른 strain값이 나오게 된다. 따라서 수정 과정에서 연결된 부분들을 분리시켰다.

성분을 제거했다.

#### 4.6 세선화

세선화 과정은 2치화상의 연결성을 유지하면서 Photo 5와 같이 선의 폭이 1인 선 도형으로 처리하는 것으로 일정한 굵기를 갖는 도형의 화소를 순차적으로 제거함으로써 도형의 중심선을 구하는 처리 과정이다.

#### 4.5 확산·수축

2치화한 화상은 그 경계가 조잡한 경우가 있다. 이 상태로 세선화하면 줄무늬에 상당한 요철이 생긴다. 따라서 Photo 4와 같이 확산·수축 조작을 함으로써 2치화상 중의 조그마한 성분이나 폭이 좁은 과정이다.

#### 4.7 원화상과의 중첩과 수정

세선화된 줄무늬를 원화상과 중첩시켜 확실히 이

상하다고 생각되는 부분을 수작업에 의해 수정하는 과정을 말한다. 또한 세선화한 줄무늬는 시험편의 경계에서 줄무늬가 누락되는 경우가 많으므로 이러한 것들도 그려 넣는다.

#### 4.8 줄무늬의 번호붙임

Strain을 구하기 위해서는 차수가 다른 줄무늬 간격을 측정해야 하지만 구부러진 줄무늬에 있어서는 같은 차수의 줄무늬 간격을 측정한다든지 외형선과 줄무늬 사이의 간격을 측정하지 않도록 연결된 줄무늬 각각의 휘도변화를 기록하여 줄무늬를 구별했다. 단 외형선의 휘도는 항상 255로 하여 줄무늬와 구별했다.

#### 4.9 외형선과 Crack을 그린다

Photo 6을 보면 strain 선도와 함께 외형선과 crack도 함께 나타나 있다. Photo 6은 (1)~(8)의 조작을 한뒤 crack과 외형선을 그려넣은 세선화된 최종적인 사진이다.

인접한 2개 줄무늬를  $n$ 차와  $(n+1)$ 차 줄무늬라 하면 각각의 줄무늬에 대한 변위량  $u_n, u_{n+1}$ 은

$$\begin{aligned} u_n &= n\lambda/2\cos\theta \\ u_{n+1} &= (n+1)\lambda/2\cos\theta \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 따라서 인접한 줄무늬의 변위량의 차  $\Delta$ 는

$$\Delta = \lambda/2\cos\theta \quad (5)$$

이며  $\lambda$ 와  $\theta$ 만에 의해 결정된다.

ESPI에 의해 구한 strain 값을 토대로 strain 분

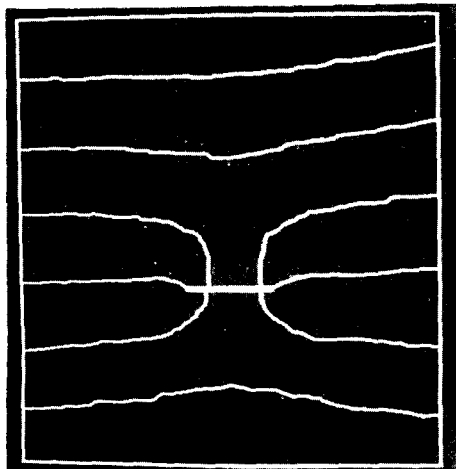


Photo 6 The crack and boundary

포를 그리기 위해 우선 strain이 얻어진 점을 접점으로 하는 삼각형 요소를 고려하여 각 요소의 조각을 1차 보간한다. 그리고 각점의 주변에서 strain 값이 같은 점이 있는지 판별하여 strain 값이 같은 점을 연결하여 strain 선도를 그렸다.

## 5. 실험결과

실험초기에 strain gauge를 붙인 위치에서의 ESPI에 의해 구한 strain 값과 strain gauge 값의 정량적인 비교를 했으므로 ESPI에 의해 gauge 위치에서의 strain 값을 구할 필요가 있다. 따라서 2개 줄무늬 중심에서의 strain 값을 구하여 그 사이를 1차 보간하고 gauge 위치에서의 strain 값을 구했다. 또한 gauge에는 폭이 있으므로 strain 값은 gauge 중심과 좌우 1 Dot씩 띄워 2 Dot 간격으로 총 5개 점에서 strain을 구하고 그 평균치를 사용했다.

각각의 Table에서 평판에 대한 이론치  $\epsilon_L$ 은 loadcell의 변형에 의해 계산된 하중차  $P$ 를 시험편의 단면적  $A$ 로 나눈값을 사용했다.

$$\epsilon_L = P/AE \quad (6)$$

또한 오차율  $G(\%)$ 는 ESPI에 의해 구한 strain을  $\epsilon_E$ 라하고 strain gauge에 의해 측정된 strain을  $\epsilon_G$ 라하여 다음 식에 의해 계산했다.

$$G = [(\epsilon_E - \epsilon_G)/\epsilon_G] \times 100 \quad (7)$$

#### 5.1 평판에 대해

인장방향에 대한 결과중  $P_2$  gauge와  $P_4$  gauge에 의한 결과를 Table 1, Table 2와 Fig. 7, Fig. 8에 나타냈다. Gauge는 Fig. 4에서의  $P_2, P_4$  gauge이며 Table의 load는 loadcell이 나타내는 strain차를 하중으로 변환한 값이다. 따라서 ESPI에 의해 구한 strain이 base 하중에 의존하지 않고 하중차만에 의해 결정된다는 것을 알았다.

#### 5.2 균열평판에 대해

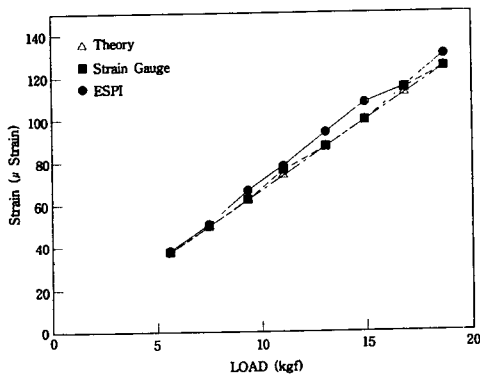
균열판에 있어서도 평판의 경우와 같은 방법으로 실험했으며 인장 방향에 대한 결과를 시험편 앞면과 뒷면 gauge로 구분하여 그 중 앞면에서  $G_1$  gauge와 뒷면에서  $Y_1$  gauge에 대한 결과를 Table 3, Table 4와 Fig. 9, Fig. 10에 나타냈다. 또한 이상의 결과를 토대로 한 인장 방향의 strain 분포를

**Table 1** The measuring results of plate(P<sub>2</sub> gauge)

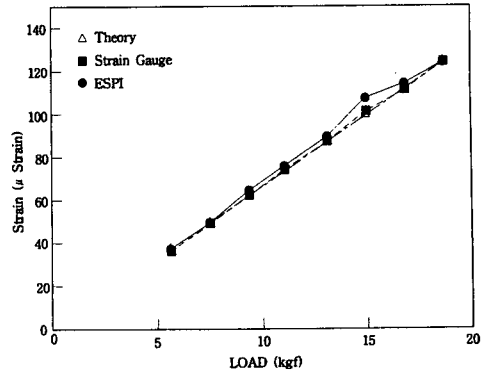
Load (kgf)	Strain ( ×10 <sup>-6</sup> )			Error (%)
	Theory	ESPI	Gauge	
5.61	37.23	38.13	36	5.92
7.47	49.57	50.58	49	3.22
9.34	61.99	66.52	62	7.29
11.03	73.20	77.86	75	3.81
13.08	86.81	93.73	87	7.74
14.95	99.22	107.59	99	8.68
16.82	111.63	114.84	113	1.63
18.69	123.04	130.03	125	4.02

**Table 2** The measuring results of plate(P<sub>4</sub> gauge)

Load (kgf)	Strain ( ×10 <sup>-6</sup> )			Error (%)
	Theory	ESPI	Gauge	
5.61	37.23	36.96	36	2.67
7.47	49.57	49.86	49	1.76
9.34	61.99	64.06	62	3.32
11.03	73.20	74.92	74	1.24
13.08	86.81	89.66	87	3.06
14.95	99.22	107.37	101	6.31
16.82	111.63	115.21	111	3.79
18.69	124.04	122.50	124	-1.21



**Fig. 7** The measuring results of plate(P<sub>2</sub> gauge)



**Fig. 8** The measuring results of plate(P<sub>4</sub> gauge)

**Table 3** Measuring result of cracked plate(G<sub>1</sub> gauge)

Load (kgf)	Strain ( ×10 <sup>-6</sup> )		Error (%)
	ESPI	Gauge	
3.36	59.71	63	-5.22
3.81	49.27	47	4.83
4.48	65.80	65	1.23
4.67	60.68	61	-0.52
4.86	60.31	59	2.22
5.23	66.42	66	0.64
6.72	84.13	86	-2.17
7.47	105.04	107	-1.83

**Table 4** The measuring results of cracked plate(Y<sub>1</sub> gauge)

Load (kgf)	Strain ( ×10 <sup>-6</sup> )		Error (%)
	ESPI	Gauge	
3.36	59.71	68	-12.19
3.81	49.27	51	- 3.39
4.48	65.80	69	- 4.64
4.67	60.68	63	- 3.68
4.86	60.31	64	- 5.77
5.23	66.42	66	0.64
6.17	84.13	88	- 4.40
7.47	105.04	111	- 5.37

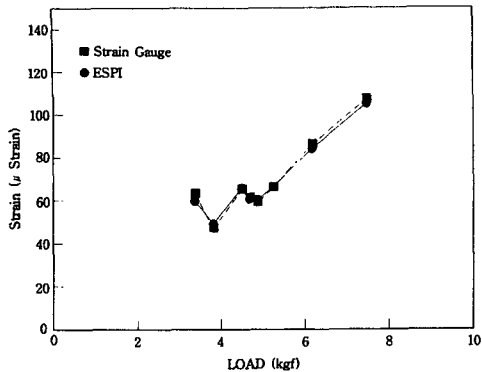


Fig. 9 The measuring results of cracked plate( $G_1$  gauge)

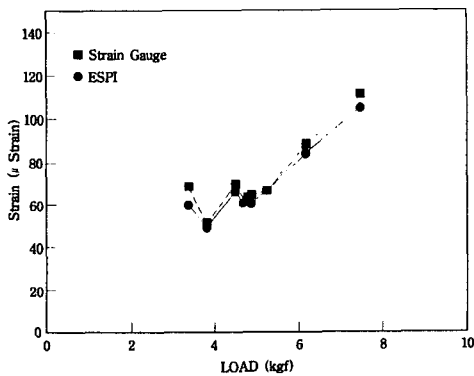


Fig. 10 The measuring results of cracked plate( $Y_1$  gauge)

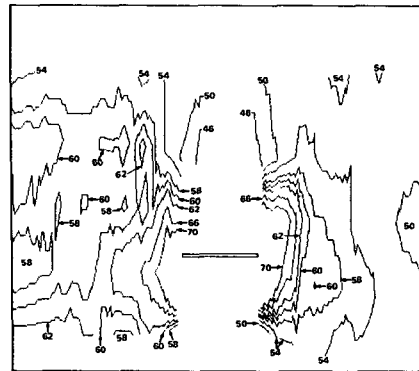


Fig. 11 The figure of strain distribution(4.86 kgf)

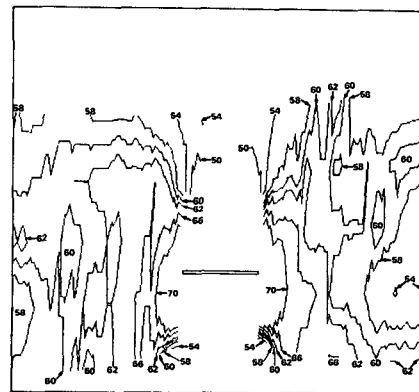


Fig. 12 The figure of strain distribution(5.23 kgf)

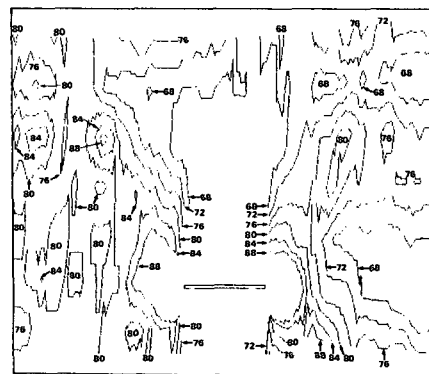


Fig. 13 The figure of strain distribution(6.72 kgf)

같은 strain 선도로 그려 Fig. 11, Fig. 12와 Fig. 13에 나타냈다.

균열판 역시 각각의 gauge는 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 앞면에 대해서는  $G_1 \sim G_3$ 의 위치에, 뒷면에 대해서는 앞면 gauge와 같은 위치에  $Y_1 \sim Y_3$ 의 위치에 Gauge를 부착시켜 실험했다.

### 5.3 고찰

실험결과에서도 알 수 있듯이 ESPI와 strain gauge 값과는 6% 전후의 오차가 발생했다. 식 (5)로 보아 이러한 오차의 원인으로는 파장, 각도, 줄무늬 간격의 3가지를 생각할 수 있으나 파장은 카탈로그 값을 사용했으므로 각도와 줄무늬 간격의 2가지 원인으로 생각할 수 있다.

각도에 의한 오차에 대해서는 각도를 나타내는 종이를 판에 부착하여 각도를 맞추어 목측에 의한 정밀도에 의존했으므로 오차가 발생했으리라 생각

된다. 이러한 조그만 오차가 변위로 바뀌면 상당히 크게되므로 각도를 정확하게 맞춤으로 정밀도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

줄무늬 간격에 대한 오차에 있어서는 줄무늬를 세선화하여 해석하였으므로 세선화한 줄무늬가 매



크럽지 못할 경우 화면상에서 1 Dot 엇갈림이 존재한다면 줄무늬 간격은 약  $110 \mu\text{m}$ 가 달라진다. gauge 폭은 20 Dot 정도이지만 본 연구에서는 5개 line만의 측정에 의해 유도한 strain이므로 오차가 발생하는 원인이 된다고 생각한다. 따라서 gauge 폭을 좀더 세분화한 line을 측정하여 평균하면 정밀도가 높아질 것으로 생각된다.

본 연구에서 사용한 ESPI법은 strain gauge법과 비교해 보면 종래의 strain gauge에 의한 방법에서는 gauge를 재료에 직접 부착해야하는 단점과 약  $400^\circ\text{C}$  이상에서의 재료시험에 있어서는 strain gauge가 파손되어 버리는 단점이 있었다. 그러나 본 연구실에서 ESPI법을 이용함으로써 고온재료의 열팽창계수 측정에서 약  $1,200^\circ\text{C}$  이상에서도 비접촉에 의해 직접 strain을 측정할 수 있음을 확인하였다. 따라서 비접촉의 정밀계측법인 ESPI법을 이용하면 인간이 접근할 수 없는 초고온에서의 재료 시험이나 원자로 압력용기등의 변형측정에 직접 활용할 수 있으리라 생각된다.

## 6. 결 론

ESPI법을 이용하여 평판 및 중앙에 crack을 갖는 균열평판의 strain을 측정하고 strain 분포를 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평판의 strain을 측정한 결과 10% 전후의 오차로 잘 일치함을 알 수 있었으며, 균열판이 있어서도 앞면 gauge( $G_1 \sim G_3$ )에 의한 결과와는 대부분  $\pm 5\%$  이내로 잘 일치함을 알 수 있었다. 그러나 뒷면 gauge( $Y_1 \sim Y_3$ )에 있어서는 오차의 폭이 크게 나타났다. 시험편 뒷면에서 오차가 크게 발생한 이유는 ESPI법에 의한 결과는 시험편 앞면에서 측정한 결과이므로 시험편의 비틀림등의 원인으로 사료된다.

(2) 계산된 strain값의 결과를 기초로 그린 strain 분포도를 보면 crack 주변에서 응력집중이 일어남을 확인할 수 있었지만 crack 좌측에 strain이 집중됨을 알 수 있었다. 이러한 이유로는 측맞춤을 했지만 측맞춤이 정확하지 않아 좌측에 strain이 집중된 것으로 사료된다.

(3) strain 분포도에서 strain선이 누락된 부분이 존재하는 것은 시험편의 경계나 crack 가장자리 사이의 줄무늬 수가 적기 때문이라 사료된다. 따라서 측정영역을 좀더 넓게하여 큰 변형을 줄 필요가

있다.

(4) 해석에 있어서 단순히 strain이 구해진 점 사이를 1차 보간했다. 같은 하중차에서 줄무늬 간격이 좁은 곳과 넓은 곳에서는 구해진 data 수가 다르므로 넓은 곳에서 오차가 클 가능성이 있다. 따라서 1차 보간에 대치될 수 있는 다른 방법을 생각해 볼 필요가 있다.

(5) 실험결과 발생한 대부분의 문제점은 ESPI법 자체의 문제점은 아니며 해석 방법에 따른 문제점이라 생각된다. 따라서 ESPI법은 면내 Strain 해석 방법으로써 매우 유용한 방법이라 사료된다.

## 후 기

본 논문은 1995년도 조선대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) 角誠之助, 1977, "構造強度解析におけるレザの應用," 日本航空宇宙學會誌, 第25卷, 第28號, pp. 259~268.
- (2) 角誠之助, 金庚錫, 山崎正秀, 韓應教, 1988, "CW 레-자. 스펙클寫眞法による高温下の面内變位計測に關する研究," 日本非破壊検査學會誌, 第37卷, 第2號, pp. 64~70.
- (3) Dendy, D. Leendertz. J. A, 1974, "Plane Surface Strain Examination by Speckle Pattern Interferometry Using Electronic Processing," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 9, No. 1, pp. 1~25.
- (4) Leendertz, J. A, 1970, "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surface Utilising Speckle Effect," *J. Phys. E*, 3(3), pp. 214~218.
- (5) 谷田貝豐彦, 1988, 應用光學, 丸善株式會社
- (6) E. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty and J. Adachi, 1980, "Thermal Strain Measurement by One-Beam Laser Speckle Interferometry," *Applied Optics*, 19(16), pp. 2701~2704 (1980).
- (7) 김경석: 1987, "CW 레이저 스펙클 사진법과 화상처리에 의한 고온하의 면내변위 및 스트레인 측정에 관한 연구," 한양대학교 박사학위 논문.