

본 논문은 1993년도 조선대학교 교비학술연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

E. S. P. I법과 화상처리에 의한 2차원의 스트레인 측정에 관한 연구

김 경 석*, 김 형 수**, 양 승 필**, 김 충 원***, 정 운 관****, 홍 명 석*****

A Study on the Measurement of two Dimensional Strain by ESPI Method and Image processing

K. S. KIM*, H. S. KIM**, S. P. YANG**, C. W. KIM***,
Y. G. JUNG****, M. S. HONG*****

ABSTRACT

ESPI(Electronic-Speckle-Pattern-Interferometry) is very useful method for measuring In-plane displacement. Using the CW-Laser and Image processing system, it is possible to measure displacement and strain. Unlike traditional strain gauge or moire' method, ESPI method requires no special surface preparation or attachments and can be measured In-plane displacement with no contact and real time. In this experimental specimen was loaded in parallel with loadcell, which provided loading step. The specimen was sheet plate, which was attached strain gauge in x-y direction. In this study provides an example of how ESPI has been used to measure two dimensional displacement and strain distribution in this specimen. The results measured by ESPI compare with the data which was measured strain gauge method in tensile testing at 1 ton range.

1. 서 론

금속의 조면, 불투명 유리 또는 종이등의 확산 반사면에 레이저광을 조사하면 확산광 가운데 또는 그 상 가운데 보통의 광에서는 볼 수 없는 반점 모양의 형태가 나타나게 된다. 이러한 현상은 레이저의 단색성, 가간섭성, 집속성등의 우수한 성질과 응용면에 있어서의 풍부한 가능성으로 레이저 응용계측⁽⁵⁾이 연구되어 왔다. 따라서 레이저의 개발에 따른 새로운 계측법이 급

속히 진전되는 가운데 그 중에서 구조 및 재료 강도의 계측분야의 일환으로 레이저를 이용하여 물체표면의 정보를 갖는 스펙클 패턴(speckle pattern)⁽⁶⁾이 변화하는 성질을 이용하여 어떠한 물체를 상온하에서 인장력에 의한 면내변위를 2차원적으로 측정하고자 한다.

본 연구에 사용되는 레이저는 아르곤(Ar) 레이저로써 파장 $\lambda=514.5\text{nm}$, 사용중의 최대 출력 400 mW인 연속파 레이저이며 이 레이저에 의하여 물체면에 조사되면 그 반사광의 결상에 의하여 아주 작은 불규칙한

* 조선대학교 기계설계공학과
** 조선대학교 대학원
*** 조선대학교 컴퓨터공학과
**** 조선대학교 원자력공학과
***** 조선대학교 기계공학과

입자모양의 Speckle이 발생하게 된다. 이 Speckle이 물체의 인장변형에 의하여 이동된다. 이 이동되는 Speckle의 변화에 의하여 줄무늬가 발생되어 이 줄무늬의 해석에 의하여 변형량이 측정된다. 이 방법을 스페클 패턴 干涉法(Speckle Pattern Interferometry : SPI) (1, 2)이라고 한다. 이렇게 해서 얻은 줄무늬를 정밀도 높게 측정하기 위하여 화상처리 System (7)을 도입하여 전자처리 스페클 패턴 干涉法(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI) (4)이 개발되었다. 그래서 본 실험은 ESPI 법의 광학계에 의하여 얻은 줄무늬를 화상처리 System을 이용하여 2차원적인 해석을 한다. 따라서 이번 연구에서는 인장시험에 의한 시험편의 변위 및 스트레인 측정을 위하여 우선 Crack이 없는 시험편인, "Al 7075-T6" 시험편을 사용하여 스트레인 측정을 하고자 한다.

2. 전자처리 스페클 패턴 干涉法(ESPI)의 原理

2.1 스페클 패턴 干涉法(SPI)

레이저광은 단색성, 가간섭성, 집속성 등의 우수한 성질을 가지고 있어 요즘은 응용계측 분야에 있어서 다방면의 실용화 연구가 진행되고 있다.

특히, 가간섭성인 레이저광을 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 照射하고 Lens를 이용해서 結像할 때, 物體像에 겹쳐서 발생하는 작은 반점모양을 像界의 스페클 패턴(Speckle-Pattern)이라 한다. 이러한 현상은

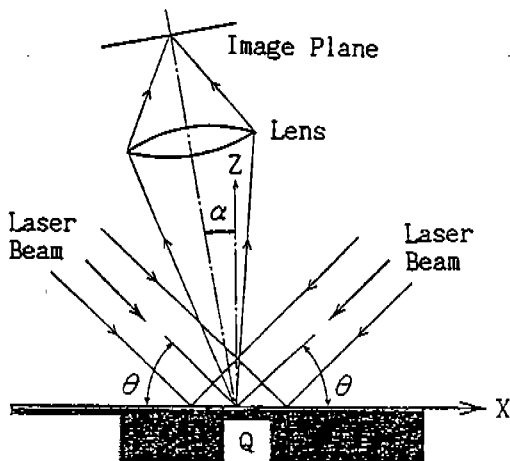


Fig. 1 A basic optical system of Speckle-Pattern Interferometry system

照射面의 작은 영역에서는 Random이지만, 시간적으로는 정상인 位相關係에 어떠한 다수의 광파가 干涉함으로써 발생한다.

Pattern 내의 알맹이 모양의 반점, 즉 Speckle의 최소 크기는 $\sigma = 1.2(1+M) \lambda \cdot f$ (3)로 주어지게 된다. 여기에서 λ 는 레이저의 파장, M은 촬영배율, f는 Lens의 F-number이다. SPI는, 이 Speckle-Pattern 끼리를 간섭시킨 것에 의해, Speckle Size 이하의 대단히 미소한 변위의 분포를 측정하는 방법이다. SPI의 원리를 응용한, 한방향의 면내변위 분포를 검출하기 위한 기본광학계를 Fig. 1에 나타내었다.

像面上에 발생한 변형 전후의 Speckle-pattern을 減算하고, 간섭시킴으로써 등변의 줄무늬를 얻을 수가 있다. 2개의 可干涉으로 평행한 레이저 빔 1, 2를 같은 각도 θ 로 피측정면에 照射된 면을 Lens에 의해 像面上에 結像한다. 이 경우 2개의 빔을 포함한 면과 측정면과의 交線方向(Fig. 1의 x방향)이 면내변위의 측정방향이다. α 는 관측방향과 측정면에 수직인 Z축과의 이루는 각이다.

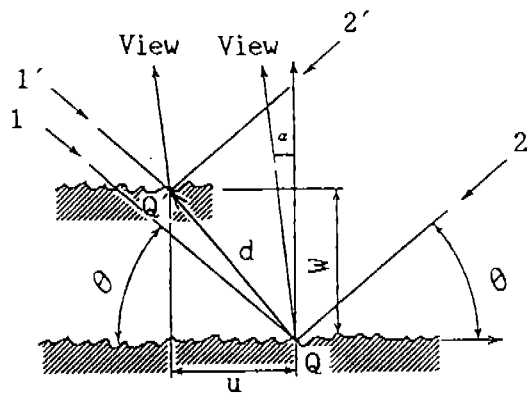


Fig. 2 A constitutional diagram of displacement

Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 측정면상의 임의의 점 Q가 d만큼 이동한 경우를 생각하자. u와 변위 d의 x방향 성분인 w는 z방향 성분이다. 이 경우에 빔 1과 관측방향으로부터 이루어진 光路長의 변화량 L_1 은,

$$L_1 = u \cos \theta + u \sin \alpha + w \sin \theta + w \cos \alpha \quad (1)$$

으로 된다. 마찬가지로 빔 2의 변화량 L_2 는,

$$L_2 = +u \cos \theta + u \sin \alpha + w \cos \alpha + w \sin \theta \quad (2)$$

가 된다. 한쪽의 照射빔은 다른 한쪽의 빔에 대해 參照光으로 간주할 수 있기 때문에 겹쳐진 변형전후의 光露長 변화 ΔL 은 다음식에 나타내어진 바와 같이 각각의 光露長 변화의 차가 된다.

$$\Delta L = L_1 - L_2 = 2u \cos \theta = n \lambda \quad (3)$$

이 ΔL 에 의해 줄무늬의 명암이 결정된다.

즉, 변형전후에 있어서 광로길이의 변화 ΔL 이 레이저 파장의 정수배가 되는 표면부분에서는 Speckle의 휘도는 변형전후의 Pattern과 같아지기 때문에, 이들의 차를 취하면 0이 되고, 이러한 부분은 검은 줄무늬로 표현되며, 다른 부분에서는 밝은 줄무늬가 형성된다. 따라서 物體像위에 형성된 줄무늬는 식(3)에 의해 일정한 변위 u 를 나타낸다. 광로길이의 변화 ΔL 은 면내변위 성분 u 에 의해 변하고, 면외변위 성분 w 에 대해서는 독립이다. 줄무늬 차수를 n , 레이저의 파장을 λ 로 하면, 변위 u 의 크기는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$u = n \lambda / (2 \cos \theta) \quad (4)$$

2.2 전자처리 스펙클 패턴 干涉法(ESPI)

Speckle-Pattern 간섭을 TV카메라로 수록하여 화상처리장치에 의하여 변형을 측정하는 방법을 전자처리 스펙클 패턴 干涉法(ESPI)이라고 한다.

Fig. 3은 ESPI System 구성을 나타낸다. Speckle-Pattern의 像은 TV카메라로 해석할 수 있을 정도로 조리개를 움직여서 정확한 像이 형성되게 한다. 우선, 어떠한 초기상태에 있는 물체의 Speckle-Pattern을 카메라로 촬영하여, 화상처리장치의 메모리에 기억시킨다. 다음에 물체가 변형을 한 후에 새로운 Speckle-Pattern이 발생되기 때문에 이것을 새로운 메모리에 기록한다. 이 두개의 畫像 data를 減算함으로써 간섭줄무늬를 얻을 수가 있다. 또 퍼스널 컴퓨터로 화상처리

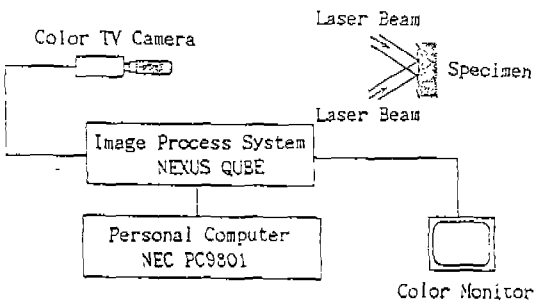


Fig. 3 Block diagram of image processing system

장치의 제어를 하면 화상을 취할 때의 처리시간은 1/30 초 정도로, 거의 실시간에서 간섭줄무늬의 관찰이 가능하다. 그리고, 일단 화상 data를 기록한 후에 Contrast가 나쁜 줄무늬는 強調등의 처리가 쉽다.

3. 실험방법과 장치

3.1 광학계

3.1.1 광학계의 배치

실험의 성공여부 즉, 선명한 간섭줄무늬를 얻기 위해서는 광학계의 Setting이 무엇보다도 중요하다. 본 실험에서의 광학계 배치를 Fig. 4에 나타냈다.

그리고 광학계 배치의 이해를 돕기 위해 바로 위에서 본 평면도를 Fig. 5에 나타내었다. mirror 8과 mirror 9는 상하로 배치되어 있고 상하로부터 각각 같은 각도로 시험편에 照射된다. 그리고, 이러한 배치는 1차원적 해석이라고 할 수 있겠다. 본 실험은 면내변위를 2차원적으로 해석하기 때문에 mirror 6과 mirror 7의 광학계가 추가로 배치되어 좌우로부터 각각 같은 각도로 시험편에 照射된다. 광원으로부터 나온 레이저는 Beam Splitter에 의해서 2개의 광으로 나뉘고, 그 각각은 Beam Splitter에 의해서 또 다시 2개로 나뉘어진다. 이 광을 Spatial Filter를 통과시켜서 noise를 제거하여 상하, 그리고 좌우에서 Beam을 시험편에 照射한다.

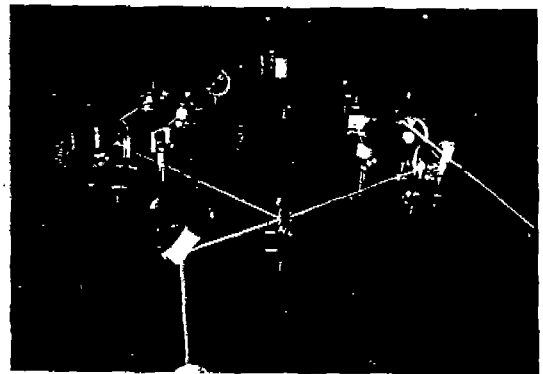


Fig. 4 An experimental apparatus of ESPI method

Fig. 5에서는 mirror 8과 mirror 9의 반사광이 중첩되어 있는 것처럼 보이지만 실제 화면에 대해 연직방향에서 $\pm \theta$ 의 각도로 시험편에 照射하고 있다. 또한, 내측과 외측의 광이 서로 교차하고 있는 것처럼 보이지만

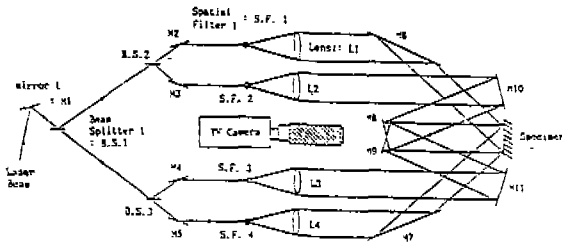


Fig.5 Arrangement of the ESPI optical system

실제의 실험에서는 동시에 두방향을 측정하는 것이 아니다. 즉, 측정하지 않은 방향은 차단되기 때문에 교차하지 않는다.

3.2 해석계

3.2.1 화상처리장치 (8)

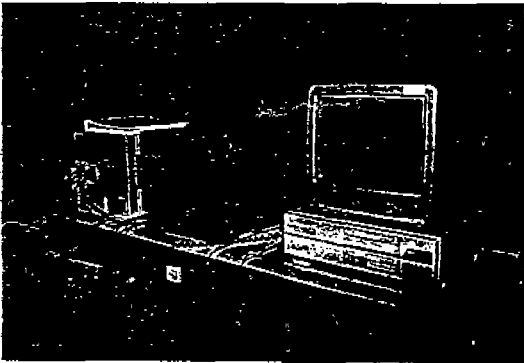


Fig.6 Image processing system

Fig.6은 본 실험에서 변형 전후의 Speckle-Pattern을 간섭시켜 해석하기 위한 화상처리장치 (NEXUS사 제품 QUBE)를 나타내고 있다. Fig.3에서 보는 바와 같이 측정면의 2방향에서 레이저광을 照射하고, 그것에 의하여 생기는 Speckle-Pattern을 고해상도의 TV카메라로 촬영하고 이것을 素素로부터 256단계의 2차원 디지털 화상데이터로 화상처리장치의 메모리에 수록한다.

3.3 실험방법

이번 실험은 시험편에 어떠한 가공도 하지 않은 상태에서 ESPI법을 이용하여, 그때 얻은 간섭줄무늬로부터 2차원적인 해석을 하였다.

Fig.7과 Fig.8은 본 실험에 사용된 시험기를 나타내고 있다. 본 시험기는 시험편의 상하를 고정시킨채로 하부쪽 기어장치를 이용해서 연직하방으로 하중을 가할

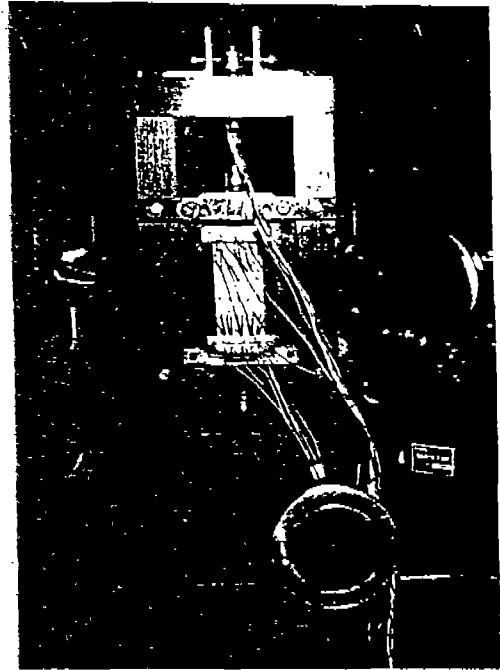


Fig.7 Tensile testing apparatus

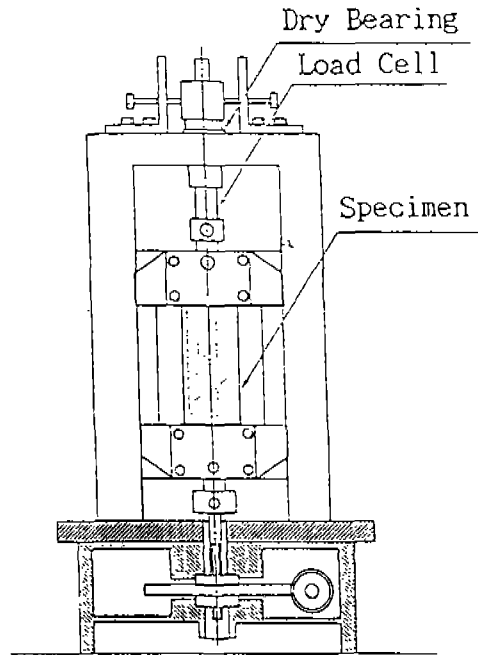


Fig.8 The fixed apparatus of specimen and tensile testing apparatus

수 있게 되어 있다. 기어장치의 레버를 회전시킴으로써 하중에 의하여 시험편은 팽창하게 되고 이 팽창의 정도와 줄무늬의 간격의 변화가 비례함으로써 이 등변위 줄무늬의 간격으로부터 변형률을 계산할 수가 있다. 하중과 변형의 관계를 나타내면, 하중을 P, 변형률을 e로 하면,

$$P = 1.8687 \times e - 8.1161$$

가 된다.

$$\text{전체 변위량 } \Delta L = \frac{n \lambda}{2 \cos \theta} \quad (5)$$

$$\text{변형률 } \epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{n \lambda}{2 \cos \theta L}$$

- 중변형률 측정시 : $\lambda = 55^\circ$
- 횡변형률 측정시 : $\lambda = 45^\circ$

식(6)에 의해 변형률은 측정된다. 이렇게 측정된 변형률은 FFT에 의한 해석, Multiple Dynamic Strainmeter에 의한 해석, 그리고 화상처리장치에 의한 해석을 비교함으로써 이 실험의 정도를 평가하였다.

3.4 시험편

시험편으로 Al 7075-T6을 사용하였다. Fig. 9과 Fig. 10은 시험편의 형상을 나타낸다. Al 7075-T6의 특성치는 다음과 같다.

[Al 7075-T6]

- 단변 길이 : $2W = 50\text{mm}$
- 장변 길이 : $2L = 100\text{mm}$
- Young's modulus : $E = 7.53 \times 10^3 \text{kgf/mm}^2$
- Poisson's ratio : $\nu = 0.32$
- 판 두께 : $H = 0.4\text{mm}$
- 밀 도 : $\rho = 2.775 \times 10^{-10} \text{kgf/mm}^2$
- 내 력 : $\sigma = 51.3 \text{kgf/mm}^2$

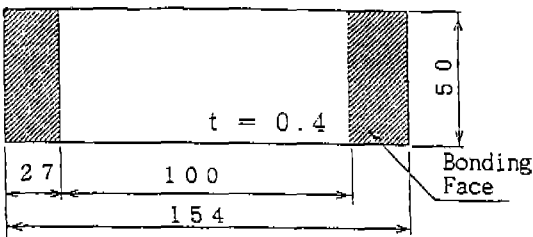


Fig. 9 The shape figure of specimen

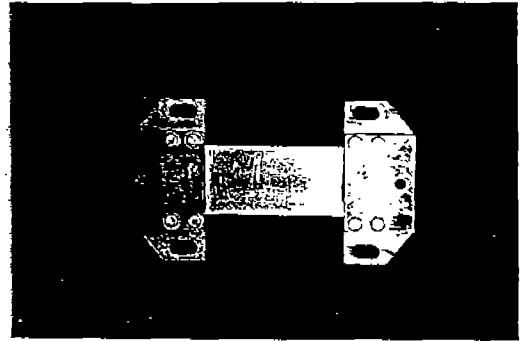


Fig. 10 The testing specimen

4. 결과 및 고찰

본 실험은 ESPI법을 이용하여 인장 荷重을 받는 평판의 面内變位를 2차원적으로 측정을 하는데에 목적을 두었다. 무엇보다도 본 실험에 있어서 ESPI법은 2차원적인 면내변위 측정에 있어서 획기적인 방법이라고 할 수 있겠다. 이러한 ESPI법에 의해 측정된 干涉줄무늬를 FFT에 의한 解析, Multiple Dynamic Strainmeter에 의한 해석, 그리고 화상처리용 Program에 의한 해석을 비교함으로써 이 실험의 정도를 평가하였다.

4.1 FFT에 의한 解析

ESPI법에 의해 얻어진 干涉줄무늬를 대형계산기를 이용하여 FFT(高速 Fourier 변환)에 의한 해석을 하였다. 본 실험에서는 어떠한 가공도 하지 않은 시험편이 사용되었기 때문에 수평, 수직 방향에서 등변위의 간섭 줄무늬를 얻을 수가 있다.

이러한 결과는 FFT의 적용에 있어서 중요한 의미를 가지고 있다. 왜냐하면, 등간격의 줄무늬가 아니면 FFT의 적용이 불가능하기 때문이다. 만일 등간격의 줄무늬가 얻어진다면 다른 측정장치로 얻어진 data 보다도 훨씬 더 정확한 data를 얻을 수가 있다. 먼저, Facom에 기록한 화상 Data를 대형계산기에 입력한 후 Fig. 11과 같이 X, Y방향을 결정하면, 우선 Y방향의 輝度分布를 X방향으로 加算해 가고, Y방향의 1차원(평면) 輝度分布를 구한다. 다음으로 1차원 輝度分布의 최대, 최소, 평균치를 구해서 최대, 최소치와 평균치와의 차가 큰 쪽을 최대 진폭으로 하고, 1次元輝

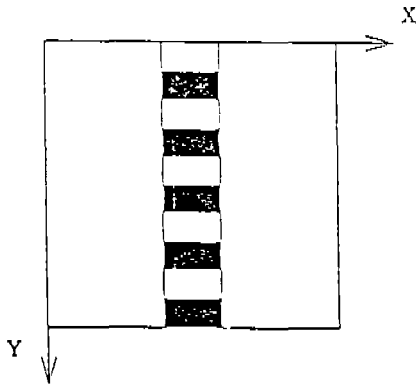


Fig. 11 The coordinate system

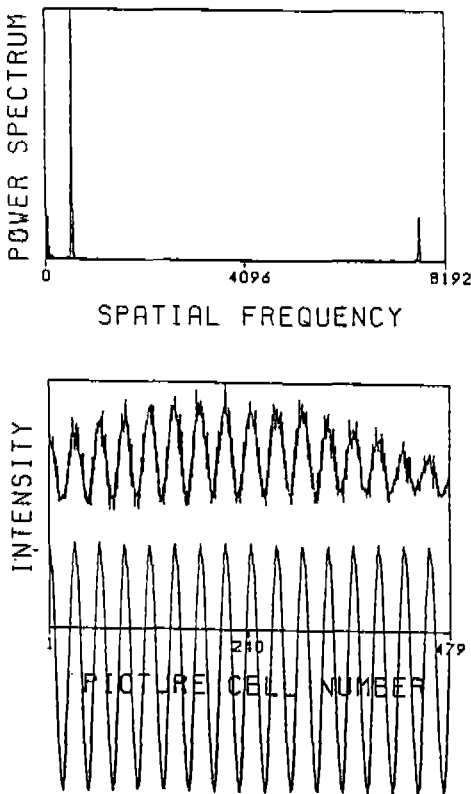


Fig. 12 The measuring results of FFT

도를 正規化 하여, 離散型實고속 Fourier 變換에 의해 Power-Spectrum을 구한다. 얻어진 Power-Spectrum에서 그 값이 최대가 되는 空間周波數에 의해 줄무늬 간격을 구한다. 해석을 행한 Sample을 Fig. 12에 나타냈다.

4.2 Multiple Dynamic Strainmeter에 의한 解析

시험편의 변형을 측정하기 위해 자동 Digital 변형측정기(TDS-301)를 사용하였다. Fig. 13은 시험편에 부착한 Strain Gauge의 형상을 나타내고 있다. Strain Gauge의 부착은 引張방향에는 5개, 壓縮방향에는 3개를 부착시켜 시험편을 인장하고 Load Cell이 나타내는 값을 근거로 하여 횡변형률과 종변형률을 구하였다. 특히 주의할 점은 strain gauge는 온도에 의해서도 저항값의 변화가 발생하기 때문에 매우 주의를 요한다. 그러나 이러한 주의만 한다면 간섭줄무늬가 등간격이든지 등간격이 아니든지 간에 측정이 가능하다.

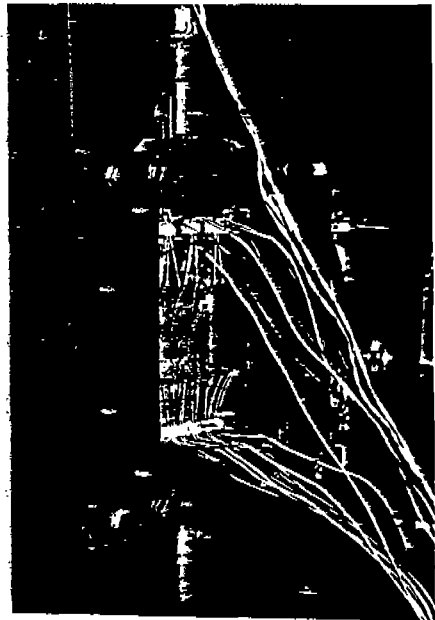


Fig. 13 Bridge connection of strain gauge measuring system

4.3 회상처리용 Program에 의한 解析

4.1에서 ESPI법에 의해 얻어진 干涉줄무늬를 대형계산기를 이용해서 해석하는 방법을 기술하였다.

이 회상처리용 Program에 의한 解析도 또한 干涉줄무늬의 간격을 회상처리장치 자체내에서 해석하는 방법이라고 할 수 있다. ESPI법에 의해 얻어진 干涉줄무늬를 TV 카메라로 촬영하고, 촬영된 原畫像을 細線化를 시켜서 Mouse를 사용하여 간섭줄무늬의 간격을 측정하고, 그 값으로 변형을 해석하는 것이다. Fig. 14-

Fig. 19는 原畫像을 細線化 시켜서 간섭줄무늬의 간격을 측정하는 과정을 나타내고 있다. 이러한 화상처리용 program의 해석방법은 앞에서 언급했던 자동 Digital 변형측정기와 마찬가지로 간섭줄무늬가 등간격이든 아니든지 간에 측정이 가능할 뿐만 아니라, 최상의 간섭줄

무늬를 채택하여 측정할 수 있어서 더욱 더 정확한 data를 얻을 수 있는 장점이 있다.

Fig. 9에서 □는 화상처리용 Program으로 해석한 결과이고, △는 Multiple Dynamic Strainmeter에 의한 해석 결과이며, ○는 FFT에 의한 해석 결과이다.

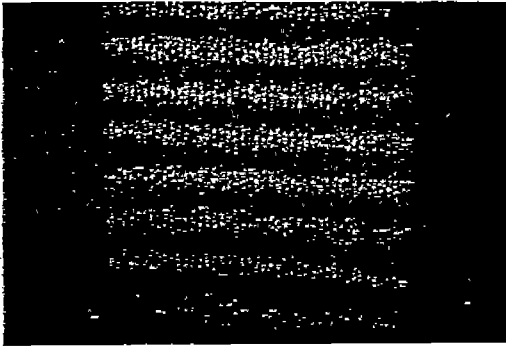


Fig. 14 Source image of Y direction

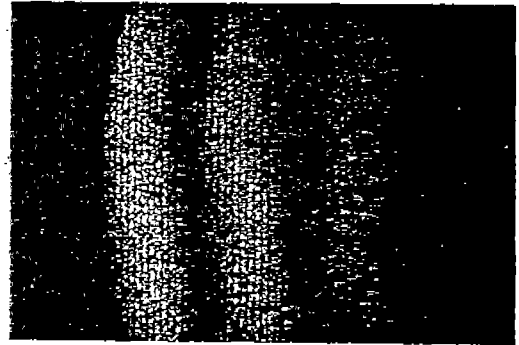


Fig. 17 Source image of X direction

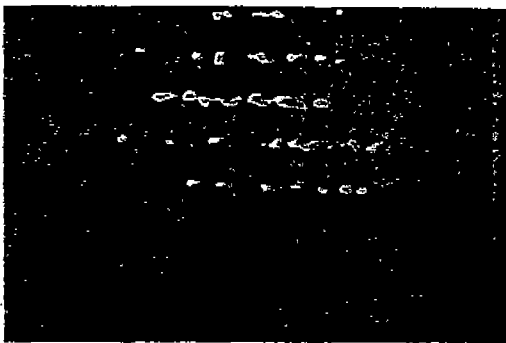


Fig. 15 Thining process of Y direction



Fig. 18 Thining process of X direction

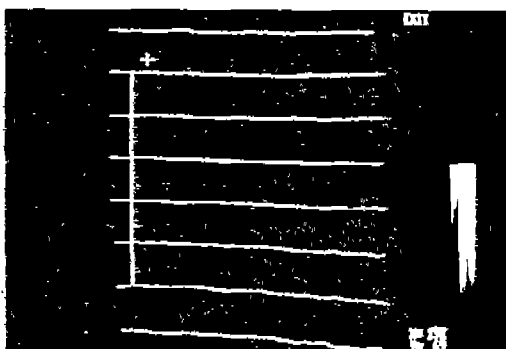


Fig. 16 Thining result of Y direction

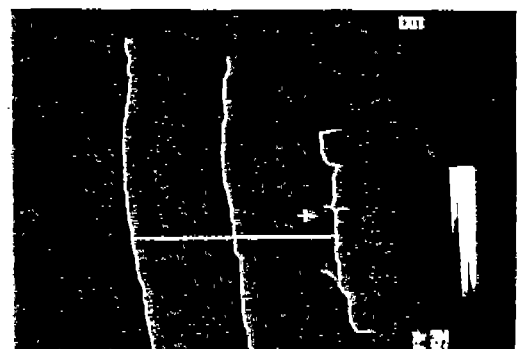


Fig. 19 Thining result of X direction

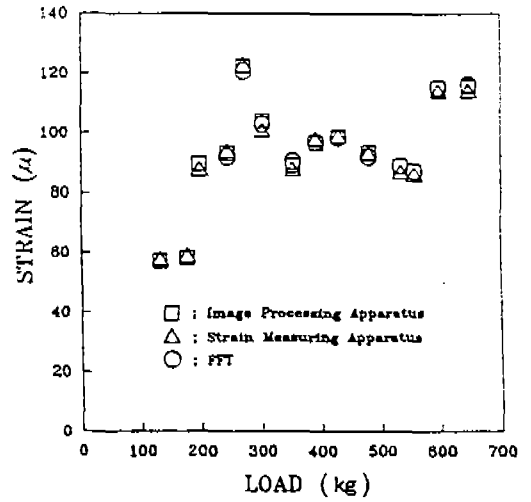
Table 1. The measuring results of In-Plane Displacement

(a) Tensile direction

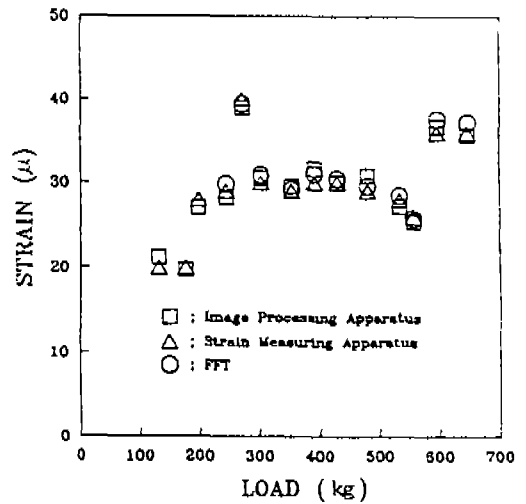
LOAD1 (kg)	LOAD2 (kg)	Image Processing Apparatus (μ)	Strain Measuring Apparatus (μ)	FFT (μ)
128	136	57.23	58	
173	181	58.26	59	
193	204	89.73	88	
238	250	93.14	94	92.01
263	280	122.45	123	120.78
296	310	104.04	101	102.88
349	360	89.08	88	90.45
386	399	96.45	98	96.88
424	437	98.65	99	98.27
474	487	93.37	93	91.89
529	540	88.62	87	88.98
552	563	87.06	86	87.12
589	605	114.95	114	115.15
639	654	115.45	114	116.15

(b) Compressive direction

LOAD1 (kg)	LOAD2 (kg)	Image Processing Apparatus (μ)	Strain Measuring Apparatus (μ)	FFT (μ)
128	136	21.26	20	
173	181	19.73	20	
193	204	27.08	28	
238	250	28.24	29	29.85
263	280	38.95	40	39.42
296	310	30.57	30	30.97
349	360	29.59	29	29.16
386	399	31.69	30	31.05
424	437	30.08	30	30.49
474	487	30.87	29	29.60
529	540	27.24	28	28.51
552	563	25.42	26	28.81
589	605	36.72	36	37.65
639	654	35.67	36	37.24



(a) Tensile direction



(b) Compressive direction

Fig. 20 Comparison of the measuring results

5. 결 론

Table 1과 Fig. 20은 면내변위를 2차원적으로 해석한 결과를 나타내고 있다. 전자처리 스펙클 패턴 干涉法으로 상온하에서 2차원의 면내변위를 측정하는 실험을 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 그래프상에서 나타난 바와 같이 ESPI법에 의한 2차원의 면내변위 측정은 정밀, 정확도 면에서 0.3

%의 측정율의 측정이 가능함을 확인하였다.

- (2) 본 연구에서는 ESPI법이 비접촉 측정에 있어서 유용한 스트레인 측정방법이라는 사실을 확인하였다.
- (3) ESPI법은 모아레법⁽⁹⁾이나 스트레인 측정장치 보다도 정도면에서 면내변위를 측정하는데 있어서 훨씬 우수하다고 사료된다.
- (4) 앞으로 ESPI법을 발전시켜서 스트레인 측정장치와 같이 자동화체계를 구축하여 스트레인 측정의 보편화에 연구방향이 설정되어야 한다고 사료된다.

후 기

본 논문은 1993년도 조선대학교 교비학술연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

1. 志自岐雄介, “스펙클패턴간섭법による溫度下の變形測定”, 九州大學 修士論文, 1989.
2. 山口秀穂, “스펙클패턴간섭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.
3. 김경석, “CW-레이저 스펙클 寫眞法에 의한 고온하에서의 面内 變位測定에 關한 研究”, 漢陽大學校 博士論文, 1988.
4. 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.
5. Groh. G : “The Engineering Uses of Holography”, edited by E. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge Univ. Press, pp.483, 1970.
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, 19980.
7. 山口一郎 : “レーザ 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.
8. 김경석, 최정석 : “고온하의 CW 레이저 스펙클 사진법과 회상처리에 의한 열팽창계수 측정에 관한 연구”, 韓國精密工學會誌, 第9卷, 第4號, pp.90~99, 1992.
9. 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.