

ESPI에 의한 원공판의 2차원 면내변위 측정에 관한 연구

김경석* 최형철** 양승필*** 김형수**** 홍명석**** 정운관*****

A Study on the Measurement of Two-Dimensional In-Plane Displacements of the Plate with a Circular Hole by ESPI Method

Kim Kyoung Suk, Choi Hyoung Chol, Yang Seung Pil, Kim Hyoung Soo, M. S. Hong, W. K. Jung

ABSTRACT

This paper presents the performance and problems in analysis method and testing system of Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI)method, in measuring two-dimensional in-plane displacement. The analysis result of measurement by ESPI is quite comparable to that of measurement by strain gauge method. This implies that the method of ESPI is a very effective tool in non-contact two-dimensional in-plane strain analysis. But there is a controversial point, measurement error. This error is discussed to be affected not by ESPI method itself, but by its analysis scheme of the interference fringe, where the first-order interpolation has been applied to the points of strain measured. Further development of advanced first-order interpolation method is being undertaken for the more precise in-plane strain measurement.

Key Words : ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry), CW(연속파), Two-Dimensional In-Plane Displacement, Image Processor

1. 서 론

최근 공업기술의 급속한 발달에 따라 기계구조 재료가 다양한 조건하에서 사용되어지고 있고, 이에 따라서

* 조선대학교 기계설계공학과
 ** 조선대학교 대학원 기계설계공학과
 *** 일본 구주대학 항공공학과
 **** 조선대학교 기계공학과
 ***** 조선대학교 원자력공학과

기계구조 재료에 대한 강도 해석을 행할 필요성이 증가하고 있다. 최근에는, 레이저의 출현에 의해 많은 새로운 측정법의 개발이 가능하게 되었고, 그 중에서 레이저 스페클 현상을 이용한 측정방법의 개발은 계측 분야에 많은 발전을 가져왔다. 레이저 스페클은, 레이저 계측에서는 일반적으로 노이즈가 되고 (1,2,3), 홀로그래피 등에서는 그 제거에 노력을 기울이고 있지만⁽⁴⁾, 본질적으로는 물체표면의 정보를 갖는 화상신호로 간주할 수가 있다. 또한, 스페클은 물체의 변형이나 스트레인에 따라 이동한다. 이러한 성질을 이용하여 물체의 변형이나 스트레인을 측정하는 방법이 스페클법이다. 이 스페클법은, 스트레인게이지를 이용한 측정법과 비교하면, 측정부 전체의 변형상태를 한번에 기록할 수 있고, 온도 보상등의 문제도 없다. 또한 패턴 계측의 대표가 되는 광탄성 피막법이나 모아레법⁽⁵⁾ 등과 비교하면, 본 방법은 측정물에 아무런 처리를 할 필요가 없고, 완전한 비접촉 측정이 가능하고, 또한 감도가 높은 잇점을 가지고 있다. 그러나 이러한 것들은 주로 1차원적인 측정에 관한 것이었고, 종래의 방법에서는 측정 곤란한 2차원 하에서의 적용이나, 변형측정 방법으로 확립하려고 하는 연구는 거의 행해지고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는, 한 방향의 면내변위 성분에만 관한 정보를 직접 얻을 수 있는 스페클 패턴 간섭법 (Speckle Pattern Interferometry : SPI)^(6,7)에 TV 카메라와 화상처리장치⁽⁸⁾를 도입한 전자처리 스페클 패턴 간섭법 (Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)⁽⁹⁾을 이용하여 인장하중을 받는 원공판의 면내변위 성분을 2차원적으로 측정하고, 스트레인 분포를 구하여 ESPI법의 적용 가능성과 문제점에 대해서 검토하고자 한다.

2. 전자처리 스페클 패턴 간섭법 (ESPI)의 원리

A. 스페클 패턴

레이저 광을 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 조사하고 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 렌즈를 이용하여 결상시킬때 물체상에 걸쳐 발생하는 작은 반점 모양을 상계의 스페클 패턴이라고 한다. 이러한 현상은 레이저가 간섭 (coherent) 광이기 때문에 조사영역에서는 Random하지만, 시간적으로는 정상인 위상관계에 있는 다수의 광파가 간섭함으로써 발생한다. 상면상의 알맹이 모양의 반점 즉, 스페클의 크기는 결상계의 분해능에

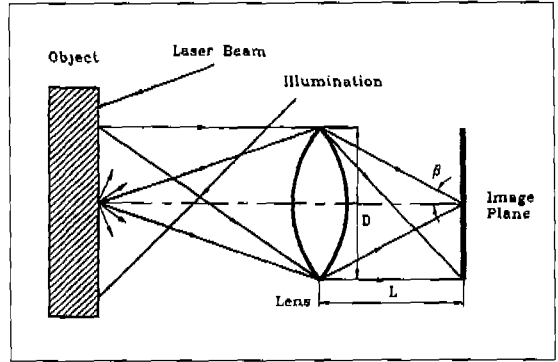


Fig. 1 Formation of subjective Speckle Pattern

의해 결정되고 스페클 최소의 크기는 $\sigma = 0.6\theta/\sin\beta$ 또는 $\sigma = 1.2(1+M)\lambda f$ 이며⁽¹⁰⁾, 렌즈에서 화면까지의 거리 L이 렌즈의 직경 D보다 아주 클 때에는 $\sigma = 1.2\lambda L/D$ 로 주어지게 된다. 여기에서 λ 는 레이저의 파장, M은 촬영배율, f는 렌즈의 F-Number이다.

B. 기본 광학계

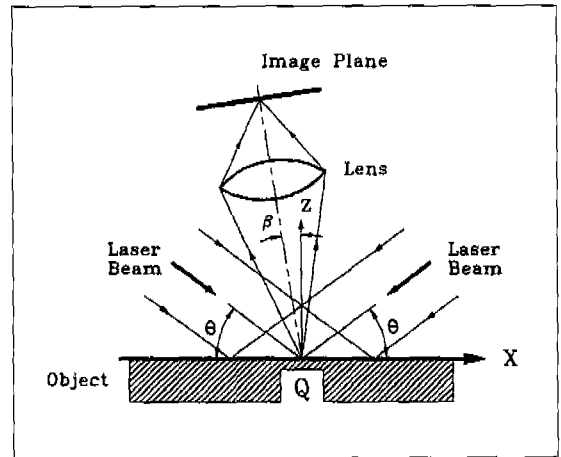


Fig. 2 The Basic Optical System of SPI

Fig. 2은 SPI의 기본 광학계를 나타내고 있다. 두개의 평행한 레이저 광 1,2를 같은 각도 θ 로 피측정면에 조사하여, 레이저 광이 조사된 확산 표면을 렌즈를 이용하여 상면상에 결상한다. 이때 두개의 광을 포함한 면과 측정면과의 교선의 방향(X방향)이 면내변위를 측

정하는 방향이다. β 는 관측방향과 측정면에 수직인 Z축과 이루는 각이다. 한쪽 방향의 레이저 광만으로도 상면에 스펙클 패턴이 발생하지만, 두개의 레이저 광에 의한 각각의 패턴에 의해 새로운 스펙클 패턴이 발생하게 된다. 휘도는 이 두개의 스펙클 패턴 간섭에 의해 결정된다. 따라서 한쪽 방향의 레이저 광을 물체광이라고 하면 다른쪽 레이저 광은 참조광이라고 생각할 수 있다. 이러한 광학계를 이용하면, 상면상의 변형 전후의 스펙클 패턴을 감산하거나 중첩함으로써 등변위 줄무늬를 얻을 수 있다.

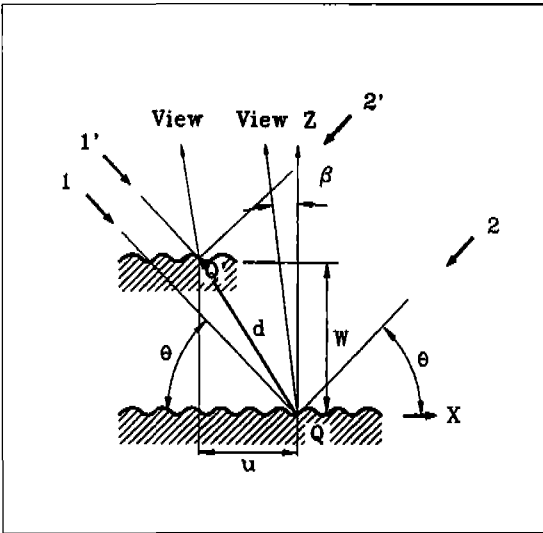


Fig. 3 Changes in Optical Path Length as a Result of Translation in both x and z Directions

한쪽 방향의 레이저 광은 다른 한쪽의 레이저 광에 대해 참조광이라고 간주할 수 있기 때문에 변형 전후의 광로길이의 변화 Δ 는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2 u \cos \theta \dots\dots\dots(2.1)$$

식(2.1)에 의해 Δ 는 면의 변형성분 w와 관측 방향 β 와는 무관하다는 것을 알 수 있다. 여기에서 광로길이 변화 Δ 가 $n\lambda$ ($n = 1, 2, 3, \dots$)가 될때 간섭 줄무늬를 볼 수 있으므로, 줄무늬 차수를 n, 레이저 파장을 λ 로 하면, 변위 u와의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$u = n \lambda / (2 \cos \theta) \dots\dots\dots(2.2)$$

식 (2.2)에 나타난 바와 같이, 변위 u는 레이저의 파장과 레이저 광의 조사각도만에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다.

C. 전자처리 스펙클 패턴 간섭법 (ESPI)

스펙클 패턴 간섭법(SPI)에 TV 카메라와 화상처리 장치를 조합시켜 변형을 측정하는 방법을 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)이라고 한다. Fig. 4은 ESPI 시스템 구성을 나타낸다. 스펙클 패턴은 TV 카메라로 해석할 수 있을 정도로 카메라의 조리개를 움직여서 정확한 상이 형성되게 한다. 우선, 어떠한 초기상태에 있는 물체의 스펙클 패턴을 카메라로 촬영하여 화상처리 장치의 메모리에 기억시킨다. 다음에 물체가 변형을 한 후에 새로운 스펙클 패턴이 발생되기 때문에 이것을 새로운 메모리에 기록한다. 이 두개의 화상 데이터를 감산함으로써 간섭 줄무늬를 얻을 수가 있다. 또 퍼스널 컴퓨터로 화상처리장치를 제어하면, 화상을 얻을 때의 처리시간은 1/30초 정도로, 거의 실시간에서 간섭 줄무늬의 관찰이 가능하다. 그리고, 일단 화상 데이터를 기록한 후에 Contrast가 나쁜 줄무늬는 강조 등의 처리가 쉽게 된다.

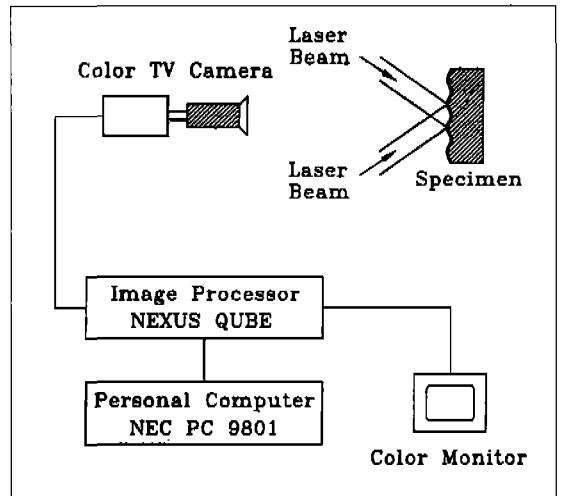


Fig. 4 Block Diagram of Image Processing System

3. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 레이저는 아르곤(Ar)레이저로서 파장 λ 는 514.5nm이고, 사용중의 최대 출력이 200 mW 인 연속파 레이저이다. 본 장에서는 광학계, 해석계 및 시험편과 실험방법에 대해서 기술한다.

A. 광학계 및 해석계

1. 광학계의 배치

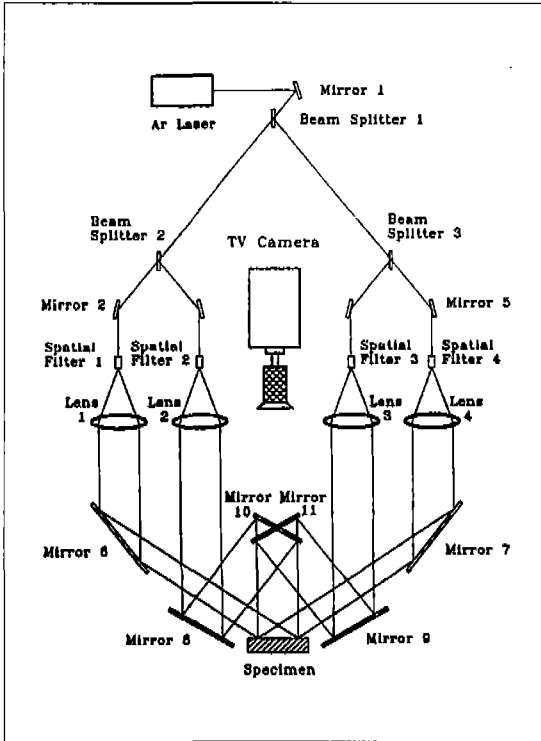


Fig. 5 Arrangement of the ESPI Optical System

실험의 성공여부 즉, 선명한 간섭줄무늬를 얻기 위해서는 광학계의 설치가 무엇보다도 중요하다. 본 실험에서의 광학계 배치를 위해서 본 평면도를 Fig. 5에 나타냈다.

mirror 10과 mirror 11은 상하로 배치되어 있고 각각 같은 각도로 시험편에 조사 된다. 그러나 이러한 배치는 1차원적 해석이라고 할 수 있다. 본 실험은 면내변위를 2차원적으로 해석하기 때문에 mirror 6과 mirror 7의 광학계가 추가로 배치되어 좌우로부터 각각 같은 각도로 시험편에 조사 된다.

2. 화상처리장치

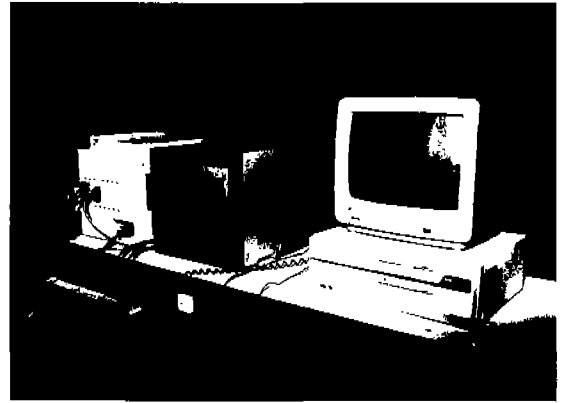


Fig. 6 The Image Processing System

Fig. 6은 본 실험에서 변형 전후의 스펙클 패턴을 간섭시켜 해석하기 위한 화상처리장치(NEXUS사 제품 QUBE)를 나타내고 있다. 레이저 광을 조사하고, 레이저 광에 의하여 발생하는 스펙클 패턴을 고해상도의 TV 카메라로 촬영하여 이것을 화소로부터 256단계의 2차원 디지털 화상 데이터로 화상처리장치의 메모리에 수록한다.

B. 시험편

본 논문에서는 원공판의 시험편을 사용하였다. 원공판은 Al 7075 - T6를 사용하였고 그 특성치는 다음과 같다.

$$\text{Young's modulus : } E = 7.53372 \times 10^3 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\text{Poisson's ratio : } \nu = 0.321162$$

시험편의 치수는, 원공판의 경우에 직경 12mm의 원공이 중앙에 위치하고 있다. Fig. 7은 시험편의 형상 및 치수 그리고 부착된 스트레인지지의 위치를 나타내고 있다. 사용한 스트레인지지는 모두 단축이며, 게이지 길이는 1mm 이다. 시험편에 균등한 하중이 걸리도록 하기 위하여 인장 시험기를 사용하였다. 기어장치의 레버를 회전시킴으로써 하중에 의하여 시험편은 팽창하게

되고, 이 팽창의 정도와 줄무늬 간격의 변화가 반비례함으로써 줄무늬 간격으로부터 스트레인을 계산할 수 있다.

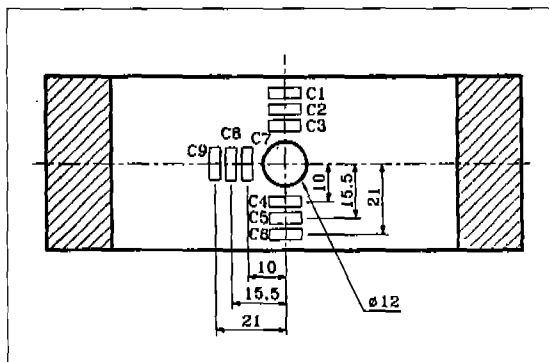


Fig. 7 The Dimension of Specimen and bonded Location of Gauge

D. 실험방법

Fig. 8는 원공판의 측정영역을 나타내고 있다. 측정은 인장방향, 그리고 인장방향에 수직인 방향에 대해서 각각 행하였다. 원공판의 경우는 간섭줄무늬를 얻기가 매우 힘들었기 때문에, 양 방향에서 좋은 줄무늬를 얻기 위해 각각 행하는 것으로 하였다. 원공판의 경우는 우선 인장방향의 데이터를 연속해서 얻고, 그 후에 레이저 광의 방향을 바꾸어 축에 대한 하중을 제거하여 또다시 하중을 가하면서 인장방향에 수직인 방향의 데이터를 얻었다. 각각의 측정에서는, 우선 시험편에 적당한 하중을 가하고 그 때의 화상을 기준 화상으로 화상처리장치의 메모리에 수록한다. 다음에 하중을 가하면서 변형중의 화상을 연속해서 화상처리장치의 메모리에 수록함으로써 실시간으로 간섭 줄무늬의 변화를 관찰하였다.

4. 원공판의 해석

본 연구는 ESPI법에 의한 측정결과와 스트레인게이지에 의한 측정결과와 비교함으로써 실험의 정도를 평가하였다. 원공판의 해석은 간섭 줄무늬의 세선화, 세선화에 의해서 구해진 줄무늬의 간격을 이용하여 스트레인의 계산, 그리고 역선(力線)을 그리는 순서로 해석을 행하였다. 본 실험에서 주의해야 할 부분은 간섭 줄

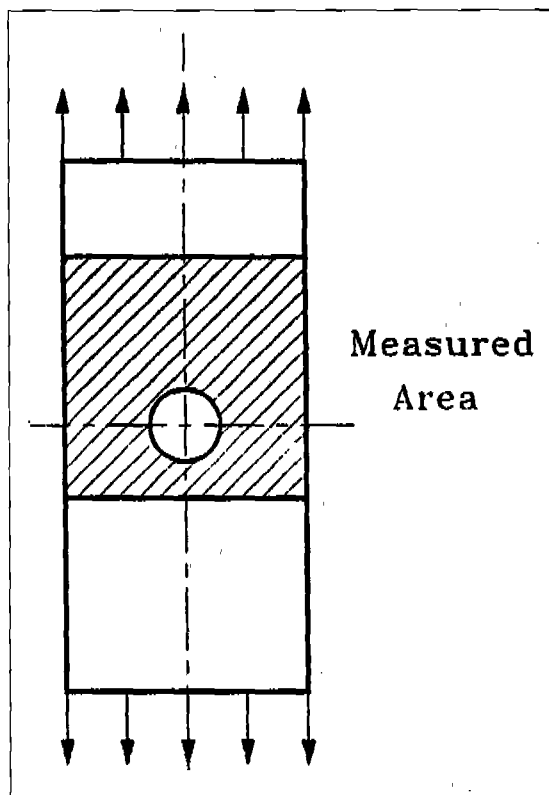


Fig. 8 The Measured Area of Specimen

무늬의 간격을 정확히 구해내는 것이다. 원공판은 평판과는 달리 간섭 줄무늬의 표현이 다소 복잡하기 때문에 보다 정확한 세선화를 하기 위해서는 화상처리장치에서 몇개의 처리과정을 거쳐야 한다. 그 처리과정에 대해서 알아본다.

A. 세선화

세선화를 하는 목적은 스트레인 값을 구할때 필요한 간섭 줄무늬 간격을 측정하기 위함이다. 세선화는 다음 몇개의 과정을 거친 후에 이루어진다. 먼저, 간섭 줄무늬의 명암이 선명하지 않을때 행하는 화상의 강조와 화상의 휘도 분포를 매끄럽게 하는 평활화, 2치화처리, 2치화처리를 행한 화상에서 서로 밝은 부분이 연결되어 있을 경우에 그 부분을 절단해 주는 수정 과정, 경계가 거친 상태에서 세선화를 행하면 그 줄무늬에는 많은 요철이 발생하게 된다. 따라서 확산, 수축을 행함으로써 2치화상 중의 폭이 좁은 부분을 제거해 준다. 다음으로

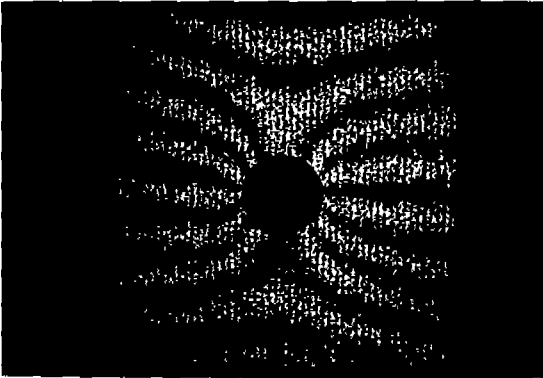


Fig. 9 The Enhancement of Source Image

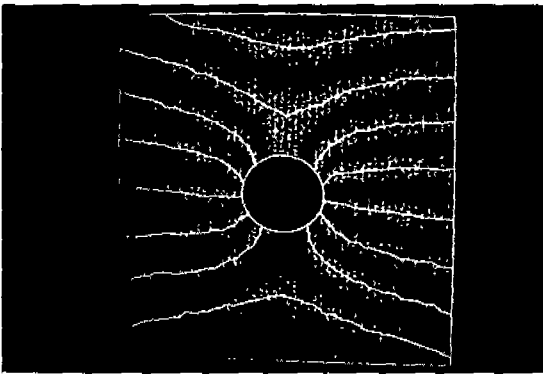


Fig. 10 The Labeling (with Outlines of Measured Area)

2차화상의 중심선을 검출하는 세선화를 행하며, 세선화한 줄무늬의 수정을 위해 원화상과 중첩을 시켜 잘못된 부분을 처리한다. 다음으로는 간섭줄무늬에 번호를 붙이는 것으로서 스트레인을 구할때는 차수가 다른 간섭 줄무늬의 간격을 측정하여야 되는데, 간섭 줄무늬가 구부러졌다거나 외형선과 인접한 줄무늬의 경우, 같은 차수의 줄무늬끼리 간격을 측정할 가능성이 있다. 그래서 같은 차수의 줄무늬끼리 간격을 측정하지 않도록 연결된 줄무늬 각각의 휘도 변화를 기록하여 줄무늬를 구별하는 것이다. 그리고 간섭 줄무늬와 외형선을 구별하기 위해서 외형선의 휘도는 항상 255로 하였다. 마지막 단계로 측정 영역의 외형선과 원공을 그리는 것으로 세선화 과정을 마치게 된다. Fig. 9과 Fig. 10은 세선화 과정의 처음과 최종적인 사진이다.

B. 스트레인의 계산

일반적으로 인접한 두개의 간섭 줄무늬를 n 차와 $n + 1$ 차의 간섭 줄무늬로 한다. 이때 각각의 줄무늬에 대응하는 변위량 U_n 과 U_{n+1} 은

$$U_n = n\lambda / (2 \cos \theta) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$U_{n+1} = (n + 1)\lambda / (2 \cos \theta) \dots\dots\dots (4.2)$$

와 같이 나타낼 수가 있다. 따라서 인접한 간섭 줄무늬의 변위량 차 ΔU 는,

$$\Delta U = \lambda / (2 \cos \theta) \dots\dots\dots (4.3)$$

가 되며, 이것은 λ 와 θ 만에 의해서 결정된다. 그리고 Fig. 11에서 줄무늬의 간격을 F 라 하면 수직변형률 ε 은,

$$\varepsilon = \Delta U / F \dots\dots\dots (4.4)$$

가 된다. 이렇게 해서 구해진 스트레인은 두개의 줄무늬 중심의 스트레인이 된다. 이러한 원리를 근거로 하여, 세선화 시킨 화상을 퍼스널 컴퓨터에서 해석한다. 그 과정에 대해서 알아본다.

화상처리장치에서는, Fig. 12에 나타난 바와 같이 화면상의 각 점에 대한 휘도를 기록한다. 처음에 각 점에서의 휘도를 읽고, 구하고자 하는 스트레인 방향과 평행한 선을 주사하여, 줄무늬가 있는 위치의 좌표를 기록한다.

그 후에, 인접한 줄무늬 사이의 간격을 측정하고 그 간격을 근거로 하여 스트레인을 계산한다. 또한, 그 값을 줄무늬 간격을 측정한 두개의 줄무늬 중심(Fig. 11, 12에서 \times 로 표시된 곳)의 스트레인으로 한다.

C. 역선을 구하는 방법

4-B에서 구한 스트레인 값을 이용하여 역선으로 나타낼 수 있다. 우선, Fig. 13에 나타난 바와 같이 스트레인이 얻어진 점을 점점으로 한 삼각형 요소를 생각하여, 각 요소의 각각 한쪽을 1차 보간한다. 그리고 스트레인 값이 동일한 점이 있는가를 각 변에서 판별하여, 스트레인 값이 동일한 점을 연결함으로써 역선이 얻어

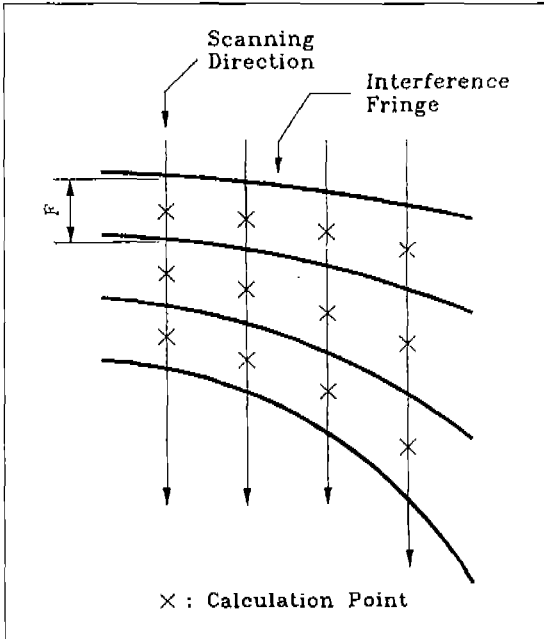


Fig.11 Calculation of Strain from the Interval of Two Adjoining Interference Fringes

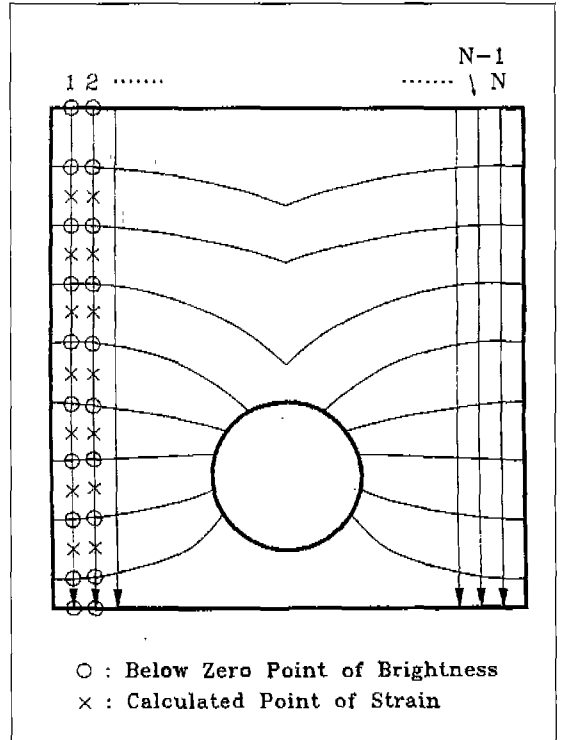


Fig. 12 The Method of Strain Calculation by PC

진다.

D. 실험결과 및 고찰

본 연구는 원공판을 이용하여 ESPI법과 스트레인지에이지에 의한 측정결과와의 정량적인 비교를 행하였다. 그러기 위해서는 스트레인지에이지를 붙인 위치에서 ESPI법을 이용하여 스트레인 값을 측정할 필요가 있어서 4-B에서 언급한 바와 같이 두개의 줄무늬 중심에서 스트레인을 구하고 그 사이를 1차 보간한 후, 스트레인지에이지 위치에서 스트레인 값을 구했다. 여기에서 말하는 스트레인지에이지 위치라고 하는 것은 Fig. 14에서 나타난 것과 같이 스트레인지에이지의 중심이다. 또한, 스트레인지에이지에는 폭이 있기 때문에, 스트레인 값은 중심에서 좌우 각각 두 곳, 즉, 총 다섯군데에서 계산하고, 그 평균값을 이용하였다. ESPI법에 의해 측정된 스트레인을 ϵ_E 라고 하고, 스트레인지에이지에 의해 측정된 스트레인을 ϵ_G 라고 할때, 오차 E(%)는 다음 식에 의해 계산된다.

$$E = [(\epsilon_E - \epsilon_G) / \epsilon_G] \times 100 (\%) \dots \dots \dots (4.5)$$

인장방향에 대한 측정결과를 각각의 스트레인지에이지에 대해 Table. 1과 Fig. 15에 나타내었다. Fig. 7에서 대응한 스트레인지에이지는 C1이다. 그리고 Table 상에서 나타난 LOAD 값은 로드셀이 나타내는 하중 값의 차다. 여기에서 ESPI법에 의해 얻어진 스트레인 값이 베이스의 하중에 의하지 않고 단지 하중차에 의해서 결정된다는 것을 확인할 수 있었기 때문에 베이스의 하중을 바꾸어 가면서 실험을 행하였다.

또한 인장방향에 수직인 방향에 대한 측정결과를 Table. 2와 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 7에서 대응한 스트레인지에이지는 C7 이다.

ESPI법에 의해 측정된 결과를 근거로, 인장방향과 인장방향에 수직인 방향의 스트레인 분포를 역선(力線)으로써 Fig. 17과 Fig. 18에 각각의 하중차별로 나타내었다. 이 역선은 시험편의 폭을 90등분한 선상에서 계산한 결과이다.

이상의 실험 결과를 보면, ESPI법과 스트레인지에이지의 측정값 사이에는 약 10% 전후의 오차가 발생하였

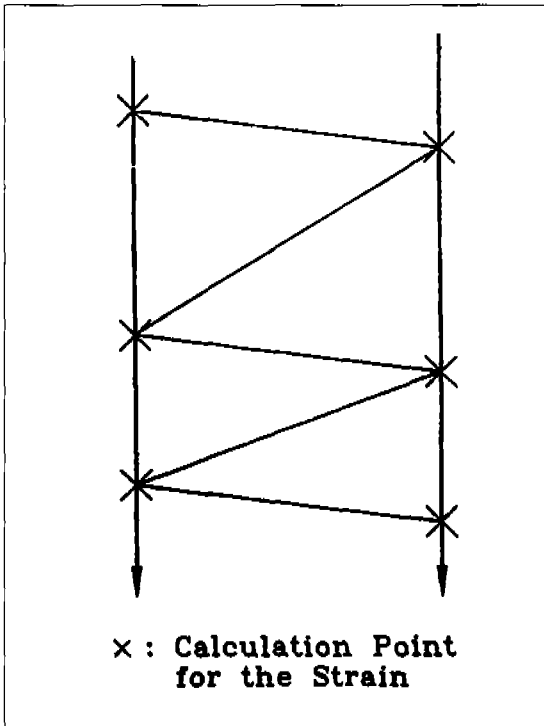


Fig. 13 The Measuring Method of Strain Contour(line of force)

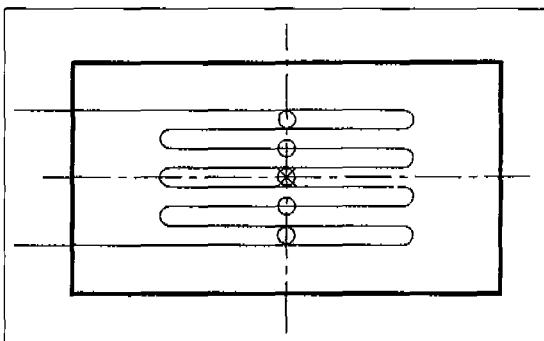


Fig. 14 The Strain gauge and Calculating Point

다. 식 (4.4)에 의해, 측정값에 대한 오차의 원인으로 여겨지는 것은, 레이저 광의 조사각도, 간섭 줄무늬의 간격 등이라고 사료된다. 레이저의 파장은 카탈로그를 참고하였기 때문에 고려하지 않았다. 레이저 광의 조사각도에 대해서 생각해 보면, 인장방향에 대해서는 θ 가 55° , 인장방향에 수직인 방향에 대해서는 θ 가 45° 가

Table 1 The Measuring Results of Plate with a Circular Hole (Tensile Direction : C1 Gauge)

LOAD (N)	ESPI (μ)	Gauge (μ)	ERROR (%)
71.44	54.52	50	9.04
91.53	70.33	66	6.56
109.85	86.19	80	7.73
128.18	100.87	94	7.31
146.51	111.95	105	6.61

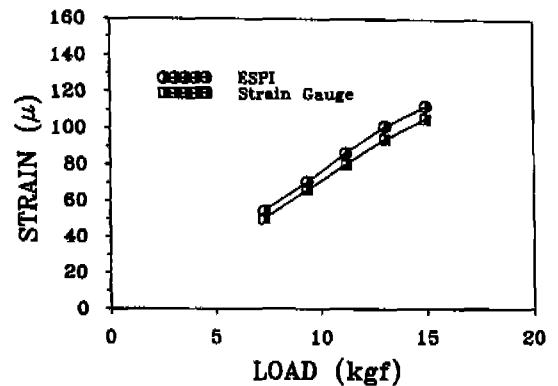


Fig. 15 The Measuring Results of Plate with a Circular Hole (Tensile Direction : C1 Gauge)

Table 2 The Measuring Results of Plate with a Circular Hole (Compressive Direction : C7 Gauge)

LOAD (N)	ESPI (μ)	Gauge (μ)	ERROR (%)
106.23	-23.05	-22	4.77
124.55	-26.12	-25	4.48
144.64	-29.09	-28	3.89
162.97	-34.80	-32	8.75
183.16	-38.48	-37	4.00
203.25	-40.79	-39	4.58

장 선명한 간섭 줄무늬를 얻을 수 있는 각도이다. 그렇지만, 각도를 측정하는데 있어서 다른 특별한 도구를 사용하지 않고 목측에 의해서 각도를 측정하였기 때문에 약간의 오차가 발생하였으리라 사료된다.

간섭 줄무늬 간격의 측정에서는 세선화를 실시한 후에 세선화시킨 줄무늬의 위치를 좌표로 기록하고 간격

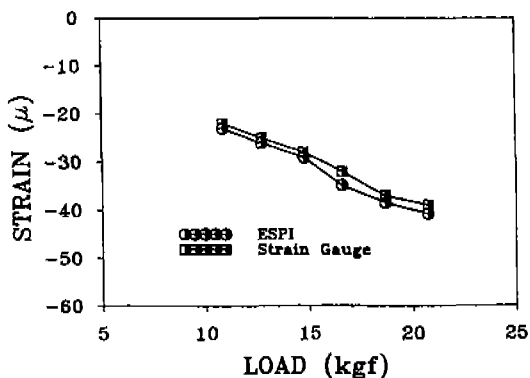


Fig.16 The Measuring Results of Plate with a Circular Hole Compressive Direction : C7 Gauge)

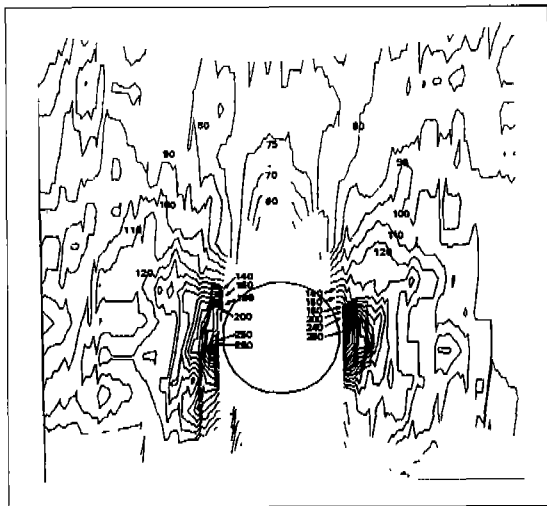


Fig.17 The Contour of Plate Specimen with a Center Hole (Tensile Direction : 146.51 N)

을 측정하였다. 그리고 여기에서 스트레인 값이 계산되면 이것을 두개의 줄무늬에서 중심 부분의 스트레인 값으로 하고 1차보간 한 것에 의해 스트레인게이지의 중심 위치에서 스트레인을 구하였다. 따라서 문제가 되는 것은 세선화가 매끄럽게 되지 않았을 때, 다시 말해서 원화상의 명암이 뚜렷하지 못했을 경우인데, 화면상에서 1도트의 오차가 난다면 간섭 줄무늬의 간격은 약 110μm 정도의 오차가 발생하는 문제가 있다. 그리고 스트레인게이지의 폭을 화면상에서 측정한 결과 약 20도트의 화소를 가지고 있다. 그런데, 스트레인 값은 단순

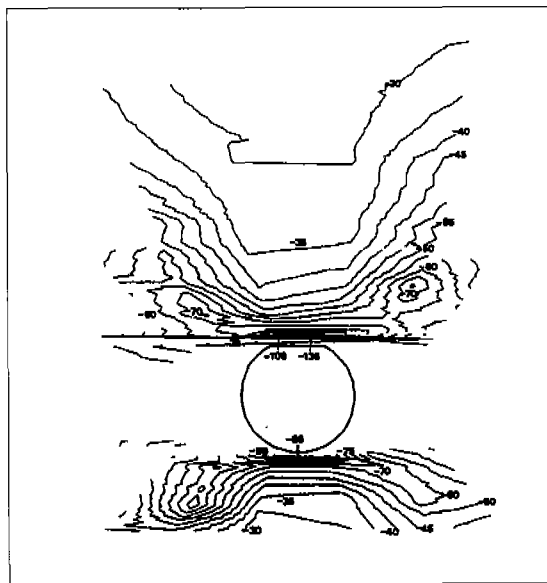


Fig.18 The Strain Contour of Plate Specimen with a Center Hole (Compressive Direction : 203.25 N)

히 몇개의 구간에서 측정하여 평균하였기 때문에 약간의 오차가 발생하였다고 사료된다. 또한, 스트레인게이지의 부착 위치에 대해서 생각해 볼 필요가 있다. 본 논문에서는 스트레인게이지를 뒷면에 붙여서 실험을 행하였다. 문제가 되는 것은 ESPI법은 시험편 앞면의 정보에 대해서 반응한 것을 측정하였고, 스트레인게이지는 시험편 뒷면의 정보에 대한 반응을 측정한 것이기 때문에 다소 오차가 발생하였다고 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 ESPI법을 이용하여 면내 스트레인 분포를 2차원적으로 측정하여 ESPI법의 유용성 및 실험 방법과 해석방법의 문제점에 대해서 고찰하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 원공판의 해석 결과를 보면 알 수 있듯이 ESPI법에 의한 측정 결과가 스트레인게이지에 의한 측정 결과와 다소 차이가 있다. 그러나 이러한 오차에 대한 문제점 모두는 ESPI법 자체적인 문제가 아니라 해석 방법이나 간섭 줄무늬에 관여하는 요인에 의한 오차라고 사료된다.

2. ESPI법을 이용하여 간섭 줄무늬의 간격을 측정하고 1차 보간하여 구한 스트레인 분포는, 예상한 대로 원공부에 집중됨을 확인할 수 있었다.

3. ESPI법은 미소변위를 측정하는 방법으로써 측정 변위량이 미소이기 때문에 면내 스트레인 이외에 등변위 줄무늬에 관여하는 요인이 존재하는 경우 그 영향을 크게 받았다.

1) 본 논문에 사용한 인장시험기는, 측정할 때마다 볼트를 이용한 측맞춤을 행하였다. 따라서 하중이 시험편에 정확히 전달되지 않았으리라 생각되며 더욱 더 정밀한 인장시험기의 개량이 필요하리라 사료된다.

2) 공기의 미소 요란에 의해 스펙클이 안정 되어 있지 않아 좋은 간섭 줄무늬를 얻을 수가 없었다. 따라서 이후의 연구에서는 진공중에서 측정을 행할 필요가 있다고 사료된다.

4. 본 논문의 해석은 단순히 스트레인이 얻어진 점 사이를 1차 보간함으로써 이루어졌다. 그러나, 동일한 하중차에서 줄무늬 간격이 좁은 경우와 넓은 경우에는 얻어진 데이터의 수가 다르기 때문에 줄무늬 간격이 넓은 경우에 오차가 많이 발생할 가능성이 있다. 따라서 좀 더 정확한 면내 스트레인을 구하기 위해서는 더욱 더 정밀한 1차 보간 방법을 개발할 필요가 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 1993년도 한국과학재단 특정기초연구 비지원(과제번호 93-0200-05)으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. D. Denby and J. A. Leendertz, "Plane-Surface Strain Examination by Speckle Pattern Interferometry using Electronic

Processing", Journal of Strain Analysis, Vol. 9, No. 1, pp. 17-25, 1974.

2. S. Sumi, "Speckle Pattern Correlation Method for Measurement of Surface Structural Changes caused by Fatigue", The Society of Materials Science, Japan, pp. 17-21, 1976
3. 山口一郎, "レーザ 스펙클히즈미計による高温下のひずみ測定", 非破壊 検査, 32(9), pp. 676-682, 1983
4. 角誠之助, "構造強度解析における レーザ의應用", 日本宇宙航空學會誌, 제25卷, 第281號, pp. 259-267, 1983
5. 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.
6. 志自岐雄介, "스펙클패턴干涉法による高温下の變形測定", 九州大學 修士論文, 1989.
7. 山口秀穂, "스펙클패턴干涉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
8. 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.
9. 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. 3167-3176, 1985.
10. 김 경석, "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.