

전자처리 및 Laser간섭에 의한 구조물의 Strain 측정에 관한 연구

정 운 관,* 김 경 석,** 최 정 상,*** 양 승 필,****
최 형 철,***** 정 현 철,***** 김 정 호*****

A Study on the Strain Measurement of Structure object by Electronic Process and Laser Interferometry

Woon-kwan Jung,* Kounng-suk Kim,** Jung-sang Choi,*** Seung-pil Yang,****
Hyoung-chol Choi,***** Hyun-chul Jung,***** Joung-ho Kim*****

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 anyalysis 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, measurment 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. In this case, it is turned out that the more errors would be occurred in the large interval of fringe. And so this paper describes a computer method for drawing when the height is available only for some arbitrary collection of points. The method is based on a distance-weighted, least-squares approximation technique with the weight varying with the distance of the data points.

Key Words : Least Square Method, Distance-Weighted Function, Electronic Speckle Pattern Interferometry

* 조선대학교 원자력공학과
** 조선대학교 기계설계공학과
*** 조선대학교 산업공학과
**** 동아대학교 음형설계과
***** 조선대학교 대학원

1. 서 론

양자전자학의 성과로 LASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)가 개발된지 20여년이 지나서 그 우수한 성질과 응용면에 있어서의 가능성으로 응용화의 연구가 진행되고 있다. Laser광은 단색성, 가간섭성(Coherency)이며, 방향성, 집속성이 좋고, Energy의 공간적, 시간적인 집중, 짧은 Pulse광의 발생이 가능하다는 등의 특징이 있다. 따라서 Laser 응용계측은 이러한 레이저의 특징을 이용한 것으로서 대표적으로 Holography 간섭법이나 Speckle Pattern법이 구조물과 재료의 다양한 역학적 거동 해석에 광범위하게 적용되고 있다. 여기에서 Holography 간섭법은 레이저 광의 간섭성에 의하여 실현된 것 중의 하나로서 단지 면외정보 해석에만 국한되어 적용되는 것으로서 면내변위의 측정에는 적용이 어렵다. 따라서 Speckle을 이용하여 면내변위를 측정하기 위한 연구가 계속되고 있다.

레이저 광을 확산 반사면에 照射 시킬때 그 반사면 내에, 또는 결상된 물체면의 상내에 나타나는 작은 입자모양의 반점모양을 Speckle이라 한다. 이 Laser Speckle은 이미 실용화 되고 있는 Holography 등에서는 Noise가 되기도 하지만 역으로 이것을 이용하여 물체표면의 면내변위를 측정하는 방법이 최근 주목을 받고 있다. 지금까지 Laser Holography법, Speckle 사진법, Speckle Pattern 간섭법 (SPI)을 이용한 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 한 방향의 변위성분을 직접 얻을 수 있는 Speckle Pattern 간섭법(SPI)에 화상처리 장치를 조합한 전자처리식 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)을 이용하여 인장하중을 받는 평판의 면내변위 측정이 가능하다는 것을 확인 하였다. 그러나 여기에는 몇가지 문제점이 있었다. 종래의 방법으로는 Laser를 이용하여 얻어진 간섭 줄무늬에 대하여 줄무늬 사이의 간격을 측정하여 Strain을 얻은 점을 정점으로 한 삼각형 요소를 고려하여, 각점을 1차 보간 하였다. 따라서 동일한 하중차에서 줄무늬 간격이 좁은 경우와 넓은 경우에 있어서 얻어진 데이터 수가 다르기 때문에 줄무늬 간격이 넓은 경우에는 오차가 많이 발생 하였다.

따라서 본 연구에서는 과거에 얻어진 데이터를 이용하고 오차를 줄이기 위해 다른 해석법을 적용하였다.

ESPI법에 의해 구한 변위 줄무늬를 분산된 데이터의 집합으로 고려하고, Error의 합이 최소가 되게 하는 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 보간방법을 1차원에서 2차원으로 바꾸어 오차를 줄여 변위 줄무늬의 정도(精度) 향상에 그 목적을 두었다.

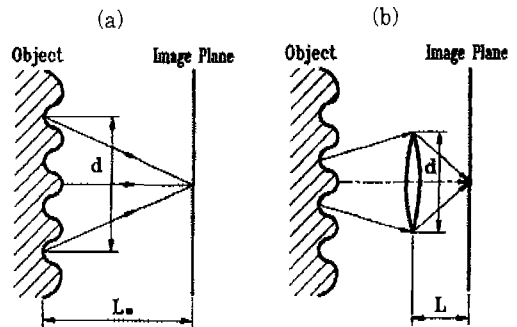
2. 전자처리 스페클 패턴 간섭법(ESPI)의 원리

2.1 Speckle Pattern Interferometry(SPI)의 원리

Laser광을 광학적으로 거친 표면을 갖는 물체에 조사하고 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 렌즈를 이용하여 물체면에 결상 시킨다. 이 광은 조면으로부터 산란된 광이며, 그 산란된 광은 레이저의 Coherent한 성질을 지니고 있기 때문에 간섭을 일으킨다. 따라서 관측면에 입자모양의 작은 반점 모양이 생기며, 이 반점 모양을 Speckle Pattern이라 한다.

Fig. 1 (a)는 렌즈를 사용하지 않는 경우로 回折界의 스페클 패턴(Objective speckle pattern)이라 하며, (b)는 렌즈를 사용하여 물체표면을 스크린에 결상할 때 발생되는 像界의 스페클 패턴(Subjective speckle pattern)이라 한다.

Speckle Size는 최대와 최소의 휘도를 갖는 근접한 영역들 사이의 거리를 통계적으로 평균한 것으로서 결상계의 분해능에 의해 결정되며, 실제 스페클 측정에 있어서 그 측정한계를 결정하는 요소가 된다. (a)의 경우 조사영역의 직경 d 가 스크린과 조사면의 거리 L_m 에 비하여 아주 작을때 Speckle Size는 $d_{sp} = 1.22(\lambda L_m / d)$ 로 나타낼 수 있으며, (b)의 경우는 $d_{sp} = 1.22$



(a) Formation of objective speckle pattern
(b) Formation of subjective speckle pattern

Fig. 1 The basic optical system of speckle pattern

$(\lambda L/d) = 1.22\lambda(1+M)f$ 이다. 여기서 λ 는 레이저의 파장, L 은 결상거리, 그리고 d 은 렌즈의 직경이며, M 은 렌즈의 배율이고 f 는 렌즈의 f -number 이다.

2.2 전자처리 스페클 패턴 간섭법 (ESPI)

Speckle의 위상 변화에 의해 Speckle의 휘도가 변화하므로 Speckle 휘도를 감산함으로써 간섭줄무늬를 발생시킬 수 있다. 물체상의 점이 이동하지 않는다는 변형에 의해 확산표면을 지나는 광로길이가 파장 λ 의 정수배만큼 변할 경우 Speckle의 감산에 의한 휘도는 0이 된다. 그 이외의 경우에 있어서 물체의 변형량이 Speckle Size를 초과하면 휘도 사이의 차를 구할 수가 없으므로 변위의 한계 측정 범위는 Speckle Size이다. SPI는 스페클의 위상변화를 물체상의 Speckle Pattern과 참조광의 간섭을 이용하여 기록하는 것이며, ESPI는 CCD 카메라와 전자식 Image Sensor를 이용하여 화상신호를 전자적 신호로 처리하는 것이다. 본 연구에서는 CCD 카메라와 화상처리장치를 이용한 ESPI System을 구성하였다. 물체의 변형전의 Speckle Pattern을 화상처리 장치의 Memory에 Digital Data로 기억시키고, 변형 후 Speckle Pattern을 카메라에 수록하여, 2개의 화상의 휘도를 감산 처리함으로써 Real Time으로 측정면 전체에 걸쳐 일정한 광로변화를 나타내는 변위 줄무늬를 구할 수 있다. 또한 화상처리 장치는 변위를 얻기 위한 전단계로서 줄무늬의 평활화에 이용하였다. 이와같은 전자처리를 행하는 스페클 패턴 간섭법(ESPI)은 변위량이 미소한 Speckle Size이하의 변위량을 완전히 비접촉적으로 측정할 수 있다. 또한 어느 한 방향의 면내변위 줄무늬를 직접 얻을 수가 있고, 면외변형의 영향을 받지 않으며, 관측방향에 의해 감도가 변화하지 않는다. 특히 완전한 Real Time으로 간섭 줄무늬의 관찰이 가능하기 때문에 재료의 연속적인 거동을 한번에 가시적으로 볼 수 있으며, 얻어진 간섭 줄무늬를 이용하여 다양한 디지털 화상처리가 가능하다.

3. 실험장치

3.1 시험편

본 실험에서 사용한 시험편으로는 7075-T6 Aluminium 합금을 사용하였다. 이 시험편의 E 는 Young's Modulus이며, ν 는 Poisson's Ratio이며,

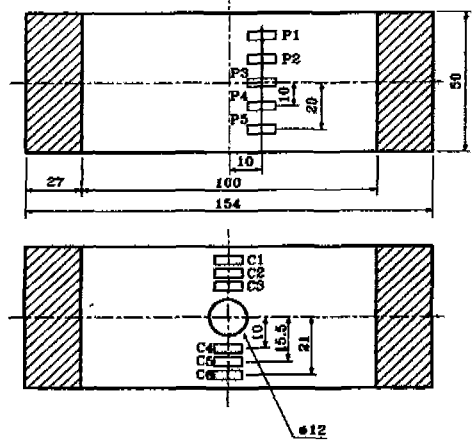


Fig. 2 The dimension of specimen and bonded location of gauge

그 값은 다음과 같다.

$$E = 7.53372 \times 10^3 (\text{kg/mm}^2)$$

$$\nu = 0.321162$$

또한 시험편으로는 평판과 원공판을 이용하였다. 시험편의 치수는 50mm×100mm×0.4mm이고, 원공판은 직경 12mm의 원이 같은 시험편 중앙에 위치하고 있다. 측정면(레이저 조사면)에는 금속광택을 제거하기 위해 백색도료를 칠하였다. 시험편의 뒷면에는 ESPI와 비교하기 위해서 Strain Gauge를 부착하였다. Fig. 2에 시험편의 형상과 Gauge의 위치를 나타내었다. 사용된 Gauge는 모두 단축이며, Gauge 길이는 1mm이다.

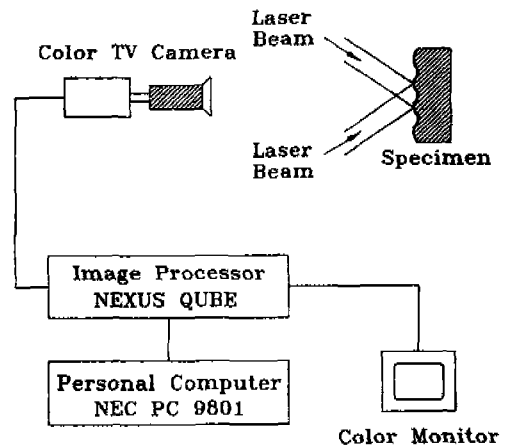


Fig. 3 Block diagram of image processing system

3.2 화상처리장치

측정면에 대해 두 방향에서 레이저 광을 조사하고, 레이저 광에 의하여 발생하는 스펙클 패턴을 고해상도의 TV 카메라로 촬영하여 이것을 화소로부터 256단계의 2차원 디지털 화상 데이터로 화상처리장치의 메모리에 수록하였다. 이와같이 스펙클 패턴 간섭법(SPI)에 TV 카메라와 화상처리장치를 조합시킨 측정방법을 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)이라고 한다. Fig. 3은 ESPI 시스템 구성을 나타내고 있다. 스펙클 패턴은 TV 카메라로 해석할 수 있을 정도로 카메라의 조리개를 조정하고 정확한 상이 형성되도록 하였다.

우선 초기상태 물체의 Speckle Pattern을 카메라로 촬영하고, 화상처리장치의 Memory에 Digital Data로 기억시키고 변형 후 물체의 Speckle Pattern을 별도의 Memory에 기억시켜, 각각의 휘도를 감산처리시

켜 간섭줄무늬를 얻었다.

4. 해석법

4.1 해석법의 개요

4.2 해석의 순서

x방향의 변위를 u , y방향의 변위를 v 라 하면, x방향의 Strain ϵ_x 와, y방향의 Strain ϵ_y 는 각각 다음과 같다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (1)$$

그러므로, 임의의 장소에서의 u 와 v 를 보간에 의해 구하고, 미계수를 해석 함으로써 면내 Strain을 구할

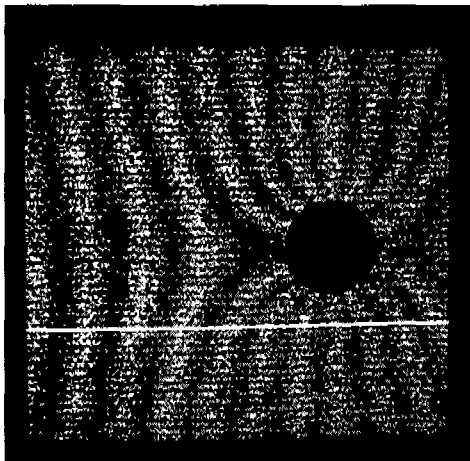


Fig. 4 The fringe pattern produced by ESPI

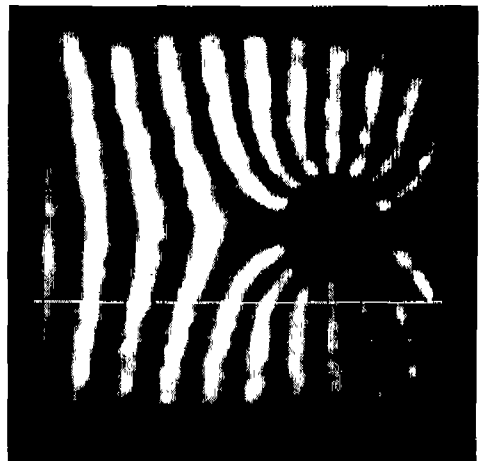


Fig. 6 The source image after smoothing

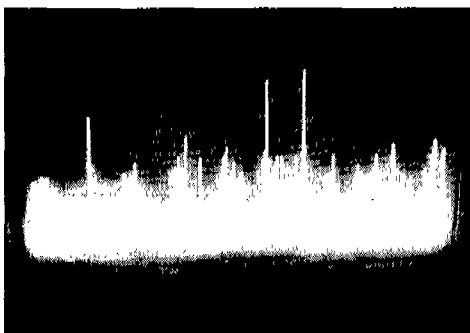


Fig. 5 The brightness distribution of source image continuous line

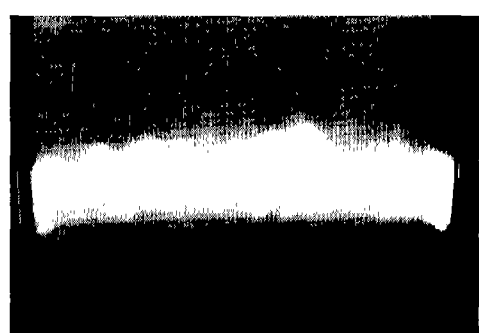


Fig. 7 The brightness distribution of source image after smoothing

수 있으며 그 해석 순서는 다음과 같다.

1. 원화상의 평활화
2. 변위 줄무늬의 추출
3. 줄무늬와 줄무늬 사이의 보간
4. 보간값의 미계수 보간

4.3 평활화

Fig. 5는 Fig. 4의 실선부에 있어서의 휘도분포를 나타내고 있지만, 이상적인 간섭줄무늬의 휘도분포는 정현파 형태인 경우, 그 위상을 구하는 것은 모든 점의 변위분포를 구할때 가능하다. 그러나 이러한 경우 Fig. 5와 같이 휘도 분포를 나타내기 때문에 이러한 방법을 직접 적용하는 것은 좋지 않다. 따라서 줄무늬의 휘도 분포의 1주기 가운데에서 위상차 π 인 2점(휘도의 최대값과 최소값)을 구하여 보간하는 방법을 취하였다. 그

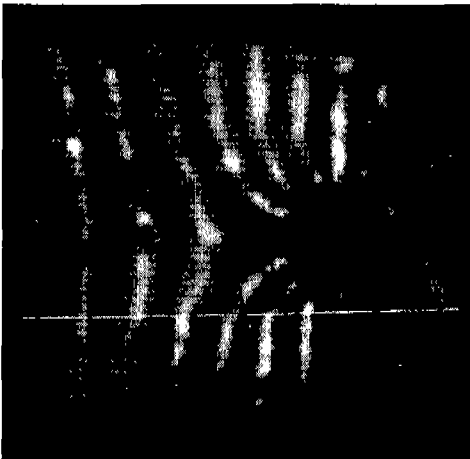


Fig. 8 The source image after fourth smoothing

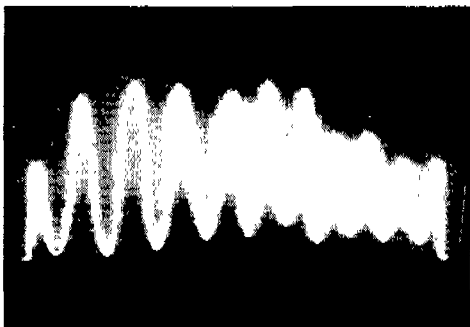


Fig.9 The brightness distribution of image after fourth smoothing

러나 이러한 상태에서는 두점으로부터 구할 수 없으므로 평활화 처리를 한 후 휘도 분포를 연속화하였다. Fig. 6는 1회 평활화 처리한 화상이고, Fig. 7는 Fig. 6의 실선부 휘도분포이다. 그리고 그 휘도분포를 반복 처리하여 휘도분포를 연속화하였다. 단, 평활화 처리를 하면 Contrast가 저하하기 때문에 적당히 Contrast를 조정했다. Fig. 8은 4회 평활화 처리한 화상이고, Fig. 9는 Fig. 8의 실선부의 휘도분포이다. 역시 여기에서도 Contrast를 변경하였다. 이런 과정을 거친 후 휘도의 최대값과 최소값을 구하였다.

4.4 변위 줄무늬의 추출

연속화한 휘도분포의 최대값과 최소값이 존재하는 좌표를 2차원적으로 연결하면 이것이 바로 변위 줄무늬가 된다. 이들의 관계를 Fig. 10에 나타내었다.

이와 같은 변위 줄무늬들은 Computer에 의해 추출하였으며, 임의의 한 Line상의 휘도의 평균을 구해 각 점에서의 휘도 차의 절대값을 취하고 그 값의 최대값이 존재하는 좌표를 순차적으로 구해가면서 변위 줄무늬의 차수를 결정했다.

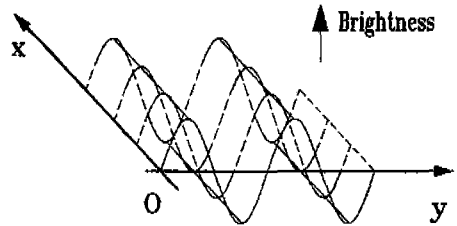


Fig. 10 The relationship between brightness and interference fringes

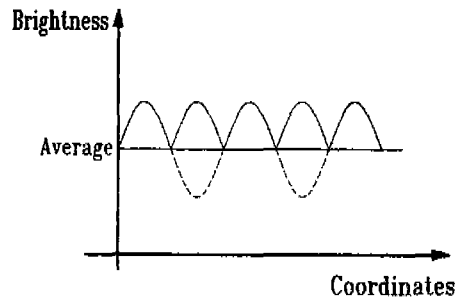


Fig. 11 The extraction scheme of interference fringes

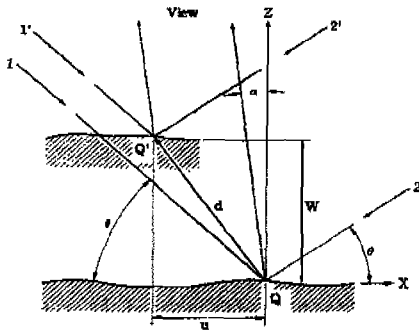


Fig. 12 The relationships between displacement and optical system

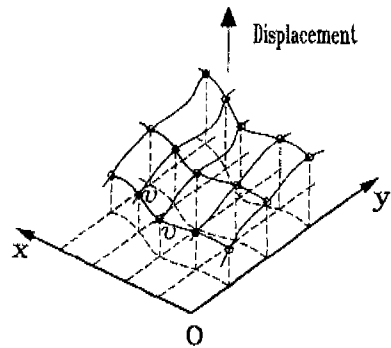


Fig. 13 The scattering in displacement distribution

4.5 보간(Interpolation)

측정면상의 임의의 점 Q가 미소변위 d만큼 변하여 점 Q'로 이동하였다고 한다면, U는 변위 d의 X방향 성분이고 W는 Z방향 성분이다. Fig. 12에서 Laser Beam 1과 관측방향이 이루는 광로길이 변화량 L₁과 Laser Beam 2의 광로길이 변화량 L₂는 다음과 같다.

$$L_1 = U \cos \theta + U \sin \alpha + W \sin \theta + W \cos \alpha$$

$$L_2 = -U \cos \theta + U \sin \alpha + W \sin \theta + W \cos \alpha \quad (2)$$

한쪽방향의 Beam을 다른쪽방향의 Beam에 대해 참조광이라 하였으므로 변형전후의 광로길이 변화량의 차는 다음과 같다.

$$L_1 - L_2 = 2U \cos \theta \quad (3)$$

또한 줄무늬 차수를 n, Laser의 파장을 λ라고 하면, 변위 U의 크기는 다음과 같다

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

따라서 변위 줄무늬 사이의 변위 차 ΔU는 1주기에 서 두개의 변위 줄무늬를 가지기 때문에, 식 (4)에 의해

$$\Delta U = \lambda / (4 \cos \theta) \quad (5)$$

가 된다.

변위 줄무늬를 구한 화상의 변위 분포는 Fig. 13과 같이 분산적인 Data로서 나타내어진다. Strain은 변위의 좌표에 의해 미계수로 나타내기 때문에 이 분산 Data에 대한 보간이 필요하다. 일반적으로 보간에는 1차보간, Spline보간 등이 있으며, 지금까지는 단순히 Strain이 얻어진 점 사이를 1차 보간했다. 따라서 동일한 하중차에서 줄무늬 간격이 좁은 경우와 넓은 경우에

는 얻어진 Data 수가 다르기 때문에 줄무늬 간격이 넓은 경우에는 큰 오차가 발생하였다. 그러므로 변위 줄무늬를 1차 보간하여 변위분포를 구하고, 그 미계수를 구한 후(이때 Strain 분포는 분산적인 값을 취한다) 다시 한번 1차 보간하여 Strain 분포를 구했다. 그러나 변위 줄무늬는 2차원 Data라고 가정 하였으므로 1차 보간의 Data를 2차원적으로 고려할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 Error의 제곱의 합이 최소가 되도록 하기 위해 거리-가중 최소자승법을 이용하여 Strain값을 구하였다.

4.5.1 거리-가중 최소자승법을 이용한 보간법

분산 data가 N개 존재하고, 이 값이 구해져 있다고 생각되는 함수를 f라 하면, 분산 data는, f_i = f(x_i, y_i), i = 1, ..., N로 나타낼 수 있다. 또한 P[f](x, y)를 f의 근사로 하고 φ_j, j = 1, 2, ..., m을 최소자승법 근사에 이용하는 기본적인 함수로 하였다. 따라서 보간함수는 일반적으로,

$$P[f](x, y) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_j(x, y) \varphi_j(x, y) \quad (6)$$

로 표시되며,

단 $\bar{a}_j(x, y), j = 1, \dots, m$ 일 때,

$$\min_{a_1, \dots, a_m} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{a_1 \varphi_1(x_i, y_i) + \dots + a_m \varphi_m(x_i, y_i) - f_i}{\rho_i(x, y)} \right\}^2 \quad (7)$$

의 해이다. 여기에서 $\bar{a}_j(x, y)$ 의 근사로서 A[\bar{a}_j](x, y)을 대입하면, P[f]의 근사함수로서 다음과 같이 된다.

$$Q[f](x, y) = \sum_{j=1}^m A[\bar{a}_j](x, y) \varphi_m(x_i, y_i) \quad (8)$$

여기에서

$$A[\bar{a}_j](x, y) = \sum_{i=1}^N A[\bar{a}_j](x_i, y_i) W_i(x, y) \text{ 로 표시되고}$$

$$W_i(x_i, y_i) = \delta_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N \text{ 으로 된다.}$$

따라서 Q 는 다음과 같이 된다.

$$Q[f](x, y) = \sum_{j=1}^m A[\bar{a}_j](x, y) \varphi_m(x_i, y_i) \quad (9)$$

여기에서 $Q_i(x, y) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_j(x_i, y_i) \varphi_j(x, y)$ 이다.

그러나 보간한 각각의 점의 최소자승 근사를 이용하게 되면 계산량이 방대해지며, Data를 얻고자하는 점이 보간한 점들로 부터 어느정도 떨어져 있다고 하더라도 보간한 점에 영향을 미친다. 따라서 $\rho_i(x_i, y_i) = 0$ 이라는 거리함수를 사용하여 $1/\rho_i(x, y)$ 를 임의의 거리로 함께 증감을 하는 누적함수로 정의하였다.

누적계수 $1/\rho$ 를 결정하기 위해 영향반경 R_q 를 도입하였으며, xy평면상의 임의의 분산점 (x_k, y_k) 에서 반경 R_q 내에 있는 N개의 분산 data만큼을 취하고, 이것을 이용하여 거리-가중 최소자승법을 해결하였다. 누적계수 $1/\rho$ 은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho_k} = \frac{(R_q - d_k)}{R_q d_k} \quad (10)$$

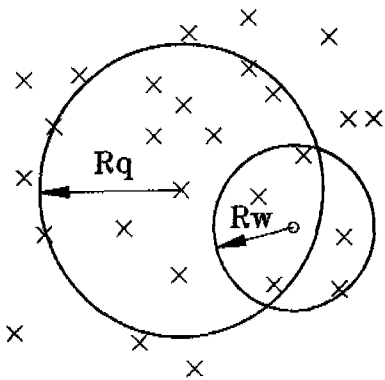


Fig. 14 The relationships between R_q and R_w

여기에서, $d_k = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ 이며,

$$(R - d) = \begin{cases} R - d & R - d \geq 0 \\ 0 & R - d < 0 \end{cases} \text{ 로 한다.}$$

따라서 해석해야 할 최소자승의 문제는,

$$\min_{a_{k2}, \dots, a_{k6}} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\rho_i^2(x_k, y_k)} [f_k + a_{k2}(x_i - x_k) + a_{k3}(y_i - y_k) + a_{k4}(x_i - x_k)^2 + a_{k5}(x_i - x_k)(y_i - y_k) + a_{k6}(y_i - y_k)^2 - f_i]^2 \quad (11)$$

이고, (x_k, y_k) 근방에서의 보간함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$Q_k(x, y) = f_k + \bar{a}_{k2}(x - x_k) + \bar{a}_{k3}(y - y_k) + \bar{a}_{k4}(x - x_k)^2 + \bar{a}_{k5}(x - x_k)(y - y_k) + \bar{a}_{k6}(y - y_k)^2 \quad (12)$$

여기에서, $\bar{a}_k, j = 2, \dots, 6$ 은 식(11)의 해이며 그 보간함수는 N개 존재한다. 따라서 xy평면상의 임의의 점에서 보간값을 구한다. 전과 동일하게 영향반경 R_w 를 도입한다. xy평면의 임의의 점 (x, y) 에서 반경 R_w 내에 있는 m개의 분산 Data의 보간함수만큼이 점 (x, y) 에서 거리에 반비례하여 누적되어 구해진다. R_w 는 R_q 의 $\sqrt{2}$ 배의 값을 취하면 비교적 잘 보간이 된다는 것을 알았다.

$$\frac{1}{\rho'_i} = \frac{(R_w - d_i)}{R_w d_i} \quad (13)$$

임의의 점에서의 보간값은 식 (12)을 이용하여 다음과 같이 된다.

$$D[f](x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{Q_k(x, y)}{\rho_k'^2(x, y)}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\rho_k'^2(x, y)}} \quad (14)$$

5. 실험결과 및 고찰

5.1 Strain Gauge값과 1차보간에서 얻어진 값의 비교

본 연구에서는, 본 실험에 의해서 구한 결과와, 이전

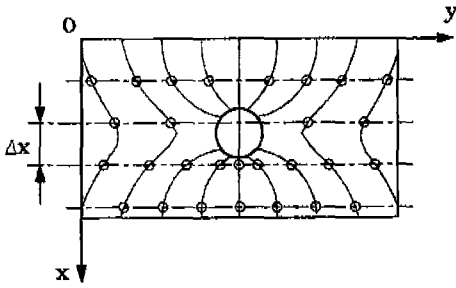


Fig. 15 The extraction scheme of scattered data

의 실험에서 1차 보간에 의해 얻은 결과값을 비교했다. 이 결과값은 평판과 원공판에서 인장방향의 등변위 줄무늬로부터 구한 것이며 Strain Gauge의 위치는 Fig. 2에 나타냈다.

또한 최소자승법을 이용하여 추출한 분산점은 다음과 같이 결정하였다. 시험편의 가장자리에 존재하는 변위 줄무늬에 대한 보간의 평균 Δx를 취해서, 변위 줄무늬와의 교점을 분산 Data로 추출하였다. 그때의 오차는

Table 1 The measuring results of plate(P1 Gauge)

	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error(%)
P1	56.10	38	37.93	36.21	-4.71
	74.70	50	50.85	49.08	-1.84
	93.40	63	65.17	59.43	-5.66
	110.33	76	79.34	78.36	3.10
	130.80	88	91.79	90.40	2.72
	149.50	100	108.09	103.53	3.53

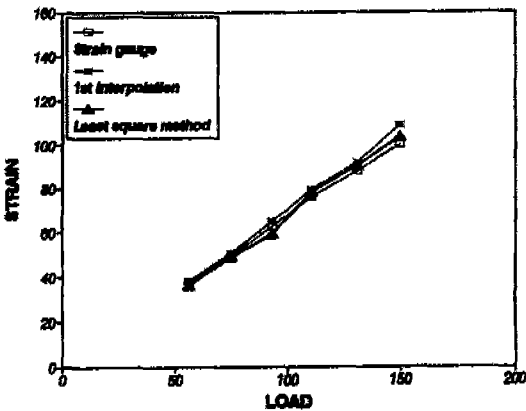


Fig. 16 The measuring results of plate(P1 Gauge)

다음 식에 의해 계산하였다.

$$Error = [(\epsilon_e - \epsilon_g) / \epsilon_g] \times 100\% \quad (15)$$

Table 2 The measuring results of plate(P2 Gauge)

	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error(%)
P2	56.10	35	38.13	35.86	-0.38
	74.70	49	50.58	48.17	-1.69
	93.40	62	66.52	59.45	-4.11
	110.33	75	77.86	80.01	6.68
	130.80	87	93.73	90.72	4.27
	149.50	99	107.59	100.52	1.53

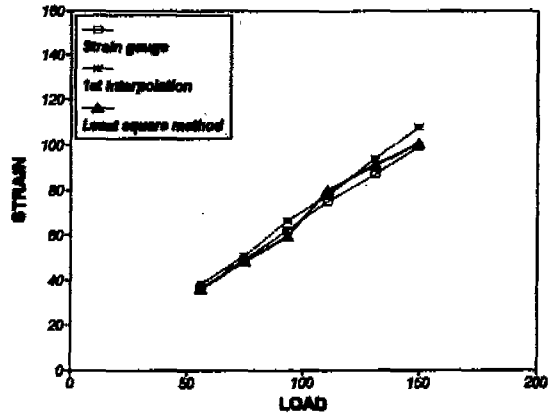


Fig. 17 The measuring results of plate(P2 Gauge)

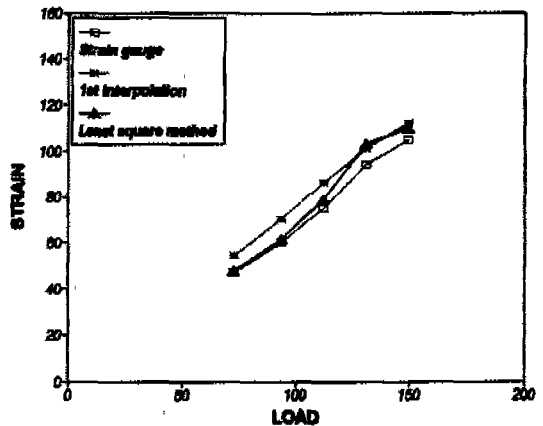


Fig. 18 The measuring results of plate with a circular hole (C1 Gauge)

Table 3 The measuring results of plate with a circular hole(C1 Gauge)

C1	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error(%)
	72.90	47	54.52	47.59	1.25
93.49	60	70.33	61.60	2.67	
112.13	75	86.19	79.00	5.33	
130.80	94	100.87	103.12	9.57	
149.51	105	111.95	109.76	4.53	

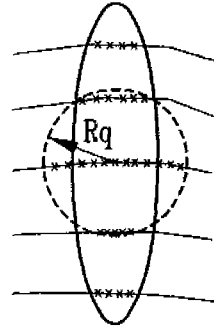


Fig. 20 An influenced block when load changes by direction follow

Table 4 The measuring results of plate with a circular hole(C2 Gauge)

C2	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error(%)
	72.90	52	58.99	53.28	2.46
93.59	66	75.05	70.13	6.25	
112.13	80	91.41	78.50	-1.88	
130.80	101	104.91	112.91	11.79	
149.51	114	119.44	115.36	1.19	

였다. 그러나 이때의 문제점으로는 x방향, y방향에 대하여 분산 Data수가 불균일하다는 것이다. 거리-가중 최소자승법을 이용하여 가중된 방향으로 영향반경을 변화시켰다. 이런 경우에는 등변위 줄무늬에 수직한 방향으로 등변위 줄무늬 방향보다 큰 누적을 해야만 한다.

본 실험에 사용된 보간법은 3차원 Data를 하나의 곡면으로 보간한 것은 아니며, 임의의 구간에서 보간한 곡면을 이용하였다. x방향의 Data를 해석하였으며, y방향에 대해서는 고려하지 않았다. 반면에 x방향의 Data를 감소시키면, 전체적인 정밀도가 떨어진다는 문제점이 발생하였다. 이것을 극복하기 위해 영향반경 R_g, R_w 로 표시되는 함수의 구간을 원형으로 하지 않고, 타원형을 이용하는 것과 정밀도 향상을 위하여 Data를 감소시키지 않는 방법을 고려하는 것이 오차를 감소시키는 적절한 방법이라 사료된다. Digital 화상에서 Data를 Δx 당 Data를 추출한다면 그 위치의 Pattern은 Δx 값에 따라 변한다.

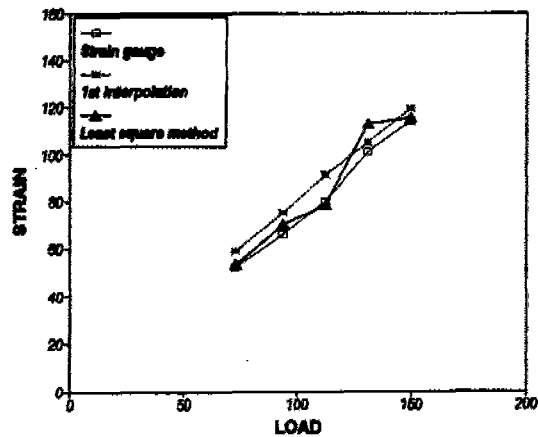


Fig. 19 The measuring results of plate with a circular hole(C2 Gauge)

여기에서 ϵ_E 는 ESPI에 의해 구해진 Strain 값이며, ϵ_G 는 Strain Gauge에 의해 구해진 Strain 값이다.

5.2 고찰

ESPI법에 의해 구한 등변위 줄무늬를 분산된 Data의 집합을 고려하고, 거리-가중 최소자승법을 이용하여 보간하고 함수의 미계수를 구하여 각점의 변위를 구하

6. 결론

ESPI법을 이용하여 면내 스트레인 측정법의 일환으로 2차원 보간법을 도입하여 거리-가중 최소자승법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ESPI법에 의해 얻은 변위 줄무늬를 분산된 Data의 집합을 고려하여 거리-가중 최소자승법을 이용한 결과 변위 줄무늬 사이를 1차 보간을 하였을 때보다는 많은 Data수의 영향을 고려할 수 있었으므로 오차를 상당히 줄일 수 있었다.

2. 보간한 각각의 점들 사이를 거리-가중 최소자승법

을 이용하면 계산량이 방대해진다. 따라서 Data를 얻으려고 한 점이 보간한 점들로부터 어느정도 떨어져 있으면 보간한 점에 영향을 미침을 알 수 있었다.

3. N_q 와 N_w 값은 각각 반경 R_q 와 R_w 의 원 내에 위치한 Data점들의 수를 나타내고 있으므로 영역을 가지고 있는 Data에 대해서 N이 25보다 적을 때에는 반드시 N 값을 증가시켜야 했다. 따라서 함수의 구간을 타원형으로 하는 것이 적절할 것으로 사료된다.

4. 본 논문의 해석결과 변위줄무늬 사이에 균일하게 분포되어 있는 Data의 경우에 있어서 $N_s = 18$ 일때 가장 정밀한 Data를 얻을 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. D. H. McLain, "Drawing contours from arbitrary data points", The Computer Journal, Vol. 17, pp. 318-324, 1974
2. D. H. McLain, "Two dimensional interpolation from random data", The Computer Journal, Vol. 19, pp. 178-181, 1976
3. R. Franke and G. Nielson, "Smooth interpolation of large sets of scattered data" International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, pp. 1691-1704, 1980
4. 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.
5. 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

6. 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.
7. 角誠之助, "構造強度解析における レーザの應用", 日本宇宙航空學會誌, 第 25 卷, 第 281 號, pp. 259-267, 1977.
8. O. J. Lokberg and J. T. Malmo, "Deformation measurements at Very High Temperatures by ESPI and Moiré Methods" Applied Optics, Vol. 1, No. 2, pp. 62-68, 1986.
9. 志自岐雄介, "スペックルパターン干渉法による 高温下の變形測定", 九州大學 修士論文, 1989.
10. 山口秀穂, "スペックルパターン干渉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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Archbold. B. E. and Bruch. J. M. and Ennos. A. E, "Recording of In-plane Displacement by Double Exposure Speckle Photography", Optics Acta, Vol. 19, pp. 253-271, 1972
15. Leendertz. J. A, "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect", J. Phys. E, Vol. 3, pp. 214-218