

# 레이저 스페클 사진법에 의한 중앙 균열판에 있어서 스트레인, 스트레스 자동화 해석에 관한 연구

김 경석\*, 나 기대\*, 정 낙규\*, 차 용훈\*\*, 정 윤관\*\*\*

## A Study of Automated Analysis of In-plane Strain and Stress of Center Cracked Plate by Laser Speckle Photography Method

K. S. Kim\*, G. D. Na\*, N. G. Jung\*, Y. H. Cha\*\*, Y. G. Jung\*\*\*

### Abstract

Laser speckle photography-one of the Laser speckle measurement methods which, recently, are used widely in various science, and engineering applications are succesfully used in the non-contact measurement of In-plane displacement. In this study, automated measurement and analysis are tried in the laser speckle photography method using a video camera, computer control and processing, and a X-Y positioning table driven by computer controlled stepping motor. The experiment was compared with the theoreical strain and stress data from finite element method. The result showed that displacement, strain and stress can be measured more accurately and conveniently by using this approach.

### 1. 서 론

최근 여러 분야에서 사용 되어지고 있는 유도방출에 의한 광증폭을 이용한 Laser는 특징으로서 스페클 패턴 이라고 하는 간섭현상을 일으키는데 여기서 생기는 간섭무늬를 측정하여 해석대상의 정보를 얻는 레이저홀로그래피(Laser Holography)에서는 스페클패턴이 해석에 지장을 주지만 이것을 역이용하여 스페클패턴을 이용한 변위의 측정법으로서 스페클사진법, 스페클간섭법, 스페클상관법 등이 있다. 이번

연구에서는 비접촉으로도 측정이 가능한 스페클사진법을 선택하여 면내변형에관한 연구를 해왔고 이때까지의 연구로서 1000℃라 할수 있는 가혹한 조건에서도 측정이 가능하다는 것을 확인했다. 이 방법의 특징으로는 거칠은 물체의 비접촉 측정이 가능하고 시험편의 모든 변위정보가 한장의 건판에 기록되어질수 있고, 측정영역과 감도는 카메라의 결상배율에 의해서 조절이 가능하고 이런 장점과 함께 시스템이 단순한 것도 하나의 특징으로 들수 있다. 그러나 여기에도 다음과 같은 문제점이 있었다.

\* 조선대학교 공과대학 기계설계공학과

\*\* 조선대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 조선대학교 공과대학 원자력공학과

1. 시험편의 전 영역에 걸쳐 변위를 구하는데에는 많은 측정점이 필요하여 무리한 시간과 노력을 필요로 한다.
2. 변위정보를 얻기 위해 간섭줄무늬를 이전처럼 눈에 의한 측정을 하게되면 정도가 저하된다.
3. 측정방법이 변위정보를 기록시킨 스펙클그램 위해서 빔을 상세히 조사시켜 평균변위가 간섭줄무늬의 간격으로부터 얻어지기 때문에 빔의 위치결정도 중요하지만 눈에 의한 측정은 한계점에 이른다.

이러한 문제점에 대응하여 본 연구에서는 Stepping Motor를 이용한 이차원 X-Y table과 Personal Computer를 조합하여 제어및 화상수록의 자동화를 이루어 앞에 열거한 문제점의 해결에 노력하였다. 본 자동화 시스템의 정도검증을 위해 유한요소법에 의한 이론치와 비교분석하였다.

## 2. 스펙클사진법

### 2.1 스펙클과 스펙클패턴

시험편의 반사면에 레이저광을 비추면 앞에서 열거한 간섭에 의해 물체의 각점에서 산란되어진 광이 Fig. 1과 같이 전방에 놓여진 스크린에 결상된 명암의 반점모양을 나타내는데 이것들은 서로 불규칙하지만 시간적으로는 정상적인 위상관계를 가지고 있다. 이를 스펙클이라고 한다.

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 렌즈를 사용하여 물체표면을 결상시켜 발생되는 스펙클패턴을 상계의 스펙클패턴이라 하고 이것은 물체의 각점과 상위의 각점이 일대일 대응하여 있고 산란이 물체의 미시적 형상에 의존하므로 특수한 표면처리 없이 물체면 위의 각점에 있어서 특징을 잡을수 있다.

### 2.2 기록계 및 해석계

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 스펙클사진법의 기록계는 상이 모아지는 점에 건판위를 두어 기록되도록 하였는데 카메라의 조사면을 촬영하는 것에 그치지 않고 물체에 의한 어떠한 형태모든 변위를 주어 그 전후의

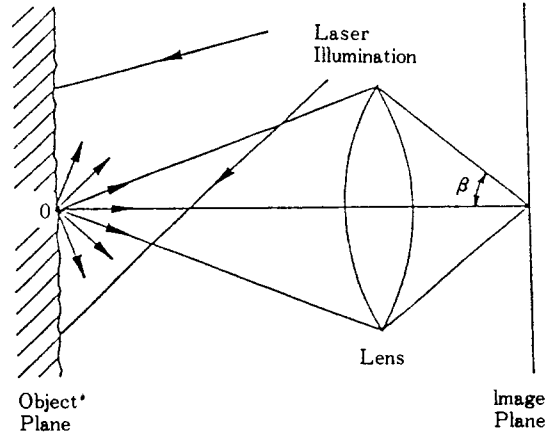


Fig. 1 像界의 스펙클패턴

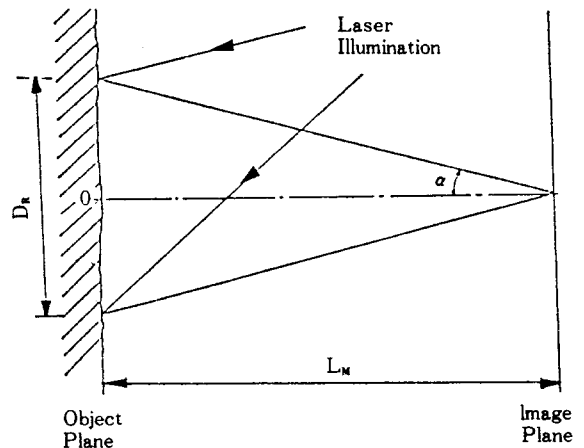


Fig. 2 回折界의 스펙클패턴

이중로광을 하면 물체면 상의 각점의 변위가 스펙클의 변위로서 건판위에 기록된다. 이렇게 만들어 진것을 Specklegram이라고 한다.

Fig. 4에서  $\overline{SS}_1 = \overline{SS}_2$  이라면  $S_1$ 과  $S_2$ 를 동시에 통과한 두개의 광 $\epsilon_1$ 과 $\epsilon_2$ 는 동일한 위상에 있다. 또, 그 크린이 이중슬릿에서 충분히 떨어져 있으면  $S_1$ 과  $S_2$ 로부터 나온 광의 진폭은 스크린의 임의의 점에서 같다고 보면 된다. 그리고  $r_1$ 과  $r_2$ 는 슬릿  $S_1$ 과  $S_2$ 에서 줄무늬의 임의의 점까지의 거리이다.

$$\epsilon_1 = A \sin \left( \omega t - \frac{2\pi r_1}{\lambda} \right) \quad (2-1)$$

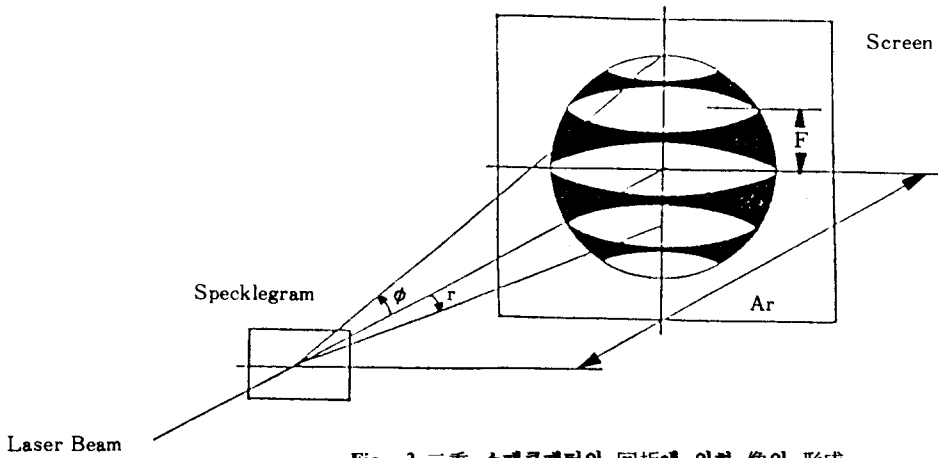


Fig. 3 二重 스펙클로그램의 회折에 의한 像의 形成

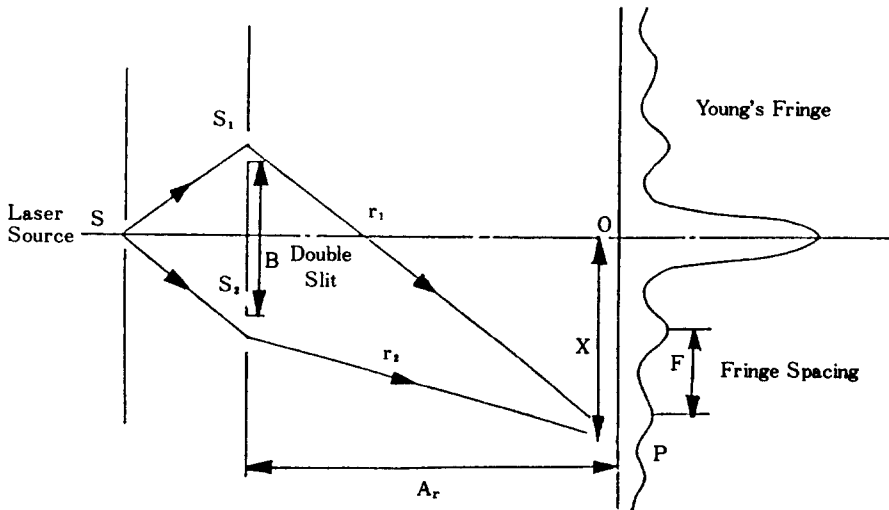


Fig. 4 二重 슬릿 스펙클에 의한 Young의 줄무늬의 형성

$$\epsilon_2 = A \sin\left(\omega t - \frac{2\pi r_2}{\lambda}\right)$$

이 두개의 광을 합성하면

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

$$= 2A \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} \sin\left(\omega t - \frac{\pi(r_1 + r_2)}{\lambda}\right) \quad (2-2)$$

합성진폭

$$X = \left| 2A \cos \frac{\pi(r_1 - r_2)}{\lambda} \right| \quad (2-3)$$

는  $m=1, 2, 3 \dots$ 로 할때  $\pi(r_1 - r_2)/\lambda = m\pi$ 에서 가장 진폭이 크고  $\pi(r_1 - r_2)/\lambda = (2m+1)\pi/2$ 에서는 0이다.

이러한 위치는 공간적으로 일정한 격자를 만든다. Fig. 4에서  $S_1$ 과  $S_2$ 면과 스크린과의 거리를  $A_r$ ,  $\overline{S_1 S_2} = B$ ,  $OP = X$ 로 하면

$$r_1^2 = A_r^2 + \left(x + \frac{B}{2}\right)^2 \quad (2-4)$$

$$r_2^2 = Ar^2 + \left(x - \frac{B}{2}\right)^2 \quad (2-5)$$

$$r_1^2 - r_2^2 = (r_1 - r_2)(r_1 + r_2) = 2Bx \quad (2-6)$$

$B < Ar$ ,  $X < Ar$ 라고 하면

따라서  $r_1 - r_2 = \frac{Bx}{Ar}$  로 성립된다.

$$\frac{Bx}{Ar} = m\lambda, \quad X = \frac{m\lambda Ar}{B} \text{----- 밝은선} \quad (2-7)$$

$$BX = \frac{(2m+1)\lambda}{2}, \quad X = \frac{(2m+1)Ar}{2B} \text{----- 어두운선} \quad (2-8)$$

그러므로 줄무늬 간격  $F$ 는

$$F = \frac{\lambda Ar}{B} \quad (2-9)$$

로 성립된다.

이와 같이 건판에 레이저 빔을 조사하면 변형전후의 스페클이  $S_1, S_2$ 의 역할로 줄무늬가 발생한다. 촬영 배율을  $M$ , 시험편의 표면에서 변형량을  $D$ 라 하면 스페클의 이동량  $B$ 는  $B = MD$ 로 된다. 이것을 (2-9)에 대입하면

$$F = \frac{\lambda Ar}{MD} \quad (2-10)$$

즉

$$D = \frac{\lambda Ar}{MF} \quad (2-11)$$

으로서 줄무늬간격  $F$ 를 구하여 빔지름내의 시험편의 변형량  $D$ 를 계산할수 있고, 줄무늬는 스페클의 이동방향에 대하여 직각으로 나타나기 때문에 줄무늬의 기울기를 측정하므로써 변위방향도 구할수 있다. 따라서 해석의 정도를 위해서는 스페클그램의 빔을 상세히 조사시켜 넓은 영역에 걸쳐 변위량을 측정할 필요가 있다.

### 3. 실험 방법

#### 3-1 시험편(Specimen)

시험편은 SUS 430으로 제작하였는데 제원은 폭 100mm, 높이 50mm, 두께 0.5mm이다. 두개의 상단 연결 부위는 Epoxy수지로 접착하여 시험편을 보울트로 고정하였고 하단부는 Epoxy수지로 접착하여 측정면의 경사및 면의변형이 발생하지 않도록 Ball Guide로서 연결하여 일축 자유단으로 하였다. 그러나 시험편을 인장시킬때 잔유응력(Residual Stress)의 영향

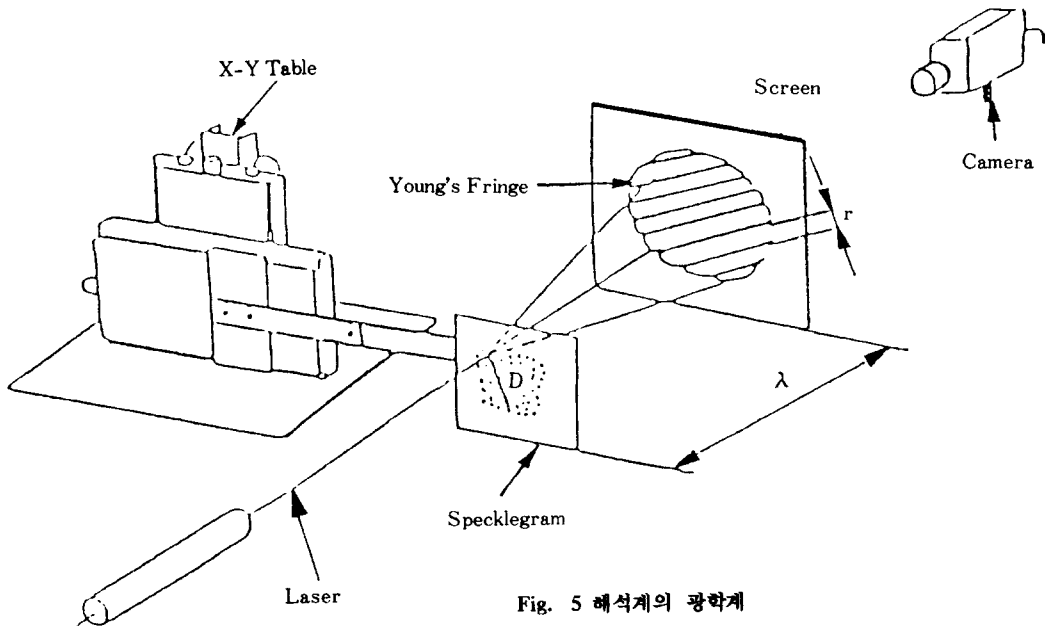


Fig. 5 해석계의 광학계

을 없애기 위하여 처음에 5kg으로 90초간 잡아당겨 초기화시키고 Argon CW Laser로 조사시켜 Scanning 한다음 200kg으로 90초간 잡아당겨 다시 Laser로 조사시켜 그때의 변형을 촬영하는 이중로광 (Double Exposure)을 하였다.

3-2 실험장치의 배치와 제원

CW 레이저로서는 출력 2W의 He-Ne 레이저와 결상렌즈(Sigma Lens : 초점거리 135mm, f-number 2.8)를 사용 촬영배율 1로서 이중로광하며, Specklegram으로 Agfa-Gevaert 10E56건판에 촬영기록하였다. 본 연구에 쓰인 레이저 장치의 규격은 다음과 같다.

- Ar 가스레이저 장치(일본 전기 GLS3200)
- 발전광파수 : 5145 A
- 발전 횡mode : Single mode
- 출력강도는 : 2w
- 빔확산 각도 :  $0.6 \times 10^{-3}$  rad (전각)
- 빔 직경 : 약 1.5mm $\Phi$

4. 화상해석 시스템

4.1 시스템개

이번 연구에서 이용한 화상해석 시스템계를 Fig. 6과 Photo. 1에 나타냈는데 이 시스템은 측정의 간편성과 정밀도를 위해서 이제까지 화상시스템에 스테레오로 나타낸 응용을 위해서 X-Y테이블을 조합시켜 퍼스널 컴퓨터와 화상처리용 모드(FDM-256)를 연결함으로써 측정의 자동화를 이루었다. Photo. 2와 같이 퍼스널 컴퓨터에 X-Y테이블의 컨트롤러를 연결시켜 스페클그램의 이동제어와 옵션보드에 의한 화상수목을 컴퓨터에 의해서 실행하였다. 이로써 변형신후의 각각의 데이터를 프로그램에 입력함으로써 간편의 임의 점에서 Young의 줄무늬를 자동으로 화상수목 할수 있게 되었다. 자동화 해석 시스템의 작동순서는 화상에 옵션보드를 끼워 퍼스널컴퓨터로 플로피 디스크에 데이터를 기록시켰다. 수록시킨 데이터는 Young의 줄무늬 해석 프로그램으로 사용이 가능하도록 변환을 한 이후에 대형계산기에 의해서 해석을 하였다.

4.2 수록방법

X-Y테이블의 X, Y축과 스페클그램 위에 주어진 시험편의 X, Y축이 서로 평행하도록 스페클그램을 테이

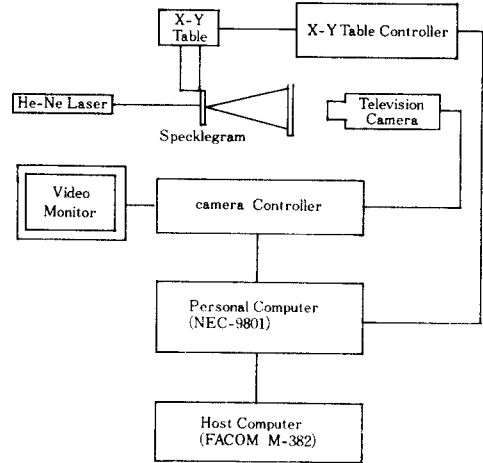


Fig. 6 畫像解析 시스템계

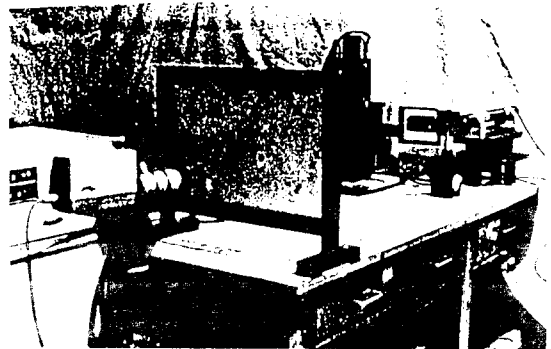


Photo. 1 畫像解析 시스템계

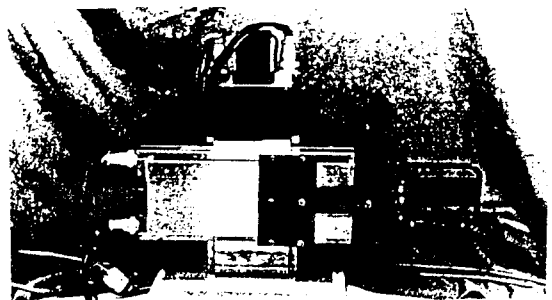


Photo. 2 이차원 X-Y 테이블 컨트롤러

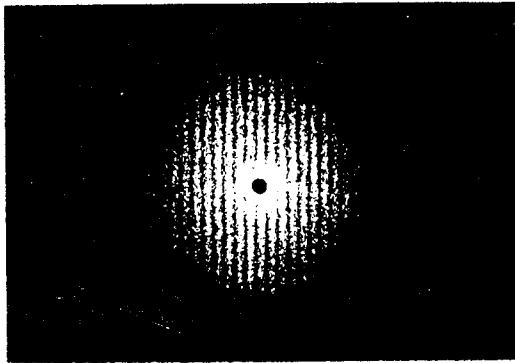


Photo. 3 Young의 줄무늬

블에 고정시켜 스펙클그램위의 임의의 점을 원점에 놓아 원점으로 부터의 좌표데이터를 입력하는것에 의해 X-Y테이블이 이동한다. 이때 X축, Y축의 Positioning accuracy는 각각 3.51%, 3.995%이며, 스테핑모터 사용시 구동에 해당하는 X-Y테이블의 운동거리는  $25 \times 62 \text{mm}$ 이고 테이블의 Positioning control은 Absolute이다. 반투명이 스크린위에 생기는 Young의 줄무늬를 스크린 후방의 비디오 카메라에 의하여 촬영하고 Option Board (FDM-256)를 끼워 줄무늬의 밝기를 0에서 63까지의 휘도로 A/D 변환시켜 각각 대응하는 밝기의 ASCII문자로 변환하여 플로피디스크에 수록한다. 촬영에 쓰인 카메라는 SONY 제의 AVC-1550 소형 비디오 카메라이고, 수록에는 NEC제 PC-9801과 옵션보드 (Option Board) FDM-256을 이용하였다. 화상의 해상도는  $256 \times 256$ 으로서 데이터량은 하나의 화면에 65280파트(Part)로 나뉜다.

#### 4.3 처리

디스크에 수록 되어진 화상데이터는 Character Code의 0에서63에 맞는 ASCII문자에 기록시켜 두고, 보드에 접속된 비디오 모니터에 의해 디스크로부터 화상을 재현할수 있었다. 그런데 커렉터 코드의 0에서31은 퍼스널 컴퓨터의 컨트롤러에 적합하지 않기 때문에 그대로의 상태에서는 데이터를 바르게 읽고 해석하는 것이 불가능하다. 이때문에 컨트롤코드

에 해당하는 부분을 겹치지 않도록 해두고 일반의 문자 코드로 고쳐서 이제까지의 해석 프로그램에 의한 Young의 줄무늬 해석을 했다. 수치 형태로 고치면 하나의 휘도를 나타내는데 문자코드에서는 1바이트 이겠지만 수치에서는 3바이트의 용량이 필요하며 전체에서는 데이터의 단락도 필요해서 데이터 양이 3.5배가 된다. 이것으로 부터 휘도의 정보를 나타낸 것은 문자코드를 이용하였다. 이 처리 속도는 MS-DOS의 Basic을 사용하였다.

### 5. Young의 줄무늬의 收錄 및 變位 解析

본 연구에서는 이제까지 촬영한 중앙에 균열이 있는 시험편의 스펙클 그래프에 레이저빔을 조사시켜 이로써 발생하는 영의 줄무늬로부터 시험편의 4분의 1영역에 있어서 90개의 변위를 구하였다.

#### 5.1 좌표계

본장에서는 Fig. 7과 같이 균열의 중앙에 기준점을 잡고 균열방향에 X축, 균열에 수직한 방향이 Y축을 잡았다. 따라서 시험편의 임의 점의 위치는 좌표(X, Y)로 나타낼수 있다.

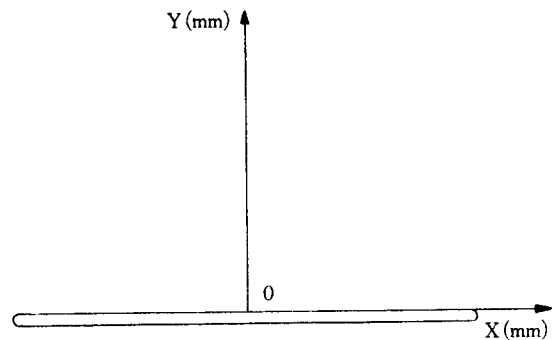


Fig. 7 균열판의 기준 좌표계

#### 5.2 측정점

시험편을 인장장치에 고정시키고 상단에 각각 4개의 점을 잡고 200kg으로 잡아 당겼을때 레이저 빔을 조사시켜 얻어진 스펙클그램을 사용하였다. Fig. 8에

표시한 것처럼 시험편의 4분의1에 해당하는 영역에 있어서 89개의 변위량과 변위를 측정하였다. X방향 변위량과 Y방향 변위량은 측정된 변위량의 cosine 성분과 sine 성분으로 구했다. 변위 기울기가 급할것으로 예상되었던 균열선 주변에서는 다른 부분보다 측정점을 많이 결정하였다.

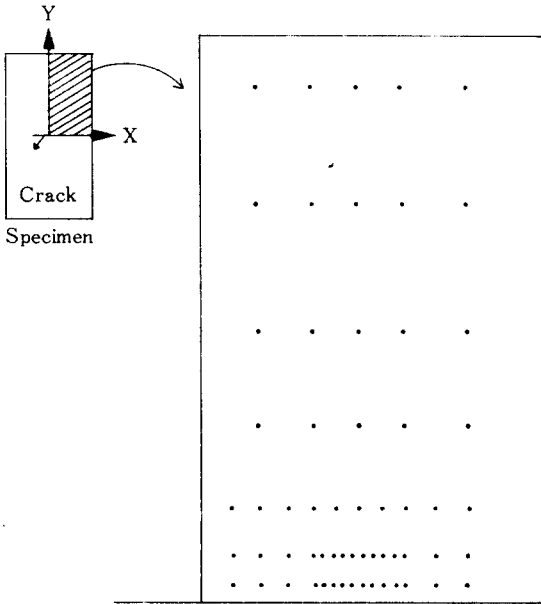


Fig. 8 균열판의 4분의 1 영역에서 측정점

5.3 화상해석

Young의 줄무늬의 해석에서는 본 연구실이 이미 개발한 화상해석 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램에 의해 줄무늬 간격및 변위 방향을 종래의 눈에 의한 측정과 비교해서 높은 정도의 측정이 행해졌다. 이제까지는 스크린 면과 촬영카메라의 렌즈거리를 스케일로서 측정을 했지만 이제부터는 마이크로미터 등으로 미리 변위량을 측정시킨 강체변위를 주어진 건판으로 사용하여 전보다 정보를 향상시켰다. 변위의 계산에서는 해석프로그램을 이용한 측정점의 변위각도와 TV라인수를 내고 기준건판의 실제 변위량과 TV라인수로부터 (4.2) 식을 사용하여 계산하였다.

F : TV라인수            A : 촬영면과의 거리  
 λ : 레이저의 파장      D : 변위량  
 S : 스케일팩터

$$\Delta D = \frac{\lambda Ar}{FS} \times 10^{-4} \quad (4-1)$$

측정에서 λ : 고정, A : 고정, S : 고정

결국 기준건판 보다 D<sub>0</sub>는 나누어져 있으므로 거기에 대응하는 F<sub>0</sub>를 구한다. 단, D<sub>0</sub>는 TV모니터 상에서 변위량이고, F<sub>0</sub>는 TV모니터에서 줄무늬 간격이다.

따라서

$$\Delta D = \frac{F_0}{F} \times \Delta D_0 \quad (4-2)$$

6. 변위, 변형률, 응력의 분포

6.1 해석요소

균열을 가진 판의 인장에 있어서는 변형률 기울기가 크게 변화되는 균열의 선단은 해석정도가 일반적으로 좋지않아 균열에 접한 자유변 근접의 면내응력 분포 및 변형률분포를 직접 구할 필요가 있으며 해석

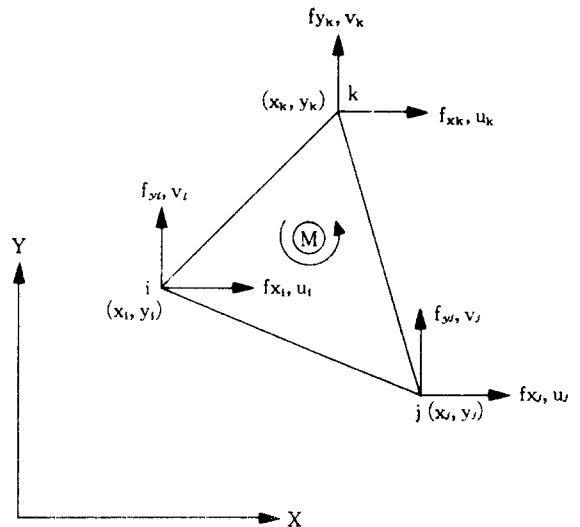


Fig. 9 삼각형의 절점력과 절점변위

에서는 면내요소로서 삼각형 요소를 사용하였다. 자유도는 그림 9에 나타난 바와 같다. Fig. 9에 표시되어진 대로 하나의 요소에는 3개의 절점력이 있고 각각에 2개씩의 자유도를 갖으므로 6자유도이다.

### 6.2 요소분할

해석에 있어서는 해법에 대해 일관성 있게 면내변형률 해석, 면내응력 해석의 요소분할양식을 동일하게 하였다. 균열주변의 요소분할은 주로 면내변형률의 해석정도에 따라서 결정 되어진다.

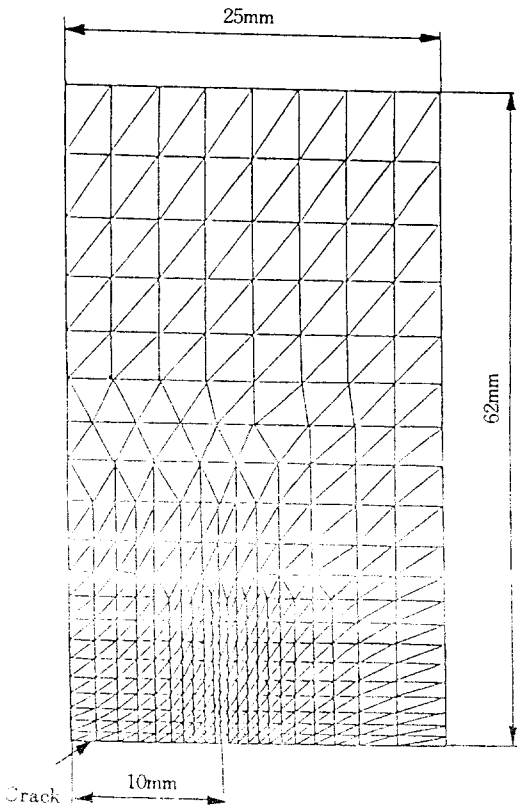


Fig. 10 시험편의 해석망

### 6.3 분할도의 작성

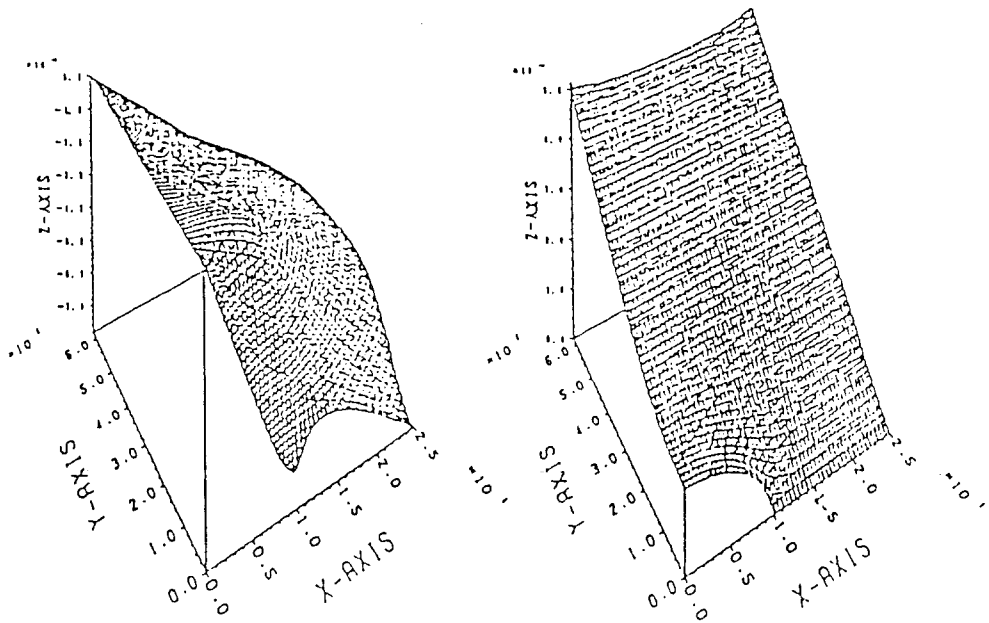
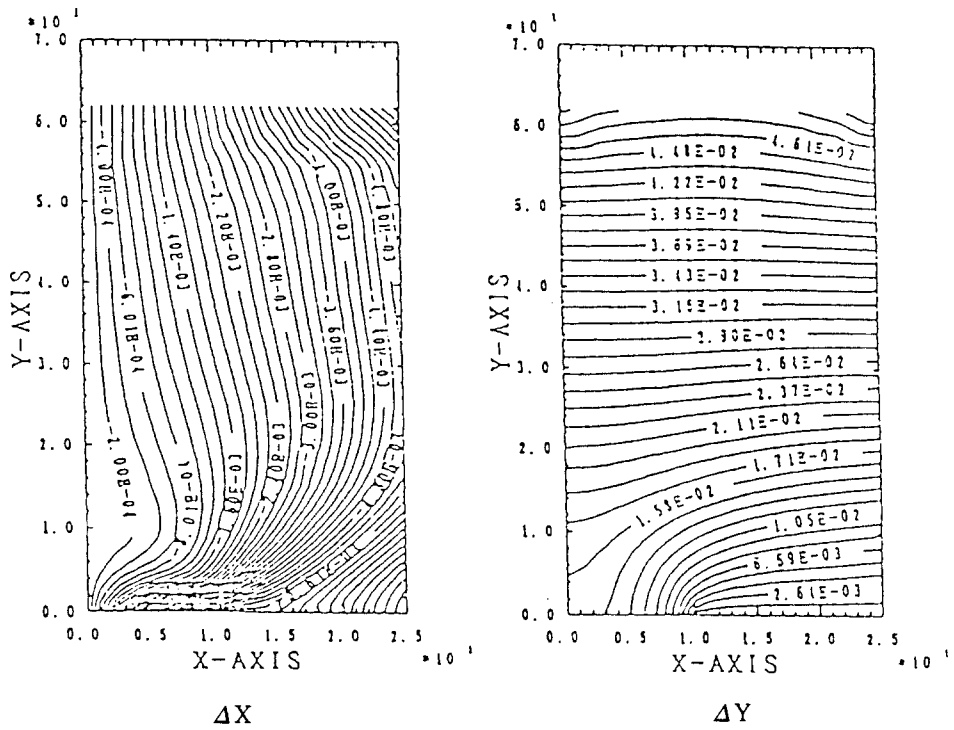
측정치로부터 X방향 및 Y방향의 변위분포를 구하고 미소변형률 요소에 의하여 유한요소법의 이론변위량 대신에 실험으로부터 얻어지는 변위량을 유한요소법

의 이론변위량 대신에 실험으로부터 얻어지는 변위량을 대입하고 그 이후의 계산은 유한요소법에 의해서 변형률분포 및 응력분포를 구한다. 측정점은 89점이 있는데 요소수는 140개 있고 변형률과 응력의 계산결과 는 요소수와 같게된다. 또 미소변형률요소에서의 유한요소법으로부터 얻어지는 이론해석치와 비교도 했다. 이론치는 격자점의 수를 340개, 요소수는 610 개로서 계산을 했다. 측정으로부터 얻어지는 변위량은 강제이동과 강제회전에 의한 변위량과 비틀림에 의한 변위량을 포함시킨 값으로 되어 있기 때문에 측정 영역의 선단이되는 점을 X방향 및 Y방향의 기준으로 한 상대변위에 의해서 시험편의 변위분포를 구하고 강제이동의 영향을 다소 제거한 변형률과 응력은 실험치 및 이론치 모두 하나씩 요소의 중심위치 값으로 계산하고 있다. 또, 미소변형률 요소를 이용하므로 요소내에서 응력, 변형률은 일정하게 된다.

### 6.4 결과 및 고찰

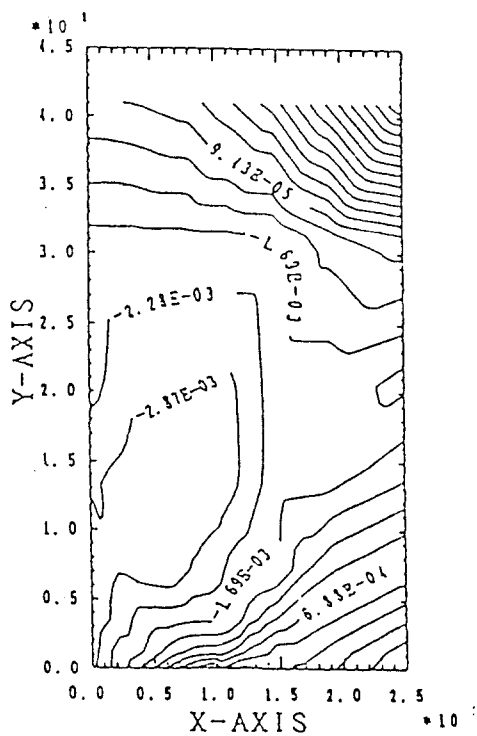
다음에 게재한 Fig. 11에서 Fig. 13까지의 그림에서 변위, 응력, 변형률에 관한 분포경향을 실험치와 이론치로 비교하면 변위에서는, Y방향에서 균열의 선단에 실험치와 이론치의 분포경향이 비슷했지만, X방향에서는 전체적으로 형상에 차이가 있었고, 변형률과 응력에서는 실험측의 요소가 빈약하기 때문에 분포경향에 꽤 혼란이 있었다. Y방향의 변형률, 응력, 집단 변형률, 집단응력에서는 분포 경향은 비슷하지만 고응력 분에 근접한 부분에서는 상당한 차이를 보였다. 그리고, X방향 변형률, X방향 응력에 대해서는 변위에서처럼 상당한 차이가 나타나기 때문에 형상이 달랐다. 이러한 원인으로서는 Y방향의 변형률, 응력에 관해서 시험편의 인장장치에 대한 부착방법에 문제가 있었던 것은 아닌가고 생각된다. X방향에 대해서는 시험편을 잡아 강제회전과 강제이동, 비틀림의 영향을 강하게 받은 것으로 생각되며 이점에 관해서는 구체적인 개선이 필요하리라고 생각되는데 인장시험을 할때에 시험편장치에 고정하는 도구를 보강하면 개선이 가능하리라 생각된다. 따라서 변위, 응력, 변형률의 결과치에서 실험치와 이론치가 다소 차이가 있었던것은 시



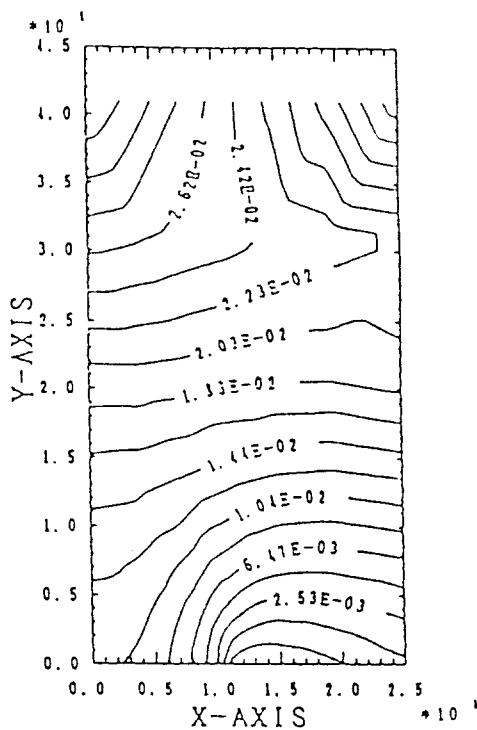


(이론치)

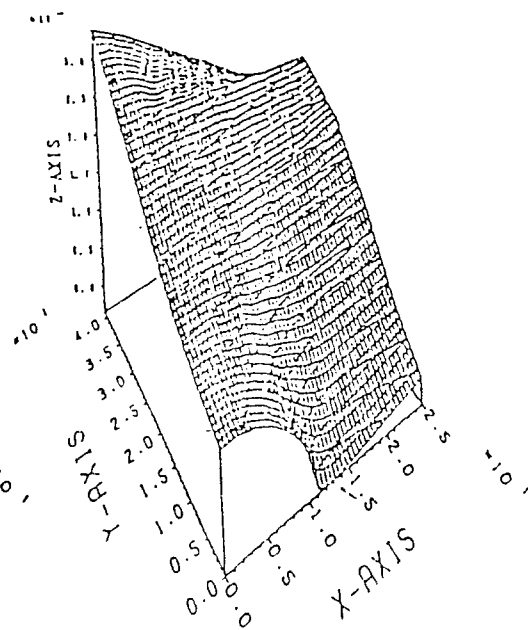
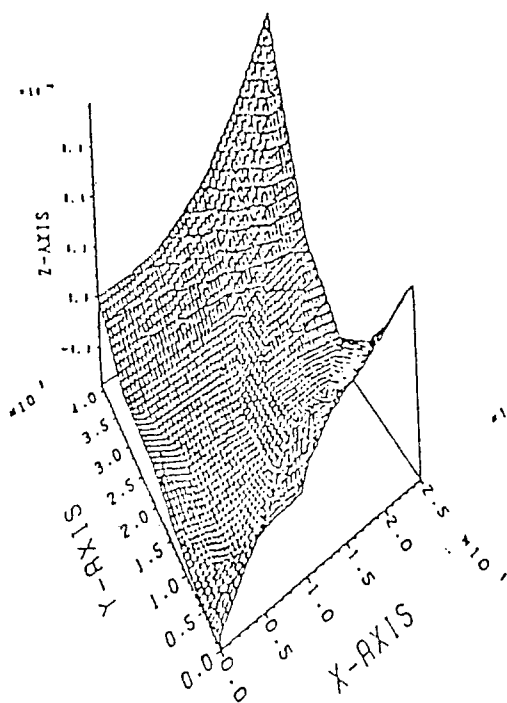
Fig. 11 실험치와 이론치의 변위분포 비교 (하중 200)



$\Delta X$



$\Delta Y$



(실험치)

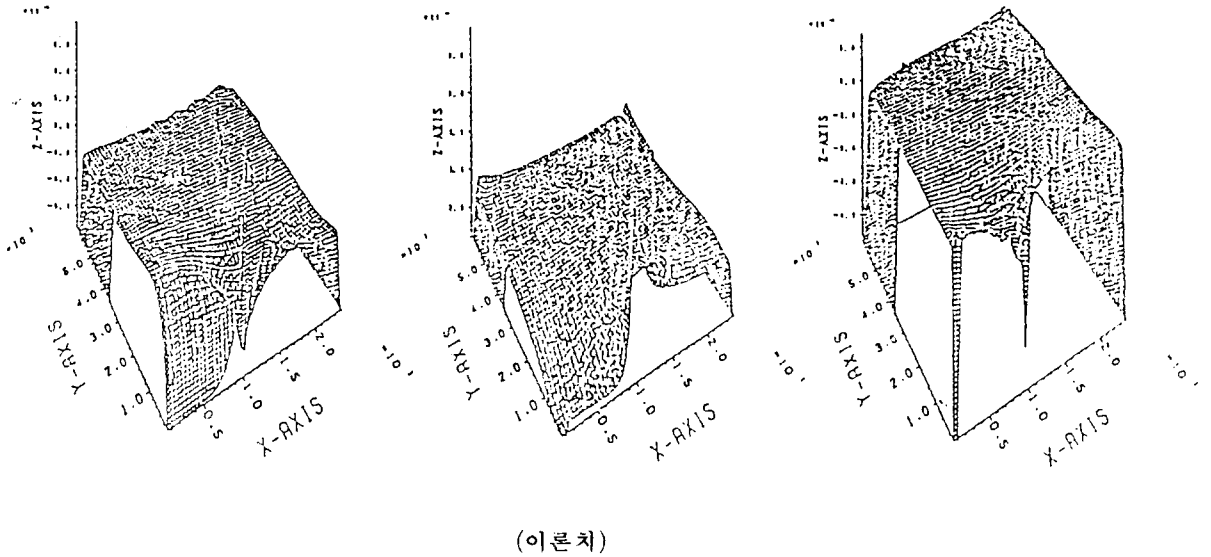
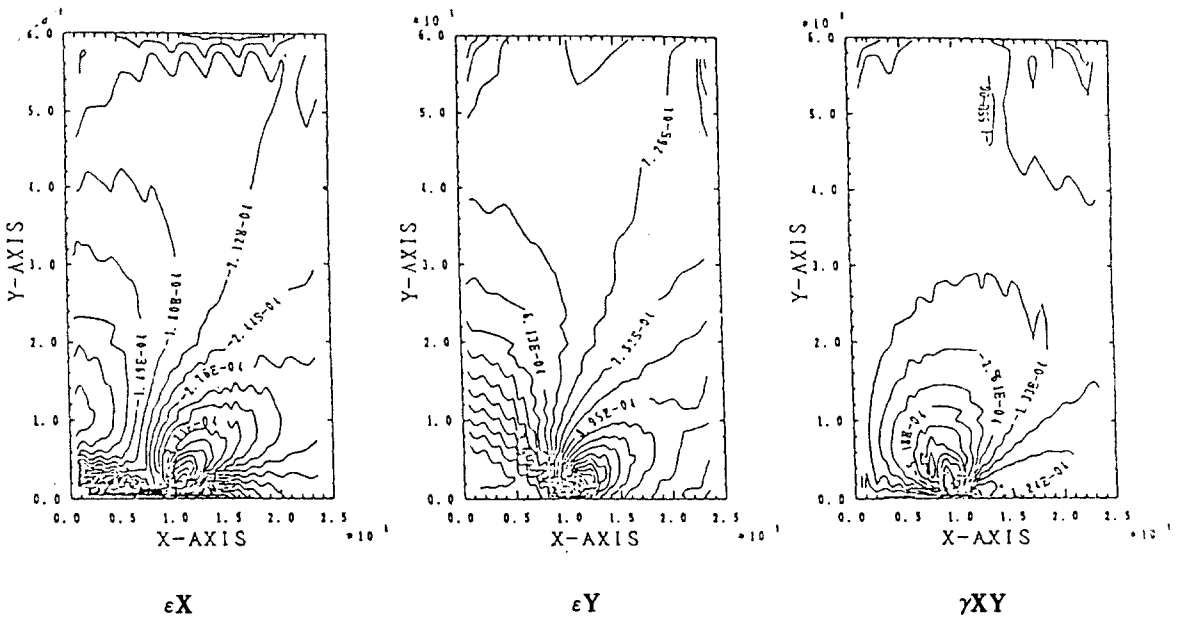
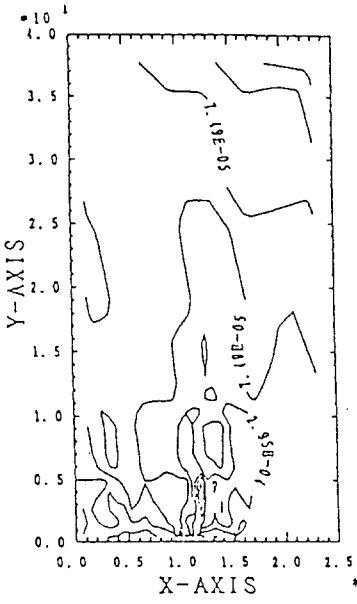
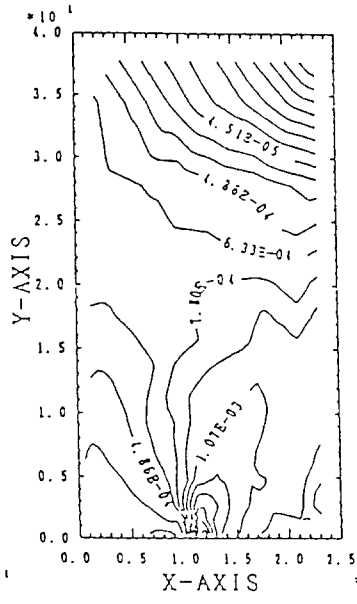


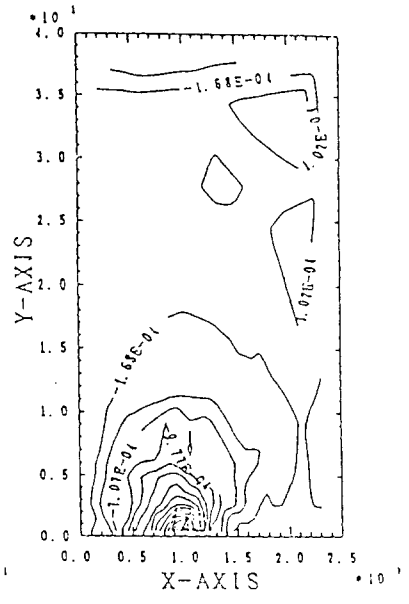
Fig. 12 실험치와 이론치의 변형률 분포 비교



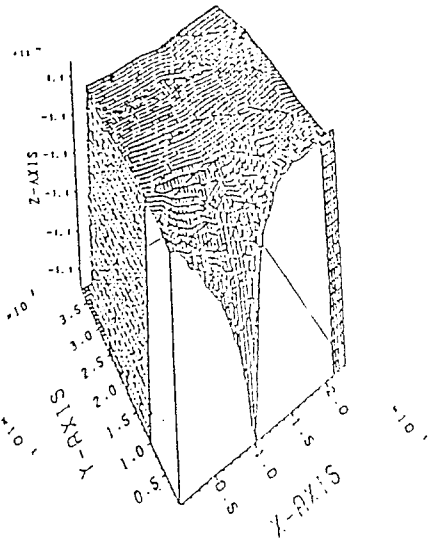
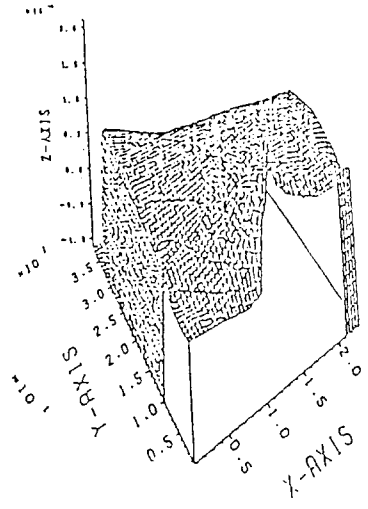
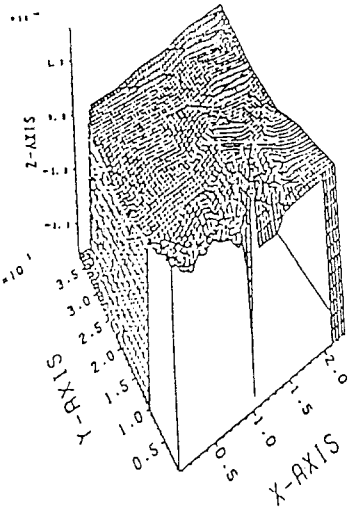
$eX$



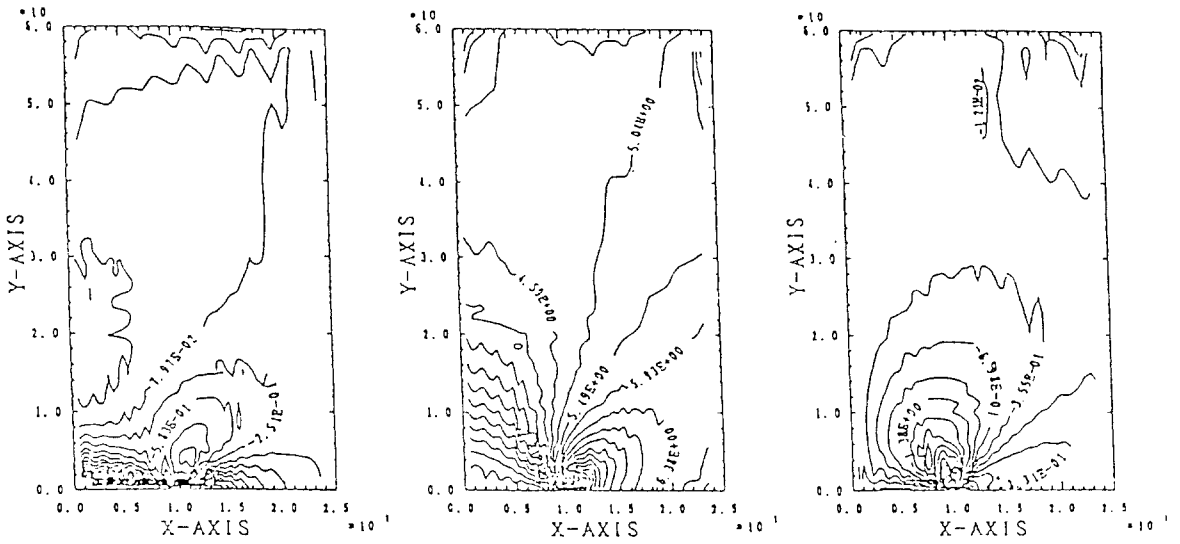
$eY$



$\gamma_{XY}$



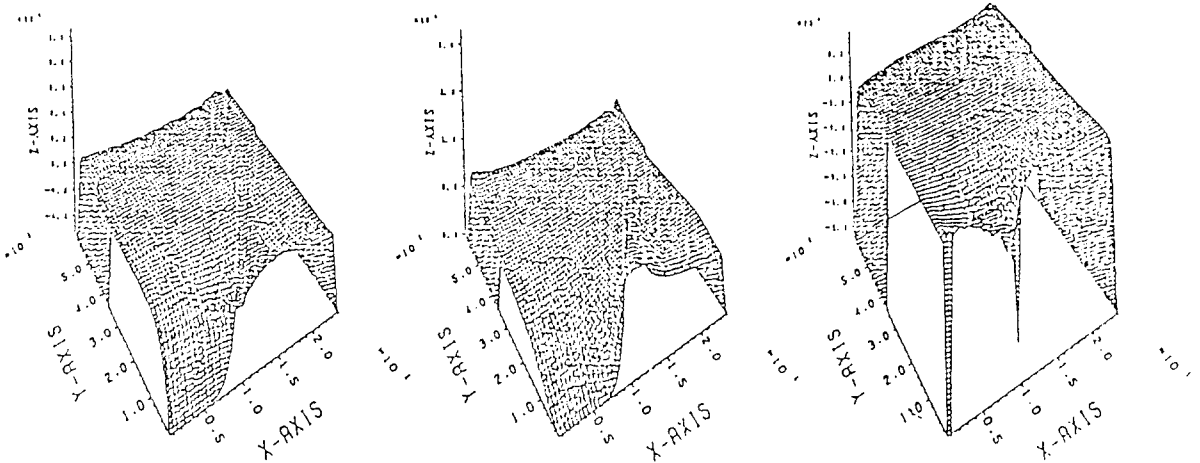
(실험치)



$\sigma_X$

$\sigma_Y$

$\tau_{XY}$



(이론치)

Fig. 13 실험치와 이론치의 응력분포 비교 (하중 200)

스텝의 문제점 보다는 차라리 시험편의 설치방법 또는 인장장치의 고정에 대한 정확도가 크게 작용한 것으로 사료된다.

## 7. 結 論

본 연구에서는 레이저 스펙클 사진법의 자동해석을 위하여 중앙에 균열을 준 얇은 박판을 인장시험하여 스트레인, 스트레스를 유한요소법에 의한 이론계산과 비교연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서는 쓰인 자동해석 시스템에서 스펙클그램의 이동은 스테핑모터에 의한 X-Y테이블의 이동에 의해 측정되었기 때문에 종래의 시스템과 비교하여 화상해석 프로그램의 변위 측정에 있어서 측정정도가 아주 향상되었음을 알 수 있었다.
2. 실험치와 이론치에 대한 오차의 원인을 분석한 결과 이론계산에서 다루어진 유한 요소법은 미소 변형률요소에서 변형률과 응력이 일정다는 조건하에서 계산하였고 특히 하나의 요소를 축소시켜 격자점과 요소수를 증가시키면 따라 정확한 분포를 얻게 되지만 실제 이론계산에서는 정도의 향상을 위해서 절점을 증가시키면 해석에 필요한 시간이 많이 걸리므로 적절한 요소분배를 해야겠고, 이와 더불어 오차의 정도향상을 위하여 실험치와 이론치에 대한 적절한 보완법의 개발이 필요하다고 생각하는 바이다.

後記 본 논문은 1990조선대학교 교비 학술연구비 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 參考文獻

1. 金庚錫：“連續波레이저 스펙클寫眞法에 의한面内變位測定에 관한研究”，韓國非破壞檢學會會志，Vol. 10, pp. 47-55, 1990.
2. D. C. O'shea, et. al, Introduction to lasers and their applications, Chap. 2, Addison-Wesely, 1978.
3. 角誠之助, 山崎正秀, 室園昌彦, 金庚錫：스펙클크호트그래피와畫像處理による面内變位計測, 九州大工學集報, 60 (2), pp. 201-206, 1987
4. R. K. Erf：“Application of laser speckle to measurement”, laser application, Vol. 4, Academic Press, 1980.
5. 角誠之助：“構造と材料強度のレボザ應用計測”，日本機械學會志，第82卷，第733號，pp. 1320-1325, 1979.
3. 山口一郎：“스펙클寫眞의自動解析裝置의開發と應用”，第15回ひずみ測定講演集.
7. F. P. Chiang：A new three dimensional strain analysis technique by scattered-light speckle interferometry pp. 249-262 Cambridge Univ. Press, 1976.
8. Luxmoore, A. R：“Application of the telecentric principle in optocale strain measurement”，Proc. Conf. Recent advances in stress analysis, London, March 1968, published by Roy. Aero Soc.