

# 전자 스페클 간섭법과 유한요소법을 이용한 면내변형의 측정에 관한 연구

## A Study on the Measurement of In-plane Deformations by using Electronic Speckle Pattern Interferometry and Finite Element Method

강형수\*, 조기현\*\*, 김홍석\*\*\*, 정형길\*\*\*\*

Hyung-Soo Kang, Ki-Hyon Cho, Hong-suk Kim, Hyung-kil chung\*\*\*\*

### <Abstract>

In-plane ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)was devised to measure in-plane deformation and rotation of a specimen with laser in this study.The conventional measuring methods of surface deformations such as the strain gauge have many demerits because they are contact and point-to-point measuring ones. But that ESPI is noncontact, nondestructive and whole field measuring method can overcome previous disadvantages. We used ESPI which is sensitive to in-plane displacement for measuring in-plane deformations of a disk. First of all, the system calibration was done due to an in-plane rotation before getting deformations of a disk. Finally we showed good agreement between theexperiment results and those of the FEA(Finit Element Analysis).

**Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry, Interference Fringe, Finite Element Method**

### 1. 서 론

홀로그래픽간섭법(Holographic interferometry)<sup>(1),(2)</sup>을 이용한 측정 방법은 광학적으로 거친 측정 대상 표면 때문에 측정 민감도가 대단히 우수하고, 비접촉식으로 검사 대상에 영향을 주지 않으며 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분의 전 영역이 측정 가능하다는 장점을 갖게 되었다. 그러나 홀로그래피 간섭법의 느리고 복잡한 기록 및 재생 과정은 현재 홀로그래피 간섭법을 이용함에 있어

하나의 난점으로 작용하고 있으며, 특히 실시간 측정이 요구되는 산업 현장은 이러한 단점 때문에 홀로그래피 간섭법의 이용이 매우 힘든 실정이다.

그러므로 홀로그래피 간섭법의 장점들을 수용하며, 동시에 그의 단점을 보완하는 신속한 비디오 시스템의 사용이 제안되었는데 이러한 간섭 시스템을 전자 스페클 패턴 간섭계 (electronic speckle pattern interferometry, ESPI)<sup>(3),(4),(5)</sup>라 한다. ESPI는 측정 물체의 변형 정보를 갖고 있는 간섭무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 사

\* 경북도립 경도대학 차량기계학과 조교수

\*\* 전주공업대학 기계과 교수

\*\*\* 제주산업정보대학 교수

\*\*\*\* 경북도립 경도대학 차량기계학과 강사



용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 대단히 용이하며, 현장 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다 이러한 ESPI가 현장에 보다 적합하게 적용되기 위해서는 외란에 덜 민감한 면내 변형 측정 ESPI가 적합하다.

이에 본 연구는 위 실험 기법들의 단점을 보완함과 동시에 관측 범위가 좀더 넓고 원거리 검사가 가능한 레이저 계측법의 일종인 ESPI를 이용하여 측방향으로 하중이 가해진 원형 구멍과 홈이 있는 시편의 면내 변형을 실시간으로 측정하였으며 본 실험을 수행하기 전 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS<sup>(6)</sup>를 이용하여 실험 결과를 미리 예측해 보았다. 실제 실험에서는 변형의 요철 정보를 알기 위해서 위상이동법(phase shifting method)<sup>(7),(8)</sup>을 수행할 수 있도록 레이저빔의 위상을 이동시킬 수 있는 압전형 변환기(piezo-electric transducer, PZT)를 간섭계 내에 구성하여 물체의 변형 정보를 나타내는 위상도(phasemap)를 얻고 화상처리법(image processing method)을 이용하여 전체 변위의 정량적인 해석을 수행하였다.

## 2. 면내 변형 스펙클 간섭계

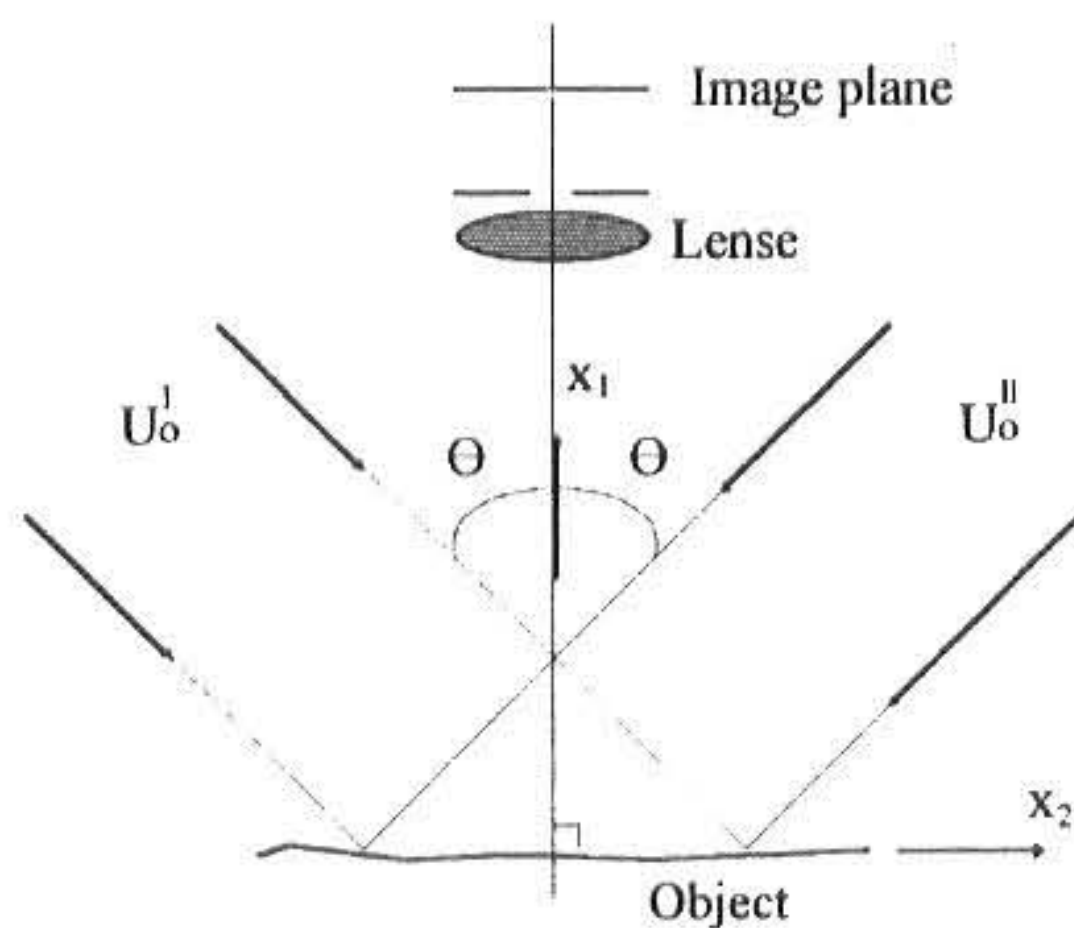


Fig. 1 The optical arrangement of laser interferometer for measuring in-plane displacement

ESPI 장치는 사용 목적에 따라 간섭계의 구성이 달라지는데 크게 면외 변위에 민감한 ESPI와 면내 변위에 민감한 ESPI 두 가지가 존재한다. 본 연구에서는 면내 변형을 측정하기 위하여 면내 변위에 민감한 In-plane ESPI를 구성하여 실험하였다. 간섭계의 구성도는

Fig. 1과 같다.

여기에서 물체는  $x_2, x_3$  평면에 놓여 있고 물체면에 수직인 방향과 이루는 각의 크기가  $\theta$ 이며 방향이 반대인 두 평면 파면  $U_0'$ 과  $U_0''$ 이 물체에 조사되고 있다. 변위  $d$ 에 의한 두 빔의 상대적인 위상차는  $x_2$ -축에서 아래의 식과 같다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (1)$$

여기에서

$\lambda$  : 광원인 레이저의 파장

$d$  :  $x_2$ -방향의 변위. 즉, 면내 변위

$\theta$  : 레이저의 입사각

또한 위상차  $\Delta\phi$ 는 스펙클 상관 계수에 의하여 아래의 식과 같이 된다.

$$\Delta\phi = 2N\pi \quad (2)$$

여기에서

$N$  : 간섭무늬 차수

식 (1)을 식(2)에 대입해 보면, 간섭무늬 차수에 비례하는 면내 변위의 상관식이 성립한다.

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (3)$$

그러므로, 이 식을 토대로 측정하고자 하는 물체의 면내 변위를 결정할 수 있다.

## 3. 위상 이동법

위상 이동법은 위상 이동 장치인 PZT와 화상처리 시스템을 사용하여 물체의 변형에 대한 정량적인 정보를 추출하고 변형의 정량화를 자동적으로 수행하기 위해 실시하는 방법이다.

변형에 대한 정보를 알고자 하는 물체의 변형 전과 변형 후에 물체에서 산란되어 나오는 파의 복소 진폭에 따른 빛의 세기 즉, 간섭무늬 패턴은 다음 식과 같다.



$$I_i(x) = I_a(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \alpha_i]\}$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

여기에서

$I_a(x)$  : 빛의 평균 세기

$m(x)$  : 간섭무늬 대비값

$\Delta\phi(x)$  : 두 파의 위상차 즉,  $\phi_2 - \phi_1$

$\alpha_i$  : 부가되는 상호 위상값

위의 (4)식에서 우리가 알고자 하는 것은 변형 전과 후의 두 파의 위상차 즉, 변형에 의한 간섭위상  $\Delta\phi(x)$  이다. 이 간섭위상을 구하기 위하여 간섭계내의 두 물체빔 중의 하나에 PZT를 설치하여  $\alpha_i$  를  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  씩 위상 이동한다. 이렇게 4번의 위상 이동을 실시함으로써 다음과 같은 상대적인 위상차를 지닌 4개의 식으로 표현되는 상을 만들 수 있다.

$$I_1(x) = I_a(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x)]\} \quad (5)$$

$$I_2(x) = I_a(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \pi/2]\} \quad (6)$$

$$I_3(x) = I_a(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + \pi]\} \quad (7)$$

$$I_4(x) = I_a(x)\{1 + m(x)\cos[\Delta\phi(x) + 3\pi/2]\} \quad (8)$$

위의 4개의 연립방정식을 풀면 변형에 의한 위상차  $\Delta\phi(x)$  를 구할 수 있는데 그 최종식은 다음과 같다.

$$\Delta\phi(x) = \tan^{-1}\left[\frac{I_4(x) - I_2(x)}{I_1(x) - I_3(x)}\right] \quad (9)$$

이러한 기법을 4-프레임 위상 이동법이라 하며 변위를 나타내는 간섭무늬는 이러한 위상 정보를 포함하고 있다. 이렇게 4개의 간섭무늬 상을 받아 만든 상은  $2\pi$  씩 나누어진 계단형 위상지도인 불연속 위상도를 나타내게 된다. 이 위상도를 위상펼침(Unwrapping)<sup>(8)</sup> 알고리즘을 이용하여  $2\pi$  씩 나누어진 부분을 이어주고, 변위정보를 담고 있는 위상펼침도를 구할 수 있게 된다.

#### 4. 유한요소해석 및 결과

ESPI를 이용한 실험에 앞서 실험에서 나온 측정 결과를 어느 정도 유추하고 비교하기 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석 시뮬레이션을 시행하였다. 실험결과에 대한 형평성 있는 이론적 검증의 유추를 위하여 실제 실험에서의 환경과 동일한 조건을 주었다. 본 연구에서는 반지름이 8.7cm이고 두께가 0.95cm인 알루미늄 합금 2014-T6 원판의 축방향에 하중을 가하는 것과 원형구멍이 있는 시편과 홈이 있는 시편을 축방향으로 인장하는 것을 근거로 하여 시뮬레이션을 실시하였다.

유한요소해석의 비선형적 응답을 얻지 않도록 하기 위해서 하중의 작용점 근처를 제외한 응력의 분포는 하중 작용의 실제 형태와는 무관하다고 한 Saint-Venant의 원리를 해석에 적용하였다.

Fig. 2, 3은 실제 실험 조건과 좀더 가깝도록 하기 위하여 3차원으로 모델 해석을 한 원판의 축방향과 횡방향을 시뮬레이션 한 것으로 유한요소해석에 의해 도출된 변형분포를 변위의 단계별인 등고선 형상으로 나타낸 것이다. Fig. 2의 축방향의 변형 결과는 실제 In-plane ESPI로 실험한 간섭무늬의 형상과 잘 일치함을 실험 결과에 의해 알 수 있고, Fig. 3은 실제 실험에서 횡방향으로 새롭게 ESPI를 구성해야만 그 변형분포를 알 수 있는데 반하여 유한요소법에 의하여 그 결과를 쉽게 유추할 수 있음을 보여준 것이다.

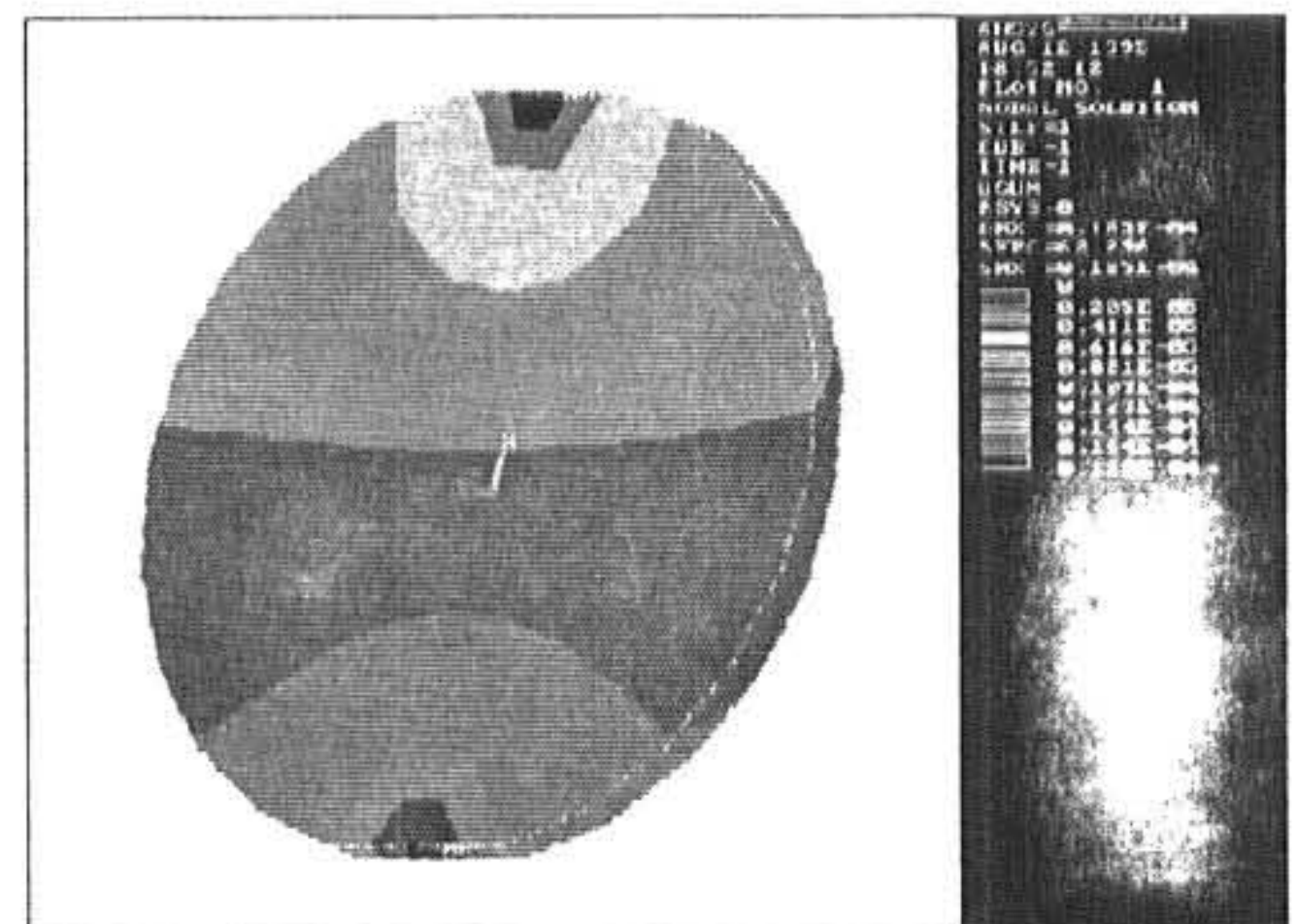


Fig. 2 The axial displacements of disk for 3-D analysis



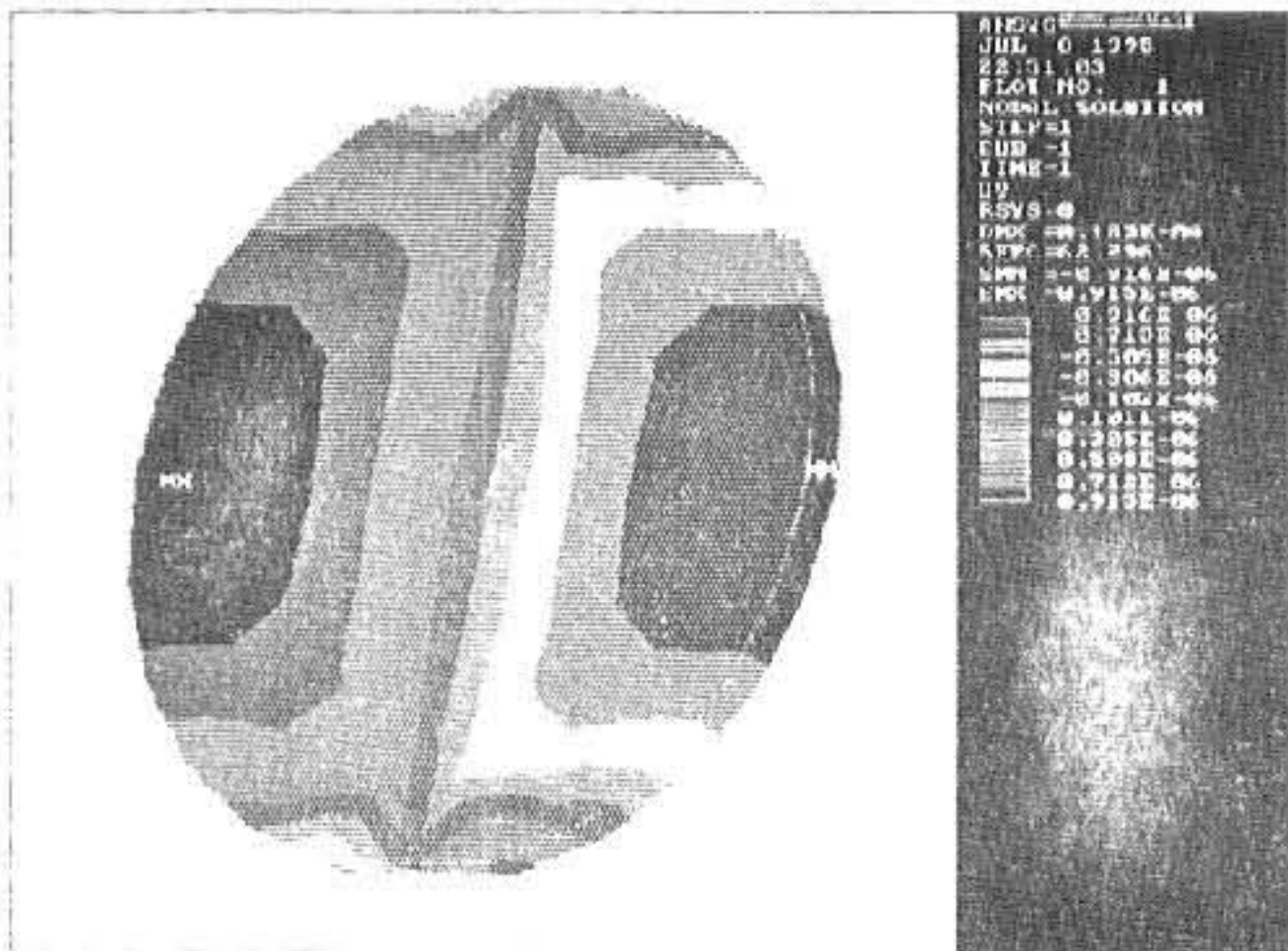
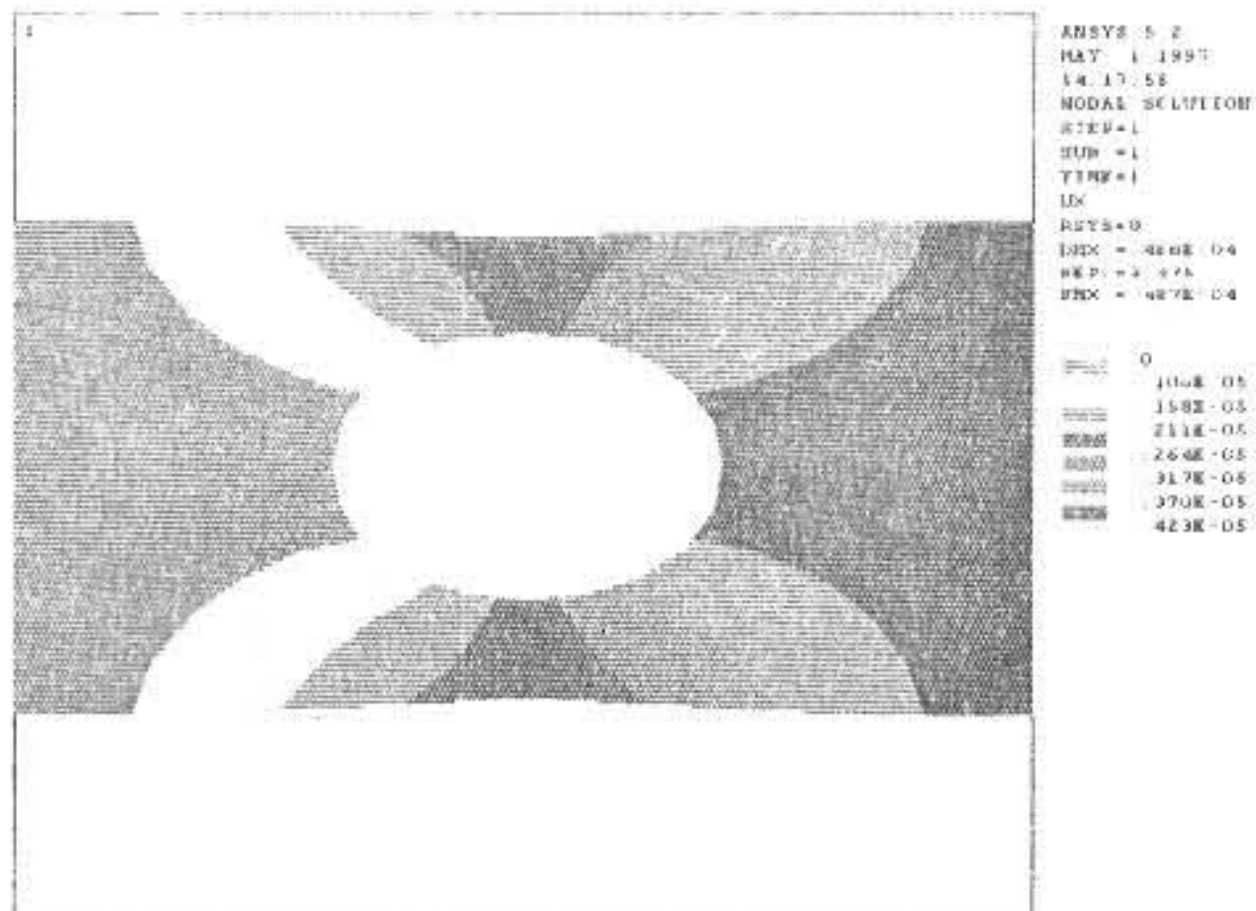
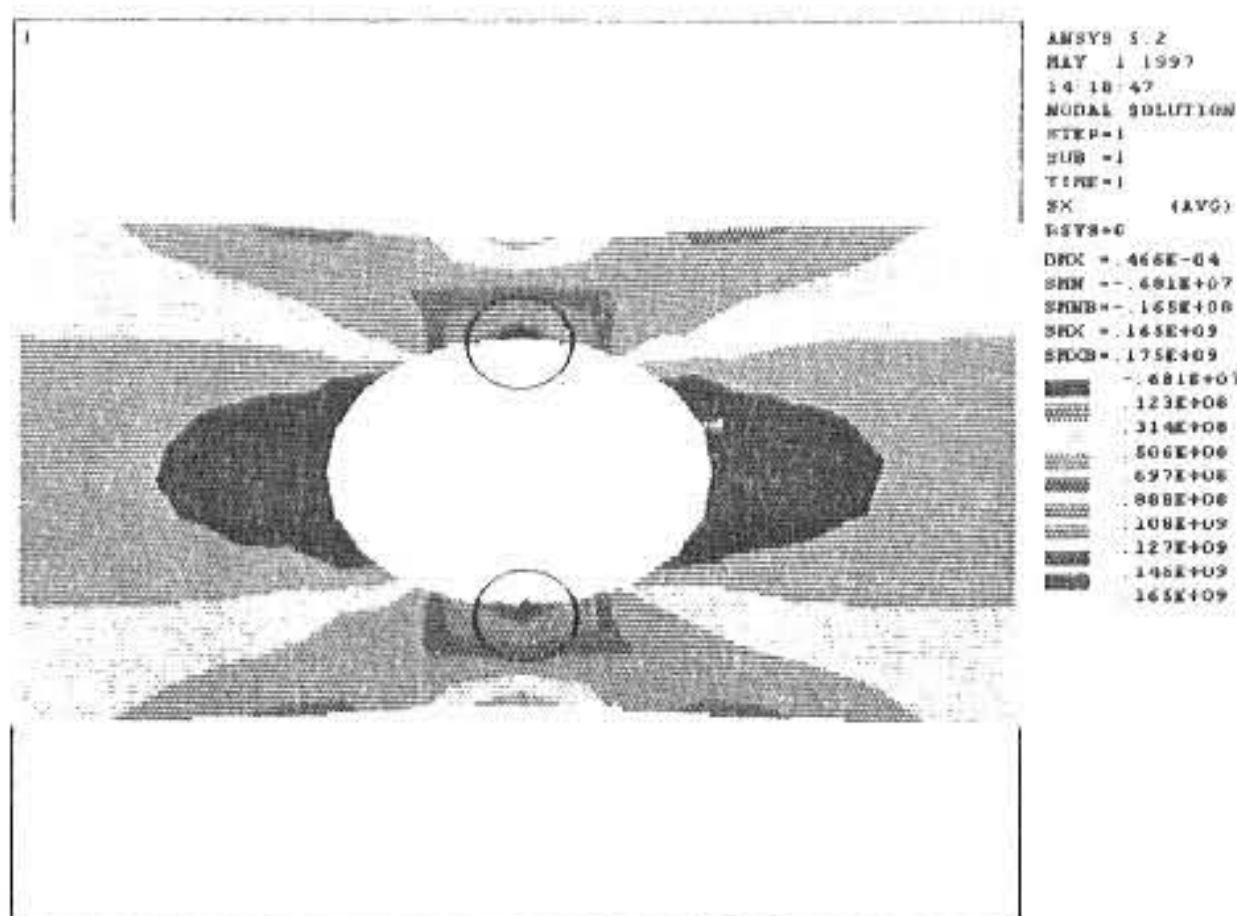


Fig.3 The lateral displacements of disk for 3-D analysis



(a) Distribution of in-plane displacement



(b) Distribution of in-plane stress

Fig. 4 (a) The distribution of in-plane displacement and (b) the distribution of in-plane stress with stress concentration around a hole in a specimen by finite element analysis

Fig. 4는 원형 구멍이 있는 시편의 면내 변형 결과, 즉 하중이 가해진 영역 주변에서 시편 표면 위에 위치의 함수인 축 방향 변위와 그에 따른 응력 분포의 그림이다. Fig. 4의 (b)를 보면 인장 응력이 가해질 때 구멍의 상단과 하단에서 높은 국부적 응력이 존재하는 응력집중현상이 존재함을 알 수 있다. 시편에 가해진 하중은 3.5kPa이며, 그에 따른 최대 변위는 4.23 $\mu$ m이다.

### 5. 실험 결과 및 고찰

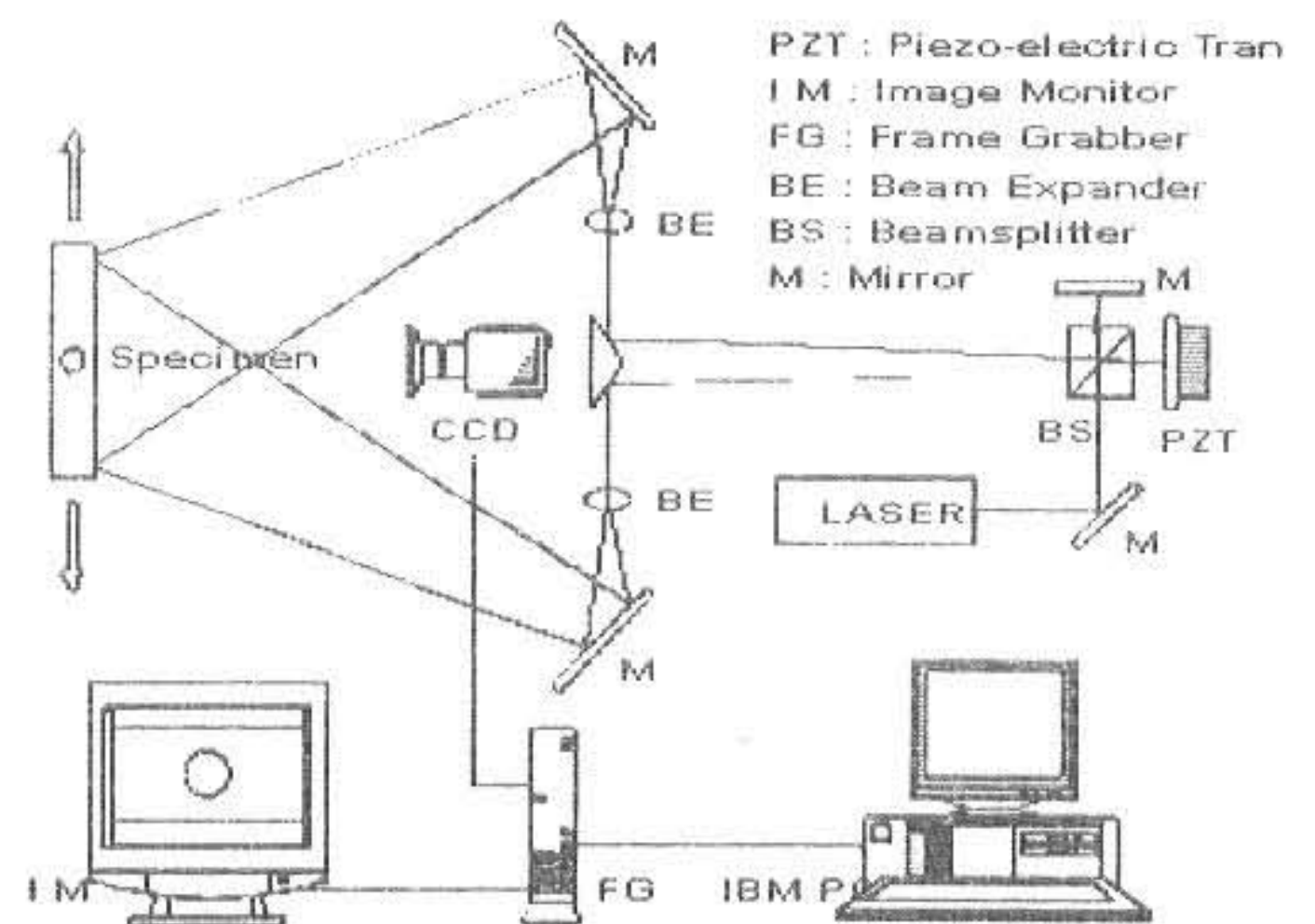


Fig. 5 Schematic of the laser interferometer used in the ESPI and image acquisition system

Fig. 5는 실험에 사용되어진 ESPI와 화상 획득 및 처리 시스템의 구성도이다. 그림을 보면 위상이동법을 수행하기 위하여 PZT에 일정 크기로 전압을 주어 각각의 화상이 일정한 위상차를 지닐 수 있도록 PZT driver를 컴퓨터와 연결하여 자동으로 위상을 맞추어 줄 수 있도록 구성하였다. 이 시스템에 사용된 레이저는 파장이 532nm인 CW Nd:YAG 2nd Harmonic 레이저이며 시편의 변형으로 인하여 측정된 간섭무늬는 CCD 카메라를 통해 그 상을 획득할 수 있도록 구성되어 있다. CCD는 512 $\times$ 512 화소로 이루어진 단색 비디오 카메라를 사용하고 있으며, 최적의 간섭무늬 계측은 화소의 밝기 값이 포화 상태에 가까울 때 이루어졌다.

Fig. 6은 축 방향으로 하중을 가할 때 원판이 이동하여 이동한 변위량이 간섭무늬의 외란으로 작용하지 않도록 원판에 500kg의 구속을



가하였다. 그런 다음 200kg의 하중을 원판의 축방향으로 가했을 때 발생한 변형전과 후의 상을 실시간으로 감산 처리해서 출력한 원판의 위상도를 나타낸 것이다. 이 위상도는 위상 펼침(Unwrapping)을 통하여 불연속인 부분을 이어주어야 하는데 이 위상도를 펼친 그림이 Fig. 7이며, 이 위상 펼침을 3차원 도면으로 변형량을 정량화한 것이 Fig. 8이다.

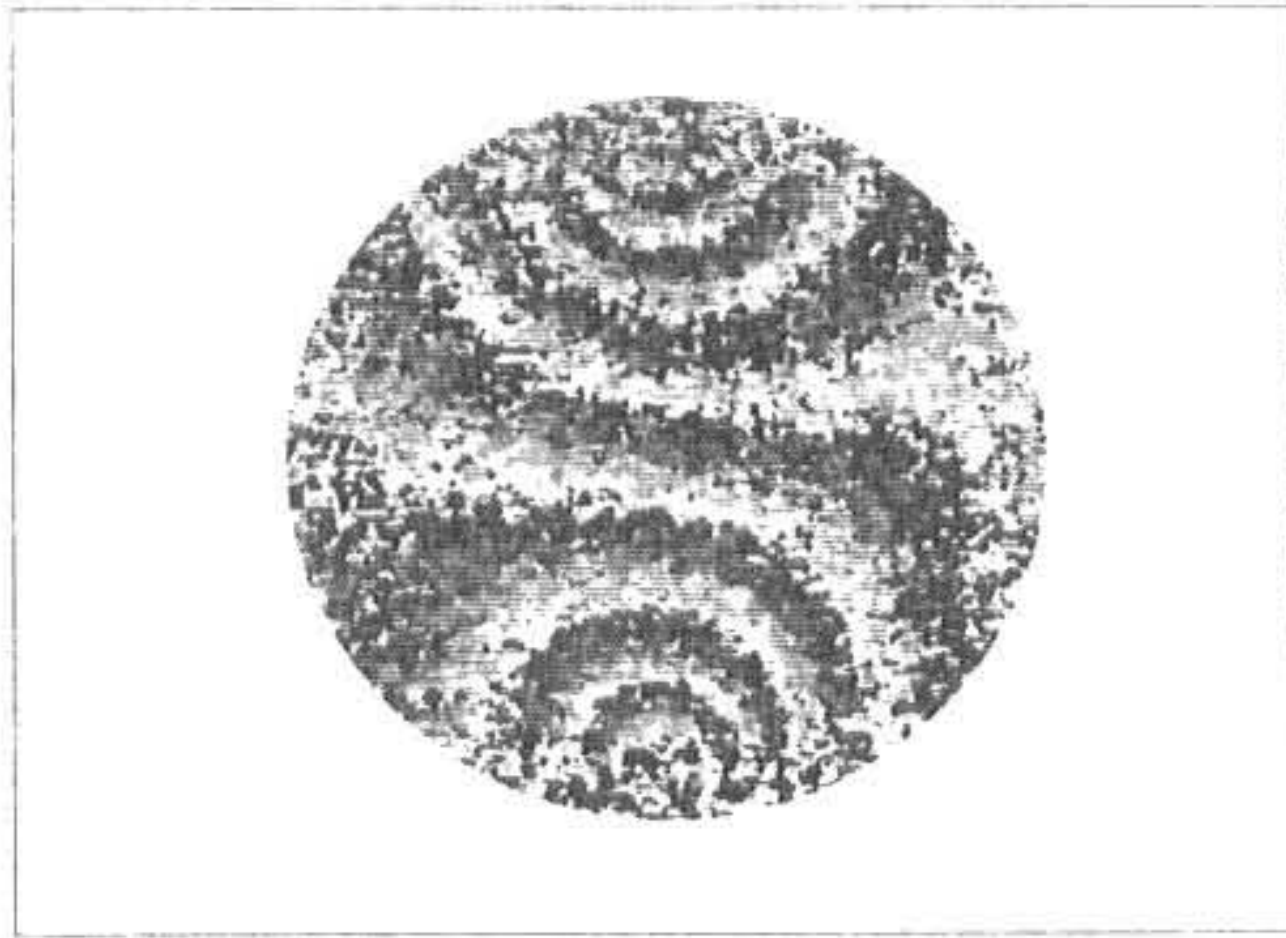


Fig. 6 The Filtered phase map of fringe of a disk

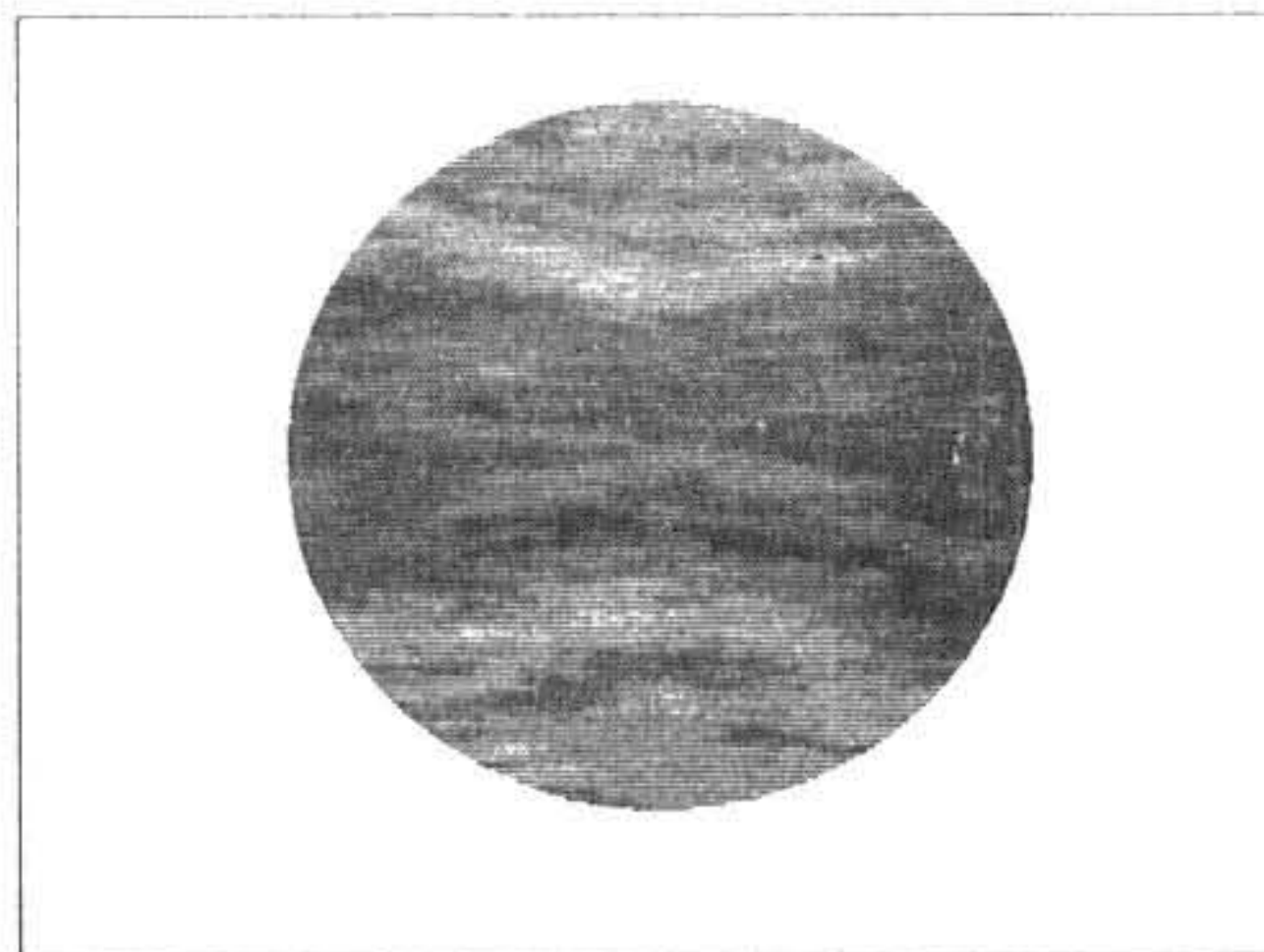


Fig. 7 Demodulation for fringe of a disk

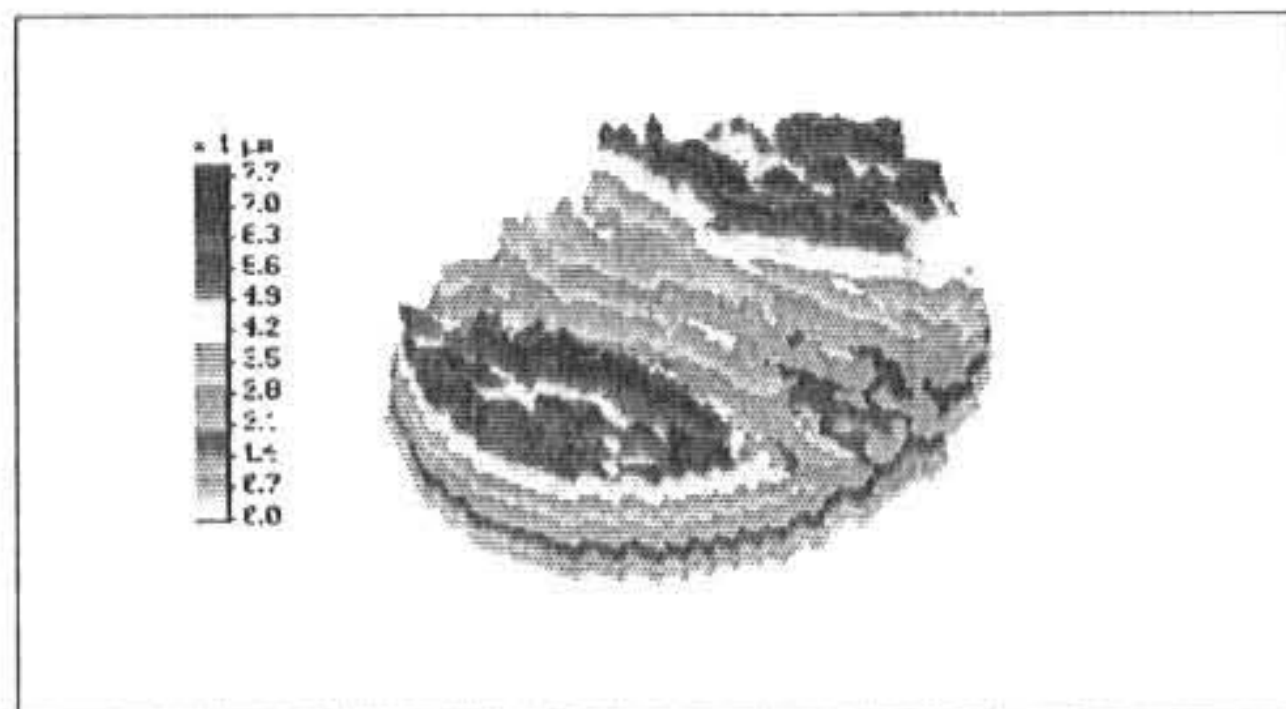
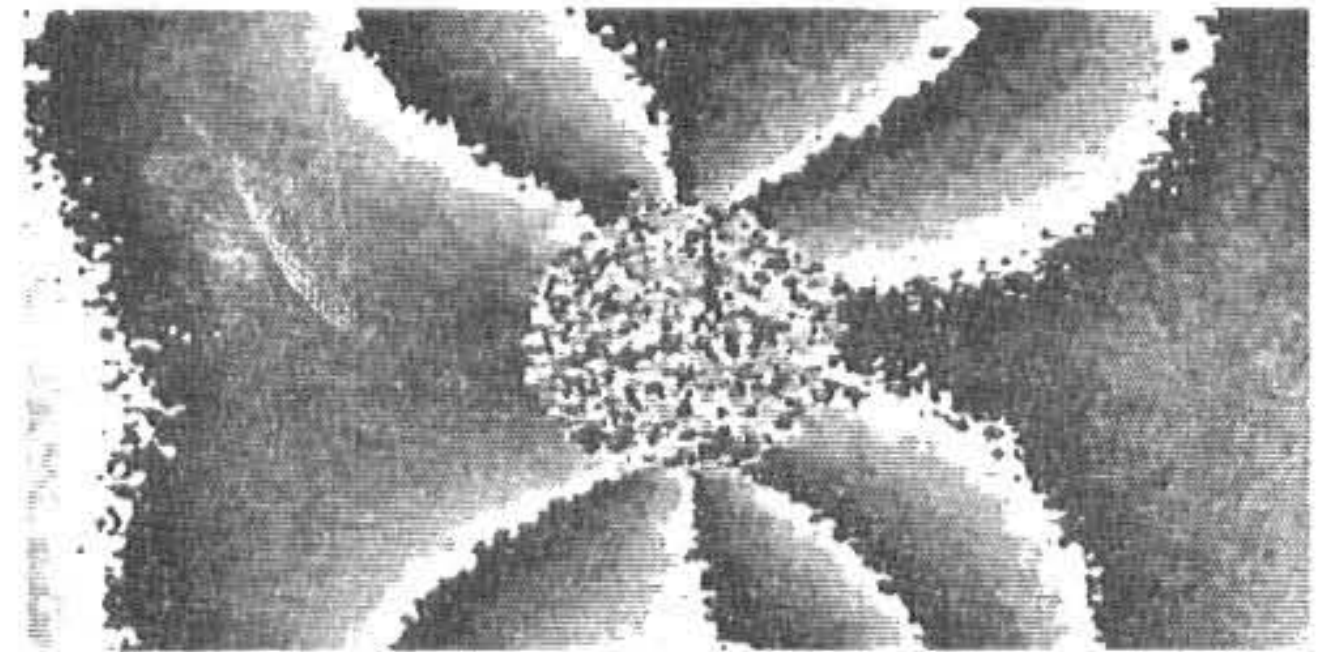
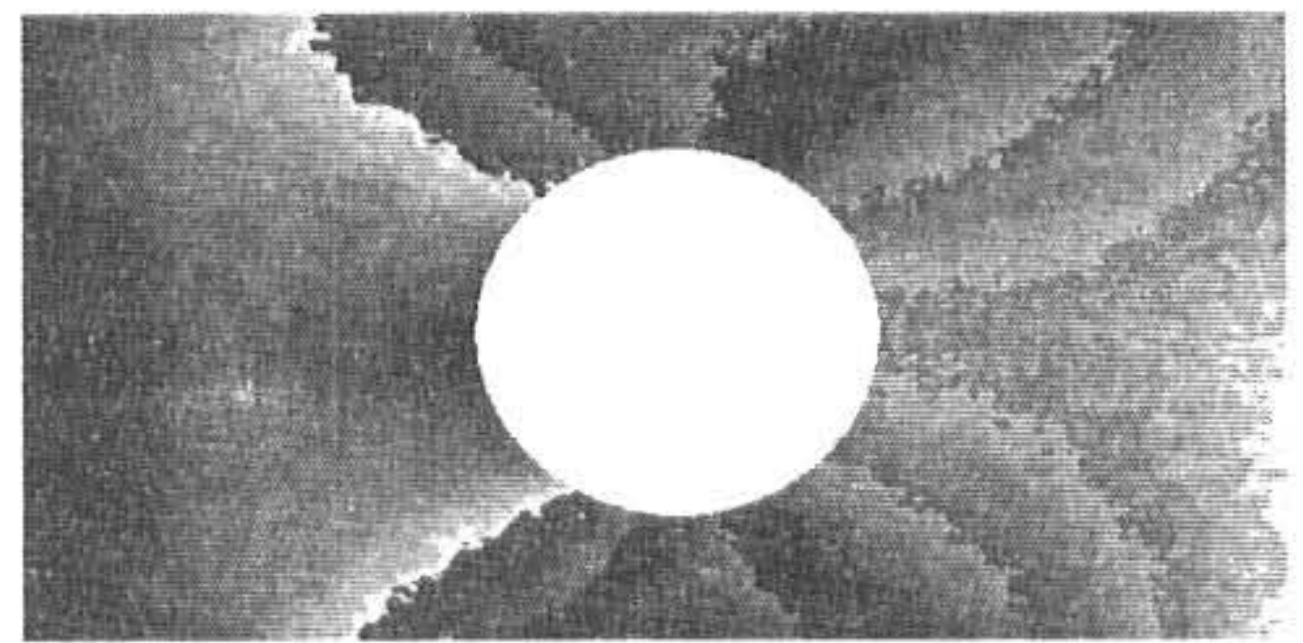


Fig. 8 The 3-D plot of demodulation from ESPI fringe

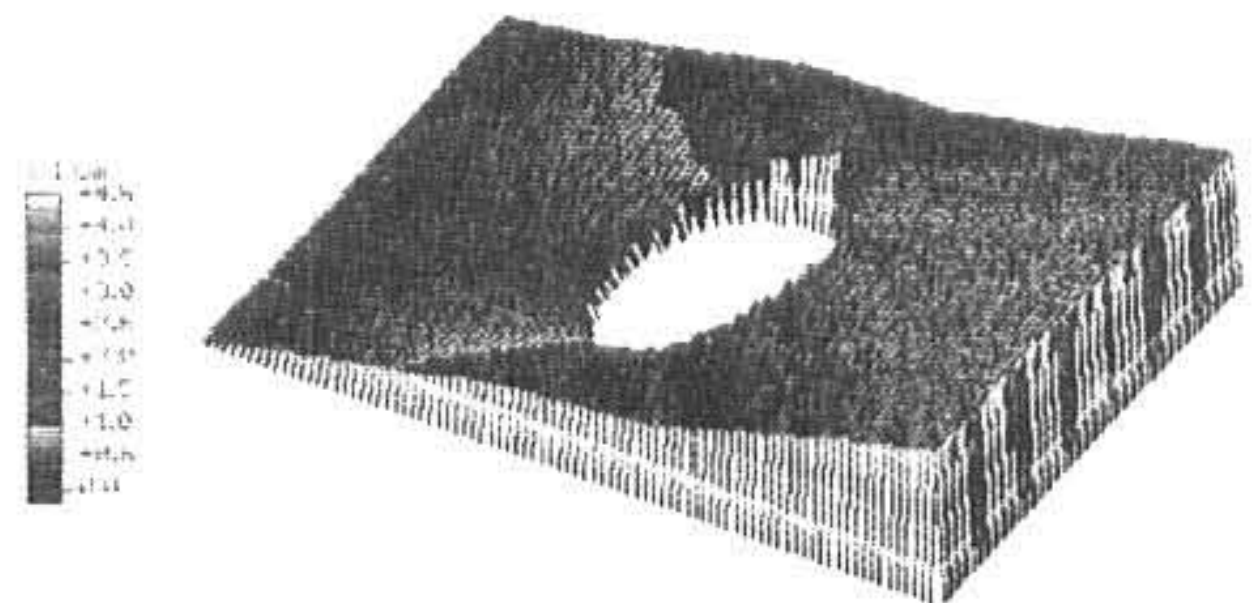
Fig. 8을 보면 원판의 최대 변형이 약  $6 \mu m$ 임을 알 수 있고 이 결과는 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션 결과와 잘 일치함을 보여준다.



(a) Phasemap of fringe



(b) Unwrapping image for quantification



(c) 3-D plot of fringe

Fig. 9 The results of a deformed specimen with a central hole; (a) the phase map of fringe, (b) the unwrapping image for quantification and (c) 3-D plot of fringe with  $4.5 \mu m$  displacements

Fig. 9는 원형 구멍을 가지고 있는 시편이 3.5kPa의 인장응력을 받을 때, 그에 따른 위상도, 위상펼침도와 3차원으로 정량화한 값들을 보여준다. 그림 9의 (c)의 결과를 보면 약  $4.5 \mu m$ 의 변위가 생성됨을 알 수 있으며, 그림 4의 유한요소해석 결과와 약 6%의 오차를 허용하고 있다.



## 6. 결 론

면내 변위에 민감한 In-plane ESPI를 이용하여 축 방향으로 하중이 가해진 원판의 면내 변형과 축 방향으로 인장력이 가해진 시편의 면내 변형을 실시간적으로 측정하였다. 실험에 앞서 유한요소법을 통해 그 결과를 어느 정도 유추하였으며, 실제 ESPI 시스템을 구성하여 원판의 변형 간섭무늬를 획득해본 결과 유한요소해석 결과와 잘 일치하는 것을 보였다. 따라서 본 실험은

- (1) ESPI 시스템을 구성하여 축 방향 하중이 가해지고 있는 원판과 축 방향 인장응력이 가해지고 있는 시편의 면내 미소 변형을 측정하였고
- (2) 유한요소법을 이용하여 사용된 시편의 변형에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 인장응력이 가해지고 있는 시편에서 변형이 급격히 일어나는 응력집중부를 알아보았으며
- (3) ESPI에 의한 결과값과 유한요소해석에 의한 결과를 비교·검증하였다.

### 참고문헌

- 1) Charles M. Vest, "Holographic Interferometry", John Wiley & Sons. Press, pp. 36-66. (1979)

- 2) K. Biedermann and L. Ek, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol.8,571. (1975)
- 3) A. E. Ennos, "Speckle interferometry", *Laser Speckle and Related Phenomena*, edited by J. C. Dainty, Springer, Germany. (1975)
- 4) R. Jones and C. Wykes, "Holographic and Speckle Interferometry, 2nd ed.", Cambridge Univ. Press, pp. 165-196. (1989)
- 5) O. J. Lokberg, "ESPI-The ultimate holographic tool for vibration analysis", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 75, 1783. (1984)
- 6) ANSYS Procedures Volume I User's Manual, Revision 5.2, Swanson Analysis System, Inc. (1994)
- 7) K. Creath, "Phase-measurement interferometry: Beware these errors", SPIE, Vol. 1553, pp. 213-220. (1991)
- 8) P. Hariharan, "Basic of Interferometry", Academic Press, pp. 95-98, (1992)

---

(2002년 4월 13일 접수, 2002년 8월 20일 채택)