

본 연구는 전북대학교 자동차신기술 연구소의 지원(연구과제9542)을 받아 수행하였으며 이에 관계자 여러분들에게 감사 드립니다.

레이저 스페클 간섭법을 이용한 면내 변형 측정 및 해석에 대한 연구 (I)

강 영 준* , 노 경 완** , 강 형 수***

A Study on Measurement and Analysis of In-Plane Deformations by Using Laser Speckle Interferometry (I)

Young-June Kang* , Kyung-Wan Rho** and Hyung-Soo Kang***

ABSTRACT

In-plane ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry) was devised to measure in-plane deformations and rotation of a specimen with laser in this study. ESPI is a optical measuring method to be able to measure the deformations of engineering components and materials in industrial fields. 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. And the 4-frame phase shifting method was used for the quantitative analysis. 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 the experiment results and those of the FEA(Finite Element Analysis).

Key Words : In-plane Deformations(면내 변형), Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자 스페클 패턴 간섭법), Nondestructive Testing(비파괴 방법), Phase Shifting(위상이동), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서 론

간섭성 광원인 레이저를 이용한 변형과 진동 계측 및 결합 검사 기법 중 대표적인 것이 홀로그래피를 이용한 간섭법(holographic Interferometry, HI)⁽¹⁾이다. 홀로그래피 간섭법은 레이저 파장을 계측 단위로 하기 때문에

실험 대상에 대한 측정 민감도가 대단히 우수하고 비파괴·비접촉식 측정이 가능하기 때문에 검사 대상에 영향을 주지 않으며, 점단위 측정이 아닌 레이저가 조사되는 부분의 전 영역이 측정 가능하다는 장점을 갖고 있다. 그러나 홀로그래피 간섭법의 느리고 복잡한 기록 및 재생 과정은 현재 홀로그래피 간섭법을 이용함에 있어 하나의

* 전북대학교 기계설계학과, 자동차 신기술 연구소
** 전북대학교 대학원
*** 전주공업대학 기계과

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

그러므로 홀로그래피 간섭법의 장점들을 수용하면서 동시에 그의 단점을 보완하는 레이저를 이용한 신속한 비디오 시스템의 사용이 제안되었는데, 이러한 레이저 간섭 시스템을 전자 스페클 패턴 간섭계(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)⁽²⁾⁻⁽⁵⁾라 한다. ESPI는 측정 물체의 변형 정보를 갖고 있는 간섭무늬의 기록과 저장에 비디오 시스템을 사용하기 때문에 데이터의 저장 및 관리가 대단히 용이하며, 현장 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 ESPI가 현장에 보다 적합하게 적용되기 위해서는 외란에 덜 민감한 레이저 간섭 시스템을 요구하게 되는데, 그러한 요구에 적합한 시스템이 면내 변형에 민감한 스페클 간섭계(in-plane ESPI)이다.

이에 본 연구는 면내 변형의 측정을 위해서 면내 변형에 민감한 레이저 간섭 시스템의 원리와 이론에 대해서 설명하고, 그러한 이론을 바탕으로 in-plane ESPI 시스템을 제작하였다. 그리고 제작한 시스템의 안정성과 측정 정밀도를 확인하는 과정으로 원판의 면내 회전을 측정함으로써 본 시스템의 보정(calibration)을 하였다. 또한 본 ESPI 시스템으로 측방향 하중을 받는 원판의 면내 간섭무늬를 측정하였다. 그리고 이론적 검증을 위해 본 실험을 수행하기 전 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS⁽⁶⁾를 이용하여 원판의 변형 결과를 추출하여 실험적 결과와 비교·분석하였으며, 실제 실험에서는 간섭무늬의 정량적 해석을 통한 전체 변형 정보를 얻기 위해 간섭계내에 압전변환기(piezo-electric transducers, PZT)를 설치하여 위상이동⁽⁷⁾을 수행하였다.

2. 면내 변형 스페클 간섭계의 원리

ESPI 장치는 사용 목적에 따라 광학계의 구성이 달라지는데 본 연구에서는 원판의 면내 변형을 측정하기 위해 면내 변위에 민감한 in-plane ESPI를 구성하여 실험하였다.

면내 변위에 민감한 간섭무늬를 얻기 위한 간섭계의 구성은 그림 1과 같다.⁽⁴⁾

여기에서 물체는 x_2, x_3 평면에 놓여 있고 물체면에 수직한 방향과 이루는 각의 크기가 θ 이며 방향이 반대인 두 평면 파면 U'_0 과 U''_0 이 물체에 조사되고 있다. 변위 d 에 의한 두 스페클 패턴에서 위상차 $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 은 각각

$$\Delta\phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(d_1 \cos\theta = d_2 \sin\theta) \quad (1)$$

$$\Delta\phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda}(d_1 \cos\theta = d_2 \sin\theta) \quad (2)$$

이고, 따라서, 두 빔의 상대적인 위상차는 x_2 -축에서 아래의 식과 같다.

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}d_2 \sin\theta \quad (3)$$

여기에서

λ : 광원인 레이저의 파장

d_1 : x_1 -방향의 변위. 즉, 면내 변위

d_2 : x_2 -방향의 변위. 즉, 면내 변위

θ : 레이저의 입사각

U'_0 과 U''_0 의 상대적인 위상은 x_1x_3 -평면에 놓여 있는 변위 성분 d_1 과 d_3 가 상대적인 위상차를 전달하지 않으므로 x_1x_3 -평면에 일정하다. 그러므로 이러한 간섭계의 형태는 면외 변위의 존재 하에서 독립적으로 면내 변위의 분포를 관찰 할 수 있게 해준다.

$x_2(x_3)$ -방향에서 간섭무늬 간격 성분 $\Delta x_{2(3)}$ 는 식(3)으로부터 아래와 같이 유도된다.

$$\Delta x_{2(3)} = \frac{2\pi}{\partial(\Delta\phi)/\partial x_{2(3)}} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta d_{2,2}(d_{2,3})} \quad (4)$$

마찬가지로 x_3 -축에서 같은 크기의 각과 방향이 반대인 평면 파면이 물체에 조사된다면 두 빔의 상대적인 위상차와 $x_3(x_2)$ -방향에서 간섭무늬 간격 성분 $\Delta x_{3(2)}$ 는

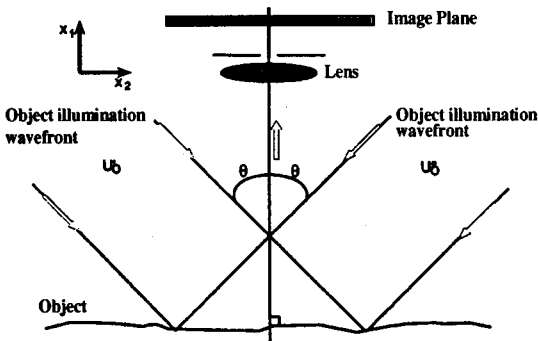


Fig. 1 Optical arrangement of ESPI for measuring in-plane displacement

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d_3 \sin\theta \quad (5)$$

$$\Delta x_{3(2)} = \frac{\lambda}{2 \sin\theta d_{3,2}(d_{3,3})} \quad (6)$$

이 된다. 그래서 이 간섭계에서 획득된 간섭무늬는 면내 변위에 일정한 등고선을 나타내며 면의 변위에 대해서는 거의 감도를 보이지 않는다. 그리고 위 식에서 알 수 있듯이 간섭무늬에 나타난 변형의 정보가 변위가 아닌 변형률의 형태로 나타나기 때문에 홀로그래피 간섭법에 비해 외란의 영향을 잘 받지 않는다.⁽⁴⁾

이와 같이 ESPI 검사·계측 기술은 레이저의 간섭성을 이용하는 기술로 비접촉 검사 방법이며, 레이저 빔이 조사되는 영역 전체의 동시 측정과 정량적 해석이 가능하고, 간섭성 광원인 레이저의 파장을 계측 단위로 하기 때문에 정밀도가 뛰어나다는 장점이 있다. 그리고 기존 레이저 계측법인 홀로그래피 간섭법은 암실과 필름 현상의 화학적인 처리가 요구되며 외란에 민감하여 사용에 많은 제약이 되지만 ESPI는 이러한 단점을 보완하여 필름 대신에 CCD 카메라를 이용하고, 일반 컴퓨터와 디지털 영상처리 장치를 사용하므로 시간의 절약과 사용의 용이함 등 현장에서의 활용성이 대단히 크다고 볼 수 있다. 특히, 본 실험에서 사용한 면내 변형에 민감한 in-plane ESPI는 변형률을 함수로 하여 간섭무늬를 생성하므로 변위를 함수로 하는 면의 변형 스펙를 간섭계(out-of-plane ESPI) 보다 외란의 영향을 덜 받으며, 레이저 광원을 전부 활용할 수 있으므로 출력이 낮은 레이저를 가지고도 충분히 시스템을 구성할 수 있다는 장점이 있다.

3. 면내 변형의 간섭무늬 해석 이론

홀로그래피 간섭법과 마찬가지로 ESPI에서도 일정한 변위의 등고선을 나타내는 밝고 어두운 간섭무늬(fringe)가 변형된 물체의 상위에 중첩되어 나타난다. 따라서 간섭무늬를 영상처리해서 물체 영상의 각 위치에서 원하는 위상정보가 얻어지면, 변위의 양은 민감도 벡터(sensitivity vector)에 의해 결정된다.⁽⁶⁾ 이러한 민감도 벡터는 광학적인 구성에 따라 변화한다. 그림 2의 벡터 구성도에서 실제 면내 변위에 민감한 간섭계의 구성에 따른 민감도 벡터와 변위 벡터를 구한다.

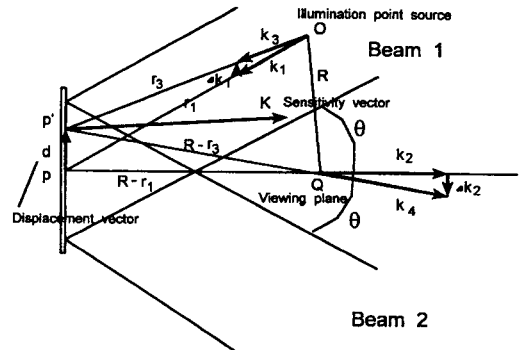


Fig. 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in a in-plane ESPI

그림에서 평면의 어느 한 점 p가 p'로 변위 \vec{d} 만큼 이동한 빛의 강도 분포는 아래식으로 표현된다.

$$i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi + \Delta\phi) \quad (7)$$

위 식에서 $\Delta\phi$ 가 두 빔에 의한 위상 변위를 나타내므로 그에 따른 식을 전개해 나가려면, 변위 \vec{d} 만큼 이동하기 전과 후 두 빛의 위상을 각각 벡터형으로 구해야 한다. 그 각각의 식들이 아래의 식(8)과 식(9)이다.

$$\phi_1 = \vec{k}_1 \cdot \vec{r}_1 + \vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_1) + \psi \quad (8)$$

$$\phi_2 = \vec{k}_3 \cdot \vec{r}_3 + \vec{k}_4 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) + \psi \quad (9)$$

여기에서 $\vec{k}_1, \vec{k}_2, \vec{k}_3$ 와 \vec{k}_4 는 $|\vec{k}_1| = |\vec{k}_2| = |\vec{k}_3| = |\vec{k}_4| = \frac{2\pi}{\lambda}$ 인 상수이다. 두 빛의 위상을 알아보았으므로 빔 1과 빔 2에 따른 각각의 전체 위상을 구해야 한다. 먼저 빔 1에서 전체 위상 변화를 δ_1 이라 하면, 두 빛의 위상차가 빔 1의 전체 위상 변화가 될 것이며, 식(10)으로 표현될 것이다.

$$\delta_1 \equiv \phi_2 - \phi_1 \quad (10)$$

위의 식에 식(8)과 식(9)을 대입하면 아래 식으로 표현된다.

$$\delta_1 = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot (\vec{r}_3 - \vec{r}_1) + \Delta\vec{k}_1 \cdot \vec{r}_3 + \Delta\vec{k}_2 \cdot (\vec{R} - \vec{r}_3) \quad (11)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} \vec{k}_3 &= \vec{k}_1 + \Delta\vec{k}_1 \\ \vec{k}_4 &= \vec{k}_2 + \Delta\vec{k}_2 \end{aligned}$$

이다.

식(11)에서 $\Delta \vec{k}_1$ 과 \vec{r}_3 , $\Delta \vec{k}_2$ 과 $(\vec{R} - \vec{r}_3)$ 는 서로 수직하게 놓여 있으므로 그 값이 0이 된다. 그러므로 최종적으로 δ_1 은 아래식으로 간단히 표현될 것이다.

$$\delta_1 = (\vec{k}_2 - \vec{k}_1) \cdot \vec{d} \quad (12)$$

여기에서 변위 \vec{d} 는 3축의 단위벡터에 따라 세 방향의 벡터로 구성되며, $(\vec{k}_2 - \vec{k}_1)$ 는 그림 2에서 설명한 민감도 벡터 \vec{K}_1 를 말한다. 그러므로 전체 위상 변화인 δ_1 은 최종적으로 식(13)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (-\sin\theta_i - \cos\theta_k)] \cdot (d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k}) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [d_x \sin\theta + d_z(1 + \cos\theta)] \end{aligned} \quad (13)$$

빔 2의 전체 위상 변화도 위에서와 같은 방법으로 전개하면, 최종적으로 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} [k - (\sin\theta_i - \cos\theta_k)] \cdot (d_x \vec{i} + d_y \vec{j} + d_z \vec{k}) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} [-d_x \sin\theta + d_z(1 + \cos\theta)] \end{aligned} \quad (14)$$

이 두 빔에 의해서 최종적으로 결정되는 위상 변화에 따른 위상차는 식(15)으로 된다.

$$\Delta\phi = \delta_1 - \delta_2 \quad (15)$$

식(13), 식(14)와 식(15)에서 아래 식으로 유도된다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (16)$$

우리가 in-plane ESPI에서 구하고자 하는 변위값을 구할 수 있으며 식(17)을 이용하면 식(18)이 얻어진다.

$$\Delta\phi = 2\pi N \quad (17)$$

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (18)$$

위 식에서 보는 바와 같이 우리가 구하고자하는 방향의

변위는 간섭무늬 차수와 레이저의 파장에 비례하고 입사각의 크기에 영향을 받음을 알 수 있다. 또한 간섭무늬의 차수가 증가할수록 변위가 증가함을 알 수 있다. 이러한 면내 변위를 측정하기 위해서 실제 실험과 일치하도록 각각의 빔 경로를 벡터로 구성하여 민감도 벡터를 이용한 이론식을 산출하였다.

그리고 CCD 카메라를 기록 매체로 사용할 때, 대상 시험 물체의 결상된 화상에 해당되는 각 화소에 대해 그에 대응되는 각각의 민감도 벡터가 존재하므로, in-plane ESPI에서는 시준빔(collimated beam)을 사용하면 어디에서나 일정한 민감도 벡터를 얻을 수 있다. 그러나, 실용성을 고려할 때, 시준빔은 여러모로 불편하므로 일반적으로 빔확대기(expander)에 의한 발산빔(diverging beam)을 그대로 사용하여도 오차가 그다지 크지 않으므로⁶⁾, 본 실험에서는 발산빔으로 간섭계를 구성하였다.

4. 레이저 간섭계 구성 및 캘리브레이션

In-plane ESPI의 광학계 구성은 전단 간섭계처럼 out-of-plane ESPI 구성에 비해 외부의 불안정성에 대해 덜 민감한 간섭계이다. 그러므로 상대적으로 실용적인 면에서 산업 현장의 적용이 유리하다고 할 수 있다. 이러한 in-plane ESPI의 광학계 구성에서 중요하게 고려된 몇 가지를 보면, 우선 간섭무늬의 자동해석을 할 수 있도록 위상이동법을 이용했다. 그림 3은 그림 2의 벡터 구성도와 일치하도록 제작한 in-plane ESPI의 구성도이다. 레이저는 파장 532nm인 제2 조화파 연속레이저(2nd harmonic cw Nd:Yag Laser)를 사용하였다. 그림 3을 보면 레이저에서 나온 빔이 거울에서 반사되어 다시 광분할기(beam splitter, BS)에 의해 둘로 나뉘는 뒤 하나는 보통 거울에서 반사되어 다시 광분할기에 의해 반사된 후 expander에 의해 발산빔이 되어 물체로 향한다. 다른 하나는 다른쪽 거울에 반사되어 반대편 expander를 통해 물체를 비추도록 하였다. 그리고 한쪽 거울에는 PZT를 설치하여 위상이동을 통해 전체 변위에 대한 정량적 해석을 할 수 있도록 하였다. 광학계를 보다 간단하고 안전하게 하기 위해서 광분할기를 포함하는 부분을 마이켈슨 간섭계 모듈(module)로 구성하였다. CCD 카메라 앞의 결상 렌즈로는 CCD 카메라 렌즈 외에도 줌렌즈(zoom lens)를 사용하여, 물체를 받아들이는 상 크기 제한에 영향이 적도록 하였다. 구성된 ESPI 시스템이 계측기로서 정밀도가 매우 우수하다는 것은 앞에서 언급한 바 있다.

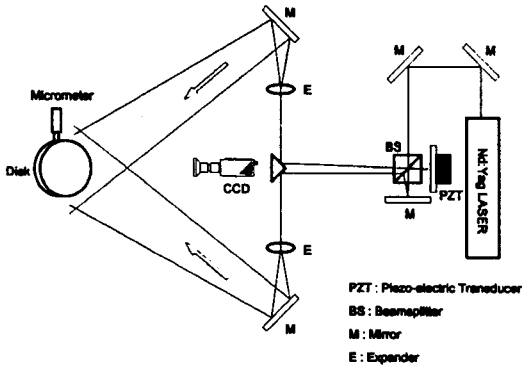


Fig. 3 Schematic of the laser interferometer used in the in-plane ESPI system

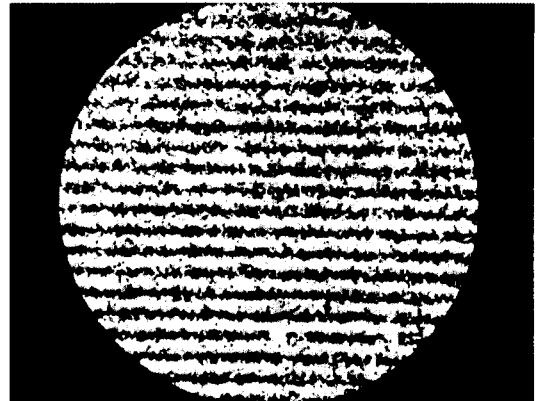


Fig. 5 Fringe pattern for a disk rotated to 5 μ m

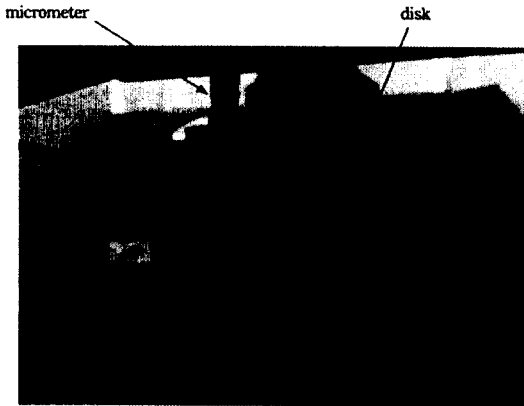


Fig. 4 Photograph of a testing disk and a micrometer for calibration



Fig. 6 Fringe pattern for a disk rotated to 2.5 μ m

정도가 우수한 계측기 일수록 정확한 보정이 요구되어 지므로 본 실험에 사용된 ESPI 시스템도 다음과 같은 방법으로 보정이 수행되었다.

in-plane ESPI에서 보정을 수행하는 가장 간단한 방법은 원판의 회전률을 측정하는 방법이다. 그림 4는 실제 회전률을 측정하기 위한 시편인 원판과 후면의 좌상단에 부착된 마이크로미터를 사진으로 보여준다. 반지름이 7.5cm인 이 원판을 마이크로미터로 원판을 회전시켜 그 회전 거리를 알아보고 실제 우리가 CCD를 통해서 받은 원판의 간섭무늬 개수를 추적하여 그 값이 서로 일치하면, 보정이 수행된 것으로 한다. 원판이 마이크로미터에 의해 회전을 하게되면, 회전시의 간섭무늬 즉, 회전율의 함수로 이루어진 간섭무늬가 나타나게 되고, 이 간격을 측정하여 실제 회전한 거리를 알아낼 수 있다. 마이크로

미터로 5 μ m를 움직였을 때, 본 간섭계에 의해서 획득된 결과가 그림 5이다. 이 결과를 간섭무늬 간격식인 식 (10)을 이용하여 얻은 결과 약 5.7 μ m변위를 얻었다. 이로써 이론식에 의한 회전 변위와 실제 실험에 의해 측정된 결과치는 약 14%의 오차를 보여 줌을 알 수 있었다. 본 실험은 암실이 아니고 방진 테이블을 사용하지 않은 상태에서 수행되었으며, 앞에서 설명한 회전률에 대한 회전 변위를 해석하기 위하여, 처음의 상과 나중에 회전을 주었을 때의 상을 감산(subtraction) 해준 결과이다. 그림 6은 이론식의 값과 실험치의 오차를 줄여보기 위하여 방진 테이블 상태에서 실험을 하였으며, 그 결과 실제 이동거리가 2.5 μ m일 때 간섭무늬 간격에 의한 결과는 약 2.7 μ m를 나타내 약 8%까지 오차를 개선하였다.

5. 유한요소해석 및 결과

실험에 앞서 실험에서 나온 측정 결과를 어느 정도 유추하고 비교하기 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ANSYS를 사용하여 유한요소해석 시뮬레이션을 해 보았다. 이러한 해석을 수행하기 위해 실제 실험에서의 환경과 동일한 조건을 주었으며, 그림 7에서 보는 바와 같이 반지름이 8.7cm이고 두께가 0.95cm인 알루미늄 합금 2014-T6 원판의 축 방향에 하중을 가하도록 하는 것을 근거로 하였다.

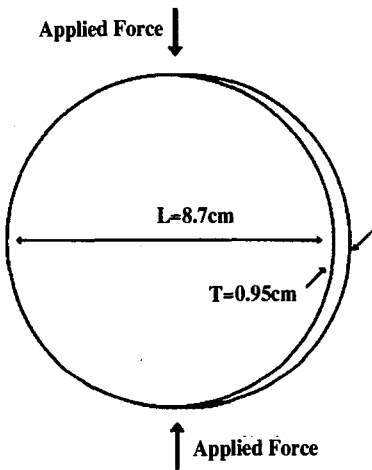


Fig. 7 Specimen geometry used for finite-element analysis simulations of the experiments

유한요소해석의 비선형적 응답을 얻지 않도록 하기 위해서 하중의 작용점 근처를 제외한 응력의 분포는 하중작용의 실제 형태와는 무관하다고 한 Saint-Venant의 원리를 해석에 적용하였으며 시편이 기하학적으로 상하와 좌우가 서로 대칭이기 때문에 경제성을 고려하여 전체의 1/4인 시편의 우상단만을 해석하였다.

이러한 축 방향 하중에 대한 원판의 면내 변형 결과, 즉 하중이 가해진 점원 영역 주변에서 원판 표면 위에 위치의 함수인 축 방향 변위를 보여주는 간섭무늬 형태가 그림 8에 있다. 이 그림을 보면 하중이 가해진 원판의 끝 부분에서 중앙까지 일정한 변형 분포를 나타내고 있으며 측정 결과 최대 변위는 약 $6\mu\text{m}$ 정도였다. 이 결과는 다음에 나오는 in-plane ESPI 실험 결과인 그림 16의 결과와 잘 일치함을 보여준다.

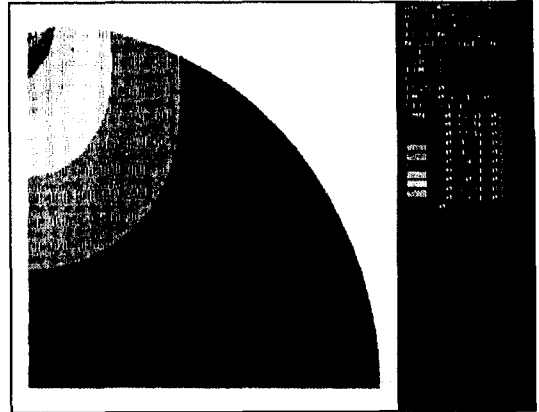


Fig. 8 Displacements of disk for a load at room temperature

그림 9, 그림 10과 그림 11은 3차원 ESPI(3-D ESPI)를 이용했을 경우에 얻을 수 있는 결과값들을 유한요소해석을 통하여도 정성적인 형태가 예측 가능함을 보여준 것이다. 각각의 그림은 3차원으로 모델 해석을 한 원판의 축방향과 횡방향 그리고 면의 방향을 시뮬레이션한 것이다. 그림 9는 유한요소해석에 의해 도출된 변형 분포를 변위의 단계별인 등고선 형상으로 나타낸 것으로서 이 축방향의 변형 결과는 실제 in-plane ESPI로 실험한 간섭무늬 형상과 잘 일치함을 실험 결과인 그림 14에 의해 알 수 있다.

그림 10은 실제 실험에서 횡방향으로 새롭게 ESPI 시스템을 구성해야만 그 변형 분포를 알 수 있는데 반하여 유한요소법에 의하여 그 결과를 쉽게 유추할 수 있음을 보여준 것이다.

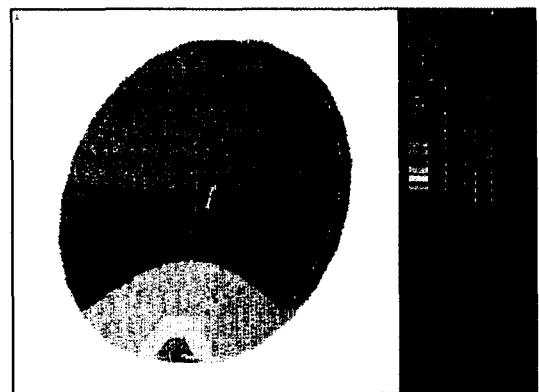


Fig. 9 Axial displacements of disk for 3-D analysis

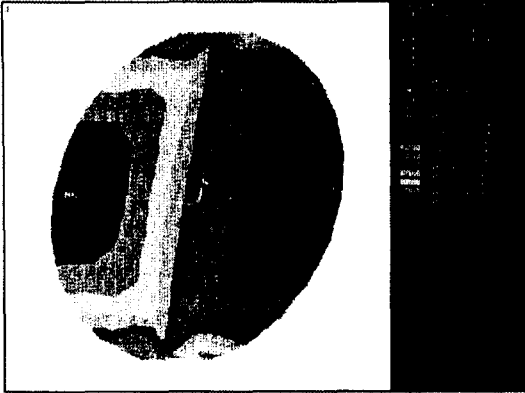


Fig. 10 Lateral displacements of disk for 3-D analysis

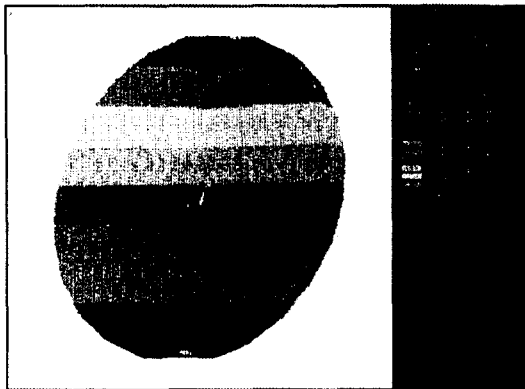


Fig. 11 Out-of plane displacements of disk for 3-D analysis

그림 11은 축방향으로 하중을 가한 원판의 면의 변형 결과에 의한 변형의 등고선 형태를 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 정성적으로 확인해 본 결과이다.

6. 실험 결과

그림 3의 구성도와 같은 실험 시스템에서 반지름이 8.7cm이고 두께가 0.95cm인 알루미늄 합금 2014-T6 원판의 시편으로 실험을 위해 축 방향으로 하중을 가하였다.

먼저 하중을 가할 때 원판이 이동하여 이동한 변위량이 간섭무늬의 외관으로 작용하지 않도록 원판에 500kg의 구속을 가하였다. 그런 다음 100kg의 하중을 원판의 축 방향으로 가하였다. 그 결과 나온 간섭무늬가 그림 12이다. 이 그림은 변형 전의 상과 하중에 의해 변형이 일어난

변형 후의 상을 실시간으로 감산 처리해서 출력한 원판의 위상도를 나타낸 것이다.

그림 13과 그림 14는 각각 150kg과 200kg의 하중을 축방향으로 가했을 때 발생한 변형 전과 후의 상을 감산 처리해서 출력한 위상도이다. 그림들을 보면 원판에 가해지는 하중이 증가할수록 변위 정보를 담고 있는 간섭무늬 수가 늘어난 것을 알 수 있다.

그림 12, 13, 14의 위상도는 2π 씩 불연속인 톱니파 모양임으로 위상 펼치기(unwrapping)를 통하여 불연속인 부분을 이어주어야 하는데 이 위상도를 펼친 그림이 그림 15이며 이 위상 펼침을 3차원 도면으로 변형량을 정량화한 것이 그림 16이다. 그림 16을 보면 원판의 최대 변형이 약 $6\mu\text{m}$ 임을 알 수 있고, 이 결과는 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션 결과인 그림 8과 잘 일치함을 보여준다.

이상의 실험 결과값은 아래와 같은 점 때문에 약간의 오차를 수반하고 있다. 첫 번째는 원판에 하중을 가해주는 프레스 장치가 구조적으로 레이저 빔을 가로막아 원판의 양 끝단에 그림자를 형성하므로 그 부분의 미소 변형에 대해서는 확실한 결과값을 얻지 못했다는 점이다. 두 번째 역시 프레스의 구조상 기계적으로 하중을 가하지 못하고 수작업으로 하중을 가하여서, 하중-시간 선도에 일정한 정하중을 가한게 아니라 반복하중에 가까운 불균일 하중이 원판에 가해져 그에 따른 노이즈를 결과값에 포함해야만 했다. 따라서 이러한 문제로 인해서 어느 정도의 오차가 있을 것으로 예견되며, 이것들에 대한 것은 차후 실험에 만능인장 시험기를 사용함으로써 충분히 극복이 가능하리라 생각된다.

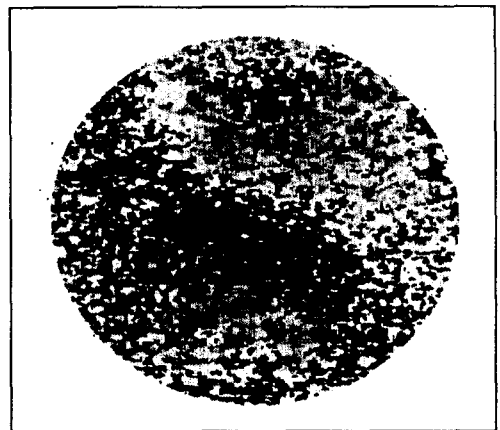


Fig. 12 Fringe pattern for a specimen loaded to 100kg and constrained to 500kg

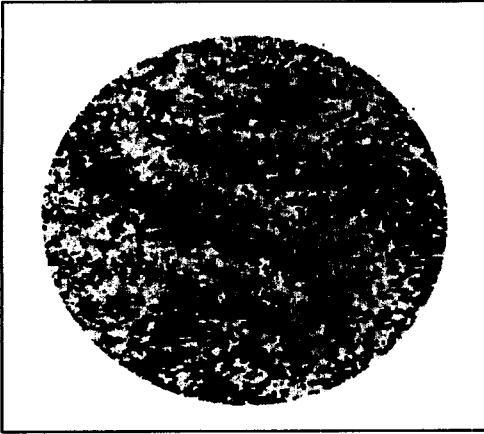


Fig. 13 Fringe pattern for a specimen loaded to 150kg and constrained to 500kg

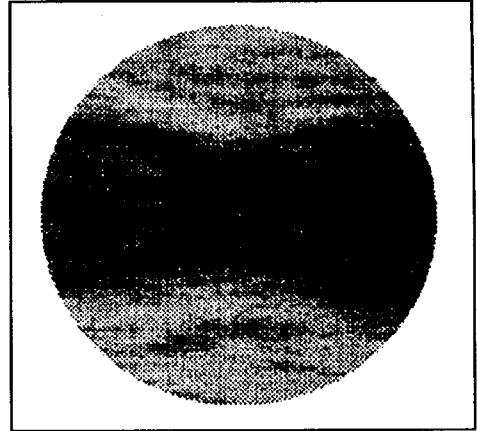


Fig. 15 Unwrapping image for fringe of a disk

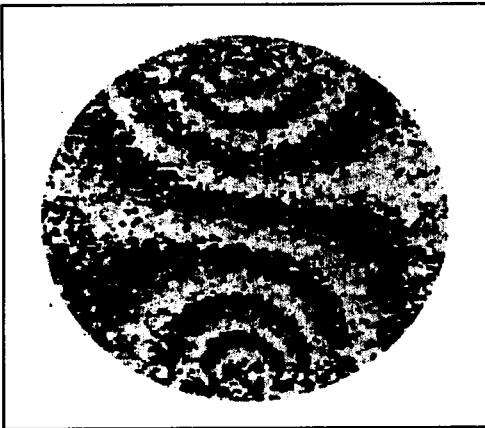


Fig. 14 Fringe pattern for a specimen loaded to 200kg and constrained to 500kg

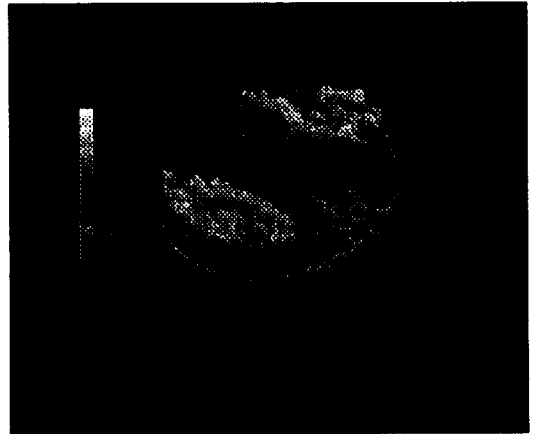


Fig. 16 3-D plot of surface deformations

7. 결 론

지금까지 면내 변위에 민감한 레이저 간섭법의 간섭무늬 해석 이론을 이용하여, 면내 변위에 민감한 간섭 시스템을 직접 구성하였다. 그리고 구성된 레이저 간섭 시스템의 안정성 확인을 위하여 면내 회전률 측정으로 보정을 수행하였다. 또한 구성된 ESPI 시스템을 이용하여 처음에 받은 화상과 변형 후의 화상을 실시간으로 감산 처리하여 원판의 축방향 변형 간섭무늬를 획득하였다. 이 획득된 간섭무늬에서 위상이동법에 의하여 위상도를 생성하였으며 정량적 해석을 위해 위상도 펼침 작업을 통하여 미소 변형량을 3차원으로 나타내며, 유한요소해석을

통하여 실험 결과값과 이론값을 검토한 결과 서로 잘 일치함을 알았다.

이러한 결과들을 활용하여 본 연구를 확장한다면 차체 판넬의 변형, 용접부의 결함, 연결 장치의 변형 등 현장에 존재하는 많은 부품의 변형을 실시간으로 측정할 수 있으며, 더 나아가 본 연구를 바탕으로 부재에 존재하는 잔류 응력을 측정하고 해석이 가능하리라 생각된다.

참 고 문 헌

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

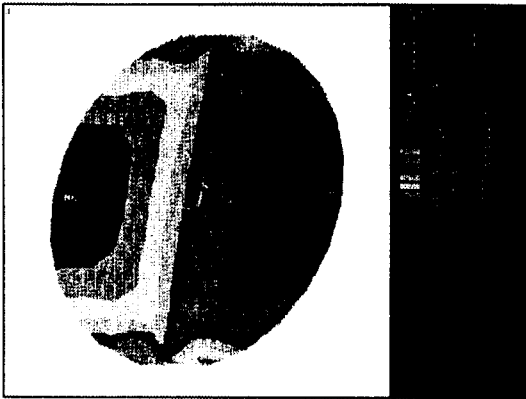


Fig. 10 Lateral displacements of disk for 3-D analysis

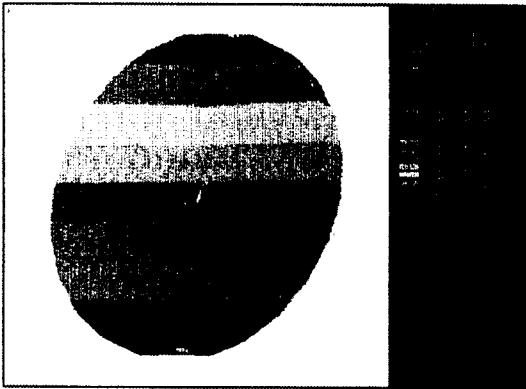


Fig. 11 Out-of plane displacements of disk for 3-D analysis

그림 11은 축방향으로 하중을 가한 원판의 면의 변형 결과에 의한 변형의 등고선 형태를 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 정성적으로 확인해 본 결과이다.

6. 실험 결과

그림 3의 구성도와 같은 실험 시스템에서 반지름이 8.7cm이고 두께가 0.95cm인 알루미늄 합금 2014-T6 원판의 시편으로 실험을 위해 축 방향으로 하중을 가하였다.

먼저 하중을 가할 때 원판이 이동하여 이동한 변위량이 간섭무늬의 외란으로 작용하지 않도록 원판에 500kg의 구속을 가하였다. 그런 다음 100kg의 하중을 원판의 축 방향으로 가하였다. 그 결과 나온 간섭무늬가 그림 12이다. 이 그림은 변형 전의 상과 하중에 의해 변형이 일어난

변형 후의 상을 실시간으로 감산 처리해서 출력한 원판의 위상도를 나타낸 것이다.

그림 13과 그림 14는 각각 150kg과 200kg의 하중을 축방향으로 가했을 때 발생한 변형 전과 후의 상을 감산 처리해서 출력한 위상도이다. 그림들을 보면 원판에 가해지는 하중이 증가할수록 변위 정보를 담고 있는 간섭무늬 수가 늘어난 것을 알 수 있다.

그림 12, 13, 14의 위상도는 2π 씩 불연속인 톱니파 모양으로 위상 펼치기(unwrapping)를 통하여 불연속인 부분을 이어주어야 하는데 이 위상도를 펼친 그림이 그림 15이며 이 위상 펼침을 3차원 도면으로 변형량을 정량화한 것이 그림 16이다. 그림 16을 보면 원판의 최대 변형이 약 $6\mu\text{m}$ 임을 알 수 있고, 이 결과는 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션 결과인 그림 8과 잘 일치함을 보여준다.

이상의 실험 결과값은 아래와 같은 점 때문에 약간의 오차를 수반하고 있다. 첫 번째는 원판에 하중을 가해주는 프레스 장치가 구조적으로 레이저 빔을 가로막아 원판의 양 끝단에 그림자를 형성하므로 그 부분의 미소 변형에 대해서는 확실한 결과값을 얻지 못했다는 점이다. 두 번째 역시 프레스의 구조상 기계적으로 하중을 가하지 못하고 수작업으로 하중을 가하여서, 하중-시간 선도에 일정한 정하중을 가한게 아니라 반복하중에 가까운 불균일 하중이 원판에 가해져 그에 따른 노이즈를 결과값에 포함해야만 했다. 따라서 이러한 문제로 인해서 어느 정도의 오차가 있을 것으로 예견되며, 이것들에 대한 것은 차후 실험에 만능인장 시험기를 사용함으로써 충분히 극복이 가능하리라 생각된다.

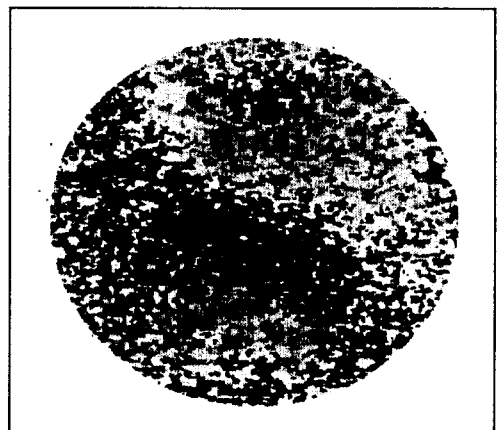


Fig. 12 Fringe pattern for a specimen loaded to 100kg and constrained to 500kg

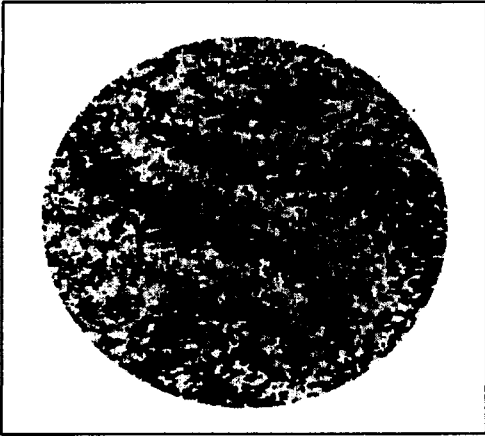


Fig. 13 Fringe pattern for a specimen loaded to 150kg and constrained to 500kg

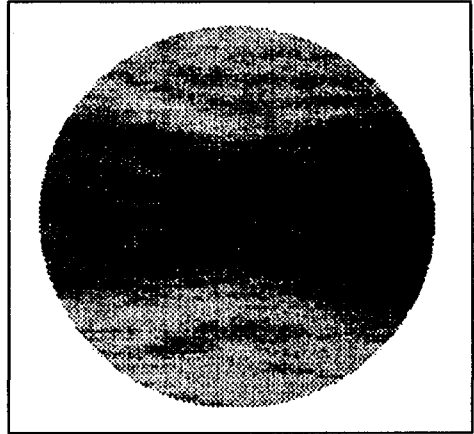


Fig. 15 Unwrapping image for fringe of a disk

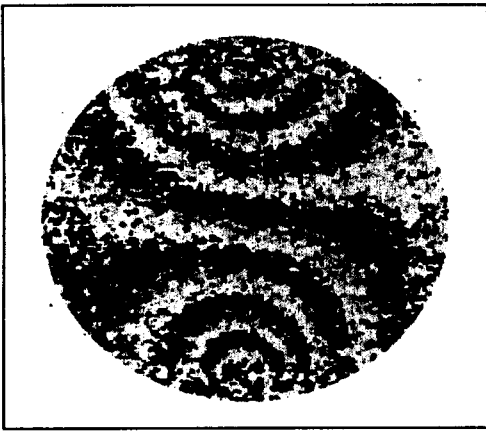


Fig. 14 Fringe pattern for a specimen loaded to 200kg and constrained to 500kg

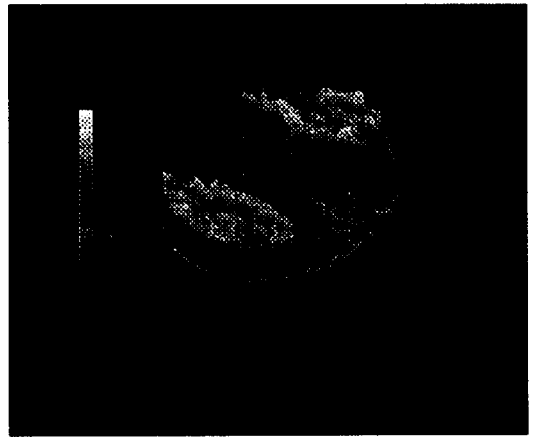


Fig. 16 3-D plot of surface deformations

7. 결 론

지금까지 면내 변위에 민감한 레이저 간섭법의 간섭무늬 해석 이론을 이용하여, 면내 변위에 민감한 간섭 시스템을 직접 구성하였다. 그리고 구성된 레이저 간섭 시스템의 안정성 확인을 위하여 면내 회전을 측정으로 보정을 수행하였다. 또한 구성된 ESPI 시스템을 이용하여 처음에 받은 화상과 변형 후의 화상을 실시간으로 감산 처리하여 원판의 축방향 변형 간섭무늬를 획득하였다. 이 획득된 간섭무늬에서 위상이동법에 의하여 위상도를 생성하였으며 정량적 해석을 위해 위상도 펼침 작업을 통하여 미소 변형량을 3차원으로 나타내으며, 유한요소해석을

통하여 실험 결과값과 이론값을 검토한 결과 서로 잘 일치함을 알았다.

이러한 결과들을 활용하여 본 연구를 확장한다면 차체 판넬의 변형, 용접부의 결합, 연결 장치의 변형 등 현장에 존재하는 많은 부품의 변형을 실시간으로 측정할 수 있으며, 더 나아가 본 연구를 바탕으로 부재에 존재하는 잔류 응력을 측정하고 해석이 가능하리라 생각된다.

참 고 문 헌

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. J. W. Goodman, "Statistical properties of laser speckle patterns," *Laser Speckle and Related Phenomena*, edited by J. C. Dainty, Springer, Germany, 1975.
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. 강영준, 문상준, "면외 변위 측정을 위한 홀로그래픽 간섭계의 민감도 벡터의 오차해석," *한국 정밀공학회지*, Vol. 14, No. 6, pp. 128-134, 1997.