

레이저 스페클 간섭법을 이용한 면내변위 측정시스템 개발

윤홍석*(조선대 대학원 기계설계공학과), 김경석(조선대 기계설계공학과)
박찬주(조선대 대학원 기계설계공학과), 최태호(조선대 LARC), 최정석(목포과학대)

The Development of In-Plane Displacement Measurement System on Laser Speckle Interferometry

H. S. Yoon*(Gradugate School, Chosun Univ), K. S. Kim(Chosun Univ),
C. J. Park(Gradugate School, Chosun Univ), T. H. Choi(Chosun. LARC), J. S. Choi(Mokpo Science College)

ABSTRACT

The measurement method by Laser Speckle Interferometry which uses the interference law which will grow precedes and with it explains a resolution measurement ability and together the change of place arrowhead and general measurement, at real-time measurement sensitivity it has application boat song from candle precise measurement field it is increasing. But, currently the domestic application technique to sleeps and optical science military merit by optical science interferometer and directness it composes purchases to the level which it applies the expensive commercial business equipment the outside and in spite of the technical ripple effect is deficient even in many strong point. The hazard which complements like this problem point form technical development it leads from the research which it sees and an application degree and to sleep as the measurement equipment which tries to develop the small-sized optical science interference sensor and an interpretation program it raises it does.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry(전자처리 스페클 패턴간섭법), In-Plane displacement(면내변위), Tensile testing(인장실험)

1. 서론

레이저의 시간적, 공간적인 가간섭성을 이용한 스페클 간섭법(Speckle interferometry)에 대한 연구가 최근 국내외적으로 활발히 이루어지고 있다. 이러한 방식은 검사면의 전체에 광원을 조사하고 실시간으로 검사할 수 있을 뿐만 아니라 검사면 전체의 형상 및 응력 그리고 본 논문에서 다루고 있는 변위에 대한 측정까지 실시간으로 검사할 수 있다¹¹⁾. 스페클 간섭법은 간섭계의 형태에 따라 구조물의 면내·면외 변위 계측과 박막의 잔류응력 해석, 주파수 변화에 따른 진동 모드 해석 등에 이용할 수 있다. 레이저 스페클 간섭법을 이용한 측정 방법은 앞서 설명한바와 같이 비접촉, 전면측정,

실시간 측정으로 고감도 고분해능 측정능력을 가지고 있어 초정밀 측정분야에서의 활용도가 증가하고 있다¹²⁾. 그러나, 현재 국내 응용기술은 광학전공자에 의해 광학간섭계를 직접 구성하거나, 국외의 고가 상용장비를 구입하여 응용하는 수준으로 많은 장점에도 불구하고 기술과급효과가 미비하다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 자체 기술개발을 통해 소형의 광학간섭센서와 해석프로그램을 개발하여 보다 측정장비로서 활용도를 높이고자 한다. 본 논문에서는 면내변위 간섭계의 광학측정 메카니즘을 분석하여 센서 형태로 소형 간섭계로 구성을 하였으며, 스페클 간섭무늬의 정량분석을 위한 위상이동기법을 적용한 해석프로그램을 개발하였다.

2. In-plane ESPI의 측정 메카니즘

2.1 광경로 추적을 통한 변위 측정

Fig. 1은 면내변위 측정을 위해 본 논문에서 사용한 간섭계의 개략도이다. 조사되는 두개의 레이저광은 조사면에 대해 같은 각도 θ 로 두 방향에서 조사하게 되며, 조사된 레이저광은 각각 물체표면에서 스페클패턴을 형성하고 각 스페클 패턴은 다시 간섭하여 제 2의 스페클패턴을 형성하게 된다. 제 2의 스페클 패턴은 조사된 레이저광의 위상차에 의해 형성되며, 조사광의 광경로를 추적함으로써 물체 변위와 레이저광의 위상과의 상관관계를 규명할 수 있다. Fig. 2는 레이저로부터 결상면(Image plan, CCD camera)까지의 조사광 1(illumination 1)의 광경로를 나타낸 것이며, 이 때 광경로(δ_1)를 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} [d_z \cos \theta_i \cos \theta_d + d_x \cos \theta_v \cos \theta_d + d_x \sin \theta_i \sin \theta_d - d_x \sin \theta_v \sin \theta_d] \quad (1)$$

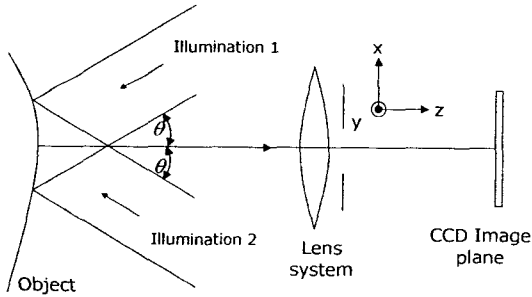


Fig. 1 In-plane displacement sensitive interferometer

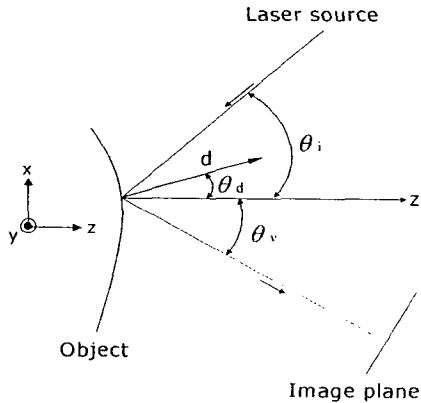


Fig. 2 Optical path tracing

여기에서 λ 는 레이저의 파장, d_z 는 물체의 z 축 방향의 변위, d_x 는 물체의 x 축방향의 변위이다. 간섭계에서는 결상면을 수직으로 위치하고, 물체와 결상면과의 측정거리가 크므로 $\theta_i \approx 0$ 이 될 수 있다. 따라서 식(1)은 식 (2)와 같이 쓸 수 있게 된다.

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} [d_z(1 + \cos \theta_i) \cos \theta_d + d_x \sin \theta_i \sin \theta_d] \quad (2)$$

광로2(illumination 2)에 대해서 광경로 차이를 다시 유도하면 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} [d_z(1 + \cos \theta_i) \cos \theta_d - d_x \sin \theta_i \sin \theta_d] \quad (3)$$

면내 변위 측정간섭계에서는 두 개의 조사광의 광로차에 의해 제 3의 스페클이 형성되며, 이 때의 위상차(ϕ)를 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\phi = \delta_1 - \delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} [d_x \sin \theta_i \sin \theta_d] \quad (4)$$

즉, 면내변위 측정간섭계에서 면외변위 성분(d_z)은 제거가 되며 변위의 면내변위 성분(d_x)만을 측정할 수 있게 된다. 변위성분에 대해서 식(4)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$d_x = \frac{\phi}{\sin \theta_i \sin \theta_d} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \quad (5)$$

2.2 간섭무늬로부터 위상추출

식(5)에서 물체의 변위에 따른 광 위상차는 조사광 1과 2의 스페클간의 간섭에 의해 제3의 스페클이 형성되면서 나타나게 되며, 이때 간섭현상을 수식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi \quad (6)$$

여기에서 I : 간섭에 의한 광강도분포, I_1 : 조사광 1의 광강도 분포, I_2 : 조사광 2의 강도분포이다.

식(6)으로부터 위상차를 추출하기 위해서는 미지수가 3개(I_1 , I_2 , ϕ)이므로 식(6)으로부터 직접 위상차를 구할 수 없게 된다. 즉, 위상을 추출하기 위해 최소한 3개의 방정식이 필요하게 된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 Piezo-electro transducer(PZT)를 이용한 위상변조 기법을 사용하고 있으며^[3], 본 논문에서도 $\pi/2$ 간격으로 위상을 변조하여 4개의 방정식을 얻어 위상을 추출하는 4-bucket phase shifting method를 사용하였다^[4]. PZT에 의해 위상변조된 4개의 광강도분포를 식(7)과 같이 쓸 수 있으며, 각 이미지는 PC에 기록이 되고 식(8)과 같은 처리를 통하여 위상차를 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_{dc} + I_m \cos \phi \\ I_2 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \pi/2) \\ I_3 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + \pi) \\ I_4 &= I_{dc} + I_m \cos(\phi + 3\pi/2) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $I_{dc} = I_1 + I_2$ 이고, $I_m = 2\sqrt{I_1 I_2}$ 이다.

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (8)$$

ESPI에서 물체의 변형을 측정하는 변형 전후의 물체의 레이저의 광로변화를 구함으로서 가능하다. 즉 물체의 변형에 의한 위상변화를 $\Delta\phi$ 라고 할 때, 물체 변형 후에 형성된 제 3의 스펙클 패턴은 식(9)와 같이 쓸 수 있다.

$$I_{def} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi + \Delta\phi) \quad (9)$$

물체의 변형위상에 의한 최종위상($\phi + \Delta\phi$)은 식(7)과 식(8)을 적용하여 추출할 수 있다. 물체의 변형에 의한 위상변화($\Delta\phi$)는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = I_{def} - I = (\phi + \Delta\phi) - \phi \quad (10)$$

최종적으로 식(10)에 의해 구하여진 변형위상을 이용하여 식(5)에 대입함으로써 물체의 변형을 구할 수 있게 된다. 식(6)과 식(9)의 감산처리에 의해 스펙클 상관간섭무늬(Speckle Correlation Fringe Pattern)가

구하여지고, 식(10)에 의해 위상지도(Phase map)가 구하여 진다. 이 위상지도는 arc-tangent 함수의 특성으로 주기가 $0 \sim \pi$ 에서 점핑(Jumping)이 일어나며, 불연속의 위상을 연속위상으로 변환하기 위해 결렬참(Unwrapping)이 필요하다^[5]. 본 논문에서는 1차원 결렬참을 적용하여 변위를 추출하였다^[6].

3. In-plane ESPI 측정 시스템 구성

개발장치는 변위 측정을 하는 센서부와 센서 컨트롤을 담당하는 컨트롤 박스의 두 부분으로 이루어져 있다. 데이터의 실시간 처리를 위해 컨트롤 박스 부분에 PC와 연결하여 측정과 동시에 해석이 가능하도록 설계하였다. 본 연구에 사용된 광학계 구성은 면내 변위 측정을 위한 것으로 평면배치도를 Fig. 2에 나타냈다. 레이저광의 간섭을 이루기 위해 하나의 레이저광을 Beam splitter로서 분리하여 두 개의 경로를 갖도록 하였다. 분리된 광은 Mirror 1과 Mirror 2에 의해서 시편에 조사되고 측정대상체의 물체 변위정보가 CCD 수광소자를 통해 저장되게 하였다. 실험에 사용된 광원은 파장이 532 nm인 Nd:YAG Laser를 사용하였다. Fig. 3은 레이저빔을 광파이버로 연결하여 면내변위 센서에 들어가게 되고 대상체에 조사된후 CCD 카메라를 통해 저장되고 PZT Controller와 PC를 거쳐 실시간으로 변형정보를 확인할수 있도록 한 화상정보처리 시스템의 구성을 나타낸 것이다.

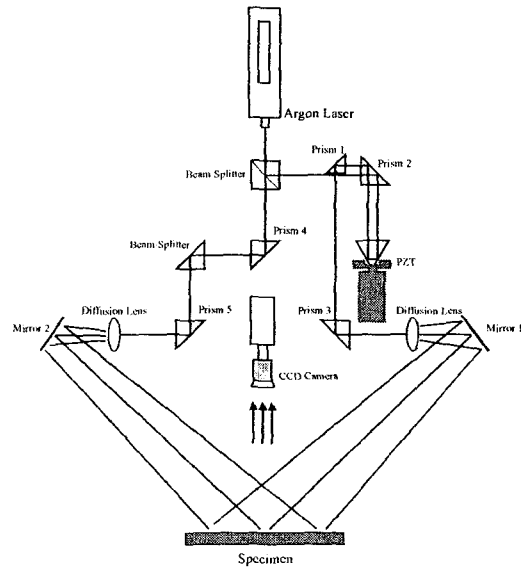
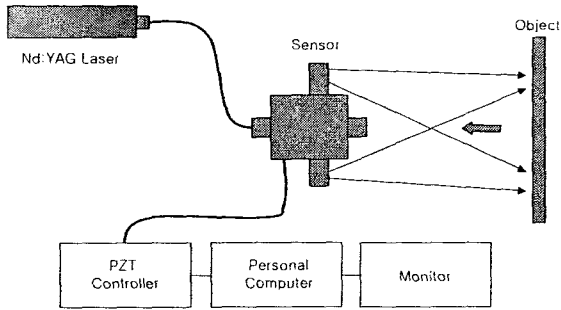


Fig. 2 Optical configuration for measuring in-plane displacement



[Fig. 3] Image processing system

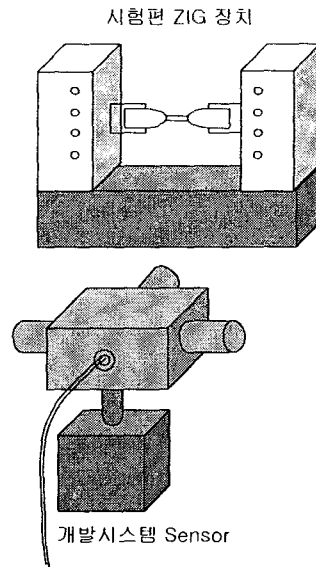
4. 개발시스템의 적용실험 및 실험결과

4.1 개발 시스템의 적용실험

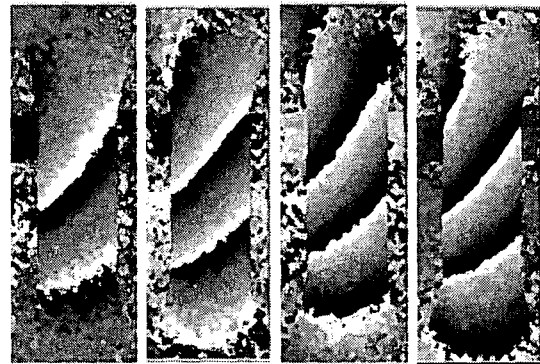
Fig.5는 개발된 면내변위 계측 시스템의 센서의 성능을 평가하기 위한 방법으로 알루미늄 시험편을 대상체로 하여 간섭이 잘 되도록 두개의 빔을 조절하여 실험한 것이다. CCD를 통해 들어온 변위정보를 이미지 프로세싱하여 변위정보를 저장하고, 3D이미지로 표현하여 변형정보를 확인하였다. Fig.4는 면내변위 개발 시스템에 대한 사진이다.



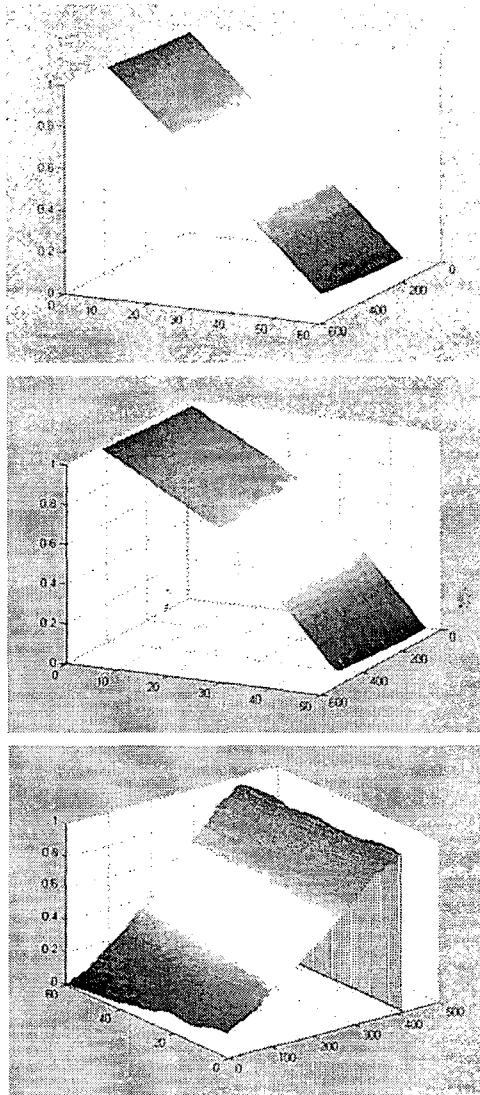
[Fig. 4] In-Plane displacement measurement system



[Fig. 5] 알루미늄 시험편을 이용한 Zig장치와 개발시스템의 Sensor



[Fig. 5] Phase map of In-Plane displacement measurement system



[Fig. 6] 3D Image

4.2 실험결과

면내변위를 측정하기 위하여 인장시험기로 일정량의 인장력을 가해 주었을시에 나타나는 Phase map를 Fig. 5와 같이 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 6과 같이 3D 이미지로 입체적으로 표현하여 인장을 가해 주었을시에 변형이미지를 확인할 수 있었다.

5. 결론

면내변위를 측정할 수 있는 소형 간섭계를 구성하여 스페클 패턴을 이용하여 측정부 전체의 변형형상 상태를 측정할 수 있었으며 비접촉식, 전면의 측정

이 가능하였다. 또한 면내변위 구성시 광로변화로 인한 대상체의 조사된 광량이 일정치 않음을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Cloud, G.L., Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge University Press, Chapter 21, 1990.
- [2] Moore, A.J. and Tyrer, J.R., "An Electronic speckle pattern interferometry for complete in-plane displacement measurement," Measurement science and technology, Vol. 1, pp. 1024-1030, 1990.
- [3] Creath, K., "Phase-shifting Speckle Interferometry.", Applied Optics·Vol. 24, pp. 3053, 1985.
- [4] Edited by Robinson, D.W. and Reid, G.T., "Interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques", Institute of Physics Publishing, Philadelphia, Chapter 4, 1993.
- [5] Cloud, G.L., Optical Methods of Engineering Analysis, Cambridge University Press, Chapter 22, 1990.
- [6] 장순석, 김정석, 홍진후, 최지은, 강기수, 김달우, "광학적 비접촉 측정에 의한 구조물 해석의 화상 처리 계측 시스템 개발에 관한 연구? 한국정밀공학회지, 제 18권, 제 7호, pp.149-154, 2001.