한국정밀공학회지 제 24 권 제 11 호 (2007 년 11 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 11, November 2007

◆특집◆ 레이저 계측

두 종류의 레이저와 스페클법을 이용한 변형 측정

김경석*, 정현철*, 장수옥**, 정성욱***, 최태호***, 장호섭***

Displacement Measurement by Using Laser of Two Type and Speckle Method

Kyoung-Suk Kim*, Hyun-Chul Jung*, Su-Ok Jang**, Sung-Wook Jung***, Tae-Ho Choi***
and Ho-Sub Chang***

Key Words : Speckle Method (스페클법), Beating Moire Method (2중 파장 무아레 방법), Displacement(변형), In-plane interferometer (면내간섭계), Complex wavelength (합성파장)

1. 서론

현대 산업사회는 고정밀과 첨단화를 추구함에 따라 고정밀의 가공기술과 계측기술이 요구되고 있다. 이러한 기술의 요구에 따라 고정밀의 가공기술에 따르는 고정밀 계측기술들이 급속히 발전을 해왔다. 그 가운데 기계공학 분야에서는 실제 구조물의 변형상태와 응력 상태를 결정하기 위해 변위의 측정은 매우 중요하다. 물체의 변형을 측정하는 방법에는 접촉식인 스트레인 게이지를 이용하는 방법과 광학적인 방법인 광탄성과 모아레 기법이 사용되고 있다. 최근에는 레이저의 발달로 홀로그래피(Holographic Interferometry), 전단간섭법(Shearography: Speckle Shearing Interferometry), 전자스페클패턴간섭법(ESPI: Electronic Speckle Pattern Interferometry) 등이 기계공학에서 응용되어 높은 정밀도를 가지고 변형측정에 사용되고 있다.[1,2] 이와 같은 광 계측 기법 중에서 ESPI 기법이 비접촉식으로 대상물의 전 영역에 걸쳐 변형에 대한 계측, 진동해석, 비파괴 검사 연구와 더불어, 산업체에 대한 적용방법의 개발과 인식의 확산 등으로 활용도가 높아지고 있으며, 지금까지의 연구를 통해 신뢰성을 인정받고 있다.[3]

ESPI 기법은 레이저의 시간적, 공간적인 가간섭성을 이용한다. 이 기법은 수 ㎛단위까지의 변형 측정이 가능한 고정밀 계측 기법이다. 이 기법은 레이저 스페클 법을 적용하여 대상물에 외력을 가했을 때 줄무늬(fringe) 형태로서 변형을 측정하며, 레이저의 파장에 따라 측정 가능한 변형의 범위가 정해져 있다. 따라서 외력을 가했을 때 측정 가능한 영역에서 벗어나는 큰 변형이 발생하면 너무 조밀한 줄무늬(fringe) 형태로 인해 해석이 불가능하게 되는 현상이 발생하게 되어 변형을 측정하는데 어려움이 있다.

이와 같은 대변형의 변형을 측정하기 위해 본 연구에서는 면내간섭계(In-Plane Interferometer)를 구성하고 2 중 파장 무아레 기법(Beating Moire Method)의 측정개념을 적용하였다. 그리하여 ESPI 기법에서 과도한 변형으로 조밀한 줄무늬(fringe)가 발생하였을 때의 변형을 측정하기 위해 파장이 다른 두 종류 레이저를 사용하여 변형을 측정하고자 한다.

* 조선대학교 기계설계공학과
Tel. 062-230-7004, Fax. 062-230-7838
Email gsckim@chosun.ac.kr
레이저 스페클에 의한 변형의 계측 및 결함의 검출, 진동해석 등에 관하여 연구활동을 하고 있다.
** 조선대학교 일반대학원 첨단부품소재공학과
*** 조선대학교 레이저응용 신기술개발 연구센터

2. 이론

2.1 스페클패턴간섭계의 원리

ESPI 은 집속성과 간섭성이 우수한 레이저 광원을 바탕으로 광학 간섭계를 구성하여 물체광과 참조광을 합성시킴으로써 물체의 변위량에 따라 발생하는 간섭 줄무늬를 해석하는 방법이다. 광학적으로 거친 물체 표면에 간섭성이 우수한 레이저 광원이 조사되면 물체표면에서 난반사가 일어나고, 이 난반사 된 빔들이 서로 간섭하면서 스페클 현상이 발생하는데 이러한 스페클은 빛의 휘도 분포로 물체 변위에 대한 중요한 위상정보를 갖게 되며, 그 위상 값은 CCD(Charged Coupled Device) 카메라와 화상처리 장치를 통해 변위의 정보로 바뀌게 된다.[4]

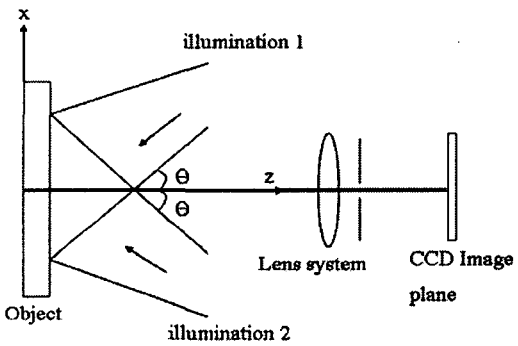


Fig. 1 In-plane displacement sensitive interferometer

Fig. 1 은 면내변위 측정을 위해 본 논문에서 사용한 간섭계의 개략도이다. 두 개의 레이저광이 조사 면에 대해 같은 조사 각도로 두 방향에서 조사되면, 조사된 레이저광에 의해 물체표면에서 스페클 패턴을 형성하게 된다. 이 스페클 패턴은 조사된 레이저광의 위상 차에 의해 형성되며, 조사광의 광 경로 차이를 구하면 물체 변위와 레이저광의 위상과의 상관관계를 다음과 같이 식 (1)으로 규명할 수 있다.[5]

$$\Delta\phi = (4\pi/\lambda) d_x \sin\theta \qquad (1)$$

여기서 $\Delta\phi$ 는 물체변위와 레이저광의 위상차, λ 는 레이저의 파장, d_x 는 물체의 x 축방향의 변위이다.

2.2 위상이동방법

전자제어 시스템을 이용한 위상이동장치를 사용하여 스페클 패턴의 강도를 측정하여 파면의 위상을 얻어낼 수 있다. 가장 많이 보편적으로 사용되는 위상이동 기술은 참조광의 경로상에 있는 거울에 압전소자(PZT)를 붙이고, 이 압전소자를 정밀 제어한 후, CCD 카메라에 입사되는 영상을 이용하여 결과를 얻어낸다. Fig. 2 는 PZT 를 이용한 참조광 위상이동장치를 이용한 간섭계의 개략도를 나타내고 있다.[6]

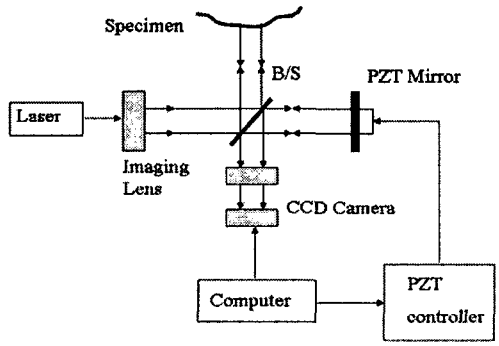


Fig. 2 Schematic of ESPI using PZT mounted mirror as phase shifter

일반적인 간섭줄무늬 패턴으로는 대상물의 변형을 정량적으로 해석할 수 없으며, 단지 시각적으로 대략적인 변형의 추정만이 가능하다. 식 (2)는 두 레이저광의 합성광의 밝기분포를 표현한 식이다. 식 (2)에서는 세 개의 미지수 I_o, γ_o, ϕ 가 있으므로, 이 미지수를 구하기 위해서는 3 개 이상의 식이 필요하게 된다.[7]

$$I = I_o(I + \gamma_o \cos\phi) \qquad (2)$$

여기서 I 는 간섭에 의한 광강도분포, I_o 는 빛의 세기, γ_o 는 간섭줄무늬 선명도이다.

여러 가지 위상 계산 알고리즘 중 일반적으로 많이 사용하는 4-프레임 기법을 적용하여 기록되는 4 개의 이미지의 각 화소별 세기는 다음 식 (3)과 같다.

$$I_1 = I_o(1 + \gamma\cos\phi)$$
$$I_2 = I_o[1 + \gamma\cos(\phi + \pi/2)] = I_o[1 - \gamma\sin\phi]$$
$$I_3 = I_o[1 + \gamma\cos(\phi + \pi)] = I_o[1 - \gamma\cos\phi]$$

$$I_4 = I_o\left[1+\gamma\cos(\phi+3\pi/2)\right] = I_o\left[1+\gamma\sin\phi\right] \quad (3)$$

식 (3)과 같이 4 개의 밝기 분포를 이용하여 대상체의 변위와 위상정보를 정량적으로 계산할 수 있다. 각 점에서의 위상은 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1}\left\{(I_4 - I_2)/(I_1 - I_3)\right\} \quad (4)$$

2.3.2 중 파장 간섭법

2 중파장 간섭법은 두 개의 유사한 피치를 갖는 격자를 사용하여 맥놀이 효과를 얻는 방법이다. 맥놀이 현상과 같은 2 중 파장원리를 사용하기 위해서는 2 개의 파장이 필요하므로 각각 다른 파장을 가진 레이저를 사용하였다.[8,9] Fig. 3 은 각각의 레이저 파장에 의한 변형 위상지도 프로파일을 나타낸 것이다.

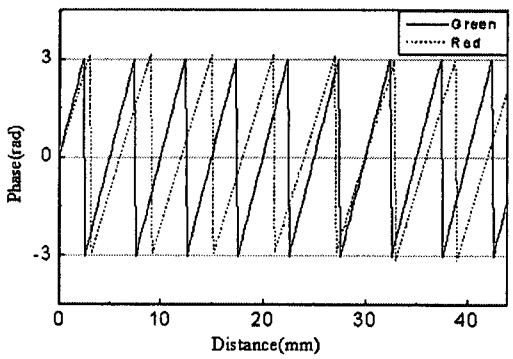


Fig. 3 Deformation phase profile

파장이 다른 두 레이저를 사용하여 얻어진 프로파일을 사용해서 맥놀이 효과를 얻는 방법은 다음과 같다.

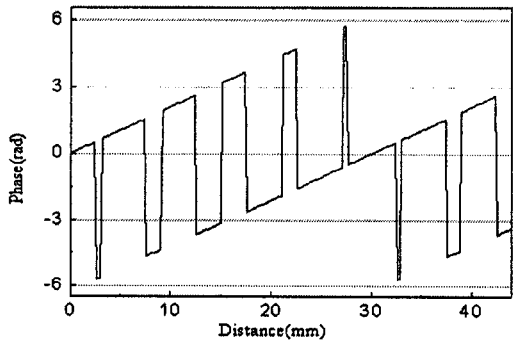
$$\lambda_3 = \lambda_1\lambda_2/\left|\lambda_2 - \lambda_1\right| \quad (5)$$
$$\phi_3 = \Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 + 2\pi \quad (\text{if } \phi_3 < 0)$$

여기서 λ_1 : green 레이저의 파장길이, λ_2 : red 레이저의 파장길이, $\Delta\phi_1$: λ_1 의 변형 위상, $\Delta\phi_2$: λ_2 의 변형 위상, λ_3 : 맥놀이 현상으로 형성된 합성파장, ϕ_3 : 합성파장의 위상이다.

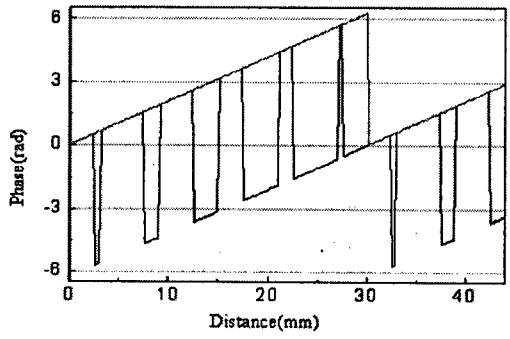
Fig. 3 에서 얻어진 각 파장의 감산결과의 프로파일과 합성파장을 Fig. 4 에서 나타내었다. 식 (5)에 의해 합성파장에서의 변형량 값을 다음 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$\Delta\phi_3 = (\phi_{31} - \phi_{32}) + 2N\pi$$
$$\delta_{total} = \left\{(\phi_{31} - \phi_{32}) + 2N\pi\right\}\lambda_3/2\pi \quad (6)$$

여기서 ϕ_{31} : 합성파장 위상의 첫 번째 위치, ϕ_{32} : 합성파장 위상의 두 번째 위치이다. N: 합성파장의 주기 차수를 나타내고, 만약 ϕ_3 의 기울기가 (+)이면 N 의 부호는 (-), ϕ_3 의 기울기가 (-)이면 N 의 부호는 (+)이다.



(a) Subtraction of profile



(b) Complex wavelength

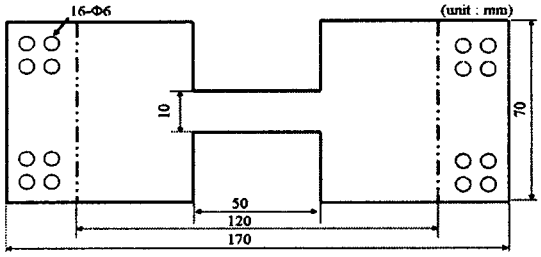
Fig. 4 Subtraction and complex wavelength

3. 실험장치 및 실험결과

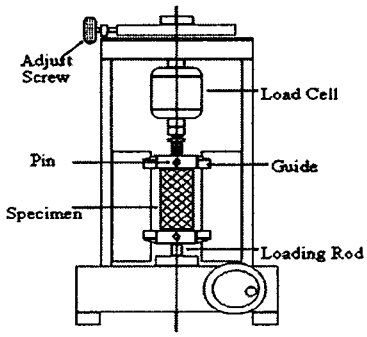
3.1 실험장치 구성 및 방법

본 연구에서는 파장대가 비슷한 두 레이저를 사용한 면내간섭계를 구성하였으며, 레이저는 파장이 532nm 인 Nd:YAG 레이저와 632nm 인 He-Ne 레이저를 사용하였다. 변형의 정량 해석을 위해

시험편은 STS304 를 사용하였고, Fig. 5 에서 표현한 것과 같이 170mm×70mm, 두께 1mm 인 인장 시험편을 만들고, 양변을 인장 시험장치에 고정하였다.



(a) Specimen



(b) Tensile loading device

Fig. 5 Specimen and the tensile loading device

두 레이저를 사용하기 위해 각각의 레이저 조사방향에 Beam Splitter 를 추가로 설치하였으며, 면내간섭계의 전체적인 구성은 Fig. 6 와 같다. ESPI 의 측정 영역을 벗어나는 변형량을 측정하기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다.

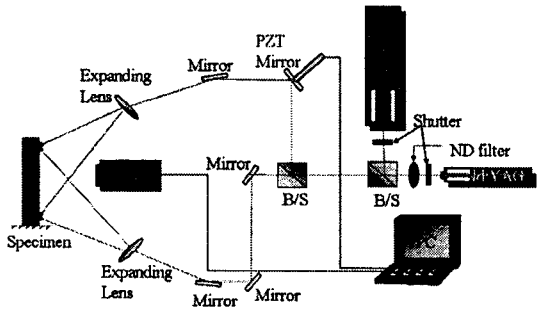


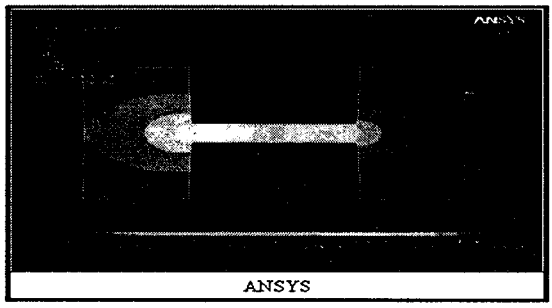
Fig. 6 Schematic of the tensile loading device and the In-plane interferometer

인장시험기에 인장시험편의 양변을 고정하고 인장력을 가한 후 CCD 카메라를 이용하여 줄무늬의 형태를 관찰하였으며, 변형부분에 줄무늬 형상이 나타낼 때와 나타나지 않을 때를 측정하면서 실험을 하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 합성파장의 차수변화가 없을 때

앞에서 언급한 바와 같이 두 레이저를 사용 한 후 시험편에 인장력을 주어 면내간섭계의 측정영역 내의 부분을 측정하였고, 그 결과인 레이저 파장에 따른 위상지도와 유한요소해석법으로 동일한 시험편에 인장을 가했을 때를 다음 Fig. 7 에 나타내었다. 여기서 유한요소해석법은 변형의 형태만 분석하고자 실시하였다.



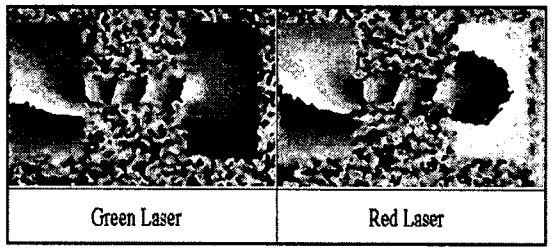
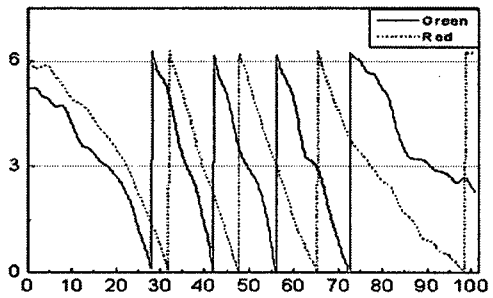


Fig. 7 ANSYS result and phase map of specimen

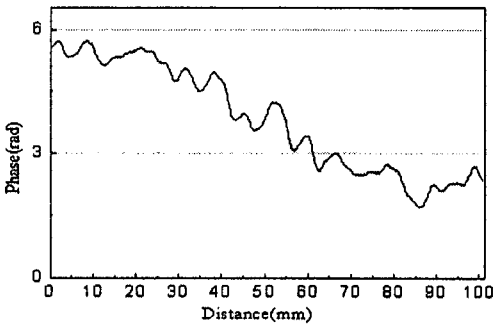
Fig. 7 에서 보는 바와 같이 각각의 위상 지도와 유한요소해석법의 결과와 비슷한 것을 볼 수 있으며, 레이저 파장에 따라 줄무늬의 형태가 다르게 나타난 것을 볼 수 있다.

본 실험에서는 시험편에 가해진 인장력이 48.8N 일 때 두 레이저에 의한 합성파장의 차수가 한 차수 이하일 때의 변형을 측정하였다. 여기서 식 (5)에 의해 합성파장의 길이 $\lambda_3 = 3.36\ \mu m$ 이 된다.

Fig. 8 은 한 차수 이하의 합성파장이 생길 때의 변형 위상지도 프로파일과 합성파장을 나타낸 것이다. Fig. 8(b)의 합성파장의 두 위치의 위상 값을 이용, 식(6)에 대입하면 변형량을 계산할 수 있다. 따라서 합성파장에 의한 시험편 전체에 발생하는 변형량 값은 2.53 μm 가 된다. 또한 변형률 (ε)은 4.36×10^{-5} 가 된다. 동일한 부분에 각각의 레이저 파장에 따른 변형 값은 Red 일 때 2.54 μm , Green 일 때 2.50 μm 이다.



(a) Deformation phase profile



(b) Complex wavelength

Fig. 8 Deformation phase map and complex wavelength

3.2.2 합성파장 차수변화가 한 번일 때

Fig. 10 은 시험편에 인장력을 66.6N 으로 가했을 때 측정한 결과인 위상지도와 각각의 변형 위상지도 프로파일과 합성파장을 나타낸 것이다. Fig. 10(b)의 합성파장에서 두 위치의 위상 값을 이용한 변형량 값은 3.52 μm 이고, 변형률(ε)은 6.06×10^{-5} 이며, 각각의 레이저 파장에 따른 변형 값은 Red 일 때 3.48 μm , Green 일 때 3.49 μm 이다.

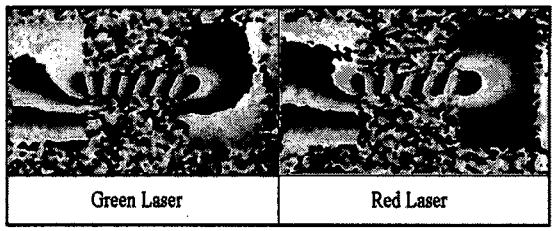
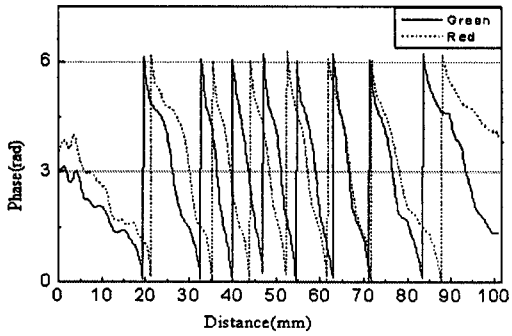
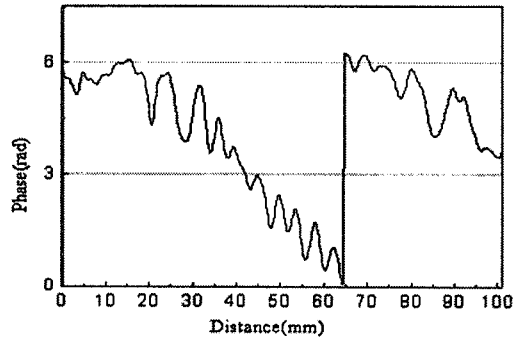


Fig. 9 Phase map of specimen



(a) Deformation phase profile



(b) Complex wavelength

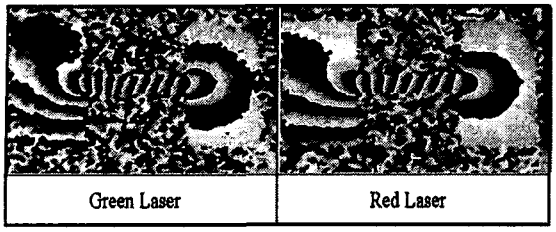
Fig. 10 Deformation phase map and complex wavelength

3.2.3 합성파장 차수변화가 두 번일 때

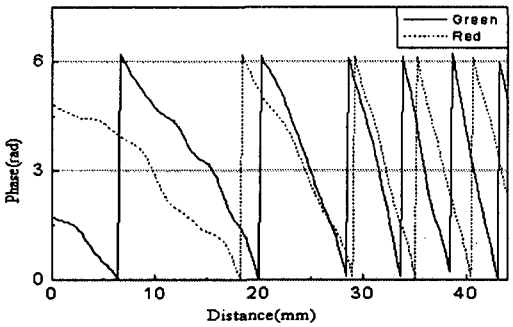
본 실험에서는 시험편에 인장력을 103.9N 으로 주어 합성파장이 두 차수가 나타났을 때 합성파장을 이용하여 변형 값을 측정하였다.

Fig. 11 은 두 차수의 합성파장이 나타날 때의 위상지도와 변형 위상 지도 프로파일을 나타내고 있다.

Fig. 12 은 각 파장 프로파일의 감산과 두 파장에 의해 생긴 합성파장을 나타내고 있다. Fig. 12(b)의 합성파장의 두 위치의 위상 값을 이용하여 변

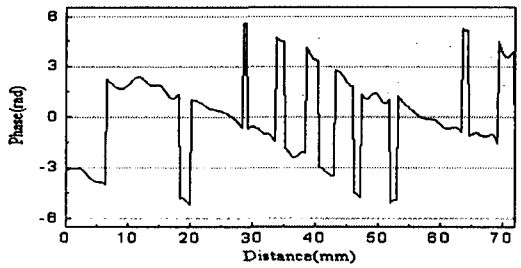


(a) Phase map of specimen

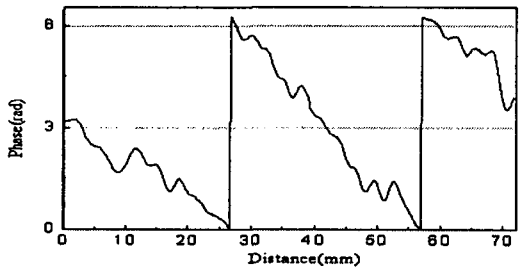


(b) Deformation phase profile

Fig. 11 Phase map and deformation phase profile



(a) Subtraction of profile

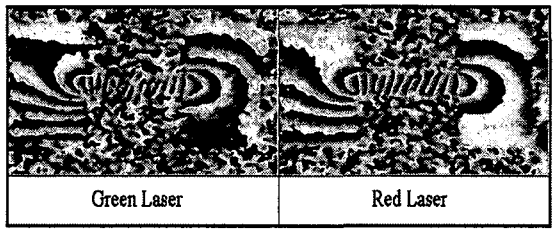


(b) Complex wavelength

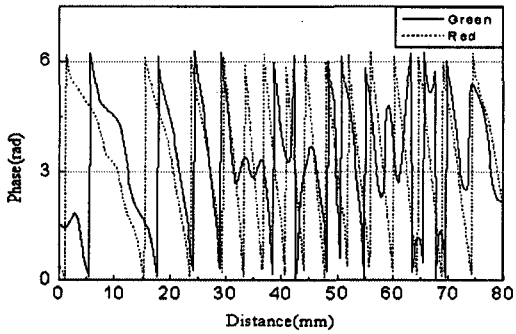
Fig. 12 Subtraction and complex wavelength

형 값을 측정 할 수 있다. 따라서 합성파장에 의해 시험편 전체에 생기는 변형량 값은 5.40 μm 가 된다. 또한, 변형률 (ε)은 9.31×10^{-5} 이다. 동일한 부분의 각각 레이저 파장에 따른 변형 값은 Red 일 때 5.40 μm, Green 일 때 5.35 μm 이다.

3.2.4 합성파장 차수변화가 불분명할 때



(a) Phase map of specilmen

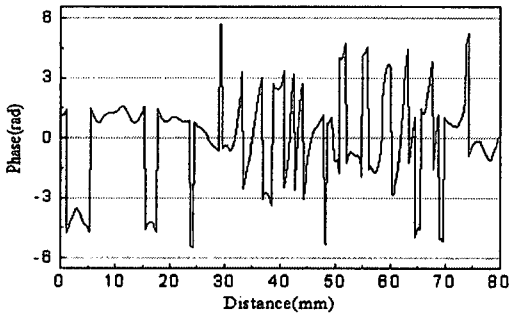


(b) Deformation phase profile

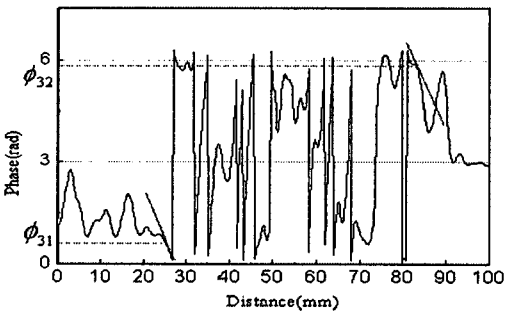
Fig. 13 Phase map and deformation phase profile

본 실험은 큰 변형이 생겼을 때 프린지 형상이 보이지 않을 경우에 변형 값을 측정하기 위해 앞 절에서보다 더 큰 인장력(154.8N)을 가하여 동일한 방법으로 측정을 하였고, Fig. 13 에 각각의 레이저 파장에 따른 위상지도와 두 레이저 파장에 의한 변형 위상지도 프로파일을 나타내었다. Fig. 13(a)에서 Green 레이저의 위상지도와 같이 프린지 형상이 너무 조밀한 형태로 나오거나 Fig. 13(b)에서의 위상프로파일이 Red 레이저만 보이게 되면 그 부분의 변형량을 측정할 수 없게 된다. 또한, λ_1 과 λ_2 의 위상 지도 획득 결과에서 그 경계가 불분명할 때 식 (6)에서 N 의 정확한 수치를 알 수 없게 된다. 따라서 본 논문에서는 역학적 거동 해석으로 N 의 수치결과를 유도하였다. 본 논문에

서 제시된 방법에 적용을 시키면 조밀한 줄무늬 형태로 인해 해석이 불가하였던 부분의 변형량을 측정할 수 있다.



(a) Subtraction of profile



$y_1 = 0.022x + 1.170$, $y_2 = 0.031x + 5.613$

(b) Complex wavelength

Fig. 14 Subtraction and complex wavelength

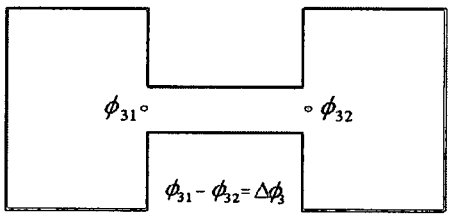


Fig. 15 Position of comlex wavelength

Fig. 14 은 각 파장 프로파일의 감산, 두 파장에 의해 생긴 합성파장, 그리고 합성파장의 두 위치를 나타내고 있다.

Fig. 15 의 합성파장의 두 위치의 위상 값을 이용하고 역학적 거동해석에 의해 N 을 유도하고 식 (6)에 대입하여 변형량을 구하였다. 따라서 시험편에 ϕ_{31} , ϕ_{32} 부분의 합성파장에 의한 변형 값은 8.09 μm 이다. 또한, 변형률(ε)은 1.39×10^{-4} 이다. 동일 부분의 레이저파장에 따른 변형 값은 Red 일 때 8.05 μm , Green 일 때 구할 수 없다.

3.2.5 고찰 – 그린레이저로 측정하지 못한 경우에 대하여 설명

Table 1 은 하중에 따라 합성파장에 의해 측정된 변형량과 두 레이저에 의해 측정된 변형량을 비교한 것이다. Table 2 은 Red 레이저로 측정된 변형량을 기준으로 Green 레이저와 합성파장으로 측정된 변형량의 오차를 나타낸 것이며, Table 2 에서 합성파장에 의해 측정된 변형량 데이터의 신뢰성을 확인하였다.

Table 1 Deformation comparison by load

Load (N)	0.532 (μm)	0.632 (μm)	Complex(3.36) (μm)
48.8	2.50	2.54	2.53
66.6	3.49	3.48	3.52
103.9	5.35	5.40	5.40
154.8	-	8.05	8.09

Table 2 Error of green laser and complex

Load	0.532	Complex(3.36)
48.8N	1.5%	0.4%
66.6N	0.3%	1.1%
103.9N	0.9%	0%
154.8N	-	0.4%

4. 결론

본 연구에서는 면내간섭계를 구성하고 2 중 파장 간섭법을 적용하여 생긴 합성파장에 의해 상대적으로 대변형이 일어나는 부분의 변형을 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 합성파장을 이용한 변형 측정결과의 오차가 약 1% 임을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 방법을 이용하면 상대적으로 큰 변형의 측정이 가능하며, 비접촉 소성해석에 ESPI 기법의 적용이 가능할 것이라 예상된다.

후 기

이 논문은 2007 년도 산업자원부 한국산업기술평가원지정 지역혁신센터인 조선대학교 산학협력단 레이저 응용 신기술개발 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구 되었음.

참고문헌

1. Gasvik, K. J., "Optical Metrology," Third Edition, John Wiley & Sons Ltd, pp. 193-212, 2002.
2. Jones, R. and Wykes, C., "Holographic and Speckle Interferometry," Cambridge University Press, pp. 165-196, 1989.
3. Kim, K. S., Kim, D. I., Jung, H. C., Kang, K. S., Lee, C. W., Yang, S. P. and Jang, S. S., "Comparison of In-Plane Measurement of Phase-Shifting with Time-Average Method," J. KSPE, Vol. 16, No. 10, pp. 53-58, 1999.
4. Kim, K. S., Back, S. K., Akhter, N., Jung, H. C. and Choi, J. S., "Measurement of Distributed Stress Butt Welding using Speckle Interferometery," KSPE Autumn Confrerence, pp. 329-330, 2006.
5. Kang, Y. J., Lee, J. S., Park, N. K. and Kwon, Y. K., "Ideal Phase map Extraction Method and Filtering of Electronic Speckle Pattern Interferometry," J. of KSPE, pp. 20-26, 2002.
6. Creath, K., "Temporal Phase Measurement Methods, in interferogram Analysis: Digital Fringe Pattern Measurement Techniques," IOP Publishing, pp. 94-140, 1993.
7. Malacara, D., Servin, M. and Malacara, Z., "Interferogram Analysis for Optical Testing," CRC Press, pp. 381-408, 1998.
8. Kang, Y. J., Ryu, W. J., Rho, H. M. and Lee, D. H., "A Study on 3-D Shape Measurement and Application by using Digital Projection Moire(I)," J. KSPE, Vol. 22, No. 7, pp. 89-90, 2005.
9. Kim, S. W., Oh, J. T., Jung, M. S. and Choi, Y. B., "Two wavelength Phase Shifting Projection Moire Topography for Measurement of Three Dimensional Profiles with High Step Discontinuities," The Korean Society Mechanical Engineers A, Vol. 23, No. 7, pp. 1129-1138, 1999.