

## ◆특집◆ 레이저 계측

## 레이저 스펙클 간섭계를 이용한 광계측

김명수\*, 백태현\*\*

## Optical Measurement Using Laser Speckle Interferometry

Myung Soo Kim\* and Tae Hyun Baik\*\*

**Key Words** : Non-contact measurement (비접촉 측정), Optical measurement (광계측), Phase-shifting method (위상 이동법), Speckle interferometry (스펙클 간섭계)

## 1. 서론

광신호를 이용한 광계측은 다양한 과학기술 분야에서 활용되고 있다. 광계측의 장점은 광신호의 2 차원 신호처리 특성을 이용하여 전시야 측정(whole-field measurement)이 가능하고, 또한 광신호의 반사 혹은 투과 현상을 이용하여 비접촉 측정(non-contact measurement)이 가능하다는 점이다. 광계측에 사용하는 광신호는 레이저로부터 얻을 수 있는 코히어런트 광신호(coherent optical signal)와 레이저 이외의 광원으로부터 얻을 수 있는 인코히어런트 광신호(incoherent optical signal)로 대별할 수 있다. 기계공학에서 코히어런트 광신호를 활용한 광계측은 레이저와 스펙클 간섭계(speckle interferometry)를 이용한 미소변위 측정<sup>1,2</sup> 등이 있으며, 인코히어런트 광신호를 활용한 광계측은 나트륨 램프(sodium vaped lamp)와 광탄성법(photoelasticity)을 이용한 응력 측정<sup>3,4</sup> 등이 있다.

레이저와 스펙클 간섭계를 활용한 광계측은 스펙클 간섭계에 의한 광신호의 간섭무늬(inter-

ference fringe)와 영상처리 알고리즘을 이용하여 미소변위에 대한 정보를 추출하는 기법으로서 광학 및 전자공학이 기계공학에 응용된 기술이다. 위상 이동법(phase-shifting method)<sup>5</sup>은 스펙클 간섭계에 적용되어 정밀한 미소변위에 대한 정보를 쉽게 추출할 수 있기 때문에 널리 활용되고 있다. 즉, 스펙클 간섭계에서 시편에 조사되는 광신호에 위상 이동법에 의하여 인위적으로 위상차를 만들고, 생성된 간섭무늬에는 영상처리 알고리즘을 적용하여 미소변위를 측정한다. 본 논문에서는 스펙클 간섭계에 4 단계 위상이동법과 위상이동법의 한 종류인 방향 푸리에 변환법(directional Fourier Transform)을 적용하여 미소 면의 변위(out-of-plane displacement)와 미소 면내 변위(in-plane displacement)의 측정 실험을 수행하고, 실험에 의한 측정 결과와 이론에 의한 계산 결과의 고찰에 대하여 기술한다.

## 2. 광계측에 위한 면내변위 측정

## 2.1 4 단계 위상이동법

Fig. 1 과 같이 면내변위를 측정할 수 있는 스펙클 간섭계에서는 레이저로부터 출력된 2 개의 광신호가 시편에 조사된다. 조사된 광신호는 간섭현상에 의하여 다음과 같은 간섭무늬의 광신호의 세기  $I_i$ 로 CCD 카메라에 입력된다.

$$I_i = I_0 + I_c \cos(\phi(x, y) + \alpha_i) \quad (1)$$

\* 군산대학교 전자정보공학부

\*\* 군산대학교 기계공학부

Tel. 063-469-4714, Fax. 063-469-4727

Email thbaek@kunsan.ac.kr

실험응력해석 및 광역학에 관해 관심을 갖고 지속적인 연구를 수행하고 있다.

여기서  $I_0$  는 간섭무늬의 평균 광세기이며,  $I_c$  는 간섭무늬의 대비값(contrast),  $\phi(x, y)$  는 시편의 변위에 의하여 발생한 접힌위상(wrapped phase)이다.  $\alpha_i$  는 스펙클 간섭계에 위상이동법을 적용할 경우 PZT(piezoelectric transducer)에 의하여 추가되는 위상값을 의미한다. 4 단계 위상이동법에서  $\alpha_i = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  라디안(radian)으로 주어진다. 각각의  $\alpha_i$  값에 대한 간섭무늬의 세기를 순차적으로  $I_1, I_2, I_3$  및  $I_4$  라고 하면 이들로부터 접힌위상(wrapped phase)을 다음과 같이 얻을 수 있다.<sup>6</sup>

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (2)$$

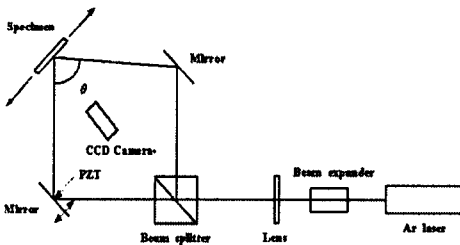


Fig. 1 Optical system for in-plane displacement measurement

본 연구의 광학실험에서 파장이 514nm 인 Ar 레이저가 사용되었다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 2 와 같다. 실험에 사용한 시편은 크기가 147mm × 27.7mm 이고 두께가 1.2mm 인 직사각형 강재 금속평판(rectangular steel plate)이며, 후면에 깊이 0.9mm 로 직경이 12mm 인 원형 구멍을 만들어 후면에 변형을 가하였다.

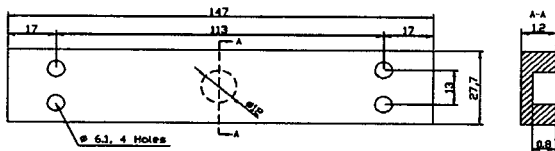
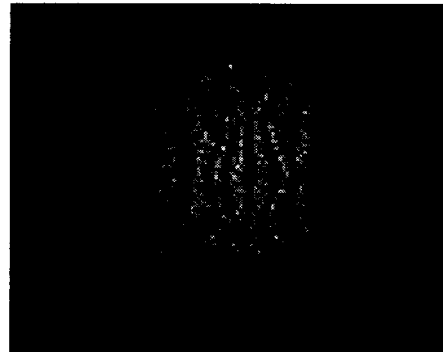


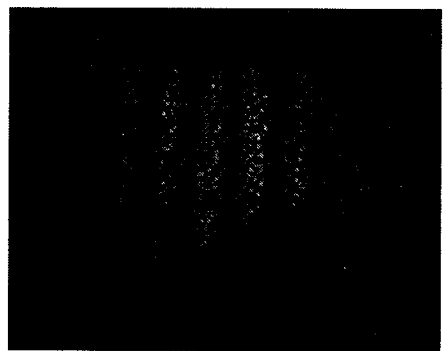
Fig. 2 Dimensions of specimen with deformation for measurement of in-plane displacement (unit:mm)

따라서 시편의 전면에서 보면 시편 후면에 있는 이 원형구멍의 존재여부를 알 수 없다. 먼저 시편의 변형여부를 알기 위한 광학실험에서는 Fig.

1 과 같은 스펙클 간섭계에 시편을 장착하고 시편에 인장력(tensile load)을 가하였을 때 나타나는 간섭무늬는 Fig. 3(a)와 같다. 참고로 동일한 크기와 두께를 갖지만 후면에 원형구멍이 없는 별도의 시편에 인장력을 가하였을 때 나타나는 간섭무늬는 그 Fig. 3-(b)와 같다. 이 두 간섭무늬를 비교하여 보면 시편 후면의 변형 유무를 쉽게 감지할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Interference fringes (a) specimen with deformation (b) specimen without deformation

Fig. 2 와 같은 시편의 면내변위를 측정하기 위하여 Fig. 1 에서 PZT 로써 거울을 움직여 4 단계 위상이동법을 스펙클 간섭계에 적용하였다. 이 때 얻어진 4 개의 간섭무늬에는 스펙클에 의한 공간 잡음(spatial noise)이 내포되어 있으므로 이를 줄이기 위하여 각각의 간섭무늬에 포토샵(Photoshop)<sup>7</sup>에서 쉽게 이용 가능한 가우시안 블러(Gaussian blur) 알고리즘을 이용하여 영상처리 작업을 수행하였다. 잡음이 처리된 4 개의 간섭무늬를 식 (2)

에 적용하여 Fig. 4 와 같은 위상  $\phi(x, y)$  를 얻었다.

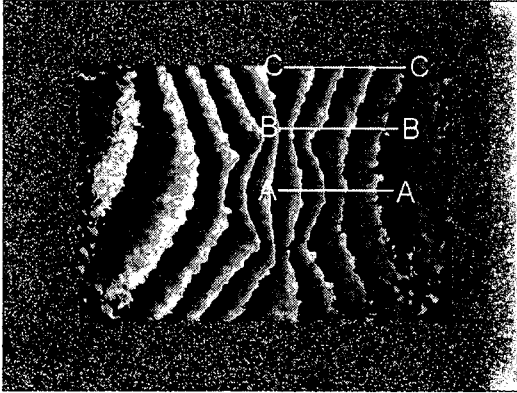


Fig. 4 Wrapped phase of specimen

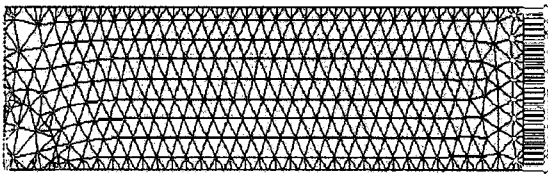
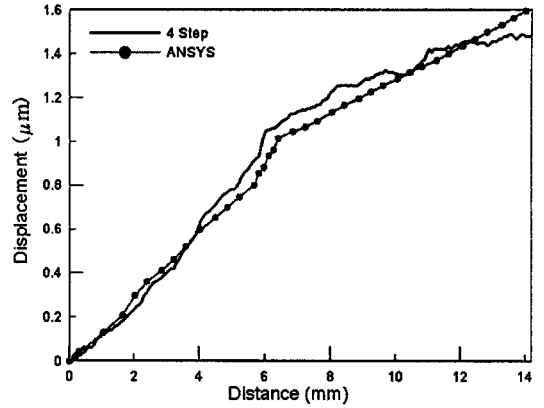


Fig. 5 ANSYS discretization model of specimen in Fig. 2

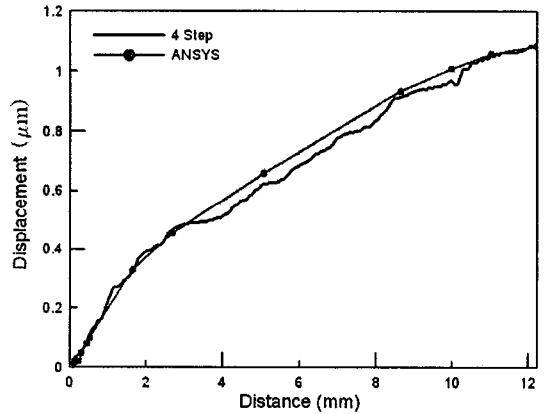
시편의 면내 변위를 정량적으로 해석하기 위하여 Fig. 4 에 나타난 선분 A-A, B-B, C-C 선상에서 위상펼침 알고리즘(phase unwrapping algorithm)<sup>8</sup> 을 이용하였으며, 펼친위상(unwrapped phase)을 통하여 면내변위<sup>9,10</sup> 를 구하여 Fig. 5 에 도시하였다. 또한 동일한 시편의 면내변위를 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS<sup>11</sup> 를 사용하여 면내변위를 이론적으로 계산하였다. 시편의 ANSYS 해석을 위한 Fig. 5 와 같은 ANSYS 분할 요소에서는 10 노드 4 면체 요소(10 node Tetrahedral element) 를 사용하였고, 물성치는 영탄성계수  $E = 200 \text{ GPa}$ , 푸아송비  $\nu = 0.3$  이었으며, 결과는 Fig. 6 과 같다. Fig. 6 으로부터 광학실험에서 얻어진 미소 면내변위는 ANSYS 로부터 계산된 면내변위에 매우 근접함을 알 수 있다.

## 2.2 방향 푸리에 변환법

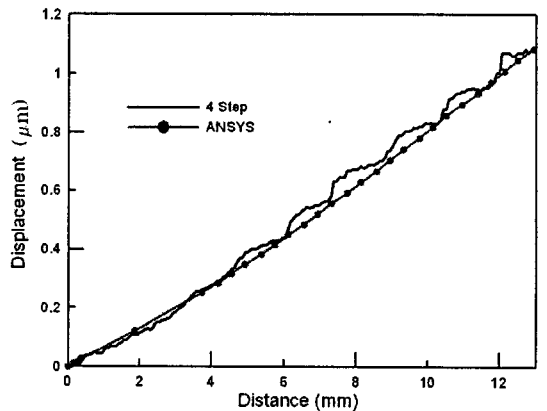
본 절에서는 방향 푸리에 변환(directional Fourier transformation)을 스펙클 간섭계에 적용하여 시편의 면내 변위를 측정하는 실험 방법에 대하여



(a) A-A



(b) B-B



(c) C-C

Fig. 6 Displacement distribution along lines of Fig. 4 (a) A-A, (b) B-B and (c) C-C

고찰한다. 스펙클 간섭계에서 2 개의 광신호에 의한 간섭무늬는 식 (1)과 같다. 식 (1) 과 같은 간섭무늬  $I_i$  는  $\alpha_i$  에 대하여 주기  $T = 2\pi$  인 주기 함수가 될 수 있으므로 푸리에 급수를 적용한 방향 푸리에 변환을 통하여 아래의 식 (3)과 같은 면내변위에 의한 접힌위상  $\phi$  를 얻을 수 있다.<sup>12</sup>

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}[F_\alpha(x, y; \omega_0)]}{\text{Re}[F_\alpha(x, y; \omega_0)]}\right) \quad (3)$$

여기서  $F_\alpha(x, y; \omega_0)$  는  $I_i$  의 방향 푸리에 변환을 의미하고,  $\omega_0$  는 기본주파수(fundamental frequency) 를 나타내며, Im 은 복소수의 허수부분, Re 는 복소수의 실수부분을 의미한다.

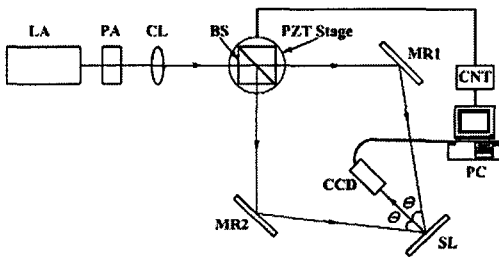


Fig. 7 Optical system for directional Fourier transformation

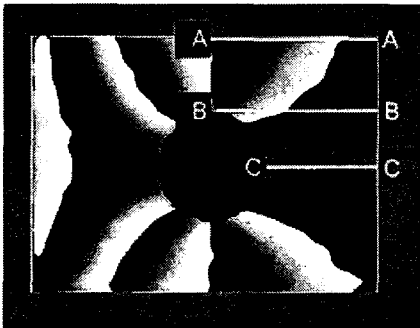


Fig. 8 Wrapped phase  $\phi$  of the specimen

Fig. 7 은 미소 면내변위 측정을 위한 광학 실험장치이다. Fig. 7 에서 LA 는 레이저, PA 는 핀-홀 장치(pin-hole assembly), CL 은 평면파(plane wave) 를 만들기 위한 렌즈, BS 는 광파분리기(beam splitter), MR1 과 MR2 는 거울을 나타낸다. SL 은

시편이 설치된 하중장치(loadng device)를 나타내며, 이 하중장치는 장착된 시편에 인장하중을 가하여 시편에 미소 면내변위가 일어나도록 한다. PZT stage 는 PZT 를 장착한 장치이며, CNT 는 PZT 를 제어하는 시스템이다. CCD 는 CCD 카메라, PC 는 개인용 컴퓨터를 의미한다. 스펙클 간섭계의 위상 이동법을 위하여 BS 는 PZT 에 의하여 제어된다. 즉, PZT 를 이용하여 BS 를 움직여 스펙클 간섭계에서의 두 광신호의 광 경로차(optical path length) 에 의한 위상 이동법을 수행한다. 시편에서의 간섭무늬는 CCD 를 통하여 PC 에 저장된다. 저장된 간섭무늬들을 방향 푸리에 변환에 적용하고, 식 (3)을 이용하여 시편에 발생한 미소 면내변위에 의한  $\phi$  를 얻는다.

실험에 사용한 시편은 Fig. 2 과 같이 크기가 113mm × 27.7mm 이고 두께가 1.2mm 이지만, 본 실험에서는 직사각형의 중앙을 관통한 지름이 12mm 인 원형구멍이 있는 강재의 금속시편이다. 광학실험에서는 PZT 를 이용하여 식 (1)의  $\alpha_i = 0 \sim 2\pi$  라디안에서 위상간격을  $\pi/16$  라디안씩 위상이동법을 수행하여 총 32 개의 간섭무늬를 생성하여 CCD 카메라를 통하여 PC 에 저장되었다. 간섭무늬에 포함된 공간잡음은 본 실험에서는 이차원 푸리에 필터링(2-D Fourier filtering)을 이용하여 감소시켰다. 이차원 푸리에 필터링을 위하여 32 개 각각의 간섭무늬에 대하여 이차원 푸리에 변환, 저역통과필터링(low pass filtering) 및 이차원 역푸리에 변환(2-D inverse Fourier transform)을 수행하였다. 잡음이 처리된 32 개의 간섭무늬를 이용하여 방향 푸리에 변환을 수행한 후, 식 (3)을 이용하여 접힌 위상  $\phi(x, y)$  을 Fig. 8 과 같이 얻었다. 본 연구에서 수행된 모든 푸리에 변환, 즉 이차원 푸리에 변환 혹은 역변환, 그리고 방향 푸리에 변환에는 MRFFT(mixed radix fast Fourier transform)이 이용되었다.<sup>9</sup> 시편의 면내 변위를 정량적으로 해석하기 위하여 Fig. 8 에 그려진 선분 A-A, B-B, C-C 선상에서 위상펼침 알고리즘에 의한 펼친위상(unwrapped phase)을 통하여 면내변위를 구하여 Fig. 9 에 도시하였다. 광학실험을 통하여 얻은 결과를 고찰하기 위하여 ANSYS 를 이용하여 시편의 면내 변위를 이론적으로 계산하였다. 시편에 광학실험에서와 같이 인장하중이 가해졌다고 가정하며, 시편의 1/4 에 대하여 ANSYS 해석을 위한 요소분할은 Fig. 10 과 같다. 요소 분할 시 416 개의 8 절점

등매개변수 요소(eight node isoparametric element)와 1,349 절점이 사용되었다. Fig. 10 에서 원형 구멍 가장자리에서 요소의 크기는 한 변의 길이가 구멍의 반지름( $r$ )의  $0.013r$ , 즉 원주각이  $1.5^\circ$  인 작은 요소이다.

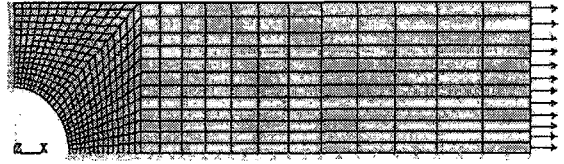
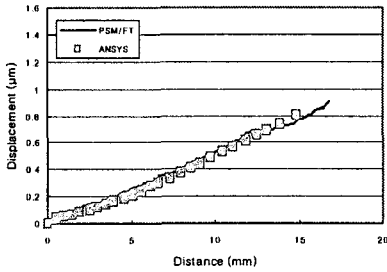
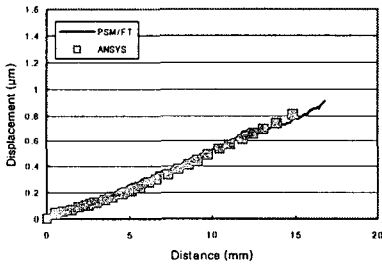


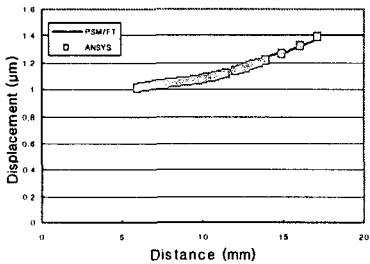
Fig. 10 ANSYS discretization of a quarter of specimen



(a) Line A-A



(b) Line B-B



(c) Line C-C

Fig. 9 In-plane displacement (a) Line A-A, (b) Line B-B, (c) Line C-C

Fig. 9 는 Fig. 8 에 있는 A-A, B-B, C-C 선분상에서 광학실험을 통하여 얻은 면내변위 결과(PSM/FT)와 ANSYS 를 통하여 얻은 이론적 결과(ANSYS)을 비교한 것이다. Fig. 9 에서 보는 바와 같이 스펙클 간섭계와 방향 퓨리에 변환을 이용한 실험의 결과는 ANSYS 의 이론적 결과와 일치함을 알 수 있다.

### 3. 광계측에 의한 면외변위 측정

본 실험에서는 스펙클 간섭계에 4 단계 위상이동법을 이용하여 시편의 면외변위를 측정하였다. Fig. 11 은 면외 변위의 측정을 하기 위한 광시스템이다. Fig. 11 에서 시편에서 반사한 광신호와 PZT 가 부착된 참조면(reference plane)에서 반사한 광신호는 간섭무늬를 생성하며, 이 간섭무늬는 CCD 카메라에 저장된다. 이 간섭무늬의 위상은 시편에서의 면외변위에 대한 정보를 내포하고 있다. 4 단계 위상이동법은 2.1 절에서와 같이 PZT 를  $\pi/2$  라디안씩 이동시켜 4 개의 영상을 얻는다. 이 4 개의 영상을 식 (2)에 적용하여 시편의 면외 변위에 의한 접힌위상  $\phi$  를 얻는다.

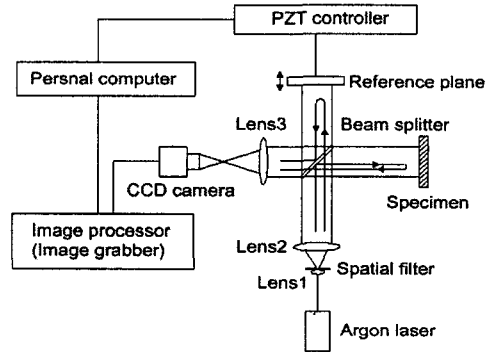


Fig. 11 Arrangement of ESPI optical system for measuring out-of-plane displacement

본 실험에서 사용된 시편의 형상 및 치수는 Fig. 12 와 같으며, 그림에서 보듯이 외팔보의 뒷면이 점용접된 시편이다. Fig. 11 의 광학시스템에 시편을 장착한 후 4 단계 위상이동법을 수행하여 4 개의 간섭무늬를 얻었다. 실험에서 얻어진 간섭무늬의 공간잡음은 가우시안 블러 알고리즘을 사용하여 감소시켰다. 잡음이 처리된 간섭무늬는 식 (1)에 적용되어 접힌위상  $\phi$  를 얻었으며, 그 결과

는 Fig. 13 이다. Fig. 14 는 Fig. 13 의 선분 A-A 에서 위상펼침 작업을 한 것이다. Fig. 13 과 Fig. 14 에서 보듯이 용접부위를 기준으로 위상도가 반전이 되었음을 알 수 있다.

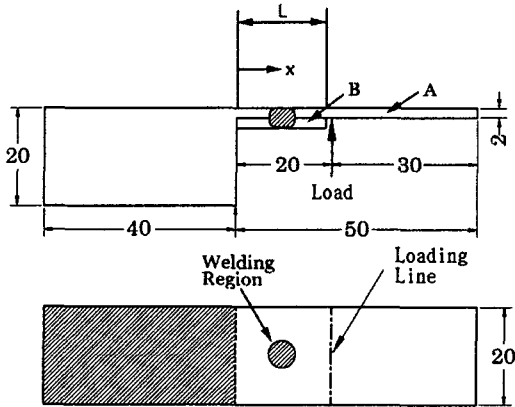


Fig. 12 Dimensions of the specimen used for measurement of out-of-plane displacement (unit: mm)

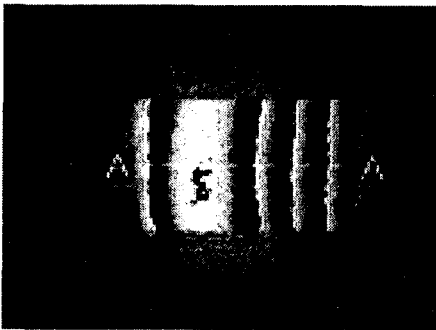


Fig. 13 Wrapped phase image of spot welded cantilever

Fig. 15 는 Fig. 13 의 A-A 선상에서의 위상펼침 알고리즘에 의한 펼친위상을 이용하여 시편의 면외변위  $\delta$  를 나타낸 것이다. 참고로 점용접이 되지 않은 단순외팔보에서 집중하중 P 에 의한 단순외팔보의 처짐방정식은 단순보이론에 의하여 다음과 같다.<sup>13</sup>

$$\delta = \frac{P}{6EI} (x^3 - 3Lx^2) \quad (4)$$

여기서  $E$  는 영탄성계수,  $I$  는 단면 2 차 모멘트,

$L$  은 고정단에서 하중작용점까지의 길이, 그리고  $x$  는 고정단으로부터 임의의 거리이다. 식 (4)에 의하여 계산된 단순 외팔보의 면외변위는 Fig. 15 에 점선으로 표시하였다.

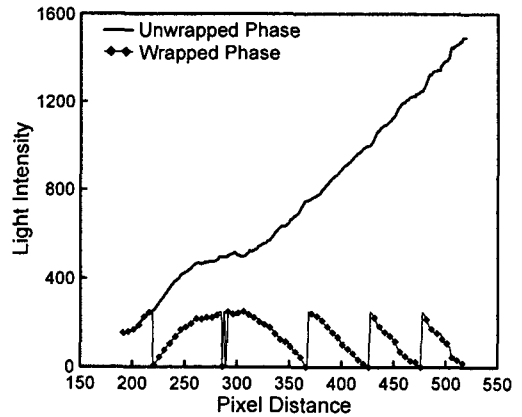


Fig. 14 Wrapped and unwrapped phase distribution along line A-A of Fig. 13

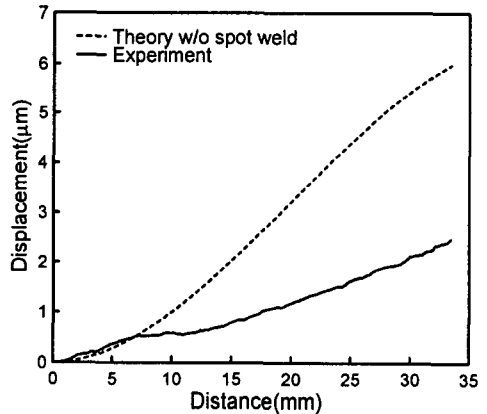


Fig. 15 Out-of-plane displacement along line A-A of Fig. 13 from experiment and theory

Fig. 15 에서 보듯이 광학실험에 의하여 측정된 점용접된 외팔보 시편의 미소 면외변위를 살펴보면 고정단으로부터 10mm, 20mm, 30mm 거리에서 각각  $0.58 \mu\text{m}$ ,  $1.18 \mu\text{m}$ ,  $2.13 \mu\text{m}$  로 나타났다. 본 실험 통하여 4 단계 위상이동법을 적용한 스펙클 간섭계는 점용접된 외팔보의 미소 면외변위를 비 접촉 방법으로 용이하게 측정할 수 있음을 입증하였다.

#### 4. 결론

광신호를 이용한 광계측은 전시아 측정 및 비접촉 측정이 가능하다는 장점이 있다. 레이저와 스펙클 간섭계를 활용한 광계측은 스펙클 간섭계에 위상이동법과 영상처리 알고리즘을 적용하여 미소변위에 대한 정보를 추출하는 기법으로서 널리 이용되고 있다.

본 논문에서는 위상이동법의 일종인 4 단계 위상이동법과 방향 푸리에 변환을 스펙클 간섭계에 적용하고 광학실험을 통하여 시편의 간섭무늬를 얻었다. 간섭무늬에 포함된 스펙클에 의한 공간잡음은 이차원 푸리에 필터링 혹은 가우시안 필터링을 이용하여 간섭무늬의 잡음을 처리하여 시편의 변위를 정밀하고 용이하게 측정하였다. 측정된 미소 면내변위 및 면외변위는 이론 또는 수치해석적 방법으로 계산된 변위와 일치함을 보였다.

앞으로도 레이저스펙클 간섭법의 원리를 응용한 많은 소프트웨어 및 하드웨어가 개발되어 기계 및 구조물의 비접촉 측정 및 시험에 응용분야가 증대될 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. Cloud, G. L., "Optical Methods of Engineering Analysis," Cambridge University Press, pp. 395-439, 1995.
2. Petzing, J. N. and Tyrer, J. R., "Recent Developments and Applications in Electronic Speckle Pattern Interferometry," Journal of Strain Analysis, Vol. 33, No. 2, pp. 153-169, 1998.
3. Baek, T. H. and Kim, M. S., "Construction and Calibration Test of Transmission-type Circular Polariscope for Photoelastic Stress Measurement," Journal of the KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 38-43, 2004.
4. Baek, T. H., "Photoelastic Stress Analysis by Use of Hybrid Technique and Fringe Phase Shifting Method," Journal of Experimental Mechanics, University of Science and Technology of China, Vol. 21, No. 1, pp. 87-95, 2006.
5. Creath, K., "Phase-Shifting Speckle Interferometry," Applied Optics, Vol. 24, No. 18, pp. 3053-3058, 1985.
6. Lanza di Scalea, F., Hong, S. S. and Cloud, G. L.,

"Whole-field Strain Measurement in a Pin-Loaded Plate by Electronic Speckle Pattern Interferometry and the Finite Element Method," Experimental Mechanics, Vol. 38, No. 1, pp. 55-60, 1998.

7. Adobe Systems Inc., "Adobe Photoshop," Adobe Systems Inc., USA, 2000.
8. Ghiglia, D. C. and Pritt, M. D., "Two-Dimensional Phase Unwrapping," John Wiley & Sons Inc., pp. 16-26, 1998.
9. Huntley, J. M., "Automated Fringe Pattern Analysis in Experimental Mechanics: a Review," Journal of Strain Analysis, Vol. 33, No. 2, pp. 105-125, 1998.
10. Kim, M. S. and Baek, T. H., "Measurement for In-plane Displacement of Tensile Plates with Partly Perforated and Through-thickness Circular Holes by Speckle Interferometry," Key Engineering Materials, Vol. 321-323, pp. 77-80, 2006.
11. ANSYS Inc., "ANSYS," ANSYS Inc., USA, 2000.
12. Morimoto, Y. and Fujisawa, M., "Fringe Pattern Analysis by a Phase-shifting Method using Fourier Transform," Opt. Eng., Vol. 33, No. 11, pp. 3709-3714, 1994.
13. Baek, T. H., Kim, M. S., Na, E. G. and Koh, S. K., "Application of ESPI to Measurement of Out-of-plane Displacement in a Spot Welded Cantilevered Plate," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 4, No. 5, pp. 41-46, 2003.