한국정밀공학회지 제 23 권 제 4 호 (2006 년 4 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 23, No. 4, April 2006

◆특집◆ 레이저응용 변형 및 진동해석 기술

레이저 스페클 간섭법에 의한 미소변위 측정법

백태현*, 김명수**, 김경석***

Measurement of Micro-scale Displacement by Laser Speckle Interferometry

Tae Hyun Baek*, Myung Soo Kim** and Koung Suk Kim***

Key Words : Laser speckle interferometry(레이저스펙클 간섭법), Phase shifting method(위상이동법), Fringe analysis(프린지해석), Non-contact displacement measurement(비접촉 변위 측정), Laser optics(레이저 광학)

1. 서론

레이저의 광신호를 이용한 광계측은 시편의 변형을 전시야 및 비접촉에 의하여 측정(whole field and non-contact measurement)할 수 있으므로 현재 기계 및 구조물의 미소변위 측정에 널리 이용되고 있다.[1,2] 이러한 응용분야 가운데 스펙클 간섭계(speckle interferometry)는 광신호의 스펙클 및 간섭현상을 이용한 물체의 변위측정에 적용하여 비접촉 방법에 의하여 형상 또는 변위측정이 가능하므로 활용성이 나날이 증대되고 있다. 특히, 위상이동법(phase shifting method)을 스펙클 간섭계에 적용하면 시편의 미소 변위를 쉽고 정밀하게 측정이 가능하므로 각광을 받고 있다.[3,4] 일반적으로 위상이동은 PZT(piezoelectric transducer)장비를 이용하며 실용화되어 산업현장에 활용되고 있다. 한편으로 좀더 정밀한 측정을 위하여 위상이동법과 퓨리에 변환(Fourier transformation)[5-7] 을 적용한 측정기법에 대한 연구결과가 발표되었다. 더 나아가, PZT 는 고가의 전자장치로서 사용이 수월하지 않은 문제점이 있어 사분파장판(quarter wave plate)을 사용한 광학시스템으로부터 변위측정이 가능한 새로운 형태의 위상이동법에 관한 연구도 진행되고 있다.[8] 본 논문에서는 이들에 대한 원리와 적용사례에 대하여 기술한다.

* 군산대학교 기계공학부
E-mail: thbaek@kunsan.ac.kr
Tel. 063-469-4714, Fax. 063-469-4727
** 군산대학교 전자정보공학부
*** 조선대학교 기계설계공학과

2. PZT 를 이용한 위상이동법

2.1 위상이동법을 적용한 면외변위 간섭계

Fig. 1 은 면외 변위의 측정을 하기 위한 광학 구성도이다. 시험편과 PZT 가 부착된 참조면(reference plane)에서의 위상차이로 인한 간섭 무늬는 변위의 정보를 내포하고 있으므로 이에 대한 해석이 필요하다. 위상 차이는 광 경로차(optical path difference)로 인하여 발생한다. 광 경로차로 인한 면외 변위는 레이저광의 파장(wave length)과 변형 전, 후의 위상차(phase difference)의 함수로 나타난다.

위상 이동법은 PZT 를 부착시킨 참조면을 $\pi/2$ 씩 위상 이동시켜 상대적인 위상차를 갖는 4 개의 화상을 얻는다. 이 4 개의 화상으로부터 아래의 식 (1)과 같이 arc tangent 함수를 이용하여 위상 ϕ 를 얻는다.[9]

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

위의 식 (1)에서 $I_i(i=1,2,3,4)$ 는 위상 이동시킨 4 개의 간섭무늬 화상을 의미한다.

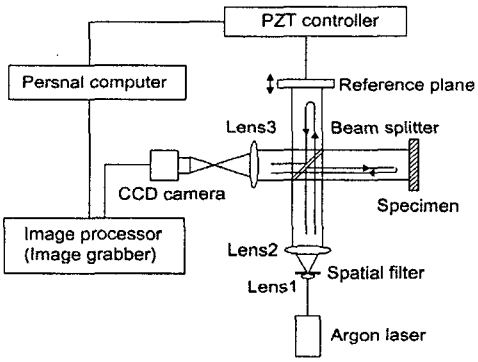


Fig. 1 Arrangement of ESPI optical system for measuring out-of-plane displacement

위상이 서로 다른 4 개의 화상을 이용하는 방법을 4-단계 위상 이동법(4-step phase shifting method)이라 한다. 이 위상도는 $-\pi$ 와 $+\pi$ 사이의 위상값 만을 가진다. 따라서 2π 마다 불연속성을 지니게 되는데 이 불연속성은 위상도 펼침(unwrapping)[10] 에 의하여 제거될 수 있으며, 물체의 표면에서 발생된 연속적인 변위량을 얻을 수 있다. 스펙클 화상에는 많은 노이즈가 포함되어 있으므로 위상도를 펼치기 전에 이들을 제거하여야 한다. 이러한 스펙클 노이즈를 제거하기 위하여 가우시안 블러(Gaussian blur)[11]를 사용한다.

2.2 실험 및 결과

본 실험에서 사용된 시험편은 두께가 2 mm 인 강재의 외팔보이다. 형상 및 치수는 Fig. 2 와 같으며 외팔보 뒷면에 점용접한 상태를 나타낸다. 면외 변위를 측정하는데 있어서 스펙클 패턴의 정밀도를 향상시킬 수 있도록 위상 이동법을 사용하였으며, 위상 이동은 PC 에 의하여 PZT 의 위상이동을 제어하였다.

Fig. 3 은 가우시안 블러를 취한 4 개의 화상으로부터 위상 분포를 구한 위상맵(phase map)이다. Fig. 2 와 같이 용접된 외팔보는 Fig. 3 에서 보인 바와 같이 용접부위를 기준으로 하여 위상도가 반전이 되었음을 알 수 있다.

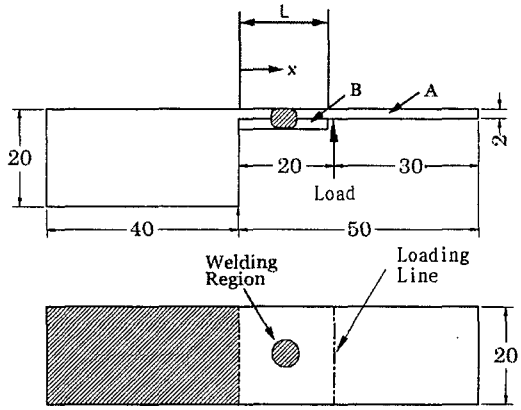


Fig. 2 Dimensions of the specimen used for measurement of out-of-plane displacement (unit: mm)

Fig. 4 의 그래프는 용접된 외팔보 실험으로부터 얻은 Fig. 3 의 위상맵에서 A-A 로 표시된 선상의 위상 분포와 위상펼침(phase unwrap) 작업을 했을 경우를 나타낸다.

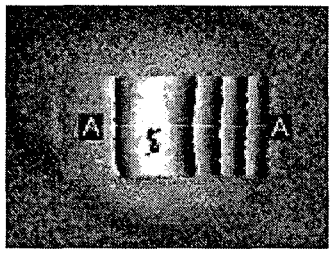


Fig. 3 Wrapped phase image of spot welded cantilever

Fig. 5 는 위상 펼침에 의해 얻어진 외팔보 변형에 대한 위상을 3 차원으로 나타낸 것이다. Fig. 5 로부터 용접된 외팔보의 변위 형태는 용접부위에서 굴곡이 생긴 것을 알 수 있다.

Fig. 6 은 위상 이동법으로 측정된 용접된 외팔보의 면외 변위를 그래프로 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 그래프는 Fig. 2 의 위 부분 그림에서 20mm 부분이 용접이 되지 않은 단순외팔보의 이론적인 변위를 나타낸다. ESPI 실험법으로 측정된 변위를 살펴보면

고정단으로부터 10mm, 20mm, 30mm 거리에서 0.58 μm, 1.18 μm, 2.13 μm 로 나타났다.

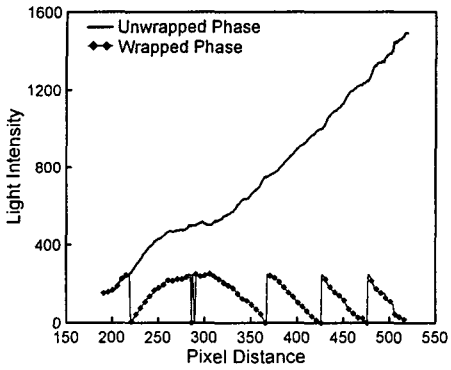


Fig. 4 Wrapped and unwrapped phase distribution along line A-A of Fig. 3

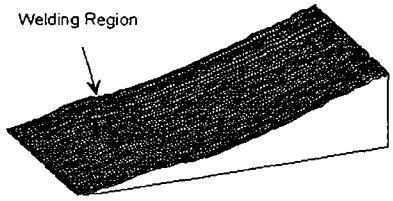


Fig. 5 Three Dimesional View of unwrapped phase image

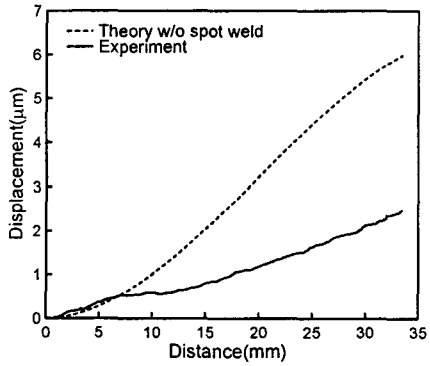


Fig. 6 Displacement distribution obtained from theory and phase shifting method along line A-A of Fig. 3

ESPI 실험법에 4 단계 위상이동법을 적용하여 외팔보와 용접된 외팔보의 면외 변위값을 나노미터(nm: nano meter)의 수준의 분해능으로 정밀측정이 가능함을 보였다. 스펙클 간섭법은 비접촉 방법으로 변위를 측정할 수 있을 뿐 아니라 보이지 않은 결함에 의한 변위도 측정할 수 있다.

그러나, 위상 이동법을 적용하기 이전에 스펙클에 의한 노이즈 제거가 선행되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 FFT 필터와 유사한 기능의 가우시안 블러(Gaussian blur) 필터가 사용되었다.

3. 퓨리에변환과 위상이동법에 면내변위 측정

3.1 위상이동 퓨리에변환 간섭계

본 절에서는 스펙클 간섭계의 위상이동법을 방향 퓨리에 변환(direction Fourier transform)에 적용하여 시편의 미소 면내변위를 측정하는 광학실험에 대해서 기술한다.[4,5,7] 스펙클 간섭계에서 면내변위가 있는 시편에 2 개의 광신호가 입사할 때, 이 광신호는 스펙클 현상과 간섭현상으로 인하여 간섭무늬(interference fringe)를 만든다. 스펙클 간섭계의 PZT 를 이용한 위상이동법을 통하여 임의로 주어진 위상으로부터 여러 개의 화상을 얻을 수 있다. 이러한 화상에 관한 식으로부터 방향 퓨리에변환(directional Fourier transform)을 취할 수 있으며, 이를 이용하여 아래의 식 (2)와 같이 위상을 계산할 수 있다.

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}\left[F_\alpha(x,y:\omega_0)\right]}{\mathrm{Re}\left[F_\alpha(x,y:\omega_0)\right]}\right) \qquad (2)$$

위의 식 (2)에서 $F_\alpha(x,y:\omega_0)$ 는 방향 퓨리에변환 함수를 의미하고, x,y 는 위치좌표, 그리고 ω_0 는 기본주파수(fundamental frequency)를 나타낸다.

Fig. 7 은 미소 면내 변위 측정을 위한 광학 실험장치의 개략도이다. 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(loading device)를 나타내며, 이 하중장치는 장착된 시편에

인장하중(tensile load)을 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 나타낸다. 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 퓨리에 변환에 적용하고, 식 (2)를 이용하여 시편에 발생한 미소변위에 의한 접힌위상(wrapped phase) ϕ 를 얻는다.

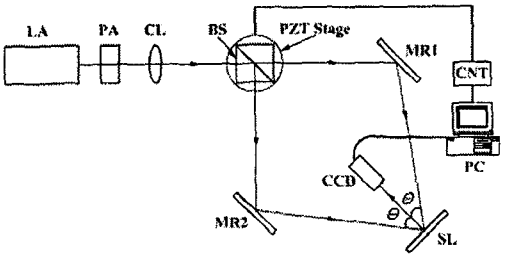


Fig. 7 Schematic diagram of optical experiment system for phase shifting method and direction Fourier transform

3.2 실험 및 결과

시편은 크기가 113mm x 27.7mm 이고 두께가 1.15mm 인 사각형 판의 중앙에 원형구멍이 있는 금속시편이다. 시편은 스펙클 현상을 확실히 나타내기 위하여 흰색 페인트로 스프레이를 하였다. 스프레이된 시편은 하중장치에 장착되어 시편에서 면내변위가 발생하도록 하였다. 본 광학실험에서는 PZT 을 이용한 위상 이동법에 의하여 면내변위를 가진 시편으로부터 $\pi/16$ 라디안의 위상간격을 가진 32 개의 간섭무늬가 CCD 카메라를 통하여 PC 에 저장되었다.

본 논문에서 수행된 모든 퓨리에 변환, 즉 이차원 퓨리에 변환 혹은 역변환, 그리고 방향 퓨리에변환에는 MRFFT(mixed radix fast Fourier transform)이 이용되었다.[5] 접힌위상 ϕ 를 구하기 위하여 $\omega_0 = 1$ 에서의 값을 식 (2)에 적용하여 Fig. 8 과 같은 결과를 얻었다. Fig. 9 의 (a), (b), (c)는 Fig. 8 에 표시된 선분 A-A, B-B, C-C 선분 상에서의 변위를 나타낸다.

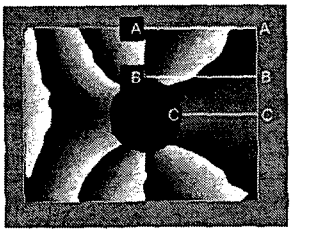
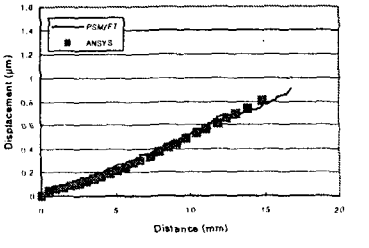
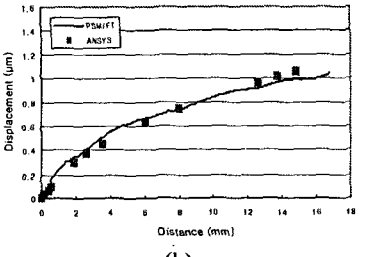


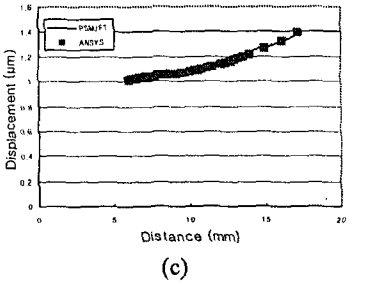
Fig. 8 Wrapped phase ϕ of the specimen



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Wrapped phase and unwrapped phase that are represented by light intensity. (a) Line A-A, (b) Line B-B, (c) Line C-C

본 절에서는 위상이동법을 방향 퓨리에 변환에 활용하여 시편의 미소 면내변위 측정방법을 기술한다. 먼저 광학실험에서 위상이동법을 이용하여 면내변위를 가진 시편으로부터 32 개의 간섭무늬를 PC 에 저장하였다. 이차원 퓨리에 필터링을 통하여 저장된 32 개의 간섭무늬에서 공간잡음을 제거하였다. 잡음이 제거된 간섭무늬에 대하여 방향 퓨리에 변환을 이용하여 미소 면내변위를 구하였다.

이 미소 면내변위는 Fig. 9 에 보인 바와 같이 동일한 시편에 대하여 유한요소법의 사용화 프로그램인 ANSYS[11] 을 이용하여 계산한 이론적 결과와 잘 일치하였다.

따라서 광학장치를 이용한 스펙클 간섭계의 위상이동법과 방향 퓨리에 변환방법이 시편의 미소 면내변위의 측정에 활용이 가능함을 입증하였다.

4. 편광판 회전에 의한 위상이동측정

4.1 사분파장판에 의한 위상이동 광학계

위상 이동법은 스펙클 간섭계에 이용되는 변위 측정기술의 한 방법으로 수월하게 미소변위측정이 가능하여 각광을 받고 있다. 현재의 위상이동법은 스펙클 간섭계에서 PZT 로써 일부 광신호에 특정위상을 더하여 얻어진 스펙클 간섭무늬를 분석하여 변위를 측정하는데, PZT 는 고가의 전자장치로서 사용이 수월하지 않은 문제점이 있다. 이 절에서는 저가이며 사용이 용이한 사분파장판(quarter wave plate)을 사용한 광학 시스템에서 변위 측정이 가능한 새로운 형태의 위상이동법을 기술하고, 광학실험에 의한 결과를 분석한다.

면내변위(x-축 변위 혹은 y-축 변위) 측정을 위한 광학시스템에서는 면내변위가 발생한 시편에 수직편광을 가진 두 개의 광신호가 Fig. 10 에서와 같이 조사된다. Fig. 10 에서 LA 는 레이저, SF 는 광학필터, BS 는 광분리기, MR 은 거울, QT 는 사분파장판, PL 은 선형편광판, SL 은 하중장치에 장착된 시편, CCD 는 CCD 카메라, PC 는 컴퓨터를 의미한다.

Fig. 10 에서 사분파판 QT 를 0, $\pi/4$, $\pi/2$ 로 각각 회전시켜 얻은 빛의 세기에 대한 화상을 I_1, I_2, I_3 라 하자. 광학실험에서 먼저 시편에 하중을 가하지 않은 상태에서 광세기(light intensity) I_1, I_2, I_3 를 I_{b1}, I_{b2}, I_{b3} 로 나타내어 컴퓨터에 저장한다. 이 경우는 시편에 하중이 가해지지 않았으므로 변위는 없고 따라서 $\phi = 0$ 이 된다.

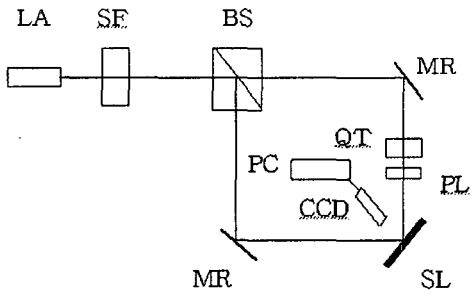


Fig. 10 Optical system for measurement of in-plane displacement

다음 시편에 하중을 가한 상태에서 광세기 I_1, I_2, I_3 를 I_{a1}, I_{a2}, I_{a3} 로 나타낸다. 이러한 화상을 이용하여 위상 ϕ 는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{4I_{a2} - 2I_{a1} - I_{a3}}{4I_{a2} - I_{a1} - 2I_{a3}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{4I_{b2} - 2I_{b1} - I_{b3}}{4I_{b2} - I_{b1} - 2I_{b3}}\right) \tag{3}$$

식 (3)의 접힌위상(wrapped phase)에 대하여 펼친위상(unwrapped phase) 알고리듬을 이용하여 펼친위상을 구하면 시편의 면내변위를 얻을 수 있다.

4.2 광학 실험 및 결과

사분파장판의 각도를 조절함에 의하여 얻어진 위상이동법을 면내변위측정을 위한 광학실험에 적용하였다. 광학시스템은 Fig. 10 과 같다. 레이저는 파장이 514.5nm 의 Ar 레이저를 사용하였으며, 광신호의 시편에의 입사각 θ 는 25° 로 하였다. 실험에 사용된 시편은 직사각형 판재로서 가로, 세로 두께가 각각 147mm x 27mm

x 1.15mm 인 강판이다. 하중을 가하지 않은 상태에서 사분파장판의 각도 δ 를 0, $\pi/4$ 및 $\pi/2$ 로 놓고 CCD 카메라를 통하여 각각의 광세기 I_{b1}, I_{b2} 및 I_{b3} 를 컴퓨터에 저장한다. 그리고 하중장치에 인장하중(tensile load)를 가한 후, 사분파장판의 각도 δ 를 0, $\pi/4$ 및 $\pi/2$ 로 놓고 각각의 광세기 I_{a1}, I_{a2}, I_{a3} 를 컴퓨터에 저장한다. 저장된 6 개의 광세기에 관한 화상을 식 (3)에 대입하여 접힌위상 ϕ 를 컴퓨터에서 계산한다. 이렇게 하여 얻어진 결과가 Fig. 4-2 이다. Fig. 4-2 에서 계산된 위상맵 ϕ 는 스펙클간섭계에서 흔히 보듯이 많은 잡음(noise)이 존재한다. 이러한 잡음을 줄이기 위하여 디지털 영상처리기법의 하나인 미디안 필터링(median filtering)을 하였다.[13] 시편 중 하나인 구멍이 없는 직사각형 시편에서 얻어진 Fig. 11 에 미디안 필터링을 적용하였다.

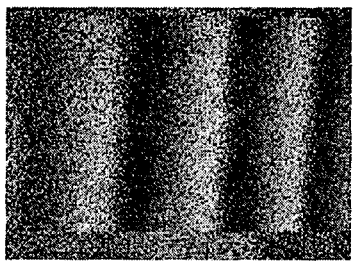


Fig. 11 Wrapped phase of in-plane displacement obtained from optical experiment

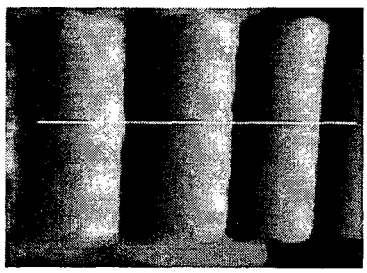


Fig. 12 Wrapped phase of Fig. 11 obtained by median filtering

미디안 필터링을 한후 얻어진 화상이 Fig. 12 이다. Fig. 12 의 중앙에 표시된 선의 왼쪽에서 오른쪽으로 펼친위상 알고리듬을 적용하여 데이터를 얻은 후, 면내 변위를 구하여 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 13 에서 세로축은 변위(μ m), 가로축은 시편에서 변위의 위치(mm)를 나타낸다. 그리고 실선은 광학실험에서 얻은 면내변위의 실험결과이고, 점선은 예상치이다. Fig. 13 에서 보인 바와 같이 광학실험에서 예상치에 필적할 만한 실험 결과를 얻어 사분파장판에 의한 위상 이동법이 면내변위측정에 이용 가능함이 입증되었다. 그러나 실험결과 그래프의 세 곳에서 급격히 감소하다 최소점에서 급격히 증가하였다. 이러한 이유는 식 (3)에서 접힌 위상(wrapped phase)의 2π , 4π , 6π 에서 위상점프(phase jump)가 발생하여야 하나 실제의 광학실험에서는 CCD 카메라의 해상도, 스펙클 간섭계에서 스펙클 크기의 유한성 때문에 그렇게 되지 않았다. 이러한 현상은 보다 정밀한 광학시스템 및 펼친위상 알고리듬을 통하여 개선될 수 있다.

Fig. 13 Measured in-plane displacement obtained from optical experiment

5. 결론

레이저를 활용한 스펙클 간섭계는 광신호 처리기술을 통하여 미소변위를 측정하는데 이용되고 있다. 현재 산업현장에서 적용되는 스펙클 간섭계는 PZT 라는 고가의 장비를 이용한 위상이동법을 스펙클 간섭계에 적용하여 미소변위를 측정하고 있다. 본 논문에서는 PZT 장비를 적용한 4 단계 위상이동으로 전면에서

보이지 않은 용접부의 면외 변위에 측정법에 대하여 기술하였다.

또한 잡음을 효과적으로 제거하기 위하여 방향 퓨리에 변환을 이용, 인장하중을 받는 원공판의 미소 면내변위를 구하였다.

PZT 대신 사용이 용이하고 저가의 광학부품인 사분파장판의 각도를 조절하여 면내 에 활용 가능한 스펙클 간섭계의 위상이동법에 관한 사항을 기술하였다. 측정된 면내변위는 예상치와 유사한 결과를 얻어 사분파장판을 통한 스펙클간섭계의 위상이동법이 가능함을 입증하였다. 이에 관하여 정확하고 정량적인 데이터처리 방법 등에 대한 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

1. Dainty, J. C. "Laser Speckle and Related Phenomena," Springer-Verlag, Berlin, 1984.
2. Cloud, G. L., "Optical Methods of Engineering Analysis," New York, Cambridge University Press, pp. 343-407, 1995.
3. 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.
4. Creath, K., "Phase-Shifting Speckle Interferometry," Appl. Opt., Vol. 24, No. 18, pp. 3053-3058, 1985.
5. 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.
6. Morimoto, Y., Seguchi, Y., and Higashi, T., "Application of Moiré Analysis of Strain by Fourier Transform," Opt. Eng., Vol. 27, No. 3, pp. 650-656, 1988.
7. Kim, M. S. and Baek, T. H., "Application of Phase-sifting Method using Fourier Transform to Measurement on In-plane Displacement by Speckle Interferometry," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 25, No. 3, pp. 171-177, 2005.
8. Kim, M. S., Baek, T. H., Morimoto, Y. and Fujigaki, M., "Phase Shifting Method using Quarter Wave Plate in Speckle Interferometry," Proc. of the SEM Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, Society of Experimental Mechanics, pp. 480 – 482, 2001.
9. Baek, T. H., Kim, M. S., Na, E. G. and Koh, S. K., "Measurement of Out-of-plane Displacement in a Spot Welded Canti-levered Plate using Laser Speckle Interferometry with 4-step Phase Shifting Technique," International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 4, No. 5, pp. 41-46, 2003.
10. Ghiglia, D. C. and Pritt, M. D., "Two-Dimensional Phase Unwrapping," John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
11. Adobe Photoshop 5.0, Adobe Systems Inc., 345 Park Avenue, San Jose, CA 95110-2704, USA.
12. ANSYS Inc., Southpointe, 275 Technology drive, Canonsburg, PA 15317, USA.
13. Gonzalez, R. C. and Wintz, P., "Digital Image Processing," Addison Wesley, California, pp. 161-175, 1987.