

위상이동 ESPI를 이용한 미세용접변형 측정에 관한 연구

이건하* · 김지태* · 나석주*
(2002년 2월 8일 접수, 2002년 9월 26일 심사완료)

A Study on Measurement of Micro Weld Deformation by Using PS-ESPI

Gunha Lee, Jitae Kim and Suck-Joo Na

Key Words: ESPI, Phase Shifting(위상이동), Unwrapping(위상연속화), Smooth Filter(평탄필터)

Abstract

ESPI is a noncontact, nondestructive and relatively fast inspection method. For these reasons ESPI is being applied as a valuable tool in the nondestructive evaluation of structural components. Phase shifting ESPI is used more effectively than the traditional ESPI because spatial resolution of small object displacements are improved and numerical phase values are obtained for all pixels in the image. Consequently the quantitative measurement of deformation is possible. ESPI fringe patterns are contaminated with high levels of speckle noise. Therefore the phase image is to be smoothed to remove the noise and obtain a better signal-to-noise ratio. In this study, smoothing is done by phase shifting convolution to avoid smoothing errors close to the 2π phase ambiguities in the deformation phase image, and median filter is used as a smoothing filter.

1. 서론

현대 사회에서는 제품의 경량화, 소형화 경향으로 인하여 미세부품의 수요가 급증하고 있다. 레이저를 이용한 접합은 높은 파워밀도로 적은 양의 입열로도 용접이 가능하므로 열변형이 적다는 장점이 있다. 하지만 이런 작은 열변형이 발생하여도 제품의 성능에 커다란 저하가 발생하기도 하는데, 이를 해결하기 위하여 정밀한 변형 측정이 필요하다.

레이저 스페클 간섭계를 이용한 측정은 비접촉식·비파괴식 방법으로 고온에도 적용이 가능하고,

거친 표면의 전역 측정(whole-field inspection)이 가능하다는 장점이 있다.⁽¹⁾

레이저 스페클 간섭계의 일종인 ESPI(Electronic Speckle Pattern Interferometry)를 이용하면 비교적 간단한 구성으로 3차원 변위 혹은 진동을 정밀하게 측정할 수 있다.^(2~4) ESPI를 적용할 경우 기존의 광강도를 이용한 방법은 노이즈가 심하고 변형의 정량적인 측정이 어렵다는 단점이 있다. 이에 반해 위상이동법(phase shifting method)을 적용할 경우, 여러 개의 영상을 이용하여 각 점의 위상을 구하기 때문에 노이즈가 적고 변형의 크기와 방향 정보를 정량적으로 구할 수 있다.⁽⁵⁾

본 연구에서는 위상이동 ESPI를 이용하여 미세 구조물의 용접시 발생하는 면외변위(out-of-plane displacement)를 측정하였다. 여러 가지 위상이동법을 적용한 간섭무늬를 획득하여 측정에 적합한 방법을 찾고, 노이즈를 제거하기 위한 필터링과 위상연속화를 수행하여 최종적인 면외변위를 측정하였다.

* 한국과학기술원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : sjna@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3216 FAX : (042)869-3256

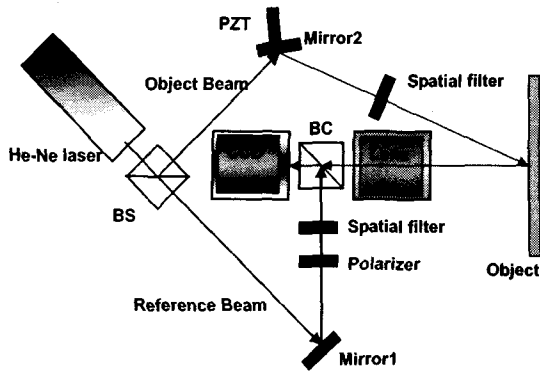


Fig. 1 ESPI system

2. 이론

2.1 ESPI

ESPI는 Fig. 1과 같이 레이저 간섭계를 구성하여 측정 대상물의 변형 전과 후의 스페클 영상을 획득하고 이를 처리하여 변형 정보를 얻는 방법이다.

변형 전의 영상을 I_1 , 변형 후의 영상을 I_2 라 하면 I_1, I_2 는 다음과 같다.

$$I_1(x, y) = I_0(x, y)[1 + \gamma(x, y) \cos \theta(x, y)] \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I_0(x, y)[1 + \gamma(x, y) \cos(\theta(x, y) + \delta)] \quad (2)$$

여기서 $I_0(x, y)$ 는 평균광강도(mean intensity), $\gamma(x, y)$ 는 가시도(visibility), $\theta(x, y)$ 는 기준광(reference beam)과 측정광(object beam)의 위상차, δ 는 변형에 의한 발생하는 레이저광의 위상변화를 나타낸다. 두 영상의 차를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta I(x, y) &= |I_2(x, y) - I_1(x, y)| \\ &= \left| 2I_0(x, y) \gamma(x, y) \sin\left[\theta(x, y) + \frac{\delta}{2}\right] \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \right| \quad (3) \end{aligned}$$

식에서 $\sin[\theta(x, y) + \delta/2]$ 부분은 측정물의 거친 표면에 의해 발생하는 스페클 노이즈를 나타내는 항이고, $\sin(\delta/2)$ 는 물체의 변형에 의해 발생하는 위상정보에 관련된 항이다. 따라서 $\delta = 2n\pi$ 일 때

영상은 어두운 무늬를 나타내고, $\delta = (2n+1)\pi$ 일 때 밝은 무늬를 나타내서 간섭무늬를 형성함을 알 수 있다. 따라서 간섭무늬의 수를 세서 변형의 크기를 알 수 있다.

위상 변화 δ 와 변형에 의한 변위의 관계는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_2 - \vec{n}_1) \cdot \vec{d} \quad (4)$$

\vec{n}_1 은 측정 대상체에 조사되는 빛의 방향 벡터, \vec{n}_2 는 측정 대상체에서 반사되어 CCD 카메라로 관찰되는 빛의 방향 벡터, \vec{d} 는 변위벡터를 나타낸다. 실험에서 \vec{n}_2 는 측정면에 수직인데 비해서, \vec{n}_1 은 측정면의 수직면에 대하여 $\alpha (=20^\circ)$ 만큼 기울어진 형태를 이용하였다. 면내변위가 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정할 경우, δ 와 면외변위 d_z 의 관계는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos 20^\circ) d_z \quad (5)$$

따라서 하나의 간섭무늬는 대략 $\lambda/1.94 (\approx 326\text{nm}, \lambda=632.8\text{nm})$ 의 면외변위를 나타낼 수 있다.

2.2 위상이동간섭법

2.2.1 간섭무늬 해석방법

간섭무늬 해석방법에는 크게 광강도를 이용한 해석방법과 위상을 측정하여 해석하는 방법이 있다. 광강도를 이용한 해석방법은 변형 전후의 영상의 합 혹은 차를 계산하여 얻은 간섭무늬를 이용하여 변형을 측정하는 방법으로, 변형의 방향이나 크기의 정량적인 측정이 어렵다. 위상을 측정하여 간섭무늬를 해석하는 방법은 변형 전과 후에 영상의 각 픽셀에서 위상의 크기를 계산하고 그 차이를 구하고, 그로부터 변형을 정량적으로 측정하는 방법이다. 일반적으로 압전소자(piezo actuator)를 이용하여 광경로를 원하는 크기로 미세하게 변화시키는 위상 변조를 필요로 한다. 이 방법은 광강도를 이용한 방법에 비하여 노이즈가 적은 선명한 영상을 얻을 수 있고, 변

형의 방향과 크기의 정량적인 측정이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 위상변조를 하기 위한 장비의 추가가 필요하고, 실시간 측정이 불가능하다는 단점이 있다.

2.2.2 위상측정방법

간섭무늬 영상으로부터 표면의 변형 정보를 얻기 위한 방법은 다음과 같다. 가장 기본적인 방법은 $\pi/2$ 간격으로 광경로를 변화시키면서 3, 4 혹은 5개의 영상을 획득하여 이들 영상으로부터 각 픽셀의 위상을 결정하는 것이다. Carre algorithm은 초기 상태에서 $-3a, -a, a, 3a$ (a 는 임의크기의 위상)만큼 위상 이동된 영상들을 획득하여 위상을 측정하는 방법이다.⁽⁶⁾ 이 방법은 위상이동의 크기를 임의로 정할 수 있고, 위상 이동이 초기 상태에 대해 대칭적이므로 위상 이동의 선형 오차에 의해 발생하는 위상측정오차가 작다는 장점을 가지고 있다. 좀 더 일반적인 방법으로 N-bucket 알고리즘과 (N+1)-bucket 알고리즘이 있다. N-bucket 알고리즘은 $2\pi/N$ 간격으로 위상이동을 시켜서 획득한 N개의 영상(위상이동 전의 영상 포함)을 이용하여 위상분포를 구하는 방법이고, (N+1)-bucket 알고리즘은 N-bucket 알고리즘에 위상이동이 2π 일 때의 영상을 추가로 이용하는 방법으로 N-bucket 알고리즘에 비해 오차가 작다.⁽⁷⁾

N-bucket과 (N+1)-bucket 방법을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$N\text{-bucket} \quad \phi_j = (j-1) \frac{2\pi}{N}, \quad (j=1, 2, \dots, N)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sum_{j=1}^N I_j \sin \phi_j}{\sum_{j=1}^N I_j \cos \phi_j} \quad (6)$$

$$(N+1)\text{-bucket} \quad \phi_j = (j-1) \frac{2\pi}{N}, \quad (j=1, 2, \dots, N+1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\frac{I_1 - I_{N+1}}{2} \cot(2\frac{\pi}{N}) + \sum_{j=2}^N I_j \sin \phi_j}{\frac{I_1 + I_{N+1}}{2} + \sum_{j=2}^N I_j \cos \phi_j} \quad (7)$$

여기서 ϕ_j 는 압전소자를 이용하여 인가한 위상 변조를 나타내고, I_j 는 ϕ_j 의 위상변조시 나타나는

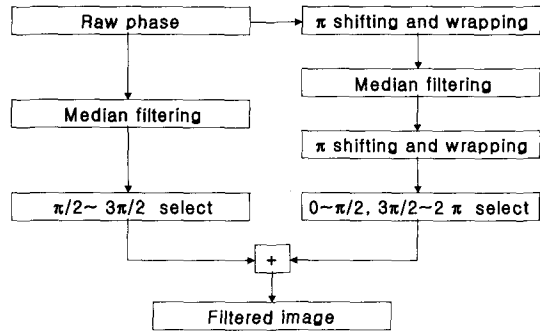


Fig. 2 Phase shifting convolution

광강도를, θ 는 측정광과 기준광의 위상차를 나타낸다. 변위변위에 의해 발생하는 위상의 변화는 위의 식을 이용하여 변형 전과 후의 위상을 계산하여 그 차이를 구함으로써 얻을 수 있다.

2.3 영상처리

위상이동 ESPI를 이용하여 얻은 위상분포에는 고주파 스펙클 노이즈가 심하게 나타나는데, 이를 제거하기 위한 영상처리를 해 주어야 한다. 일반적으로 고주파 노이즈를 제거하기 위하여 미디언 필터(median filter)나 평균화 필터(averaging filter) 등의 평활화 필터(smooth filter)를 사용한다. ESPI에서 나타나는 노이즈는 주로 픽셀단위의 스펙클 노이즈이므로 이를 제거하기 위하여 미디언 필터를 사용하였다. 하지만 원시위상(raw phase)에 그대로 미디언 필터를 적용할 경우, 0과 2π 부근에서 위상 정보의 왜곡이 발생하여 변형 측정에 오차가 발생하게 된다. 이를 방지하고 노이즈를 제거하기 위하여 위상이동 컨볼루션(phase shifting convolution)을 이용하였다.⁽⁸⁾ 방법은 Fig. 2와 같다.

우선 원시위상에 미디언 필터를 적용하고 이를 이미지1이라 하자. 원시위상에 π 를 더하고 랩핑을 한 후, 미디언 필터를 적용한다. 다시 여기에 π 를 더하고 랩핑을 수행하고 이를 이미지2라 하자. 이미지1은 0과 2π 부근의 위상정보가 왜곡되고, 이미지2는 π 부근의 위상정보가 왜곡된다. 따라서 이미지1에서는 $\pi/2$ 부터 $3\pi/2$, 이미지2에서는 0에서 $\pi/2$, $3\pi/2$ 에서 2π 까지의 위상정보를 취하여 합하면, 위상정보의 왜곡 없이 노이즈가 제거된 이미지를 얻을 수 있다. Fig. 3은 평판의 한쪽 끝에 변형을 준 후 얻은 이미지에 미디언 필터와 위상이동 컨볼루션을 적용하였을 때의 결

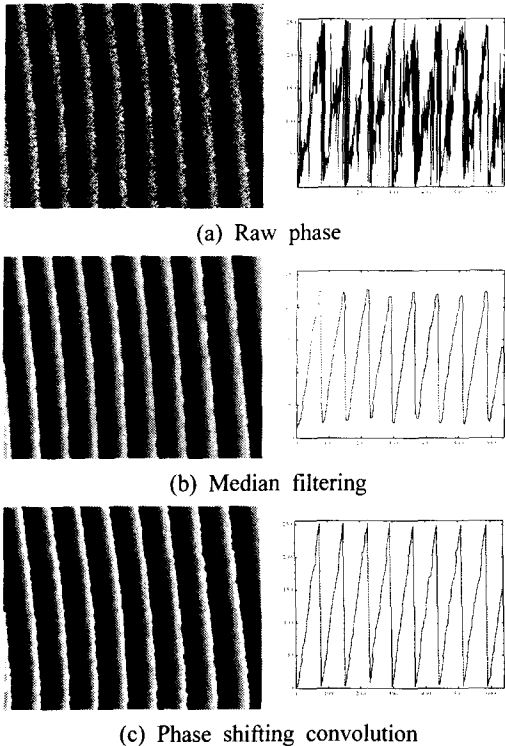


Fig. 3 Filtering results

과를 나타낸 그림과 단면도이다. 단면도에서 x축은 영상의 가로방향 pixel을 나타내고, y축은 그레이레벨(grey level)을 나타낸다. 미디언 필터를 적용한 (b)의 경우 원 신호의 고주파 노이즈는 제거되었지만, 0과 2π 주변의 위상신호 왜곡이 발생하였다. 하지만 위상이동 컨볼루션을 적용한 (c)의 경우에는 고주파 노이즈를 0과 2π 주변의 위상신호 왜곡 없이 제거하였음을 확인할 수 있다.

2.4 위상연속화(Unwrapping)

위상이동법을 이용하여 얻는 위상값은 \tan^{-1} 함수를 이용하여 계산되므로 0에서 2π 까지의 값을 가진다. 따라서 정확한 위상값을 알기 위해서는 2π 의 정수배에 해당하는 값을 각 픽셀의 위상값에 적절하게 더해 2π 모호성(ambiguity)을 제거하는 위상연속화(phase unwrapping) 과정을 수행해 주어야 한다.⁽⁹⁾ 본 연구에서는 위상의 크기가 일정값(threshold) 이상으로 급격히 변하는 점을 찾아 간섭무늬의 경계를 구하고, 이로부터 오프셋 위상을 구하여 최종 위상을 얻는 방법을

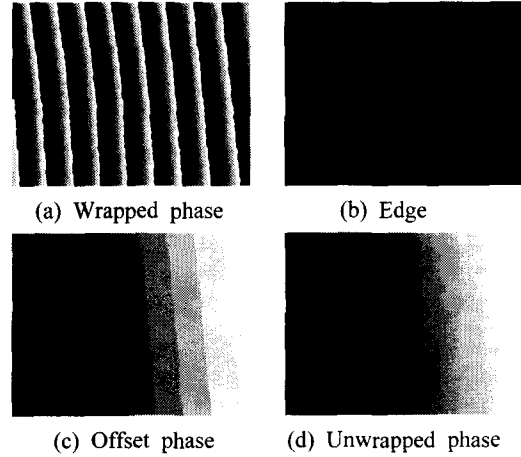


Fig. 4 Unwrapping process

이용하였다. 일정값(threshold)으로는 π 를 이용하였다. 경계는 위상이동 컨볼루션을 통한 필터링을 통하여 왜곡이 없어져서 쉽게 찾을 수 있었다. Fig. 4는 위상연속화의 예이다. (d)를 보면 위상분포가 왜곡 없이 연속적으로 나타나므로 위상연속화가 정상적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험방법

Fig. 1은 측정을 위한 시스템 구성을 나타낸다. 측정광으로는 20mW 출력의 He-Ne 레이저($\lambda=632.8\text{nm}$)를 사용하였다. 측정광의 위상을 변화시키기 위하여 측정광의 경로에 있는 거울에 압전소자를 장착하였다. 압전소자에 전압신호를 주기 위한 아날로그 출력은 PCL-812보드를 이용하여 인가하였다. 영상 획득에 사용한 CCD 카메라는 640×480 의 영상소자로 구성되어 있고, 한 소자의 크기는 $8.4\mu\text{m} \times 9.8\mu\text{m}$ 이다.

최종적으로 측정하고자 한 대상은 광커플러로 Fig. 5와 같다. 튜브부분과 이를 지지하는 부분의 한 쪽 경계에 Nd:YAG 레이저를 조사하여 용접을 수행하였다. 펄스 에너지는 1J, 펄스 시간은 1ms를 이용하였다.

3.2 실험결과

우선 위상이동 방법을 변화시켜 가면서 간섭무늬를 얻었다. 2, 3, 4, 5-bucket에 대하여 실험을

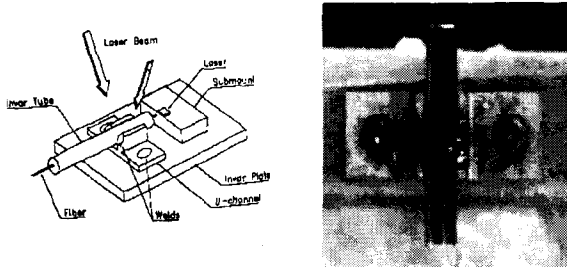


Fig. 5 Optical coupler

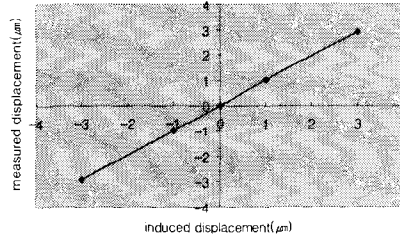


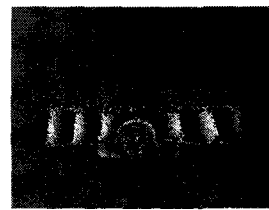
Fig. 6 Calibration result

수행하였는데, bucket 수가 증가할수록 노이즈가 적고 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 측정광과 기준광의 크기도 영상이 선명하도록 조절하였는데, 기준광에 비해 측정광의 크기가 더 클 때 좀더 선명한 영상을 얻을 수 있었다. 평균 광강도는 영상의 포화를 방지하기 위하여 약간 어렵게 조절하였다.

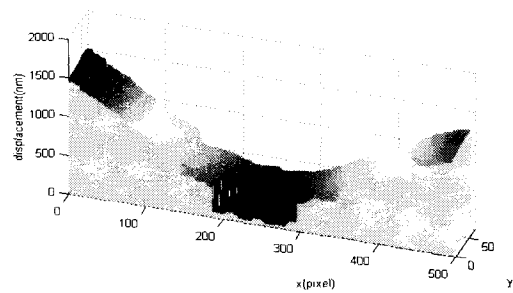
평판에 높이방향으로 마이크로미터를 이용하여 선형변형을 주고 수용한 기초 실험 결과 마이크로미터를 이용하여 인가한 변형과 측정된 변형이 대략 일치함을 확인할 수 있었다. 최대 오차는 3 μm의 변형을 주었을 때 0.06 μm였다. 변형의 방향을 바꾸어 가면서도 실험을 수행하였는데 그 결과 광강도를 이용한 경우에는 방향을 알 수 없으나, 위상이동법을 적용할 경우 방향 정보를 알 수 있었다. Fig. 6은 인가한 변위와 측정된 변위의 관계 그래프이다. 인가한 변위와 측정된 변위가 거의 일치함을 확인할 수 있다. Fig. 7은 위상이동 ESPI를 이용하여 광커플러의 용접에서 발생하는 면외변위를 나타낸 것이다. 튜브의 가운데 아랫부분을 Nd:YAG 레이저를 이용하여 1J, 1ms의 펄스로 용접하였다. (a)는 전체 광커플러의 경우 나타나는 간섭무늬 패턴이고, (b)는 튜브 부분의 면외변위를 3차원으로 표현한 것이다. 용접이 일어난 부분을 기준으로 하였을 경우, 용접이 일어난 부분에서 멀어질수록 변위가 커지고, 방향은 +임을 알 수 있다. 변위는 용접이 일어난 부분을 중심으로 하는 원의 형태를 띤다. 최대 변위는 1.4 μm로 나타났다.

4. 결 론

위상이동 ESPI를 이용하여 변형 측정시 다음과



(a)



(b)

Fig. 7 (a) Fringe pattern, (b) 3D plot of out-of-plane displacement after welding

같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) ESPI에 위상이동법을 적용하여 변위를 정량적으로 측정할 수 있었다.

(2) 위상이동법을 이용하여 얻은 위상분포에는 심한 고주파 스페클 노이즈가 존재하는데 이를 제거하기 하고, 위상 왜곡을 방지하기 위하여 위상이동 컨볼루션을 적용하였다. 평활화 필터는 미디언 필터를 이용하였다.

(3) 위상연속화는 위상값이 급격하게 변하는 곳을 찾아 간섭무늬의 경계를 찾고 이로부터 오프셋 위상을 구하여 최종적인 위상분포를 얻을 수 있었다.

위상이동 ESPI를 평판에 적용할 경우에는 비교적 깨끗한 영상을 얻을 수 있었지만, 광커플러의 경우 튜브부분의 양 가장자리에 지지대부분에서 반사된 레이저광의 영향으로 상관도가 떨어지므로 영상이 선명하게 나타나지 않는 문제점이 발생하였다. 이를 해결하기 위한 방안이 필요하다.

참고문헌

- (1) Lokberg, O. J., 1993, "Recent Developments in Video Speckle Interferometry," *Speckle Metrology*, pp. 157~194.
- (2) Wong, W. O., and Chan, K. T., 1998, "Quantitative Vibration Amplitude Measurement with Time Averaged Digital Speckle Pattern Interferometry," *Optics & Laser Technology*, pp. 317~324.
- (3) Ritter, R., Galanulis, K., Winter, D., Muller, E. and Breuckmann, B., 1997, "Notes on the Application of Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 283~299.
- (4) Tong, J., Zhang, D., Li, H. and Xu, G., 1997, "Automatic Analysis of Three-Dimensional Displacement Field Using ESPI," *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 515~529.
- (5) Creath, K., 1985, "Phase-Shifting Speckle Interferometry," *Applied Optics*, pp. 3053~3058.
- (6) Kjell, J. G., 1996, "Optical Methodology(2nd Edition)," *Wiley*, pp. 177~273.
- (7) Surrel, Y., 1993, "Phase Stepping : A New Self-Calibrating Algorithm," *Applied Optics*, pp. 3598~3600.
- (8) Vikhagen, E., 1990, "Nondestructive Testing by Use of TV Holography and Deformation Phase Gradient Calculation," *Applied Optics*, pp. 137~144.
- (9) Kim, H. J., "A Study on Measurement System for Micro Weld Distortion Using Laser Speckle," M.S. Thesis, KAIST.