

레이저스펙클 간섭법과 4단계 위상이동법에 의한 외팔보 점용접부의 면외 변위측정

백태현*(군산대 기계공학부), 김명수(군산대 전자정보공학부),
차병석, 조성호(군산대 대학원 기계공학과)

Measurement of Out-of-plane Displacement in a Spot Welded Canti-levered Plate using Laser Speckle Interferometry with 4-step Phase Shifting Technique

Tae Hyun Baek*, Myung Soo Kim (Kunsan Nat'l Univ.),
Byung Suk Cha, Seong Ho Cho(Graduate School of Kunsan Nat'l Univ.)

ABSTRACT

Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) has been recently developed and widely used because it has advantage to be able to measure surface deformations of engineering components and materials in industrial areas with non-contact. The speckle patterns to be formed with interference phenomena of scattering phenomena measure the out-of-plane deformations, together with the use of digital image equipment to process the informations included in the speckle patterns and to display consequent interferogram on a computer monitor. In this study, the experimental results of a canti-levered plate using ESPI were compared with those obtained from the simple beam theory. The ESPI results of the canti-levered plate analyzed by 4-step phase shifting method are close to the theoretical expectation. Also, out-of-plane displacements of a spot welded canti-levered plate were measured by ESPI with 4-step phase shifting technique. The phase map of the spot welded canti-levered plate is quite different from that of the canti-levered plate without spot welding.

Key Words : ESPI (전자처리 스펙클간섭법), Out-of-plane displacement(면외 변위), 4-step phase shifting method (4 단계 위상이동법), Spot welding(점용접), Canti-lever(외팔보), Phase map(위상맵).

1. 서론

레이저스펙클 간섭법(laser speckle interferometry)은 프린지패턴의 형상정보를 이용하여 피측정물의 응력집중 위치와 측정면 전체에 걸쳐 발생하는 변형을 신속히 한눈에 확인할 수 있으며, 변형에 대한 기록을 정확하게 비교하는 것이 가능하므로 광학적인 방법에 의해 비접촉식으로 물체의 변위를 정밀하게 측정할 수 있는 큰 장점을 지니고 있다.

전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI : Electronic Speckle Pattern Interferometry)은 화상 데이터를 감산 ($I = |I_{before} - I_{after}|$) 처리함으로써 간섭 줄무늬를 얻을 수 있다. 이러한 간섭 줄무늬로부터 레이저파장 차수에 상당하는 미소 변위량을 측정할 수 있다^(1,2).

본 논문에서는 ESPI에 의하여 나타나는 프린지를 해석하기 위하여 4단계 위상이동법(4-step phase shifting method)을 적용하여 부분적으로 점용접(spot welding)된 외팔보와 용접되지 않은 외팔보의 면외 변위(out-of-plane displacement)를 측정하고 이들을 서로 비교하였다.

2. ESPI 실험

2.1 면외 변위 ESPI간섭계

Fig. 1은 면외 변위의 측정을 하기 위한 광학 구성도이다. 시험편과 PZT(piezoelectric transducer)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 면의 변위의 관계식은 다음과 같다.

$$w = \frac{\lambda}{4\pi} \phi \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 w 는 면의 변위(z-directional displacement), λ 는 레이저광의 파장(wave length), 그리고 ϕ 는 변형 전·후의 위상차(phase difference)를 나타낸다.

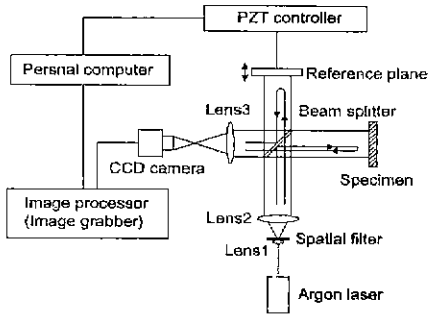


Fig. 1 Arrangement of ESPI optical system for measuring out-of-plane displacement.

2.2 ESPI에서 4단계 위상이동법

본 연구에 사용된 위상 이동법은 PZT (piezoelectric transducer)를 부착시킨 참조면을 $\pi/2$ 씩 위상 이동시켜 상대적인 위상차를 갖는 4개의 화상을 얻는다. 이 4개의 화상으로부터 arc tangent 함수를 이용하여 위상도를 얻는다. 레이저 스펙클에서 빛의 세기 I_i 는 다음의 식 (2)와 같다.

$$I_i = I_0 \{1 + m(x, y) \cos [\phi(x, y) + \alpha]\} \quad (2)$$

위의 식에서 $I_i = I_i(x, y)$ = 재생빔의 세기, $I_0 = I_0(x, y)$ = 빛의 평균 세기, $m(x, y)$ = 간섭 무늬 대비값, $\phi(x, y)$ = 두 파의 위상차, α = 상호 위상값을 의미한다. 식 (2)에서 $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 를 대입하여 각각을 I_1, I_2, I_3 및 I_4 라 하면, 이 들로부터 다음의 식 (3)을 얻을 수 있다⁽³⁾.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right] \quad (3)$$

식 (3)으로부터 변위의 크기와 부호를 알 수 있는 위상도(phase map)를 얻을 수 있다. 식 (3)은 4개의

위상이 서로 다른 4개의 화상을 이용하므로 4-단계 위상 이동법(4-step phase shifting method)이라 한다. 이렇게 하여 얻은 위상도는 arc tangent 연산의 특성으로 인해 $-\pi$ 와 $+\pi$ 사이의 위상 값만을 가진다. 2π 마다 불연속성을 지니게 되는데 이 불연속성은 위상도 펼침(unwrapping)⁽³⁾에 의하여 제거될 수 있으며, 물체의 표면에서 발생한 연속적인 변위량을 얻을 수 있다.

스펙클 화상에는 많은 노이즈가 포함되어 있으므로 위상도를 펼치기 전에 이들을 제거하여야 한다. 이러한 스펙클 노이즈를 제거하기 위하여 포토샵에 내장된 필터중 가우시안 블러(Gaussian blur)를 사용하였다. 가우시안 블러는 FFT(Fast Fourier Transform) 필터와 유사한 기능으로 스펙클 노이즈를 제거하는데 사용될 수 있다.

3. 실험

3.1 시험편 및 실험장치

본 실험에서 사용된 시험편은 두께가 2 mm인 외팔보이다. 형상 및 치수는 Fig. 2와 같으며, A는 용접이 되지 않은 정상적인 외팔보이고, B는 외팔보 뒷면에 점용접한 상태를 나타낸다. 재료의 물성치는 Table 1과 같다⁽⁴⁾. Fig. 3은 면외변위 측정을 위해 Fig. 1의 구성도에 나타낸 Twyman-Green 간섭계로써 실험에 사용된 광학부품의 배열상태를 나타낸다. 면외 변위를 측정하는데 있어서 스펙클 패턴의 정밀도를 향상시킬 수 있도록 위상이동법을 사용하였으며, 위상 이동은 PC에 의하여 PZT(piezoelectric transducer)의 위상이동을 제어하였다.

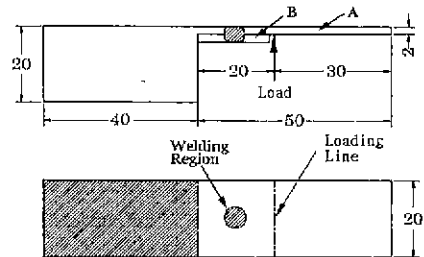


Fig. 2 Dimensions of the specimen used for measurement of out-of-plane displacement.

집중하중 P 를 받고 있는 외팔보의 처짐 방정식은 단순보이론에 의하여 다음과 같다.

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

식 (4)에서 E 는 영탄성계수, I 는 단면2차모멘트, L 은 고정단에서 하중 작용점까지의 길이이고 x 는 고정단으로부터 임의의 거리이다.

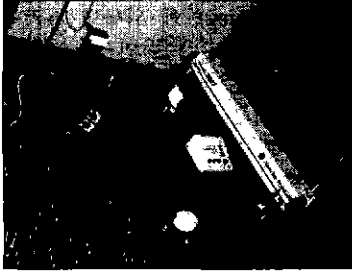


Fig. 3 Optical system for ESPI measurement of out-of-plane displacement.

Table 1 Physical properties of the specimen.

Material	Strength (MPa)		Modulus of Elasticity (GPa)	Poisson's Ratio
	Yield Strength	Ultimate Strength		
Structural Steel	250	450	200	0.3

3.2 실험결과

Fig. 4와 Fig. 5의 (a), (b), (c) 및 (d)는 용접되지 않은 정상적인 외팔보와 점용접된 외팔보의 하중점에서 변위를 가했을 때의 스펙클 프린지 패턴을 감산처리에 의해 나타낸 화상이므로 PZT를 이용하여 위상을 $\pi/2$ 씩 이동하여 각각 위상이 $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ 에 해당되는 스펙클 프린지를 나타낸다.

Fig. 4와 Fig 5에서 보는바와 같이 점용접 후의 용접부위에서 프린지 형태가 변화가 되었음을 알 수 있다.

Fig 6은 원래의 화상과 스펙클 프린지 패턴으로부터 고주파 성분의 잡음을 제거하기 위하여 포토샵에 내장된 필터중 가우시안 블러(Gaussian blur)를 적용한 화상이다. 화상처리가 되지 않은 주변과 비교하면 고주파 성분의 잡음이 제거되었음을 쉽게 식별할 수 있다

Fig. 6과 같이 원래의 화상과 가우시안 블러를 사용한 화상에서 A-A로 나타낸 선의 광강도(light intensity) 분포를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 가우시안 블러를 사용한 화상의 광강도는 고주파 성분의 노이즈가 대부분 제거되었음을 확인할 수 있다.

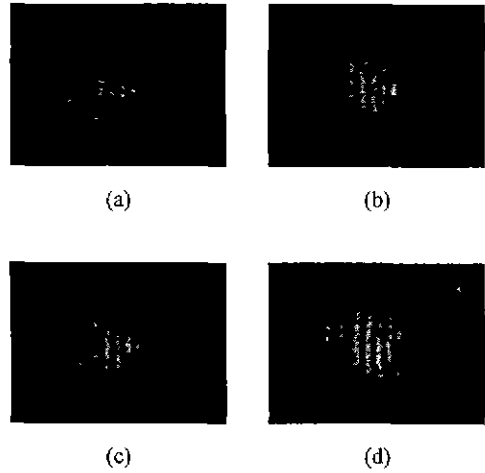


Fig. 4 Speckle fringe patterns of a normal cantilever at difference phases for $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$.

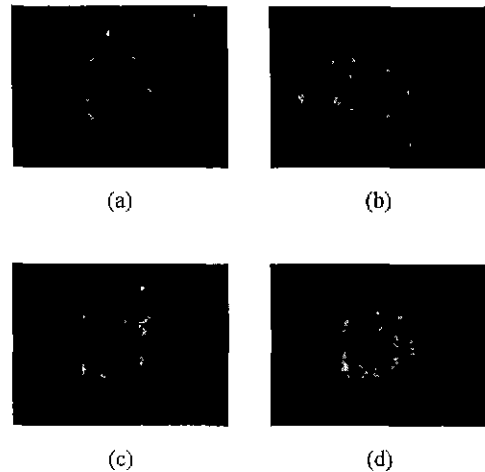


Fig. 5 Speckle fringe patterns of a spot welded cantilever at difference phases for $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$.



Fig. 6 Original image(a) and shown Gaussian blurred image(b) in Fig. 4(a).

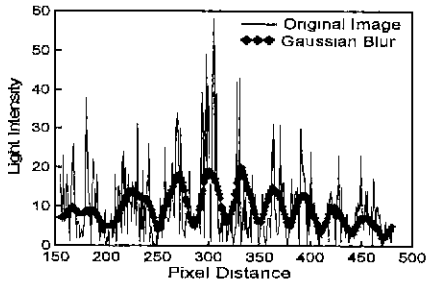


Fig. 7 Comparison of light intensity along line A-A of Fig. 6.

Fig. 8은 가우시안 블러를 취한 4개의 화상을 식 (3)에 대입하여 위상 분포를 구한 위상맵(phase map)이다. Fig. 8의 (a)와 (b)를 비교해보면 용접되지 않은 정상적인 외팔보에서는 위상도의 형태가 일정하였으나, 용접후의 외팔보에서는 용접부위를 기준으로 하여 위상도가 역전이 되었음을 알 수 있다.

Fig 9와 Fig. 10의 그래프는 용접되기 전과 용접후의 외팔보 실험으로부터 얻은 Fig. 8의 위상맵에서 A-A로 표시된 선상의 위상 분포와 위상펼침(phase unwrap) 작업을 했을 경우를 나타낸다.

Fig. 8의 화상으로부터 위상 펼침에 의해서 얻은 위상(unwrapped phase map)은 Fig. 11과 같다.

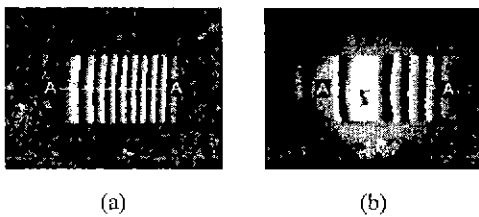


Fig. 8 Wrapped phase image of (a) normal and (b) spot welded cantilever.

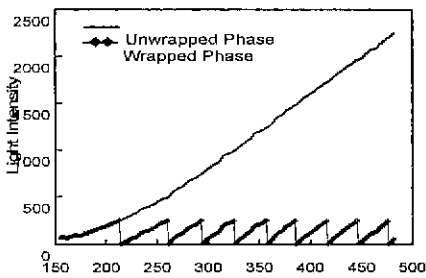


Fig. 9 Wrapped and unwrapped phase distribution along line A-A of Fig. 8(a).

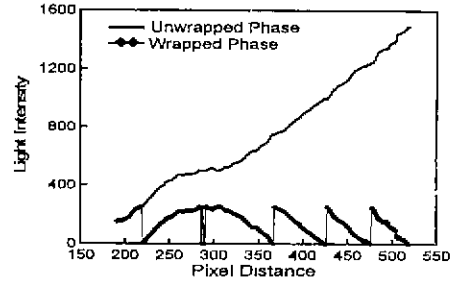
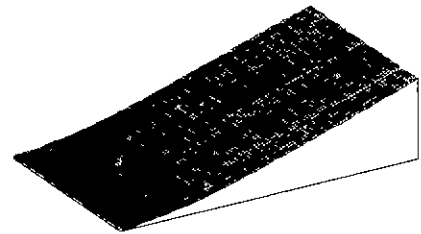


Fig. 10 Wrapped and unwrapped phase distribution along line A-A of Fig. 8(b).

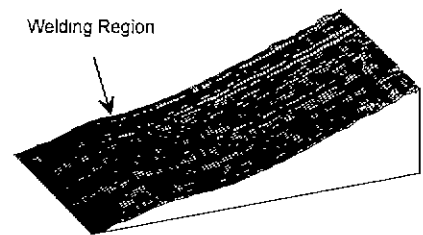


Fig. 11 Unwrapped phase map of Fig. 8.

Fig. 12는 위상 펼침에 의해 얻어진 Fig. 11의 외팔보 변형에 대한 위상을 3차원으로 나타낸 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 정상적인 외팔보의 변위 형태는 규칙적이거나 용접된 외팔보의 변위 형태는 용접부위에서 굴곡이 생긴 것을 알 수 있다.

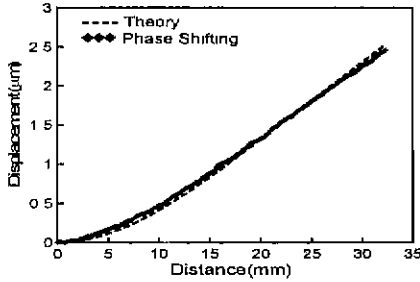


(a) normal cantilever

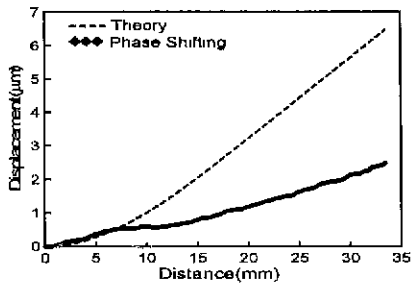


(b) spot welded cantilever

Fig. 12 3D-View of unwrapped phase image.



(a) normal cantilever



(b) spot welded cantilever

Fig. 13 Displacement distribution obtained from theory and phase shifting method along line A-A of Fig. 8.

Fig. 13은 위상 이동법과 단순보 이론에 의한 면의 변위를 그래프로 나타낸 것으로, 용접전의 외팔보의 변위 형태가 거의 일치함을 알 수 있다. 최대 오차는 외팔보의 고정단으로부터 7.9 mm 정도에서 $0.076 \mu m$ 의 차이가 나타났다. 그러나, 용접후의 외팔보의 변위형태는 용접전의 외팔보에 적용된 이론에 비해 많은 차이가 나타났다. 이는 용접부위에서의 변위변화가 거의 없기 때문에 나타난 결과로서 스펙클 간섭법을 이용하면 보이지 않는 부분에서도 용접부를 용이하게 감지할 수 있다.

4. 결론

ESPI 실험법에 4단계 위상이동법을 적용하여 용접전의 외팔보와 용접 후의 외팔보의 면의 변위값을 비교한 결과 용접전의 외팔보의 면의 변위는 이론값과 $0.076 \mu m$ 이내로 일치하였으며, 나노미터(nm: nano meter)의 수준의 분해능으로 정밀한 측정이 가능함을 보였다. 또한, 표면에서 보이지 않은 용접부도 ESPI실험법으로 감지할 수 있었으며, 용접부의 미소한 면의변위도 측정할 수 있었다.

4단계 위상 이동법으로 얻은 분포는 프린지 주 기 구간에서 다소 비선형 형태를 나타냈으며, 더욱

정밀한 측정을 위해서는 이에 대한 연구가 필요하리라 생각된다. 또한, 위상 이동법을 적용하기 이전에 스펙클에 의한 노이즈 제거가 선행되어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 FFT 필터의 유사한 가우시안 블러(Gaussian blur) 필터가 사용되었다.

후기

본 연구는 군산대학교 자동차부품 기술혁신센터(TIC)의 연구비지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. G. L. Cloud, *Optical Methods of Engineering Analysis*, New York, Cambridge University Press, pp. 343-407, 1995.
2. J. N. Petzing and J. R. Tyrer, "Recent Developments and Applications in Electronic Speckle Pattern Interferometry", *Journal of Strain Analysis*, Vol. 33, No. 2, pp. 153-169, 1998.
3. D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, *Two-Dimensional Phase Unwrapping*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
4. 백태현, 김명수, 김수일, "FFT필터와 4단계 위상이동법을 적용한 레이저스펙클 간섭법에 의한 외팔보 면외변위 측정", 2000년도 추계학술발표회, 한국비파괴검사학회 (2000. 11), pp. 535-546.