

레이저 스페클 간섭법에 의한 점 용접부의 면내변위 측정에 관한연구

A Study on the In-plane Displacement Measurement of Spot Welded Joints
by Electronic Speckle Pattern Interferometry Method

성백섭*(조선대 대학원) · 김덕중(동아전문대) · 차용훈(조선대 공대)

B. S. Sung(Graduate School, Chosun Univ.) · D. J. Kim(Dong-A College) · Y. H. Cha(Chosun Univ.)

Abstract

Electronic Speckle Pattern Interferometry(ESPI) using the Model 95 Ar laser, a video system and an image processor was applied to the in-plane displacement measurements. Unlike traditional strain gauges or Moire method, ESPI method requires no special surface preparation or attachments and can be measured in-plane displacement with no contact and real time.

In this experiment specimen was loaded in parallel with a loadcell. The specimen was the cold rolled steel sheet of 2mm thickness, which was attached strain gauges. The study provides an example of how ESPI have been used to measure strain displacement in this specimen. The results measured by ESPI compare with the data which was measured by strain gauge method in tensile testing.

1. 서 론

일반적으로 용접부에 대한 연구는 대형 구조물을 주대상으로 하는 아크 용접에 관한 것이 주류를 이루어 왔다. 그러나 산업의 발달과 더불어 얇고 가벼운 첨단 제품의 비중이 커지고 이러한 제품에 관한 생산성 및 신뢰성이 문제가 되고 있다. 박판 구조물에 주로 응용되는 점용접법은 생산성이 높고 작업절차가 간단하여 자동화가 용이하므로 자동차, 항공기, 전자제품등 각종 첨단 제품의 조립에 널리 응용되고 있다.

빛을 이용한 계측법은 정밀도가 매우 높은 계측법이라 할 수 있다. 또한 레이저의 우수한 성질을 이용

한 연구가 활발히 진행되고 있으며 많은 분야에서 레이저 응용의 새로운 기술이 개발되고 있다.

레이저광은 단색성, 가간섭성(Coherency)이며, 지향성, 집속성이 좋고, 에너지의 공간적 시간적인 집중, 짧은 펄스광의 발생이 가능하다는 등의 특징이 있다. 레이저 응용은 주로 이러한 성질을 이용한 것들이며 주요 응용분야로는 계측, 정보처리, 통신, 재료가공, 분광등이 있지만 특히 계측 분야에 있어서는 눈부신 발전을 하였으며 매우 넓은 범위를 포함하고 있다.

따라서 본 연구에서는 한 방향의 변위성분에 대한 분포를 직접 얻을 수 있는 스페클 패턴 간섭법^(1~6)에 화상처리 장치를 조합한 전자처리식 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)을 이용하여 인장하중을 받는 점용접부의 면내 변위를 측정하고, ESPI법의 측정 정밀도와 가능성 및 문제점에 대해 검토하고자 한다.

2. ESPI법의 원리

측정면에 레이저 빔을 조사하면 렌즈에 결상된 조사면의 상에는 스페클 패턴이 생긴다. 한쪽 방향의 레이저 빔만을 조사해도 스페클 패턴은 생기지만^(7,8) 2개 빔을 조사하면 각각의 패턴이 간섭하여 새로운 스페클 패턴이 생긴다⁽⁹⁾. 따라서 한쪽 빔을 물체광이라 하면 다른쪽 빔은 참조광이라 생각할 수 있다. 즉 변형 전후의 스페클 패턴의 간섭에 의해 등변위 줄무늬가 생기는 것이다.

Fig. 1과 같이 측정면상의 임의의 점 Q가 미소변위 d만큼 변하여 점 Q'로 이동한다고 생각하자. 여기에서 u는 변위 d의 x방향 성분이며 w는 z방향 성분이다.

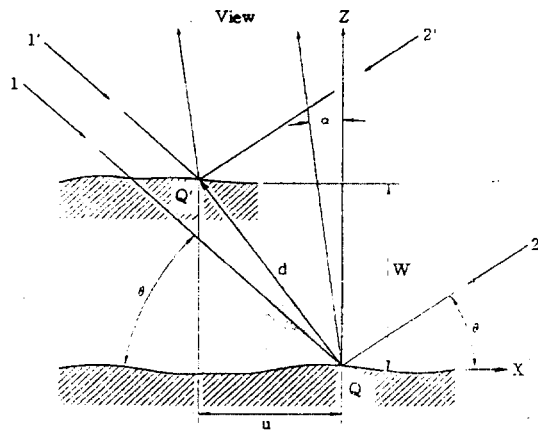


Fig. 1 Relationships between Displacement and Optical System

Fig. 1에서 레이저 빔 1과 관측방향이 이루는 광로길이 변화량 L_1 은

$$L_1 = u \cos \theta + u \sin \alpha + w \sin \theta + w \cos \alpha \quad (1)$$

이며, 마찬가지로 레이저 빔 2의 광로길이 변화량 L_2 는

$$L_2 = -u \cos \theta + u \sin \alpha + w \sin \theta + w \cos \alpha \quad (2)$$

이다.

한쪽 방향의 빔을 다른쪽 방향의 빔에 대해 참조광이라 하였으므로 변형 전후의 광로길이 변화량의 차 Δ 는

$$\Delta = L_1 - L_2 = 2u \cos \theta \quad (3)$$

이다.

식(3)에서 Δ 는 변위에 대해 u 만에 의해 결정되며 면외 변형성분 w 와 관측방향 α 는 영향을 미치지 않음을 알았다.

또한 줄무늬 차수를 n , 레이저의 파장을 λ 라 하면 변위 u 의 크기는 다음과 같다.

$$u = n\lambda / (2\cos\theta) \quad (4)$$

스패클의 위상변화에 의해 스패클의 휘도가 변하므로 스패클 휘도를 감산하여 간섭줄무늬를 발생시킬 수 있다. 물체상의 점이 이동하지 않는 다든지 변형에 의해 확산표면을 지나는 광로길이

가 파장 λ 의 정수배 만큼 변한 경우 스패클의 감산에 의한 휘도는 0이 된다. 그 이외의 경우에는 스패클 감산에 의한 휘도치가 나온다.

ESPI는 TV 카메라와 화상처리 장치를 사용하여 변형 전후의 스패클 휘도의 감산에 의해 간섭 줄무늬를 발생시키는 것이다.

어떤 초기상태 물체의 스패클 패턴을 카메라로 촬영하고 화상처리 장치의 메모리에 디지털 데이터로 기억시킨다. 그런다음 변형 후 물체의 스패클 패턴을 TV 카메라에 의해 수록하고 변형 전의 스패클 패턴과 감산하면 실시간으로 줄무늬를 관찰할 수 있다.

3. 실험 및 측정방법

3.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 현장에서 사용되고 있는 2.0mm 두께의 냉간압연강판(Cold rolled steel sheet)인 SCPI를 사용했으며, 그 물성치는 다음과 같다.

$$E = 2.11095 \times 10^4 \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

$$\nu = 0.3$$

여기에서 E 는 영계수이며, ν 는 포와송의 비이다. 점용접 시험편의 치수는 Fig. 2에 나타내었고, Fig. 3은 시험편을 지그에 체결한 상태를 보여주고 있으며, 자체 제작한 지그를 이용하여 시험편의 양단을 8개의 볼트로 고정시켰다. 편심이 되지 않도록 양쪽 그림에 시험편과 두께가 같은 조각판을 대었다.

Table 1은 본 실험에 사용된 시험편의 화학적 성분을 나타내고, Table 2에 기계적 성질을 나타냈다.

Table 1. Chemical Compositions of base metal (wt %)

C	Mn	P	S	Al
0.04	0.32	0.087	0.008	0.039

Table 2. Mechanical Properties of base metal

Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
17.5	30.02	56.0

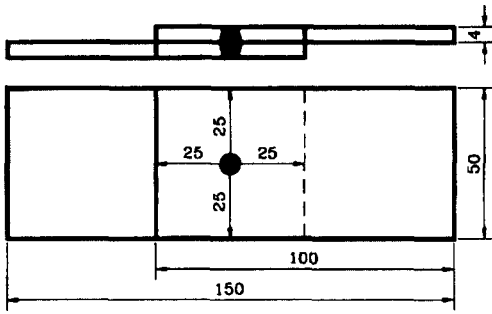


Fig. 2 Spot Welded Specimen

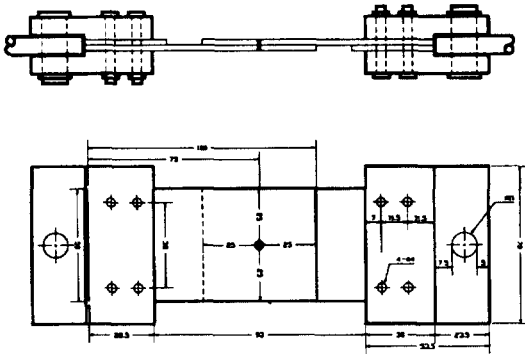


Fig. 3 Configuration of Grip

용접시험편은 현재 자동차 차체에 실제 많이 활용되고 있는 판두께 2.0mm의 냉간압연강판(SCPI)을 사용하였으며, JIS Z3136에 따랐고, 본 실험에 사용된 점용접기는 공압식으로 정격용량이 150KV인 장치식을 사용하였으며, 용접전극은 반구형(dome type)으로 형상은 외경 16mm ϕ , 용접선단경 전극팁은 6.0mm의 A형 수냉식으로 산화 알루미늄 분산등으로 되어있고 10타점마다 교환하였다. 용접조건은 초기가압시간 40싸이클, 유지시간 17 싸이클, 가압력 490(kgf), 용접전류 13500(A), 냉각수의 유속은 12 l/min로 일정하게 유지하였다. 용접시간과 용접전류는 순간전류계로 측정하였으며, 가압력은 가압력계를 사용하여 측정하였다. 본 실험에 사용된 용접시간은 싸이클로 표시하였으며 1 싸이클은 1/60초에 해당한다.

인장시험기의 가이드에 시험편을 끼우고 균등한 하중이 걸리도록 했다. 시험기의 상부축은 고정되어 있으며, 원과 원 휠에 의해 하부축에 인장하중을 주어 시험편이 인장되는 구조로 되어 있다.

3.2 측정방법

광학계의 평면배치도를 Fig 4에 나타냈다.

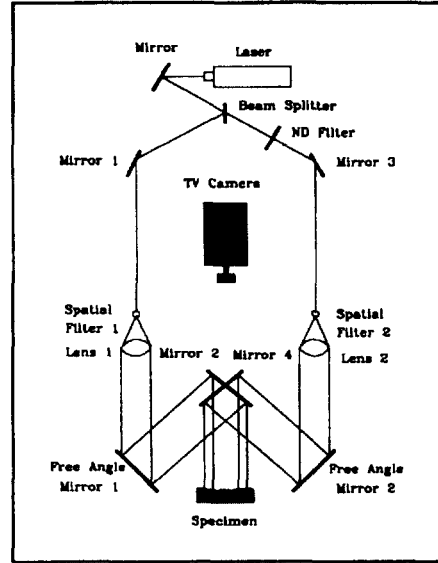


Fig. 4 Optical System

레이저 빔의 간섭에 의해 발생하는 줄무늬를 해석하는 것이므로 하나의 레이저 빔을 Beam Splitter에 의해 2개 경로의 레이저 빔으로 분리시켰다. 그림에서 Mirror 2와 Mirror 4는 상하로 배치되어 있으며, 레이저 빔을 상하방향에서 시험편에 조사하고 변위를 측정했다.

본 실험에서 사용한 레이저는 LEXEL사의 모델 95 아르곤 레이저이며, 광학 정반위에 설치된 CCD 카메라(일본 SONY사 제품)에 의하여 전송되어 들어온 신호를 처리하기 위하여 NEXUS사 QUBE 시스템을 사용했다. 화상처리를 수행하기 위한 컴퓨터는 일본 NEC사의 PC-9801FA를 이용하였다.

측정영역으로는 점용접부의 변형률 측정을 위한 측정영역 및 스트레인 게이지 부착 위치를 Fig 5에 나타냈다.

측정면에는 금속광택을 제거하기 위해 흰색 도료를 칠했다. 또한 ESPI법에 의해 구한 줄무늬로부터 계산한 변형률값이 타당한 값을 나타내는지 조사하기 위해 시험편 점용접 너깃부 좌·우측에 스트레인 게이지를 부착했다. 사용된 게이지는 모두 단축이며, 게이지 길이는 1mm이다.

측정에 있어서는 시험편에 적당한 Base 하중을 가한 상태의 화상을 기준화상으로 하여 화상처리 장치의 메모리에 수록한다.

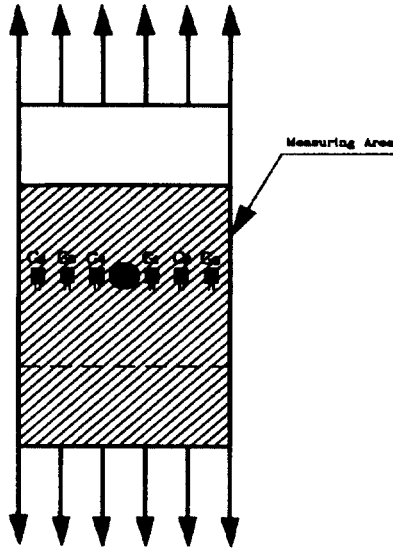


Fig. 5 Measuring Area of Specimen

Base 하중에 하중을 가하면서 변형된 화상을 연속적으로 화상처리 장치에 수록하고 실시간으로 줄무늬 변화를 관찰했다. 줄무늬 변화를 관찰하면서 비교적 대칭인 줄무늬가 나오면 그때마다의 화상을 플로피 디스크에 기록했다.

인접한 2개 줄무늬를 n 차와 $(n+1)$ 차 줄무늬라 할 때 각각의 줄무늬에 대한 변위량 u_n 과 u_{n+1} 은 각각

$$u_n = n\lambda / 2\cos\theta \quad (5)$$

$$u_{n+1} = (n+1)\lambda / 2\cos\theta \quad (6)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 인접한 줄무늬의 변위량의 차 Δ 는

$$\Delta = \lambda / 2\cos\theta \quad (7)$$

이며, λ 와 θ 만에 의해 결정된다. 줄무늬 간격을 F 라 하면 수직변형률 ε 은

$$\varepsilon = u / F \quad (8)$$

가 된다. 이러한 계산에 의해 구한 변형률은 2개 줄무늬의 중심 변형률값이 된다.

이상의 원리를 토대로하여 세선화된 화상을 해석하게 되며, 구해진 줄무늬 간격을 토대로 변형률을 계산하게 되며 줄무늬 간격은 측정된 2개 줄무늬의 중심 변형률값으로 한다.

4. 실험결과 및 고찰

스트레인 게이지를 붙인 위치에서 ESPI법에 의해 구한 스트레인값과 정량적인 비교를 하기 위해 스트레인 게이지에 의해 구한 스트레인값을 구했다. 그리고 2개 줄무늬의 중심 스트레인값을 구하여 그 사이를 1차 보간하고 게이지 위치에서 스트레인값을 구했다. 게이지의 중심을 게이지의 위치로 했으며 게이지에는 폭이 있으므로 스트레인값은 게이지의 중심과 중심에서 좌우 2Dot씩 띄워 총 5개 점에서 스트레인을 계산하고 그 평균치를 사용했다.

또한 오차 $G(\%)$ 는 ESPI에 의해 구한 스트레인을 ε_E 이고, 게이지의 스트레인을 ε_G 라 하면

$$G = [(\varepsilon_E - \varepsilon_G) / \varepsilon_G] \times 100 \quad (9)$$

으로 계산된다.

점용접부에 대한 실험 결과를 각 게이지별로 구분하여 Table 3~5에 나타냈으며, 각각의 점용접 부근의 변위값은 Fig 6~8에 나타냈다. 또한 Table에서 하중은 로드셀이 나타내는 값의 차이이다.

그림에서 나타난 것처럼 실험 결과에서 ESPI법에 의한 측정치와 스트레인 게이지에 의한 측정치를 비교해 보면 저하중에서는 7~8%의 오차가 발생했으며, 고하중에서는 14~18%의 오차가 발생했다. 하중이 높아질수록 압축·굽힘 등의 요인들이 크게 작용하는 결과라고 생각된다.

이러한 오차의 원인으로는 (7), (8)식으로 보아 파장, 각도, 줄무늬 간격의 3가지로 생각할 수 있다. 파장은 Catalogue값을 사용하고 있으므로 각도와 줄무늬 간격의 2가지 원인에 의해 오차가 발생한 것으로 생각된다.

각도에 대해서는 각도가 그려진 종이를 판에 부착하여 빔의 각을 맞추어 목측에 의한 정밀도밖에 맞출 수 없었으므로 오차가 발생했으리라 생각된다. 이러한 조그마한 오차도 변위로 바뀌게 되면 상당히 커지므로 각도를 정확하게 맞추므로 정밀도를 높일 수 있을 것이다.

Table 3 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₁ Gauge)

LOAD (kgf)	STRAIN(× 10 ⁻⁶)	
	ESPI 1	GAUGE 1
22	60.704	56.10
23	62.150	57.31
28	65.257	59.68
31	70.549	64.28
33	78.01	68.53
35	81.571	72.06
48	92.21	79.55

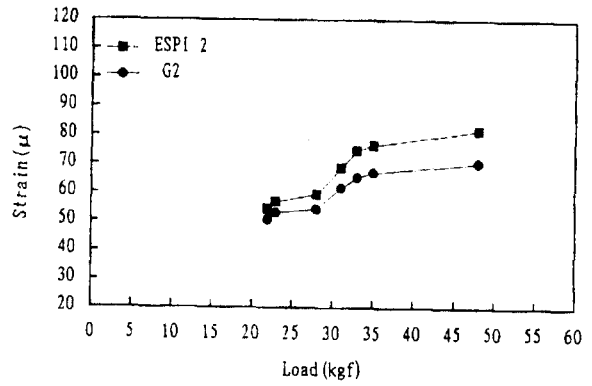


Fig. 7 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₂ Gauge)

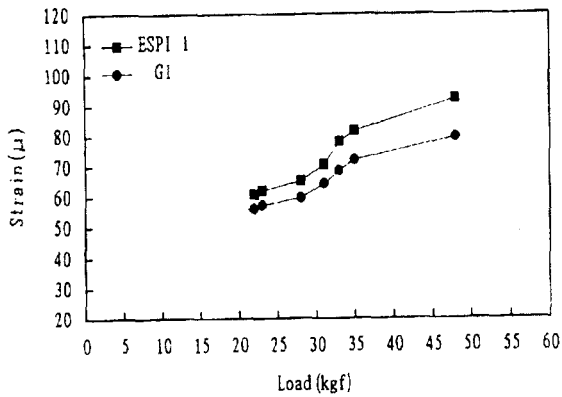


Fig. 6 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₁ Gauge)

Table 5 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₃ Gauge)

LOAD (kgf)	STRAIN(× 10 ⁻⁶)	
	ESPI 3	GAUGE 3
22	50.517	46.58
23	53.324	49.12
28	58.006	53.11
31	62.150	56.25
33	72.508	63.89
35	75.773	65.50
48	79.10	67.37

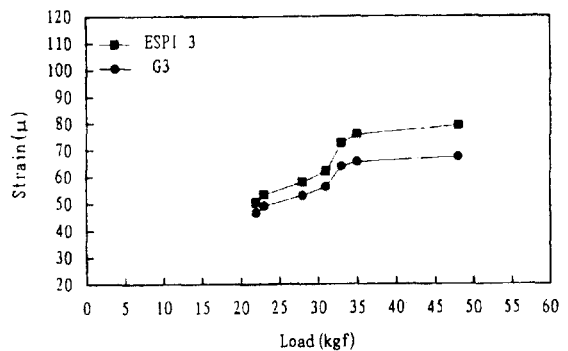


Fig. 8 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₃ Gauge)

Table 4 Measuring Results of Spot Welded Joint

(G₂ Gauge)

LOAD (kgf)	STRAIN(× 10 ⁻⁶)	
	ESPI 2	GAUGE 2
22	54.324	50.66
23	56.745	52.98
28	59.324	54.21
31	68.691	61.73
33	74.579	65.32
35	76.571	67.01
48	81.773	70.42

5. 결 론

ESPI법과 스트레인 게이지를 이용하여 점용접의 변형률을 측정된 결과 점용접부의 응력분포를 측정하는 새로운 방법으로 ESPI법이 유용함을 알 수 있었으며, 점용접 너깃부 근처에서 변형률 값이 크게 나타나 응력이 집중됨을 알 수 있었다.

점용접부의 변형률을 측정된 결과 저하중 상태에서는 오차의 폭이 7~8%의 오차가 측정되었고, 고하중의 경우는 오차의 폭 14~18%의 오차를 나타냈다. 따라서 고하중 일수록 용접 너깃부 주위에서 굽힘 현상이 발생했음을 알 수 있었다. 또한 너깃부에서 멀어질수록 변형률 값의 차이가 작아 지는 것으로 보아 용접의 영향을 받지 않는 지점에서는 좌·우의 변형률 편차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Dendy. D., Leendertz. J. A, " Plane-Surface Strain Examination by Speckle Pattern Interferometry using Electronic Processing ", Journal of Strain Analysis, Vol.9, No.1, pp.17-25 (1974)
- (2) Barker. D. B, Fourney. M. E, " Displacement Measurement in the Interior of 3-D using Scattered Light Speckle Patterns, Experimental Mechanics ", 16(16), pp.209-214 (1976)
- (3) 山口一郎, " レーザスペックルひずみ計による高温下のひずみ測定 ", 日本非破壊検査學會, 第32巻, 第9號, pp.676-682 (1983)
- (4) Goodmann. J. W, " Statistical Properties of Laser Speckle Pattern ", Topics in Applied Physics, Vol.9, pp.876-879 (1975)
- (5) Groh. G, " The Engineering Uses of Laser Produced Speckle Pattern ", edited by E. Robertson and J. M. Harvey, Cambridge Univ. Press, pp.483-494 (1970)
- (6) Leendertz. J. A, " Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect ", J. Phys. E, 3(3), pp.214-218
- (7) 谷田貝豊彦, " 應用光學 ", 丸善株式會社 (1988)
- (8) E. P. Chiang, R. Anastasi, J. Beatty and J. Adachi, " Thermal Strain Measurement by One-beam Laser Speckle Interferometry ", Applied Optics, 19(16), pp.2701-2704 (1980)
- (9) Archbold. E, Ennos. A. E, " Displacement Measurement from Double Exposure Laser Photographs ", Optics, 19(4), pp.253-271 (1972)
- (15) P. F. Chiang, R. Anastasi. J. Beatty and J. Adachi, " Thermal Strain Measurement by One-beam Laser Speckle Interferometry ", Applied Optics, 19(16), pp.2701-2704 (1980)