

## 點 熔接部の 變形率 測定 및 影響 評價

차용훈\*, 김덕중\*\*, 성백섭\*\*\*

### Evaluation on the Influence and Measurement of Strain in Spot Welded Joint

Cha Yong-Hoon\*, Kim Duck-Joong\*\*, Sung Back-Sub\*\*\*

#### 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.

Keywords : ESPI(전자처리스패클패턴 간섭법), Inplane displacement(면내변위), Moire method(모아레법), Strain gauge method(스트레인 게이지법)

#### 1. 서 론

산업의 발달과 더불어 얇고 가벼운 첨단 제품의 비중이 커지고 이러한 제품에 관한 생산성 및 신뢰성이 문제가 되고 있다. 박판 구조물에 주로 응용되는 점용접법은 생산

성이 높고 작업절차가 간단하여 자동화가 용이하므로 자동차, 항공기, 전자제품등 각종 첨단 제품의 조립에 널리 응용되고 있다. 점용접은 많은 점으로 접합되어 박판 구조물 특유의 변형거동을 하기 때문에 응력, 스트레인 상태가 복잡하고 강도평가가 용이하지 않다. 또한, 점 용접부에서

\* 조선대학교 기계공학과(수송기계부품공정자동화연구 센터)  
\*\* 동아전문대학 자동차정비과  
\*\*\* 조선대학교 대학원

균열이 발생·성장하여 파괴에 이르는 경우가 많으므로 너깃주위의 응력상태를 알기 위해 비파괴적인 방법으로 변형률을 측정하는 것이 대단히 중요하다고 할 수 있다. (1~3)

그러나 국내에서는 많은 산업의 응용면에 비해 이 분야에 관한 연구는 극히 미비한 실정이다. 비파괴적 변위 측정법으로는 간섭법, 광탄성법, 모아레법, 홀로그래피법 등이 사용되고 있으며, 그 가운데에서도 전자처리 스페클 패턴 간섭법은 다른 방법에 비해 측정 안정성 및 민감도가 우수한 장점을 가지고 있다. (4~6)

따라서 본 연구에서는 한 방향의 변위성분에 대한 분포를 직접 얻을 수 있는 스페클 패턴 간섭법에 화상처리 장치를 조합한 전자처리식 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry : ESPI)<sup>(7~10)</sup>을 이용하여 인장하중을 받는 점용접부의 면내 변위를 측정하고, ESPI법에 의한 점용접 너깃 근방의 변형률 분포 측정 가능성 및 문제점에 대해 검토하고자 한다.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 재료는 현장에서 사용되고 있는 2.0mm 두께의 냉간압연강판(Cold rolled steel sheet)인 SPCC를 사용하였다. 점용접 시험편의 치수는 Fig. 1에 나타내었고, Fig. 2는 시험편을 지그에 체결한 상태를 보여주고 있으며, 자체 제작한 지그를 이용하여 시험편의 양단을 8개의 볼트로 고정시켰다. 또한 편심이 되지 않도록 양쪽 그립에 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	Si	Mn	P	S
0.04	0.012	0.32	0.025	0.008

Table 2 Mechanical Properties of base metal

Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Young's modulus (kg/mm <sup>2</sup> )	Poisson's ratio
17.5	30.02	56.0	2.11095×10 <sup>4</sup>	0.3

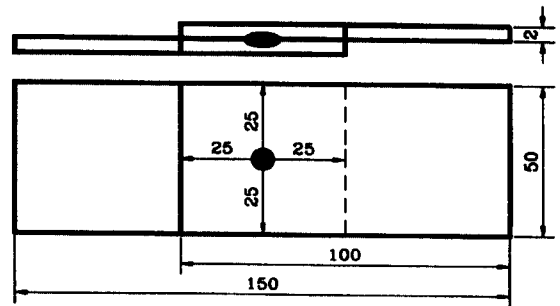


Fig. 1 Spot Welded Specimen

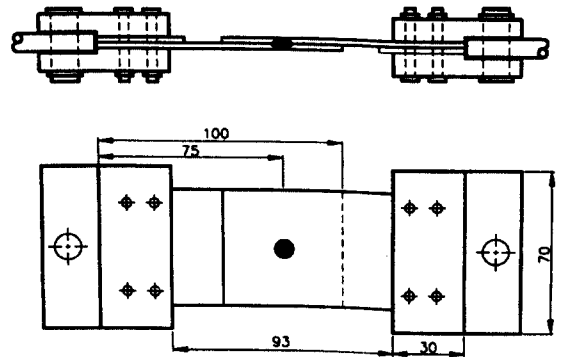


Fig. 2 Configuration of Grip

시험방법은 Spot 용접이음의 인장전단 시험법(JIS Z3136)에 따랐으며, 본 실험에 사용된 점용접기는 정격용량이 150KV인 공압식을 사용하였고, 용접전극은 반구형(dome type)으로 형상은 외경 16mm  $\phi$ , 용접선단경 전극팁은 6.0mm의 A형 수냉식으로 10타점마다 교환하였다. 용접조건은 초기가압시간 0.67초, 유지시간 0.28초, 가압력 490kgf, 용접전류 13500A, 냉각수의 유속은 12 l/min로 일정하게 유지하였다. 용접시간과 용접전류는 순간전류계로 측정하였으며, 가압력은 가압력계를 이용하여 측정하였다.

인장시험기는 가이드에 시험편을 끼우고 균등한 하중이 걸리도록 하였으며 시험기의 상부측은 고정시켜 워프 및 휠에 의해 하부측에 인장하중을 주어 시험편이 인장되는 구조로 되어 있다.

시험편을 인장할 때 상하방향에서 레이저 빔을 조사하면 줄무늬는 점용접부에 수평을 유지하면서 집중된 형태로 나올것으로 예상되지만 초기 인장시 점용접 너깃부

(nugget)가 면내에서 회전할 가능성이 있다고 생각되었으므로 상부의 축을 조정할 수 있도록 축구멍을 크게하고 화면상의 줄무늬를 실시간으로 관찰하면서 홀더에 의해 위치를 미세 조정할 수 있도록 했다.

시험기와 가이드의 접촉부에 윤활유를 칠해 마찰저항이 줄어들도록 하여 시험편을 인장한 결과 줄무늬는 점용접에 집중된 현상으로 나왔으며 시험편에 거의 균등한 하중이 걸리고 있음을 확인할 수 있었다.

광학계의 평면배치도를 Fig. 3에 나타냈으며 하나의 레이저 빔을 Beam Splitter에 의해 2개 경로의 레이저 빔으로 분리시켰다. 그리고 Mirror 2와 Mirror 4는 상하로 배치하여 레이저 빔을 상하방향에서 점용접 시험편에 조사하고 변위를 측정했다.

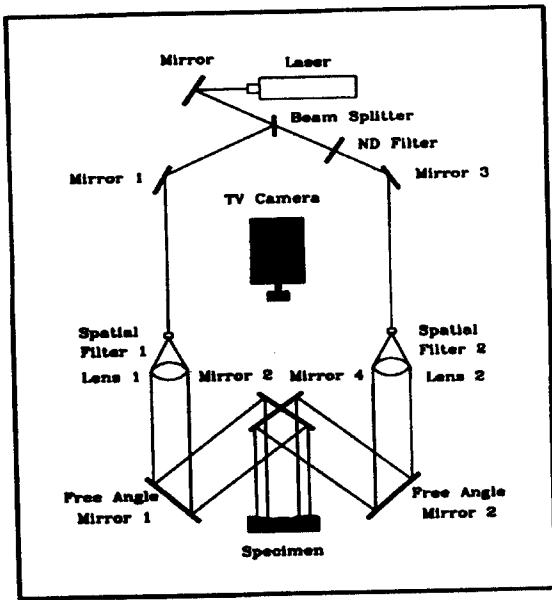


Fig. 3 Optical System

본 실험에서 사용한 레이저는 LEXEL사의 모델 95 아르곤 레이저이며, 이것의 최대 출력은 8W이다. 실제로는 대략 80mW에서 실험을 하였다. 또한 전압의 불안정을 막기 위하여 3상 15KVA AVR(Automatic Voltage Regulator)을 설치하였다. 또한 2개 레이저 빔의 광량을 동일하게 맞추기 위해 ND Filter를 사용하여 Beam Splitter에서 시험편까지의 광로길이가 같도록 Mirror를 배치했다.

또한, 광학 정반위에 설치된 CCD 카메라(일본 SONY

사 제품)에 의하여 전송되어 들어온 신호를 처리하기 위하여 NEXUS사 QUBE 시스템을 사용했다. 화상처리를 수행하기 위한 컴퓨터는 일본 NEC사의 PC-9801FA를 이용하였으며 화상처리 장치 구성을 Fig. 4에 나타냈다.

먼저 초기상태 물체의 스페클 패턴을 카메라로 촬영하여 화상처리 장치의 메모리에 디지털 데이터로 저장하고, 변형 후 물체의 스페클 패턴을 별도의 메모리에 기억시켜 화상처리 장치 내부에서 변형 전후의 2개의 화상 휘도를 감산하여 간섭 줄무늬를 발생시킨다. 휘도를 감산하면 데이터의 반은 음이 되므로 그 상태에서는 화상정보의 반을 잃게 된다. 따라서 감산한 데이터값에 절대치를 취함으로써 잃어버린 데이터를 회복할 수 있게 된다.

Personal Computer를 이용하여 화상처리 장치를 제어하고 화상을 수록하여 처리하는 시간은 약 1/30초 정도이며, 대부분 실시간으로 간섭 줄무늬를 관찰할 수 있다. 또한 일단 기록한 후 Contrast가 나쁜 줄무늬에 대해서는 Contrast 강조등의 다양한 디지털 화상처리를 할 수 있는 잇점이 있다.

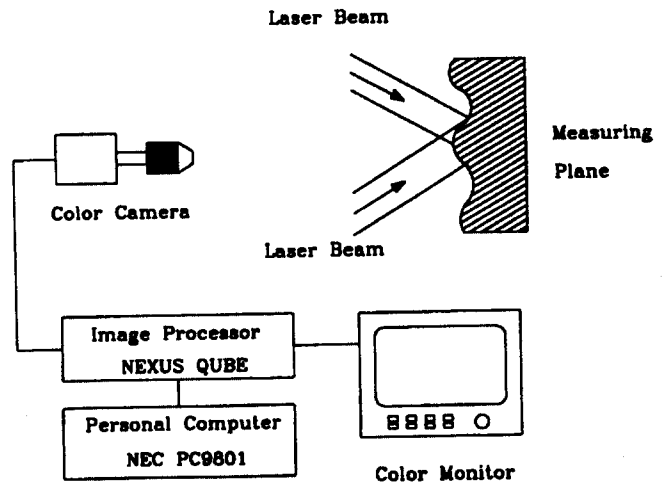


Fig. 4 Composition of Image Process Apparatus

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 1mm이고, 게이지 저항은 120Ω이다.

점용접부의 변형률 측정을 위한 측정영역 및 스트레인

게이지 부착 위치는 Fig. 5와 같으며, 측정면의 금속광택은 줄무늬 화상의 정도를 저해하므로 이를 제거하기 위해 흰색 도료를 도포하였다. 측정에 있어서는 시험편에 기준 하중을 가한 상태의 화상을 메모리 장치에 입력시켜 기준 화상으로 하여 화상처리 장치에 수록한다.

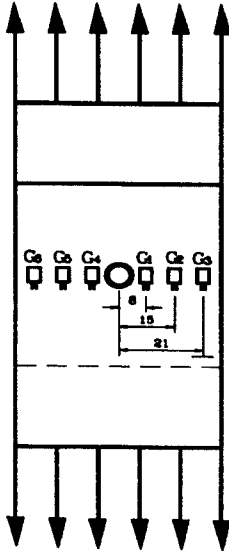


Fig. 5 Attached position of Strain gauge

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

$$u_n = n\lambda / 2\cos\theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

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

와 같이 나타낼 수 있다. 따라서 인접한 줄무늬의 변위량의 차  $\Delta$ 는

$$\Delta = \lambda / 2\cos\theta \quad \dots\dots\dots (3)$$

이며,  $\lambda$ 와  $\theta$ 만에 의해 결정된다. 줄무늬 간격을  $F$ 라 하면 수직변형률  $\varepsilon$ 은

$$\varepsilon = u / F \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

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

### 3. 실험결과 및 고찰

스트레인 게이지를 붙인 위치에서 ESPI법에 의해 구한 스트레인값과 정량적인 비교를 하기 위해 스트레인 게이지에 의해 스트레인값을 측정하였다. 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 2D씩 띄워 총 5개 점에서 스트레인을 계산하고 그 평균치를 사용했다.

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

$$G = [(\varepsilon_E - \varepsilon_G) / \varepsilon_G] \times 100 \quad \dots\dots\dots (5)$$

으로 계산하였다.

점용접부에 대한 실험 결과를 각 게이지별로 구분하여 각각의 그림을 Fig. 6~11에 나타냈다. Fig. 6~11에서 나타난 것처럼 실험 결과에서 ESPI법에 의한 측정치와 스트레인 게이지에 의한 측정치를 비교해 보면 저하중에서는 Strain gauge법을 기준으로 7~8%의 오차가 발생했으며, 고하중에서는 오차가 14~18%로 커지는 경향이 있다.

이러한 오차의 원인으로는 파장, 각도, 줄무늬 간격 그리고 스트레인 게이지의 위치에서 변형률을 구할 때 변형률이 얻어진 점 사이를 1차 보간하면서 발생하는 오차를 생각할 수 있다. 따라서 동일한 하중차에서도 줄무늬 간격이 좁은 곳보다는 넓은 곳에서 오차가 클 가능성이 있다.

이외에도 Scale Factor를 구할 때의 오차나 게이지 위치의 측정오차, 카메라 렌즈의 구면수차에 의한 오차도 생각할 수 있지만 이러한 오차는 미소한 양이므로 크게 문제가 되지 않는다.

또한 고하중에서 저하중에 비해 오차가 커지는 경향을 보이는 것은 ESPI법에서는 한방향으로 하중을 가할 때 면내변위를 측정하도록 구성된 간섭계로서 Z방향으로 굽

힘현상이 발생하면 레이저 광로에 굴절이 생겨 줄무늬 형상의 민감도가 떨어지기 때문에 Strain gauge법에 의한 변형률 측정값과의 오차가 커진 것으로 생각된다.

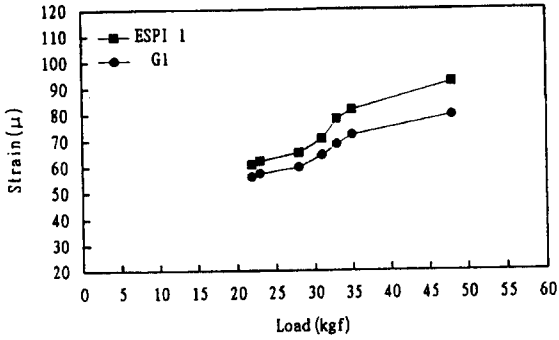


Fig. 6 Measuring Results of Spot Welded Joint (G1 Point)

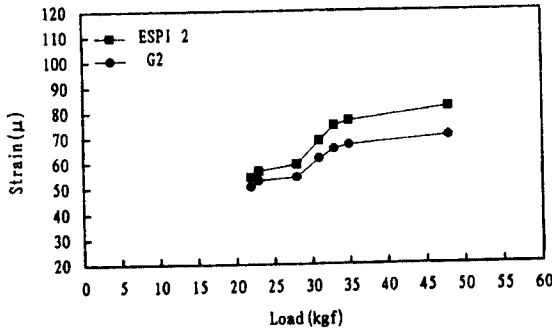


Fig. 7 Measuring Results of Spot Welded Joint (G2 Point)

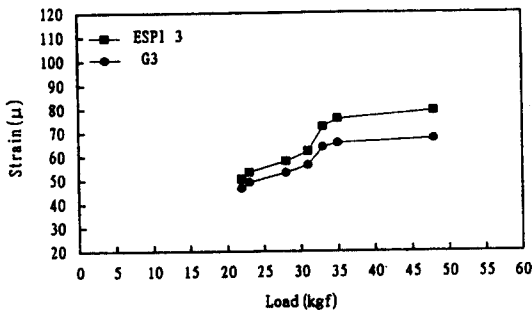


Fig. 8 Measuring Results of Spot Welded Joint (G3 Point)

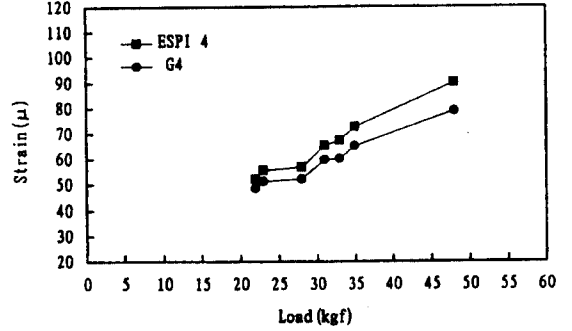


Fig. 9 Measuring Results of Spot Welded Joint (G4 Point)

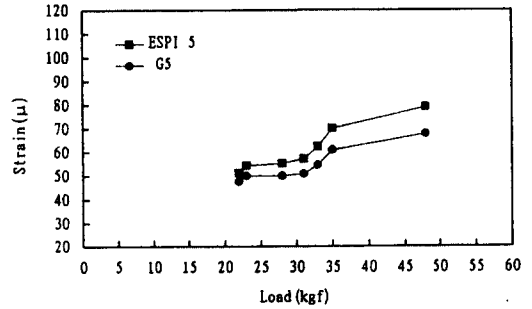


Fig. 10 Measuring Results of Spot Welded Joint (G5 Point)

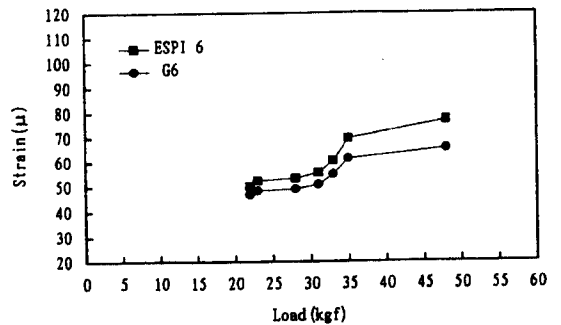


Fig. 11 Measuring Results of Spot Welded Joint (G6 Point)

## 5. 결 론

전자처리 스페클 패턴 간섭법을 이용, 점용접부의 변형률을 측정하여 스트레인 게이지법과 비교 고찰한 결과 점용접부 변형률 측정의 새로운 방법인 ESPI법이 유용함을 알 수 있었다. 저하중의 경우 7~8%의 오차가 발생했으며, 고하중의 경우 14~18%로 오차가 커지는 경향을 나타냈는데 이는 하중이 증가함에 따라 측정면에 굽힘 현상이 발생되어 레이저 스페클의 민감도가 떨어지기 때문이며, ESPI법 자체의 문제로는 생각되지 않는다.

점용접 너깃부 근방에서 변형률 값의 차이가 크게 나타났으며, 너깃부에서 멀어질수록 변형률 값의 차이가 작아지는 것으로 보아 용접부 영향을 받지 않는 지점에서는 좌·우의 변형률 편차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다.

실험을 통하여 발생된 오차값들은 인장시험기, 광학계 배치, 레이저 광의 조사각도 그리고 줄무늬 간격 측정시의 오차 등을 생각할 수 있는데, 향후 이에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

## 후 기

본 논문은 1996년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

## 참 고 문 헌

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, Fournery. 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스펙클히ずみ計による高温下のひずみ測定 ", *日本破壊検査學會*, 第32卷, 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. 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)
9. 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)
10. Archbold. E, Ennos. A. E, " Displacement Measurement from Double Exposure Laser Photographs ", *Optics*, 19(4), pp.253-271 (1972)