

스펙클 간섭법에 의한 Nd:YAG 레이저 용접부의 변형해석

Strain Analysis of Nd:YAG Laser Welding Zone by Speckle Interferometry

김경석(조선대 기계공학부), 김성식(목포과학대학 컴퓨터응용기계과),
정승택(조선대 대학원), 김종수(조선대 레이저응용신기술개발연구센터)

ABSTRACT

This paper used the Laser Speckle Interferometry to present the strain analysis of Nd:YAG Laser welding zone. Previous TIG welding to sheet plate, which welds only high-skilled engineer, produces residual stress nearby welding zone due to thermal effect. However, Laser welding makes sheet plate welding easy and thermal effect minimum. Thermal effect zone is measured by strain analysis of the laser-welding zone by ESPI under tensile testing of sheet plate welded by Nd:YAG laser. The ESPI results, which compared with strain gage method, are agreed within error 3 %.

1. 서론

본 연구에서는 레이저 용접부의 변형해석을 위해 비접촉 변형해석 기술인 ESPI를 사용하였다. 레이저용접은 이종금속간의 용접이 가능하고, 순간적으로 원하는 부위에만 열을 집중하여 용접이 이루어지므로 모재에는 거의 열변형이 가지 않아 잔류응력을 발생하지 않는다. 이러한 특성으로 많은 부분에서 레이저용접을 선호하고 있다. 따라서 본 연구에서는 레이저 용접부가 구조물에 미치는 영향에 대해 정확히 평가하기 위해 Nd:YAG 레이저 용접 시험편을 제작하고 인장실험을 통하여 용접부 주위의 변형분포를 관찰하여 미치는 영향을 규명하였다. 기계부품 및 구조물의 정밀계측은 수명 및 안전에 직결되므로 여러 가지 방법으로 안정성

을 위한 정밀계측 방법이 제안되고 있다. 지금까지 가장 신뢰하는 기법으로 Strain-gage를 부착하여 측정하는 방법이 있으나, 이 기법은 대상 표면 상태가 청결해야하고, 준비단계가 많으며, Strain-gage를 부착한 부분만을 측정해내므로 넓은 영역을 측정할 시에는 많은 Gage를 부착하여야 한다는 단점이 있다. 이러한 불편함을 줄이기 위해 본 연구에서는 실질적인 현장적용기법으로 평가받고 있는 전자처리 스펙클패턴 간섭법 (ESPI : Electronic Speckle Pattern Interferometry)을 이용하였다. 이 기술은 레이저가 조사되는 면적을 동시에 검사 계측할 수 있는 기술로 기존의 형상제약 등의 문제를 보완하면서 물체의 3D 변형해석을 할 수 있다. 본 연구에서는 레이저 용접 시험편의 인장실험을 Strain gage 기법과 ESPI를 동시에 적용하여 상호 기법의 신뢰성평가와 용접부 주위에서 변형 분포를 관찰하여 레이저용접이 구조물에 미치는 영향을 평가하였다.

2. ESPI 시스템 구성

2.1 4개의 면의정보를 측정한 3차원 변형해석

본 연구에서 사용하는 기법은 기존의 3D 변형해석을 위한 두 개의 면내간섭계와 하나의 면외간섭계를 사용하지 않고 4개의 면외변위 간섭계를 구성하여 물체의 변형정보를 계측함으로써 물체의 3차원 정보를 해석하였다. ESPI는 가장 널리 알려진 Holography기법과 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 즉, 레이저의 간섭현상을 이용하여 변형 전과 변형후의 이미지를 Hologram에 저장하고, 처리하여

이를 재생(Reconstruction)함으로써 변형정보를 얻을 수 있다. ESPI에서는 Hologram을 대신하여 CCD 카메라와 광합성광학기기(Beam combiner)를 이용하여 각 이미지의 위상정보를 레이저의 간섭성질에 의해 일어나는 물체표면의 Speckle의 강도분포로 컴퓨터에 저장하고, 화상처리장치를 통하여 두 이미지를 감산(Subtraction) 또는 합산(Addition)처리함으로써 프린지 패턴 (Fringe Pattern)을 형성하게 된다. 즉, 두 장의 스페클 패턴 변형 전·후 $I_{before}(x, y)$ 와 $I_{after}(x, y)$ 는 CCD 카메라에 수광된 빛의 강도분포를 나타내며, 이들의 차를 구함으로써 관찰대상의 변화된 정도가 가시화된다. 만일 CCD 카메라의 수광소자에 입력되는 변형 전·후의 신호인 $S_{before}(x, y)$ 와 $S_{after}(x, y)$ 가 이미지의 강도 분포에 비례한다면 감산된 신호 $S_f(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$S_f(x, y) = S_{before}(x, y) - S_{after}(x, y) \\ = 4\sqrt{I_b I_a} \sin\left(\phi(x, y) + \frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta\phi(x, y)}{2}\right) \quad (1)$$

여기에서 $\phi(x, y)$: 초기위상,

$\Delta\phi(x, y)$: 물체의 변형에 따른 위상차

이 신호는 음수 값과 양수 값을 갖게된다. 그러나 모니터는 음수 값을 검정색으로만 표시를 하게되며 이를 피하기 위해 정류과정을 거쳐 모니터에 표시를 한다. 위상변화를 일으키는 물체의 면외변위 d_1 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

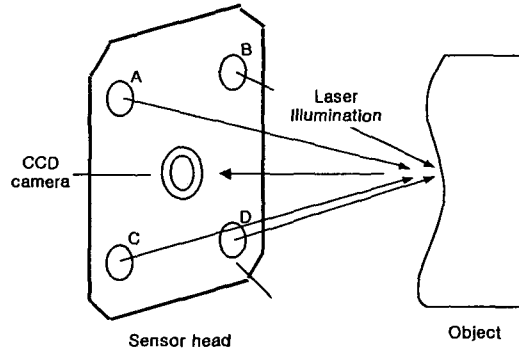
$$\Delta\phi = 4\pi d_1 / \lambda \quad (2)$$

$\Delta\phi$ 의 일반화된 형식은

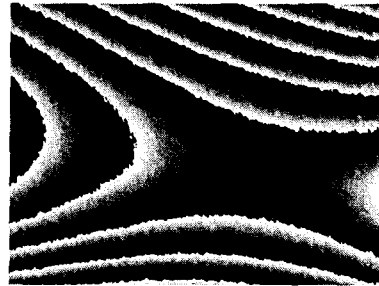
$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\vec{n}_o - \vec{n}_s) \cdot \vec{d} \quad (3)$$

여기에서 \vec{n}_o : 레이저조사 방향벡터

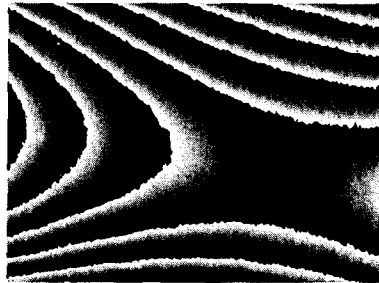
\vec{n}_s : 관찰 방향벡터 이다.



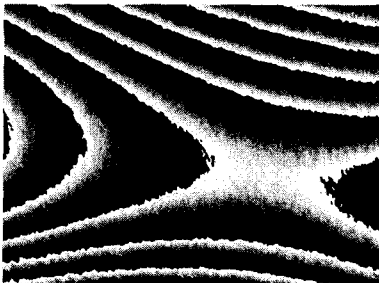
[그림 1] 4개의 면외변위간섭계를 이용한 물체의 3차원 변위정보 해석



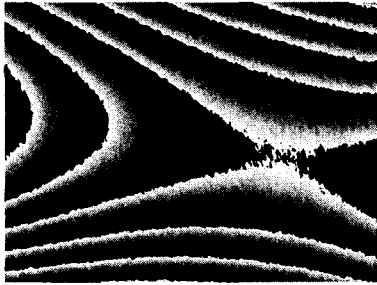
(a) 간섭계 A에 의한 위상지도와 변위분포



(b) 간섭계 B에 의한 위상지도와 변위분포



(c) 간섭계 C에 의한 위상지도와 변위분포



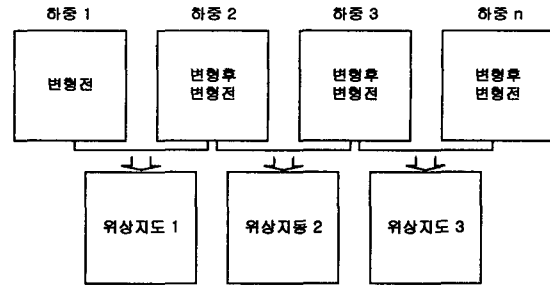
(d) 간섭계 D에 의한 위상지도와 변위분포

[그림 2] 4개의 면외변위 간섭계로 부터 획득한 각각의 위상지도 및 변위분포

식(3)에서 레이저의 조사방향과 CCD 카메라가 이루는 벡터를 감도 벡터 \vec{k} 라 하면 [그림 1]에서 4개의 면외변위 간섭계(A, B, C, D)는 각각의 감도 벡터를 가지며, 각 감도 벡터는 물체의 3차원 정보를 가지고 있으며, 4개의 감도벡터의 관계식을 풀어냄으로서 물체의 3차원 정보를 얻을 수 있다. 변형정보의 정량화를 위한 위상이동기법은 각 4개의 면외변위 간섭계에서 수행이 된다. 즉 각 간섭계에서 변형전 4개($0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$)의 위상 이동된 스페클패턴(Speckle pattern)을 얻고 변형 후 4개의 스페클패턴을 얻어 연산처리함으로써 물체의 변형정도를 얻을 수 있다. [그림 2]는 각 4개의 간섭계에서 확보한 면외변위에 대한 위상지도(Phase map)를 각각 표시하였다.

2.2 연속적인 인장실험을 위한 화상처리구성

ESPI 실험은 화상처리기법의 특성으로 변형전후의 상태를 비교하므로 본 논문에서는 변형해석을 위해 두 가지의 기법을 사용하였다. 첫 번째 방법으로 변형 전과 변형 후의 하중 값을 기록하고 ESPI로 측정하였으며 하중변화에 따라 변형해석을 하였다. 이때 스트레인게이지와 동시에 측정하여 실험결과를 비교하였다. 두 번째 방법은 연속적인 인장실험을 위해 사용한 기법으로 ESPI는 최대 CCD의 분해능에 의존하여 보통 $100 \mu\text{m}$ 이내의 변위를 측정하게 된다. 따라서 연속적인 인장실험에서는 적용이 어려워 [그림 3]과 같은 방법을 사용하였다. 하중 1과 2의 차이에 의해 위상지도 1을 형성하고 변형 값이 기록이 되며, 다시 위상지도 2는



[그림 3] 연속적인 인장실험을 위한 실험방법

하중 2와 3의 차에 의해 기록이 된다. 즉 하중 2의 상태는 위상지도 1의 변형 후와 위상지도 2의 변형전이 되어 각 위상지도의 변형 값을 합산함으로써 연속적인 인장실험에서 전체 변형 량을 측정하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 Nd:YAG 레이저 용접시험편

실험에 사용된 재료는 자동차 및 주방에 많이 사용되는 STS304 시험편으로 $50 \times 50 \times 1t \text{ mm}^3$ 의 시험편을 Nd:YAG Laser를 이용하여 두 개를 맞대기 용접하였다. [표 1]은 Nd:YAG 레이저용접 조건이다.

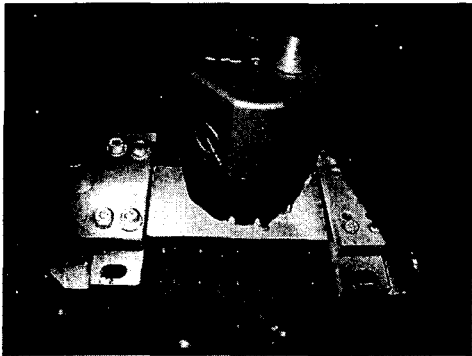
[표 1] Nd:YAG 레이저 용접 조건

Power	Speed	Focal Length	보조가스
1 kW	2.5 m/min	0	Ar (4 l/min)

2-2. 실험장치

인장실험은 자체 제작된 인장시험기를 이용하여 3개의 Strain gage를 용접부에 근접하여 부착을 하고 같은 표면을 ESPI 시스템(Microstar, Ettemeyer Co., Germany)을 이용하여 변형해석을 하였다. ESPI는 레이저를 이용한 비접촉 해석기술로 물체의 변위에 따라 물체와 센서 사이에 상대운동이 발생하고 이는 오차를 유발하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시험편에 센서를 지지대로 부착을 하여 물체와 센서간의 상대운동을 제거하였다. 지지대의 거리 제한으로 실험에서는 $30 \times 30 \text{ mm}^2$

의 면적을 동시에 측정하였으며, 이 면적은 1 mm strain gage의 900개에 해당하는 정보를 동시에 제공하게 된다. 실험방법으로는 하중변화에 따라 스트레인게이지와 ESPI 실험결과를 비교하여 ESPI 시스템의 신뢰성을 평가하였으며, 또한 ESPI 실험 결과로부터 측정된 용접부 주위의 변형분포를 관찰함으로써 용접에 의해 미치는 영향을 분석하였다. [그림 4]는 용접시험편에 지지대(35 mm)를 이용하여 부착한 ESPI 센서의 사진이다.

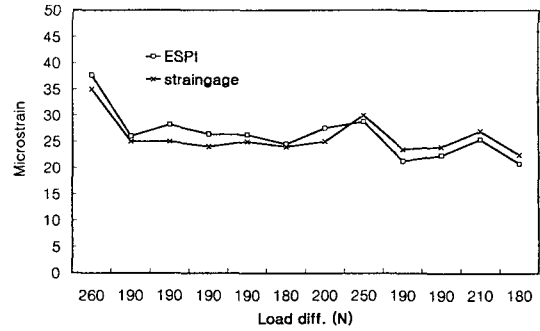


[그림 4] 대상 시험편과 ESPI 센서

3. 결과 및 고찰

3.1 실험 결과 비교

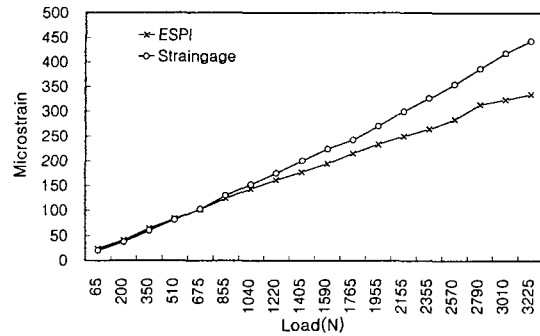
본 연구에서는 Nd:YAG 레이저 용접부에서 변형해석을 위해 ESPI를 이용하였으며, 1차적으로 스트레인게이지 기법과 비교하여 신뢰성을 검증하였다. 변형 전과 후의 하중상태에 따라 변형량을 측정 비교하였다. [그림 5]와 [표 2]는 실험결과를 보여 준 것으로 12회의 실험을 통하여 8.5 % 오차가 발생하는 것으로 측정되었다. 다음은 연속적인 인장실험결과로서 ESPI와 스트레인게이지는 1000 N 이내에서는 실험결과가 잘 일치하고 있으나, 그 이상에서는 상당한 오차를 보이고 있다. 이는 ESPI가 각 하중단계에서 구한 변형값의 누적합으로 보여 주고 있으므로 오차 또한 누적되어 2500 N 이상에서는 상당한 오차를 보이고 있다. 오차의 원인으로서는 하중이 증가함에 따라 자체 개발된 인장시험기에서 백래쉬가 발생하여 동적변위가 발생하여 ESPI 결과에 영향을 주는 것으로 사료된다.



[그림 5] ESPI와 스트레인게이지 기법의 비교

[표 2] ESPI와 스트레인게이지 기법의 비교(με)

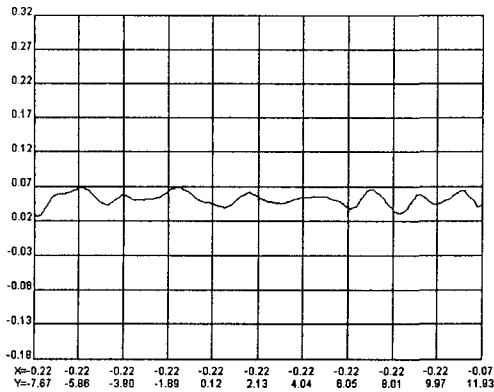
변형 전 하중(N)	변형 후 하중(N)	ESPI (με)	Strain gage(με)	Error (%)
160	420	37.7	35	7.71
190	380	26	25	4.00
250	440	28.2	25	12.80
290	480	26.4	24	10.00
370	560	26.3	25	5.20
410	590	24.5	24	2.08
510	710	27.5	25	10.00
600	850	28.8	30	4.00
710	900	21.3	23.5	9.36
810	1000	22.4	24	6.67
600	810	25.4	27	5.93
740	920	20.8	22.5	7.56



[그림 6] 연속적인 인장실험 결과비교

3.2 Nd:YAG Laser 용접부 주위의 변형분포 해석

비교실험결과에서 1000 N 이하의 하중조건에서 두 기법은 잘 일치하였다. 따라서 분포해석에서는 1000 N이하의 조건에서 인장력을 가하고 용접부에서 변형분포를 가시화하였다. [그림 7]은 인장



[그림 7] Nd:YAG 레이저 용접시험편의 변형률 분포

축 방향에 대한 변형률 분포를 나타낸 것으로 용접부에서 특이한 변형 분포를 찾을 수 없다. 시험편 전체에 대해 거의 균일한 하중분포를 보이는 것으로 측정되었다. 즉, 기존의 TIG 박판용접의 경우 열영향으로 인해 용접부 주위에서는 많은 잔류응력이 존재하였지만, 레이저용접의 경우 시험편 전체에 대해 균일한 변형분포로 잔류응력이 거의 없음을 보여주고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 Nd:YAG 레이저 용접부에서 용접의 영향을 규명하기 위해 시험편 전체의 변형률 분포를 알 수 있는 ESPI 기법을 이용하여 변형해석을 하였다. 적용을 위해 1차적으로 스트레인게이지와 비교를 통하여 ESPI 시스템의 신뢰성을 평가하였다. 비교에서 1000 N 이하의 실험에서는 실험 결과가 잘 일치하였으나, 그 이상에서는 자체 제작된 인장시험기의 백래쉬의 문제로 스트레인게이지와 비교에서 많은 오차를 보이고 있다. 실험결과에서 1000 N 이하에서는 8.5 %의 오차로서 실험결과가 잘 일치하였다. 또한 용접부 주위의 변형분포 해석에서는 인장력에 대해 기존의 용접기법과는 달리 용접부에서 특이한 변형분포를 보이지 않으며, 전체적으로 균등한 변형분포를 나타내는 것으로 측정되었다. 즉, 이 결과는 레이저용접은 모재에 영향을 주지 않으며, 특히 용접에 따른 열영

향이 거의 없어 용접부 주위에서 잔류응력이 존재하지 않는 것으로 조사되었다.

참고문헌

1. GARY L. CLOUD : Optical Methods of Engineering Analysis (1988), 481-491
2. Jones, R. and Wykes, C. : Holographic and Speckle Interferometry, Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1983.
3. Andress Ettemeyer Technical Engineering Note : Laser shearography for inspection of pipelines , nuclear Engineering and design, No. 160, pp.237~240, 1996.
4. Rastogi, P. K : Holographic Interferometry - Principles and Methods : Springer Series in Optical Sciences, Berlin Heidelberg : Springer - Verlag, 68(1994)
5. Cha, Y. H, Sung, B. S, Kim, D. J : Out-plane Displacement Measurements of Butt-Welded Zone in the SS400 Steel Plate. (2002), 185-200
6. Sung, B. S : The Strain Measurement of Welded Zone by the Laser System(2001)
7. John Wiley & Sons : Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry (1996) 201-234