

레이저 간섭법과 점 가열법을 이용한 용접부의 잔류응력 측정에 관한 연구

홍경민*, 강영준#, 이동환**

A Study on Welding Residual Stress Measurement by Laser Interferometry and Spot Heating Method

Kyung Min Hong*, Young June Kang# and Dong Hwan Lee**

ABSTRACT

Residual stress is one of the causes which make defects in engineering components and materials. Many methods have been developing to measure the residual stress. Though these methods provide the information of the residual stress, they also have disadvantage like a little damage, time consumption, etc. In this paper, we devised a new experimental technique to measure residual stress in materials with a combination of laser speckle pattern interferometry and spot heating. The speckle pattern interferometer measures in-plane deformation during the heat provides for much localized stress relief. 3-D shape is used for determining heat temperature and other parameters. The residual stresses are determined by the amount of strain that is measured subsequent to the heat and cool-down of the region being interrogated. A simple model is presented to provide a description of the method. In this paper, we could experimentally confirm that residual stress can be measured by using laser interferometry and spot heating method.

Key Words : Electronic Speckle Pattern Interferometry (전자 스펙클 패턴 간섭법), Residual Stress (잔류응력), Spot Heating Method (점 가열법), Welding (용접)

1. 서론

잔류응력(residual stress)이란 절삭, 압연, 단조, 가열, 냉각, 열처리, 용접, 도금과 같은 많은 재료 공정과 연결 조작에 의한 급격한 변화로 생긴 불균일한 소성 변형의 결과로 발생한 응력, 즉 모든 외부의 힘을 제거시켰을 때 재료 내부에 존재하는 응

력으로 “의도되거나 의도되지 않은 외부하중 작용 없이 존재하는 응력”을 말하며,¹ 이러한 잔류응력은 기계 부품들뿐만 아니라 항공기와 원자로 같은 많은 공학적 구조물에도 발생하며, 대부분이 잠재되어 있는 응력에 의해 구조물의 파손이 순간적으로 이루어져서 산업 재해 및 손실을 주고 있다.² 이러한 잔류응력 측정은 크게 파괴적인 방법과

☞ 접수일: 2007년 3월 13일; 게재승인일: 2007년 11월 19일

* 전북대학교 대학원 기계설계학과

교신저자: 전북대학교 기계항공시스템공학부

E-mail yjkang@chonbuk.ac.kr Tel. (063) 270-2453

** 전북대학교 기계항공시스템공학부

비파괴적인 방법으로 구분할 수 있는데 파괴적인 방법은 여러 가지 확립된 방법이 있으나 측정 대상체를 파괴시켜야만 한다는 근본적인 문제점이 있다. 반면에 비파괴적인 방법은 X-ray 회절법(혹은 XRD)을 비롯하여, 중성자 회절법, Barkhausen noise와 초음파법(ultrasonics)이 있지만 X-ray 회절법은 표면 상태에 따라 영향을 많이 받는다는 가장 큰 단점이 있으며, 중성자 회절법은 원자로와 같이 강한 중성자 원료가 필요하기 때문에 그것은 산업 현장으로 확대되지 못하고 실험실 수준으로 제한되어져 있다. 그리고 초음파법은 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력 분포에는 측정이 용이하지 않다. 또한 홀드릴링(hole-drilling)을 이용한 레이저 간섭법을 이용한 기존 잔류응력 측정 방법이 있으나 이 방법 또한 파괴적이라는 단점을 피할 수 없다.²

그러므로 본 연구는 이러한 잔류응력 측정 기법들의 단점을 보완하고자 비파괴 비접촉 방법인 레이저 계측 기술 중 전자 스페클 패턴 간섭법(Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI)³과 점 가열법(spot heating method)으로 잔류응력을 측정하는 새로운 실험적 기법을 이용하여 현재 여러 산업 분야에서 문제시 되고 있는 잔류응력을 검출하기 위한 새로운 방법을 고안함으로써 그 이론적 접근 방법을 제시하고 실험을 통한 검증은 목적으로 하였다.

2. 잔류응력 해석 모델링

잔류응력을 결정하는 과정은 아래에서 논의될 단순한 모델링으로 설명되어 진다. 온도 T_L 에서 길이 L 인 스프링이 초기에 완료되어 있다고 가정하자. 그 후 미지의 변위량 x_1 이 그 스프링에 가해지고, 그 양 끝단은 일시 고정되어 있다. 그러므로 가해진 힘의 값 또한 미지수이다. 변위와 힘의 상관관계를 후크의 법칙으로 나타내면

$$F_1 = k_L x_1 \quad (1)$$

여기에서 k_L 은 온도 T_L 에서의 스프링 상수이다. 이 스프링에 내재된 변형에너지는 힘-변위 선도인 Fig. 1을 참조하면 아래 식으로 표현되어진다.

$$U_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{F_1^2}{k_L} \right) \quad (2)$$

이러한 초기상태가 Fig. 1의 힘-변위 선도에서 point I으로 나타난다. 스프링에 인장을 가한 그 후에 가열하면, 힘은 열 팽창과 소성 흐름에 의해서 이루어질 것이다. 소성 흐름은 상승된 온도 T_H 에서 재료의 항복 응력을 감소시킨다.

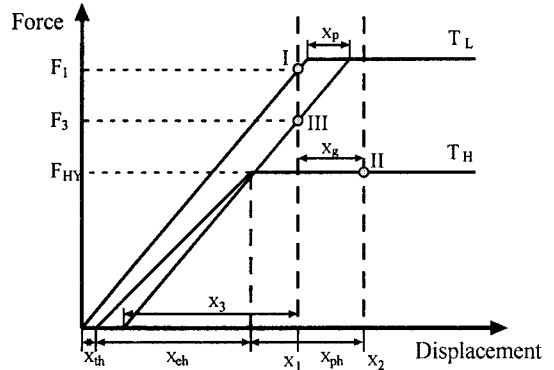


Fig. 1 Force-displacement diagram for the simple spring model

스프링이 가열되어진 후의 스프링 상태는 Fig. 1에서 point II로 나타난다. point II는 보다 높은 온도 T_H 와 일치하는 힘-변위 선상에 위치하며, Fig. 1에서 보면 알 수 있지만 초기 변위에서 어느 정도 변위가 증가하였음을 알 수 있다. 이 이유는 스프링의 양 끝단이 고정되어 있다 하여도, 실제 잔류응력이 있는 부재에 열을 가하면 그 변위가 증가함으로 실제 환경과 보다 일치하게 접근하기 위해서이다. 힘-변위 선도는 열팽창에 의해 고려되어진 변위량 x_{th} 에 영향을 받으며, 가열된 스프링의 총 변위는 x_2 이다.

이 변위는 그 특성에 따라서 3개의 ‘가상’ 성분으로 나누어 질 수 있다. 첫 번째가 가열에 의한 열팽창 성분이며 아래 식으로 표현되어 진다.

$$x_{th} = \alpha (T_H - T_L) L \quad (3)$$

두 번째가 가열 온도 하에서의 탄성 성분이며 아래 식으로 나타난다.

$$x_{eh} = \frac{F_{HY}}{k_H} \quad (4)$$

여기에서

- x_{th} : 가열에 의한 열팽창 변위량
- x_{eh} : 가열에 의한 탄성 변위량
- x_{ph} : 상승온도에서의 소성 변위량
- F_{HY} : 스프링의 고온 항복응력에서의 힘
- T_L : 레이저로 가열하기 전의 온도
- T_H : 상승온도
- L : 스프링의 초기 길이
- k_H : T_H 에서의 스프링 상수
- k_L : T_L 에서의 스프링 상수

그리고 마지막으로 상승된 온도에서의 소성 성분은 x_{ph} 가 된다. 이 세 성분은 힘-변위 선도인 Fig. 1을 보면 잘 나타나 있다. 여기에서 F_{HY} 는 고온 항복응력에서의 힘을 나타낸다. 그리고 그 재료는 완전 소성으로 가정되어 진다.

이제 스프링이 가열된 후 냉각 과정을 보자. 스프링이 완전히 냉각되었을 때, 열팽창은 반대로 되어지지만 소성 변형은 남는다. 그러므로 힘은

$$F_3 = k_L x_3 = k_L (x_1 - x_p) \quad (5)$$

이며, point III는 아직까지 세 번째 힘-변위 선상에 있고 그것은 소성 흐름에 의해서 변위되어지고 있다. 그 때 스프링에 내재된 변형에너지는 아래 식으로 표현된다.

$$U_3 = \frac{1}{2} x_3 F_3 \quad (6)$$

그러면, 앞에서 언급하였던 가열에 의해서 가해진 응력이 경감된다는 원리에 따라 응력 경감의 결과로서 소산된 변형 에너지의 양이 구해져야 한다. 그 소산된 변형 에너지의 산출식이 아래와 같다.

$$U_d = x_{ph} F_{HY} \quad (7)$$

지금까지 세 개의 탄성 에너지를 구하였다. 맨 처음 힘 F_1 에 의해 초기에 저장된 에너지는 마지막 까지 남아 있는 에너지와 소성 흐름에 의해 소산된 에너지의 합과 같다. 즉,

$$U_1 = U_3 + U_d \quad (8)$$

위 식을 물리적 매개변수와 소성 흐름량의 항인

미지의 힘 F_1 으로 이끌기 위해서 식(8)을 전개해 보자. 각각의 탄성 에너지식인 식 (2), 식 (6)과 식 (7)을 식 (8)에 대입하면, 식 (9)가 된다.

$$x_1^2 k_L = (x_1 - x_p)^2 k_L + 2\{x_1 + x_g - (x_{th} + x_{eh})\} F_{HY} \quad (9)$$

위 식은 식 (3)과 식 (4)가 각각 대입되고, 일부 항이 전개되어 식 (10)이 된다.

$$\left(1 - \frac{F_{HY}}{x_p k_L}\right) F_1 = \frac{1}{2} x_p k_L + \{x_g - (\alpha \Delta T L + \frac{F_{HY}}{k_H})\} \frac{F_{HY}}{x_p} \quad (10)$$

위 식 (10)은 힘 F_1 (실제 실험에서 우리가 가해 주는 기지의 힘)으로 이끌어지며, 그 결과식이 식 (11)이다.

$$F_1 = \frac{\frac{1}{2} x_p^2 k_L + x_g F_{HY} - \alpha \Delta T L F_{HY} + \frac{F_{HY}^2}{k_H}}{x_p - \frac{F_{HY}}{k_L}} \quad (11)$$

만약 스프링을 일정한 단면적을 갖는 bar라고 가정하면, F_1 은 아래와 같이 응력과 변형률을 포함하는 식으로 고쳐 쓸 수 있다.

$$\sigma_R = \frac{\frac{1}{2} \epsilon_p^2 E_L + \epsilon_g \sigma_{HY} - \alpha \Delta T \sigma_{HY} + \frac{\sigma_{HY}^2}{E_H}}{\epsilon_p - \frac{\sigma_{HY}}{E_L}} \quad (12)$$

여기에서

- σ_R : 측정되어지는 미지의 인장 응력
- 즉, 측정하고자하는 잔류응력
- E_L : 레이저로 가열하기 전의 Young's modulus
- σ_{HY} : 상승 온도 T_H 에서의 항복 응력
- E_H : 상승 온도에서의 Young's modulus
- α : 재료의 열팽창 계수
- ΔT : 레이저 가열에 의한 온도 상승 ($T_H - T_L$)

ε_g : 변위 x_g 에 의한 면내 변형률
 ε_p : 응력 이완의 결과인 “가상” 면내 변형률

그러므로 만약 재료의 물성치가 알려져 있다면 변형률 값 ε_p 로 잔류응력이 결정되어진다. 이러한 접근 방법이 본 실험에서 사용한 점 가열법의 원리라 할 수 있다.

3. 간섭무늬 해석 이론

홀로그래피 간섭법과 마찬가지로 ESPI에서도 일정한 변위의 등고선을 나타내는 밝고 어두운 간섭무늬가 변형된 물체의 상위에 중첩되어 나타난다. 이러한 변위의 방향은 간섭계의 광학적 구성에 의해 결정되는 Fig. 2의 민감도 벡터(sensitivity vector)⁵에 의해 결정된다. 일반적인 간섭계에서 물체를 비추는 빔의 벡터 \vec{k}_1 과 물체에서 관측자에게 오는 빔의 벡터 \vec{k}_2 에 대한 민감도 벡터 \vec{K} 는 아래 식과 같다.

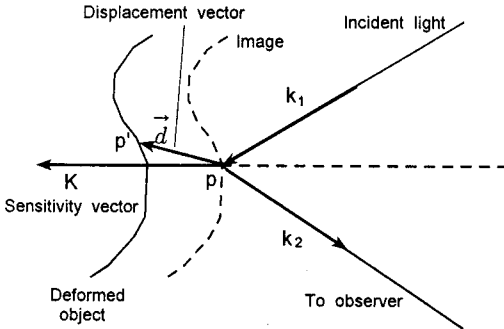


Fig. 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in ESPI

$$\vec{K} = \vec{k}_1 - \vec{k}_2 \quad (13)$$

따라서 간섭무늬를 영상처리해서 물체 영상의 각 위치에서 원하는 위상정보가 얻어지면, 변위의 양은 민감도 벡터에 의해 결정된다. 그림에서 평면의 어느 한 점이 변위 \vec{d} 만큼 이동한 빛의 강도 분포는 아래 식으로 표현된다.

$$i = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Psi + \Delta\phi) \quad (14)$$

위 식에서 $\Delta\phi$ 가 두 빔에 의한 위상 변위를 나

타내므로 그에 따른 식을 전개해 나가려면, 변위 \vec{d} 만큼 이동하기 전과 후 두 빛의 위상을 각각 벡터 형으로 구해야 한다. 구해진 각각의 벡터 방정식들은 위상변화에 의한 위상차들로 나타나면서 스칼라 량으로 표현된다. 그리고 면내 변위에 의한 최종 위상차는 아래와 같이 식 (15)로 표현된다.

$$\Delta\phi = \delta_1 - \delta_2 \quad (15)$$

이 위상차는 각각 아래의 두 식 (16)과 식 (17)로 표현되며, in-plane ESPI에서 구하고자 하는 변위 값인 식 (18)을 구할 수 있다.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta \quad (16)$$

$$\Delta\phi = 2\pi N \quad (17)$$

$$d = \frac{N\lambda}{2\sin\theta} \quad (18)$$

여기에서

- N : 간섭무늬 차수
- λ : 레이저의 파장
- θ : 레이저의 입사각

그러므로 스페클에 의해서 간섭무늬가 발생하며, 이 간섭무늬는 위상차 즉, 우리가 구하고자 하는 방향의 변위를 내포하고 있다.

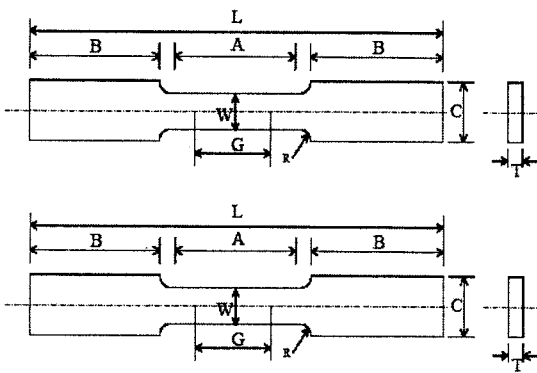
4. 실험 구성 및 방법

4.1 시편 제작 및 인장 시험기

Fig. 3에서 보는 바와 같이 측정 시편은 ASTM subsizer 인장 시편을 기준으로 하였으며 응력 변화를 뚜렷이 관찰하기 위해 약 1.5배의 크기로 인장 시편을 제작하였고 재질은 산업 현장이나 인장 및 용접 시험에서 많이 쓰이고 있는 스테인리스 강인 STS 304 (SUS 304)를 사용하였다. ASTM 인장 시편을 제작한 후 두 가지 방법으로 용접을 하여 시편을 마무리하였다. 첫 번째 시편(Fig. 4)은 방전 가공 한 뒤 아무런 용접을 하지 않고 잔류응력도 내재되어 있지 않은 시편이다. 이 시편은 인장 시험기로 임의의 인장 잔류응력을 생성 시켜서 실험한 뒤 잔류응력 이론식과의 비교를 위한 것이다.

두 번째 용접 시편은 아르곤 가스를 이용하여 시편 중앙을 맞대기 용접한 것과 같이 TIG 용접을 한 것이고(Fig. 5), 세 번째 용접 시편은 가공용 Nd:YAG 레이저를 사용하여 30W의 출력으로 21초 동안 heating하여 시편 중앙을 용접한 것이다.(Fig. 6)

Fig. 7은 실험에 사용된 인장 시험기의 사진이며, 이 인장기의 최대 인장력은 200 kgf이고 최소 변형량은 1 μ m, 최대 인장 길이는 100 mm이다. 인장기 좌측에 load cell이 부착되어 있고 controller와 PC에 설정된 프로그램과 연결되어 원하는 인장력이나 변형량을 프로그램에 입력하여 시편을 손쉽게 인장시킬 수 있다.



Abbrev.	Description	Dimension
L	Over-all length	150 mm
A	Length of reduced section	78 mm
B	Length of grip section	36 mm
C	Width of grip section	54 mm
G	Gage length	70 mm
W	Width of reduced section	15 mm
T	Thickness	0.5 mm

Fig. 3 Dimension and mechanical properties of specimen

4.2 시스템 구성

관류응력을 측정하기 위해서 인장 시험에 많이 사용되는 In-plane (면내변위) ESPI 간섭계를 사용하였다. In-plane ESPI 광학계 구성에서 중요하게 고려되는 점들은 간섭무늬의 자동해석을 할 수 있도록 위상이동법을 이용해야하며 이 방법을 적용하기 위해서 위상이동이 가능해야 한다는 점이다. 또한, 최소한의 광학 부품을 사용하여 시스템을 간결

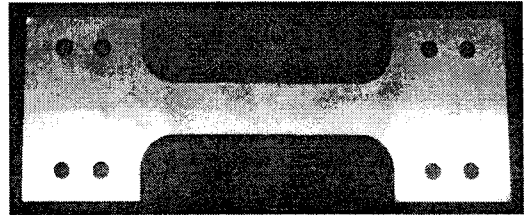


Fig. 4 Typical tension specimen

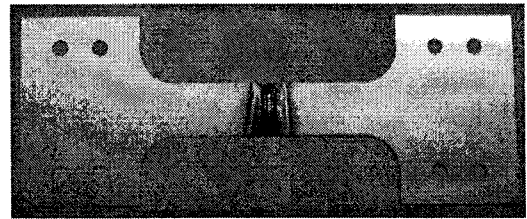


Fig. 5 TIG welding specimen

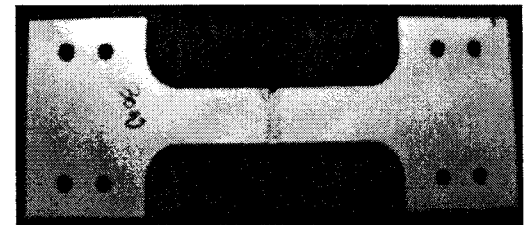


Fig. 6 Nd:YAG Laser welding specimen

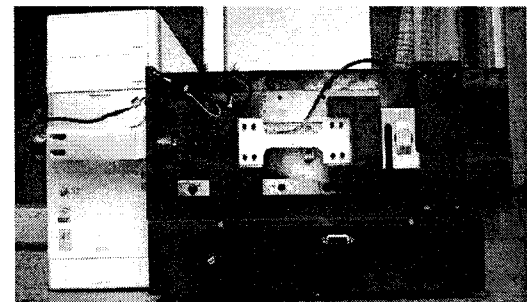


Fig. 7 Tension Tester

하게 구성하는 것도 중요하다. Fig. 8은 본 실험을 위해 구성된 In-plane ESPI의 구성도이다.

실제 실험 중 가열을 하기 위한 가열원은 가공용 Nd:YAG 레이저이며, 가열시 가열점의 크기, 가열률, 열유속과 레이저 펄스폭들이 입력 매개변수로 작용하며, Table 1에는 이러한 매개변수들이 나타나있다.

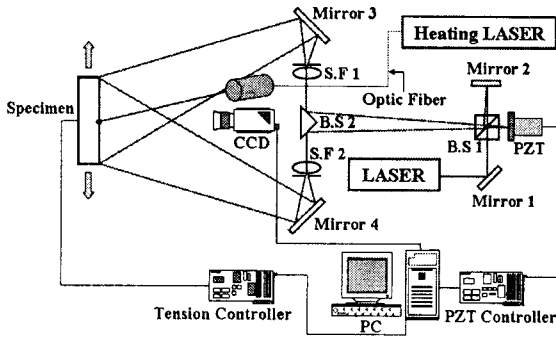


Fig. 8 Schematic diagram of the laser interferometer used in the in-plane ESPI

Table 1 Heating laser specifications

Heating source	Nd : YAG Laser
Heating area	D 1.2 mm
Heating time	5 seconds
Heating power	13 W
Pulse width	8 ms
Frequency	10 Hz
Energy level	10 %

5. 실험 결과

5.1 TIG 용접 시편의 인장 잔류응력

TIG 용접의 경우에는 용접에 의해 생성된 용접 비드의 영향 때문에 시편의 앞면에서 측정을 하였을 경우 점 가열 위치에 따라 결과가 다르게 얻어졌다. 용접 비드를 중심으로 좌측, 우측, 중앙 총 세 위치를 점 가열하였는데 각각의 위치에 따라 인장 잔류응력 값이 다르게 얻어졌다. 따라서 TIG 용접과 같이 용접부에 용접 비드가 생성되는 경우에는 용접 뒷면에서의 측정이 불가피한 것으로 판단되어 용접 뒷면의 중심을 점 가열하여 실험하였다.

Fig. 9 는 4.2절에서 설명되어진 시스템으로 위상이동을 시켜 얻어진 위상도이고, Fig. 10 은 자체 개발된 화상처리 프로그램을 사용하여 위상도를 펼쳐서 얻어진 위상 펼침 이미지이고, Fig. 11 은 눈으로 쉽게 인장 잔류응력을 볼 수 있도록 3차원으로 정량화한 그림이다. 정량화를 통해 측정된 최대 변형량은 $6.8 \mu\text{m}$ 이고, 잔류응력 산출식(식 12)에 적

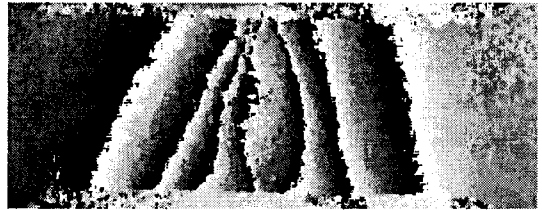


Fig. 9 Phasemap for TIG welding specimen

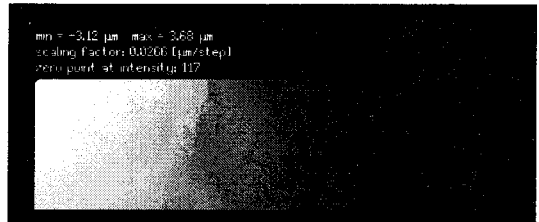


Fig. 10 Unwrapping for TIG welding specimen

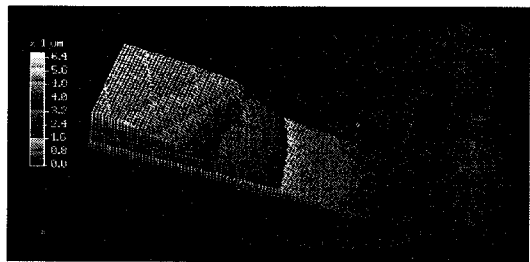


Fig. 11 3D plot for TIG welding specimen

용하여 계산된 최대 인장 잔류응력은 228.5 MPa 이다.

5.2 레이저 용접 시편의 인장 잔류응력

최근에 원자력 분야에서 각광 받고 있는 레이저 용접이 기존의 TIG 용접에 비해 인장 시편의 잔류응력 생성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 레이저 용접 시편으로 동일한 실험을 수행하였다. 레이저 용접의 경우 용접 비드 생성이 없기 때문에 시편의 앞면에서의 점 가열 및 측정이 가능하였다. 그 결과가 Fig. 12~14 에 나타나 있다. 시편의 변형이 TIG 용접 시편과 유사한 형태를 이루고 있음을 알 수 있고, 정량화를 통해 측정된 최대 변형량은 $6.1 \mu\text{m}$ 이고, 잔류응력 산출식(식 12)에 적용하여 계산된 최대 인장 잔류응력은 204.2 MPa이다.

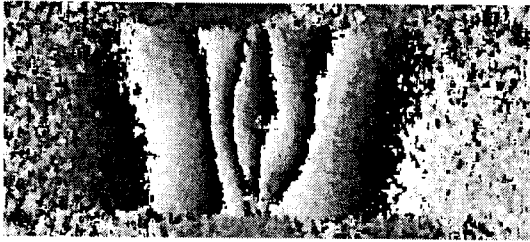


Fig. 12 Phase map for LASER welding specimen

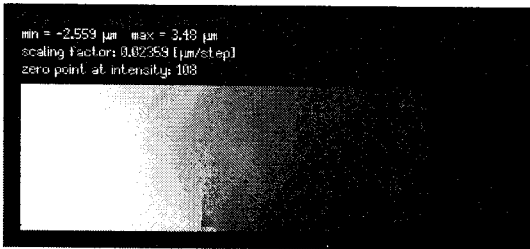


Fig. 13 Unwrapping for LASER welding specimen

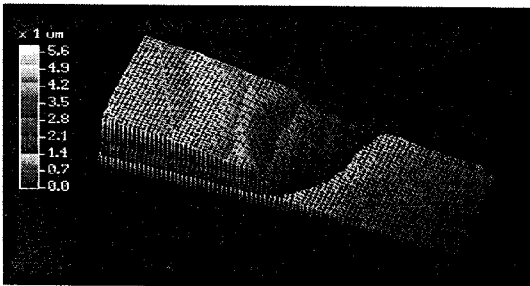


Fig. 14 3D plot for LASER welding specimen

5.3 인장 잔류응력 환산 데이터 그래프

레이저 간섭법과 점 가열법을 이용하여 측정된 용접부의 변형량 데이터를 2장에서 설명되어진 잔류응력 산출식인 (식 12)에 대입하여 계산한 결과값들을 눈으로 보기 쉽게 그래프로 나타낸 결과가 Fig. 15에 나와 있다. 인장 잔류응력 값은 시편의 우측을 중심으로 잡고 x축 성분만을 환산한 것이다. 실험을 통한 간섭무 실제 시편의 위치로 환산하여 Fig. 15와 같은 그래프를 얻게 되었다. LASER 용접 시편이 TIG 용접 시편보다 인장 잔류응력 값이 전체적으로 낮은 것으로 보아 LASER 용접 방법이 시편에 미치는 영향이 보다 적음을 다시 한 번 확인 할 수 있었다.

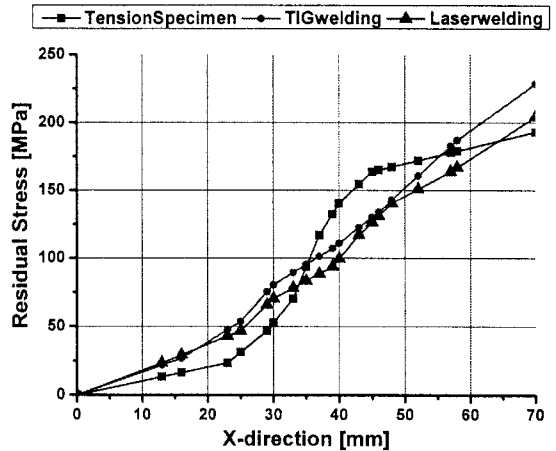


Fig. 15 Residual stress graph

6. 결론

본 연구는 산업 현장 전반에 걸쳐 문제가 되고 있는 용접부의 잔류응력 결정 방법에 대한 연구로서, 레이저 간섭법과 점 가열법을 이용한 잔류응력 측정이라는 방법을 제시하고 그 결과를 3D 가시화하여 정량화가 가능함을 밝혔다. 인장 잔류응력 측정 시스템은 크게 세 부분으로 구성되어 있으며 첫 번째는 점 가열법을 위한 레이저 가열 시스템이며, 두 번째는 시편을 인장시켜주는 인장 시험기 시스템이고, 세 번째는 시편에 존재하는 잔류응력의 함수인 면내 변형을 측정하기 위한 In-plane ESPI 시스템이다. 이러한 시스템을 이용하여 인장 잔류응력을 측정하였다. 본 논문을 위해 구성된 시스템의 신뢰성을 알아보기 위해 잔류응력이 존재하지 않는 시편에 인장 시험기를 이용하여 임의의 잔류응력을 발생시켜 그 결과를 이론식과 비교하는 여러 차례의 실험을 통하여 오차율을 줄인 다음 그 시스템을 그대로 용접 시편의 인장 잔류응력 측정 실험에 적용하였다. 레이저 간섭법과 점 가열법을 이용하여 기존의 기초 실험 단계를 벗어나 실제 용접부의 인장 잔류응력 측정을 하고자 하였다.

본 논문에서 제시된 시스템은 기존의 파괴적이고 접촉적인 Hole-Drilling 방법과는 달리 비파괴적이며 비접촉적인 방법이다. 또한 Hole-Drilling 방법에는 스트레인 게이지를 부착시켜야 하기 때문에 측정 범위에 제약을 받지만 본 논문의 시스템은 레이저를 사용하기 때문에 측정 대상물에 전면적인 조사가 가능하고 전면적인 측정이 가능하다는 큰

장점이 있다. 차후에는 Hole-Drilling 이나 X-ray 회절법과 같은 기존 잔류응력 측정 방법과의 비교를 통하여 정량화 단계까지 진행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

1. Nelson, D. V., Makino, A. and Fuchs, E. A., "The Holographic-hole drilling method for residual stress determination," Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 3-23, 1997.
2. Pechersky, M. J., Miller, R. F. and Vikram, C. S., "Residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry and local heat treating," Optical Engineering, Vol. 34, Issue 10, pp. 2964-2971, 1995.
3. Kim, J. S., Park, J. S. and Jin, T. E., "Review on the International Joint Researches for Evaluation of Welding Residual Stresses," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 23, No. 6, pp. 8-17, 2005.
4. Yang, Y. S., Lee, S. H. and Lee, C. S., "Analysis of Residual Stress and Strength in the Laser Spot Weldment," Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 22, No. 6, pp. 1016-1021, 1998.
5. Baysore, J. K. and Williams, M. S., "Laser Beam Welding and Formability of Tailored Blanks," Welding Journal, Vol. 74, No. 10, pp. 345-352, 1995.
6. Papkala, H., "Technological Problems in Spot Welding of Galvanized Car Body Sheet," Welding International, pp. 341-346, 1992.
7. Kang, Y. J., Rho, K. W. and Kang, H. S., "A study on Residual Stress Measurements with Laser Speckle Pattern Interferometry," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 11, pp. 121-129, 1998.