

레이저 간섭법을 이용한 잔류응력 측정 방법에 대한 연구

A Study on Residual Stress Measurements by Using Laser Speckle Interferometry

노경완*, 강영준**, 홍성진***, 강형수****

Kyung-Wan Rho*, Young-June Kang**, Seong-Jin Hong*** and Hyung-Soo Kang****

초 록 잔류응력은 공학적 구조물에 결함을 야기하는 유해한 응력이므로 산업현장에서는 이를 측정하기 위한 많은 관심을 가지고 있다. 현재 잔류응력 측정은 일반적인 방법을 사용하고 있지만 이러한 방법들은 어느정도 문제점을 내포하고 있다. 그러므로 레이저 스페클 간섭법에 유한요소법과 점 가열법을 혼합하여 산업 현장에 유해한 잔류응력을 측정할 수 있는 새로운 기법을 개발하였다. 이 기법에서 사용된 레이저 스페클 간섭계는 측정 시편의 응력이 풀림 때의 면내 변형을 측정하기 위해서 사용되어 졌으며, 유한요소법은 응력 풀림을 위한 가열부의 온도와 그 밖의 변수들을 결정하기 위해서 사용되어 졌다. 잔류응력은 측정하고자 하는 부위의 가열 냉각에 의한 변형률에 의해 결정되어지며, 이에 대한 간단한 모델링을 제시하였다. 또한 본 실험은 변형의 3차원 정량화를 수행하기 위해서 레이저 스페클 간섭계의 전자 광학적 기법 중의 하나인 위상이동법을 이용하여 수행되어졌다.

Abstract Residual stress is one of the causes which make defects in engineering components and materials. And interest in the measurement of residual stress exists in many industries. There are commonly used methods by which residual stresses are currently measured. But these methods have a little demerits, time consumption and other problems. Therefore we devised a new experimental technique to measure residual stress in materials with a combination of laser speckle pattern interferometry, finite element method and spot heating. The speckle pattern interferometer measures in-plane deformations while the heating provides for very localized stress relief. FEM 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 heating and cool-down of the region being interrogated. A simple model is presented to provide a description of the method. In this paper, the ambiguity problem for the fringe patterns has solved by a phase shifting method.

1. 서 론

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 응력을 말하며, 크게 압축 잔류응력과 인장 잔류응력으로 나누어진다. 압

축 잔류응력은 재료에 압축의 응력을 주어 균열 성장에 대한 잠재성을 감소시키기 위한 방법으로 재료에 shot peening이나 water peening 작업을 통해 주어진다. 반면에 인장 잔류응력은 재료의 피로 파괴와 부식을 일으키는 인장축 방향 응력을 말한다[1,2]. 이러한 잔류응력은 기계 부품들 뿐만 아니라 항공기와 원자로 같은 많은 공학적 구조물에도 발생하며, 대부분이 잠재되어 있는 응력에 의해 구조물의 파손이 순간적으

로 이루어져서 산업 재해 및 손실을 주고 있다.

이러한 잔류응력 측정은 크게 파괴적인 방법과 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 제한되어 있다. 그리고 초음파법은 측정하는 면적이 크기 때문에 국부적으로 미세하게 변하는 응력 분포에는 측정이 용이하지 않다. 또한 홀로그래피 간섭법(holographic interferometry)과 홀드드릴링(hole-drilling)을 이용한 기존 잔류응력 측정 방법이 있으나 이 방법 또한 파괴적이라는 단점을 피할 수 없다[3]. 그러므로 우리는 이러한 잔류응력 측정 기법들의 단점을 보완하고자 레이저 스페클 간섭법(laser speckle interferometry), 유한요소법과 점 가열법(spot heating method)으로 잔류응력을 측정하는 새로운 실험적 기법을 개발하였다. 본 기법은 응력을 받은 재료가 가열되어질 때, 재료가 열처리 시간과 온도 그리고 재료의 응력-변형률 특성에 어느 정도 의존함으로써 그 응력이 경감되어질 수 있다는 아주 간단한 사실을 기반으로 하고 있다. 궁극적인 측정 기법은 레이저로 자극 영역 내에 있는 조그마한 한 점을 가열하고 면내 변형에 민감한 ESPI(electronic speckle pattern interferometry)로 순수소성 흐름을 결정하는 것이다. 이러한 접근 방법은 전적으로 비접촉식이며 비파괴적인 ESPI의 장점을 모두 수용하고 있으므로 현장 측정에서 어느 상황에서든 쉽게 적용 가능한 잠재성을 가지고 있다.

2. 잔류응력 해석 모델링

잔류응력을 결정하는 과정은 아래에서 논의될 단순한 모델링으로 설명되어진다. 온도 T_L 에서 길이 L 인 스프링이 초기에 이완되어 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 상관 관계를 후크의 법칙으로 나타내면

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

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

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

이러한 초기상태가 Fig. 1의 힘-변위 선도에서 point I으로 나타난다. 스프링에 인장을 가한 그 후에 가열하면, 힘은 열 팽창과 소성 흐름에 의해서 이완되어질 것이다. 소성 흐름은 상승된 온도 T_H 에서 재료의 항복 응력을 감소시킨다. 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_h 에 영향을 받으며, 가열된 스프링의 총 변위는 x_2 이다.

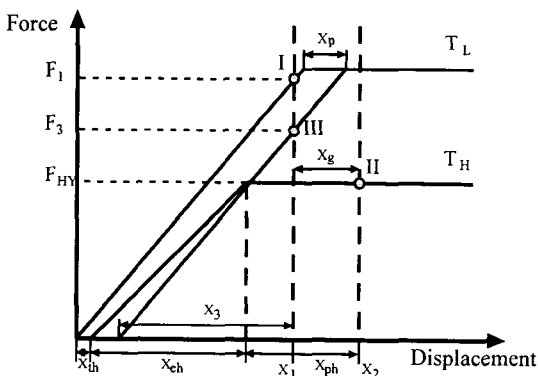


Fig. 1 Force-displacement diagram for the simple spring model

이 변위는 그 특성에 따라서 3개의 “가상” 성분으로 나누어 질 수 있다. 첫번째가 가열에 의한 열 팽창 성분이며 아래 식으로 표현되어진다.

$$x_{ph} = \alpha(T_H - T_L)L \dots\dots\dots (3)$$

두번째가 가열 온도 하에서의 탄성 성분이며 아래식으로 나타난다.

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

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, 열 팽창은 반대로 되어지만 소성 변형은 남는다. 그러므로 힘은

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

이며, point III는 아직까지 세 번째 힘-변위 선상에 있고 그것은 소성 흐름에 의해서 변위 되어지고 있다. 그때 스프링에 내재된 변형 에너지는 아래 식으로 표현된다.

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

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.

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

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

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

위 식을 물리적 매개변수와 소성 흐름량의 항인 미지의 힘 F_1 으로 이끌기 위해서 식 (8)을 전개해 보자. 각

각의 탄성 에너지식인 식 (2), 식 (6)과 식 (7)을 식 (8)에 대입하면, 식 (9)가 된다.

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

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

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

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

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

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

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

여기에서

- σ_R : 측정되어지는 미지의 인장 응력, 즉 측정하고자 하는 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

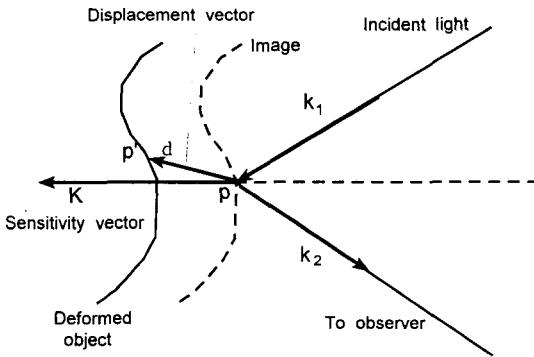


Fig. 2 Vector diagram showing sensitivity to displacement in ESPI

그러므로 만약 재료의 물성치가 알려져 있다면 변형을 값 ϵ_p 로 잔류응력이 결정되어 진다. 이러한 접근 방법 이 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)(4)에 의해 결정된다. 일반적인 간섭계에서 물체를 비추는 빔의 벡터 k_1 과 물체에서 관측자에게 오는 빔의 벡터 k_2 에 대한 민감도 벡터 \vec{K} 는 아래식과 같다.

$$\vec{K} = k_1 - k_2 \dots\dots\dots (13)$$

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 아래식으로 표현된다(5).

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

위 식에서 $\Delta \phi$ 가 두 빔에 의한 위상 변위를 나타내므로 그에 따른 식을 전개해 나가려면, 변위 \vec{d} 만큼 이동하기 전과 후 두 빛의 위상을 각각 벡터형으로 구해야

한다. 구해진 각각의 벡터 방정식들은 위상변화에 의한 위상차들로 나타나면서 스칼라량으로 표현된다. 그리고 면내 변위에 의한 최종 위상차는 아래와 같이 식 (15)로 표현된다.

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

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

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

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

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

여기에서

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

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

4. 유한요소해석 및 결과

잔류응력 산출을 위하여 실제 실험에서는 시편에 순간적인 열을 가해주는 점 가열법이 사용된다. 이 열은 잔류응력을 해소시키기 위해서 가해지는 것이며, 이 때에 가열 점의 면적, 가열 시간과 가열량에 따라 시편의 열팽창에 영향을 주게 된다. 즉, 이러한 변수들이 시편에 잔재해 있는 잔류응력을 결정하는데 상당한 역할을 하게된다. 그러므로 시편에 가해지는 열량과 가열점의 면적을 구해주는 것은 중요하다고 할 수 있다. 이러한 방법은 실험적으로 많은 시행착오법을 수행하여 구할 수도 있으나 시편과 많은 시간 소모 때문에 유한요소법을 이용하여 구하는 것이 더 유리하다. 본 해석에 사용한 요소는 2차원 평면 요소이며, 하나의 절점에 온도 하나의 자유도를 갖는 요소를 사용하여 계산량과 시간을 절약하였다(6,7). 또한 본 요소는 정상상태 뿐만 아니라 시간 경과 상태를 알아보기 위해서도 사용할 수 있는 요소이며, 일정한 속도장에 따라 질량 전이를 보

상할 수도 있다. 대부분 실험적으로 시편 뒷면에서 온도차가 50℃가 넘으면 항복응력이 열응력을 능가하게 된다. 이 결과로 허락 가능한 온도 증가는 약 60℃임을 알 수 있다.

Fig. 3은 2차원 중축 대칭인 원판의 유한요소 모델을 보여준다. 이때 모델의 재질은 SUS304이며, 이 원판은 가열하기 전에 응력이 없다고 가정하였다. 좌우가

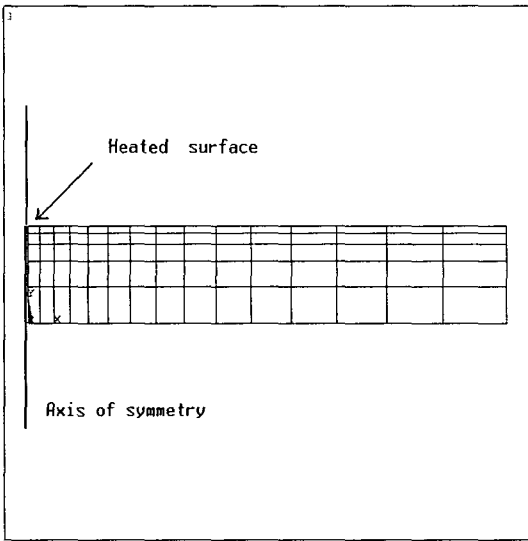


Fig. 3 Finite-element model of two-dimensional, axisymmetric disk

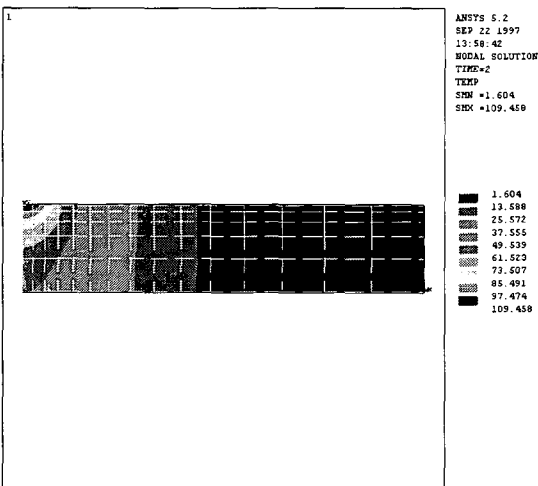


Fig. 4 Distribution of temperature after heating for 3 seconds

서로 같으므로 대칭 모델을 사용하였으며, 가열 지점으로부터 온도의 전도가 이루어지므로 그 부분을 중심으로 미세하게, 외각 부분은 큰 부분으로 요소화하였다. 가열 위치는 원판의 중심이며, 가열 점의 크기, 가열률과 열유속이라는 매개 변수들이 시편 앞, 뒷면의 최대 온도 상승과의 함수관계를 가지므로 이 변수들을 변화시켜 가면서 적정값을 산출하여 보았다. 그 결과 최종 가열 사이클은 최고 200W/cm²의 열유속을 가지며, 가열 점은 지름이 1mm가 이상적이었다. 처음에 출력을 0으로 두고 시작하여 3초에서 최대 출력을 주다가 다시 3초 후에 출력을 0으로 떨어뜨리는 형식으로 가열 펄스를 주었다. 이러한 가열을 위해서 레이저의 최대 출력은 반드시 시편의 반사율을 고려해서 해석하였다.

Fig. 4를 보면 Fig. 3의 유한요소모델에 3초 동안 가열했을 때의 온도분포를 나타낸 것이다. 시편 뒷면을 보면 온도 증가가 약 60℃임을 알 수 있다. 총 60초 동안 온도 분포의 진행 과정을 시뮬레이션으로 구해보았으며, 그 결과 시편 뒷면의 온도가 60℃에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있었다. 그러므로 위 결과의 가열량과 가열점의 면적이면 열 응력에 의한 시편의 변형이 이루어지지 않는다는 것을 확인하였다. 각 시간대 별로 시편 축 방향의 온도 분포를 도식화한 결과가 Fig. 5에 있다.

5. 실험 구성 및 방법

Fig. 6은 시편에 임의의 응력 축, 구하고자 하는 임

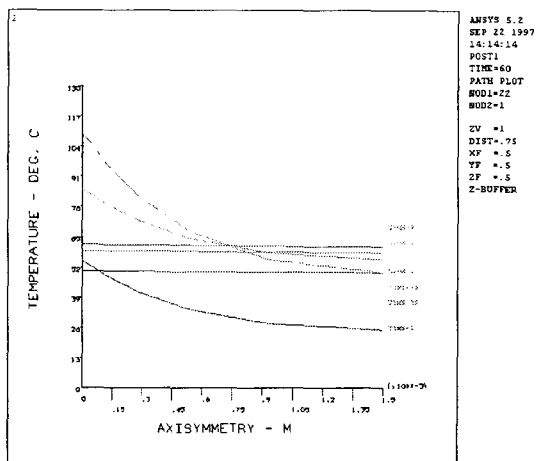


Fig. 5 Temperature rise graph of specimen center after heating and cooling

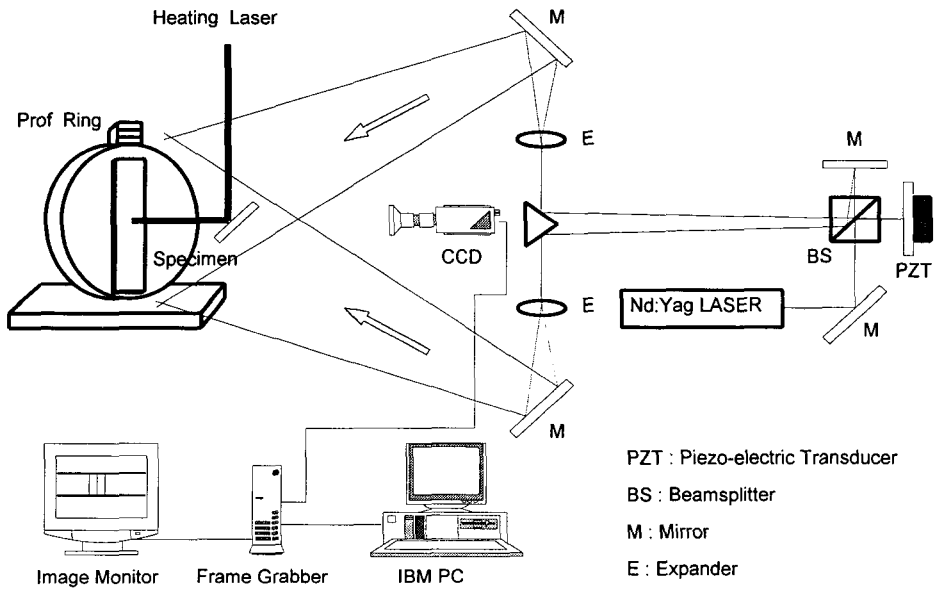


Fig. 6 Schematic of the laser interferometer and the image acquisition system used in the in-plane ESPI

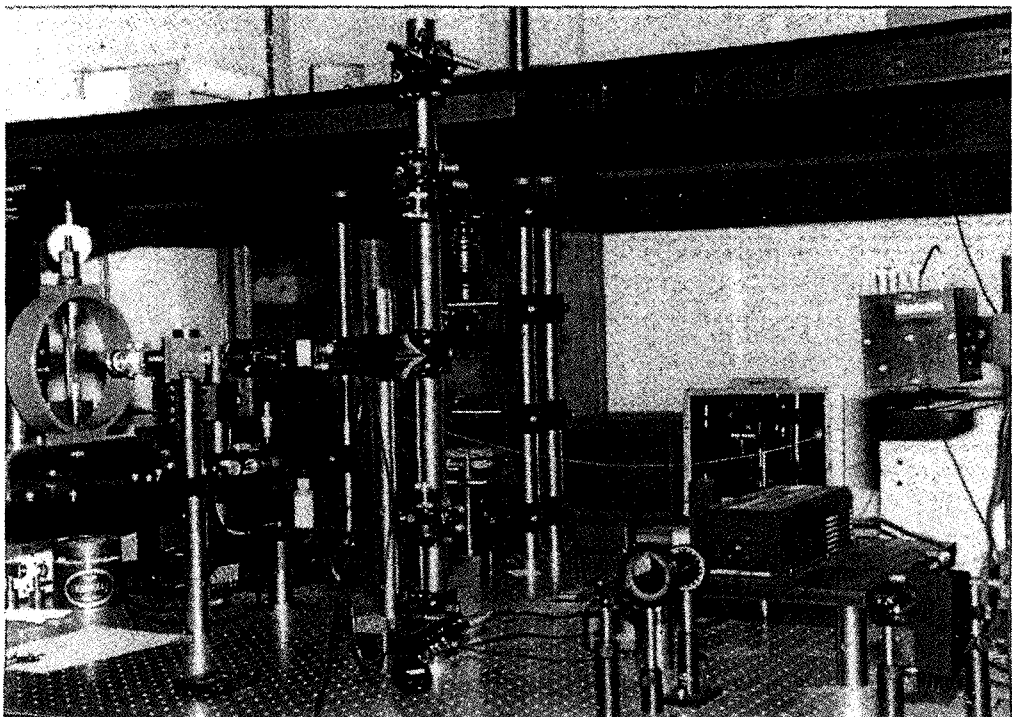


Photo. 1 Laser interferometer and the image acquisition system used in the in-plane ESPI

의의 잔류응력을 가하고, 점 가열법을 적용하여 시편에 열을 가하고 변화를 알아보기 위한 실험 시스템의 개략도이다. 여기에서 열원은 Nd:Yag 레이저로서 펄스폭과 에너지 레벨 등을 자유로이 조정할 수 있으며, 레이저에서 가열부까지의 연결 장치로는 광 파이버를 사용하였고, CCD 카메라 앞에는 hot mirror를 사용하여 한쪽 면은 반사를, 다른 한 면은 투과를 할 수 있게 하여, 열을 가하는 레이저는 이 거울에서 반사되어 시편에 열을 가하고, 그 가한 모습을 CCD 카메라를 통해 볼 수 있도록 하였다. 이 잔류응력 측정 시스템은 가열 전과 후의 영상을 획득할 수 있는 면내 변위에 민감한 간섭계와 영상획득 시스템 그리고 이 영상에 존재하는 간섭무늬를 처리할 수 있는 영상처리 시스템으로 구성되어 있다. 시편이 가열되어 지기 전에 얻어진 초기의 상은 컴퓨터의 메모리에 저장되고, 가열을 한 후 냉각시킨 다음 두 번째 상을 얻는다. 그 두 상들이 감산되어진 후에 간섭 무늬 결과가 단색 모니터에 나타나게 되고, 이 간섭 무늬의 결과가 잔류응력의 함수이다.

6. 실험 결과

본 실험에 사용된 전체 시스템을 구성한 실제 모습이 Photo. 1에 있다. 이러한 일련의 실험은 앞부분에서 언급한 잔류응력 산출 모델링의 접근 방법이 타당하다는 것을 증명하기 위하여 수행되어 졌다. Fig. 7, Fig. 8과 Fig. 9를 보면 각각 항복응력의 80%, 90%와 98%의 예하중이 가해졌을 때, 약 13W의 가공용 Nd:Yag 레이저 출력으로 약 3초간 가열한 후 냉각시켰을 때에 측정된 간섭무늬 패턴을 보여준다. 가열에 사용된 레이저의 펄스폭은 8ms이며, 반복률 10Hz, 입력 전압은 11.5V에서 에너지 레벨을 10%만 놓고 사용하였다. 실제 시편에 받는 레이저 출력을 정확히 알기 위해서 측정해 본 결과 약 25W였다. 여기에서 고려해야 할 사항은 시편에서 반사되어 나가는 반사율이다. 각 그림들을 보면 이미 내재되어 있는 응력 축, 일부러 만들어준 잔류응력이 클수록 가열에 의해 획득된 간섭무늬의 수가 많아짐을 알 수 있다.

이 간섭무늬에 의해 변형 축, 변형률을 구해낼 수 있으며, 여기에서 구해진 변형률이 앞에서 구한 잔류응력 식인 식 (12)의 함수이며 면내 가상 변형률인 ϵ_p 이다. 이러한 경우에 어두운 간섭무늬의 중간 부분이 0차 간섭무늬가 된다. 이런 0차 간섭무늬의 중앙과 간섭무늬 안에 있는 수평선의 교차면이 가열이 발생된 지점이다.

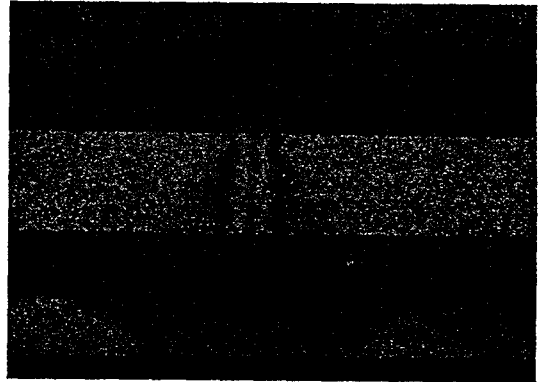


Fig. 7 Fringe pattern for a specimen loaded to 80% of its yield stress

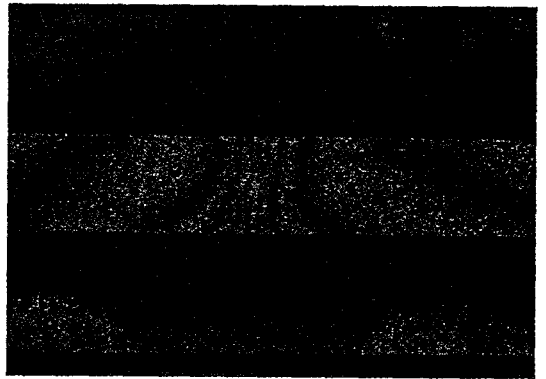


Fig. 8 Fringe pattern for a specimen loaded to 90% of its yield stress

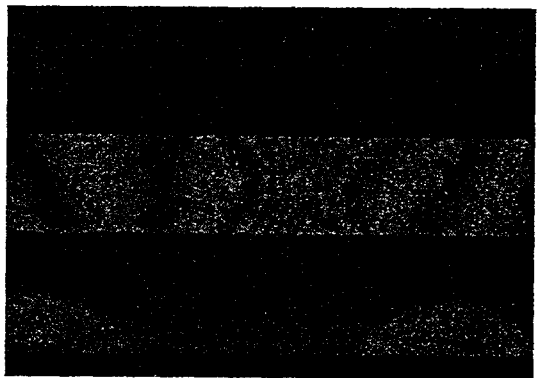


Fig. 9 Fringe pattern for a specimen loaded to 98% of its yield stress

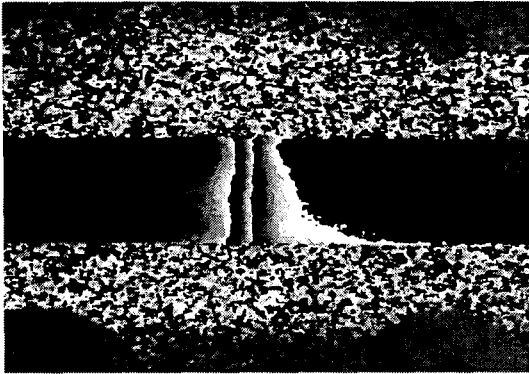


Fig. 10 Phasemap for a specimen loaded to 80% of its yield stress

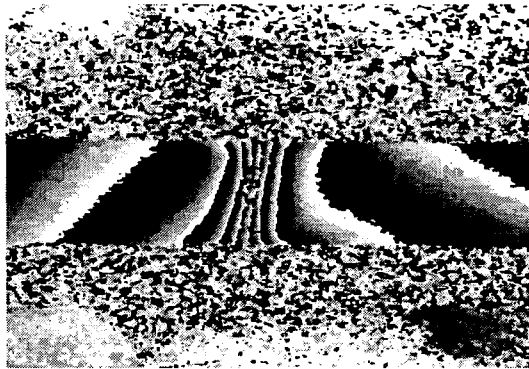


Fig. 11 Phasemap for a specimen loaded to 90% of its yield stress

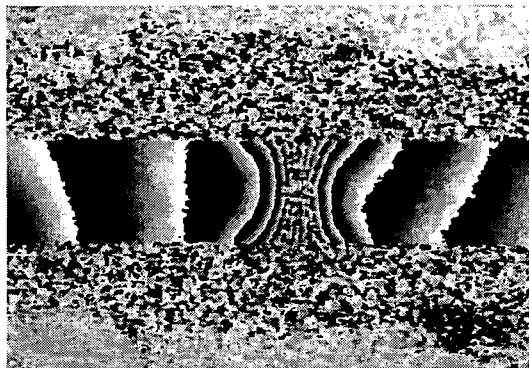


Fig. 12 Phasemap for a specimen loaded to 98% of its yield stress

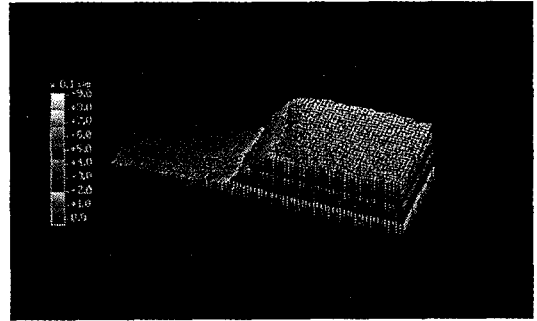


Fig. 13 3D plot for a specimen loaded to 80% of its yield stress

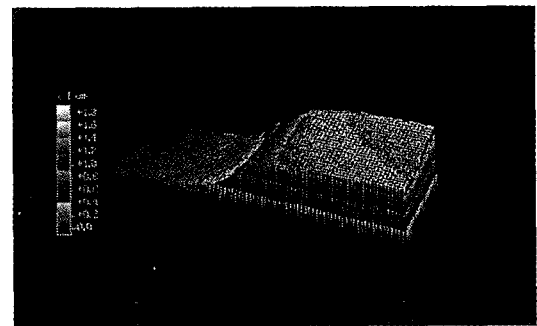


Fig. 14 3D plot for a specimen loaded to 90% of its yield stress

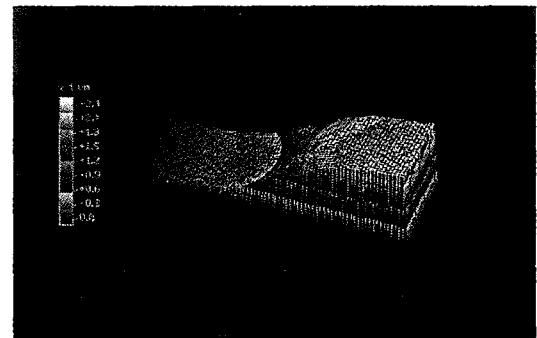


Fig. 15 3D plot for a specimen loaded to 98% of its yield stress

이 점이 대칭축이라는 것을 간섭무늬 패턴으로부터 잘 알 수 있다. Fig. 7, Fig. 8과 Fig. 9를 보면 측정 시편 전체를 CCD 카메라로 받은게 아니라 가열점을 중심으로 일부만 받아들였다. 그 이유는 시편 전체를 CCD로 받을 경우 상이 너무 적게 나와서 정확한 간섭무늬 개수를 알아보기 힘들고, 차후 위상이동법에 의해

정량화를 수행할 때 화상처리에 대한 에러율을 낮추기 위해서 측정 가능 부분만 확대하여 상을 받았다. 이렇게 시편의 일부만 확대하여 상을 받기 위해서 망원렌즈를 CCD 카메라 앞에 부착하여 실험의 완성도를 높였다.

Fig. 10, Fig. 11과 Fig. 12는 각각 항복응력의 80%, 90%와 98%의 예하중이 가해진 후 가공용 Nd:Yag 레이저로 약 3초간 가열하고 냉각시켰을 때에 측정된 위상도를 보여준다. Fig. 13, Fig. 14와 Fig. 15는 각각 항복응력의 80%, 90%와 98%의 위상펼침 이미지를 3차원으로 도식화 한 것이다. 결과를 보면 각각 약 $0.9\mu\text{m}$, $1.8\mu\text{m}$ 와 $2.4\mu\text{m}$ 의 변형량을 결과값으로 가지며, 하중에 의한 내부 잔류응력이 클수록 본 시스템에서 측정된 변형량의 크기도 함께 증가함을 알 수 있다. 본 결과의 변형량을 변형률로 바꾸고 간단한 잔류응력 측정식인 식 (12)에 대입한 결과 약 20%의 오차를 형성했다. 이 결과는 간단한 모델링에 의한 잔류응력식의 도출과 그 식에서 아직은 미지수로 남는 변수들 문제 때문에 가정에 의한 값을 넣고 산출하였으므로 아직까지 실용화 할 정도의 에러율을 확보하지는 못했다.

7. 결 론

본 연구는 산업 현장 전반에 걸쳐 크게 문제가 되고 있는 잔류응력 결정 방법에 대한 연구로서, 레이저와 유한요소법을 이용한 잔류응력 측정이라는 새로운 방법을 제시하고 그 결과를 가시화하여 정량화가 가능함을 밝혔다. 본 연구는 기존에 나와 있는 많은 잔류응력 측정법에서 탈피하여 보다 새로운 기법으로의 접근을 시도하였으며, 그 방법은 아래와 같다.

먼저 잔류응력의 측정 시스템의 개발에 앞서 힘-변위 선도를 기본으로 한 간단한 잔류응력 산출식을 개발하였다. 다음으로 잔류응력이 있는 부재의 응력 경감을 유발하기 위하여 가열원의 출력과 가열 영역, 그리고 가열 온도를 유한요소해석을 이용하여 결정하였다. 실험을 위한 잔류응력 측정 시스템은 점 가열법을 위한 시편 가열 시스템과 시편에 존재한 잔류응력의 함수인 면내 변형을 측정하기 위한 레이저 간섭 시스템인 두 부분으로 구성하였다. 이를 토대로 산출된 모든 결과는 본 시스템을 이용하여 미지의 잔류응력을 결정할 수 있다는 과학적 가능성을 제시하였다.

본 실험에서 고려해야 할 사항은 잔류 응력 상태의 완벽한 묘사를 얻기 위해서는 응력 이완에 따른 변형이 세 방향에서 측정되어야 할 것으로 생각된다. 또한

본 실험에서는 잔류응력의 크기가 hand book에서 찾아보기 쉬운 재료의 항복 응력의 크기에 따라 결정되었는데 여기에 대한 불확실성이 약감은 제시되어 진다. 그리고 시편 앞면의 온도 측정, 진동 격리(산업 현장에서의 측정을 위해)와 응력의 깊이 윤곽을 위한 가열 사이클과 일반적으로 받아들일 수 있는 측정 표준의 산출이 본 연구 기법을 완벽하게 하기 위해서 지속적으로 연구해야 할 부분들이라고 생각한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원(과제번호 981-1001-008-2)에 의해서 수행된 연구결과의 일부로서 관계자 여러분께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- [1] D. V. Nelson, A. Makino and E. A. Fuchs, "The holographic-hole drilling method for residual stress determination", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, No. 1, pp. 3-23, (1997)
- [2] M. J. Pechersky, R. F. Miller and C. S. Vikram, "Residual stress measurements with laser speckle correlation interferometry and local heat treating", Optical Engineering, Vol. 34, No. 10, pp. 2964-2971, (1995)
- [3] R. K. Stanley, P. O. Moore and P. Malntire, "Nondestructive testing handbook", ASNT, Vol. 9, pp. 2-13, (1995)
- [4] P. K. Rastogi, "Holographic interferometry", Springer Series in Optical Sciences, pp. 27-31, (1994)
- [5] R. Jones and C. Wykes, "Holographic and speckle interferometry, 2nd ed.", Cambridge Univ. Press, pp. 146-182, (1989)
- [6] ANSYS Solid Modeling User Guide for Reversion 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., (1993)
- [7] ANSYS Verification for Reversion 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., (1993)