

Lock-In Thermography를 이용한 노치시험편의 응력해석 및 피로한계치 평가

Stress Analysis and Fatigue Limit Evaluation of Plate with Notch by Lock-In Thermography

김원태*, 강기수**[†], 최만용**, 박정학**, 허용학**

Won Tae Kim*, Ki Soo Kang**[†], Man Yong Choi**, Jeong Hak Park** and Yong Hak Huh**

초 록 비접촉 비파괴 응력해석기술인 위상잠금 적외선 열화상기술 (Lock-in infrared Thermography)를 이용하여 V-노치와 원형노치를 갖는 평판의 응력분포해석과 피로한계치를 예측하였다. 반복하중을 받는 시험편의 표면온도 분포를 2차원 열화상으로 측정하고 열탄성효과에 의해 노치 선단에서 응력분포를 예측하였으며, 재료의 비가역적 히스테리시스에 의해 발생하는 내재 분산에너지를 측정하여 노치시험편의 피로한계치를 예측하였다. 피로한계응력 이내에서 응력측정 결과는 10% 이내의 정확도를 보였으며, 원형노치와 V-노치 시험편의 피로한계치를 164 MPa과 185 MPa로 예측하였다.

주요용어: 위상잠금 적외선열화상기술, 응력해석, 피로한계치, 내재 분산에너지, 열탄성

Abstract This paper describes stress analysis and fatigue limit evaluation of plate with V-notch and hole-notch by lock-in infrared thermography. Temperature variation of a specimen under cyclic loading is negatively proportional to the sum of principle stress change and the surface temperature measured by infrared camera is calculated to the stress of notch specimens, based on thermoelastic equation. And also, fatigue limitation can be evaluated by the change of intrinsic energy dissipation. Fatigue limitation of two notch specimens is evaluated as 164 MPa and 185 MPa, respectively and the stress measured by Lock-in infrared Thermography show good agreement within 10% error.

Keywords: Lock-In Infrared Thermography, Stress Analysis, Fatigue Limitation, Intrinsic Energy Dissipation, Thermoelasticity

1. 서 론

파장이 가시광선보다 길고 전파보다 짧은 전자파를 적외선이라 부른다. 온도를 가지고 있는 모든 물체는 그 온도에 대응하는 복사에너지를 방출하게 되며, 적외선 열화상기술(infrared thermography: IRT)은 방출된 복사 에너지를 검출소자에 의해 측정하고 검출된 량과 온도의 상관관계로부터 물체

의 온도화상을 제공한다[1]. 1960년 적외선 열화상기술이 개발되었으며, 초기에는 단일 검출소자에 의해 스캐닝 방식으로 온도영상을 구현하였으나, 현재는 어레이(array)방식의 고감도 적외선 검출소자와 화상처리기술의 발전을 배경으로 비파괴 진단에서 평가기술까지 다양한 산업분야에서 활용되고 있다. 적외선 열화상기술은 적외선 카메라가 고분해능, 고정밀도, 고속 측정이 가능하게 되면서 과학기술 및 산

업분야에서 다양하게 응용되고 있으며, 물체 표면 온도 분포 측정에 기초한 비파괴 평가·모니터링 기술은 적외선 열화상기술의 응용이 성공을 얻은 분야 중 하나이다[2]. 최근에는 물체에 조화함수로 반복하중을 인가하고 이와 동기화 된 고분해능 적외선 열화상 카메라로 하중변화에 따른 물체의 온도변화를 측정하여 누적 평균함으로서 물체에 작용되고 있는 응력 분포를 측정하는 기술이 개발되어 구조물 응력해석분야에 많은 활용을 하고 있다. 이 기술은 위상잠금 적외선 열화상 기술(lock-in infrared thermography)로 알려져 있으며, 이 응력해석 기술을 소성영역으로 확대하면서 피로한계치 분석 기술로 확장하고 있다[3,4]. 위상잠금 적외선 열화상을 이용한 피로한계치 분석기술은 기존 피로시험을 수행함에 있어서 장시간의 시험시간을 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 기대하고 있다. 현재 이 기술은 평판에 대한 피로한계치 적용시험을 바탕으로 다양한 재료에 적용을 위한 연구가 진행되고 있으며, 본 연구에서는 기존 피로시험에 있어서 피로한계치 분석이 어려운 노치시험편의 피로한계치를 위상잠금 적외선 열화상기술을 이용하여 예측하고자 한다. 현재, 위상잠금 적외선 열화상기술을 이용한 피로한계치 분석시험에서는 내재분산에너지를 시험편의 일정한 면적에 대해 평균을 취하여 하중에 따른 변화를 추적하여 피로한계치를 분석하였으나, 이러한 평균에 의한 내재분산에너지의 추적은 인장과 압축이 동시에 존재하는 노치를 갖는 시험편에 대해서 내재분산에너지 변화의 기술기의 분포를 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 2차원 영상으로부터 내재분산에너지의 최대점을 추적하는 방법으로 각 하중에서 내재분산에너지를 구하고, 하중-내재분산에너지 그래프로부터 내재분산에너지의 기술기 변화점을 구하여 피로한계치로 예측하였다.

2. 이론

열탄성효과(thermoelastic effect)를 이용한 응력해석은 적외선 카메라의 개발과 함께 급격히 발전하였으며, 재료의 온도변화를 2차원 열화상으로 표현함으로써 구조물의 응력상태를 비접촉, 전면(full-field) 측정이 가능하게 하였다. 최근에는 열탄성효과와 비열탄성효과(inelastic effect)를 고려하여 피로한계치 분석에 활용되고 있다[5,6]. 고체 내의 전도방정식에 대한 열기계연성효과 (thermo-mechanical coupling

effect)를 고려한다면 식 (1)과 같이 쓸 수 있다[7].

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} - k \nabla^2 U = R_{tmc} + D + R_e \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 밀도, t 는 시간, c 는 비열, U 는 외부열원, k 는 재료의 열전도계수, R_{tmc} 는 열기계 효과에 의한 내부에서 발생하는 열원(thermo-mechanical coupling source), D 는 내재분산에너지 (intrinsic dissipation), R_e 는 외부 물체와 열교환이다. 반복하중을 받는 재료의 탄성영역에서는 다음의 가정으로 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. ① 탄성영역에서는 가역과정, ② 시험편과 외부물체 사이에서 열교환은 없음, ③ 시험중 물체는 단열조건, ④ 시험 중 실내온도변화가 없음.

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = R_{tmc} \quad (2)$$

R_{tmc} 는 탄성영역에서 열탄성효과로 알려져 있으며, 탄성고체의 응력변화와 온도변화의 관계로 1853년 Kelvin경[8]에 의해 이론적 기초가 확립되었으며, 1967년 Belgen[9]가 적외선 검출장치를 이용하여 최초로 비접촉으로 열탄성 응력을 측정하였다. 즉, 탄성고체의 응력변화와 온도변화의 관계는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{tmc} = -\alpha T \Delta \sigma_{x,y,z} - \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T \frac{\partial U}{\partial t} \quad (3)$$

여기에서 α 는 열팽창계수, E 는 탄성계수, ν 는 포와송 비, T 는 절대온도, $\Delta \sigma_{x,y,z}$ 는 물체의 응력변화이다. 식 (3)을 식 (2)와 함께 정리하면,

$$\left(\rho c + \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T \right) \frac{\partial U}{\partial t} = -\alpha T \Delta \sigma_{x,y,z} \quad (4)$$

이 되며, 상온에서 $3E\alpha^2 T / \rho c(1-2\nu)$ 는 무시할 정도로 작은 값이 된다. 결과적으로 탄성영역에서 내부응력변화에 따른 온도변화는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot \Delta \sigma_{x,y,z} \quad (5)$$

여기에서 ΔT 는 물체의 온도변화, $K_m (= \alpha / \rho c)$ 는 열탄성계수이다. 식(5)에서 온도변화를 적외선 카메라를 이용하여 측정함으로써 물체의 응력변화를 측정할 수 있다. 그러나 실제 기계구조물에 있

어서 응력변화로 인한 온도변화는 미세하며, 그 온도변화를 측정하기 위해서 위상잠금 기법이 적용된다. 즉, 물체에 조화함수로 반복하중을 인가하고 이와 동기화 된 적외선 카메라로 측정된 온도를 누적 평균함으로써 물체의 응력을 계측할 수 있다. 식 (5)은 반복하중을 받는 재료의 열탄성효과에 의한 응력해석은 재료의 탄성영역 내에서 가역적으로 성립하게 되나, 소성역에서는 Fig. 1과 같이 비가역적 히스테리시스 즉 비탄성효과가 존재하며, 반복 하중에 의하여 식 (11)과 같이 재료에 에너지가 누적되며, 이를 내재분산에너지, D 로 나타내었다 [10].

$$D = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma_u d\epsilon - \int_{\epsilon_2}^{\epsilon_1} \sigma_l d\epsilon = A_i \quad (6)$$

여기에서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 응력-변형을 히스테리시스 선도에서 최소, 최고 변형을, σ_u 와 σ_l 는 히스테리시스 선도의 윗부분과 아랫부분의 응력, A 는 각 히스테리시스에서 면적, i 는 반복하중의 횟수이다. 탄성영역 내에서는 가역과정으로 내재분산에너지의 변화가 매우 작으나, 소성영역에 근접하면서 비가역과정이 증가하고 내재분산에너지 증가도 뚜렷하게 나타난다. 반복하중에 의한 피로파괴의 관점에서 살펴보면, 피로한계응력은 반복하중에 의한 일정량의 에너지를 흡수할 수 있는 한계치이며, 한계응력 이상에서 재료는 비가역적 히스테리시스에 의한 내부 에너지가 재료에 남게 되고 이는 피로손상의 원인이 된다. 즉 피로손상의 시작과 내재분산에너지의 증가가 동시에 일어난다는 가정과 내재분산에너지가 재료의 온도변화로 나타난다는 가정으로 반복하중에 의한 온도 변화를 위상잠금 기법을 적용하여 적외선 카메라로 관찰함으로써 재료의 피로한계치를 예측할 수 있다.

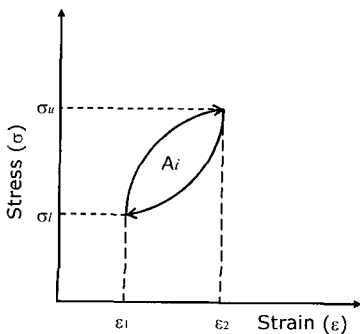


Fig. 1 Stress versus strain hysteresis loop at plastic deformation zone

3. 적용시험

3.1. 위상잠금 적외선열화상 시스템의 구성

반복하중에 의한 재료의 온도변화를 고분해능 적외선 카메라에 의해 측정이 가능하며, 이 온도변화로부터 재료의 응력분포를 예측할 수 있다. 그러나 반복하중에 의한 온도변화량은 매우 미세하며, 검출 소자의 특성으로 하중의 방향성에 따른 온도변화를 측정할 수 없게 된다. 이러한 문제점은 위상잠금 적외선 열화상기술 즉, 조화함수로 제어되는 피로시험기와 시험기와 동기화된 적외선 열화상 카메라를 이용하여 반복하중의 각 위상에서 온도변화를 누적 측정함으로써 하중변화에 따른 시험편의 온도를 측정할 수 있다. 위상잠금 적외선 열화상 기술은 기존 적외선 열화상기술에 위상잠금 기법을 적용함으로써 온도측정 분해능의 개선과 함께 하중변화에 따른 온도변화만을 측정할 수 있는 기법이다[7]. 본 논문에서는 Fig. 2와 같이 위상잠금 적외선 열화상 시스템은 상용장비인 프랑스 Cedip사의 Silver 480과 피로 시험기는 MTS 858 table top system을 사용하였다.

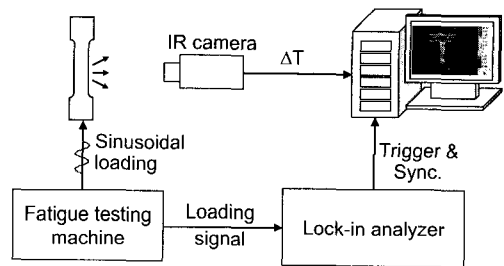


Fig. 2 Lock-in IRT set-up for stress analysis

3.2. 시험편 및 시험방법

본 논문에서 시험편은 기계구조물과 건설재료로 사용되는 구조용강(SCG400-L, KS D 3506, JIS G3302, ASTM A653 grade C)을 사용하였으며, 형상은 Fig. 3과 같이 2 종류의 노치시험편을 사용하였다.

시험 과정은 Fig. 4와 같이 피로시험기에서는 하중을 400 MPa 까지 50 MPa씩 증가하고 각 하중단계에서 총 7400 cycles 동안 응력비를 -1로 하여 반복하중을 주게 된다. 위상잠금 적외선 열화상기술에서는 각 하중에서 응력과 내재분산에너지를 측정하기 위해 E-mode와 D-mode로 구별하였다. E-mode

에서는 200 cycles후 600 cycles동안 프레임을 60 Hz로 하여 총 3600장의 열화상을 평균하여 식 (5)에 의해 처리하였으며, D-mode에서는 6000 cycles의 반복하중을 가하고 600 cycles동안 60 Hz로 총 3600장의 열화상을 평균하여 식(6)에 의해 처리하였다. 여기에서 E-mode는 열탄성효과에 의한 응력해석을 위한 부분으로 하중변화에 따른 온도변화를 측정하고 식 (5)을 적용하여 응력을 측정하게 된다. 또한, D-mode에서는 식 (6)을 이용하여 경로에 따른 내재에너지 분산을 측정하는 부분으로 탄성영역에서는 내재에너지 분산은 매우 작은 변화를 가지게 되며, 소성영역에 근접함으로써 내재분산에너지가 점차로 증가하게 된다.

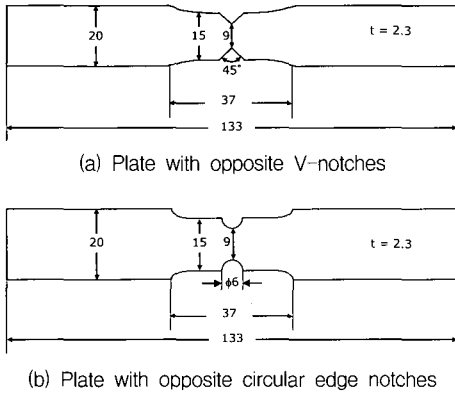


Fig. 3 Geometry of specimen

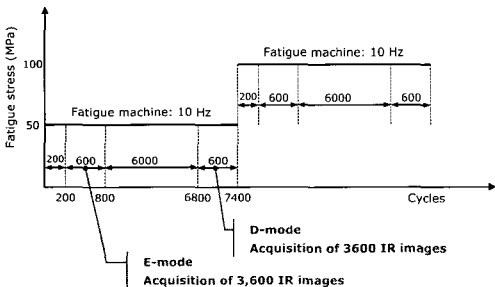


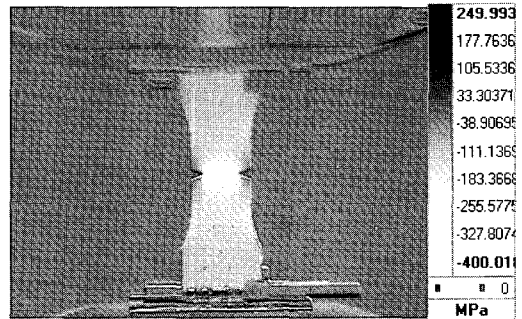
Fig. 4 Fatigue stress step and lock-in IRT measurement

4. 시험결과

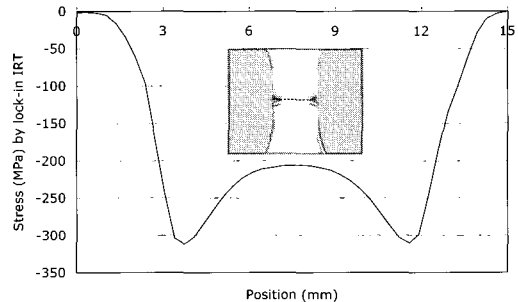
4.1. V-노치 시험편

Fig. 5(a)는 V-노치시험편에 대해 피로시험기의 응력 200 MPa로 피로시험을 수행하고 위상잠금 적

외선 열화상기법의 E-mode를 적용하여 구한 응력 해석 결과이며, Fig. 5(b)는 이 때 결함 침단부에서 응력분포를 나타내었다. 시험편의 중앙부에서 응력은 205.7 MPa로서 피로시험기의 응력 200 MPa과 잘 일치함을 보이고 있다. 이때, 노치 침단부에서 응력은 311.87로 평가되었다. Fig. 6은 시험편 중앙부분의 평균응력을 위상잠금 적외선 열화상 기술에 의해 측정된 값과 피로시험기에 의해 재료에 부과된 피로응력 진폭성분 $((\sigma_{max} - \sigma_{min})/2)$ 과 비교하였으며, 상대오차는 6 % 이내로 일치하였다. 즉, 피로시험기에 의해 부과된 응력과 위상잠금 적외선 열화상기법을 적용하여 측정된 응력을 비교함으로써 시험의 신뢰성을 확인할 수 있다. Fig. 7은 응력 변화에 따른 내부분산에너지의 변화를 나타내었으며, Luong[4]에 의해 제안된 기법을 적용하여 내재분산에너지의 기울기 변화를 추적하여 V-노치 시험편의 피로한계치를 164 MPa로 예측하였다. Fig. 7에서 기존 일정 영역의 평균 내재분산에너지보다는 노치에 의한 내재분산에너지의 최대점을 추적함으로써 보다 기울기변화점을 보다 정확하게 예측할 수 있다.



(a) Two-dimensional stress distribution



(b) Stress profile on V-notch surface

Fig. 5 Stress distribution of V-notch plate at 200 MPa

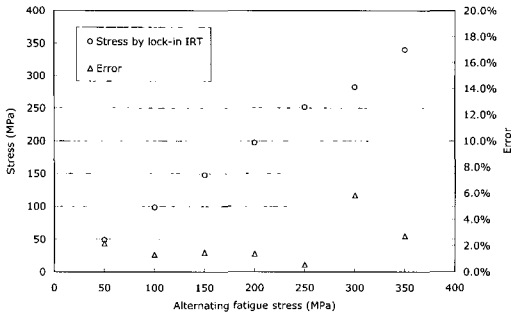


Fig. 6 Stress analysis of plate with opposite V-notches

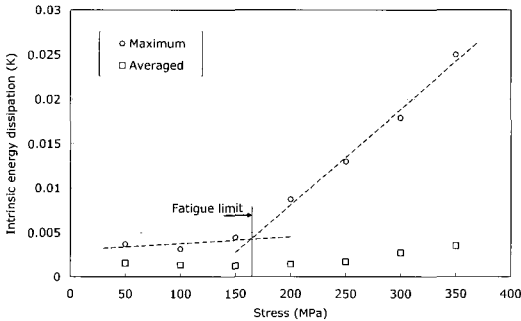


Fig. 7 Determination of fatigue limit of plate with opposite V-notches

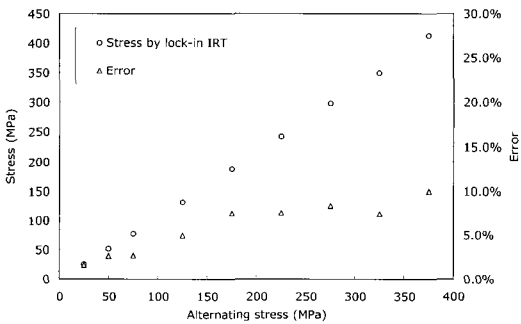


Fig. 8 Stress analysis of plate with opposite circular edge notches

4.2. 원형노치 시험편

Fig. 9는 평균시험편의 양쪽에 원형구멍을 갖는 시험편의 시험결과이다. 시험편의 중앙부에서 위상 잠금 적외선 열화상기술로 측정된 응력과 피로시험기에서 가해지는 응력진폭성분과 비교하였으며, 상대오차는 10% 이내로 나타나고 있다. 또한 Fig. 9에서는 피로시험기의 응력진폭성분의 변화에 따라

위상잠금 적외선 열화상기술로 측정된 내재분산에너지의 최대점의 변화를 나타내었으며, 내재분산에너지의 변화를 추적하여 양편 원형 시험편의 피로 한계치를 185 MPa로 예측하였다.

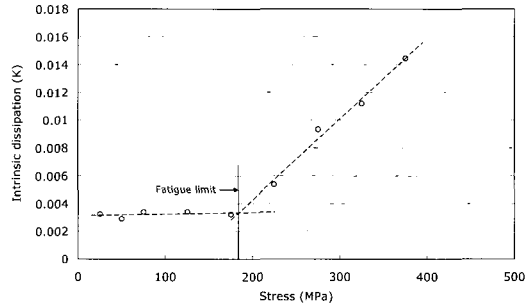


Fig. 9 Determination of fatigue limit of plate with opposite circular edge notches

4. 결론

본 논문에서는 위상잠금 적외선 열화상기술을 이용하여 V-노치와 원형 노치를 갖는 시험편의 2D 응력분포와 피로한계치를 예측하였다. 피로한계치 예측을 위해 기존 평균 내재분산에너지를 사용하지 않고 노치에서 내재분산에너지의 최대점을 사용함으로써 내재분산에너지의 기울기 변화를 보다 용이하게 예측할 수 있었다. 두 시험편에 대해 응력분포 해석에서는 상대오차가 10% 이내로 측정하였으며, 내재분산에너지 변화를 추적하여 V-노치 시험편과 원형 시험편의 피로한계치를 164 MPa과 185 MPa로 예측하였다. 위상잠금 적외선 열화상기술은 반복하중을 받는 대상체와 동기화하여 재료의 응력을 측정한다는 제한이 있으나, 기존 장시간을 요구하는 피로시험을 우선적으로 대체할 수 있으며, 모터, 자동차와 같이 조화진동을 하는 구조물에 대해 산업적 활용도가 높을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] G. Gaussorgurs, "Infrared thermography," translated by Chomet, S., Chapman & Hall, London, (1994)
 [2] X. P. V. Maldague, "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Rastogi P. K., Inaudi D, Editors, Elsevier Science, Switzerland, (2000)

- [3] (社)日本非破壊検査學會, "赤外線サーモグラフィによる 設備診断・非破壊評価ハンドブック," 廣濟堂, 大阪, (2004)
- [4] M.P. Luong, "Infrared thermographic scanning of fatigue in metals," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 158, pp. 363-376, (1995)
- [5] R. Peyroux, A. Chrysochoos, C. Licht, and M. Löbel, "Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 36, Issue 4, pp. 489-509, (1998)
- [6] M.P. Luong, "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique," *Mechanics of Materials*, Vol. 28, pp. 155-163, (1998)
- [7] P. Bremond, and P. Potet, "Lock-in thermography: a tool to analyze and locate thermomechanical mechanisms in materials and structures," *Proceedings of SPIE*, Vol. 4360, pp. 560-566, (2001)
- [8] W. Thomson, (Lord Kelvin), "On the dynamic theory of heat," *Trans. Soc. Edinburgh*, Vol. 20, pp. 261-283, (1853)
- [9] M.H. Belgen, "Structural stress measurement with a infrared radiometer," *ISA Trans.*, Vol. 6, pp. 49-53, (1967)
- [10] B. Yang, P. K. Liaw, M. Morrison, C. T. Liu, R. A. Buchanan, and J. Y. Huang, "Temperature evolution during fatigue damage," *Intermetallics*, Vol. 13, pp. 419-428, (2005)