

위상잠금 적외선 열화상 기술을 이용한 피로 시험편의 응력해석 Stress analysis of fatigue specimens by Lock-in infrared thermography technique

*김민근¹, #김경석², 김현민³, 김동수⁴, 김우진⁵

*M. K. Kim¹, #K. S. Kim(gskkim@chosun.ac.kr)², H. M. Kim³, D. S. Kim⁴, W. J. Kim⁵

¹ 조선대학교 첨단부품소재공학과, ² 조선대학교 기계설계공학과, ³ 조선대학교 첨단부품소재공학과, ⁴ 조선대학교 첨단부품소재공학과 ⁵ 조선대학교 레이저응용 신기술 연구센터

Key words : Infrared thermography, Lock-in, Fatigue, Stress analysis, Frequency, Loading

1. 서론

IRT(infrared thermography technique)를 이용한 응력측정은 대상물 표면에 발생하는 열변화량(ΔT)을 적외선 열화상 카메라로 측정하여, 열탄성 효과의 원리로부터 응력치로 환산해 주응력화($\Delta\epsilon$)의 분포를 2차원으로 화상화할 수 있다. 대상물에 동적부하(Dynamic Loading)를 가하면, 재료에 응력이 급격하게 작용하여 변형이 단열적으로 수행되는 경우, 온도 변화는 재료에도 동일하게 나타난다. 재료에 반복응력을 작용시키면 응력 변동에 비례한 온도 상승이 일반적으로 발생하는 현상을 열탄성효과(thermoelastic effect)라 하며 이러한 열탄성효과를 이용하여 열탄성 응력을 도출할 수 있다. 동적거동을 하는 구조물에서 응력분포 해석은 기존 스트레인게이지 기법, 광탄성, 스케플간섭법 등의 단점 등을 보완할 수 있으며, 현장 적용에서 환경 제약요소들이 적어 산업적 활용이 높은 기술로 평가받고 있다. 본 논문에서는 적외선열화상기술을(Infrared thermography)이용하여 반복하중을 통한 열탄성응력해석을 수행하기 위한 최적주파수 결정 및 열탄성 응력해석을 위상잠금(Lock-in) 적외선 열화상기술을 이용하여 수행하였다.

2. 이론

2.1 열탄성효과

외부와 단열된 물체가 외력으로 인해 변형이 될 때, 탄성구간 내에서 변형-열 에너지 변환 관계로부터 열탄성 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{E}{1-2\nu} \alpha T_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1)$$

여기에서, ρ 는 밀도, c 는 비열, T 는 물체의 온도변화, t 는 시간, E 는 탄성계수, ν 는 포아송 비, α 는 열팽창계수, T_a 는 주변온도, ϵ 는 외력에 의한 물체 변형이다. 식(1)은 재료감쇠에 의한 비가역적 $\partial\epsilon/\partial t$ 항과 시간에 의존하는 T_a 항으로 인하여 비선형방정식으로 나타나게 된다. 실제 문제에 적용하기 위해 시험하는 동안 주변온도가 일정($T_a \gg T$)하고, 탄성구간 내에서 응력-변형율의 관계가 선형을 유지한다고 가정한다면, 선형미분 방정식으로 취급하여 식(1)은 다음 식(2)와 같이 쓸 수 있다. 본 논문은 적외선 열화상 카메라로 온도를 측정하고 식(2)의 관계식으로부터 열탄성응력을 예측하게 된다.

$$\Delta T = - \frac{\alpha}{\rho c} T_a \frac{E}{1-2\nu} \Delta \epsilon = - K_m T_a \Delta \sigma_{1,2,3} \quad (2)$$

2.2 위상잠금 광-적외선 열화상

위상잠금 적외선 열화상 기법은 만능피로시험기(MTS Co.) 통해 조화함수형태로 대상체를 가진하고, 대상체에 입사한 적외선 에너지를 동기화된 검출소자를 통해 받아들여 신호처리를 통하여 획득하고자 하는 위상, 진폭을 구하는 방법이다. 이 기법은

Fig. 1과 같다.

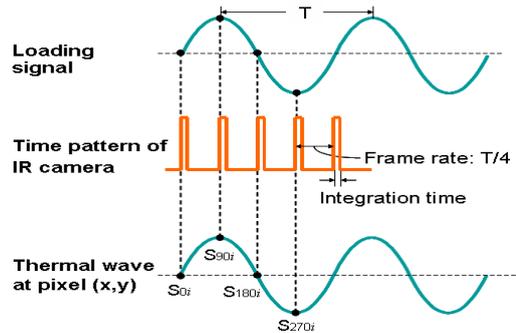


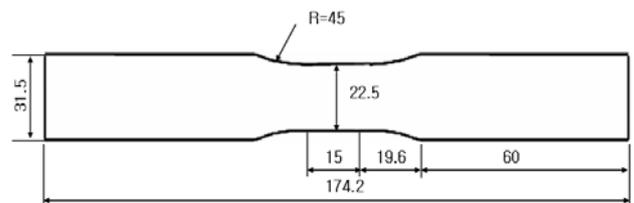
Fig. 1 Signal processing of lock-in infrared thermography

3. 시험장치 구성

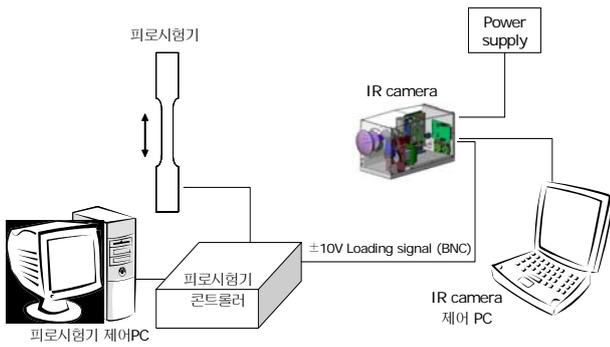
열탄성효과를 이용하여 정확한 응력해석을 위해서는 식(2)에서 시험편의 단열조건과 일정한 주변온도를 유지하여야 한다. 본 연구에서는 시험편의 단열조건을 만족시키기 위해 일정한 주파수로 지속적으로 가진함으로써 열적 평형상태를 유지할 수 있도록 하였으며, 대류, 복사의 외부열원을 시험편에 차단하기 위해 일정한 내부온도와 방사율을 유지하였다. 또한, KS B 1099에 따라 시험편을 제작하였다. 시험편의 재질은 SM45C(AISI 1045)로서 시험편의 물성은 Table 1에 표시하였으며, 시험편과 시험장치 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 적외선 카메라는 Cedip Infrared System 480M 제품을 사용하였으며, 온도 분해능은 0.02 °C이며, 온도측정은 만능재료시험기와 적외선 열화상 장비를 동기화하여 측정분해능과 데이터 신뢰도를 개선하도록 하였다⁷. 방사율을 일정하게 유지하기 위하여 0.95에 방사율을 방출하는 무광택 페인트를 시험편에 도포하였다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

열팽창계수	밀도	비열	열탄성계수
11.5 K ⁻¹	7850 kg/m ³	486 J/kg-K	3.01 MPa ⁻¹



(a) Schematic of specimen



(b) System configuration
Fig. 2 Experimental setup

4. 시험결과 해석

SM 45C의 경우, 열탄성 응력해석을 위한 최적 주파수는 만능 시험기의 성능곡선에 따른 분해능에 따라 탄성한도 내에 가질 수 있는 하중에서 가능한 최대주파수로 설정하는 것이 현명하다. 이는 주변의 전도와 대류의 손실을 최소화해야하며 외력변화에 대한 함수로만 온도변화가 발생하도록 하기 위해서이다. 본 실험 장비는 MTS 793.01 table top system 장비의 최대 80 Hz에서 25 kN의 분해능으로 40 Hz~80 Hz로 10Hz씩 증가시키며 반복하중을 가한 후 ΔT 가 일정해지는 구간에서 응력을 측정하였다. Fig. 3에 응력측정 결과를 나타내었으며, Fig. 4 는 실험동안의 전체 온도변화 곡선을 나타내었다. 이는 온도 ΔT 가 일정해지는 응력측정 구간과 상이하다.

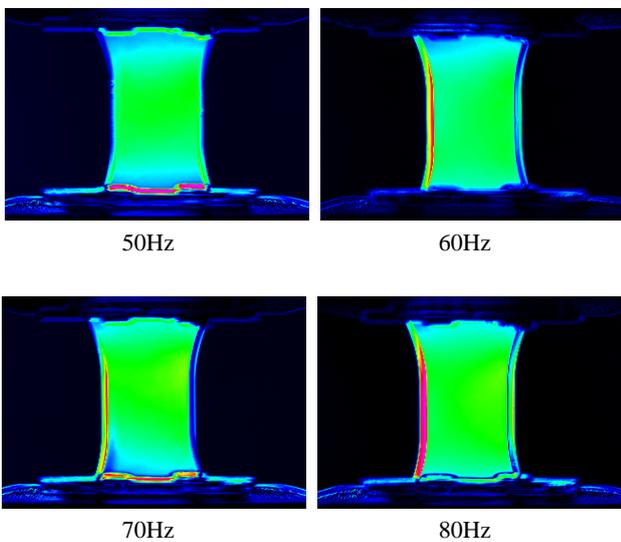


Fig. 3 Thermoelastic stress of each frequency

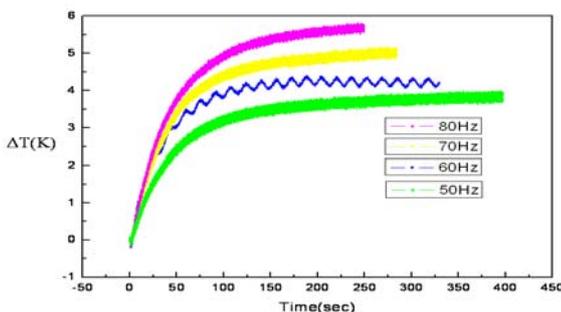


Fig. 4 Temperature evolution of each frequency

주파수의 레벨의 높을수록 이론적인 응력값과의 오차가 줄어든다. 이로써 주파수가 높을수록 더욱더 정확한 응력값을 도출해 낼 수 있을것이라 사료된다. 응력비를 0으로 하고 응력값은 246.91 Mpa으로 설정하여 주파수 변화에 따른 열전도등의 손실에 의해 온도평행 상태에서 온도변화(ΔT) 및 응력값을 table 2에 나타내었다.

Table 2 Data of the measured thermoelastic stress

주파수(Hz)	응력(Mpa)	온도변화(ΔT)
50	212.995	0.19
60	225.955	0.20
70	232.675	0.21
80	253.505	0.23

5. 결론

본 논문에서는 반복하중을 받는 피로시험편에 주파수를 변화하면서 일정 반복하중에 의한 열탄성 응력분포를 해석하였다. 최적 검출 주파수를 찾기 위한 실험을 수행한 결과 탄성한도내의 일정하중에 조건에서 주파수가 높을수록(40 Hz 이상) 보다 정확한 결과를 도출할 수 있었다. 이는 외부로의 전도와 대류의 영향을 최소화 할 수 있다고 사료되며 또한 응력측정구간 설정(246.91 Mpa에서 20000 cycles이상)에 있어서 주파수에 따라 적절한 측정 주기(cycles)을 설정하는 것도 결과에 영향을 미침을 보였다. 그에 따른 열탄성 응력측정 실험결과에 있어서 측정값은 평균 231.28 Mpa로 이론적인 응력값 246.91 Mpa과 7 % 내로 일치함을 보였다.

후기

본 연구는 2008년도 방사선 비파괴 신뢰성 향상사업의 지원을 받아 수행되어졌다.

참고문헌

1. Awrejcewicz, J., Pyryev, Yu, "Thermoelastic contact of a rotating shaft with a rigid bush in conditions of bush wear and stick-slip movements", International Journal of Engineering Science, 40(10), 1113-1130, 2002.
2. Boyd, S.W., Dulieu-Barton, J.M., Rumsey, L., "Stress analysis of finger joints in pultruded GRP materials", International Journal of Adhesion and Adhesives, 26(7), 498-510, 2006.
3. Minh Phong Luong, "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique", Mechanics of Materials, 28, 155-163, 1998.
4. Panteliou, S.D., Dimarogonas, A.D., "Thermodynamic damping in porous materials with ellipsoidal cavities", J. of Sound and Vibration, 201(5), 555-565.
5. Bremond, P., Potet, P., "Lock-In Thermography: A tool to analyse and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures", Thermosense XXII, 4360-4376, 2001.
6. Wu, D., Busse, G., "Lock-in thermography for evaluation of materials", Rev. Gen. Therm., Vol. 37, 693-703, 1998
7. Pierre Bremond and Pierre Potet, Cedip Infrared System : Application of Lock-in thermography to the measurement of stress and to the determination of damage in material and structures., QIRT conferences 2000