

◆특집◆ 비전응용계측기술

적외선 열화상기술을 이용한 결함측정 및 응력계측기술

최만용*, 강기수*, 박정학*, 김원태**, 김경석***

Measurement of Defects and Stress by Infrared Thermography

Man Yong Choi*, Ki Soo Kang*, Jung Hak Park*, Won Tea Kim** and Koung Suk Kim***

Key Words : Stress (응력), Infrared thermography(적외선 열화상기술), Lock-in thermography(위상변조 적외선 열화상기술), Thermoelastic effect(열탄성효과), Fatigue limitation evaluation(피로한계치평가)

1. 서론

급변하는 21 세기의 글로벌 경쟁시대에 생산성과 신뢰성 증대를 최대화하기 위해서는 비전응용 계측 및 검사기술이 핵심기술이라 할 수 있다. 비전응용 계측 및 검사기술은 CCD 카메라의 대중화와 영상처리기술의 발전과 함께 다양한 산업분야에서 활용하고 있으며, 고분해능 카메라와 영상처리기술의 발전은 기술적 한계를 지속적으로 극복하고 있다. 그러나, 이는 인간의 시각을 모사하여 측정대상을 정량화하려는 노력이며, 가시광선이 제한적인 환경에서는 인간의 시각으로 인지할 수 없는 적외선을 이용한 계측 및 검사기술이 우리에게 더 많은 정보를 제공할 수 있다. CCD 카메라가 가시광선을 2 차원 영상으로 표현하는 장비라면, 적외선 카메라는 물체가 발산하는 적외선을 2 차원 영상으로 표현할 수 있는 장비이다.^{1,2} 적외선 열화상기술 (Infrared Thermography)는 적외선 카메라를 이용하여 물체의 온도측정을 기반으로 응력 해석, 두께측정, 피로한계치 분석, 의료진단, 결함

검사까지 그 응용범위가 넓어지고 있다. 본 논문에서는 적외선열화상기술의 원리와 이를 이용한 결함검사, 응력해석, 피로한계치 분석의 응용사례를 소개하고자 한다.

2. 적외선 열화상기술의 개발동향

2.1 적외선 열화상기술의 진보

1960 년 적외선 열화상기술이 개발되었고 지금까지 다양한 적외선센서 개발과 디지털 신호 및 영상처리 기술의 진전을 배경으로 다양한 분야에서 활용되고 있다. 초기의 적외선열화상기술은 단일 또는 소수의 적외선 검출소자를 이용하여 1 차원으로 측정영역을 스캐닝하여 열화상을 구성하였으며, 고성능 검출소자에 의해 0.1 °C의 온도분해능을 구현할 수 있었다. 그러나, 스캐닝 방식에 의한 열화상의 구현은 시간소요, 시간에 따른 온도장의 변화, 이동물체의 온도 변화 등의 문제가 있었다. 또한 적외선 검출소자가 질소 냉각방식으로 적외선 열화상 시스템이 대형이고 재현성이 우수하지 못하였다.³

1980 년대 후반부터는 적외선 검출소자가 2 차원 배열(array) 방식으로 온도를 계측하는 시스템이 개발되었다. 어레이 센서의 도입은 기존 주사 방식에 비하여 열화상 데이터의 동시성이 월등히 향상되었다. 1990 년대에는 어레이 센서의 화소수도 증가하고 검출소자로부터 전자신호의 획득 기

* 한국표준과학연구원 안전그룹
Tel. 042-868-5251, Fax. 042-868-5650
Email mychoi@kriss.re.kr

적외선 열화상기술을 이용한 계측 및 평가기술에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

** 공주대학교 생물기계공학전공

*** 조선대학교 기계설계공학과

술이 진보하여, 동시성이 우수하면서도 정밀한 온도분포 화상을 고속, 고분해능으로 계측하는 것이 가능해 졌다. 현재 InSb 검출소자를 이용하고 있는 적외선 카메라의 경우 노이즈 등가 온도차(분해능) (Noise equivalent temperature difference : NETD)가 0.020 ℃이하이고 영상획득속도(Frame rate)는 사용하는 카메라의 해상도에 따라 다르게 된다. 현재 상용 제품의 경우 640 × 512 화소와 420 Hz 이며, 화소수를 1/4 로 감소할 경우 프레임율은 약 4 배가 된다. 최근 수년간의 적외선 카메라의 개발은 비냉각방식으로 급격한 진보를 하고 있으며, 비냉각방식 적외선 검출소자의 개발은 카메라의 소형화, 경량화 및 저가격화를 가능하게 하고 있다.

2.2 검출소자의 종류 및 측정원리

온도를 가지고 있는 모든 물체는 그 온도에 대응하는 적외선 파장대역에서 적외선 에너지를 방출하게 되며, 적외선 카메라는 이 방출된 에너지량을 측정하여 검출에너지량과 온도의 상관관계로부터 열화상을 제공한다. 물체로부터 방출된 복사에너지를 검출하기 위해서 적외선 검출소자가 사용되며, 적외선 검출소자는 적외선 검출 대역에 따라 PbS (1.3 ~ 3 μm), PbSe (2 ~ 5 μm), InSb (3 ~ 5.5 μm), HgCdTe (2 ~ 14 μm), PbSnTe (2 ~ 12 μm) 등과 같은 반도체 화합물이 사용되며, 최근에는 카메라 해상도와 온도분해능이 높은 InSb 소자가 대부분을 차지하고 있다.⁴ 이러한 검출소자는 적외선 에너지를 광자(Photon)로서 흡수하고 흡수된 적외선 광자들은 검출기 내에 전자를 여기시켜 전류를 발생한다. 여기된 광자의 수에 따라 검출기 내의 전기저항(Electrical Resistance)도 비례적으로 변하게 되며, 이 저항변화를 검출하여 디지털 레벨로 저장하게 된다. 이 디지털레벨 값은 캘리브레이션 함수를 이용하여 온도로 변환하게 된다. 식 (1)은 디지털 레벨, g 를 온도함수로 변환하는 캘리브레이션 함수의 예이다.⁴

$$T = -13.4 + 0.05g - 1.6 \times 10^{-5}g^2 + 2.2 \times 10^{-9}g^3 \quad (1)$$

3. 적외선 열화상기술의 응용

3.1 결함측정기술

적외선 열화상카메라의 고유한 기능은 비접촉

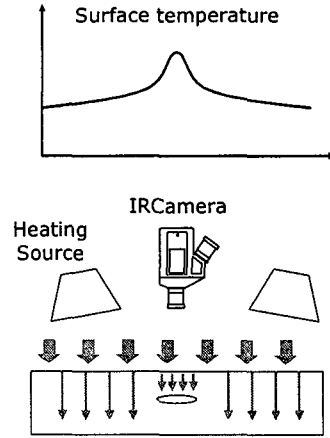


Fig. 1 Subsurface defect detection by Thermography

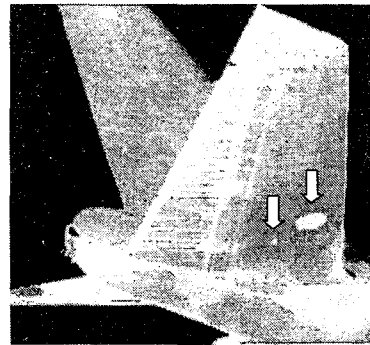


Fig. 2 Inspection of internal delamination of airplane

온도 계측이며, 2 차원 열화상을 이용하여 재료의 열전도계수 측정, 열확산거동 해석 등에 활용이 되어 왔다. 또한 2 차원 열화상은 재료의 외부 또는 내부상태에 따라 온도분포 변화를 쉽게 할 수 있으며, 이러한 장점은 비파괴 진단기술로 응용되어 국내에서도 복합재료 검사, 전자부품의 열화진단, 원자력시설물 검사등의 연구가 진행되고 있다.^{5,8} 결함 검사원리를 살펴보면, Fig. 1 과 같이 열원이 결함을 갖는 대상체에 전면 또는 후면에서 입사가 되면, 대상체의 건전부와 불연속부에서 온도장이 다르며, 이는 표면 온도분포 변화로 나타나게된다. Fig. 2 는 적외선 열화상을 이용하여 항공기 후미익의 내부 박리결함 검사 사례이다.³ 적외선 열화상기술에서 결함 검출능은 결함의 크기, 깊이 뿐만 아니라 재료의 열확산계수와도 연관성이 있으며, 같은 조건의 결함에서 열확산계수가 낮은 재료일수록 결함 검출이 용이하다. 결함 검

사의 경우 결함의 여부를 상대온도차이에 의존하고 있으므로 시험편의 표면상태와 외부 환경 변수 등이 영향을 줄 수 있다. 온도 계측에 있어서 물체의 방사율(emissivity), 주변 물체의 온도(ambient temperature), 대기 온도(atmosphere temperature), 상대 습도(relative humidity), 대기 중 CO₂ 농도가 영향인자로 작용하게 되며 식(2)와 같이 표현된다.⁴

$$T_m = (\alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2}) (\epsilon_o T_o + \tau_o T_a + \epsilon_a T_a + \tau_a T_a) \quad (2)$$

여기에서 T_m : IR camera에서 측정된 온도, T_o : 물체의 온도, T_a : 주변 물체온도, α_{H_2O} : 공기 중 수분에 의한 흡수율, α_{CO_2} : 공기 중 CO₂에 의한 흡수율, ϵ_o : 물체 방사율, $\tau_o (=1-\epsilon_o)$: 물체의 반사율, ϵ_a : 주변 물체 방사율, $\tau_a (=1-\epsilon_a)$: 주변 물체의 반사율이다.

최근에는 이러한 영향인자들은 적외선열화상 시스템에서 입력 받아 보정함으로써 사용자가 정확한 온도값을 얻을 수 있다. 특히, 물체의 방사율은 온도측정에 있어서 가장 많은 영향을 미치고 있으며, 표면상태에 따라 정확한 방사율을 입력할 필요하다. 상대온도차를 이용한 의료진단, 미세결함의 검사분야에서는 정확한 온도측정을 위해서 환경에 따른 영향인자들이 고려되어야 하며, 환경영향변수를 제어하기 위한 챔버와 규격개발도 중요한 연구과제이다.

3.2 Lock-in (Phase modulation) Thermography

균질의 물체에 전달되는 온도 $U(x, y, z, t)$ 는 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a^2 \nabla^2 U \quad (3)$$

여기에서 $a(=k/\rho c)$ 는 열확산계수, k 는 열전도계수, ρ 는 밀도, c 는 비열이다. 식(3)에서 알 수 있듯이 열확산계수가 큰 재료의 내부에서는 열확산이 빠르게 되며, 이는 표면 깊은 곳의 결함에 의해 발생하는 온도정보가 표면에 도달하기 전에 주변 온도에 묻혀 표면에서 검출이 되지 않게된다. 따라서, 강 구조물 검사에 있어서 기존 열화상기술에서는 표면에 근접한 내부결함만을 검출할 수 있으며, 대상체의 표면 상태에 따라 검사결과에 영향을 받게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 반송주파수(Carrier frequency)를 이용하여 내부

결함 정보를 표면까지 효과적으로 전달할 수 있도록 하였다.⁹⁻¹¹ 즉, 식(3)에서 입력되는 열원 $U(x, y, z, t)$ 을 조화함수로 물체에 가진을 하고 이때 물체표면의 응답정보를 연속하여 계측하여 식(4), 식(5)와 같이 처리하여 위상정보와 진폭정보를 구함으로써 내부결함의 정보를 표면에서 구할 수 있다. Fig. 3은 Lock-in Thermography의 시스템 구성도를 나타내었으며, Fig. 4는 위상추출원리를 나타내었다. 즉, 입력되는 열원에 동기화시켜 $T/4$ 의 주기마다 열화상을 기록하고 식(4)와 식(5)의 알고리즘으로 처리함으로써 물체표면에서 결함부에서 온도장 변화를 용이하게 나타낼 수 있다.

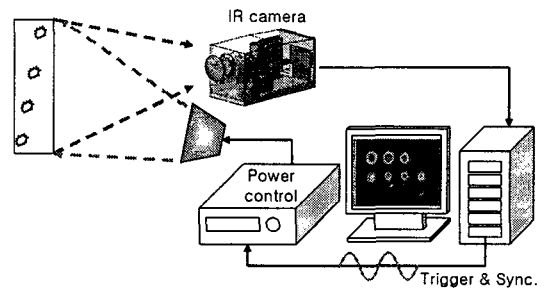


Fig. 3 Lock-in Thermography set-up

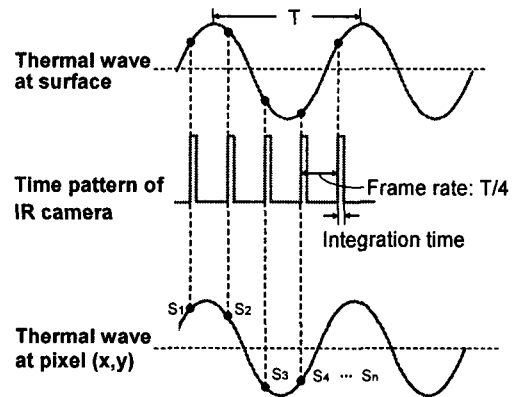


Fig. 4 Principle of lock-in Thermography

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4} \right) \quad (4)$$

$$A(x, y) = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 + (S_2 - S_4)^2} \quad (5)$$

Fig. 5 는 할로겐 램프을 열원으로 Lock-in Thermography 를 이용하여 복합재료 내부 결함 검사 사례이다.¹²

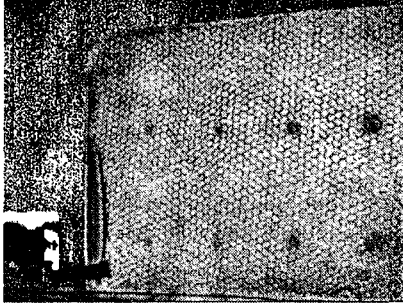


Fig. 5 Subsurface defect inspection of steel plate

3.3 응력해석 및 피로한계치 분석

열탄성효과(Thermoelastic effect)를 이용한 응력 해석은 적외선열화상 카메라의 개발과 함께 급격히 발전하였으며, 재료의 온도변화를 2 차원 열화상으로 표현함으로써 재료의 응력상태를 비접촉, 전면(Full-field) 계측이 가능하게하였다. 최근에는 열탄성효과와 비열탄성효과(inelastic effect)를 고려하여 피로한계치 분석에 활용되고 있다.¹³⁻¹⁵

고체 내의 열전도방정식에 대한 열기계연성효과(Thermomechanical coupling effect)를 고려한다면 식(3)은 식(6)과 같이 쓸 수 있다.¹⁶

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} - k \nabla^2 U = R_{imc} + D + R_e \quad (6)$$

여기에서 R_{imc} 는 열기계효과에 의한 내부에서 발생하는 열원 (Thermomechanical coupling source), D 는 내재분산 (Intrinsic dissipation), R_e 는 외부로부터 전도에 의한 열공급이다.

반복하중을 받는 재료의 탄성영역에서는 다음의 가정으로 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. ① 탄성영역에서는 가역과정으로 내재분산이 없음 ($D \approx 0$), ② 시험편과 외부물체 사이에 전도에 의한 열전달이 없음 ($R_e \approx 0$), ③ 시험중 물체는 단열 조건, ④ 실험 중 실내 온도변화가 없음 ($T_0 \approx 0$).

$$\rho c \frac{\partial U}{\partial t} = R_{imc} \quad (7)$$

R_{imc} 은 탄성영역에서 열탄성효과로 알려져 있

으며, 탄성고체의 응력변화와 온도변화의 관계로 1853 년 Kelvin 경¹⁷에 의해 이론적 기초가 확립되었으며, 1967 년 Belgen¹⁸ 가 적외선 검출장치를 이용하여 최초로 비접촉으로 열탄성 응력을 계측하였다.¹⁹ 즉, 탄성고체의 응력변화와 온도변화의 관계는 식(8)과 같이 표현할 수 있다.¹⁶

$$R_{imc} = -\alpha T \Delta \sigma_{x,y,z} - \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T \frac{\partial U}{\partial t} \quad (8)$$

여기에서 α 는 열팽창계수, E 는 탄성계수, ν 는 포와송의 비, T 는 절대온도, $\Delta \sigma_{x,y,z}$ 는 물체의 응력변화이다. 이식을 식(7)과 함께 정리하면

$$\left(\rho c + \frac{3E}{1-2\nu} \alpha^2 T \right) \frac{\partial U}{\partial t} = -\alpha T \Delta \sigma_{1,2,3} \quad (9)$$

이 되며, 상온에서 $3E\alpha^2 T / \rho c(1-2\nu)$ 는 무시할 정도로 작은 값이 된다. 결과적으로 탄성영역에서 내부응력변화 따른 온도변화는 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta T = -K_m T \Delta \sigma_{1,2,3} \quad (10)$$

여기에서 ΔT 는 물체의 온도변화, $K_m (= \alpha / \rho c)$ 은 열탄성계수이다. 식(10)에서 온도변화를 적외선 열화상기술을 이용하여 계측함으로써 물체의 응력변화를 예측하게 된다. 그러나 실제 기계구조물에 있어서 응력변화로 인한 온도변화는 미세하며, 응력변화를 측정하기 위해서 Lock-in Thermography 가 이용된다. 즉, 물체에 조화함수로 반복하중을 인가하고 이와 동기화 된 IR 카메라로 측정된 온도를 누적 평균함으로써 물체의 응력을 계측할 수 있다. 열탄성효과를 이용하여 응력해석을 위한 시스템 구성도를 Fig. 6 에 나타내었다.

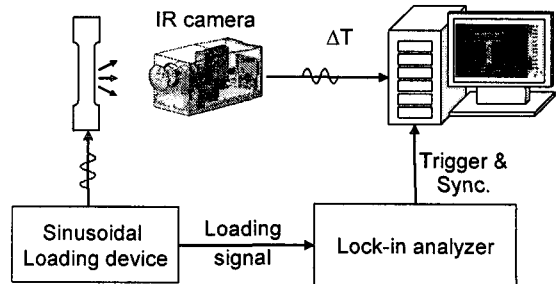


Fig. 6 Schematic of stress analysis system

열탄성효과를 이용한 응력해석분야는 자동차 산업에서 피로하중에 의한 응력해석에 활용을 하고 있으며, 최근에는 진동모드 해석에도 활용하고 있다. Fig. 7 은 적외선 열화상카메라를 이용하여 자동차 엔진에서 응력해석 사례를 나타내었다.²⁰

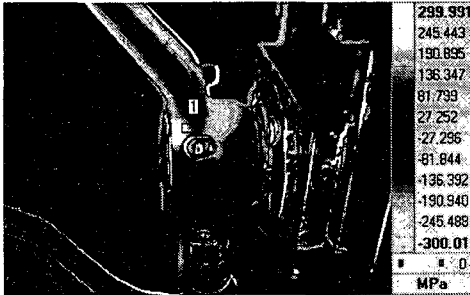


Fig. 7 Full-field stress analysis of automobile engine block

식(7)은 반복하중을 받는 재료의 열탄성효과에 의한 응력해석은 재료의 탄성영역 내에서 가역적으로 성립하게되나, 소성역에서는 Fig. 8 과 같이 비가역적 히스테리시스가 존재하며, 반복 하중에 의하여 식(11)과 같이 재료에 에너지가 누적되며, 이를 내재분산에너지, D 로 나타내었다.²¹

$$D = \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma_u d\epsilon - \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} \sigma_l d\epsilon = A_i \quad (11)$$

여기에서 ϵ_1 과 ϵ_2 는 응력변형을 히스테리시스 선도에서 최소, 최고 변형을, σ_u 와 σ_l 은

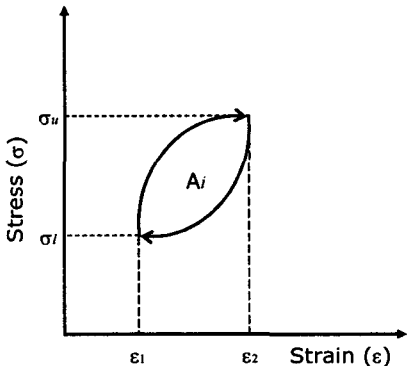


Fig. 8 Stress versus strain hysteresis loop at plastic deformation zone

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 피로 파괴의 관점에서 살펴보면, 피로한계치는 반복하중에 의한 일정량의 에너지를 흡수할 수 있는 한 계응력이 되며, 이 응력에 도달할 때 재료는 피로 파괴가 일어난다. 즉 반복하중에 의한 내재분산에너지의 변화를 Lock-in IRT 로 관찰함으로써 재료의 피로한계치분석을 할 수 있다. Fig. 9 는 노치시험편을 이용하여 Lock-in IRT 로 내재분산에너지 변화를 측정하고 이로부터 피로한계치를 예측한 결과이다. 기존 피로시험기에 의한 피로한계치평가 시험에서는 많은 시간과 시험편을 소요하고 있으나, Lock-in IRT 에 의한 피로한계치 분석을 짧은 시간에(3 시간 이내) 결과를 확보할 수 있다.

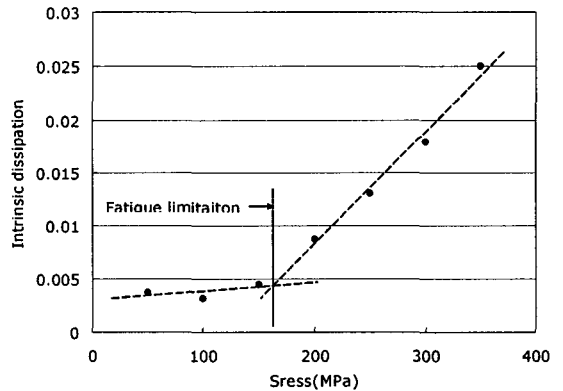


Fig. 9 Fatigue limitation evaluation from intrinsic dissipation

4. 결론

본 논문에서는 비접촉, 전면 계측이 가능한 적외선 열화상기술(Infrared Thermography)을 바탕으로 최근 많은 연구가 진행되고 있는 Lock-in Thermography 를 이용한 응용기술을 소개하였다. IR 검출소자의 발전과 함께 온도검출분해능이 향상되면서 열탄성효과를 이용한 응력해석, 피로한계치 분석, 결함검사의 부분에서 많은 기술적 진전이 되고 있다. 현재 국내에서는 한국표준과학연

구원이 적외선 열화상기술을 이용한 비파괴검사 분야 ISO TC135/SC8 국제 규격 개발 간사국으로서 활동을 하고 있으며, 이와 관련된 참조시험편 개발, 시험규격개발, 응력해석기술, 피로한계치평가기술 등을 개발하고 있다.

적외선열화상 기술은 기존 단순한 비파괴 진단기술에서 Lock-in 기술과 같은 제어기술과 영상처리 기술이 접목되면서 재료의 특성을 제공하는 복합적인 계측.평가기술로 지속적으로 발전을 하고 있으며, 우리나라의 핵심 산업인 고집적 전자제품의 평가에서도 탁월한 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Maldague, X.P.V., "Trends in optical nondestructive testing and inspection," Rastogi P.K., Inaudi D, editors, Elsevier Science, Switzerland, 2000.
- Maldague, X.P.V., "Infrared methodology and technology," Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 1994.
- (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.
- Gaussorgurs, G., "Infrared thermography," translated by Chomet, S., Champman & Hall, London, 1994.
- Kang, K.S., Choi, M.Y., Park, J.H. and Kim, K.S., "Detection of Delamination Defects in Honeycomb Plate by Optical NDT: Thermography and ESPI," FENDT2006, pp.147-153, 2006.
- Kim, W. T., Choi, M. Y. and Park, J. H., "Diagnosis of defect points in materials using infrared thermography," Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp. 2169~2173, 2005.
- Joo, H., Kim, W.T. and Choi, M.Y., "Reliability testing on the printed circuit board of mobile pon using infrared thermography," 8th QIRT, pp. 120, 2006.
- Cho, J.W., Kim, H.H., Seo, Y.C., Choi, Y.S. and Kim, S.H., "Inspection of calandria front area of wolsung NPP using technique of mapping thermal infrared image into CCD image," Spring conference of KSNT, pp. 173-178, 2002.
- Busse, G., Wu, D. and Karpen, W., "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," J. Appl. Phys. Vol. 71, No. 8, 1992.
- Wu, D. and Busse, G., "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," Rev. Gin. Therm., Vol. 37, pp. 693-703, 1998.
- Wu, D., Salerno, A., Schonbach, B., Hallin, H. and Busse, C., "Phase-sensitive modulation thermography and its applications for NDE," Proc. SPIE, Vol. 3056, pp. 176-182, 1997.
- Bremond, P. "Nondestructive testing by heat wave detection," Technical report, KRISS, 2006.
- Luong, M.P., "Infrared thermographic scanning of fatigue in metals," Nuclear Engineering and Design, Vol. 158, pp. 363-376, 1995.
- Peyroux, R., Chrysochoos, A., Licht, C. and Löbel, M., "Thermomechanical couplings and pseudoelasticity of shape memory alloys," International Journal of Engineering Science, Vol. 36, Issue 4, pp. 489-509, 1998.
- Luong, M. P., "Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique," Mechanics of Materials, Vol. 28, pp. 155-163, 1998.
- Bremond, P. and Potet, P., "Lock-in thermography: a tool to analyze and locate thermomechanical mechanisms in materials and structures," Proceedings of SPIE, Vol. 4360, pp. 560-566, 2001.
- Thomson, W. (Lord Kelvin), "On the dynamic theory of heat," Trans. Soc. Edinburgh, Vol. 20, pp. 261-283, 1853.
- Belgen, M.H., "Structural stress measurement with a infrared radiometer," ISA Trans., Vol. 6, pp. 49-53, 1967.
- Rauch, B.J. and Rowlands, R.E., "Handbook on experimental mechanics," VCH publishers Inc, New York, Ch. 14, 1993.
- Bremond, P. "application of thermal stress analyzer," Technical report, KRISS, 2006.
- Yang, B., Liaw, P.K., Morrison, M., Liu, C.T., Buchanan, R.A. and Huang, J.Y., "Temperature evolution during fatigue damage," Intermetallics, Vol. 13, pp. 419-428, 2005.