

## 위상잠금 열화상기법을 이용한 복합재 튜브 충격 손상 결함 측정

### Defect Detection of Impacted Composite Tubes by Lock-in Photo-Infrared Thermography Technique

김경석\*, 전소영\*\*, 정현철†

Kyoung-Suk Kim\*, So young Jeon\*\* and Hyun-Chul Jung†

초 록 충격에 의한 복합재 튜브의 내부 박리 현상은 항공 우주 및 자동차 산업 등에서 흔히 발생되어 왔다. 이러한 복합재 구조물의 안전성을 평가하기 위해서는 적외선열화상기법(IRT)과 같은 복합재 구조물의 내부 결함을 검출할 수 있는 비파괴검사가 필요하다 적외선 열화상 이미지 패턴 분석에 의해서 내부 결함이 발생한 복합재 튜브의 내·외부 결함 부위를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 적외선열화상기법을 이용하여 충격 하중에 따른 복합재 튜브 표면에서 방출하는 적외선 에너지를 감지하여 열 분배로부터 복합재 튜브의 내부 결함을 검출하는 연구를 수행하였다.

주요용어: 적외선 열화상, 위상잠금, 결함검출, 복합재 튜브

**Abstract** The problem of delamination of composite tubes by impact has been acknowledged in aerospace and automobile industry. Non-destructive testing(NDT) methods in composite material structure are important to evaluate reliability of composite structure. There are many kinds of NDT methods which can detect the inside defect of the composite material such as Infrared Thermography(IRT). Infrared thermal imaging of object is different from that of a defect, in heated composite tubes with an internal defect, and then location and size of a defect can be measured by the analysis of thermal imaging pattern. In this study, Lock-in Infrared thermography detect internal defects of Impacted composite tubes by the inspection of infrared lay radiated from the surface of composite tubes.

**Keywords:** Infrared Thermography, Lock-in, Defect Detection, Composite Tubes

#### 1. 서 론

최근 산업분야에서 에너지 절약 및 신소재 개발의 일환으로 복합재료의 응용분야가 급속히 확산되고 있으며 그 중 탄소섬유강화 플라스틱은 비강도, 비강성이 기존의 금속재료보다 훨씬 높고 내화학적, 전기절연성 등이 우수하기 때문에 항공기, 자동차, 기차 및 선박, 우주비행체 등에 이용되고 있으며 그 활용 범위도 점차 확대되어

가고 있다[1,2].

현재 복합재 구조물 결함 검출 및 평가로 초음파(ultrasonic), 방사선(radiography) 등을 이용하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 적외선 열화상 기법을 이용하여 복합재 튜브의 결함을 검출하였다. 적외선 카메라를 이용한 적외선열화상(infrared thermography)기법은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 이용하여 물체의 표면 온도 분포 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로써 초기에는

비접촉 온도 측정 장비로 사용되어 왔다[3].

적외선 열화상 기법은 물체 표면의 복사에너지를 검출하여 이를 온도로 환산하여 실시간으로 영상을 제공하는 기술이며 열을 눈으로 볼 수 있도록 하는 방법으로 진단 결과가 신속하고 빠른 결과와 함께 바로 눈으로 실제 결과를 볼 수 있는 특징을 가지고 있다. 그러나, 대상물의 열확산 계수가 클 경우 샘플링 한계로 인하여 결함을 찾는 데 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 위상잠금(lock-in)기법을 적용함으로써 측정이 가능하다[4-5].

본 연구에서는 위상잠금 기법을 사용하여 위상 변화를 추출함으로써 복합재 튜브의 충격에너지에 의한 손상 및 결함 부위를 측정 하였다.

## 2. 이론

위상잠금 적외선 열화상 기법은 자극원을 조화함수로 하여 대상체에 입사하고 이때 대상체의 응답신호를 처리하여 위상, 진폭 등의 변화를 구하는 방법이다. 외부 자극원으로는 결함의 종류와 대상체의 재질에 따라 조화함수로 제어가 용이한 광, 초음파, 진동 등이 사용된다. 본 논문에서는 결함검출을 위해 자극원을 광으로 하는 위상잠금 광·적외선 열화상 기법을 사용하였다. 이 기법은 Fig. 1과 같이 신호처리 과정을 거치며 조화함수로 입사되는 열원(heat source)에 적외선 검출소자를 동기화시켜 대상체의 응답신호를 획득하게 된다. 식(1)로 표현되는 고체 내의 1차원 열전도방정식에서 외부 자극원으로서 할로젠 램프를 사용하여 대상체에 조화함수로 가열하고, 이때 대상체로 침투한 열원의 변화를 관찰하여 결함을 검출하는 방법이다[6-9].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

여기에서 T는 온도, t는 시간, k는 열전도계수, ρ는 밀도, c<sub>p</sub>는 비열, x는 열유동 방향으로의 거리이다. 조화함수로 가열된 식(1)의 해는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T(x,t) = T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \quad (2)$$

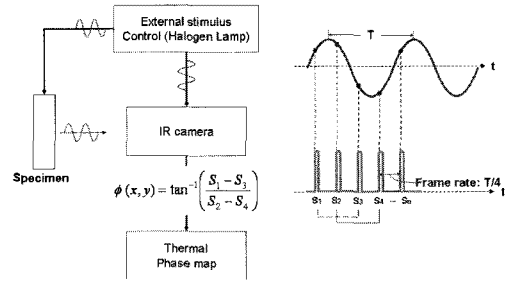


Fig. 1 Signal processing of lock-in infrared thermography

여기서 침투깊이(thermal diffusion length),  $\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}}$ , 열확산계수(thermal diffusivity),  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ 이다. 위상잠금 기법에서는 식(2)에서 측정결과로부터 위상을 추출함으로써 검출 민감도를 향상시킬 수 있으며, 표면 방사율의 불균일성에 의한 결함 검출 오류를 최소화할 수 있다. 식(2)에서 위상은 외부 자극원과 적외선 검출소자를 동기화시켜 자극원의 λ/4주기 간격으로 연속하는 적외선 검출신호 I<sub>1</sub>, I<sub>2</sub>, I<sub>3</sub>, I<sub>4</sub>를 식(3)과 같이 획득하고, 식(4)를 사용하여 추출할 수 있다[10-12].

$$\begin{aligned} I_1 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu) \\ I_2 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi/2) \\ I_3 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - \pi) \\ I_4 &= T_0 e^{-x/\mu} \cos(\omega t - x/\mu - 3\pi/2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi = x/\mu = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (4)$$

## 3. 시험편 및 실험 방법

### 3.1. 시험편

본 연구에서 사용한 복합재 튜브 시험편은 두께 10 mm이고 지름 ∅150, ∅250 mm이며 필라멘트 와인딩 기법으로 제작하였다. 이 시험편에 충격하중에 따른 결함을 측정하기 위하여 시험편의 두께 방향으로 강구를 발사하여 다양한 충격하중을 주었다.

∅150 시험편의 충격에너지는 시험편의 왼쪽에서부터 각각 3JL, 3JR, 5J, 10J, 15JL, 20J, 30J, 40JR이고, ∅250 시험편의 경우 왼쪽에서부터 각

각 10JL, 5JL, 3JL, 3JR, 80J, 60J, 40J, 20J, 10JR, 5JR의 충격을 가하였다. 동일한 충격에너지의 경우 왼쪽 충격부위를 L, 오른쪽 충격부위를 R로 표기하였으며, Fig. 2에 제작된 시험편을 나타내었다.

3.2. 실험 방법

위상잠금(lock-in) 적외선 열화상 시스템을 Fig. 3과 같이 IR camera, halogen lamp, function generator로 구성하였다. 이 시스템에서는 함수발생기에 의해 할로겐램프의 주파수를 조절하고 이와 동기화시켰으며 시험편의 표면에 방사페인트를 도포하여 방사율을 0.95로 유지하였고, 위상잠금기법을 이용하여 열원과 검출소자를 동기화시켜 50 mHz 주파수를 주어 위상이미지를 신호처리를 통하여 획득하였다. 복합재 튜브의 결함을 측정하기 위하여 주변의 온도(20±0.5℃)를 일정하게 유지 하였다.

4. 결 과

충격에너지에 따른 각 시험편의 적외선 열화상 이미지는 Fig. 4, 6에 나타내었고 획득한 이미지에서 충격이 가하여진 중앙 부분을 기준으로 y축

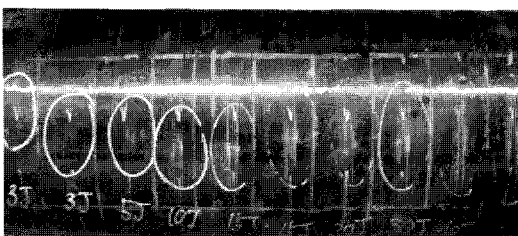


Fig. 2 Prepared composite tubes



Fig. 3 Infrared thermography system

방향으로 프로파일 선도를 획득하여 각 위치별 온도변화 그래프는 Fig. 5, 7에 나타내었다.

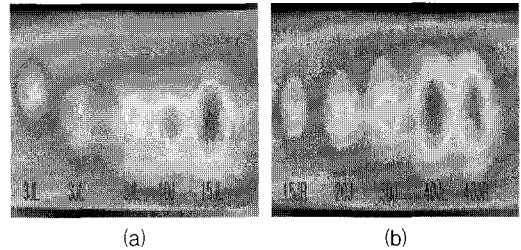
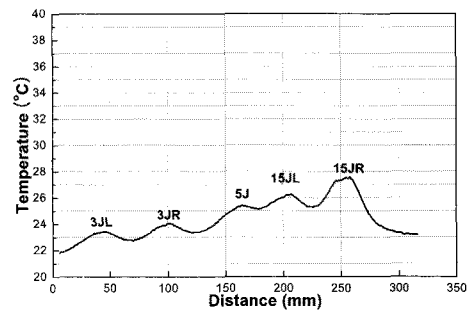
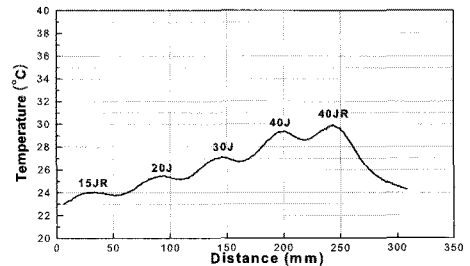


Fig. 4 Infrared thermography image of  $\varnothing 150$ , (a) Left side, (b) Right side

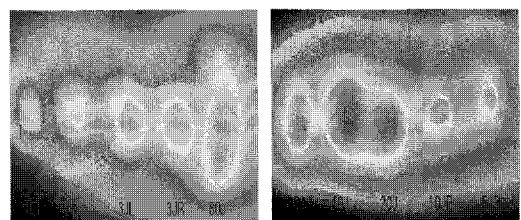


(a)



(b)

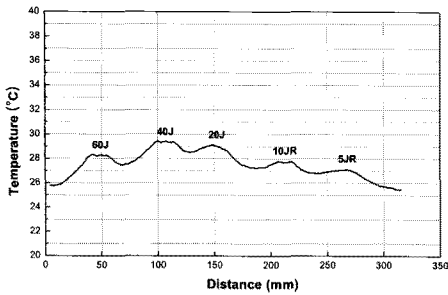
Fig. 5 Temperature of  $\varnothing 150$  specimen, (a) Left side, (b) Right side



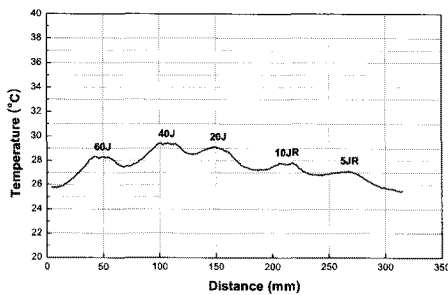
(a)

(b)

Fig. 6 Infrared thermography image of  $\varnothing 250$ , (a) Left side, (b) Right side



(a)



(b)

Fig. 7 Temperature of  $\varnothing 250$  specimen, (a) Left side, (b) Right side

측정된 결과에 따라 왼쪽 충격부위와 오른쪽 충격부위를 비교해보면 충격에너지가 클수록 온도가 높게 측정되었고  $\varnothing 150$ 에서는 15JL, 40JR과  $\varnothing 250$ 에서는 80J, 40J의 충격부위가 다른 충격부위에 비하여 열적 손상이 많음을 적외선 열화상 이미지로 확인할 수 있으며, 이를 통하여 충격하중에 따른 복합재료의 결함의 위치를 알 수 있다. 또한 충격에너지의 크기에 따른 온도그래프가 선형적이지 않은 것은 복합재료 특성상 충격과 열에 약하여 내부 박리 결함 및 모재부 외부 크랙이 발생하여 시험편의 넓은 면적을 할로겐램프를 이용하여 가열시 시험편의 전 측정영역에 열원 전달 및 침투가 되지 않았을 것이라 사료된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 적외선 열화상을 이용하여 복합재 튜브의 충격손상에 따른 결함을 측정하였다. 복합재 튜브의 충격에 따른 결함부위의 측정온도가 상대적으로 높게 나타났다. 이를 통하여 복합재 튜브의 내·외부 결함부위를 측정할 수 있었

다. 또한 내부 박리 및 외부 손상에 따라 충격에너지와 결함부 측정 온도가 선형적이지 않음을 확인할 수 있었다. 본 논문을 통하여, 적외선 열화상을 이용하여 복합재 튜브의 충격에너지에 따른 결함을 측정함으로써 복합재료 활용 분야에서 제품의 안정성 확보 및 충격손상거동 해석에 기초자료가 될 것이라고 사료된다.

## 후기

본 논문은 2010년도 지식경제부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과입니다.

## 참고문헌

- [1] A. G. Mamalis and D. E. Manolaks, "Crashworthy behavior of thin-walled tubes of fiberglass composite materials subjected to axial loading," *J. Composite Materials*, Vol. 24, pp. 72-91 (1990)
- [2] C. H. Chiu and C. K. Lu., "Crushing characteristics of 3-D braided composite square tubes," *J. Composite Materials*, Vol. 31, pp. 2309-2327 (1997)
- [3] C. H. Chiu, K. H. Tsai and W. J. Huang, "Effects of braiding parameters on energy absorption capability of triaxially braided composite tubes," *J. Composite Materials*, Vol. 32, pp. 1964-1983 (1998)
- [4] Vistasp M. Karbhari, "Energy absorption characteristics of hybrid braided composite tubes," *J. Composite*, Vol. 31, pp. 1164-1186 (1997)
- [5] X. P. V. Maldague, *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing*, Vol. 3, ASNT, pp.12-20 (2001)
- [6] S. M. Chang, S. H. Lee and H. M. Kwon, "Electromagnetism induction heating and application," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 50, No. 2, pp. 8-14 (2001)
- [7] H. E. Horng, J. T. Jeng, H. C. Yang and J. C. Chen, "Evaluation of the flaw depth using high-T SQUID," *Physica. C, Superconductivity*,

- Vol. 367, No. 1/4, pp. 303-307 (2002)
- [8] G. Gaussorgurs, *Infrared Themography*, pp. 375-431. Translated by S. Chomet, Champman & Hall, London, (1994)
- [9] K. S. Kang, M. Y. Choi, J. H. Park, K. S. Kim and S. M. Yang, "Determining size and location of subsurface defects of steel plate by lock-in thermography," 12th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Test, pp. 48 (2006)
- [10] M. Y. Choi, "The utilization of nondestructive testing and defects diagnosis using infrared thermography," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531, (2004)
- [11] D. Wu, and G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Rev. Gen. Therm.*, Vol. 37, pp. 693-703. (1998)
- [12] D. C. Shin and H. M. Kwon, "Development a high-efficiency induction heating heater using a 5[kW] class full-bridge high frequency resonant inverter," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 10, No. 5, pp. 481-487 (2005)