

## 적외선 열화상 기술을 이용한 철도차량 대차 건전성 평가

### Integrity Evaluation of Railway Bogie Using Infrared Thermography Technique

김정국

Jeongguk Kim

초 록 철도차량 대차의 건전성 평가를 위해 위상잠금 열화상 기술이 이용되었다. 실제 대차의 건전성 평가 전에 인공결함을 함유한 실제 대차와 동일한 재질의 시험편으로 교정을 실시하였으며, 이러한 결함에 대한 정보를 바탕으로 실제 철도차량 대차의 결함 평가를 실시하였다. 본 연구에서는 대차결함의 검출을 위한 비파괴평가 기술로써 위상잠금 열화상 기술의 적용성을 탐구하였으며, 열화상법에 의한 결함 평가 결과와 다른 비파괴평가 결과와의 비교 결과를 나타내었다. 본 연구에서는 비접촉, 빠른 결과 처리 등의 장점을 지닌 위상잠금 적외선 열화상 기술이 기존의 대차 결함 평가를 위한 방법을 대체할 수 있는 효율적인 기술임을 알 수 있었다.

주요용어: 철도차량 대차, 비파괴평가, 적외선 열화상, 위상잠금

**Abstract** The lock-in thermography was employed to evaluate the integrity of railway bogies. Prior to the actual application on railway bogies, in order to assess the detectability of known flaws, the calibration reference panel was prepared with various dimensions of artificial flaws. The panel was composed of structural steel, which was the same material with actual bogies. Through lock-in thermography evaluation, the optimal frequency of heat source was determined for the best flaw detection. Based on the defects information, the actual defect assessments on railway bogie were conducted with different types of railway bogies, which were used for the current operation. In summary, the defect assessment results with thermography method showed a good agreement as compared with the conventional inspection techniques. Moreover, it was found that the novel infrared thermography technique could be an effective way for the inspection and the detection of surface defects on bogies since the infrared thermography method provided rapid and non-contact mode for the investigation of railway bogies.

**Keywords:** Railway Bogie, Nondestructive Evaluation, Infrared Thermography, Lock-in Thermography

#### 1. 서 론

적외선 열화상 기술(infrared thermography)은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 탐지하여 물체의 표면 온도 측정 또는 온도 분포를 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로써 초기에는 비접촉 온도

측정 장비로 사용되어 왔다[1-3]. 최근에는 비접촉식, 최고 20 kHz 이상의 초고속, 다양한 온도범위에서의 분해능 등과 같은 특성으로 인하여 단순한 온도 측정뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장 분석, 응력해석, 의료분야에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되

고 있다[4-8]. 특히, 적외선 열화상 기술이 기존의 수동(passive) 방식에서 능동(active) 방식으로 개발되면서 비파괴평가 분야에 다양하게 활용되고 있다. 향후 비접촉 비파괴검사 기술로 기존 검사 기법의 단점을 보완 할 수 있을 것으로 보인다.

최근 철도 시스템의 발달과 속도 향상으로 철도 시스템의 안전성에 대한 관심이 고조되고 있으며, 이와 관련하여 시스템의 안전성, 고속주행 성능, 유지 보수의 효율성 등이 중요한 인자가 되고 있다. 철도분야에서도 철도 차량 시스템의 유지 보수와 관련하여, 차량 제작이나 운행 중에 형성된 결함 또는 손상의 조기 검출 및 관리를 위한 건전성 평가 기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 초음파탐상, 자분탐상, 방사선법 등과 같은 기존의 비파괴평가 기술을 적용하여 다양한 활용이 이루어지고 있다.

적외선 열화상 기술은 철도차량의 유지 보수에 이용되는 기존의 다른 여러 가지 비파괴평가 기술과 비교하여 다양한 응용 특징을 제공하고 있어 이에 대한 기초 및 응용연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다[9-11]. 따라서 적외선 열화상 기술을 이용하여 초기 단계에 머물고 있는 손상 진단 및 유지 보수 기술의 향상과 철도차량 시스템 건전성 평가 기술의 확보를 통하여 철도의 안전성 및 신뢰성 제고를 위한 노력이 요구된다.

철도차량의 대차는 차체와 레일 사이에 위치하고, 윤축(차축과 차륜)과 대차프레임 등으로 구성되어 차체의 중량을 지지하고 차량의 주행을 직접적으로 담당하는 기능을 지닌다. 또한, 차량의 운행과 관련하여 주행 안전성 및 내구성의 확보 등을 요구하며 안전과 직결되는 중요한 철도 부품의 하나이다. 본 연구에서는 철도차량 대차의 건전성 평가를 위해 비파괴평가 기술의 하나인 적외선 열화상 기술을 도입하여 그 가능성을 시도하였다. 다양한 종류의 철도차량 대차에 대하여 위상잠금 적외선 열화상 기술을 적용하여 비파괴진단을 실시하였으며, 그 결과를 나타내었다. 또한, 본 연구에서는 대차 결함의 검출을 위한 비파괴평가 기술로써 위상잠금 열화상 기술의 적용 가능성을 탐구하였으며, 열화상법에 의한 결함 평가 결과와 기존의 다른 비파괴평가 기술에 의한 결과와의 비교도 실시하였다. 본 연구에서는 비접촉, 빠른 결과 처리 등의 장점을 지닌 위상 잠금 적외선 열화상 기술이 기존의 대차 결함

평가를 위한 방법을 대체할 수 있는 효율적인 기술을 소개하고자 한다.

## 2. 위상잠금 적외선 열화상 및 시험 절차

### 2.1. 위상잠금 적외선 열화상 기술(Lock-in Infrared Thermography)

기존의 적외선 열화상 기술은 표면 근처의 내부 결함만이 검출 가능한 단점이 있으며, 물체의 표면 방사율이 불균일할 경우 검사 결과에 영향을 주었다. 이러한 문제점은 위상잠금(lock-in) 기술을 적용하면서 크게 개선되었다[12].

위상잠금 열화상 기술은 대상 시험체에 주기적인 열을 가하여 열원에 대한 시험편의 위상, 진폭 및 온도 등의 응답신호를 분석하여 프로그램 처리를 통해 시험편의 이상상태를 확인하는 방법이다. Fig. 1에서는 위상잠금 적외선 열화상의 기본원리와 위상잠금 열화상 기술을 이용한 시험편의 결함 검출을 위한 구성장치를 나타내고 있다.

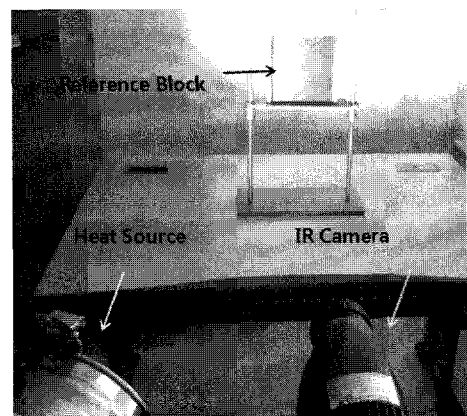
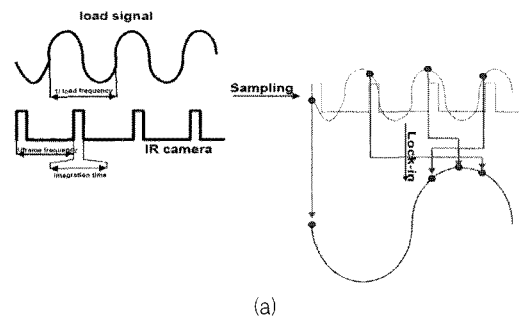


Fig. 1 (a) The principle of lock-in thermography [13] and (b) Testing setup

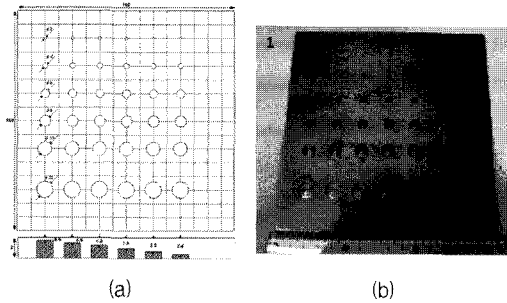


Fig. 2 (a) The drawing of calibration block with artificial flaws and (b) The actual specimen with SS400 materia

본 구성에서 약 1,000 W의 할로겐램프가 주기적으로 주파수를 변화시키며 열을 인공결합 시험편에 가하고 시험편의 위상, 온도 또는 진폭의 변화를 적외선 카메라가 저장하여 최종 열화상(위상, 온도, 진폭 등) 이미지로 재가공하여 이에 따른 결과를 이미지의 형태로 도출하게 된다. 이때 최적의 주파수를 나타내는 열화상 이미지를 통해 결함에 대해 적합한 최종 이미지를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 할로겐램프를 가진하는 함수발생기(function generator)와 록인 모듈이 장착된 Cedip의 Silver 480M 적외선 카메라 모델로 구성된 위상 잠금 열화상 시스템을 이용하여 건전성 평가를 수행하였다. 위상잠금 적외선 열화상 기술은 넓은 면적을 동시에 검사하는 것이 가능하고 표면 방사율의 불균일성에 둔감해 결함 검출의 오류를 최소화할 수 있다. 복합재의 결함 검사, 베니어합판 박리검사, 얇은 금속판 내부 감육 검사, PCB 박리검사 등에 적용되고 있다.

## 2.2. 교정용 인공결합 시험편의 제작

적외선 열화상 기술을 이용한 철도차량 대차의 결함 평가를 위해 다수의 용접 구조물로 이루어진 복잡한 대차 구조로 바로 접근하기보다는 우선적으로 대차와 동일한 소재에 인공의 결함을 가공한 인공결합 시험편을 제작하여 실제의 대차 구조물에 적용하기 위한 대비 연구를 실시하였다. Fig. 2(a)는 본 연구를 위해 설계한 원형 인공결합을 함유한 인공결합 시험편을 나타내고 있다. 인공결합 시험편은 결함의 직경이 2 mm에서

12 mm까지 2 mm 간격으로 결함을 설정하였으며, 깊이는 0.4 mm에서 시작하여 0.4 mm의 차이를 두고 깊이를 증가시켜 2.4 mm까지 각기 다른 깊이와 직경의 결함을 함유한 시험편을 제작하였다.

Fig. 2(b)는 실제 가공된 인공결합 함유 표준시험편을 나타내고 있다. 대차 소재는 실제 대차의 재질과 동일한 SS400 소재의 재질을 이용하였고 시험편의 크기는  $160 \times 160 \times 3$  mm로 제작되었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 인공결합 시험편 적외선 열화상 평가 결과 및 분석

인공결합으로 설계 및 제작된 시험편을 이용한 적외선 열화상 비파괴평가는 위상잠금(lock-in) 열화상 기술을 이용하여 진행되었다. 적외선 열화상 평가는 Fig. 1에서 나타난 실험 구성으로 실시하였다. Fig. 3은 열원 주파수에 따른 상대 위상차를 이용한 위상잠금(lock-in) 열화상 이미지의 결과를 나타내고 있다. Fig. 2(a)의 인공결합 시험편의 도면에서 왼쪽 하단부의 가장 큰 결함의 직경이 12 mm이며, 위쪽으로 2 mm 간격으로 직경이 감소(10, 8, 6, 4, 2 mm의 순서)하고, 인공결합의 깊이는 왼쪽으로부터 0.4, 0.8, 1.2 mm 등의 순서로 증가하고 있다. 위상잠금 적외선 열화상 실험은 결함을 드러내지 않는 반대면을 향하여 실시하였으므로 Fig. 3의 결과에서는 Fig. 2(a)와 비교하여 좌우가 뒤바뀐 결과를 나타내고 있다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 대차 시험편에 대해 왼쪽에서 첫번째(깊이 0.4 mm), 윗 방향으로 5번째(직경 4 mm)까지의 결함이 관찰되는 것으로 볼 때 본 인공결합 시험편에 대해 직경 4 mm, 깊이 0.4 mm의 결함에 대해 검출 가능성을 알 수 있다. 또한 최적의 주파수는 0.5 Hz인 것으로 관찰되었다. 본 연구에서 제작된 시험편들은 현장시험에 앞서 다양한 결함 검출 시험 교정용 시험편(calibration block)으로 활용되어 질 수 있으며, 본 시험 결과를 통해 각 재질별 적외선 열화상 비파괴기술로 검출 가능한 임계결함 크기와 깊이 데이터 확보로 철도차량 대차의 건전성 평가를 위한 기반기술로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

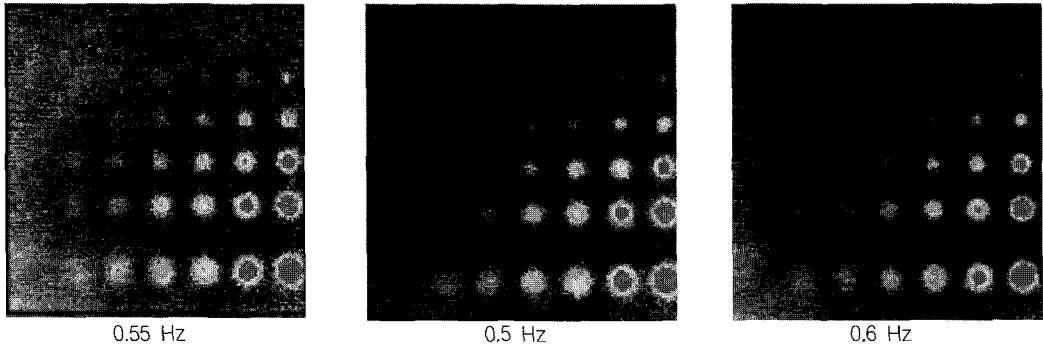


Fig. 3 The images of lock-in thermography on the calibration block showing different frequencies

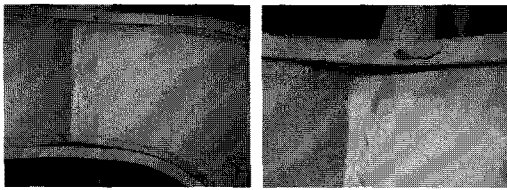


Fig. 4 The railway bogie for high-speed train showing weldments and surface flaw with painting peel-off

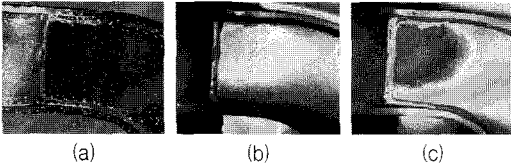


Fig. 5 The lock-in thermographic images of (a) phase, (b) temperature, and (c) amplitude with the frequency of 0.35 Hz for high-speed train bogie

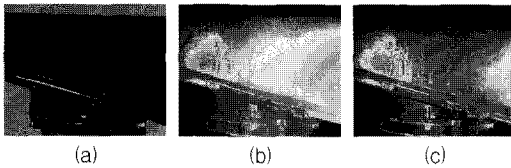


Fig. 6 The lock-in thermographic images of (a) phase, (b) temperature, and (c) amplitude with the frequency of 0.45 Hz for subway bogie

### 3.2. 철도차량 대차의 적외선 열화상 평가 결과 및 분석

#### 3.2.1. 고속철도용 대차의 위상잠금 적외선 열화상 평가

위상잠금 적외선 열화상 기술을 다양한 실제 현장에 대한 적용성 검토를 위하여 고속철도에 이용되는 대차를 대상으로 평가를 실시하였다.

Fig. 4는 적외선 열화상 기술을 이용한 건전성 평가를 실시한 고속철 대차의 한 부위를 나타내고 있다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 대차 용접 부위를 포함하고 있으며, 또한 그림의 상단부에는 페인트가 벗겨진 부위를 포함하고 있다. 이에 대한 위상잠금 적외선 열화상 평가를 실시하였고, 그 결과는 Fig. 5에서 나타난 바와 같다.

Fig. 5(a)의 위상차 열화상 이미지에서는 페인트의 벗겨진 부분이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 표면에 흰색의 점들이 많이 분포되어 있음을 알 수 있다. 그러나 온도 이미지(Fig. 5(b))에서는 페인트 부분만 도출될 뿐 표면에서는 중심부의 가장자리 부위에서 점들을 나타내는 외에 뚜렷한 변별성이 나타나지 않고 있으며, 진폭 이미지(Fig. 5(c))에서도 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 대차 평가 부위의 정면에 할로겐램프가 집중적으로 가해졌으며, 이로 인한 반사로 인해 다른 부위에 비해 상대적으로 고열 또는 높은 값이 얻어져 이것이 반영되어 최종적 결과 이미지에 영향을 준 것으로 분석된다. 그러나 실제의 사진에서는 표면에 페인트가 균일하게 도색되지 않음으로 인한 결함들이 관찰되었으며, 위상 열화상 이미지(Fig. 5(a))에서 나타난 것과 동일한 이미지임을 알 수 있다.

본 위상잠금 적외선 열화상 평가는 대차 용접부의 결함 검출이 주목적이었으나, 실제 대차 용접부에서는 결함이 관찰되지 않았다.

#### 3.2.2. 전동차 대차의 위상잠금 적외선 열화상 평가

앞의 섹션에서 위상잠금 적외선 열화상 평가를 다양한 현장에 적용하기 위해 고속철 대차에 대

한 적용과 그 결과들을 소개하였는데, 본 섹션에서는 약 10만 km 이상을 운행한 전동차에 대한 비파괴평가 결과를 소개하고자 한다.

Fig. 6는 전동차 대차에 대한 위상잠금 적외선 열화상 평가 결과를 나타내었다. 표면 페인트의 얼룩 등이 Fig. 6(c)의 진폭 이미지에서 관찰되었고, 또한 할로겐램프의 정면 발열 및 반사로 인한 온도 상승 영역(Fig. 6(b)와 (c))이 발견되기도 하였다. 그러나 이런 부위는 실제 결함과는 관계가 없는 영역이다.

그러나 Fig. 6(a)의 위상 열화상 이미지에서는 사진 하반부에서 대차의 용접부를 따라 이상 영역이 관찰되었다. 연두색으로 표시되어 나타나고 있는데, 이는 Fig. 6(b)와 (c)의 온도와 진폭의 열화상 이미지에서도 동일하게 관찰되었는데, 용접 부위의 불량 등으로 인한 결함 영역으로 판단된다. 결함이 발견되어 실제 이미지를 관찰하였으나 결함 부위에 해당되는 실제 사진에서는 별다른 이상 징후가 발견되지 않았다(Fig. 7).

이로서 필요하다면 추후 초음파탐상, 자분탐상 등과 같은 다른 형태의 비파괴검사를 통해 결함에 대한 분석이 요구되어지며, 이에 대한 검사 결과를 비교하는 것이 필요하다.

Fig. 8은 자분탐상을 통하여 볼스터에서 발견된 핀홀 결함을 나타내고 있다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯이 거의 직경 1 mm 정도의 핀홀 결함(표면결함)임을 알 수 있다. 이러한 핀홀에 대한 위

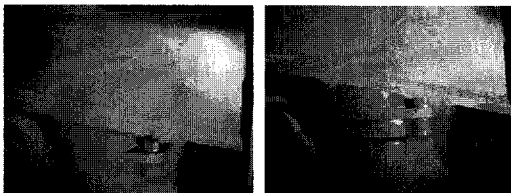


Fig. 7 The actual bogie showed line defect from lock-in thermographic images, and note that no significant features on surface were found

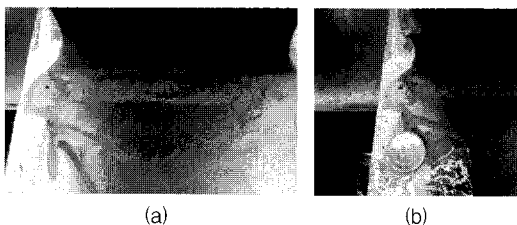


Fig. 8 The pin-hole defect in bolster from magnetic particle testing

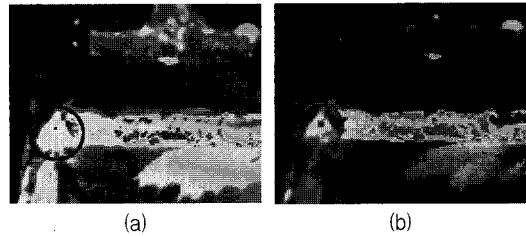


Fig. 9 The lock-in thermographic images of (a) temperature and (b) amplitude with the frequency of 0.01 Hz for bolster, and note that the pin-hole type defects were marked by red circle

상잠금 적외선 열화상 기술의 적용성을 비교하기 위하여 본 부위(known defect)에 대한 열화상 평가를 실시하여 자분탐상에 의해 발견된 결과와 비교하였다.

Fig. 9는 Fig. 8의 적외선 열화상 평가 결과를 각각 온도와 진폭 열화상 이미지로 나타내고 있다. Fig. 9(a)와 (b)의 온도와 진폭 이미지에서는 자분탐상으로 검출된 핀홀 결함에 대해 선명한 이미지를 나타내고 있다. 온도와 진폭 이미지에서는 그림 중반 부분의 볼스터 용접부에서는 할로겐 프의 반사로 인한 결과(표면이 균일하지 못함, Fig. 8)로 다소 복잡한 이미지를 제공하였으나 핀홀 결함 부위에 대해서는 선명한 결함을 나타내고 있다.

이를 통해볼 때 적외선 열화상 비파괴평가는 비접촉식이며 복잡한 표면의 상태와 형상에 대해서도 전처리 등의 작업이 필요 없이 비교적 빠른 방식으로 결함 정보를 제공하는 도구가 될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 유추해 볼 때 핀홀 결함 등과 같은 유사한 차원의 결함에 대해서는 비교적 손쉽게 결함을 분석할 수 있는 강력한 도구가 될 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

적외선 열화상 기술을 이용한 철도차량 대차의 건전성 평가를 실시한 본 연구에서는 다음의 결론이 도출되었다.

- 1) 철도차량 대차와 동일한 재질로 제작된 인공 결함 함유 시험편을 이용하여 열화상 비파괴 평가를 실시하였고, 내부에 인공결함이 함유된 시험편에 대해 직경 4 mm, 깊이 0.4 mm

- 의 결합에 대해 검출이 가능함을 알 수 있었고, 이때 최적의 주파수는 0.5 Hz인 것으로 관찰되었다. 또한 복잡한 실물 대상체의 내부 결합 검출에 앞서 예비실험을 통해 결합에 대한 검출 정보를 알 수 있을 것으로 보이며, 본 시험편은 적외선 열화상 시스템의 교정용 시험편으로도 활용될 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 고속철도 및 전동차 대차에 대한 위상잠금 적외선 열화상 평가를 통해 표면결합에 대한 분석을 실시하였으며, 비파괴평가 기술로써 적용이 가능함을 알 수 있었다.
  - 3) 위상잠금 적외선 열화상 기술은 철도차량 대차의 건전성 평가에 적용할 수 있으며, 검사 시간의 획기적인 단축 등의 결점을 보완할 경우, 정성적 열화상 이미지 분석을 통해 기존의 결합 검사 방법을 대체할 가능성이 높은 것으로 판명되었다.
  - 4) 적외선 열화상 비파괴평가는 기존의 초음파 탐상, 자분탐상 등과 비교하여 비접촉식이며 복잡한 표면의 상태와 형상에 대해서도 전처리 등의 작업이 필요 없이 비교적 빠른 방식으로 결합 정보를 제공하는 도구가 될 수 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [1] X. P. V. Maldague, *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing*, Vol. 3, ASNT (2001)
- [2] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, pp. 9.1-9.47 (2001)
- [3] 김정국, "철도차량 차축 재료의 파괴 특성 적외선열화상 모니터링", *비파괴검사학회지*, 제30권 제2호, pp. 116-120 (2010)
- [4] J. Kim and P. K. Liaw, "Characterization of fatigue damage modes in Nicalon/Calcium aluminosilicate composites," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 127, pp. 8-15 (2005)
- [5] X. P. V. Maldague, S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," *J. Appl. Phys.* 79, pp. 2694-2698 (1996)
- [6] J. Kim and P. K. Liaw, "Tensile fracture behavior of Nicalon/SiC composites," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 38A, No. 13, pp. 2203-2213 (2007)
- [7] 김원태, 강기수, 최만용, 박정학, "Lock-in Thermography를 이용한 노치시험편의 응력 해석 및 피로 한계치 평가", *비파괴검사학회지*, 제26권, 제4호, pp. 315-320 (2006)
- [8] 최만용, 김원태, "적외선 열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결합 진단", *비파괴검사학회지*, 제24권, 제5호, pp. 525-531 (2004)
- [9] S. Panier, P. Dufrenoy and D. Weichert, "An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes," *Wear*, 256, pp. 764-773 (2004)
- [10] P. Dufrenoy, "Two-/three-dimensional hybrid model of the thermomechanical behavior of disc brakes," *Proc. Instn Mech. Engrs*, Vol. 218 Part F: J. Rail and Rapid Transit, pp. 17-30 (2004)
- [11] G. Degalaix, P. Dufrenoy, J. Wong, P. Wicker and F. Bumbieler, "Failure mechanisms of TGV brake discs," *Key Engineering Materials*, Vols. 345-346, pp. 697-700 (2007)
- [12] 최만용, 강기수, 박정학, 김원태, 김경석, "위상잠금 광-적외선 열화상 기술을 이용한 내부결합의 위치 및 크기 평가", *비파괴검사학회지*, 제27권 제4호, pp. 321-327 (2007)
- [13] ALTAIR LI User Manual, Cedip Infrared Systems (2008)