

철도차량 차축 재료의 파괴특성 적외선열화상 모니터링

Infrared Thermographic Monitoring for Failure Characterization in Railway Axle Materials

김정국

Jeongguk Kim

초 록 차축과 차륜으로 구성되는 철도차량 윤축은 차량의 운행과 관련하여 안전과 직결되는 중요한 철도 부품의 하나이다. 본 연구에서는 철도차량의 차축 재료의 인장파괴거동에 대한 특성을 분석하였다. 20년 이상 운행된 전기기관차 및 디젤전기기관차의 차축 시편에 대하여 인장시험을 수행하였다. 인장시험 동안 시편의 파괴특성을 모니터링하기 위해 고속 적외선카메라가 사용되었는데, 인장시험 동안의 시편 표면의 온도 변화를 모니터링하여 온도 분포로부터 인장파괴거동을 설명하고 파괴모드를 규명하고자 하였다.

주요용어: 차축 재료, 인장시험, 적외선열화상, 온도 모니터링, 파괴 분석

Abstract The wheelset, an assembly of wheel and axle, is one of important parts in railway bogie, directly related with the running safety of railway rolling stock. In this investigation, the tensile failure behavior of railway axle materials was investigated. The tensile coupons were prepared from the actual rolling stock parts, which were operated over 20 years. The tensile testing was performed according to the KS guideline. During tensile testing, an infrared camera was employed to monitor temperature changes in specimen as well as demonstrate temperature contour in terms of infrared thermographic images. The thermographic images of tensile specimens showed comparable results with mechanical behavior of tensile materials. In this paper, the failure mode and behavior of railway axle materials were provided with the aid of infrared thermography technique.

Keywords: Railway Axle Materials, Tensile Testing, Infrared Thermography, Temperature Monitoring, Failure Analysis

1. 서 론

적외선 카메라(infrared camera)를 이용한 열화상 기술(thermography)은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 이용하여 물체의 표면 온도 분포를 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로써 초기에는 비접촉 온도 측정 장비로 사용되어 왔다[1,2]. 최근에는 비접촉식, 최고 20 kHz 이상의 초고속, 다양한 온도 범위에서의 분해능 등과 같은 특성으로 인하여 단

순한 온도 측정뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴진단 및 검사, 고장 분석, 응력해석, 의료분야에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다[3-7]. 특히, 적외선열화상기술이 기존의 수동(passive) 방식에서 능동(active) 방식으로 개발되면서 비파괴평가 분야에 다양하게 활용되고 있는 실정이다.

최근 철도시스템의 발달과 속도 향상으로 인하여 철도시스템의 안전성에 대한 관심이 고조되고 있

며, 이와 관련하여 시스템의 안전성, 고속주행성능, 유지보수의 효율성 등이 중요한 인자가 되고 있다. 철도분야에서도 철도차량시스템의 유지보수와 관련되어, 차량 제작이나 운행 중에 형성된 결함 또는 손상의 조기 검출 및 관리를 위한 건전성 평가기술에 대한 관심이 증가하고 있으며, 적외선열화상기술은 철도차량의 유지보수에 이용되는 다른 여러 가지 비파괴평가기술(초음파탐상, 자분탐상, 방사선법 등)과 비교하여 다양한 응용 특징을 제공하고 있어 이에 대한 기초 및 응용연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다[8-10].

철도차량의 윤축은 차축과 차륜으로 구성되어 차량의 운행과 관련하여 주행안전성 및 내구성의 확보 등을 요구하며 안전과 직결되는 중요한 철도 부품의 하나이다. 본 연구에서는 철도차량의 차축에 이용되는 재료의 인장파괴거동 특성을 비파괴평가기술의 하나인 적외선열화상기술을 이용하여 분석하고자 시도하였다. 20년 이상 운행된 전기기관차 및 디젤전기기관차의 차축으로부터 시편을 준비하여 한국산업규격에 따라 인장시험을 수행하였으며, 인장시험 동안 시편의 파괴특성을 모니터링하기 위해 고속 적외선카메라가 사용되었는데, 인장시험 동안의 시편 표면의 온도 변화를 온도의 함수로 인장파괴 거동을 설명하고 파괴모드를 규명하는데 이용되었다.

본 논문에서는 20년 이상 운행된 철도차량의 차축으로부터 채취된 인장시편의 파괴 거동을 비파괴검사 기술을 이용하여 설명하고자 하였으며, 특히 적외선카메라를 이용한 시편의 온도 모니터링을 통해 철도차량 차축재료의 인장파괴특성을 분석하였고, 그 결과를 소개 하고자 한다.

2. 재료 및 인장시험

본 연구에 이용된 인장시편은 20년 이상 운행된 전기기관차 및 디젤전기기관차의 차축으로부터 준비되었다. Fig. 1은 본 연구에서 인장시편을 채취하기 위하여 준비한 전기기관차 및 디젤전기기관차의 차축을 나타내고 있다. Fig. 1의 차축으로부터 인장시편을 가공하였는데, KS규격(KS B 0801 : 2007)[11]의 5호시험편의 형태와 치수로 제작하였으며, 시험편의 모양 및 치수는 Fig. 2에서 나타난 바와 같다. 위와 같이 준비된 인장시편을 이용하여 인장시험을 실시하였는데, 인장시험은 KS규격(KS B 0802 :

2003)[12]에 따라 실시되었으며, 각 재질별로 3개의 시험을 실시하였고, 응력증가율에 따라 인장시험기의 하중 속도를 조절하였으며, 평균응력 증가율을 $3 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ 로 하여 인장시험을 실시하였다. 인장시험기는 Inova 모델로 최대하중 250 kN급의 시험기가 사용하였다. 인장시험 동안 인장시편 표면의 온도모니터링 및 표면의 온도 변화를 관찰하기 위하여 초고속 적외선 카메라(high-speed infrared camera)를 사용하였으며, 카메라의 속도는 100 Hz로 하여 인장시험을 실시하였다. 적외선 카메라는 프랑스 Cedip의 Silver 480M 모델을 이용하여 본 연구가 수행되었다. Fig. 3은 인장시험 동안 사용된 적외선카메라를 포함한 시험장치를 나타내고 있다.

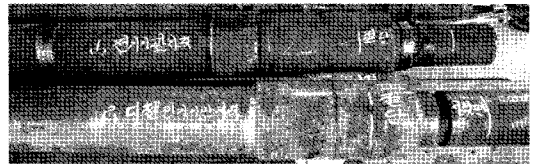
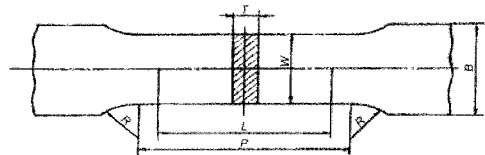


Fig. 1 The railway axles for tensile specimen preparation; Electric locomotive(up) and Diesel electric locomotive(down)



W : 25 mm, P : 60 mm, R : over 15, and t : 5 mm

Fig. 2 The geometry of tensile specimen

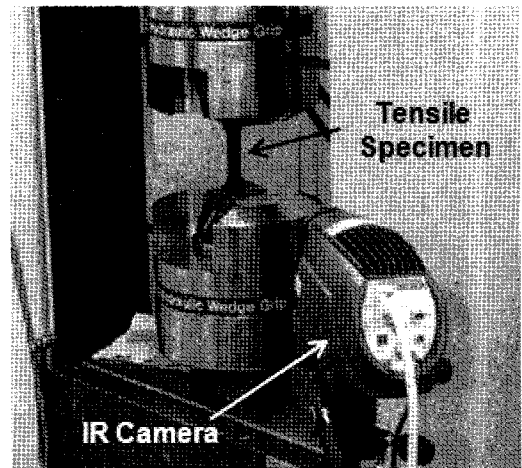


Fig. 3 The experiment set-up for tensile testing with testing machine and infrared camera

3. 결과 및 분석

3.1. 인장시험 결과 및 분석

Fig. 4는 전기기관차 및 디젤전기기관차의 차축 재료의 인장시험 결과를 나타내고 있다. 재질당 3개의 시험편이 이용되었으며, 총 6개의 인장시험을 실시하였다. Fig. 4에서 인장시험 결과는 개략적인 인장파괴거동을 설명하고 있다. 즉, 두 가지 다른 재질의 차축 재료의 경우 초기 탄성영역을 벗어나 항복점 현상(상항복점 및 하항복점)을 보인 뒤 실질적인 가공경화를 통해 변형이 일어나 최종적인 파괴에 이르는 전형적으로 저탄소강에서 예견되는 인장파괴모드를 나타내고 있다. 또한 기계적 성질에 있어서는 두 차축 재료의 경우 항복강도가 약 350 MPa 내외이며, 최대인장강도는 약 600 MPa(전기기관차)에서 약 650 MPa(디젤전기기관차) 정도의 값이 얻어졌으며, 파단에서의 강도는 500 MPa에서 550 MPa 정도로 관찰되었다.

3.2. 인장시험 동안의 시편 온도 모니터링

초고속 적외선 카메라를 이용하여 인장시험 동안 발생하는 열과 이로 인한 시편 표면의 온도 변화를 모니터링 하였다. 적외선 카메라를 이용한 목적은 인장시험 동안 시편에서 발생하는 열로 인한 시편 표면의 열분포 분석을 통하여 인장시험 동안의 시편의 변화를 온도의 함수로 관찰하기 위한 것과 시편 표면의 온도 변화 모니터링을 통하여 인장시험의 파괴모드와 파괴과정을 해석하는 데 있다.

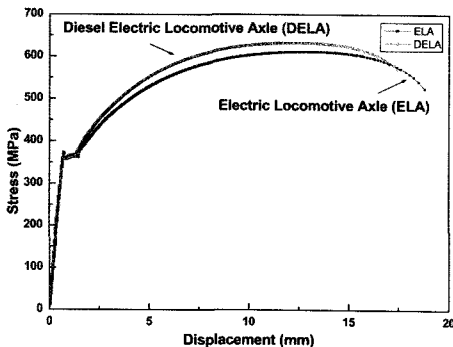


Fig. 4 Tensile testing results with stress-displacement curves for electric locomotive and diesel electric locomotive axles

인장시험 중 대표적인 시험편을 선택하여 인장시험 동안의 적외선열화상 분석을 실시하였는데, 차축 인장시험 중(Fig. 4) 디젤전기기관차 차축에서 선택하였다. Fig. 5는 디젤전기기관차 차축 시험편의 인장시험 동안 적외선열화상 이미지를 나타내고 있으며, 상단에는 열화상 이미지 프레임 번호와 하단에서는 시험진행시간을 초단위로 표시하였다. Fig. 5에서는 인장시험 시작 후 인장시험의 열화상 이미지를 표시하고 있으며, 인장시험 초기단계와 최종 파단이 일어날 때까지의 시간에 따라 진전된 열화상 이미지를 도시하고 있다. 최초 시험이 시작된 후 항복점 현상을 거친 후 지속적인 가공경화를 통해 최대인장강도에 도달 후 서서히 응력이 감소되어 최종 파단이 일어남을 Fig. 5에서 알 수 있다.

열화상 이미지를 통한 온도 분석을 위해 시험편의 각기 다른 지점에서 온도 변화를 관찰하였는데, 그 기준점은 최종 파단이 일어난 열화상 이미지를 바탕으로 4지점을 선택하였다(Fig. 6). 시험편은 Fig. 6의 온도변화곡선에 나타난 바와 같이 항복현상이 시작되는 지점에서 미세한 온도 상승을 보인 후 지속적으로 온도가 상승하여 최종 파단 시에는 급격한 온도 상승을 나타낸 후 급격한 온도 하강의 경향을 나타내었다. Fig. 6의 2번 지점은 최종 파단영역으로 선택되었으므로 전체적 온도 프로파일에서 파단시 급격한 온도 상승을 나타내었고, 그 외의 시험편의 지점인 3번, 5번 및 6번 영역의 지점에서는 2번 지점만큼은 아니지만 지속적 온도 상승(계속되는 가공경화에 의한 소성변형으로 인한) 후 최종 파단 지점에서는 온도 피크가 관찰 되었다. 이는 시험편의 최종 파단시에 발생하는 파괴에너지와 시험편 분리에 따른 순간적 에너지의 증가로 인한 결과로 추론된다.

흥미로운 것은 Fig. 6의 온도 프로파일에서 약 85초 부근에서 온도전이점이 발견되었는데 이 지점은 응력-변위 곡선에서 상항복점에 해당되는 지점

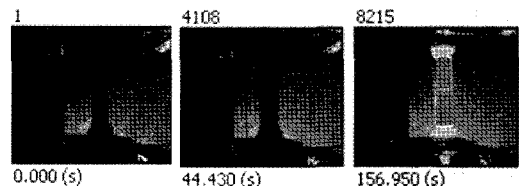


Fig. 5 The infrared thermographic images of tensile specimen for diesel electric locomotive axle during tensile testing

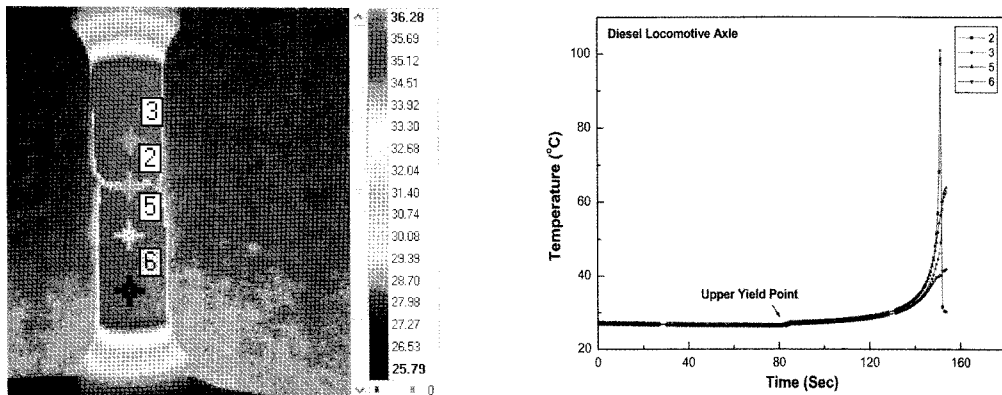
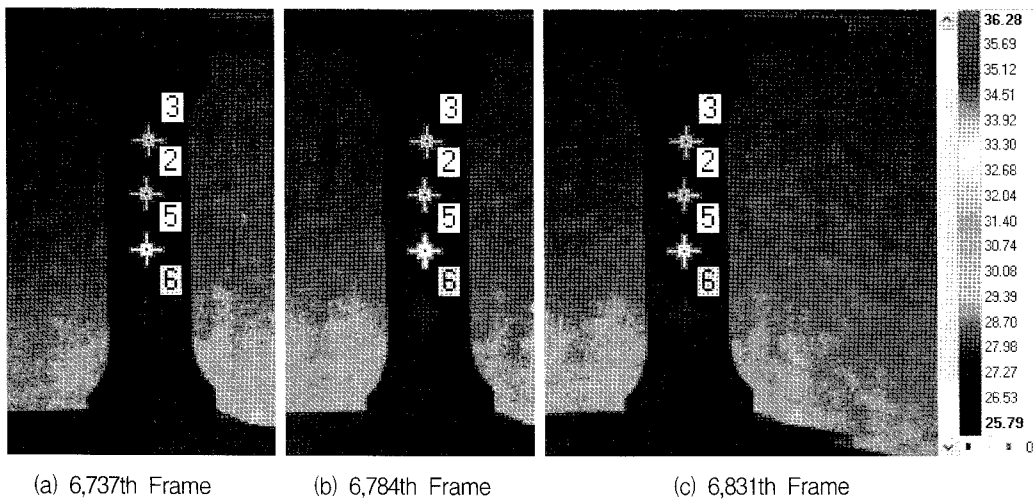


Fig. 6 The temperature changes of different points in a tensile specimen during tensile testing



(a) 6,737th Frame

(b) 6,784th Frame

(c) 6,831th Frame

Fig. 7 The thermographic images showing the formation(6,737th), evolution(6,784th), and completion(6,831th) of Luders band

으로 루더스 밴드(Luders band)가 최초로 형성되는
 위치가 적외선열화상 분석을 통해 관찰되었다.
 Fig. 7은 루더스 밴드가 최초로 관찰된 프레임(적외
 선 열화상 카메라 속도는 100 Hz로 관찰되었으며
 6,737번째 프레임에 해당)을 나타내고 있으며 루더
 스 밴드는 인장축의 약 45°방향으로 관찰되었다.
 또한 Fig. 7에서는 루더스 밴드가 진전(6,784번째
 프레임) 및 완료(6,831번째 프레임)된 열화상 이미
 지도 함께 나타내고 있다.

4. 결론

적외선열화상기술을 이용한 철도차량 차축 재료

의 인장파괴특성을 분석한 본 연구에서는 다음의
 결론이 도출되었다.

- (1) 인장시험을 통하여 차축 재료의 파괴모드를 알 수 있었으며, 차축 시편의 경우 초기 탄성변형 후 항복점 현상을 나타낸 뒤 가공경화에 의한 소성변형으로 이어지는 파괴변형모드를 나타내었다.
- (2) 적외선열화상기술을 이용한 인장시험 동안의 온도 변화는 차축 시편에서 탄성영역을 벗어나 하중이 증가함에 따라 지속적인 온도 증가가 관찰되었으며 파괴시점에서는 시편에서 파괴에 의한 에너지 증가로 추론되는 급격한 온도 피

크가 관찰되었다.

- (3) 차축 시편에서 관찰된 항복점 현상으로 인한 뒤틀러스 밴드의 발생과 진전을 적외선열화상 분석을 통해 설명할 수 있었으며, 뒤틀러스 밴드의 형성이 시편 표면의 온도 변화와 관계됨이 확인되었고, 이는 적외선열화상기술이 인장시험의 온도 모니터링에 있어 재료의 변형 및 파괴해석에 유용하게 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] X. P. V. Maldague, *Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing*, Vol. 3, ASNT, pp. 12-20 (2001)
- [2] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, pp. 9.1-9.47 (2001)
- [3] 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)
- [4] X. P. V. Maldague and S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," *J. Appl. Phys.* 79 (Mar), pp. 2694 - 2698 (1996)
- [5] 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)
- [6] 김원태, 강기수, 최만용, 박정학, "Lock-in thermography를 이용한 노치시험편의 응력해석 및 파괴한계치 평가", *비파괴검사학회지*, 제26권 제4호, pp. 315-320 (2006)
- [7] 최만용, 김원태, "적외선열화상을 이용한 비파괴시험 활용 및 결함 진단", *비파괴검사학회지*, 제24권, 제5호, pp. 525-531 (2004)
- [8] S. Panier, P. Dufrenoy and D. Weichert, "An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes," *Wear*, 256, pp. 764-773 (2004)
- [9] P. Dufrenoy, "Two-/three-dimensional hybrid model of the thermomechanical behavior of disc brakes," *Proc. Instrn. Mech. Engrs.* Vol. 218 Part F: J. Rail and Rapid Transit, pp. 17-30 (2004)
- [10] 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)
- [11] KS B 0801 : 2007, 금속재료 인장시험편 (2007)
- [12] KS B 0802 : 2003, 금속재료 인장시험방법 (2003)