

적외선카메라를 이용한 제동 디스크 열크랙 분석

Hot Spot Analysis on Brake Disc Using Infrared Camera

김정국*
Kim, Jeongguk

구병춘**
Goo, Byeong-Choon

권성태***
Kwon, Sung-Tae

ABSTRACT

Infrared thermography using high-speed infrared camera has been recognized as a powerful method for various potential applications, such as nondestructive inspection, failure analysis, stress analysis, and medical fields, due to non-contact, high-speed, and high spatial resolution at various temperature ranges. In this investigation, damage evolution due to generation of hot spots on railway brake disc was investigated using the infrared thermography method. A high-speed infrared camera was used to measure the surface temperature of brake disc as well as for in-situ monitoring of hot spot evolution. From the thermographic images, the observed hot spots and thermal damage of railway brake disc during braking operation were qualitatively analyzed. Moreover, in this investigation, the previous experimental and theoretical studies on hot spots phenomenon were reviewed, and the current experimental results were introduced and compared with theoretical prediction.

1. 서 론

최근 철도의 고속화에 따라, 제동장치 성능의 중요성이 점점 부각되고 있다. 철도의 안전한 운행을 위해서는 기동 및 가속 등의 제어장치와 함께 열차를 안전하고 정확하게 정차시키고, 감속 또는 정지시키는 제동장치의 역할이 중요해지기 때문이다. 철도차량의 고속화가 진행됨에 따라 정위치 정지, 신속성, 승차감 등과 관련된 제동장치의 역할이 더욱 강조되고 있다. 따라서 차량의 안전성과 승차감 향상을 위한 최적의 제동시스템 제어기술의 확보와 안전성과 내구성을 겸비한 제동시스템의 설계, 제작 및 성능시험, 유지보수 관리 기술개발이 중요하다.

철도차량에 이용되고 있는 제동방식중 제동디스크(Brake Disc)에 의한 제동은 대표적인 철도차량의 제동방식으로 제동디스크의 성능향상은 제동성능에 직접적으로 영향을 미치게 되며, 향상된 성능의 제동 디스크 설계를 위해 열크랙현상, 마찰계수, 디스크의 재질, 마찰재의 재질, 디스크의 내구성, 마찰성능, 온도특성, 마멸량 등과 같은 여러 가지 인자들이 고려되어야 한다.

제동디스크는 고속의 미끄럼 마찰로 인해 급격한 온도상승이 유발되며 특히 반복적인 급제동시 마찰 표면과 외부에 발생하는 온도차에 의해 수축과 팽창이 반복되어 핫스팟(hot spot)과 같은 국부적 고온부의 형성으로 인해 주행중 비정상적인 저온 진동인 열적 저더(thermal judder)라 불리는 심각한 진동을 유발시키며 디스크 표면에 미세한 크랙과 열변형을 발생시키게 된다. 디스크의 제동 성능에 직접적인 영향을 주는 주요인자 중의 하나인 마찰열은 미끄럼 마찰면의 온도상승을 가져오고, 마찰면의 접촉 상태에 따라서 접촉면에 마찰온도가 집중되면서 열팽창이 국부적으로 진행되어 스파이크 압력이 발생하

* 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부, 정회원

E-mail : jkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5518 FAX : (031)460-5539

** 한국철도기술연구원

*** 한국철도기술연구원

고 궁극적으로는 마멸로 이어지는 열탄성 마멸이 발생된다. 이러한 디스크 마찰표면에서 발생하는 마찰열 크랙이나 마멸문제와 관련된 진동이나 소음 등의 문제를 해결하기 위한 기초연구가 필요한 실정이다.

적외선 카메라 (Infrared Camera)를 이용한 열화상기술 (Thermography)은 물체의 표면에서 방사되는 적외선을 이용하여 물체의 표면 온도 분포를 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로서 초기에는 비접촉 온도측정 장비로 이용되었지만, 최근에는 비접촉식, 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 응용되고 있다.

본 논문에서는 적외선 카메라를 이용하여 제동디스크에 형성되는 열크랙 현상을 관찰하여 분석하고자 하였다. 또한, 적외선 열화상 기술을 통하여 제동디스크에서 발생하는 열크랙 현상에 대한 분석 결과를 제공하였다.

2. 본 문

2.1 제동 디스크

본 연구에서 이용된 제동디스크는 현재 새마을호 및 무궁화호 열차에서 이용되고 있는 객차용 제동 디스크로서 12공 분할형으로, 재질은 펄라이트(Pearlite) 기지조직에 흑연이 균일하게 분포된 회주철 (Gray Cast Iron)로 구성되어 있다.

그림 1은 새마을호 제동 디스크에서 발생한 열크랙을 표시하고 있는데, 주로 열크랙은 디스크 마찰면의 반경방향으로 진전하며 방사상으로 분포하고 있음을 알 수 있다. 디스크 표면에는 헤어크랙들이 망을 이루며 연결되어 있는 것도 볼 수 있다.



그림 1. 새마을호 디스크에서 발생한 열크랙

2.2 제동 디스크의 핫스팟 현상

서론에서 소개된 제동 디스크의 핫스팟(Hot Spots) 현상은 자동차 분야에서 우선적으로 방대한 연구가 진행되었다. 통상적으로 마찰시스템은 마찰 표면에서 균일한 압력과 온도분포 하에서 작동되지만, 미끄럼 속도가 임계속도(Critical Speed)라고 불리는 특정한 속도에 도달하게 되면, 접촉력(Contact Load)은 마찰표면의 하나 또는 둘이상의 작은 영역에 집중되게 된다. 이러한 현상으로 말미암아 핫스팟이라고 알려진 국부적인 고온 집중영역의 형성이 이뤄지게 된다. 이러한 현상으로부터 야기되는 마찰열 발생, 열탄성 변형, 및 탄성 접촉간의 상호작용을 마찰 역학적으로 야기된 열탄성 불안정 (Thermoelastic Instability, TEI)이라고 한다. 이 현상은 대부분의 슬라이딩 시스템에서 관찰되며, 특히 자동차나 산업용 디스크 브레이크에서 핫스팟의 형성이 관찰되었고, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 이와 연관된 연구현황을 보면, 자동차 디스크 브레이크 시스템의 임계속도를 예측하기 위한 이론적 연구가 진행된 바 있고, 디스크의 안정성 분석을 위한 유한요소기술의 개발, 디스크의 비선형적

거동에 관한 시뮬레이션 연구 등을 들 수 있다.

자동차 디스크의 핫스팟 현상에 관한 연구를 바탕으로, 최근에는 철도분야에서도 많은 연구가 진행되고 있는 실정이다. Painer 등은 철도차량 디스크 브레이크에서 핫스팟의 실험적 연구를 수행하였으며, 초고속 적외선카메라를 이용하여 단계별로 상세한 열적손상 메카니즘을 연구하였다. 또한, 이들의 연구에서 단계별 핫스팟 형성 시나리오가 제안되었으며, 핫스팟 생성에 따른 패드의 경도와 패드 접촉길이 등과 같은 인자들의 영향에 대해 정량적으로 연구하였다.

그림 2는 열적구배를 나타내는 철도의 제동 디스크의 열화상 이미지를 나타내고 있는데, Painer 등은 그림2의 (a)의 단계가 제동 디스크 파손의 주요 메카니즘이 될 수 있음을 제안하였다. 일반적으로 거시적 핫스팟 (Macroscopic Hot Spots (MHS))은 마르텐사이트의 형성으로 인해 결정학적으로 구조변화를 나타내며, 디스크 표면의 균열 시작점이 될 수 있으며, 마르텐사이트는 비체적 변화로 인한 심한 국부적 변형을 일으키기 때문이다. 그러므로 제동시 제동디스크의 핫스팟의 제어는 제동디스크의 조기 파단을 방지하기위한 중요한 역할을 담당하게 된다.

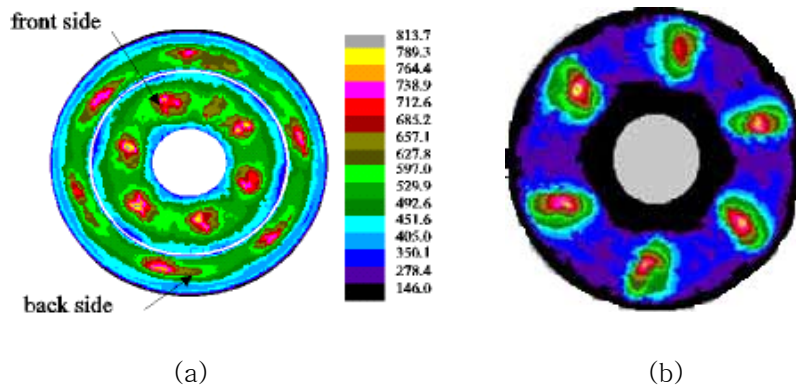


그림 2 . 제동디스크의 열화상 이미지 (a) 디스크 양면의 동시 열화상 이미지 (b) 거시적 핫스팟을 보여주는 열화상 이미지 [9].

2.3 실험방법

제동 디스크의 핫스팟 분석은 고속이 아닌 일반 적외선 열화상 카메라 (100 Hz 이하)로는 분석이 적합치 않아 초고속 적외선 카메라 (최고 380 Hz)를 이용하여 수행되었고, 제동 동작동안 제동 디스크 표면의 불균질 온도 분포를 모니터링하였다.

제동 시험은 실험기기(직경 860 mm) 제동시험기에서 수행되었는데, 제동 디스크로는 현재 새마을호 및 무궁화에서 상용되고 있는 회주철 디스크가 사용되었다. 제동시험기의 앞부분에 초고속 적외선 열화상 카메라가 장착되어, 제동 디스크 표면의 온도측정과 핫스팟 생성 및 진전을 모니터링하였다.

본 시험에 이용된 적외선 카메라는 최고속도가 380 Hz, 즉 1초에 380 프레임의 이미지 관찰이 가능하며, 픽셀 사이즈는 320 × 256까지 나타낼 수 있으며, 공간 해상력은 약 5.4 μm이며, 온도 감도는 상온에서 0.015°C일 정도로 매우 민감한 카메라이다. 적외선 카메라의 캘리브레이션은 다이내모미터 실험 전에 이루어졌는데, 제동디스크를 어느 온도까지 가열하였다가 공냉을 시키면서 미리 부착된 열전쌍이 제동디스크 표면의 온도를 실측하고 적외선카메라가 읽은 보정된 강도값(Intensity)과 비교하여 이들간의 관계식을 도출 시킨 후 캘리브레이션이 이루어졌다.

2.4 실험결과 및 고찰

그림 3은 제동디스크 표면의 핫스팟 또는 열밴드의 열화상 이미지를 나타내고 있다. 그림 3의 두 이미지는 동일한 이미지이나 그림 3(b)는 참고 인덱스를 표기하여 나타내었다. 제동 동작은 150 km/h에서 이루어졌으며, 적외선 열화상 이미지는 온도 상승을 분석하기 위해 얻어졌다. 그림 3(a)에서 얻어진 제동디스크 표면의 열화상 이미지를 대상으로 그림 3(b)에서는 관심의 대상이 되는 5부분에 대하여 분

석을 위해 표시하였다.

그림 4는 그림 3(b)에서 얻어진 5 다른 위치에 대한 온도 변화를 나타내고 있다. 그림 3(b)에서 예측되었듯이 포인트1과 3은 다른 위치에 비해 매우 높은 온도 분포를 나타내고 있으며, 이들은 핫스팟이나 열밴드의 중심에 위치하고 있다. 뿐만아니라, 제동 동작동안 경과시간의 함수로 나타낸 온도 상승은 디스크상의 작은 온도 변화에도 매우 민감하게 나타나고 있다. 비록 본 논문의 결과는 핫스팟의 정량적 분석을 제공하는데 있어 예비적인 시험결과를 나타내고 있지만 철도분야 제동디스크에서의 핫스팟 현상의 연구에 대해 열화상 기법이 강력한 실험적 도구가 될 수 있음을 보여주기에 충분한 결과로 볼 수 있다.

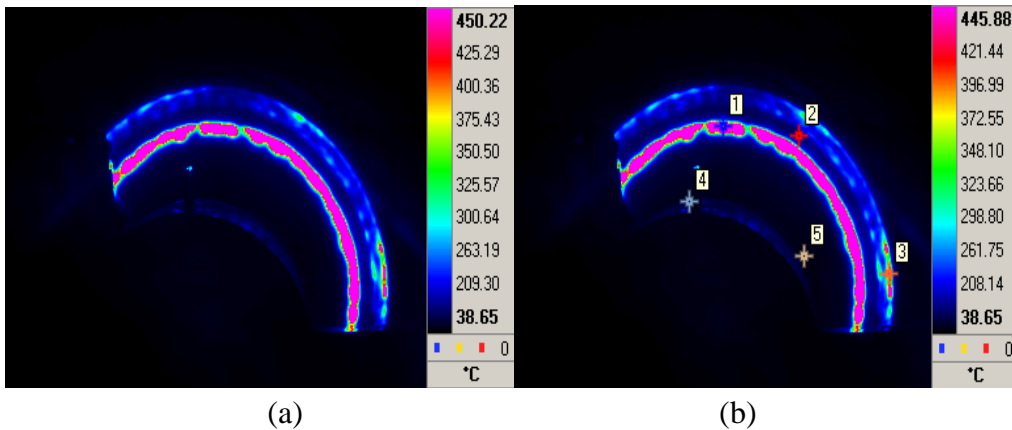


그림 3. 핫스팟 또는 열밴드를 나타내는 제동 디스크 표면의 열화상 이미지

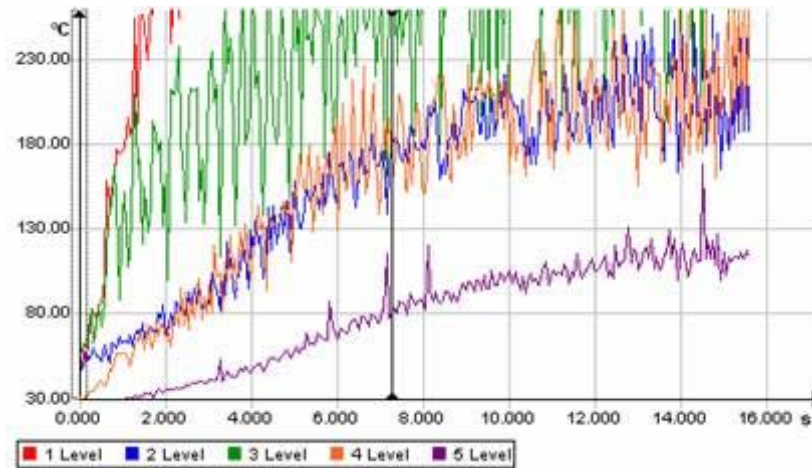


그림 4. 그림 3에서 표시된 5 영역에 대한 제동 동안의 온도변화. 5 영역에 대한 온도변화는 30°C에서 250°C까지의 온도범위를 표시하고 있다.

3. 결론 및 향후 연구방향

철도차량 제동디스크에서의 핫스팟 현상의 열화상적 분석에 관한 본 연구에서는 다음의 결론이 도출되었다. 적외선 열화상 기법은 초고속 열화상 카메라가 고속이며, 철도제동디스크의 표면을 비접촉 스캔할 수 있다는 장점으로 철도 제동디스크의 온도 모니터링 및 핫스팟 관찰 연구 분석에 매우 효율적으로 적용될 수 있음이 소개되었다. 자동차 디스크 관련한 이전의 연구결과와 현재의 철도분야 제동디스크 핫스팟 연구동향도 간단히 소개되었으며, 제동디스크의 제동동작 동안의 핫스팟 관찰과 온도상승이 설명되었고, 철도 분야 제동디스크에서의 핫스팟 현상의 연구를 위해 적외선 열화상 기술이 필수적인 기

술임이 소개되었다. 이번에 얻어진 기초실험결과를 토대로 향후 철도제동 디스크 핫스팟 연구가 활발히 전개될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. 김정국 (2007년), “제동디스크 설계를 위한 고려인자고찰”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집
2. 박경식, 강성웅, 조정환, 이희성 (2005), 틸팅차량용 제동 디스크의 트라이볼로지 특성 연구, 한국철도학회 논문집.
3. K. Lee and F.W. Brooks, *Journal of Tribology*, Vol. 125, 44-51, 2003.
4. Y. Lee, H. Cho, C. Cho, C.B. Kim, ATEM'07, JSME-MMD, Sep. 12-14, 2007. (a CD ROM).
5. J. Kim and P.K. Liaw: *J. Eng. Mater. Technol*, 2005, vol. 127, pp. 8-15.
6. K. Lee and R.B. Dinwiddie, SAE 98PC-392, 1998.
7. J.R. Barber, "Thermoelastic Instabilities in the Sliding of Conforming Solids," *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, 312, pp. 381-394, 1969.
8. Anderson, A. E., and Knapp, R. A., 1990, "Hot Spotting in Automotive Friction Systems," *Wear*, **135**, pp. 319-337.
9. S. Panier, P. Dufrenoy, D. Weichert, An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes, *Wear* 256 (2004) 764-773.
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*, 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 (2007) pp. 697-700.