

# 적외선 카메라를 이용한 제동디스크 온도 모니터링 Temperature Monitoring of Brake Disc Using Infrared Camera

\*#김경국<sup>1</sup>, 권성배<sup>2</sup>, 구병훈<sup>3</sup>

\*#Jeongguk Kim(jkim@krii.re.kr)<sup>1</sup>, S. T. Kwon<sup>2</sup>, B.C. Goo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 주행추진연구실, <sup>2</sup> 한국철도기술연구원 시험인증센터, <sup>3</sup> 한국철도기술연구원 철도구조연구실

Key words : Railway brake disc, infrared thermography, temperature monitoring

## 1. 서론

철도차량의 고속화로 인한 안전성 및 신뢰성의 확보가 점점 더 중요한 이슈가 되고 있다. 철도차량의 안전한 운행을 위해서 주행 및 추진 장치와 함께 열차를 안전하고 정확하게 감속 또는 정지시키는 제동장치의 역할이 더욱 중요해지고 있다. 철도차량에 이용되고 있는 제동 방식 중 제동 디스크에 의한 제동은 전동차에 적용되는 대표적인 철도차량의 제동 방식으로 제동디스크의 성능향상은 전동차의 제동 성능에 직접적인 영향을 미치게 되는데, 성능이 향상된 제동 디스크 설계를 위해서 고려되어야 할 인자들로써는 디스크 표면의 열크랙 생성의 제어, 마찰계수, 디스크의 재질, 마찰재료의 재질, 디스크의 내구성, 마찰성능, 마찰재와 디스크간의 온도특성, 마멸량 등이 될 수 있다.

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 주행 중 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 접촉상태에 따라서 접촉면에 마찰온도가 집중되면서 열팽창이 국부적으로 진행되어 스파이크 압력이 발생하고 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 대상체의 표면 온도 분포를 영상으로 볼 수 있게 하는 기술로서 초기에는 비접촉 온도측정용 장비로만 사용되었으나 최근에는 비접촉식, 초고속(최고 20 kHz), 다양한 온도범위에서의 분해능 등과 같은 특성으로 인하여 단순한 온도 측정뿐만 아니라 검출된 적외선을 이용하여 비파괴 진단 및 검사, 고장분석, 응력해석, 의료분야에 이르기까지 다양한 분야에서 응용되고 있다. 특히, 적외선 열화상 기술이 기존의 Passive 방식에서 Active 방식으로 개발되면서 대상체의 표면 및 내부의 결함 또는 손상 감지를 위한 비파괴 평가분야에 다양하게 활용되고 있으며, 향후 비접촉 비파괴 검사기술로 기존 비파괴검사 기법의 단점을 보완하는 기술도 개발되고 있다. 이처럼 적외선 열화상 기술 (Infrared Thermography)은 다른 여러 가지 비파괴평가기술과 비교하여 비접촉식, 높은 결함 검출능력을 바탕으로 다양한 응용분야를 제공하고 있어 이에 대한 기초 및 응용연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 적외선 카메라를 이용하여 제동 디스크의 마찰 시험중 제동디스크에 형성되는 온도분포를 모니터링하고 디스크 표면의 온도 프로파일을 관찰하여 분석하고자 하였다. 또한, 적외선 열화상 기술을 통하여 제동디스크에서 발생하는 핫스팟 현상에 대한 분석 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 제동시험

제동 다이내모미터의 최대 회전수가 약 1,600 rpm 이상이 되므로 제동 디스크의 표면 온도 또는 표면에 형성되는 핫스팟

분석은 고속이 아닌 일반 적외선 열화상 카메라 (100 Hz 이하)로는 분석이 용이치 않으므로 최고 속도 380 Hz의 고속 적외선 카메라가 본 연구를 위해 사용되었다. 제동 동작동안 제동 디스크 표면의 불균질 온도 분포를 200 Hz의 속도로 적외선 카메라를 이용하여 모니터링하였다. 제동 시험에는 실물크기(직경 860 mm) 제동시험기가 이용하였고, 제동 디스크는 현재 전동차용으로 이용되는 전동차용 디스크와 비석면 디스크 브레이크 라이닝을 이용하여 제동 동작이후 순간마찰계수를 측정하였고, 제동시험기의 정면에 초고속 적외선 열화상 카메라가 장착되어, 제동 디스크 표면의 온도측정과 핫스팟 생성 및 진전을 모니터링 하였다. 그림 1은 본 제동시험에 사용된 제동시험기를 나타내고 있다.

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. 제동시험은 한국철도표준규격 ‘비석면디스크 브레이크 라이닝’에 따라 제동 압부력이 양압 2.5 ton, 라이닝 습동면의 접촉이 70%이상으로하여 매회 시험 시작시 브레이크 마찰면의 온도가 60° C 이하로 하여 순간마찰계수 및 평균마찰계수를 측정하는 과정으로 실시되었다. 제동초속도 (km/h)의 순서는 65, 35, 95, 65, 110, 95, 95, 35, 110, 65, 65, 95, 110, 110, 35, 35, 65 순으로 실시되었다. 순간마찰계수는 다음의 식에 의해 계산되었다.

$$F = \frac{B}{A} T = \frac{1}{0.235} T = 4.235 T$$

$$fk = F/P$$
$$fk = 4.2553 T/P$$

여기서 A: 차륜반경 (m), B: Load Cell까지의 거리 (m), T: Torque (kg.m), P: 압부력 (kg), F: 마찰력 (kg), f: 순간마찰계수, w: 관성중량(kg)

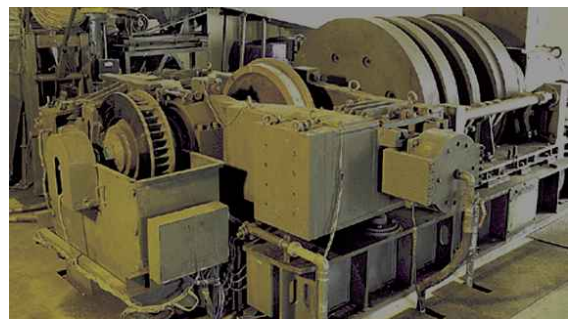


Fig. 1 Full-scale dynamometer for braking test

## 3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 35 km/h의 제동 초속도에서 제동을 실시후 관찰된 열화상 이미지를 나타내고 있다. 그림2의 최초 이미지는 제동 초기의 열화상 이미지는 나타내고 있는데 비교적 저속에서 제동 동작이 이루어져 패드와 디스크의 마찰 현상의 결과로 나타나는 디스크 표면상의 핫스팟이나 열밴드에 대한 관찰이 69까지

못한 상태이다. 그림2에서는 최초 제동 동작후 일정한 시간 간격(약 1.8초정도)으로 나타난 열화상 이미지를 나타내고 있다. 그림2에서 나타난 바와 같이 35 km/h의 비교적 저속 제동에서는 열크랙을 일으킬 수 있는 핫스팟 현상은 관찰되지 않았으며, 디스크 표면의 온도변화도 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

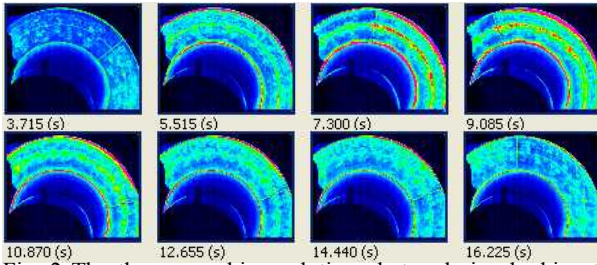


Fig. 2 The thermographic evolution photos during braking tests at the braking speed of 35 km/h

그림3은 그림2의 3번째 열화상 이미지를 확대하여 나타난 열화상 이미지인데 실제 제동 동작이 시작된 후 제동디스크와 패드간의 마찰에 대한 결과를 제동디스크 표면의 온도프로파일을 나타내고 있다. 제동이 시작되어 상당한 시간이 경과하였음에도 비교적 저속에서 동작된 관계로 핫스팟은 관찰되지 않고 있으며, 디스크 중앙부분에 열밴드(thermal band)만 나타내고 있다. 또한 그림3에서는 온도분포 해석을 위해 나타난 선 프로파일(line profile)을 따라 실제 온도를 나타내고 있는데 최대온도는 약 113° C에 이르는 것으로 나타났다.

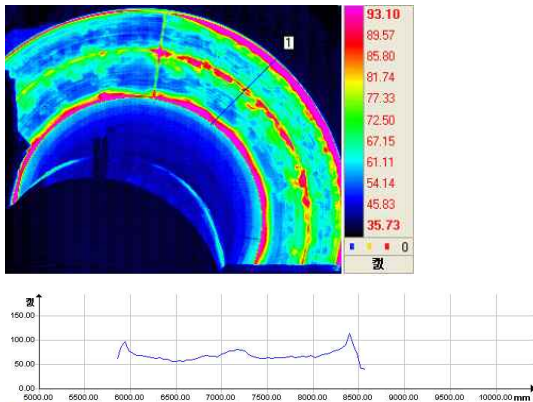


Fig. 3 The thermographic image of brake disc after braking operation at the braking speed of 35 km/h with temperature profile

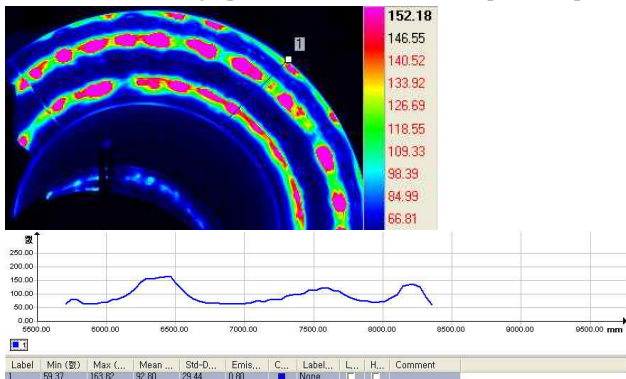


Fig. 4 The thermographic image of brake disc after braking operation at the braking speed of 65 km/h with temperature profile

그림 4,5,6은 그림3에서와 마찬가지로 각각 65 km/h, 95 km/h 및 110 km/h의 제동초속도에서 제동동작후 약 10초가 경과한 지점의 열화상 이미지를 나타내고 있다. 그림4-6에서 보는 바와 같이 제동 초속도가 증가함에 따라 열밴드의 출현은 없어지고 국부적인 핫스팟이 생성되며, 110 km/h의 경우 실제 작은 핫스팟

이 군집을 이루어 대형 핫스팟으로 성장하고 있음을 보였으며, 핫스팟 내부의 최대온도는 329° C 정도로 관찰되었다.

본 연구에서는 고속 적외선 카메라를 이용하여 제동시험 동안의 디스크 온도분포 관찰이 소개되었고, 이러한 기초단계 연구결과를 통하여 향후 핫스팟 생성의 메카니즘, 핫스팟의 이동현상 모니터링 등 다양한 연구활동이 가능할 수 있음을 보여주었다.

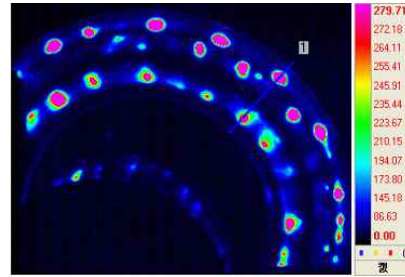


Fig. 5 The thermographic image of brake disc after braking operation at the braking speed of 95 km/h with temperature profile

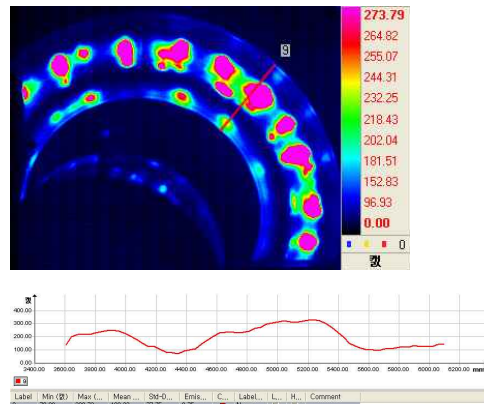


Fig. 6 The thermographic image of brake disc after braking operation at the braking speed of 110 km/h with temperature profile

#### 4. 결론 및 향후 계획

철도차량 제동디스크에서의 표면 온도 모니터링이 열화상적 분석을 통하여 이루어 졌다. 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. 제동 초속도가 낮은 경우에는 열밴드만이 디스크 표면에서 관찰되었으나 예견된 바와 같이 속도가 증가할수록 표면의 온도는 높아지고 디스크 표면의 국부적 핫스팟이 관찰되었다. 본 기초연구를 통하여 향후 디스크 온도해석관련 다양한 연구활동이 기대된다고 할 수 있다.

#### 참고문헌

1. 김정국, "적외선카메라를 이용한 제동디스크 열크랙분석," 한국철도학회 추계학술대회논문집, 2008.
2. G.Degalaix et al., " Failure Mechanisms of TGV Brake Discs," Key Engineering Materials, 345-346, 697-700, 2007.
3. S. Panier, P. Dufrenoy, D. Weichert, An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes, Wear, 256, 764-773, 2004.
4. X.P.V. Maldague, Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing, Vol. 3, ASNT, 2001.