

일반철도 고속화 구간에서 차축온도검지장치 활용방안에 대한 연구

Study on the Utilization of HBD in the Conventional Speed-up Lines

최 권 희* · 김 유 호* · 백 승 문** · 빙 군 섭***

Abstract

HBD(Hot Box Detector) is a device to monitor temperature rises to inappropriate lubricant use or mechanical defects. If a train operates without recognizing such an effect, it might result in bearing overheating due to defects and cause a dangerous situation that it could derail a train owing to the damage of axles.

Now for the Gyeongbu HSL at 300km/h, the laws related to monitoring overheated axle bearings are notified in the Railway Safety Law and the Railway Construction Law. But in case of the conventional speed-up lines that a train operates at 180 to 230 km/h, the revised bill of relevant standards is ongoing. Therefore in this paper we present references and reviews investigated in order to use the optimal HBD in the conventional speed-up lines.

1. 서 론

철도시스템에서 안전성에 기초한 시스템 설계의 전반적 목표는 설계단계에서 장애물을 제거하거나 장애물의 발생 확률이 매우 낮도록 설계를 변경하여 위험성을 최소화하는 것이다. 시스템 안전성 또는 저위험성을 표시하기 위해서는 첫째, 규정된 사양이 올바르게 실행되고 있고, 또 어떠한 고장도 발생하지 않으므로 시스템의 작동으로 인한 어떠한 재난도 발생하지 않을 것임을 보장해야 한다.

* (주)에이알텍, 대표이사/기술사

** (주)에이알텍 기술연구소

*** 한국철도시설공단 기술본부 신호제어처, 차장

둘째, 고장의 위험성이나 재난으로 진행되는 고장을 제거하거나 절대적 안전성이나 고장허용 절차를 이용하여 이를 최소화해야 한다. 장애발생 가능성을 완전히 제거할 수 없는 경우에는 장애 조건에 대한 노출시간(발생시간 길이)을 최소화하여 위험성을 줄여야 한다. 위험에 대한 노출시간을 산출하기 위해 프로세스 안전시간(Process safety time)이라는 개념을 사용한다. 이 개념은 시스템이 가지고 있는 잠재적 위험고장 발생과 위험사건 발생 간의 경과시간을 말한다. 예를 들면, 어떤 속도로 주행하고 있는 열차가 차축온도과열(Axle overheating)이라는 잠재적인 위험 요소로 인해 선로의 어느 시점에서 발생하였다고 가정한다. 열차에는 차축의 온도상승을 검지하는 수단이 없다고 할 때, 프로세스 안전시간이 경과하면 차축과열로 인해 열차탈선과 같은 심각한 경지에 이르게 될 것이다. 이제, 차상(On-board) 또는 지상(Wayside)에 차축온도를 검지하는 수단이 있다고 가정한다. 동일한 개념으로 잠재적 위험에 대한 고장정보를 검지시점과 고장에 대한 응답시간이 전체 고장 제어시간 범위를 초과하지 않는다면 위험사건으로 전개되는 것을 사전에 예방할 수 있다. 따라서 프로세스 안전시간 내에서 초기의 잠재적 위험 크기를 검지하여 시간변화에 따라 위험의 크기가 증가하는 지를 모니터링하는 것이 전체 프로세스 안전시간을 충분히 확보하는데 중요한 변수로 작용한다.

현재 경부고속선(300km/h)에는 차축온도과열을 모니터링하는 장치에 대해 관련법이 철도안전법과 철도건설법에 고시되어 있으나, 일반철도 고속화 구간(180~230km/h)에 대해서는 관련법 기준 개정안이 진행 중에 있다. 따라서 본 논문은 일반철도 고속화 구간에서 차축온도검지장치를 최적으로 활용하기 위해 조사된 문헌 및 검토 내용을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 차축온도검지장치의 필요성

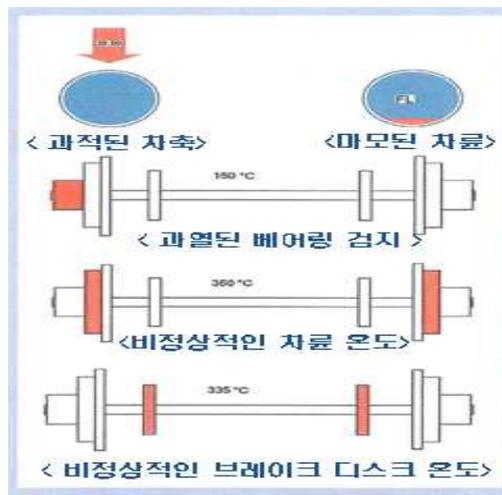
[그림 1]과 같이 차축온도검지장치(Hot Box Detector, HBD) 및 차륜온도검지장치(Hot Wheel Detector, HWD)는 운행되는 열차의 축 베어링(Axle bearing)에 부적절한 윤활류나 기계적 결함의 원인이나 빈번한 열차제동에 의해 디스크 온도가 증가하는 것을 모니터링하는 장치이다[1].

특히 철도운행 많은 유럽에서는 여객전용 열차보다도 화물수송 목적의 열차에서 차축, 차륜 및 브레이크 디스크의 온도 상승으로 인해 매년 심각한 사고가 발생하고 있다고 보고되고 있다[2].

이러한 영향을 인식하지 못한 상태에서 열차 운행을 한다면 결함이 발생한 베어링 또는 제동기에 과열이 발생할 수 있고, 차축 또는 차륜에 파손이 발생하여 이로 인해 열차 탈선이 발생할 수 있다. 초기에 차축 또는 디스크 브레이크의 과열을 발견하지 못할 경우에는 차축의 윤활 그리스가 그 기능을 상실하여, 차축에 고장이 발생할 수 있

다. 또한 차축 당 균등하지 않은 부하가 나타날 경우, 과열이 발생해 대차 탈선이 일어날 수 있다.

이러한 손상을 사전에 식별하기 위해 온도 측정 포인트를 차상(On-board)에서 직접 측정하는 방법[3]과 지상(Wayside)에서 측정하는 방법이 있지만, 설치 및 유지보수 비용을 고려하여 궤도를 따라 적절한 거리로 설치하여 사용하는 것이 일반적이다. 궤도에 설치된 온도측정 센서는 통과하는 열차의 차축 베어링, 차륜 그리고 제동 디스크의 온도를 적외선 센서(Infrared Sensor, IR)를 사용하여 비접촉으로 측정한다.



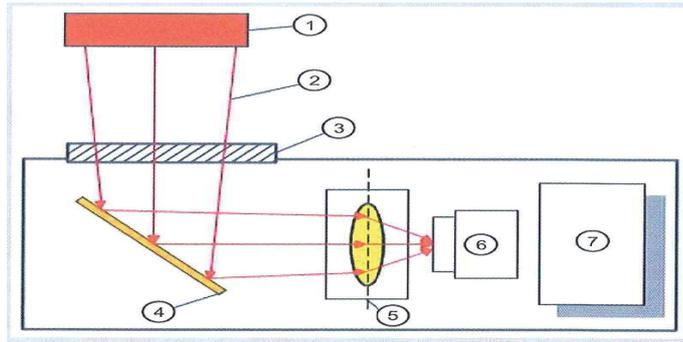
[그림 1] 차축, 차륜 및 디스크 온도

현재 여객전용선으로 운행하고 있는 경부고속선에는 차축 베어링 온도만을 측정할 수 있는 차축온도검지장치(HBD)가 25~30km 간격으로 설치되어 있으며, 일반철도 고속화 구간(180~230km/h)에는 아직 설치기준이 정립되어 있지 않은 실정이다. 따라서 화물수송 목적이 아닌 여객전용 열차에 대해서는 역간거리, 운행속도 등을 고려하여 프로세스 안전시간 내에 온도상승을 검지할 수 있는 최적의 설치기준이 필요하다[4].

2.2 차축온도검지장치 기술개발 현황

2.2.1 차축온도검지의 원리

차축온도검지장치(HBD)는 비접촉 기반의 적외선 센서를 사용하여 온도를 검지하는 장치로써 온도 검지는 중간 적외선 범위에서 주로 발생한다(파장 3 μ -6 μ m). 비접촉 기반의 표면이 방출한 복사열과 온도 값에 직접 할당되어 있는 출력 신호를 측정할 수 있는 도구를 복사온도계(고온계)라고 한다. 차축온도검지장치의 적외선 센서는 철도환경과 같이 극한 환경에서도 신뢰성 있게 동작할 수 있도록 개발된 고속 복사온도계이다.



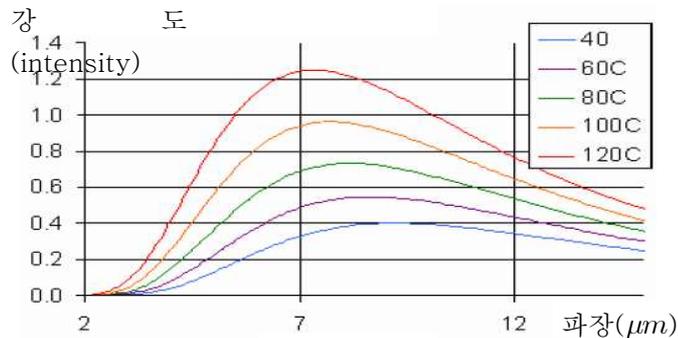
[그림 2]는 적외선 복사온도계의 원리를 간략하게 표시한 것이다[2].

각 구성품을 설명하면, ① 차속베어링, 차륜 및 브레이크 디스크 ② 열복사 ③ 셔터 장치 ④ 편향거울 ⑤ 광학장치 ⑥ 적외선 센서 ⑦ 전자장치 등으로 구성된다. 적외선 센서는 1개 이상의 픽셀을 가진다. 시스템은 통과한 축상의 열복사를 검지하여, 전압으로 변환하고 이를 절대온도로 표시한다. 이 전압을 이전 교정(비교 측정)을 기초로 하는 온도로 변환한다.

온도 측정 및 계산은 플랑크 방정식(Planck's Equation)에 의해 순식간에 이루어진다.

$$f(\lambda) = \frac{8\pi hc\lambda^{-5}}{e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

여기서, λ 는 파장(wavelength), h 는 플랑크 상수 $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$, c 는 빛의 속도($c = 3 \times 10^8 m/s$), k 는 볼츠만 상수($k = 1.38 \times 10^{-23} J/k$), T 는 절대온도이다. 또한 위의 식은 $\lambda_{\max} T = \text{Const.}$ 로써 최대 방출 파장과 절대온도의 결과가 언제나 일정하다는 것을 보여준다.



[그림 3] 플랑크 흑체복사 온도곡선

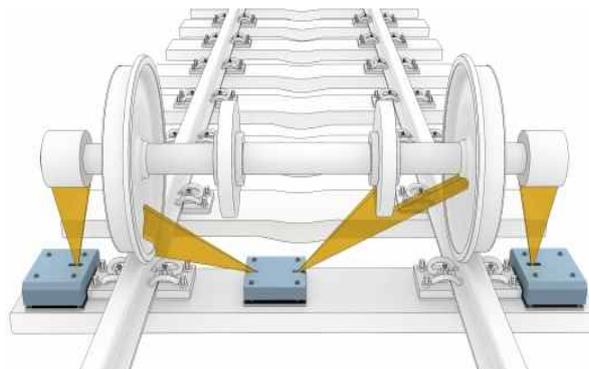
[그림 3]은 차축 베어링 온도와 관계된 온도 범위에 대한 흑체복사 패턴을 나타낸 것이다. 온도가 40℃(313K)~120℃(393K)로 증가함에 따라 피크 위치(Peak Position)가 ~9 μm 에서 ~7 μm 로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 약 2 μm 이하로는 에너지 함량이 나타나지 않는 것을 알 수 있다[1].

일반적으로 철도차량에 사용되고 있는 차축 베어링, 차륜 및 제동디스크에서 요구되는 온도 범위는 다음과 같다.

- 차축베어링온도 : 0℃ ~ 150℃
- 차륜 및 제동디스크 온도 : 0℃ ~ 650℃

사용된 모든 시스템은 철도환경에 대한 오염, 특정 지역의 주변 온도, 눈, 얼음, 습도 등의 영향을 받지 않도록 설계된다. 실제로 열차가 정상적으로 운행되는 상황에서 적외선 온도 센서는 몇 가지 문제점을 갖는다. 예를 들면, 열차의 하부 프레임(골조)에 반사되는 태양복사(태양열 = 6000℃의 표면온도로 열원을 방해), 즉 태양흑점(sunspot)에 의한 오동작, 제동 스파크, 측정된 표면(차축베어링, 차륜, 브레이크 디스크) 영역 또는 이에 인접한 부분에 열원이 있을 경우 온도측정에 방해가 된다. 이러한 경우, 측정오차 및 오류를 절대적으로 줄이기 위해 방해되는 열원을 하드웨어 및 소프트웨어 메커니즘을 혼합하여 시스템적으로 보완하여 사용하고 있다.

2.2.2 차축온도검지장치의 종류



[그림 4] 차축온도(베어링, 차륜, 디스크)검지

현재 유럽에서 운용 중인 차축온도검지장치를 살펴보면, 적외선 센서를 이용하여 차축의 발열을 검지하는 일반적인 원리는 거의 유사하지만, 설치 및 유지보수 비용, 측정 차량의 형식 등에 따라 측정 구조 및 방법에서는 여러 가지 방식이 있다. 이러한 시스템 타입들은 적외선 센서 측정 포인트를 1개, 2개, 또는 여러 개로 구성하는 적외

선 센서의 종류에 따라서 차이가 발생한다. HBD의 적외선 온도 측정 시스템은 다음과 같이 4가지로 분류할 수 있다[2].

① 싱글 빔 시스템(Single-beam system)

싱글 빔 시스템 타입의 모든 적외선 센서는 1개의 빔으로 구성된 스캐닝 포인트를 가진다. 전체 시스템을 각각 1개의 스캐닝 포인트를 가지고 있는 여러 개의 적외선 스캐너로 구성할 수 있다. 표준 시스템은 3개 시스템으로 구성된다. 차축베어링 왼쪽과 오른쪽에 1개 씩 2개, 차륜 및 브레이크 디스크에 1개의 HWD 스캐너가 있다. IR 스캐너는 레일에 설치한다. HWD 스캐너는 궤도에 기대어, 비스듬하게 상향으로 기울어져 있기 때문에, 한쪽의 차륜 및 제동디스크를 검지할 수 있다. 각 스캐너에는 1개 픽셀로 구성된 적외선 검지기가 장착되어 있다. 기록된 최대 온도 값을 표시한다.

② 듀얼 빔 시스템(Dual-beam system)

이 시스템 타입은 차축 베어링 측정을 위해 적외선 스캐너와 2개의 독립적 스캐닝 포인트를 결합시킨 장치이다. 왼쪽 및 오른쪽에 설치되어 있는 차축베어링 스캐너 당 2개의 적외선 센서로 구성되며, 따라서 각각 두 개의 측정 포인트를 가진다. 2개 HWD 스캐너로 되어 있으며 하나는 차륜에, 다른 하나는 차축에 설치되어 있는 브레이크 디스크에 설치되어 있으며, 이를 아래에서 측정할 수 있다. 각각의 차륜 및 제동 디스크를 측정하는 적외선 스캐너는 1개의 스캐닝 포인트를 가진다.

③ 복합 빔 시스템(Multi-beam systems)

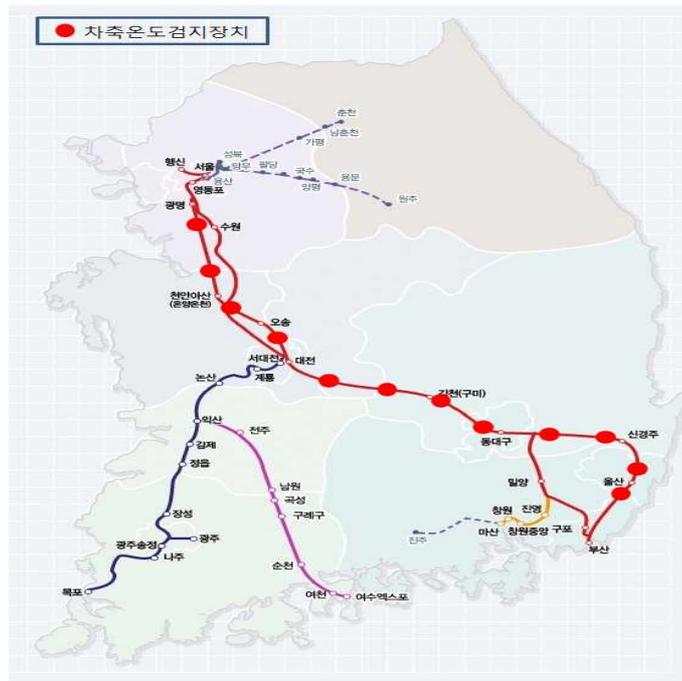
시스템의 모든 적외선 스캐너는 여러 개의 스캔 포인트를 가진다(몇 개의 픽셀로 이루어진 선로 센서이며 열차 이동방향과 직각이다). 완전한 시스템은 여러 개의 스캔 포인트로 이루어진 적외선 시스템으로 구성할 수 있다. 스캐너는 1대의 1열이 4 ~ 8픽셀, 그 이상의 픽셀을 검지하는 적외선 센서로 이루어져 있다. 선로 센서가 달린 시스템은 베어링 온도를 적절하게 평가하기 위해 확장이 가능한 현대식 소프트웨어 형태로 제공된다. 스캔 영역을 추가로 확장하기 때문에, 베어링에 할당할 수 없는 과열 부분 검지에 대한 위험도를 감소시킬 수 있다.

④ 진동 거울방식(Mechnically oscillating mirror-system)

이 장치에는 적외선 선로 검지기가 설치되어 있지 않지만, 기계식 거울 진동 기능을 이용하여 측정노면의 선로를 스캔할 수 있다. 차축 베어링박스의 특정 측정 구역 및 자동시준이 발생하는 베어링 커버 영역 위로 작동 빔을 통과시킨다. 이러한 진동거울의 위치에서는 베어링박스에서 발생한 적외선이 검지기 요소의 거울에서 반사되어 차축 베어링박스의 절대 온도를 결정한다.

2.3 경부고속선 차축온도검지장치 운영현황

[그림 5]는 경부고속선의 차축온도검지장치를 설치현황을 나타낸 것이다. 1단계구간(광명~대구) 상·하선에 14개소, 2단계구간(대구~부산) 상·하선에 10개소로 총 24개소에 평균 25~30km 간격으로 설치되어 있다.



[그림 5] 경부고속선 HBD 설치 현황

차축온도검지장치의 기능 및 동작은 열차가 검지기 전방 2개 궤도회로를 동시에 점유했을 때 차축온도 측정 준비(검지기 셔터 열림)를 하여 열차 통과 시 차축계수기(Axle counter)와 적외선 센서(IR)로 차축온도를 측정하고 데이터를 선로변 제어함으로 전송한다. 제어함에서는 측정된 온도와 외기 온도를 보정하여 실 측정 온도를 생성하고, 측정온도에 따라 단순경보와 위험경보를 발생하여 열차의 프로세스 안전시간을 확보하도록 구성되어 있다.

- 단순경보 : 70℃ 이상 시
- 위험경보 : 90℃ 이상 시

측정된 데이터는 차상신호장치(ATC)와 신호기계실의 차측온도검지시스템(HBS)로 전송되며, HBS에서는 관련 정보를 기계실의 로컬시스템에 표시 및 저장하고, 정보와 메시지를 생성하여 통합관제실(CTC)에 전송한다.

경보가 발생(단순경보 또는 위험경보)하면 ATC장치는 검지기 전방 2km에 설치된 불연속정보전송장치(ITL)을 통하여 열차의 차상에 정보를 전송하고 열차의 운전대에서는 해당 램프가 점등되며, 이와 동시에 열차는 상용제동(Service braking)을 체결하고 30km/h로 감속운행하게 된다[5].

2.4 일반철도 고속화 구간에서 차측온도검지장치 활용방안

2.4.1 관련 법령 및 지침



[그림 6] 관련 법령 및 규정 체계도

현재 국내 관련 법령 및 지침에는 고속선 전용구간에만 국한되어 적용되도록 고시되고 있으나, 국가철도망 구축계획에 따라 일반철도의 열차운행 속도를 개량·신설하여 고속운행(180~230km/h)을 계획하고 있으므로 관련 기준의 필요성이 대두되고 있다[4].

2.4.2 국외 차측온도검지장치 적용현황 조사

여객전용 고속철도를 운영하고 있는 프랑스, 독일, 스페인, 이태리 등 대부분의 유럽 국가에서 차측온도검지장치를 설치하여 운용하고 있다. 뿐만 아니라 기존선 구간(Conventional line)에서 화물수송 목적으로 철도 연장구간 길고(수 백km 이상), 화물의 적재 하중이 큰 열차의 이동이 빈번한 선로의 경우, 축중 때문에 발생하는 발열로 인해 열차가 탈선하는 것을 방지할 목적으로, 차측베어링 온도뿐 아니라 차륜 및 브레이크 디스크 온도를 함께 측정하는 설비를 병행하여 사용하고 있다. 여기에는 철도를 운영하는 대부분의 유럽국가에서 주로 운영되고 있으며, 아시아 여러 국가 및 미국,

호주 등지에서도 다양하게 운영되고 있다.

독일 철도국에서는 실제로, 열차속도가 200km/h 이상인 구간에서는 30~35km 간격으로, 열차속도가 200km/h 이하의 구간에서는 40~70km 간격으로 차축온도검지장치를 설치하여 운영하고 있다[6].

2.4.3 일반철도 고속선 구간 차축온도검지장치 설치기준(안)

일반철도 고속화 구간에 차축온도검지장치를 설치하기 위해서는 영국철도에서 가이드라인으로 제시한 위험도 평가 절차(Yellow Book Issue 3&4)에 따라 철도선로에 대한 잠재적인 위험 원인, 가능한 시나리오, 사건발생 가능성, 사고영향, 사고발생확률, 피해정도 등을 세부적으로 분석하여 다음과 같은 결과를 산출하였다.

- 주요 위험원 : 열차축중, 베어링 마모, 윤활유 점성, 열차속도 및 주행거리
- 위험원의 진행 : 탈선, 승객사상사고, 시설물 전도, 화재
- 위험도 평가 결과 : 발생빈도는 낮으나 심각도는 매우 높음

또한 경부고속선 차축온도검지장치 운영현황 데이터를 분석한 결과 차축 베어링의 온도상승은 주행거리 및 정차 시간에 따라 다음과 같은 결과 데이터를 산출하였다.

- 차축 이상 시 온도상승 : 약 31℃ / 100km (외기온도 : 30.8℃ 시, 6월 중순)
- 역 정차 시 차축온도 감소 : 약 5℃ 이상(2분 내외 정차)

따라서 여객전용인 일반철도 고속화 구간의 차축온도검지장치를 최적으로 활용하기 위해서는 정차역간 거리 및 열차 속도가 중요한 변수로 작용되어, 시뮬레이션 결과 표 1과 같은 설치기준(안)을 제안한다.

<표 1> 일반철도 고속화 구간의 설치기준(안)

현행	일반철도 고속화 구간의 설치기준(안)
철도신호제어설비설계지침 (2011.12.01.) 제22장 고속철도의 신호안전설비 제272조 (차축온도검지장치) 차축온도검지장치는 다음 각 항에 의한다. ② 설치간격은 25~30Km로 한다.	정차역간 거리가 60km 이상을 열차속도 180km/h 이상으로 연속 주행하는 선로 및 구간에 설치한다. ※ 고속철도전용선은 기존 설치기준을 준수
철도설계기준-시스템편 (2011. 5.) 3.14 안전설비 3.14.1 차축온도검지장치 (1) 차축온도검지장치는 고속철도 전용구간의 전 노선에 걸쳐 최고속도로 주행하는 구간에 적절한 간격을 두어 설치한다.	

3. 결 론

열차의 차축 베어링 온도에는 열차의 안전운행에 대한 잠재적 위험요소가 내포되어 있다. 다시 말해, 운행 중 차축 베어링의 고장은 대참사가 일어날 수 있는 잠재적 원인이 될 수 있다. 이로 인해, 사상자 발생, 차량 및 인프라에 심각한 손상, 차량 탈선 및 화재가 등이 발생할 수 있다.

이러한 잠재적 위험을 해소할 목적으로 모든 선로에 차축온도검지장치를 설치한다고 가정하면, 설치 및 유지보수 비용 측면과 안전측면에서 고민할 수 밖에 없다. 특히 일반철도 고속화 구간(180~230km)의 역간 평균 거리는 고속 전용선 구간에 비해 현저히 짧고, 역간 정차 횟수가 많기 때문에 차축 베어링의 온도 상승에 대한 위험도가 낮게 평가되었다.

일반철도 고속화 구간인, 예를 들면, 전라선의 경우, KTX산천이 서울역을 출발하여 대전-여수 구간을 운행하므로 서울-대전 고속선 구간에 설치된 차축온도검지장치를 병행 활용할 경우, 열차의 잠재적 위험도는 현저하게 낮아질 수 있다.

본 연구에서는 국내 경부고속선에서 운용되고 있는 차축온도검지장치의 운영 현황 및 데이터 분석, 해외 설치 사례를 토대로 하여 일반철도 고속화 노선 및 구간에서의 필요성에 대해 살펴보았다. 차축온도발열이 철도 인프라에 직접적인 손상을 끼치지 않지만, 사고 발생 시 큰 재앙으로 다가올 수 있는 위험들이 존재하기 때문에, 적절한 사전 대책을 통해 사고발생을 예방할 수 있다. 철도시설 안전규칙 등의 규정에서도 볼 수 있듯이 안전보호 정책의 효과를 거두기 위해서는 항상 열차의 상태에 대해서 주시해야 하며, 위험 요소에 대한 즉각적인 조치를 취해야 한다. 그러기 위해서 열차가 고속으로 주행하는 구간에 차축온도검지장치와 같은 안전설비가 필요하다. 현행 고속철도 설치기준은 그대로 준수하되 새로이 신설되거나 일반철도를 고속화하여 180~230km, 또는 230km/h 이상으로 주행하는 구간 및 노선에서는 앞에서 제시한 설치기준(안)을 적용하여 설치한다면 열차운행 안전에 기여할 수 있을 것이다.

4. 참 고 문 헌

- [1] P.Butani & Dr. sanjay Gupta, Development of Hot Box & Hot Wheel Detector.
- [2] Dr.-ing, Erich Eisenbrand, "Hot box detection in European railway network", RTR, p.16~25, 2011.
- [3] BSI Group, Draft BS EN 15437-2 Railway applications - Axlebox condition monitoring - Performance requirements Part 2: Onboard systems for temperature monitoring, 2010.
- [4] 철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반연구-안전설비분야 연구보고서, (주)에이알텍, 2012.
- [5] 고속철도 안전설비 현황, "차축온도검지장치", 한국철도공사 오송고속철도전기사무

소, 2008.

- [6] 운행 중의 위험 경보 장치, HBD(Hot Box Detector)/HWD(Hot Wheel Detector), 독일철도국,2006.