

# EWMA 기법을 적용한 효율적 철도차량 차축온도검지 모니터링 방법 연구

최석중<sup>1</sup>, 김문홍<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>한국철도공사 차세대 KOVIS 추진처, <sup>2</sup>우송대학교 철도경영학과

## A Study on Efficient Rolling Stock HBD Monitoring Method Using EWMA Technique

Seog-Jung Choi<sup>1</sup>, Moon-Hong Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Next-Generation KOVIS Promoting, Korea Railroad Corp.

<sup>2</sup>Dept. of Railroad Management, Woosong University

**요약** 철도는 전 세계적으로 매우 안전하고 중요한 운송 수단 중 하나이다. 그러나 철도시스템이 복잡도가 높아지고 주행거리 증가 등으로 인해 매년 사고가 지속적으로 발생하고 있다. 특히, 고속열차와 화물열차의 경우, 차축베어링 비정상 과열로 인하여 차축베어링의 기능이 소실되면 차축의 불균등한 하중을 초래한다. 따라서, 차축베어링의 비정상 과열은 심각한 사고 또는 차량 탈선의 원인이 될 수 있다. 이에 따라서 현재 고속열차 운행 중 차축의 비정상적인 발열을 검지하기 위하여 차축온도검지장치(Hot Box Detector, HBD)가 설치되어 운영되고 있다.

본 연구에서는 비정상 차축 과열 발생시, 이를 빠르고 효율적으로 검지하기 위하여 지수가중이동평균(EWMA) 기법을 적용한 차축온도 모니터링 방법을 제안하였다. 또한 제안한 방법에 대하여 통계적으로 설계하였다. 본 연구에서 제안하는 방법은 현재의 차축온도검지 모니터링 방법과 비교하여 비정상 과열의 발생에 대하여 더 좋은 성능으로 평가되었으며 그 수행도는 최대 170% 향상되었다.

**Abstract** Railways are one of the safest and most important transportation systems in the world. On the other hand, due to the increasing complexity of the railway system and the running distance of rail vehicles, railway accidents occur continuously every year. In particular, in the case of high-speed trains and freight trains, if the function of the axle bearing is lost due to abnormal overheating of the axle box bearing, the load on the axle becomes uneven. Therefore, abnormal overheating in the train axle box bearings can cause serious accidents or derailments. For this purpose, a Hot Box Detector (HBD) was installed in the track side of a high speed line to detect abnormal overheating. This paper proposes an EWMA technique-based axle temperature monitoring method to detect abnormal overheating quickly and efficiently. A statistical design of the proposed method was also performed. The proposed method has better performance compared to the current method in the case of abnormal overheating and the performance is improved by approximately 170% at the maximum.

**Keywords** : Axle Heating, EWMA, HBD, Rolling Stock, Transportation

### 1. 서론

철도산업은 최근 급격한 관련 기술 분야의 발전으로

가장 효율적이고 이동성이 뛰어난 교통수단 중 하나가 되었다[1]. 이에 따라 철도시스템은 안전성과 저 위험성을 위한 설계 단계에서부터 폐기에 이르기까지 다양한

\*Corresponding Author : Moon-Hong Kim(Woosong Univ.)

Tel: +82-42-630-9188 email: mhkim@wsu.ac.kr

Received November 25, 2016

Revised (1st December 20, 2016, 2nd December 21, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

설계 저감 활동을 통해 시스템에 어떠한 고장이 발생하지 않도록 해야 하며 이를 통해 궁극적으로 어떠한 중대한 사고도 발생하지 않을 것임을 보장해야 한다. 그럼에도 불구하고 철도에서는 매년 중대한 사고들이 간헐적으로 꾸준히 발생하고 있다. 특히, 고속 및 화물열차의 경우 차축베어링의 이상 발열로 윤활이 충분하지 않을 경우, 차축베어링은 그 기능을 상실하게 되고 이로 인해 차축의 불균등한 하중으로 인해 열차의 탈선까지 초래할 수 있다.

철도산업이 발달한 많은 유럽국가에서는 여객용 열차뿐만 아니라 화물수송 철도차량에서 차축베어링 비정상 발열로 인해 매년 심각한 사고가 지속적으로 보고되고 있다[1,2]. 이러한 차축베어링의 비정상 발열을 사전에 검지하여 이를 열차에 긴급 무선 통보하고 관제사를 통해 열차 운행 조치를 수행하기 위한 차축온도검지장치(Hot Box Detector, HBD)가 전 세계적으로 설치되어 운영 중에 있다[3].

국내의 경우, 경부선과 호남선에 총 38개소가 약 20~40Km 간격으로 설치되어 운영 중에 있다. 이에 따라 비정상 차축 발열을 얼마나 빠르고 정확하게 검지하여 통보하느냐는 철도차량의 안전 확보 관점에서 매우 중요한 요소이다.

본 연구에서는 차축온도검지장치를 통해 수신되는 비정상 차축 발열 온도에 대하여 빠르고 정확하게 검지하기 위한 지수가중이동평균(Exponentially Weighted Moving Average: EWMA) 기법을 적용한 새로운 차축온도 모니터링 방법을 제시하고 통계적으로 이를 설계한다. 또한, 제안된 방법의 성능을 평가하기 위하여 실제 과거 사례 데이터를 기준으로 기존의 차축온도 모니터링 방법과의 수행도를 산출 및 분석하여 차축베어링 비정상 발열 발생시, 각 방법들 간 성능을 분석하여 수행도를 비교 평가한다.

## 2. 본론

### 2.1 차축온도검지장치(HBD) 개요와 원리

#### 2.1.1 차축온도검지장치(HBD) 개요

차축온도검지장치(Hot Box Detector: HBD)는 운행 중인 철도차량의 차축 베어링의 비정상 과열을 검지하고 모니터링하기 위한 안전설비장치이다[3]. 이에 철도 운영사들에서는 HBD 설치를 통해 수신되는 차축베어링

온도 비정상 발열을 검출함으로써 차축 발열로 인한 안전사고를 예방한다. 이와 같은 차축 발열로 인한 중대한 안전사고는 매년 간헐적이지만 지속적으로 발생하고 있어 철도차량의 안전성 측면에서 HBD는 매우 중요하다[3].

현재 유럽을 중심으로 운용 중인 차축온도검지장치는 적외선 센서를 이용하여 차축베어링 과열을 검지하는 기본원리에는 큰 차이가 없으나 설치 및 유지보수 비용, 측정 철도차량의 형식 등에 따라 측정 구조 및 방법에는 일반적으로 다음과 같은 네 가지 방식으로 분류할 수 있다[4]. 첫째, 싱글 빔 시스템(single-beam system) 둘째, 듀얼 빔 시스템(dual-beam system), 셋째, 복합 빔 시스템(multi-beam system), 넷째, 진동거울방식(mechanically oscillating mirror-system)으로 구분할 수 있으며 국내에는 싱글 빔 시스템 방식의 차축온도검지장치가 경부선(26개소)과 호남선(12개소) 등 총 38개소에 설치되어 있다. 이 시스템 방식은 모든 적외선 스캐너는 하나의 스캐닝 포인트를 가지며 전체 시스템은 한 지점에 여러 적외선 스캐너로 구분 된다는 특징이 있다.

아래의 Fig. 1은 국내의 경부선과 호남선에 설치된 싱글 빔 시스템 방식의 HBD 설치전경으로 각 구간별로 약 20~40Km 간격으로 설치되어 있다.



Fig. 1. Complete view of installed HBD sensor

#### 2.1.2 차축온도검지장치(HBD) 동작원리

차축온도검지장치(HBD)의 동작 원리는 HBD가 설치된 궤도회로 내 철도차량이 점유하면 선로에 설치된 HBD 센서 서터가 자동 개방되어 차축온도를 측정하며 크게 다음의 두 단계를 거쳐 동작된다.

첫 단계로 차륜이 센서에 설치된 전자폐달을 밟게 되고 이 때 각 축에서 발생하는 적외선을 수신하여 전자력에 해당 정보를 전송하고 그 파장 분석을 통해 차축 온도를 측정한다.

두 번째 단계로 상온에 따라 생성되는 온도 기준값과 측정값을 비교하여 경보를 판정하며 통합관제실에 이상

경보를 전송함과 동시에 KTX 운전실로 해당 경보를 동시 전송한다. 아래의 Fig. 2는 앞에서 설명한 HBD 동작 원리를 간단하게 도식화한 것이다.

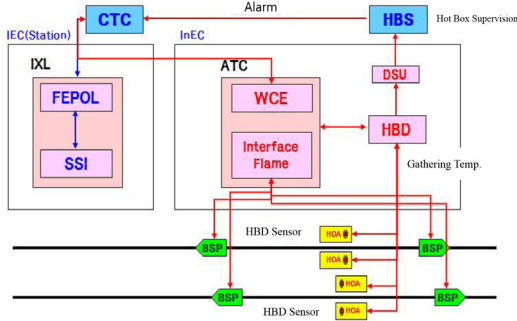


Fig. 2. System diagram for HBD's operation

2.1.3 차축온도검지장치(HBD) 이상경보 종류

차축온도검지장치(HBD)에서 측정되어 수집되는 데이터 종류로는 차축베어링 온도 뿐만 아니라 대기온도, 통과열차 시각, 열차번호, 열차 속도, 센서 내부온도, 좌우측 평균차축 온도 등을 동시에 수집한다. 경부선과 호남선에 설치된 HBD 시스템은 차축베어링 온도가 70~90℃ 미만일 경우 단순경보를 전송하고 차축베어링 온도가 90℃이상일 경우에는 위험경고를 발생한다. 특히, 위험경보가 발생되면 열차 일시정차 후 기장에 의한 차축베어링 온도를 재측정하고 그 결과에 따라 전도 운행하여 차축베어링 과열에 의한 사고를 사전 예방하도록 조치하고 있다.

2.1.4 차축온도검지장치(HBD) 필요성

철도산업이 가장 발달한 유럽에서는 철도차량에서의 차축베어링 과열로 인한 심각한 사고가 매년 지속적으로 발생하고 있어 대부분의 철도 운영사들에서는 HBD를 설치하여 운용 중에 있다. 특히, 최근에는 측정 가능한 철도차량의 속도가 최고 500Km/h까지 향상되고 차축 온도의 정확도가 외부환경의 영향도가 보정되어 매우 정확도 높은 차축 온도를 측정할 수 있는 기술들이 급속히 발전하고 있다[3].

2.2 국내 차축 과열 사고 사례 I & II

2.2.1 국내 차축 과열 사고 사례 I

위에서 설명한 유럽의 경우에서와 같이 국내에서도 매년 간헐적 차축베어링 과열에 의한 중대한 사고가 지

속적으로 발생하고 있다. 2010년 7월 29일 12시 24분경, 경부고속선 KTX열차(부산→서울)에서 차축베어링 발열에 따른 비정상 경고가 발생하였으며 이로 인해 열차지연 장애가 발생하였다. 아래 Table 1은 위에서 언급했던 사고 사례에 대한 요약한 내용으로 차축베어링 발열에 의한 사고 원인은 베어링의 윤활미흡과 그리스 기준치 360g에 비하여 227g을 초과급유함에 따라 그리스 내 수분 유입으로 그리스가 변질되어 윤활불량이 발생하였다. 아래 Fig. 3은 차축베어링과 롤러 앤 케이지의 상태를 분해 검사한 결과에 대한 그림이다.

아래의 Table 2는 36번째 차축 우측 측상 온도의 HBD 지상설비 각 구간별 측정 기록이다. 해당 Table에서와 같이 HBD No.502~402 구간까지는 평균 차축(1번~46번) 온도와 큰 차이가 없었으나 이후 지속적으로 차축 온도가 상승하여 HBD No.082 구간에서 81℃의 정보가 발생하였다.

Table 1. Case I of axle overheating

Classification	Detail Description
Date	7-29-2010, 12:24
Weather	Cloud(28℃)
Accident Interval	Cheonan-Asan ~ Gwangmyeong Station
Train Number	124
HBD Position	Right, 36th
HBD Temp.	81℃
HBD Average Temp.	45℃
Accident Cause	Insufficient bearing lubrication and grease overfilling
grease overfilling(g)	227g

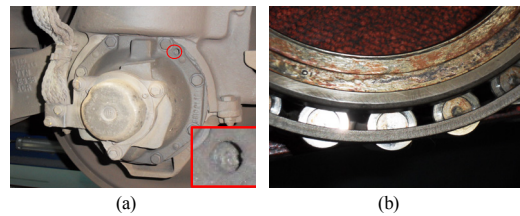


Fig. 3. (a)Bearing condition (b)Roller and cage contact condition

Table 2. Axle temperature record(right, 36th) of case I

Temp(℃) \ HBD	502	462	402	262	222	182	082
	Measure	41	40	42	50	64	69
Axle average	40.2	38.5	41.2	40.3	42.3	45.0	45.2
External	31	29	30	31	29	33	33

2.2.2 국내 차축 과열 사고 사례 II

2007년 9월 12일 19시25분경, 경부고속선 KTX 열차(서울→부산)에서 김천IEC~칠곡IEC 구간을 운행 중 차축온도검지장치(HBD)가 8번째 차축에서 비정상 발열(85℃)을 검지하고 이에 따른 긴급조치로 인해 약 15분간의 열차운행이 지연되었다. 아래 Table 3은 사고 사례 II에 대한 요약 내용이다.

아래 Fig. 4에서와 같이 차축 분해검사 결과 8번째 차축베어링(Fig. 4(b))이 7번째 차축베어링(Fig. 4(a))에 비하여 장기 사용에 따른 기능저하가 발생하였다.

또한, 아래 Table 4는 8번째 차축 좌측 축상 온도의 HBD 지상설비 각 구간별 측정 기록으로 HBD No.181 구간 이후로 차축베어링 온도가 점차 상승하여 HBD No.501 구간에서 85℃의 경보가 발생하였다.

Table 3. Case II of axle overheating

Classification	Detail Description
Date	9-12-2007, 19:25
Weather	Clear(20.5℃)
Accident Interval	Gimcheon IEC~Chilgok IEC
Train Number	171
HBD Position	Left, 8th
HBD Temp.	85℃
HBD Average Temp.	30℃
Accident Cause	Degradation of function due to long-term use of grease
Decomposition Result	Grease leakage and discoloration



Fig. 4. Bearing condition on 7th(a) and 8th(b)

Table 4. Axle temperature record(left, 8th) of case II

No. Temp(℃)	HBD						
	081	181	221	261	401	461	501
Measure	32	52	56	65	48	53	85
Axle average	29.5	40.4	38.3	40.9	39.2	40.3	43.9
External	21	20.5	21	21	20	20	20

2.3 차축온도검지모니터링 중요성과 문제점

2.3.1 차축온도검지모니터링 중요성

차축온도검지장치(HBD)는 운행되는 열차의 차축 베어링에 부적합한 윤활유, 수분 유입 또는 기계적 결함, 기능 소실에 의해 차축베어링의 온도 상승을 모니터링하기 위한 설비이다. Xiang Liu *et al.*[5]은 최근 10년 간 조사를 통하여 탈선사고가 전 세계적으로 약 5만건 이상(Table 5 참조) 발생하였고 그 중 차축베어링과 휠의 고장에 의한 탈선이 전체의 약 11%(Table 6 참조)의 비중을 차지하고 있음을 연구하였다. 이와 같이 HBD 시스템을 통한 비정상 차축 온도검지모니터링은 철도차량의 탈선 사고를 예방하고 안전성을 확보하는데 매우 중요한 요소임을 확인하였다. 국내 K사의 경우, 차축베어링 발열에 의한 연도별 철도차량 사고 추이는 아래 Fig. 5와 같으며 매년 꾸준히 발생함을 확인할 수 있다.

Table 5. Accident frequency, accident severity, and car derailment by accident type and track type, 2001-2010

Track type	Total Number of Cars Derailed				
	Derailment	Collision	Highway	Other	All
Main	37,456	989	609	580	39,634
Yard	13,363	527	9	511	14,410
Siding	2,477	85	0	47	2,609
Industry	1,593	22	8	23	1,646
All	54,889	1,623	626	1,161	58,299

Table 6. Major derailment frequency and severity by accident cause, 2001-2010

Accident Cause	Derailments		Cars Derailed	
	Number	Percentage	Number	Percentage
Broken rails or welds	665	15.3	8,512	22.7
Track geometry	317	7.3	2,057	5.5
Bearing failure	257	5.9	1,739	4.6
Bearing wheels	226	5.2	1,457	3.9
Train handling	201	4.6	1,553	4.1

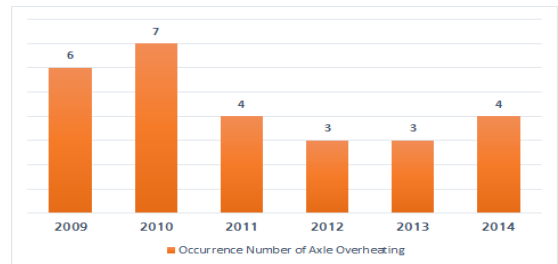


Fig. 5. Occurrence number of axle overheating

### 2.3.2 차축온도검지모니터링 문제점

앞의 2.1.1절에서 언급한 바와 같이 국내에서는 경부선과 호남선에 총 38개소의 싱글 빔 시스템 방식의 HBD가 설치되어 있어 좌·우측 각 46개(축상별 총 92개) 차축베어링 온도가 수집되어 2.1.2절에서 언급한 정보 기준에 의하여 차축베어링 과열을 검지한다.

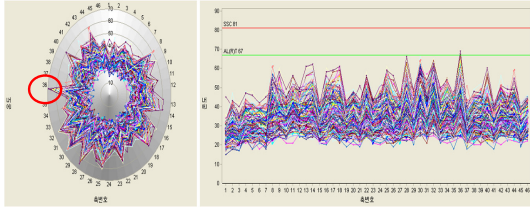


Fig. 6. Case of axial temperature monitoring viewer (HBD)

위의 Fig. 6은 국내 경부선에서 HBD를 통해 수집된 46개 축상별 차축베어링 온도에 대한 모니터링 수집화면 예시이다.

국내외에서 현재 사용되는 차축온도검지모니터링 방법은 각 축상별 온도에 대하여 경험적 기준(단순경보: 70~90℃미만, 위험경보: 90℃이상)만으로 차축베어링 비정상 발열을 판정하고 있다. 그러나 이러한 차축온도 모니터링 방법은 차축베어링 온도가 점진적으로 상승하여 특정 임계점에 도달 후 급격하게 상승하는 차축베어링 온도 패턴의 특성을 제대로 반영하지 못한다. 즉, 비정상 차축베어링 발열이 발생하였음에도 시스템에서 검지될 때까지 상당한 시간이 소요된다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 비정상 차축베어링 발열이 발생할 경우, 기존 방법에 비하여 빠르고 정확하게 검지할 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

## 2.4 새로운 차축온도검지모니터링 방법에 대한 통계적 설계

본 절에서는 기존의 차축온도검지모니터링 방법보다 비정상 차축베어링 발열에 대하여 더 민감하고 효율적인 지수가중이동평균(exponentially weighted moving average) 기법을 적용한 새로운 차축온도검지모니터링 방법을 제안하기 위한 통계적 설계를 수행한다.

### 2.4.1 지수가중이동평균(Exponentially Weighted Moving Average: EWMA)

통계적 공정관리(Statistical Process Control: SPC) 기법 중 관리도(Control Chart)는 많은 산업 현장들에서 생산 공정 또는 시스템을 모니터링하고 품질을 향상시키기 위하여 가장 보편적으로 사용하는 중요한 모니터링 기법으로 Shewhart 관리도가 가장 많이 사용된다[6]. 그러나 Shewhart 관리도는 각 샘플들의  $\bar{X}$ , S, R 통계량 등을 산출하고 이를 타점하여 공정 또는 시스템을 관리한다. 그러나 작은 공정변동(small shifts)가 자주 발생하는 시스템 또는 자기 상관(auto-correlation)이 존재하는 공정들에서는 Shewhart 관리도의 성능이 현저하게 저하된다[6].

Roberts[7]는 공정 평균의 작은 변화에 민감하게 반응하는 지수가중이동평균(EWMA) 기법에 대하여 최초로 연구하였으며, 그 연구 결과에 따르면 이 기법은 공정 평균의 작은 변동에 민감하게 변동하고 자기 상관이 존재하는 공정에서도 매우 효율적인 기법임을 증명하였다.

최근, 제품의 생산주기가 짧고 제품의 종류와 규격이 빈번하게 변경되는 공정 모니터링을 위하여 CV 통계량과 EWMA 기법이 함께 적용된 관리 방법에 대한 연구가 수행되었다[8]. 본 연구에서 적용된 EWMA 기법은 지수적(exponentially)으로 최근의 정보들에 큰 가중치를 부여하여 공정 또는 시스템의 변동에 매우 민감하게 반응하도록 한 것이 특징이다. 특히, 모니터링 대상이 정규분포를 따라야 한다는 가정에 크게 영향을 받지 않는다는 장점이 있다[6,9]. 동시에 일반적으로 EWMA 기법이 적용된 관리도는 Shewhart 관리도에 비하여 공정 평균의 작은 변동에 매우 좋은 수행도를 보이는 것으로 알려져 있다[9].

### 2.4.2 지수가중이동평균(EWMA)의 통계적 설계

EWMA기법 적용을 위하여 아래의 식 (1)과 같은 EWMA 통계량( $z_i$ )을 정의한다.

$$Z_i = \lambda u_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}, \quad i \geq 1 \quad (1)$$

여기서,

$$u_i = x_i - \frac{D}{N} = x_i - \frac{\sum_{k=1}^N x_k}{N}, \quad i, k \geq 1$$

$\lambda$ 는  $i$ 번째 샘플링 시점에서의 가중치로  $0 < \lambda \leq 1$ 을 갖는 상수이며,  $Z_0 = \mu_0 = \bar{u}$ (공정 목표값)이다. 본 연

구에서는 국내의 경부선과 호남선에 설치된 HBD를 대상으로 통계적 설계를 적용하며 각 구간별로 46개 차축 베어링 온도가 측정 및 수집되므로  $N = 46$ 을 적용하도록 한다.

따라서, EWMA 통계량( $z_i$ )을 반복적으로 기술하면 아래의 식 (2)와 같이 유도하여 정의 할 수 있다.

$$Z_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1-\lambda)^j u_{i-j} + (1-\lambda)^i Z_0, \quad i \geq 1 \quad (2)$$

또한, EWMA 통계량( $z_i$ )의 분산( $\sigma_{Z_i}^2$ )은 아래의 식 (3)과 같이 유도하여 정의할 수 있다.

$$\sigma_{Z_i}^2 = \sigma^2 \left( \frac{\lambda}{2-\lambda} \right) [1 - (1-\lambda)^{2i}] \quad (3)$$

위 식 (1)~(3)을 활용하여 차축온도검지모니터링을 위한 EWMA 통계량의 관리상·하한선(upper and lower control limit)은 아래의 식 (4)~(5)와 같이 정의한다.

$$[\text{EWMA 관리상한선(UCL:upper control limit)}] \dots = \bar{u} + L\hat{\sigma}_u \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]}, \quad i \geq 0 \quad (4)$$

$$[\text{EWMA 관리하한선(LCL:lower control limit)}] \dots = \bar{u} - L\hat{\sigma}_u \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]}, \quad i \geq 0 \quad (5)$$

여기서,  $L$ 은 관리한계선 조정상수이다. 따라서, 차축온도검지장치(HBD)에서 비정상 차축베어링 발열의 판정은 EWMA 통계량( $z_i$ )이 EWMA 관리상·하한선을 벗어나면 비정상 차축베어링 발열이 발생한 것으로 판정한다. Lucas *et al.*[10]은 EWMA 기법을 적용할 경우 최적의  $L, \lambda$ 의 조합에 대하여 연구하였으며  $L = 2.7, \lambda = 0.1$ 일 경우에 일반적으로 가장 좋은 수행도를 보이는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서도  $L$ 와  $\lambda$ 의 최적 조합으로  $L = 2.7, \lambda = 0.1$ 를 적용하였으며 그에 따른 수행도를 평가하였다.

## 2.5 새로운 차축온도검지모니터링 방법의 수행도 평가

앞 절에서는 지수가중이동평균(EWMA) 기법이 적용

된 새로운 차축온도검지모니터링 방법을 위한 EWMA 통계량( $z_i$ )과 EWMA 관리 상·하한선을 통계적으로 설계하였다. 본 절에서는 새롭게 설계된 차축온도검지모니터링 방법과 기존의 방법에 대하여 각각 과거 사례 데이터를 적용한 후 성능을 측정하고 상호 비교·분석하여 그 수행도를 평가한다.

### 2.5.1 사고 사례(I, II)를 적용한 수행도 평가

앞 절 2.2.1과 2.2.2에서는 국내의 차축베어링 발열에 대한 실제 사고 사례와 데이터를 설명하였다. 본 절에서는 두 사고 사례 데이터를 기반으로 두 가지 방법의 성능을 측정하기 위한 일련의 산출 과정을 수행하였다.

아래 Table 7은 사고 사례 II의 HBD 각 구간별 축별 차축베어링 온도 실제 측정값의 일부이다. 각 구간별 축별 차축베어링 온도 측정값을 통해 각 구간별 평균값과 위 식 (1)에서 설명한 실제 차축베어링 발열이 발생하였던 8번째 축에 대한  $u_i$  값을 계산하였다. 아래 Table 8은 현재의 차축온도검지모니터링 방법과 새로운 EWMA 기법 기반의 차축온도검지모니터링 방법의 각 구간별 통계량을 산출한 결과이며 위 결과에서와 같이 현재의 차축온도검지모니터링 방법은 7번째 구간(HBD No.501)에서 이상경보가 발생하였으나 새롭게 제안한 기법에서는 네 번째 구간(HBD No.261)에서 이상경보가 발생함

Table 7. Temperature records for all axles of case II

HBD No. Axle No.	081	181	221	261	401	461	501
1	24	25	26	29	24	23	27
2	23	27	27	30	27	26	25
3	27	41	40	46	32	32	39
4	27	43	44	51	41	43	47
5	25	35	36	47	36	32	39
6	25	27	29	29	29	27	26
7	25	28	28	30	26	26	85
8	32	52	56	65	48	53	85
9	26	43	46	54	38	38	42
10	32	46	44	53	41	42	47
...	...						
41	25	28	28	27	27	26	28
42	30	46	47	40	45	42	49
43	26	29	30	31	31	29	30
44	26	45	47	41	45	43	49
45	25	28	27	25	25	26	26
46	27	29	31	32	32	31	31
Average	29.5	40.4	38.3	40.9	39.2	40.3	43.9
$u_i^{8th}$	2.48	11.6	17.67	24	8.7	12.67	41.06



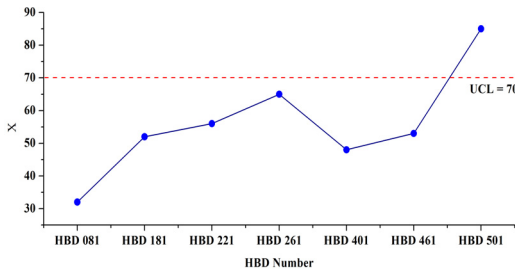
**Table 8.** Calculation result(caseII) of current & EWMA based HBD monitoring system

HBD No.	Current HBD			EWMA based HBD			
	$x_i$	Upper Control Limit	Lower Control Limit	$u_i^{sth}$	$Z_i^{sth}$	Upper Control Limit	Lower Control Limit
081(i=1)	32	70	-	2.48	0.247	2.055	-2.05
181(i=2)	52	70	-	40.4	1.384	2.765	-2.76
221(i=3)	56	70	-	38.3	3.012	3.227	-3.22
261(i=4)	65	70	-	40.9	<b>5.120</b>	3.558	-3.55
401(i=5)	48	70	-	39.2	<b>5.484</b>	3.805	-3.80
461(i=6)	53	70	-	40.3	<b>6.203</b>	3.994	-3.99
501(i=7)	<b>85</b>	70	-	43.9	<b>9.689</b>	4.141	-4.14

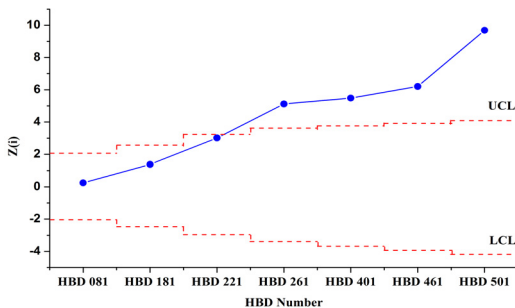
**Table 9.** Calculation result(case I) of current & EWMA based HBD monitoring system

HBD No.	Current HBD			EWMA based HBD			
	$x_i$	Upper Control Limit	Lower Control Limit	$u_i^{36th}$	$Z_i^{36th}$	Upper Control Limit	Lower Control Limit
502(i=1)	41	70	-	0.8	0.08	1.22	-1.22
462(i=2)	40	70	-	1.5	0.22	1.64	-1.64
402(i=3)	42	70	-	0.8	0.28	1.92	-1.92
262(i=4)	50	70	-	9.7	1.22	2.11	-2.11
222(i=5)	64	70	-	21.7	<b>3.27</b>	2.26	-2.26
182(i=6)	69	70	-	24	<b>5.34</b>	2.37	-2.37
082(i=7)	<b>81</b>	70	-	35.8	<b>8.39</b>	2.45	-2.45

을 알 수 있다. 아래 Fig. 7~8은 Table 8의 값을 그래프로 도식화한 그림이다. Fig. 7~8에서와 같이 새롭게 제안한 차속온도검지모니터링 방법이 비정상 차속배어링 발열이 발생하였을 경우, 기존의 방법에 비하여 약 170% 더 민감하게 반응하여 이상경보가 발생함을 확인할 수 있었다. 아래 Table 9는 사고 사례 I의 HBD 구간별 축별 차속온도 실제 측정값에 대한 현재와 새롭게 제안한 차속온도검지모니터링 방법의 수행도 비교 결과이다. 그 결과 새롭게 제안하는 차속온도검지모니터링 방법이 비정상 차속배어링 발열에 대하여 약 140% 빠르게 검지 후 경보를 발생하였다.

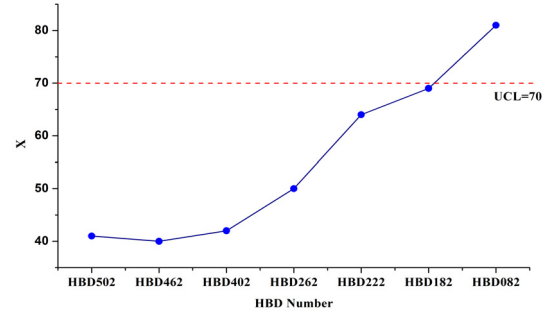


**Fig. 7.** Performance of current HBD system(CASE II)

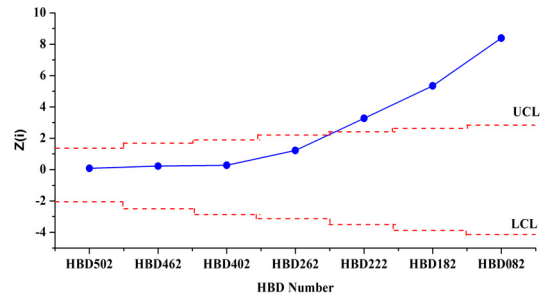


**Fig. 8.** Performance of EWMA based HBD system(CASE II)

실제 설치된 HBD 설치 간격이 약 20~40km임을 감안하면 사고 사례 I의 경우, 약 50km 전에 사전 검지가 가능하며 사고 사례 II의 경우, 약 80km 전에 기존 차속온도검지모니터링 방법에 비하여 더 빨리 검지할 수 있다. 다음의 Fig. 9~10은 Table 9의 값을 그래프로 도식화한 그림이다.



**Fig. 9.** Performance of current HBD system(CASE I)



**Fig. 10.** Performance of EWMA based HBD system (CASE I)

따라서, 본 연구에서 제안하는 EWMA 기법 기반의 차속온도검지모니터링 방법의 수행도가 기존의 방법에

비하여 최대 170% 향상된 수행도를 보였으며, 이를 통해 제안된 방법의 수행도가 기존의 방법에 비하여 매우 우수함을 확인하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 차축베어링 발열을 더 빠르고 민감하게 검지하여 차축 고장을 더 빨리 예측하기 위한 새로운 차축온도검지모니터링 방법을 제안하였다. 또한, 제안된 차축온도검지모니터링 방법의 성능을 비교·분석하기 위하여 과거 실제 사고 사례 데이터를 적용하여 각 방법들 간 수행도를 측정하여 분석 및 비교하였으며 그에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 비정상 차축 발열이 발생할 경우, 현재의 차축온도검지모니터링 방법에 비하여 더 민감하게 반응하는 지수가중이동평균(EWMA) 기법이 적용된 새로운 차축온도검지모니터링 방법의 적용을 제안하였으며 이를 통계적으로 설계하였다.
- (2) 새롭게 제안하는 차축온도검지모니터링 방법은 기존의 방법에 비하여 비정상 차축 발열이 발생할 경우, 매우 빠르고 민감하게 반응하였으며, 최대 170%의 좋은 수행도를 보였다.
- (3) EWMA 기법은 모집단의 정규성을 가정하지 않는다는 특성이 있다. 이러한 특성으로 인하여 새롭게 제안하는 차축온도검지모니터링 방법은 모집단의 분포를 고려할 필요가 없이 모든 대상에 적용이 가능하여 그 범용성과 활용성이 매우 뛰어나다.
- (4) 기존의 차축온도검지모니터링 방법이 이미 적용된 시스템에 쉽게 알고리즘 적용이 가능하므로 이식성과 호환성이 매우 우수하다는 장점이 있다.

추후 연구 방향으로는 본 연구에서 제안한 차축온도검지모니터링 방법에 대한 다양한 비정상 발열 패턴들(recurring cycle, increasing & decreasing trend, upward & downward shift, stratification)에 대한 상세한 수행도를 연구하고자 한다.

### References

- [1] E. Eisenbrand, "Hot box detection in European railway networks", RTR Special 2011, pp. 1-11, 2011.
- [2] Minister of Land, Infrastructure and Transport, 2015 Statistical Year Book of MOLIT. pp. 722-736, Huimun Printing Corp., 2015.
- [3] J. S. Choi, "Introduction of Hot Box Detector(HBD) technology trend of European railway network", Journal of Korean Society for Railway, pp. 21-26, 2012.
- [4] G. H. Choi, Y. H. Kim, S. M. Baik, G. S. Bing, "Study on the Utilization of HBD in the Conventional Speed-up Lines", Proc. of 2nd Conference on Korea Safety Management & Science, pp. 233-243, April, 2012.
- [5] X. Liu, M. R. Saat, C. Barkan, "Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates", Journal of the Transportation Research Board, pp.154-163, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.3141/2289-20>
- [6] D.C. Montgomery, Introduction to Statistical Quality Control 5th Edition. pp. 300-416, John Wiley & Sons. Inc., 2005.
- [7] S. W. Roberts, "Control Chart Tests Based on Geometric Moving Average", Technometrics, pp. 239-250, 1959.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1959.10489860>
- [8] E. P. Hong, C. W. Kang, H. W. Kang, "Development of CV Control Chart Using EWMA Technique", Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering, pp. 114-120, 2008.
- [9] Lu. C. W, M. R. Reynolds, "EWMA control charts for monitoring the mean of autocorrelated processes", Journal of Quality Technology, pp. 166-188, 1999.
- [10] J. M. Lucas, M. S. Saccucci, "Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", Technometrics, pp. 1-12, 1990.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/00401706.1990.10484583>

### 최 석 중(Seog-Jung Choi)

[정회원]



- 2000년 8월 : 건국대학교 산업대학원 산업공학과 (공학석사)
- 2011년 2월 : 우송대학교 일반대학원 경영학과(경영학박사과정)
- 2012년 6월 ~ 2014년 12월 : 안전본부 고속철도사고조사부장
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도공사 경영지원본부 기획조정실차세대 KOVIS 추진처 기술팀장

<관심분야>

철도차량관리, 신뢰성/RCM, 경영관리, 정보통신



김 문 흥(Moon-Hong Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국외국어대학교 대학원 무역학과(경영학석사)
- 2000년 2월 : 한국외국어대학교 대학원 무역학과(경영학박사)
- 1993년 3월 ~ 2006년 2월 : 우송정보대학 전자무역실무과 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 우송대학교 철도경영학과 교수

<관심분야>

경영전략, 국제경영, 마케팅, 철도경영, 유통 및 물류관리