

전기기관차 주요부품의 수명주기 설정 및 개선방안에 관한 연구

이덕구* · 이희성**†

A Study on the Life Cycle Establishment and Improvement of Main Parts for Electric Locomotive

Doek Koo Lee* · Hi Sung Lee**†

Corresponding Author

Hi Sung Lee

Tel : +82-2-970-6877

E-mail : hslee@seoultech.ac.kr

Received : November 18, 2020

Revised : January 6, 2021

Accepted : February 23, 2021

Copyright©2021 by The Korean Society of Safety All right reserved.

Abstract : The 8200-unit electric locomotive, which is a high-efficiency multipurpose electric locomotive, is a German model, namely BR152 series ES64F, and it is manufactured to suit the operating conditions in Korea. Since 2003, 83 locomotives have been introduced in Korea, and they have been operating in the general railway sector for both passenger and freight transport. Although more than 15 years have passed since their first introduction, owing to the characteristics of vehicles introduced overseas, responding promptly to failures has been difficult owing to problems related to factors such as transfer of technology and procurement of parts for maintenance. Furthermore, there have been difficulties in operating the locomotives on the basis of the manufacturer-recommended time-between-overhaul (TBO) cycle. Therefore, a new TBO should be determined. To support the development of a reliability-based maintenance system, this study conducted a reliability and TBO analysis by using failure data obtained from KOVIS, and future management measures are presented.

Key Words : traction motor, reliability centered maintenance, display screen, KOVIS, TBO

1. 서론

최근 들어 철도산업이 급속도로 발전함과 동시에 좁은 국토와 산이 많은 우리나라와 같은 지리적 특성은 오늘날 전기철도가 가장 우수한 교통수송 방식으로 인식되고 있다.

전기기관차는 전철화 초기에 1972년 차관에 의하여 처음 도입된 8000호대 구형 전기기관차 94량이 1973년 6월 20일부터 중앙선 청량리~제천간 전철화로 운행이 시작되었다. 세계적인 추세에 따라 지속적으로 발전하는 고속전철 운용과 기존선의 전철화에 대비하여 열차속도 향상을 위한 새로운 시스템의 차량 개발과 당시 국내의 운영환경에 적합한 차량 도입이 필요하게 되었다.

그 이후 8200호대 전기기관차는 독일 지멘스사에서 우리나라 운영환경에 맞추어 제작되어 2003년부터

2006년까지 55량, 2008년에 28량이 추가 도입되어 총 83량이 운행되어 현재 약 15년 이상 경과 되어 노후화가 진행되고 있으나 해외에서 도입된 차량으로 유지보수 측면에서 원천기술 이전이 완전히 이루어지지 않아 많은 어려움이 존재하고 있다. 또한 해외에서 도입된 시스템의 특징상 유지보수 부품의 조달 장기화 등으로 고장 시 신속한 대응에 어려움이 있다. 따라서, 국내 운영환경을 고려하여 운영 중인 신뢰성 기반 유지보수(RCM, Reliability centered maintenance)를 수행하는 것이 매우 중요하고 시급한 실정이다. 전기기관차 견인 전동기의 정비는 현재 부품수명주기인 TBO(Time between overhauls) 960,000 km(84개월, 7년)로 분해정비 및 교체를 시행중에 있어서 기존에 도입된 전기기관차가 모두 그 시점을 넘기고 있다. 따라서 외국에서 제시된 TBO 자료는 우리나라 현실에 적합하지 않을 뿐만 아니라, 현재 그 정보도 정확히 관리되고 있지 않

*서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 박사과정 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science & Technology)

**서울과학기술대학교 철도차량시스템공학과 교수 (Department of Rolling Stock System, Seoul National University of Science & Technology)

Table 1. Analysis of domestic railway accidents and delayed operations in the last 10 years

Year	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19
Accidents	317	277	250	232	209	138	124	105	98	72
Delayed	313	349	339	321	279	253	245	253	231	347
Vehicle fault	160	192	166	160	150	116	119	141	109	184
Others	74	65	110	99	86	98	67	51	67	87
Fault+other	234	257	276	259	236	214	186	192	176	271
Ratio	74.8	73.6	81.4	80.7	84.6	84.6	75.9	75.9	76.2	78.1

기 때문에 우리나라 특성 및 운영환경에 적합한 새로운 TBO를 산정할 필요가 있다.

현재 교통안전공단에서 관리하고 있는 철도안전정보종합관리시스템의 철도사고현황 분석 결과 Table 1과 같이 최근 10년간 철도사고의 경우 지속적으로 줄어들고 있고, 2010년에 비해서 77%가 감소되었다. 그러나 지연운행의 경우 2014년부터 다소 줄어들긴 하였으나 사고건수에 비해 크게 줄어들지 않고 있으며, 2019년의 경우 전년에 비해 50% 가량 오히려 증가하였다. 더구나 지연운행의 원인을 해석한 결과 현재 시스템상의 구분으로는 차량고장과 기차가 대부분 차량고장으로 해석해야 하는 부분으로 전체 지연운행의 80% 정도가 차량고장으로 인해 발생되어 유지보수가 얼마나 중요한지를 명확히 보여주고 있다.

특히 2014년에 발생한 상왕십리역 2호선 충돌사고¹⁾로 인해 477명의 인명피해가 발생하였고, 2011년에 발생한 광명역 KTX 열차탈선사고²⁾로 인해 객차 6량이 파손되는 등 잘못된 유지보수가 대형사고까지 연결될 수 있다는 것을 명확히 보여주고 있어 유지보수가 안전에 직접적으로 연결되고 있음을 보여주는 사례라고 할 수 있다.

본 연구에서는 전기기관차의 주요부품에 대한 실제 고장이력자료를 바탕으로 새로운 TBO로 제시함으로써 신뢰성을 확보하고 이를 지속적으로 관리하기 위한 유지보수정책 수립을 지원할 수 있는 방안을 제시하고자 한다. 이를 통하여 철도차량의 예방보전을 통하여 차량가용성 향상 및 전체 수명주기 동안 유지보수 절감에 크게 기여할 것으로 기대한다.

2. 선행연구 조사

황지환 등³⁾은 고속철도차량 견인전동기의 고장데이터를 분석하여 확률론적 특성을 평가하고, 하부구성품의 치명도를 고려한 신뢰도를 평가하였다. 그 결과 견인전동기의 새로운 TBO주기의 최소단위 계산은 Matlab

Program의 Optimization tool을 이용하여 계산하였으며, 계산된 최적주기의 값은 225만km(현재 250만km)로 결과 값을 도출하여 제시하였다.

정진태 등⁴⁾은 RCM을 이용한 고속차량 부품의 완전분해정비주기에 대한 최적화 방안 연구를 진행하였으며, 구동장치의 신뢰성분석 및 샘플링검사를 통하여 주기최적화를 제안하였다. 유기적인 연관이 있는 구성품은 시스템에 미치는 영향을 고려하여 정비주기를 산출하여, 구동장치의 TBO주기는 TM과 MRU의 주기는 하나로 통합하고 ARU는 차륜과 축상베어링의 정비에 상호 영향을 감안하며, Tripod는 TM, MRU, ARU 작업시 마다 차량에서 취거, 취부해야 하는 특성을 감안하여 TM(현재 250만km), MRU(현재 180만km), Tripod(현재 200만km)는 210만km으로, ARU(현재 180만km)는 280만km로 제안하였다.

심대섭 등⁵⁾은 구름접촉피로(RCF) 시험기에 운행거리별로 채취된 그리스를 충전 한 후 시험편에 결함이 발생하는 시점을 파악하는 실험을 수행하여 운행거리별 그리스 특성 변화를 분석하였고, 각각의 그리스 샘플에서 베어링의 특성에 영향을 줄 수 있는 이물질 중의 하나인 철분(Fe) 함유량을 측정하여 운행거리와의 상관관계를 비교분석하였다. 그 결과 RCF 시험편의 피로파괴 수명이 운행거리에 반비례하여 뚜렷이 감소하는 경향이 관찰되어 현재 운행거리에 따라 윤축베어링의 분해정비주기를 설정한 KTX 윤축베어링의 분해정비주기 140만km는 타당한 것으로 판단하였다.

정진태, 김철수⁶⁾는 1차 구동장치인 모터감속기와 견인전동기의 실제 유지보수 정비이력으로부터 두 구성품에 대한 고장결함나무 분석을 수행하고, 각 하부부품들의 치명도를 고려한 고장률을 각각 평가하였다. 두 구성품에 대한 최적의 동일한 완전분해 정비주기는 기존의 총 예방정비 비용을 감소하기 위하여 유전자 알고리즘으로부터 얻었으며, 유전자 알고리즘에 의한 최적의 동일한 완전분해 정비주기는 225만km로 산출되었으며, 기존(MRU 180만km, TM 250만km) 방법의 총비용과 비교하여 약 14% 감소됨을 제시하였다. 그로인하여 비용 최소화를 위한 철도차량 유지보수 주기 최적화에 유지보수 Data 분석을 통하여 휴리스틱 기법인 유전자알고리즘의 적용 실효성을 확인함으로써 TBO관리 체계를 명확화 할 수 있는 기반을 마련하였다.

김인섭⁷⁾은 최근 5년간에 가장 많이 검수된 5종류 댐퍼에 대한 프랑스 국영철도회사인 SNCF에서 제시한 적정 교체주기에 대하여 Minitab을 이용하여 데이터를 분석하여 TBO를 산출 하였다. 객차 횡댐퍼는 기존 150

만km 보다 빠른 978,141 km로, 동력차 1차 수직댐퍼는 기존 150만km 보다 빠른 897,605 km로, 객차 요댐퍼는 기존 200만km 보다 빠른 1,192,665 km로, 차체간 하부댐퍼는 기존 150만km 보다 빠른 903,380 km로, 객차 1차 수직댐퍼는 기존 150만km 보다 빠른 634,059 km로 각각 적정 TBO로 산출되었으며, 새로 산출된 현실적 TBO를 기준으로 부품의 적정성을 파악하고 RCM 기반의 효율적 검수인 예방정비에 기여하고자 하였다.

최용각⁸⁾은 도시철도차량 인버터장치의 신뢰성분석을 통한 적정 사용수명과 관련하여 운영기관이 적정 사용수명을 판단하는 모델을 연구하였다. 경제성을 고려하여 차량수명이 30년으로 가정하였을 경우 차량도입 후 15년에 인버터장치를 신제품으로 교체하는 것이 경제적으로 유리하다는 것이 정량적으로 도출하였으며, 인버터장치를 교환하지 않고 수리하여 재사용하여 차량수명 30년 동안 사용하는 것보다 약 213억원의 비용 절감된다는 것을 알 수 있었다.

Table 2. Comparison with preceding studies and improvements in this study

Author's name	Key content and problems	Improvements
JiHwan Hwang	Performing a TBO analysis using failure data simply by evaluating the criticality and reliability of high speed rail vehicles	Criticality and reliability evaluation of high-speed railway vehicles simply presenting the optimal TBO period and suggest improvement plans for setting the period
JinTae Jung, ChulSu Kim	Proposal of the optimal TBO method for high speed vehicle components and a period calculation method using sampling method	Analysis of the current status and presentation of solutions to problems for RCM fulfillment
Dae Sop Sim	Measurement of the content of iron (Fc) and comparative analysis of correlation with distance traveled, resulting in insufficient analysis of actual analysis	Analysis and suggest of improvement plan through actual failure data
JinTae Jung, ChulSu Kim	Simulation based on a theoretical basis is carried out with optimal TBO cycle analysis through FTA analysis of high speed vehicles.	Analysis and suggest of improvement plan through actual failure data
In-Sub Kim	Selection of replacement cycle through reliability analysis results and comparative analysis of European standards for oil damper	Failure analysis and selection of replacement period for traction motor
Yong Kak Choi	The proper service life of the inverter device was presented, but the current status analysis for performing RCM is insufficient	Analysis of the current status and presentation of solutions to problems for RCM fulfillment

상기와 같이 철도차량과 관련된 부품수명주기 설정에 대하여 여러 전문가에 의해 연구활동이 수행되었으며, Table 2는 본 연구의 기존 선행연구 사례와의 비교하여 개선사항을 분석하여 나타낸 자료이다. 이에 본 연구에서는 철도공사에서 관리하고 있는 고장 데이터를 바탕으로 신뢰성 분석 및 TBO분석을 통해 정확한 수명주기 설정 방안을 제시하고자 한다.

3. 이론적 배경

3.1 주요 용어 정리

본 연구논문에서 사용되는 주요 용어를 정리하면 아래와 같다.

- 8200호대 : 한국철도공사에서 운용중인 전기기관차로서 독일의 오이로슈프린터를 기반으로 제작된 열차로 구형 8000호대 차량 사용완료를 앞두고 대체할 동력차의 필요성과 주요 간선 전철화 및 고속화에 따른 새로운 전기기관차가 도입됨
- ARU(Axle Reduction Unit) : 차축 감속 장치
- MRU(Motor Reduction Unit) : 모터 감속 장치
- KOVIS(Korail Vision Innovation System) : 한국철도공사에서 운용중인 전사적자원관리시스템
- MTTF(Mean Time To Failure) : 고장날 때 까지 걸리는 평균시간
- MVB(Multifunction Vehicle Bus) : 철도차량 내 통신으로써 차량통신 네트워크를 구축하는데 필요한 인터페이스 역할
- RCM(Reliability Centered Maintenance) : 유지보수를 수행함에 있어 신뢰성 분석방법을 활용한 최적 유지보수 전략
- SNCF(Société Nationale des Chemins de fer Français) : 프랑스 국유철도로써 프랑스 전국의 철도망을 총괄하는 철도운영법인
- TBO(Time Between Overhaul) : 부품의 완전히 분해하여 검사 후 교체 및 수리가 필요한 부품에 대해 수리하는 분해주기
- TM(Traction Motor) : 전기에너지를 기계에너지로 바꾸어 주는 장치
- VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) : 가변 제어 가변주파수 제어방식으로 인버터 등의 교류 전력을 출력하는 전력변환장치에 두어 출력되는 전력의 실효 전압과 주파수를 임의로 가변 제어하는 기술
- 위수 : 전기기관차의 견인전동기가 4대 설치되어

있으며, 운전실을 기준으로 하여 견인전동기 설치 위치를 1위~4위 까지 표시

3.2 8200호대 전기기관차 시스템

3.2.1 8200호대 전기기관차

8200호대 전기기관차는 8000호대 구형 전기기관차를 대체하기 위하여 독일 지멘사에서 유로스프린터 (Europrinter) 2세대 화물형인 ES64F(도이체반 152계)를 원형으로 우리나라의 운용 환경에 맞추어 제작된 기관차이다. VVVF 인버터 제어방식인 SIBAS32 계열의 전장품을 사용하였으며, 1,300 kW급 교류전동기 4Set로 량당 5,200 kW 수준의 출력이 가능하다.

2003년부터 2006년까지 총 55량이 도입되었으며, 이후 2008년까지 28량이 추가로 도입되어 현재는 전체 83량으로 경부선, 호남선, 충북선 등의 노선에 투입되어 운행되고 있다. 8200호대 전기기관차의 일반도는 Fig. 1과 같다⁹⁾.



Fig. 1. 8200 electric locomotive general diagram.

3.2.2 견인전동기 특성 및 유지보수사항

8200호대 견인전동기는 차량의 추진력을 위해 사용되는 전동기로 전기기관차 1량에 4대의 견인전동기가 취부되어 운행되고 있다. 3상 비동기 유도전동기를 사용하며 회전자 적층 철심, 고정자 권선 및 절연 시스템 등으로 구성된다. 8200호대 견인전동기의 일반도는 Fig. 2과 같다⁹⁾.



Fig. 2. 8200 electric locomotive traction motor.

전기기관차 견인전동기는 유지보수 시 40,000 km(4개월) 단위로 수행하는 경정비3, 240,000 km(22개월) 단위로 수행하는 경정비8, 960,000 km(6~7년) 단위로 수행하는 중정비6으로 나눌 수 있으며, 유지보수에 관한 자세한 내용은 Table 3과 같다¹⁰⁾.

Table 3. Maintenance points for traction motor

Main. cycle	Operating dist(km) (Time)	Maintenance criteria
Light maintenance 3	40,000 (4Month)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Check external damage and bolt tightening after cleaning traction motor
Light maintenance 8	240,000 (22Month)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Check the hemispheric (N-end) polewheel and speed sensor for damage and security ○ Check for loosening of the drive side pinion fixing bolt ○ Inspect power cable terminal tightening conditions and damage in terminal box ○ hemispherical bearing re-smoothing
Light maintenance 6	960,000 (7Year)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Demolition maintenance of traction motor - Replace drive side (D-end) and hemispherical (N-end) bearings (replace bearing shields if necessary) - Cleaning and insulation reinforcement of traction motor exterior, fixings, rotators - Insulation resistance measurement and end-voltage test - No-load rotational test and vibration, noise measurement

3.2.3 운전실 화면표시기 특성 및 유지보수사항

운전실 화면표시기는 MVB 통신을 기반으로 전기기관차의 중앙제어장치에 연결되며, 운전 및 차량 진단 데이터에 대한 정보를 그림이나 텍스트로 현시하여 기관사와 유지보수 담당자에게 정보를 제공하는 역할을 수행하며, 특별한 경우 기관사에게 음향 신호로 경고를 주는 기능을 수행한다. 8200호대 운전실 화면표시기의 일반도는 Fig. 3과 같다⁹⁾.



Fig. 3. Display screen traction motor.

Table 4. Maintenance points for display screen

Main. cycle	Operating dist(km) (Time)	Maintenance criteria
Basic maintenance	5000 (5Day)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Check the status of the display (MMI) (Functional Test)
Light maintenance 3	480,000 (42Month)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Decomposition and cleaning of the display and replacing the backlight
Light maintenance 6	960,000 (7Year)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Central Control Unit Screen Indicators(MMI) disassembly

운전실 화면표시기는 유지보수 시, 5,000 km(5일) 단위로 수행하는 기본정비, 480,000 km(42개월) 단위로 수행하는 중정비3, 960,000 km(7년) 단위로 수행하는 중정비6으로 나눌 수 있으며, 유지보수에 관한 자세한 내용은 Table 4와 같다¹⁰⁾.

3.3 TBO 분석 절차

TBO는 부품을 완전히 분해하여 검사한 후 교체 및 수리가 필요한 부품에 대하여 정비를 수행하는 교체주기 시점으로 부품들의 운영환경 및 특성을 반영한 적절한 교체주기를 기반으로 시스템의 경제적, 효율적 관리에 큰 영향을 미친다.

일반적으로 고장이력자료(혹은 유지보수자료)를 수집하고 정리하여 신뢰성 분석을 수행한 후, 고장률이 증가하는 부품을 대상으로 사후 및 예방정비 관련된 정보를 수집하여 적절한 TBO를 산정하며, 고장률이 증가하지 않는 감소형, 일정형, 혼합형인 부품들의 경우 신뢰성 특성값인 평균수명 및 백분위수명 결과를 TBO 대안으로 추천하여 향후 현장 경험치와 비교하여 적절한 값을 TBO로 산정하도록 제안한다.

본 연구에서 전기기관차의 주요부품을 대상으로 운영환경 및 특성을 반영하고 있는 필드데이터인 고장이력자료를 수집하고, 해당 고장이력자료를 기반으로 신뢰성 분석을 수행한 결과, 분석대상품의 고장률의 형태가 모두 혼합형임을 알 수 있다. 따라서 향후 경험치와 비교하여 적절한 값을 TBO로 활용할 수 있도록 평균수명 뿐만 아니라 누적고장확률이 1%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%인 분위수값을 산출하여 제시하였다. 전체적인 TBO 산정 절차는 Fig. 4와 같다.

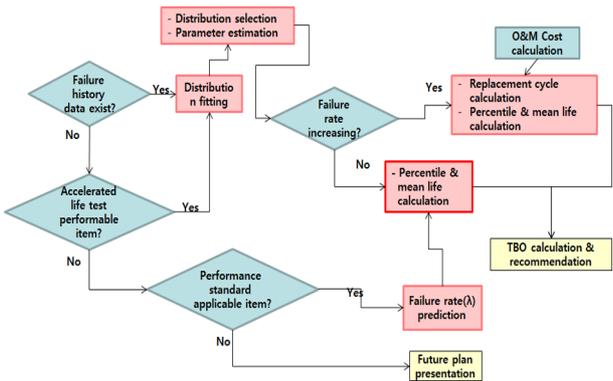


Fig. 4. TBO Calculation procedure.

운행중이던 차량에 고장이 발생하였거나, 미리 부품을 교체하는 경우 소요되는 비용은 보전을 대기하기 위해서 또는 보전하기 위하여 비가용 상태에 머무는

시간 그리고 보전하기 위해 소요되는 자원수에 의해 결정된다. 유지보수 시 소요되는 비용은 주행 중 고장이 발생하여 부품을 교체하는데 소요되는 사후보전비용(C_f)과 고장이 발생하기 전 미리 부품을 교체하는 비용인 예방보전비용(C_p)로 구분되며, 부품의 고장이 마모로부터 유발된다면 사후보전비용이 예방보전비용보다 더 크며, 그 이유는 다음과 같다.

- 사후보전은 우발적으로 발생하기 때문에 즉각적으로 대비하기 어려워 오랜 기간을 대기하며, 예방보전의 경우 미리 정해진 기준에 따라 보전을 수행하기 때문에 대기시간이 적어진다.
- 사후보전 시, 고장난 부품의 교체가 정상적인 부품의 교체보다 더 힘들며, 다른 부품의 고장 또한 유발할 수 있기 때문에 예방보전에 비하여 사후보전 시 오랜 시간과 높은 비용이 소요된다.
- 사후보전에 소요되는 시간에 의해 발생하는 기회비용은 예방보전에 소요되는 시간에 의해 발생하는 기회비용보다 더 크다.
- 운행 중 고장난 부품을 보수하기 위해서는 가외의 자원을 필요로 한다.

단위 비가용기간당 기회비용을 산출할 수 있는 경우, 사후보전 및 예방보전 시 소요되는 총비용은 식(1)과 식(2)에 의해 산출할 수 있다.

$$C_f = \text{사후보전에 따르는 단위 비가용기간당 기회비용} \times \text{장비 비가용기간} + \text{사후보전 시 직접 소요되는 비용(인건비+재료비 등)} \text{----- (1)}$$

$$C_p = \text{예방보전에 따르는 단위 비가용기간당 기회비용} \times \text{장비 비가용기간} + \text{예방보전 시 직접 소요되는 비용(인건비+재료비 등)} \text{----- (2)}$$

위와 같은 내용을 바탕으로 유지보수 시 소요되는 단위주행거리(시간)당 비용인 아래 식(3)을 최소화하는 시점(T)을 교체주기로 산출하며, 이 값을 TBO로 산정한다.

$$C(T) = \frac{C_f[1 - R(T)] + C_p R(T)}{\int_0^T R(x) dx} \text{----- (3)}$$

여기서, $R(T)$ 는 고장이력자료에 적합한 분포의 신뢰도 함수이다. 참고로 T시점에서 분자의 경우 고장날 확률×사후보전 비용과 고장 나지 않을 확률×예방보

전비용의 의미이며, 분모의 경우 T시점까지 고장 나지 않을 확률의 적분 값을 의미한다. 또한 고장날때까지 걸리는 시간의 평균값인 MTTF(Mean Time To Failure)는 $\int_0^{\infty} R(x)dx$ 와 같이 계산한다.

4. 신뢰성분석 데이터 수집 및 정리

4.1 신뢰성분석 데이터 수집

전기기관차의 견인전동기와 운전실 화면표시기에 대한 분석자료를 철도공사 전사적자원관리시스템인 KOVIS에 입력되어 관리하고 있는 데이터 중 최초설치일부터 2019년 3월 4일까지 견인전동기와 운전실 화면표시기의 고장이력자료에 대한 정보를 Table 5와 같이 수집하였다.

견인전동기의 경우, 차량 1대당 4위수에 설치가 되며 1위수 당 1대씩 설치된다. 분석대상품은 모두 8200호대 차량을 대상으로 하고 있으나, 견인전동기의 경우 8256호 차량 이전의 차량의 경우(8251~8255호) 고장이력자료가 제대로 수집되지 않아 분석에 한계가 존재하므로 고장이력자료가 정확히 수집된 8256호 차량부터 8283호 차량을 대상으로 총 210건의 자료를 수집하였다.

운전실 화면표시기의 경우, 차량 1대당 2위수에 설치되며 1위수 당 1대씩 설치된다. 운전실 화면표시기는 견인전동기와 다르게 8200호대 전 차량의 고장이력자료인 520건을 자료를 수집하였다.

Table 5. General vehicle failure data status

Equipment name	Number of data	Initial installation data	Location	Train type
Traction motor	210	2008-09-19	1,2,3,4	8200 Series (8256~8283)
Display screen	520	2003-12-26	1,2	8201 Series (8201~8283)

4.2 신뢰성분석 가능한 형태 자료 정리

견인전동기와 화면표시기의 고장이력자료를 신뢰성 분석이 가능한 형태로 정리하였다. 견인전동기의 경우, 8263호 차량의 고장이력을 살펴보면 1,2,3위수에서 고장이력이 존재함을 알 수 있으며 4위수에 설치된 견인전동기는 분석종료 시점까지 고장 없이 운행하고 있음을 알 수 있다. 따라서 무고장데이터 입력 시, “고장구분”란은 관측중단을 의미하는 “s”를 기입하며 “빈도”란은 총 4대 견인전동기 중 1대가 고장 없이 운행 중이므로 “1”을 입력한다. “기간 주행키로”는 고장이 발생하지 않았으므로 8263호 차량의 총 누적주행거리와 동일한 “1649011.6”을 입력하였다. 또한, 고장이력 자

Table 6. Reason code for disassembly of traction motor

Code	Contents
1	Change interval
2	Functional defect
3	Parts breakdown
4	Abrasion
5	Lost
6	Maintenance
7	Test
8	Change type
9	Other matters
10	Improvement
11	Oil leak

료에서 유지보수 수행을 위해 부품분해 시, 분해사유는 Table 6과 같이 11가지 종류로 구분하여 사유를 표기하고 있다.

5. 분석대상 신뢰성 분석

전기기관차의 분석대상품인 견인전동기와 운전실 화면표시기의 고장이력자료를 수집하고, 자료 형태 파악하여 이상자료를 분류하였으며, 신뢰성분석이 가능한 형태의 고장이력자료를 기반으로 신뢰성 분석을 수행하기 위한 분석 절차와 신뢰성 분석 결과인 수명분포 적합, 백분위수명 및 평균수명을 산출하여 기술하였다. 또한, 고장률 형태를 파악한 후 TBO 분석 대상 유무를 기술한다. 신뢰성 분석을 수행하기 위하여 “Minitab”과 “Weibull++”을 활용하였다.

5.1 신뢰성 분석 절차

견인전동기와 운전실 화면표시기의 획득된 고장이력 데이터를 바탕으로 일반적인 신뢰성 분석을 위해 아래 Fig. 5와 같은 절차를 거쳐 수행하였으며, 조유희 등¹¹⁾이 제시한 신뢰성 관리체계 관리방안에 대해서 참고하였다.

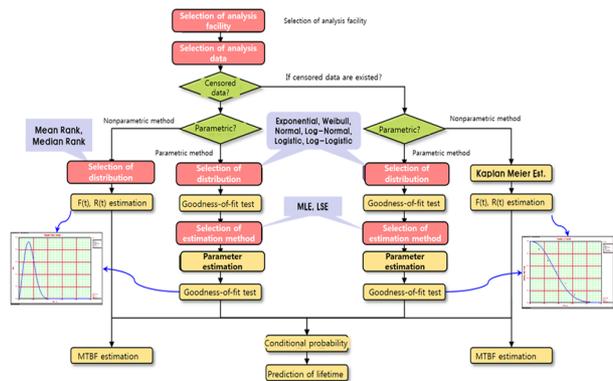


Fig. 5. Reliability Analysis Process.

5.2 견인전동기 신뢰성 분석결과

견인전동기의 경우 상기 절차에 의거 분석한 결과 분포적합은 신뢰성 분석 툴인 Weibull++7을 이용하여 11개 분포 중 Anderson-Darling값이 가장 작은 2-그룹 Weibull 분포가 적합 되었으며, 2-그룹 Weibull 분포를 적용하였을 때 적합도 평가 지수인 Kolmogorov-Smirov (KS Test) 결과는 7.77%로 Fig. 6과 같으며 해당 값은 “0”에 가까울수록 선택한 분포가 적합하다고 판단하므로 견인전동기 주행거리를 2-그룹 Weibull 분포에 적합 시 대체로 적합한 것으로 판단되며 이를 기반으로 신뢰성 분석을 수행하였다.

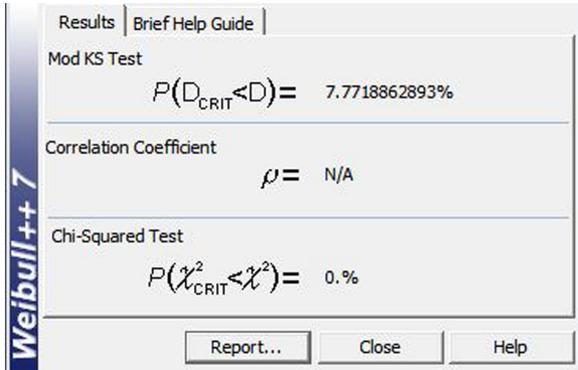


Fig. 6. Distribution fitting result for traction motor.

2-Group 와이블분포가 최적의 분포로 적합되었으며, 각 분포에 대한 형상모수와 척도모수는 아래 Table 7 과 같다.

Table 7. Parameter estimation result for traction motor

Fitting Distri.	Classify	Parameter	Estimator
2-Group Weibull Distribution	1-Group (0.7070)	Shape Para.	0.9370
		Scale Para.(km)	1,775,800
	2-Group (0.2930)	Shape Para.	6.3771
		Scale Para.(km)	876,960

이 결과를 바탕으로 평균수명과 백분위 수명을 분석한 결과, 평균수명은 1,532,700 km(약 11.8년)이며, 백분위수는 아래 Table 8과 같은 결과를 얻었다.

Table 8. Percentile for Traction Motor(km, year)

B ₁ life	B ₅ life	B ₁₀ life	B ₂₀ life	B ₃₀ life
19,003 (0.1)	109,250 (0.8)	238,420 (1.8)	515,090 (4.0)	695,350 (5.3)
B ₄₀ life	B ₅₀ life	B ₆₀ life	B ₆₇ life	B ₇₀ life
808,180 (6.2)	906,770 (7.0)	1,041,800 (8.0)	1,328,500 (10.2)	1,506,600 (11.6)

5.3 운전실 화면표시기 신뢰성 분석결과

화면표시기의 경우도 견인전동기와 동일하게 Anderson-Darling값이 가장 작은 2-그룹 Weibull 분포가 적합 되었으며, 2-그룹 Weibull 분포를 적용하였을 때 적합도 평가 지수인 Kolmogorov -Smirov(KS Test) 결과는 3.59%로 Fig. 7과 같으며 해당 값은 “0”에 가까울수록 선택한 분포가 적합하다고 판단하므로 견인전동기 주행거리를 2-그룹 Weibull 분포에 적합 시 대체로 적합한 것으로 판단되며 이를 기반으로 신뢰성 분석을 수행하였다.

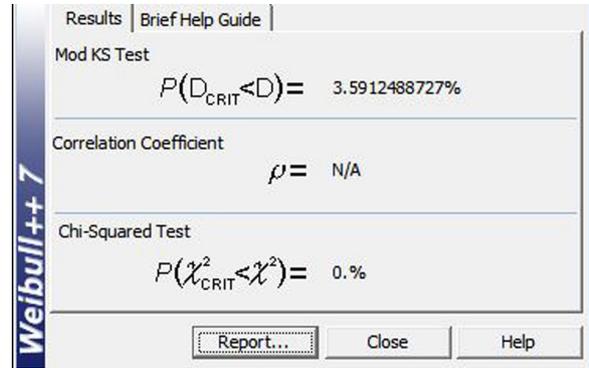


Fig. 7. Distribution fitting result for display screen.

운전실 화면표시기의 경우 상기 절차에 의거 분석한 결과 2-Group 와이블분포가 최적의 분포로 적합되었으며, 각 분포에 대한 형상모수와 척도모수는 아래 Table 9와 같다.

Table 9. Parameter estimation result for traction motor

Fitting Distri.	Classify	Parameter	Estimator
2-Group Weibull Distribution	1-Group (0.4132)	Shape Para.	0.7968
		Scale Para.(km)	216,390
	2-Group (0.5868)	Shape Para.	2.2086
		Scale Para.(km)	1,558,500

이 결과를 바탕으로 평균수명과 백분위 수명을 분석한 결과 평균수명은 911,580 km(약 7.0년)이며, 백분위수는 아래 Table 10과 같은 결과를 얻었다.

Table 10. Percentile for traction motor(km, year)

B ₁ life	B ₅ life	B ₁₀ life	B ₂₀ life	B ₃₀ life
2,059 (0.02)	16,543 (0.1)	43,092 (0.3)	126,290 (1.0)	270,120 (2.1)
B ₄₀ life	B ₅₀ life	B ₆₀ life	B ₆₇ life	B ₇₀ life
499,730 (3.8)	774,860 (6.0)	1,046,200 (8.0)	1,235,500 (9.5)	1,318,700 (10.1)

5.4 신뢰성 분석결과 해석

전기기관차 분석대상품의 고장이력자료를 수집하여 신뢰성 분석이 가능한 형태로 자료를 정리하여 신뢰성 분석을 수행한 후, 고장률 형태를 파악하였다. 고장률이 증가하는 형태를 가지는 경우 시간이 지남에 따라 부품이 노후화되는 마모성을 띄는 부품이며 이를 대상으로 TBO 분석이 가능한 부품으로 분류할 수 있으나, 분석대상품인 견인전동기와 운전실 화면표시기의 경우 Mixed-2Group Weibull 분포로서 두 가지 형태의 Weibull 분포가 혼합된 형태이므로 TBO 분석이 가능한 품목으로 분류할 수 없다. TBO는 완전분해정비주기를 의미하며, 교체 및 수리가 필요한 부품에 대하여 정비를 수행하는 교체주기 시점으로 고장률이 증가하는 형태인 즉, 마모성을 가지는 부품을 대상으로 적용하기 때문이다.

따라서 전기기관차 견인전동기와 화면표시기의 신뢰성 분석을 수행한 결과, Mixed 2-Group Weibull 분포로 고장률이 혼합형인 형태로 TBO 분석 대상으로 선정할 수 없으므로 신뢰성 분석 결과를 기반으로 평균수명 및 백분위수명을 산출하여 TBO값으로 추천하며, 견인전동기의 경우, 평균값인 1,532,700 km(약 11.8년), 운전실 화면표시기의 경우, B_{70} 인 1,318,700 km(약 10.1년)을 TBO주기로 추천한다.

6. TBO 분석을 위한 개선방안

6.1 분석 데이터 관리

현재 철도공사에서 관리하고 있는 KOVIS의 RCM 시스템 내 견인전동기의 유지보수자료를 기반으로 신뢰성 분석을 수행 후 TBO 산출을 수행함에 있어 몇 가지 사항으로 인하여 정확한 TBO 산출에 한계가 존재하였다.

첫째, 실제 운행기간동안 고장발생 데이터 수집결과 Table 5와 같이 전체 운행기간 동안 발생된 고장 데이터를 수집하였으나, 정확히 신뢰성 분석을 위한 형태로 관리되고 있지 않아 분석 과정에서 수작업을 통해 보정작업을 거쳤으며, 이 과정에서 일부 오류가 발생하여 정확한 TBO값 산정에 오차가 발생한 것으로 판단된다.

둘째, 유지보수에 소요되는 정확한 비용 정보를 알 수 없다는 점이다. TBO는 사후 및 예방보전 시 소요되는 장비, 인력 그리고 비가용 기간에 대한 기대비용을 최소화하는 교체주기를 의미하는 것으로 보다 정확한 비용정보가 존재할 시 정확한 분석 결과를 알 수 있으나 현재로서는 해당 정보를 획득하기 어렵기 때문에 본 연구에서는 사후정비 대 예방정비 비용 비율을 가

정하여 교체주기를 산정하였고 이는 보수적인 분석으로써 정확한 운영환경을 반영하였다고 볼 수는 없다. 또한 이러한 문제점이 발생 되는 이유 중 하나는 KTX 차량의 유지보수를 관리하는 KOVIS의 RCM 시스템에서 유지보수비용에 관한 정보를 고려하고 있지 않은 점 또한 이유가 된다.

6.2 분석 Process 구축 필요

철도산업의 경우 현재 일일생활권에 도입한 시대에서 많은 이용객이 활용하는 주요한 운송수단 중 하나임에도 불구하고 유지보수자료 관리에 있어서 이를 개선하기 위한 노력이 미흡한 현실이다. 특히 철도안전법에 의거 지속적인 신뢰성분석을 통하여 유지보수 활동을 수행하도록 법적으로 명시하고 있으나 대부분의 운영사의 경우 신뢰성 분석의 개념 부족과 초기부터 신뢰성 분석을 위한 데이터 정리 부족으로 제대로 된 신뢰성 분석을 수행하지 못하고 있는 것이 현실이다. 철도공사의 경우도 KTX가 도입된 지 10년 이상이 지났지만, 현재까지 국내 실정에 적합한 교체주기가 존재하지 않으며 이를 선정하기 위한 다양한 연구에도 불구하고 분석에 기본이 되는 유지보수자료 획득의 어려움이 존재하고 있다.

항공기 운영사에서는 TBO에 대한 중요성이 과거 30~40년전부터 인식하고 이를 수행하기 위한 제반 활동을 꾸준히 수행하여, 분석에 필요한 데이터 관리 및 유지보수 활동비용까지 시스템적으로 관리함으로써 고도화된 RCM 시스템을 개발하여 운영하고 있다. 이를 통하여 정확하고 자세한 유지보수자료를 이용한 현실적인 분석이 가능하며, 더 나아가 RCM 관련하여 다양한 분석 또는 예측을 통한 재고량 관리까지 하나의 시스템으로 관리할 수 있는 여건을 구축하였다.

이 시스템에서는 5장의 Fig. 5의 신뢰성 분석을 위한 Process를 내부적으로 만들어 통계적으로 필요한 모든 절차의 모듈을 개발하고, 이를 이용하여 분석할 수 있도록 기능을 구축함으로써 분포적합을 통해 필요 통계량을 계산하고, 그 결과를 이용하여 잔여수명, 기대수명 뿐만 아니라 재고량 관리까지 예측할 수 있도록 함으로써 장기적인 운영에 필요한 정보를 정확하게 생산할 수 있는 여건을 만들어 활용하고 있다.

6.3 빅데이터 분석을 위한 장기적 준비필요

최근 들어 모든 산업분야에 가장 큰 이슈중 하나는 4차 산업 혹은 빅데이터 분석이다. 의료, 항공, 플랜트, 발전산업에서는 빅데이터 분석을 수행하기 위한 많은 노력들이 진행되고 있고, 일부에서는 서서히 노력의

결실을 보고 있는 시점에 도달해 있다. 그러나 철도의 경우 아직은 빅데이터 분석을 위해서는 많은 준비가 필요한 것이 현실이다.

최근 들어 국토교통과학기술진흥원 등에서 연구되었거나 진행 중인 연구과제의 대부분은 각종 센서를 통해 실시간으로 들어오는 수 많은 데이터를 분석(빅데이터 분석에서 가장 기본적인 분석 방법인 데이터마이닝, 머신러닝 혹은 딥러닝 등의 방법을 활용)하고 그 결과를 바탕으로 설비 혹은 차량의 고장을 예측함으로써 체계적인 유지보수 및 사고를 미연에 방지하고자 하는 시스템의 개념위주로 고장을 예측하기 위한 데이터가 존재하지 않은 현실에서 정확한 예측 모델링 없이 단순 데이터처리 정도의 수준에 그치고 있다. 따라서 고장예지를 위한 장기적 관점에서 고장 데이터를 수집하고, 이를 이용한 지속적인 고장모델링 즉 데이터마이닝 적용방법 및 머신러닝이나 딥러닝 등의 기법 적용을 위한 구체적 방법을 정리하여야만 정확한 빅데이터를 통한 고장예지가 되리라 판단한다.

7. 결론

신뢰성 분석 결과, 사후 및 예방정비 비용을 고려하였을 때 전체 유지보수비용을 최소화 하는 시점을 교체주기 즉 TBO로 산출한 결과 적합된 분포가 Mixed Weibull 분포로 전기기관차 견인전동기와 화면표시기는 TBO 분석 가능 품목으로 분류할 수 없으며, 이와 같은 경우 신뢰성 분석 결과인 평균수명 및 백분위수명을 TBO 대안으로 제시하여 적절한 값을 교체주기로 제안하였다.

현재 견인전동기의 경우, 평균수명인 1,532,700 km (11.8년)을 TBO로 추천하며, 운전실 화면표시기의 경우, B70수명인 1,318,700 km(10.1년)을 TBO로 추천하고 있으나, 향후 현장 관리자 및 관계자들의 경험을 반영하여 분석 결과 중 실제 부품의 운영과 가장 적합한 주기를 TBO로 산정하여 활용할 수 있다.

본 연구를 통해서 고장이력자료 수집 및 정리, 신뢰성 분석 방안, TBO 산정 방안 등 전반적인 전기기관차 분석대상품의 신뢰성 분석 과정은 향후 유지보수자료 관리 체계 수립 시 하나의 참고 자료로 활용될 수 있다. 또한, 현재 선정된 분석대상품의 고장률의 형태는 혼합형으로 보다 구체적인 TBO 분석 대신 신뢰성 분석 결과를 TBO 대안으로 추천하였지만, 연구 과정 중 신뢰성 분석이 가능한 유지보수자료 형태를 제시함으로써 향후 수집되는 고장이력자료를 이와 같은 형태로 정리하고 수집한다면 정확한 자료를 기반으로 본 연구

의 결과보다 사후 및 예방 정비 비용을 고려하여 총 수명주기비용을 최소화할 수 있는 보다 구체적인 TBO 분석이 가능할 것이다.

References

- 1) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Railway Accident Investigation Report, Report Number : APAIB/R 2014-8, Aviation and Railway Accident Investigation Board.
- 2) Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Railway Accident Investigation Report, Report Number : APAIB/R 2011-2, Aviation and Railway Accident Investigation Board.
- 3) J. H. Hwang, J. T. Jung and C. S. Kim, "Evaluation of Optimal Time Between Overhaul Period of the Traction Motor for High-Speed Railway Vehicle", Proceedings of The Korean Society of Railway Spring Conference(in Korean), 2016.
- 4) J. T. Jung and C. S. Kim, "A Study on Evaluation of the Economic Overhaul for Transmission of the High Speed Train", Proceedings of The Korean Society of Railway Spring Conference, pp. 1209-1304, 2015.
- 5) D. S. Sim, T. H. Heo, Y. I. Park, H. S. Kim, K. H. Shin and S. K. Cheong, "Estimation of the Overhaul Cycle Time for KTX Wheelset Bearing by RCF Test", J. Korean of Soc. Saf., Vol. 31, No 1, pp. 13-18, 2016.
- 6) J. T. Jung and C. S. Kim, "Evaluation of Optimal Time Between Overhaul Period of the First Driving Devices for High-Speed Railway Vehicle", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 16, No. 12 pp. 8700-870, 2015.
- 7) I. S. Kim, "A Study on the Conformity of KTX Oil Damper TBO", Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2015.
- 8) Y. K. Choi, "A Research on the Optimal Service Life of Inverter System in EMU", Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2019.
- 9) KORAIL Human Resources Development Institute, "Textbook of 8200 Type Electric Locomotive", 2014.
- 10) KORAIL, Rules for Maintenance of Rolling Stock, 2018.
- 11) Y. H. Cho, H. W. Lee, J. W. Kim and J. M. Yans, "Development of Reliability Management System for Vehicle Component in Korea Railway Corporations", Journal of Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 43, No. 4, pp. 267-275, 2019.