

스위치 타이 탬퍼 작업주행용 카르단 샤프트의 고장 데이터 분석에 의한 교환주기 예측

홍영선, 최용은, 오효석, 김재문*
한국교통대학교

Prediction of Exchange Cycle by Analysis of Failure Data of Cardan Shaft for Switch Tie Tamper Working Driving

Young-Seon Hong, Yong-Eun Choi, Hyo-Seok Oh, Jae-Moon Kim*
Korea National University of Transportation

요약 선로보수 장비는 특수목적용 철도차량으로 여객과 화물을 안전하게 수송할 수 있도록 선로, 구조물 등 철도 시설물의 유지보수 업무를 수행한다. 선로보수 장비의 고장은 철도 운송에 있어 직접적인 피해를 유발할 수 있으므로 적절한 신뢰성 기반의 유지보수를 수행하는 것이 중요하다. 선로보수 장비 중 스위치 타이 탬퍼에 적용되고 있는 작업주행용 카르단 샤프트는 작업을 위한 주행장치에 동력을 전달하는 기능을 하는 장치로 중요한 역할을 하고 있어 신뢰성 확보가 요구된다. 따라서 한국철도공사에서 운영중인 스위치 타이 탬퍼 장비 유지보수 데이터를 기반으로 신뢰성 분석을 수행하였다. 그 결과 고장 데이터 분석을 통해 수명분포는 와이بل 분포에 적합함을 확인하였고, 고장률이 증가하는 추세로 열화 특성이 있음을 확인하였다. 카르단 샤프트의 교환주기 산정을 위해 최소비용 교환주기와 백분위 수명에 의한 교환주기를 산출한 결과 최소 비용 교환주기는 단위시간당 교체비용이 최소화되는 2,190일, 백분위 수명에 의한 교환주기는 2,012일로 확인되었다. 본 연구에 의한 수명주기 교환 시점은 신뢰도가 반영된 정량화된 기준이므로 유지보수 정책 설정에 도움이 될 것으로 기대한다.

Abstract A track repair machine is a special-purpose railway vehicle that performs maintenance on railway facilities such as tracks and structures so that passengers and cargo can be safely transported. Proper reliability-based maintenance is important because failure of a track-repair machine can directly damage rail transport. The cardan shaft in switch tie tampers plays an important role as a device for transmitting power, so it is necessary to secure its reliability. Therefore, a reliability analysis was performed based on maintenance data from switch tie tampers operated by the Korea Railroad Corporation. Through fault data analysis, it was confirmed that the life distribution fit a Weibull distribution and that the failure rate was increasing. The degradation characteristics were also confirmed. To calculate the cardan shaft's exchange cycle time, we checked the minimum-cost exchange cycle and the percentile life. The minimum-cost exchange cycle time was 2,190 days, and the percentile life exchange cycle time was 2,012 days. The life cycle exchange period according to this study is a quantified standard that reflects reliability, so it is expected to help establish maintenance policies.

Keywords : Cardan Shaft, Exchange Cycle, Percentile Life, Switch Tie Tamper, Track Repair Machine

*Corresponding Author : Jae-Moon Kim(Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea)

email: goldmoon@ut.ac.kr

Received August 9, 2023

Accepted October 6, 2023

Revised September 4, 2023

Published October 31, 2023

1. 서론

선로보수 장비는 철도 시설물의 유지보수를 지원하는 특수목적용 차량으로 여객과 화물을 안전하게 수송할 수 있도록 선로, 구조물 등 철도 시설물의 유지보수 업무를 수행한다. 이러한 선로보수 장비의 고장은 철도 운송에 있어 직접적인 피해를 유발할 수 있으므로 적절한 신뢰성 기반의 유지보수(Reliability Centered Maintenance)를 수행하는 것이 중요하며, RCM 분석을 통하여 신뢰도와 안전성뿐만 아니라 유지보수 비용 또한 함께 분석하여 최적의 예방정비 방안을 결정할 수 있다. 하지만, 현재 철도의 유지보수 체계는 직접적인 운송의 역할을 수행하는 철도차량에 집중되어 있는 실정이다.

선로보수 장비 중 스위치 타이 탬퍼(Switch Tie Tamper, 이하 STT)는 분기부의 궤도틀림 정정작업을 수행하는 장비로 주요 작업장치로는 다짐작업을 하는 탬핑유닛, 레일을 들어 올리는 리프팅유닛, 레일을 좌, 우로 밀어주는 라이닝유닛이 있다. 궤도틀림 정정작업은 열차운행에 의한 반복하중의 작용으로 궤도의 자갈이 파괴되어 선로가 처지거나 열차의 좌,우 유동에 의해 선로가 밀려 틀어진 상태를 바로 잡는 작업을 말한다. Fig. 1은 스위치 타이 탬퍼의 작업모습을 보여주고 있다.



Fig. 1. Work by switch tie tamper

STT 장비의 주행을 위한 동력의 전달은 일반주행과 작업주행으로 구분되며, 엔진과 미션, 미션과 기어박스 등의 장치를 서로 연결해 주는 장치가 카르단 샤프트(Cardan shaft)이다. STT 장비가 분기부에서 작업할 때에는 짧은 구간을 계속 반복하면서 주행함에 따라 작업주행의 동력을 전달하는 카르단 샤프트에는 항상 전부하에 가까운 토크가 발생하므로 일반주행용 카르단 샤프트에 비해 수명이 짧다. Fig. 2는 카르단 샤프트의 주요 고장유형 사진을 보여주고 있다.

선행연구 조사에 따르면, 철도차량 중 고속차량과 전동차량의 부품이나 장치에 대한 수명주기에 관한 연구는 활발하게 추진되고 있으나, 선로보수 장비에 대한 연구는 2019년에 수행한 '시설분야 주요부품 내용연수 및 교체주기 산정에 관한 연구' 외에는 찾아볼 수 없었다.



Fig. 2. Cradan shaft failure type

본 연구에서는 선로보수 장비 중 분기부의 틀림정정 작업을 수행하는 STT 장비에 사용중인 작업주행용 카르단 샤프트를 대상으로 유지보수 자료를 수집한 후, 이를 기반으로 신뢰성 분석을 수행하고 해당 장치의 신뢰성 특성 및 고장률 형태를 토대로 교환주기를 산정하였다.

2. 신뢰성 분석

2.1 데이터 수집

본 연구에 사용된 고장데이터는 고장발생 시점의 신뢰성을 보장하기 위해 전산에 등록된 데이터를 사용하였다. 데이터 수집 대상은 한국철도공사에서 운영중인 STT 장비 19대이며, 데이터 수집 기간은 2006년 1월에서 2021년 12월까지 16년 간의 데이터 중 25건의 고장데이터를 취득하였다. Fig. 3은 장비별로 고장이 발생한 시점을 표시하는 사건 발생 그림을 보여주고 있다.

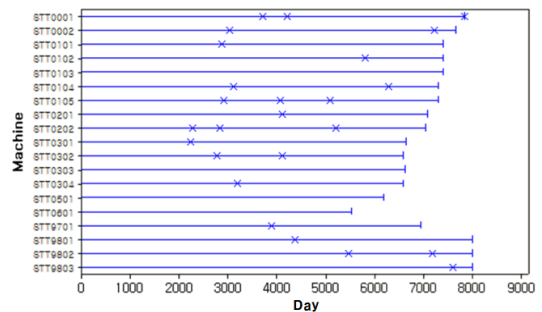


Fig. 3. Event plot by track repair machine

2.2 수명분포 적합도

신뢰성 데이터의 통계적 분석을 위해 추출된 데이터를 어떠한 수명분포에 적용시킬 수 있는지를 판명하기 위하여 적합도 검정이 필요하다[1]. 수명분포의 적합도를 확인하기 위해 통계 프로그램을 이용하여 와이블 분포, 지수분포, 로지스틱 분포 등 7개의 분포를 분석한 결과와

이들 분포가 가장 잘 적합되는 분포로 확인되었다. Fig. 4는 각 분포별 확률도를 나타내고 있다.

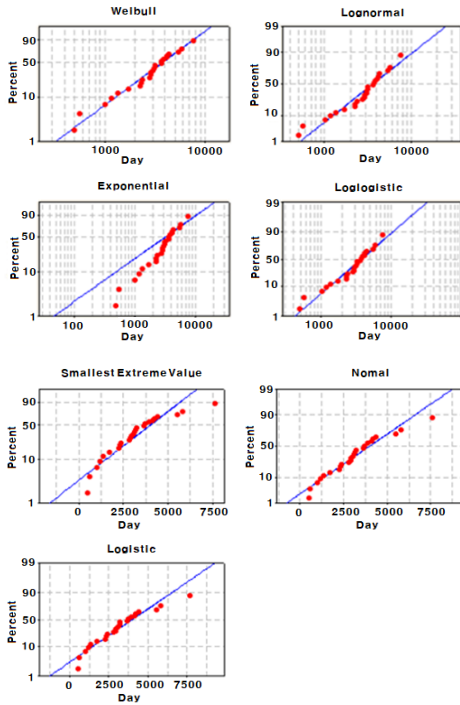


Fig. 4. Probability plot by distribution

2.3 신뢰성 척도

와이블 분포는 신뢰성 분석에서 가장 폭넓게 사용되는 고장분포 중 하나이다. 와이블 분포는 물질의 강도를 모형화하기 위해 스웨덴의 와이블(Weibull) 교수에 의해서 개발되었다[2]. 수명 T가 와이블 분포를 따르면 분포함수는 Eq. (1)과 같다.

$$F(t) = \Pr(T \leq t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}, t > 0 \quad (1)$$

여기서 $\lambda (> 0)$ 는 척도모수, $\beta (> 0)$ 는 형상모수를 각각 나타낸다. 와이블 분포의 확률밀도함수는 분포함수를 미분하여 Eq. (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$f(t) = \frac{\beta}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}, t > 0 \quad (2)$$

와이블 분포의 신뢰도함수는 Eq. (3)과 같이 구할 수 있다.

$$R(t) = \Pr(T > t) = e^{-\left(\frac{t}{\lambda}\right)^\beta}, t > 0 \quad (3)$$

여기서 $\beta = 1$ 인 경우 고장률은 일정하며, $\beta < 1$ 이면 신뢰도가 성장한다. 즉, 사용시간 대비 신뢰도의 개선을 나타내며, $\beta > 1$ 이면 열화되는 특성을 나타낸다. 수리계에서 $\beta > 1$ 인 경우 수명주기 비용(life cycle cost) 문제와 관련하여 최적의 예방보전(PM) 주기 선정 등의 연구를 많이 시행하고 있다[3].

2.4 분포의 모수 추정

와이블 분포에 의한 확률밀도 함수, 신뢰도 함수, 고장률 함수의 형태를 확인한 결과 고장률이 증가하는 추세를 보임에 따라 수명주기 분석이 가능한 장치로 확인되었다. Fig. 5는 와이블 분포에 대한 분포 개관 그림을 보여주고 있다.

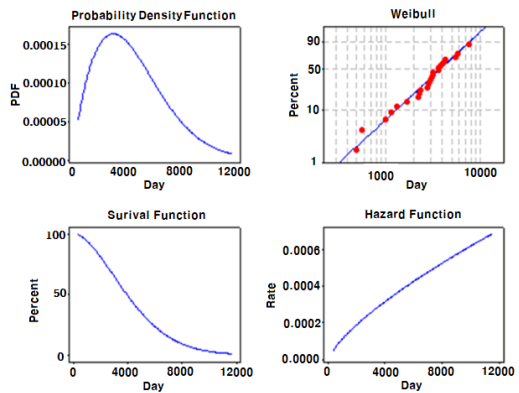


Fig. 5. Distribution overview plot

모수는 분포의 특성을 나타내는 것으로 분포에 따라 추정되는 모수가 다르며, 모수를 추정하는 방법으로 제곱오차를 최소화하는 “최소제곱법”과 우도함수를 최대화하는 “최우추정법”이 있다. 일반적으로 관측중단 자료가 포함되었을 경우 “최우추정법”을 적용하여 신뢰성 분석을 수행한다[4].

와이블 분포의 모수를 추정하기 위해 통계 프로그램을 이용하여 최우추정법에 의해 분석한 결과 Table 1과 같은 모수의 추정값을 얻었으며, Fig. 6은 와이블 분포의 확률지 및 신뢰구간 도시의 결과를 보여주고 있다.

Table 1. Parameter estimate value

Parameters	Statistics
Shape Parameter	1.72619
Scale Parameter	4798.45
Mean	4277.12

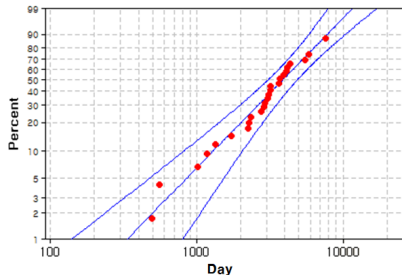


Fig. 6. Probability plot and confidence interval

3. 교환주기 분석

3.1 교환주기 결정 모델

최적의 교환주기를 결정하기 위해서는 최적의 기준이 필요하며, 많은 연구자들이 다양한 기준들을 고려하여 다양한 모형들을 제시해 왔다[5]. 철도차량 부품의 경우 경제성과 안전도를 고려하여 점검 또는 교환주기를 결정하고 있다.

3.1.1 최소비용 교환주기

고장에 의한 비가동 시간의 기회비용을 적용한 고장손실 비용과 예방정비 시 소요되는 비용의 총비용을 산출한다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 단위 시간당 교환비용이 증가하면 장치의 고장이 줄어 고장손실비용은 줄지만 예방정비비용이 과다하게 발생하게 된다.

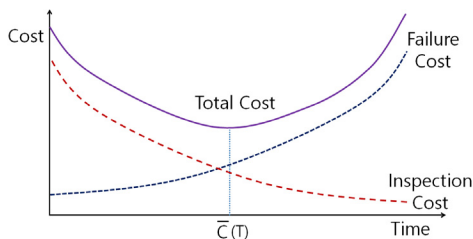


Fig. 7. Total cost per hour

설정된 교환주기 범위의 시간을 교환주기 적용 모델의 Eq. (4)에 의해 $\bar{C}(T)$ 를 도출한다. 이렇게 도출된 시간 중 단위 시간당 교체비용 $\bar{C}(T)$ 가 최소로 되는 시점을 교환주기로 결정한다.

$$\bar{C}(T) = \frac{C_f \cdot F(t) + C_p \cdot R(t)}{\int_0^T R(t)dt} \quad (4)$$

여기서, C_f 는 고장손실비용, C_p 는 예방정비비용, $F(t)$ 는 고장이력 자료에 적합한 누적분포함수, $R(t)$ 는 고장이력 자료에 적합한 분포의 신뢰도 함수이다[5].

3.1.2 백분위 수명에 의한 교환주기

백분위 수명에 의해 교환주기를 도출하는 방법은 현재 철도에서 많이 적용하고 있는 방법으로 고장 시 예상되는 안전 및 운행 지연 등 부품의 특징에 따라 허용 결함 부품의 최대 비율 기준에 의해 교환주기를 결정하는 방법이다. 고장날 확률이 q 가 되는 시점 t_q 값을 분위수라 하며, 수식으로 표현하면 누적분포함수를 이용하여 $F(t_q) = q$ 가 된다. 일반적으로 t_q 를 백분위수라 부르며, B(bearing life) 또는 L(minimum time to failure life)로 아래와 같이 나타내기도 한다[6].

- 제 1백분위수 : $t_{0.01}$, B1, L1
- 제 10백분위수 : $t_{0.1}$, B10, L10
- 제 25백분위수(제1 사분위수) : $t_{0.25}$, B25, L25
- 제 50백분위수(중앙값) : $t_{0.50}$, B50, L50

철도차량 중 고속차량의 경우 300km/h의 속도로 주행하며, 여객을 수송함에 따라 높은 신뢰도와 안전성이 요구되므로 관리 대상 부품의 특징에 따라 백분위수에 의해 허용 결함부품의 최대 비율 기준을 아래와 같이 정하고 있다.

- B4 : 열차의 운행 안전과 관련된 부품
- B6 : 열차의 정시 운행과 관련된 부품
- B8 : 기타 부품

3.2 교환주기 예측

3.2.1 최소비용에 의한 교환주기

데이터 수집기간이 16년으로 큰 수치로 표현됨에 따라 단위시간을 1일로 하여 교환주기를 도출했다. 고장손실비용, 예방정비비용은 아래와 같이 적용하였으며, 부품 대기기간은 없는 것으로 가정하였다.

① 고장손실비용

$C_f =$ 부품비용 + 인건비 + 기대비용(고장으로 작업이 불감함에 따른 장비 비가동 손실비용)

② 예방정비비용

$$C_p = \text{부품비용} + \text{인건비}$$

STT 장비의 기대수명 20년을 기준으로 반수명 주기인 10년까지 연 단위로 교환주기를 적용했을 때의 단위 시간당 기대비용을 산출하였다. Table 2는 Eq. (4)에 의해 도출된 교환주기별 단위시간의 기대비용을 보여주고 있다.

Table 2. Estimated cost by replacement cycle

Time[day]	$\bar{C}(T)$ [₩]	Time[day]	$\bar{C}(T)$ [₩]
365	8,183	2190	2,698
730	4,484	2555	2,742
1095	3,382	2920	2,851
1460	2,931	3285	3,017
1825	2,744	3650	3,236

단위시간당 기대비용을 산출한 결과 교환주기를 길게 가져갈수록 비용이 감소하다 2,190일 이후로는 기대비용이 증가하였다. 따라서 단위시간당 교체비용이 최소화 되는 2,190일(6년)이 최소비용에 의한 교환주기로 선정이 가능하다.

3.2.2 백분위 수명에 의한 교환주기

백분위 수명을 확인하기 위해 수집된 고장데이터를 통계 프로그램을 이용하여 분석한 결과 Table 3과 같이 산출되었다. 고속차량의 경우 안전확보가 요구됨에 따라 백분위 수명을 부품에 따라 B4, B6, B8의 보수적 기준을 적용하고 있지만, STT 장비와 같은 선로보수 장비의 경우는 부품이나 장치에 대한 백분위 수명 기준이 없다. 또한 선로보수 장비는 열차운행이 중단된 선로에서 작업을 수행하는 장비로 고장에 의한 영향이 고속차량보다 매우 낮아 백분위 수명을 다음과 같이 정의하였다.

- B10 : 열차의 운행 안전과 관련된 부품
- B15 : 열차의 정시 운행과 관련된 부품
- B20 : 장비작업에 상당한 지장을 주는 부품
- B25 : 기타 부품으로 신뢰성 관리 대상 부품

STT 장비용 카르단 샤프트의 경우 고장발생 시 열차 운행과는 관련이 없고, 작업 시 주행을 위한 동력의 전달이 불가하여 작업을 할 수 없으므로 H20의 기준이 적용된 교환주기는 약 2,012일(약 5.5년)로 산출되었다.

Table 3. Table of percentiles

Percent	Percentile	Standard Error	95% Confidence Interval	
			Lower	Upper
5	859	256	479	1539
10	1303	307	822	2066
15	1675	335	1132	2479
20	2012	354	1426	2841
30	2640	382	1988	3508
40	3252	413	2536	4170
50	3881	456	3082	4886

4. 결론

선로보수 장비의 주요 부품 중 STT 장비에 적용되고 있는 작업주행용 카르단 샤프트는 작업을 위한 주행장치에 동력을 전달하는 기능을 하는 장치로 중요한 역할을 하고 있어 카르단 샤프트의 신뢰성 확보가 요구된다. 본 연구에서는 한국철도공사에서 운영중인 STT 장비 19대를 대상으로 그 간의 유지보수 데이터를 기반으로 통계 프로그램을 활용하여 신뢰성 분석을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- ① 고장 데이터 분석을 통해 수명분포는 와이블 분포에 적합됨을 확인하였고, 고장률이 증가하는 추세로 열화특성이 있음을 확인하였으며, 모수추정에 의해 형상모수와 척도모수, 평균수명을 확인하였다.
- ② 카르단 샤프트의 최소 비용 교환주기는 단위시간당 교체비용이 최소가되는 2,190일(6년)로 확인되었다.
- ③ 카르단 샤프트의 백분위 수명 교환주기는 B20의 기준에 의해 2,012일(약 5.5년)로 산출되었다.

본 연구에 의한 수명주기 교환 시점은 신뢰도를 반영하였으며 경제성과 안전도가 고려된 정량화된 기준이므로 유지보수 정책 설정에 도움이 될 것으로 기대한다.

References

[1] I. S. Kim, *A Study on the Conformity of KTX Oil Damper TBO*, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, pp28, 2022.

[2] S. K. Seo, H. G. Kim, H. M. Kim, M. S. Cha, J. H. Cha, *Reliability Engineering*, p.420, Kyobo Bookstore, 2013, pp.43.

[3] J. H. Han, J. W. Kim, J. S. Koo, "A Study on the Maintenance Policy Considering the Failure Data of the EMU Braking System and the Cost Funtion", *Journal of the Koren Society of safety*, Vol.30, No.3, pp.13-19, June. 2015.
DOI: <http://doi.org/10.14346/JKOSOS.2015.30.3.13>

[4] J. H. Park, B. N. Park, M. O. Song, S. I. Sung, "A Study on Two-phase Condition-based Maintenance Scheduling for Rolling Stocks with Left-truncated and Right-censored Data", *Journal of Applied Reliability*, Vol.22, No2, pp.118-131, June. 2022.
DOI: <http://doi.org/10.33162/JAR.2022.6.22.2.118>

[5] S. H. Kim, Y. G. Choi, J. H. Kang, K. H. Hong, W. S. Hwang, A Study on the Calculation of the Service Life and Exchange Cycle of Major Parts in the Facility Sector, Research Report, Korea Railroad Coporation, Korea, pp.55.

[6] S. K. Seo, Minitab Reliability Analysis, p.594, Eretec Coporrnation, 2017, pp.38-40.

홍 영 선(Young-Seon Hong) [정회원]



- 2004년 2월 ~ 2015년 7월 : 한국 철도공사 시설장비사무소
- 2020년 2월 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 (공학석사)
- 2015년 7월 ~ 현재 : 한국철도공사 인재개발원
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<관심분야>
철도차량, 기계설비

최 용 은(Yong-Eun Choi) [정회원]



- 2019년 2월 : 광주대학교 전기전자공학과 졸업
- 2022년 2월 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<관심분야>
전력전자, 전기철도

오 호 석(Hyo-Seok Oh) [정회원]



- 2020년 2월 : 인덕대학교 메카트로닉스공학과 졸업
- 2022년 2월 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 (공학석사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통대학원 박사과정

<관심분야>
전력전자, 전기철도

김 재 문(Jae-Moon Kim) [정회원]



- 2000년 2월 : 성균관대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2004년 2월 : 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원
- 2004년 3월 ~ 2012년 2월 : 한국철도대학 철도차량전기와 교수
- 2006년 1월 ~ 현재 : 국토교통부 철도기술 전문위원
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 교통시스템공학과 교수

<관심분야>
전력전자, 전기철도