

# 전기철도 가공전차선로의 신뢰성 기반 유지보수(RCM)에 관한 연구

## A Study on RCM Approach to Catenary System of Electric Railway

윤 응 규 · 최 규 형\*

(Eung-Kyu Youn · Kyu-Hyoung Choi)

**Abstract** - A RCM approach to maintenance of the catenary system of electric railway is proposed. The proposed RCM approach provides a maintenance-oriented FMECA procedure to derive critical failure modes by analyzing failure effects and a RCM decision logic tree to suggest optimal maintenance works for the derived failure modes. By applying the proposed RCM procedures to the catenary system of high speed railway, it is suggested that strand breaks of dropper and voltage equalizing wire, and trolley wire wear-out are the critical failure modes for whom maintenance works based on condition monitoring should be applied instead of conventional time-based preventive maintenance. It is also proposed by reliability analysis that replacement time of dropper can be reduced from 18 years to 10 years. These results show that the proposed RCM approach can optimize the maintenance procedures of catenary system.

**Key Words** : Catenary system, Electric railway, FMECA, RCM, Reliability

### 1. 서 론

전차선로는 철도차량에 전력을 공급해주는 전기철도의 핵심설비로서, 고속철도에 이용되고 있는 가공전차선로는 전차선, 조가선, 급전선을 비롯하여 이들을 지지하기 위한 애자 및 지지물, 금구류 등으로 구성된다. 가공전차선로는 열차가 고속으로 주행함에 따라 전차선과 철도차량 집전장치와의 접촉이 끊어지는 이선 현상이 발생하여 전력공급이 순간적으로 중단되고 아크가 발생하기 때문에, 조가선과 드로퍼를 이용하여 전차선을 수평으로 유지하고 자동장력조정장치를 이용하여 장력을 일정하게 유지시키는 등 특수한 구조로 되어 있다. 특히, 가공전차선로는 특성상 이종화가 불가능하여 예비설비를 둘 수 없기 때문에 고장 발생 시 열차 운행에 직접적인 영향을 미치게 되므로, 전차선로의 운영 및 유지보수단계에서 신뢰도를 향상시키기 위한 특별한 노력이 요구된다[1].

가공전차선로는 복잡한 구조로 철도선로를 따라 장거리에 걸쳐 가공으로 설치되어 있고, 풍설 및 온도변화 등 자연 환경에 노출되어 열차 통과 및 수와 진동, 장력, 순환전류, 부식 등의 영향을 받기 때문에 유지보수에 많은 어려움을 겪고 있다. 현재 고속철도 전차선로의 유지보수는 작업자들의 도보순회 및 열차 운행 중에 기관사들의 육안점검을 위주로 사고나 장애를 발견하고 야간에 조치하는 방법으로 주로 이루어지며, 정기적으로 작업차

를 통한 차상점검과 검측차를 통한 전차선 높이, 편위, 아크상태 점검으로 전차선로 시설물 상태와 변위상태만을 점검하고 있다. 이러한 유지보수 방법으로는 시설물의 변형상태를 정확히 인식하기 곤란하고, 완전한 변형이 이루어져 장애가 발생하는 단계에 이르러서야 인지가 가능하므로, 사전예방유지보수를 통한 장애 예방 및 신뢰도 향상이 곤란하다.

이에 따라, 현재의 시간중심의 단순한 주기적 예방정비방식을 탈피하여 시스템의 고장에 영향을 미치는 중요인자와 고장모드 등을 도출하여 신뢰도를 정확하게 분석하고 신뢰도를 향상시키기 위한 체계적인 접근방법으로서 신뢰도 기반 유지보수체계(RCM: Reliability Centered Maintenance)를 적용할 필요가 있다[2]. 철도분야에서는, 고속철도가 도입되면서 철도차량의 신뢰성을 향상시키기 위하여 RCM 기법을 적용하기 시작하였고, 철도신호분야에서 이중계 구조의 열차제어시스템 설계 및 유지보수, 전기철도분야에서 변전시스템이나 배전계통의 유지보수에 RCM을 적용한 사례가 발표되어 있다[3-6]. 그러나 구조적 특성상 높은 신뢰도가 요구되며, 장거리에 걸쳐 가설되어 있어 유지보수에 어려움을 겪고 있는 가공전차선로에 대해서는 아직까지 RCM 적용을 위한 연구가 발표되어 있지 않다.

본 논문에서는 가공전차선로의 유지보수에 적용하기 위한 RCM 절차를 제시하였다. 전기철도 유지보수과정에서 축적된 가공전차선로의 고장데이터를 분석하여, 전차선로의 고장모드를 도출하고 각 고장모드의 고장원인, 고장영향 및 치명도를 분석함으로써 우선적으로 유지보수대책을 수립하여야 할 핵심 고장모드를 도출하기 위한 FMECA(Failure Modes, Effects and Criticality Analysis) 기법을 제시하였다. 또한, 핵심 고장모드에 대한 고장검지 기법 분석과 각 장치별 신뢰도 분석을 토대로 RCM 결정논리트리를 이용함으로써 최적의 유지보수방식 및 교체주기를 제시

\* Corresponding Author : Dept. of Railway Electrical & Signaling Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Korea.

E-mail: khchoi@seoultech.ac.kr

Received : May 18, 2016; Accepted : June 28, 2016

하고 불필요한 정비를 최소화하기 위한 유지보수방식 선정기법을 제시하였다. 이상과 같이 제한한 RCM 절차를 경부고속철도에서의 가공전차선로에 적용하여 유지보수업무 분석을 통해 최적방안을 제시하였다.

## 2. 가공전차선로 유지보수체계

### 2.1 가공전차선로 구조

가공전차선로는 그림 1에 보이는 것처럼 철도차량의 집전장치와 접촉해 전력을 공급하는 전차선, 전차선을 지지하면서 전류를 부담하는 조가선, 전차선의 일정한 높이를 유지하고 조가선과 전기적 균압 역할을 하는 드로퍼, 변전소로부터 전력을 공급해주는 급전선을 비롯하여 이를 지지해주는 애자, 지지물, 장력설비로 이루어져 있다. 가공전차선로는 전기철도의 핵심설비로서 전기차량에 전력을 직접적으로 공급하는 중요한 역할을 담당하고 있다. 특히 최근 전기차량의 고속화, 대용량화, 운전시각의 단축으로 대량으로 운전함에 따라 전차선로의 성능, 신뢰도 및 안전성 향상이 요구되고 있다.

전차선로에서 전차선이나 조가선의 단선 시에는 열차운행이 전면 중단되는 사고가 발생한다. 또한, 조가선의 일부 가닥이 단선 시에는 선이 풀려서 전차선 하부로 늘어지게 되면 팬터그래프에 접촉되어 열차운행에 지장을 주게 되므로 타행으로 운전해야 한다. 드로퍼, 균압선의 경우는 상부축이 끊어지면 전차선 하부로 늘어져서 타행운전을 하여야 하며, 하부가 끊어지는 경우에는 차량운전에는 문제가 없으나 순환전류가 증가하여 타 드로퍼나 균압선에 과열 및 열화를 초래할 수 있다.

### 2.2 가공전차선로 유지보수

가공전차선로의 유지보수에서, 전차선은 철도차량의 집전장치와 접촉을 통하여 전력을 공급하며 차량 통과에 따라 마모가 진행되므로, 마모량을 측정하여 기준치 이상일 경우 교체하는 방식을 취하고 있다. 한편, 조가선과 드로퍼, 급전선, 균압선은 연선으로 구성되어 있어 단선이나 가닥단선이 생기면 묶음이 풀리면서

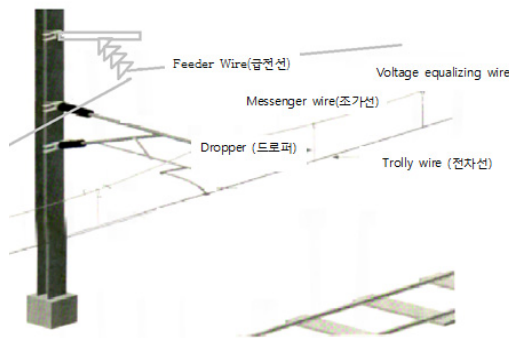


그림 1 가공전차선로 구조  
Fig. 1 Structure of catenary system

가닥들이 흩어지고 점차 가닥단선이 빠르게 진행되므로 순시 점검을 통하여 이상을 검지하고 교체 또는 보강작업을 실시한다. 고속철도에서의 가공전차선로 유지보수 방법은 주기적인 순회점검, 차상점검, 검측점검으로 다음과 같이 이루어진다[7].

- 1) 순회점검은 월 1회 육안이나 망원경을 이용한 도보순회점검과 월 2회 열차순회점검으로 이루어지며, 절연이격거리, 장력상태, 시설물 위치, 전선류 이도, 전차선 아크상태, 전선 단선이나 가닥 단선 등을 점검한다.
- 2) 차상점검은 년 1회 점검으로서, 마모, 요철상태(비틀림, 킁킁), 지지점 (당김금구, 드로퍼, 균압선) 경점, 편위, 높이, 구배, 장력, 이격거리의 적부, 부식손상의 유무, 볼트, 너트 이완여부, 지지위치의 적부, 온도상승의 양부, 접속부 상태, 크램프 부식여부, 시설물 위치적부, 전선의 손상 및 가닥단선 여부를 점검한다.
- 3) 검측차를 이용한 검측점검은 팬터그래프 집전상태, 집전충격, 이선상태 등을 월 1회 점검하고, 아크 및 전차선로 동특성에 대하여는 월 2회 점검을 시행한다. 이밖에 장애 발생 시에는 별도로 긴급유지보수를 실시한다.

## 3. 가공전차선로의 RCM 기법

### 3.1 RCM 절차

RCM은 시스템의 기능 정비에 역점을 두기 위한 유지보수체계로서, 주어진 상태에서 정상적인 작동을 보장하기 위해 시스템의 특성을 고려한 효과적인 유지보수정책 적용과 논리적인 방법론이다. 시스템의 가장 중요한 기능을 논리의 관점에서 접근하여 안전성과 신뢰성을 향상시키고, 부품의 고장에 따라 나타날 수 있는 결과를 완화시키거나 예방하며, 필요 없는 유지보수 활동을 지양하여 업무를 최소화하고, 확실적이고 주기적인 오버홀(Overhaul)을 줄이고 시스템의 기능을 유지하는 방식으로 유지보수의 개념을 변화시켰다.

RCM을 수행하기 위한 절차는 그림 2에 보이는 것처럼 데이터 수집, 시스템 기능 분석, 고장모드 영향분석(FMECA), RCM 결정논리구조에 의한 유지보수방식 선정, 결정된 유지보수방식의 적용 및 비교평가의 순서로 진행된다. FMECA에서는 고장모드를 식별하여 각 고장모드가 시스템의 안전성, 운전성, 경제성, 잠재적 안전성 및 잠재적 경제성에 미치는 영향을 고려하여 분석하고, 만약 영향을 미칠 경우에는 RCM 결정논리구조에 의한 해석을 실시하여 해당 고장모드 발생을 사전에 예방하기 위한 유지보수방법을 선정한다.

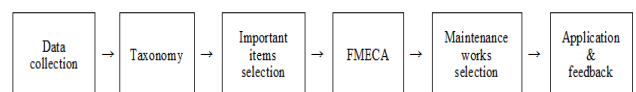


그림 2 RCM 절차  
Fig. 2 General procedures of RCM

### 3.2 FMECA에 의한 고장모드 분석

경부고속선 1단계 구간에서의 2004~2014년까지의 고장데이터를 이용하여 가공전차선로의 고장모드를 식별하고 표 1과 같이 FMECA를 수행하였다[8].

표 1에서 고장 레벨은 가공전차선로 고장모드의 영향을 IEC-62278의 기준을 참고하여 4등급으로 구분한 것으로서, level II는 중대(critical)로서 일시적인 열차운행중단이 발생할 수 있는 것이고, level III는 경미(marginal)로서 열차운행에는 지장이 없

으나 서행 등의 안전조치가 수반되는 것을 의미한다[8]. 또한,  $C_i$ 는 각 고장모드가 시스템에 미치는 치명도를 나타낸 것으로 식 (1)로부터 산출하였다[9].

$$C_i = \lambda\alpha\beta t \quad (1)$$

여기서,  $\lambda$ 는 구성품의 고장률,  $\alpha$ 는 구성품이 특정 고장모드로 고장이 발생하는 비율,  $\beta$ 는 고장모드의 고장영향확률을 나타내며,  $t$ 는 구성품의 동작시간을 나타낸다.

이상과 같이 각 고장모드에 대하여 고장레벨과 치명도를 분석

표 1 가공전차선로의 FMECA 결과

Table 1 FMECA results of catenary system

No	Failure Mode	Failure level	$C_i$	Failure causes	Failure effects	
					Catenary system	Railway system
1	Dropper strand break(Five or more)	II	14.57	- Mechanical impact & vibration - Circulating current - Wind pressure - Defective material - Poor maintenance	- Sequential break of dropper strands - Circulating current increase - Grounded fault	- Train speed-down & inertia operation
2	Voltage equalizing wire: strand break (Five or more)	II	3.10	- Improper setup - Circulating current - Irregular tension - Defective material - Poor maintenance	- Sequential break of voltage equalizing wire strands - Circulation current increase - Grounded fault	- Train speed-down & inertia operation
3	Abnormal abrasion of trolley wire	II	0.32	- Unbalanced sag - Improper dropper - Irregular tension & impact - Defective material - Faulty pantograph	- Interruption of power supply - Arc generation	- Train pantograph damage - Train operation stop
4	Messenger wire strand break (Five or more)	II	0.01	- Foreign objects contact - Lack of separation - Irregular tension - Bad connection - Defective material - Poor maintenance	- Sequential break of messenger wire strands - Relaxation of trolley wire	- Train speed-down & inertia operation
5	Voltage equalizing wire: strand break (Less than five)	III	11.0	- Improper setup - Circulating current - Irregular tension - Defective material - Poor maintenance	- Strength degradation of voltage equalizing wire	- Train speed-down
6	Messenger wire strand break (Less than five)	III	2.74	- Foreign objects contact - Lack of separation - Bad connection - Defective material - Poor maintenance	- Strength degradation of messenger wire	- Train speed-down
7	Feeder strand break (Less than five)	III	1.46	- Foreign objects - Lack of separation - Bad connection - Defective material - Poor maintenance	- Strength degradation of feeder - Power load unbalance	- Train speed-down
8	Dropper strand break (Less than five)	III	0.96	- Mechanical impact & vibration - Circulating current - Wind pressure - Defective material - Poor maintenance	- Strength degradation of dropper	- Train speed-down

한 결과를 치명도 매트릭스에 적용하여 치명도 등급을 평가하였으며, 치명도 등급이 가장 높게 나타난 8개 고장모드만 선별하여 표 1에 정리하였다[10]. 또한, 선별된 각 고장모드에 대하여 발생 원인을 추정하여 분석하였고, 각 고장모드로 인한 고장영향을 상위시스템인 가공전차선로와 철도시스템의 2단계로 나누어 분석하였다. 분석결과, 드로퍼 단선(5가닥 이상), 균압선 단선 및 조간선 단선이 고장영향이 크고 치명도가 높기 때문에 우선적으로 유지보수대책을 실시하여야 하는 것으로 나타났다.

**3.3 RCM 결정논리에 의한 유지보수방식 선정**

FMECA 결과로부터 시스템의 기능에 크게 영향을 미치는 것으로 식별된 고장모드들에 대하여 RCM 결정논리트리를 적용하여 유지보수방식을 결정한다. 여기서, 유지보수방식은 예방정비와 사후정비로 구분되며, 예방정비에는 다음과 같이 시간계획정비와 상태감시정비로 구분된다.

- 1) 시간계획정비
  - ① 정기점검(Periodic inspection)은 기능을 유지하기 위해 제품의 고장 발생 전에 수행하는 정기적인 점검, 교환 작업 및 윤활유 보충 작업.
  - ② 개량 정비(Overhaul)는 제품에 대한 개량(오버홀) 작업을 하고 이상 유무를 확인하고 이상이 발견된 경우에는 복구를 위해 보존한다.
  - ③ 정시점검(Elapsed-time maintenance)은 제품이 예정 누적 가동 시간에 도달 했을 때 실시하는 유지보수방식.
- 2) 상태감시정비
  - ① 모니터링 정비(Monitoring maintenance)는 제품의 사용 상태를 상시 또는 정기적으로 모니터링 하여, 프로세스 등의 시간적 변화를 분석하고, 제품의 이상을 조기 발견하고 수리하기 유지보수 방식이다. 모니터링 및 분석은 일반적으로 수집 시스템에 의해 자동으로 이루어지며 작업원에

의한 모니터링도 포함된다.

- ② 조건부 정비(On-condition maintenance)는 제품의 사용 상태 또는 대기 상태에서 고장 징후나 성능 저하 등을 정기적인 기능 시험 등으로 확인하고 이상이 있는 경우에 처리하는 유지보수방식이다

RCM 결정논리트리는 유지보수업무의 특성과 고장 검출 가능성 및 유지보수효과를 분석하여 최적의 유지보수방식을 선정하기 위한 논리적 절차로서, 기능 고장에 의한 영향 평가와 유지보수 방식 선정의 2단계로 나누어 수행한다. 기능 고장에 의한 영향 평가는 안전성, 운전성 및 경제성으로 구분하여 이분법을 적용하여 수행한다. 유지보수방식 선정은 그림 2에 보이는 절차에 따라 수행하며, 기능 고장에 대한 영향 평가를 토대로 안전성에 영향이 있을 경우에는 정기점검, 모니터링 정비, 조건부정비에서 유효한 유지보수방식을 조합하여 유지보수 계획을 수립하고, 운전성 및 경제성에만 영향이 있을 경우에는 그림 3의 점선에 보이는 것처럼 모니터링정비, 조건부 정비, 개량정비의 순서로 검토하여 유효한 유지보수방식을 하나 선정한다[11].

RCM 결정논리트리에 의한 유지보수방식 선정 결과를 표 2에 보인다. 드로퍼, 조간선 단선 고장의 경우, 기존에 실시되어 왔던 정기점검 외에 전차선로 변형상태 검측장비를 이용한 모니터링 정비가 제시되었다. 급전선 고장의 경우에는 기존에 실시되어 왔던 정기점검 외에 열화상 측정을 통한 모니터링정비가 제시되었다. 균압선 단선 고장의 경우에는 정기점검과 정기교환 외에 전차선로 변형상태 검측 및 열화상 측정, 전차선의 이상마모의 경우에는 정기점검 외에 전차선로 고속검측장비에 의한 모니터링정비가 제시되었다. 또한, 드로퍼와 균압선의 경우에는 정시정비에 의한 부품 교체도 효과적인 것으로 나타났다.

**3.4 신뢰도 분석에 의한 교체주기 분석**

가공전차선로의 내구연한은 표 3의 내용처럼 한국철도시설공단 회계규정시행세칙으로 정하고 있으며[12], 드로퍼나 클램프와

**표 2** RCM 결정논리트리에 의한 유지보수방식 선정 결과

**Table 2** Selection of maintenance methods based on RCM decision logic tree

Component	Failure Mode	Conventional preventive maintenance scheme	Failure impact	RCM based preventive maintenance scheme
Dropper	strand break (Five or more)	- Periodic inspection,	Safety	- Periodic inspection, - Monitoring maintenance - Time-elapsed maintenance
Voltage equalizing wire	strand break (Five or more)	- Periodic inspection,	Safety	- Periodic inspection, - Monitoring Maintenance - Time-elapsed maintenance
Trolley wire	power supply failure (Abnormal abrasion)	- Periodic inspection, - Monitoring Maintenance	Safety	- Periodic inspection, - Monitoring Maintenance
Messenger wire	strand break (Five or more)	- Periodic inspection,	Train operation	- Monitoring Maintenance
Feeder	strand break (Less than five)	- Periodic inspection,	Train operation	- Monitoring Maintenance

같은 부속설비들은 표 4와 같이 한국철도공사 전철전력설비 유지 보수 세칙으로 정하고 있다[7]. 여기서, 가공전차선로의 내구연한은 일반 전선과 같은 내구연한을 적용하고 있으며, 부속설비의 내구연한은 프랑스 고속철도의 내구연한을 적용하고 있으나 국내 철도의 운행조건이나 기후조건을 포함하여 전기적, 기계적 특성을 반영하지 못하고 있다는 문제가 있다.

고속철도 현장에서 수집된 가공전차선로 고장데이터를 이용하여 가공전차선로의 신뢰도 및 평균수명을 분석하였다. 경부고속철도 1단계 구간에서 2004~2014년까지의 고장데이터를 수집하여

분석하였으며, 신뢰도 분석 도구로서 Minitab을 활용하여 수명분포의 특성을 분석하고 모수 추정을 통해 신뢰도를 분석하였다 [13].

그림 4와 표 5는 고장의 패턴을 Weibull 분포로 가정하고, 고장데이터를 토대로 평균수명을 분석한 결과를 보인다. 여기서,  $\beta$ 와  $\eta$ 는 각각 Weibull 분포의 형상모수(Shape parameter)와 척도모수(Shape parameter)이며, MTBF (Mean Time Between Failure)는 고장평균시간, 그리고 B10 수명(life)은 전체설비의 10%에서 고장이 발생하는 평균시간을 나타낸다. 전차선로 장치별

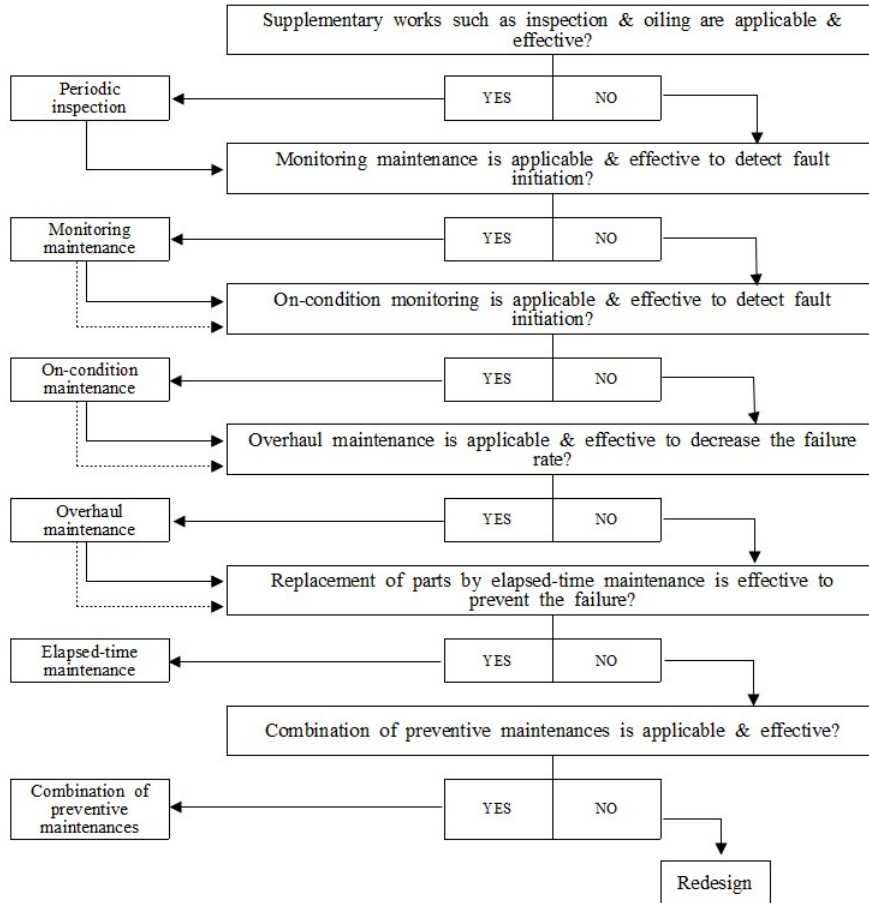


그림 3 RCM 결정논리에 의한 유지보수 방식의 선택

Fig. 3 Selection of maintenance mode by RCM decision logic

표 3 가공전차선로 내구 연한

Table 3 Life expectancy of catenary system

Asset Class		Reference code	Accounts of property		Contents		Life expectancy	Details
State Property	Property Agency							
11500	31500	060100	06	Power Equipment	01	catenary	20years	Trolley wire, Messenger wire, Voltage equalizing wire
		060700	06	Power Equipment	07	catenary	30years	Feeder

표 4 가공전차선로 장치별 교체 주기

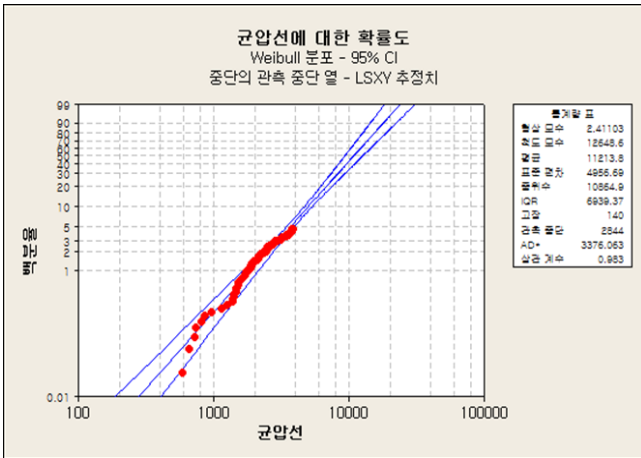
Table 4 Replacement period of catenary system equipments

Equipment	Replacement period	Remarks	
Voltage equalizing wire 75 mm <sup>2</sup> CU(A01D12)	8 years		
Trolley wire, Messenger, Dropper clamp(A02C03, A02C04)	10 years		
Dropper-Voltage equalizing wire-Dropper(128, 128p)	12 years		
Bronze Cable dropper 12 mm <sup>2</sup> (A02C07)	The 1 <sup>st</sup> place in a span		10 years
	Else		5 years

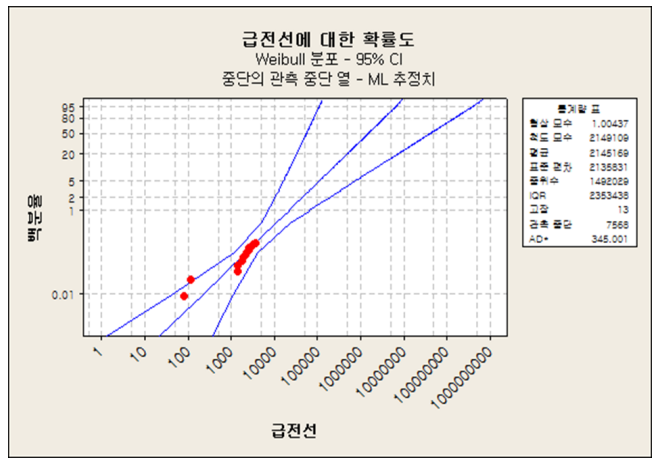
표 5 Weibull 분석결과

Table 5 Weibull analysis results

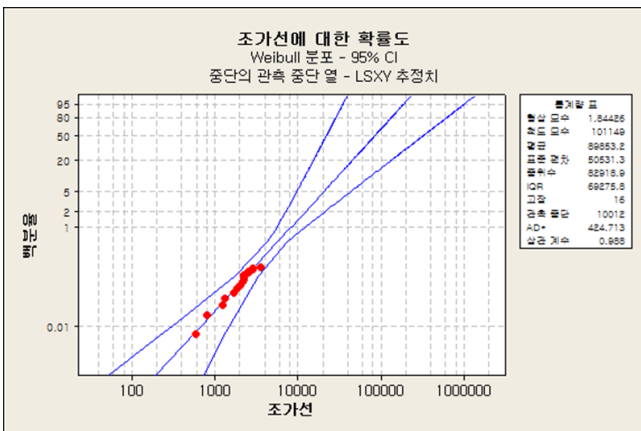
	Feeder line	Messenger wire	Dropper	Voltage equalizing wire
$\beta$	1.00437	1.84425	1.89932	2.41103
$\eta$	2,149,109	101,149	28,529	12,648
MTBF [day]	2,145,169	89,853	25,316	11,213
B10 life [day]	8,998 (24.7years)	12,091 (33.1years)	7,950 (21.8years)	4,645 (12.7years)



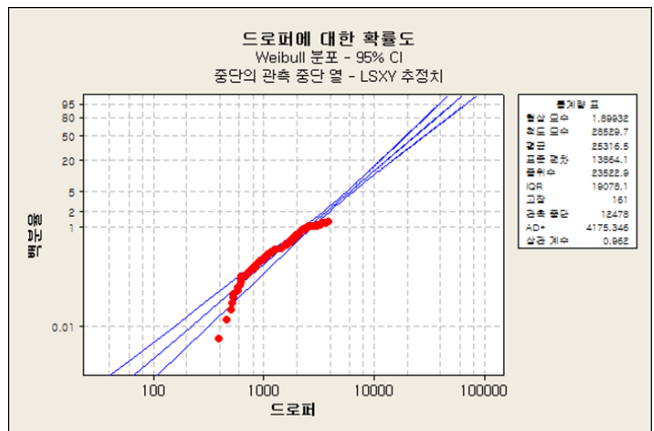
(a) 균압선(Voltage equalizing wire)



(b) 급전선(Feeder)



(c) 조가선(Messenger wire)



(d) 드로퍼(Dropper)

그림 4 Weibull 분석 결과

Fig. 4 Weibull analysis results

표 6 교체주기 분석결과

Table 6 Replacement period by failure data analysis

	Life expectancy		Replacement period
	Korail	Korea Railway Authority	
Trolley wire	-	20 years	-
Messenger wire	-	20 years	33.1 years
Feeder	-	30 years	24.7 years
Dropper	10 years 5 years(1 <sup>st</sup> place)	-	21.8 years
Voltage equalizing wire	12 years, 8 years	20 years	12.7 years

로 MTBF를 비교해보면, 조가선이 89,853일, 급전선이 2,145,169 일로서 고장평균시간이 길고, 드로퍼가 25,316일, 균압선이 11,238일로 짧게 나타났다. 여기서, 전차선은 고장이 거의 발생하지 않기 때문에 분석에서 제외하였다. 또한, B10 수명을 분석한 결과, 균압선과 드로퍼가 각각 12.7년 및 21.8년으로 비교적 작았으며, 급전선과 조가선은 각각 24.7년과 33.1년으로 크게 나타났다. 전차선로는 대체설비가 없고 높은 신뢰도 및 안전성을 유지해야 하므로, 전체 장치의 10%에서 고장이 발생하는 B10 수명에 달할 때 전체 장치를 교체하는 것이 바람직하다. 이에 따라, B10 수명을 기준으로 전차선로 장치들의 적정교체주기를 검토하였다.

이상의 신뢰도 분석결과로부터 도출된 전차선로 장치들의 적정교체주기(B10)와 설비기준에서 규정한 내구연한을 표 6에 보인다. 현재 적용되고 있는 전차선로 내구연한은 고장데이터 분석에 의한 적정교체주기와 큰 차이가 있으며, 향후 고장데이터를 통한 적정교체주기 분석 결과를 토대로 내구연한을 재설정할 필요가 있다. 드로퍼의 경우, 고장 데이터 분석결과 적정교체주기가 21.8년으로 나타났으며 현재 10년으로 규정되어 있는 내구연한을 연장할 필요가 있다.

### 3.5 RCM에 의한 가공전차선로 유지보수체계

이상의 RCM 분석으로부터, 가공전차선로의 주요 고장모드에 대한 유지보수업무는 다음과 같이 선정되었다.

#### 1) 드로퍼 가닥단선

드로퍼는 전차선의 높이를 일정하게 유지하기 위하여 상부의 조가선과 하부의 전차선을 연결하여 지지하고 있으며, 드로퍼에 가닥단선이 생기면 묶음이 풀리면서 가닥들이 흩어지고 점차 가닥단선이 빠르게 진행된다. 또한, 드로퍼의 상부 접속이 끊어지면 전기차량의 집전장치에 접촉할 수 있으므로 타행운전을 해야 하며, 하부접속이 끊어지는 경우에는 차량운전에는 문제가 없지만 순환 전류가 발생하여 전차선로의 과열 및 열화를 초래할 수 있다.

- ① 현재 도보순회와 차상점검을 통하여 정기점검을 하고, 가닥단선 발견시에 긴급유지보수를 하고 있으나, 가닥단선된 상태를 발견하기 곤란하다는 문제가 있다. 또한, 열차운행 중에 드로퍼 가닥단선을 발견하여 긴급유지보수를 실시하여야 할 경우

에도, 열차운행이 중단된 야간에 교체할 수밖에 없기 때문에, 주간에는 열차를 서행 및 타행으로 운전하여야 하는 등 열차운행에 차질을 초래한다. RCM 분석 결과, 기존의 정기점검과 함께 전차선로 변형 검측시스템에 의한 모니터링정비와 정기정비를 조합하여 적용하는 방식이 효과적이라고 제시되었다.

- ② 드로퍼의 내구연한은 일반개소는 10년, 진행방향 첫 번째 개소는 5년을 기준으로 하고 있으나, 고장데이터 분석에 의한 적정교체주기가 21.8년으로 나타남에 따라 내구연한을 최대 20년까지 연장하도록 조정할 필요가 있다.

#### 2) 균압선 가닥단선

균압선은 조가선과 같은 재질로서 전차선과 조가선을 전기적으로 연결해주는 역할을 수행하며, 가닥단선이 발생할 경우 드로퍼와 동일한 형태의 고장이 발생한다.

- ① 도보순회와 차상점검을 통하여 유지보수를 실시하고 있으나, RCM 분석 결과, 전차선로 변형 검측시스템 및 열화상 측정장비를 이용한 모니터링 정비가 효과적이라고 제시되었으며, 기존의 정기점검과 정기점검을 조합하여 적용하는 것이 적합하다고 분석되었다.
- ② 균압선의 수명주기는 고장데이터 분석에 의한 적정교체주기와 기존의 내구연한에 큰 차이가 없기 때문에 현재의 내구연한을 유지하는 것이 적합하다.

#### 3) 전차선 이상마모

전차선은 주행중인 철도차량 집전장치와 접촉하여 전력을 공급하는 가공 나전선으로서, 교체주기는 전차선의 마모상태에 따라 결정된다.

- ① 전차선의 유지보수는 검측설비를 이용하여 전차선 동특성 및 아크상태를 측정하고 전차선 마모상태를 진단하는 방식을 취하고 있으며, 향후 전차선 변형상태까지 측정을 확대하여 모니터링정비를 실시할 필요가 있다.
- ② 전차선의 내구연한은 20년으로 되어 있으나, 별도의 교체시기를 정하지 않고 상태 모니터링을 통하여 교체시기를 결정하는 것이 효과적이다. 전차선의 경우에는 정상적인 마모보다는 이상 마모가 수명을 단축시키는데 결정적인 역할을 하므로, 모니터링정비를 통하여 이상마모를 조기에 검지하고 사전정비를 실시한다면 내구연한보다 길게 교체시기를 연장할 수 있다.

#### 4) 조가선 가닥단선

조가선은 열차운행에 따른 전류의 증가와 대도시 및 공장지대에서의 공해에 의한 부식방지를 위하여 청동연선(Bz) 65mm를 사용하고 있으며, 드로퍼와의 접속과 가동브래킷 지지점에서의 응력, 장력 인가 및 순환전류의 불균형으로 인하여 가닥단선이 발생한다.

- ① 조가선 가닥단선은 기존의 육안점검과 차상점검을 통하여 검지하기가 곤란한 것으로 나타났다. RCM 분석 결과, 전차선로 변형 검측설비를 도입하여 모니터링정비를 실시하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.
- ② 고장데이터 분석에 의한 적정교체주기는 33.1년으로서 내구연한(20년)보다 크게 나타났다. 조가선의 경우, 내구연한을 별도로 정하지 않고 상태 모니터링으로 이상을 검지하여 교체시기를 정하는 것이 효과적이다.

#### 5) 급전선 가닥단선

전차선로 급전선은 철도차량에 전력을 공급하기 위한 가공 나전선으로서, 온도변화에 따른 접속부의 손상 또는 절연이격거리 불량으로 인하여 가닥단선이 발생한다.

- ① 기존의 육안점검 및 차상점검으로는 가닥단선 검지가 곤란하므로, 전차선로 변형 검측설비를 이용한 모니터링정비가 효과적이다.
- ② 고장데이터 분석에 의한 적정교체주기는 24.7년으로서 내구연한(30년)과 큰 차이는 없으며, 급전선의 경우 전차선이나 조가선처럼 내구연한을 별도로 정하지 않고 상태 모니터링으로 이상을 검지하여 교체시기를 정하는 것이 효과적이다.

### 4. 결 론

전기철도에서 가공전차선로의 신뢰도를 향상시키고 유지보수를 최적화하기 위한 RCM 기법을 제시하였다. 전차선로의 주요 고장모드를 도출하고 고장영향 및 고장검지기법을 분석하기 위하여 전차선로 유지보수에 적합한 FMECA 기법을 제시하였으며, 신뢰도 분석 및 RCM 결정논리트리틀을 이용하여 전차선로의 주요 고장모드에 대한 최적의 유지보수방법을 선정하는 기법을 제시하였다. 제안한 RCM 결정논리트리틀에서는 유지보수의 과학화를 통한 업무의 생산성 및 효율성 향상을 위하여 상태감시 기반의 방식을 우선 적용하도록 하였으며, 고장데이터를 이용한 신뢰도 분석을 통하여 교체주기를 최적화하도록 하였다.

고속철도 가공전차선로에 대하여 제안한 RCM 절차를 적용한 결과, 드로퍼 가닥 단선과 균압선 가닥 단선, 전차선 이상마모 등이 주요 고장모드로 도출되었으며, 기존의 시간중심 예방정비를 탈피하여 전차선로 변형 검측시스템과 열화상 측정장비 등을 이용한 상태감시 기반의 유지보수방식을 우선적으로 적용할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 고장데이터를 이용한 신뢰도 분석 결과를 이용하여 드로퍼의 교체주기를 10년에서 최대 20년까지 연장하는 등 교체주기를 최적화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이상으로부터, 가공전차선로의 유지보수에 RCM을 적용하여 상태감시 기반의 유지보수방식을 적용하고 교체주기도 최적화함으로써, 전차선로의 신뢰도 및 유지보수의 효율성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 제안한 RCM 기법은 향후 고속철도 전차선로의 유지보수 업무에 적용할 계획이다.

#### 감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

- [1] R. J. Hill, "Electric Railway Traction : Part 3 Traction Power Supplies", Power Engineering Journal, pp. 275-286, 1994.
- [2] J. Moubray, Introduction to Reliability-Centered Maintenance, Industrial Press Inc., 1997.
- [3] Seok-Yun Han, "A Study on Reliability Centered Maintenance of AGT Vehicle System", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 7, No. 3, pp. 271-277, 2004.
- [4] Yang-Ha Yu, "Reliability Centered Rolling-stock Maintenance methods(RCRM)", Chungnam National University, PhD thesis, pp. 32-35, 2014.
- [5] Seok-Kyun Shin, "A Study on the Analysis of the Reliability and the Safety to Apply RCM to Railway System", Journal of the Korean Society for Railway, vol. 9, No. 6. 2006.
- [6] Hyeong-Cheol Kim, "The Evaluation of Inspection Period based on Reliability in Railway Traction Power Systems", Trans. of the KIEE, vol. 62, No.8, pp.1177-1183, 2013.
- [7] Korea Railroad Corporation, "Power Train Maintenance Enforcement Regulations", March 2015.
- [8] Eung-Kyu Youn and Kyu-Hyoung Choi, "A Study on Reliability Analysis of Electric Railway Catenary System using FMECA", Trans. of the KIEE, vol. 64, No.11, pp. 1618-1625, 2015.
- [9] MIL-STD-1629A, "Procedures for Performing a Failure Mode and Effects and Criticality Analysis", DOD, 1980.
- [10] IEC-60812, Analysis Techniques for System Reliability- Procedure for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), IEC, 2001.
- [11] Onodera Katzshige, Practical FMEA Techniques for global standards, Japan Science and Technology Association, pp.113-125, 2005.



- [12] Korea Rail Network Authority, "Accounting Enforcement Regulations", asterisk 2, 2015. 2. 24.
- [13] Sun-Geun Seo, Minitab Reliability Analysis, EraeTech, pp. 157-161, 2005.

---

## 저 자 소 개



### 윤 응 규 (Eung-Kyu Youn)

2000년 : 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업, 2012년 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과(박사수료). 1984년~현재 : 철도인재개발원 기술아카데미센터 교수

Phone : 031-461-4266

E-mail : ykkekk@hanmail.net



### 최 규 형 (Kyu-Hyoung Choi)

1981년 : 서울대학교 전기공학과 졸업, 1982년 : 홋카이도(北海道)대학 전기공학과 박사과정 졸업(공학박사). 2005년~현재 : 서울과학기술대학교 철도전기신호공학과 교수

Phone : 02-970-6873

E-mail : khchoi@seoultech.ac.kr