

# 전동차 신뢰성 모델 및 분석 방법

## Reliability Modeling and Analysis Method of EMU

신무승\*  
Shin, Moo-Seung

김필환\*\*  
Kim, Phil-Hwan

구병춘\*\*\*  
Goo, Byeong-Choon

### ABSTRACT

This paper is to suggest reliability modeling and analysis method of Electric Multiple Unit (EMU). It is necessary to identify subsystems/equipments of EMU and functional interfaces between subsystems in order to carry out reliability modeling of EMU properly. After identifying subsystems/equipments and functional interface, reliability allocation is performed using ARINC method. Reliability target of system/subsystems is verified in revenue service during the proper periods.

### 1. 서 론

최근 전동차의 기술 경향은 전기/전자 시스템 자체 뿐만이 아니라 각 시스템간의 인터페이스 기술이 점점 복잡해지고 첨단화되어 가고 있는 추세이다. 따라서 차량의 안전한 운행과 내구성 있는 시스템 구축을 위해 전동차를 구성하는 시스템의 신뢰성 확보 문제는 중요한 문제이다.

일반적으로 신뢰성은 정해진 기간동안 규정된 시스템의 기능을 고장 없이 수행할 수 있는지를 시간 또는 거리를 기준으로 평가한다는 점에서 정해진 시점에서의 시스템의 품질을 평가하는 품질관리와는 구분이 된다. 신뢰성 모델링과 분석을 통해서 일정기간동안 발생하는 고장을 예측함으로써 고장발생에 따른 여유부품의 관리 및 예비차량편성 계획을 지원하는데 필요한 정보를 지원할 수 있다. 본 논문은 전동차를 구성하는 시스템에 대한 신뢰성 모델링과 분석 방법을 통하여 전동차의 신뢰성 확보를 위한 접근 방법을 제시한다.

### 2. 신뢰성 모델

신뢰성 모델은 규명된 장치 또는 기능과 구성 부품들간의 상호 연관관계를 표현하는 방식이다. 기본적인 신뢰성 모델은 모든 시스템 구성 부품이 직렬로 연결된 모델이라고 가정하며 신뢰성 예측을 위한 수단으로 활용된다. 신뢰성 분석 대상인 시스템 고장은 정상적인 유지보수가 수행되는 정상적인 운영조건에서 발생하는 순수한 장치 고장만을 대상으로 하며 운전자나 정비요원의 실수에 의해 발생하는 고장은 분석대상에서 제외한다.

#### 2.1 전동차 신뢰성 요구사항 분석

전동차의 신뢰성 모델링과 분석을 효과적으로 수행하기 위해서는 해당 전동차의 운행 환경, 구

\* (주)한국철도차량 중앙연구소 주임연구원, \*\* (주)한국철도차량 중앙연구소 선임연구원

\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원

성 시스템의 기술 사양 및 신뢰성 요구사항 등의 분석이 우선적으로 수행되어야 한다. 일반적으로 전동차의 신뢰성 요구사항 분석을 위해서 다음 표1과 같은 사항들을 고려해야 한다.

**표 1. 신뢰성 분석시 고려사항**

<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전동차 운행 환경             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전동차 운행 지역의 운습도</li> </ul> </li> <li>• 전동차 주행 조건             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연간 평균 주행 거리</li> <li>- 일일 평균 주행 시간 또는 거리</li> <li>- 표정 속도</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신뢰성 평가 파라미터 (MTBF/MDBF)</li> <li>• 시스템 고장 정의</li> <li>• 서브시스템/장치 기술 사양 및 신뢰성 요구사항</li> </ul>
---	---

## 2.2 전동차 서브시스템 구분

전동차의 신뢰성 모델링과 분석 수행에 앞서 먼저 전동차를 구성하는 서브시스템과 장치들의 정의와 규명이 이루어져야 하며 이들의 기능과 인터페이스 관계를 규정해야 한다. 다음 표 2는 일반적으로 전동차를 구성하는 서브시스템과 주요 장치를 기능적인 측면을 고려하여 구분한 것이다.

**표 2. 전동차 서브시스템 구분**

서브시스템	부품(또는 장치)	서브시스템	부품(또는 장치)
00 차량	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차량 배선</li> <li>• 공기 배관</li> </ul>	07 대차	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대차 프레임</li> <li>• 1차 현수장치</li> <li>• 2차 현수장치</li> <li>• Wheel set</li> <li>• Traction link</li> <li>• 기타 장치</li> </ul>
01 차체 및 gangway	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 차체</li> <li>• 차외 설비</li> <li>• Gangway</li> <li>• 운전실 출입문</li> </ul>	08 제동 및 공기 제어 장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 제동 제어 장치</li> <li>• 제동</li> <li>• 공기압축기</li> <li>• 공기통</li> <li>• 기적장치</li> <li>• 와이퍼</li> </ul>
02 실내설비	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 객실 설비</li> <li>• 창문</li> <li>• 운전실 설비</li> </ul>	09 커플러 및 Draft gear	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 커플러</li> <li>• Draft gear</li> </ul>
03 출입문 및 출입문 제어 장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 승객용 출입문 장치</li> </ul>	10 동구류	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 실내등</li> <li>• 설외등</li> </ul>
04 HVAC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에어컨</li> <li>• 라인폴로우 팬</li> <li>• 배기팬</li> </ul>	11 열차제어 및 감시장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 상태 표시 모니터</li> <li>• 열차 제어 장치</li> </ul>
05 전원공급장치 및 보조장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SIV</li> <li>• 축전지 시스템</li> <li>• 일반 전장품</li> </ul>	12 승객정보 및 통신장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 열차무선장치</li> <li>• 승객표시장치</li> <li>• 방송장치</li> </ul>
06 견인장치 및 전기제동	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 판토크래프</li> <li>• 견인 장치 (전기/기계)</li> </ul>	13 신호장치	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ATC/ATO (ATP)</li> </ul>

### 2.3 신뢰성 블록 다이어그램

신뢰성 블록 다이어그램은 차량 시스템 내의 장치/부품의 고장 영향을 분석하기 위해 상호 연결된 블록을 사용하는 신뢰성 해석 방법으로, 각 서브시스템뿐만 아니라 차량 전체 시스템 평가에 유용하다. 차량 시스템의 블록다이어그램에 있어서 차량의 서브시스템에서 고장발생 또는 고장정후가 감지되면 정상적인 차량 운행이 불가능하거나 운행 능력이 저하되므로 신뢰성 관점에서 볼 때, 각 서브시스템은 상호 보완 관계가 아닌 직렬관계(series)로 연결되어 있다고 가정할 수 있다. 시스템과 서브시스템의 직렬 관계는 다음 그림 1.과 같은 블록 다이어그램으로 나타낼 수 있다.

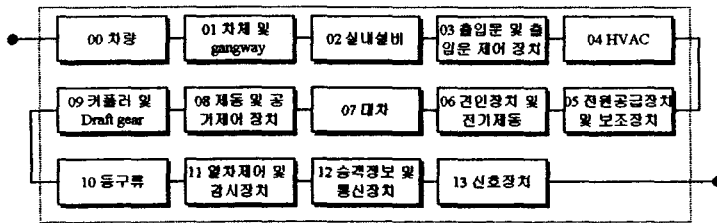


그림 1. 차량 시스템 신뢰성 블록 다이어그램

또한 서브시스템의 신뢰성 블록다이어그램의 경우 서브시스템을 구성하는 장치나 부품들의 기능적인 인터페이스를 고려하여 직렬, 병렬 또는 리던던시 구조로 구성하며, 서브시스템중 출입문 장치의 기능 블록 다이어그램과 신뢰성 블록다이어그램 그림 2.1과 2.2에 나타내고 있다.

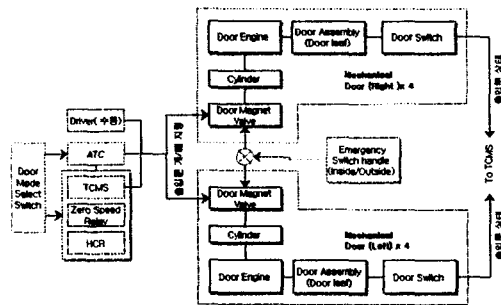


그림 2.1 기능 블록 다이어그램 (출입문 장치)

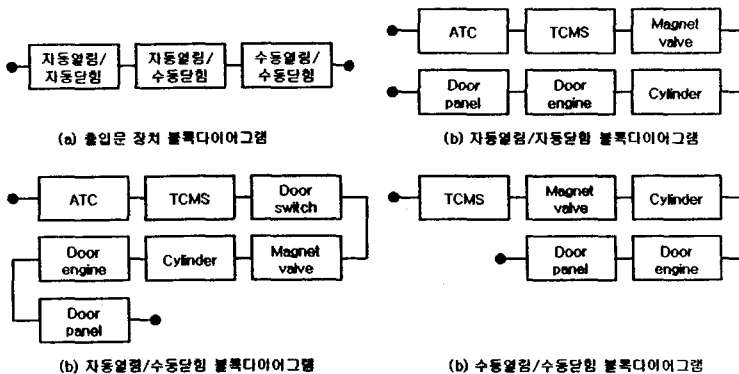


그림 2.2 신뢰성 블록다이어그램 (출입문 장치)

## 2.4 신뢰성 할당

철도차량 시스템은 대차, 제동, 견인장치 등과 같이 많은 서브시스템으로 구성된 복잡한 시스템이다. 이와 같은 차량 시스템에 대해서는 차량 전체 수준의 목표 신뢰도가 결정이 되었다 하더라도 이를 만족시키기 위해서는 각 서브시스템(혹은 장치)에 대한 신뢰도 수준을 필요로 하게 된다. 이론적인 측면에서 보면 시스템 신뢰성 배분은 다음과 같은 기본적인 부등식을 푸는 것을 의미한다.

$$f(\widehat{R}_1, \widehat{R}_2, \dots, \widehat{R}_n) \geq R^*$$

여기서 :

$\widehat{R}_i$  는 i번째 서브 시스템에 대해 배분된 신뢰성 파라미터이다.

$R^*$ 는 차량에 대한 신뢰성 요구사항 파라미터이다.

$f$  는 서브시스템과 차량의 신뢰성간의 기능적 관계이다.

시간 t에 대해 간단한 직렬 시스템으로 구성되어 있는 경우에 대해서는 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$f(\widehat{R}_1 \cdot \widehat{R}_2 \cdot \dots \cdot \widehat{R}_n) \geq R^*(t)$$

그러나 시스템 배분에 대한 제약 사항이 없다고 가정할 경우 위의 수식은 무한개의 해를 갖게 된다. 따라서 신뢰성 배분 과정은 일관성 있고 적절한 신뢰성 배분이 이루어 질 수 있도록 유일하거나 제한된 수의 해를 도출하는 과정을 설정하는 것이다. 이러한 신뢰성 배분 방법으로는 '등가 배분', 'AGREE 기법', 'Feasibility-of-objective technique' 또는 'Minimization of effort algorithm'과 같은 방법 등이 있으나 유사 차량이나 시스템에 대한 경험 데이터를 사용하여 각 시스템의 가중치에 의한 신뢰도 분배를 수행하는 ARINC 기법이 가장 많이 수행되는 방법으로 다음과 같이 수행된다.

가정 1 : 각 서브시스템은 일정한 고장률을 갖는다.

가정 2 : 각 서브시스템은 직렬구조를 갖는다. 즉, 어떠한 서브시스템에서 발생한 고장은 전체 시스템 고장을 유발시킨다.

가정 3 : 서브시스템 임무시간(Mission time)은 전체 시스템 임부시간과 동일하다

ARINC 방법은 신뢰성 요구사항 수식을 고장률로 나타내며 다음과 같은 단계를 통해 수행된다.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i^* = \lambda^*$$

여기서  $\lambda_i^*$  : 서브시스템 i에 배분된 고장률,  $\lambda^*$  : 시스템 목표 고장률

단계 1 : 과거 관측이나 예측으로부터 서브 시스템 고장률  $\lambda_i$ 를 결정한다.

단계 2 : 단계 1에서 결정된 고장률에 따라 각 서브 시스템에 대한 가중치  $w_i$ 를 결정한다

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$

단계 3 : 서브 시스템에 대한 고장률을 다음과 같이 분배한다

$$\lambda^*_i = w_i \lambda^*$$

이와 같은 ARINC 배분 방식은 기존의 유사 차량/장치에 대한 신뢰도 데이터를 기초로 하고 있기 때문에 비교적 정확한 신뢰도 배분을 할 수 있다. 신뢰도 배분시 시스템간의 상호 인터페이스에 따른 문제점을 고려하여 목표 신뢰도보다 다소 높게 설정하는 것이 바람직하다.

### 2.5 신뢰성 예측

신뢰성 예측은 신뢰성 모델에서 정의된 방법을 사용하여 차량을 구성하는 서브시스템/장치의 신뢰도가 고장률 혹은 MTBF와 같은 신뢰성 요구사항을 만족시키는지 여부를 예측하는 방법으로 다음과 같은 방식을 사용하여 신뢰성 예측을 수행한다.

#### 방법 1 : 통계적 필드 데이터를 이용한 신뢰성 예측

- 예측 대상 서브시스템/장치에 대한 통계적 데이터의 활용이 가능한 경우 기술적 요인, 운행 환경 요인을 고려하여 신뢰성 예측을 한다.

#### 방법 2 : 신뢰성 시험 결과를 이용한 신뢰성 예측

- 예측 대상 서브시스템/장치에 대한 기존의 신뢰성 시험 결과를 사용하여 신뢰성 예측을 한다.

#### 방법 3 : 표준을 이용한 신뢰성 예측

- 방법 1, 2의 데이터를 활용할 수 없는 경우 MIL-STD-271, Bellcore, NPRD와 같은 예측 표준을 사용하여 신뢰성 예측을 한다.

철도차량의 경우 신뢰성 함수는 불특정 고장을 전제로 일정한 고장율을 갖는 지수분포로 정의되기 때문에 MTBF는 다음과 같이 정의된다.

$$MTBF = \frac{\text{조사 기간동안 차량운행 시간(또는 거리)}}{\text{조사 기간동안 고장발생수}}$$

## 3. 신뢰성 입증

### 3.1 신뢰성 입증 시험

신뢰성 입증은 설계 초기단계에서 배분된 차량 시스템 및 서브 시스템의 신뢰성 목표값을 만족시키는지 여부에 대해 시험을 통해서 입증하는 단계이다. 일반적으로 신뢰성 입증 시험은 차량의 영업운전 단계에서 일정기간 대상차량 전체를 대상으로하여 수행한다. 신뢰성 입증 시험 단계에서 발생한 모든 고장의 원인 규명과 대책 그리고 그 영향 평가는 고장 심사 위원회(Failure Review Board : FRB)에서 논의된다. 고장 심사 위원회의 인원은 수요자, 차량 제작사, 서브시스템/장치 공급사의 필요 인원으로 구성된다.

### 3.2 신뢰성 성장

일반적으로 철도차량의 고장률은 다른 수송 시스템과 같이 운행 초기 단계 많으나 운행시간 증가에 따라 서서히 감소하여 일정한 시간이 경과하면 비교적 일정하게 안정화되어 목표한 고장률에 이르게 된다. 이렇게 일정 수준의 목표 고장률(신뢰성)이 확보될 때까지의 시간을 신뢰성 성장(Reliability Growth) 기간이라 하며, 이를 그래프로 표현하면 그림. 3과 같다.

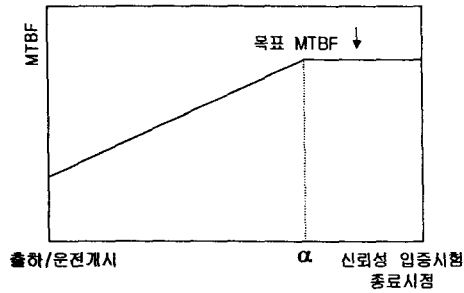


그림 3. 전동차 신뢰성 성장 Log-Log 선도

신뢰성 성장은 Duane Model을 통해 설명되는데 Duane Model에서 중요한 요소는 성장률( $\beta$ )이며 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$C(t) = M(t)/t = \lambda t^{-\beta}$$

여기서  $C(t)$ 는  $t$ 시간동안 발생하는 고장발생횟수를  $t$ 시간으로 나눈값,  $M(t)$ 는  $t$ 시간 동안 발생하는 고장발생 횟수,  $\lambda$ 와  $\beta$ 는 각각 신뢰성 성장률 그래프의  $y$ 절편값과 성장률을 나타낸다. 철도차량의 경우에는  $C(t)$ 는 고장률,  $1/C(t)$  또는  $t/M(t)$ 는 MTBF를 나타낸다.

성장률이 클수록 목표 신뢰도에 접근하는 시간이 짧아지고 성장률이 작을수록 목표 신뢰도에 접근하는 시간이 길어지게 된다. 그러나 성장률이 크다는 것은 초기 고장이 많고 반복 고장 또는 연속적인 유사고장일 가능성이 있어 반드시 좋은 것만이 아니기 때문에 적절한 값의 설정이 중요하다.

#### 4. 결 론

전동차 시스템에 대한 신뢰성 분석 방법은 앞에서 기술한 내용 이외에도 필요에 따라 FMEA/FMECA 또는 FTA 등 여러 방법을 통해 분석을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 일반적으로 전동차의 초기 설계 단계에서부터 제작, 시험에 이르기까지 적용 가능한 신뢰성 모델링 기법과 분석방법에 대해 간략히 기술하였다. 그러나 전동차 시스템/서브시스템에 대한 적절한 신뢰성 모델링과 분석을 수행하기 위해서는 서브시스템/장치들에 대한 신뢰성 데이터베이스 구축이 필요하며 이는 단기간에 이루어질 수 있는 사항이 아니다. 따라서 장기간에 걸친 신뢰성 데이터베이스 구축은 필수적이며, 이를 위해서는 전동차 운영 주체와 차량 제작사 및 장치/부품 공급사간의 체계적인 연계가 필요하다.

#### 참고 문헌

- 구병춘,김필환,신무승(2001), "도시철도표준화 연구개발사업 중간보고서 - 표준전동차 RAMS 평가 연구", 한국철도기술연구원
- MIL-HDBK-338B (1998), "Electronic reliability design handbook", DOD. U.S.A
- A.Birolini (1999), "Reliability Engineerin, Theory and Practice", Springer
- M.Modarres (1993), "Reliability and Risk Analysis", Dekker
- 윤용기,정락교,이병송 (2001), "경량전철차량시스템 제동장치의 신뢰도 예측", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집