

# 표준 전동차의 신뢰성 평가

## Reliability Estimation of the Standard Electric Multiple Unit

구병춘\*                      김남포\*  
Goo Byeong-choon, Kim Nam-po

### ABSTRACT

To estimate the reliability of the standard electric multiple unit developed by Korea Railroad Research Institute, the vehicle system composed of 4 cars is divided into 14 subsystems. The 14 subsystems are connected in series. For each subsystem except for car body and bogie, failure rate is evaluated by an optimal failure model used in reliability engineering. For car body and bogie probabilistic structural integrity analysis is carried out. The distribution of failure rate of each part and system is assumed to be exponential. The estimated MTBF of the vehicle satisfies the planned MTBF.

### 1. 서론

본 연구는 한국철도기술연구원이 개발한 표준전동차의 신뢰성 평가에 관한 것이다. 표준전동차는 그림 1에서 보는 바와 같이 2량의 제어차와 2량의 구동차로 4량이 1편성을 구성하고 있다.

신뢰성 평가를 위하여 전동차를 직렬로 연결된 14개의 서브시스템으로 나누어 각 서브시스템의 신뢰성을 평가하고 전체 차량시스템의 신뢰성을 평가하였다. 차량과 대차에 대해서는 최근에 연구가 활발한 구조 신뢰성 평가기법을 적용하여 평가하고 나머지 서브시스템에 대해서는 MIL-HDBK나 SWSC-98LE1과 같은 규격을 적용하여 예측하였다. 모든 부품과 서브시스템의 고장률은 지수분포를 따른다고 가정하였다.

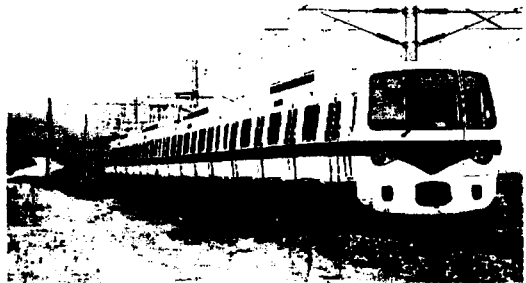


Figure 1. 4량 1편성 표준전동차 전경

### 2. 서브 시스템 분류

표준전동차를 구성하는 서브시스템은 그림 2에서 보는 바와 같이 전동차 시스템이 정상적인 운영을 하는데 있어서 독립적으로 중요한 기능을 수행하는 14개의 서브시스템으로 분류하였다. 서브시스템에서 고장발생 또는 고장징후가 감지되면 정상적인 차량 운행이 불가능하거나 운행 능력이 저하되므로 차량의 신뢰성 관점에서 각 서브시스템은 상호 보완 관계인 병렬이 아닌 직렬(series)로 연결되어 있다고 가정할 수 있다.

\* 한국철도기술연구원, 차량기계연구본부, 선임연구원

Vehicle cabling/piping

(00.Vehicle)의 경우는 다른 장치와 같은 기능품이 아닌 각 서브시스템/ 장치간의 공기 및 전기적 인터페이스 관계를 의미하는 것으로 별도의 MTBF/ MTBSF를 갖지 않는다. 다만 각 서브시스템/ 장치간의 인터페이스 오류로 인해 발생하는 고장을 고려하여 설계 시 차량 편성 MTBF/ MTBSF에 약 10% 정도의 여유분을 고려하는 것이 일반적이다. Lighting의 경우는 주 구성품이 형광등으로 이는 기능품의 역할보다는 소모품의 성격을 갖기 때문에 전체 MTBF와 MTBSF 해석에서 제외하였다.

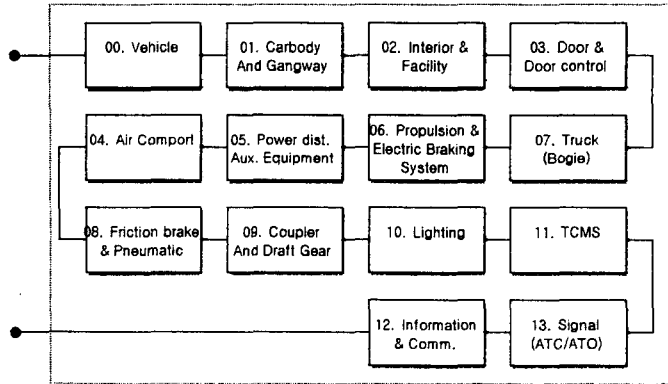


Figure 2. 시스템 신뢰성 블록도

3. 고장 및 MTBF/MTBSF의 정의

철도차량에 있어서의 고장은 시스템 또는 부품 자체 고장뿐만이 아니라 이들 고장으로 인해 차량 운행에 미치는 영향을 고려하는 것이 중요하며 이에 대한 정의는 다음과 같다.

- 1) 고장(Failure): 시스템/장치의 예정되지 않은 유지보수, 수리 또는 교체가 요구되는 모든 오동작
- 2) 관련 고장 (Relevant Failure): 시스템/장치에 대한 관련 고장은 다음 사항이 원인이 되어 해당 시스템/장치의 기능 손실을 유발하는 고장
  - 설계 또는 환경 사양 기준 이내에서 작동하는 시스템/장치의 고장
  - 시스템/장치 제작사가 공급하는 자료에 따라 수행된 부적절한 운영, 유지보수 또는 시험에 의해 발생된 고장
- 3) 비관련 고장(Non-relevant Failure): 다음 사항과 같이 관련 고장 정의에 포함되지 않는 시스템/장치의 고장으로 정의된다.
  - 다른 장치의 오동작으로 발생된 고장
  - 사람의 실수로 발생된 고장
  - 충돌 또는 장애물 추돌과 같이 시스템 또는 부품의 정상적인 동작과 관련이 없는 사건에 의해 발생된 고장
  - 설계 또는 환경 사양 기준을 초과하는 조건에서 운영되는 시스템/장치에 의해 발생된 고장
- 4) 운행 고장(Service Failure) : 영업운행, 시운전 또는 출고전 장치 상태 시험동안 다음과 같은 사항을 유발하는 모든 관련 고장
  - 출고전 시험은 성공적으로 완료되었으나 차량을 영업운행에 투입하지 못한 경우
  - 영업운행 도중 운행이 불가하여 차량을 입고 조치한 경우
  - 5분 이상의 영업운행 지연이 발생한 경우
 위와 같은 고장의 정의에 의해 철도차량에 있어서 시스템 또는 부품의 고장이라 함은 관련고장 및 운행고장을 말하여 비관련 고장은 고장으로 분류하지 않는다. 따라서 신뢰성 평가 척도인 MTBF와 MTBSF는 다음과 같이 정의된다.

$$MTBF = \frac{\text{차량의 전체 운행 시간}}{\text{전체 관련고장 개수}}; \quad MTBSF = \frac{\text{차량의 전체 운행 시간}}{\text{전체 운행고장 개수}}$$

4. 신뢰성 평가

신뢰성의 예측은 통계적 필드 데이터를 이용하거나 시험 데이터 혹은 규격을 이용하여 할 수

있다. 통계적 필드 데이터를 이용한 신뢰성 예측 방법은 예측 대상 서브시스템/장치에 대한 통계적 데이터의 활용이 가능한 경우에 기술적 요인, 운영 환경 요인을 고려하여 신뢰성 예측을 한다. 신뢰성 시험 결과를 이용한 신뢰성 예측 방법은 예측 대상 서브시스템/장치에 대한 기존의 신뢰성 시험 결과를 사용하여 신뢰성을 예측한다. 그리고 규격을 이용한 신뢰성 예측 방법은 위의 2가지 방법을 활용할 수 없는 경우 전기, 전자 부품에 대해서는 MIL-HDBK-217, Bellcore 등의 규격을 적용하며 기계부품에 대해서는 NPRD, NSWC-98/LE1과 같은 규격을 적용하여 예측하였다.

#### 4.1 차체와 대차의 신뢰성

서브시스템 차체와 대차의 신뢰성은 한계상태방정식을 사용하는 구조 신뢰성 기법을 활용하여 평가하였다<sup>(1, 2)</sup>

#### 4.2 Interior & Facility의 신뢰성

의자, 내장판, 창문과 같은 실내 설비는 단순 고정물로서 신뢰성 측면에서 크게 중요한 부품들이 아니기 때문에 신뢰성 모델링과 평가를 수행하는 것은 큰 의미를 갖기 어렵다. 따라서 Interior & Facility에 대한 별도의 신뢰성 평가는 수행하지 않았다.

#### 4.3 Door & Door control의 신뢰성

출입문장치는 승객용 출입문, 운전실 출입문 및 차량 통로문으로 구성되어 있다. 운전실 출입문과 차량 통로문은 기계적인 로킹장치와 출입문 판넬로 구성되어 있기 때문에 마모, 부식, 크랙과 같은 단순한 고장 모드를 나타내고 있다. 따라서 전기적, 기계적 특성을 갖고 있으며 신뢰성과 안전성 확보가 중요한 승객용 출입문(이하 출입문)에 대한 신뢰성 모델링과 예측을 수행하였다. 출입문 장치의 신뢰도는 출입문을 구성하는 실린더, 벨브, 벨트 어셈블리, 출입문 패널, 출입문 제어 장치의 신뢰도에 따라 결정되며, 전체 고장률은 각 부품들의 고장률의 합으로 나타난다.

$$\lambda_{Door} = \lambda_{Cyl} + \lambda_{MVV} + \lambda_{Belt} + \lambda_{Leaf} + \lambda_{Con}$$

여기서  $\lambda_{Door}$ =출입문 고장률;  $\lambda_{Cyl}$ =실린더 고장률;  $\lambda_{MVV}$ =전자 벨브 고장률;  $\lambda_{Belt}$ =벨트 어셈블리 고장률;  $\lambda_{Leaf}$ =출입문 판넬 고장률;  $\lambda_{Con}$ =출입문 제어장치 고장률이다.

#### 4.4 Air Comport System (HVAC)

HVAC 서브 시스템은 에어컨과 line flow fan으로 구성된다. 에어컨은 천정 장착형(Roof mounted type)으로 냉방기가 2대씩 설치되어 있고 실내온도 상태를 감지하여 자동으로 작동되도록 구성되어 있다. 또한 운전실에서 선택 스위치를 통하여 수동운전도 가능한 구조로 되어 있다. 에어컨의 주요 구성품은 압축기(Compressor), 응축기(Condenser), 건조기(Filter drier), 모세관(Capillary tube), 증발기(Evaporator), 액분리기 (Accumulator), 고·저압 스위치 (Dual pressure switch), 실내온도 조절기 (Room thermostat) 등이다.

에어컨의 신뢰도는 에어컨을 구성하는 부품들의 신뢰도에 의존하며 고장 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{AirCon} = \lambda_{COM} + \lambda_{CON} + \lambda_{FLT} + \lambda_{CAP} + \lambda_{EVA} + \lambda_{EVA} + \lambda_{ACC} + \lambda_{DPS} + \lambda_{THE}$$

여기서  $\lambda_{COM}$ =압축기 고장률;  $\lambda_{CON}$ =응축기 고장률;  $\lambda_{FLT}$ =건조기 고장률;  $\lambda_{CAP}$ =모세관 고장률;  $\lambda_{EVA}$ =증발기 고장률;  $\lambda_{ACC}$ =액분리기 고장률;  $\lambda_{DPS}$ =고·저압 스위치 고장률;  $\lambda_{THE}$ =실내온도 조절기 고장률이다.

#### 4.5 동력배분 및 보조 장치의 신뢰성

Power distribution & Auxiliary equipment는 SIV, Battery system 및 AC & low voltage equipment (일반 전장품)로 구성되나 일반 전장품은 단품으로서 Power distribution & Auxiliary equipment의 신뢰성 예측에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 SIV와 Battery에 대한 MTBF만으로 신뢰성 예측을 수행하였다.

**(1) SIV 신뢰성**

SIV를 구성하는 각 부품들은 주로 저항, 커패시터, 리액터, 트랜지스터와 같은 전기, 전자 부품으로 구성되어 있기 때문에 SIV 고장 모델은 이들 전기, 전자 부품에 대한 고장 모델과 동일한 모델을 갖는다. SIV의 모든 전기, 전자 부품에 대해서 고장 모델을 기술하는 것은 큰 의미가 없기 때문에 SIV의 주요 부품만을 선정하여 고장 모델링을 수행한다.

○ 저항 고장모델

$$\lambda_P = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_P \cdot \pi_S \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$$

여기서  $\lambda_b$ =저항의 기본 고장률;  $\pi_T$ =온도 팩터=  $\exp\left(\frac{-E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{298}\right)\right)$ ,  $E_a = 0.2$

또는 0.08;  $T$  = 저항 표면 온도;  $\pi_P$ =전력 팩터;  $\pi_P = (\text{소비전력})^{0.39}$ ;  $\pi_S$ =전력 스트레스 팩터;

$$\pi_S = 0.71e^{1.1(S)} \text{ 또는 } 0.54e^{2.04(S)}; S = \frac{\text{실제 소비전력}}{\text{정격 소비전력}}; \pi_Q=\text{품질 팩터}; \pi_E=\text{환경 팩터};$$

$$\pi_E = G_M = 16$$

○ 커패시터 고장모델

$$\lambda_P = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_C \cdot \pi_V \cdot \pi_{SR} \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$$

여기서,  $\lambda_b$ =커패시터의 기본 고장률;  $\pi_T$ =온도팩터=  $\exp\left(\frac{-E_a}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{298}\right)\right)$ ,

$E_a = 0.15$  또는 0.35,  $T$  = 커패시터 주위 온도;  $\pi_C$ =커패시턴스 팩터;  $\pi_C = C^{0.09}$  또는  $C^{0.23}$ ;

$\pi_V$ =전압 스트레스 팩터;  $\pi_{SR}$ =직렬 저항 팩터 (Tantalum CSR 형태의 커패시터만 적용);  $\pi_Q$  = 품질

팩터;  $\pi_E$ =환경 팩터,  $\pi_E = G_M = 20$

○ 인덕터 고장모델

$$\lambda_P = \lambda_b \cdot \pi_T \cdot \pi_Q \cdot \pi_E$$

여기서,  $\lambda_b$ =인덕터 기본 고장률;  $\pi_T$ =온도 팩터=  $\exp\left(\frac{-0.11}{8.617 \times 10^{-5}} \left(\frac{1}{T_{HS}+273} - \frac{1}{298}\right)\right)$ ,  $T_{HS} =$

Hot spot 온도;  $\pi_Q$ =품질 팩터;  $\pi_E$ =환경 팩터;  $\pi_E = G_M = 12$

○ 접촉기 고장모델

$$\lambda_P = \lambda_b \cdot V^n \cdot I^m$$

여기서  $\lambda_b$ =접촉기 기본 고장률;  $V$ =접촉기 양단의 전압;  $n$ =전압 상수;  $I$ =전류;  $m$ =전류 상수

**(2) 배터리 시스템**

표준전동차에서 사용되는 HDM 70P 축전지의 신뢰성 평가 방법으로 기존의 유사 시스템의 운행 경험과 MIL-HDBK-217F를 사용하여 축전지 시스템의 고장률을 예측한다. 표준전동차에서 사용되는 축전지는 Ni-Cd 축전지로서 총 10개의 crate로 구성되어 있으며, 각 crate에는 7개의 축전지 cell을 갖는다. Ni-Cd 축전지의 고장률은 전기적, 화학적 기술과 설계보다는 외부적인 작용에 좀 더 많은 영향을 받기 때문에 유사 시스템의 운행 데이터를 통하여 고장률을 예측하는 방법이 단순히 Handbook이나 사양 분석을 통한 예측보다 더 좋은 예측 결과를 나타낸다.

Cell의 고장률은 다음과 같은 수식으로 나타낸다.

$$\lambda_c = \frac{N_f \times \alpha}{T_o}$$

여기서,  $\lambda_c$ =Cell 고장률;  $N_f$ =고장난 Cell 수;  $\alpha$ =신뢰도 수준 (95%);  $T_o$ =전체 운행 시간이다.

상기 cell 고장률 계산에 대한 파라미터 값은  $N_f = 5.25$  cells,  $\alpha = 5.99$ ,  $T_o = 1,320,964,200$  hours 이다. 따라서 cell 고장률  $\lambda_c = 0.0238 \times 10^{-6}$  이다.

축전지 기타 전기부품들로는 Cell과 Crate 상호간의 전기적 연결을 위해 사용되는 screw 연결과 crimping 연결이 있으며 이들 고장률은 MIL-HDBK-217에 따라 계산한다.

Screw 연결 :  $\lambda_{cw} = 0.00026 \times 10^{-6}$ , Crimping 연결 :  $\lambda_{cr} = 0.0012 \times 10^{-6}$

축전지의 신뢰도를 계산하기 위해서 축전지의 모든 부품은 직렬로 연결되어 있으며 연간 365일, 일일 24시간 동작한다고 가정한다. 표 1은 축전지의 각 부품들에 대한 신뢰도 수식을 나타낸다.

Table 1 축전지 각 부품의 신뢰도 함수

부품	신뢰도 (Reliability)
Cell	$R_c = e^{(-\lambda_c \times t)}$
Cell package	$R_b = R_c^n$
기타 부품	Screw 연결: $R_{cw} = [e^{(-\lambda_{cw} \times t)}]^n$ , Crimping 연결: $R_{cr} = [e^{(-\lambda_{cr} \times t)}]^n$

표준 전동차 축전지 시스템은 70 cell, 140회의 Screw 연결, 18회 Crimping 연결로 이루어진다. 최종적인 축전지 신뢰도는 모든 축전지 부품들의 신뢰도의 곱으로 얻어진다.

$$R = R_b \times R_{cr} \times R_{cw}$$

#### 4.6 추진 및 전기제동 장치의 신뢰성

Propulsion & Electric Braking System은 Power supply (pantograph), Mechanical propulsion system 및 Electric propulsion system으로 구성된다.

##### (1) 판토티그래프의 신뢰성

판토티그래프의 경우 부품별 상세 고장데이터 확보가 되어 있지 않기 때문에 부품별 MTBF 예측을 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서 판토티그래프 신뢰성 수준에 대해서는 유사 국내전동차(서울시 7&8호선 전동차, 인천시 1호선 전동차)에 대한 경험 데이터를 기준으로 하여 표준전동차 판토티그래프의 주요 사양을 고려한 예측은 가능하다.

##### (2) 기계 추진 시스템

Mechanical propulsion system은 드라이빙 기어와 기어 커플링으로 구성된다. 드라이빙 기어는 99/14(7.07:1)의 기어비를 가지며, 기어, 기어 케이스, 베어링, 실링, 토크링크 등으로 구성된다. Mechanical propulsion system의 고장률 예측은 판토티그래프의 경우와 마찬가지로 유사 국내전동차(서울시 7&8호선 전동차, 인천시 1호선 전동차)에 대한 경험 데이터를 기초로 하여 예측하였다.

##### (3) 전기 추진 시스템 신뢰성

전인전동기의 신뢰도는 전인전동기를 구성하는 베어링, 권선, 회전자, 고정자 등의 신뢰도에 따르며, 이들 부품들의 성능 저하에 따른 고장 메카니즘과 고장률 분포는 각 고장률 모델에 있어서 상호 독립적이다. 전인전동기 전체 고장률은 다음과 같이 각 부품들의 고장률의 합으로 나타난다.

$$\lambda_M = \lambda_{BE} + \lambda_W + \lambda_{RT} + \lambda_{ST}$$

여기서  $\lambda_M$ =전인전동기 고장률;  $\lambda_{BE}$ =베어링 고장률;  $\lambda_W$ =권선 고장률;  $\lambda_{RT}$ =회전자 고장률;  $\lambda_{ST}$ =고정자 고장률이다.

##### (4) 추진 및 전기제동 장치의 신뢰성

추진 및 전기제동장치의 각 서브 시스템에 대한 고장률 예측으로부터 Propulsion & Electric Braking System에 대한 MTBF를 구하면 MTBF = 4,231 hour-편성이다.

#### 4.7 기타 서브 시스템에 대한 신뢰성 평가

위에서 기술하지 않은 나머지 서브시스템에 대해서도 유사한 방법으로 신뢰성을 평가하였다.

#### 4.8 편성차량의 신뢰성 평가

차량 시스템의 신뢰성 예측 평가는 각 서브시스템과 장치에 대한 신뢰성 예측값을 사용하여 계

산한다. 철도차량에 있어서 고장률이 지수분포를 따른다고 하면 신뢰성 평가 파라미터인 MTBF와 고장률과는 상호 역수의 관계가 있으며 다음 식과 같이 표현된다.

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \text{ (여기서 } \lambda \text{는 차량의 고장률)}$$

그리고 13개로 분류한 서브시스템의 고장률을 각각  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{13}$ 이라고 한다면 차량의 고장률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{13} = \sum_{i=1}^{13} \lambda_i$$

앞에서 계산한 각 서브시스템의 MTBF와 위의 수식을 이용하여 차량 전체의 MTBF를 구하면 다음 표 2와 같다. 차체, 대차 및 의장의 경우 이들 서브시스템들은 일반적으로 고장률이 아주 작아서 전체 차량의 고장률 계산에 큰 영향을 주지 않기 때문에 계산에서 생략하였다.

Table 2. 표준전동차 신뢰성 평가 결과

서브시스템	MTBF	고장률
Vehicle Cabling/Piping	-	-
Carbody and gangway	-	-
Interior & facility	-	-
Door & door control	4,529	0.00022
Air comport System (HVAC)	3,133	0.000319
Power distribution & aux. equipments	3,212	0.000311
Propulsion & electric braking system	4,231	0.000236
Truck (bogie)	-	-
Friction brake & pneumatic system	1,029	0.000972
Coupler and draft gear	16,667	5.999E-05
Lighting (system)	-	-
TCMS	4,472	0.000224
Information & communication	973	0.001028
Signal (ATC/ATO)	3,811	0.000262
합계	275.3	0.003632

## 5. 결 론

표준전동차 차량 시스템의 MTBF는 4량 편성 기준으로 275.3시간으로 초기 신뢰성 목표값 115시간을 만족하는 것으로 평가되었다. 그러나 국내의 경우 신뢰성 해석의 경험이 부족한 관계로 본 해석에 사용한 많은 자료가 외국의 것이거나 가정된 것이므로 국내의 실정에 맞는 신뢰성 평가기술과 고장 데이터의 축적 등에 노력하고 신뢰성 관리와 RAMS 관련 연구를 계속적으로 수행하여야 할 것으로 판단된다. 또한 대차 서브 시스템의 경우 주요 구성 부품인 1차·2차 현수장치, 휠셋, 링크 기구 등에 대한 고장률의 평가없이 구조체의 신뢰성만 평가하였으므로 구성품의 신뢰성 평가도 보완하여야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) 구병춘, 서정원, 유원희, 김필환, 신무승, 2001, "표준전동차 RAMS 평가 연구," 한국철도기술연구원.
- (2) 구병춘, 서정원, 김남포, 김원경 2001, "전동차 대차 프레임의 확률론적 구조 건전성 평가," 대한기계학회 추계학술대회는문집 A, pp.161~165.