

한국형 고속열차 신뢰성 관리 체계 연구

A Study of Reliability Management System for High Speed Rollingstock 350 eXperimental

이태형*, 최성훈, 박춘수, 서승일(한국철도기술연구원)

1. 서 론

철도에서 RAMS (Reliability, Availability, Maintainability and Safety)의 구현은 승객의 안전과 시스템 사용자들의 원활한 동작을 위해서 필수 불가결하다. 아무리 좋은 시스템도 그 시스템을 사용하는 사람들이 믿고 신뢰하지 못하면 시스템을 운용하는데 큰 어려움이 있을 것이다. 따라서 시스템의 설계단계에서부터 제작 그리고 시스템을 설치하고 운용하기까지 철저한 검증 작업을 통해 설계자와 사용자가 원하는 동작과 안정성을 갖고 있는지를 확인하는 것이 중요하며 이러한 검증 작업을 통해 시스템을 신뢰할 수 있게 된다. 실제로 영국 등 철도 선진국에서는 시스템 개발 기간과 인력보다 개발한 시스템을 검증하는데 투자하는 기간과 인력이 비슷하거나 더 많은 사례를 간과하지 말아야 할 것이다. 특히, 고속철도시스템과 같이 차량 시스템, 신호 시스템, 궤도 시스템, 운영 시스템 등 다양한 시스템이 상호 연계되어 의도한 기능을 발휘하는 복합 시스템의 경우 안전과 운영 효율화 측면에서 높은 신뢰성이 요구된다. 복합 시스템의 신뢰성을 향상시키고, 규정 이상의 신뢰성을 유지하기 위해서는 지속적인 신뢰성의 평가 및 관리가 필수적이라 할 수 있다.

고속철도시스템의 RAMS 관련된 활동은 그림 1에서처럼 차량의 기획단계에서부터 시작되며, 차량의 수명이 다하는 시점까지 계속된다[1].

본 논문에서는 한국형 고속열차의 안정화와 신뢰성 확보를 목표로 기획한 신뢰성 관리 체계 구축 사례를 소개한다.

한국형 고속열차는 시험차의 제작이 완료되어 현재 각종 구성품의 성능 안정화를 위한 시운전 단계이므로, 그림 1에서의 단계로 보면 installation과 system validation을 거치는 과정이라고 할 수 있다. 관련된 신뢰성 활동을 보면 시스템의 사양을 확정하고, 신뢰성에 대한 기본적인 해석을 수행하고 정량적인 목표를 설정한 후 신뢰성 입증에 대한 준비를 할 단계라고 할 수 있다.

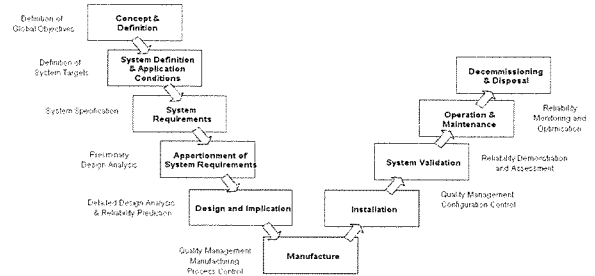


그림 1 제품 수명주기 동안의 신뢰성 관리 절차

2. 신뢰성 관리 체계

신뢰성 관리 체계의 핵심은 신뢰성 평가기법이다. 철도차량 시스템의 신뢰성 평가 사례 분석을 통해 공통적으로 수행하는 신뢰성 평가 과정을 정리하면 그림 2와 같다. 각 과정별로 수행한 내용을 정리하겠다.

2.1 신뢰성 요구조건 설정

시스템의 성능과 수명, 안전성, 제작비용, 유지 보수비용 등 시스템 설계 시의 상충 요인들을 절충(trade-off)하여 시스템의 신뢰성 요구 조건을 설정하게 된다. 우선 G7 고속전철기술개발사업을 통해 확정된 기본사양에서 추출한 신뢰성 요구조건과 이 요구조건으로부터 파생하여 각 서브시스템의 요구조건을 설정하였다. 철도차량 시스템의 경우에는 보통 주행거리를 기준으로 신뢰성 요구 조건을 설정하게 된다.

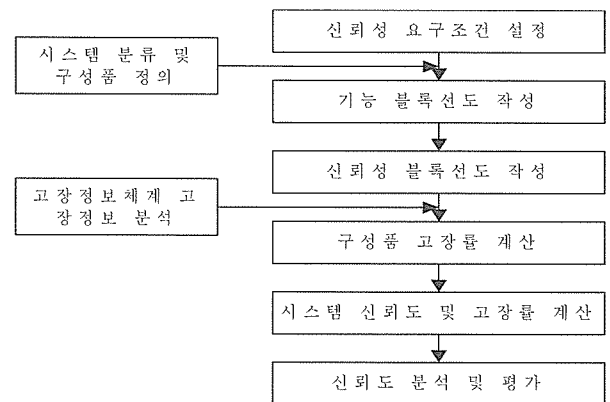


그림 2 신뢰성 평가 과정

2.1.1 한국형 고속열차 기본사양 요구조건
한국형 고속열차 시스템 기본사양에 따른 신뢰성 부분의 요구 조건을 정리하면 다음과 같다.

(1) 신뢰성

- 모든 시스템 및 보조시스템의 신뢰성은 MTBF(Mean Time Between Failure) 기준에 따라 시험되고 평가되어야 하며 전체 열차의 MKBSF(Mean Kilometer Between Service Failure)는 121,000 km 이상이 되어야 한다. 또한, 검사, 유지보수 혹은 고장 수리의 빈도와 관련하여 부품의 상대적 접근 용이성에 대한 타당성을 가져야 한다.
- 제동, 신호 및 속도 제어 장치 등 모든 중요 장치는 근본적으로 다중화계(redundancy)로 구성되거나 혹은 여유 용량을 확보하여야 한다.

(2) 고장 시 운행

- 감지할 수 있는 모든 고장은 기관사나 보조기기의 기억장치에 알려져야 한다.
- 동력대차 1대 고장 시 7/8의 출력으로 정상 운행이 가능해야 한다.
- 동력대차 2대 고장 시 전체 동력의 3/4만으로도 고속철도 선로 및 재래선로 선형의 어느 위치에서나 정지 상태에서부터 출발이 가능하고 감속할 수 있어야 한다.
- 동력차의 동력 손실 시 철도청(KNR)의 디젤기관차로 구원이 가능하여야 한다.

(3) 안전성

- 모든 부품의 설계와 제작은 여객과 승무원의 안전이 고려되어야 하며 위험 상황에서 탈출할 수 있는 장치가 구비되어야 한다.
- 전기, 전자 및 통신 장치의 상호간 간섭이 없어야 하며 유도 및 복사에 의한 방사 때문에 기기의 운용이나 안전에 영향이 없어야 한다.
- 전장품의 냉매는 무독성이어야 하고 환경적으로 안전하며 불연성이어야 한다.

2.1.2 한국형 고속열차 서브시스템 신뢰성 요구 조건

상업운행 하는 열차가 달성할 수 있는 신뢰성 수준은 다양한 요인에 의해서 결정된다. 이들 요인 중 일부는 차량 자체의 성능에 의해 결정되지만 많은 요인들은 이와 무관하다. 철도차량의 운행 신뢰성 수준을 결정하는 요인에는 다음과 같은 것이 있다.

- 부속 시스템의 다중화 설계 등 차량시스템의 구성
- 생산과 조립의 질
- 부품과 장비의 질
- 운행과 유지보수 절차
- 운행과 유지보수 적용 및 숙련도
- 궤도 등의 운행 환경

이러한 이유 때문에 동일한 차량이라도 운행하는 조건에 의해 신뢰도가 크게 달라질 수가 있다. 고속열차 등의 시스템에 대한 신뢰성 평가를 위해서는 적절한 평가 지표가 있어야 한다. 구체적으로는 고속철도차량에 대한 신뢰성 사양 또는 목표를 결정해야

하며, 철도차량의 신뢰성 목표로는 일반적으로 고장률 또는 이의 역수인 고장간의 운행거리(Mean kilometers between service failures: MKBSF)를 정의한다. MKBSF는 총 누적 운행거리를 발생한 고장 수로 나눈 값이기 때문에 고장의 정의가 매우 중요하다. 고장을 정의할 때는 시스템의 성능저하가 용인될 수 있는 정도, 예를 들면 철도 차량의 경우에는 어느 정도까지의 운행 지연이 용인되는지에 대한 정의와 함께 이러한 고장이 발생하는 빈도에 대한 고려가 필요하다. 철도차량의 고장을 정의할 때는 다음 사항을 고려해야 한다.

- 운영자의 운행 요구조건
- 경쟁 교통수단과의 비교
- 승객의 요구사항 조사

고속열차는 경쟁 교통수단인 항공기 수준의 안락성, 편의성 및 신뢰성이 요구되기 때문에 신뢰성 목표도 이를 고려하여 결정하게 된다.

2.2 시스템 분류 및 구성품 정의

한국형 고속열차의 분류는 시스템, 서브시스템, LRU(Line Replaceable Unit)의 3단계를 적용하여 시스템은 6개, 서브시스템은 31개, LRU는 160개로 분류한다.

아래 표 1은 한국형 고속열차의 6개 시스템을 정리한 것이고 그림 3은 추진 및 전기제동 시스템에 대해서 LRU까지 분류한 것이다.

표 5 한국형 고속열차의 시스템

순서	시스템
1	주행 및 기계제동
2	추진 및 전기제동
3	공압계통
4	보조전원 및 공급
5	편의시설
6	열차 제어 및 통신

그림 3 고속전철 추진 및 전기제동 시스템의 분류

SYSTEM	SUBASSEMBLY	LRU	FUNCTION	
ELECTRIC TRACTION AND BRAKING	PANTOGRAPH	GAU TROGRAPH	Power pick-off on catenary	
		AIR SUPPLY HOSE UNIT		
	HIGH VOLTAGE SAFETY DEVICE	GROUND TRIP CIRCUIT BREAKER		
		VACUUM CIRCUIT BREAKER		
		RETURN CURRENT DEVICE	Current return	
		CURRENT MEASUREMENT TRANSFORMER	Current measurement on HV line	
	ROOF LINE	LIGHTNING ARRESTER	Protection against overvoltage	
		ROOF LINE 25KV	HV line	
		ROOF LINE SWITCH	Isolation of bad-make from HV	
	MAIN TRANSFORMER	POTARY HEAD	Power car-make connection	
		MAINT TANK	Reduce voltage	
	MOTOR BLOCK	VEHICLE FAN UNIT	Main transformer oil cooler	
		OIL PUMP UNIT		
		OIL PUMP CONTACTORS	Oil pump isolation on the auxiliary block	
		POWER FAULT CONTACTORS	Missage's cooling fan unit isolation on the auxiliary block	
		POWER CONVERTER STACK		
POWER INVERTER STACK				
BRAKING RESISTOR STACK				
VENTILATION FAN				
VENTILATION INVERTER		Motor block ventilation		
ACTIVE FILTER UNIT				
ELECTRIC COMPONENTS	CONTACTORS			
	CONTACTOR INVERTER CONTROL UNIT	Traction/braking control		
TRACTION MOTOR	TRACTION CONTROL UNIT	Traction/braking control		
	TRACTION MOTOR	Traction motor ventilation		
EDDY CURRENT BRAKE	VEHICLE FAN UNIT			
	EDDY CURRENT BRAKE CONTROL UNIT			
	BRAKE ASSEMBLY			
	BRACKET			
	AIR FILTERER ASSEMBLY			

2.3 기능블록 선도 작성

설계 결과 및 PWBS(Project Work Breakdown System)를 기초로 시스템을 기능별로 분류하고 시스템을 구성하는 구성품을 명확히 식별하고, 그것의 연

결을 표시한 기능 블록선도를 작성한다. 연결선은 기계적인 연결과 신호의 흐름을 표시하고, 인터페이스 관계를 나타낸다.

그림 4는 추진 및 전기제동시스템에 대한 기능블록선도이다.

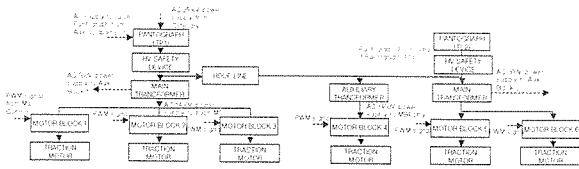


그림 4 추진 및 전기제동시스템 기능블록 선도

2.4 신뢰성 블록선도 작성

기능 블록선도를 활용하여 신뢰성 블록선도를 작성한다. 신뢰성 블록선도에는 기능 블록선도 각 유니트가 시스템의 고장에 어떻게 관련되어 있는지 표시한다. 신뢰성 블록선도를 활용하여 신뢰도 계산을 위한 수학적 모델링이 가능하다.

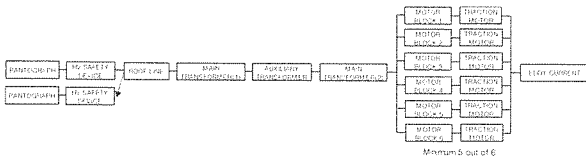


그림 5 보조변압기 정상 경우 신뢰성 블록선도

2.5 고장정보체계 고장정보 분석

고장 정보 체계(Failure Reporting, Analysis and Corrective Action System)는 신뢰성 평가 시험 단계에서 고장 정보, 원인 분석 대책 수립 및 조치를 취하고 이를 설계 및 보전 계획에 반영함으로써 고속철도 시스템의 신뢰성을 높이고 효과적인 보전 계획을 수립할 수 있는 시스템이다. 고장 정보 체계의 목적으로 다음을 열거할 수 있다.

- 차량 시험 또는 운용 과정에서 대책을 필요로 하는 설계 및 제조상의 결함을 확인하고 이에 대한 대책을 체계적으로 수립하기 위한 엔지니어링 정보와 자료를 제공한다.
- 하드웨어와 소프트웨어, 설계 및 제조의 고장모드와 원인/메커니즘, 그리고 그에 대한 대책 등의 기술 정보를 축적한다.
- LRU의 평균 고장 시간(MTBF), 평균 수리 시간(MTTR), 가용도, 예방 정비 시간 등 신뢰성 정보를 수집하고 분석하여 고속전철의 신뢰성을 정량적으로 평가한다.
- 차량 결함의 패턴을 밝힐 수 있다.
- 통계 분석을 위한 자료를 제공한다.
- 신뢰성 보증의 기초가 된다.

한국형고속열차는 신뢰성시험 중 고장정보를 수집하기 위하여 매 시운전 완료 후 고장 관측 시 마다 고장보고서를 작성하고 있다. 고장 보고서에 기록된 내용에 따라 고장 정보를 입력하고 검색하며, 정보를 분석하

기 위한 고장 정보 체계를 엑셀과 VBA(Visual Basic Application)을 이용하여 구축하였다[2]. 발생한 고장 각각에 대해 고장보고서에 따라 일시, 서브시스템 코드, 주행 거리, 고장 수 등의 자료를 입력한다. 고장 정보의 입력이 이루어지면 스프레드시트 상에서 표 3과 같은 고장분류에 따라 고장을 집계하여 누적 주행거리와 누적 고장 수 정보를 표기한다. 누적 고장 수 정보에 따라 평균 고장률이 프로그램에 따라 자동으로 계산된다. 각 서브시스템의 고장률 정보는 시스템의 고장률 및 신뢰도 계산에 이용하고 있다.

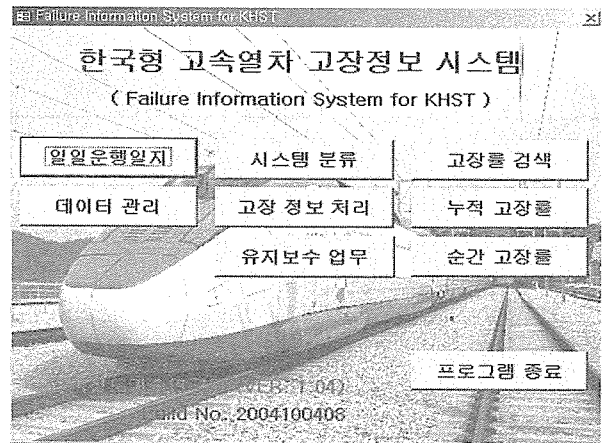


그림 6 한국형 고속열차 고장정보체계

표 3 한국형 고속열차 시운전 시험의 고장 분류

구분	고장 지속 시간
R1	운행에 지장이 없음 또는 2분 이내
R2	2~4분
R3	4~20분
R4	20분 이상

2.6 구성품 고장률 계산

고장정보체계로부터 수집된 각 구성품의 고장 정보로부터 평균 고장률을 계산한다. 그림 7은 주행거리에 따른 추진 및 전기제동시스템의 서브시스템 중의 하나인 모터블럭에 대한 고장률 변화이다.

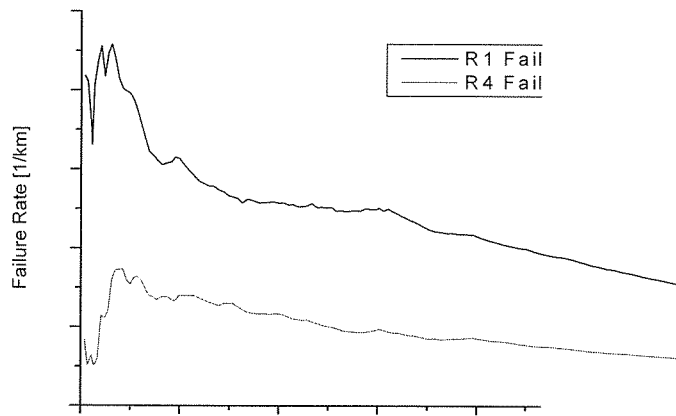


그림 7 모터블럭의 고장률 변화

2.7 시스템 신뢰도 및 고장률 계산

각 구성품의 고장률 자료를 이용하고 신뢰성 블록선도를 기초로 수학적 기법을 적용하여 시스템의 고장률 및 신뢰도를 계산한다.

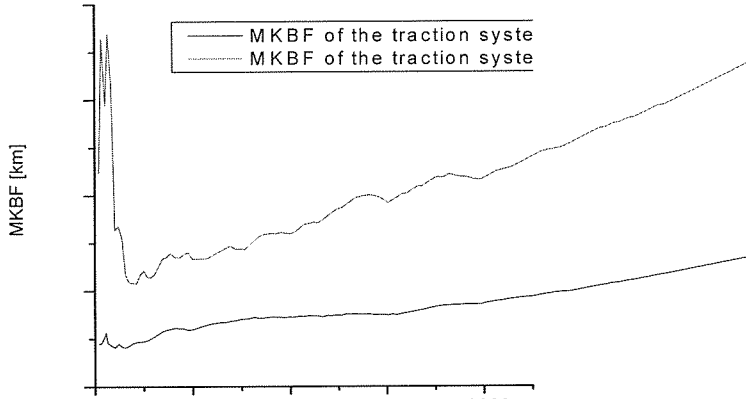


그림 8 추진 및 전기제동 시스템의 MKBF

2.8 신뢰도 분석 및 평가

계산한 신뢰도를 신뢰도 요구 조건과 비교 분석하고, 신뢰도 요구 조건을 만족시키지 못하는 시스템에 대해 구성품의 고장률 감소 및 신뢰도 성장 방안을 모색한다.

3. 결론

한국형 고속열차의 안전성과 신뢰성을 확보하기 위해 신뢰성 관리 체계를 구축하고 시운전시험을 통해 산출되는 시험데이터를 사용하여 신뢰성 성장관리를 수행하였다.

이를 통해 현재까지 계산한 신뢰성이 한국형 고속열차 개발초기 설계한 신뢰성 요구조건에 만족해가고 있음을 확인하였다.

앞으로 계속되는 신뢰성시험을 통해서 한국형 고속열차의 신뢰성 관리를 지속적으로 수행하고 신뢰성 관리 체계에 부족한 부분을 보완하여 실용화시 활용할 계획이다.

본 연구는 건설교통부 고속철도기술개발사업으로 수행한 “고속철도시스템 신뢰성 및 운영 효율화 기술개발” 과제의 연구결과 중 일부입니다.

참고문헌

- [1] Railway Applications - The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety(RAMS), BS EN 50126, British Standard, 1999.
- [2] 이태형 외, “한국형 고속열차 고장정보체계 구축 및 활용”, 시스템엔지니어링학술지 제1권 1호.