

경량전철 차량시스템의 신뢰도 배분

정락교, 윤용기, 목재균, 이병송
한국철도기술연구원

The Reliability Allocation of the AGT Vehicle System

Rag - Gyo Jeong, Yong - Ki Yoon, Jae - Kyun Mok, Byung - Song Lee
The Korea Railroad Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 경량전철시스템 기술개발사업에서 개발하고자 하는 차량시스템, 신호제어시스템, 전력공급시스템 및 선로구축물의 목표신뢰도를 정의하였다. 이 목표신뢰도의 배분은 국내 지하철의 고장유형 및 철도분야에 축적되어 있는 고장율을 바탕으로 작성되었다. 특히, 차량시스템분야는 보다 자세히 목표신뢰도를 배분하였다. 이러한 목표신뢰도배분을 통하여 경량전철시스템의 각 개발단계마다 이루어지는 개발활동(설계, 제작 및 구매)의 검증을 수행하여야 신뢰성을 확보한 경량전철시스템개발이라는 궁극적인 목적을 달성할 수 있다. 목표신뢰도배분에 맞추어 경량전철시스템기술개발동안 제동장치, 추진장치, 출입문장치, 제어장치 등 고장시 열차의 운행에 정지시킬 수 있는 구성품에 대한 신뢰도를 모델링 하여 신뢰도 예측 및 분석하고 이에 맞추어 설계검증 및 보안을 한다. 또한 경량전철시스템의 시험선로에서의 주행시험을 통하여 국내 경량전철시스템에 적합한 신뢰도 기준을 마련하고자 한다.

1. 서 론

본 논문의 목적은 무인자동운전을 목표로 개발되는 경량전철시스템에 대한 목표신뢰도를 정의하는 것이다. 개발중인 경량전철시스템은 고무차륜형식의 차량시스템, 신호제어시스템, 전력공급시스템 및 선로구축물로 구성되어 있다. 이들 하부시스템의 설계수명은 다음과 같다.

- 차량시스템 : 25년(정밀진단 후 5년 연장)
- 신호제어시스템 : 30년(IEEE 권고기준)
- 전력공급시스템 : 30년
- 선로구축물 : 50년

또한 경량전철시스템의 운전조건은 다음과 같다.

- 편성열차의 1일 평균주행거리 : 400km 이상
- 최고운행속도 : 70km/h 이상
- 최소운행시각 : 90초
- 왕복운행시간 : km당 3초의 예비시간
- 정차시각 : 정차역당 최소 20초

철도분야에서 신뢰도를 나타내는 방법으로 사용되는 방법은 MDBF와 MTBF 및 고장율을 사용하고 있다.

고장(Fail)을 정의하는 것은 시스템을 운용하는 관점에서 정의하는 방법과 구성품에 대한 정의방법이 있는데 여기서는 시스템운영과 관련하여 고장정의, 고장율과 MDBF, MTBF의 관계를 다음과 같이 정의한다.

- 고장(fail) : 열차운행이 5분 이상 지연되는 상황
- 고장율 = $(1/MTBF) = (\text{평균속도}/MDBF)$

본 논문에서는 경량전철시스템기술개발의 신뢰성관리프로그램 및 프로그램절차에 맞추어 경량전철시스템의 목표신뢰도를 배분하였다. 특히 차량시스템의 경우 보다 자세히 하였다.

2. 신뢰성관리프로그램

국내에서는 경량전철시스템에 대한 제작, 건설 및 운영 경험이 없는 상태이므로 과거 지하철에서 경험하지 못하

였던 문제가 발생할 수 있고, 사소한 부품의 고장이 안전상의 문제를 야기할 수 없도록 개발 및 설계과정에서 분석 및 시험을 거쳐 문제가 발생하지 않도록 하는 것이 필요하다. 이에 총괄주관기관, 주관기관, 참여기업 및 위탁기관에 대한 신뢰성관리프로그램을 작성하였다.

2.1 기관별 신뢰성관리활동

총괄주관기관 및 주관기관이 신뢰성관리를 위해서 수행하는 내용은 대부분 동일하다. 그러나 총괄주관기관은 경량전철시스템 전체에 대한 개발프로그램, 신뢰도 목표, 고장정의와 하고, 주관기관은 담당하고 있는 하부시스템에 대한 개발프로그램, 신뢰도 목표 및 고장정의와 한다. 이에 대한 내용은 그림.1과 같다.

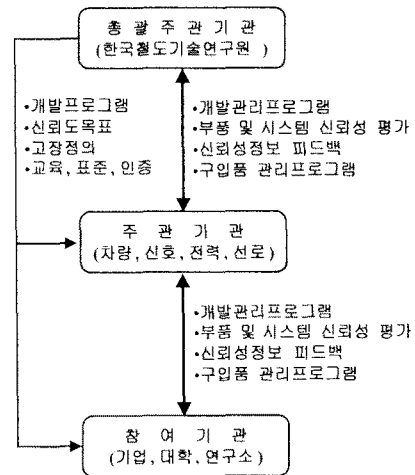


그림.1 기관별 신뢰성 관리 및 평가프로그램

2.2 신뢰성프로그램

경량전철기술개발사업에서 신뢰성을 관리하기 위한 프로그램의 구성 및 단계별 활동내용을 살펴보면 표.1과 같다.

표.1 신뢰성관리프로그램의 단계별 활동

단계	활동내용
개념설계	· 신뢰성 요구사항 설정 · 타당성 연구 · 개념설계
설계	· 신뢰도 목표 배분 · 기능설계 · FMECA, FTA · 신뢰성 예측

개발	· 상세설계 분석 · 신뢰성 예측 · 신뢰성 개발 성장시험
인증	· 신뢰성 인증시험 · 생산계획 및 평가
생산	· 부품의 제조/생산시험
운용	· 동작시험평가/보전활동

현재 경량전철기술개발은 개념설계와 기본설계를 완료한 단계로 이에 따라 신뢰성요구사항을 설정하였으며, 현 단계에서는 경량전철시스템 전체에 대한 목표신뢰도 설정 및 각 하부시스템에 대한 목표신뢰도를 설정하였다.

3. 경량전철시스템의 신뢰도 배분

경량전철시스템의 목표신뢰도를 설정하고 하부 시스템별 목표신뢰도를 배분하기 위해서 PRT(Personal Rapid Transit), MPM(Morgan-town People Mover) 및 기타 자료를 활용하였다.

3.1 MPM의 신뢰도 배분 및 시험결과

MPM은 1979년부터 무인자동운전방식으로 운영을 시작하였으며, 차량의 특징은 고무차륜형식의 차량으로 1량 편성으로 운행되며, 좌석은 8개이고 입석공간을 확보하고 있다.

MPM에서 정의하는 고장은 운행지연시간을 기준으로 하지 않고 운영 스케줄에 맞추어 열차가 운행하는 도중 서비스가 멈추는 사건으로 정의를 하였다. 이러한 조건에 맞추어 MPM의 목표신뢰도를 설정하였고, 1979 ~ 1982년에 걸쳐 측정을 하였다. 그 내용은 표.2와 같다.

표.2 목표신뢰도 배분 및 실측

항목	MTBF배분	MTBF실측('81)
MPM	9.2	
1)지상설비	34.17	30.02
-BACS	35.85	34.20
·SCCS/CCCS	45.13	39.47
·통신	708	
·충돌방지	66.51	
·자료관리	667	
·DSU	238	
·소프트웨어	445	1430
·컴퓨터	287	272
-선로/전력공급	726	282.2
2)운행차량	9.28	27.80
-차량	441	1446
· 전기장치	1643	
· 조향장치	3578	
· Hydraulic	2915	
· ECU	97659	
· 제동장치	3648	
· Pass module	33112	
· VCCS	2400	
· 차체	25277	
· Pneumatic	6487	
· 추진장치	8828	

MTBF : Mean Time Between Failure(hr)

차량의 경우 차량에 장애가 발생했을 경우 사령실(SCCS/CCCS)에서 운영요원이 원격제어를 하는 기능이 있어 실측된 MTBF가 목표MTBF보다 매우 높았다. 선로/전력공급의 경우 동절기인 겨울에 장애가 집중되어 운전설비를 도입하게 되었다.

3.2 PRT의 신뢰도 분석

PRT는 무인자동운전방식으로 2명 정도의 승객과 소형 화물을 수송하는 것으로 현재 시험선로를 구축하여 시험 중에 있다.

PRT의 신뢰도분석은 Bellcore에 있는 데이터베이스를 활용했는데, 모든 부품 및 하부시스템을 직렬로 연결하였으며, 수명분포는 지수분포로 가정하여 분석하였다.

이 분석방법은 PRT의 시스템적인 관점보다는 구성품단위의 관점에서 분석하였으며, 결과는 표.3과 같다.

표.3 PRT 고장을 분석

하부시스템		MTBF
차량시스템	차대	348.0881
	차량제어기	256.6105
	차내장치	196.2489
선로구축물	광케이블	3.8638
	선로연결	0.0208
	VCOM 케이블망	2.4196
	전원 및 RFID	30.0071
전력공급시스템		26.3877
역사설비	지상제어장치	325.8625
	기타장치	84.7238
유지보수설비	지상제어장치	651.7250
	기타장치	39.0988

MTBF = 고장발생건수/백만시간

이 PRT 시스템고장율은 1938.6689로 MTBF는 515.8178가 된다. 즉 515.8178시간마다 고장이 발생하는 경우로 시스템을 하루 17시간정도 운영을 한다면 30일 간격으로 PRT시스템의 구성품 가운데 하나의 고장이 발생하는 것이 된다.

3.3 향후 차량시스템의 신뢰성

현재 철도차량시스템을 제작하는 유럽 및 일본에서는 유지보수가 없는 시스템을 제작 경제성을 극대화하는 것을 목표로 하고 있다.

일본에서는 3년 주기로 차량을 분해하여 소모품 교체 및 주요 구성품에 대한 정밀검사를 수행하고 있는데, 이것을 13년으로 연장하고 있다.

Adtranz 경우 1990년대에 제작된 차량의 경우 14개월동안 150,000 engineering-hour(100명/1년)가 투입된 차량의 고장율은 1편성의 열차가 100만km를 주행했을 때 85번의 고장이 발생하였다. 고장의 대부분은 출입문장치, 제어시스템, 전력장치 및 동적 메카니즘을 갖는 부분에서 50%이상을 차지하였다.

10년이 지난 현재는 100만km를 주행했을 때 6번의 고장이 발생하였다. 6량/편성의 경우 1년에 평균 1대의 차량에 의한 열차 지연이 1번 발생하는 것이 된다.

향후 차량당 고장발생건수는 100만km를 주행하는 경우 1번 발생하는 것을 목표로 한다.

고장의 정의는 2분 이상 열차가 지연되는 것이다.

4. 경량전철시스템의 목표신뢰도

경량전철시스템에서 적용하는 고장은 열차의 주행이 5분 이상 지연되는 것으로 한다. 열차의 년 평균 가용율은 90%이상으로 한다.

4.1 차량시스템의 목표신뢰도

차량시스템을 편성개념이 아닌 량수로 하여 1량이 1년 동안 주행하는 거리는 131,400km(400km * 365 * 0.9)로, 차량 1량이 13만km를 주행할 때 5분을 초과하는 운행지연이 발생하는 횟수를 1회로 제한한다. 즉 2량/1편성의

열차가 운행지연을 발생시키는 횟수를 2회로 제한하는 것이다. 이러한 정의에 의해서 차량에 대한 목표신뢰도의 배분은 표.4와 같다.

표.4 경량전철차량시스템의 목표신뢰도 배분

구성품	신뢰도 비율(%)	신뢰도값(MDBF)
차체	2.33	55793
대차/현가	0.04	3250000
조향장치	5.76	22569
통로 및 연결기	0.06	2166667
추진장치	20.81	6246
보조전원장치	14.67	8861
제동장치	19.01	6838
출입문장치	14.51	8959
공기압축기	7.60	17105
열차제어장치	15.21	8547

MDBF : Mean Distance Between Failure(hr)

이 신뢰도배분은 열차의 운행에 많은 영향을 줄 수 있는 추진장치, 열차제어장치, 보조전원장치, 제동장치 및 출입문에 목표신뢰도를 집중을 하였는데 제어장치(하드웨어, 소프트웨어), 전력시스템 및 기계작동장치 등이 포함된다. 또한 국내에서 전동차의 운행을 지연시킨 사고내용을 고려하여 신뢰도를 배분하였다.

3.2 지상시스템의 신뢰도 배분

지상시스템을 구성하고 있는 것은 열차의 모든 운행을 관리하는 중앙사령설비, 일정한 제어영역을 관리하는 지역사령설비, 역설비, 전력공급설비 및 선로구축물이 있다. 선로구축물의 사고는 일반적으로 선로의 보수와 관련하여 발생하는 것으로 신뢰성을 고려하는데 제외한다. 고무차륜 차량시스템이 열차운행을 지연시키는 요인은 눈과 결빙에 의한 것으로 이에 대한 설비로는 전력공급시스템의 한 부분으로 융설설비를 포함한다. 또한 선로방향진환기(전철기)는 사령설비에 포함을 한다.

지상설비의 목표신뢰도는 13만km를 주행하는 동안 4회로 제한한다. 비록 지상신호설비가 차량시스템에 비해서 매우 복잡하게 구성되어 있으나 대부분 이중화로 시스템을 구축하고 있어 신뢰성은 매우 높다. 전력공급시스템의 고장발생율은 지상설비의 50%를 포함한다. 지상설비에 대한 목표신뢰도는 표.5와 같다.

표.5 지상시스템의 목표신뢰도

구성품	신뢰도 배율(%)	신뢰도값(MDBF)	
전력설비	50	65000	
신호설비	제어/감시장치	10	325000
	소프트웨어	10	325000
	하드웨어	30	108333

MDBF : Mean Distance Between Failure(hr)

3. 결 론

이 논문에서는 MPM, PRT 및 기타자료와 국내 전동차의 사고사례 내용을 바탕으로 하여 개발중인 경량전철 고무차륜시스템에 요구되는 목표신뢰도를 작성하였다.

1) 경량전철시스템의 고장은 13만km를 주행하는 동안 5분 이상의 운행지연을 초래하는 것으로 정의한다.

2) 차량시스템의 목표신뢰도는 13만km를 주행하는 경우 고장발생을 1회로 제한을 한다.
3) 지상시스템의 목표신뢰도는 13만km를 주행하는 경우 고장발생을 4회로 제한한다.

이러한 결과를 바탕으로 향 후 지속되어야 할 내용은 다음과 같다.

- 1) 운영 및 유지보수에 대한 경제성 해석
- 2) 차량시스템, 지상시스템의 구성품에 대한 신뢰성분석
- 3) 이중화기술 등 새로운 신뢰성을 향상하는 새로운 기술을 확보하여 MDBF가 낮은 구성품의 목표값 상향 조정
- 4) 시험선로에서의 주행시험을 통한 경량전철시스템의 목표신뢰도의 기준 작성등이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] Richard E. Albert and Wayne H. Swan, "Morgantown People Mover Reliability Experience"
- [2] Adtranz Metro, "Towards zero failure, zero maintenance", Railway Gazette International, January 2001
- [3] Raythyon system company, "Phase II Demonstration PRT Project Safety Compliance Assessment Report", September 1998
- [4] JR East, "Short-life trains need no maintenance", Railway Gazette International, April 1993
- [5] 한국철도기술연구원, "경량전철시스템 기술개발사업 1차년도 연구결과보고서(종합시스템엔지니어링)", 경량전철시스템기술개발사업, 1999
- [6] 한국철도기술연구원, "경량전철시스템 기술개발사업 2차년도 연구결과보고서(시스템최적화 및 시험평가)", 경량전철시스템기술개발사업, 2000