

시제고속열차의 신뢰도 목표 설정 및 평가 방안

Reliability Target and Assessment of a Prototype High-Speed Train

박춘수* 최성훈** 이태형** 김기환**
Park, Choonsoo Choi, Sunghoon Lee, Tae-Hyung Kim, Kiwhan

ABSTRACT

A train is subject to a series of reliability-related tasks through its entire life cycle. Among them the reliability demonstration is required for commercial trains and the test is performed during the commissioning period or the early stage of the commercial operation. On the other hands various test are carried out for prototype trains and hence their operational condition is quit different from that of the commercial trains. One should take account of these differences when reliability assessment is needed for the prototype trains. This paper presents a procedure and an analysis method to evaluate reliability of a prototype train. Reliability data have been obtained through test runs of the HSR-350x and operational conditions for the KTX and HSR-350x have been analyzed to compare the reliability targets of the prototype train.

1. 서 론

철도차량의 RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, and Safety)에 대한 관심은 날로 증가하고 있으며, 신규로 시작되는 철도 관련 모든 프로젝트에 이러한 시스템적 성능관련 요구가 필수적이 되어 가고 있다. 특히, 신뢰성(Reliability)에 관해서는 차량, 선로, 신호 등 철도 운행과 관련된 전체 시스템에 대한 신뢰성 확보를 위한 활동에 프로젝트의 시작부터 프로젝트가 완료되는 시스템의 전주기 동안 지속적으로 수행이 요구된다. 전체시스템 입장에서 보면 하위시스템인 차량시스템에 대해서도 동일한 요구가 주어지고 있으며, 일반적으로 상업용 열차에서는 전체시스템의 신뢰성 만족을 확인하는 절차의 하나로 열차시스템의 신뢰성 입증시험의 수행을 요구하고 있으며, 이 시험은 일반적으로 초기 상업운행시점에서 실시하고 있다. 상업용 열차의 신뢰성입증 시험의 기준으로는 “운행 고장간 평균주행거리(Mean Kilometer Between Service Failure: MKBSF)”의 사용이 보편적이며, KTX 고속열차의 경우에는 상업운행을 시작하는 시점부터 4년 또는 11만 편성시험기간 이내에 20편성에 대한 12개월간의 MKBSF가 121,000km 이상이라는 기준에 부합되도록 하고 있다. MKBSF 평가에서 고장의 정의는 계획된 운행시간 대비 10분 이상의 지연이나, 열차운행의 취소 등이다. 시제열차는 상업용 열차로 개발하는 것에 필요한 열차 및 하위시스템의 성능을 확인하기 위해 설계·제작하고 있으며, 이에 대한 검증을 위해 다양한 조건하에서의 많은 시험을 실시하는 등의 상업열차와는 상이한 특성조건을 갖게 된다. 따라서, 단일편성만 존재하고, 상업운행과 같은 운행 조건을 구현하기가 어렵고, 시제열차의 성능평가가 동시에 수행되며, 많은 주행거리 확보에 어려움이 있는 등 시제열차 특유의 조건을 갖는다. 이러한 여러 가지의 제한요소로 인하여 상업용 열차와 동일한 조건의 신뢰성입증을 시제열차에 적용하기에는 다소 한계가 있다.

* 한국철도기술연구원, 고속철도사업단, 정희원

E-mail : cspark@krri.re.kr

TEL : (031) 460-5621 FAX : (031)460-5649

** 한국철도기술연구원, 고속철도사업단

한국형 고속열차는 지난 1996년 개발에 착수하여 2002년 시운전시험을 시작하였으며, 시제열차의 성능확인 및 최고속도 주행시험을 거쳤다. 현재는 차량시스템의 안정화와 신뢰성 확보를 위한 주행시험을 실시하고 있으며, 2007년 3월 기준으로 약 18만 km를 주행하였다. 주행시험 기간 동안 차량시스템의 고장정보를 취득하고 고장의 내용을 분석하였으며, 시제열차를 구성하는 하위시스템별로 고장데이터를 전산시스템에 입력하고 이를 분석하여 신뢰성 성장 및 평가를 실시하고 있으며, 이를 통하여 신뢰성 향상을 위한 각종 활동을 수행하고 있다.

본 논문에서는 시제열차인 한국형 고속열차의 신뢰성평가 방법 및 절차에 대하여 상업열차인 KTX와 비교 분석하였으며, 한국형 고속열차의 지속적인 시운전시험에서 취득한 데이터를 기반으로 시제열차의 특성과 조건에 맞는 신뢰성평가 방안의 수립에 대하여 검토하였다.

2. 한국형 고속열차의 신뢰성 평가 및 방법

2.1 한국형 고속열차의 신뢰성 성장관리 활동

한국형 고속열차의 신뢰성 성장관리는 시험이 시작된 이래 지속적으로 시운전시험의 과정에서 발생한 고장의 시간과 내용 등에 대한 정보를 기 구축된 고장정보관리시스템에 입력하고, 이를 바탕으로 각 하위시스템별로 신뢰도를 분석하고 차량시스템 전체에 대한 신뢰성 성장을 분석하고 있다. 이를 위해 초기에는 차량시스템을 시스템, 하위시스템, LRU(Line Replaceable Unit)로 분류하고 기능 블록선도 및 신뢰성 블록선도를 작성하여 신뢰성을 계산하도록 하였다. 개발시스템의 안정화 및 신뢰성 성장의 정도를 지속적으로 모니터링하기 위해 일정 주행거리마다 차량시스템을 구성하는 6개의 시스템별로 MKBF(Mean Kilometer Between Failure: MKBF)를 계산하여 Duane 모델의 성장률을 계산하고 있다[1].

2.2 한국형 고속열차의 신뢰성 평가의 방법 분석

한국형 고속열차는 개발초기에 시스템 요구사항[2]을 작성하여 차량, 신호, 선로구축물 등 전반적인 시스템에 대하여 요구조건을 제시하였으며, 차량시스템의 신뢰성에 대해서는 KTX와 동일한 요구조건을 기준으로 삼았다. 시제열차의 개발에는 이러한 신뢰성 요구조건에 부합하도록 각 시스템 및 부품에서 설계 및 제작이 이루어졌다. 그러나, 연구개발이라는 특수성으로 인하여 각 부품 및 장치 각각에 대하여 성능시험은 실시하였으나, 장시간이 요구되는 신뢰성 시험은 실시하지 못한 상태에서 열차에 탑재하였다. 따라서, 개발열차의 신뢰도 입증은 본선시운전시험에서 차량시스템 전체에 대한 입증 시험을 실시하여야 한다. 이를 위해 KTX와 동일한 기준의 MKBSF를 적용하여 신뢰도 입증을 실시하고자 하였으나, <표 1>에서 언급한 것과 같은 여러 제한 조건을 고려한 시제열차 신뢰성 입증 방안의 확립이 절실하게 필요하였다.

표 1. 상업열차와 시제열차의 신뢰도 분석을 위한 환경조건 비교

항목	상업열차	시제열차
시험 편성열차 수	다수	1개 편성
서비스 운행	정상운행	비 정상운행
성능개선 활동	서비스 후 없음	지속적인 활동
편성 주행거리	충분	매우 짧음
평가를 위한 고장의 수	다수	극히 제한
열차 성능평가 시험	-	다수 실시

표 1.에서 볼 수 있듯이 시제열차와 상업열차에는 차량시스템의 신뢰도를 평가하는 관점에서 많은 차이점이 있음을 쉽게 알 수 있으며, 이러한 차이 때문에 상업열차에 적용하는 기준 시제열차에 동일하게 적용하는 것은 적절하지 않다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 상업열차의 기준을 시제열차에 적용하기 위해서는 상업열차와 비교되는 시제열차만의 특성을 도출하고 이를 기준에 반영하는 새로운 신뢰도 평가방안에 대하여 검토하였다.

3. 시제 고속열차의 신뢰성 목표설정 및 평가방안

3.1 주행거리 및 신뢰성 성장을 고려한 보정

상업열차는 지속적으로 상업운행을 하기 때문에 많은 주행거리 실적을 달성할 수 있으나, 시제열차의 경우 시험 전용시험선의 확보없이는 누적주행거리를 늘리는 것이 매우 어렵다. 실제로 KTX는 2004년 개통한 이래 현재까지 편성당 약 130만 km를 주행하였으나, 한국형 고속열차의 경우 2002년 시운전시험을 실시한 이래 약 5년간의 시운전기간동안 18만 km의 주행실적을 갖고 있다. 따라서 이렇게 짧은 주행거리로 인하여 KTX의 기준인 2,200,000 km 주행 후에 신뢰도를 평가하는 기준을 한국형 고속열차에 동일하게 적용하는 것은 타당하지 않다. 시제열차에서는 평가시점(200,000km)에서의 신뢰도와 Duane 신뢰도 성장곡선의 기울기를 이용하여 2,200,000km 주행할 때의 신뢰도를 예측하고자 한다. 주행거리 200,000km 도달할 때의 신뢰도가 $MKBSF_{200,000}$ 이고 Duane 신뢰도 성장 곡선의 기울기가 α 일 때, 시스템의 신뢰도가 지속적으로 성장한다면 2,200,000km 주행 시점에서의 신뢰도 ($MKBSF_{2,200,000}$)와 $MKBSF_{200,000}$ 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$\frac{\log(MKBSF_{2,200,000}) - \log(MKBSF_{200,000})}{\log(2,200,000) - \log(200,000)} = \alpha \quad (1)$$

$$MKBSF_{200,000} = MKBSF_{2,200,000} \times 10^{-1.0414\alpha} \quad (2)$$

표 2. Duane 성장곡선 기울기 α 와 주행거리별 신뢰도비

α	$MKBSF_{200,000}/MKBSF_{2,200,000}$
0.25	54.9%
0.50	30.2%
0.75	16.6%

예를 들어, 200,000 km 주행 후 Duane 신뢰도 성장 곡선의 기울기가 0.25인 시스템의 신뢰도는 KTX 신뢰도(2,200,000 km 주행)의 약 55%를 목표치로 할 수 있을 것이다. 따라서, 시운전시험에서 취득한 데이터를 이용하여 각 하위시스템의 신뢰도와 신뢰도 성장곡선의 기울기를 계산하고, 이를 식 (1), (2)를 이용하여 200,000 km의 신뢰도로 2,200,000 km에서의 MKBFS를 예측할 수 있다.

3.3 시운전시험의 운행조건에 따른 보정

KTX의 경우는 영업 운행의 운행 지연 (10분 기준)을 고려한 MKBSF, 즉 운행고장(Service Failure)를 기준으로 하지만 한국형고속열차는 장치별 고장률을 이용한 MKBF를 평가하기 때문에 이에 대한 보정이 필요하다. 한국형 고속열차에서 KTX와 동일하게 10분 이상의 고장 데이터를 이용하는 경우, 운행거리 과소 및 단일편성으로 인하여 샘플의 수가 매우 적기 때문에 통계적 평가방법을 적용하는 것에 어려움이 있다. 따라서 시제열차에서는 각 장치별로 2분 이상의 고장 데이터를 이용하되, 운전 데이터를 분석하여 10분 고장으로 보정하는 가중치를 적용한다. 또한 시운전 운행 조건(평균주행거리, 평균운행속도, 기존선 운행 비율 등)을 표 3.과 같이 분석하여, 표 4.와 같이 이에 따른 특성을 장치별로 고려한다.

표 3. 운행조건 비교

	운행조건	KTX	HSRx350x
1	기존선 운행 비율	50%	11%
2	주행거리/월 ^(A)	50,000 km/month	5,000 km/month
3	주행시간/월 ^(B)	250 시간/month	36.6 시간/month
4	평균주행속도	200 km/h ^(A/B)	137km/h
5	# of station	7	-

표 4. 운행조건에 따른 장치별 가중치

하부시스템	가중치		
	고장시간	평균속도	기존선운행
추진 및 전기제동시스템	1.05	1.46	1.03
주행 및 기계제동시스템	2.00	1.46	1.0
보조전원시스템	1.00	1.46	1.03
운전, 열차제어 및 통신시스템	1.66	1.46	1.03
편의시설 시스템	1.0	1.46	1.0
공압시스템	1.0	1.46	1.0

3.4 각종 성능시험의 영향에 따른 보정

한국형 고속열차는 각 장치 및 시스템의 성능개선과 안정화를 위해 시운전 중에 많은 시험이 실시되고 있다. 이러한 시운전 시험의 특성을 고려하여 각 장치의 고장에 미치는 영향을 산출한 후 하위시스템의 고장률 계산 결과 (또는 목표)를 보정하여 평가하여야 한다. 즉, 시운전 성능시험에 대하여 각 장치별 고장률 가중치를 고려하여 정상운행과 비교하여 특정 목적의 시험 수행 시 해당 장치에서 고장이 얼마만큼 더 발생할 가능성이 있는지에 대한 가중치를 입력한다. 예를 들어 비상제동 시험 시 정상운행 때보다 Brake Operation의 고장발생 가능성이 3배 높다고 판단되는 경우 가중치는 3.0이다. 그러나 이러한 가중치는 절대적인 기준이 없기 때문에 각 장치를 설계하고 제작한 장치담당자가 지금까지의 경험을 바탕으로 주관적으로 정의할 수밖에 없다. 일자별 시험항목 및 조건에 따라 각 장치의 작동 횟수, 장치에 걸리는 부하 등을 고려하여 이를 정량적으로 산출한다. 표 5.에는 시험항목에 따른 각 장치별로 가중치 예를 보여주고 있다.

표 5. 시험항목별 각 장치의 고장발생 가중치

일자	시험구간	시험항목	장치명					비고
			모터블럭	변압기	제동장치	공기제동	보조블럭	
05.4.11	광명-동대구	100% 견인력시험	3	2	1	1	1	
05.5.9	광명-동대구	저항제동시험	2	1.5	2	2	1	
05.5.19	광명-목포	전기부하분담 시험	2	1.5	1	1	2	
06.12.14	오송-동대구	판도 특성시험	2	1.5	1	1	1	

3.5 장치별 변경사항에 따른 보정[4]

한국형 고속열차는 시운전시험을 거치면서 발견된 각 장치의 문제점을 개선하기도 하고 새로이 설계된 제품을 탑재하기도 한다. 이러한 개선활동을 통하여 시스템의 주요 부품을 새로운 부품으로 교체하거나 S/W를 수정한 경우에는 그 시스템이나 장치는 이전과는 다른 새로운 시스템으로 생각할 수 있기 때문에 그 시점에서 신뢰성 평가를 새로 시작하는 것이 타당하다[3]. 이러한 경우 적용할 수 있는 방법의 하나로 일정 기간 동안의 평균 고장률을 사용하는 방법이 있다. 하지만 한국형고속열차와 같은 시제

열차의 경우 신뢰성시험 샘플이 1대 뿐이기 때문에 제한된 시간 동안 충분한 주행거리를 확보하기 힘든 문제가 있다. 따라서, 평균 고장률을 이용하는 대신 전체 시운전 시험 데이터를 활용할 수 있는 방법을 고려한다. 즉, 개선활동을 통하여 고장 원인이 밝혀지고 이에 대한 근본적인 해결책이 적용된 고장은 고장률 계산에서 제외하는 방법이다.

3.6 종합

위에서 제시한 시제열차의 운행패턴 및 여러 가지 특성들을 종합하여 각 시스템별 신뢰도 목표치를 새로이 계산할 수 있다. 표 6.은 시제열차에 따른 보정치를 임의의로 고려한 차량시스템 목표달성을 위해 각 시스템별로 할당된 신뢰도이다.

표 6. 시제열차에 할당된 신뢰도 목표

하부시스템	할당비율	고장률	CF		MKBSF(km) (=1/고장률/CF)	a = 0.5 적용 MKBSF
			주행조건	시험조건		
추진 및 전기제동시스템	18.7%	1.55E-06	1.58	1.50	273,195	82,505
보조전원시스템	13.4%	1.11E-06	1.50	1.50	400,313	120,894
운전, 열차제어 및 통신시스템	39.8%	3.29E-06	2.50	1.50	81,192	24,520
편의시설 시스템	5.1%	4.21E-07	1.46	1.50	1,625,034	490,760
공압시스템	0.7%	5.79E-08	1.46	1.50	11,839,530	3,575,538
차량시스템	100.0%	8.26E-06			36,701	11,084

4. 결론

열차의 신뢰성평가는 요즈음 들어 매우 중요한 성능평가의 한 항목으로 자리매김하고 있다. 한국형 고속열차에서도 개발시스템의 신뢰성 평가는 매우 중요하게 취급하고 있으며, 2002년 시운전시험이 시작된 이래 지속적으로 시운전 차수별로 각 장치의 고장에 대하여 기록·분석하는 연구활동을 해오고 있다. 한국형 고속열차는 현재기준으로 380회의 시험과 179,000km의 누적주행거리 실적을 보이고 있다.

본 연구에서는 상업열차에 적용하는 기준을 상업운행이 아니라, 시운전시험을 하는 시제열차에 동일하게 적용하는 것은 여러 가지 운행의 특성과 조건상 적절하지 못함을 밝혔다. 따라서 시제열차에는 상업열차에 적용한 기준을 운행조건 등의 시제열차의 특성에 맞도록 보정하는 것이 필요하며 한국형 고속열차와 같은 시제열차의 예에 대하여 보정값을 계산하였다. 이러한 시제열차 신뢰도 평가방법은 국제적인 기준이나 규격이 없기 때문에 그 값의 절대성을 확보하기에는 한계가 있으나, 시제열차의 운행특성을 고려한다면 매우 타당한 방안이라 할 수 있을 것이다. 한국형 고속열차는 20만km 주행을 목표로 지금도 시운전시험을 실시하고 있으며, 최종적으로 20만km 도달시점에서 신뢰도를 평가하는 방법으로 본 논문에서 제시한 방안을 사용하고자 한다. 남은 기간 동안 본 논문에서 제시한 여러 값들을 좀 더 검토하고, 각 조건에 대한 값을 계산하여 제시한 방안의 타당성을 검증할 예정이다.

후기

본 연구는 건설교통부에서 추진 중인 고속철도기술개발사업인 “고속철도 시스템 신뢰성 및 운영효율화” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 이태형, 최성훈, 서승일, 박춘수, “한국형 고속열차 신뢰성 관리 체계 연구,” 한국SE협회 추계심포지움 논문집, 2005, pp.13~16.
2. 한국철도기술연구원, 시스템 사양서, 1997
3. MIL-HDBK-781A: Handbook for reliability test methods, plans, and environments for engineering, development, qualification, and production, Department of Defense, 1996.
4. 최성훈 외, “한국형고속열차 차량시스템의 신뢰성 서장평가”, 한국철도학회 논문집, 2006, 제9권 제3호, pp.606-611
5. Zhang, H, “Time-varying failure rate for system reliability analysis in large-scale railway risk assessment simulation”, International Conference on CAD, Manufacture, and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit System, 2004, pp.313-322.
6. Ming-Wei Lu, "Vehicle or System Reliability Assessment Procedure", Reliability Engineering and Its Applications, 1994, pp. 37-42.