

한국형 고속철도 차량시스템의 안전설계 요건 분석

왕중배

한국철도기술연구원 안전기술연구팀

Analysis of Safety Design Requirement for KHSR Rolling-stock System

Jong-Bae Wang

Safety Technology Research Team, Korea Railroad Research Institute

Abstract

최고속도 350km/h의 한국형 고속철도시스템은 안전보장과 사고예방을 위해서는 시스템 위험분석에 근거한 안전검증과 성능확인이 요구된다. 본 논문에서는 고속철도 차량시스템 개발을 위한 시스템 개발요건과 위험도 분석에 근거한 안전성능요건을 근거로 하여, 차량시스템에 대한 일반 안전요건, 구조적 안전요건 및 핵심 장치별 안전요건으로 구성된 한국형 고속철도 차량시스템의 안전설계 요건분석 결과를 소개한다.

Key Words : 고속철도차량시스템, 시스템위험분석, 안전설계요건, 안전인증 및 성능시험

1. 서론

최고속도 350km/h의 한국형 고속철도시스템은 안전보장과 사고예방을 위해 그림 1에 제시한 절차에 따른 시스템 위험분석에 근거한 안전검증과 성능확인이 요구된다. 즉, 시스템의 기술적인 특성과 운영조건을 고려한 안전설계 요건을 도출하여 설계, 제작, 운영 단계별로 이들 안전요건의 적합성 검증해야 하고, 시스템의 기능 및 성능요건을 제작 및 시운전 단계에서 시험, 입증해야 한다.

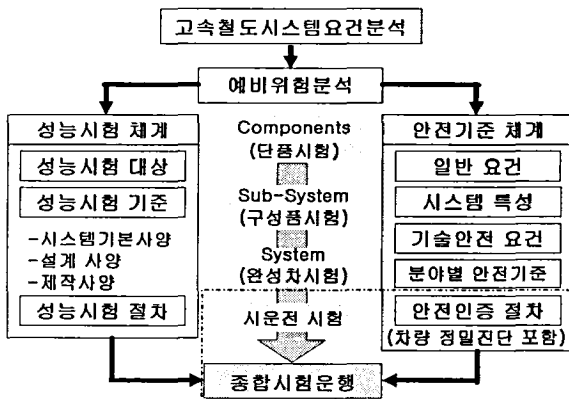


그림 1. 고속철도 안전인증 및 성능시험 절차

2. 한국형 고속철도시스템 개발요건

한국형 고속철도 시스템은 그림 2에 제시한 것처럼 시스템 기본사양을 기반으로 하여 안전기준체계 개발에 필수 요건으로 반영해야 되는 “시스템 안전요건”과 “차량의 성능요건”을 규정하고 있다.

- (1) 시스템 기본사양
 - 1. 차량일반 1) 운행속도: 최고운행속도 350km/h, 설계속도 385km/h
 - 2) 차량종류 2) 차량크기: 20량11량기준 (철도차량체계 준수)
 - 3) 차량주요품: 최소 20년 고속운전(연간 600,000Km 주행조건)
 - 2. 환경조건 1) 기후조건: 외기온도, 습도, 최대강우, 최대강설, 풍속
 - 3. RMS 1) 신뢰성: MKBSF 시험평가 중요장치 redundancy 구성
 - 2) 고장시 운행: 정선운행, 돌발 및 긴급 및 차량 격인 조건
 - 4. 시운전준비 1) 안전성: 인명안전에상관함, 기기운영 및 환경영향 고려
- (2) 차량 시스템
 - 5. 차체와 설비 1) 차체재질, 2) 차량간 충돌, 3) 기타(생난방설비, 접근식)
 - 6. 대차 1) 대차형식(관절형/일반형), 2) 구조강도, 3) 설계안정성(활선계수/운중)
 - 7. 추진 및 동력장치 1) 출력, 2) 견인전동기, 3) 팬터그래프, 4) 보조동력, 5) 기타
 - 8. 시동 1) 제동거리(상용제동/비상제동), 2) 제동성능(평균감속도)
 - (3) 전기선로 시스템
 - 1. 전차선 시스템 1) 일반시황(견인강하변동, 이선율), 2) 최소안전율(미요)
 - 3) 지지물 설비, 4) 전차선 편위 및 구배
 - 2. 열차제어 시스템 3. 자동화차제어장치(ATC) 4. 연동장치(IXL) 5. 감속제어장치(CTC)
 - (4) 선로구축 및 시스템
 - 1. 설계 2. 곡선연경 3. 구배 및 4. 개도 5. 단면 6. 설계 7. 허용
 - 최고속도 및 편도 8. 종곡선 표준이중 선로결합

그림 2. 한국형 고속철도시스템의 안전성능 요건

2.1 시스템 기본사양 분석

한국형 고속철도 시스템은 기술적, 경제적, 사회적 요소들을 고려하여 열차편성을 20량 편성과 11량 편성으로 하여 다음 조건을 만족하도록 하고 있다.

- 최고운행속도 350 km/h
- 최대 수송능력 1000 명 수준
- 수송수요에 유연한 대응이 가능한 선택적 편성
- 경부고속철도와와의 호환성 유지 및 기술 활용

표 1. 한국형 고속철도 열차성능목표

열차편성		KHST-20	KHST-11
차량수		20	11
열차편성중량(만차시) [ton]		780	458
총 길이 [m]		393.5	218.9
출력/전동기 1대 [kW]		1,100	1,100
총 출력 [kW]		17,600	13,200
최고운행속도 [km/h]		350	350
최고속도 (350km/h)	견인력 [kN]	176.5	132.4
	주행저항 [kN]	131.4	81.6
	가속여력[m/s ²]	0.056	0.107
남서울- 부산 운행	소요시간(2개역)	99.19분	96.56분
	에너지[kWh]	17,073.0	8,220.9

2.2 위험분석에 근거한 시스템 안전성능

요구사항

시스템 안전성능 요구는 시스템 내에 존재하는 위험조건(Hazard)을 확인하고, 위험조건을 제거하거나 또는 인정할 수 있는 수준까지 위험을 감소시키기 위한 활동을 수행하는 시스템 엔지니어링의 핵심 요소로서, 철도차량 시스템의 일반적인 안전성능 요구사항은 다음과 같다.

구분	안전성능 요건
열차 및 차량	1. 구조적 무결성 : 정상운영 상태에서 열차의 구조적 무결성을 유지해야하며, 사고 발생 시에도 운송하고 있는 사람 및 화물을 보호할 수 있어야 한다.
	2. 내장 : 운송하는 승객 및 화물에 대해 안전한 환경을 제공해야 한다.
	3. 출입 및 대피 : 운송하는 사람 및 화물의 안전한 출입과 대피 방안을 확보해야 한다.
	4. 통신 : 열차 내부에서 송수신하고 안전 메시지를 효과적으로 통신할 수 있는 방안을 마련해야 한다.
	5. 전력공급시스템 : 전기시스템과 전기를 공급받는 시스템 및 열차내장치는 다른 시스템이나 사람의 안전을 위협하지 않아야 한다.

	6. 속도 제어(제동) : 운송하는 승객 및 화물의 안전을 위협하지 않도록 철도의 운영조건을 만족하여야 한다.
	7. 신호와의 적합성 : 열차는 신호 시스템과의 적합성을 확보해야 한다.
	8. 주행장치 : 열차가 안전하게 궤도를 따라 이동하는 것을 보장할 수 있어야 한다.
	9. 기반시설과의 적합성 : 열차의 크기와 차량간격은 철도기반시설과의 적합성을 확보해야 한다.
	10. 전력공급 시스템과의 적합성 : 열차는 전력공급 시스템과의 적합성을 확보해야 한다.

3. 한국형 고속철도 차량시스템의 안전설계 요건

3.1 한국형 고속철도 차량시스템 일반 안전요건

구분	고속철도 차량시스템 안전설계 요건
가. 1) 운행나. 속도	열차 및 그에 따른 장비는 설계 최고운행속도로 주행 또는 그 속도에서 정지시 안전하여야 한다.
다. 2) 차량량. 중량	차량 축중은 17톤 이하로 한다.
마. 3) 차량바. 크기	차량의 크기는 차체의 구조적 손상을 제외한 모든 경우에 규정된 차량간격 이내에서 운행이 가능하도록 설계되어야 한다.
사. 4) 차량아. 수명	연간 평균 주행거리 600,000km 기준으로 20년 이상을 원칙으로 한다.
자. 5) 기후차. 조건	카. 고속철도 시스템은 다음의 기후조건에서 정상운행을 보장할 수 있어야 한다. -외기온도 : -35℃ ~ +40℃ -습도 : 5%~100% -최대강우 : 120mm/h(414mm/d) 이하 -최대강설 : 12.5cm/h (296cm/d) 이하 -풍속(지상10m): 연속 45m/s, 돌풍 50m/s 이하
타. 6) 침수과. 운행	수밀구조로서 KSR 9145에 적합해야 하며, 레일상면으로부터 50mm 수중을 20km/h로 통과할 때 차량하부의 격리실이나 기기함이 손상 또는 침수되지 않아야 한다.
하. 7) 침설거. 운행	레일 상면으로부터 30cm 높이의 눈속을 50km/h로 통과할 때 차량하부의 기기에 손상을 주지 않으며 공조설비나 냉각설비 등에 눈이 들어가지 않아야 한다.
8) 화재저항	1) 차량에 적용되는 모든 기기는 난연성 재료를 사용하여야 하며, 구조 및 기능상 불가피한 경우에 한하여 자기 소화성 재료를 사용할 수 있다.

	<p>2) 내장재, 카펫 등을 포함하여 모든 재료는 화재시 열 및 화염에 강하여야하고, 유독성 연기/가스를 발생하지 않아야 하며 UIC 642 VE/ 2VE를 만족하여야 한다.</p> <p>3) 열차의 화재는 감지되어야 하며 적절한 곳에 경고장치가 설치되어야 한다.</p>
9) 환경 적합성	<p>1) 먼지, 쓰레기, 식물 부스러기 및 터널먼지(최대 70%의 금속성 먼지) 속에서도 정상적으로 운행 가능해야 한다.</p> <p>2) 차량의 제작과정 및 향후 폐차 시를 고려하여 유해한 공해물질이 함유되지 않고 가능한 한 재활용성이 우수한 재료를 사용해야 한다.</p> <p>3) 진장품의 냉매는 무독성이어야 하고 환경적으로 안전하며 불연성이어야 한다.</p>
10) 안전성	<p>1) 차량의 모든 부품의 설계와 제작은 여객과 승무원의 안전이 고려되어야 하며 위험상황에서 탈출할 수 있는 장치가 구비되어야 한다.</p> <p>2) 열차 운전보안 설비의 모든 장치는 fail-safe 설계를 원칙으로 하며 장치의 일부분이 고장났을 경우 그 다음의 안전한 조건으로 변환 가능해야 한다.</p> <p>3) 제동, 신호 및 속도제어 장치 등 모든 중요장치는 근본적으로 다중화계(redundancy)로 구성되거나 혹은 여유용량을 확보하여야 한다.</p> <p>4) 전기, 전자 및 통신장치의 상호간 간섭이 없어야 하며 유도 및 복사에 의한 방사 때문에 기기의 운용이나 안전에 영향이 없어야 한다.</p> <p>5) 차량의 모든 장치는 유지보수성이 뛰어나도록 가능한 한 모듈화하고 컴퓨터 설비는 장래 확장성이 충분히 고려되어야 한다.</p>

5. 13) 승차감	<p>승차감은 ISO 2631에 따라 평가되어야 하며 “2.5 hour reduced comfort level”을 초과하지 않아야 한다.</p>
14) 압력 완화	<p>1) 기밀유지 : 압력보상시스템이 동작하지 않는 상태에서 초기압력이 3,000Pa인 객실에 대해 1,000Pa까지 압력이 떨어지는 시간이 40초 이상이어야 하며, 동일 조건하에서 운전실은 8초 이상이어야 한다.</p> <p>2) 터널 교행시 압력완화</p> <ul style="list-style-type: none"> -동일한 두대의 열차가 350km/h의 속도로 100m²의 단면적을 갖는 터널내 직선 자갈도상 케도에서 교행시 내부압력 변화량은 ±1,000pa이내이어야 하며 이때의 평균압력 변화속도는 객실에서 200Pa/s이하, 운전실에서 400Pa/s이하가 되어야 한다. -압력완화장치에 의해 제어 가능한 최대의 차의압력 변동치는 ±7kPa이상이 되어야 한다.
15) 고장시나 운행	<p>1) 감지할 수 있는 모든 고장은 기관사나 보조기기의 기억장치에 알려져야 한다.</p> <p>2) 동력대차 1대 고장시 7/8의 출력으로 정상운행이 가능해야 한다.</p> <p>3) 동력대차 2대 고장시 전체동력의 3/4만으로도 고속철도 선로 및 재래선로 선형의 어느 위치에서나 정지상태로부터 출발이 가능하고 감속할 수 있어야 한다.</p> <p>4) 동력차의 동력 손실시 구원기관차로 구원이 가능하여야 한다.</p>

3.2 한국형 고속철도 차량시스템 구조적 안전

요건

구분	고속철도 차량시스템 안전설계 요건
1. 11) 소음	<p>1) 객실내 소음은 300km/h 주행시 개찰지에서 66dB(A), 터널내 73 dB(A)이하를 만족해야 한다.</p> <p>2) 운전실내 소음은 300km/h 주행시 개찰지에서 78dB(A), 터널내 80dB(A)이하를 만족해야 한다.</p> <p>3) 정차중 모든 보조장치와 에어컨이 가동되는 상태에서 객실내 소음은 개찰지에서 60dB(A)이하를 만족해야 한다.</p> <p>4) 300 km/h 주행시 개찰지 선로중심으로 부터 선로 직각방향으로 25m, 레일상면으로부터 1.2m 높이의 선로변 소음은 91dB(A)이하를 만족해야 한다.</p>
4. 12) 진동	<p>차량의 모든 기기는 정상 주행 중에 발생하는 진동과 충격이 가해져도 성능의 저하나 손상 없이 운용될 수 있도록 설계되어야 한다.</p>

	고속철도 시스템 안전요구
6. 1) 차체 및 설비	<p>1) 차량은 한국의 모든 기후조건에 적합한 난방, 환기 및 냉방 시스템이 구비되어야 한다.</p> <p>2) 차체 내부설비는 다른 시스템과 간섭없이 보수유지, 고장수리를 위한 접근성을 갖추어야 하며 모든 요소는 소음, 진동조건에 부합되어야 한다.</p> <p>3) 모든 골조, 출입문, 창은 개찰지 및 터널 내에서 최고 운행속도로 열차가 교행할 때 발생하는 압력변화 및 반복 압력파에 의한 차체의 피로현상이 발생되지 않아야 한다.</p> <p>가. 2.1.1 차량간 통로</p> <p>1) 차량 양단의 연결은 차량간에 연속적이고 편리한 통로를 마련하여야 하며 비, 바람, 소음 및 압력의 심한 변화를 방지해야 할 뿐만 아니라 여객의 안전과 사고방지를 위해 설계되어야 한다.</p> <p>2) 동력대차는 동력실의 진장품 배치를 최적화하여 비상 사태시 승객이 안전하게 이동할 수 있도록 승객통로를 확보해야 한다.</p>

	<p>2.1.2 동력차 하중 및 내충돌성</p> <p>1) 차량 작용 하중 차체는 하중에 대하여 충분한 강도와 강성을 유지하고 20년 이상의 운행내구성을 가질 수 있도록 설계되어야 한다. -차체 강도 : UIC 566 OR 기준</p> <p>2) 내충돌성 에너지 흡수 설드는 최대 24MJ을 흡수해야 한다. -의자 및 기타설비는 3g의 길이방향 가속도에 영구 변형없이 견디어야 한다. -대차취부장치는 3g로 충돌하거나 탈선하여도 대차는 차체에 연결되어 있어야 한다.</p>
8. 2) 9. 대차 설비	<p>가. 2.2.1 대차 형식</p> <p>1) 객차와 객차, 동력객차와 객차 사이에는 대차가 진후차체를 연결하는 방식의 관절형 대차를 장착한다.</p> <p>2) 동력차 및 동력객차의 나머지 한 쪽(동력차와 연결되는 방향)은 단일 차체와 연결되는 일반형의 대차를 장착한다.</p>
	<p>나. 2.2.2 안전 및 안정성</p> <p>대차는 설계 최고속도에서 안전 및 안정성을 확보하도록 해야 한다.</p> <p>1) 주행 안정성 -대차는 고속선로의 악화된 조건(마모차륜과 75%효과의 댐퍼)에서 설계최대속도까지의 안전한 운행을 확보하도록 설계해야 한다. -개개의 부재가 고장이 나더라도 될수록 적은 운전상의 제한을 받으려는 해결안이 우선적으로 추구되어야 하며, 대차에 고장 진단 장치가 포함되어 있어야 한다.</p> <p>2) 안락성 -대차에서 차체로 전달되는 진동 : 대차로부터 진동과 접촉소음이 차체로 전달되는 것을 될수록 방지하여야 한다. -차체와 대차의 탈연계: 차체의 고유진동이 대차 운동에 의해 가진 되는 것을 방지한다. 이를 위하여 대차의 고유진동과 차체의 고유진동이 일치하지 않도록 해야 한다.</p>
	<p>다. 2.2.3 구조 강도</p> <p>대차 프레임 강도는 UIC 515/615-4에 따른 강도를 만족하여야 한다.</p>

3.3 한국형 고속철도 차량시스템 장치별 안전

요건

1) 추진 및 동 10. 장 치	<p>가. 3.1.1 추진 출력</p> <p>열차의 추진성능은 5%의 오름구배에서 균형속도 350 km/h 이상으로 되도록 결정해야 한다.</p> <p>3.1.2 추진력 변환장치</p> <p>각 모터블록은 Power Converter, Power</p>
----------------------------	---

	<p>Inverter, Ventilation 전원장치, 저항제동용 저항기, 추진제어용 제어회로를 포함하며, 이러한 장치들은 하나의 Cubicle로 제작된다.</p> <p>3.1.3 보조전원 및 기타</p> <p>모든 추진과 제동제어 및 여자, 차상 ATC, 무전기, 비상등 및 출입문 제어(공압기기 제외)는 축전지에서 공급되어야 하며 추진원 없이 최소 30분 동안 완전한 환기상태를 유지하기 위한 축전지 용량과 그의 접속이 이루어져야 한다. 고주파 회로는 현저한 가청소음이 없어야 한다.</p> <p>나. 3.1.4 견인 전동기</p> <p>-견인전동기는 고속 주행과 진동 및 강수, 강설 먼지 등 악조건 하에서도 사용할 수 있도록 제작되어야 한다. -하나의 인버터 장치에 병렬 접속된 견인 전동기간에는 속도 불평형이 없도록 한다. -견인전동기의 절연등급은 Class 200 이상이어야 하며, 94%이상의 효율을 보장하도록 한다.</p>
2) 전원 공급 장 치	<p>1) 편성차량에는 가선으로부터 전원을 수전하고 수전 된 전원을 각 장치의 소비에 적합한 형태로 공급하기 위한 전원공급 장치와 압축공기를 생성하여 공급하는 장치를 구비하여야 한다.</p> <p>2) 이들 장치는 가능한 한 최대의 Redundancy와 효율을 보장 하여야하고 가장 적은 보수비용과 시간으로 수리가 가능하여야 한다.</p> <p>3.2.1 고전압 설비</p> <p>1) 고전압 설비에는 판토품그래프, 주차단기, 가선진압 검지용 변압기, 주변압기, 접지설비 등을 포함한다.</p> <p>2) 한대의 판토품그래프가 절연애자와 함께 동력차 지붕에 설치된다.</p> <p>다. 3.2.2 팬터그래프</p> <p>1) 각 동력차는 1개씩 팬터그래프가 설치되며 팬터그래프 1개는 출발로부터 385 km/h까지의 모든 속도에서 추진 및 보조동력에 필요한 전류를 집전할 수 있는 성능을 가져야 한다.</p> <p>2) 팬터그래프는 모든 운행속도에서 뿐만 아니라 터널의 출입시, 개활지 및 터널에서의 열차 교행시 등의 조건하에서 안전한 동작 특성을 가져야 하며 주행시간의 1% 이상의 이선이 발생하지 않아야 한다.</p> <p>라. 3.2.3 보조동력</p> <p>보조동력 모터와 축전지 시스템은 주요 시스템에 공급하는 정격이상의 신뢰성을 갖고 있어야 한다.</p>
11.3) 제 동 12.	<p>가. 3.3.1 제동성능 요건</p> <p>나. 1) 감속도 : 제동 시 최대 감속도는 $1.47m/s^2$를 초과하지 않아야 한다.</p> <p>2) 385 km/h로 운행중 주동력 공급이 차단</p>

<p>장 치</p>	<p>되어도 정상적인 제동작용이 확보되어야 한다.</p> <p>2) 규정된 최소 운전시격(3분)을 충족시킬 수 있는 충분한 제동력과 제동거리를 가져야 한다.</p> <p>- 350 km/h의 운행속도에서 평탄선로에서의 제동거리는 상용제동 8,150m, full 제동 5,523m, 비상제동 4,800m 이하가 되도록 한다.</p> <p>3.3.2 제동 제어</p> <p>1) 제동제어는 중앙집중식 제동제어가 가능해야 하며 정상적인 제동력 인가는 운전실의 Mas-con에 의해 수행되고 비상시에는 자동적으로 비상제동이 체결되도록 하여야 한다.</p> <p>2) 디스크 제동장치는 열차에서 요구되는 제동력이 다른 전기제동장치로 확보될 수 없는 만큼의 제동력을 분담하도록 작동되어야 한다.</p> <p>3) 하나의 회생제동 단위의 고장이 다른 회생제동 단위의 동작에 방해를 받지 않도록 제작되어야 하며, 가선으로 회생전원의 송전이 불가능하거나 불충분한 경우 저항제동이 동작하여야 하고, 와전류 제동에 필요한 전력이 열차의 모든 와전류 전자석에 공급되도록 하여야 한다.</p> <p>4) 제동은 열차가 분리되어 떨어져 나가는 것을 피하기 위하여 서로 조정되어야 하며, 제어는 마멸이 없는 제동시스템을 우선적으로 투입할 수 있도록 설계 제작되어야 한다.</p> <p>5) 와전류 제동이 투입되어 신호장치와 선로사이에 간섭이 발생할 경우 이러한 제한들은 제동제어장치에 인식되어야 하고, 그에 상당하는 제동력 부분을 타 제동장치로 분산 처리될 수 있도록 설계되어야 한다.</p> <p>6) 비상제동 시에는 Jerk제어가 요구되지 않는다.</p>
<p>4) 열차 운행 제어 장치</p>	<p>1) 열차의 운행제어 및 진단은 운전자와 열차 내부 기기간의 data / signal / Information 통신뿐만 아니라 열차외부와와의 제어신호 및 Monitoring신호 통신을 포함해야 한다.</p> <p>2) 열차제어 및 진단의 주요 기능은 안전한 열차운행을 보장하는 것이다.</p> <ul style="list-style-type: none"> · 열차중앙제어실과의 열차운행에 대한 data 통신 (운행구간, 운행 방향시간) · 운전자와의 Information 통신 및 명령 통신 · 운전자의 제어명령을 차량의 각각의 장치들이 수행하도록 하는 기능 · 자동안전설비 제어 · 승객비상호출장치 · 열차안의 경고신호와 진단신호를 관리하는 기능

4. 결 론

본 논문에서는 최고속도 350km/h의 고속철도 차량시스템 개발을 위한 시스템 개발요건과 위험도 분석에 근거한 안전성능요건을 근거로 하여, 차량시스템에 대한 일반 안전요건, 구조적 안전요건 및 핵심 장치별 안전요건으로 구성된 한국형 고속철도 차량시스템의 안전설계 요건분석의 개요를 제시하였다.

이들 차량시스템에 대한 안전요건 분석결과는 고속철도시스템의 안전보장과 사고예방을 위한 안전검증과 성능확인에 요구되는 고속철도 시스템 안전기준 및 성능시험 기준 체계를 구축하는데 활용될 것이다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부 “한국형 고속철도 시스템 성능시험 및 안전기준 체계 개발” 사업(2004년 2차년도)으로 수행된 연구내용임을 밝히며, 건설교통부 및 건설교통기술평가원의 관계자 및 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단 여러분께 감사사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] 한국철도기술연구원, 고속전철 시스템 통합 및 총괄 최종보고서, 2002. 12.
- [2] 한국철도기술연구원, G7 고속전철 기술개발사업서, 2002. 3.
- [3] 생산기술연구원, 차량시스템 엔지니어링 기술 개발 최종보고서, 2002. 12.
- [4] 한국전기연구원, 전기시스템 엔지니어링 기술 개발 최종보고서, 2002. 12.
- [5] 영국 HSE, Railway Safety Principle & Guidance
- [6] Title 49 of the Code of Federal Regulations Part 243 - FOX(Florida Overland eXpress).
- [7] Railway Safety, Profile of safety risk on Railtrack PLC-controlled infrastructure Issue 1, Report No. SP-RSK-3.1.3.11, January 2001.