공통 방법론을 적용한 철도사고 위험도 평가 절차 개발

Development of Railway Accident Risk Assessment Procedures using Common Safety Methods

박찬우† 왕종배* 곽상록* 최돈범*

Park, Chan-Woo Wang, Jong-Bae Kwak, Sang-Log Choi, Don-Bum

Abstract

This study has proposed the development procedure of 'railway accident risk assessment model' by as a common approach. The risk assessment procedure is following the requirements of the common safety methods (CSM) suggested in EU and was developed based on the accident scenarios. Various hazardous events, which have the potential to lead directly to casualties, were defined. Then, for each hazardous event, the railway accident appearance scenarios and railway accident progress scenarios were developed. The developed procedure will provide a generic model of the safety risk on the Korea railway.

1. 서론

철도는 사람, 규칙/절차, 열차 및 기반시설 등이 복합적, 상호 의존적으로 연계되어 운영되는 시스템으로서, 시스템 구성 및 운영 과정에 잠재되어 있는 위험요인을 체계적으로 파악하고 비용-효율적인 안전대책을 수립하여 허용 가능한 수준으로 위험도를 제어할 수 있는 시스템 안전관리체계 구축과 합리적인 안전 활동이 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 철도 시스템 안전관리의 출발점이자 핵심 과정인 위험(Hazard)분석 및 위험도(Risk) 평가를 위한 공통적인 접근법으로서 철도시스템의 운영과정에서 발생하는 철도사고 위험도 평가 절차와 사고시나리오를 기반으로 하는 주요 개발 내용을 소개하고자 한다. 철도사고의 위험도 평가를 위해 본 논문에서는 철도 사고의 위험요인을 분석하여 관련 위험사건을 정의하였고, 위험사건의 발생을 초래하는 위험요인들의 논리적 연계성을 사고발생 시나리오로 구성하여 사고발생빈도 평가모델을 고장수목(Fault Tree)을 이용하여 개발하였다. 또한 사건수목(Event Tree)을 이용하여 인명피해를 초래하는 영향인자를 사고진전 시나리오로 구성하고, 위험사건별 사고 심각도를 등가사망지수로 환산하여 계산하는 위험도 평가모델을 개발하였다.

2. 철도사고 위험도 평가 동향

국내의 경우 2004년 10월 「철도안전법」이 제정 이후, 철도사고 분석 및 통계관리 기반을 마련하기 위해 2006년 1월 공표된「철도사고보고 및 조사에 관한 지침」이 2007년 11월 「철도사고등의 보고에 관한 지침」로 개정되었으며, 철도운영자등은 철도사고 및 운행장애를 해당 절차 및 방법에 따라 보고해야 한다. 철도사고 및 운행장애 분류는 철도사고, 운행장애, 철도재난으로 구성되며, 철도사고는 다시 철도 교통사고, 철도 안전사고로 구분된다. 철도 교통사고는 열차충돌, 열차탈선, 열차화재 등의 열차사고, 건널목사고 및 철도 교통사상사고를 포함한다. 여기에서, 철도 교통사상사고란 열차사고와 건널목 사고를 동반하지 않고 열차 또는 철도차량의 운행으로 여객, 공중, 직원이 사망하거나 부상을 당

한 사고를 의미한다. 단, 건널목에서 철도차량과 도로차량과 충돌 및 접속 사고 외에 여객, 공중, 직원의 사상이 발생한 사고를 포함한다. 또한 철도 안전사고는 열차 또는 차량의 운전과 관계없이 철도운영 및 철도시설관리와 관련하여 인명의 사상이나 물건의 손괴가 발생된 사고로서 철도화재사고, 철도 안전사상사고, 철도시설파손사고 등을 포함한다. 여기에서, 안전사상사고란 열차 또는 차량의 운전과 관계없이 철도시설에서 추락, 감전, 충격 등으로 여객, 공중, 직원의 사상이 발생한 사고를 의미한다.

미국 FRA(Federal Railroad Administration)에서는 열차사고의 유형별 원인을 궤도/노반/구조, 기계적/전기적 고장, 신호 및 통신, 열차운영/인적요소, 기타 원인 등으로 분류하여 코드화 하였으며, 그 외 사상자의 행위특성을 포함한 환경조건, 상해/질병 또한 유형별로 분류하여 위험분석을 수행하였다. 호주의 철도사고 유형별 위험요인은 안전체계 및 운영관리상의 위험, 선로 점유 및 작업 실행상의 위험, 업무종사자의 자격 및 활동상의 위험 등으로 분류한 후 각각의 경우에 대해 위험조건과 위험요인을 세분하고 있다. 유럽연합은 2004년도부터 SAMRAIL(Safety Management in Railway) 프로젝트를 진행하여 승객, 작업자 및 하청직원, 건널목 이용자 및 선로 불법침입자 등에 대한 철도 안전목표 지수(CST, Common Safety Target)를 개발하였고, 철도 안전목표를 설정하기 위한 공통적인 위험도 관리 접근법 (CSM, Common Safety Method)을 개발하였다. 영국에서는 철도사고를 열차사고(철도 충돌/탈선/화재/건널목 사고), 철도 교통사상사고를 나타내는 이동사고(movement accidents), 철도 안전사상사고를 의미하는 비이동사고(non-movement accidents)로 분류하였고, 각각의 사고를 세분하여 사고로 발전될 잠재적 가능성이 높은 상황을 의미하는 위험사건을 총 125로 정의하였다. 그리고 영국철도에 대한 시스템 차원의 위험도 평가 모델(safety risk model)을 구축하여 초래될 수 있는 각 위험사건에 대한 위험요인을 파악하고 위험사건에 대한 원인분석(causal analysis)와 결과분석(consequence analysis)을 수행하고 있다. 특히 영국에서는 위험도의 정량적 평가를 위하여 기본 자료를 안전경영정보시스템(SMIS, Safety Management Information System)에서 축출하고 있다. SMIS는 웹기반의 사고보고 시스템으로 시설관리자인 Network Rail의 관리영역에서 발생한 모든 안전관련 사건을 기록하기 위해 60개 이상의 모든 철도 운영자 및 관리자에 의해 사용된다.

3. 철도사고 위험도 평가 절차

통상 위험도 평가는 위험요인 판별(hazard identification), 위험도 산출(risk estimation) 및 위험도 경감(risk reduction)을 골격으로 하는 단계적인 절차를 따르지만, 적용 대상의 특징에 따라 기준별로 조금씩의 차이가 있다. 예를 들어, 영국 철도의 공학적 안전관리에서는 1) 위험요인 판별, 2) 원인분석, 3) 결과분석, 4) 손실분석, 5)대안분석, 6) 영향분석, 7) 허용 위험도 입증의 7단계 절차를 따른다. 또한 유럽연합 SAMRAIL 프로젝트의 「공통적인 위험도 관리 접근법」에서는 다음과 같은 6단계의 위험도 관리 접근법을 개발하였다. 1) 시스템 경계설정 및 위험요인 판별, 2) 사고 시나리오 기반의 위험도 평가, 3) 위험도 허용수준 및 제어수단의 판별, 4) 제어수단의 선정 및 위험도 경감효과 평가, 5) 판별된 위험요인에 대한 대응계획 및 실행전략 수립, 6) 지속적인 위험요인 추적 및 변경사항 관리. 그림 1은 본 연구에서 제시된 철도사고 위험분석 및 위험도 평가 절차를 나타낸 것으로서, 유럽철도안전지침과 ISO/IEC Guide 51, MIL-Std 882c] 등에서 지시하는 국제적인 공통 방법론을 따르고 있다. 우선, 위험분석 과정에서 위험사건을 정의하고, 위험사건의 발생원인과 최종적인 결과피해에

이르는 사고진전 과정을 논리적으로 연결한 사고시나리오를 구성한다. 여기에서 위험사건은 사고로 발전될 잠재적 가능성이 높은 상황을 말한다. 그리고 위험도 평가 단계에서는 이들 시나리오를 기반으로 위험사건의 발생확률(빈도)과 사고 진전과정의 결과심각도를 산정하여, 최종적으로 인명피해에 대한 위험도를 정량적으로 평가하는 것으로 하였다. 위험도 경감 및 대책 분석은 철도운영환경에 따라 상이하여 철도운영기관별 특성을 반영하여야 하기 때문에 본 연구에서는 생략되었다.

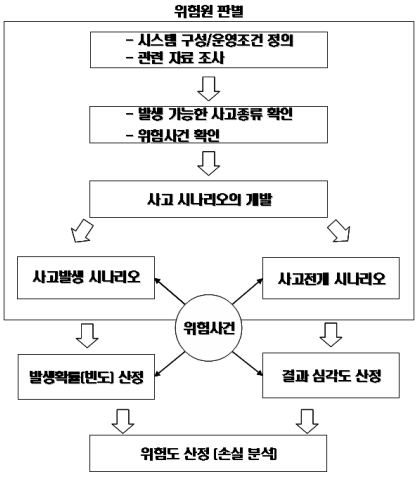

그림 1. 철도사고 위험도분석 절차

4. 철도 사고 시나리오 개발

표1. 철도사상사고의 위험목록

사건형식		주요 기여요인
추락	열차 추락	뛰어내림/뛰어탐, 열차출입문 개방/열차출입문 오동작, 열차출입문 오사용(반대측), 열차출입문 매달림
	승강장 추락	안전설비(펜스, 경고장치) 결함, 떠밀림 추락(혼잡, 범죄), 개인부주의(자살포함)
	작업장 추락	안전설비(펜스, 경고장치) 결함, 작업장비(사다리, 비계, 곤도라) 결함, 개인부주의
전도/실족	열차내 전도/실족	제동/급출발, 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장, 안전설비(손잡이) 결함, 개인부주의
	승강장 전도/실족	바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장, 안전설비 결함, 개인부주의
	역구내 전도/실족	운반/이동 장비(승강기 등) 급제동/급출발, 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장, 안전설비 결함, 개인부주의
	작업장 전도/실족	바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장, 안전설비 결함, 작업장비 결함, 개인부주의
끼임/끌림	열차 출입문 끼임	출입문 고장/오작동, 개인부주의
	역구내 출입문	출입문 고장/오작동, 개인부주의
	열차-승강장 끼임	승강장 곡선부 간격 과다, 안전설비(발판) 결함, 개인부주의(승/하차 과정)
	작업장비 끼임	작업장비 결함, 개인부주의
충격	열차/차량 충격	선로추락(열차/승강장/작업장), 승강장 열차근접 통행/이동, 선로 무단 침입/통행, 선로(변) 이동/작업, 차량입환작업(돌방입환, 차량분리/구름)
	시설물 충격(기둥, 건물, 표지, 창문)	시설물 붕괴/구성품 탈락, 안전설비(보호/방호) 결함, 개인부주의
	물체 충격	바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장, 열차내 화물 추락, 외부 물체 투사/낙하, 작업 도구/공구 투사/낙하, 재료/자재 낙하/붕괴, 기타 물체 충격
화상	열차 화재, 기기 과열, 고온부 접촉	내장재 연소, 화물연소, 전기합선, 난방기 과열, 제동부 과열, 식당 온수, 뜨거운 물체
감전	전철/전력 설비, 열차전기설비, 승강장 전기설비, 작업장 전기설비, 선로변 전기설비	설치/안전보호 결함(파손, 노출, 누전), 개인부주의, 오사용
기타	질식(독가스, 매연, 화학물질), 질병, 폭행/협박, 사상자 발견	

철도사고 시나리오를 모형화하기 위해서는 먼저 철도사고의 위험사건과 위험요인을 규명하여야 한다. 본 연구에서는 위험사건과 위험요인을 정의하기에 앞서 현존하는 사고자료와 다양한 국·내외 자료를 분석하고, 다수의 국·내외 전문가 검토를 거쳐, 충돌, 탈선, 화재, 건널목, 사상사고 별 위험목록

(hazard list)을 표 1의 사상사고의 예와 같이 개발하여 분석의 범위를 규명하였고, 개발된 위험목록을 이용하여 인명피해를 초래할 수 있는 위험사건을 표 2의 사상사고의 예와 같이 사고종류 별로 정의하였다.

표 2. 철도사상사고의 위험사건

구분			위험사건
-여객 -공중 -직원	교통 사상 사고	충격	열차충격, 물체충격
		전도/실족	열차 승/하차 중 전도/실족, 급제동/급출발에 의한 전도/실족
		추락	열차 추락/낙하, 열차 승/하차 중 승강장 추락
		끼임/끌림	열차 출입문 끼임, 승강장-열차사이 끼임
	안전 사상 사고	충격	차량충격, 물체충격
		전도/실족	역사 내부 전도/실족, 선로/건널목 전도/실족, 차량 내부 전도/실족, 작업장 전도/실족
		추락	차량 추락/낙하, 고소 작업 중 추락, 시설물 추락, 승강장 추락
		끼임/끌림	차량 설비 끼임, 역사 내부 시설물 끼임, 작업 장비/물체 끼임
		감전	차량 및 시설물 감전
		화상	차량 및 시설물 화상
		질식	차량 및 시설물 질식
		기타	환자발생, 폭행/협박, 사상자 발견

표 3. 철도사상사고 추락의 위험사건 사고발생 시나리오

사고구분	위험사건	위험상황	위험요인		
교통 사상 사고	열차추락	출입문 무단취급, 출입문 취급오류/오동작, 출입문 잠금장치 고장, 출입문 개방상태 운행, 매달림/뛰어탐	인적 관리 요인	정보인식 오류, 상황판단 오류, 의사결정 오류 실행 오류, 의사소통 오류, 절차/규정 위반	-음주 -질병 -혼잡 -장애 -기타
	열차 승/하차 중 승강장 추락	바닥/미끄러움, 안전설비 고장, 바닥 장애물 지장, 부주의			
안전 사상 사고	차량추락	뛰어내림, 출입문 취급오류/오동작, 출입문 잠금장치 고장, 출입문 개방상태 운행, 매달림/뛰어탐, 차량격동/급제동/급출발, 부주의	기술 요인	선로/구조물 결함, 신호제어설비 결함, 정보통신설비 결함, 전철전력설비 결함, 열차/차량설비 결함, 건널목설비 결함, 작업 물체/장비 결함	
	차량지붕 추락	차량 지붕에서 추락, 전철/전력선 감전 후 추락			
	고소 작업 중 추락	사다리에서 추락, 비계에서 추락, 철로교에서 추락, 검사피트로 추락, 기타 고소 작업 중 추락	외부 요인	불법행위	불법 침입/행동, 자살추정 무단공사/임의작업, 무단설치/방치, 테러, 기타
	시설물 추락	외부 지역에서 선로 추락, 외부 지역에서 도로차량의 선로로 추락, 역사 내부 시설물에서 추락			
	승강장 추락	바닥/미끄러움, 안전설비 고장, 바닥 장애물 지장, 부주의		불완전한 기후조건, 불완전한 환경조건	

철도사고 시나리오는 위험사건을 중심으로 위험사건이 발생하기 전까지 과정을 나타낸 사고발생 시나리오와 위험사건이 발생 후 사고가 확대되는 과정을 나타내는 사고 진전시나리오로 구성된다. 본 논문에서는 지면 관계상 전체 위험사건의 사고시나리오는 생략하고,「추락/낙하」위험사건을 대상으로 개발된 사고 시나리오의 구성을 소개한다. 철도사고 시나리오에 대한 세부 내용은 참고문헌을 참고하기 바란다. 사고발생 시나리오는 위험사건의 발생을 초래할 수 있는 위험상황과 이와 같은 위험상황의 원인을 나타내는 위험요인으로 구성되며, 위험요인은 다시 인적관리 요인, 기술적 요인, 외부 요인으로 구분된다. 위험상황은 위험사건의 특징을 반영하여 위험사건 별로 다르게 구성되었으며, 위험요인은 모든 위험사건에 동일하게 적용되었다. 표3은 「추락/낙하」위험사건의 사고발생 시나리오를 나타낸 것이다. 위험사건이 발생 후 확대되는 과정을 나타내는 사고 진전시나리오는 인명피해를 초래하는 핵심 영향인자를 선별하고 영향인자별 인명피해에 영향을 줄 수 있는 피해기준을 검토하여 작성되었다. 표 4는 철도사고의 「열차/차량 추락/낙하」위험사건의 사고진전 시나리오를 나타낸 것이다.

표 4. 철도사상사고 추락의 위험사건 사고진전 시나리오

위험사건	→	운행속도	→	추락높이	→	인명피해
열차 추락/낙하	→	고속	→	2M 이상	→	사망
		저속				중상
차량 추락/낙하		정지		2M 이하		경상

5. 철도 사고 위험도평가 모델 개발

위험도를 평가하기 위해서는 사고시나리오의 분기별 발생빈도(또는 확률) 및 인명피해의 평가가 이루어져야 한다. 본 절에서는 철도사고 위험도 평가 모델을 소개한다. 발생빈도 평가는 위험사건 형식별로 위험상황과 위험요인을 개발된 사고발생 시나리오를 기반으로 FTA 기법을 적용하여 관계논리를 모델링 하였다. 그림 4는 열차충격 위험사건의 발생에 대한 FTA 모델링 사례를 제시한 것이다. 수치계산을 설명하기 위해서 FT(Fault Tree)의 구성인자는 서로 독립이라고 가정 하였고, 발생빈도 값은 사고자료를 기반으로 한다. 본 연구에서는 인명피해(사망/중상/경상)를 산정할 수 있는 결과심각도 평가 모델을 ETA 기법을 적용하여 개발하였으며, 개발 모델은 위험사건의 발생에 따른 사고피해의 확대과정을 논리적으로 전개한 사고진전 시나리오를 바탕으로 한다. 사고자료가 충분한 경우 ET(Event Tree)의 분기확률을 사고자료를 기반으로 객관적 관점에서 계산할 수 이였다. 자료가 충분하지 못하는 경우 인적신뢰도 분석 분야에 HEART(Human Error Assessment and Reduction Technique)과 전문가의 의견 및 공학적 판단을 병행 고려하여 적용하였으며, 향후 추가적인 연구를 통해 보완이 필요한 분야이다.

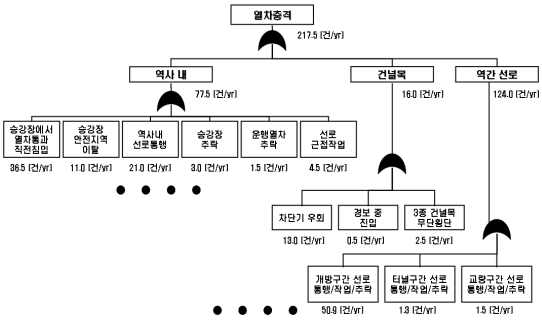

그림 2. 열차충격 위험사건의 Fault Tree

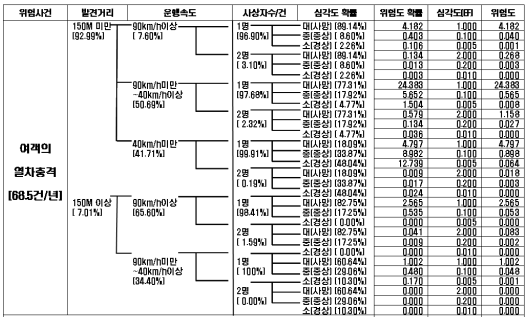

Fig. 3. 열차충격 위험사건의 Event Tree

철도 위험도 평가는 방대한 사고/장애 자료의 처리와 사고 시나리오 모델 개발에 많은 인력과 시간이 소요될 뿐만 아니라, 향후 철도안전법의 시행에 따른 주기적 철도 위험도 분석의 효율성을 고려할 때 철도 사고/장애 자료와 사고 시나리오 모델의 유기적인 유지 및 연계 관리, 신속한 철도 위험도 정량분석을 통한 의사결정 지원 등이 요구되므로 철도 위험도 평가에 특성화된 전문 소프트웨어의 개발 이용이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 철도사고 위험도평가 전용 전산지원 시스템을 개발 중이다. 「철도사고 위험도평가 전용 전산지원 시스템」은 철도 시스템의 위험도 정보 생산 및 관리를 위한 전용 전산 체계로 요구되는 구성 모듈의 프로그램 방식에 따라 크게 1) 철도 위험도 평가 전산시스템과 2) 철도 위험도 정보 관리 전산 시스템의 두 분야로 나눌 수 있으며, 현재 전자는 MS Windows 기반 프로그램으로, 후자는 웹 기반 프로그램으로 각각 개발 중에 있다. 그림 4는 시스템을 구성하는 전체 전산 프로그램 모듈들을 연차별 개발 완료 일정과 함께 도식화한 것이다. 여기에서 통합연계 프로그램을 포함한 모든 전산모듈들은 철도 전용으로 개발되어지나, 위험도 정량 평가 엔진은 한국원자력

연구소에서 기 개발된 FTREX(Fault Tree Reliability Evaluation eXpert) 최신 버전을 사용한다. 현재는 그림 4의 개발 소프트웨어 가운데 위험도 평가용 데이터베이스(DB) 검색/연계 모듈과 위험도 정보 출력 모듈이 웹 기반 프로그램으로 개발 중에 있으며, 향후 요건검증관리(RVM: Requirements Verification Management) 모듈, 사상가치환산(VPF: Value for Preventing a Fatality) 모듈, 비용-효과분석(CBA: Cost-Benefit Analysis) 모듈 등이 웹 기반 프로그램으로 개발될 예정이다. 이들을 제외한 R-ETA(Railway-Event Tree Analyser), R-FTA(Railway-Fault Tree Analyser), R-HRA(Railway-Human Reliability Analyser), 불확실성 분석 모듈, 민감도 분석 모듈, 위험도 모델 관리 및 통합 평가를 위한 통합 분석 모듈은 MS Windows 기반 프로그램으로 개발된다. 여기서, 각 모듈의 괄호 안의 숫자는 개발 연도를 의미한다.

그림 4. 철도사고 위험도평가 전용 전산지원 시스템

6. 결론

본 논문에서는 철도 시스템 안전관리의 출발점이자 핵심 과정인 위험(Hazard)분석 및 위험도(Risk) 평가를 위한 공통적인 접근법으로서 철도시스템의 운영과정에서 발생하는 철도사고 위험도 평가 절차 개발에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 사건발행 확률을 평가하기 위해 위험사건별 위험상황과 위험요인을 조합으로 사고 시나리오를 구성하고 하며, 이를 토대로 사고 인자별 사고 분석을 수행하고, 이를 구성하여 각 위험 사건별 위험발생 확률을 추정할 수 있는 위험 사건별 FTA 모델을 구성하였다. 또한 사건 발생 시 시 피해 확산요인을 고려하여 최종결과를 ETA 형식으로 전개하였다. 본 연구의 결과는 철도 시스템의 위험도 평가단계에서 체계적으로 국내 철도 사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하고, 국내 철도사고의 발생확률과 위험도를 정량적으로 평가하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부(2004), “철도안전법”, 제7245호.
2. 건설교통부(2006), “제1차 철도안전 종합계획”
3. European Commission (2004), “Safety Management in Railway, D.2.3:Common Safety Methods”.
4. European Commission (2004), “Safety Management in Railway, WP.2.4: Acceptable Risk Level”.
5. Rail Safety and Standard Board (2005), “Investigation of common safety methods”.
6. Rail Safety and Standard Board (2006), “Profile of Safety Risk on the UK Mainline Railway”, issue 5.
7. Rail Safety & Standard Board, (2004), “A statistical review of the RSSB Safety Risk Model (WP1)”.
8. 건설교통부(2006), “철도사고보고 및 조사에 관한 지침”, 제 2006-3호.

9. 건설교통부(2007), “철도사고등의 보고에 관한 지침”, 제 2007-512호.
10. ISO/IEC Guide 51 (1991), “Safety Aspect-Guidelines for their inclusion in standards”.
11. Rail Safety and Standard Board(2007), "Engineering Safety Management(The Yellow Book) Volume 2 Guidance Issue 4.
12. Rail Safety and Standard Board, Railway Group Guidance Note GE/GN8561 (2002), “Guidance on the Preparation of Risk Assessments within Railway Safety Cases”.
13. US DOT (1993), “Military Standard : System Safety Program Requirements”, MIL-STD-882C.
14. 한국철도기술연구원(2003), “철도사고 위험요인 분석기술개발 : 별책 호주철도사고 위험요인 분석”.
15. 한국철도기술연구원(2007), “철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축”.
16. 한국철도공사(2006), “운전사고 및 운전장애 월보(2004년-2005년)”.
17. Rail Safety and Standard Board, UK (2004), “Rail-specific HRA technique for driving tasks”, Final report.
18. 김재환, 정원대, 장승철, 왕종배 (2006), 철도 인간신뢰도분석 방법 선정을 위한 사례분석, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp. 532-538.