철도 사상사고 위험도 평가를 위한 사고 시나리오 모델 개발에 관한 연구

박찬우† · 왕종배 · 조연옥
한국철도기술연구원 철도종합안전기술개발사업단
(2008. 9. 3. 접수 / 2009. 6. 1. 채택)

Development of Accident Scenario Models for the Risk Assessment of Railway Casualty Accidents

Chan-Woo Park† · Jong-Bae Wang · Yun-ok Cho
Railroad Safety Technology R&D Corps, Korea Railroad Research Institute
(Received September 3, 2008 / Accepted June 1, 2009)

Abstract : The objective of this study is to develop accident scenario models for the risk assessment of railway casualty accidents. To develop these scenario models, hazardous events and hazardous factors were identified by gathering various accident reports and information. Then, the accident scenario models were built up. Each accident scenario model consists of an occurrence scenario model and a progress scenario model. The occurrence scenario refers to the occurrence process of the event before the hazardous event. The progress scenario means the progress process of the event after the hazardous event. To manage a large amount of accident/incident data and scenarios, a railway accident analysis information system was developed using railway accident scenario models. To test the feasibility of the developed scenario models, more than 800 domestic railway casualty accidents that occurred in 2004 and 2005 were investigated and quantitative and qualitative analyses were performed using the developed information system.
Key Words : railway casualty accident, accident Scenario, risk assessment

1. 서 론

철도는 국가 공공 교통수단으로서 안전성과 정시성을 장점으로 하지만, 열차충돌, 열차탈선, 열차화재, 철도 사상사고(死傷事故, casualty accident) 등의 사고를 유발할 수 있는 위험요인(hazard factor)을 내재하고 있다. 여기서, 위험요인이란 사고를 유발할 수 있는 불완전한 조건 또는 행동을 의미한다[1]. 이에 따라 선진 철도운영 국가에서는 위험요인의 발견, 평가, 대책 수립 및 실행, 문제점 개선을 통해 지속적으로 안전수준을 유지 또는 향상시키는 일련의 순서를 가진 프로그램 활동을 기반으로 시스템 안전관리(system safety plan)를 수행하고 있다[2-5].

국내의 경우 위험도 분석 및 안전성 평가에 관한 사항을 포함하는 「철도안전법」[6]이 2004년 10월에 제정된 이후, 「위험분석 및 위험도 평가」를 기반으로 하는 시스템 안전관리에 관한 관심이 높아지고 있다[2,7]. 특히, 전체 철도사고를 적정수준으로 제어하기 위하여, 철도사고의 상당한 비중을 차지하고 있는 철도 사상사고의 위험관리에 대한 중요성이 부각되고 있다[7]. 그러나 다른 철도사고와 비교하여 철도 사상사고는 그 위험요인을 규명하고 대책마련을 위한 위험분석 및 위험도(risk) 평가에 관한 연구가 미진한 상태이다. 여기서, 위험도 평가란 사고로 인해 나타날 수 있는 피해결과를 발생확률과 결과심각도(severity)의 항목으로 평가하는 것을 의미하며, 결과심각도란 하나의 사고로 인해 나타날 수 있는 인명피해, 재산피해 또는 시간손실의 정도를 사상자 수나 재산피해금액 등으로 표시한 것을 의미한다[1].

철도의 시스템 안전관리는 사고/장애 이력자료와 안전규정/기준 등의 관련 자료 분석을 통해, 철도사고를 유발할 수 있는 위험요인을 파악하는 위험분석이 선행되어야 한다. 또한, 위험분석에서 식별된 위험요인은 사고의 배경원인 추적 및 그에

† To whom correspondence should be addressed.
cwpark@krri.re.kr

대한 중요도 평가, 그리고 대책 선정에 있어서 매우 중요한 정보를 제공할 수 있는 수단이 된다. 따라서 위험요인이 사고의 발생에 어떤 식으로 작용하고, 어떤 결과를 초래하는지에 대한 분석을 위해서는 철도분야의 특성을 반영한 사고 발생-진전 메커니즘의 모형화 및 이를 평가하는 기술개발이 반드시 필요하다[3,8].

이와 같은 이유로 본 연구에서는 국내 철도 사상사고의 위험도 평가를 위한 기초 분석모형을 개발하였다. 이를 위해 철도 사상사고을 분석하여 관련 사고형식과 사고를 유발할 수 있는 불완전한 조건 및 행동을 각각 위험사건(hazardous event)과 위험요인으로 나타내었고, 위험사건과 위험요인의 논리적 연계성을 나타내는 사고 메커니즘을 사고 시나리오 모델로 구성하였다. 또한 위험도의 정량적 평가에 요구되는 사고/장애 이력 자료의 체계적 관리 및 분석을 위하여, 사고 시나리오 모델을 기반으로 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템을 구축하였고, 이를 활용하여 개발된 모델의 적합성을 검토하였다.

2. 철도 사상사고 관련 연구 현황

2.1. 철도 사상사고의 정의 및 국내현황

「철도안전법」에 따른 「철도사고등의 보고에 관한 지침」이 2007년 11월에 제정되어 철도운영자 등은 철도사고 및 운행장애를 해당 절차 및 방법에 따라 보고해야 한다[9,10]. 본 연구의 철도 사상사고의 범위 및 정의는 「철도사고등의 보고에 관한 지침」을 따랐다.

철도 사상사고는 철도교통 사상사고와 철도안전 사상사고로 구성된다. 철도교통 사상사고는 열차충돌, 열차탈선, 열차화재 등의 열차사고와 건널목에서 철도차량과 도로차량과의 충돌이나 접촉 사고 없이 열차 또는 철도차량의 운행으로 여객, 공중, 직원의 사상이 발생한 사고를 의미한다. 철도안전 사상사고란 열차 또는 차량의 운전과 관계없이 철도 운영/시설 관리와 관련하여 인명사상이 발생된 사고로서 철도시설에서 추락, 감전, 충격 등으로 여객, 공중, 직원의 사상이 발생한 사고를 의미한다[10]. 예를 들어, 여객이 열차의 이용을 위해 승강장에서 대기 중 열차와 접촉사고가 발생했다면, 열차운행과 관련되어 철도교통 사상사고에 해당된다. 반면, 여객이 승강장에서 대기 중 열차의 운행과 직접적인 관련이 없는 승강장 추락, 전력설비 감전 등의 다양한 사고를 당할 수도 있다. 이와 같은 사고는 차량의 운전과 관련 없는 철도 운영/시설 관리와 관련되어, 철도안전 사상사고에 해당된다.

Table 1. Status of railway casualty accidents (2000–2005)[11]

구분 \ 년도		2000	2001	2002	2003	2004	2005	합계
발생건수	전체사고	1,081	1,041	1,030	1,121	1,099	801	6,173
	사상사고	556	512	536	638	575	318	3,135
	사상사고/전체사고	51%	49%	52%	57%	52%	40%	51%
등가사망자수	전체사고	250.67	233.46	252.19	223.50	214.53	167.82	1,342.17
	사상사고	238.52	219.60	236.21	209.43	206.95	157.07	1,267.78
	사상사고/전체사고	95%	94%	94%	94%	96%	94%	94%

Table 1은 최근 몇 년 동안의 연도별 철도 사상사고의 현황을 나타낸다. 사상사고의 발생건수는 전체 철도사고 발생건수의 51%, 중상자 수와 경상자 수를 등가사망지수(FWI, Fatalities and Weighted Injuries)로 환산(사망 1명 = 중상자 10명 = 경상자 200명)[8]하였을 경우 사상사고의 등가사망지수는 전체 철도사고 등가사망지수의 94%를 차지한다. 이와 같이 사상사고는 철도사고에서 많은 비중을 차지하고 있어, 철도관계자들은 철도 사상사고의 위험관리를 위한 다양한 대책을 마련하고 있다[7].

그러나 위험요인의 판별, 관련 위험도의 평가, 대책의 검토 및 실행, 이에 대한 주기적인 문제점 개선 활동 및 이를 통한 일정한 안전수준을 지속적으로 유지하거나 향상시키는 프로그램 활동 기반의 시스템 안전관리는 부족한 실정이다[2]. 서론에서도 언급하였지만, 위험요인을 판별해 내는 것은 사고의 배경원인 추적이나 그에 대한 중요도 평가, 대책선정에 있어서 중요한 정보를 제공할 수 있기 때문에, 철도 사상사고에 대한 시스템 안전접근에서 가장 중요한 단계이다. 따라서 위험요인의 판별 및 관련 위험도 평가가 선행되어야 하며, 이를 위하여 위험요인을 사고 발생-진전 메커니즘으로 모형화하는 연구가 요구된다.

2.2. 철도 사상사고에 대한 국외현황

미국 FRA(Federal Railroad Administration)에서는 사상사고를 포함한 열차사고의 유형별 원인을 궤도/노반/구조, 기계적/전기적 고장, 신호 및 통신, 열차운영/인적요인, 기타 원인 등으로 분류하여 코드화 하였으며, 그 외 사상자의 행위특성을 포함한 환경조건, 상해/질병 또한 유형별로 분류하여 위험

분석을 수행하였다[12].

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[3,13].

유럽연합은 2004년도부터 SAMRAIL(Safety Management in Railway) 프로젝트를 진행하여 승객, 작업자 및 협력업체, 건널목 이용자 및 선로 불법 침입자 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[14,15].

영국에서는 철도사고를 열차사고(철도 충돌/탈선/화재/건널목 사고), 철도교통 사상사고를 나타내는 이동사고(movement accidents), 철도안전 사상사고를 의미하는 비이동사고(non-movement accidents)로 분류하였고, 철도사고로 발전될 잠재적 가능성이 높은 상황을 의미하는 위험사건을 125가지로 정의하였다. 그리고 영국철도에 대한 시스템 차원의 위험도 평가 모델(safety risk model)을 구축하여, 초래될 수 있는 각 위험사건에 대한 위험요인을 파악하고 원인분석(causal analysis)과 결과분석(consequence analysis)을 수행하고 있다. 또한 영국에서는 위험도의 정량적 평가를 위하여 기본 자료를 안전경영정보시스템(SMIS, Safety Management Information System)에서 추출하고 있다. SMIS는 웹 기반의 사고보고 시스템으로 시설관리자인 Network Rail의 관리영역에서 발생한 모든 안전관련 사건을 기록하기 위해 60개 이상의 모든 철도 운영자 및 관리자에 의해 사용된다[16,17].

3. 철도 사상사고 시나리오 모델 및 위험도 평가용 정보처리 시스템 개발

3.1. 기초 분석모형 개발 절차

위험도 평가의 절차는 ISO/IEC Guide 51[18]에서 정의된 것과 같이 일반적으로 위험요인 판별(hazard identification), 위험도 산출(risk estimation), 위험도의 허용여부 결정(risk evaluation) 및 위험도 경감(risk reduction)의 단계적인 절차를 따르지만, 적용 대상의 특징에 따라 기준별로 조금씩의 차이가 있다. 예를 들어, 영국 철도의 공학적 안전관리[19]에서는 1) 위험요인 판별, 2) 원인분석, 3) 결과분석, 4) 손실분석, 5) 대안분석, 6) 영향분석, 7) 허용위험도 입증의 7단계 절차를 따른다. 또한 유럽연합 SAMRAIL 프로젝트[14,15]의 「공통적인 위험도 관리 접근법(CSM)」에서는 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 등과 같은 6단계의 위험도 관리 접근법을 적용하고 있다.

Table 2. Comparison of risk assessment processes

ISO/IEC Guide 51[18]	유럽연합 CSM[14,15]	영국 철도 공학적 안전관리[19]	본 연구의 위험도 평가 절차
위험요인 판별	시스템 경계설정 및 위험요인 판별	위험요인 판별	- 시스템 경계설정 - 사고종류 판별 - 위험요인 판별 - 위험사건 정의
위험도 산출	사고 시나리오 기반 위험도 평가	원인분석	사고 시나리오 모델 기반의 발생확률 평가
		결과분석	사고 시나리오 모델 기반의 결과 평가
		손실분석	위험도 산출
위험도 허용여부 결정 및 위험도 경감	위험도 제어수단 판별	대안분석	위험도 경감대책 분석
	제어수단 선정 및 효과 평가	영향분석	위험도 경감대책 평가
	대응계획 및 실행전략 수립	허용 위험도 입증	위험도 허용여부 결정
	위험요인 추적 및 변경사항 관리		

본 연구의 위험도 평가 절차는 Table 2와 같이 ISO/IEC Guide 51에서 정의하는 위험도 평가 절차를 따르면서, 유럽연합의 CSM과 영국 철도의 공학적 안전관리에서 규정하는 세부적인 절차를 따르고 있다.

즉, 본 연구에서는 위험요인 판별 단계에서 조사대상 시스템의 범위를 설정하고, 발생 가능한 사고종류와 위험요인을 판별하며, 관련 위험사건을 정의한다. 위험도 산출 단계에서는 위험사건의 위험요인과 최종적인 결과피해에 이르는 사고 진행과정을 논리적으로 연결한 사고 시나리오 모델을 구성하고, 정의된 시나리오 모델을 기반으로 위험사건의 발생확률(빈도)과 시나리오 전개에 의한 위험사건의 결과심각도를 평가하여, 빈도와 결과심각도의 곱으로 표현되는 위험도를 정량적으로 산출한다. 위험도 평가의 최종 단계에서는 위험도 경

감대책을 분석/평가하고 위험도의 허용여부를 결정하는 것으로 하였다. 이상의 과정 중 본 논문에서는 철도사고 시나리오의 모델 구성까지를 기술하였으며, 나머지 위험도평가 단계는 철도운영기관별 특성을 반영하여야 하기 때문에 본 논문에서는 생략하였다. 1절에서 언급하였듯이 결과심각도는 사상자 수나 재산피해금액 등으로 표현될 수 있지만, 본 연구에서는 심각도 분석의 범위를 인명피해로 제약하였으며, 사상자 수를 2.1절에서 언급한 등가사망지수로 환산(사망 1명 = 중상자 10명 = 경상자 200명)하여 표현하였다.

3.2 철도 사상사고 시나리오 모델 개발

철도 사상사고 시나리오를 모형화하기 위해서는 먼저 철도 사상사고의 위험사건과 위험요인을 규명하여야 한다. 철도 사상사고는 열차충돌, 열차탈선, 열차화재 사고로 구성된 열차사고와, 철도차량과 도로차량과의 충돌 및 접촉 사고를 나타내는 건널목사고를 제외한 철도운영 및 철도시설관리와 관련하여 인명사상이 발생한 모든 사고를 나타내므로, 분석의 범위가 상당히 넓어 모형화하기가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 위험사건과 위험요인을 정의하기에 앞서 한국철도공사 관할의 철도시스템을 대상으로 KROIS(Korean Railroad Operating Information System)[11]에 등록된 지난 5년간(2001~2005)의 2,579건의 철도 사상사고를 Table 3과 같이 서술형으로 분석하여 철도 사상사고의 형태 및 주요 사고원인을 파악하였다.

이후 분석된 결과를 요약하고, 미국[12], 영국[16,17], 유럽연합[20] 등의 국외 철도사고분석의 코드와 관련 선행연구[13,21-23]를 참조하여, 추락, 전도/실족, 끼임/끌림, 충격, 화상, 감전 등으로 구성된 위험성목록(hazard list)[4]을 Table 4와 같이 구성하여 분석의 범위를 규명하였고, 이를 이용하여 인명피해를 초래할 수 있는 위험사건을 Table 5와 같이 정의하였다.

Table 3. Example of railway casualty accident analysis

사고유형	열차운행 중 선로로 뛰어내림	일시 : *년 *월 *일 *시 *분
사고개요	*행 제 *열차가 *에서 발차 후 저속으로 운행 중 여객이 선로로 뛰어내리다 넘어지는 것을 열차감시 중인 부역장이 발견하여 급정차.	
사고분석	- *행 *열차가 *역을 발차 후 저속으로 20m 진행시 앞에서 1번째 객차에서 여객이 뛰어내림 - 열차감시 중인 부역장이 발견하여 급정차시킴	
사고원인	- 여객의 운행 중 출입문 개방	
사고피해	여객 1명 중상	

Table 4. Hazard list of railway casualty accidents

사고형식		주요 사고원인
추락	- 열차 추락	- 뛰어내림/뛰어탐 - 열차출입문 개방/열차출입문 오동작 - 열차출입문 오사용(반대측) - 열차출입문 매달림
추락	- 승강장 추락	- 안전설비(펜스, 경고장치) 결함 - 떠밀림 추락(혼잡, 범죄) - 개인부주의(자살포함)
추락	- 작업장 추락	- 안전설비(펜스, 경고장치) 결함 - 작업장비(사다리, 비계, 곤도라) 결함 - 개인부주의
전도/실족	- 열차내 전도/실족	- 급제동/급출발 - 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장 - 안전설비(손잡이) 결함 - 개인부주의
전도/실족	- 승강장 전도/실족	- 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장 - 안전설비 결함 - 개인부주의
전도/실족	- 역구내 전도/실족	- 운반/이동 장비(승강기 등) 급제동/급출발 - 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장 - 안전설비 결함 - 개인부주의
전도/실족	- 작업장 전도/실족	- 바닥 결함(미끄러움, 결빙)/통로 장애물 지장 - 안전설비 결함 - 작업장비 결함 - 개인부주의
끼임/끌림	- 열차 출입문 끼임	- 출입문 고장/오작동 - 개인부주의
끼임/끌림	- 역구내 출입문	- 출입문 고장/오작동 - 개인부주의
끼임/끌림	- 열차-승강장 끼임	- 승강장 곡선부 간격 과다 - 안전설비(발판) 결함 - 개인부주의(승/하차 과정)
끼임/끌림	- 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)
충격	- 시설물 충격 (기둥, 건물, 표지, 창문)	- 시설물 붕괴/구성품 탈락 - 안전설비(보호/방호) 결함 - 개인부주의
충격	- 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	

Table 5. Hazardous events of railway casualty accidents

사고	위험사건		사고대상자		
			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	○	○	○

Table 5에서 사고대상자 별로 위험사건의 발생 가능성이 무시 가능한 위험사건(Table 5의 「×」 표시)은 제외하고 각각의 위험사건은 사고대상자 별로 적용(Table 5의 「○」 표시)되었다. 이는 정부의 철도안전 종합계획7) 및 철도 운영기관의 안전계획 등에서 여객/공중/직원에 대한 각각의 통계를 수집하고 대책을 수립하기 때문이다. 즉, 동일한 위험사건이 여객/공중/직원에 대해 발생할 가능성이 있지만 사고대상자 별로 위험사건의 빈도, 심각도, 위험도가 다르기 때문에 위험도 평가 및 안전대책 수립 시 세부적으로 이를 반영하기 위함이다.

철도 사상사고 시나리오 모델은 위험사건의 발생을 전후로 하여 위험사건이 발생하기 전까지 과정을 나타낸 사건발생 시나리오 모델과 위험사건이 발생 후 사고로 확대되는 과정을 나타내는 사고진전 시나리오 모델로 구성된다. 사건발생 시나리오 모델은 위험사건의 발생을 초래할 수 있는 위험상황과 이와 같은 위험상황의 원인으로 작용하는 위험요인으로 구성되며, 위험요인은 다시 인적관리 요인, 기술 요인, 외부 요인으로 구분된다[3,17,24,25]. 위험상황은 위험사건 별로 그 특징을 반영하여 다르게 구성되었으며, 위험요인은 모든 위험상황에 공통적으로 적용되었다. 이와 같은 방법은 영국과 미국의 철도사고 보고시스템에서 사고종류별 위험사건을 구분하고 위험사건별 직접원인(immediate cause)을 분류하며, 직접원인의 배경원인(underlying cause)을 공통적인 위험요인으로 사용하는 방식과 유사하다. Table 6은 「추락/낙하」위험사건의 사건발생 시나리오 모델의 예를 나타낸 것이다.

Table 6. Example of occurrence scenario model of the hazardous event(in the case of the "falling" hazardous event)

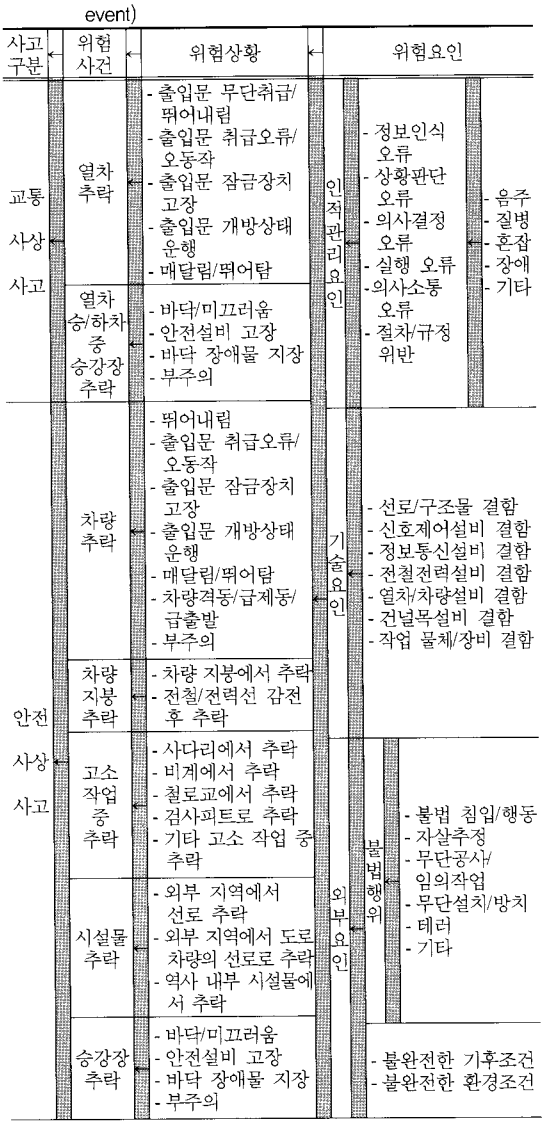

Table 7. Example of progress scenario model of the hazardous event (in the case of the "falling from train/rolling stock" events)

위험사건	→	운행속도	→	추락높이	→	노출인원수	→	인명피해
열차 추락/낙하	→	저속	→	2m 이하	→	1명	→	경상 확률
								중상 확률
차량 추락/낙하		고속		2m 이상		2명		사망 확률

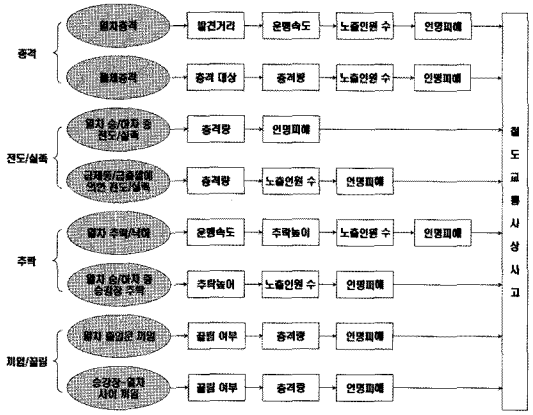

Fig. 1. Summary of progress scenario models for hazardous event of railway traffic casualty accident.

위험사건 발생 후 사고로 확대되는 과정을 나타내는 사고진전 시나리오 모델은 인명피해를 초래하는 요인을 선별하고 요인별 인명피해에 영향을 줄 수 있는 피해기준을 검토하여 작성되었다[3]. Table 7은 「열차/차량 추락/낙하」의 사고진전 시나리오 모델을 나타낸 것이며, Fig. 1은 철도교통 사상사고의 사고진전 시나리오 모델을 요약한 것이다. 철도안전 사상사고의 사고진전 시나리오 모델도 Fig. 1과 유사하게 작성되었다.

본 연구에서는 「추락/낙하」 위험사건과 유사한 방법으로 여객/공중/직원의 구분을 고려하여 총 73개의 위험사건에 대해 위험사건 별로 사건발생 시나리오 모델과 사고진전 시나리오 모델을 개발하였으며, 각 위험사건별 두 종류의 시나리오 모델을 연결하였을 경우 발생 가능한 사고 시나리오의 수를 요약하면 Table 8과 같다.

Table 8. Number of railway casualty accident scenarios

위험사건의 총 수	73개
사건발생 시나리오의 총 분기 수	36,315개
사고진전 시나리오의 총 분기 수	540개
사고 시나리오의 총 분기 수	362,880개

3.3. 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템

철도 위험도 평가는 방대한 사고/장애 자료의 처리와 사고 시나리오 유지관리에 많은 시간과 인력이 소요될 뿐만 아니라, 향후 주기적인 철도 위험도 분석의 효율성을 고려할 때 철도 사고/장애 자료와 사고 시나리오 간의 유기적인 연계 관리, 신속한 철도 위험도 평가 지원 등이 필요하다. 따라서 이와 같은 요구사항과 자료의 관리를 수행할 수 있는 정보시스템 개발이 요구된다. 본 연구에서는 이와 같은 요구사항을 컴퓨터 시스템으로 구현하기 위하여 사고 시나리오 모델을 기반으로 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템을 개발하였다.

철도 위험도 평가용 정보처리 시스템은 다양한 철도분야의 안전관계자가 철도 위험도 평가와 관련된 자료에 접근할 수 있도록 웹(Web) 기반 하에 개발되었다. 또한 향후 개발될 철도 사고 위험도 평가 모듈과 연계하여 입력된 사고자료가 분석을 통하여 위험도 평가를 위한 기초 정보로 변환되고, 이 정보를 이용하여 각종 의사결정을 수행할 수 있도록 설계되었다. 이를 위해 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템은 시스템 관리 모듈, 사고분석 모듈, 통계분석 모듈로 구성되며, 사고분석 모듈은 철도사고 분석절차[10,26]에 따라 환경분석, 사고분석, 피해분석, 대책분석 등의 기능을 수행한다.

Fig. 2는 개발된 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템의 사고분석 모듈의 실행화면을 나타낸다. 환경분석 기능에서는 분석자가 기후조건, 노선, 발생위치, 관계열차, 신호제어방식, 건널목 종별 등 코드화된 정보와 발생일시, 발생지점 등의 텍스트 정보를 입력하여 사고발생 환경에 대한 분석을 수행할 수 있도록 하였다. 사고분석 기능에서는 사건발생 시나리오 모델을 기반으로 위험사건, 위험상황, 위험요인 등을 규명하고 위험도의 기본적인 자료

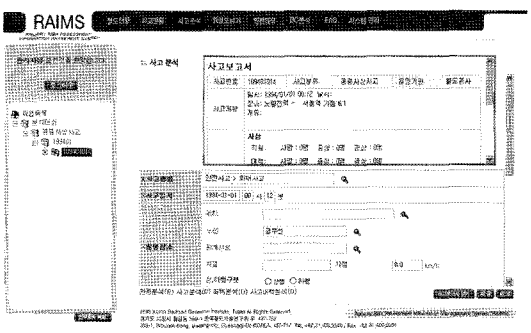

Fig. 2. Railway risk assessment information management system.

를 생성할 수 있도록 하였다. 또한 피해분석 기능에서는 분석자가 사고진전 시나리오 모델을 기반으로 인명피해를 초래한 핵심 요인을 규명하고, 인명피해, 재산피해 및 손실시간에 대한 분석을 수행할 수 있도록 개발하였다.

4. 철도 사상사고 시나리오 모델의 적합성 검토

본 장에서는 3장에서 제시된 철도 사상사고 시나리오 모델의 적합성을 검증하기 위해 지난 2년간(2004~2005)의 철도 사상사고와 철도 사상사고로 분류될 수 있는 기타 철도사고를 철도 위험도 평가용 정보처리 시스템을 이용하여 상세 분석을 수행하였다. 분석 시 각각의 철도 사상사고에 대하여, 개발된 사고 시나리오를 적용함으로써, 개발된 사고 시나리오가 실제 철도 사상사고를 모델링하여 위험도 평가 모형의 기본 모형으로 사용될 수 있으며, 위험도 평가 모형의 통계자료를 수집할 수 있는지를 검증하였다.

Table 9는 개발된 사고 시나리오 모델을 이용하여 위험사건별로 분석한 과거 2년간 발생빈도와 실제 발생한 인명피해를 나타낸다. Table 10~11은 Table 9의 위험사건 중 열차충격 위험사건과 추락 위험사건의 위험상황에 대하여 분석한 결과를 요약한 것이다. 위험사건 발생 시 한 명 이상의 사상자가 동시에 발생할 수 있으므로 Table 9~11에서 빈도는 사망, 중상, 경상의 합계보다 작거나 같으며, 위험도는 2.1절에서 언급한 등가사망지수로 환산(사망 1명 = 중상자 10명 = 경상자 200명)하여 계산하였다.

개발된 사고 시나리오 모델을 활용함으로써 분석한 철도사상사고를 분류할 수 있다는 것이 위의 표들을 통하여 확인되었다. 이는 3.1절에서 제시한 분석모형개발 절차 중 위험도 평가를 위한 기초자료로 활용될 수 있다는 것을 시사한다.

3.1절의 발생확률 평가의 예를 들면, Table 6의 "열차 추락/낙하" 위험사건은 사건발생 시나리오를 사상수목분석(Fault Tree Analysis) 기법[27]을 적용하여 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 즉, Fig. 3은 "열차 추락/낙하" 위험사건을 사상수목의 Top event로 하여 Table 6의 위험상황을 전개한 것이다. 여기서 각각의 위험상황은 "Exclusive OR gate"로서 독립적으로 발생하는 것으로 가정하였고, 분석된 자료에는 존재하지 않지만 발생 가능한 위험상황도 포

Table 9. Frequency & severity analysis for casualty accident hazardous events during two years (2004-2005)

구분		위험사건	빈도	사망	중상	경상	위험도
교통사상사고	충격	열차충격	435	308	90	48	317.240
		물체충격	3	0	0	4	0.020
	전도/실족	열차 승/하차 중 전도/실족	12	0	2	10	0.250
		전도/실족-급제동/급출발	1	0	0	1	0.005
	추락	열차 추락/낙하	41	4	13	25	5.425
		승강장 추락(승/하차 중)	4	0	1	3	0.115
	끼임/끌림	열차 출입문 끼임	34	0	6	29	0.745
		승강장-열차사이 끼임	16	0	2	14	0.270
안전사상사고	충격	차량충격	12	1	9	3	1.915
		물체충격	47	0	15	32	1.660
	전도/실족	역사 내부 전도/실족	89	3	30	59	6.295
		선로/건널목 전도/실족	8	1	6	1	1.605
		차량 내부 전도/실족	16	0	5	11	0.555
		작업장 전도/실족	2	0	2	0	0.200
	추락	차량 추락/낙하	10	0	6	4	0.620
		고소 작업 중 추락	13	2	9	3	2.915
		시설물 추락	3	1	4	0	1.400
		승강장 추락	8	1	2	5	1.225
	끼임/끌림	차량 설비 끼임	56	0	9	47	1.135
		역사 내부 시설물 끼임	4	0	2	2	0.210
		작업 장비/물체 끼임	12	0	11	1	1.105
	감전	차량 및 시설물 감전	23	5	15	8	6.540
	화상	차량 및 시설물 화상	16	0	2	14	0.270
	질식	차량 및 시설물 질식	1	0	0	1	0.005
	기타	환자발생	23	10	9	4	10.920
		폭행/협박	3	1	2	0	1.200
		사상자 발견	2	2	0	0	2.000
합 계			894	339	252	329	365.845

Table 10. Frequency & severity analysis for train striking hazardous event during two years (2004-2005)

위험사건		위험상황	빈도	사망	중상	경상	위험도
열차충격	역사내	승강장에서 열차통과 직전침입	73	51	16	8	52.640
		승강장 안전지역 이탈	22	1	4	17	1.485
		역사내 선로통행	42	24	12	6	25.230
		승강장 추락	6	2	4	0	2.400
		운행열차 추락	3	1	2	0	1.200
		선로 근접작업	9	6	5	0	6.500
	건널목	건널목 차단기 우회	26	24	3	0	24.300
		건널목 경보 중 진입	1	0	1	0	0.100
		3종 건널목 무단횡단	5	3	2	0	3.200
	역간선로	개방구간 선로 통행/작업/추락	235	183	41	17	187.185
		터널구간 선로 통행/작업/추락	6	6	0	0	6.000
		교량구간 선로 통행/작업/추락	7	7	0	0	7.000
합 계			435	308	90	48	317.240

Table 11. Frequency & severity analysis for falling hazardous event during two years (2004–2005)

위험사건	위험상황	빈도	사망	중상	경상	위험도
열차 추락/낙하	출입문 무단취급	38	3	12	24	4.320
	매달림/뛰어탐	2	1	0	1	1.005
	출입문 취급오류/오동작	1	0	1	0	0.100
열차 승/하차 중 승강장 추락	부주의	4	0	1	3	0.115
차량 추락	뛰어내림	3	0	1	2	0.110
	차량격동/급제동/급출발	2	0	1	2	0.110
	출입문 개방상태 운행	1	0	1	0	0.100
	부주의	4	0	3	1	0.305
고소 작업 중 추락	사다리에서 추락	7	0	6	1	0.605
	비계에서 추락	1	0	1	0	0.100
	철로교에서 추락	1	1	0	0	1.000
	검사피트로 추락	1	0	1	0	0.100
	기타 고소 작업 중 추락	3	1	1	2	1.110
시설물 추락	역사 내부 시설물에서 추락	1	0	1	0	0.100
	외부 지역에서 도로 차량의 선로로 추락	2	1	3	0	1.300
승강장 추락	안전설비 고장	1	0	1	0	0.100
	부주의	7	1	1	5	1.125
합 계		79	8	35	40	11.700

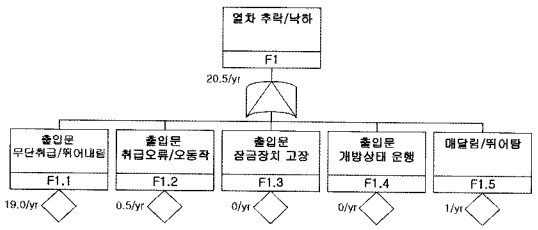

Fig. 3. Example of fault tree diagram for "Falling from train" vent.

함한 것이다. Fig. 3에서 표시된 수치는 Table 9와 Table 11의 "열차 추락/낙하" 위험사건 및 위험상황의 2년간의 빈도(위험사건 41건)를 연간 평균(위험사건 20.5건/년)으로 표현한 것이다.

3.1절의 결과 및 위험도 평가의 예를 들기 위해 Table 7의 "열차 추락/낙하" 사건의 사고진전 시나리오를 사건수목분석(Event Tree Analysis) 기법[27]을 적용할 경우 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 사고분석 결과 Table 9에서 발생한 "열차 추락/낙하" 사건은 모두 역사에서 열차가 저속상태(40km/h 미만)로 운행 중 2m 이하의 추락 높이에서 발생한 위험사건 이었으며, 1건의 사고에서 두 명의 사상자가 발생하였다. 따라서 "열차 추락/낙하" 사건에서

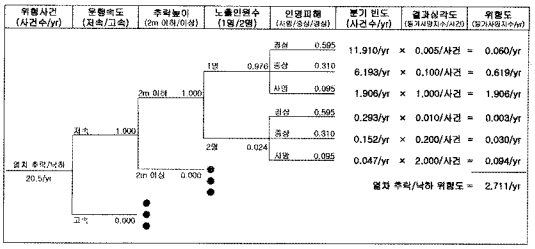

Fig. 4. Example of event tree diagram for "Falling from train" event.

1명의 사상자가 발생한 사고는 41건 중 40건이며, 이를 확률로 계산하면 0.976(=40건/41건)이다. 또한 인명피해의 사망/중상/경상 확률은 Table 9의 각각의 해당 사상자 수를 총 사상자 42명로 나눈 값이다. Fig. 4에서와 같이 빈도와 결과심각도의 곱으로 정의되는 위험도는 2.711/년이다. 이 값은 Table 9의 실제발생 연간 위험도(2.713/년)와는 약간의 차이가 있다.

Fig. 3과 Fig. 4의 몇 가지 계산 예시와 같이 위험도 평가 시 충분한 사고자료의 확보가 가능한 경우 빈도 및 분기확률을 사고자료를 기반으로 계산할 수 있다. 현재 2년간의 사고자료를 활용하였으나, 보다 많은 사고자료를 분석 시에는 사고 시나리오에 대한 보다 정확한 위험도 평가가 가능하다. 그러나 자료가 충분하지 못하는 경우 인적신뢰도 분석, 전문가의 의견, 공학적 판단 등 추가적인 방법 을 고려하여 하며, 향후 위험도 평가 시 보완이 필요한 분야이다.

5. 결론 및 토의

철도 사상사고는 전체 철도 사고의 많은 비중을 차지하고 있으나 아직까지 다른 사고종류에 비교하여 많은 연구가 진행되지 않은 상태이고, 위험분석 및 위험도 평가를 위한 사고 시나리오의 모델에 관한 연구도 미흡한 상태이다.

따라서 본 논문에서는 승객, 공중 및 직원의 철도 사상사고를 대상으로 위험사건을 추락, 충돌, 전도/실족, 충격, 화상, 감전, 질식 등으로 정의하였고, 각각의 위험사건에 대한 철도사고 시나리오 모델을 구성하여, 철도 사상사고의 사고분석 모델을 개발하였다. 또한 철도 사상사고의 사고분석에 요구되는 사고/장애 이력 자료의 체계적 관리 및 분석을 위하여 사고 시나리오 모델을 기반으로 철도 사고분석 정보시스템을 구축하였고, 이를 활용하여 과거 2년간 철도 사상사고 자료를 분석하였다.

감사의 글 : 본 연구는 국토해양부 철도종합안전기술개발사업의 연구비지원(과제번호: 철도안전C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1) 건설교통부, "철도차량 안전기준에 관한 지침: 철도차량의 위험도분석 세부기준", 제2007-278호, 2007.
2) 왕종배, 박찬우, "위험도 평가 기반의 철도시스템 안전관리", 한국방재학회논문집, 제3권, 제3호, pp.10~21, 2006.
3) 한국철도기술연구원, "철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축", 2007.
4) Rail Safety and Standard Board, Railway Group Guidance Note GE/GN8561, "Guidance on the Preparation of Risk Assessments within Railway Safety Cases", 2002.
5) European Commission, "Safety Management in Railway, D.2.3:Common Safety Methods", 2004.
6) 건설교통부, "철도안전법", 제7245호, 2004.
7) 건설교통부, "제1차 철도안전 종합계획", 2006.
8) Rail Safety and Standard Board, "Profile of Safety Risk on the UK Mainline Railway", issue 5, 2006.
9) 건설교통부, "철도사고보고 및 조사에 관한 지침", 제 2006-3호, 2006.
10) 건설교통부, "철도사고등의 보고에 관한 지침", 제 2007-512호, 2007.
11) 한국철도공사, "Korean Railroad Operating Information System의 철도 사고 및 장애 Database", 2007.
12) U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration, "FRA Guide for Preparing Accident/Incident Report", 2003.
13) 한국철도기술연구원, "철도사고 위험요인 분석 기술개발 : 별책 철도사고 위험요인 분석", 2003.
14) European Commission, "Safety Management in Railway, WP.2.4: Acceptable Risk Level", 2004.
15) Rail Safety and Standard Board, "Investigation of common safety methods", 2005.
16) Rail Safety and Standard Board, "A statistical review of the RSSB Safety Risk Model (WP1)", 2004.
17) Rail Safety and Standard Board, UK, "Safety Management Information System User Manual", 2006.
18) ISO/IEC Guide 51, "Safety Aspect-Guidelines for their inclusion in standards", 1991.
19) Rail Safety and Standard Board, "Engineering Safety Management(The Yellow Book)" Volume 2 Guidance Issue 4, 2007.
20) European Commission, "Safety Management in Railway, WP.2.3/D2.3.1/V4: Framework for identifying sources, stockholders and the nature of risks", 2004.
21) 박찬우, 왕종배, 박주남, 곽상록, "철도 사상사고 위험도 평가를 위한 정량화 분석 기초모델 개발", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2007.
22) 한국철도기술연구원, "고속철도 성능시험 및 안전기준 체계 기술개발", 2006.
23) 곽상록, 홍선호, 왕종배, 조연옥, "확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성", 한국철도학회논문집, 제7권, 제4호, pp. 302~306, 2004.
24) 고종현, 정원대, 김재환, "철도사고 및 장애의 인전오류 유형분석", 한국안전학회지, 제22권, 제4호, pp. 66~71, 2007.
25) 김재환, 정원대, 장승철, 왕종배, 철도 인간신뢰도 분석 방법 선정을 위한 사례분석, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp. 532~538, 2006.
26) 박찬우, 왕종배, 곽상록, 박주남, 장승철, "철도 위험도평가 SW 및 사고분석 프로그램 개발에 관한 연구", 한국안전학회 추계학술대회, pp. 148~153, 2006.
27) C.A. Ericson, "Hazard Analysis Techniques for System Safety", pp.183~234, Wiley Interscience, 2005.