

철도 사상사고 위험도 평가 모델 개발에 관한 연구

Development of Risk Assessment Models for Railway Casualty Accidents

박찬우[†] · 왕종배* · 김민수** · 최돈범* · 곽상록*

Chan-Woo Park · Jong-Bae Wang · Min-Su Kim · Don-Bum Choi · Sang-Log Kwak

Abstract This study shows the developing process of the risk assessment models for railway casualty accidents. To evaluate the risks of these accidents, the hazardous events and the hazardous factors were identified by the review of the accident history and engineering interpretation of the accident behavior. The frequency of each hazardous event was evaluated from the historical accident data and structured expert judgments by using the Fault Tree Analysis (FTA) technique. In addition, to assess the severity of each hazardous event, the ETA (Event Tree Analysis) technique and other safety techniques were applied. The risk assessment models developed can be effectively utilized in defining the risk reduction measures in connection with the option analysis.

Keywords : Railway casualty accident, Accident Scenario, Risk Assessment

요 지 본 연구에서는 승객, 공중 및 직원의 철도 사상사고를 대상으로 위험도 평가모델을 개발하였다. 이를 위해 철도 사상사고의 위험요인을 분석하여 관련 위험사건을 정의하였고, 위험사건의 발생을 초래하는 위험요인들의 논리적 연계성을 사건발생 시나리오로 구성하여 사건발생빈도 평가모델을 고장수목(Fault Tree)을 이용하여 개발하였다. 또한 사건수목(Event Tree)을 이용하여 인명피해를 초래하는 영향인자를 사건진전 시나리오로 구성하고, 위험사건별 사고 심각도를 등가사망지수로 환산하여 계산하는 위험도 평가모델을 개발하였다. 본 연구의 결과는 비용효과 분석, 안전대책의 민감도 분석 등에 다양하게 활용될 수 있다.

주 요 어 : 철도 사상사고, 사고 시나리오, 위험도평가

1. 서 론

2004년에 제정된 「철도안전법」에서는 철도운영자 및 철도시설관리자가 철도운영, 철도시설의 건설 또는 관리와 관련된 위험도 분석 및 안정성 평가에 관한 사항을 포함한 안전관리규정을 작성하여 정부의 승인을 얻도록 규정하고 있어[1], 최근 국내 철도 산업계에서는 위험 분석 및 위험도 평가 기술에 관한 관심이 높아지고 있다. 이와 같은 법적 요건 외에도 사고를 유발할 수 있는 취약요인과 안전 위험요소를 사전에 파악하고, 능동적으로 대처하기 위하여 위험분석 및 위험도 평가기술을 기반으로 하는 시스템 안

전관리 체계구축에 관한 요구가 국가 공공 교통수단으로서 철도에 확대되고 있다[2,3]. 특히, 전체 철도사고를 적정수준으로 제어하기 위하여 철도사고의 상당한 비중을 차지하고 있는 철도 사상사고의 위험관리에 대한 중요성이 국내 뿐 아니라 국제적으로 부각되고 있다[4-8].

유럽연합은 2004년도부터 SAMRAIL(Safety Management in Railway) 프로젝트를 진행하여 승객, 작업자 및 하청직원, 건설목 이용자 및 선로 불법침입자 등에 대한 철도 안전목표(CST, Common Safety Target)를 개발하였고, 철도 안전목표를 설정하기 위한 공통적인 위험도 관리 접근법(CSM, Common Safety Method)을 개발하였다[4-6].

영국은 열차사고(충돌/탈선/화재/건설목 사고)를 포함하여 이동사고(열차운행과 관련한 사상사고)와 비이동사고(열차운행과 관련 없는 사상사고)를 2006년도 기준으로 총 125건의 위험사건(hazardous event)으로 구분하고 연간 등가사상자(FWI, Fatalities and Weighted Injuries) 기준으로

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도종합안전기술개발사업단
E-mail : cwpark@krti.re.kr

TEL : (031)460-5545 FAX : (031)460-5540

* 한국철도기술연구원, 철도종합안전기술개발사업단

** 과학기술연합대학원대학교 석사과정

위험사건들의 위험도를 정량적으로 평가하고 있다[7,8]. 그러나 국내 철도에서는 다른 사고와 비교하여 사상사고의 원인과 대책마련을 위한 위험분석 및 위험도 평가를 관한 연구가 미진한 상태이다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 국내 철도 사상사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하여 관련 위험사건과 위험요인을 정의하였고, 각 위험사건에서 위험요인의 논리적 연계성을 사건 발생 및 진전 시나리오로 구성하였다. 또한 위험사건별 발생빈도를 산정하기 위하여 고장수목분석(FTA, Fault Tree Analysis) 기법을 적용하여 사건발생 시나리오를 기반으로 발생빈도 평가모델을 개발하였고, 사건진전 시나리오를 기반으로 사건수목분석(ETA, Event Tree Analysis) 기법을 적용하여 위험사건별 등가사망지수로 환산된 정량적인 위험도 평가모델을 제시하였으며, 세부내용을 본문에 수록하였다.

2. 철도 사상사고 위험도 평가 기초 분석 모델 개발

2.1 철도 사상사고 현황

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[9,10]. Table 1은 「철도사고등의 보고에 관한 지침」에서 정의하고 있는 철도사고 및 운행장애의 분류를 요약해서 나타낸 것이다.

Table 1. Railway accident classification

철도 사고	철도 교통사고	열차 사고	열차 충돌/탈선/화재 사고
		건설목 사고	
철도 안전사고	철도 안전사고	철도교통 사상사고	여객/공중/직원
		철도 화재사고	
		철도안전 사상사고	여객/공중/직원
		철도시설파손사고	
		기타철도안전사고	
운행장애			
철도재난			

철도사고 및 운행장애 분류는 철도사고, 운행장애, 철도재난으로 구성되며, 철도사고는 다시 철도 교통사고, 철도 안전사고로 구분된다. 철도 교통사고는 열차충돌, 열차탈선, 열차화재 등의 열차사고, 건설목사고 및 철도교통 사상사고를 포함한다. 여기에서, 철도교통 사상사고란 열차사고와 건설목 사고를 동반하지 않고 열차 또는 철도차량의 운행으로

여객, 공중, 직원이 사망하거나 부상을 당한 사고를 의미한다. 단, 건설목에서 철도차량과 도로차량간의 충돌 및 접촉 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 발생한 사고로서 철도화재사고, 철도안전 사상사고, 철도시설파손사고 등을 포함한다. 여기에서, 철도안전 사상사고란 열차 또는 차량의 운전과 관계없이 철도시설에서 추락, 감전, 충격 등으로 여객, 공중, 직원의 사상이 발생한 사고를 의미한다. 본 논문에서의 철도 사상사고는 철도 교통 사상사고와 철도안전 사상사고를 의미한다.

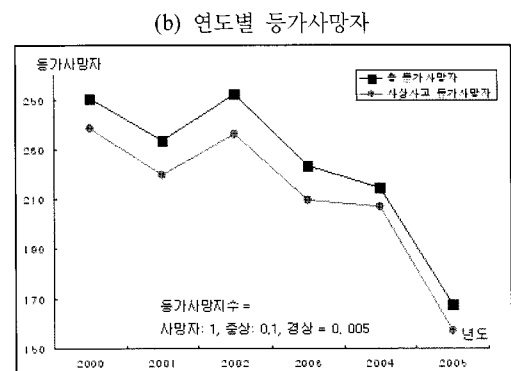
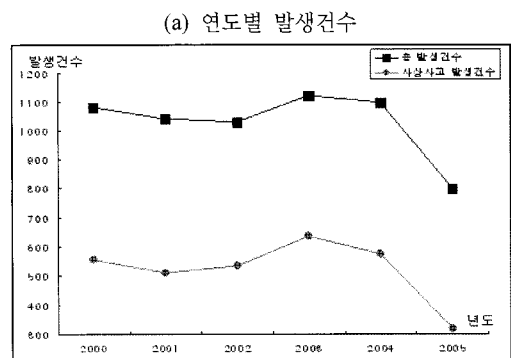


Fig. 1. The status of railway casualty accidents and overall railway accidents*.

*quoting from Korean Railroad Operating Information System of Korea Railroad Co.

Fig. 1은 철도 사상사고의 연도별 사상사고 현황을 나타낸다. 사상사고의 발생건수는 전체 발생건수의 51%, 등가사망지수 (사망 1명 = 중상자 10명 = 경상자 200명)[7]로 환산한 사상자 수에서는 전체 사상자의 94%를 차지한다. 이와 같이 사상사고는 철도사고에서 많은 비중을 차지하고 있어, 철도관계자들은 철도 사상사고의 위험관리를 위한 다양한 대책을 마련하고 있다[3]. 그러나 이들 대책의 효과에 대한 정량적인 평가와 다양한 대책이 동시에 사용될 경우의 효과에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

2.2 철도 사상사고 위험도 평가절차

대상에 따라 다양한 위험도 평가 기법의 적용이 가능하며, 시스템 차원의 위험도 평가절차는 ISO/IEC Guide 51[11]에 기술되어 있으며, 통상 위험도 평가는 위험원 판별(hazard identification), 위험도 산출(risk estimation) 및 위험도 경감(risk reduction)을 골격으로 하는 단계적인 절차를 따르지만, 사용 목적상 위험도 평가 단계를 구분하는 관점이 다르다. 예를 들어 영국철도의 “Engineering Safety Management[12]”에서는 7단계의 위험도 평가절차를 따르지만, 영국의 “Railway Group Guidance Note GE/GN8561 [13]”에서는 이를 세분화 하여 13단계의 위험도 평가절차를 따른다.

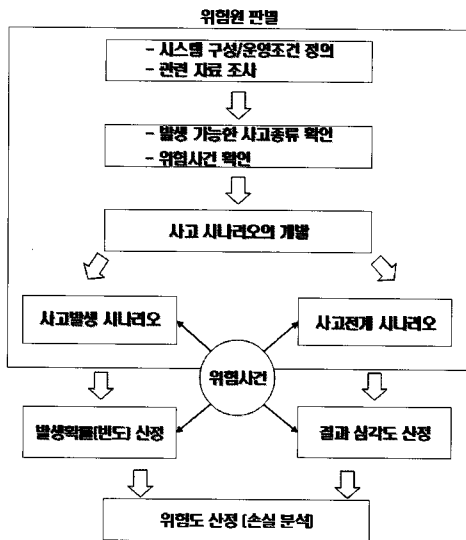


Fig. 2. Risk assessment procedure for railway casualty accidents

Fig. 2는 본 연구의 철도사고 위험분석 및 위험도 평가 절차를 나타낸 것으로서, 유럽철도안전지침[4,5]과 ISO/IEC Guide 51 등의 국제지침에서 제시된 위험원 판별, 위험도 산출, 위험도 경감으로 이어지는 국제적인 공통 절차를 따르고 있다. 우선, 위험분석 과정에서 위험사건을 정의하고, 위험사건의 발생원인과 최종적인 결과피해에 이르는 사건진전 과정을 논리적으로 연결한 사고 시나리오를 구성한다. 여기에서 위험사건은 사고로 발전될 잠재적 가능성이 높은 상황을 말한다. 그리고 위험도 평가 단계에서는 이들 시나리오를 기반으로 위험사건의 발생확률(빈도)과 사건진전 과정의 인명피해에 대한 결과심각도를 산정하여, 최종적으로 발생확률과 인명피해의 곱으로 표현되는 위험도를 정량적으로 평가하는 것으로 하였다.

위험도 경감 및 대책 분석은 철도운영환경에 따라 상이하여 철도운영기관별 특성을 반영하여야 하기 때문에 본 연구에서는 생략되었다.

2.3 철도 사상사고 시나리오 개발

철도 사상사고 위험도 평가를 위한 기초 분석 모델인 철도 사상사고의 시나리오 개발을 위해, 현존하는 사고자료와 다양한 사고목록을 참고하여[15-19], 인명피해를 초래할 수 있는 위험사건을 Table 1에 분류에 따라 철도교통 사상사고와 철도안전 사상사고를 구분하여 Table 2와 같이 정의하였고, 각각의 위험사건을 다시 통계분석 상의 목적으로 여객/공중/직원 별로 구분하였다.

Table 2. Hazardous events of railway casualty accidents

구분	위험사건		
철도 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/펼림	-열차 출입문 끼임 -승강장-열차사이 끼임	
-여객 -공중 -직원	철도 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/펼림	-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	

참고로, Table 2에서 몇 개의 동일한(또는 비슷한) 종류의 위험사건이 2.1절에서 언급된 철도교통 사상사고와 철도안전 사상사고의 정의에 따라 두 종류의 사고에서 발생함을 알 수 있다. Table 2의 “물체충격” 위험사건을 예를 들면, 열차운행 시 자갈이 비산하여 선로인접 지역에 거주하는 공중의 사상사고가 발생하는 경우는 철도교통 사상사고의 “물체충격” 위험사건에 해당하고, 열차운행과 관계없

이 선로 작업 중 오류로 자갈이 비산하여 직원의 사상이 발생하는 경우는 철도안전 사상사고의 “물체충격” 위험사건에 해당된다. 이와 같이 철도교통 사상사고와 철도안전 사상사고를 분류하는 것은 1장에서 언급한 영국철도에서 사상사고를 이동사고와 비이동사고 분류하고, 각각의 분류에서 위험상황에 따라 동일한 종류의 위험사건을 적용하는 방식과 같다. 이는 위험상황에 따라 빈도, 심각도, 위험도가 다를 수 있기 때문에 안전대책 및 안전요건의 수립 시 이를 반영하여야 하기 때문이다.

철도 사상사고 시나리오는 위험사건을 중심으로 위험사

건이 발생하기 전까지 과정을 나타낸 사건발생 시나리오와 위험사건이 발생 후 사고가 확대되는 과정을 나타내는 사건진전 시나리오로 구성된다. 본 논문에서는 지면 관계상 전체 위험사건의 시나리오는 생략하고, 열차충격 위험사건을 대상으로 개발된 시나리오의 구성을 소개한다. 철도 사상사고 시나리오에 대한 세부 내용은 참고문헌[20]을 참고하기 바란다.

사건발생 시나리오는 위험사건의 발생을 초래할 수 있는 위험상황과 이와 같은 위험상황의 배경원인(underlying cause)을 나타내는 위험요인으로 구성되며, 위험요인은 다

Table 3. Example of hazardous event appearance scenarios (in case of train striking event)

사건	위험상황				위험요인					
(여객/공중/직원) 열차충격	역사 내부	무단 침입	승강장에서 열차통과 직전 선로침입	←	인적 관리 요인	정보인식 오류	←	음주·질병·장애·기타		
			승강장 안전지역 이탈						승강장 추락	바닥/미끄러움(결빙/기름)
			역사 내부 선로통행							안전설비(손잡이/발판) 고장
										바닥 장애물 지장
		부주의								
	역사 내부	추락	출입문 무단취급	←	기술적 요인	선로/구조물 결함	←	신호제어설비 결함		
			출입문 취급오류/오동작						정보통신설비 결함	
			출입문 잠금장치 고장						전철전력설비 결함	
			출입문 개방상태 운행						열차/차량설비 결함	
	역사 내부	시설물 추락	매달림/뛰어탐	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함		
			외부 지역(육교/고가교)에서 공중의 선로로 추락						불법 행위	불법 침입/행동
			역사 내부 시설물에서 추락							
			무단공사/임의작업							
역사 내부	선로 근접 작업	열차 감시/경보 결함	←	기술적 요인	선로/구조물 결함	←	신호제어설비 결함			
		무단공사/임의작업 시행						정보통신설비 결함		
		대피실패						전철전력설비 결함		
								열차/차량설비 결함		
역사 내부	무단 침입	구내 건물목/3중 건물목 무단횡단	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
		건널목 차단기 우회						불법 행위	불법 침입/행동	
		건널목 경보 중 진입								자살추정
										무단공사/임의작업
역사 내부	선로 근접 작업	열차 감시/경보 결함	←	기술적 요인	선로/구조물 결함	←	신호제어설비 결함			
		무단공사/임의작업 시행						정보통신설비 결함		
		대피실패						전철전력설비 결함		
								열차/차량설비 결함		
역사 내부	운행 열차 추락	출입문 무단취급	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
		출입문 취급오류/오동작						불법 행위	불법 침입/행동	
		출입문 잠금장치 고장								자살추정
		출입문 개방상태 운행								무단공사/임의작업
역사 내부	매달림/뛰어탐	매달림/뛰어탐	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
								불법 행위	불법 침입/행동	
										자살추정
										무단공사/임의작업
역사 내부	개방 구간	선로 무단침입	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
								불법 행위	불법 침입/행동	
										자살추정
										무단공사/임의작업
역사 내부	터널 구간	열차 감시/경보 결함	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
		무단공사/임의작업 시행						불법 행위	불법 침입/행동	
		대피실패								자살추정
										무단공사/임의작업
역사 내부	교량 구간	출입문 무단취급	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
		출입문 취급오류/오동작						불법 행위	불법 침입/행동	
		출입문 잠금장치 고장								자살추정
		출입문 개방상태 운행								무단공사/임의작업
역사 내부	매달림/뛰어탐	매달림/뛰어탐	←	기술적 요인	건설목설비 결함	←	작업 물체/장비 결함			
								불법 행위	불법 침입/행동	
										자살추정
										무단공사/임의작업

시 인적관리요인, 기술적 요인, 외부요인으로 구분된다. 위험상황은 위험사건의 특징을 반영하여 위험사건 별로 다르게 구성되었으며, 위험요인은 모든 위험상황에 공통적으로 적용되었다.

Table 3은 위험요인, 위험상황, 위험사건으로 구성된 열차충격 위험사건의 사건발생 시나리오의 예를 나타낸 것이다. Table 3에에서 유의할 점은 사건장소를 위험상황에서 구분하여 사건발생 시나리오를 세분화한 것이다. 이는 위험도 평가 후 위험도 경감대책 수립 시 장소별로 경감대책이 다를 수 있으므로 위험도 평가 시 장소별 위험도 값을 제시하기 위해서다. 예를 들어, 역사내부에서의 무단침입을 막는 방법(예를 들어 스크린도어 설치)과 건널목 또는 역간선로에서 무단침입을 막는 방법은 상이 할 수 있다. 따라서 위험사건, 위험상황, 위험요인의 3단계 중 어느 부분에서는 장소의 구분을 반드시 해야 하는데, 본 연구에서는 위험상황에서 장소의 구분을 하였다. 이와 같은 이유로 장소를 구분하고 운행열차추락, 선로근접작업, 무단침입 등의 위험상황을 장소 별로 공통적으로 적용하여 표시하였다.

본 연구의 범위는 철도시스템 차원에서 위험도 평가 모델을 개발하는 것이다. 따라서 사고 시나리오의 복잡성을 줄이기 위하여 사건 별 특이한 위험요인을 위험상황으로 나타내고, 위험상황별 근본원인은 미국, 영국 등의 철도에서 공통적으로 사용되는 위험요인으로 표현하였다[7,25]. 즉, 영국과 미국의 철도사고 보고시스템에서 사고종류별 위험사건을 구분하고 위험사건별 직접원인(immediate cause)을 분류하며, 직접원인의 배경원인을 공통적인 위험요인으로 사용하는 방식과 유사하다[16,20]. 비록 본 연구의 범위 상 위험요인을 모든 위험상황에 동일하게 적용하였더라도, 향후 철도운영자 및 철도시설관리자가 실행할 수 있는 세부적인 안전대책을 수립하기 위해 위험요인을 세분하여 위험상황과 위험요인을 연결할 수 있는 추가 고려가 필요할 것으로 판단된다.

Table 4. Example of hazardous event progress scenarios (in case of train striking events)

위험사건	발견거리	운행속도	인명 피해
(여객/공중/직원) 열차충격	150m 미만	90km/h이상	사망
		90km/h미만~40km/h이상	중상
	150m 이상	40km/h이상	중상
		40km/h미만	경상

위험사건의 발생 후 확대되는 과정을 나타내는 사건진전 시나리오는 인명피해를 초래하는 핵심 영향인자를 선별하고 영향인자별 인명피해에 영향을 줄 수 있는 피해기준을

검토하여 작성되었다. Table 4와 같이 열차충격 위험사건이 발생했을 때 인명피해에 영향을 줄 수 있는 핵심인자로 열차 기관사의 사고 대상자 발견거리, 발견 시 열차 운행속도(=제동초속도), 사고 대상자 충격량(피해도)을 선별하였다.

본 연구에서는 열차속도와 발견거리가 인명피해에 미치는 영향을 검토하기 위해 공개된 많은 문헌을 조사하였으나 현재까지 관련된 문헌을 찾기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 Table 4에서 열차속도와 발견거리가 인명피해에 미치는 영향을 검토할 수 있는 사고자료로 지난 2년간('04-'05) 한국철도공사에서 KROIS(Korean Railroad Operating Information System)[21]에 등록된 전체 사고 중 열차속도와 발견거리의 정보가 존재하는 열차충격 위험사건에 대하여 열차속도와 발견거리가 인명피해에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 3은 그 결과를 요약하여 나타낸 것이다.

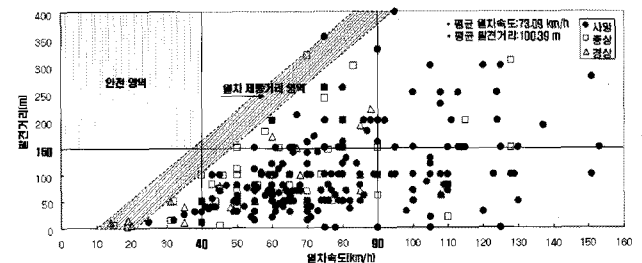


Fig. 3. The relationship between the recognition distance and the train velocity

열차 제동거리는 기관사가 전방의 이상을 감지하고 제동장치를 작동할 때까지 열차의 주행거리, 제동장치의 작동까지 열차의 주행거리를 나타내는 공주거리와 제동장치 작동 후 열차의 주행거리를 나타내는 실제제동거리로 구성된다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다[22].

$$\text{열차 제동거리(m)} = \text{제동초속도(km/h)} \times \{(\text{기관사의 반응시간(s)} + \text{공주시간(s)})/3.6 + \text{제동초속도(km/h)}^2 / \{7.2 \times \text{감속도(km/h/s)}\}\} \quad (1)$$

식 (1)은 제동초속도, 반응시간, 공주시간, 감속도 등의 변수로 구성되지만, 열차무게, 기후조건, 선로조건, 기관사의 대응능력 등 다양한 요소가 식 (1)의 변수에 영향을 미친다. 본 연구에서는 식 (1)의 다양한 영향인자를 고려하여 Fig. 3에서와 같이 열차 제동거리 영역을 정의하였다. Fig. 3에서 나타난 ●, □, △ 기호는 주어진 열차속도와 발견거리에서 열차충격 사건 후 발생한 사망자, 중상자, 경상자를 각각 표시한 것이다. Fig. 3에서와 같이 사고발생 시 기관

사의 사고대상자의 별견거리는 주어진 열차속도에서 열차 제동거리보다 작다. 비록, 분석된 모든 자료의 열차속도와 발견거리가 열차속도기록장치의 판독 결과가 아닌 사고 후 면담 등의 방법으로 조사되어 기록된 결과일지라도 Fig. 3의 결과와 같이 신뢰성 있는 결과를 나타낸다. Fig. 3의 결과에 대한 다양한 해석이 존재할 수 있지만 본 연구에서는 열차 제동거리 영역과 인명피해의 관계에서 열차 제동거리 영역의 최악의 상황(worst case)을 가정하여 열차충격 위험 사건이 발생하지 않는 안전영역을 「열차속도 40km/h 이하와 발견거리 150m 이상」으로 정의하였다. 3장에서 설명될 위험도의 세부적인 평가를 위하여 안전영역 정의방법과 같은 방법으로 경상자의 발생확률이 낮고 중상 이상의 심각도를 가진 구간을 「열차속도 90km/h 이상과 발견거리 150m 이하」로 정의하였다.

3. 철도 사상사고 위험도평가 모델 개발 및 타당성 검토

위험도를 평가하기 위해서는 사고 시나리오의 분기별 발생빈도(또는 확률) 및 인명피해에 대한 평가가 이루어져야 한다. 본 절에서는 철도 사상사고 위험도 평가 모델을 소개하고, 개발된 모델의 타당성을 검토하기 위해 한국철도공사 관할의 철도시스템을 대상으로 지난 2년간('04-'05년)의 연간 위험도를 평가한다.

발생빈도 평가는 위험사건 형식별로 위험상황과 위험요인을 개발된 사건발생 시나리오를 기반으로 FTA 기법을 적용하여 관계논리를 모델링 하였다. Fig. 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. 따라서 상위 Event의 발생확률은 하위 Event의 발생확률의 합과 같다.

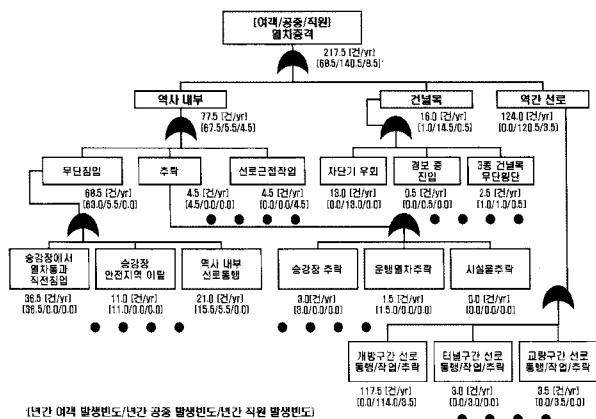


Fig. 4. Fault tree Example for train striking event

본 연구에서는 인명피해(사망/중상/경상)를 산정할 수 있는 결과심각도 평가모델을 ETA 기법을 적용하여 개발하였으며, 개발 모델은 위험사건의 발생에 따른 사고피해의 확대과정을 논리적으로 전개한 사건진전 시나리오를 바탕으로 한다. 철도 사상사고의 경우 철도사고의 다른 종류와 비교하여 사고자료가 충분하여 대부분의 ET(Event Tree)의 분기확률을 사고자료를 기반으로 객관적 관점에서 계산할 수 있었다. 자료가 충분하지 못하는 경우 인적신뢰도 분석 분야에 HEART(Human Error Assessment and Reduction Technique)[23,24]와 전문가의 의견 및 공학적 판단을 병행 고려하여 적용하였으며, 향후 추가적인 연구를 통해 보완이 필요한 분야이다.

위험사건	발견거리	운행속도	사상자수/건	심각도 확률	위험도 확률	심각도(명)	위험도
여객의 열차충격 (88.5건/년)	150M 미만 (92.99%)	90km/h이상 (17.80%)	1명 (사망) (88.14%)	0.132	1.000	4.132	4.132
			중상상 (88.0%)	0.408	0.100	0.340	0.340
		2명 (사망) (17.80%)	0.132	0.035	0.047	0.047	
		중상상 (17.80%)	0.132	0.200	0.268	0.268	
		경상상 (17.80%)	0.132	0.200	0.268	0.268	
		사망상 (17.80%)	0.132	0.200	0.268	0.268	
	90km/h미만 -40km/h이상 (50.49%)	1명 (사망) (77.31%)	24.588	1.000	24.588	24.588	
		중상상 (17.82%)	5.652	0.100	0.565	0.565	
		2명 (사망) (17.81%)	13.776	0.035	0.481	0.481	
		중상상 (17.82%)	13.776	0.200	1.158	1.158	
		경상상 (17.82%)	13.776	0.200	1.158	1.158	
		사망상 (17.82%)	13.776	0.200	1.158	1.158	
40km/h미만 (41.71%)	1명 (사망) (14.77%)	4.926	0.100	0.493	0.493		
	중상상 (14.77%)	4.926	0.100	0.493	0.493		
	2명 (사망) (48.04%)	12.738	0.035	0.448	0.448		
	중상상 (18.09%)	5.919	0.100	0.592	0.592		
	경상상 (18.09%)	5.919	0.200	1.184	1.184		
	사망상 (18.09%)	5.919	0.200	1.184	1.184		
150M 이상 (7.01%)	90km/h이상 (85.80%)	1명 (사망) (82.75%)	2.365	1.000	2.365	2.365	
		중상상 (11.23%)	0.365	0.100	0.365	0.365	
	2명 (사망) (82.75%)	0.730	0.035	0.257	0.257		
	중상상 (11.23%)	0.365	0.100	0.365	0.365		
	경상상 (11.23%)	0.365	0.200	0.730	0.730		
	사망상 (11.23%)	0.365	0.200	0.730	0.730		
60km/h미만 -40km/h이상 (34.40%)	1명 (사망) (86.64%)	1.902	1.000	1.902	1.902		
	중상상 (28.0%)	0.450	0.100	0.450	0.450		
2명 (사망) (86.64%)	0.900	0.035	0.315	0.315			
중상상 (28.0%)	0.450	0.100	0.450	0.450			
경상상 (28.0%)	0.450	0.200	0.900	0.900			
사망상 (28.0%)	0.450	0.200	0.900	0.900			
계			68.500	0.588	40.289		

Fig. 5. Train striking event tree with branch probabilities

Fig. 5는 열차충격 위험사건의 발생에 대한 ETA 모델링 사례를 제시한 것이다. Fig. 5의 각 분기 확률은 한국철도공사에서 KROIS에 등록된 446건의 사고 정보(2004-2005년)를 바탕으로 “발견거리”와 “열차속도”를 기준으로 Table 5의 예와 같이 계산하였다. 또한 각 분기 확률 별 인명피해를 나타내는 심각도는 등가사망자로 환산(사망 1명 = 중상자 10명 = 경상자 200명)[7]하여 표현되었다. 그러나 향후 추가적인 연구에서 충분한 자료가 확보되면 제시된 ET를 보완하여 보다 신뢰성 있는 수치의 산출이 가능할 것으로 판단된다.

Table 6은 위험사건별로 개발모델이 산정한 연간 인명피해와 실제 발생한 연간 인명피해를 등가사망지수로 환산한 위험도를 나타낸다. 위험사건을 종합한 등가사망 위험도는 개발모델에서 181.88명으로 산정되었고 실제 발생한 위험도는 182.93명으로서 1.05명의 차이(0.57%)만이 발생하여 개발모델이 타당한 것임을 입증한다.

Table 7은 Table 6에서 나타난 열차충격 위험사건의 위험도(157.7명)에 대해 위험상황 별로 세부적인 위험도 평가를 한 결과를 나타낸다. 이와 같은 위험 상황별 위험도 평가결과는 향후 위험도 경감대책 수립 및 평가에서 경감대

책의 비용효과분석 시 유용하게 사용될 수 있다. 예를 들어, 모든 역사 내 스크린도어 설치 시 “승강장에서 열차통과 직전침입”, “승강장 안전지역 이탈”, “역사 내 선로통행”, “승강장 추락” 등의 위험상황에 의한 열차충격 위험사건을 예방할 수 있으므로, Table 7에서 같이 열차충격 위험

사건에 대하여 42.9(=25.3+2.4+14.5+0.7)명의 위험도의 감각이 가능하다. 따라서 위험도 값과 생명예방가치(VPF, Value of Preventing a Fatality)[7]을 활용한 비용효과분석 등의 방법을 이용하여 대상 위험도 경감대책에 대한 의사결정이 가능하다.

Table 5. Example of branch probability calculation in the train striking event tree (in case of severity probability of Fig. 5)

발견거리	열차속도	평균 사망자 수/년(a) [사망확률]*	평균 중상자 수/년(b) [중상확률]**	평균 경상자 수/년(c) [경상확률]***	사상자 수(d)
150m 미만	90km/h 이상	47.23 [89.14%]	4.56 [8.60%]	1.20 [2.26%]	52.99
	40km/h 이상 90km/h 미만	188.83 [77.31%]	43.78 [17.92%]	11.65 [4.77%]	244.26
	40km/h 미만	11.43 [18.09%]	21.40 [33.87%]	30.35 [48.04%]	63.18
150m 이상	90km/h 이상	32.23 [82.75%]	6.72 [17.25%]	0.00 [0.00%]	38.95
	40km/h 이상 90km/h 미만	28.27 [60.64%]	13.55 [29.06%]	4.80 [10.30%]	46.92
	40km/h 미만	0.00 [0.00%]	0.00 [0.00%]	0.00 [0.00%]	0.00

(*사망확률=a/d, **중상확률=b/d, ***경상확률=c/d)

Table 6. Comparison of estimated risk with actual equivalent fatality

구분	위험사건	개발모델 빈도	개발모델 심각도	개발모델 위험도	실제발생 인명피해	
교통사상사고	충격	열차충격	217.5	0.725	157.732	158.571
		물체충격	1.5	0.007	0.011	0.011
	전도/실족	열차 승/하차 중 전도/실족	6.0	0.021	0.125	0.125
		전도/실족-급제동/급출발	0.5	0.006	0.003	0.003
	추락	열차 추락/낙하	20.5	0.132	2.712	2.713
		승강장 추락 (승/하차 중)	2.0	0.029	0.058	0.058
끼임/끌림	열차 출입문 끼임	17.0	0.021	0.362	0.373	
	승강장-열차사이 끼임	8.0	0.017	0.135	0.135	
안전사상사고	충격	차량충격	6.0	0.160	0.957	0.958
		물체충격	23.5	0.035	0.830	0.831
	전도/실족	역사 내부 전도/실족	44.5	0.068	3.045	3.148
		선로/건널목 전도/실족	4.5	0.189	0.852	0.853
		차량 내부 전도/실족	8.0	0.035	0.278	0.278
		작업장 전도/실족	1.0	0.100	0.100	0.100
	추락	차량 추락/낙하	5.0	0.062	0.310	0.311
		고소 작업 중 추락	6.5	0.224	1.458	1.458
		시설물 추락	1.5	0.467	0.700	0.700
		승강장 추락	4.0	0.153	0.613	0.613
	끼임/끌림	차량 설비 끼임	28.0	0.020	0.568	0.568
		역사 내부 시설물 끼임	2.0	0.053	0.105	0.105
		작업 장비/물체 끼임	6.0	0.092	0.553	0.553
	감전	차량 및 시설물 감전	11.5	0.276	3.174	3.270
	화상	차량 및 시설물 화상	8.0	0.017	0.135	0.135
	질식	차량 및 시설물 질식	0.5	0.006	0.003	0.003
	기타	환자발생	11.5	0.475	5.461	5.461
폭행/협박		1.5	0.400	0.600	0.600	
사상자 발견		1.0	1.000	1.000	1.000	
합 계		447.5	0.406	181.880	182.934	

Table 7. Risk for Train Striking Event

위험상황		여객		공중		직원		합계	
		빈도	위험도	빈도	위험도	빈도	위험도	빈도	위험도
역사내	승강장에서 열차통과 직전침입	36.5	25.3	-	-	-	-	36.5	25.3
	승강장 안전지역 이탈	11.0	2.4	-	-	-	-	11.0	2.4
	역사 내 선로통행	15.5	10.8	5.5	3.7	-	-	21.0	14.5
	승강장 추락	3.0	0.7	-	-	-	-	3.0	0.7
	운행열차 추락	1.5	0.3	-	-	-	-	1.5	0.3
	선로 근접작업	-	-	-	-	4.5	3.9	4.5	3.9
건널목	건널목 차단기 우회	-	-	13.0	10.4	-	-	13.0	10.4
	건널목 경보 중 진입	-	-	0.5	0.4	-	-	0.5	0.4
	3중 건널목 무단횡단	1.0	0.8	1.0	0.8	0.5	0.4	2.5	2.0
역간선로	개방구간 선로 통행/작업/추락	-	-	114.0	89.8	3.5	2.8	117.5	92.6
	터널구간 선로 통행/작업/추락	-	-	3.0	2.4	-	-	3.0	2.4
	교량구간 선로 통행/작업/추락	-	-	3.5	2.8	-	-	3.5	2.8
합계		68.5	40.3	140.5	110.3	8.5	7.1	217.5	157.7

4. 결론

본 연구에서는 철도사상사고의 위험도 평가를 위한 모델을 개발하기 위해 먼저 국내 철도 사상사고 사례를 체계적으로 분석하여 국내철도에 적합한 철도 사상사고의 위험사건과 위험요인을 정의하였고, 발생빈도를 결정하기 위한 사건발생 시나리오 모형과 피해 심각도를 산정하기 위한 사건진전 시나리오 모형을 개발하였다. 다음으로 본 연구에서는 위험사건별 발생빈도를 산정하기 위하여 고장수목 분석 기법을 적용하여 사건발생 시나리오를 기반으로 발생빈도 평가모형을 개발하였고, 사건진전 시나리오를 기반으로 사건수목분석 기법을 적용하여 위험사건별 등가사망지수로 환산된 정량적인 위험도 평가모형을 개발하였다. 마지막으로 본 연구에서는 철도사상 사고이력을 기반으로 개발된 모델의 적합성을 평가하였고, 평가결과에서 개발모델과 실제 사고이력이 근소한 차이(0.57%)만이 발생하여 개발모델이 적합함을 알 수 있었다.

향후 본 연구의 결과는 철도 시스템의 위험도 평가단계에서 체계적으로 국내 철도 사상사고의 직·간접 원인과 중요 기여요소를 분석하고, 국내 철도사상사고의 발생확률과 위험도를 정량적으로 평가하는데 활용될 수 있으며, 비용효과 분석, 안전대책의 민감도 분석 등에 다양하게 활용될 수 있다.

후기

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

참고문헌

1. 건설교통부(2004), “철도안전법”, 제7245호, 제 5조.
2. 왕종배, 박찬우(2006), “위험도 평가 기반의 철도시스템 안전관리”, 한국방재학회논문집, 제 3권, 제 3호, pp. 10-21.
3. 건설교통부(2006), “제1차 철도안전 종합계획”.
4. European Commission (2004), “Safety Management in Railway, D.2.3:Common Safety Methods”, pp. 19-26.
5. European Commission (2004), “Safety Management in Railway, WP.2.4: Acceptable Risk Level”, pp. 14-18.
6. Rail Safety and Standard Board (2005), “Investigation of common safety methods”, pp.35-46.
7. Rail Safety and Standard Board (2006), “Profile of Safety Risk on the UK Mainline Railway”, issue 5, pp. 1-9.
8. Rail Safety and Standard Board, (2004), “A statistical review of the RSSB Safety Risk Model (WP1)”.
9. 건설교통부(2006), “철도사고보고 및 조사에 관한 지침”, 제 2006-3호.
10. 건설교통부(2007), “철도사고등의 보고에 관한 지침”, 제 2007-512호.
11. ISO/IEC Guide 51 (1991), “Safety Aspect-Guidelines for their inclusion in standards”, pp. 3-4.
12. Rail Safety and Standard Board(2007), “Engineering Safety Management(The Yellow Book)”, Guidance Issue 4, pp. 151-194.

13. Rail Safety and Standard Board, Railway Group Guidance Note GE/GN8561 (2002), "Guidance on the Preparation of Risk Assessments within Railway Safety Cases", pp. 3-29.
 14. US DOD (1993), "Military Standard : System Safety Program Requirements", MIL-STD-882C.
 15. 박찬우, 왕중배, 박주남, 곽상록(2007), "철도 사상사고 위험도 평가를 위한 정량화 분석 기초모델 개발", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집.
 16. 박찬우, 왕중배, 곽상록, 박주남, 장승철(2006), "철도 위험도평가 SW 및 사고분석 프로그램 개발에 관한 연구", 한국안전학회 추계학술대회, pp. 148-153.
 17. 곽상록, 홍선호, 왕중배, 조연옥(2004), "확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성", 한국철도학회논문집 제7권 4호, pp. 302-306.
 18. 한국철도기술연구원(2003), "철도사고 위험요인 분석기술개발 : 별책 호주철도사고 위험요인 분석".
 19. 한국철도기술연구원(2006), "고속철도 성능시험 및 안전기준 체계 기술개발", pp. 71-116.
 20. 한국철도기술연구원(2007), "철도사고 위험도 분석 및 평가체계 구축", pp. 13-150.
 21. 한국철도공사(2006), "운전사고 및 운행장애 월보(2004년-2005년)".
 22. 한국철도기술연구원(1997), "열차 제동거리 기준치 설정에 관한 연구", pp. 116-127.
 23. Rail Safety and Standard Board, UK (2004), "Rail-specific HRA technique for driving tasks", Final report.
 24. 김재환, 정원대, 장승철, 왕중배 (2006), 철도 인간신뢰도분석 방법 선정을 위한 사례분석, 한국철도학회 논문집, 제9권, 제5호, pp. 532-538.
 25. U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration (2003), "FRA Guide for Preparing Accident/Incident Report".
- 접수일(2008년 8월 27일), 수정일(2008년 9월 23일),
게재확정일(2009년 4월 12일)