

철도화재사고 위험도평가를 위한 Event Tree 및 Fault Tree 구성

Construction of Event Tree & Fault Tree for Train Fire Risk Assessment

곽상록* · 왕종배* · 이봉섭† · 박찬우*

Sang-Log Kwak · Jong-Bae Wang · Bong-Seob Lee · Chan-woo Park

Abstract After train fire accident in Daegue, many research on train fire safety improvement have been carrying out. Since many alternative fire safety measures can be applied in our railway system, the effect of the each safety measure must be quantified prior to the safety investment. In order to estimate the effects of each safety measure quantitatively, fault trees and event trees are constructed in this study. Results can be applied for cost-benefit analysis or sensitivity analysis for safety measures in risk assessment process.

Keywords : Fault tree, Event tree, Train fire, risk assessment, Safety measure

요 지 대구지하철 화재사고 이후 많은 화재안전대책에 대한 연구가 수행중이나, 안전대책의 효과에 대한 정량적 분석이나 다양한 대책이 조합되어 사용될 경우의 효과에 대한 연구는 미흡한 실정으로 화재안전대책의 중복투자가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 화재안전대책의 연관성을 분석하고 안전대책이 위험도 경감에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 주요 영향인자와 대책을 고장수목과 사건수목으로 구성하였다. 본 연구 결과는 향후 위험도 평가과정에서 안전대책의 민감도 분석이나 비용효과 분석 등에 활용될 수 있다.

주요어 : 고장수목, 사건수목, 열차화재, 위험도평가, 안전대책

1. 서론

대구지하철 화재사고 이후 철도시스템의 화재안전성 향상을 위하여 차량 화재안전기준의 작성, 철도차량 내장재 교체, 지하역사 화재안전설비 확충, 대국민 홍보 활동 등 많은 대책을 추진하여 왔으며, 2006년부터는 제1차 철도안전종합계획에 따라 13개 화재분야 안전대책이 2006년부터 추진중이다[1]. 철도의 화재안전대책에 대한 다양한 국제기준이 존재하며, 국제철도연맹(UIC)의 철도터널에 대한 화재안전기준의 경우 시설·차량·운영의 3분야로 구분된 52개의 화재안전 대책을 기술하고 있다[2]. 그러나 각각의 안전대책이 위험의 제거나 위험도 경감에 미치는 효과에 대해서는 정성적으로 간략히 기술되어 있다[2-4]. 철도의 특성과 운영조건에 따라 다양한 화재안전대책을 선택할 수 있으며, 이를 위해 국내에서 많은 화재안전대책 연구가 수행되

고 있다[5-8]. 그러나 이들 화재안전 대책이 위험도에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가와 다양한 안전대책의 적용가능성을 판단하는 의사결정에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 철도화재사고 위험도 평가를 위한 사건수목(Event Tree)를 전개하고 안전방벽을 구성하는 주요 기여 인자들에 대한 고장수목(Fault Tree)를 구성하여 다양한 화재안전대책들 사이의 상호 연관성과 이들이 위험도에 미치는 영향을 정량화하여 분석하고자 한다. 사건수목과 고장수목의 구성은 선행연구[8,9]의 예비위험분석, 국내외 철도사고/장에 자료를 활용하였다. 본 연구 결과는 철도화재사고 위험도 경감을 위한 각종 안전대책의 민감도 분석이나 비용효과 분석 등에 활용하여 철도화재 안전대책 선정의 합리적인 의사결정을 지원할 수 있다.

2. 철도화재사고 위험도평가

현재 유럽연합국가, 호주, 캐나다 등에서는 위험도에 기반한 안전관리를 수행중에 있으며[10-12], 안전대책의 의사결정시 위험도 감소에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고

* 책임저자 : 정희원, 강원대학교 심적캠퍼스, 전기제어공학부, 교수
E-mail : mirine@kangwon.ac.kr
TEL : (033)570-6385 FAX : (033)570-6389

* 한국철도기술연구원

이러한 안전대책의 적용시 얻어지는 비용 효과를 평가하여 최적의 안전투자를 수행하기 위함이다. 국내 철도산업에서도 위험도기반의 선진 안전관리체계 구축과 합리적인 안전관리를 실행하기 위하여 2004년부터 철도사고 위험도평가 사례연구[13], 위험도평가 전산도구 개발[14], 사고시나리오 개발 등의 연구가 본격적으로 진행중이다.

2.1 위험도평가 방법 및 절차의 선정

평가대상과 수준에 따라 다양한 위험도평가 기법의 적용이 가능하다. ISO/IEC Guide 51[15]의 경우 시스템 차원의 위험도 평가절차를 기술하고 있으며, 적용 대상의 특징에 따라 조금씩 상이하다. 현재 국내에서 적용을 검토중인 위험도 평가법은 영국의 철도안전표준위원회(RSSB)에서 제시한 철도산업의 안전관리규정의 승인을 위해 요구되는 위험도평가 15단계로 구성된 절차[16]와 유사하다. 15단계의 절차는 다음과 같다. ① 위험도 평가법의 선정, ② 위험사건의 정의, ③ 위험도 평가법의 검토, ④ 위험사건, 형식의 검토, ⑤ 각 위험사건의 원인 선정, ⑥ 각 원인별 적용중인 안전대책의 분석, ⑦ 원인과 위험사건의 빈도 산정, ⑧ 위험원인 저감 대책에 대한 Brainstorming, ⑨ 집합적 위험도의 산출 및 평가, ⑩ 개인 위험도(여객, 일반공중, 직원) 산출 및 평가, ⑪ 개별 원인별 대책에 따른 Brainstorming, ⑫ 집합적 위험도 및 개인 위험도 평가, ⑬ 모델에 대한 검증 및 민감도 분석, ⑭ 산출된 위험도의 허용여부 결정, ⑮ 위험도가 허용되지 않는 범위인 경우 안전대책을 강화하여 위의 절차를 반복하여 수행

본 연구에서는 위에 기술된 15단계 중 ①~⑦단계까지의 절차만 적용하며, ⑧단계인 위험저감 대책 수립부터는 많은 대안이 가능하고 철도운영 환경과 철도운영기관별 특성을 반영하여야 하기 때문에 본 연구에서는 생략하였다.

2.2 철도 화재발생 관련 위험요인의 도출

철도 화재를 유발할 수 있는 위험요인은 국내외의 대형 철도화재사고자료 및 사고장애 자료와 기존에 수행된 화재 안전연구자료[10,16-18]를 활용하였다. 철도화재사고의 특징은 열차충돌·탈선과 같은 중대사고에 비하여 화재발생에 대한 위험요인은 간단하나 화재발생 이후 대응과 관련된 많은 위험요인이 존재한다. 국내에서 발생한 사고를 분석한 결과 일반선로에서 발생한 화재의 경우 인명피해가 없었으며 터널구간에서 발생한 화재의 경우 인명피해와 큰 물적 피해를 수반하였다. 이는 일반선로에서 화재가 발생한 경우 여객의 탈출이 용이하기 때문이며, 일반선로에는 화재안전설비의 설치가 고려중이지 않아 안전대책 차원에서 중요성이 낮다. 따라서 본 연구에서는 일반철도(고속철도 포함)와

도시철도로 구분된 시나리오를 구성하였으며, 위험도가 높은 터널구간에서의 화재사고에 대한 위험요인을 중점적으로 분석하였다. 주요 위험요인을 다음에 설명하였다.

1) 화재발생과 관련된 위험요인

- ① 차량내부의 화재 유발 원인: 객실영역(객실, 운전실, 화물칸, 식당칸 등)의 인화성 물질에서의 발화, 방화, 폭발, 전기 합선, 화물영역의 인화성 화물 및 화물의 발화
- ② 차량하부 영역의 화재 유발 원인: 고장난 차축(베어링 및 차축과열 방지장치고장 포함), 엔진, 고전압장치, 배터리 상자, 연료 누출, 변압기, 계동 불꽃, 저항기 뱅크, 제어장치, 견인전동기, 차륜공전에 의한 불꽃 및 기타 하부구조물
- ③ 역사, 선로변, 전차선, 인근 운행열차 등 외부 영역의 화재 유발 원인

2) 철도 화재피해 확산 관련 위험요인의 도출

- ① 화재감지 및 기관사의 대응과 관련된 요인
- ② 여객과 기관사의 차량 및 터널탈출과 관련된 요인
- ③ 비상대응을 통한 외부지원과 관련된 요인

Table 1은 국제철도연맹, NFPA 기준, 선행연구 등[2,3,9]을 통해 분석한 철도화재사고에서 피해확산과 관련된 위험요인을 정리한 것이다.

3. 사건수목 및 고장수목의 구성

3.1 화재사고 시나리오의 구성

열차화재 발생이후 승객과 기관사의 생존을 위해서는 화재의 감지, 기관사의 대응, 차량 및 터널의 탈출을 통한 안전한 영역으로의 대피과정이 필요하다. 각 과정에서의 위험요인은 Table 1에 기술되어 있으며, 현재 이들 인자의 정량적 효과에 대해서는 연구가 진행중이다. 철도의 종류에 따라 Table 1에 기술된 영향인자중 일부만이 고려될 수 있으며, 이들 인자들간의 관계는 사건수목과 고장수목을 통해서 연결할 수 있다. 본 연구에서는 철도의 종류와 발생 위치에 따라 도시철도에 대해 4개의 시나리오, 일반철도에 대해 4개의 시나리오를 구성하여, 이를 Table 2에 수록하였다.

3.2 화재사고 사건수목의 구성

열차화재 발생이후 화재의 감지, 진압, 기관사의 대응, 차량 및 터널 탈출의 과정을 사건수목으로 구성하여, Fig. 1에 나타내었다. 이는 Table 2의 S5 시나리오에 해당하는 사

Table 1. Hazard for mitigating the effect of train fire accident

구 분	단계별 위험요인		
화재감지	승객의 미통보	화재영역(화불포함) 승객없음	승객의 미대응
	기관사 판단 오류	화재신호 무시	신호 미확인
	화재감지기 없음/오류	화재감지기 미작동	열차기동불능
화재진압	가연성 물질	화재 확산	열차기동불능
	유독가스 발생	소화후 재발화	통보 지연
	소화설비 부족		
기관사대응	피난대피 절차 미통보	사령실 미통보	인접선로 운행열차
	출입문 미개방	비상대응 요청실패	개별적인 탈출
	기관사 질식		
	사령통신 장비 고장		
차량탈출	출입문 차단	수동 개방 실패	화염, 유독가스
	전원 차단	창문을 통한 탈출 실패	대중 혼잡
			시야 미확보
터널탈출	탈출 유도장비 부족	인접선로 열차운행	화염
	탈출 지원인력 부족	인접선로 차단 실패	유독가스
	탈출전 연기확산	제연설비 용량부족	시야 미확보
	탈출로 없음	제연설비 미작동	대중 혼잡
	제연설비 부족	제연설비 미설치	
역사탈출	탈출 유도장비 부족	승강기 미작동	화염
	탈출 지원인력 부족	대중 혼잡	유독가스
	탈출전 연기확산	제연설비 용량부족	시야 미확보
	탈출로 부족	제연설비 미작동	대중 혼잡
	제연설비 부족	제연설비 미설치	
	역사내 소화설비 부족		
선로탈출	인접선로 열차운행	비상탈출로 폐쇄	
	전차선/선로 감전	노약자 대비불능	
	탈출 지원인력 부족		
	탈출로 없음		
비상대응	사령실의 상황 미인지	비상대응기관의 정보부족	
	인근 역사의 상황 미인지	화재구간 열차운행 미통제	
	접근로 폐쇄	대응장비 부족	대피중 부상

Table 2. Scenario for Train fire accident

구 분	실 명
도시철도 (터널/지하구간)	S1 차량, 기기과열에 의한 차량내부 화재
	S2 불법행위에 의한 차량내부 화재
	S3 승강장 등의 역사화재가 차량으로 전파
	S4 변전소/전차선 등 설비화재가 전파
일반철도	S5 차량, 기기과열에 의한 차량내부 화재
	S6 불법행위에 의한 차량내부 화재
	S7 변전소/전차선 등 설비화재가 전파
	S8 선로변 화재가 차량으로 전파

건수목이다. 구성된 사건수목의 각각 분기는 성공과 실패로 구분하였으며, 각각의 분기에는 많은 영향인자가 있어 이를 고려하기 위해 고장수목과 연결하여 분기확률을 계산하였다. 사건수목의 중단에는 사고의 결과를 수록하였으며, 18개의 결과중 6개는 인명피해가 없는 사건으로, 4개는 대형철도사고로 연결되는 사건으로, 8개는 일부 피해가 발생하는 사건으로 연결된다. 분기점의 피해도 예측 역시 많은 영향인자를 고려해야 한다. 그러나 승객의 피해도 예측에 요구되는 자료의 불확실성이 커서 확률론적 평가에 근거한 연구가 수행중이다[5,8].

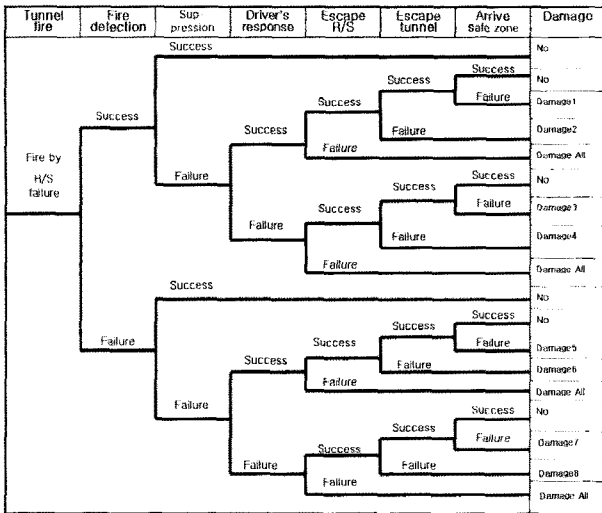


Fig. 1. Event tree for train fire caused by rolling stock problem

3.3 화재사고 고장수목의 구성

Fig. 1에 나타난 5개의 분기확률의 결정에는 많은 영향인자를 고려하여야 한다. 이를 효과적으로 고려하는 방법으로 고장수목이 사용될 수 있으며, 현재 자료의 확보가 가능하거나 사용중인 안전대책을 고려하여 고장수목을 구성하여 Fig. 2-6에 수록하였다. 향후 안전대책이 추가되거나 개선되는 경우 추가된 안전대책을 아래의 고장수목에 반영하면 안전대책의 효과를 정량적으로 산출할 수 있다. Fig. 2는 화재감지에 대한 고장수목으로 화재감지기, 경보시스템, 기관사의 경보에 대한 인식, 화재영역의 승객/직원의 배치 여부를 고려하여 구성하였다. Fig. 3은 화재발생후 기관사나 승객에 의한 화재진압 실패에 대한 고장수목으로 화재진압 당사자와 화재진압 후 화재가 재발화하는 상황을 고려하였다. 자동 소화시스템이 추가된 차량의 위험도 평가시에는 자동 소화시스템을 고장수목에 추가하면 된다. Fig. 4에는 화재발생 이후 기관사의 대응으로 기관사의 승객탈출 안내,

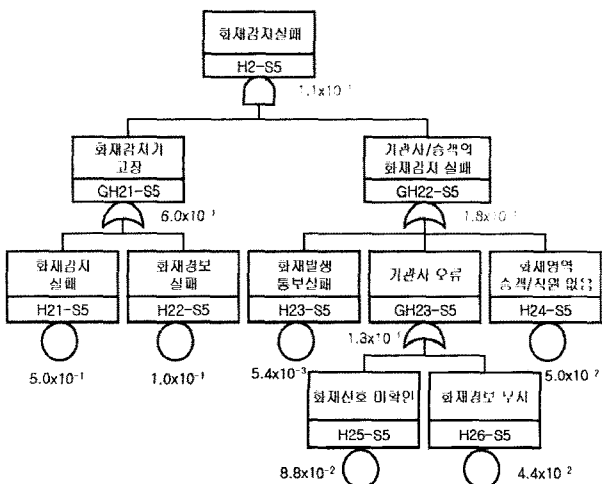


Fig. 2. Fault tree for fire detection

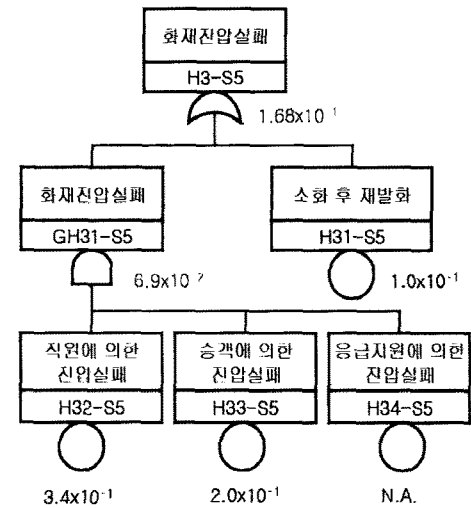


Fig. 3. Fault tree for fire suppression

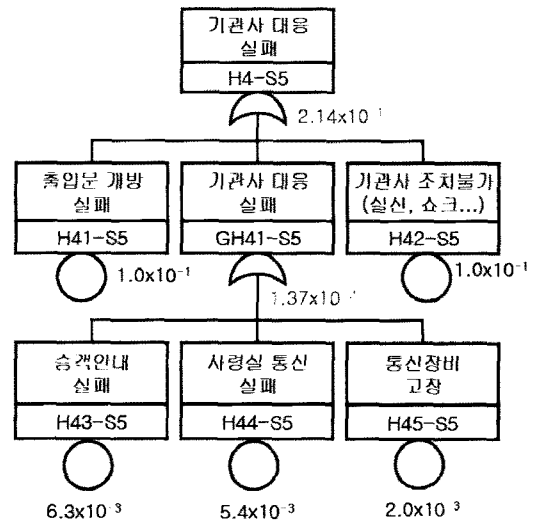


Fig. 4. Fault tree for driver response

사령실의 통신, 기관사의 출입문 개방 등이 영향인자로 포함되어 있다. Fig. 5에는 차량탈출로 출입문과 창문을 통한 승객탈출과 관련된 인자가 포함되어 있다. Fig. 6에는 터널탈출과 관련된 인자로 탈출로, 조명, 제연시스템, 탈출 안내표시, 응급지원 등의 인자가 고려되어 있다. Fig. 2-6에 수록된 인자중 일부는 상호 연관되어 있다. 예로서 기관사가 화재를 조기에 감지한 경우 출입문 개방, 승객탈출 안내, 외부 지원의 성공확률은 증가하며, 실패한 경우 감소하도록 설정된다. Fig. 2-6에는 고장 확률값이 계산되는 과정을 설명하기 위해 '영향인자는 서로 독립적으로 발생한다'고 가정하여 작성된 고장수목의 수치계산 과정을 함께 수록하였다.

3.4 고장수목과 사건수목의 연결

주요 영향인자의 실패확률을 계산하여 구성된 고장수목에

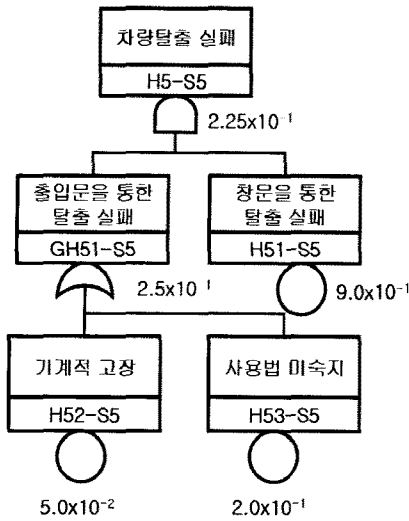


Fig. 5. Fault tree for driver rolling stock evacuation

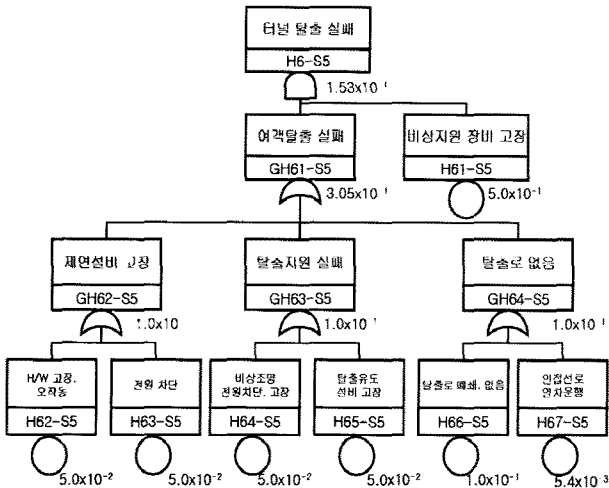


Fig. 6. Fault tree for tunnel evacuation

적용하면 Fig. 2~6에 표시된 바와 같이 ① 화재감지실패 확률, ② 화재진압실패 확률, ③ 기관사 대응 실패 확률, ④ 여객의 차량탈출 실패 확률, ⑤ 여객의 터널탈출 실패확률을 산출할 수 있다. 현재는 국내 화재관련 분석자료가 많지 않아 일부자료는 전문가 판단의 자료를 사용하였으며, 기관사의 대응과 관련된 자료는 영국에서 수행한 인간신뢰도 분석자료[19]와 국내 원자력 산업의 자료[20]를 활용하였다. 인간신뢰도 분석에는 HEART(Human Error Assessment and Reduction Technique)을 적용하였으며, 향후 추가적인 연구를 통해 보완이 필요한 분야이다. 그러나 향후 추가적인 연구를 통해 충분한 자료가 확보되면 제시된 고장수목 및 사건수목을 보완하여 보다 신뢰성 있는 수치의 산출이 가능하다.

계산된 고장수목의 확률은 Fig. 1에 제시된 사건수목의 분기점의 실패확률로 연결되며, 성공확률은 1에서 실패확률을 제외한 값을 설정할 수 있다. 각 분기점의 확률이 결정

Tunnel fire	Fire detection	Sup-pression	Driver's response	Escape R/S	Escape tunnel	Arrive safe zone	Damage %	Prob. %
Fire by R/S feature	8.9x10 ⁻¹	1.7x10 ⁻¹	7.9x10 ⁻¹	2.2x10 ⁻¹	7.8x10 ⁻¹	8.3x10 ⁻¹	0	73.9
						8.5x10 ⁻¹	0	7.0
						1.0x10 ⁻¹	14.2	0.8
						1.5x10 ⁻¹	14.2	1.41
						9.0x10 ⁻¹	100	2.7
						8.5x10 ⁻¹	0	1.8
						1.0x10 ⁻¹	14.2	0.2
						1.5x10 ⁻¹	14.2	0.4
						2.2x10 ⁻¹	100	0.7
						8.5x10 ⁻¹	0	8.1
						9.0x10 ⁻¹	0	1.5
						1.0x10 ⁻¹	14.2	0.2
						1.5x10 ⁻¹	14.2	0.3
						9.0x10 ⁻¹	100	0.6
						8.5x10 ⁻¹	0	1.5
						1.0x10 ⁻¹	14.2	0.2
1.5x10 ⁻¹	14.2	0.3						
2.2x10 ⁻¹	100	0.6						

Fig. 7. Train fire event tree with branch probabilities

되면 16개 결과의 각각 분기별 확률이 계산되며, 확률값이 반영된 사건수목을 Fig. 7에 제시하였다. Fig. 7의 화재진압확률은 화재감지 성공여부에 따라 상이하하며, 성공시의 확률은 Fig. 3과 같으나 진압실패후 화재진압확률은 Fig. 3에 '승객에 의한 진압실패'를 고려하지 않고 산출된 값을 적용하였다. 적용 사례로서 화재발생을 감지후 화재진압에 성공한 경로의 화재감지 성공확률(Fig. 7에서 8.9x10⁻¹)과 화재진압 성공확률(Fig. 7에서 8.3x10⁻¹)을 곱하여 0.739 (73.9%)의 확률이 계산된다.

3.5 위험도평가예의 활용

위험도의 정량적 평가를 위해서는 위험사건의 발생빈도와 피해심각도가 필요하다. 전절에서 설명한 사건수목의 분기별 발생확률에 연간 화재사고 발생 빈도를 고려하면, 해당 철도시스템의 화재사고 발생빈도가 산출된다. 피해심각도의 산출에는 전문가의 판단이나 확률론적 평가를 통해 도출된 결과를 Fig. 7의 "Damage(피해도)" 항목에 할당하면 된다. 본 연구에서는 선행연구를[8] 통해 개발된 철도화재사고 피해도 예측을 위한 평가코드를 활용하였으며, 피해가 발생하는 분기의 피해심각도를 14.2%로 설정하였다. 이는 탑승객 1000명이 승차중일 때 승객의 14.2%가 사망하는 피해를 의미한다. 피해 심각도는 터널의 물리적 구조나 안전대책에 따라 변화하는 값으로 세부적인 평가 결과를 반영하여야 한다. 여기서 도출된 피해심각도와 발생빈도를 곱하면 철도차량고장으로 인한 열차화재 사고의 위험도가 산출된다.

4. 결론

본 연구에서는 위험도가 높은 터널구간에서의 화재사고의

위험도를 정량적으로 예측을 위해 주요 영향인자와 사고시나리오를 사건수목과 고장수목으로 구성하였다. 구성된 고장수목과 사건수목을 활용하면 주어진 시나리오의 위험도 산출이 가능하다. 제안된 사건수목과 고장수목은 화재안전 대책의 정량적 효과에 대한 분석이나 안전대책간의 연관성 분석에 효율적으로 사용될 수 있다. 향후 지속적인 연구를 통해 고장수목과 사건수목에 사용된 수치의 신뢰성을 높이면, 보다 정확한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2006), “제1차 철도안전 종합계획”.
2. UIC (2003), “Safety in railway tunnels”, UIC779-9.
3. NFPA (2003), “Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems”, NFPA-130.
4. UN (2003), “Recommendations of group of the experts on safety in tunnels (RAIL)”, TRANS AC.9/2003/1.
5. Powell, S. and Grubits, S. (1999), “Tunnel Design with TRAFFIC -Tunnel Risk Assessment For Fire Incidents and Catastrophes”, Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon.
6. Molag, M. and Sluis, L. (1999), “Quantitive Risk Analysis to Optimize Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design”, Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon.
7. 장용준, 이창현(2008), “Fluent와 Exodus를 이용한 승객피난 시뮬레이션”, 한국철도학회 논문집, 제11권 1호, pp. 95-100.
8. 곽상록, 홍선호, 왕종배, 조연옥(2004), “확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성”, 한국철도학회논문집 제7권 4호, pp. 302-306.
9. 곽상록, 왕종배, 박찬우, 박주남(2006), “철도사고 위험도평가를 위한 화재사고 시나리오 구성에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집.
10. Rail Safety & Standard Board (2004), “A statistical review of the RSSB Safety Risk Model (WP1)”.
11. Transport Canada (2005), “Rail Safety Strategic Plan (2005-2010) : All Aboard”.
12. Australian Railway Association (2004), “Australian Railway Industry Report”.
13. 곽상록, 왕종배, 박찬우, 조연옥(2005), “선로 작업자 위험도 예측을 위한 고장수목 구성연구”, 춘계 철도학회 학술대회 논문집.
14. 박찬우, 왕종배, 곽상록, 박주남, 장승철(2006), “철도 위험도평가 SW 및 사고분석 프로그램 개발에 관한 연구”, 한국안전학회 추계학술대회, pp. 148-153.
15. ISO/IEC Guide 51 (1991), “Safety Aspect-Guidelines for their inclusion in standards”.
16. RSSB, Railway Group Guidance Note GE/GN8561 (2002), “Guidance on the Preparation of Risk Assessments within Railway Safety Cases”.
17. 한국철도기술연구원(2003), “철도사고 위험요인 분석기술개발 : 별책 호주철도사고 위험요인 분석”.
18. U.S. Dept. of Transportation (2000), “Hazard Analysis Guideline for Transit Project”.
19. Rail Safety and Standard Board, UK (2004), “Rail-specific HRA technique for driving tasks”, Final report.
20. KAERI (2005) “Development of A Standard Method for Human Reliability Analysis (HRA) of Nuclear Power Plants”, KAERI/TR-2961/2005.

접수일(2008년 3월 12일), 수정일(2008년 5월 25일),
 게재확정일(2008년 6월 2일)