

고속철도 터널의 정량적 위험도 분석(QRA)을 위한 세부기준에 관한 고찰

최원일^{1)*}, 최정환¹⁾, 문연오²⁾, 김선홍²⁾, 유호식²⁾

Review on the detailed standards for Quantitative Risk Analysis in High Speed Railway Tunnels

Choi Won-il, Choi Jeong-Hwan, Moon Yeon-Oh, Kim Seon-Hong, Yoo, Ho-Sik

Abstract To protection of fire accident and to minimize danger of spreading the disaster. in railway tunnel, MCT (the Ministry of Construction and Transportation) published "Rules about the Safety Standard of Railroad (2005.10.27)" and "The Detailed Safety Standard of Railroad (2006.9.22)". QRA(Quantitative Risk Analysis) results are applied to establish the fire protection facilities in railway tunnel so that institute the reasonable application about the fire safety facilities However, it is difficult to perform the fire safety design due to lack of the detailed standards about event scenario, fire intensity, incidence rate of accidents etc. Therefore, This paper introduces the practical method about detailed standards of QRA.

Key words Q.R.A, the fire prevention design, the fire protection facilities

초 록 철도터널에서의 화재 등과 같은 불의의 사고를 예방하고 사고 발생시에는 피해를 최소화하기 위하여 철도시설에 대한 안전기준이 필요하게 되었으며, 건설교통부(현 국토해양부)에서는 『철도시설 안전기준에 관한 규칙(2005년 10월 27일)』과 『철도시설 안전세부기준(2006년 9월 22일)』을 고시하여 일반철도와 고속철도 터널에 적용하도록 하였다. 이러한 방재관련 법규는 터널 방재설비의 과다 및 과소 설계를 방지하기 위하여 5가지 주요시설물(방연문, 배연설비, 대피통로 접속부, 대피통로 간격, 연결송수관 설비)에 대하여 안전성 분석결과에 따라 설치하도록 하여 많은 비용과 시간이 소요되는 방재시설물의 합리적인 설치방안을 제시하였다. 그러나, 안전성 분석방법은 기존 사고사례 및 자료를 토대로 화재강도, 가능한 시나리오, 사건발생 가능성, 사고영향, 사고발생확률 등에 대한 세부적인 분석방법에 따라 안전성 분석 결과의 차이가 크므로 이에 대한 구체적인 기준이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 고속철도 터널 안전성 분석에 대하여 단계별로 세부적인 수행방법을 소개하였으며, 이를 참고하여 합리적인 범위 및 기준을 개발하는 데 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어 안전성 분석, 방재설계

1. 개요

건설교통부에서는 철도시설에 대한 방재설계와 평상시 유지관리를 목적으로 『철도시설 안전기준에 관한 규칙(2005년 10월 27일)』과 『철도시설 안전세부기준(2006년 9월 22일)』을 고시, 일반철도와 고속철도 터널에 대하여 적용하도록 하였으며, 도시철도 구간의 터널, 하저

및 해저터널, 지하승강장, 화물열차 전용터널은 별도의 기준을 따르게 하였다.

상기 규칙과 세부기준에 따라 연장 1 km 이상의 신구터널 방재 설계시 방연문, 배연설비, 대피통로 접속부, 대피통로 간격, 연결송수관 설비 시설물에 대하여 안전성 분석을 수행하여 방재시설의 설치여부 및 규모를 결정하도록 규정하고 있다.

철도시설의 안전성 분석은 기존 사고사례를 포함한 충분한 자료검토를 통하여 정량적 위험도 분석(QRA, Quantitative Risk Analysis) 방법으로 수행하게 된다. 이를 위하여 철도시설에 대한 잠재적인 위험 원인, 가능한 시나리오, 사건발생 가능성, 사고영향, 사고발생확률, 피해정도 등을 세부적으로 분석하여야 된다.

¹⁾ 한국철도시설공단

²⁾ (주)유신코퍼레이션

* 교신저자 : cwikt@yaho.co.kr

접수일 : 2008년 11월 28일

심사 완료일 : 2008년 12월 9일

게재 확정일 : 2008년 12월 11일

그러나 철도시설 안전세부기준에는 안전성 분석을 수행하기 위한 세부적인 수행방안이 제시되어 있지 않아, 세부분석방법에 따라 안전성 분석 결과의 차이가 발생하여 방재설계의 신뢰성 확보에 어려움이 있다.

따라서, 본 논문에서는 철도시설 안전세부기준의 단계별 수행절차를 토대로 고속철도터널에서의 안전성 분석 세부수행방법을 제안하고자 한다.

2. 철도터널 방재기준 검토

철도터널은 일반적으로 고속철도, 일반철도, 도시철도(지하철) 등으로 분류되는데 경부고속철도의 개통에 따라 “고속철도 터널 방재기준”이 2003년 11월에 제정,

2005년 9월에 개정되었으며, 여객전용인 복선 고속철도의 터널방재기준만을 수록하고 있다. 이후, 2005년 10월에 “철도시설 안전기준에 관한 규칙”이 제정되어 일반철도와 고속철도에 대한 기준이 수립되었으며, 이듬해인 2006년 9월에 “철도시설 안전세부기준”이 제정되었으며, 제정 및 개정내용은 표 1과 같다.

상기 기준은 UIC 779-9(세계철도 연맹)와 UN의 철도터널 안전기준의 분류 체계를 활용하여 기반시설과 운용의 범주를 바탕으로 하고 하위체제로 사고예방 대책, 사고피해감소 대책, 승객 대피축진 대책, 구조축진 대책의 4가지로 분류되어 있다.

이러한 규칙 및 기준의 특징은 표 2에서와 같이 주요 방재시설을 안전성분석 결과에 따라 설치하도록 하여

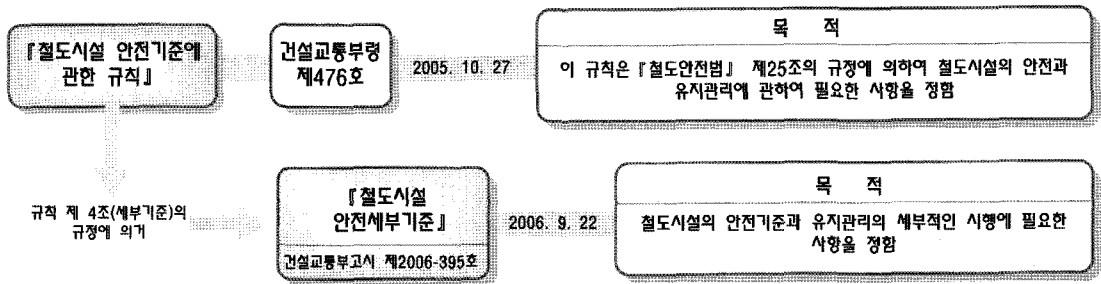


그림 1. 『철도시설 안전기준에 관한 규칙』과 『철도시설 안전세부기준』 제정고시

표 1. 터널방재기준 제정 및 개정경과

구분	방재기준	비고
2003.11	고속철도 터널방재기준 제정	• 대구지하철 화재(2003.2.18)후 국가 안전정책의 일환으로 수행
2005.09.	고속철도 터널방재기준 개정	• 당초기준에 대한 감사원 기술감사에서 보완 권고(2005.2.) • 주요개정사항 - 대피거리 2.5 km로 단축(당초 5 km), 구난대피소 성능 개선 - 터널연장 2.5 km 초과시 연결 송수관 설비 설치 (당초 “소화·구조 차량 실효성 없음”으로 판단)
2005.10.	철도시설 안전기준에 관한 규칙 제정	• 1 km 이상 터널에 대해서 안전성분석결과에 따라 터널 방재 시설 설치
2006.09.	철도시설 안전세부기준 제정	• 철도시설 안전기준에 관한 규칙 제4조의 규정에 의거 철도시설 안전에 관한 세부기준 제정

표 2. 주요 방재시설 기준 비교

구분	경부고속철도 설계기준	철도시설안전기준
대피통로	2.5 km 이내 간격으로 설치 구난대피소는 0.5~1 km 이상 이격	안전성 분석 결과에 따라 설치
방재구조지역	2.5 km 이상 터널에 설치	1 km 이상 터널에 설치
연결송수관 설비	2.5 km 이상 터널에 설치	안전성 분석 결과에 따라 설치
제연시설	대피통로 접속부에 설치	안전성 분석 결과에 따라 설치
배연설비	대피통로 간격 2.5 km 초과시, 필요에 따라	안전성 분석 결과에 따라 설치

많은 비용과 시간이 들어가는 방재시설에 대하여 합리적인 설치방안을 제시한 것이다. 그러나, 안정성 분석을 수행하기 위한 세부기준의 미비로 인하여 안전성 분석 결과의 차이가 발생하므로, 현행 관련법규에서 정하지 못한 정량적 안정성 분석을 수행하기 위한 세부 분석방안의 제시가 필요하다.

3. 안전성 분석

3.1 QRA 정의

QRA란 위험의 상대적인 크기를 파악하기 위한 방법으로서 위험크기를 정량화시켜 사회적 위험기준과의 비교를 통하여 주요시설물의 안전성을 평가하는 방법이다.

이러한 정량화된 위험의 크기를 사회적 위험기준과 비교하여 방재설비의 적정성을 평가할수 있으며, 위험의 크기는 다음의 식으로 정량화 할 수 있다.

$$\text{위험(Risk)} = \text{사고발생확률(Frequency)} \times \text{손실(Fatalities)}$$

철도터널에서 발생할 수 있는 위험을 인명피해로 국한하였을 때, 철도터널의 위험인자는 터널붕괴, 열차충돌 및 탈선시의 충격, 그리고 화재사고 등이 있을 수 있다. 이 중 충돌 및 탈선시 발생하는 충격에 의한 피해는 예측하기 불가능한 면이 크지만, 화재사고의 경우 FED(Fractional Effective Dose) 평가 기법이 개발되어 화재시나리오별로 연기확산 및 피난 예측을 통해 피해 예상자의 예측이 가능하다.

이러한 전반적인 사고 시나리오 구성과 화재 및 피난 시뮬레이션 등의 분석과정을 통해 철도터널의 정량적 위험성 분석은 사고발생확률 × 사망자의 관계를 그림 2의 FN 곡선으로 표현할 수 있다.

여기서 ALARP (As Low As Reasonably Practicable) 구간은 실행할 수 있는 한 위험도를 낮게 유지해야 하

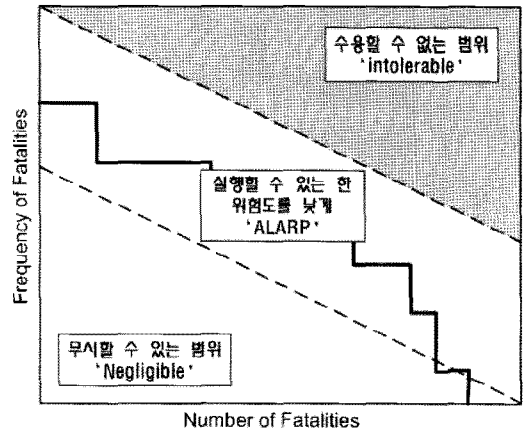


그림 2. FN 곡선

는 구간으로 경제성의 원칙에 입각하여 위험도를 낮추는 개념이다. 따라서 정량적 위험도 분석 결과를 토대로 위험수준은 적어도 이 구간 이하를 유지하도록 적정 방재시설 계획을 수립하여야 한다.

국내의 철도터널 방재관련 법규에는 이러한 위험도 분석을 수행하여 주요한 방재시설의 설치여부 및 규모를 결정하도록 규정하고 있다.

3.2 정량적 위험도 분석(QRA) 수행기준

철도안전세부기준에서는 표 3과 같이 QRA 수행기준을 잠재위험 확인, 사고발생확률 산정, 사고영향 분석, 안전성 분석, 안전대책 수립의 순서로 단계별로 수행하게 되어 있으며, 이를 수행흐름도로 작성하면 그림 3과 같다.

그러나 철도안전세부기준에서는 수행 단계별로 사회적 위험(Societal risk) 기준, 화재강도(Heat release rate), 사고확률(frequency) 산정, FED (Fractional Effective Dose) 평가에 대한 적용 방법이 미제시 되어있으므로 본 논문에서는 세부수행방법을 검토하여 제시하고자 한다.

표 3. 철도안전세부기준 안전성 분석 수행 절차 및 문제점

구분	내용	문제점
1. 잠재위험 확인	• 사고발생시 전개될 수 있는 가능한 시나리오 작성	• 충돌 및 탈선의 경우 사고통계 적용 및 사망자 산정 곤란
2. 사고발생확률계산	• 각각의 시나리오 단계별 사건발생 가능성 산정	• 국내 고속철도에 대한 사고자료 부족
3. 사고영향 분석	• 각각의 시나리오 단계별 사고 영향에 의한 결과분석	• 각 시나리오 단계별 안전시설의 사고 피해영향 감소 적용 기준 없음
4. 안전성 분석	• 각각의 시나리오 단계별 피해 정도 산출	• 사망자수 예측방법 및 판단기준 모호
5. 안전대책 수립	• 안전성 분석결과 사회적 위험기준을 만족하지 못하는 경우, 요구수준에 부합하는 안전대책 수립	• 안전수준(사회적 위험기준)에 대한 기준 없음

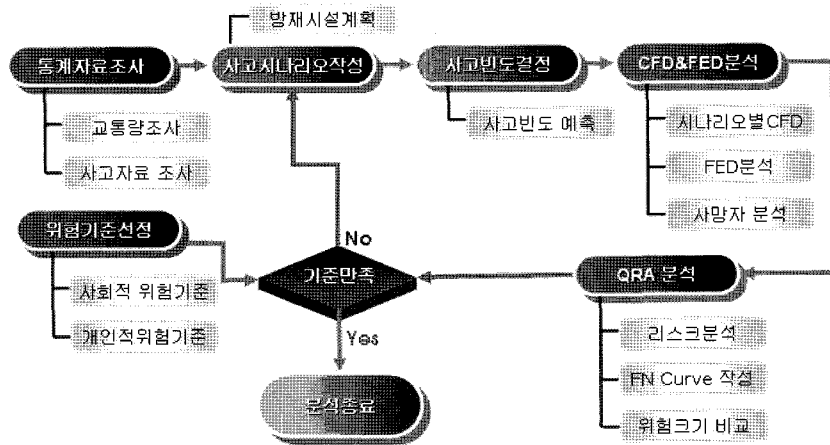


그림 3. QRA 수행흐름도

4. 안전성 분석 세부수행방법

4.1 교통량 및 사고자료

사고발생확률을 산정하기 위해서는 교통량과 사고자료에 대한 충분한 사례조사와 타당성 있는 자료를 적용해야 하므로 교통량은 철도통계연보에서 제공된 교통량이나 장래 교통량 예측값을 적용한다.

사고자료는 국내 고속철도사고사례를 적용하여야 하나, 2008년 현재까지 터널내 열차화재사고는 전혀 발생하지 않았다. 또한, 외국의 사고사례는 각 나라마다 방재시설의 차이와 운영특성이 다르고, 교통량 및 사고사례의 정확한 DATA 입수가 곤란하며, 일부의 사고사례를 차용해서 쓰는것은 사고발생확률의 신뢰성을 저하시키므로 적용이 곤란하다.

따라서, 사고자료는 기존 철도자료를 활용하여 고속철도 사고 확률 산정에 적용하며, 국내 철도 관련 사고자료는 한국철도공사가 매년 제공하는 “철도통계연보” 자료를 적용한다.

“철도터널 안전성 분석 평가절차서(감리용)”에서는 열차교통량을 운행열차회수에 주행거리를 곱하여 산출

하는 “열차·km”로 적용하도록 되어 있으나, 철도통계연보에는 “인·km”로 자료가 정리되어 있고 교통량 분석에는 차이가 없으므로 “인·km”를 적용한다.

위험평가의 불확실성을 감소하기 위하여 “철도터널 안전성 분석 평가절차서(감리용)”에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 도입하여 정규확률분포를 이용하게 되어 있으나, 사고발생 확률이 정규확률분포에 따르는지는 불확실하다.

따라서, 현재로서는 과거 자료를 통한 미래의 예측을 진행할 수 밖에 없으며, 안전기술의 향상, 기준 및 집행의지의 강화에 따라 과거보다 장래의 사고발생건수가 상당히 감소될 수 있을 것으로 판단되므로, 과거자료를 이용한 사고발생 확률은 여유치가 내포되었다고 할 수 있다.

그리하여, 구간별 사고 자료를 확보할 경우, 전체 사고 발생건수보다 높으면 구간별 사고자료를 우선적으로 적용하여야 하며, 통계적 분석기법을 사용하여 오차범위를 최소화시킴으로써 사고발생확률의 불확실성을 개선시켜야 한다.

교통량과 사고자료가 결정되면, 표 4의 순서로 사고

표 4. 사고확률 산정방식

산정순서	내용
전체 교통량(인·km) 분석	조사 기간의 전체 교통량(인·km)을 분석하여 평균 교통량(인·km)을 산출한다.
과업구간 교통량(인·km) 분석	목표연도 교통량 및 수송수요를 분석하여 연간 과업구간의 교통량(인·km)을 산출한다.
사고통계자료 분석	조사 기간의 각종 사고종별 발생건수를 분석하여, 연간 발생값을 산출한다.
사고종별 사고확률 분석	“과업구간 교통량(인·km) × 사고 건수 / 전체 교통량(인·km)”를 적용하여 각 사고종별 사고발생 확률을 분석한다.

발생확률을 산정한다.

사고 발생 확률은 과거 자료를 기초로 하여 작성되므로, 추가 자료의 입수에 따라 기초자료를 적극적으로 수정하여야 한다.

4.2 사회적 위험 기준

사회적 위험기준은 핵 반응로, 위험설비, 해양설비, 잠재적 위험설비 등의 시설물 용도에 따라 다르며, 시설물의 위험도가 커질수록 엄격한 기준이 적용된다. 이 기준은 경제규모, 국민의식수준 등 여러 가지 여건에

따라 국가별로 상이하며, 우리나라의 경우 사회적 위험 기준이 미정립된 상태이다. 아래 표 5는 각 국가별로 사회적 위험도기준을 정리한 것으로 도로터널에 대한 위험기준은 있으나, 도로터널보다 상대적으로 안전한 철도터널에 대한 위험기준은 아직 정립되지 않은 상태이다.

영국 HSE 기준과 OECD 기준은 위험의 빈도 크기가 같으며, OECD 기준은 위험이 참조선을 초과할 경우, 추가적인 검토를 요구하는 라인이 추가되어 있다. OECD 기준은 현재 국내 도로터널 QRA 평가에 관한 건설교

표 5. 세계 각국의 사회적 위험 기준

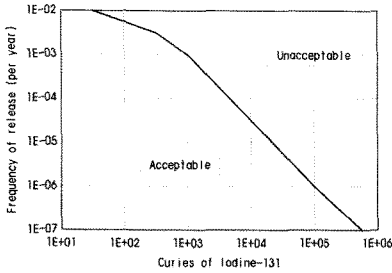
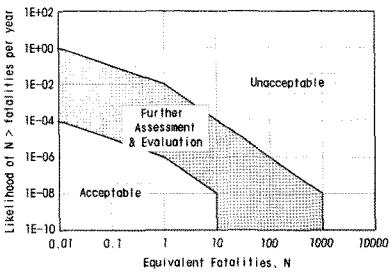
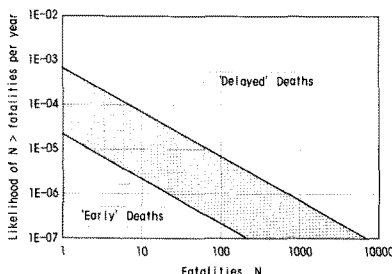
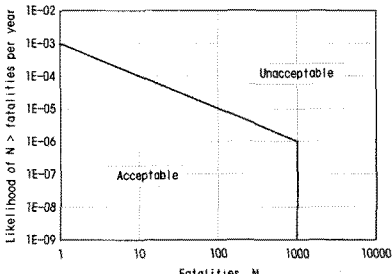
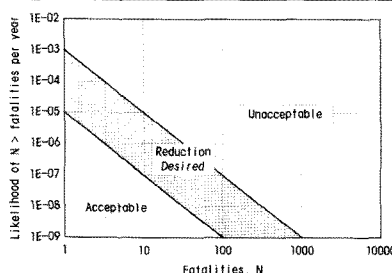
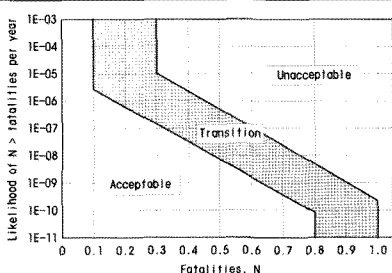
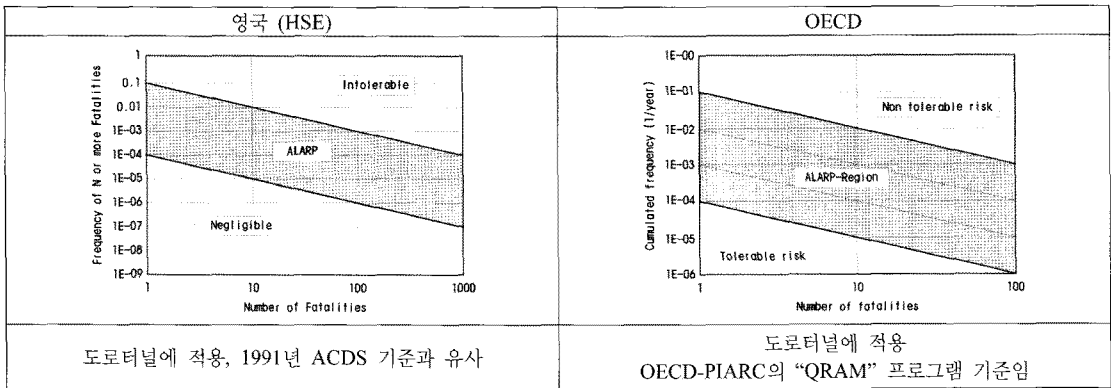
<p style="text-align: center;">영국 (1967)</p>  <p style="text-align: center;">Farmer 곡선 : 핵 반응로에 적용</p>	<p style="text-align: center;">네덜란드 (1978)</p>  <p style="text-align: center;">Groningen 곡선 : 위험물질 처리설비에 적용</p>
<p style="text-align: center;">영국 (1982)</p>  <p style="text-align: center;">수정 Kinchin 곡선 : 핵 반응로 1기에 적용</p>	<p style="text-align: center;">홍콩 (1988)</p>  <p style="text-align: center;">잠재적인 위험설비나 그에 가까운 설비에 적용</p>
<p style="text-align: center;">네덜란드 (1980년대)</p>  <p style="text-align: center;">기존의 위험설비에 가까운 것들에 적용</p>	<p style="text-align: center;">스위스 (1991.2)</p>  <p style="text-align: center;">위험설비에 적용</p>

표 5. (계속)

<p style="text-align: center;">영국 (1991)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>	<p style="text-align: center;">영국 (1991)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>
<p>ACDS(Advisory Committee on Dangerous Substances) : 위험물질 수송경로와 근접한 곳에 적용</p>	<p>탑승객 150명인 해양설비(offshore)에 적용</p>
<p style="text-align: center;">홍콩 (1993)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>	<p style="text-align: center;">네덜란드 (1996)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>
<p>PHI(Potentially Hazardous Installation)에 적용</p>	<p>위험설비에 가까운 것에 적용</p>
<p style="text-align: center;">네덜란드 (1996)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>	<p style="text-align: center;">홍콩 (1997)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>
<p>위험물질 수송에 적용</p>	<p>LPG 수송 관련시 적용</p>
<p style="text-align: center;">홍콩 (1997)</p> <p style="text-align: center;">Fatalities, N</p>	<p style="text-align: center;">스웨덴 (1997)</p> <p style="text-align: center;">Number of Fatalities</p>
<p>연소 수송 관련시 적용</p>	<p>토지, 하천, 도시개발에 따른 위험에 적용</p>

표 5. (계속)



통부 세부 연구과제로 추진중인 과업에 소개되어 있다. 국내 철도관련 QRA 보고서에 간혹 언급되는 사회적 위험기준은 Offshore 기준과 홍콩 PHI 기준이 있으며, 홍콩 PHI 기준은 잠재적 위험 시설에 대해 반영되는 기준으로, 홍콩에서 규정한 잠재적 위험설비(Potentially Hazardous Installation)는 주로 유류 및 가스, 그리고 폭발물 저장소에서의 위험 평가에 적용한다.

안전성 분석의 기준이 되는 사회적 위험기준의 선정은 타 시설과의 위험크기의 정량적 비교 뿐만 아니라 방재시설의 적정성 평가에 중요한 잣대가 되기 때문에 그 선정에 있어 합리적인 판단이 요구된다.

이와 관련하여, 가장 최근에 터널방재에 대하여 논의된 호남고속철도 기본설계에서는 방재 전문가들로 구성된 자문회의를 수행하였으며, 다음과 같이 크게 두가지 의견으로 양분되었다.

첫째, 사회적 위험기준은 안전에 대한 목표이므로, 철도가 도로에 비해 낮은 위험을 보이는 만큼 그러한 사회적 정서를 반영하여 위험을 낮게 관리하기 위해 홍콩 PHI 기준을 적용하여야 한다.

둘째, 도로터널 안전성 분석에 적용하고 있는 HSE 기준은 철도터널에도 사용한 적이 있으며, 객관적인 안전도 분석을 위해 도로나 철도는 동일한 잣대로 분석해야 한다.

이외에 철도기술연구원에서 작성하고 있는 “철도터널 안전성 분석 평가절차서(감리용)” 초안에서는 홍콩 PHI 기준을 적용하도록 기술하고 있으나, 향후 국내 실정에 맞는 사회적 위험기준 선정에 관한 추가 연구를 계획하고 있는 것으로 파악되었다.

현 시점에서 “국내 철도터널에 사용되는 사회적 위험기준은 이것이다” 라고 정할 수는 없으나 관련 전문가들의 의견을 수렴하여 향후 국내 실정에 적합한 사회적

위험기준이 정립되기 전까지 도로터널과 동일한 사회적 위험기준인 HSE 기준을 호남고속철도 터널 안전성 평가에 반영하기로 하였다.

그러나 HSE 기준이 홍콩 PHI 기준보다 위험관리 수준이 상대적으로 더 낮은 기준이므로, 방재시설계획 측면에서 더 완화될 소지가 있으므로 향후 방재계획시 이러한 점을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

4.3 화재 강도

화재강도는 객차와 기관차의 화재원이 상이하므로 화재성장률, 화재지속시간, 화재하중을 달리하여 실제 사고사례나 실차실험 등의 자료를 적용해야 하며, 차량 제작사에서 제시하는 차량의 총 발열량 자료가 있을 경우에는 제작사의 자료를 기준으로 화재강도를 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그러나 국내의 경우 고속철도 뿐 만아니라 일반철도 터널내에서도 화재사고가 전혀 발생되지 않았다. 또한, 대구지하철 화재사고 이후 지하철 차량 및 경부고속철도 차량에 대한 모의 화재실험은 있었으나 화재연기의 발생 및 화재의 확산정도에 대한 관찰 수준으로만 수행되었으며 화재규모에 대한 정량적인 측정 및 분석 자료가 전혀 없는 실정이다.

국내 철도시설 세부안전기준에는 제 7조 2항에 의거하여 객차 화재강도는 10MW 이상으로 규정하고 있고 화물열차는 교통량이 가장 많은 화물열차 1량 이상의 화재강도로 수행해야 함을 명시하고 있으나 기관차에 대한 화재강도는 고려하고 있지 않다.

유럽에서 진행된 EUREKA 499 프로젝트에서는 도로차량 및 철도차량의 화재규모에 대한 실험이 수행되었으며, 표 6은 객차의 화재규모를 정리한 것으로 IC차량은 화재크기가 적은 반면, 전체적인 화재 지속시간이

길고, Subway Coach는 가연성 재질의 좌석으로 인해 화재규모가 큰 반면 초기에 화재발열이 집중되어 있고 30분 이후에는 화재크기가 상당히 낮아지는 것으로 나타났다.

표 7은 기관차의 화재규모를 정리한 것으로, 기관차 화재에 대한 조사 결과 차량형식에 따라 상이한 화재강도를 보이고 있어, 화재강도 기준을 선정하는 데 어려움이 있다.

FIT (fire in tunnel) network의 최종 보고서에는 독일에서 일반적으로 사용하고 있는 객차화재규모를 25MW 규모로 제시하고 있으며, DIN 5510 기준 또는 EN 45545 규격을 만족하도록 설계되는 신형 열차의 경우 6MW 규모의 화재가 적용가능하다고 언급하고 있다.

스웨덴과 덴마크를 연결하는 Oresund tunnel 설계에

서는 영국의 객차와 태국의 객차에 대한 화재규모 자료가 사용되었으며, 표 8에서와 같이, KTX와 같은 내화 성능 적용된 신형 여객차량의 경우에는 10MW 이하의 화재규모를 나타내었다.

TGV 기관차 화재강도는 INERIS(국립산업환경연구소)와 CSTB(건축과학기술센터)에서 발표하였다.

INERIS(국립산업환경연구소)⁷⁾에서 수행한 화재규모 산정은 TGV 기관차 내의 변압기유(Transformer oil)의 용량에 대하여 Zone-model 프로그램인 “MAGIC”을 사용하여 화재강도를 예측한 것으로 7MW로 나타났다.

CSTB(건축과학기술센터)⁸⁾에서 수행한 화재규모 산정은 화재 갤러리에 1:3 규모의 TGV 축소모형을 만든 후, 헵탄(Heptane)을 연소시켜 구한 화재강도에 Richard Carval 이 제시한 상사 규칙(Similitude rule)을 적용하

표 6. EUREKA 499 프로젝트 차량별 화재규모(객차)

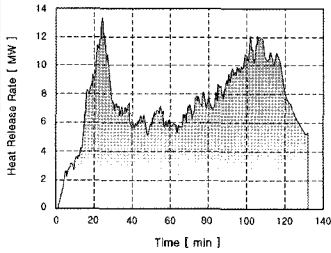
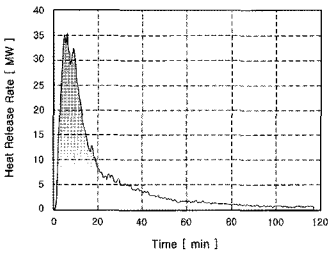
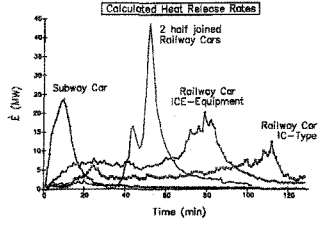
구분	Inter City Train (IC)	Subway Coach	Inter City Express(ICE)
차량 특성	<ul style="list-style-type: none"> 차량크기 : 20.6 m^L×2.7 m^W×3 m^H 좌석수 80개 	<ul style="list-style-type: none"> 차량크기 : 18 m^L×2.8m^W×3m^H 폴리우레탄 재질 좌석 40개 	<ul style="list-style-type: none"> 차량크기 : 26.1 m^L×2.9 m^W×2.4 m^H
화재 곡선			
화재 규모	최대 13.5 MW	최대 35 MW	최대 19 MW
도달 시간	25 MIN	5 MIN	80 MIN

표 7. EUREKA 499 프로젝트 차량별 화재규모(기관차)

구분	차량형식	화재 규모	비고
British Rail	Diesel Locomotive	30 MW	EUREKA 499
HongKong MTR	Electric Locomotive	6.8 MW	EUREKA 499

표 8. 영국 및 태국 객차의 화재규모(객차)

구분	차량형식	화재규모
British Rail	천으로 된 좌석 및 가연성 내장재의 구형 여객차량	16 MW
	내화성능 좌석의 신형 여객차량	7 MW
Thai Railways	모든 침구와 장식용 커튼이 있는 침대차량	16.3 MW
	목재로 된 좌석과 벽 내장재의 구형 여객차량	14.0 MW

여 유추한 화재강도로서 15~30MW의 편차를 나타냈다.

상기의 자료를 정리해 보면, 화재강도는 객차 및 기관차의 제작기준이 중요하며, 국내 고속철도 차량인 KTX는 철도차량에 대한 국내기준인 철도차량 안전기준에 관한 규칙[건설교통부령 제455호](2005,09,16) 및 그 하위 지침의 불연재 적용을 원칙으로 제작되어 있다.

따라서, 가장 최근 고속철도터널 방재에 관하여 논의된 호남고속철도 기본설계 자문회의에서는 표 10과 표 11에서와 같이 객차 및 기관차 화재강도를 모두 10MW 규모로 결정하고, 객차와 기관차의 화재원이 상이하므로 화재성장율, 화재지속시간, 화재하중을 달리하여 적용하는 것을 제안하였으며, 향후 국내 실정에 적합한 화재규모가 정립되기 전까지는 아래와 같은 화재성장

표 9. TGV 기관차 화재강도

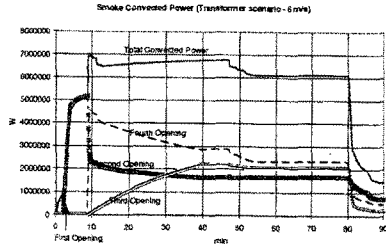
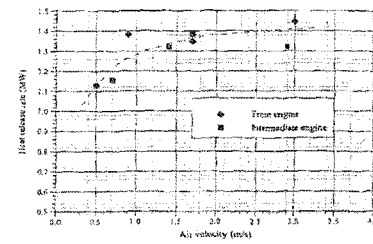
구분	France INERIS	France CSTB
화재 곡선		
화재 규모	7 MW	15 MW ~ 30 MW
비고	존 모델 화재 평가	헵탄화재 축소모형실험 및 상사를 통한 유추

표 10. 객차 화재강도

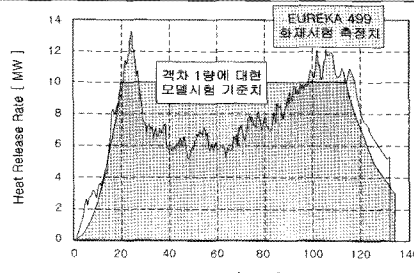
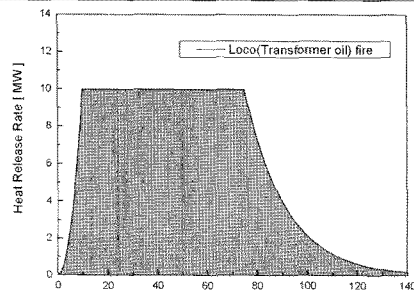
화재성장곡선	비고
	<ul style="list-style-type: none"> 최대화재강도 : 10MW 화재성장율 : 0.025 MW/min² 화재하중 : 70GJ EUREKA 499 Fire test 데이터를 적용 다만, 차량 제작사에서 제시하는 차량의 총 발열량 자료가 있을 경우에는 제작사의 자료를 기준으로 화재규모를 선정하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

표 11. 기관차 화재강도

화재성장곡선	비고
	<ul style="list-style-type: none"> 최대화재강도 : 10MW 화재성장율 : 0.1 MW/min² 화재하중 : 60GJ 변압기유 용량 1000kg 적용 다만, 차량 제작사에서 제시하는 차량의 총 발열량 자료가 있을 경우에는 제작사의 자료를 기준으로 화재규모를 선정하는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

곡선을 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

4.4 사고시나리오 구성

국·내외 논문에서 사고 시나리오는 화재가 발생한 열차는 터널내 정차를 피하여 터널 외부에 정차하는 것을 우선으로 하나, 열차화재, 전력 고장, 감속거리의 계산 오류나 비상 브레이크 작동 오류 등의 이유로 터널내에 정차할 수도 있다. 따라서 사고시나리오의 구성은 화재열차가 터널내부에 정차할 경우 피난객의 탈출 및 화

재연기 확산의 다양한 조합을 고려하기 위해 사고수법(Event Tree Analysis)을 적용하며³⁹⁾ 이를 참고하여 사고시나리오의 단계별 진행과정을 구성하면 다음과 같다.

- 1단계 : 상행 또는 하행으로 주행중인 열차의 객차 또는 기관차에 화재가 발생하게 되어 이 상황을 열차에 설치된 화재감지기 또는 승객에 의해 감지하게 됨.
- 2단계 : 감지 후 승객 또는 승무원에 의해 초기소화가 진행되며, 초기소화가 완료될 경우 화재

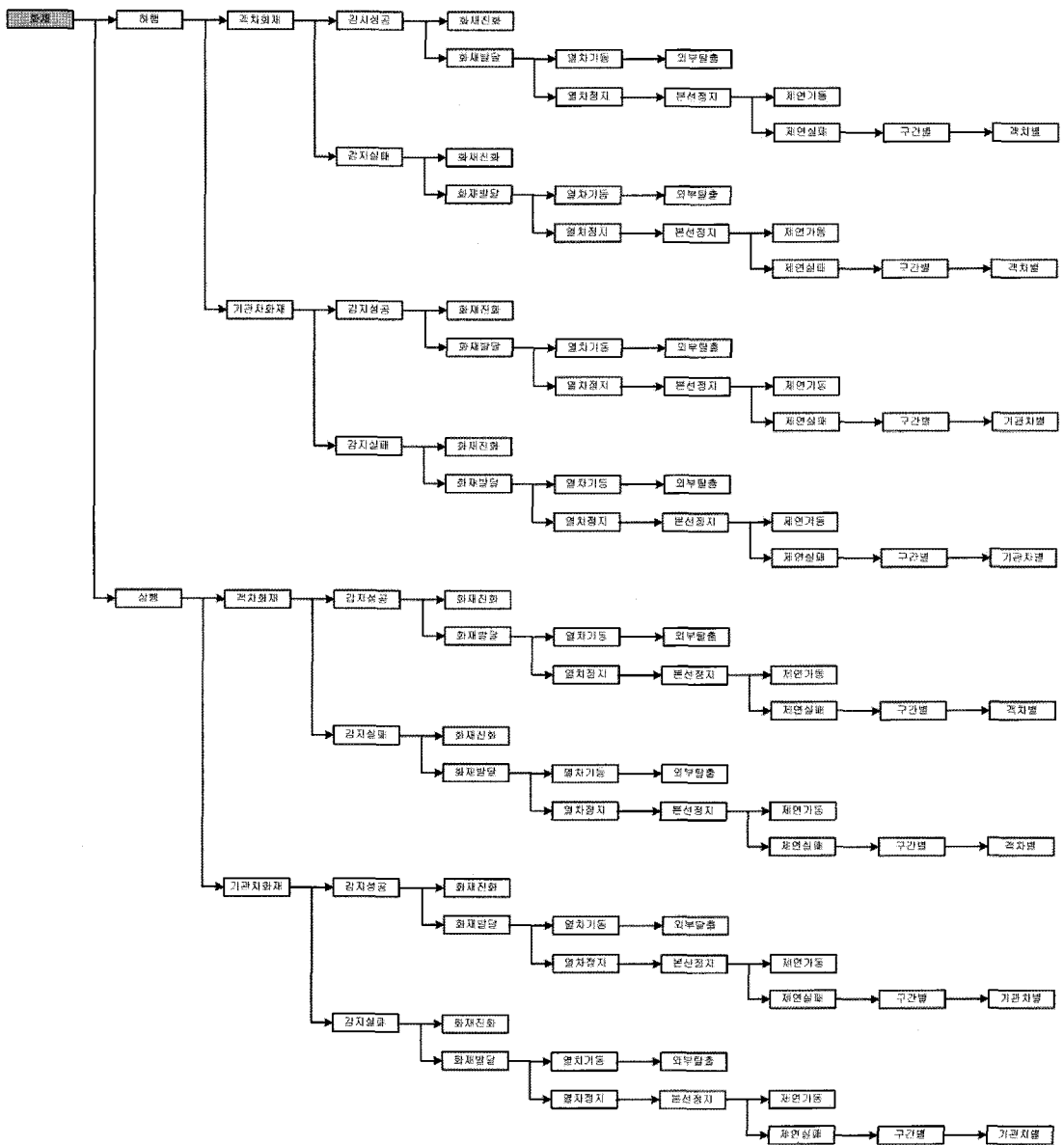


그림 4. 사고 시나리오

시나리오는 종료되게 함.

- 3단계 : 그러나 초기소화 실패할 경우, 열차가 기동을 지속할 경우에는 터널 외부로 탈출하게 되지만, 열차의 기동고장으로 연결되면, 터널내에 정차하여 탈출을 개시하게 함.
- 4단계 : 이때 터널내에 설치된 배연설비의 가동유무 및 가동시의 운전방향 오류 등에 따라 시나리오가 분기되나, 검토단계에서는 배연설비의 설치는 고려하지 않음.

일반적으로 사고시나리오 구성시 비상조명은 일반조명과는 별도로 비상조명이 추가적으로 60분 동안 작동할 수 있는 성능을 확보하도록 요구하고 있으므로 작동 및 고장여부는 고려하지 않았다.

또한, QRA에서 현재의 피해규모 산정은 사망자수만을 대상으로 하고 있고 방재시설에 대한 피해는 제외하므로 연결송수관설비의 고려는 제외하는 것이 타당하다. 즉, 연결송수관설비는 화재사고 후 투입된 소방대에 의해 가동되는 설비로서 사고후 가동시까지 일정한 시간이 필요하여 대피승객의 피해경감보다는 연소확대방지에 의한 방재시설 피해의 최소화에 적합한 방재시설이므로 현재의 피해규모 산정에서 제외한다.

여기서, 탈선 및 충돌사고는 철도의 운전시스템과 관련된 것으로 특정한 방재시설로 예방 또는 사고이후 사망자의 발생을 방지할 수 없고 열차의 주행상태 및 선로상태 그리고 사고시의 열차감속조건 등에 따라 사망자 발생 예측이 여의치 않으므로 사고시나리오에 충돌 및 탈선 사고를 포함할 경우에는 불확실성이 증가하게 된다.

따라서, 사고시나리오는 충돌과 탈선을 제외하고 화재사고만을 대상으로 구성하였다. 대신 화재발생 빈도 산정시, 사망자가 발생하지 않은 열차 운전장애훈을 포함시켜 화재발생빈도를 다소 증가시켜, 이러한 조건에서도 안전성이 확보될 수 있도록 방재시설 계획을 검토하여 안전성에 있어 보다 보수적인 접근을 모색하였다.

터널내 화재발생 확률은 화재사고 발생건수를 기준으로 철도 전체노선에서의 열차교통량에 대한 터널구간에서의 열차교통량 비율로 산정한다.

화재발생 시나리오는 열차 주행 방향과, 터널의 부력 방향이 일치하는 조건을 선정하여 적용하였으며, 이러한 열차 운행시의 경계조건은 1차원 해석을 통해 산정한다.

현재의 시나리오에서 분석가능한 방재시설은 대피통로 및 제·배연설비 등이며, 기타 터널 단면적, 구배변화 등은 화재 시뮬레이션에 의해 위험성의 심각도를 반영할 수 있다.

4.5 사건 발생확률

열차 주행방향, 화재감지기 작동여부, 초기진화 여부, 열차기동 여부, 제·배연설비 작동 여부 및 화재위치에 따라 구성된 사고 시나리오에는 적절한 분기비율을 적용하여 시나리오별 사건 발생확률을 산정하여야 한다.

분기비 적용과 관련한 통계 및 분석자료가 없어 현실적으로 정확한 분기비를 결정할 수는 없으나 분기비 적용시 전문가적 판단에 따라 적절한 수준의 분기비를 반영하고 있는 것으로 검토되었으며, 이를 기초로 다음과 같이 분기비를 결정하였다.

그러나, 이 분기비는 향후 추가적인 연구 및 지속적으로 사고자료를 축적, 분석하여 보다 적절한 분기비로 개선할 필요가 있다.

(1) 주행방향

- 시나리오 : 열차의 주행방향을 의미하며 상행 및 하행으로 구분한다.
- 적용 분기비 : 열차의 주행방향별 교통량 비율로 결정한다.

(2) 화재발생

- 시나리오 : 주행열차의 화재발생을 의미하며 객차 및 기관차 화재로 구분한다.
- 적용 분기비 : 영국 RSSB(Rail Safety and Standards Board) 2004년 위험분석 및 건설교통부 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발” 자료에 기초하여, 고속열차 전기식 동차의 화재원인 분석결과에 따라 객차 및 기관차의 화재 비율을 0.7 : 0.3 로 적용한다.

(3) 화재감지

- 시나리오 : 화재발생시 초기 화재감지 여부를 의미하며 화재감지 성공 및 화재감지 실패로 구분한다.
- 적용 분기비 : 장비 실패율은 보통 0.1로 설정37)하고 있으므로, 객차 화재시 감지성공 및 실패 분기 비율은 0.9 : 0.1 을 적용하며, 기관차 화재시는 육안에 의한 인지가 감소되므로 0.8 : 0.2 를 적용한다.

(4) 초기소화

- 시나리오 : 화재발생 초기의 진화 또는 발달 여부를 의미한다.
- 적용 분기비 : 이 항목은 객차 또는 기관차 내부의 소화시스템에 따라 분기비가 결정되며, KTX 객차의 불연성 자재 사용을 고려하면 성공 분기비는 클 것으로 판단되므로 0.9 : 0.1 을 적용한다. 그러나 화재감지가 실패한 경우에는 초기 소화 가능성이 낮아지므로 0.8 : 0.2 로 적용한다. 기관차 화재감지 분기비율은 설치된 6.5 kg ABC 소화기의 유류화

재 소화 능력이 10단위이므로, 적어도 10단위의 유류 화재를 소화할 수 있다고 가정한다. 10단위 능력시험시의 기술된 화재 테스트 면적이 2 m² 이며, 기술된 채움 높이가 0.03 m 인 점을 고려하여³⁴⁾ 소화기의 소화강도를 4.64MW로 예측하였고, 이를 소화가능 개시시간⁹⁾의 열차 화재강도와 비교하여 초기소화 분기비를 산정하였다. 분석에 따라 화재 강도는 소화기의 화재 소화강도보다 작으므로 적절한 초기대응으로 화재의 초기진화를 할 수 있을 것으로 판단되나 기타 불확실성을 고려하여 화재감지가 성공할 경우의 초기소화 성공 빈도를 0.9 : 0.1로 적용하고 화재감지가 실패할 경우에는 0.8 : 0.2로 적용한다.

(5) 열차기동

- 시나리오 : 화재열차의 기동 가능성여부를 의미하며, 열차기동과 열차정지로 구분한다.
- 적용 분기비 : AREMA conference⁴⁾에서 제시된 열차가 기동하여 인접역으로 갈수 있는 성공 분기비는 0.98 정도로 제시하고 있으나, KTX 에 적용된 전기설비의 신뢰도는 이 보다 우수할 것으로 예상되어 0.99 : 0.01 의 비율을 적용한다.

(6) 제·배연설비 유무

- 시나리오 : 제·배연설비의 설치유무를 의미하며, 제·배연설비 가동 및 제·배연 실패로 구분한다.
- 적용 분기비 : Lund university, “Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel” 자료⁴⁾에 기초하여 제·배연설비 미설치시는 전부 제·배연실패로 간주되며, 제·배연설비 설치시의 성공 실패 분기비는 장비 실패율을 고려하여 0.9 : 0.1로 적용한다.

(7) 화재위치

- 시나리오 : 열차의 화재발생 지점을 의미하며, 이는

열차구성조건에 따라 변동되지만, 일반적으로 객차 화재시는 선두부, 중앙부, 후미부 객차화재로 구분하고, 기관차 화재는 선두부, 후미부 기관차화재로 구분한다.

- 적용 분기비 : 화재위치별로 균등하게 분기비를 적용한다.

(8) 피난지체

- 적용 기준 : 한국철도기술연구원의 자료⁹⁾에 의하면, 그림 5에서와 같이 화재감지기 설치시 피난대피까지 4분, 미설치시 6분이 소요되는 것으로 제시하고 있다. 따라서, 피난지체 시간은 4~6분으로 적용하는 것을 원칙으로 한다.

4.6 사고영향 분석

사고영향분석은 각 시나리오별로 수행한 화재연기 확산 CFD 를 통해 예측된 각 지점별 독성가스의 확산 정도와 피난자의 위치를 비교·분석하여 화재연기의 흡입 정도를 산정하여 피난자의 사망위험을 분석한다.

사망위험 평가시 충돌 및 탈선사고에 의한 피해자 예측은 사고 상황시의 여러 조건에 따라 달라지게 되어 사망자 수를 예측하는 것이 매우 곤란하며 화재사고와는 달리 사고자체만으로 사망자가 발생하는 특징이 있다.

또한, 탈선 및 충돌사고에 대한 방재시설계획은 열차의 운영시스템과 관련한 문제로서 화재사고와 같이 사고 이후 승객의 안전을 확보하기 위한 방재시설 계획은 곤란하여 탈선·충돌 사고에 의한 1차적인 사고피해는 고려하지 않으며, 탈선·충돌사고 이후의 2차적인 화재 사고는 화재사고에 포함시켜 사망자수를 예측하는 것이 타당하다고 판단된다.

화재 사고시 발생 가능한 사망자수 평가는 표 12 의 “철도터널 안전성 분석 평가 절차서(감리용)”의 4.4.3항 의 사망자수 예측 방법에 따른다.

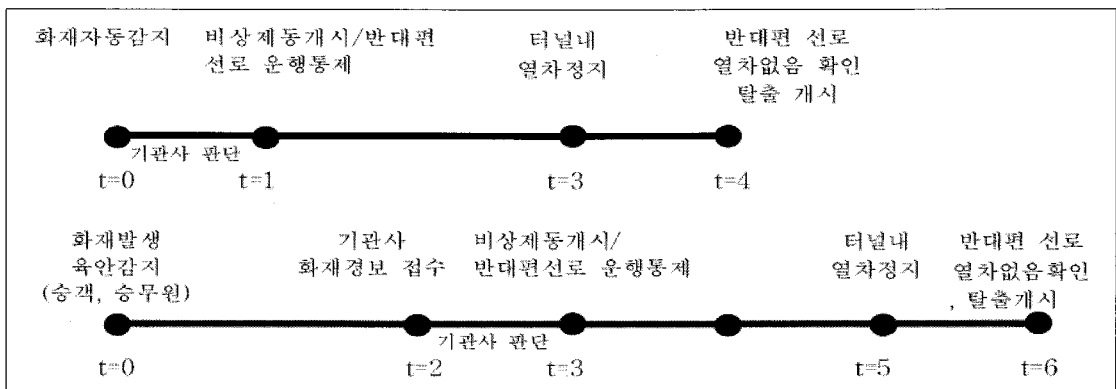


그림 5. 피난지체

표 12. 사망자수 예측(철도기술연구원, “철도터널 안전성 분석 평가절차서”)

- 화재에 의한 피해는 사망자수로 나타내며 피난자의 사망여부는 이론적 방법에 의해서 예측한다.
- 피난자의 사망판정은 화재시 발생하는 유해한 물질들의 데이터를 이용하여 인체에 미치는 영향을 수치적으로 계산하는 방법을 이용한다.
- 이때, 피난자의 이동에 따른 인체의 유독물질 흡입량에 대한 변화를 고려하기 위해 유독물질의 인체 누적량을 고려한다.
- 모든 피난자에 대한 시간별, 거리별, 연기농도 및 흡입가스 농도, 흡입가스 온도 등이 데이터 되어야 하며, 이를 근간으로 하는 피난자 각각의 위험도가 수치화되어 생성되며 이를 제추하여야 한다.

위의 내용을 살펴 볼 때 사망자수 예측 방법은 FED (Fractional Effective Dose) 분석에 따라 실행되어야 하며, 이 분석을 위해서는 기본적으로 화재 시나리오 및 화재 강도에 따른 연기확산 거동 해석과 열차 탑승객의 탈출 거동 해석을 수행한 후, 그 결과를 이용하여 사망자수를 예측한다.

FED 계산을 위한 모델은 PURSER's model, N-GAS model, 미국 FAA의 모델 등이 있으며, FED값을 FAA model 보다 높게 평가하고 있어 FED 분석에 많이 적용되고 있는 PURSER's model을 적용하며, 열환경 및 가시거리에 대한 모델을 추가로 적용한다. FED 에 의한 사망 평가기준은 “ISO/DTS 13571”에서 제시하고 있는 0.3값을 사용하며, FED가 0.1~0.3인 범위에 노출된 피난자들은 중상자로 고려하여 1/10 을 반영하여 부상자에 대한 위험정도를 정량적 위험성 평가에 고려한다.

5. 결론

본 논문에서는 고속철도 방재시설 계획의 적정성 검토를 위해 수행되는 정량적 위험도 분석의 단계별 문제점 및 이에 대한 세부분석방안에 대하여 제안하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

1) 사회적 위험기준

많은 안전성 분석자료 축적을 통한 사회 구성원이 인정할 수 있는 사회적 위험기준 조정 필요하며, 향후 국내 실정에 적합한 사회적 위험기준이 정립되기 전까지 교통시설과 동일한 특성을 갖는 도로터널과 동일한 사회적 위험기준인 HSE 기준을 반영하였다.

2) 화재 규모

국내고속철도차량에 대한 실차화재실험을 통한 화재성장곡선 분석 및 설계기준으로 제시가 필요하며 향후, 국내 실정에 적합한 최대강도가 정립되기 전까지는 객차 및 기관차 화재강도는 모두 10MW 규모로 결정하고, 화재성장율, 화재지속시간, 화재하중을 달리하여 적용하였다.

3) 사고시나리오 및 분기비율

사고종류별로 사고위치, 사고원인, 피해규모를 세분화하여 분석하고 데이터화를 통한 합리적인 사고시나리오 및 분기비율 결정하여야 하며, 연결송수관 설비는 화재사고 후 투입되는 소방대에 의해 가동되는 설비로서 대피승객의 피해경감보다는 연소확대 방지에 적합한 방재시설이므로 제외하는 것이 타당하며 충돌, 탈선은 해석범위에서 제외하되 충돌, 탈선에 의한 화재는 모두 화재사고발생빈도에 포함되는 것으로 고려하였다.

4) 사고피해 영향

사고시 안전시설별로 작동여부, 피해를 줄이는 데 기여한 정도를 종합·분석하여 적용하였다.

본 논문에서 제시한 분기비율 및 화재시나리오는 절대적인 값이 될 수 없지만 이를 참고하여 합리적인 범위 및 기준을 개발하는데 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 판단되며 향후, 단계별 세부수행방안 설정시에는 모든 단계에 걸쳐 적절한 근거자료에 의해 결정되어야 할 것이다.

참고문헌

1. RSSB (Rail Safety and Standards Board), 2004, “Profiles of Safety Risk on the UK Mainline Railway”, Report.
2. Det Norske Veritas Ltd, 2002, “Application of QRA in operational safety issues”, Health and safety executive.
3. Mattias Persson, 2002, “Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel”, Lund University.
4. Yoav Arkin, 2002, “Using quantitative risk assessment (QRA) and cost benefit analysis (CBA) to prioritize fire and life safety risk reduction measures in old railway tunnels”, AREMA Annual conference.
5. Haukur Ingason and Anders, 2004, “Recent achievement regarding measuring of time-heat and time-temperature development in tunnels”, ITA-AITES first conference, pp 87-96.
6. Boon Hui Chiam, 2005, “Numerical simulation of a

- metro train fire”, Canterbury university.
7. E Casale, E Cesmat, J.P Vantelon, M Legrant, E Verbesselt, 2006, “Influence of longitudinal ventilation on the heat release rate of a TGV engine fire”, BHR Group AVVT 12, pp 95-109.
 8. E.Ruffin, A Carrau & C Cwinklinski, 1999, “Numerical Simulation of Locomotive Fires in the Lyon-Turin Tunnel”, International Conference, pp 235-244
 9. 왕중배, 홍선호, 김상암, 박옥정, 2003, “철도터널 및 지하구간에서의 화재사고 위험성 분석연구”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 271-276
 10. American National Standards Organization, “ISO/DTS 13571 Life threat from fires-Guidance on the estimation of time available for escape using fire data”
 11. 건설교통부, “철도시설 안전기준에 관한 규칙”, 건설교통부령 제 476호.
 12. 건설교통부, “철도시설 안전세부기준”, 건설교통부 고시 제 2006 - 395호.
 13. Boras, “Proceedings of the International Conference on Fires in Tunnels”, Sweden.
 14. Subway Environmental Simulation 4 User Guide.
 15. National Institute of Standard and Technology, 2006, “Fire Dynamics Simulator and Smokeview User Guide”, BFRl.
 16. “SFPE 방화공학 핸드북 제3판 1권, 2권”, 한국화재보험협회.
 17. 임재현, 김영근, 김동현, 정찬목, 한국철도학회, 2006, “QRA에 의한 철도터널 방재안전성 평가”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 21-31.
 18. Louise C.Speitel, 1995, “Toxicity Assessment of Combustion Gases and Development of a Survival Model”, FAA.
 19. Palsson, 2004, “Risk Management in Hvalfjurdur Tunnel”, Lund University.
 20. David J Bell, Peter J Floyd, “Societal Risks”, Middlesex University and Risk & Policy Analysts Limited
 21. M.Rausand, 2005, “Some basic risk concepts”, Norwegian University.
 22. S.N.Jonkman and J.K.Vrijling, P.H.A.J.M van Gelder B.Arends, 2003, “Evaluation of tunnel safety and cost effectiveness of measures”, Safety and Reliability.
 23. Det Norske veritas ltd, 2002, “Application of QRA in operational safety issues”, HSE.
 24. Fathi Tarada, Rudolf Bopp, Samuel Nyfeler, Kwang-soo Jegal, Deog-Su Kim, 2000, “Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea”, International conference on major tunnel and Infrastructure Project.
 25. Knoflach H, Pfaffenbichler P.C, “A comparative risk analysis for selected austrian tunnels”, Vienna University.
 26. Hakan Frantzich, 1998, “Uncertainty and Risk Analysis in Fire Safety Engineering”, Lund University.
 27. Bouissou Charlotte, Ruffin Emmanuel, Defert Raphael, Prats Franck, Dannin Eric, “A new QRA model for rail transportation of hazardous goods”, INERIS.
 28. Dan Modi, “Application of Risk Analysis to Product Safety”, Alcon Research Ltd.
 29. Stanford University, 2007, “Special Workshop on Risk Acceptance and Risk Communication”.
 30. Tara Barden, Jason Bro-wn and et al, “Modeling Train Fires in Fire Dynamics Simulator”, WPI.
 31. FIT, final reports of the FIT network, “Annex1~Annex4”.
 32. 김성찬, 유홍선, 최영기, 김동현, 2004, “화재성장 모델이 객차내 화재 특성에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구”, 한국 철도학회지, 제7권 제3호, pp 180-185.
 33. 홍선호, 왕중배, 광상록, 이우준, 2003, “철도안전관리를 위한 사고자료관리 D/B구조에 관한 기초연구”, 한국철도학회 추계학술대회, pp 214-246.
 34. 신제영, 1996, “누구나 알아야 할 화재진압요령”, 한국소방안전협회 통권 91호.
 35. IES, SIMULEX, User manual.
 36. 건설교통부, 2006, “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”, pp 141-143.
 37. Bjorn Hedsdog et al, 1998, “Deterministic analysis of a fire in Stenungsbaden Yacht Club”, Lund University.
 38. 철도기술연구원, 2006, “철도터널 안전성 분석 평가절차서(감리용)”.
 39. M Molaq & L Slutis, “Quantitative Risk Analysis to Optimise Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design”, TNO.
 40. 김원국, 송범, 전덕찬, 2003, “QRA를 이용한 철도터널 방재설계에 관한 연구”, 대학토목학회 정기학술대회, pp 4705~4790.
 41. 김선홍, 문연오, 석진호, 김기림, 김찬동, 유호식, 2008, “호남고속철도터널의 정량적 위험도 분석(QRA)을 위한 세부 기준수립 및 적용사례”, 한국안전공학회 국제학술회의.
 42. 김시격, 신태균, 2005, “터널방재의 최근동향” 대한터널학회, VOL 6 NO 2 pp 51~58.

최원일

1992년 고려대학교 지질학과 이학사



Tel: 02-2128-8373
E-mail: cwiktx@yahoo.co.kr
현재 한국철도시설공단 수도권지역본부 차장

최정환

1988년 연세대학교 토목공학과 공학사
2001년 연세대학교 토목공학과 공학석사



Tel: 042-607-4322
E-mail: kanina@hanmail.net
현재 한국철도시설공단 고속철도기술팀 팀장

문연오

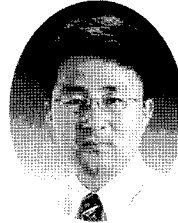
1995년 인하대학교 토목공학과 공학사
1997년 명지대학교 토목공학과 공학석사



Tel: 02-6202-0838
E-mail: y12874@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 지반터널2부 부장

김선홍

1989년 한양대학교 자원공학과 공학사
1991년 한양대학교 자원공학과 공학석사
2003년 한양대학교 자원공학과 공학박사



Tel: 02-6202-0832
E-mail: shkim85@empal.com
현재 (주)유신코퍼레이션 지반·터널2부 상무

유호식

1968년 동아대학교 토목공학과 공학사



Tel: 02-6202-0066
E-mail: y12056@yooshin.co.kr
현재 (주)유신코퍼레이션 철도본부 전문위원