

철도터널에서 차량화재시 정량적 위험도 평가에 관한 연구

유지오^{1*}, 남창호², 조형제³, 김종원⁴

A study on quantitative risk assessment for railway tunnel fire

Ji-Oh Yoo, Chang-Ho Nam, Hyeong-Je Jo, Jong-Won Kim

Abstract As we learned in Daegu subway fire accident, fire in the railway tunnel is prone to develop to large disaster due to the limitation of smoke control and smoke exhaust. In railway tunnel, in order to ensure fire safety, fire prevention and fighting systems are installed by quantitative risk assessment results. Therefore, in this research, developed the program to establish quantitative risk assessment and suggested quantitative safety assessment method including fire scenarios in railway tunnel, fire and evacuation analysis model, fatality estimate model and societal risk criteria. Moreover, this method applies to plan preventing disaster for Honam high speed railway tunnel. As results, we presented the proper distance of escape route and societal risk criteria.

Keywords: Railway tunnel, quantitative risk assesment, societal risk criteria

요 지 대구지하철 화재사고에서와 같이 철도터널 내 화재는 제연과 배연의 어려움으로 자칫 대형 사고로 이어질 가능성이 크다. 철도터널에서는 화재 시 안전성 확보를 위하여 정량적 위험도 평가를 통하여 방재 시설을 설치하도록 되어 있다. 이 연구에서는 터널내 화재시 정량적 위험도평가를 위해서 필요한 화재발생 표준시나리오, 화재 및 대피해석모델, 사망자 추정모델, 사회적 위험도 평가기준 등을 정립하여 철도터널에 대한 정량적 안전성 평가 기법을 제시하고자 하였다. 또한 본 연구에는 각각의 철도터널 화재사고에 대한 정량적 위험도를 평가할 수 있는 프로그램의 개발과 각종 모델을 정립하여 호남고속철도 방재시설 설계에 반영하였다.

주요어: 철도터널, 정량적 위험도 평가, 사회적 위험도 평가기준

1. 서 론

철도는 운송에너지의 효율성, 환경친화성, 안전성 등 여러 가지 측면에서 타 운송수단 보다 일반적으로 우수한 것으로 알려져 있으며, 그린에너지 운송수단으로 각광 받고 있다. 국내의 경우, 최근 경부고속철도의 개통, 호남고속철도의 설계 및 건설, 기존철도노선에 대한 선형개량 사업이 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라서 장대터널의 건설이 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 그러나 대구지하철 화재사고에서 알 수 있는 바와 같이 터널에서의 화재사고는 제연 또는 배연에 제약이 있기 때문에 유독가스 및 열로 인한 인명피해가 발생할 가능성이 높으며, 화재사고가 발생하는 경우, 대형화재사고로 발전할 개연성이 높다.

이에 철도터널에는 화재시 안전성을 확보하기 위해서 방재시설을 설치하도록 법이나 기준으로 정하고 있으며, 특히, 철도시설 안전기준에 관한 규칙(국토해양부, 2008)에서 1 km이상의 터널은 정량적인 방법에 의해서 안전성 평가를 수행하여 그 결과에 따라 방재시설의 설치 여부를 결정하도록 정하고 있다. 그러나 현재 정량적 안전성 평가를 위한 세부지침이 마련되지 못한 실정으로 많은 혼란을 야기하고 있는 실정이다.

터널에서 화재시 위험도는 일반적으로 터널에서 화재 사고가 발생할 빈도와 화재사고의 결과의 곱으로 나타내진다. 그래서 터널의 위험도를 정량화하기 위해서는 사고빈도 및 사고결과를 정확하게 예측하여야 한다. 사고빈도의 경우, 국내뿐만 아니라 외국의 경우에도 특히 철도차량의 화재사고는 그 빈도가 매우 낮기 때문에 통계자료의 대표성을 확보하기가 어려운 실정이다. 또한 사고결과는 인명피해와 차량 및 구조물에 대한 피해로 대별될 수 있으나 이에 대한 통계도 극히 빈도가 작기 때문에 통계적인 방법을 통한 확률론적으로 예측하는

¹신흥대학 건축설비설계과

²(주)범창종합기술 대표

³(주)범창종합기술 상무

⁴(주)범창종합기술 차장

* 교신저자: 유지오 (E-mail: jolew@shc.ac.kr)

것은 어려운 것으로 평가된다.

본 연구는 철도터널에 대한 정량적 안전성 평가의 일환으로 터널내 화재시 정량적 위험도평가를 위해서 반드시 필요한 화재발생 표준시나리오, 화재 및 대피해석 모델, 사망자 추정모델, 사회적 위험도 평가기준 등을 정립하는 것을 목적으로 하며, 이에 본 연구에는 각각의 철도터널 화재사고에 대한 정량적 위험도를 수행할 수

있는 프로그램의 개발과 각종 모델을 정립하여 호남고속철도 방재시설 설계에 반영하였다.

2. 정량적 안전성 평가기법

터널 화재에 대한 정량적 위험도 평가는 사고발생 빈도를 포함하는 화재발생 시나리오를 작성하고 시나리오

표 1. 정량적 위험도 평가절차

검토단계	주내용	상세내용
화재발생 시나리오작성	터널에서 발생 가능한 화재 사고발생 시나리오 작성	<ul style="list-style-type: none"> • 화재사고 발생률 분석 • 차종별 화재강도 및 사고발생률 검토 • 화재열차가 화재시 터널을 탈출할 가능성 분석 및 적용 • 화재가 확대될 빈도에측 및 적용 • 화재발생 위치에 대한 고려
화재해석	화재시 온도분포, 복사강도, 유해가스농도, 가시거리 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 시나리오별 화재시 터널내 풍속을 검토하여 화재해석을 위한 경계조건을 적용 • 호흡선 높이에서 유해가스농도(CO, CO₂), 열환경(온도, 복사강도), 연기농도 및 가시거리에 대한 평가
대피해석	대피자별의 위치 및 대피시간 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 경고방송 시간 분석 및 적용 • 대피자별 열차 탈출시간 및 초기대피시간의 설정 • 인접한 대피자의 밀도 및 거리, 연기농도 등을 반영한 대피자별 대피속도 검토 • 대피자별 대피시간분석
사망자수 추정	시나리오별 사망자수 추정	<ul style="list-style-type: none"> • 시간 경과에 따른 대피자 위치분석 및 화재해석 결과를 동기화하여 유해가스에 노출농도 해석 • 대피자별 유해가스 및 열환경에 노출된 정도를 정량화하는 누적복용(노출)량 분석 • 대피자별 유효복용분량(FED)분석 및 사망여부 판단
사회적 위험도 평가	F/N선도 작성 및 사회적위험도 평가기준과 비교	<ul style="list-style-type: none"> • 누적발생빈도/사망사수(Frequency(F)/Fatalities(N))에 대한 평가 • F/N선도 작성 및 사회적 위험도 평가기준과 비교 • 총괄 Risk Index($\sum frequency \times fatalities$)검토

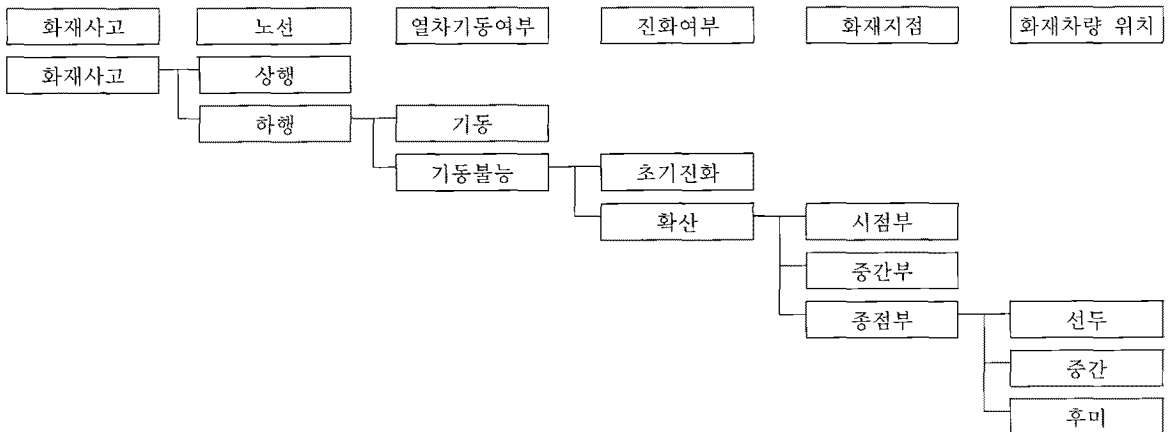


그림 1. 화재발생 시나리오

별 사고결과를 사망자수나 경제적인 비용으로 정량화하여 위험도를 예측하는 기법으로 최근 터널방재시설 설계에 반영하고 있으며, 일반적으로 표 1에 제시한 절차를 통해서 수행하게 된다. 각 단계별 상세내용 및 연구 결과를 다음절에 기술하였다.

2.1 화재발생 시나리오 및 발생률

화재발생 시나리오는 화재사고에 국한하여 사건나무(event tree)기법에 의해서 작성되며, 그림 1에 나타낸 바와 같다. 화재발생 시나리오는 사고가 발생한 노선, 화재열차의 기동가능성, 터널내에서 정차하는 경우에 초기진화의 성공여부를 반영하였으며, 또한 화재열차의 터널내 정차지점 및 화재차량의 위치를 고려하여 기본 시나리오로 설정하였다.

화재사고발생률은 2001년 이후의 여객열차의 평균화재사고 발생률에 근거하여 0.013건/10⁶ tr·km으로 적용하였다. 국내철도터널의 화재사고발생률은 표 2에 나타낸 바와 같이 미국 및 유럽연합(Eurostat)보다는 작으며, 일본(일본국토교통성, 평성18년)과 비교하면 약 10배 이상 높게 평가된다. 이것으로 국내 및 일본의 경우, 아직 방화에 의한 화재사고가 작기 때문으로 화재발생 빈도가 낮은 것으로 평가된다.

열차의 운행방향은 터널경사와 관련하여 터널내 초기기류의 방향에 영향을 미치게 된다. 즉, 터널의 경사가 열차운행방향으로 상향경사인 경우에는 초기의 열차진행방향으로 기류가 형성되고 화재시 연기는 상향경사로 이동하게 되므로 연기의 역전이 현상이 발생하지 않으나 열차의 운행방향이 하향경사인 경우에는 열차운행에 따른 교호환기력에 의해서 초기기류의 방향이 하향경사 방향으로 형성되며, 화재규모가 증가하면 부력에 의한 기류의 방향이 상향경사방향으로 역전되게 된다. 따라서, 화재연기가 대피자에게 미치는 영향은 대피자의 이

동방향과 연기이동방향의 상관관계에 의해서 결정되므로 열차의 운행 방향에 대한 고려가 필요하며, 열차운행 방향에 대한 분기비는 운행 방향별 열차주행킬로(tr·km)의 비로 적용하였다.

터널에서 화재사고 발생시 모든 열차는 기동이 가능한 경우에 터널을 탈출하는 것을 기본원칙으로 하고 있다. 그러나 터널에서 열차가 정차하는 것으로 가정하여 방재시설에 대한 검토를 수행하고 있는 바, 터널내에서 화재가 발생하는 경우, 열차기동 가능성에 대한 합리적인 확률계산이 필요하다.

본 연구에서는 한국철도공사의 안전조사팀에 의뢰하여 터널과 관련한 열차사고에 대한 조사 검토를 수행한 바, 2001년 이후 사고발생건수는 표 3와 같이 총 29건으로 전체사고발생건수 2,820건에 대해서 약 1%로 수준으로 나타나고 있다. 또한 고속차량이 정지하거나 기동할 수 없는 상황에 해당하는 고속열차의 고장건수는 2004년 이후 총 168건으로 고속열차의 총사고건수 1315건의 약 12.7%정도로 나타나고 있다. 그러나 이것은 운행중에 발생한 것만을 고려한 통계치가 아니기 때문에 이 값을 기동할 수 없는 상황으로 판단하는 것은 과대산정의 우려가 있는 것으로 평가된다. Yoav Arkin은 일반철도노선의 터널에 대한 정량적 위험도 평가시 열차의 기동 가능성을 98%를 적용하고 있으며, Alan Beard(2005)는 The handbook of tunnel fire safety에서는 열차의 터널내 화재시 기동하여 탈출할 확률을 90%로 평가하고 있다. 또한 Mann(2005)은 객차에서 수화물에 의한 화재가 발생하는 경우에 대한 위험도 평가시, 열차가 터널에 정차할 가능성 검토하기 위해서 노선중 터널연장의 비를 고려하고 있으며, 또한 화재가 확대되는 경우, 안전지역으로 대피할 수 있는 가능성을 50%로 고려하고 있다. 즉, 열차가 터널에 정차할 가능성은 터널

표 2. 외국의 화재사고 발생률 비교

국 가	건/10 ⁶ tr·km	비고
일본	0.0013	2003~2006년 평균치
미 국	0.0299	2004~2008년 평균치
EU(유럽연합)	0.0358	2004~2007년 평균치
네델란드	0.01	Oresund tunnel 위험도평가

표 3. 차량운행사고 및 터널관련 사고건수

년도별	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	합계
터널관련 사고건수	4	4	6	6	-	4	5	29
전체 사고건수	529	492	484	555		401	359	2,820
고속열차 차량고장	-	-	-	81		50	28	168

구간길이/전체노선×50%로 검토하고 있다.

이와 같이 열차화재가 터널에서 발생하는 경우, 열차의 기동 가능성은 연구자에 따라서 2%에서 10%정도까지 고려하고 있으며, 노선중 터널구간거리의 비를 고려하는 등 상당한 차이를 보이고 있는 것이 사실이다. 따라서 열차의 기동 가능성을 정량화하는 것은 통계자료의 미비로 거의 불가능한 실정으로 호남선의 경우, 중련편성으로 편성당 4대의 동력차가 편성되므로 화재시 열차가 터널내에 정착할 가능성은 거의 없는 것으로 평가되나, 본 연구에서는 The handbook of tunnel fire safety (Beard, 2005)에 제시된 10% 및 재래노선에서의 기동 여부를 98%로 하는 자료를 인용하여, 이들의 평균값에 해당하는 95~97.5%를 열차의 기동확률로 적용하였다.

객차에서 화재 발생시 초기진화의 가능성은 객차 내부의 소화시스템의 비치 및 종류에 따라 결정되어야 한다. 향후 호남선 노선에 운행하게 될 KTX II 객차는 소화기를 비치하고 있으며, 난연자재를 사용하여 내화성능을 높이고 있기 때문에 화재실험에서 알 수 있는 바와 같이 가스에 의해서 지속적인 점화열량을 공급하는 경우에도 화재확대시간까지 약 10분 정도가 소요된다는 점에서 초기진화의 가능성이 아주 높은 것으로 판단된다. 또한 국내의 경우 2001년 이후에 차량화재가 17건이 발생하였으나 사상자가 발생한 것으로 보고되는 사례가 없다는 사실이 이를 반증하는 것으로 평가된다. 외국의 논문에 의하면 Kees Both(2004)는 화재가 확대될 가능성을 10%로 정하고 있으며, Molag(2001)는 화재사고에 대한 시나리오 작성시 flash over가 발생하지 않을 확률을 85%로 고려하고 있으며, flash over에 도달하는 시간이 600초 미만이 될 확률을 3%로 설정하고 있다. Mann은 정량적 위험도평가를 위한 화재시나리오에서 화재가 확대될 가능성은 1.1%정도로 설정하고 있다.

이상에서 화재가 확대될 가능성은 1.1%에서 10%정도로 고려하고 있으며, 호남고속철도 기본 설계시 지문을 거쳐 화재가 확대될 확률을 10%로 적용하고 있는 바, 본 연구에서도 10%를 적용할 것을 제시하는 바이다.

화재지점에 대한 고려는 열차가 터널의 시점부, 중간부, 종점부로 3개의 지점에 정착하는 조건으로 검토하였다.

열차의 화재가 몇번째 차량에서 발생하느냐는 대피방향의 결정에 영향을 미치고, 사망자수에 영향을 미치게 되기 때문에 전체차량에 대해서 모두 검토하는 것이 바람

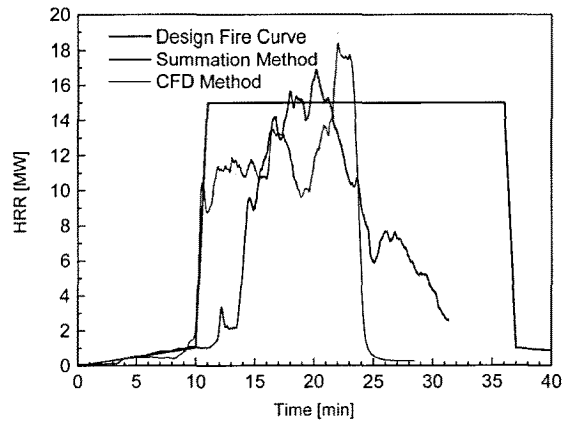


그림 2. 객차 1량에 대한 화재강도추정 및 설계화재강도

직하나, 계산 및 분석시간 등을 고려하여 최소 3개의 차량(예, 선두부, 중간부, 후미부)에 대해서 검토하였다.

2.2 화재해석

화재해석 방법은 1차원 해석 방법과 3차원 해석방법으로 대별되며, 해석을 위한 기본적인 입력값인 화재강도 및 화재성장곡선, 유해가스 발생량 등 기본인자에 대한 산정이 필요하다. 본 논문에서는 목업실험을 통해서 얻어진 결과만을 나타내면 다음과 같다.

2.2.1 화재강도 및 화재성장곡선

그림 2에 제시된 호남고속열차에 대한 목업실험을 통해서 구한 화재성장곡선을 적용한다.

2.2.2 유해가스 발생량

화재해석은 미국의 NIST에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) 프로그램으로 수행하였으며, 화재해석을 위해 기본적으로 요구되는 CO 발생수율(Y_{CO})은 $0.161 \text{ kg/kg}_{Fuel}$, Soot 발생수율은 $0.132 \text{ kg/kg}_{Fuel}$ 을 적용하였다.

2.3 대피해석

철도터널에서 화재시 승객인 안전한 지역까지 탈출하는데 소요되는 시간인 필요안전피난시간(Required Safety Egress Time, RSET)은 식(1)을 적용할 수 있다.

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e \quad (1)$$

여기서,

- t_d : 화재가 감지되는데 걸리는 시간(감지시간)
- t_a : 화재감지 후 승객들이 인지하는데 걸리는 시간(경고방송시간)
- t_o : 화재인지 후 승객들이 피난행동을 할 것인지 결정하는데 걸리는 시간 (대피결정시간)
- t_i : 피난행동을 할 것인지 결정하고 실제 피난 이동을 시작하기 전까지 걸리는 시간(반응시간)
- t_e : 피난 이동을 시작해서 안전한 장소까지 피난을 마치는데 걸리는 시간(이동시간)

이다.

대피해석에서는 감지시간 및 경고방송시간을 경고방송시간으로 합하여 반영하였으며, 대피결정시간 및 반응시간을 열차에서 하차하는 시간으로 반영하였다. 안전지역으로 이동하는 시간은 앞서사람과의 간격, 대피자 밀도, 가시거리에 연동하여 대피속도를 구하여 이동시간을 산정하였다. 차량에서 하차하는 시간은 대피해석 전용 프로그램인 SIMULEX 프로그램(2004, IES사)에 의해서 열차의 차량별로 구하여 반영하였다. 본 해석에서는 경고방송시간은 4분, 최초대피자의 하차시간은 5초 최종대피자의 하차시간은 140초로 적용하였다.

대피속도를 전방 대피자와의 거리[그림 3참조] 및 대피자 밀도[식(2)참조]와 가시거리저하에 따른 보행속도 감소[그림 4참조]를 반영하여 구하였으며, 세가지 방법으로 구한 대피속도 중 가장 작은 값을 대피자의 대피속도로 적용하였다.

$$W_{spi} = k - a \cdot k \cdot D, \quad D_H > 0.55 \text{ person/m}^2 \quad (2)$$

$$W_{spi} = 0.85k$$

여기서, $a=0.266 \text{ m}^2/\text{person}$, D_H : 밀도, k 는 상수로 Ramp나 Corridor, doorway의 경우에는 1.4 m/s이다.

2.4 사망자수 추정방법

일반적으로 국내 도로터널 및 철도터널설계에서 사망자의 판정은 유효복용분량평가에 의한 방법과 유효안전 피난시간(ASET; Available Safety Egress Time) 및 필

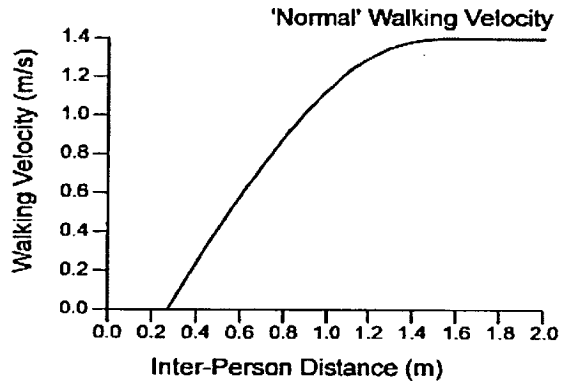


그림 3. 전방 대피자와 거리에 따른 보행속도 변화

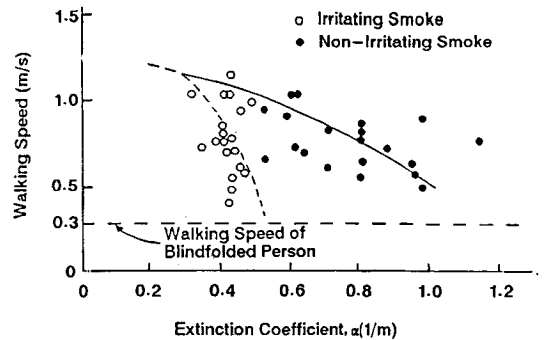


그림 4. 가시도와 보행속도 관계

요안전피난시간(RSET, Required Safe Egress Time)의 비교하는 방법에 의해서 수행하고 있으며, 사망자의 판단기준은 사망자수 추정에 지대한 영향을 미치므로 이에 대한 합리적인 기준의 정립이 요구되며, 전술한 방법을 설명하면 다음과 같다.

2.4.1 유효복용분량(FED)에 의한 방법

유효복용분량(FED, Fractional Effect Dose)은 인간이 열환경이나 유해가스에 노출되어 나타나는 영향을 정량화하기 위한 지수로 $t(\text{min})$ 시간동안 인간이 호흡한 유해가스의 누적복용량($\text{ppm} \cdot t$)과 인간에게 특정한 영향(incapacitation or death)을 미치는 한계누적복용량(Ct)과 비를 말한다.

한계누적복용량은 $L(Ct)_{50}$ 즉, 유해가스에 의해서 50%가 치사에 도달하는 복용량과 무기력상태(incapacitation)

에 도달하는 누적복용량을 기준으로 하고 있으며, 건축물이나 터널의 위험도평가에서는 무기력 상태에 도달하게 되는 한계누적복용량을 기준으로 하며, 유효복용분량(FED; Fractional Incapacitation Dose)이 0.3 이상이 되면 무력화 상태에 도달하는 것으로 평가하여 사망자에 이르는 것으로 추정한다.

유효복용분량(FED_i)을 계산하기 위한 모델은 Purser 모델(SFPE, 2003), N-GAS 모델, 미국의 Speitel(1995)가 제시하고 있는 FAA(Federal Aviation Administration) 모델 등이 있으며, 본 연구에서는 FAA 모델 보다 FED_i 값을 높게 평가하며, 도로터널 위험도 평가에 적용하고 있는 Purser 모델을 적용하였으며, FAA 모델에서 제시된 열환경(온도, 복사강도) 및 가시거리에 대한 모델을 추가로 적용하였으며, 이는 식 (3)과 같다.

$$FED = (F_{ICO} + F_{IHcn}) \times V_{CO_2} + F_{IO} + F_{IHeat} + F_{IRAD} \quad (3)$$

2.4.2 ASET과 RSET의 비교에 의한 방법

이 방법은 방재시스템이나 피난연결통로의 조건에 따라서 어떠한 시스템이 대피안전을 확보해줄 수 있는 시간인 유효안전피난시간(ASET)과 안전지역까지 사람이 피난하는데 소요되는 시간인 필요안전피난시간(RSET)을 비교하여 ASET > RSET인 경우에는 안전하고, ASET < RSET인 경우에는 안전하지 못한 것으로 평가하는 방법으로 대피자별 대피시간을 구하고 이를 ASET와 비교하여 사망여부를 평가한다.

그림 5는 터널연장이 5 km인 경우에 화재해석 및 대

피해석을 수행하여 사망자수를 추정하는 방법을 설명하고 있다.

그림에서 ASET은 대피한계조건에 따른 유효피난 시간을 나타낸 것이다. 즉, ASET1은 1101초로 연기가 대피자를 덮치는 시점을 기준으로 한 것이며, ASET2는 1760초로 등가사망자가 발생하는 시점, ASET3는 2464초로 대피자중 FED_{max}가 0.3을 초과하는 시점을 기준으로 유효피난시간을 산정한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유효피난안전시간은 조건을 어떻게 설정 하나에 따라서 달라질 수 있으며, 기존에 터널설계시 적용한 연기가 대피자를 덮치는 시간을 기준으로 ASET를 평가하는 것은 유효안전피난시간을 과소평가할 수 있음을 알 수 있으며, 이로 인해서 피난대피통로의 간격 등 대피시설이 과다하게 선정될 우려가 있는 것으로 평가된다.

이에 본 연구에서는 ASET를 등가사망자가 발생하는 시점을 기준으로 할 것을 제안하며, 본 연구에는 등가사망자수를 기준으로 사망자수를 산정하였다.

2.4.3 사회적 위험도 평가기준

사회적 위험도 평가기준은 핵발전소 및 위험 물질의 수송 같은 위험물질 관련시설 및 수송수단과 관련된 사회적 위험에 초점을 맞추어 지난 30년에 걸쳐 지속적으로 발전되어 왔다(Ball, 2003).

교통시설에 대한 사회적 위험도 평가는 개방된 지역에서 위험물질이 누출되는 경우에 주변지역의 주민에게 영향을 미칠 수 있기 때문에 인구밀도가 주요 변수가 된다. 따라서 산업화 정도가 높고 인구밀집이 높은 영국, 네델란드 및 홍콩 같은 3개국에서 선도적으로 개발되어 왔으며, 터널에서 위험물질수송과 관련한 사회적 위험도 평가기준은 최근에 발표되고 있는 추세로 도로터널의 경우에는 OECD가 주관하여 위험도 평가프로그램(QRAM, Quantitative Risk Assessment Model)을 개발하고 평가 기준을 제시하고 있으며, QRAM모델은 터널구간에 대한 평가 뿐만 아니라 위험물질이 누출되어 주변지역으로 확산되는 경우를 고려할 수 있도록 하고 있다.

터널에 대한 사회적 위험도 평가는 일반적으로 x축은 사건의 결과인 사망자수를 나타내고 y축은 사건발생빈도(또는 가능성)를 나타내는 그래프 형식으로 표현된다. 즉, 터널이나 위험시설 또는 그에 관련된 활동에 대한

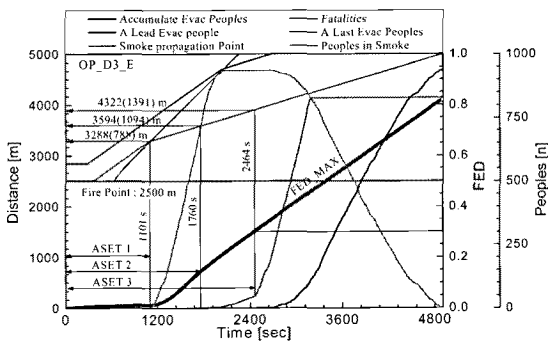


그림 5. 사망자 평가 개념 비교(터널 연장 : 5 km, 대피방향과 연기의 이동방향이 일치하는 경우)

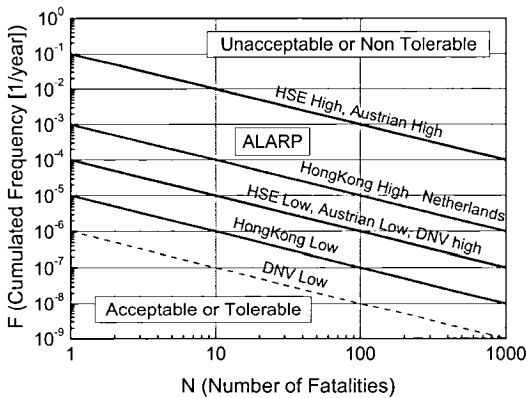


그림 6. 각국의 사회적 위험도 평가기준 비교

위험의 평가결과는 사망자의 수로 표현되며, 사건발생률(또는 가능성)은 연간의 사고발생빈도나 가능성으로 표현된다. 사회적 위험도 평가를 비누적(non-cumulative) 빈도에 근거하여 선도를 작성하는 것은 f/N 선도라 하며, 누적빈도(cumulative frequency)에 근거하는 것을 F/N 선도라 한다. 일반적으로 사회적 위험도 평가기준은 그림 6에 나타난 바와 같이 사회적으로 받아들일 수 없는(non tolerable, unacceptable)영역을 구분하는 high level 기준선과 받아들일 수 있는(tolerable, acceptable)영역을 구분하는 low level 기준선으로 구성되며, low level 영역과 high level 영역의 중간영역은 ALARP(As Low As Reasonably Practicable)영역으로 경제성 분석을 통해서 최대한 위험도를 낮추아하는 영역으로 구분된다. 그림에서 HSE기준(2003, anchor point: $N=10, F=10^{-2}$)과 오스트리아기준이 일치하고 있으며, DNV기준이 가장 엄격한 것으로 나타나고 있으며, Hong Kong의 기준은 잠재적인 위험을 포함하고 있는 산업설비(PHI: Potential Hazardous Installations, 1993)에 대한 기준이며, LPG수송에 관련한 기준으로 발전하였다.

3. 정량적 위험도 평가기준에 대한 적용성 평가

본 절에서는 전술한 정량적 위험도 평가기법의 적정성 및 적용성을 평가하기 위해서 모델터널에 대한 정량적 위험도 평가를 수행하고 전절에서 제시한 조건을 적용하는 경우, 피난연결통로의 적정이격거리에 대한 검토를 목적으로 한다.

표 4. 해석터널 제원

구분	해석조건
터널연장	2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 km
경사도	25% (하행방향기준)
열차정차위치	입구부(1/6지점), 중앙부(1/2), 출구부(1/6지점)
화재성장곡선	10분간 : 1MW이하 유지 11분 : Flash over 도달 (25분간 최대화재강도 15MW 유지) 36분 : 화재최퇴기 도달 37분 : 1MW에 도달
대피시나리오	입구부 및 출구부 화재시 : 최단거리로 대피 중앙부 화재시 : 양방향 대피
열차운행 조건	중련편성(20량), 편도 76편/day
열차 승객수	952명/편 (전 차량을 일반실로 적용)

3.1 해석조건

정량적 위험도 평가를 위한 모델터널 제원은 표 4에 나타난 바와 같이 터널연장은 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 km로 하였으며, 경사도는 25% 대해서 검토하였다. 열차의 정차위치는 하행방향을 기준으로 시점부(터널연장의 입구부 1/6지점), 중앙부(1/2지점), 종점부(터널연장의 출구부 1/6지점)로 하였으며, 각각에 대해서 선두부, 중앙부, 후미부에서 화재가 발생하는 경우에 대해서 해석을 수행하였다.

3.2 화재발생 시나리오

화재발생 시나리오는 전절에서 설명한 바와 같으며, 각 시나리오에 대한 사고발생률 및 회귀기간(RY)은 표 5에 나타난 바와 같다. 회귀기간은 사건이 발생하는 주기를 의미하며, 식(4)로 계산한다.

$$RY = \frac{365n \cdot L_{tnt}}{A_{rate}} f_A \quad (4)$$

여기서, n : 일편성갯수, L_{tnt} : 터널연장, A_{rate} : 사고발생률, f_A : 사건별 분기확률이다.

표 5 및 그림 7에 의하면 연간 열차추행키로는 편도 138,700 tr · km(5 km, 76편/일 기준)이며, 터널에서 화재가 발생할 빈도는 1.80E-3건/yr로 회귀기간이 554.6년으로 평가된다. 또한 본 시나리오에 의해서 화재가 확대

표 5. 시나리오별 화재발생 빈도 및 회귀기간(편도기준, 터널연장 : 5 km)

시나리오	화재사고 발생률 (건/10 ⁶ tr·km)	연간발생빈도 (Frequency per year)	회귀기간 (return year)
화재사고발생(노선별)	1.30E-2	1.80E-3	554.6
→ 기동(95%적용)	1.24E-2	1.71E-3	583.8
기동불가(5%적용)	6.50E-4	9.02E-5	11,092.0
→ 초기진화(90%)	5.85E-4	8.11E-5	12,324.5
화재확산(10%)	6.50E-5	9.02E-6	110,820.1
→ 화재차량위치	7.08E-6	9.82E-7	1,018,549.9

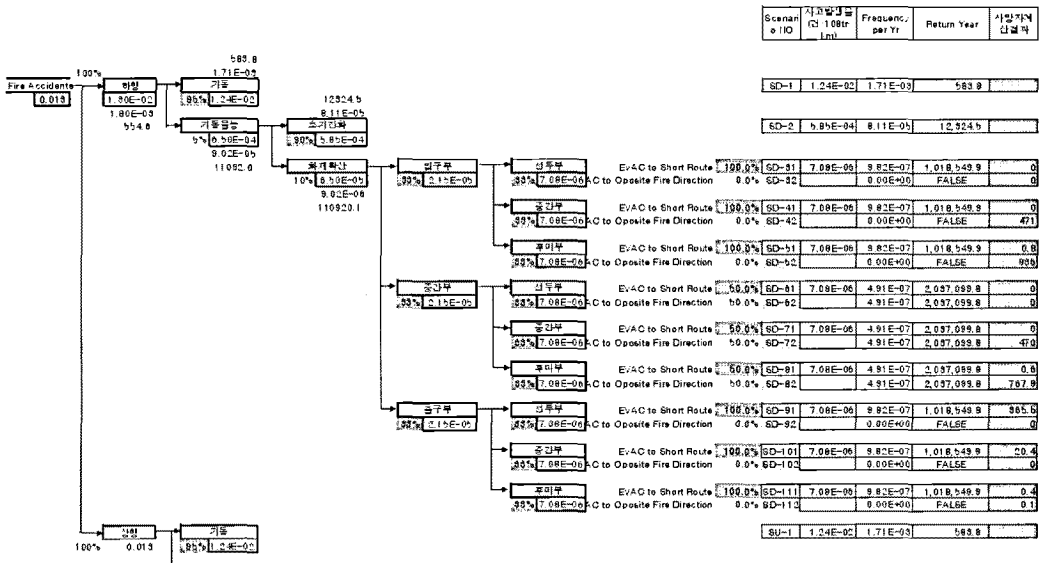


그림 7. 터널 화재발생 시나리오 설정(터널연장 5 km)

될 가능성은 9.02E-6건/yr로 회귀기간은 110,820.1년으로 평가된다. 따라서 연장이 5 km인 터널에서 양방향 어느 한쪽에 화재가 발생할 가능성은 55,410년에 1건으로 평가된다.

3.3 해석프로그램

정량적 위험도 평가프로그램은 기 개발되어 기본설계에 적용한 프로그램을 수정하여 사용하였다. 본 해석에 사용한 해석프로그램은 GUI환경의 프로그램으로 그림 8에 나타난 바와 같이 Event Tree에 의한 화재발생 시나리오작성 모델, FED계산을 위한 터널제원 및 화재강도 등 관련 데이터 입력모델, 대피시뮬레이션 모델, 유해가스 농도 및 열환경 해석모델(1D해석모델), 대피자별 유효

복용분량해석 모델, 사회적 위험도 평가모델로 구성된다. 정량적 위험도 평가의 신뢰성을 좌우하는 사망자수 추정에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 화재해석결과와 대피해석 프로그램의 신뢰성으로 평가된다. 본 연구에서는 화재해석은 화재실험결과를 반영하고 현재 가장 많이 보급되어 화재해석에 적용하고 있는 FDS프로그램을 사용하였기 때문에 비교적 신뢰할 수 있는 결과를 얻은 것으로 평가되며, 대피해석 프로그램의 결과는 SIMULEX에 의한 해석결과와 비교하여 신뢰성을 검토하였다.

3.4 해석결과

화재시 터널내 풍속해석은 동계시 온도조건에 대해서

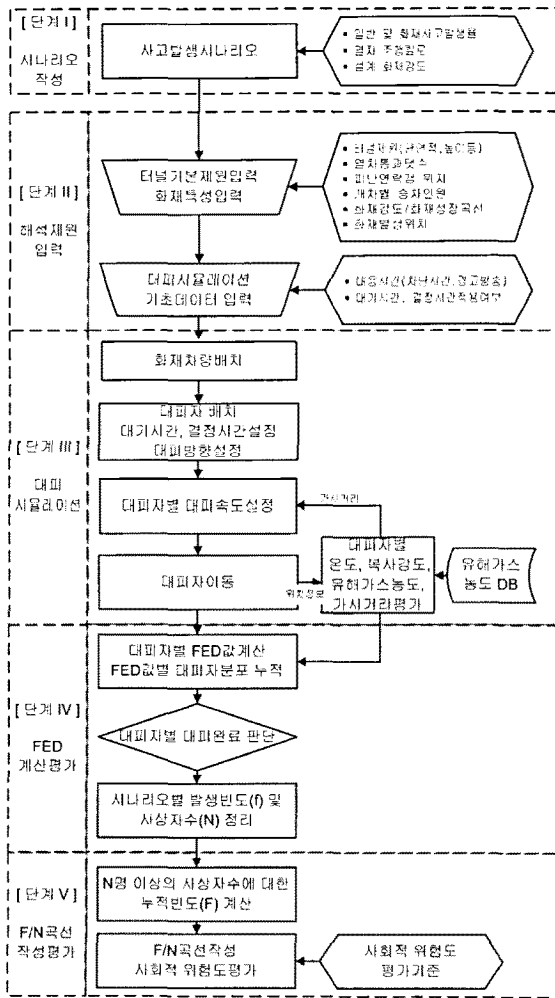
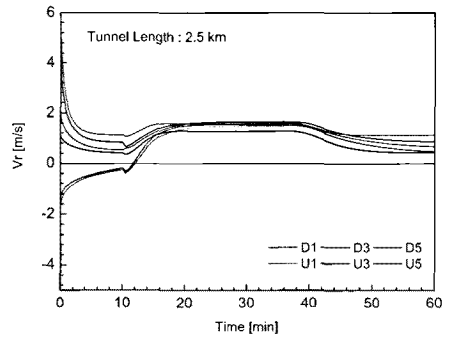


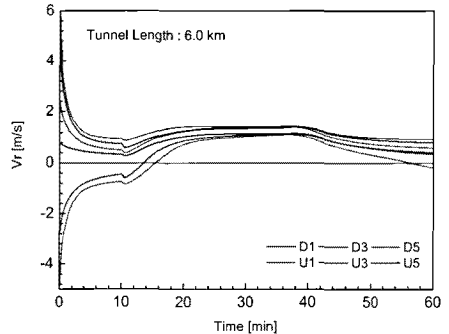
그림 8. 위험도평가 프로그램의 순서도

수행하였으며, 초기풍속(화재전 풍속)은 SES (Subway Environmental Simulation) 프로그램에 의해서 터널연장, 열차운행 및 정지위치를 고려하여 구하였으며, 이를 FDS에 의한 화재해석시 초기풍속으로 반영하여 화재해석을 수행하였다.

그림 9는 화재시 터널내 풍속변화를 나타낸 것으로 그림에서 U1, U3, U5는 열차가 상행으로 운행하는 경우에 하행방향의 진입개구를 기준으로 각각 터널의 시점부, 중앙부, 종점부에 열차가 정차하는 경우이며, D1, D3, D5는 하행방향으로 열차가 운행되는 경우에 각각 터널 시점부, 중앙부, 종점부를 나타낸다.



(a) 터널연장 : 2.5 km



(b) 터널연장 : 6.0 km

그림 9. 터널연장에 따른 화재시 터널내 풍속변화

그림 9(a)는 터널연장이 2.5 km인 경우에 상행방향의 열차가 하행방향기중 종점부에서 진입하여 약 2.0 km를 주행한 후에 정차하는 경우(U1)로 초기풍속은 열차의 주행으로 인해서 상행방향(- : 풍속)으로 형성되나 화재 이후에 열부력에 의해서 +경사 방향인 하행방향으로 풍향(+ : 풍속)이 전환되고 있는 것을 알 수 있다. 그림에서 U1, U3의 경우에는 이와 같은 현상이 발생하고 있으며, U5의 경우에는 열차진행방향으로 터널입구부에 정차하는 경우이기 때문에 교통신기력에 의한 기류의 역전현상은 발생하지는 않고 있는 것으로 나타나고 있다.

그림 10은 초기풍속에 대한 고려의 중요성을 보이기 위해서 U1 지점에 화재열차가 정차하는 경우에 단순히 터널풍속을 적분하여 연기의 이동거리를 나타낸 것이다. 그림에서 터널연장이 짧은 2.5 km의 경우에는 초기에는 연기의 이동이 상행방향으로 형성되어 최대 약 400 m까지 이동하다가 기류가 역전하여 하행방향으로 이동하게 된다. 이 경우, 기류의 역전이 발생한 후에 약 18분 만에 최초로 발생한 연기가 화재지점을 지나게 된다. 따라서

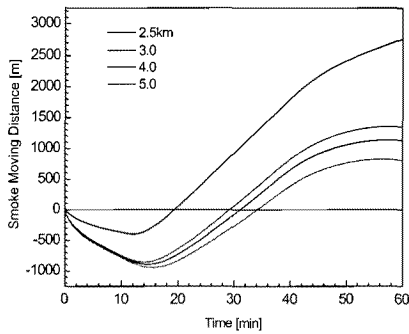


그림 10. 화재시 터널내 연기이동거리

표 6. 열부력에 의한 풍속검토

화재위치	연장	하행	상행
시점부	2.5	1.53	1.51
	4.0	1.48	1.21
	5.0	1.39	1.11
	6.0	1.31	1.01
중간부	2.5	1.63	1.56
	4.0	1.48	1.37
	5.0	1.41	1.27
	6.0	1.40	1.15
종점부	2.5	1.57	1.27
	4.0	1.54	1.24
	5.0	1.49	1.22
	6.0	1.43	1.17

화재지점을 기준으로 상행방향은 연기가 배제된 상태가 될 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 다른 연장조건에서도 동일하게 발생하고 있으나 터널연장이 증가할수록 하행방향으로 연기의 이동이 역전하는데 오랜 시간이 소요되는 것으로 알 수 있다. 이것은 표 6에 나타난 바와 같이 부력에 의해서 발생하는 풍속이 터널연장이 길어질수록 감소하고 터널내 열차의 운행거리가 증가하여 교통환기력에 의한 화재전 초기풍속이 크게 형성되기 때문이다. 터널연장이 2.5 km인 경우에는 부력에 의한 풍속이 1.5 m/s에 달하나 터널연장이 6.0 km인 경우에는 1.0 m/s로 계산된다.

3.4.1 시나리오별 사망자수 추정결과

시나리오별 사망자수 추정결과는 표 7에 나타났다.

표에 제시된 사망자수는 유효복용분량(FED)을 해석하여 등가사망자수를 기준으로 사망자수를 추정된 결과이다.

표 7은 열차의 운행방향이 하행인 경우에 터널연장, 화재시나리오 및 대피방향에 따른 사상자수 추정결과를 나타낸 것이다. 이 경우, 모델터널은 하행방향으로 상향 경사이기 때문에 열부력에 의한 연기의 이동방향은 열차의 초기운동방향과 동일하다. 표에서 대피루트 SR은 차량중 화재위치에 관계없이 최단거리로 대피하는 조건이며, OP는 열차중 화재가 발생한 차량을 기준으로 화재반대방향으로 대피하는 조건을 나타낸 것이다.(이하 SR, OP로 표기한다.)

표에서 시점부 화재시, 선두부 차량에서 화재가 발생하는 경우에는 대피루트 SR과 OP는 동일한 경우로 두 경우 모두 터널의 시점부로 대피하는 경우이다. 이 경우 예상되는 사상자는 터널연장에 관계없이 1명도 발생하지 않는 것으로 추정된다. 이것은 초기의 부력 및 교통환기력에 의한 연기의 이동방향이 하행방향으로 형성되고 화재경과 후에도 연기는 상향경사인 하행방향으로 이동하여 대피자의 위치가 모두 연기이동방향으로 기준으로 상류지역에 있기 때문이다.

그러나 중간부 차량 및 후미부 차량에서 화재가 발생하는 경우, 연기의 반대방향(OP)으로 대피하는 경우에 사상자수가 증가하는 것으로 나타나고 있다,

즉, 화재열차를 기준으로 반대방향인 종점부로 대피하는 경우에 많은 사상자가 발생할 것으로 예상된다. 이것은 초기 기류의 방향 및 열부력에 의한 연기의 이동방향이 종점부로 형성되어 결국에는 연기가 대피자를 덮치는 현상이 발생하기 때문이다. 이 경우에 특히, 터널연장이 연장 6 km인 경우에 추정사망자수가 오히려 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 터널연장이 증가할수록 부력에 의한 승압력은 일정한 반면에 터널벽면마찰이 증가하여 부력에 의한 풍속이 감소하기 때문에 연기의 이동이 지연되는 때문으로 분석된다.

터널의 중간부화재시 대피방향 SR은 열부력의 반대방향인 시점부로 대피하는 경우이며, OP는 화재차량의 반대방향으로 대피하는 경우이다. 이 경우에도 부력에 의해서 기류가 종점부로 형성되기 때문에 종점부로 대피하는 대피자가 연기의 영향으로 위협에 처하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 중간지점에서 화재가 발생하는

표 7. 사상자수 추정결과(하행방향)

Scenario		2.5 km			3.0 km			5.0 km			6.0 km			
Description	대피 방향	발생빈도 건/yr	대피시간 (sec)	사상 자수	발생빈도 건/yr	대피시간 (sec)	사상 자수	발생빈도 건/yr	대피시간 (sec)	사상 자수	발생빈도 건/yr	대피시간 (sec)	사상 자수	
화재+기동		8.56E-04		0.0	1.03E-03		0.0	1.71E-03		0.0	2.06E-03		0.0	
화재+기동불 능+초기진화		4.06E-05		0.0	4.87E-05		0.0	8.11E-05		0.0	9.74E-05		0.0	
시점부	선두부	SR	4.91E-07	758.7	0.0	5.89E-07	851.3	0.0	9.82E-07	1,179.3	0.0	1.18E-06	1,326.7	0.0
		OP	0.00E+00	754.0	0.0	0.00E+00	850.7	0.0	0.00E+00	1,204.7	0.0	0.00E+00	1,347.3	0.0
	중간부	SR	4.91E-07	954.0	0.0	5.89E-07	1,026.0	0.0	9.82E-07	1,345.3	0.0	1.18E-06	1,522.0	0.0
		OP	0.00E+00	4,058.0	450.1	0.00E+00	4,996.0	469.3	0.00E+00	7,202.0	469.3	0.00E+00	7,202.0	438.3
	후미부	SR	4.91E-07	1,192.7	1.0	5.89E-07	1,267.3	0.7	9.82E-07	1,588.7	0.7	1.18E-06	1,780.0	0.9
		OP	0.00E+00	4,186.0	601.3	0.00E+00	5,051.3	850.3	0.00E+00	7,202.0	790.7	0.00E+00	7,202.0	419.0
중점부	선두부	SR	2.45E-07	1,592.7	0.0	2.95E-07	1,804.7	0.0	4.91E-07	2,756.0	0.0	5.89E-07	3,219.3	0.0
		OP	2.45E-07	1,576.7	0.0	2.95E-07	1,806.7	0.0	4.91E-07	2,782.0	0.0	5.89E-07	3,208.7	0.0
	중간부	SR	2.45E-07	1,746.7	0.0	2.95E-07	1,982.0	0.0	4.91E-07	2,904.0	0.0	5.89E-07	3,384.0	0.0
		OP	2.45E-07	2,324.0	9.9	2.95E-07	2,924.7	121.0	4.91E-07	4,972.0	469.0	5.89E-07	5,985.3	470.7
	후미부	SR	2.45E-07	1,980.0	0.8	2.95E-07	2,204.0	0.9	4.91E-07	3,202.7	1.4	5.89E-07	3,607.3	0.5
		OP	2.45E-07	2,392.0	13.5	2.95E-07	2,934.0	130.1	4.91E-07	5,060.0	785.1	5.89E-07	6,143.3	891.6
종점부	선두부	SR	4.91E-07	1,639.3	16.8	5.89E-07	1,824.0	21.9	9.82E-07	1,491.3	4.4	1.18E-06	2,932.0	560.0
		OP	0.00E+00	2,357.3	0.0	0.00E+00	2,737.3	0.0	0.00E+00	4,330.7	0.0	0.00E+00	5,098.0	0.0
	중간부	SR	4.91E-07	1,270.0	0.0	5.89E-07	1,454.0	0.6	9.82E-07	1,343.3	0.1	1.18E-06	2,635.3	163.6
		OP	0.00E+00	2,324.0	0.0	0.00E+00	2,718.7	0.0	0.00E+00	4,289.3	0.0	0.00E+00	5,080.7	0.5
	후미부	SR	4.91E-07	763.3	0.0	5.89E-07	844.7	0.0	9.82E-07	1,173.3	0.0	1.18E-06	1,838.7	1.7
		OP	0.00E+00	756.7	0.0	0.00E+00	839.3	0.0	0.00E+00	1,174.0	0.0	0.00E+00	1,868.7	1.1

경우, 화재차량의 위치에 관계없이 하행경사방향으로 대피하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

터널의 중점부에서 화재가 발생하는 경우에는 일정한 경향성을 보이고 있지는 않으나, 이 경우에도 연기의 이동방향으로 대피하는 경우(선두부 화재시 SR)에 예상되는 사망자수가 증가하는 것으로 나타나고 있다.

3.4.2 정량적 위험도 평가결과

그림 11은 터널연장별 F/N선도(Frequency more than n Fatalities ; N명 이상의 사상자를 초래할 확률/N Fatalities) 및 사회적 위험도 평가기준을 나타낸 것이다. 그림에서 HSE기준은 영국의 Health Safety Executive에서 제시하고 있는 기준으로 국제상설도로협회(PIARC)와 OECD에서 도로터널의 안전성평가를 위해서 제시하고 있는 기준과 동일하며, PHI은 홍콩에서 잠재적 위험

물 수송 및 산업과 관련하여 사회적 위험도 평가기준으로 제시하고 있는 기준으로 국내의 철도터널에 대한 정량적 안전성 분석에 적용하도록 정하고 있는 기준이다.

그림에서 터널연장이 2.5와 3.0 km인 경우에 최대사망인원은 거의 비슷한 것으로 나타나고 있으며, 터널연장이 5 km를 초과하는 경우에는 F/N선도가 PHI기준의 상위레벨을 초과하여 Unacceptable영역에 F/N 곡선이 위치하게 된다.

따라서 본 연구에서 제시하고 있는 정량적 안정성 분석기준을 적용하는 경우에 모델터널에 대해서는 터널연장이 5 km를 초과하는 경우에는 사상자수를 줄이기 위해서 대피환경을 확보하기 위해 제연설비나 피난연결통로의 설치가 필요한 것으로 판단할 수 있다. 또한 HSE 기준을 적용하는 경우에는 ALARP영역의 범위가 너무 광범위하여 터널연장이 6 km를 초과하여도 ALARP영

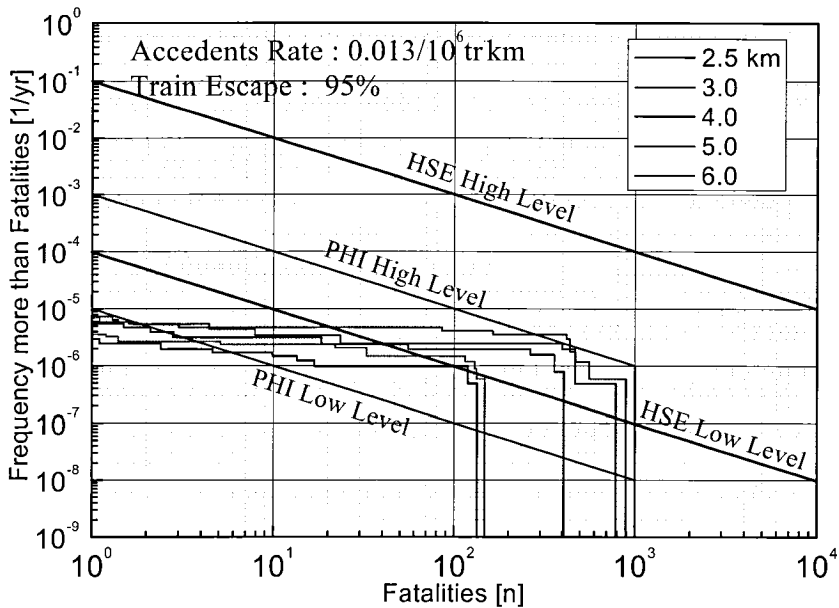


그림 11. 모델터널 연장별 F/N곡선 및 곡선 및 사회적 위험도 평가기준

역을 초과하지 않는 것으로 나타나고 있다.

이에 본 연구에서는 고속철도에 대한 사회적 위험도 평가기준으로 PHI기준을 적용할 것으로 제안하는바 이다. PHI기준을 적용하는 경우, 본 연구의 결과를 통해서 개별터널별로 제원 및 통행량이 다르기 때문에 차이가 있을 수 있으나, 호남선 터널의 경우에는 약 5 km부터는 피난대피통로를 설치하는 것이 사회적 위험도 평가 기준을 만족할 수 있을 것으로 평가된다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도터널에 대한 화재시 정량적 위험도 평가기법을 도출하고 정량적 위험도 평가를 위한 프로그램을 개발하였으며, 이를 호남고속철도 노선에 적용하여 정량적 위험도평가를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 철도터널의 화재사고 발생률은 2001년 이후의 통계자료를 근거로 여객열차에 대한 평균화재사고 발생률로 산정하였으며, 화재사고 발생률은 0.013건 / 10^6 tr · km으로 분석되었다. 이 값을 5 km 연장의

호남고속철도 터널에 적용하는 경우, 사망자가 발생할 가능성이 있는 화재사고의 회귀기간은 55,410년으로 평가되었다.

2. 유효복용분량에 대한 평가결과, CO 및 온도가 사망자수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
3. 전방 대피자와의 간격, 주변 대피자밀도, 연기농도에 따른 가시거리에 영향을 받는 대피자의 보행속도는 가시거리의 영향이 가장 높은 것으로 평가되며, 연기가 대피자를 초과하는 순간 대피속도가 최소속도로 급격하게 감소하는 경향을 보인다.
4. 터널내 화재시 예상되는 사망자수는 터널내 기류의 방향과 대피방향의 상관관계에 의존하며, 예상되는 바와 같이 대피방향과 기류의 방향이 동일한 경우에 사망자수가 가장 많이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 터널내 차량 화재시 대피방향은 화재에 의한 열부력에 의해 형성되는 기류의 반대방향으로 대피하는 것이 대피안전에 보다 효과적인 것으로 평가된다.
5. 연장별 사회적 위험도 평가에서는 터널연장이 5 km를 초과하는 경우에는 PHI의 적용기준을 초과하는 것으로 나타나고 있으며 HSE에서 제시하는 사회적 위험도 평가기준을 적용하는 경우에는 터널연장이

6 km인 경우에도 ALARP영역을 초과하지 않는 것으로 나타나고 있다.

6. 따라서, 본 연구 범위에서는 PHI기준을 사회적 위험도 평가기준으로 적용하는 것이 타당한 것으로 제시하는 바이다.
7. 본 연구의 결과, 사회적 위험도 평가기준으로 PHI기준을 적용하는 경우, 본 연구에서 대상의 모델터널에 대해서는 터널연장이 5 km이상인 경우에는 피난연결통로가 필요한 것으로 평가되나, 이 결과는 터널제원, 열차통과갯수, 통과열차의 종류에 따라서 달라질 수 있다.

참고문헌

1. 국토해양부 (2008), 철도시설안전기준에 관한 규칙
2. 일본 국토교통성 철도국, 평성 18년도 철도통계연보
3. <http://www.tsb.gc.ca/eng/stats/rail/2007-01/index.asp>
4. Beard, A., Carvel, R. (2005), The Handbook of Tunnel Fire Safety, Thomas Telford, UK
5. Ball, D.J. (2003), Societal risks - Final report, School of Health, Bio & Environmental Sciences, Middlesex Univ., U.K.
6. Dineno, P.J. (2004), The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineering, Boston, USA.
7. Eurostat, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page?_pageid=0,1136228,0_45572954&_dad=portal&_schema=PORTAL
8. HSE, 2003, Transport fatal accidents and FN-Curves, 1967-2001, HSE book.
9. IES, 2004, SIMULEX User Manual, UK
10. Munro, J., Scott, P. (1999), Tunnel design fire assessment, Proceedings of International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnel, Lyon, France
11. Both, K. (2004), Present-day design fire scenarios and comparison with test results and real fires: Structures & equipment, Proceedings of 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, Prague, Czech Republic.
12. Speitel, L.C. (1995), Toxicity assessment of combustion gases and development of a survival model, DOR/FAA/AR-95/5
13. Molag, M., Mierlo, R., Wiersma, T. (2001), Realistic fire scenarios for safety assessment of train fires in tunnels, Proceedings of 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, Spain.
14. Mann, P. (2005), Fire Risk Assessment Study for a High Speed Train, PMSC Limited Paper on Generic Approach to Fire QRA for High Speed Trains

접수일(2010.3.29), 수정일(2010.5.17), 게재확정일(2010.7.1)