

철도터널의 안전성 분석방법 소개 및 사례연구

- 조형제 / (주)범창종합기술, hjjo@bumchang.co.kr
- 김종원 / (주)범창종합기술, jwkim@bumchang.co.kr
- 유지오 / 신홍대학 건축설비설계과, jolew@shc.ac.kr

“철도시설 안전기준에 관한 규칙”에서 정한 안전성 분석 방법을 소개하고 철도터널 안전성 분석사례를 기술한다.

산악지형이 많은 국내의 경우 원거리 지역간의 여객 및 화물수송을 위해 철도 운송수단을 많이 이용하고 있으며, 특히 산악지대를 통과하는 노선은 고속화계획에 따라 선형이 직선화될 수밖에 없는 실정으로, 현재 많은 터널이 건설되어 운영되고 있으며, 열차의 터널통과시간이 증대하고 있는 실정이다. 또한 최근 경부고속철도의 개통, 호남고속철도의 설계 및 건설, 기존노선에 대한 선형개량 사업이 활발히 진행되고 있어, 장대터널 건설이 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 철도교통은 타 운송수단 보다 정시성, 환경친화성, 안전성 등에서 매우 우수한 것으로 평가되고 있으나, 대구지하철 화재사고에서 알 수 있는 바와 같이 터널에서 화재사고가 발생하면 유독가스 및 열로 인해 많은 인명피해가 발생할 개연성이 높다.

이에 철도터널에서 화재시 안전성을 확보하기 위해서 “철도시설 안전기준에 관한 규칙”에서 1 km 이상의 터널에 대해 정량적인 방법에 의해서 안전성 평가를 수행하고 그 결과에 따라 대피통로, 배연설비 등의 방재시설 설치여부를 결정하도록 규정하고 있다. 그러나 현재 정량적 안전성 평가를 위한 세부지침이 마련되지 못한 실정으로 많은 혼란을 야기하고 있는 실정이다.

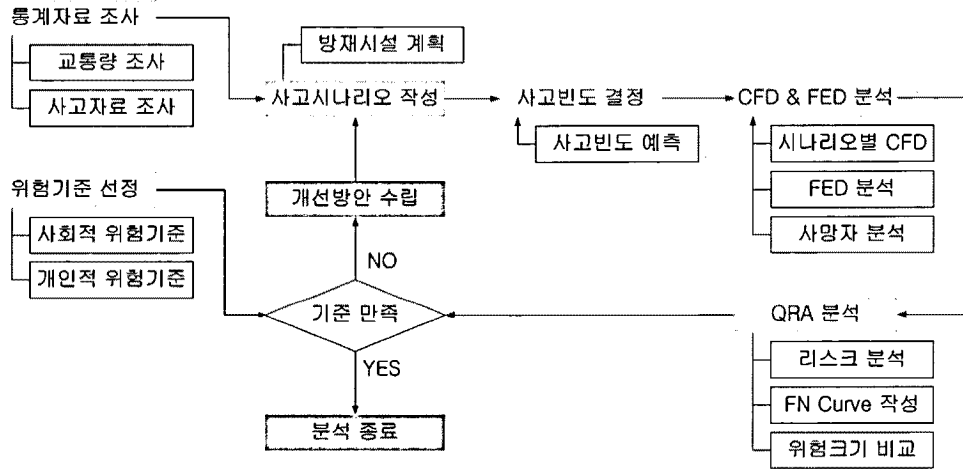
위험도는 일반적으로 화재사고가 발생할 빈도와 그 결과의 곱으로 표현되기 때문에, 터널의 화재위험도를 정량화하기 위해서는 사고빈도 및 사고결과를 정확하게 예측하여야 한다. 사고빈도의 경우,

국내뿐만 아니라 외국의 경우에도 철도차량의 화재사고에 대한 빈도가 매우 낮기 때문에 통계자료로서 대표성을 갖는다고 보기가 어려운 실정이며, 사고결과는 인명피해와 차량 및 구조물에 대한 피해로 대별될 수 있으며 이에 대한 통계가 미비하여 통계적인 방법을 통한 확률론적으로 예측하기에는 기존의 데이터가 아주 미흡한 것으로 평가된다.

최근 한국철도시설공단에서는 철도터널에서의 안전성 평가와 관련하여 “호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 안전성 평가(QRA) 기준”을 작성하였으며, 이를 통해 철도터널내의 정량적 안전성 평가 세부절차 및 관련 근거를 제시하여, 안전성분석수행을 위한 지침을 제시하였다. 본 고에서는 정량적 안전성 분석에 대한 전반적인 절차 및 세부기준에 대해 설명하고자 한다.

정량적 안전성 분석 절차

철도터널에 대한 정량적 안전성 분석 수행절차는 그림 1과 같은 순서로 진행된다. 부연하자면, 기초 자료로서 국내 철도터널 사고자료 및 연간 열차교통량 조사를 통해 전체 화재사고 발생율을 산정하고, 이를 기초로 터널구간내의 사고빈도를 결정하게 된다. 또한 터널구간의 화재사고 발생과정을 사건수목분석(ETA : Event Tree Analysis)법을 적용하여 그림 3과 같이 전개하고 전개된 각 시나리오별로 화재연기 확산 CFD를 수행하게 된다. 그 다음 시나리오에 따른 연기확산 CFD 해석결과를 반영하여 피난대피해석을 수행하여 탈출승객의 유해가스에 대한 노출정도를 정량화하는 유효복용분량(FED : Fractional Effective Dose)을 해석하여 사망위험성



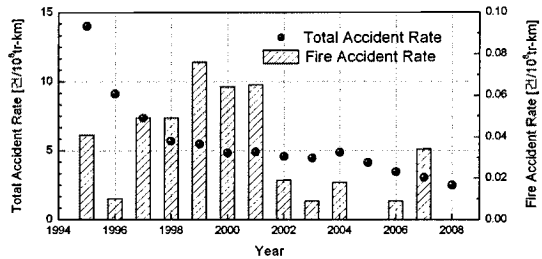
[그림 1] 정량적 안전성 분석 절차

을 평가하고 사망자수를 추정한다. 시나리오별 발생빈도와 사망자수를 기초로 FN 곡선을 작성하고 위험의 분포를 사회적 위험기준과 비교하여 만족여부를 결정하게 된다. 이 과정에서 사회적 위험기준 초과시 대피통로 추가설치 등의 적절한 방재시설 계획을 보장하여 일련의 과정을 재검토하게 된다.

화재사고 발생빈도

국내에서의 터널내 화재사고는 방화로 다수의 사상자가 발생한 대구지하철 화재사고나 서울지하철 7호선 화재사고를 제외하고 인명피해를 수반한 화재사고가 일반철도 터널내에서 발생한 사례가 없기 때문에 통계자료의 신뢰도가 낮으나, “호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 안전성 평가(QRA) 기준”에서는 2001년 이후의 운전사고 및 운전장애로 발생한 화재사고를 고려하여 여객열차의 평균 화재사고 빈도를 $0.013\text{건}/10^6\text{ tr} \cdot \text{km}$ 로 제안하고 있다. 그림 2는 철도시설공단에서 매년 공개하는 철도통계연보에 수록된 운전사고 및 운전장애를 바탕으로 산정한 사고발생빈도를 나타낸 것이다.

이러한 평균 화재사고 빈도를 활용하여 분석터널에서의 화재사고 발생건수를 추정할 수 있으며, 화재사고 시나리오의 기준 발생빈도로 이 값을 적용한다.



[그림 2] 국내 사고발생빈도

사고 시나리오

사고 시나리오는 그림 3과 같이 화재사고에 국한하여 사건수목(Event tree)기법에 의해서 작성하며, 사고가 발생한 노선, 화재열차의 기동가능성, 터널내에서 정차하는 경우, 초기진화의 성공여부를 반영하였으며, 또한 화재열차의 터널내 정차지점 및 화재차량의 위치를 고려하여 기본 시나리오로 설정하고 있다.

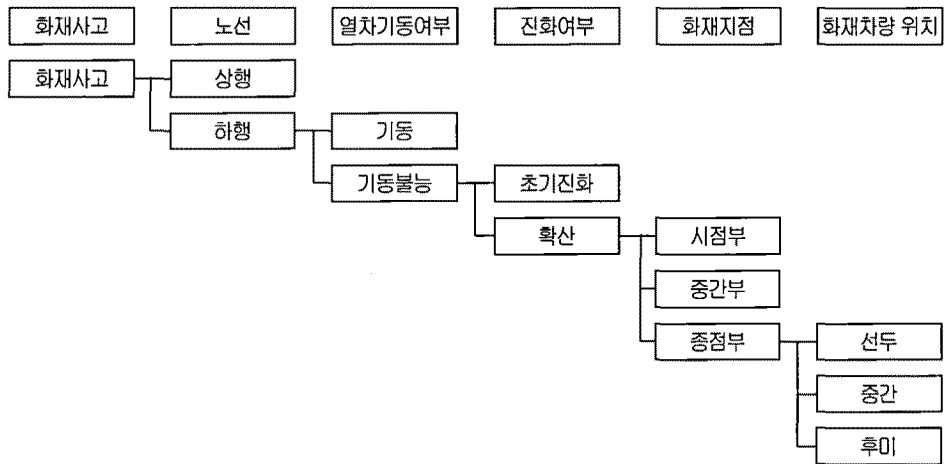
화재열차의 경우 터널외부에 정차하거나 터널내부 화재시 신속히 외부로 탈출하는 것이 기본적인 사고대응지침이나, 부득이하게 터널내 정차할 경우에 발생할 수 있는 위험의 정도를 파악하기 위해 정량적 안전성 분석을 수행하므로, 터널내 정차조건을 시나리오에 반영하여 위험을 분석하게 된다.

또한 터널내 열차의 정차위치는 터널내 모든 지점이 대상이 될 수 있으나, 터널시점, 중앙, 종점부에 정차하는 것으로 가정하였다. 열차의 화재지점은 그 위치에 따라 승객의 피난방향에 영향을 미치게 되고, 사망자 발생정도가 변동되므로 전체 열차에 대한 검토가 필요하나 본 시나리오에서는 계산시간 및 분석비용의 증가를 고려하여 열차 선두, 중앙, 후미화재를 고려하고 있다.

사고시나리오의 각 단계별 분기비율 결정에 있어 분기항목에 대한 국내통계자료는 전무한 실정이며 이로 인해 합리적인 분기비율 결정에 어려움이 있다. 몬테카를로 시뮬레이션 기법 등을 이용한 확률론적 위험성 분석(Probabilistic Risk

Analysis) 방법도 있으나, 철도터널 화재사고의 경우 대상 모집단의 통계치에 대한 신뢰도가 낮기 때문에, 난수발생을 통한 확률론적 접근의 기본이 되는 확률분포함수, 표준편차, 평균, 최대값, 최소값의 불확실성이 높으며, 결과물의 신뢰도가 떨어질 수 있다.

“호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 안전성 평가(QRA) 기준”에서는 분기비율 결정에 있어 국외논문, 지침서 및 연구자료를 중심으로 적용현황을 조사분석하여, 합리적인 수준의 분기율을 제시하고 있으며, 그 값을 사고시나리오의 분기율로 적용하고 있다. 이와 같이, 사고시나리오의 분기율에 대한 접근은 전체 화재시나리오의 발생빈도에 영



[그림 3] 사고발생 시나리오 구성

<표 1> 사고시나리오의 분기율 정리

구분	분기율	비고
주행노선	• 하행 : 상행 = 주행열차비율	• 열차의 방향별 운전대수 비율 적용
열차기동	• 기동 : 미기동 = 0.95 : 0.05	• Yoav Arkin : 98% 적용 • Alarn Beard : 90% 적용
초기소화	• 소화 : 확대 = 0.9 : 0.1	• Kees Both : 10% 적용 • Mann : 1.1% 적용 • 호남고속철도 : 10% 적용
정차위치	• 입구 : 중앙 : 출구 = 0.33 : 0.33 : 0.33	• 등가확률 적용
화재위치	• 선두 : 중앙 : 후미 = 0.33 : 0.33 : 0.33	• 등가확률 적용
설비고장	• 성공 : 실패 = 0.98 : 0.02	• 도로터널 제연팬 고장시 2% 적용



향을 주기 때문에, 분기율의 적용시 각별한 주의가 필요하며, 이에 대한 명확한 증거를 제시할 필요가 있다. 표 1에는 “호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 안전성 평가(QRA) 기준”에서 제시하고 있는 각종 분기비율을 정리하여 나타내었다.

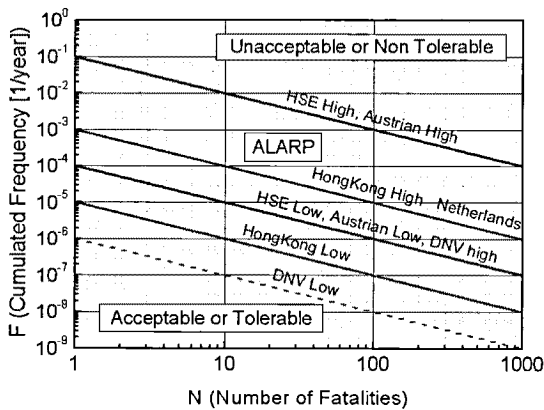
사회적 위험기준

터널에 대한 사회적 위험도 평가시 해당터널의 위험은 그래프로 표현할 수 있다. 일반적으로 그래프의 x축은 사건의 결과인 사상자수를 나타내고 y축은 사건발생빈도(또는 가능성)를 나타낸다. 즉, 터널이나 위험시설 또는 그에 관련된 활동에 대한 위험의 평가결과는 사상자의 수로 표현되며, 사건발생률(또는 가능성)은 연간의 사고발생빈도나 가능성으로 표현된다. 사회적 위험도에 대한 평가를 비누적(non-cumulative) 빈도에 근거하여 선도를 작성하는 것으로 f/N 선도라 하며, 누적빈도(cumulative frequency)에 근거한 것을 F/N 선도라 한다. 일반적으로 사회적 위험도 평가기준은 그림 4에 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

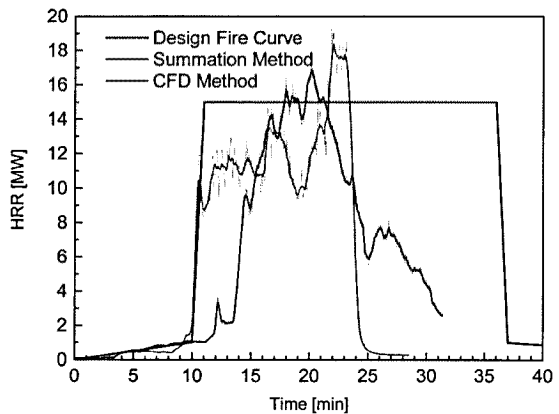
통해서 최대한 위험도를 낮춰야하는 노력이 요구되는 영역으로 구분된다.

현재 국내에는 사회적 위험기준에 대해 정립되어 있지 않으나, 최근의 사회적 위험기준에 대한 국내 동향을 살펴보면 “철도터널의 안전성분석 평가절차서(감리용)”에서 홍콩 PHI 기준을 제시하고 있고, 도로터널의 경우에도 국토해양부의 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침”에서 홍콩 PHI 기준을 사회적 위험기준으로 제시하고 있다. 또한, 호남고속철도 실시설계 시 수행한 “호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 위험도 평가(QRA) 기준”에서도 사회적 위험기준으로 홍콩 PHI 기준을 제시하고 있으며, 국내에서 수행된 대부분의 철도터널 안전성 분석 사례에서도 홍콩 PHI 기준을 적용하고 있다.

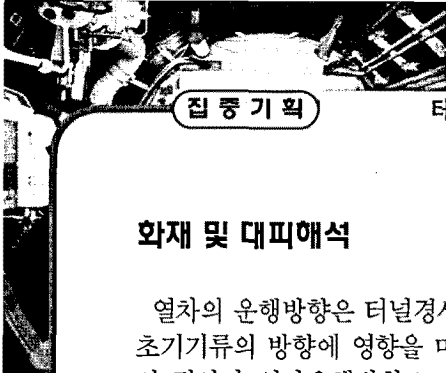
철도터널의 안전성은 통계적으로 볼 때 상당히 높은 편이나, 지하공간에서 발생하는 화재사고의 피해규모는 예기치 않은 상황으로 발전하여 상당히 커질 수 있고, 또한 사회 전체적인 안전에 대한 요구의 증대로 적절한 방재시설의 강구가 필요하다. 따라서 향후 국내 실정에 적합한 사회적 위험기준이 정립되기 전까지는 이 같은 사회적인 안전요구수준을 충족하기 위해, 국내 적용사례가 가장 많고, 도로터널 방재기준에서도 적용하고 있으며, 비교적 높은 안전도를 요구하는 홍콩 PHI 기준을 반영하는 것이 현재의 국내의 현실에 비춰 바람직할 것으로 판단된다.



[그림 4] 각국의 사회적 위험기준



[그림 5] 객차 1량에 대한 화재강도추정 및 설계화재강도



화재 및 대피해석

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 역전현상이 발생하지 않으나 열차의 운행방향이 하향경사인 경우에는 열차운행에 따른 교통환기력에 의해서 초기기류의 방향이 하향경사방향으로 형성되며, 화재규모가 증가하면 부력에 의한 기류의 방향이 상향경사방향으로 역전되게 된다. 이와 같이 사고위치별 터널내 풍속변화는 다른 양상을 보이게 되며 이러한 교통환기력과 화재시 열부력에 따라 터널내 화재연기의 확산정도가 화재시 나리오별로 다르게 발생하게 된다. 따라서, 화재연기가 대피자에게 미치는 영향은 대피자의 이동방향과 연기이동방향의 상관관계에 의해서 결정되므로 열차의 운행 방향별 화재해석을 수행하여야 하며, 열차의 사고위치 정차에 따른 터널내 교통환기력을 반영하기 위해 1차원 해석을 수행하여 기류경계조건을 반영한다.

화재해석시 가장 주요한 인자는 화재강도 선정이라 할 수 있다. 국내의 경우 열차화재에 대한 실측자료가 전무한 실정이어서 대부분의 방재 엔지니어들은 국외자료를 통해 화재강도 및 화재가스 발생량을 추정하여 이를 화재해석에 적용하고 있는 실정이다.

최근 호남고속철도 설계와 관련하여 KTX2 목업 차량에 대한 실측 화재실험이 수행되어 그림 5와 같이 설계화재강도를 15 MW로 선정하였고 화재성장 곡선과 CO가스 및 검댕(soot) 발생량 등의 실측치 및 적정 발생량을 제시하였다. 물론, 연소조건 변화시 연소성상이 달라져 이 값의 변동소지는 있으나, 국내 최초로 화재실험을 통한 화재강도 및 가스 발생량 평가라는 측면에서 의의가 크다 할 수 있다.

KTX2 차량은 실험에서 볼 수 있듯이, 점화원을 지속적으로 공급할 경우에도 10분이 경과한 후에야 대형화재로 발달하므로, 차량내 비치된 소화기를 사용한 초기진화 활동으로 충분히 화재를 소화할 수 있는 시간적 안전여유를 확보하고 있지만, 일단 화재가 성장하게 될 경우, 가스 발생량은 일반열

차 수준으로 발생하게 되는 것으로 조사되었다.

열차에서 대피하는 승객은 기본적으로 화재감지 및 경고방송을 통해 사고를 인지한 이후에 위험구역에서 벗어나려는 행동특성을 보이게 된다. 이러한 경고방송에 소요되는 시간은 화재감지기가 설치된 차량의 경우에 4분 정도 소요되는 것으로 알려져 있다. 사고열차를 벗어난 승객은 기본적으로 화재를 피해 반대방향으로 대피를 시작하게 되며, 화재연기확산속도에 따라 연기에 노출되어 유독가스를 흡입할 경우 사망위험에 이르게 된다. 이러한 유독가스 흡입의 정도에 따른 사망위험을 평가하기 위해 “호남고속철도 차량 화재강도 및 정량적 위험도 평가(QRA) 기준”에서는 FAA(Federal Aviation Administration)보다 FEDI값을 높게 평가하며, 도로터널 위험도 평가에 일반적으로 적용하고 있는 Purser모형을 적용하고 있으며, FAA모델에서 제시된 열환경(온도, 복사강도) 및 가시거리에 대한 모델을 추가로 적용하여 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

정량적 안전성 분석 적용사례

정량적 위험도 평가를 위한 모델터널 제원은 표 2에 나타낸 바와 같이 터널연장은 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 km를 대상으로 하고, 열차운행횟수는 편도 76편성/일을 적용하였다.

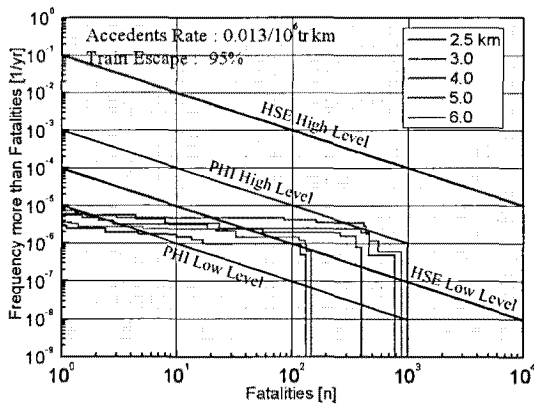
탈출승객의 사망위험 분석을 수행하기 위해 화재

<표 2> 해석터널 제원

구분	해석조건
터널연장	• 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 km
경사도	• 25°
열차운행 대수	• 편도 76회/일
열차승객수	• 952명/열차
열차정차	• 터널 입구(1/6), 터널중앙(1/2), 터널 출구(5/6)
열차화재 위치	• 열차 선두부, 중앙부, 후미부
대피시나리오	• 화재반대방향(OP) : 화재발생위치의 반대 방향으로 피난함 • 인접출구방향(SP) : 가까운 출구방향으로 피난함

<표 3> 사망자수 추정결과(하행기준)

Scenario		2.5 km		3.0 km		5.0 km		6.0 km	
Description	대피 방향	발생 빈도건/yr	사상자수	발생 빈도건/yr	사상자수	발생 빈도건/yr	사상자수	발생 빈도건/yr	사상자수
시정부	선두부	SR 4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0	9.82E-07	0.0	1.18E-06	0.0
	OP	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0
중간부	SR	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0	9.82E-07	0.0	1.18E-06	0.0
	OP	0.00E+00	450.1	0.00E+00	469.3	0.00E+00	469.3	0.00E+00	438.3
후미부	SR	4.91E-07	1.0	5.89E-07	0.7	9.82E-07	0.7	1.18E-06	0.9
	OP	0.00E+00	601.3	0.00E+00	850.3	0.00E+00	790.7	0.00E+00	419.0
중점부	선두부	SR 2.45E-07	0.0	2.95E-07	0.0	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0
	OP	2.45E-07	0.0	2.95E-07	0.0	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0
중간부	SR	2.45E-07	0.0	2.95E-07	0.0	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0
	OP	2.45E-07	9.9	2.95E-07	121.0	4.91E-07	469.0	5.89E-07	470.7
후미부	SR	2.45E-07	0.8	2.95E-07	0.9	4.91E-07	1.4	5.89E-07	0.5
	OP	2.45E-07	13.5	2.95E-07	130.1	4.91E-07	785.1	5.89E-07	891.6
중점부	선두부	SR 4.91E-07	16.8	5.89E-07	21.9	9.82E-07	4.4	1.18E-06	560.0
	OP	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0
중간부	SR	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.6	9.82E-07	0.1	1.18E-06	163.6
	OP	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.5
후미부	SR	4.91E-07	0.0	5.89E-07	0.0	9.82E-07	0.0	1.18E-06	1.7
	OP	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	0.0	0.00E+00	1.1



[그림 6] 모델터널 F/N 곡선 및 사회적 위험도 평가기준

시나리오별 연기확산해석을 수행하였으며, 이를 승객의 피난거동과의 비교를 통해 사망위험을 평가한 결과 화재시나리오별 사망자 추정수는 다음

표 3과 같이 평가되었다.

상기와 같이 평가된 사고발생빈도와 사상자수를 통한 안전성 분석결과 모델터널에 대해서는 터널연장이 5 km를 초과하는 경우에는 대피안전성을 확보하기 위해서 대피환경을 확보하기 위한 대피통로 설치 또는 배연설비의 설치가 필요한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 이 결과는 특정조건에서의 해석 결과이며, 터널 단면적, 터널 종단경사, 일 교통량, 승차인원 등의 복합적인 변화요인에 따라 대피통로의 한계거리는 변화할 수 있음을 주의해야 한다.

또한 정량적 안전성 분석은 특성상 여러 가지 불확실성을 내포하고 있기 때문에 상한선만을 판단 기준으로 정하지 말아야 하며, 가급적 ALARP 개념을 반영하여 상대적으로 낮은 위험분포를 유지하도록 방재시설을 계획하는 것이 불확실성에 따른 위험대응시의 안전여유를 확보하는 최선의 방안일 것으로 사료된다. ㉔