

# 철도터널 및 지하구간에서의 화재사고 위험성 분석 연구

## A study on the fire risk analysis on the railway tunnel and subway area

왕종배\*                      홍선호\*\*                      김상암\*\*\*                      박옥정\*\*\*\*  
Wang, Jong-Bae              Hong, Seon-Ho              Kim, Sang-Ahm              Park, Ok-Jeong

---

### ABSTRACT

In this paper, various hazard factors are reviewed on the train fire accident in railway tunnel and subway. In case studies of systematic risk evaluation on the tunnel fire accident, we have learned the critical fire safety points for accident prevention and damage reduction such as fire-endurance of infrastructure, mortality of heat & toxic smoke, emergency situation control and management of escape requirements etc.. These hazard analysis study will contribute for improving the railway fire-safety and establishing the long-term safety management plan.

---

### 1. 서론

철도에서 지하구간 또는 터널내의 열차화재사고 발생확률은 800년에 1번 정도로 추산되고 있지만, 일본의 北陸터널 열차화재, Euro 터널화재, 오스트리아 산악철도 터널화재 등에서도 알 수 있듯이 철도에서의 열차화재사고는 더 이상 후진국형 재난이 아니고 인명과 재산에 큰 손실을 초래하는 대형참사로 이어지고 있어, 단순히 통계에 근거한 발생가능성 보다는 안전상의 심각한 위험성을 깊이 인식해야 한다.

우리나라는 대도시 지하철의 확산으로 도심 지하구간의 열차운행과 국토의 70%가 산악인 지형적인 특성에 의해 장대터널을 통과하는 열차운행의 지속적 증가가 예상되는 상황이며, 특히 경부고속철도는 총 98개의 터널이 계획되어 이중 3km이상의 장거리 터널이 17개이고, 특히 5km이상의 터널도 10개나 있는 것으로 파악되고 있어 이에 대한 특별관리가 요구된다.

불행하게도 2003년 2월 18일 대구지하철 화재는 최악의 상황인 지하구간에서의 열차화재사고가 발생하면서 외부연결(대피)통로가 한정되어 있고 공기가 밀폐되어 있어 많은 양의 연기와 열이 생성되었기 때문에 외부 또는 지상에서의 상황 파악, 탈출, 진화, 방어 및 구조 행동을 취하는데 큰 어려움을 가지거나 적절한 대응조치가 실패하여 인명안전에 심각한 문제를 야기한 대형참사가 실제로 발생한 것으로서, 철도화재 역사상 최악의 사건 중 하나로서 기록될 것이다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원  
\*\*\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

이제 우리나라도 대구지하철 참사를 계기로 철도터널 또는 지하구간에서의 화재사고의 위험요인을 철저히 분석하여 철도시설 및 차량의 설계, 건설, 운영 및 유지보수 단계별로 화재예방 및 피해경감을 기본원칙으로 하는 철도안전 기본개념에 대하여 관계자 모두가 공통적인 인식을 하는 것이 중요하다.

본고에서는 철도화재에 대한 안전예방 및 피해경감 대책을 효율적으로 개선하기 위한 기반 작업으로서 철도 터널 및 지하구간 화재사고의 위험요소와 사고의 심각성을 체계적으로 분석하고자 하며, 이를 통해 화재 수준에 따른 화재안전 시설규모 및 설비기준 마련, 피난(구난)체계 구축, 실시간 통제 관리가 가능한 화재대응 및 운영절차를 확립하여 체계적인 “철도화재 안전개선 대책” 및 장기적인 “철도 안전관리 전략”을 수립해야 한다.

## 2. 화재 최대온도가 터널 구조물에 미치는 영향과 위험성

BRUSSELS 보고서에 따르면 터널 구조물의 화재저항 설계 일반지침을 상태별로 고려하여 제안하면서, 구조물의 화재 저항성과 인명구조, 탈출가능성, 진화작업 및 폭발 회피에 필요한 터널내 연기와 화재 제어의 중요성을 강조하고 있다.

우선 화재저항 구조물 설계의 출발점인 온도-시간 특성에서, 대형 휘발유 탱크의 경우 1400℃까지 상승하며, EUREKA 시험에 의해 확인된 터널 횡단면의 최대온도 분포와 화재영역 거리에 따른 온도 분포 특성에서 100MW급 최대온도 1000℃의 화재로에서 100, 200, 400m 떨어진 곳의 온도는 각각 400℃, 200℃, 100℃로 나타났다.

표 1과 표 2는 화재발생시 터널 구조물 재료의 도달온도에 따른 강도 특성 저하를 제시하고 있다.

표 1. 터널 라이닝에 사용되는 콘크리트의 화재 영향 특성

차종별 최대 도달온도	도달온도 범위	영향
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 객차 : 400℃</li> <li>• 버스(소형) : 700℃</li> <li>• 발화물질을 가진 중형로리 : 1000℃ (휘발유, 위험재료아님)</li> <li>• 휘발유탱크 : 1200℃</li> <li>• 대형휘발유탱크 : 1400℃</li> </ul>	< 100℃	없음
	100℃ - 150℃	표면의 수분성분이 없어짐
	150℃ 지속	압축강도 약간 감소, 인장강도 크게 저하 “조개집”이 150-200℃에서 시작
	단기간 250℃까지 가열	인장강도 감소. 압축강도 영향 없음
	300℃ - 500℃	압축강도의 20% 손실, 인장강도가 완전소멸 가능
	>500℃	수분함유된 석회가 물 결정 손실로 파괴
	900℃ - 1000℃	수분 완전 손실, 콘크리트 붕괴 유발

표 2. 콘크리트와 철강의 도달온도 범위에 따른 강도감소 특성

콘크리트	온도	20 ≤ T ≤ 100℃	100 ≤ T ≤ 400℃	300 ≤ T ≤ 900℃	T ≥ 900℃
	압축강도	1	1-0.8	0.8-0.47	0
철강	온도	20℃ ≤ t ≤ 350℃	350℃ ≤ t ≤ 700℃	t ≥ 700℃	
	강도	1	1-0.10	0.1-0	

### 3. 터널내 열차화재 발생시 열방출 및 연기방출의 위험성

일반적으로 횡단면적이 60m<sup>2</sup>인 터널에서 5MW 규모의 열방출을 갖는 화재가 발생하였을 때 3m/s의 환기율이 확보되는 경우에는 사망자가 발생하지 않지만, 20MW 또는 40MW의 열이 방출되는 경우에는 많은 사망자가 발생하는 것으로 알려져 있다.

표 3은 폐쇄공간에서의 화염과 가열된 연기층 방사에 따른 생명안전기준을 제시하고 있다.

표 3. 화염과 연기층 방사에 의한 생명안전기준

열전달 모드	증상	노출 수준
폐쇄공간 화염 방사(6m거리)	심각한 화상	2.5kW/m <sup>2</sup>
150℃로 가열 연기층 방사	노출 80초 후 실신	1.8kW/m <sup>2</sup>

#### (1) 여객열차 화재시의 열방출 규모 추정

독일 Gotthard 터널에서 “여객열차 200km/h 운행중 차량화재 발생→승객 화재발생→긴급제동체결→기관사 중앙제어센터 통보→터널내 정차→열차탈출→터널탈출(대피로)”과 같은 시나리오를 구성하여 시뮬레이션을 실시한 사례에서 터널내 여객열차 화재시의 열방출 규모는 다음과 같다.

##### a) 철제 IC 객차 1량의 화재의 Eureka 측정 분석 결과

- 최고열방출 : 화재 개시후 20분 12MW에 도달
- 전체 화재발전 : 8MW 열방출 평균 90분 지속

##### b) 철제 IC 객차 10량의 화재를 선형 중첩 산정 결과

- 최고열방출 : 40MW에 도달
- 전체 화재발전 : 35MW 수준 200분 이상 지속

#### (2) 기관차 화재시의 온도상승 및 연기방출 규모 추정

프랑스의 LYON-터널내 TGV 기관차 화재시뮬레이션에서 “터널내 정차, 3m/s 및 6m/s의 통풍, 800m까지 1.6m 높이의 탈출로 형성”을 전제조건으로 하고, TGV 기관차의 가연성 재료구성으로 오일 1000kg(변압기오일), 합성수지재료 1750kg (polycarbonate, polyurethane, epoxy, polyseter 등), 기타 재료 3500kg(wood, phenolic resin, paint, SH cable 등)인 경우에 대해 MAGIC zone code 적용 해석을 실시하여 기관차 화재시의 온도상승, 최대발생매연 농도 및 가시도를 다음과 같이 제시하고 있다.

##### a) Motor 블록 화재(0.35MW) 분석 결과

- 최고온도상승 : < 3℃
- 최대매연농도 : < 300ppm CO<sub>2</sub>, < 9ppm CO, < 1ppm HCN, - 가시도 : > 10m

##### b) 변압기 오일 화재(7MW) 분석 결과

- 최고온도 : < 44℃
- 최대매연농도(최초10분) : < 800ppm CO<sub>2</sub>, < 250ppm CO, < 8ppm HCN, - 가시도 : 2m~10m

##### c) 분석 결론

- 터널내 화재로 인한 탈출시 온도보다는 화재 발생 10분 정도에 최대로 발생하는 매연에 의한 독성과 가시도가 문제이며, 이것은 터널의 통풍조건에 의존한다.
- 장대터널의 경우 화재 발생 최초 10~15초 사이에 piston 효과가 나타나 고온층의 성층화를 방해하여 안전탈출에 지장을 줄 수 있다.

#### 4. 터널내 열차화재 발생에 대한 정량적 위험도 평가

최근 암스테르담에서 파리까지의 신규 HSL-South구간의 터널내 여객열차 화재에 대한 정량적 위험도 평가(QRA)를 실시한 바 있다. 표 4의 화재 시나리오를 전개하여 평가한 결과, 열방출률이 화재 시 사망자 수에 대단히 중요한 영향을 미치고 있다는 사실을 증명하고 있다.

표 4. 열차 화재 시나리오 전개 및 평가결과 요약

화재 시나리오	연기발생단계 [초]	화재 전개 [W/s <sup>2</sup> ]	Flashover (섭락) [초]	최대열방출률 [MW]	시나리오 가능성
1 섭락 없음	60	11	-	1	0.60
2 섭락 없음	60	11	-	3	0.25
3 평균 섭락	60	11	800	30	0.06
4 조기 섭락	30	45	240	69	0.03
5 지연 섭락	120	3	1600	30	0.06

##### (1) 터널내 열차화재 발생 시나리오 전개

① 연기발생 단계 : 연기발생 단계는 보통 2분에서 5분 사이로 비교적 짧다.

##### ② 화재전개(성장) 단계

화재전개는 좌석, 내장 표면 재료, 바닥면 등에 사용된 재료의 특성에 따라 달라진다.

현재 유럽의 철도 차량은 UIC 56402 화재 안전요건을 만족하고, NFPA(National Fire Protection Association:미국방화협회) classifications 92B1에 따르면 UIC 564-2를 만족하는 차량도 급속히 화재가 전개되어 150초 후에는 열방출량이 1 MW에 달하는 것으로 보고되어 있다.

##### ③ Flashover(불꽃섭락)

화재시 어떤 시점에 이르면 차량 내에서 약 600℃까지 올라가는 방출열 및 온도로 인하여 Flashover(불꽃섭락)가 발생할 수 있다. 터널내 화재와 관련한 열차 안전성 평가는 최고열방출 수준이 10MW 미만인 경우에만 적절하다. 10MW가 넘는 열이 방출되게 되면 터널 내부에 높은 온도와 연기가 발생하여 사실상 안전한 탈출이 어렵다고 한다.

④ 연소종료 : 차량은 Flashover발생 후 연소되며, 대략 1000초 정도의 연소시간을 가정한다.

##### (2) 화염과 연기방출의 위험도 평가

화재 발생시 승객들은 고온 및 연기에 노출되며, 이로 인해 호흡기 계통의 손상이나 자극성 물질 또는 독성 연소 물질을 흡입하여 심각한 경우 사망에 이르게 된다.

위험도 평가는 연기 및 열에 대한 노출모델과 결과심각도 모델을 적용하며, 이때 다음 사항을 기본적으로 고려해야 한다.

##### ① 노출시간 : 화재로 인해 사람이 받는 연기와 열의 노출 기간 결정

이 기간은 열차내 사람의 위치, 화재 위치 및 사람과 최단 탈출구간의 거리에 의존한다.

탈출모델에서 사람의 밀도와 가시도에 의해 탈출속도가 결정되며, 결과 심각도 평가시 임의의 지점 x에서 실제 온도와 화재 가스 농도를 지정하여 승객이 지점 x에 얼마나 오랜 시간 노출되는가를 함께 고려해야 한다.

##### ② 연기 및 열에 의한 결과 심각도

노출시간에 따른 결과 심각도 평가에서 열이나 CO, HCl, NOx와 같은 독성가스에 노출됨으로 인해

1) NFPA classifications 92B는 대형 공간의 연기층 위치를 정의하는 수치 계산법에 대해 기술한다.

발생할 수 있는 피해를 평가한다. 화재시 열발산과 유독가스 구성은 열방출율과 관계가 있으며, TNO-MEP-R 연구보고서에 따르면 표 5와 같이 유독가스가 방출되는 것으로 알려져 있다.

③ 조명상태와 통로조건에 따른 탈출속도

현대식 터널은 환기 방향이 통행 방향으로 설정되어 있어 화재 위치보다 전방부 쪽에 있는 승객들은 열과 연기에 노출되지 않지만, 화재 후방부 쪽에 있는 승객들은 반드시 탈출해야 한다.

탈출로상의 승객 밀도, 구역별 터널내 가시성(연기 밀도), 그리고 눈 및 호흡기 계통에 대한 구역별 유독 물질 농도가 보행 속도를 결정짓게 되는데, 표 6은 조명상태와 통로표면상태에 따른 보행속도를 제시하고 있다.

표 5. MW당 유독가스 방출량

화재 가스 구성물질	방출량(mg/MW)
CO(일산화탄소)	3330
HCl(염화수소)	1950
HCN(시안화수소)	12.5
NO <sub>x</sub> (질소산화물)	122

표 6. 조명상태와 통로표면상태에 따른 보행속도

보행속도[m/s]	조명양호		조명적당		조명불량	
	시계확보	연기상태	시계확보	연기상태	시계확보	연기상태
통로표면 양호	1	0.5	0.75	0.5625	0.2	0.2
통로표면 적당	0.6	0.3	0.45	0.3375	0.2	0.2
통로표면 불량	0.5	0.25	0.375	0.28125	0.2	0.2

(3) 열차 화재감지설비 설치 유무가 탈출개시에 미치는 영향

그림 2의 자동 화재감지와 육안인지시의 반응시간 비교에서, 자동화재감지방식의 경우 탈출개시까지의 반응시간은 4분이지만, 육안인지의 경우 반응시간이 6분으로 나타나고 있다. 즉, 화재 감지로부터 탈출개시까지의 시간은 일차적으로 열차내 화재감지기 설치 여부에 달려있으며, 만약 자동화재감지기가 설치되어 있지 않다면 승무원이나 승객들만이 화재를 감지하고 이 사실을 다시 기관사와 통제센터에 알리는 과정에서 더 많은 시간이 소요되어 탈출개시 시간이 늦어지게 된다.

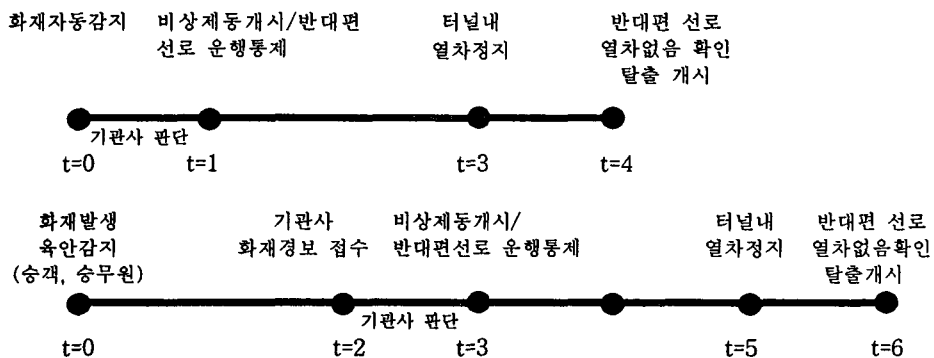


그림 2. 자동 화재감지와 육안 화재감지시의 반응시간 비교

#### (4) 터널내 열차화재 발생에 따른 사망자 추정

총연장 7.2km Green Heart Tunnel에 대해 차상 스프링클러 유무 및 반응시간 4분과 6분에 대한 동적 결정론적 안전성 평가모델을 수립하여 위험도 평가를 수행한 결과인 그림 3은 1900명의 승객이 탑승한 통근용 열차에 대한 반응시간 4분의 후미화재(스프링클러가 없는 것) 사례이다.

최고 열방출율 30MW에 이르는 화재 시나리오 3의 결과를 분석해 보면, 시간 경과에 따라 위험에 처한 승객 수(비상구에 아직 도달하지 않은 승객)는 감소하지만 굵은 곡선의 사망자 수는 Flashover(섬락)가 발생(800초)후 급격히 증가하여 화재발생 15분 정도에 100명에 이르는 사망자가 발생하는 것으로 추정되고 있다.

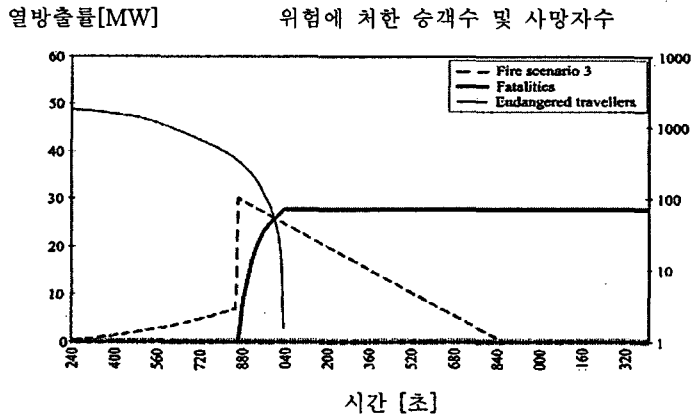


그림 3. 화재시나리오 3 : 열방출율 및 사망자수 추이

#### 5. 결론

철도 터널 또는 지하구간의 화재는 탈출대피나 진화활동에 어려움이 있고, 외부 또는 지상에서 현장 상황을 파악하여 효과적인 방어조치를 취하기가 곤란해져 커다란 인명피해를 야기하는 대형참사로 이어질 가능성이 높다. 본고에서는 철도 터널 및 지하구간 화재사고의 위험요소와 사고의 심각성을 체계적으로 분석하였으며, 이를 통해

- 피난시설 확보와 화재확산 방지에 우선순위를 둔 화재위험감소 대책
- 안전보장에 필요한 구조물, 안전시설물 및 관리방안 제공
- 이를 운영하기 위한 적절한 지침과 완벽한 논리순서 제정

과 같이 화재예방 및 피해경감을 기본원칙으로 하는 체계적인 “철도화재 안전개선 대책” 및 장기적인 “철도 안전관리 전략”의 수립에 대한 관계자의 공통적인 이해가 있기를 촉구한다.

#### 참고문헌

1. Proc. International Conference, "Tunnel fires and escape from Tunnel", Lyon, France, May. 1999
2. Peter Semmens & Yves Machefert-Tassin, "Channel Tunnel Trains", Eurotunnel, 1994
3. Channel Tunnel Publications, "The Channel Tunnel A safety Case", Eurotunnel, E676
4. Tunnel and underground station fires 2000, ITC
5. Final Report on "The Feasibility Study into Computer Modelling of a Fire in a Railway Vehicle", ERRI, C204.1-RP3
6. "철도 터널 화재위험 분석 및 안전개선 권고", 한국철도기술연구원 보고서, 2002년 3월