

# 철도사고 위험도평가를 위한 화재사고 시나리오 구성에 관한 연구

## Development of Train Fire Accident Scenario for Risk Assessment

곽상록\*                      왕종배\*\*                      박찬우\*                      박주남\*  
Kwak, Sang Log      Wang, Jong Bae      Park, Chan Woo      Park, Joo Nam

---

### ABSTRACT

Fatalities of train fire accident can be determined by various factors such as location of fire, type of train, driver's action and emergency rescues. When the worst case of these factors are combined, catastrophic accident can be occur. In order to estimate risk under the condition of train fire, accident scenarios are required together with fault tree analysis and event tree analysis. In this study, train fire accidents scenarios are constructed based on hazard log for train fire. Risk can be estimated when accident statistics are connected with these scenarios. Estimated risk will be use for the derivation and verification of safety measure.

---

### 1. 서론

철도에서 여객의 안전을 위협하는 중대사고에는 열차 화재, 열차 충돌 및 탈선사고가 있으며, 많은 사고의 결과로 이들 중대사고에 대한 다양한 안전대책이 수립되어 시행중에 있다. 그러나 다양한 안전대책에도 불구하고 전세계적으로 대형 철도사고가 지속적으로 발생되고 있으며, 사고 피해 역시 증가하고 있다. 사고발생 원인 역시 다양하여 여객이 사용하는 객실내부 영역, 차량하부 영역, 기관실, 선로변 등 다양한 사고의 위험요인이 존재하고 있다. 사고시나리오의 구성은 과거에 발생한 철도화재 사고는 물론 예비위험분석(Preliminary Hazard Analysis, PHA)을 통해 사고는 발생하지 않았으나 발생가능성이 있는 위험요인을 함께 고려하여야 위험도평가에 활용할 수 있어야 한다. 철도 화재사고는 터널 혹은 지하구간에서 발생한 경우가 가장 큰 피해를 초래하기 때문에 많은 연구가 터널 구간의 화재발생 상황에 대해 집중적으로 진행되었다. 터널구간의 화재사고는 대구지하철 사고(191명 사망), 2000년 오스트리아 산악열차 사고(155명 사망), 1995년 아테르바이잔 지하철 사고(340명 사망)에서 보듯이 엄청난 인적 손실을 가져오는 사고로, 국내외에서 터널구간의 화재안전 대책에 관한 많은 연구가 진행중이다. 미국의 NFPA<sup>(1)</sup>를 비롯해 BHRG, ITC, ASHRAE, APTA 등의 많은 기관에서 연구가 진행되어 다양한 철도의 화재안전기준이 수립되어 활용되고 있다. 다양한 연구의 결과<sup>(2)-(5)</sup>중 유독가스 제거를 위한 배연시스템 설치 및 승객 대피용 터널설치에 대한 기준이 제시되어 있으며, 터널화재시 가장 효과적인 수단으로 입증되었다. NFPA 130<sup>(1)</sup> 기준에는 철도역사 및 터널구간의 화재시 인명피해를 최소화하기 위한 장비, 계단, 탈출로, 비상통신 및 화재확산 방지 요건 등이 구체적으로 기술되어 있다. 국내에서도 철도차량안전에 관한 지침<sup>(6)</sup>과 규칙에 화재안전성 확보를 위한 법적요건이 기술되어 있다.

본 연구에서는 터널분야에 집중되어 있는 화재연구의 내용과 국내외 철도화재사고 자료를 종합 분석하여 철도 운행중 발생가능한 화재사고의 시나리오를 구성하였다. 개발된 사고 시나리오에 고장정보나 전문가의 판단, 사고 및 장애 정보를 조합하면 고장수목(Fault Tree)의 구성 및 사건수목(Event Tree) 구성 등 향후 화재사고로 인한 위험도를 정량적으로 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다<sup>(7)</sup>.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정희원  
\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정희원

## 2. 철도 화재사고 관련 위험요인의 도출

본 절에서는 열차화재사고를 유발하는 요인과 화재피해를 확산시키는 요인으로 분류하여 기술하였다. 화재사고 위험요인은 열차 충돌, 탈선사고에 비하여 인적요인의 개입이 적어 비교적 단순하나 화재사고에 대한 대응은 충돌, 탈선사고에 비하여 복잡하다. 관련된 위험요인과 피해확산요인을 본 절에서 기술하였다.

### 2.1 화재사고 유발 위험요인 도출

철도 화재를 유발할 수 있는 위험요인은 국내외의 대형 철도화재사고자료 및 사고장애 자료와 기존에 수행된 화재안전연구 및 영국, 호주, 프랑스의 예비위험분석 자료<sup>(8)~(14)</sup>를 활용하였다. 다만 현재 국내 실정과 동떨어진 철도운행 초창기의 나무로 된 객차나 석유를 이용한 객실 조명기구 등의 내용은 제외하였다. 화재를 유발하는 위험원의 위치에 따라 다음과 같이 나누었다. 구분은 화재확산진 기관사, 승객, 사령, 역무원 등의 화재진압 시간, 화재규모 및 열차 기동여부에 영향을 미치는 인자로 향후 위험도 평가시 피해정도에 영향을 주어 별도로 구분하였다. 위험도 평가가 수행되면 개선대책이 수립되어 발생확률이 없거나 피해도가 낮은 경우 필요에 따라 구분을 하지 않을 수 있으나, 현단계에서는 위험도 평가 결과가 도출되지 않아 가급적 세부적으로 분류하였다.

#### 1) 차량내부의 화재 유발 원인

- 객실영역 : 객실, 운전실, 화물칸, 식당칸 등의 인화성 물질에서의 발화, 방화, 폭발, 전기계통의 합선
- 화물영역의 화재 : 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, 제동 불꽃, 저항기 뱅크, 제어장치, 견인전동기, 차륜공전에 의한 불꽃 및 기타 하부 구조물

#### 3) 차량외부 영역의 화재 유발 원인

- 역사, 선로변, 전차선, 인근 운행열차의 화재

### 2.2 화재 사고피해 확산 위험요인 도출

기존에 수행된 많은 연구결과<sup>(2),(8),(9)</sup>를 정리하면 화재사고의 피해정도는 화재확산시간이 여객의 탈출시간에 비하여 어느 정도 되는가에 따라 결정된다. 화재확산 시간의 경우 차량의 연소특성, 화재진압설비의 능력, 화재발생 장소의 물리적 특성에 따라 결정되며, 여객의 탈출시간은 화재감지 시간, 여객/기관사/사령/역무원/비상대응 기관의 대응 정도, 혼잡정도, 탈출속도와 같은 인자에 따라 결정된다. 사고 시나리오 작성에 고려된 주요 인자를 다음에 기술하였다.

#### 2.2.1 발생 장소

철도 화재사고의 발생장소는 가장 큰 인자로 대부분의 연구가 터널 혹은 지하구간으로 설정되어 있다. 터널 혹은 지하구간의 화재사고는 발생시 차량탈출 후 안전한 영역까지의 추가적인 탈출이 필요하며, 차량과 터널의 탈출전에 연기와 유독가스에 의한 많은 여객의 피해가 발생한다. 또한 고속화에 따른 10km 가량의 장대터널에서 화재사고가 발생한 경우에는 기존의 대책보다 강화된 추가적인 안전대책이 요구된다.

#### 1) 터널 혹은 지하구간

- 여객 및 기관사가 차량을 탈출하여 유독가스나 화염이 없는 안전한 영역으로 대피하는데 소요되는 시간의 결정에 영향을 미치는 인자와 화재확산이나 유독가스의 전파에 영향을 미치는 인자들이 다음과 같이 복합되어 있다.
- 여객의 대피시간에 영향을 미치는 인자 : 양방향 선로/단방향 선로(인접선로를 운행중인 열차여부), 터널의 물리적 조건(단면적, 구배, 비상조명시설, 대피터널까지의 거리, 탈출로 설치 여부 및 기타 탈출보조 안전설비 등)
- 화재의 확산에 영향을 미치는 인자 : 배연시스템의 간격 및 성능, 소화장비의 성능, 인화물질의 양(차량의 특성, 화물의 특성)

#### 2) 지하역사

- 지하역사에 화재가 발생한 경우 차량탈출은 필요 없으나 운행중 차량의 창문을 통한 유독가스 유입으로 기관사나 승객이 질식할 수 있다. 또한 역사에 차량이 정차한 경우 터널 혹은 지하구간의 조건과 동일한 인자의 지배를 받는다.
- 여객의 대피시간에 영향을 미치는 인자 : 여객의 혼잡도, 역사의 탈출유도장비, 여객 탈출 통로의 물리적 조건 및 거리
- 화재의 확산에 영향을 미치는 인자 : 제연설비, 화재진압장비

#### 3) 교량구간

- 교량구간에서 화재발생시에는 차량의 객실을 통한 탈출로 승객의 혼잡도와 교량의 물리적 특성에 영향을 받으며, 유독가스에 의한 피해가 지하구간보다 크지 않다. 반면 외부 지원을 받기 위한 진입로가 부족하여 노약자 및 사고로 인한 부상자의 구조가 용이하지 않다.

#### 4) 일반선로

- 일반선로에 화재발생시에는 차량탈출 후 인접선로를 운행하는 열차, 전차선/선로의 감전을 피하여 안전한 영역으로 대피하는 것으로 설정하였다.

### 2.2.2 화재감지 및 기관사의 대응

차량의 종류에 따라 화재감지장비가 설치되지 않았거나, 혹은 감지장치의 고장으로 화재시 경보가 작동되지 않은 경우, 화재경보가 작동되었으나 기관사가 조치하지 않은 경우, 화재를 진압하였으나 재발화한 경우 화재의 초기진화에 실패하여 중대형 규모의 화재로 확산될 확률이 높다. 또한 여객의 대피가능 시간에 직접적으로 영향을 미치는 인자로 화재사고의 주요 인자가 된다.

기관사의 대응에는 화재의 초기진압여부의 결정, 사령요원에 화재상황 통보, 승객의 탈출 통보 및 승객 탈출 지원이 있다. 또한 사령실이나 기관사에게 해당선로의 화재상황이 통보되지 않은 경우 운행중 열차의 환기구나 열려진 창문을 통해 유입된 유독가스는 화재사고 피해인자가 된다.

### 2.2.3 차량 및 터널 탈출

화재진압이 실패하여 차량을 탈출하는 경우 여객의 혼잡도 외에 출입문의 작동여부, 전원차단여부, 창문을 통한 탈출 가능여부, 시야확보 여부를 주요 인자로 고려하였다. 터널화재의 경우 차량탈출후 추가적인 탈출이 필요하며 터널탈출에 기여하는 인자는 발생장소에 포함되어 있다.

### 2.2.4 비상대응을 통한 외부 지원

화재진압, 여객구조에 소요되는 외부 지원에 따라 화재의 피해가 변화하여 주요 인자가 된다. 여기에는 사령실, 인근역, 기관사 및 응급지원 기관의 상황인지, 비상대응장비의 확보여부, 접근의 용이성이 주요 인자로 작용한다.

### 3. 시나리오 구성 인자간의 연관성 분석을 통한 시나리오 구성인자 도출

위에 언급된 인자들은 서로 독립적인 경우도 있으나 상호 연관되어 있는 경우가 많다. 위험요인들이 독립적인 경우 시나리오 작성시 경우의 수가 증가하여 고장수목분석(Fault Tree Analysis) 및 사건수목분석(Event Tree Analysis)에 많은 시간이 소요된다. 그러나 이들의 연관성을 이용하면 시나리오 구성시 많은 중복사항이 제거되어 보다 간단한 해석이 가능하다. 그러나 분석시 중복성을 완전히 배제하기는 어려우며, 일부 인자에 대해서는 여러단계에서 중복으로 고려가 필요한 경우 이를 포함하여 아래의 표와 같이 구성하였다. 해석시 가장 많은 인자가 고려된 터널구간의 화재에 대한 화재확산 시나리오에 대해 아래표에 수록하였다.

<표 1. 터널구간 화재확산 시나리오 구성의 주요인자>

확산단계	단계별 위험요인		
화재감지	승객의 미통보	화재영역(화물포함) 승객없음	승객의 미대응
	기관사 판단 오류	기관사의 화재신호 무시	화재신호 미확인
	화재감지기 없음/오류	화재감지기 미작동	
화재진압	가연성 물질	화재 확산	열차기동 불능
	유독가스 발생	소화후 재발화	사령실 통보 지연
	소화설비 부족		
기관사대응	피난대피 절차 미통보	사령실 미통보	인접선로 운행열차
	출입문 미개방	비상대응 요청실패	개별적인 열차 탈출
	기관사 질식		
	사령통신 장비 고장		
차량탈출	출입문 차단	수동 개방 실패	화염
	전원 차단	창문을 통한 탈출 실패	유독가스
			시야 미확보
			대중 혼잡
터널탈출	탈출 유도장비 부족	인접선로 열차운행	화염
	탈출 유도지원인력 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 유도지원인력 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 유도지원인력 부족		
	탈출로 없음		
비상대응	사령실의 상황 미인지	비상대응기관의 정보부족	
	인근 역사의 상황 미인지	화재구간 열차운행 미통제	
	접근로 폐쇄		
	비상대응 장비 부족		

#### 4. 결론

본 연구에서는 기존에 수행된 국내외의 연구결과를 통하여 철도화재사고를 유발하는 사고위험요인을 도출하였으며, 사고피해확산에 기여하는 주요인자를 도출하였다. 도출된 사고위험요인과 화재확산 기여인자는 상호 연관성을 분석하여 시나리오 구성인자에 반영하였다. 개발된 사고 시나리오에 고장정보나 전문가의 판단, 사고 및 장애 정보를 입력하면 고장수목(Fault Tree)의 구성 및 사건수목(Event Tree) 구성 등 향후 화재사고로 인한 위험도를 정량적으로 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

#### 참고문헌

1. NFPA, "U.S. Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems", NFPA 130, 2003
2. Powell, S. and Grubits, S., "Tunnel Design with TRAFFIC-Tunnel Risk Assessment For Fire Incidents and Catastrophes", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999.
3. Molag, M. and Sluis, L., "Quantitive Risk Analysis to Optimise Fire Safety During Basic HSL South Tunnel Design", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999
4. Molag, M. and Mierlo, R., "Realistic Fire Scenarios for Safety Assessments of Train Fires in Tunnel", Proc. of Independent Technical Conferences, Madlid, 2001
5. 한국철도기술연구원, "장대 철도터널 화염방재기술 및 환기공조시스템 개발", 2003
6. 건설교통부, "철도차량안전에 관한 지침", 2005
7. Richard A. Stephans, "System Safety for the 21th Century", Wiley & Sons Press, 2004
8. 곽상록, 홍선호, 왕종배, 조연옥, "확률론적 기법을 활용한 철도터널의 화재사고 시나리오의 구성", 한국철도학회논문집 2004
9. 곽상록, "철도터널 화재시 승객 생존을 예측을 위한 확률론적 평가코드 개발연구", 한국전산구조공학회 추계학술대회, 목포해양대학교, 2004
10. Rail Safety & Standard Board, "A statistical review of the RSSB Safety Risk Model (WP1)", 2004
11. GEC ALSTORM S.A., "Preliminary Hazard Analysis : Core System of the KHSR", 1996.
12. GEC ALSTORM S.A., "Safety Tests and Verification Program : Rolling Stock", 1998.
13. 한국철도기술연구원, "철도사고 위험요인 분석기술개발 : 별책 호주철도사고 위험요인 분석", 2003
14. U.S. Dept. of Transportation, "Hazard Analysis Guideline for Transit Project", 2000.