

철도터널 화재시 승객 생존율 예측을 위한 확률론적 평가코드 개발연구

Development of Probabilistic Fatality Estimation Code for Railway Tunnel Fire Accidents

곽상록¹⁾
Kwak, Sang-Log

ABSTRACT

Tunnel fire accident is one of the critical railway accidents, together with collision and derailment. For the safe operation many tunnel design guidelines are proposed but many Korean railway tunnels do not satisfy these guidelines. For the safety improvement, current safety level is estimated in this study. But so many uncertainties in major input parameters make the safety estimation difficult. In this study, probabilistic techniques are applied for the consideration of uncertainties in major input parameters. As results of this study, probabilistic safety estimation code is developed.

1. 서 론

철도에서 승객의 안전을 위협하는 중대사고에는 터널화재, 열차 충돌 및 탈선이 있으며, 많은 사고의 결과로 이들 중대사고에 대한 안전대책을 수립하여 시행중에 있다. 터널구간의 화재사고는 대구지하철 사고(191명 사망), 2000년 오스트리아 산악열차 사고(155명 사망), 1995년 아데르바이잔 지하철 사고(340명 사망)에서 보듯이 엄청난 인적 손실을 가져오는 사고로, 국내의에서 터널구간의 화재안전 대책에 관한 많은 연구가 진행중이다. 미국의 NFPA⁽¹⁾를 비롯해 BHRG, ITC, ASHRAE, APTA 등의 많은 기관에서 연구가 진행되어 다양한 철도의 화재안전기준이 수립되어 활용되고 있다. 다양한 연구의 결과⁽²⁾⁽⁵⁾중 유독가스 제거를 위한 배연 시스템 설치 및 승객 대피용 터널설치에 대한 기준이 제시되어 있으며, 터널화재시 가장 효과적인 수단으로 입증되었다. NFPA 130⁽¹⁾ 기준에는 철도역사 및 터널구간의 화재시 인명피해를 최소화하기 위한 장비, 계단, 탈출로, 비상통신 및 화재확산 방지 요건 등이 구체적으로 기술되어 있다. 그러나 국내는 물론 국외의 많은 철도터널의 경우 과거에 설계되어 NFPA 130을 비롯한 화재 안전 기준을 적용할 수 없으며, 터널구간의 특성상 환기시설이나 별도의 탈출터널 신설이 불가능하거나 막대한 비용 때문에 어려운 실정이다.

터널구간의 화재시 승객의 안전성 확보를 위한 기초연구로 현재의 시스템에서 사고가 발생한 경우 승객의 생존율을 예측한다면, 사고예방에 필요한 투자비용과 사고발생시 피해비용을 비교하여 안전개선 의의 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.⁽⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 국내에서 건설 혹은 사용중인 철도터널에서 화재사고가 발생할 경우 승객의 생존율을 예측하였다. 터널구간에서 화재가 발생한 경우 승객의 생존율 예측을 위해서는 해당 터널의 길이, 열차의 정차위치, 화재의 규모, 화재 감지 시간, 승객의 탈출속도, 터널내 연기전파 속도 등의 많은 입력자료가 요구된다. 그러나 이들 입력자료들은 열차화재 상황에 따라 많은 불확실성을 포함하고 있어 해석시 사용하는 값의 선정에 따라 승객의 생존율이 10배 이상차이나 일반적인 해석을 적용하기 어렵다. 이를 위해 본 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이션을 활용한 확률론적 기법을 사용하였으며, 다양한 터널의 조건에 대한 해석을 효율적으로 수행하기위해 승객생존율 예측을 위한 확률론적 평가코드인 PRA-Tunnel Fire(Probabilistic Risk Analysis for Railway Tunnel Fire Accidents)를 개발하였다.⁽⁷⁾

1) 정회원, 한국철도기술연구원, 안전기술연구팀

2. 철도터널화재시 승객 생존율 결정 인자 및 사고시나리오

터널화재 사고시 승객 생존율에 영향을 미치는 인자는 승객생존율을 향상시키는 인자와, 사망률을 향상시키는 인자로 구분할 수 있다. 즉 승객탈출에 필요한 시간(Required Time, t_R)과 화재시 연기나 화염이 승객에게 도달하는 시간(Available Time, t_A)을 승객의 생존을 결정하는 기준으로 설정하였다. 이들 두 변수(t_A 와 t_R)중 승객의 탈출에 필요한 시간은 ①열차내 화재감지시간, ②탈출거리(터널의 길이와 열차정차위치), ③승객의 탈출속도(터널내 탈출로의 바닥상태, 조명 및 연기상태, 승객밀도에 따라 결정), ④응급지원 도착시간 등에 의해 결정된다. 반면 승객의 생존에 요구되는 시간은 ①화재섬락(Flash-over) 발생시간(화재규모로부터 결정가능), ②연기 전파 및 연기층 강하 속도를 통해 결정된다. 그러나 이들 두변수인 t_A 와 t_R 은 하나의 값으로 결정되기보다는 개발된 평가시스템의 결과 출력화면과 같은 확률분포로 나타낼 수 있다. 언급된 인자들은 모두 불확실성을 포함한 값들로 하나의 값을 가정한 일반적인 해석보다는 확률분포를 활용한 해석이 보다 타당하다 할 수 있다. 터널화재의 안전영향인자와 이의 설정을 위한 사고시나리오의 세부적인 내용을 다음에 기술하였다.

2.1 터널길이와 열차 정차위치

대피터널 및 배연시스템이 없는 국내의 철도터널내의 최악의 사고 시나리오는 터널의 중앙에 열차가 정차한 경우로 볼 수 있다. 예로서 길이 1km의 터널의 중앙에 열차가 정차한 경우 승객의 대피거리는 500m로 가정할 수 있다. NFPA 130에서 제시된 터널화재 안전평가 대상 터널의 길이는 300m 이상이며, 길이가 300m 이상인 국내의 일반철도 및 고속철도 터널 200곳의 자료를 분석한 결과 평균 1,005m 표준편차 2,637를 갖는 대수-정규분포로 나타났다. 터널의 길이가 증가할수록 사망자 역시 증가하므로 본 연구에 수록된 사례 연구는 터널길이 5km를 기준으로 하였다.

2.2 승객 탈출속도

화재시 승객이 열차 탈출후 도보로 터널을 탈출하는 속도는 탈출통로의 표면, 조명, 시야확보, 연기상태, 터널의 구배 등 다양한 조건에 따라 결정된다. 본 연구에서는 호주에서 사용된 TRAFFIC모델⁽²⁾에 제시된 승객의 탈출속도를 참조하였으며, 사례연구에서는 평균 0.5m/s 표준편차 0.4m/s를 갖는 정규분포로 승객의 탈출속도를 가정하였다.

2.3 화재감지 시간

화재를 조기에 감지하는 경우 사고확산을 예방할 수 있으나, 화재 확산까지 적절한 대응을 하지 못하면 대형사고로 연결된다. 그러나 화재감지 시간에 대한 선행연구가 없어 본 연구에서는 열차에서 발생한 화재를 감지, 화재진압 실패 및 열차 탈출까지의 시간 전체를 확률변수로 가정하여 해석하였다. 사례연구에서 화재 감지 시간은 평균 420초, 표준편차 84초(평균의 20%)를 갖는 정규분포로 가정하여 해석하였다.

2.4 응급지원 도착시간

열차화재 발생후 자력으로 터널을 탈출할 수 없는 노약자나 부상자들의 지원을 위해 응급지원팀이 터널 입구까지 도착하는 시간, 터널 입구에서 터널내 부상자 혹은 탈출자의 위치까지 이동하는 시간의 합을 응급지원 도착시간으로 계산하였다. 화재발생후 화염이나 연기가 급속히 확산되지 않는 다면 승객의 이동이 가능하므로 승객의 이동을 고려하여 응급지원 도착시간을 결정하였다. 본 연구에서는 응급지원팀이 터널입구까지 도착하는 시간을 평균 900초, 표준편차 600초를 갖는 대수정규분포로 가정하였으며, 터널입구에서 부상자 위

치까지 2.0m/s의 속도로 진입하는 것으로 계산하였다.

2.5 연기 전파속도

터널구간에서 승객의 생존을 위협하는 것은 화재로 인한 화염보다는 화재로 인해 발생하는 유독가스로 연기 전파속도에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있다. 연기 전파속도는 터널의 배기시스템이나 터널의 단면적, 화재의 규모에 따라 상이하다. 이의 결정을 위해서는 SES, TUNFIRE, FLUENT와 같은 전산유체역학적 시뮬레이션이 요구되나 본 연구의 목적이 세부적인 해석보다는 현재 터널의 안전성 확인에 있으므로, 이들 결과를 간략화하여 사고지점에서부터 터널입구까지 일정한 속도로 유독가스가 퍼지는 것으로 가정하였다. 사례연구에서는 2.0m/s로 가정하였다.

2.6 화재섬락(flash-over) 시간

화재가 급격히 진행되는 화재섬락시간은 열차 편성 및 열차의 종류에 따라 결정되며, 본 연구에서는 화재 섬락 시간을 화재발생후 평균 1,200초, 표준편차 300초를 갖는 정규분포로 가정하였다.

2.7 터널화재 사고 시나리오의 구성

열차화재시 승객이 생존하기 위해서는 그림 1의 시나리오와 같이 ①화재감지, ②확인 및 운전사령 보고, ③ 화재 진압실패 및 열차 탈출의 결정, ④탈출안내 방송 및 출입문 개방, ⑤터널의 도보 탈출의 과정이 필요하다. 반면, 승객에게 주어진 시간은 화재가 발생하여 발생한 유독가스가 승객의 위치까지 전파되기 직전까지로 설정이 가능하다. 해석시에는 그림 1과 같이 응급지원의 도움을 받아서 탈출하는 경우와 응급지원의 도착 전 터널을 탈출하는 경우를 고려하였다. 두 경우 모두에 대해 승객의 생존을 위해 주어진 시간은 동일하나, 승객의 탈출 소요시간은 2.4절에 기술한 바와 같이 고려하였다.

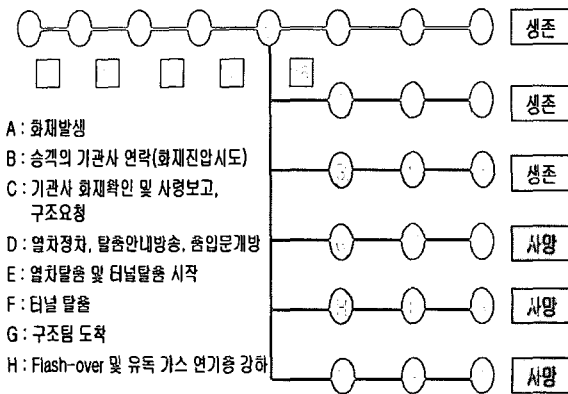


그림 1 화재사고시 승객탈출 시나리오 및 생존여부

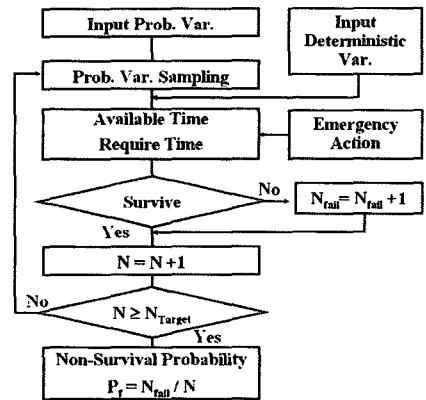


그림 2 확률론적 평가코드의 해석절차도

3. 승객생존을 예측을 위한 확률론적 평가코드 개발

Monte Carlo 시뮬레이션 기법은 반복적인 난수추출에 근거한 기법으로 이를 터널화재시 승객 생존을 예측에 적용하기 위한 시뮬레이션의 절차를 그림 2에 나타내었다. 그림의 절차는 ①확률변수의 선정 및 자료입력, ②고정변수의 선정 및 자료입력, ③난수발생, ④평가변수(t_r , t_A) 계산, ⑤승객 생존여부 결정, ⑥평가결과

저장 및 통계처리, ⑦시뮬레이션 조건 확인, ⑧결과처리의 과정을 흐름을 나타낸다. 승객의 생존을 예측에는 많은 전문지식, 평가자료는 물론 Monte Carlo 시뮬레이션 적용에 따른 많은 반복계산과 통계처리가 필수적이다. 이를 위해 본 연구에서는 “PRA -Tunnel Fire”로 명명된 코드를 개발하여 사용하였으며, 개발코드는 인터넷 홈페이지⁽⁸⁾에서 다운로드 하여 사용할 수 있다. PRA-Tunnel Fire 코드는 Visual C++를 활용하여 윈도우 환경에서 구동되도록 구현하였다. 개발된 시스템의 초기화면, 자료입력 및 결과출력 화면을 그림 3에 나타내었으며, 모듈구성에 관한 내용을 다음에 설명하였다.

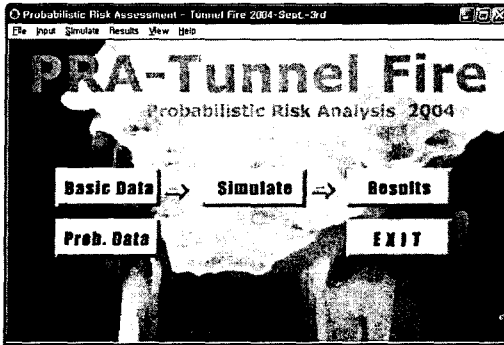


그림 3 PRA-Tunnel Fire 초기화면

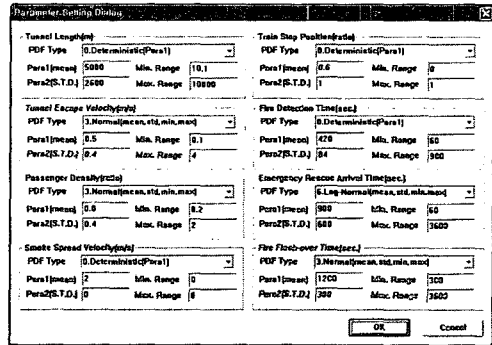


그림 4 자료입력화면 구성

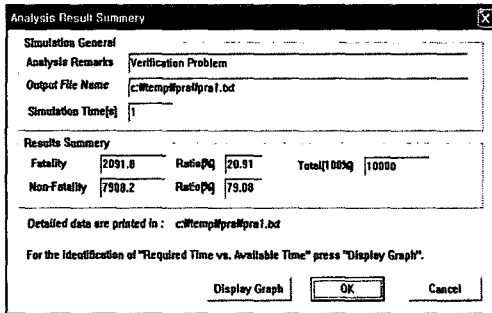


그림 5 요약결과 출력화면

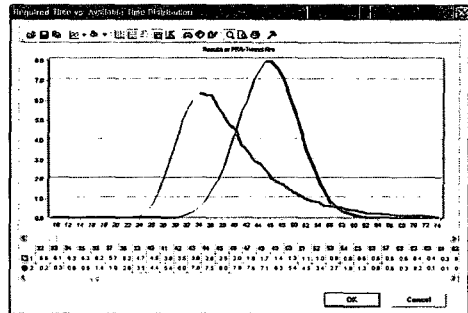


그림 6 결과의 그래프 출력화면

3.1 자료 입력 모듈의 구성

입력자료는 크게 확률변수로 고려하는 변수와 하나의 값으로 고정된 일반변수 혹은 결정론적 변수가 있다. 확률론적 변수를 입력하기 위해서는 해당 변수의 확률분포형태, 평균, 표준편차와 같은 분포형태의 모수, 입력변수의 최대-최소값의 범위를 입력하여야 한다. 본 해석에서 입력이 가능한 확률변수는 ①터널길이, ②열차정차위치, ③승객의 터널탈출속도, ④화재감지시간, ⑤ 승객밀도, ⑥응급지원 도착시간, ⑦연기전파속도, ⑧화재선평 시간으로 설정하였다. 이들 값은 확률변수는 물론 결정론적 변수로도 고려할 수 있도록 하였으며, 입력화면을 그림 4에 나타내었다. 이외에 입력 가능한 항목으로는 시뮬레이션 횟수, 독립시행횟수, 결과 저장 파일명, 해석에 대한 설명, 중간해석결과의 출력여부 등이 있으며, 이들 변수의 입력은 일반적인 윈도우 프로그램의 구성과 동일하다.

3.2 해석 모듈의 구성

사용자로부터 평가에 필요한 자료를 입력받으면 사용자가 지정한 횃수만큼 그림 2의 절차에 따라 반복계산을 수행한다. 승객의 생존여부 결정은 승객의 탈출시간과 화재후 연기가 탈출중인 승객의 위치까지 도달하는 시간을 비교하여 결정하였다. 응급지원을 고려하지 않는 경우 탈출시간은 탈출거리를 탈출속도로 단순히 나누어 결정되며, 응급지원을 고려하는 경우 본 연구에서는 시간(s)차원으로 유도된 식(1)을 시뮬레이션에 활용하였다.

$$t_R = t_1 + t_2 + \frac{S_{total}/V_1 - t_2}{V_2/V_1 + 1} \quad (1)$$

여기서, t_1 은 화재감지 및 열차탈출 시간, t_2 는 응급지원팀의 터널입구 도착시간, S_{total} 은 열차로부터 터널 밖까지의 탈출거리, V_1 은 승객의 도보탈출 속도, V_2 는 응급지원팀의 이동속도이다.

3.3 결과출력 모듈의 구성

해석결과와 통계적 처리를 통해 도출된 승객의 생존율 및 시간에 따른 승객의 생존과 사망을 그래프와 표일로 출력하도록 구성하였다. 해석결과와 요약내용 출력화면을 그림 5에 나타내었으며, 시간에 따른 승객의 생존 및 사망 분포를 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 두 분포가 겹쳐지는 부분의 영역에서 승객의 사망이 발생한다.

4. 사례연구

본 연구에서는 개발된 PRA-Tunnel Fire 코드를 활용한 사례연구 내용을 본 절에 수록하였다. 해석 대상은 배연시설과 탈출터널이 없는 길이 5km의 양방향 열차운행이 가능한 터널의 60% 지점에 열차가 정지한 경우로 설정하였다. 즉 2km를 탈출거리로 가정하였으며, 나머지 확률변수에 대한 세부적인 입력값은 2절에서 언급한 값을 사용하였다. 이외에 승객의 탑승률은 평균 0.8, 표준편차 0.4인 정규분포로 가정하였다.

Monte Carlo 시뮬레이션 시에는 난수발생의 영향을 줄이기 위해 10만번씩 각각 5회의 독립수행을 시행하여 이의 평균값을 승객의 생존율로 결정하였다. 주요 해석의 경우와 승객의 사망률(100%에서 승객의 생존율을 제외한 값)을 계산하였다. 앞서 제시된 확률분포를 활용한 경우 외에 일부 확률변수를 평균값만으로 가정하여 결정론적으로 해석한 경우에 대한 해석결과를 다음에 나타내었다.

- 1) 주어진 조건을 활용한 해석 → 21.4%
- 2) 주어진 조건에서 승객 탈출속도만 확률변수로 가정한 해석 → 1.5%
- 3) 주어진 조건에서 응급구조 도착시간만 확률변수로 가정 → 16.3%
- 4) 주어진 조건에서 화재섬락시간만 확률변수로 가정 → 11.4%
- 5) 주어진 조건에서 화재감지시간만 확률변수로 가정 → 0.1%
- 6) 주어진 조건에서 모든 변수의 평균값만을 이용한 해석 → 0

위의 해석에서 6)의 경우는 입력자료의 불확실성을 고려하지 않은 결정론적 해석으로 승객의 사망률은 없다고 계산되나 1)5)의 경우와 같이 입력자료의 불확실성을 고려한 경우는 승객의 사망률이 최고 20%이상으로 나타나 확률론적 해석의 필요성을 나타내고 있다. 또한 각각 변수의 영향을 확인하기 위해 평균값과 표준편차를 변화시켜가면서 다양한 해석을 수행한 결과를 다음에 나타내었다.

- 1) 탈출속도와 연기전파속도의 영향 : 탈출길이에 따른 승객의 사망률은 연기전파속도와 연결되어 승객의 생존율에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예로서 연기전파속도를 2.0m/s, 탈출속도가 2.0m/s로 서로 큰 차

이가 나지 않는 경우 사망률은 1%미만이나, 탈출속도를 1.5m/s로 가정한 경우는 14%로 사망률이 급격히 증가하였다.

2) 화재감지 시간 : 화재감지시간은 승객 생존에 주어진 시간에 직접 영향을 미치는 인자로 화재섬락 시간과 연결되어 승객의 생존율에 큰 영향을 미친다. 화재감지시간이 100초인 경우 승객의 사망률은 10%이지만, 화재감지 시간이 420초인 경우 21%로 증가하였다.

3) 응급지원 도착시간 : 응급지원 도착시간의 영향은 승객의 탈출거리와 연결되어 사망률에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 예로서 응급지원 시간이 500초인 경우 사망률은 2%로 낮으나 900초로 증가한 경우 사망률 또한 15%로 급격히 상승하였다.

본 연구에 현재 진행중인 터널안전과 관련된 많은 연구의 결과를 활용한다면 보다 정확한 승객 생존을 예측이 가능할 것으로 예상된다.

5. 결 론

본 연구에서는 확률론적 기법을 활용하여 터널화재시 승객의 안전성을 예측하기 위한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- i) 승객의 생존을 예측을 위한 확률론적 모델을 구축하였으며, 이의 실현을 위한 평가 코드를 개발하였다.
- ii) 승객의 탈출시간과 승객생존에 요구되는 시간을 기준으로 하여 승객의 생존율을 결정하였다.
- iii) 터널 화재시 승객의 생존에 영향을 미치는 인자의 특성을 분석하였다.
- iv) 승객 생존율을 결정하는 영향인자에 대해 정량적으로 기여도를 분석하였다.

참 고 문 헌

- 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. Network Rail, "Railway Safety Case, Ver. 6", 2004
- 7. 이준성, 광상록, 김영진, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 파괴역학 수법의 적용성 검토", 한국정밀공학회, 제 18권 10호, pp.154-160, 2001
- 8. http://mail.krri.re.kr/~slkwak/theme_1.html, 2004