

# 철도시스템의 확률론적 위험평가 모델 개발 연구

## - 터널화재 위험도 평가에의 적용

### Development of Probabilistic Risk Analysis Model on Railroad System

### - Its Application to Tunnel Fire Risk Analysis

곽상록\*                      왕중배\*\*                      홍선호\*                      김상암\*  
Kwak, Sang-Log              Wang, Jong-Bae              Hong, Seon-Ho              Kim, Sang-Am

---

#### ABSTRACT

Though the probability of tunnel fire accident is very low, but critical fatalities are expected when it occurred. In this study the effect of critical safety parameters on tunnel fire accident are examined using probabilistic technique. Fire detection time, smoke spread velocity, passenger escape velocity, flash-over time, and emergency service arrival time are considered.

In order to estimate the uncertainties of input parameters Monte Carlo simulation are used, and fatalities for each assumed accident scenarios are obtained as results. For the efficiency of iterative calculation PRA(Probabilistic Risk Analysis) code is developed in this study. As a result fire detection have large effect.

---

#### 1. 서론

열차 사고중 터널화재, 충돌 및 탈선사고는 사고발생 확률은 낮으나 사고가 발생할 경우 많은 사상자를 유발하여, 철도선진국에서는 이들 사고에 대비한 안전활동을 활발히 수행하고 있다. 국내에서도 대구 지하철 화재를 계기로 지하공간이나 터널에 대한 화재연구에 대해 많은 관심이 집중되고 있다. 화재, 충돌 및 탈선과 같은 철도의 중대사고에 대한 안전관리를 위해 정량화된 지표로 위험도 개념을 도입하고 있다. 정량화된 지표인 위험도는 사고빈도와 사고시 심각도를 함께 고려하는 값이며, 사고빈도는 과거의 운행이력 및 국내외 자료의 통계적 분석을 통하여 결정하고 있다. 그러나 사고시의 심각도는 사고의 상황, 사고시 응급지원활동, 안전장비 등의 영향을 크게 받아, 평가시 불확실성 매우 커서 정확한 예측이 어렵다.

본 연구에서는 철도시스템의 위험도 평가를 위해서 기초적으로 요구되는 사고시 심각도를 예측하기 위해 확률론적 평가기법을 사용하였다. 확률론적 평가기법은 입력자료의 불확실성이 큰 경우; 입력자료의 분산을 고려하기 위한 평가기법으로 하나의 입력값을 사용하는 대신 확률분포나 데이터베이스를 활용하는 기법으로 발생가능성이 낮은 사건의 정량적 평가를 위해 항공, 원자력, 대형선박 설계분야에 활용중이다.

그러나 아직 국내 철도시스템에 대한 사고위험분석이나 이를 위한 확률론적 평가는 이루어지지 못하고 있는 상황으로 안전개선 투자의 효율성 검토나 안전도의 국제적인 비교가 어려운 실정이다.

---

\* 한국철도기술연구원, 안전체계 연구그룹, 선임연구원, 정회원

\*\* 한국철도기술연구원, 안전체계 연구그룹 리더, 선임연구원, 정회원

반면 국외의 연구결과를 국내에 적용할 경우 많은 가정이나 시설에 대한 설계기준이 상이하여 현실과는 거리가 먼 평가결과를 도출하고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 철도터널의 자료 분석을 통하여 도출된 확률분포와 국내 상황에 맞는 사고시나리오 구성 및 확률론적 평가기법을 연결하여 국내 철도터널 화재시 승객의 생존율에 대한 기초연구를 수행하였다. 본 연구에서 도출된 사고 심각도에 사고빈도를 고려하면, 터널화재시의 위험도가 결정된다.

## 2. 터널화재 사고시나리오 구성 및 안전영향 인자 도출

철도선진국에서는 터널화재 사고에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며, 도출된 안전인자의 대표적인 것이 유독가스제거를 위한 배연시스템과 별도의 피난터널이다. 그러나 국내의 철도 시스템에는 이들 시스템의 설치가 어려운 상황으로 이들의 연구 적용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 승객의 생존 및 탈출에 필요한 시간(Required Time,  $t_r$ )과 승객에게 주어진 시간(Available Time,  $t_a$ )을 기준으로 연구를 수행하였으며, 터널화재의 안전영향인자와 사고시나리오의 세부적인 내용을 다음에 기술하였다.

### 2.1 안전영향 인자의 도출

본 연구에서 승객생존 여부를 결정하는 기준이 되는 두 변수( $t_a$ 와  $t_r$ )중 승객의 탈출에 필요한 시간은 ①열차내 화재의 감지시간, ②탈출거리(터널의 길이와 열차정차위치 및 터널 구배로 결정), ③승객의 탈출속도(터널내 탈출로의 바닥상태, 조명 및 연기상태, 승객밀도에 따라 결정), ④응급지원 도착시간 등에 의해 결정된다. 반면 승객의 생존에 요구되는 시간, 즉 터널을 탈출해야만 하는 한계시간은 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 영향인자의 분포 특성에 따라 Fig. 1과 같은 확률분포로 나타낼 수 있다. 이들 분포는 Fig. 2에서 보는바와 같이 동일한 평균값을 갖더라도 사망률은 상이함을 알 수 있어, 하나의 값을 가정한 해석보다는 확률분포를 활용한 해석이 보다 타당하다 할 수 있다. 본 연구에서는 위에서 언급한 두개 변수의 영향인자의 조합으로 얻어지는 확률분포를 직접 구할 수 없기 때문에 본 연구에서는 각각의 영향인자를 확률변수로 고려하여, Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 적용하여 승객의 생존여부를 결정하였다.

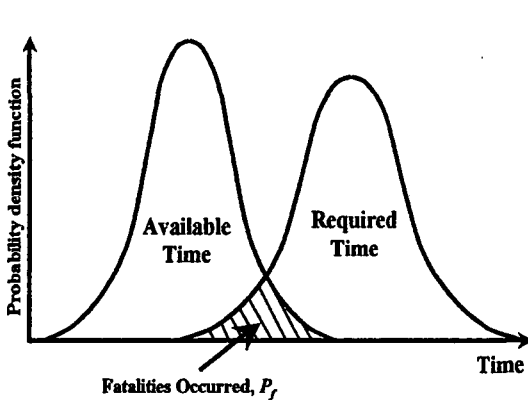


Fig. 1 승객의 터널탈출시간과 생존시간의 분포

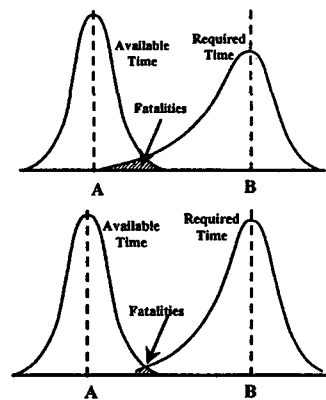


Fig. 2 동일한 평균값 하에서의 상이한 사망률 분포

본 연구에서 고려된 안전영향인자와 3절의 사례연구에서 사용된 자료를 다음에 기술하였다.

- 1) 터널길이와 열차 정차위치 : 길이 300m 이상인 국내의 일반철도터널과 고속철도 터널을 각각 분석한 결과 모두 대수-정규분포를 갖는 것으로 나타났으며, 평균 1005m 표준편차 2637로 계산되었다. 3절의 사례연구에서는 터널내 탈출거리 3km를 기준으로 해석하였다.
- 2) 터널탈출속도 : 열차를 탈출한 승객이 도보로 터널을 탈출하는 속도는 Table 1과 같이 호주에서 연구된 TRAFFIC모델의 값을 참조하였으며, 이 값은 터널내 조명과 시야 확보 여부, 통로 표면 상태에 따라 계산된 값이다. 사례연구에서는 평균 0.5m/s 표준편차 0.4m/s의 정규분포를 가정하였다.

Table 1 터널화재 상황에 따른 승객의 도보 탈출 속도

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	0.2813	0.2	0.2

- 3) 화재감지 시간 : 선행연구가 없는 본 연구에서는 열차에서 발생한 화재를 감지, 화재진압 실패 및 열차 탈출까지의 시간 전체를 확률변수로 가정하여 해석하였다. 3절의 사례연구에서 화재감지 시간은 평균 420초, 표준편차 84초를 갖는 정규분포로 가정하여 해석하였다.
- 4) 응급지원 도착시간 : 열차화재 발생후 응급지원팀이 터널 입구까지 도착하는 시간으로, 평균 900초, 표준편차 600초를 갖는 대수정규분포로 가정하여 3절에서 해석하였다. 터널입구에서 사고현장까지 진입하는 시간은 속도를 2.0m/s로 사고현장까지 도착하는 거리를 나누어 계산하도록 하였다.
- 5) 연기 전파속도 : 연기 전파속도는 터널의 배기시스템이나 터널의 단면적에 따라 상이하나 본 연구에서는 사고지점에서부터 터널입구까지 일정한 속도로 유독가스가 퍼지는 것으로 가정하였다. 3절의 사례연구에서는 2.0m/s로 가정하였다.
- 6) 화재섬락 시간 : 열차발령말에 따라 결정되며, 본 연구에서는 화재발생후 화재섬락까지의 시간을 평균 1200초, 표준편차 300초를 갖는 정규분포로 가정하였다.

## 2.2 터널화재 사고 시나리오

열차화재시 승객이 생존하기 위해서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 ①화재감지, ②화재 확인, 운전사령 보고, ③화재 진압 및 열차 탈출의 결정, ④탈출안내 방송 및 출입문 개방, ⑤터널의 도보 탈출의 과정이 필요하다. 반면, 승객에게 주어진 시간은 화재가 발생하여 발생된 유독가스가 승객의 위치까지 전파되기 직전까지로, 설정하였다. 이외의 가정으로는 응급지원이 도착한 경우 승객의 터널 탈출속도는 2.0m/s로 향상된다고 가정하였으며, 응급지원팀은 2.0m/s의 속도로 터널입구에서 화재현장까지 진입하는 것으로 가정하였다. 해석시에는 Fig. 3과 같이 응급지원의 도움을 받아서 탈출하는 경우와 응급지원이 도착하기전 터널을 탈출하는 경우를 고려하였다. 두 경우 모두에 대해 승객의 생존을 위해 주어진 시간은 동일하나, 승객의 탈출 소요시간을 각각 상이하게 고려하였다. 응급지원을 고려하지 않는 경우 탈출시간은 탈출거리를 탈출속도로 단순히 나누어 결정되며, 응급지원을 고려하는 경우 식(1)을 유도하여 시뮬레이션에 활용하였다.

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

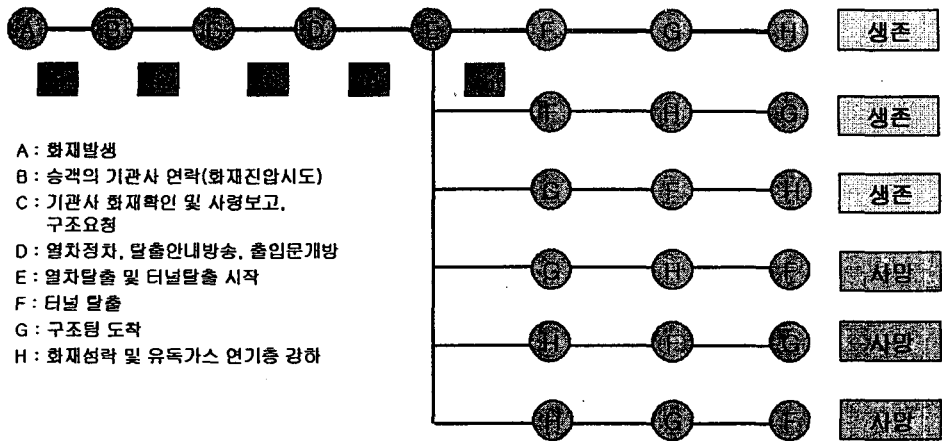


Fig. 3 터널화재시 승객의 생존 및 사망 시나리오

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

### 2.3 승객 생존율의 결정

승객탈출에 소요되는 시간과 승객생존에 주어진 시간을 비교하여 승객의 생존여부를 결정하였다. 입력자료에 포함된 불확실성을 고려하기 위한 확률론적 기법에는 신뢰도지수(reliability index)를 이용한 방법과 시뮬레이션을 활용한 방법이 있다. 신뢰도를 이용한 방법은 복잡한 결합확률분포를 적분하여야 하나 많은 경우 적분이 불가능하여, FORM이나 SORM과 같은 근사해를 구하고 있다. 그러나 이들은 사고 시나리오를 수식으로 표현할 수 없어 본 연구에서는 Monte Carlo 시뮬레이션기법을 활용하여 승객의 생존율을 결정하였다.



Fig. 4 터널화재 위험도평가 코드의 초기화면

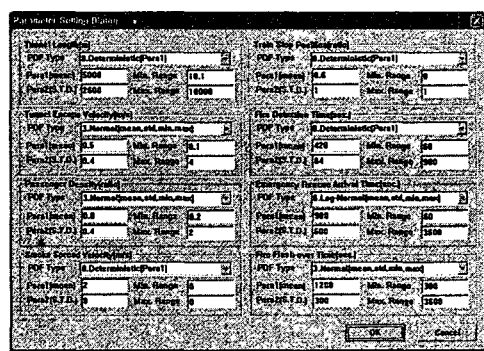


Fig. 5 개발코드의 주요항목 입력화면

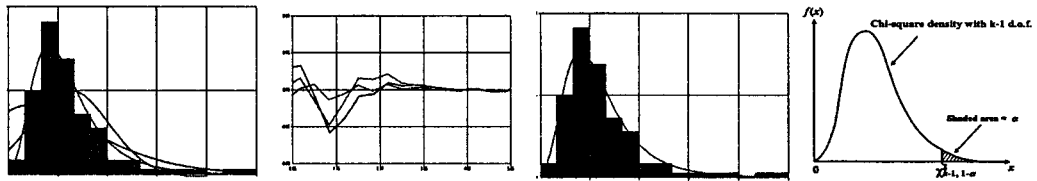
### 3. 국내 터널의 확률론적 위험도평가 및 사례연구

전절에서 언급하였듯이 터널 화재시에는 많은 영향인자가 있으며, Monte Carlo 시뮬레이션의 적용을 위해서는 많은 반복계산이 필요하다. 본 연구에서는 이의 해석을 위해 “PRA-Tunnel Fire” 코드를 개

발하여 사용하였다. 개발코드의 초기화면, 사용자 입력화면을 Fig. 4~5에 수록하였으며, Visual C++를 활용하여 윈도우환경에서 구동되도록 구현하였다.

### 3.1 입력자료의 경향분석

본 연구에서는 주요 입력자료의 분산을 고려하기 위해 확률변수의 경향분석으로 얻어진 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 유도하여 이를 입력자료로 활용하였으며, 확률밀도함수 유도과정의 예를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)에는 구간에 따른 확률변수의 빈도를 히스토그램으로 표시 후 이를 복수개의 확률밀도함수로 곡선접합 하였다. (b)에서는 곡선접합에 대한 각각의 오차계산을 수행하였다. (c)에서는 오차를 통한 최적 확률밀도함수의 결정을 나타내었으며, (d)에서는 Chi-Square 시험을 통한 확률밀도함수의 유효성 검증을 나타내었다.



(a)히스토그램 생성과 곡선접합 (b) 오차계산 (c)최적 확률밀도함수 결정 (d)유효성 검증  
 Fig. 6 확률밀도함수의 도출과 유효성 검증

### 3.2 확률론적 위험도 평가

터널 화재시 NFPA 130의 기준에 따르면 31m 이하의 터널에 대해서는 배연설비와 같은 안전설비를 요구하지 않으며, 300m 이하에 대해서는 해석에 따라 설치여부를 결정하고 있다. 본 연구에서는 배연시설이 없는 5km의 양방향 터널을 해석대상으로 설정하였으며, 주요 입력변수의 값은 전절에서 언급하였다. Monte Carlo 시뮬레이션시 난수발생의 영향을 줄이기 위해 10만번씩 각각 5회의 독립수행을 시행하여 이의 평균값을 승객의 생존율로 결정하였다. 주요 해석의 경우와 승객의 사망률(100에서 승객의 생존율을 제외한 값)를 다음에 기술하였다.

- |                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 1) 주어진 조건활용                 | → 21.4% |
| 2) 승객의 탈출속도만을 확률변수로 가정한 해석  | → 1.5%  |
| 3) 응급구조 도착시간만을 확률변수로 가정한 해석 | → 16.3% |
| 4) 화재선타시간만을 확률변수로 가정한 해석    | → 11.4% |
| 5) 화재감지시간만을 확률변수로 가정한 해석    | → 0.1%  |
| 6) 모두 평균값을 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 각각의 변수 영향을 확인하기 위해 각각의 변수에 대해서 평균값과 표준편차를 수정하면서 다양한 해석을 수행하였다.

- 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 차이가 나지 않는 경우 사망률은 1%미만이나, 탈출속도를 1.5m/s로 가정한 경우는 14%의 사망률을 나타내었다.

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

#### 4. 결론

본 연구에서는 확률론적 기법을 활용하여 터널화재시의 위험도평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 철도시스템의 위험도평가를 위한 기초연구와 입력자료를 분석하였다.
- 위험도 평가의 주요 영향인자를 도출하였으며, 이들의 개별적인 영향을 분석하였다.
- 승객의 탈출시간과 승객생존에 요구되는 시간을 기준으로 하여 승객의 생존율을 결정하였다.
- 탈출거리, 화재감지시간, 승객탈출 속도, 응급지원 도착시간, 화재선타시간에 대한 영향을 정량적으로 분석하였다.

#### 참고문헌

1. Powell S and Grubits S, "Tunnel Design with TRAFFIC-Tunnel Risk Assessment For Fire Incidents and Catastrophes", Proc. of Independent Technical Conferences, Lyon, 1999
2. 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
3. NFPA 130, "U.S. National Fire Protection Association Standard 130", 1995
4. Molag M, Mierlo R, "Realistic Fire Scenarios for Safety Assessments of Train Fires in Tunnel", Proc. of Independent Technical Conferences, Madlid, 2001
5. Andrew A Dykes and Gary P Wolf, "Quantitative Risk Assessment of Railroad Derailment Accidents", Int. Conference on PSAM5, Osaka, 2000
6. Railtrack, "Profile of Safety Risk on Railtrack PLC-Controlled Infrastructure", Railway Safety Issue, SP-RSK-3.1.3.11, 2001
7. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, "장대터널 화염방재 기술 및 환기공조시스템 개발", 2003
8. Law, A.M. and Kelton, W.D., "Simulation Modeling and Analysis", McGraw-Hill Press, 1991
9. Kwak, Sang-log, Lee, Joon-seong, Kim, Young-jin, and Park, Youn-won, "A Probabilistic Integrity Assessment of Flaw in Zirconium Alloy Pressure Tube Considering Delayed Hydride Cracking", International Journal of Modern Physics B, Vol. 17, Nos. 8 & 9, pp. 1587-1593, 2003
10. 이준성, 광상록, 김영진, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 확률론적 파괴역학 수법의 적용성 검토", 한국정밀공학회, 제 18권 10호, pp.154-160, 2001