

터널 화재시 승객의 개인적 위험도 계산에 대한 확률적 접근

## The probability approach for the personal risk calculation of the passenger due to a tunnel fire

김동진\*                      황영하\*\*                      장용준\*\*\*  
Kim Dong-Jin      Hwang, Young-Ha      Jang, yong-jun

---

### Abstract

The land transportation is the most common way to transport passengers as well as freight among other mode of transportations and consequently more likely to be constructed for faster and convenient travel In this regard, the demand for tunnel constructions will be increasing and the safety inside the tunnel will be considered major concern more than ever. In this paper, we show probabilistic methodology to calculate the personal risk of each evacuee starting from a different location in a tunnel on fire. Passenger evacuation time and smoke spread time are both assumed to be continuous random variables having specific distributions. The evacuation of passengers at each location and the safety facilities inside the tunnel are also crucial factors to calculate the probability of death.

---

### 1. 서론

#### 1.1 연구의 배경 및 목적

터널과 같은 부분적으로 밀폐된 공간 내에서의 화재가 발생했을 경우 화염과 연소가스의 발생으로 많은 인명피해를 주고 있으며, 터널 자체를 붕괴하거나 훼손하는 경우도 발생하고 있다.

국내에서도 효율적이고 신속한 수송을 위하여 장대터널 건설이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 터널 내에서의 위험성을 예측하고 평가하기 위하여 외국에서는 다수의 실물 화재시험을 실시하여 연기의 유동과 관련한 제 현상을 연구하고 방재설비 및 피난시스템, 특히 체연방식을 교체하는 계기가 되기도 하였다.

---

\* 부산대학교, 국제전문대학원 부교수, 정회원

E-mail : ssskdj@yahoo.co.kr

TEL : (051)510-3726      FAX : (051)581-7144

\*\* 연세대학교, 정보산업공학과 박사과정

\*\*\* 철도기술연구원, 책임연구원

장석부 [3] 등은 양방향 도로 터널에 있어서 화재 거동현상 및 사망자수를 계산하기 위해 화재 및 피난 시뮬레이션을 이용하였다. Molag [8]은 실제 화재시나리오를 이용하여 파리와 암스테르담을 연결하는 Green Heart 터널을 대상으로 터널내 화재 시나리오에 대한 해석으로 스프링클러의 영향, 열발생률의 영향을 분석하였다. 본 연구의 목적은 도로터널 내 화재 발생시 화재 특성 등에 대한 기존 논문의 데이터를 이용하여, 대피 위치별 승객의 사망확률을 정량적으로 분석하고, 그 위험도를 파악하는 확률적 방법을 제시하는데 있다.

## 2. 승객 사망확률 산출방법

### 2.1 승객 사망의 정의 및 사망 확률

터널내 화재사고시 주요 사망원인은 유해가스에 의한 질식이다. 본 연구에서는 승객이 안전한 장소(대피로)로 이동하는데 필요한 총 시간과 유해가스가 승객에게까지 도달하는 총 시간을 비교하여 승객 탈출 시간이 더 많이 소요될 경우 승객이 사망하는 것으로 가정하였다. 화재 사고 시 각 지역별 탈출 승객의 사망유무는 다음 식으로 표시 할 수가 있다.

$$Z_{ij} = T_{j(s)} - T_{ij(e)}, \text{ if } \begin{cases} Z_{ij} \leq 0, & \text{대피위치 } j \text{에서의 승객 사망} \\ Z_{ij} > 0, & \text{대피위치 } j \text{에서의 승객 생존} \end{cases}$$

$$T_{ij(e)} = t_{i(a)} + t_{i(r)} + t_{ij(e)}$$

$$T_{j(s)} = t_{(f)} + t_{j(s)}$$

여기서,

$i$ : 터널 내 대피 승객의 초기 위치

$j$ : 터널 내  $j$  번째 비상대피로

$T_{ij(e)}$ : 위치  $i$ 의 승객이  $j$  번째 대피로로 이동하기까지 소요되는 총 시간

$T_{j(s)}$ : 화재 발생 후 유해연기가  $j$  번째 대피로까지 도달하는 총 시간

$t_{i(a)}$ : 위치  $i$ 의 승객이 화재상황을 감지하기까지의 시간

$t_{i(r)}$ : 위치  $i$ 의 승객이 화재상황을 인지한 직후 대피를 시작하기 전까지 준비시간

$t_{ij(e)}$ : 위치  $i$  지역의 승객이  $j$  번째 대피로로 이동하는데 소요되는 보행시간

$t_{(f)}$ : 화재발생 후부터 flash-over time에 이르기까지의 소요시간

$t_{j(s)}$ : flash-over time 이후 유해가스가  $j$  번째 대피로까지 도달하는데 소요되는 시간

### 2.2 승객 사망 확률 분포

본 연구에서는 탈출 시간과 전파시간이 특정한 확률 분포를 따른다고 가정하였다. 그리고 각 위치에서의 승객의 사망확률을 산출하였다.

$T_{ij(e)}$ ,  $T_{j(s)}$  를 독립적인 연속 확률 분포라고 가정하고, 밀도 함수를 각각  $f_{ij(e)}$ ,  $f_{j(s)}$  라고 하면, 승객

의 사망확률은 아래와 같이 표현된다.

$$P(\text{대피위치 } i \text{의 승객사망}) = P(T_{ij(e)} > T_{j(s)})$$

$$= \int_0^{\infty} F_{j(s)}(e) f_{ij(e)}(e) de$$

여기서,  $F_{j(s)}(e) = \int_0^e f_{j(s)}(s) ds$

승객의 사망확률을 계산하기 위해,  $y = f_{j(s)} - f_{ij(e)}$  놓으면 아래의 Fig.1과 같이  $y$ 의 함수로 표현할 수 있으며,  $y > 0$  이면 승객이 생존하는 경우이고,  $y < 0$ 이면 승객이 사망하는 경우이다.

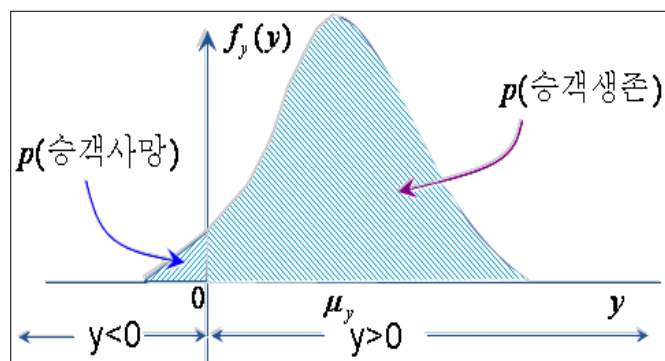


Fig. 1 Distribution function of passenger death probability

### 3. 사례연구(영동고속도로 둔내터널)

본 연구에서는, 이러한 시간들을 고려하고, 개개인의 승객이 대피시의 사망확률을 계산하기 위해 다음과 같이, 장대 도로 터널의 경우를 이용하여 사망확률을 분석하였다.

#### 3.1 터널의 특성

##### 3.1.1 영동고속도로 둔내터널

둔내 터널은 영동 고속도로상 신갈기점 127.12km지점에 위치해 있는 양방향도로터널이며 총연장은 3.3km로써 길이만으로 국내 2위의 도로터널이다. 이에 장대터널에서의 화재사고를 가정하여 승객사망확률을 정량적으로 산출하는 대상터널로 선정을 하였다.

##### 3.1.2 방재 설비

터널내 주요 방재설비는 화재발생시 승객의 안전을 최대한 보장해주는 역할을 담당한다. 이들 방재설비들 중에서 터널 화재 사고시 승객의 직접적인 사망원인에 해당하는 유해연기와 관련된 두 요인을 선

정하였다.

첫째는 비상조명등으로써 승객이 대피로까지 탈출하는 총 소요시간에 보행시간이 포함되어 있는데 비상조명등의 작동여부에 따라 터널내부의 밝기가 좌우되며 정상작동이 되었을 경우에는 정상보행속도를 유지하는 것으로 가정하였다.

둘째는 비상환풍기으로써 터널내연기가 승객에게 전파되는 속도를 지연시키는 역할을 담당하는 장비이다.

본 논문에서는 비상환풍기가 원활히 작동할 경우에 유해연기의 전파속도가 늦춰지는 것으로 가정하였으며 미작동의 경우에는 유해연기 전파속도를 유지하는 것으로 설정하였다.

### 3.2 화재 가정사항

#### 3.2.1 일반사항

둔내터널의 비상통로는 500m 간격으로 설치 되어있다. 아래 Fig. 2는 화재 상황을 가정하여 도식한 것이다. 각 zone은 비상 통로간의 거리 간격별로 구분한 것이다.

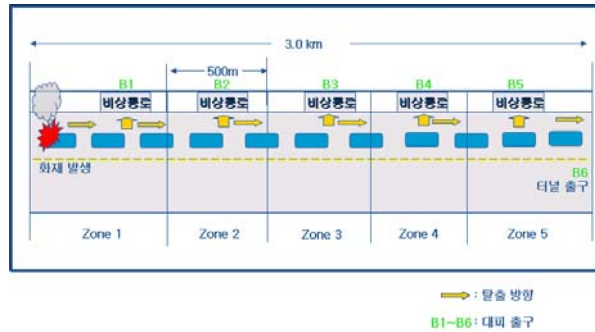


Fig. 2 Tunnel fire model

화재발생위치는 터널 출구로부터 300m 지점으로 설정하였고, 화재가 발생 하였을 때 승객의 탈출방향은 화재반대방향으로 가정하였다. 본 연구에서 비상통로간(각 zone간)의 중간지점(250m) 위치한 승객이 대피하는 것으로 가정하였다. 탈출 승객들은 대피시 가장 가까운 대피로를 이용하는 것이 정상적인 대피행태이나, 대피하는 승객들의 비상대피로 선택확률은 동일한 것으로 가정하였다. 일반적으로 비상 대피로를 사용하는 승객의 사망확률은 다음과 같은 조건부 확률을 이용하여 계산 할 수 있다.

$$P(\text{승객 사망}) = \sum P(\text{비상대피로 } i) P(\text{승객사망} | \text{비상 대피로 } i), i=1, \dots, n.$$

#### 3.2.2 화재 감지시간

화재 감지시간은 터널 내 승객이 화재상황임을 인지하기까지 소요되는 시간으로써 터널내 화재감지장치의 설치형태와 이용자의 유무 등 여러 가지에 의해 달라진다. 본 연구에서는 각 zone 별로 30초 가량의 시간 차이를 두었으며, 일정거리를 벗어나면 화재상황을 인지하는데 소요되는 시간은 차이가 없는 것으로 가정하였다.

Table 1 Fire perception time

구분	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	zone5
소요시간(초)	60	90	150	210	210

### 3.2.3 준비시간

준비시간은 대피를 결정하고 반응하는 예비행동시간으로써, zone 별로 30초의 시간 간격을 두었으며, 일정 거리를 벗어나면, 시간차이는 없는 것으로 가정하였다.

Table 2 Ready time

구분	Zone1	Zone2	Zone3	Zone4	zone5
소요시간(초)	30	60	90	120	120

### 3.2.4 보행시간 및 총 탈출 시간

보행시간은 승객이 안전한 지대로 이동하기까지 소요된 순수한 도보이동 시간으로써 CIBSE Guide E에 따르면 터널 내 성인의 정상 도보 속도는 1.2m/s, 열악한 조명상태에서의 도보속도 0.9m/s로 조사되었다. 승객의 보행속도별로 각 zone의 중간위치에서 각 대피로까지 탈출에 소요되는 총 시간을 계산하면 Table 3과 Table 4와 같다.

Table 3 Escape time(1.2m/s)

구분	B1	B2	B3	B4	B5
Zone1	298	715	1131	1548	1965
Zone2	-	358	775	1191	1608
Zone3	-	-	448	865	1281
Zone4	-	-	-	538	955
zone5	-	-	-	-	538

Table 4 Escape time(0.9m/s)

구분	B1	B2	B3	B4	B5
Zone1	367	923	1478	2034	2590
Zone2	-	427	983	1538	2094
Zone3	-	-	517	1073	1628
Zone4	-	-	-	607	1163
zone5	-	-	-	-	607

### 3.2.5 Flash-over time

flash-over란 발화 후 급속도로 수평방향으로 불이 번져 연소면적이 넓어짐과 동시에 복사열에 의해 실내에 있는 가연물의 열분해가 한층 촉진되어 가연성 가스와 공기가 혼합되면서 연소범위에 들어가게 되며 연소중의 불에 인화하여 급속히 화재가 확대 되며 온도가 상승하기 시작하는 현상으로 화재공간의 구조, 내장재, 화원의 크기에 따라 상이하다. Molag [8]은 파리와 암스테르담을 연결하는 Green Heart 터널을 대상으로 실제 화재 시나리오를 활용한 터널내 화재 안전성평가를 실시하였는데 이때의 flash-over time은 Table 5와 같다.

Table 5 Flash-over time

화재 규모	flash-over time(초)
20MW	180
30MW	600

### 3.2.6 연기 전파 시간

연기 전파시간은 flash-over time 직후 유해연기가 이동을 시작하여 승객에게 도달하기까지의 소요시간으로써 화재의 규모에 따라 달라진다. N Rhodes [9]는 일반적으로 화재 규모별 연기 전파 속도를 아래와 같이 제안하였다.

Table 6 Smoke speed of travel

열 확산율	연기 전파 속도	
	비상환풍기 작동	비상환풍기 미작동
20 MW	1.2 m/s	1.4 m/s
30 MW	1.8 m/s	2.0 m/s

### 3.3 시나리오 구성

초기 화재규모는 20MW와 30MW 2가지로 구분을 하여 화재가 발생한 후에 초기 화재진압의 성공여부, 터널내 화재감지기의 화재 감지 여부, 화재 발생 당시의 터널 내 조명상태, 비상환풍기의 작동여부로 총 5가지의 요인으로 구성하였으며 세부구성 내용은 Table 7과 같다.

Table 7 Fire scenario

화재규모	초기진압	화재 감지기	조명상태	비상환풍기	
20MW	실패	성공			
		작동	양호	작동	작동
				미작동	미작동
			불량	작동	작동
				미작동	미작동
		미작동	양호	작동	작동
				미작동	미작동
			불량	작동	작동
미작동	미작동				
30MW	실패	성공			
		작동	양호	작동	작동
				미작동	미작동
			불량	작동	작동
				미작동	미작동
		미작동	양호	작동	작동
				미작동	미작동
			불량	작동	작동
미작동	미작동				

### 3.4 시나리오별 사망확률

시나리오별 사망확률을 산출하기 위해서는 연기전파 시간과 승객 탈출 시간이 필요하다. 연기 전파 시간은 화재규모별로 전파속도가 다르며 환풍기의 작동여부에 따라 속도의 차이를 보이므로 각각의 경우에 따른 연기 전파시간을 산출해야 한다. 화재 가정 사항들을 이용하여 화재 지점으로부터 각 대피로까지의 연기전파시간을 구하면 Table 8과 같다.

아래 Table 8과 Table 9에서 각 구역으로의 연기 전파 시간 및 승객 탈출 시간은 정규 분포로 가정하고 표준편차는 시간에 대한 10% 정도로 가정하였다.

Table 8 Smoke arrival time

화재규모	구분 전파 속도	연기 전파시간					표준편차				
		B1	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B3	B4	B5
20MW	1.2m/s	388	805	1221	1638	2055	40	80	120	160	200
	1.4m/s	358	715	1072	1430	1787	30	70	100	140	170
30MW	1.8m/s	388	735	1013	1291	1568	40	70	100	120	150
	2m/s	358	662	912	1162	1412	30	70	90	110	140

Table 9 Escape time(zone 1)

보행 속도	구역	승객 탈출 시간					표준편차				
		B1	B2	B3	B4	B5	B1	B2	B3	B4	B5
1.2m/s	zone1	298	715	1131	1548	1965	30	70	110	150	190
0.9m/s	zone1	367	923	1478	2034	2590	30	90	140	200	250

zone1의 서브시나리오별 각 대피로로 대피하는 승객의 사망확률은 Table 10과 같다.

Table 10 Passenger death probability(zone1)

	B1	B2	B3	B4	B5	사망확률
s1	-	-	-	-	-	0.0000
s2	0.0354	0.1985	0.2887	0.3402	0.3721	0.2470
s3	0.0766	0.4971	0.6521	0.7173	0.7572	0.5401
s4	0.3348	0.8364	0.9177	0.9388	0.9526	0.7961
s5	0.5787	0.9654	0.9907	0.9933	0.9960	0.9049
s6	0.0354	0.1985	0.2887	0.3402	0.3721	0.2470
s7	0.0766	0.4971	0.6521	0.7173	0.7572	0.5401
s8	0.3348	0.8364	0.9177	0.9388	0.9526	0.7961
s9	0.5787	0.9654	0.9907	0.9933	0.9960	0.9049
s10	-	-	-	-	-	0.0000
s11	0.0354	0.4177	0.7856	0.9094	0.9491	0.6195
s12	0.0766	0.7033	0.9382	0.9809	0.9904	0.7379
s13	0.3348	0.9499	0.9965	0.9992	0.9997	0.8561
s14	0.5787	0.9889	0.9996	0.9999	0.9999	0.9134
s15	0.0354	0.4177	0.7856	0.9094	0.9491	0.6195
s16	0.0766	0.7033	0.9382	0.9809	0.9904	0.7379
s17	0.3348	0.9499	0.9965	0.9992	0.9997	0.8561
s18	0.5787	0.9889	0.9996	0.9999	0.9999	0.9134

각 zone에서의 서브시나리오별 승객의 사망확률도 같은 방식으로 계산 할수 있다.

### 3.5 Zone 별 대피 승객 평균 사망 확률 산출

zone 1 에서의 평균 사망확률을 다음식에 의해서 구할 수가 있다.

$$E(\text{Death probability}) = \sum P(S_i) \cdot P(\text{Death } i)$$

여기서 P(S<sub>i</sub>)는 서브시나리오 S<sub>i</sub>의 발생 확률이고, P(Death i)는 서브 시나리오i 상에서의 승객 사망확률이다. zone 1 에서의 평균사망확률은 E(Death probability)=0.0758 이 된다.

각 zone에서의 승객의 평균 사망확률도 같은 방식으로 구할 수 있으며,, 화재 발생 지점에서 멀어질수록 승객의 평균 사망확률은 감소하게 된다.



#### 4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 국내 도로터널에서 화재가 발생했을 경우의 승객사망확률 산출방법에 대한 정량적인 접근방법을 제시하였다. 이를 위하여 유해연기가 승객에게 도달하는 전파시간과 승객 탈출시간을 확률변수로 가정하고 비교하여 승객사망확률을 계산하였다. 본 연구에서 사용한 데이터 값들 중에서 화재감지 시간 및 준비시간은 승객의 행동 특성에 크게 좌우되기 때문에 임의로 가정하였다. 또한 시나리오별 확률 계산 시 필요한 분기별 확률값도 임의로 선정하였다. 향후 터널화재 관련된 실질적인 데이터 및 터널 내 장비와 방재 설비의 신뢰도 분석을 통해 정확한 확률값이 산출된다면, 보다 정확한 사망확률을 계산할 수가 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 “미래철도기술개발사업”의 일환으로 한국철도기술연구원의 연구지원으로 이루어졌습니다.

#### 참고문헌

1. 김시곤(2004) . 유해물질수송의 위험도 평가 모형
2. 박창규 하재주(2003), 확률론적 안전성 평가”, 브레인코리아
3. 장석부, 허도학, 문상조(2005), 양방향 장대터널에서 대피 및 화재 위험도 평가 방법”, 유신기술회보, 제 12호
4. 허문희(1994), 화학공정의 정량적 위험성분석을 위한 위험성평가와登高선작도”
5. 한국건설기술연구원(2004), 건설공사의 확률적 위험도 분석평가 기법 개발”
6. Paul Mann, "Fire Risk Assessment Study for a . High Speed Train", PMSC
7. M. Molag(2001), Realistic Fire Scenarios for Safety Assessments of Train Fires in Tunnel, TNO Environmental Sciences, Netherland
8. M. Molag & L. Sluis, Quantitative Risk Analysis to Optimize Fire Safety during Basic HSL South Tunnel Design, TNO Environmental Sciences, Netherland
9. N Rhodes & H Wong Faster And Safer Evacuation By Designing for Behavioural Trends
10. Spadoni G., Leonelli P., Egidi D(1997) , Quantitative Risk Analysis of Industrial and Transportation Activities in the Ravenna Area: a Second Report, ESREL 97 Conference, Lisbon,
11. CIBSE Guide E, Fire Engineering, UK