

# 정량적 위험도 평가를 통한 열차 승강장 화재시 최적 제연모드 선정에 관한 연구

이보훈<sup>1</sup> · 홍서희<sup>2</sup> · 백두산<sup>3</sup> · 이호형<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>비회원, (주)주성지앤비 대리

<sup>2</sup>비회원, (주)주성지앤비 주임

<sup>3</sup>정회원, (주)주성지앤비 과장

## A study on the selection of the optimal smoke control mode in train platform through quantitative risk assessment

Bo-Hoon Lee<sup>1</sup> · Seo-Hee Hong<sup>2</sup> · Doo-San Baek<sup>3</sup> · Ho-Hyung Lee<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Assistant Manger, JS G&B Inc.

<sup>2</sup>Senior Researcher, JS G&B Inc.

<sup>3</sup>Manager, JS G&B Inc.

\*Corresponding Author : Ho-Hyung Lee, hhlee@gnbeng.com

### Abstract

In the case of train stations, due to the specificity of underground spaces with limited smoke emissions, if appropriate removal equipment is not equipped, the damage caused by fire smoke may increase in the event of a fire. As a result, the need for measures to ensure the safety of evacuation of underground stations has been highlighted, and research for safe evacuation of platform users in case of fire is continuously being conducted at home and abroad. However, although the smoke removal area is currently divided by smoke boundary walls and platform screen doors (PSD) and installed in the train platform, standards for smoke removal methods (air supply or exhaust) for each fire removal area, that is, smoke removal mode, are not presented. In this study, fire analysis and evacuation analysis were performed to estimate the number of deaths and to derive F/N guidance in order to quantitatively evaluate the fire risk according to the fire station fire, and the total risk was the lowest in the case of fire area exhaust and supply to adjacent areas.

**Keywords:** Platform fire, Smoke control mode, FED, QRA (quantitative risk assessment)

### 초 록

열차 정거장의 경우 연기배출이 제한된 지하공간이라는 특수성으로 인해 적절한 제연 설비가 갖추어지지 않는다면 화재 발생시 화재연기로 인한 피해가 확대될 우려가 있다.

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
24(6)539-552(2022)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.539>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 11, 2022

Revised November 23, 2022

Accepted November 24, 2022



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

[www.kci.go.kr](http://www.kci.go.kr)

이에 지하 정거장의 대피 안전성을 확보하기 위한 대책의 필요성이 부각되었으며, 화재시 승강장 이용객의 안전한 대피를 위한 연구가 국내외에서 지속적으로 수행되고 있다. 하지만 현재 열차 승강장에는 제연 경계벽과 PSD (Platform Screen Door) 등에 의해 제연구역을 구획하여 제연설비를 설치하고 있으나, 화재시 제연구역별 제연방법(급기 또는 배기) 즉, 제연모드에 관한 기준은 제시되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 열차 정거장 화재시 제연모드에 따른 화재위험을 정량적으로 평가하기 위해서 화재해석 및 대피해석을 수행하여 사망자수를 추정하고 F/N 선도를 도출하였으며, 이를 통해 최적 제연모드를 검토한 결과, 화재 구역 배기 및 인접구역 급기인 경우에 총 위험도가 가장 낮은 것으로 분석됐다.

**주요어:** 승강장화재, 제연모드, 유효복용분량, 정량적 위험도 평가

## 1. 서론

열차의 승강장은 주로 도심지와 도심지 사이의 인적·물적 교통통행을 목적으로 지하화를 통해 지상의 공간을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 극대화하여 대표적인 대중교통수단으로 이용되고 있으며, 인적·물적 탑승 및 하차를 위하여 정거장이 설치되고 있다. 이러한 철도터널에 설치되는 승강장은 지하공간 혹은 구획화된 건축물 임에 따라 밀폐된 구조를 갖고 있어 화재시 피해를 최소화하기 위해 적절한 제연설비를 갖추고 있다.

국내·외적으로 열차 승강장에 대한 다양한 연구가 활발하게 진행 중이며, Bartlett (2012)은 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용하여 승강장 화재시 정거장 양단 배기 시스템의 가동조건에 따른 가시도 변화를 해석하였으며, 정거장 양단 배기 시스템을 배기로 가동하는 Pull-Pull (배기-배기)인 경우가 대피 환경 확보에 보다 효과적인 것으로 보고하였다. 국내의 Kim et al. (2018)과 Rie (2003)의 연구에서도 승강장에서 열차화재가 발생하는 경우에 제연모드별 연기전파 특성에 대해 분석한 결과, 본선 양단 배기를 배기모드로 하는 것이 대피환경 확보에 효과적인 것으로 발표했다. 또한 McKeen (2016)은 화재 성장률이 시간의 제곱에 비례하는 “T-squared” 공식을 적용해 화재 해석을 수행하고, 화재성장곡선이 대피 안전성에 미치는 영향을 ASET (Available Safety Egress Time, 유효안전피난시간)과 RSET (Requirement Safety Egress Time, 필요안전피난시간)으로 비교하여 검토하였다.

전술한 열차 승강장의 화재안전성 확보를 위한 연구들의 경우, 수치해석적 방법으로 화재해석을 수행하여 화재특성에 대한 검토 후, 대피해석을 별개로 수행하여 ASET과 RSET을 비교하는 정성적인 방법으로 위험에 대한 평가를 수행하였다. 하지만 이는 화재시 발생하는 화재연기가 대피자의 대피환경에 미치는 영향을 정량적으로 반영하기 어렵다. 이에 대해 Rie and Ryu (2020)는 승강장에서 열차화재시 제연모드에 따라 화재해석 및 대피해석을 수행하여 대피자가 화재에 노출되는 정도를 유효복용분량(Fractional Effective Dose, FED)으로 정량화하는 기법을 제시하고 사망자를 추정하여 제연모드에 따른 안전성을 정량적으로 비교하였다(Rie and Ryu, 2020).

일반적으로 열차 승강장의 제연설비는 공조용 급·배기 시스템(Heating, Ventilation, Air Conditioning, HVAC), 본선부의 배열시스템(Track Exhaust System, TES), 본선화기 및 배연을 위한 승강장 양단 배기 시스템(Tunnel Ventilation System, TVS) 등이 있으며, 이를 통해 승강장 내의 열환경 및 공기질을 적정 수준으로 유지하고 있다.

그러나, 이와 관련된 기준에서는 앞서 서술한 설비들의 조합에 따른 적절한 제연모드와 관련된 사항이 부족하여 화재시 보다 안전한 열차 승강장을 구축이 필요할 것으로 예상된다. 상기 서술한 열차 승강장의 제연설비는 설치 유무와 제연구역별 제연모드에 따라 화재연기의 확산 양상이 달라질 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 열차의 승강장 중 상대식 승강장을 대상으로 화재 발생시 제연모드에 따른 위험도를 정량적 위험도 평가를 통해 비교·분석하여 화재시 피난안전성 확보를 위한 최적의 제연모드를 제시하였다.

## 2. 해석대상

본 연구에서는 열차 승강장에서 열차 화재가 발생하는 경우, 화재열차에 따른 최적 제연모드 산정을 위해 160 m 길이의 승강장을 모델링하고 40 m 간격으로 제연구역을 구획하였으며, 각 제연구역당 제연풍량은 “제연설비의 화재안전기준(NFSC 501)”에서 정하는 바와 같이 50,000 m<sup>3</sup>/hr로 적용하였다. 또한 화재위치별 4개의 제연모드(화재위치별 4개의 제연모드 ① 전 구역 급기, ② 전구역 배기, ③ 화재 구역 급기 및 인접구역 배기, ④ 화재 구역 배기 및 인접구역 급기)를 구성하였으며, 사망자수 분석을 통해 제연모드에 따른 대피 안전성을 정량적으로 분석하였다. 본 연구에 대상이 인 상대식 승강장의 제원은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 총 길이 160 m, 높이 및 폭은 각각 3.0 m, 7.2 m이다. 계단은 승강장 중앙에 좌·우 대칭으로 위치하고 있으며, 폭은 4.4 m이다. 제연구역은 40 m 간격으로 제연경계벽과 PSD, 벽면으로 이루어져 있으며 화재 승강장에서 총 4개의 제연구역으로 구획하였다.

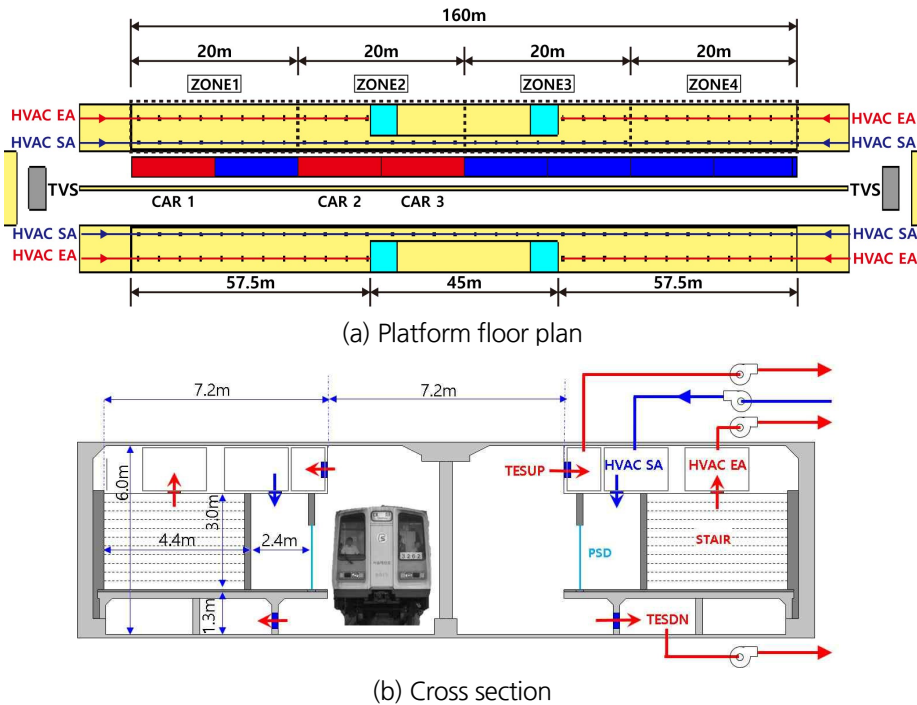


Fig. 1. Subway platform model

화재열차는 Fig. 1의 (a)에 나타낸바와 같이 한쪽 승강장에 정지한 상태이며, 화재 객차는 열차 중 1호, 3호, 4호차이다. 화원은 열차의 바닥에 위치한 것으로 가정했으며, 폭 3 m, 길이 20 m 크기로 적용하였다. 화재연기 발생수율(Soot Yields) 및 CO발생수율(CO Yields)은 현재 지하철 차량에 대해 제시된 값이 없으므로 수도권 고속철도 정량적 위험도 평가에 적용한 0.161, 0.189 g/gFuel을 적용하였다(KTA, 2015).

### 3. 해석모델 및 해석방법

#### 3.1 해석모델

본 연구에서 고려한 해석모델은 제연모드의 경우 정거장 양단 배기 시스템과 선로부에 위치한 TES는 모두 배기모드로 작동하는 것으로 고려했으며, 화재가 발생하지 않은 승강장의 PSD는 닫힌 상태로 가정하여 화재 연기가 승강장 내부로 유입되지 않으므로 해당 승강장의 HVAC를 가동하지 않는 것으로 고려했다. 화재 승강장 PSD의 경우 열차 이용자의 피난을 위해 화재 종료시까지 개방된 상태로 가정하여 화재 차량의 위치에 따라 제연구역 별로 디퓨저의 가동모드를 달리하여 총 12개의 모드를 구성했으며, Table 1에 나타낸 바와 같다. Mode 1의 경우 모든 제연구역의 디퓨저를 급기로 가동한 경우이고, Mode 2의 경우 모두 배기로 가동한 경우이다. Mode 3의 경우 화재 열차가 위치한 구역의 디퓨저는 급기로 가동하고 그 외의 디퓨저는 배기로 가동한 경우이며, Mode 4의 경우 화재구역의 디퓨저는 배기, 그 외 디퓨저는 급기로 가동한 경우이다.

Table 1. Analysis case (platform supply and exhaust volume and smoke exhaust mode)

Fire train	Case	Plat. Zone 1 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 2 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 3 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 4 (m <sup>3</sup> /min)	TES (m <sup>3</sup> /min)		TVS (m <sup>3</sup> /min)
						Top	Bottom	
Car 1	Mode 1	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 2	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 3	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 4	-833 (exhaust)	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
Car 2	Mode 1	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 2	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 3	-833 (exhaust)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 4	+833 (supply)	-833 (exhaust)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)

**Table 1.** Analysis case (platform supply and exhaust volume and smoke exhaust mode) (continued)

Fire train	Case	Plat. Zone 1 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 2 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 3 (m <sup>3</sup> /min)	Plat. Zone 4 (m <sup>3</sup> /min)	TES (m <sup>3</sup> /min)		TVS (m <sup>3</sup> /min)
						Top	Bottom	
Car 3	Mode 1	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 2	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 3	-833 (exhaust)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)
	Mode 4	+833 (supply)	-833 (exhaust)	+833 (supply)	+833 (supply)	-833 (exhaust)	-833 (exhaust)	-5,000 (exhaust)

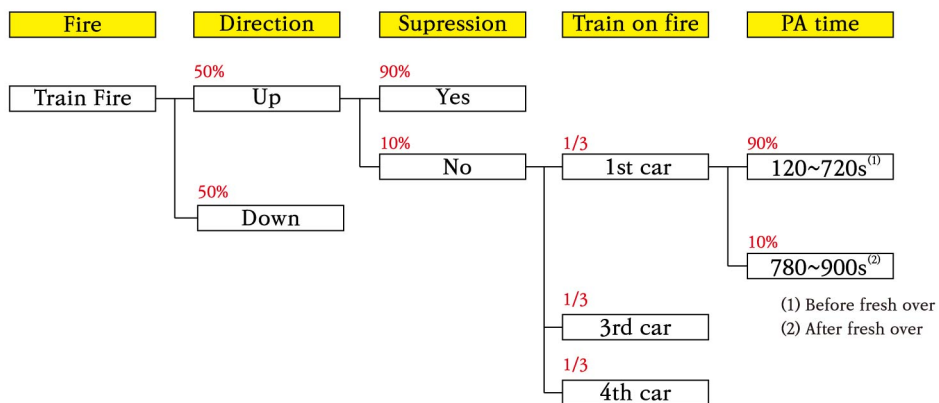
### 3.2 해석방법

철도터널의 정량적 위험도평가 방법은 기본적으로 RSRG (Railway Safety Research Group, 2011)이 제시한 “철도터널 화재 안전성 평가 매뉴얼, 2011”에 따라 수행하였으며, 적용된 주요 변수들은 다음과 같다.

#### 3.2.1 화재사고 시나리오 및 사건의 분기비

국도교통부의 ‘철도안전정보 종합관리시스템’의 통계자료를 기반으로 최근 10년(2012~2021년)간의 열차운행거리 및 화재건수에 따른 화재사고 발생률을 조사한 결과, 본 연구의 대상인 도시철도의 경우 총 화재건수는 10건, 총 열차의 운행거리는 1,289.05 × 100만km로써 화재사고발생률은 0.0078건/100만 tr·km으로 조사되었다.

한편, 시나리오의 분기비는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 각 시나리오에 따라 관련 연구결과를 적용하여 각 상황에 따른 분기비를 적용하였다(Molag et al., 2001; BSI, 2003; Both and Haack, 2004).



**Fig. 2.** Fire scenario

### 3.2.2 열차 화재 강도

본 연구에 적용한 열차 화재강도는 20 MW로써, “철도터널 화재안전성 평가 매뉴얼(Railway Safety Research Group, 2011)”에서 제시하는 신형 전동차에 대한 화재성장곡선을 적용하였으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 785초에 화재강도 1 MW 도달하여 900초에 Flashover에 도달한 후 1,120초 이후 감소한다.

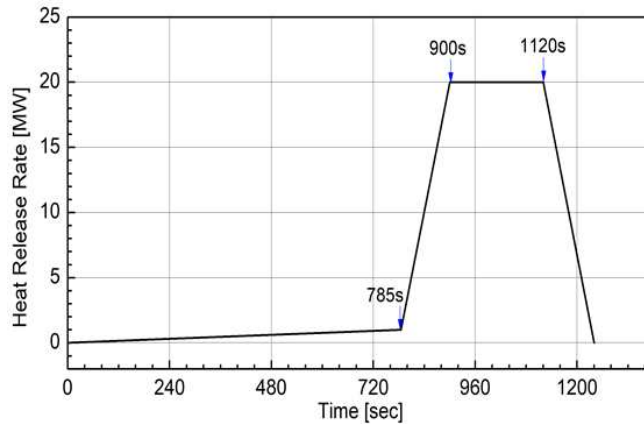


Fig. 3. Fire growth curve

### 3.2.3 사망자수 추정 방법

사망자수의 추정은 일반적으로 화재해석을 통해 시스템이 인명안전기준(NFA, 2017)에 도달하기 전까지 확보 가능한 시간인 ASET (Available Safe Egress Time)을 구하고, 대피해석을 통해 대피에 요구되는 시간인 RSET (Requirement Safety Egress Time)을 구하여  $RSET > ASET$ 인 경우 사망자가 발생하는 것으로 판단한다. 그러나 이 방법은  $RSET > ASET$ 인 조건으로 대피자의 사망여부를 판단하기 때문에 대피자가 받는 영향을 정량화하는 것이 곤란하며, 일반적으로 인명안전기준(NFA, 2017)에 노출되는 경우에 즉시 사망에 도달하는 것으로 판정하고 있다. 즉, 노출농도 또는 노출시간에 대한 고려가 반영되지 않기 때문에 열환경 및 유해가스가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 평가한다고 볼 수 없으며, 이는 시스템 과설계의 요인이 될 우려가 있다.

국내의 경우, ASET을 판단하기 위한 근거로 “소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준”의 인명안전기준을 적용하고 있으며, 온도(열)에 허용기준은  $60^{\circ}\text{C}$ , 허용가시거리 한계는 집회 및 판매시설 10 m, 기타시설 5 m, 고위도 유도등 및 바닥유도등, 축광유도표지가 설치된 집회 및 판매시설은 7 m로 하고 있으며, 일산화탄소농도는 1,400 ppm으로 설정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 온도  $60^{\circ}\text{C}$ , 가시거리 7 m를 기준으로 ASET을 검토하였으며, 일산화탄소의 경우 인명안전기준에서 제시하고 있는 1,400 ppm을 기준으로 ASET을 구하면 ASET이 과대해져 의미가 없으므로 일산화탄소 농도는 300 ppm을 기준으로 ASET을 검토하였다.

또한, 본 연구에서는 열환경 및 유해가스가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 방법으로 널리 이용되고 있는 “대피자별로 유해인자에 대한 누적복용량”(노출농도(온도) × 노출시간)을 구하여 이를 “한계복용량”

으로 나눈 “유효복용분량(FED)”을 기준으로 사망자를 추정하였으며, 유효복용분량을 산정하기 위한 수식은 식 (1)과 같다.

$$FED = (F_{ICO} + F_{IHCN}) \times V_{CO_2} + F_{IO} + F_{IHeat} + F_{IRAD} \quad (1)$$

각 유해가스에 대한 FED 계산식은 다음과 같다.

$$F_{ICO} = \frac{\%COHb}{D} = \frac{8.2925 \times 10^{-4} (\text{ppmCO})^{1.036} t}{D} \quad (2)$$

여기서,  $F_{ICO}$ : 의식불명에 도달하는 위험도지수,  $D$ : 의식불명에 이르는 COHb농도(%)로 30%이다.

$$F_{IO_2} = \frac{t}{e^{8.13 - 0.54(20.9 - \%O_2)}} \quad (3)$$

여기서,  $\%O_2$ : 산소의 농도(%)이다.

$$F_{ICO_2} = \frac{t}{e^{(6.1623 - 0.5189\%CO_2)}} \quad (4)$$

$$F_{IHCN} = \frac{t}{e^{(5.396 - 0.023\text{ppmHCN})}} \quad \text{ppmHCN} > 180 \text{ ppm} \quad (5)$$

$$F_{IHCN} = \frac{4.4}{185 - \text{ppmHCN}} \quad 80 < \text{ppmHCN} < 180 \text{ ppm} \quad (6)$$

$$F_{IHEAT} = \frac{t}{e^{5.1849 - 0.0273T}} \quad (7)$$

$$F_{IRAD} = \frac{q^{1.33}}{1.33} t \quad (8)$$

일반적으로 사망자의 판단한계는 FED 값이 0.3 이상인 경우에 사망으로 평가하고 있으며, SFPE핸드북에서는 구조물의 소방 성능 설계기법을 도입하는 경우 FED값이 0.1 이상인 경우를 사망자로 평가한다. 따라서 통상

적으로 적용하는 FED에 따른 등가사망자의 산정 및 적용은 Table 2에 따라 적용한다.

**Table 2.** Equivalent fatalities at FED

FED	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3 or more
Fatalities	1/100	1/10	1

### 3.2.4 위험도 평가 기준

본 연구에서 적용한 위험도 평가 기준은 사회적 위험도 평가기준(Societal risk criteria)과 F/N선도를 비교하여 평가하는 방법을 적용하였다. 이 방법은 사건의 발생확률과 사건의 심각도(인명피해, 등가사망자 수)를 집계하여 x축은 사망자 수(N: Number of Fatality), y축은 N명 이상의 사망자가 발생할 확률을 의미하는 누적확률(F: Frequency accumulated)을 log-log 스케일로 작도하여 분석된 사망자수와 발생빈도가 “ALARP (As Low As Reasonable Practicable)” 또는 “Acceptable” 내의 범위에 있을 경우 안전한 제연모드를 확보한 것이라 판단하였다. “Acceptable” 및 “Unacceptable”, “ALARP (As Low As Reasonable Practicable)”의 기준이 되는 사망자 수 및 발생빈도는 한국철도기술연구원(Railway Safety Research Group, 2011)에 규정된 내용을 준용하였다.

## 4. 해석결과

### 4.1 ASET 검토 결과

CO농도 300 ppm, 온도 60°C, 가시거리 7 m를 기준으로 화재 위치와 제연모드 별 ASET을 분석하고, 시간대 별로 각 위험 요소들의 기준치 별 ASET을 Figs. 4~6에 나타내었다.

Fig. 4의 경우 Car 1에서 화재가 발생했을 경우 ASET 분석 결과이다. Mode 1 (전급기)의 경우 930초 경과시 중앙 계단 좌측 입구부에서 가시거리가 기준치 미만이 되는 것으로 나타났다. CO의 경우 990초 경과시 해당 위치에서 300 ppm까지 상승하는 것으로 나타났으며, 온도의 경우 중앙 계단 양측 입구부에서 1,200초 이후까지 기준 온도에 도달하지 않는 것으로 나타났다. Mode 2 (전배기)의 경우 중앙 계단 좌측 입구부에서 930초, 우측 입구부에서 990초 경과시 가시거리가 기준치 미만이 되는 것으로 나타났다. 온도와 CO의 경우 화재 열차가 위치한 제연구역에서 990초인 것으로 나타났으며, 중앙 계단 양측 입구부의 ASET은 1,200초 이상인 것으로 나타났다. Mode 3 (화재구역 급기, 그 외 배기)의 경우 Mode 2와 비슷한 양상을 보이며, 중앙 계단 좌측 입구부에서 900초, 우측 입구부에서 990초 경과시 가시거리가 기준치 미만이 되는 것으로 나타났다. 온도의 경우 화재 열차가 위치한 제연구역에서 1,020초, CO의 경우 해당 지점에서 990초 인 것으로 나타났으며 중앙 계단 양측 입구부의 ASET은 1,200초 이상인 것으로 나타났다. Mode 4 (화재지점 배기, 그 외 급기)의 경우 4개의 제연모드 중 ASET이 가장 큰 것으로 나타났다. CO, 온도, 가시거리 모두 화재 열차가 위치한 제연구역 내에서 제연이 가능한 것으로 나타났으며, 해당 지점 이외에서의 ASET은 1,200초 이상인 것으로 나타났다.



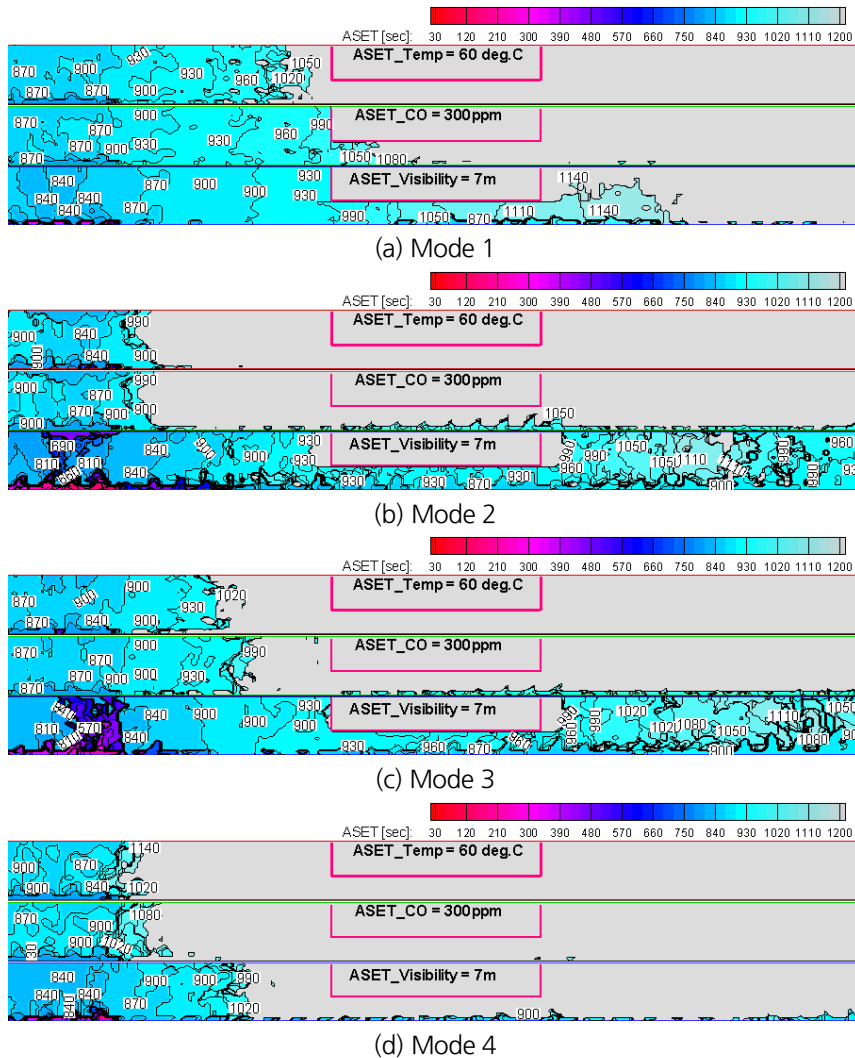


Fig. 4. Results of ASET simulation : Car 1

Fig. 5의 경우 Car 2에서 화재가 발생했을 경우에 ASET 분석 결과이다. Mode 1의 경우 900초 경과시 중앙 계단 좌측 입구부에서 온도 기준을 초과하는 것으로 나타났다. CO의 경우 1,050초 경과시 기준치에 도달하며, 가지거리의 경우 840초에 해당 지점에서 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. 우측 계단 부근의 ASET의 경우 CO, 온도, 가지거리 모두 1,200초 이상인 것으로 나타났다. Mode 2의 경우 화재 발생 870초 경과시 중앙 계단 좌측 입구부에서 CO, 온도, 가지거리 모두 기준치에 도달하는 것으로 나타났으며, 960초 경과시 중앙 계단 우측 입구부 근에서 가지거리 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. Mode 3의 경우 중앙 계단 좌측 입구부에서 화재발생 900초 경과시 가지거리 기준치에 도달하며, 930초 경과시 CO와 온도 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. 가지거리의 경우 930초에 우측 계단 입구부에서 기준치에 도달하며, CO와 온도의 경우 우측 계단 입구에서 1,200초 이상

인 것으로 나타났다. Mode 4의 경우 중앙 계단 좌측 입구부에서 화재발생 870초 경과시 가시거리 기준치에 도달하며, 960초 경과시 CO와 온도 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. CO, 온도, 가시거리 모두 우측 계단 입구에서 1,200초 이상인 것으로 나타났다.

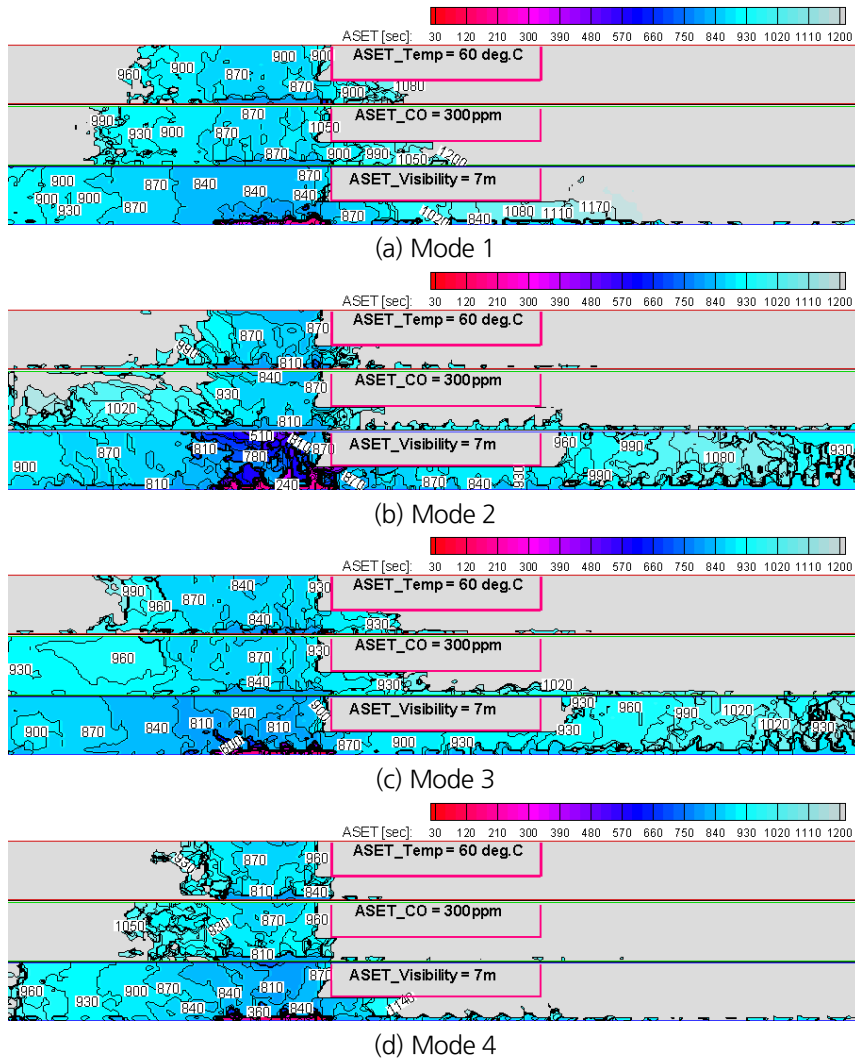


Fig. 5. Results of ASET simulation : Car 2

Fig. 6은 Car 3에서 화재가 발생했을 경우 ASET 분석 결과이다. Mode 1의 경우 1,020초 경과시 중앙 계단 좌측 입구부에서 CO 및 온도 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 가시거리의 경우 900초에 해당 지점에서 기준치에 도달하는 것으로 나타났으며, 우측 계단 부근의 ASET의 경우 가시거리는 930초, CO 및 온도는 1,200초 이상인 것으로 나타났다. Mode 2의 경우 화재 발생 870초 경과시 중앙 계단 좌측 입구부에서 가시거리 기준치에 도달하

는 것으로 나타났으며, 900초 경과시 중앙 계단 우측 입구 부근에서 가시거리 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. Mode 3의 경우 중앙 계단 좌측 입구부에서 화재발생 870초 경과시 가시거리 기준치에 도달하며, 900초 경과시 CO, 960초 경과시 온도 기준치에 도달하는 것으로 나타났다. 가시거리의 경우 960초에 우측 계단 입구부에서 기준치에 도달하며, CO와 온도의 경우 우측 계단 입구에서 1,200초 이상인 것으로 나타났다. Mode 4의 경우 화재발생 900초 경과시 중앙 계단 양측 입구부에서 가시거리 기준치에 도달하며, CO 및 온도의 경우 양측 계단 입구에서 1,200초 이상인 것으로 나타났다.

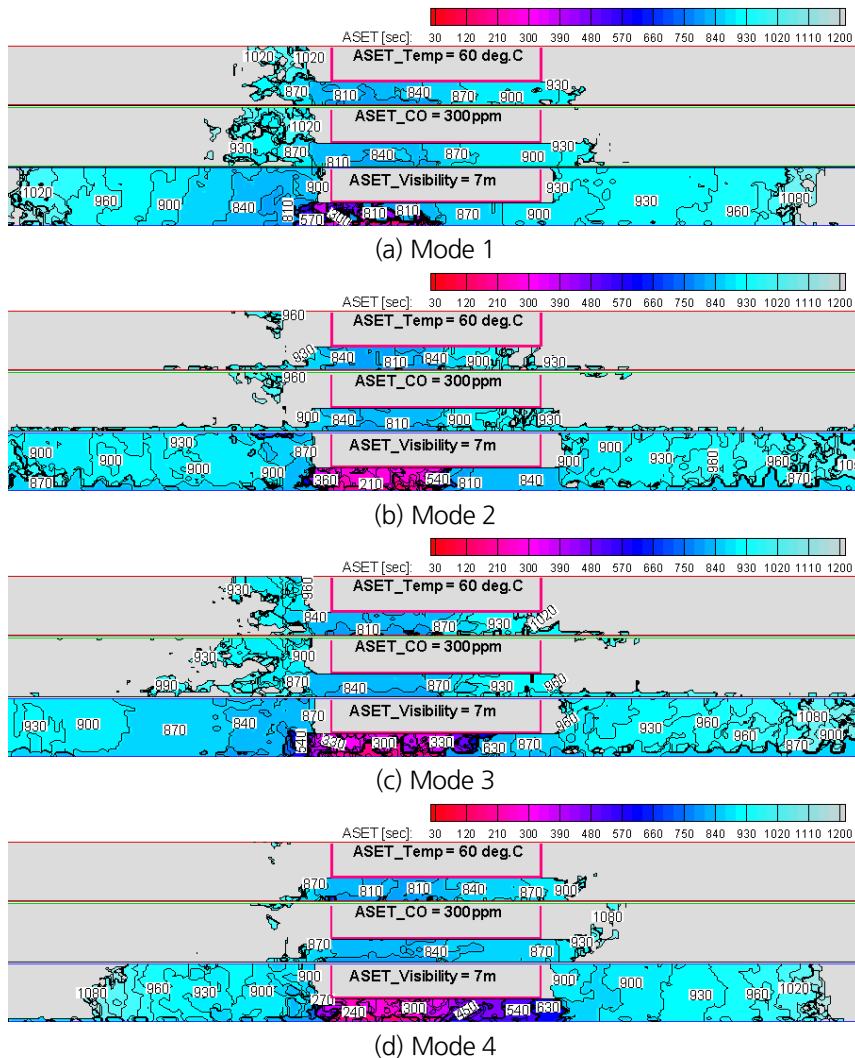


Fig. 6. Results of ASET simulation : Car 3

## 4.2 사망자 수 추정 결과

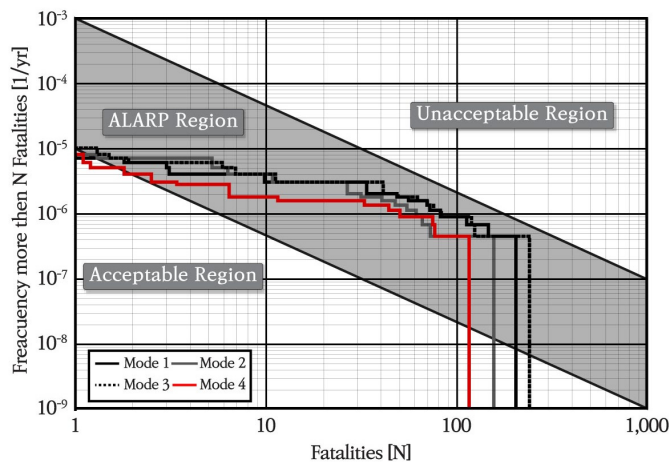
제연모드별 경고 방송 시간에 따른 사망자 수 추정 결과를 Table 3에 나타내었다. 경고 방송이 600초 이전에 이루어질 경우 사망자는 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 경고 방송 시간이 지연될수록 사망자 수가 증가하는 것으로 나타났다. 사망자가 가장 많이 발생하는 경고 방송 시간 905초의 경우, Mode 1~3의 경우 Car 2에서 화재가 발생했을 경우 가장 많은 사망자가 발생하는 것으로 나타났다. Mode 4의 경우 경고 방송 시간에 무관하게 Car 3에서 화재시 가장 많은 사망자가 발생하는 것으로 나타났다.

**Table 3.** The maximum number of deaths by fire location by exhaust mode

Exhaust mode	Car 1	Car 2	Car 3
1	145.8	203.3	81.9
2	47.4	155.7	72.4
3	123.6	239.7	69.8
4	26.9	38.4	135.7

## 4.3 사회적 위험도 평가 결과

Fig. 7은 제연모드(Mode 1~4)별로 시나리오에 따른 추정사망자수와 발생빈도에 의한 F/N선도를 나타낸 것이다. 제연모드별 위험도 평가결과는 ALARP 영역을 만족하는 것으로 분석되었다. Fig. 8은 제연모드별 위험도 지수(Risk Index)를 나타낸 것으로 화재구역(Zone)에서 배기를 수행하고 그 외 구역에서 급기가압을 하는 Mode 4의 경우에 위험도가  $1.3017 \times 10^{-4}$ 으로 가장 낮은 것으로 나타났으며, 화재구역에서 급기를 수행하고 그 외 구역에서 배기를 수행하는 Mode 3의 경우에 총 위험도  $2.2623 \times 10^{-4}$ 으로 가장 높은 것으로 나타났다.



**Fig. 7.** F/N curve by exhaust mode

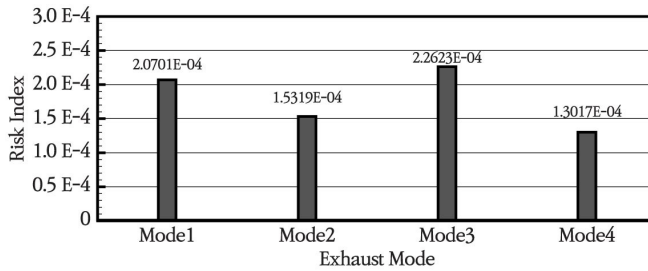


Fig. 8. Risk index by exhaust mode

## 5. 결론

본 연구에서는 철도터널 상대식 승강장의 열차 화재시 제연모드에 따른 대피 안전성을 사망자수 분석을 통해 비교하여 철도터널 이용객이 가장 안전하게 대피할 수 있는 제연모드를 제시함을 목적으로 한다. 이를 위해 160 m 길이의 열차가 운행되는 승강장을 모델링하고, 화재 시나리오별 화재 해석과 대피 해석을 수행하여 대피자의 유효복용분량(Fractional Effective Dose, FED) 계산을 통해 사망자수를 추정하였다. 이를 통해 F/N선도를 작성하고 제연모드별 위험도를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경고 방송이 600초 이내에 실시될 경우, 사망자는 발생하지 않으며, 경고 방송 시간이 지체될수록 사망자수 또한 증가하는 경향을 보였는데 Flashover 이후인 785초 이후에 사망자수가 급격히 증가하는 것으로 나타났다.
2. 제연모드(Mode 1~4)별 사망자수를 비교·분석한 결과, 화재지점에서 배기를 수행하고 그 외 제연구역에서 급기를 수행하는 경우(Mode 4)에 사망자수가 가장 적은 것으로 나타났으며, 화재 지점의 제연구역에서 급기를 수행하고 그 외 제연구역에서 배기를 수행하는 경우(Mode 3)에 가장 많은 사망자가 발생하는 것으로 나타났다.
3. 각 제연모드별 사회적 위험도 평가 결과, 모든 제연모드의 경우에 위험도 평가 기준을 만족하는 것으로 나타났으며 Mode 4의 경우에 총 위험도가 가장 낮은 것으로 분석됐다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 2019년 선도연구센터사업의 스마트 수중 터널 시스템 연구센터(2017R1A5A1014883)의 지원으로 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## 저자 기여도

이보훈은 데이터 수집 및 데이터 해석, 데이터 분석, 원고작성을 하였고, 홍서희는 데이터 수집을 하였으며, 백두산과 이호형은 연구 개념 및 설계, 데이터 분석, 원고 작성 및 원고 검토를 하였다.

## References

1. Bartlett, N. (2012), Optimization of smoke control systems in underground subway stations, Master thesis submitted in the Erasmus Mundus Study Programme, Ghent University, pp. 60-62.
2. Both, K., Haack, A. (2004), "Present-day design fire scenarios and comparison with test results and real fires: structures & equipment", Proceedings of the First International Symposium, Safe & Reliable Tunnels, Innovative European Achievements, Prague, Czech Republic, p. 73-86.
3. BSI (2003), Application of fire safety engineering principles to the design of buildings - Part 7: Probabilistic risk assessment, PD 7974-7.
4. Kim, H.G., Yoo, J.O., Kim, D.Y. (2018), "A study on the optimal ventilation and smoke exhaust systems in case of fire in subway stations installed with PSD", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 2, pp. 527-539.
5. KTA (2015), Metropolitan high-speed rail (Suseo-Pyeongtaek) roadbed construction design - Research report for quantitative risk assessment criteria, Korea Rail Network Authority, Dejeon, Korea.
6. McKeen, P. (2016), Computational modeling of fire safety in metro-stations, Bachelor of Architectural Science, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada, pp. 10-12.
7. Molag, M., van Mierlo, R., Wiersma, T. (2001), "Realistic fire scenarios for safety assessments of train fires in tunnels", Proceedings of the 4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Madrid, Spain, pp. 171-180.
8. NFA (2017), Performance-oriented design methods and standards for fire fighting facilities, etc, National Fire Agency.
9. Railway Safety Research Group (2011), Guideline for fire safety evaluation of railway tunnel, pp. 4-21.
10. Rie, D., Ryu, J. (2020), "Sustainable urban planning technique of fire disaster prevention for subway", Sustainability, Vol. 12, No. 1, p. 372.
11. Rie, D.H. (2003), "A study on safety evaluation by changing smoke ventilation mode in subway tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 5, No. 4, pp. 389-400.