

철도터널에서 위험인자가 정량적 위험도 평가에 미치는 영향

유지오^{1*} · 김진수² · 이동호³ · 신현준⁴

¹정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

²비회원, 인천대학교 대학원

³정회원, 인천대학교 소방방재연구소

⁴비회원, 한국건설기술연구원, 선임연구위원

The effect of a risk factor on quantitative risk assessment in railway tunnel

Ji-Oh Yoo^{1*}, Jin-Su Kim², Dong-Ho Rie³, Hyun-Jun Shin⁴

¹Professor, Dep. of Automotive Engineering, Shin-Han University, Gyeonggi-do, Korea

²Graduate School, Incheon National University, Incheon, Korea

³Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Korea

⁴Senior Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea

ABSTRACT: Quantitative risk assessment (QRA) of railway is to create a variety of scenario and to quantify the degree of risk by a result of the product of accident frequency and accident. Quantitative risk Assessment is affected by various factors such as tunnel specifications, characteristics of the fire, and relation of smoke control and evacuation direction. So in this study, it is conducted that how the way of smoke control and the relation of smoke control and evacuation direction affect quantitative risk assessment with variables (the tunnel length (2, 3, 4, 5, 6 km) and the slope (5, 15, 25‰)). As the result, in a train fire at the double track tunnel (Area = 97 m²), it is most efficient to evacuate to the opposite direction of smoke control regardless of the location of train in train fire. In addition, under the same condition, index risk in mechanical ventilation up to 1/10.

Keywords: Railway tunnel, Quantitative risk assesment, Smoke control & evacuation direction

초 록: 철도터널에 대한 정량적 위험도 평가는 다양한 시나리오를 작성하고 사고발생빈도 및 사고의 결과의 곱으로 위험도를 정량화하는 것이다. 정량적 위험도 평가는 터널제원, 화재특성, 제연방법, 제연과 대피방향의 관계 등 다양한 인자에 의해서 영향을 받는다. 이에 본 연구에서는 터널연장(2, 3, 4, 5, 6 km) 및 경사도(5, 15, 25‰)를 변수로 하여 제연방법 및 제연과 대피방향의 관계가 정량적 위험도 평가에 미치는 영향을 검토하였다. 이 결과로 복선터널 단면(단면적 97 m²)에서는 열차화재시 열차중 화재차량의 위치와 무관하게 제연반대방향으로 대피하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 또한 이와 같은 조건에서 기계환기시 위험도지수가 자연환기 보다 약 1/10까지 감소하는 것으로 평가되었다.

주요어: 철도터널, 정량적 위험도 평가, 제연과 대피방향

1. 서론

철도는 도로나 항공보다 일반적으로 안전성이 높은 것으로 알려져 있으나, 철도터널에서의 화재사고는 제연 또는 배연에 제약이 있기 때문에 유독가스 및

열로 인한 인명피해가 발생할 가능성이 높으며, 특히, 수송인원이 밀집되고 대량이라는 특성 때문에 화재사고가 발생하는 경우, 대형화재사고로 발전할 개연성이 높다.

이에 국내의 기준이나 관련법규에 의하면 철도터널에는 화재시 안전성을 확보하기 위해서 방재시설을 설치하도록 정하고 있다. 국내의 경우, 철도시설 안전기술기준(Ministry of Land, 2013)에서 1 km이상의 터널은 정량적인 방법에 의해서 안전성 평가를 수행

*Corresponding author: Ji-Oh Yoo
E-mail: geotunnel@hanmail.net

Received February 7, 2015; Revised February 16, 2015;
Accepted February 25, 2015

하여 그 결과에 따라 방재시설의 설치여부를 결정하도록 정하고 있다. 이에 국내에서는 호남고속철도 설계시 부터 정량적 안전성 평가기준을 해당사업별로 작성하여 적용하고 있으며, 현재 정량적 안전성 평가 매뉴얼을 개발중에 있다.

정량적 위험도 평가는 방재시설에 대한 성능위주설계를 목적으로 한다. 즉, 해당시설의 위험을 정량화하여 이를 평가기준과 비교하는 방법으로 방재시설의 적정성을 평가하는 기법이다. 현재 국내의 경우에는 화재사고에 국한하여 방재시설의 적정성 여부를 평가하기 위한 의사 결정 도구로 활용되고 있다.

터널 화재에 대한 정량적 위험도 평가는 화재발생 시나리오를 작성하고 시나리오별 사고발생빈도 및 사고결과를 사망자 수나 경제적인 비용으로 정량화하여 위험도를 예측하고 이를 사회적 위험도 평가기준과 비교하여 위험수준의 적정성을 평가하게 된다.

정량적 위험도 평가는 Fig. 1과 같은 절차를 통해서 수행하게 되며 Yoo(참고문헌, 2010)는 국내에 적용 가능한 정량적 위험도 평가 방법에 대하여 연구한 바 있다. 정량적 위험도 평가결과는 사고의 발생빈도 뿐만 아니라 터널제원(터널연장, 경사도, 단면적 등), 화재특성(화재강도 및 성장곡선), 제연여부 및 대피방향과 제연방향의 상관관계 등 다양한 인자에 의해서 영향을 받게 된다.

특히, 열차의 중앙부 차량에서 화재가 발생하는 경우에 제연을 수행하면 연기가 이동하는 방향에 대 피자가 존재하기 때문에 연기에 노출되어 위험한 상황에 도달할 가능성이 크다.

이에 본 연구에서는 터널연장, 경사도, 제연여부와 제연방향과 대피방향의 상관관계가 위험도 평가에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 평가모델

본 연구에서는 전술한 바와 같이 터널제원 및 제연여부, 대피방향이 정량적 위험도 평가에 미치는 영향

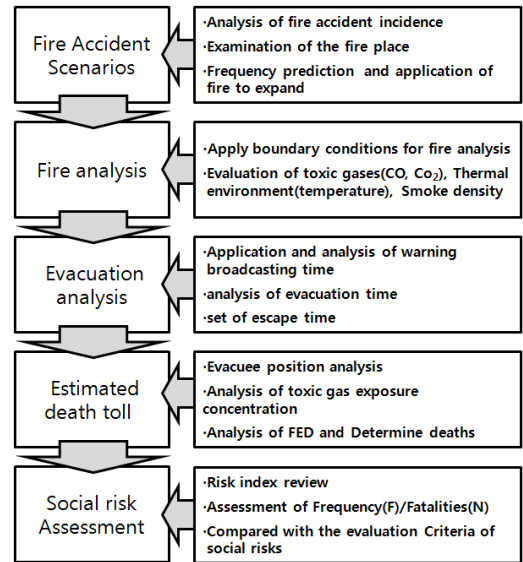


Fig. 1. Quantity risk assessment Process

을 검토하였다. 검토는 5개의 터널연장(2, 3, 4, 5, 6 km)에 따른 경사도의 영향과 경사(5, 15, 25%) 조건을 변수로 하여 Fig. 1과 같은 방법으로 위험도 평가를 수행하였다.

2.1 화재시나리오

화재발생시나리오는 사건나무(Event Tree)기법에 의해서 Fig. 2와 같이 적용하였다. 화재의 발생은 상하행으로 구분하고 해석구간에 3개 지점(시점부, 중앙부, 종점부)에서 발생하는 것으로 하였으며, 화재차량의 위치는 선두, 중간, 후미부로 구분하였다. 터널에서 화재사고 발생빈도는 교통안전공단(한국교통안전공단, 2013)을 조사하여 0.007건/10⁶ tr·km을 적용하였다.

화재열차의 기동여부 또는 부득이 터널에 정지하는 확률은 차량의 운행속도, 안전기준 등에 영향을 받으나 본 연구에서는 열차가 기동하여 터널을 탈출할 가능성을 95%로 적용하였다.

또한, 열차에서 화재가 발생하는 경우, 경미한 화재로 초기진화의 가능성을 기존의 연구결과 등을 반영

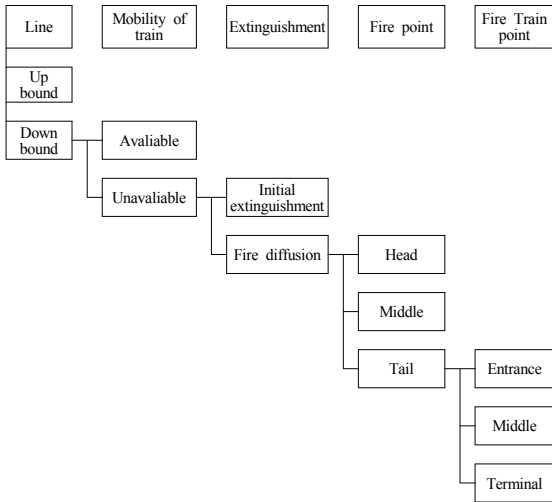


Fig. 2. Fire accident scenarios

하여 90%로 하였다(Kees Both, 2004).

본 연구의 열차운행계획은 현재설계중인 수서-평택노선을 적용하였으며, 열차운행계획은 Table 1과 같다.

화재시나리오에 따른 사고발생빈도 및 회귀기간은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Train operation plan

Division	Cars	Number of service	Total number
KTX10	10	16 train/one way .day	363
KTX20	20	32 train/one way .day	935
MTX	8	136 train/one way	984

Table 2. Fire accident incidence and return year

Scenario	Fire Accident Incidence (case/106 tr-km)	Frequency per year	return year
Fire accident	1.20E-2	2.80E-4	3,567
Train escape(95%)	1.14E-2	1.33E-4	7,510
Train can't escape (5%)	6.00E-4	7.00E-6	142,694
Initial fire fighting (90%)	5.40E-4	6.30E-6	158,549
Spread of fire (10%)	6.00E-5	7.00E-7	1,426,940

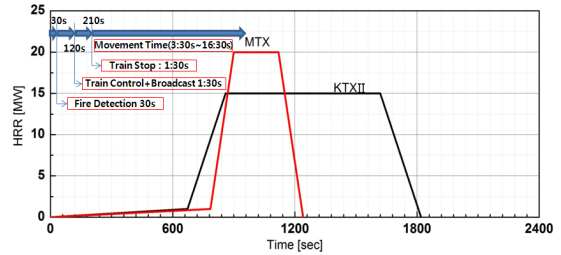


Fig. 3. Fire strength of train

2.2 화재해석 모델

본 연구에서 화재해석은 FDS를 이용하여 수행하였다. 화재해석에 필요한 화재성장곡선은 한국철도기술 연구원에서 제시하고 있는 객차1량에 대한 성장곡선을 적용하였으며(Korea Railroad Research Institute, 2014). 이는 Fig. 3과 같다. KTXII (KTX10, KTX20)의 경우에 최대화재강도는 15 MW, MTX의 경우 최대화재강도는 20 MW를 적용하였으며, 화재는 인접객차로 확산되어 지속되는 것으로 가정하였다.

또한 FDS (Fire Dynamics Simulator)에 의한 화재해석에 필요한 유해가스 발생량 산정을 위한 CO 발생수율과 Soot(매연) 발생수율은 각각 0.161 kg/kgFuel, 0.132 kg/kgFuel를 하였다(Tunnelling and Underground Space Association, 2009).

2.3 대피해석 및 사망자수 추정방법

철도터널에서 화재시 승객인 안전한 지역까지 탈출하는데 소요되는 시간(Required Safety Egress Time, RSET)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(SFPE, 2003).

$$RSET = t_d + t_a + t_o + t_i + t_e \quad (1)$$

여기서,

t_d : 화재를 감지하는데 걸리는 시간(감지시간)

t_a : 화재감지 후 승객들이 인지하는데 걸리는 시간 (경고방송시간)

t_0 : 화재인지 후 승객들이 피난행동을 할 것인지 결정 하는데 걸리는 시간(대피결정시간)

t_1 : 피난행동을 할 것인지 결정하고 실제 피난 이동을 시작하기 전까지 걸리는 시간(반응시간)

t_2 : 피난을 개시하여 안전지역까지 이동하는데 걸리는 시간(이동시간)

이다.

본 해석에서는 경고 방송 후에 즉시 대피자가 대피를 개시하는 것으로 하였으며, 경고방송시간은 4분, 대피자의 하차시간은 대피해석프로그램인 Simulex (IEX, 2004)를 이용하여 구하였으며 이에 따른 시간은 5~140초이다.

대피해석은 화재해석결과를 반영하여 시간에 따른 터널내 유해가스온도 및 열환경에 대한 터널종방향 평균치를 DB로 구축하여 대피자의 이동시간 및 위치에 따라서 동기화하여 유해환경에 노출되는 농도 및 온도 등을 구하였다. 대피자가 대피하는 동안에 유해 환경에 노출되는 정도는 식 (2)로 표현되는 유효복용분량(FED: Fractional Effect Dose)으로 정량화하였으며, 이 값이 한계치를 초과하면 사망에 도달하는 것으로 사망자를 추정하였다(SFPE, 2003).

$$FED = (F_{ICO} + F_{IHCN}) \times V_{CO_2} + F_{IO} + F_{IHeat} + F_{IRAD} \quad (2)$$

여기서,

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

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

$$V_{CO_2} = \frac{e^{0.2496\%CO_2 + 1.9086}}{6.8}$$

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

$$F_{IHEAT} = \frac{t}{e^{5.1849 - 0.0273T}}$$

$$F_{IRAD} = \frac{q''^{1.33}}{1.33} t$$

Table 3. Scenario branching ratio according to the ventilation and evacuation direction

Ventilation scenario	V000	V010	V050	V090	V100
No vent	100%	90%	50%	10%	0%
Mech. vent	0%	10%	50%	90%	100%
Evacuation scenario	E100	E090	E050	E010	
op. dir. of Vent	100%	90%	50%	10%	
op. dir. of Fire	0%	10%	50%	90%	

이다.

2.4 제연방향 및 대피방향

터널에 열차화재시 제연방향은 열차의 진행방향, 진행반대방향, 자연환기의 세 가지 경우가 있을 수 있으며, 대피방향은 화재반대(화재에서 멀어지는) 방향, 제연반대방향, 제연과 동일한 방향이 있을 수 있다. 이에 본 연구에서는 열차 중앙부 화재시 제연여부 및 제연방향과 대피방향에 따른 위험도를 비교하기 위해서 제연방법에 대해 제연을 수행하지 않는 분기비에 따라 5개의 시나리오, 제연방향의 방대방향으로 대피하는 분기비에 따라 4개의 시나리오를 추가하여 위험도 평가를 수행하였다. 제연 및 대피방향에 따른 시나리오 분기비는 Table 3과 같다.

3. 해석결과

3.1 화재시 풍속해석 결과

터널조건 및 화재강도가 동일한 경우 화재해석결과에 영향을 가장 크게 미치는 인자는 화재시 터널내 풍속이다. 화재시 터널내 풍속은 SES (Subway Environmental Simulator)로 해석하였으며, Fig. 4는 화재시 제연에 따른 풍속을 나타낸 것이다.

Fig 4의 (a)는 제연을 수행하지 않는 경우, 터널연장이 6 km이고 진행방향이 상행방향의 열차가 터널의 중앙지점(3 km)에 정차하는 경우, 정차이후에 터널내

풍속의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 터널내 기류는 초기에는 열차의 진행 방향인 -방향으로 형성되나 시간이 경과하면 열부력의 영향으로 상향경사방향인 +방향으로 형성되며, 정상상태에 도달하면 일정한 값에 도달하는 것을 알 수 있다. 또한 정상상태의 풍속은 경사도가 증가하면 증가하며, 이 경우 경사도에 따라 1.1(5%), 1.93(15%), 2.42 m/s(25%)에 도달하고 있다.

Fig. 4의 (b), (c)는 동일한 열차운행조건에서 각각 열차의 진행반대방향(b), 열차의 진행방향(c)로 제연을 수행하는 경우이다. 이 경우, 터널내 풍속은 초기에는 열차의 운행에 따른 교통환기력의 영향으로 약간의 변화가 있으나, 팬가동이 정상상태에 도달한 후 60초 정도가 경과하면, 약간의 차이는 있으나, 설정풍

속에 도달하는 것으로 알 수 있다. 우리나라의 경우 “철도시설 안전기술기준(Ministry of Land, 2013)”에 제연시 풍속은 2.5 m/s이상 또는 임계풍속을 유지하도록 정하고 있다. 여기서 교통환기력 및 팬가동에 따른 영향이 미치는 시간은 약 240초 이하로 나타나고 있다.

이상의 검토에서 화재시 터널내 풍속은 자연환기시에는 경사도에 영향을 받으며, 정상상태에 도달시간은 600초 이상이 소요되나, 제연을 수행하는 경우에는 제연팬 가동 후 짧은 시간내에 정상상태의 풍속에 도달하는 것으로 평가된다. 따라서 제연을 수행하는 경우, 위험도는 경사도의 영향이 거의 나타나지 않을 것으로 예측된다.

3.2 화재해석 결과분석

본 연구에서는 연장 및 경사도에 따라 제연방향 및 자연환기에 대한 화재해석을 수행하였으며, Fig. 5는 연장이 6 km이고 경사도가 5%인 경우에 대한 호흡선 높이에서 평균 CO, CO₂, Soot농도와 온도를 나타낸 것이다.

Fig 5의 (a)는 자연환기시를 나타내는 것이다. 터널내 풍속이 느리기 때문에 터널내 연기의 전파속도가 느리게 나타나고 있으며, 화재하류 방향으로 연기의 이동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이 경우, 정상상태에 도달한 후에 터널내 평균농도는 유해가스별로 660 mg/m³(soot), 0.6%(CO₂), 700 ppm(CO)이며, 최대온도는 80°C 정도이며 온도의 영향범위는 약 1,000 m 정도이나 화재근접지역을 제외하고는 40°C 이하로 온도가 대피환경에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가된다.

Fig. 5의 (b), (c)는 제연을 수행하는 경우로 화재에서 발생하는 유해물질의 농도는 시간이 경과하면 일정한 값을 유지한다. 유해물질별로 열차의 진행방향으로 제연하는 경우에는 290 mg/m³(soot), 0.26%(CO₂), 300 ppm(CO)이며, 열차의 진행반대방향으로 제연하는 경우에는 275 mg/m³(soot), 0.25%(CO₂), 290 ppm(CO)로 나타나고 있다.

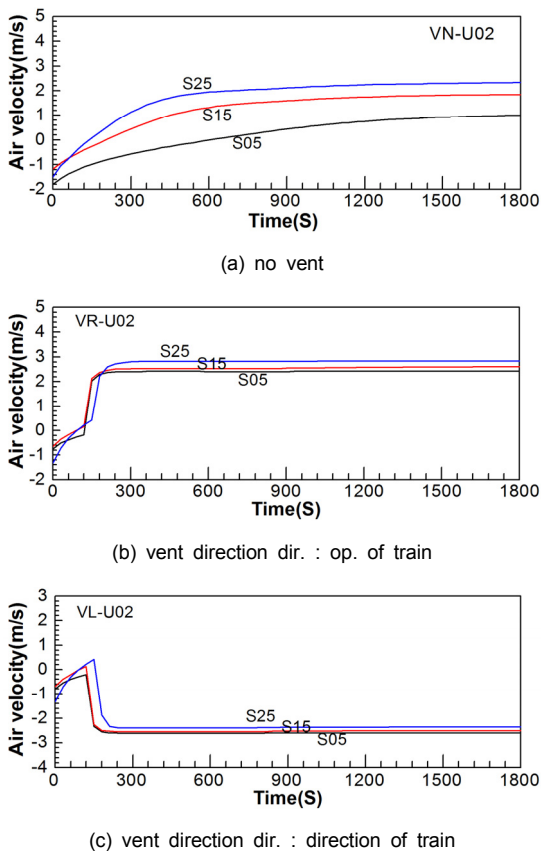


Fig. 4. Wind speed in the tunnel at the time of fire

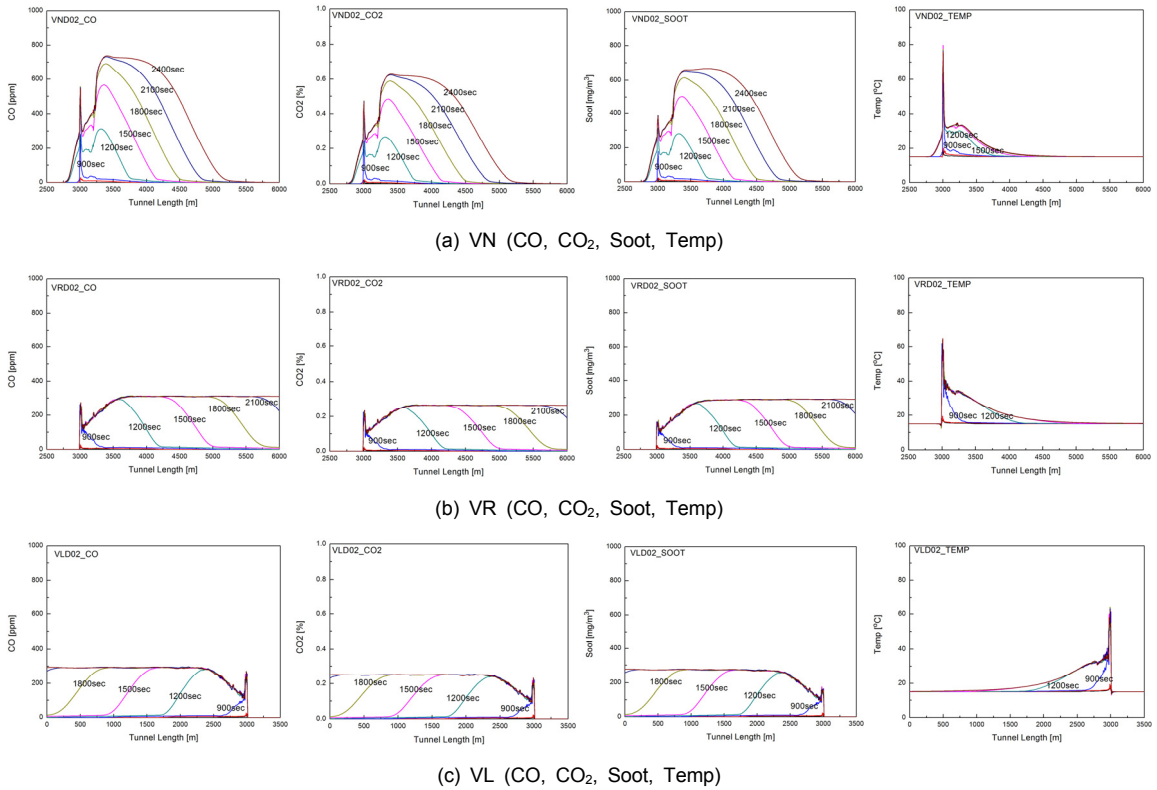


Fig. 5. Result of fire analysis

이와 같이 자연환기시 보다 제연을 하는 경우에 농도가 낮고 제연방향에 따라서 유해물질이 농도가 거의 비슷하게 나타나는 이유는 유해물질의 농도는 희석이론에 의해서 풍량에 반비례하기 때문이다. 따라서 제연을 수행하는 경우, 제연풍속을 2.5 m/s로 설계한다면 터널 단면적이 동일한 경우에는 제연시

터널내 유해물질의 농도는 거의 비슷한 값을 갖게 됨을 알 수 있다.

Fig. 6은 경사도에 따른 유해물질의 농도를 비교하여 나타낸 것으로 경사도가 증가할수록 유해물질의 농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 경사도가 증가할수록 터널내 풍속이 증가하기 때문이다.

따라서, 터널내 풍속이 증가하면 이에 반비례해서 유해물질의 농도가 감소하여 위험도를 낮추는 효과로 작용하게 되나, 연기의 이동속도를 증가시켜 연기가 대피자를 덮치는 시간이 빨라져서 위험도를 높이는 상반되는 효과로 작용하게 된다.

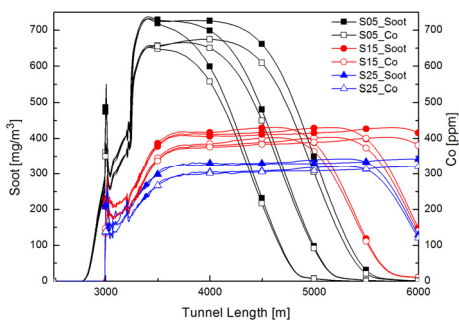


Fig. 6. The concentration of hazardous substances according to the slope

3.3 위험도 평가결과 분석

3.3.1 터널연장 및 경사도가 미치는 영향

Fig. 7은 경사도가 동일한 경우에 연장별로 F/N

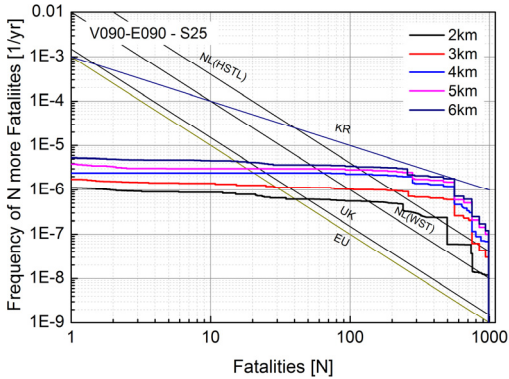


Fig. 7. F/N diagram by tunnel length

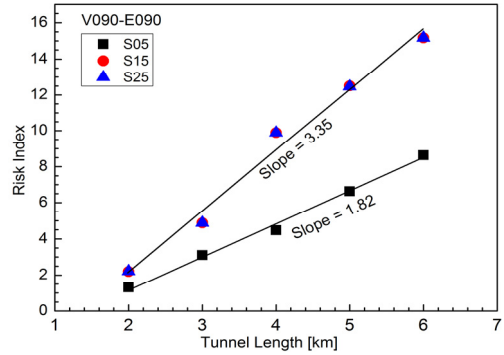


Fig. 9. Compare of risk index (V090-E090)

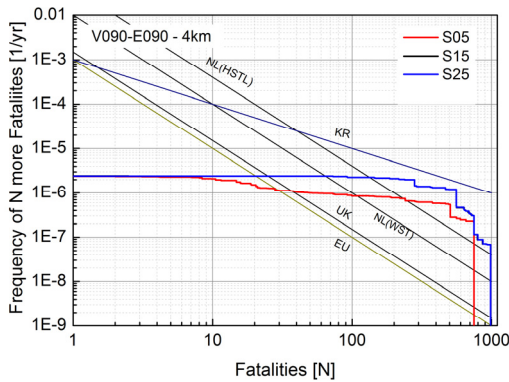


Fig. 8. F/N diagram by tunnel slope

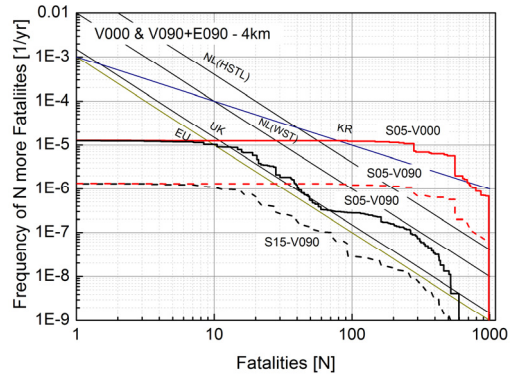


Fig. 10. compare of natural ventilation and mechanical ventilation (length: 4 km, slope: 5%, 15%)

(Frequency/Number of Fatalities)선도를 나타낸 것이다. 제연시나리오는 V090(자연환기 10%+제연 90%)이며, 대피시나리오는 E090(제연반대 90%+화재반대 10%)인 경우이다.

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 터널연장이 증가하면 위험도가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 8은 터널연장이 4 km일 때 경사도별로 F/N 선도를 나타낸 것이다. 이 경우 경사도 15%와 20%의 경우에는 거의 일치하는 것으로 나타나고 있으며, 5% 상당히 낮은 결과를 보이고 있다.

Fig. 9는 터널 경사도별로 연장증가에 따른 Risk Index의 변화를 나타낸 것이다. Risk Index는 식 (3)으로 구하며, 연간 사망자 수를 의미한다.

$$\text{Risk Index} = \sum \text{frequency} \times \text{fatalities} \quad (3)$$

Risk Index는 경사도가 5%일 때 가장 낮으며, 15%와 25%의 연장별 Risk Index는 거의 일치하는 것으로 나타나고 있다. 연장증가에 따른 Risk Index의 증가 기울기는 경사도별로 1.82(5%), 3.35(15, 25%)로 나타나고 있다.

3.3.2 제연방법 및 대피방향의 영향

제연효과를 검토하기 위해서 제연을 수행하는 경우에는 현재의 위기대응 메뉴얼에서 제시하는 바와 같이 제연 반대방향으로 대피하며, 자연환기시에는 화재지점에서 멀어지는 방향으로 대피하는 조건에서

제연효과를 비교·검토하였다.

Fig. 10은 연장이 4 km인 경우에 경사도(5%, 15%) 별로 자연환기(V000+E090)와 기계환기(V090+E100) 시 F/N선도를 비교한 것이다. 제연을 수행하는 경우, 환기팬의 고장이나 오류로 인해 제연을 수행하지 못하게 될 확률은 10%로 고려하였다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 제연을 수행하는 경우에 약 1/10정도 까지 위험도가 감소하는 것으로 나타나고 있다.

그러나 이와 같은 감소효과는 제연시 대피가 이상적으로 이루어지는 경우이나 제연 및 대피가 이상적으로 이루어지지 않을시 제연으로 인한 위험도 증가를 야기할 수도 있다.

Fig. 11의 (a), (b)는 V090(제연90%+자연환기10%)인 경우, 대피방향에 따른 위험도 지수를 자연환기시 위험도지수와 비교하여 나타낸 것으로 (a)는 경사도가 5%이고, (b)는 25%인 경우이다.

경사도가 5%인 경우에는 E100과 E090은 자연환

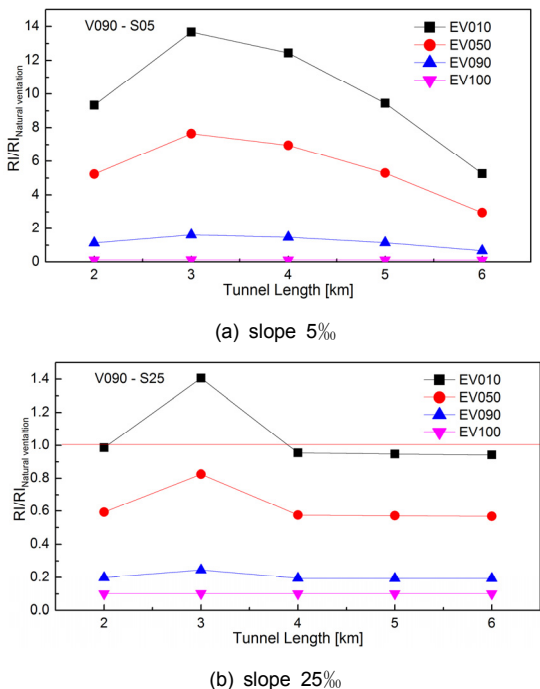


Fig. 11. Compare of Risk Index

기시보다 RI가 감소하나, E050, E010인 경우에는 자연환기시보다 터널연장에 따라서 10배 이상 증가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 경사도가 25%인 경우에는 대피조건이 어떠한 경우일지라도 제연을 수행하는 것이 위험도를 낮추는 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 터널제연시설 설계시 정량적 위험도 평가를 통해서 제연과 제연 효과를 검증할 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 복선터널 단면(97 m²)의 철도터널에서 터널연장(2, 3, 4, 5, 6 km) 및 경사도(5, 15, 25%)를 변수로 하여 제연방법 및 제연방향과 대피방향의 상관관계가 정량적 안전성 평가에 미치는 영향을 검토하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 터널내 유해가스의 농도는 화재시 풍속에 의존하며, 터널풍량이 동일한 경우에는 제연운전 운전모드가 작동하여 정상상태에 도달한 후에는 거의 일정한 농도에 도달하며, 화재강도가 20 MW이고 터널(단면적 97 m²)풍속이 2.5 m/s인 경우에 CO농도가 약 300 ppm정도에 도달하면, soot(매연)농도는 275~290 mg/m³정도의 값을 유지하는 것으로 분석되었다.
2. 제연을 수행하지 않는 경우에 화재시 풍속은 터널 경사도에 의존하며, 경사도가 증가할 수록 풍속이 증가하여 풍량이 증가하므로 유해가스의 농도는 감소하는 경향을 갖는다.
3. 터널연장이 증가하면 Risk Index는 선형적으로 증가하는 경향을 보이며, 경사도가 15%와 25%인 경우 위험도는 거의 차이가 없는 것으로 나타나고 있으며, 위험도지수의 증가 기울기는 5%일 때는 1.82, 15%와 25%일때는 3.35로 나타나고 있다.
4. 기계환기를 수행하는 경우에 제연반대방향으로 대피하는 것이 가장 안전하며, 이 경우, 제연을 하지 않는 경우보다 위험도가 약 1/10수준으로 감

소하는 것으로 나타나고 있다.

5. 기계환기에 의한 제연효과는 대피방법 및 경사도에 따라 차이가 크게 나타나고 있으며, 경사도가 5%인 경우, 기계환기에 의한 위험도 감소효과는 대피방향을 제연반대방향으로 하는 이상적인 경우를 제외하고는 발생하지 않는 것으로 나타나고 있으며, 열부력에 의한 풍속이 제연풍속과 비슷한 경우에는 거의 모든 조건에서 기계환기에 의한 제연효과가 크게 나타나고 있다.
6. 따라서, 터널경사도가 낮은 경우에는 제연효과를 검토하여 초기에 제연을 수행할지 여부를 포함하는 제연모드의 수립이 필요하며, 경사도가 증가하는 경우에는 제연반대방향으로 대피를 유도하는 대피계획의 수립이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

1. IES. (2004), "SIMULEX User Manual", UK.
2. Kees Both. (2004), "Present-day design fire scenarios and comparison with test results and real fires: structures & equipment.", 1st Int. Sym. Proc. Safe & Reliable Tunnels. Innovative European Achievements, Prague, p. 73.
3. Korea Railroad Research Institute. (2014), "Quantitative risk assessment manual draft", South Korea.
4. Korea Transportation Safety Authority. (2013), "Railway accident statistics", South Korea.
5. Ministry of Land. (2013), "Railway facilities Safety Technical standards", South Korea.
6. SFPE. (2003), "Emergency movement", Chapter 3-14.
7. Tunnelling and Underground Space Association. (2009), "Ho-nam railway vehicle fire intensity and quantitative risk assessment (QRA)", South Korea.
8. Yoo, J.O., Nam, C.H., Jo, H.J., Kim, J.W. (2010), "A study on quantitative risk assessment for railway tunnel fire", Tunneling Technology, Vol. 12, No. 4.