

# 해저철도터널(목포-제주간) 화재시 정량적 위험도 평가기법에 의한 피난연결통로 적정간격산정에 관한 연구

유지오<sup>1\*</sup> · 김진수<sup>2</sup> · 이동호<sup>3</sup> · 신현준<sup>4</sup>

<sup>1</sup>정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

<sup>2</sup>비회원, 인천대학교 대학원

<sup>3</sup>정회원, 인천대학교 소방방재연구소

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구위원

## The study on interval calculation of cross passage in undersea tunnel by quantitative risk assesment method

Ji-Oh Yoo<sup>1\*</sup>, Jin-Su Kim<sup>2</sup>, Dong-Ho Rie<sup>3</sup>, Hyun-Jun Shin<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dep. of Automotive Engineering, Shin-Han University, Gyeonggi-do, Korea

<sup>2</sup>Graduate School, Incheon National University, Incheon, Korea

<sup>3</sup>Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Korea

<sup>4</sup>Senior Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi-do, Korea

**ABSTRACT:** Quantitative Mokpo-Jeju undersea tunnel is currently on the basis plan for reviewing validation. As for the cross section shape for express boat of 105 km line, sing track two tube is being reviewed as the Euro tunnel equipped with service tunnel. Also, 10 carriage trains have been planned to operate 76 times for one way a day. So, in this study, quantitative risk assessment method is settled, which is intended to review the optimal space between evacuation connection hall of tunnel by quantitative risk analysis method. In addition to this, optimal evacuation connection hall space is calculated by the types of cross section, which are Type 3 (double track single tube), Type 1 (sing track two tube), and Type 2 (separating double track on tube with partition). As a result, cross section of Type 2 is most efficient for securing evacuation safety, and the evacuation connection space is required for 350 m in Type 1, 400 m in Type 2, and 1,500 m in Type3 to satisfy current domestic social risk assessment standard.

**Keywords:** Railway tunnel, Quantitative risk assesment, Cross passage

**초 록:** 현재 목포-제주간 해저터널은 타당성 검토를 위한 기본계획 중에 있으며, 노선의 길이가 108 km인 고속여객 전용선으로 단면형태는 유로터널과 같은 서비스터널을 설치한 단선쌍굴터널로 검토되고 있다. 또한 교통량은 10량 1편성의 열차가 일일 76편/편도 운행하는 것으로 계획하고 있다. 이에 본 연구에서는 터널의 피난연결통로의 적정 간격을 정량적 위험도 평가기법에 의해서 검토하는 것을 목표로 정량적 위험도 평가기법을 정립하였다. 또한 터널의 단면형태를 복선터널(Type 3), 쌍굴터널(Type 1) 및 복선터널을 격벽으로 분리하는 형태의 터널(Type 2)을 대상으로 단면형태별로 적정 피난연결통로 간격을 산정하였다. 본 연구결과, Type 2의 단면이 대피안전확보에 가장 효과적이며, 현행 국내 사회적 위험도 평가기준을 만족하기 위해서는 단면형태별로 350 m (Type 1), 400 m (Type 2), 1,500 m (Type 3)의 피난연결통로 간격이 요구되는 것으로 나타나고 있다.

**주요어:** 철도터널, 정량적 위험도 평가, 피난연결통로

\*Corresponding author: Ji-Oh Yoo

E-mail: geotunnel@hanmail.net

Received April 7, 2015; Revised April 17, 2015;

Accepted April 21, 2015

Copyright ©2015, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 철도건설 분야는 에너지 효율성 및 안전성이 부각되면서 경부고속철도의 2단계 사업완료 및 호남고속철도의 준공, 기존철도노선에 대한 선형개량 사업이 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라서 장대터널의 건설이 급격하게 증가하고 있는 실정이다. 그러나 대구지하철 화재사고에서 알 수 있는 바와 같이 터널에서의 열차의 화재는 제연 또는 배연에 제약이 있기 때문에 유독가스 및 열로 인한 인명피해가 발생할 가능성이 높으며, 화재사고가 발생하는 경우, 대형화재사고로 발전할 개연성이 높다.

이에 철도터널에는 화재시 안전성을 확보하기 위해서 방재시설을 설치하도록 법이나 기준으로 정하고 있으며, 특히, 철도시설 기술기준(Ministry of Land, 2013)에 1 km이상의 터널은 정량적인 방법에 의해서 안전성 평가를 수행하고 그 결과에 따라 방재시설의 설치여부를 결정하도록 정하고 있다.

철도터널에서 화재시 위험도는 일반적으로 터널에서 화재사고가 발생할 빈도와 화재사고의 결과의 곱으로 나타낸다. 이에 철도터널의 정량적 위험도 평가에서는 화재발생 시나리오를 구축하여 시나리오별 발생률을 분석하고, 화재해석 및 대피해석을 수행하여 사고결과(사망자수)를 예측하여 화재사고의 위험도를 정량화하고 있다.

본 연구에서는 목포-제주간 가상해저터널을 대상으로 적용 가능한 단면형태에 따른 정량적 위험도 평가를 실시하여 사회적 위험도 평가기준을 만족하기 위한 적정 피난연결통로 간격을 산정하였다.

## 2. 정량적 위험성 평가기법

철도터널에 대한 정량적 위험도 평가를 위한 상세 내용은 Yoo (2010)에 의해서 발표된 바가 있으며, 본 논문에서는 이에 대해서 자세한 기술은 생략한다. 다만, 기존의 기준과 차이가 있는 사항은 다음 절의 해석조건에서 기술하였다.

## 3. 정량적 위험성 분석

### 3.1 터널형태 및 기본제원

목포-제주간 가상 해저터널의 연장 등 기본제원은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 총연장은 108 km이며, 노선중 구간역을 3지점에 설치하는 것으로 하였다.

또한, 본 연구에서는 터널단면 형태에 따른 정량적 위험도 평가를 수행하였으며, 단면형태 및 단면적은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 열차는 10량 편성의 열차가 76편/day운행하는 것으로 하였다.

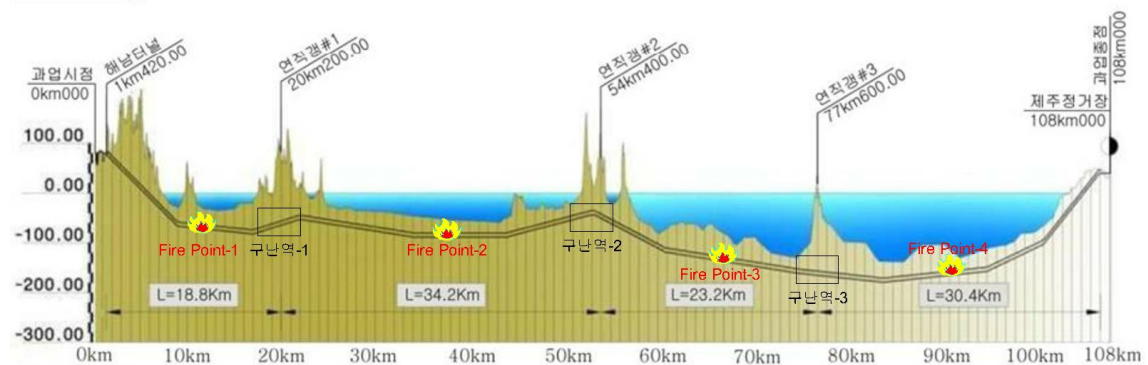

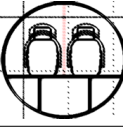



Fig. 1. Tunnel overview and fire point

Table 1. Tunnel cross section type

Tunnel type		Cross section area (m <sup>2</sup> )	Note
Single track two tube (Type 1)		57	Virtual tunnel on planning
Double track on tube with partition (Type 2)		50.4 (Diameter : 13.3 m)	Green heart tunnel cross section
Double track single tube (Type 3)		97	Honam railway line

### 3.2 해석조건

#### 3.2.1 화재발생 시나리오

##### (1) 시나리오 및 분기비

화재발생 시나리오는 호남고속철도의 정량적 위험성 평가 보고서(Tunnelling and Underground Space Association, 2009)에 제연방향 및 대피방향에 대한 분기를 추가하여 Fig. 2와 같이 설정하였다.

Event tree상의 분기비는 다음과 같다.

- 운행방향 : 상행 : 하행 = 50% : 50%
- 열차탈출확률 : 32.4%
- 화재지점 : 구간별 1개 지점으로 함.
- 화재차량수 : 6개소(10량/2+1 지점, 발생확률 균등하게 분할)
- 초기화재진화 실패 : 6.4%

- 제연팬 신뢰도 : 10%
- 제연 및 대피방향에 대한 분기비

단선병렬 터널의 경우에는 Yoo (2010)의 연구에 제시된 바와 같이 열차의 중앙부에서 화재가 발생하는 하는 경우, 화재지점을 통과하는 대피가 불가능한 것으로 판단하여 제연팬을 가동하지 않는 것으로 하여 자연환기의 비를 90%로 하고 대피방향은 화재반대방향으로 설정하였다.

복선단굴터널의 경우에는 열차중앙부 화재시 제연을 하는 것으로 기본으로 하였으며, 제연팬의 가동을 90%로 설정하고 10%가 고장 등의 이유로 정지하는 것으로 하였으며, 대피방향은 90%가 제연반대방향으로 대피하며, 10%가 화재반대방향으로 대피하는 것으로 설정하였다.

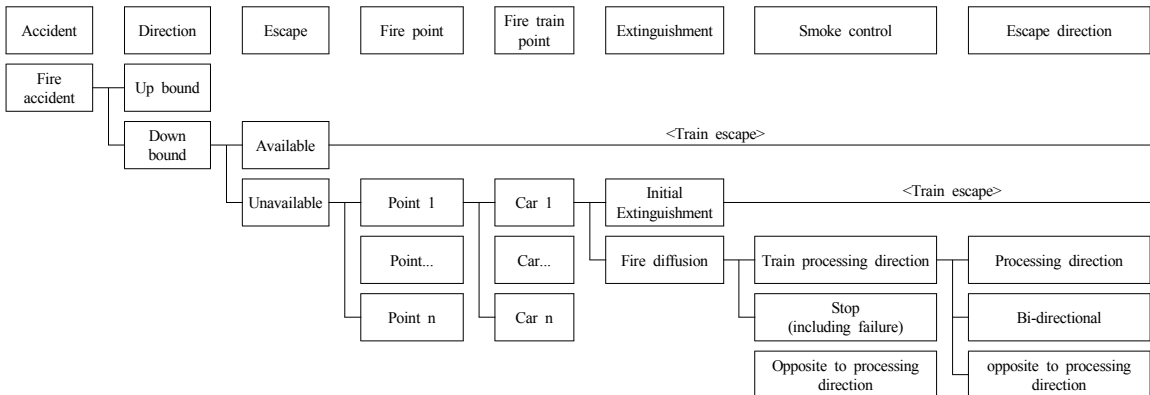


Fig. 2. Fire accident scenarios

**Table 2.** Return year and fire occurrence frequency by scenario

Scenario	Fire accident occurrence rate (times/10 <sup>6</sup> tr·km)	Frequency per year	Return year
Fire accident incidence (Ignition in train)	1.20E-2	7.05E-2	14.2
→ Fire train proceed out of the tunnel (67.6%)	8.11E-3	2.38E-2	42.0
→ Fire train stops in tunnel (32.4%)	3.89E-3	1.14E-2	87.4
→ Fire extinguished (93.6%)	1.12E-3	3.30E-3	303.3
→ Fire spread (6.4%)	7.68E-5	2.26E-4	4426.3
→ Fire train point (25 km)	3.00E-5	8.83E-5	11,340

**(2) 시나리오별 사고발생률 분석결과**

각 시나리오에 대한 사고발생률 및 회귀기간(RY)은 Table 2에 나타난 바와 같다. 회귀기간은 사건이 발생하는 주기를 의미하며 식 (1)로 계산한다.

$$RY = \frac{365n \cdot L_{tunnel}}{A_{rate}} f_A \quad (1)$$

여기서, n : 일편성횟수, L<sub>tunnel</sub> : 터널연장, A<sub>rate</sub> : 사고발생률, f<sub>A</sub> : 사건별 분기확률이다.

Table 2에 의하면 연간 열차주행키로는 편도 2,937,666 tr·km(편도 76편/day)이며, 상하행 전터널에서 화재가 발생할 빈도는 7.05E-2건/yr로 회귀기간이 14.2년으로 평가된다.

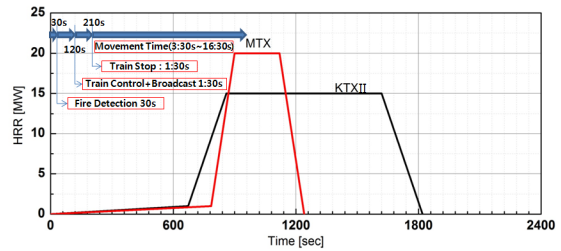
또한 본 시나리오에 의해서 화재가 확대될 가능성은 2.26E-4건/yr로 회귀기간은 4,426년으로 평가된다.

**3.2.2 화재해석 및 대피해석 모델**

**(1) 화재해석모델**

본 연구는 상용프로그램인 FDS (Fire Dynamics Simulator, NIST, 2010)를 이용하여 화재해석 수행하였으며, 해석격자는 0.25 (W) × 0.25 (H) × 0.5 m (L)로 하였다. 최대화재강도는 15 MW이고 화재성장곡선은 Fig. 3에 나타난 바와 같다(Korea Railroad Research Institute, 2014).

FDS에 의한 화재해석에 필요한 유해가스 발생량



**Fig. 3.** Heat release rate of train (KTXII)

산정을 위한 CO발생수율(Y<sub>co</sub>)과 Soot 발생수율은 호남고속철도의 정량적 안전성 평가기준 작성을 위해 실시한 목업실험에서 도출된 0.161 kg/kgFuel, 0.189 kg/kgFuel를 적용하였다(Tunnelling and Underground Space Association, 2009).

**(2) 대피해석모델**

대피해석 모델에서는 초기대피시간의 설정, 시간 경과에 따라서 대피자가 노출되는 열환경(온도, 복사강도)과 유해가스환경(가시거리, CO, CO<sub>2</sub>, 산소농도)를 구하며, 보행속도를 산정하여, 대피자를 이동하고 대피자가 화재환경으로부터 받는 위험정도를 FED (유효복용분량)으로 정량화하여 사망여부를 판단하게 된다. 본 연구에서 초기대피시간은 화재의 감지(t<sub>d</sub>), 운행중인 열차와 통제센터간의 통신명령하달시간(t<sub>a</sub>) 열차가 정지하는데 소요되는 시간(t<sub>s</sub>)을 고려하여 경고방송시간(t<sub>w</sub>)을 산정하고 Simulex에 의해서 구한 하차시간을 더하여 대피자별로 초기피난 개시시간으

로 설정하였다(IES, 2004). 따라서, 철도터널 안전성 평가매뉴얼에 따르면 초기경고방송시간까지는 3분30초~16분 30초가 범위가 되며, 본 과업에서는 경고방송시간을 600초로 하였다. 또한 하차시간은 4~140초를 고려하였다. 대피자의 보행속도는 인접한 대피자의 밀도, 전방대피자의 거리, 가시거리에 따른 보행속도저하를 고려하여 계산하며, 가장 작은 값을 적용하였으며, 대피속도의 범위는 1.4~0.3 m/s이다.

사망자수는 FED값에 의해서 등가사망자수로 추정하였으며, FED에 따른 등가사망자수는

FED에 의한 사망자는 FED가 0.3을 초과하는 경우에 사망자로 판단하며, 중상(0.2 < FED ≤ 0.3), 경상(0.1 < FED ≤ 0.2)로 하여 등가사망수를 식 (2)와 같이 구한다. 본 연구에서는 a=10, b=100으로 적용하였다(SFPE, 2003).

$$Fatal_{eqv} = n_{(FED > 0.3)} + \frac{1}{10}n_{(0.2 < FED \leq 0.3)} + \frac{1}{100}n_{(0.1 < FED \leq 0.2)} \quad (2)$$

### 3.3 단면형태별 해석결과

#### 3.3.1 터널단면형태별 화재해석 결과

화재시 터널내 풍속해석은 동계시 온도조건에 대해서 수행하였으며, 초기풍속(화재전 풍속)은 SES (Subway Environmental Simulation)프로그램에 의해서 터널

연장, 열차운행 및 정지위치를 고려하여 구하였으며, 이를 FDS (NIST, 2010)에 의한 화재 해석시 초기풍속으로 반영하여 화재해석을 수행하였다.

Fig. 4는 환기를 하지 않는 경우에 단면형태별로 호흡선 높이에서 시간변화에 따른 CO농도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 화재연기는 화재지점을 중심으로 양방향으로 이동하는 현상을 보이고 있으며, 진행방향으로 이동거리가 보다 증가 하는 현상을 보이고 있다. 또한 동일한 시간에서 CO농도는 단면적이 가장 큰 복선터널의 경우가 가장 낮게 나타나고 있으며, Type 1과 Type 2의 경우 Type 2가 보다 농도가 낮게 나타나고 있는데 이는 Type 2가 터널전정 높이가 높기 때문으로 판단된다.

기계환기시 풍속은 단면 Type 별로 2.5 m/s에 근접한 풍속으로 제연하는 것으로 하였으며, 이때 CO농도는 Fig. 5에 나타냈다.

그림에서 터널내 농도는 시간이 경과하면 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이고 있으며, 이때 CO농도는 Type 1은 373 ppm, Type 2는 350 ppm, Type 3은 192 ppm으로 나타나고 있다. 이 경우에도 단면적이 가장 큰 Type 3의 경우가 CO농도가 가장 낮게 나타나고 있다. 이는 터널내 제연풍속이 2.5 m/s로 동일하여 단면적이 큰 Type 1이 풍량이 증가하고 이로 인한 희석효과가 증가하기 때문으로 판단된다. Type 1과 Type 2의 경우에는 단면적이 작은 Type 2의 경우가 오히려 농도가 감소하는 경향을 보이고 있는 이는

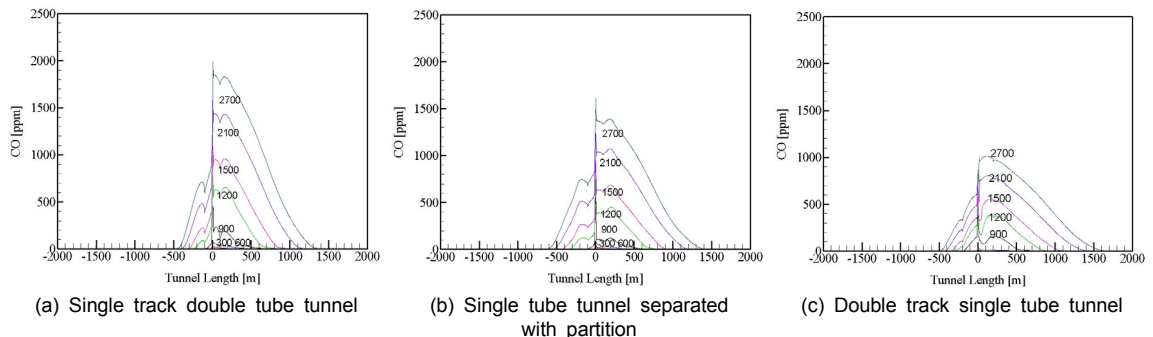


Fig. 4. Mean Co concentration of tunnel type(Natural ventilation)

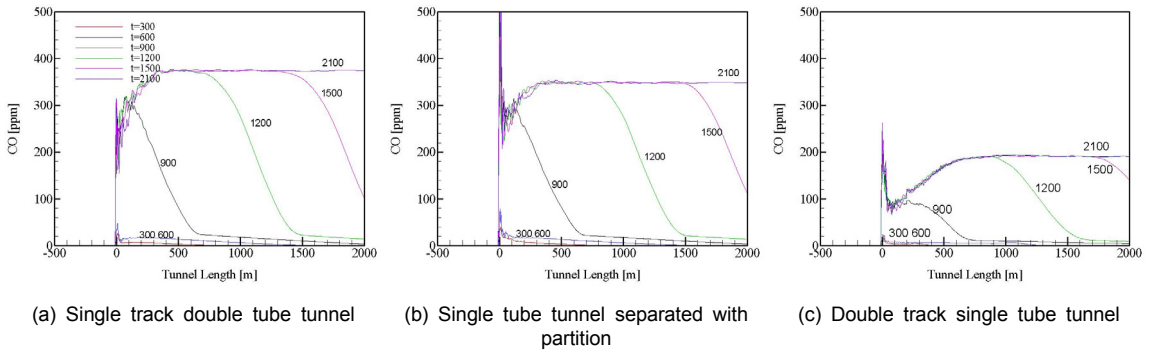


Fig. 5. Mean Co concentration of tunnel type(Ventilation)

Type2의 경우가 천정높이가 높아서 연기의 하강현상이 적게 나타나기 때문에 판단된다.

이상의 CO농도에 대한 검토결과, 피난거리가 동일한 경우에는 Type 3가 대피안전확보에 가장 효과적일 것으로 판단되나, Type 3의 경우, 피난연결통로의 설치가 곤란하며, 피난연결통로의 설치가 용이한 Type 1과 Type 2의 경우에는 Type 2가 대피안전확보에 보다 효과적일 것으로 예측된다.

### 3.3.2 대피해석 및 사망자수 추정결과

Fig. 6은 대피해석 결과를 나타내기 위해서 Type 1의 터널에서 2번째 구간에서 3번째 차량에서 화재가 발생하는 경우, 제연을 수행하지 않고 양방향으로 대피하는 경우에 연기의 이동 및 최초대피자의 위치 시간에 따른 사망자수 등을 나타낸 것이다.

그림에서 SMDS\_MAX, SMDS\_MIN은 연기의 위

치를 나타내는 것으로 연기는 약 815초 정도에 나타나기 시작하며, 열차진행 반대방향에서는 연기의 이동속도가 낮기 때문에 연기에 포획되는 대피자가 없으나 열차의 진행방향으로 대피하는 대피자는 일부가 연기에 포획된다. PEVC\_MAX와 PEVC\_MIN은 대피자를 나타내며 연기에 포획되는 대피자의 수는 PSIN\_SMK에 나타났고, 시간에 따른 대피 완료자의 수는 EVC\_MAN에 나타냈다.

본 연구에서는 이와 같은 대피해석을 수행하여 사망자수를 추정하였으며, Table 3은 피난연결통로 간격별 최대 사망자수 추정결과를 나타낸 것이다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 병렬터널로 건설하는 경우가 사망자수가 감소하며, 격벽이 설치된 터널 Type 2의 경우, 비화재 터널에서의 가압형성이 가능하여 Type 1보다 대피환경 확보에 효과적임을 알 수 있다.

Type 3의 경우, 피난연결통로 간격이 2.0 km이상인 경우에는 최대인원은 모두 219명(총인원의 60%)으로 나타나고 있다.

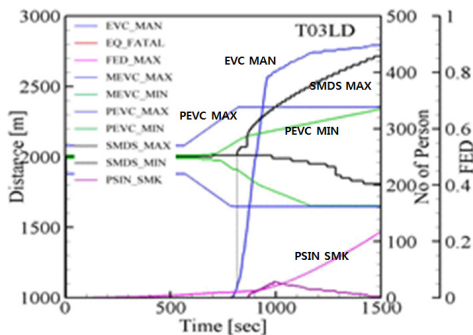


Fig. 6. Results of evacuation characteristics

Table 3. Estimated number of deaths by interval of tunnel cross passage

Division	250 [m]	300 [m]	350 [m]	400 [m]	450 [m]	500 [m]
Type 1	9	10	21	29	47	57
Type 2	4	5	5	10	15	23
Division	1.5 [m]	2 [m]	3 [m]	4 [m]	5 [m]	6 [m]
Type 3	32	219	219	219	219	219



### 3.3.3 사회적 위험도 평가결과

터널 단면형태에 따른 정량적 위험도 분석을 위해 서 피난연결통로 간격을 변화하여 화재위험도를 평가 하였다.

각국의 사회적 위험도 평가기준은 Table 4에 나타 낸 바와 같다. 각국의 위험도 평가기준은 2000년 이후 에 제시된 것으로 국내(KR)기준과는 달리 기율기를 -2.0을 적용하고 있으며, 2000년 후반에는 Frequency of N more Fatalities에 대한 절편인 1명 사망자에 대한 빈도도 10<sup>-3</sup>으로 강화하고 있는 추세이다. 따라서 국내의 경우도 현재 적용하는 기준의 강화 필요성 이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 Type 1의 터널에 대한 연장별 정량적 위험

도 평가를 위해서 F/N선도와 사회적 위험도 평가기준 을 나타낸 것이다.

그림과 같이 피난연결통로의 간격이 감소 될수록 위험도는 감소하는 것으로 나타나고 있으며, 터널단 면형태가 Type 1인 경우, 본 노선이 국내에서 현재 적용하고 있는 사회적 위험도 평가기준을 만족하기 위해서는 피난연결통로의 간격이 350 m정도임을 알 수 있다.

Fig. 8은 Type 2단면에 대한 평가결과를 나타낸 것으로 현재 국내기준을 만족하기 위한 피난연결통로 의 간격은 400 m정도로 나타나고 있다.

Fig. 9는 국내에서 최근에 건설되는 복선터널의 단면적을 적용한 노선의 사회적 위험도 평가기준으로

Table 4. Social risk assessment criteria on the country

Nation	F (1)	Slop	Note	Year
Republic of Korea	1E-3	-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Based on the standard of PHI in Hongkong.</li> <li>Add Low level standard to standard written in 1988.</li> <li>Apply 10 times moderated standard regarding chlorine transportation in 1997.</li> </ul>	1996
Netherlands (B.J. Arends, 2005)	0.15E-2	-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Western Scheldt tunnel, 6.6 km</li> </ul>	2002
France (V.M Trbojevic, 2004)	1E-7	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facility newly built facility.</li> <li>Apply 5E-07 to existing facility.</li> <li>Apply horizontal line regardless casualty.</li> </ul>	2003
UK (V.M Trbojevic, 2004)	1E-2	-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adopted at HSE by Trbojevic. Henceforth, Strengthen and suggest as EU standard</li> </ul>	2004
Czech republic (John, 2010)	1E-4	-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Apply to newly built facility</li> </ul>	2010
EU (John., 2010)	1E-3	-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Upper Tolerable Limit</li> <li>Target Boundary : 1.0E-04</li> </ul>	2010
Netherlands (B.J. Arends, 2005)	0.3E-2	-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Betuwe tunnel, 3 km</li> </ul>	2011

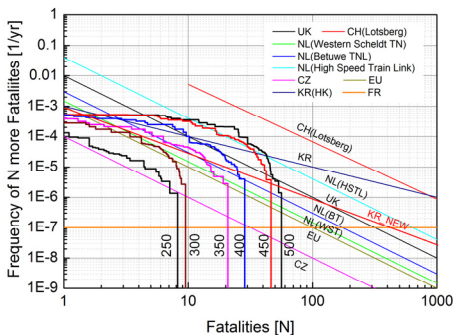


Fig. 7. F/N diagram by cross section area (Type 1)

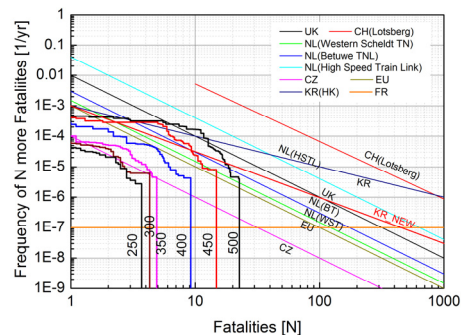


Fig. 8. F/N diagram by cross section area (Type 2)

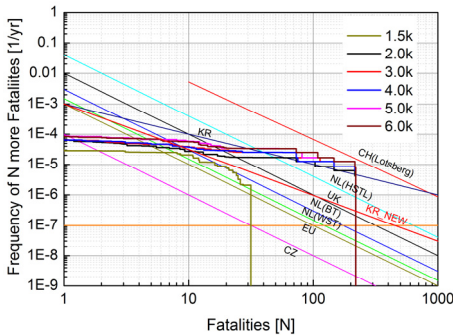


Fig. 9. F/N diagram by cross section area (Type 3)

사갱이나 수직갱 등에 의한 피난연결통로의 간격은 1.5 km 정도로 나타나고 있으며, 이 경우 2~6 km까지는 F/N 선도에 의한 차이가 크지 않게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 2 km까지가 대피자의 최대인원이 사망에 도달하는 한계상황으로 볼 수 있으며, 따라서 피난연결통로의 간격을 줄이더라도 위험도의 감소효과는 작게 나타날 것으로 보인다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 목포-제주간 가상터널(105.6 km)에 대해서 복선터널(Type 3), 쌍굴터널(Type 1) 및 복선터널을 격벽으로 분리하는 형태의 터널(Type 2)로 가정하여 단면형태별로 피난안전을 확보할 수 있는 피난연결통로의 적정 간격을 정량적 위험도 평가기법에 의해서 산정하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서 설정한 터널단면 형태중 비화재 터널에서의 가압형성이 이루어지는 Type 2(복선터널을 격벽으로 분리한 형태)가 대피안전확보에 가장 효과적 인 것으로 나타났다.
2. 터널내 유해가스농도(CO)는 제연시 터널내 풍속을 2.5 m/s로 동일하게 하는 경우에 각 유형별로 최대 373 ppm (Type 1), 350 ppm (Type 2), 192 ppm (Type 3)으로 나타났다.
3. 복선터널의 경우, 피난연결통로의 간격이 2.0 km를

- 초과하는 경우에는 연결통로의 축소에 따른 최대사망자수의 감소효과는 없는 것으로 나타나고 있으며, 위험도의 감소효과도 크지 않은 것으로 나타났다.
4. 터널 단면형태 별로 적정 피난연결통로의 간격은 350 m (Type 1), 400 m (Type 2), 1500 m (Type 3)로 검토되었다.

#### 감사의 글

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

#### References

1. Arends, B.J., Jonkman, S.N., Vrijling, J.K. (2005), "Evaluation of tunnel safety: towards an economic safety optimum", Reliability Eng. & system Safety.
2. IES. (2004), "SIMULEX User Manual", UK.
3. John Dalsgaard Sorensen. (2010), "Belastning og sikkerhed", Denmark.
4. Korea Railroad Research Institute. (2014), "Quantitative risk assessment manual draft", South Korea.
5. Ministry of Land. (2013), "Railway facilities safety technical standards", South Korea.
6. NIST. (2010), "Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide", US.
7. SFPE. (2003), "Emergency movement", Chapter 3-14.
8. Trbojevic, V.M. (2004), "Risk criteria in EU", Risk support Limited, London, U.K.
9. Tunnelling and Underground Space Association. (2009), "Ho-Nam railway vehicle fire intensity and quantitative risk assessment(QRA)", South Korea.
10. 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, pp. 307-319.