소형차 전용 도로터널의 화재 위험도 평가기법개발 및 적용성에 관한 연구

류지오[1*] · 최판규[2]

[1]정회원, 신한대학교 기계자동차공학과 교수
[2]정회원, 주성지앤비 팀장

A study on the development and applicability of fire risk assessment method for small road tunnels passing only small cars

Ji-Oh Ryu[1*] · Pan-Gyu Choi[2]

[1]Professor, Dept. Mechanical and Automotive Engineering, Shinhan University
[2]Team Leader, JS G&B Inc.

***Corresponding Author :** Ji-Oh Ryu, geotunnel@gmail.com

Abstract

A quantitative risk assessment method for quantitatively evaluating the fire risk in designing a road tunnel disaster prevention facilities has been introduced to evaluate the appropriateness of a disaster prevention facility in a large tunnel through which all vehicle types pass. However, since the quantitative risk assessment method of the developed can be applied only to the large sectional area tunnels (large tunnels), it is necessary to develop a quantitative risk assessment method for road tunnels passing only small cars which has recently been constructed or planned. In this study, fire accidents scenarios and quantitative risk assesment method for small road tunnels through small cars only which is based on the methods for existing road tunnels (large tunnels). And the risk according to the distance between cross passage is evaluated. As a result, in order to satisfy the societal risk assessment criteria, the distance of the appropriate distance between cross passages was estimated to be 200 m, and the effect of the ventilation system of the large port exhaust ventilation system was quantitatively analyzed by comparing the longitudinal ventilation system.

Keywords: Quantitative risk assessment, Road tunnel for small cars, Distance between cross passages, Tunnel ventilation system

초 록

도로터널의 방재시설 설계에 화재 위험을 정량적으로 평가하기 위한 정량적 위험도 평가기법이 소방시설물에 대한 성능위주 설계의 일환으로 도입되어 전차종이 통과하는 대단면 터널에 대한 방재시설의 적정성을 평가하는데 활용되고 있다. 그러나 현재 도로

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
20(6)917-930(2018)
https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.6.917

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received August 7, 2018
Revised September 12, 2018
Accepted September 17, 2018

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 ⓒ2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

터널에 도입하고 있는 정량적 위험도 평가기법은 대단면 터널에만 적용이 가능하기 때문에 최근 건설이나 계획이 증가하는 소형차 전용 도로터널에 대한 정량적 위험도 평가기법의 개발 필요성이 대두되게 되었다. 이에 본 연구에서는 기존의 터널에 대한 정량적 위험도 평가기법을 기반으로 하여 소형차 전용 도로터널에 적합한 화재발생 시나리오를 제시하고 소형차 전용의 모델터널에 대해서 피난연결통로 간격에 따른 위험도를 분석하고 적용성을 검토하였다. 그 결과로 소형차 전용도로터널의 경우, 현행 사회적 위험도 평가기준을 만족하기 위한 피난연결통로의 적정 간격은 200 m로 평가되었다. 또한 소형차 전용터널에 대한 제배연방식에 따른 위험도를 비교한 결과, 제트팬에 의해서 기류제어가 가능한 대배기구방식이 피난안전확보에 효과적인 것으로 분석되었다.

주요어: 정량적 위험도 평가, 소형차전용터널, 피난연결통로간격, 터널환기시스템

1. 서 론

최근 들어 소방시설물에 대한 설계 시 사양위주 설계를 지양하고 성능위주 설계기법이 도입되고 있는 추세이며, 도로터널에 대한 방재시설 설계에 있어서도 성능위주 설계의 일환으로 화재 위험도를 정량적으로 평가하기 위한 정량적 위험도 평가기법이 도입되고 있으며, 도로터널 방재시설의 최적화 및 적정성을 결정하기 위한 도구로 활용되고 있다.

정량적 위험도 평가기법은 원자력발전, 화학 및 석유화학 분야 등에서 위험한 시설이나 공정의 안전성을 평가하기 위해 개발되었으며, 도로터널에 대한 위험도 평가는 2004년 4월 발표된 유럽 횡단 도로 네트워크의 도로터널의 최소안전요구사항(Official Journal of the European Union, 2004)에 명시적으로 규정하고 있어, 유럽연합을 중심으로 활발하게 도로터널의 방재시설 설치계획과 설계 및 기존터널의 방재시설보강을 위한 의사결정도구로 활용되고 있다.

전술한 바와 같이 유럽의 국가들은 유럽연합에서 권고하는 도로터널에 대한 최소 안전기준에서 요구하는 규정을 수용하여 정량적 위험도 평가기법을 국가지침이나 기준으로 제시하고 있다. 대표적인 평가모델은 오스트리아의 TuRisMo (Kohl, 2006), 네덜란드의 TUNPRIM (De Weger, 2001), OECD/PIARC DG QRA모델(Philippe CASSINI, 2010)등이 있으며, 프랑스, 독일, 이탈리아는 2004/54/EC지침의 조건에 만족하도록 DG QRA모델을 적용하여 자체적으로 평가하도록 정하고 있다.

또한, Mattias (2002), Pálsson (2004)은 특정터널에 적용하기 위한 정량적 위험도 평가기법을 연구한 바가 있으며, 최근에 Meng (2010)은 싱가폴의 KPE터널에 적용하기 위한 연구결과를 발표하고 있다. 국내의 경우에는 Yoo (2006)의 연구결과가 있으며, 이를 2005년에 재정된 “도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침” (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2015)에 반영하여 도로터널에서의 화재 위험도를 정량화하여 평가하도록 정하고 있으며, 터널 방재시설 설계 시 피난연결통로 및 제연시설의 적정성 평가나 대안에 대한 상대적인 위험도를 비교 · 평가하고 있다.

그러나 현재 개발된 정량적 위험도 평가기법은 전차종이 통과하는 대단면 터널에 대해 적용성이 있으며, 단면적이 상대적으로 작고 통과하는 차량의 종류가 소형차량으로 제한되는 소단면 터널에 대한 적용은 곤란한 것으로 평가된다. 현재 시공 중인 서부간선지하도로 및 제물포로 터널과 같이 소형차 전용의 소단면 터널의 건설이나 계획이 대도시를 중심으로 활발히 진행되고 있으며, 향후 이에 대한 수요는 대도시의 녹지공간 확보 및 대기환경 오염물질 저감을 목적으로 더욱 증대할 것으로 전망된다. 이에 소형차 전용터널에 대한 정량적 위험도 평가 기법의 개발 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 소형차 전용도로에 대한 화재위험을 정량적으로 평가하기 위한 정량적 위험도 평가기법의 개발을 목적으로 소형차 전용터널에 대한 표준 화재시나리오를 정립하고 화재해석 결과를 반영하는 사망자 수 추정 방법과 위험도 평가방법을 제시하였다. 또한 본 연구결과를 통해 도출된 정량적 위험도 평가기법의 적용성을 평가하기 위하여 모델터널에 대한 피난연결통로 간격별 위험도 평가와 소형차 전용터널에 대한 제·배연방법에 따른 위험도를 비교 검토하였다.

2. 도로터널에 대한 정량적 위험도 평가

정량적 위험도 평가는 일반적으로 Fig. 1에 보인 바와 같이 ① 위험의 정의(Hazard identification), ② 사고발생 빈도의 분석 및 사고결과의 예측(Probability and Consequence analysis), ③ 위험수준의 산정 및 평가 단계(Risk estimation)로 수행하고 있다.

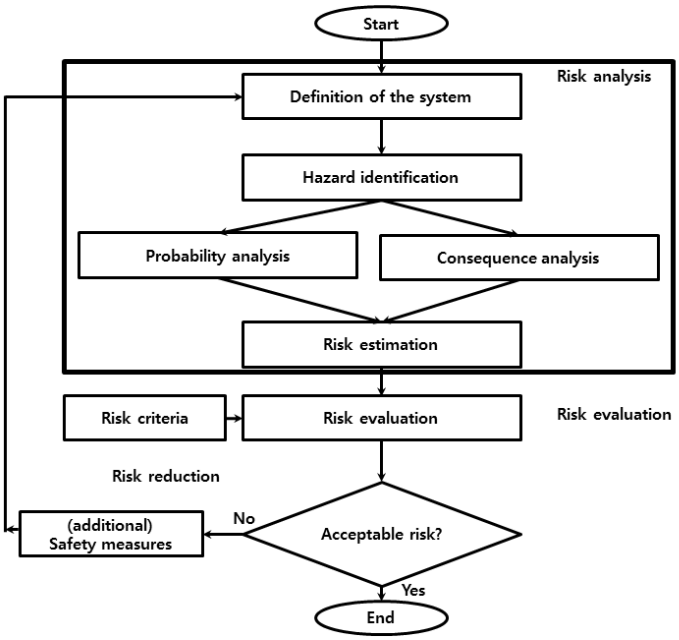


Fig. 1. Risk assessment

도로터널에 대한 위험도 평가 시 위험은 일반적으로 일반(기계적: 충돌, 추돌 등)사고, 화재 및 위험물 누출, TNT의 폭발 등을 포함하고 있으며, 각 사고는 사건수목(event tree)기법에 의해서 전개하며, 화재로 확대되는 시나리오를 포함하고 있다. 또한 화재사고 시나리오는 화재강도 및 화재의 성장곡선에 의해서 구분하고 있다. 각 시나리오는 사고발생통계에 근거하여 각종 분기비를 적용하여 시나리오별 발생빈도를 산정한다.

사고결과는 사망자 수 및 경제적인 손실규모로 예측하는 것이 일반적이다. 사망자 수의 예측방법은 대피해석을 수행하여 대피자가 대피할 수 있는 거리를 산정하고 화재의 영향을 화재해석이나 통계적으로 판단하여 대피거리와 화재의 영향거리를 비교하여 사망자 수를 추정하는 비교적 간단한 방법과 화재해석과 대피해석을 수행하여 터널 내 유해환경과 대피자의 위치를 시간경과에 따라 해석하여 대피자가 유해환경에 노출되는 정도를 유효복용분량(Fractional Effective Dose, FED)으로 정량화하여 사망상태에 도달하는지 여부를 판단하는 방법이 있다.

각국의 정량적 위험도 평가기법에서는 화재 시 열환경 및 유해가스농도를 1D 방정식에 의해 산정하거나 경험적인 결과를 반영하도록 하고 있으나, 구체적인 방법을 기술하고 있지는 않고 있으며, 대피해석 방법이나 결과 또한 명확하게 기술되어 있지 않은 실정으로 외국에서 사용하고 있는 모델을 국내에 도입하여 적용하는 데에는 한계가 많은 실정이다.

도출되는 위험의 평가는 개인적 위험도(Individual Risk, IR), 연간 사망자 수에 대한 기댓값(Expect Value, EV), 인명의 가치를 고려한 경제적인 손실, F/N (Frequency/No. of Fatalities)선도와 사회적 위험도 기준(Societal Risk Criteria)의 비교 등을 통해서 평가하고 있다.

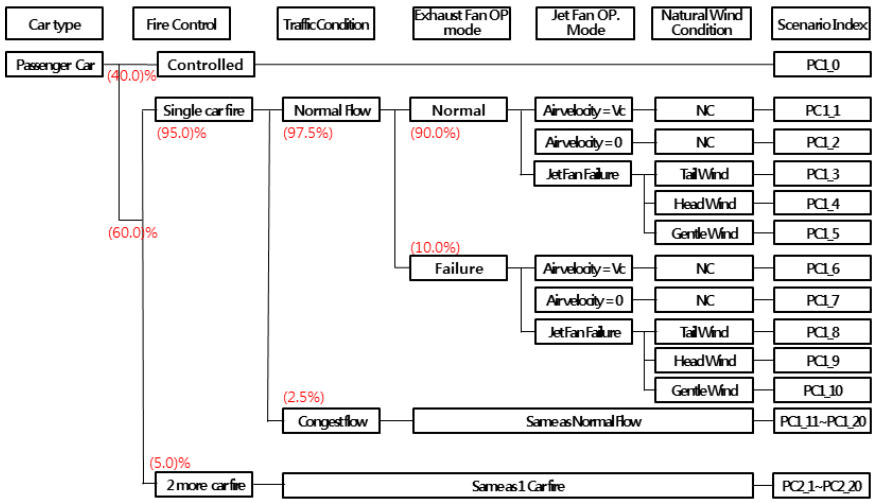
3. 소형차 전용터널의 위험도 평가모델

본 연구에서는 터널방재시설은 화재에 대비하여 인명의 안전을 확보하기 위한 것이 대부분이며, 위험물 누출 및 테러 등에 의한 폭발사고의 발생빈도는 아주 낮은 수준으로 예측이 불가능하기 때문에 위험요인으로 가장 비중을 많이 차지하는 차량 화재만을 위험의 대상으로 하였다.

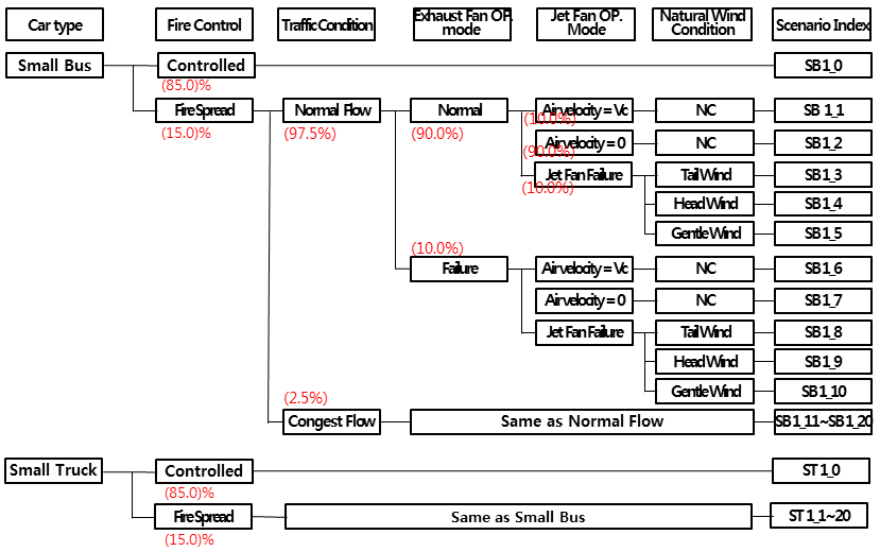
3.1 화재발생 표준시나리오

소형차 전용터널에 대한 화재시나리오는 사건수목(event tree)기법에 의해서 차종별(승용차, 소형버스, 소형화물차)로 구분하여 Fig. 2와 같이 전개하였다. 각 차량의 화재는 확대되는 경우와 조기진화(화재제압이 가능하여 경미한 화재)되는 경우로 구분하고 화재 시 교통류의 상태(정체 또는 원활)를 고려하였다. 또한, 제연시스템은 배기구에 의한 배연방식과 제트팬 방식을 모두 적용할 수 있도록 하였으며, 배기방식은 배연효율을 향상하기 위하여 열기류의 방향제어를 할 수 있도록 제트팬 설치를 권장하고 있는 바, 화재시나리오에서는 배기구에 의한 배연 및 제트팬의 가동조건을 고려할 수 있도록 제연시스템에 대한 시나리오를 구성하였다.

또한 제연시스템의 고장 시에는 터널 내 대피환경이 자연풍의 세기 및 방향에 영향을 크게 받게 되므로 이를 고려할 수 있도록 시나리오를 작성하였다.



(a) Fire scenario for passenger car



(b) Fire scenario for passenger car for SB and ST

Fig. 2 Fire scenario for road tunnel only small car

3.1.1 차종별 화재사고 발생률

차종별 화재사고 발생률은 NFDS (2017)의 차량화재 통계현황과 Korea Transportation Safety Authority (2016)의 주행거리계 통계자료에 근거하여 최근 5년간(2012~2016)의 차종별 화재사고발생률을 산정하였으며, Table 1에 나타냈다.

전체차종에 대한 화재사고발생률은 1.15건/10^8 Veh · km이며, 차종별 화재사고발생률은 승용차, 0.77, 버스, 1.52, 화물차, 2.30건/10^8 Veh.km으로 분석되었다.

Table 1. Fire accidents rate for each vehicle

Vehicle	PC	Small bus	Small truck	Sum
Fire accidents (1/yr)	7,906	1,520	7,067	16,493
Veh · kilometer (10^6 Veh · km)	1,031,249	100,331	307,784	1,439,364
Fire accidents rate ($1/10^8$ Veh · km)	0.77	1.52	2.30	1.15

3.1.2 승용차 화재시나리오

승용차 화재중 소화기로 진화가 가능한 경미한 화재는 PIARC (1995) 보고서에서는 80~90%, 일본의 Japan Road Association (2002)의 자료에는 53%정도로 제시되고 있으나, 본 시나리오에서는 승용차 화재가 확대되는 분기비를 보수적인 관점에서 60%로 고려하였다.

세계적으로 대형참사를 유발한 도로터널의 화재는 39명이 사망한 몽브랑 터널화재, 고타드 터널화재, 니혼카키 터널화재가 대표적이며, 이들 사고는 모두 화재가 인접차량으로 확산되는 현상(이하 fire jump현상)이 발생하여 대형화재로 확대되어 인명피해가 크게 발생한 것으로 보고되고 있다. 이에 본 시나리오에서는 승용차 화재를 단독화재와 fire jump현상에 의해서 2대 이상으로 확대되는 것을 고려하였다. 노르웨이의 경우, 67건의 차량충돌사고 중 6건이 화재사고로 발전하였으며, 화재사고 중 1건(15%)이 인접차량으로 확대되는 것으로 보고하고 있으며, 독일의 경우에는 Elb tunnel에서 16년간 63건의 화재가 발생하여, 1건(1.6%)이 인접차량으로 확대된 것으로 보고하고 있다. 국내의 경우, 한국도로공사의 자료를 분석하면 고속도로터널에서 2005년에서 부터 2014년까지 승용차 및 승합차의 화재건수는 63건이며, 이중 2대 이상의 차량으로 화재가 전파한 경우는 5%로 분석되었다. 이에 화재시나리오에서 화재가 2대 이상의 차량으로 전파될 확률을 5%로 고려하였다. 또한 승용차의 화재강도는 일반적으로 2.5~5 MW정도로 제시되고 있는 바, 본 연구에서는 단독화재의 경우에는 5 MW로 2대 이상으로 화재가 확대되는 경우에는 10 MW로 화재강도를 설정하였다.

3.1.3 소형버스 및 소형화물 차량의 화재시나리오

고속도로 터널의 화재사고를 분석하여 소형버스 및 소형트럭의 화재가 확대될 가능성을 15%로 하였으며, 화재강도는 소형버스는 15 MW로 설정하고 소형트럭의 경우에는 적재화물의 다양성을 고려하여 20 MW로 설정하였다.

3.1.4 화재 시 교통상황 및 제연·배연 시나리오

화재 시 제트팬에 의해서 제연하는 종류환기방식의 제연운전모드는 제트팬을 가동하여 터널 내 풍속을 임계풍속으로 유지하여 화재하류로 제어하여 화재상류에 정체되는 차량의 대피자가 안전하게 대피하도록 하는 것을 기본 운전모드로 한다. 그러나 대면통행 터널이나 정체가 극심한 상태의 일방통행 터널에서는 화재지점 상하류에 대피자가 존재하게 되므로 화재 시 제연팬의 가동은 터널 내 풍속을 증가시켜 연기의 이동을 촉진하므로 화재하류에 존재하는 대피자를 연기가 덮칠 가능성이 증대하게 되며, 이로 인한 인명피해를 가중할 우려가 있다. 이에

제트팬의 운전방법은 화재 전 교통상황(정체 또는 정상)에 따라 다르게 적용되어야 하므로 화재 전 교통상태를 정상 시와 정체 시로 구분하여 시나리오를 구성하였다.

정체상황은 화재 시 차량의 주행속도가 연기의 이동속도보다 낮은 경우로 하였으며, 연기의 이동속도를 3.0 m/s (10.8 km/h)하여 차량의 주행속도가 이보다 저속인 경우를 정체상태로 가정하였다. 이에 정체빈도는 서울시 전도로의 평균주행속도에 대한 통계자료로 부터 주행속도가 10.8 km/h 이하인 시간을 구하여 2.5%로 제시하였다.

제연팬의 고장여부 및 신뢰도에 대한 연구는 거의 없는 실정이나, 영국의 성능위주 설계기준인 PD 7974-7:2003에서는 제연시스템의 신뢰도를 85~90%로 적용하고 있으며, Mattias Persson이 도로터널의 위험도 평가에서 적용한 제연설비의 신뢰도는 10%로 가정하고 있다.

제연시나리오는 배연을 위한 배기구방식(일반적으로 대배기구방식의 적용이 많으므로 이하 대배기구방식이라 함)과 제트팬에 의한 제연방식을 모두 포함하는 시나리오를 작성하였다. 화재 시 배연팬의 정상작동 여부는 전술한 제연팬의 신뢰도에 근거하여 10%로 하였다. 제트팬은 교통상황이 정상주행 상태인 경우에는 임계풍속으로 운전하는 것을 기본으로 하므로 임계풍속으로 운전하는 빈도를 80%로 하고 고장빈도 및 오동작 빈도(풍속 0화 운전)는 각각 10%로 하였으며, 정체상황에서는 대배기구를 통한 배연운전에 대한 분기비는 정상교통류와 동일하게 설정하였으며, 제트팬 방식은 터널 내 풍속을 0 m/s로 유지하는 풍속 0화 운전을 기본으로 하기에 이에 대한 분기비를 80%로 하고 오류에 의한 임계풍속운전 및 고장빈도를 각각 10%로 하였다.

자연풍의 영향은 제트팬이 정상작동하여 임계풍속 및 풍속0화 운전을 하는 경우에는 자연풍이 작용하여도 풍속제어에 의해서 소정의 풍속을 유지할 수 있으므로 고려하지 않았으며, 제트팬 고장 시에는 터널 내 풍속을 인위적으로 제어할 수 없으므로 자연풍의 조건을 순풍, 미풍, 역풍으로 구분하여 고려하였다. 자연풍의 풍속은 일반적으로 역풍 2.5 m/s로 고려하고 있으나, 도심지 소형터널의 경우에는 산악터널과 달리 외부 자연풍에 영향이 작을 것으로 판단하여 미풍상태에 대한 분기비를 가중하여 적용하였으며, 미풍조건의 분기비를 80%, 순풍 및 역풍(풍속 2.5 m/s 이상)에 대한 분기비는 각각 10%로 적용하였다.

3.2 사망자 수의 추정

사망자 수는 시나리오별로 화재해석을 선행하여 시간별로 터널 내 유해환경에 대한 DB를 구축하고 대피해석을 통해 시간별 대피자의 위치를 계산하여 대피자의 위치에 따른 온도, 복사강도, CO 및 CO_2농도, O_2 저감률을 화재해석 결과DB에서 읽어와 대피자별 유효복용분량(Fractional Effective Dose, FED)에 의해서 산정하여 유효복용분량에 따라 등가사망자 수로 추정하였다. 대피해석 및 유효복용분량계산 방법은 Yoo (2006)의 논문에 제시되었으므로 본 논문에서는 생략하였다.

유효복용분량(FED)을 계산하기 위한 모델은 Purser (1988) 모델, N-GAS모델, 미국FAA (Federal Aviation Administration, 1995) 모델 등이 있으며, 본 연구에서는 FAA 모델보다 FED값을 높게 평가하며, 도로터널 위험도 평가에 일반적으로 적용하고 있는 Purser 모델을 적용하였으며, FAA모델에서 제시된 열환경 및 가시거리에 대한 모델을 추가로 적용하였다.

FED에 의한 사망자의 평가는 전술한 바와 같이 FED값이 0.3에 도달하면 사망으로 판정하고 있으며, 이하의 값에서는 Table 2와 같이 등가사망자 수를 적용하였다.

Table 2. Equivalent fatalities

FED range	0.1~0.2	0.2~0.3	>0.3
Equivalent fatalities	1/100	1/10	1

3.3 위험도 평가기준

위험에 대한 평가기준은 사회적 위험도 평가기준, 연간 사망자 수인 EV (Expected Value)나 개인적 위험도 (Individual Risk, IR)가 있다.

사회적 위험도 평가는 시나리오별로 사망자 수(N)와 발생확률을 구하여 N명 이상 사망할 누적확률(F)을 도식화한 F/N선도를 작성하고 이 선도를 사회적 위험도 평가기준과 비교하여 위험도를 평가하는 것이다. 각국의 사회적 위험도 평가기준은 보고서마다 다양하게 제시되고 있으며, 가장 최신의 자료를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서는 DG QRA기준과 Austria는 단위길이(1 km)에 대한 위험도이며, 그 외의 국가는 터널 당 기준이다.

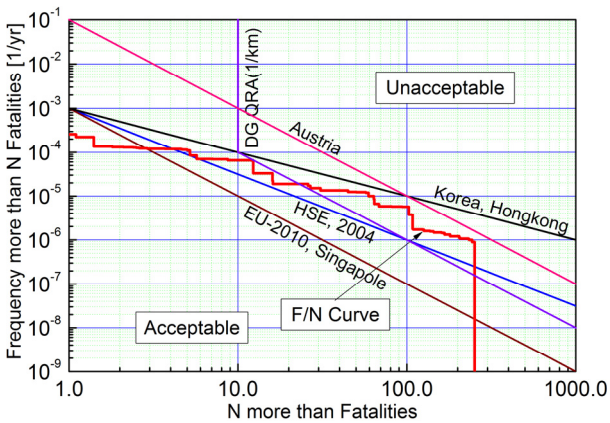


Fig. 3. Societal risk criteria for countries

연간 예상되는 사망자 수(EV)와 터널 화재 사고 시 화재사고에 연루된 개인이 사고로 인해 사망할 확률인 개인적 위험도(IR)는 식 (1)과 식 (2)로 계산한다. Table 3은 유럽국가의 도로터널에 대한 EV값을 나타낸 것이다.

$$EV = \sum_{i=1}^{n} f_i \cdot N_{fat,i} \tag{1}$$

$$IR = \sum_{i}^{n} f_i \cdot Nb_i \cdot P_{fi} \tag{2}$$

여기서, f_i는 시나리오 i의 발생확률, $N_{fat,i}$는 시나리오 i의 사망자 수, Nb_i는 시나리오 i의 위험에 노출되는 사람 수, P_{fi}는 사나리오 i의해서 사망할 확률($N_{fat,i}/Nb_i$)이다.

Table 3. Expected value for each nation

Country	EV	
Austria, France, Greece	10^{-3} fat./yr tunnel	
Germany	Fire	5.0×10^{-3} fat./km · yr
	Fire + Explosion	2.2×10^{-3} fat./km · yr
	Explosion	1.0×10^{-6} fat./km · yr
	Toxicity	4.0×10^{-4} fat./km · yr
	Total	6.2×10^{-3} fat./km · yr

4. 위험도 평가기법의 적용성 평가

4.1 위험도 평가터널 제원

전술한 정량적 위험도 평가기법의 적용성 평가를 위해서 모델터널을 대상으로 위험도 평가를 수행하였다.

모델터널의 제원과 교통량은 Table 4 및 Table 5에 나타냈다. 화재 시 대피안전에 직접적으로 영향을 주는 제연설비는 대배기구방식을 적용하고 기류제어를 위해 제트팬을 설치하는 것으로 하였다. 피난연결통로의 간격은 설치간격에 따른 위험도를 비교하기 위해서 설치간격을 150~250 m로 하여 25 m간격으로 검토하였다.

Table 4. Model tunnel specification

	Length (km)	Area (m^2)	Height (m)	Gradient (%)	Diameter (m)	Perimeter (m)
Spec.	5.0	35.7	3.9	1.00	8.079	31.652

Table 5. Traffics for model tunnel

Vehicles	Sum	PC	Small bus	Small truck
AADT/tube	30,686	26,635	461	3,590
Mixing ratio (%)	100	86.8	1.5	11.7
Car performance (10^8 Veh · km/Yr)	0.5600	0.4861	0.0084	0.0655

4.2 모델터널에 대한 위험도 평가결과

4.2.1 사고발생빈도 분석결과

Fig. 4는 모델터널에 대해 시나리오별 화재사고발생빈도를 분석한 결과를 나타낸 것이다. 차종별 화재발생주기(return year)는 승용차 2.67년, 소형버스 78.2년, 소형트럭 6.64년으로 분석되며, 각각의 경우 화재가 확산되는 사고는 4.7년(1 car fire), 89.1년(2 car fire), 521.3년(버스소형), 44.2년(소형트럭)으로 분석되었다. 특히, 사망자가 많이 발생할 것으로 예상되는 교통정체 시 소형버스나 소형트럭의 화재의 발생주기는 각각 20,852.7년(소형버스), 1,769.6년(소형트럭)으로 분석된다.

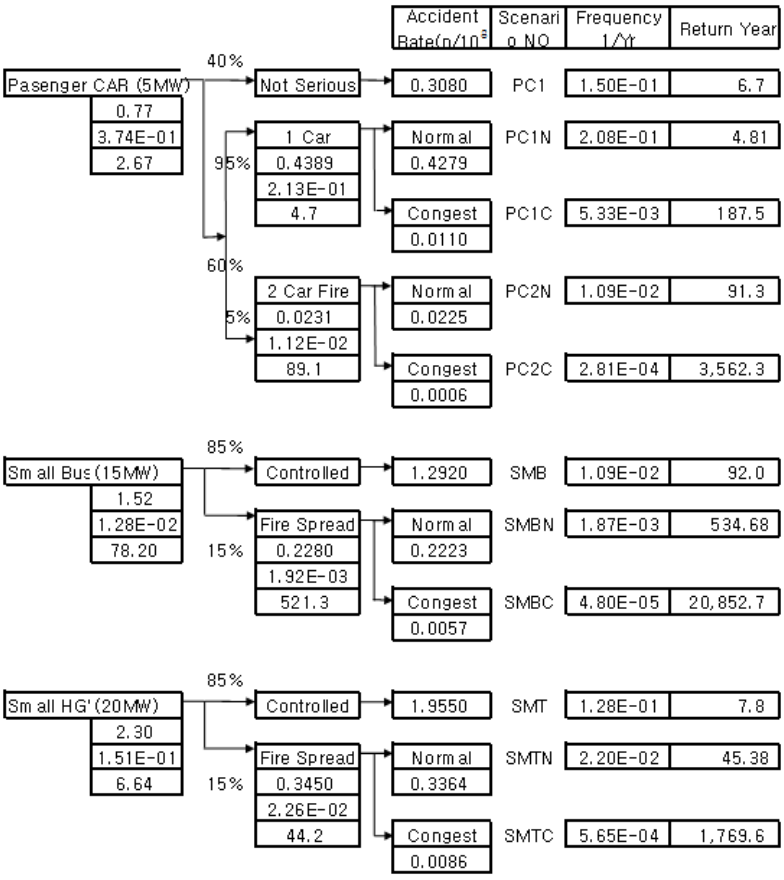


Fig. 4. Accident rate and frequency, return year according to scenario

4.2.2 피난연결통로 간격에 따른 검토

Fig. 5는 터널연장이 5 km인 경우에 피난연결통로 간격에 따른 F/N선도와 사회적 위험도 평가기준을 나타낸 것이다.

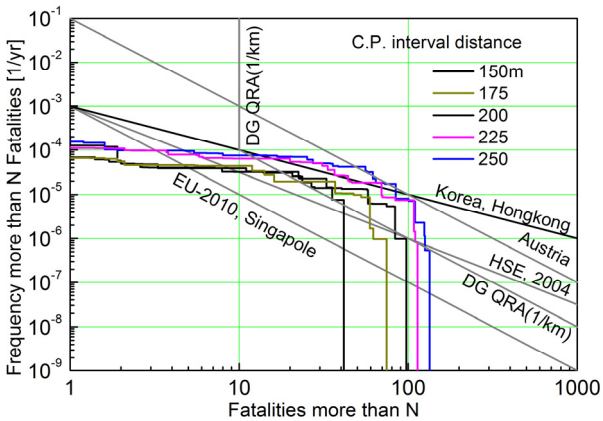


Fig. 5. Societal risk assessment by distance between cross passage

피난연결통로의 간격이 증가하면 예상되는 바와 같이 위험도가 증가하며, 현재 "도로터널방재시설 설치 및 관리지침"에서 정하고 있는 사회적 위험도 수준(Korea)을 만족하기 위해서는 피난연결통로의 간격이 200 m 이하가 되어야 함을 알 수 있다.

Table 6. EV & IR according to interval between cross passages (tunnel length: 5000 m, slope: 1%)

Interval between C.P.(m)	150	175	200	225	250
EV × 10^{-3} TN · yr	1.172	1.209	1.944	3.119	4.191
EV × 10^{-3} km · yr	0.234	0.242	0.389	0.624	0.838
IR × 10^{-7}	0.53	0.55	0.88	1.41	1.90

Table 6은 피난연결통로간격에 따른 EV을 나타낸 것으로 피난연결통로의 간격이 150~250 m인 경우에 1.17~4.19 × 10^{-3} fat./yr으로 나타나고 있으며, 피난연결통로 간격이 150과 175 m인 경우에는 그 차이가 아주 작으나 200 m 이상인 경우에는 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 이 값은 유럽의 국가의 기준(10^{-3} fat./yr)보다 높은 값을 보이고 있으나, 단위길이(1 km)당 EV값은 피난연결통로간격이 200 m일 때 0.39 × 10^{-3} fat/km.yr로 독일의 기준과 비교하면 1/10수준으로 상당히 낮은 값을 보이는 것으로 분석되고 있다. 또한, 승용차의 평균탑승인원을 3명, 소형버스는 8명, 소형트럭은 2명으로 하면 화재 시 터널 내 대피자수는 최대 4,410명 정도 이며, 이를 적용하여 개인적 위험도(IR)을 산정하면 피난연결통로의 간격이 200 m인 경우에 0.88 × 10^{-7} persons · yr로 평가되며, 일반적으로 요구되는 10^{-6}~10^{-7} fat/persons · yr의 범위에 있는 것으로 평가된다.

Fig. 6은 터널연장에 따른 사회적 위험도 평가기준을 만족하는 피난연결통로간격을 분석한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 터널연장별로 333 m (터널연장: 1.0 km), 285 m (2.0 km), 230 m (3.0 km), 200 m (5.0 km) 분석되었으며, 각각의 EV값 및 IR은 Table 7에 나타냈다.

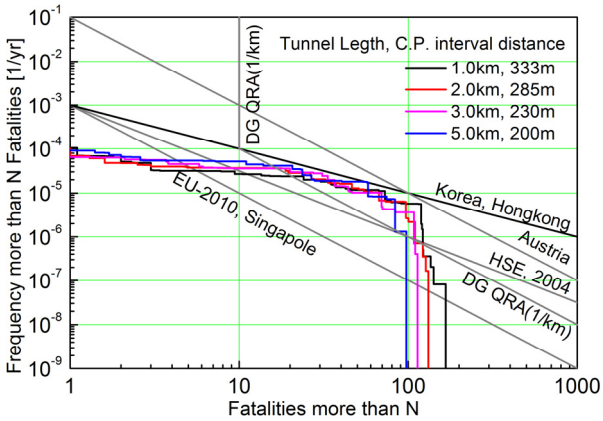


Fig. 6. Optimal distance between cross passage according to tunnel length

Table 7. EV according to interval between cross passages (tunnel length: 5000 m, slope: 1%)

Tunnel length	1.0	2.0	3.0	5.0
EV × 10^{-3} TN · yr	1.1724	1.2085	1.9437	3.1186
EV × 10^{-3} km · yr	1.172	6.043	6.479	1.040
IR × 10^{-7}	13.29	6.85	7.35	7.07

Fig. 7은 피난연결통로간격이 200 m인 모델터널에 대해서 제연방식에 따른 사회적 위험도 평가결과를 나타낸 것이다. 제트팬 방식(Only Jet Fan)과 대배기구 방식(Only Exhaust), 대배기구 + 제트팬 방식(Only Exhaust + Only Jet Fan)을 적용하는 경우를 비교하였으며, 예상되는 바와 같이 제트팬 방식을 적용하는 경우가 위험도가 가장 높으며, 대배기구를 적용하는 경우에도 제트팬을 이용하여 풍속을 제어를 하는 경우가 배연효과가 가장 우수한 것으로 나타나고 있다.

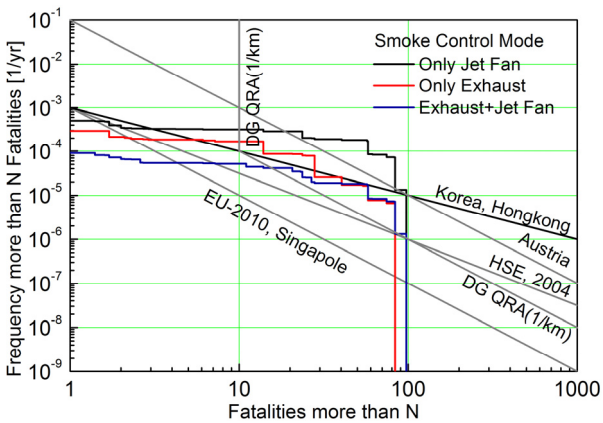


Fig. 7. Risk comparison according to ventilation method

Table 7은 제배연방식에 따른 EV값 및 IR을 나타낸 것이며, EV값은 대배기구 방식을 적용하면 제트팬 방식보다 약 1/5수준으로 감소하며, 대배기구 + 제트팬 방식은 대배기구만 적용하는 경우보다 약 1/2수준으로 감소하는 것으로 나타나고 있다.

Table 7. Risk (EV and IR) comparison according to ventilation method (tunnel length: 5000 m, slope: 1%)

Smoke control	Jet fan	Exhaust	Jet fan + Exhaust
EV × 10^{-3} TN · yr	15.602 (1.0)	3.338 (0.214)	1.944 (0.125)
EV × 10^{-3} km · yr	3.12	0.668	0.389
IR × 10^{-7}	35.4	7.57	4.41

5. 결 론

본 연구에서는 소형차 전용도로에 대한 정량적 위험도 평가기법 개발을 목적으로 소형차 전용터널의 표준 화재시나리오, 화재해석 결과를 반영하는 사망자 수 추정방법과 위험도 평가방법을 제시하였으며, 모델터널에 대해 정량적 위험도 평가기법의 적용성을 평가한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 터널 화재를 차종별(승용차, 소형버스, 소형트럭)로 화재강도에 따라 구분하고 화재확대, 교통상황(정체 및 정상류) 및 제연시스템에 따른 제연효과를 고려할 수 있도록 사건수목(Event tree)기법에 의한 터널화재 시나리오를 제시하였다.
2. 화재사고 발생률은 소방청의 차종별 화재발생 통계 및 교통안전공단의 주행거리계를 인용하여 분석하였으며, 차종별 사고발생률을 0.77 (승용차), 1.52 (소형버스), 2.30 (소형트럭) 건/10^6 Veh.km로 제시하였다.
3. 연장 5 km, 경사도 1%, 단면적 35.7 m^2의 일평균교통량 30,686대/tube인 모델터널을 대상으로 피난연결통로 간격별 사회적 위험도 평가를 수행한 결과, 피난연결통로간격이 200 m일 때 현행 위험도 기준을 만족할 수 있는 것으로 분석되었다.
4. 터널 연장별 적정 피난연결통로 간격을 검토한 결과, 333 m (터널연장: 1.0 km), 285 m (1.0 km), 230 m (3.0 km), 200 m (5.0 km)분석되었다.
5. 모델터널에 대해 제연방식에 따른 위험도를 비교결과, 대배기구방식을 적용하고 제트팬에 의해서 풍속제어를 수행하는 경우, 위험도가 제트팬 방식보다 1/10로 감소하는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Japan Road Association (2002), Road Tunnel Emergency Facility Installation Criteria · Commentary, Tokyo, Japan.
2. Kohl, B., Botschek, K., Hörhan, R. (2006), "Austrian risk analysis for road tunnels development of a new method for the risk assessment of road tunnels", Proceedings of the 3rd International Conference "Tunnel Safety and Ventilation", Graz, pp. 204-211.
3. Korea Transportation Safety Authority (2016), 2016 vehicle mileage statistics, Gimcheon, Korea.
4. Mattias, P. (2002), "Quantitative risk analysis procedure for the fire evacuation of a road tunnel-anillustrative example", Division of Fire Safety Engineering, Lund University, Master's Degree, Sweden.
5. Meng, Q., Xiaobo, Q. (2010), "Quantitative risk assessment model for fire in road tunnels with parameter uncertainty", Proceedings of the 4th International Workshop of Reliable Engineering Computing, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore, pp. 751-764.
6. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2015), Guidelines for installing and managing road tunnel emergency facilities, Sejong, Korea.
7. National Fire Data System (2017), E-Fire statistics, http://www.nfds.go.kr/rdpage.jsf, National Fire Agency.
8. Official Journal of the European Union (2004), "Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the trans-European road network", L201/76, pp. 56-76.
9. Pálsson, I. (2004), Risk management in hvalfjorður tunnel, department of fire safety engineering, Lund University, Sweden.
10. Philippe CASSINI (2010), Brief overview of the DG-QRAM, PIARC, PARIS.
11. PIARC (1995), Road safety in tunnels, PIARC committee on road tunnels, France.
12. Purser (1988), "Toxicity assesment of the combustion products", the SFPE Handbook of Fire protection Eng. National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, USA.
13. Speitel, L.C. (1995), Toxicity assessment of combustion gases and development of a survival model, Federal Aviation Administration, Virginia, USA.
14. Weger, D.D., Kruiskamp, M.M., Hoeksma, J. (2001), "Road tunnel risk assessment in the Netherlands TUNprim: A spreadsheet model for the calculation of the risks in road tunnels", Proceedings of the ESREL 2001, International Conference, Torino, Italy, pp. 16-20.
15. Yoo, J. (2006), "Method and program for the quantitative risk assessment of the road tunnel", Proceedings of the 2006 Ventilation Sector Academic Lecture, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea, pp. 89-103.