

도심부 대심도 터널의 방재시설 설치 기준에 관한 연구 (부산 승학터널 사례를 중심으로)

이수범* · 김정현** · 김정식*** · 김도훈**** · 임준범*****

Lee, Soobeom*, Kim, JeongHyun**, Kim, Jungsik***, Kim, Dohoon****, Lim, Joonbum*****

Installation Standards of Urban Deep Road Tunnel Fire Safety Facilities

ABSTRACT

Road tunnel lengths are increasing. Some 1,300 tunnels with 1,102 km in length had been increased till 2019 from 2010. There are 64 tunnels over 3,000 m in length, with their total length adding up to 276.7 km. Safety facilities in the event of a tunnel fire are critical so as to prevent large-scale casualties. Standards for installing disaster prevention facilities are being proposed based on the guidelines of the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, but they may be limited to deep underground tunnels. This study was undertaken to provide guidelines for the spacing of evacuation connection passages and the widths of evacuation connection doors. Evacuation with various spacing and widths was simulated in regards to evacuation time, which is the measure of safety, using the evacuation analysis simulation software EXODUS Ver.6.3 and the fire/smoke analysis software SMARTFIRE Ver.4.1. Evacuation connection gates with widths of 0.9 m and 1.2 m, and spacings of 150 m to 250 m, were set to every 20 m. In addition, longitudinal slopes of 6 % and 0 % were considered. It was determined to be safe when the evacuation completion time was shorter than the delay diffusion time. According to the simulation results, all occupants could complete evacuation before smoke spread regardless of the width of the evacuation connection door when the longitudinal slope was 6 % and the interval of evacuation connection passage was 150 m. When the evacuation connection passage spacing was 200 m and the evacuation connection gate width was 1.2 m, all occupants could evacuate when the longitudinal slope was 0 %. Due to difference in evacuation speed according to the longitudinal slope, the evacuation time with a 6 % slope was 114 seconds shorter (with the 190 m connection passage) than with a 0 % slope. A shorter spacing of evacuation connection passages may reduce the evacuation time, but this is difficult to implement in practice because of economic and structural limitations. If the width of the evacuation junction is 1.2 m, occupants could evacuate faster than with a 0.9 m width. When the width of a connection door is 1.2 m with appropriate connection passage spacing, it might provide a means to increase economic efficiency and resolve structural limitations while securing evacuation safety.

Key words : Evacuation safety, Evacuation simulation, Cross passage, Cross passage door, Urban deep road tunnel

* 종신회원 · 서울시립대학교 교통공학과 교수, 공학박사 (University of Seoul · mendota@uos.ac.kr)

** 종신회원 · 교신저자 · 한국철도기술연구원 철도정책연구실 실원, 공학박사

(Corresponding Author · Korea Railroad Research Institute · kimjh@krii.re.kr)

*** 정회원 · 서울특별시청 도로계획과 주무관, 공학박사 (Seoul Metropolitan Government · kjungsik@seoul.go.kr)

**** 서울시립대학교 교통공학과 박사수료, 공학석사 (University of Seoul · dhkim@forum8.co.kr)

***** 한국교통안전공단 교통안전연구처 책임연구원, 공학박사 (Korea Transportation Safety Authority · limjb@kotsa.or.kr)

Received September 27, 2021/ revised October 14, 2021/ accepted October 29, 2021

초 록

국내 도로터널은 2010년과 2019년과 비교시 1,300개소, 1,102 km 증가하고 있으며, 연평균 7.6 %씩 증가하고 있는 수치이다. 또한, 도로터널 연장이 3,000 m 이상 되는 장대터널도 64개소, 276.7 km에 달하고 있다. 도로터널은 폐쇄적인 공간적 특성으로 인해 화재사고 발생시 대형 인명피해로 연결될 가능성이 높으므로 안전시설 설치를 고려해야 한다. 현재 국토교통부의 지침을 통하여 방재시설 설치 기준이 제시되고 있으나, 대심도의 특성을 반영하는데 한계가 있는 것으로 사료된다. 본 연구에서는 다양한 피난연결통로의 설치간격과 피난연결문의 폭을 적용한 시뮬레이션을 통하여, 적절한 기준값을 도출하고자 하였다. 안전성의 척도가 되는 피난시간 산정은 피난 분석 시뮬레이션 소프트웨어 building EXODUS Ver.6.3과 화재/연기 분석 소프트웨어 SMARTFIRE Ver.4.1을 활용하였다. 시나리오는 피난연결문 폭 0.9 m, 1.2 m 두 종류와 피난연결통로간격 150~250 m를 20 m간격으로 설정하였다. 또한, 대심도 특성인 경사도를 고려하기 위해서 종단경사 6 %와 0 %를 각각 적용하였다. 피난완료시간이 연기확산시간보다 짧은 경우 “안전”으로 판단하였다. 시뮬레이션 결과 종단경사 6 %인 경우, 피난연결통로 간격이 150 m인 경우에는 피난연결문 너비에 상관없이 연기확산 전에 모든 채실자들이 피난을 완료할 수 있었다. 종단경사 0 %인 경우, 피난연결통로 간격이 200 m이고 피난연결문의 폭이 1.2 m인 경우 모든 채실자가 피난을 완료할 수 있었다. 종단경사에 따른 피난 속도의 차이로 0 % 경사에서는 6 %에 비해 대피시간이 114초(190 m연결통로 기준) 단축되는 것으로 나타났다. 피난연결통로 간격이 짧아질 수록 빠르게 대피할 수 있으나 경제적, 구조적인 문제로 연결통로를 촘촘하게 배치하기는 어렵다. 피난연결문의 폭이 1.2 m로 늘어난다면 0.9 m 폭인 경우와 비교하여 채실자들이 더 빠르게 대피가 가능할 것이다. 연결통로간격을 적정하게 유지하면서 1.2 m폭의 연결문을 적용한다면, 피난 안전을 확보하면서 경제성을 높이고 구조적인 안전까지 해결하는 방법이 될 것이다.

검색어 : 피난안전, 피난 시뮬레이션, 피난연결통로, 피난연결통로문, 도시부 대심도 터널

1. 서론

‘도로터널’은 자동차의 통행을 목적으로 지반을 굴착하여 지하에 건설한 구조물, 개착공법으로 지중에 건설한 구조물(BOX형 지하차도), 기타 특수공법(침매공법 등)으로 하저에 건설한 구조물(침매터널 등)과 지상에 건설한 터널형 방음시설(방음터널)을 포함하여 말한다(MOLIT, 2019a). 우리나라 국내 도로터널 현황을 살펴보면(MOLIT, 2019b), 2019년말 기준으로 2,682개소, 총연장 약 2,077 km로 나타났다. 이는 10년 전인 2010년과 비교시 총 1,300개소, 1,102 km가 증가한 수치이며, 연평균 7.6 %씩 증가하고 있다. 도로터널 연장이 3,000 m 이상되는 장대터널의 경우도 총 64개소, 276.7 km에 달하고 있으며, 강남순환로의 관악터널(4,796 m), 봉천터널(3,230 m)과 같이 도시지역에서도 건설되

고 있다. 특히, 최근 서울시에서는 지상도로의 교통량 저감과 보행자 중심 도로환경 구축으로 패러다임이 전환되면서 도시고속화도로(국회대로, 서부간선도로, 동부간선도로 등)의 지하화를 추진하고 있다. 도시부 간선급 도로의 지하화는 서울특별시 135 km, 부산광역시 95 km 도로가 건설 또는 건설 계획 중에 있다(Seoul Metropolitan Government, 2019).

그러나 이러한 도로터널은 교통안전 측면에서 일반도로에 비해서 위험하다고 알려져 있다. 터널입구 진입시 운전자의 긴장감을 증가시키고, 터널 내의 폐쇄적인 환경과 조도 적응 등의 이유로 교통사고 발생확률이 높고, 사고처리 등의 어려움이 대형사고로 연결될 가능성도 높다(Seo et al., 2012).

최근 5년간(2015~2019년) 교통사고 통계(Table 1)를 보면, 전체 교통사고의 치사율(사망자수/사고건수*100)은 평균 1.8수준

Table 1. Data for Traffic Accidents in the Tunnels and Underground Roads

Classification		2015	2016	2017	2018	2019
Total	# of accidents	232,035	220,917	216,335	217,148	229,600
	Fatal	4,621	4,292	4,185	3,781	3,349
	Fatality rate	1.99	1.94	1.93	1.74	1.46
Tunnel	# of accidents	638	535	725	781	773
	Fatal	32	27	28	18	21
	Fatality rate	5.02	5.05	3.86	2.30	2.72
Under-ground roads	# of accidents	251	227	463	1,763	2,614
	Fatal	10	13	11	53	72
	Fatality rate	3.98	5.73	2.38	3.01	2.75

Source: Traffic Accidents Analysis System (KOROAD, 2020)

이나 터널(3.8)과 지하도로(3.6) 치사율이 2배이상 높은 것으로 나타났다. 특히 지하차도의 경우 2017년까지 10명 수준이었으나 2018년 53명, 2019년 72명으로 급격하게 증가한 것으로 나타났다. 또한 도로터널과 지하도로는 폐쇄적인 공간적 특성으로 인해 화재사고 발생시에는 대형 인명피해로 연결될 가능성이 있다. 2007~2016년 도로터널 내 화재사고는 총 275건이었으며, 발화의 원인은 차량 기계적 요인이 128건(46.5%), 교통사고가 62건(22.5%)으로 나타났다.

이와 같이 도로터널과 지하차도는 교통사고 발생시 치사율이 높고, 화재로 인한 대형사고로 연결될 수 있기 때문에 안전시설 설치를 고려해야 한다. 특히, 도로터널내 화재시 차량 탑승자들이 대피할 수 있는 방재시설 설치를 고려해야 한다. 현재 국토교통부의 「도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침」에서 방재시설 설치 기준을 제시하고 있으나, 최근 건설이 증가하고 있는 대심도의 특성을 반영하는데에는 한계가 있는 것으로 평가된다. 따라서 본 연구의 목적은 기존 지침에서 제시하고 있는 피난방재시설 중 피난연결통로의 설치간격과 피난연결문의 폭에 대한 기준값을 대심도 특성을 고려하여 제시하는 것이다.

2. 선행연구

2.1 국내·외 도로터널 방재시설 설치 기준

「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」에서는 터널연장과 위험도 지수에 따라서 터널등급을 구분하고 있다. 터널연장이 3,000 m이상인 경우와 위험도 지수가 29 초과시에는 1등급으로 구분하고 있다. 위험도 지수는 주행거리계, 진입부 경사도, 입출구 표고차, 터널높이, 터널 곡선반경, 대형차 혼입률, 감시시스템, 유도시스템, 서비스수준, 터널내 합/분류, 교차로/신호등/TG 유무 등의 변수의 위험도를 합산하여 산출한다. 연장과 위험도 지수를 통해서 산정된 터널등급별로 방재시설 설치기준을 제시하고 있다. 피난대피설비 중 피난연결통로는 연장등급 1,2,3등급 터널(500 m이상)은 설치하도록 하고 있으며, 피난연결통로의 설치간격은 연장 500 m이상 터널에서는 250 m, 연장 1,200 m이하 터널에서는 최대 300 m까지로 규정하고 있다. 또한 피난연결통로 설치가 불가능한 터널이면서 3,000 m 이상되는 1등급 터널은 피난대피터널을 설치하도록 하고 있으며, 2등급(1,000 m이상 3,000 m미만), 3등급(500 m이상 1,000 m미만) 터널은 격벽분리형 피난대피통로를 설치하도록 규정하고 있다.

국의 11개 국가 및 협회의 도로터널 방재시설 설치기준을 검토한 결과 노르웨이, 오스트리아, 영국, 일본은 교통량과 터널연장을 고려하여 터널등급을 정하고 터널등급에 따라서 방재시설 설치를 규정하고 있어 우리나라와 유사한 것으로 나타났다. 피난연결통로

의 경우 덴마크, 프랑스, 영국의 경우 500 m미만의 터널에 대해서도 설치하도록 하고 있으며, 스위스, 일본, 우리나라가 500 m이상 터널, 유럽연합은 1,000 m이상 터널에 대해서 설치하도록 규정하고 있다. 피난연결통로의 설치간격은 오스트리아 500 m 간격, 일본, 프랑스가 400 m 간격, 독일, 스위스가 300 m 간격, 노르웨이 250 m 간격, 스웨덴 150~200 m 간격을 두는 것을 제시하고 있다.

2.2 도로터널 안전성 관련 연구

Yoo et al.(2005)은 장대터널의 방재설비를 계획하기 위한 축소 모형실험을 실시하여 터널화재시 연기의 거동 특성 파악과 피난연락개의 설치 간격을 검토하였다. Froude 상수를 기본으로 1/50으로 축하여 20 m 모형 터널을 제작하여 실험하였으며, 터널내 20 MW 화재가 발생하였을 경우 일산화탄소(CO)의 전파 속도와 거리와의 관계를 이용하여 피난연락개의 위치를 검토하였다. 분석결과 화재거리와 일산화탄소 감지시간의 상관식은 CO 감지시간 = $36.60363 + 0.42049$ (화재거리) + 0.00357 (화재거리)²로 제시하였다.

Ryu and Choi(2018)은 전차종이 통과하는 대단면 도로터널의 방재시설 설계에 화재위험을 정량적으로 평가하기 위한 정량적 위험도 평가기법이 성능위주 설계의 일환으로 도입되어 있으나 소형차 전용터널에 대해서는 적용이 어려운 문제를 제기하였다. 따라서 소형차 전용터널에 적합한 화재발생 시나리오를 제시하고, 소형차 전용 도로터널에 대해서 피난연결통로 간격에 따른 위험도 분석과 적용성을 검토하였다. 분석방법은 시나리오별 사망자수와 발생확률을 구하여 사회적 위험도 평가기준과 비교하는 방법을 사용하였다. 소형차 전용터널의 경우 피난연결통로 간격에 따른 연간 사망자수에 대한 예측값을 보면 150 m와 175 m는 차이가 작으나 200 m 이상부터는 급격히 증가하는 것으로 나타나 피난연결통로 간격은 최대 200 m로 제시하였다.

Jin(2019)는 고속도로 터널이 장대화되면서 고속도로 터널 화재의 위험성을 평가하여 위험도 지수를 보완할 필요가 있다고 주장하였다. 기존 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」에서 제시하고 있는 위험도지수는 사고빈도에 대한 요소가 대부분이므로 피해강도에 대한 요소를 위험도 지수에 반영할 필요가 있다고 하였다. 화재시 초기 대응시간이 화재 강도에 중요한 변수이므로 화재대응여건의 차이를 위험도 지수에 포함시키는 것을 제안하였다. 자체 소방대 유무와 인근 소방센터 도착시간에 따라서 위험도지수를 산출하여 제시하였다.

Hao and Yuan(2009)은 지하도로 화재시 피난에 대한 연구를 수행하였다. 화재위험등급 1~5등급 중 2등급을 기준으로 방재시설을 설계한다고 가정하여 피난연결통로 거리의 최적값을 시뮬레이

선으로 도출하였다. 화재속도가 3 m/s 일 때, 연결통로 간격은 100 m 미만이어야 피난에 성공할 수 있다고 주장하였다.

3. 방법론

3.1 실험방법

본 연구의 목적인 도로터널에서의 방재시설 설치기준 도출을 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. 기존 방재시설 설치 기준 연구와 같이 화재상황에 대해서 현장실험이 어려워 경제적, 도덕적으로 가장 적합한 방법인 시뮬레이션 방법을 이용하였다. 현실에서의 피난행동은 배치(configuration), 순서(procedure), 환경(environment), 행동(behaviour)의 4가지 요소가 복합적으로 작용하여 피난 효율에 영향을 미치므로, 이 4가지 요소를 모두 고려해야 한다 (Gwynne et al., 1998). 시뮬레이션 기법은 위의 4가지 요소를 현실과 완전히 똑같이 재현하기엔 한계가 있으나 최근의 시뮬레이션 소프트웨어로는 최대한 반영할 수 있다. 본 연구의 시뮬레이션은 화재상황에 대한 유체역학적 특성등을 해석하는 화재 시뮬레이션과 보행자의 피난에 대한 시뮬레이션 2가지를 수행하였다.

3.1.1 시뮬레이션 맵구축

본 연구는 현재 부산시에서 운영중인 승학터널(대심도)의 설계도면을 참고하여 구축하였다. 가상현실 소프트웨어 UC-win/Road를 이용하여 피난 시뮬레이션을 위한 도로 맵을 구축하였다. 승학터널은 부산광역시 사상구 엄궁동을 시점으로 부산광역시 중구 중앙동(충장대로)를 종점으로 하는 총 연장 7.69 km 왕복 4차로, 설계속도 80 km/h의 대심도 터널이다(Fig. 1). 대심도 터널에서 진출하는 도로의 중단경사는 6.4 %이며, 터널단면은 시설한계고 4.5 m,

내부단면적 69 m², 굴착단면적 86 m²로 구성되어 있다.

3.1.2 화재시뮬레이션

화재시뮬레이션은 과거 실험에 의한 경험식과 간단한 이론으로만 표현 가능한 것들로만 수행하였으나, 최근에는 화재현상을 유체역학, 화재역학, 열 및 물질전달, 연소공학 등을 복합적으로 고려한 접근방법들이 시도되고 있다. 특히, 화재의 움직임을 나타내는 운동량, 질량, 에너지 및 화학종 보존 방정식의 해를 직접 구함으로써 시-공간에 관하여 구체적인 해석이 가능한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD)이 적용되고 있다. 본 연구의 화재시뮬레이션 소프트웨어는 CFD에 근거한 SMARTFIRE를 이용하였다.

SMARTFIRE는 공간 내의 연소범위를 예측하고, 그 결과를 피난 시뮬레이션 소프트웨어인 building EXODUS와 연계가 가능한 것이 장점이다.

3.1.3 피난시뮬레이션

현재 국내 외에서 화재상황에서의 피난 시뮬레이션 방법은 널리 활용되고 있다. 시뮬레이션이 현실을 100 % 반영하기는 어려우나 소프트웨어 기술이 발전됨에 따라 인간의 신체적 특성, 심리적 특성 등이 적용할 수 있어 그 정확성이 날로 높아지고 있다. 소프트웨어 기술의 발전과 더불어 보행속도, 군집보행, 반응시간, 바닥을 기는 행동 등과 같은 인간의 행동특성 등이 다양한 실험을 통해서 연구되어 소프트웨어에 반영할 수 있어 활용범위가 점점 넓어지고 있다. 특히, MOLIT(2019a)의 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」과 부산광역시의 「소방시설 등의 성능위주설계 평가 가이드라인」 등에서 피난 시뮬레이션을 이용한 결과를 토대로 터널 등의

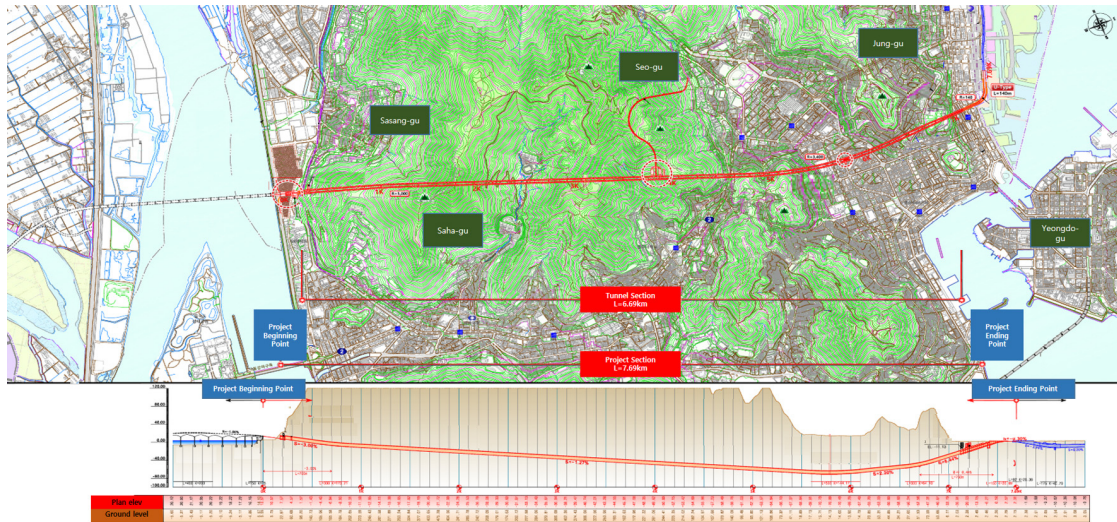


Fig. 1. Route Map of the Experimental Section (Seunghak Tunnel)

방재시설물 설치에 대한 설계를 권고하고 있다. 본 연구에서는 화재로 인한 독성가스 등 화재시뮬레이션과 연동이 가능하고, 공간 표현을 격자로 하고 피난자의 피난행동은 확률기반으로 하는 building EXODUS 소프트웨어를 이용하였다.

3.2 실험계획

3.2.1 인자결정

실험계획법(Design of Experiments)에 따라 실험목적 달성을 위한 지표인 특성치(characteristics)를 설정하고, 특성치에 영향을 미치는 인자와 인자수준을 결정하였다. 본 시뮬레이션 실험의 목적은 도로터널의 피난연결통로 간격과 피난문 너비를 산출하는 것이다. 이 실험 목적 달성을 위해 고려해야 하는 지표는 화재시 연기확산 시간(Available Safety Egress Time, ASET)과 피난자의 피난완료시간(Required Safety Egress Time, RSET)으로 선정할 수 있다. 즉, 피난연결통로 간격과 피난문 폭의 조합별 시나리오로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 연기확산시간 보다 피난완료시간이 짧은 시나리오는 안전한 것으로 판정하였다.

본 시뮬레이션 실험의 인자는 기존 화재 및 피난 시뮬레이션 연구사례들을 참고하여 도로터널 화재발생시 재설자들이 도로터널 밖으로 피난을 모두 완료하는 시간(RSET)과 연기확산시간(ASET)에 영향을 미치는 변수들을 선정하였다. 피난완료시간(RSET)에 영향을 미치는 인자는 보행속도, 고령자 비율, 차량 탑승자수, 반응시간, 피난연결통로 설치간격, 피난연결문의 폭으로 선정하였으며, 연기확산시간(ASET)에 영향을 미치는 인자는 화재강도, 최대화재강도 도달시간, 외풍 여부로 선정하였다.

3.2.2 시나리오

실험에서 인자들의 속성값은 최악의 상황을 가정하여 정하였으며, 본 연구의 목적인 피난연결통로 간격과 피난문 폭에 대해서만

시나리오를 구성하였다. 앞서 선정한 인자들 중 재차인원, 화재강도, 최대화재강도 도달시간, 외풍은 기존 화재 및 피난시뮬레이션 연구에서 최악의 시나리오로 가정하고 사용한 값을 적용하여 Table 2와 같이 설정하였다.

재차인원은 소형차 4명, 중형차 10명, 대형차 40명으로 설정하고, 차종별 교통량 비율은 80:10:10으로 설정하였다. 화재강도는 MOLIT(2019a)의 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」에서 제시하고 있는 화물차의 화재강도 30~50 MW의 중앙값인 40 MW를 사용하였다. 최대화재강도 도달시간과 외풍은 최악의 상황을 고려하여 450초, 외풍없음(제트팬 고장)으로 설정하였다.

고령자 비율(만 65세이상)은 통계청 예측자료에 의해 2030년 25 %를 적용하였다. 연령별 보행속도는 비고령자와 고령자, 평지와 경사도로에서의 보행자의 속도를 제시한 기존 연구를 참고하였다. 국내연구 중 비고령자가 평지를 걷는 보행속도는 Seo et al.(2010) 등이 군집밀도 1.0인/m² 인 경우 군집보행속도는 0.79 m/s로 제시하였으며, Bae et al.(2014)은 연기가 있는 경우 군집보행속도가 0.78 m/s로 제시하였다. 최진승은 비고령자가 평지에서 1.44 m/s, 경사로에서는 40 % 감소한 0.84 m/s로 제시하였고, 고령자는 평지에서 0.99 m/s, 경사로에서 0.67 m/s의 보행속도를 제시하였다. Lee et al.(2015)은 비고령자는 1.11 m/s, 고령자는 0.78 m/s의 보행속도를 제시하였다. 본 연구에서는 국내 가장 유사한 환경을 고려하여 비고령자는 1.1 m/s로 보행속도를 설정하였다. 고령자의 경우 평지에서 비고령자에 비해 30~50 % 정도 보행속도가 느려지는 것으로 나타났으나, 피난이라는 특수상황을 감안하여 0.9 m/s로 설정하였다. 경사로의 경우에는 비고령자의 경우 편차가 크지만 고령자의 경우 약 25~30 %정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 진출입부(6 %경사도)에서 비고령자는 0.9~1.0 m/s를 랜덤하게 분포하였으며, 고령자의 경우 0.5~0.6 m/s속도를 랜덤하게 분포시켰다. 연령과 보행속도의 관계가 명확하게 규명된 자료가 없어

Table 2. Simulation Scenario Details

Factors		Level	Specifications
Required safety egress time (RSET) factors	Walking speed	random	• where, vertical grade 6 %; general people 0.9~1.0 m/s; older people 0.5~0.6 m/s • where, vertical grade 0 %; general people 1.1 m/s; older people 0.9 m/s
	Older ratio	1	• 25 % (domestic standard in 2030)
	# of passengers	1	• passenger car 41 vehicles * 4people + van 7 vehicles * 10people + bus 7 vehicles * 40 people = 514 people
	Reaction time	1	• 60 sec
	Cross passage intervals	6	• 150 m, 170 m, 190 m, 210 m, 230 m, 250 m
	Width of cross passage door	2	• 0.9 m, 1.2 m
Available safety egress time (ASET) factors	Power of fire	1	• average power of fire involving a truck: 40 MW
	Time of max power of fire	1	• 450 sec (setting to Ultra-Fast for worst-case scenario)
	Draft	1	• no natural wind, for worst scenario, jet fan breakdown

기존 연구를 바탕으로 최대한 본 연구의 시뮬레이션 환경에 맞는 보행속도를 가정하여 반영하였다.

피난자의 반응시간은 화재가 발생하였음을 인지하고, 피난을 시작하는데 까지 걸리는 시간을 의미한다. 국토교통부 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」에서 반응시간은 감지시간과 대피결정 시간으로 나누는데 감지시간을 자동화재탐지설비 감지성능 판단기준인 1분을 준용하고 있다. 대피결정시간은 정확한 기술자료가 없으나 대피자의 행동특성 및 이에 따른 확률분포를 적용할 것을 권장하고 있습니다. 또한 피난자의 반응시간에 대해 현장실험한 값을 60초로 제시한 연구(Porzycki et al., 2018)를 근거로 60초로 설정하였다.

피난연결통로 간격이 맵 구축 연장과 동일하도록 하여 피난연결통로 간격과 맵 구축 길이는 동일하게 하였다. 이 구간내에서 교통밀도가 가장 높은 상태인 통행속도 10 km/h의 교통정체 상황에서 교통량을 계산하여 배치하였고, 차종별 재차인원과 차종별 교통량

비율을 고려하여 피난자수를 산출하였다. 피난연결통로의 최대간격인 250 m 구간을 예를들면, 승용차 41대, 중형차 7대, 버스 7대 총 55대를 배치하였으며, 차종별 최대 재차인원인 4명, 10명, 40명의 재차인원을 곱하여 총 피난자 514명을 배치하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 화재시뮬레이션 결과

SMARTFIRE 소프트웨어를 이용하여 최대 화재강도 도달시간은 450초로 가정하고, 최악의 상황을 가정하여 Ultra-Fast로 설정하여 화재시뮬레이션 한 결과는 Fig. 2와 같으며, 최대 화재 열에너지는 40,000 KW로 나타났다. 화재강도 40 MW일 때, 일산화탄소(CO)농도 1,000 ppm을 기준으로 최대 연기발생량을 산출한 결과 0.100592 kg/s로 나타났으며, 총연기량은 15.218 kg으로 나타났다. 연기확산 위치는 연기기준용량(1,000 mg/l)에 연기발생량

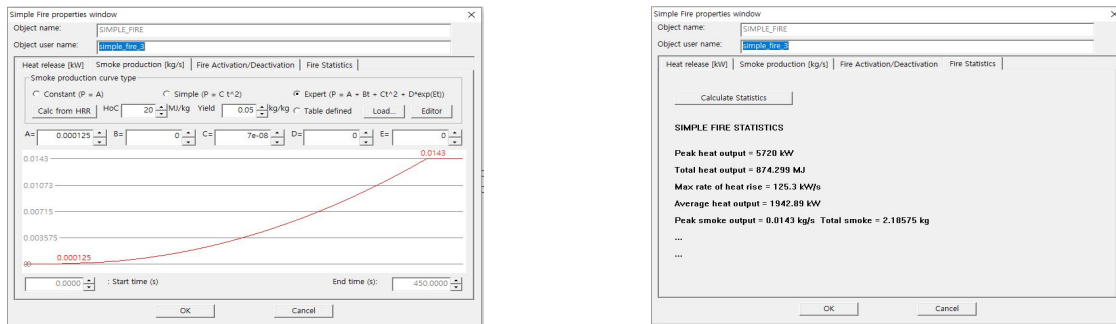


Fig. 2. Statistical Results on SMARTFIRE

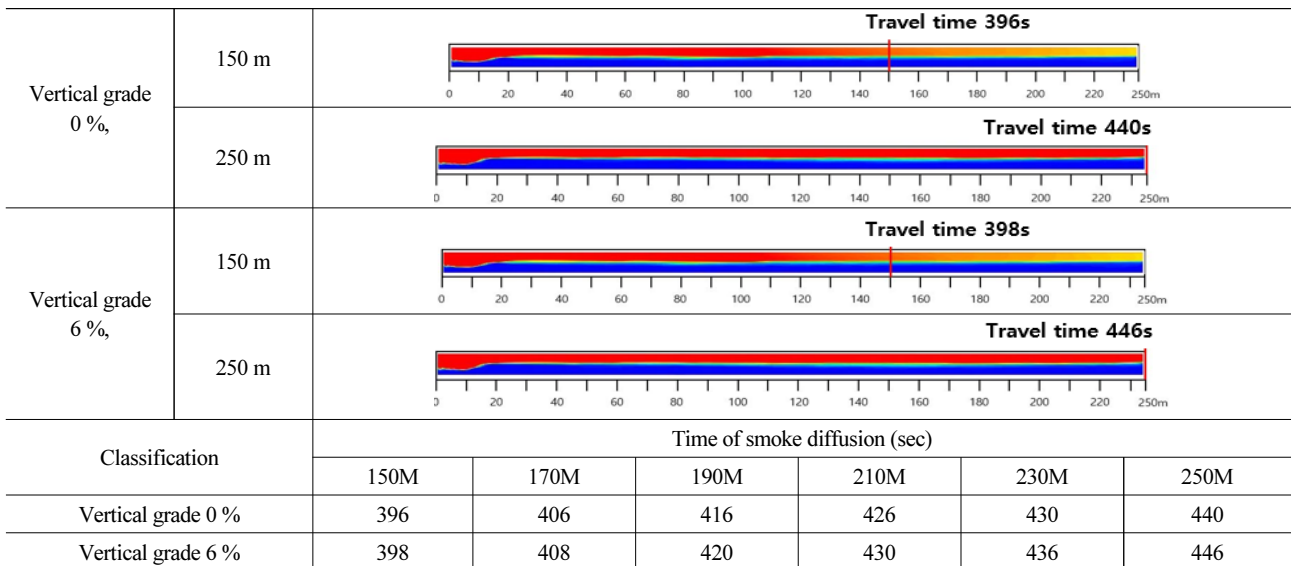


Fig. 3. Simulation Results of Smoke Diffusion Scenarios

(0.100592 kg/s)을 곱한 0.00100592 kg/s의 위치이다.

연기확산거리가 피난연결통로 간격과 같아지는 지점까지의 연기확산시간을 시뮬레이션을 통해 분석한 결과는 Fig. 3과 같이 나타났다. 종단경사가 0 %인 본선부에서 연기확산시간은 발화지점부터 150 m 지점까지는 396초로 분석되었으며, 250 m 지점까지는 440초로 분석되었다. 종단경사 6 %인 진출 입부에서 연기확산시간은 발화지점부터 150 m 지점까지는 398초, 250 m 지점까지는 446초로 분석되었다.

4.2 피난시뮬레이션 결과

피난시뮬레이션의 경우 마지막 피난자가 피난에 성공한 시점을 피난완료시간으로 산출하였다. 대피 안전성 분석은 피난완료시간이 연기확산시간보다 긴 경우 피난자가 연기를 마신 상황이므로 “위험”으로 판단하고, 피난완료시간이 연기확산시간보다 짧은 경우는 “안전”으로 판단하였다. 시뮬레이션 결과로 도출된 피난완료시간, 연기확산시간 등의 수치는 절대적인 의미를 갖는다기 보다는 동일한 상황에서 시뮬레이션을 수행한 결과이므로 시나리오별 상대적인 비교에 의한 해석의 의미라고 할 수 있다.

먼저 종단경사 6 %인 진출입부 구간에서 피난 시뮬레이션 결과는 Table 3과 같으며, 피난연결문 폭이 0.9 m-피난연결통로 간격 250 m 일 때, 지체시간 55.6초, 피난완료시간 645초로 나타났다. 피난연결문 폭 0.9 m-피난연결통로 간격이 150 m일 때 지체시간 33.5초, 피난완료시간 341초로 나타나 지체시간은 약 22초, 피난완

료시간은 약 304초의 차이를 보였다. 피난연결문 폭 1.2 m-피난연결통로 간격 250 m인 경우 지체시간 37.4초, 피난완료시간 637초로 나타났으며, 피난연결통로 간격이 150 m인 경우 지체시간 15.4초, 피난완료시간 325초로 나타나 지체시간 약 20초, 피난완료시간 약 312초의 차이를 보였다. 피난연결문의 폭이 1.2 m일 때 모든 피난연결통로 간격에서 지체시간과 피난완료시간은 정도의 차이는 있지만 피난연결문의 폭이 0.9 m일 때 보다 작은 것으로 나타났다. 앞서 화재시뮬레이션 결과 연기확산시간은 연기확산거리가 250 m일 때 446초, 연기확산거리가 150 m일 때는 398초이다. 피난연결통로 간격이 150 m인 경우에는 피난연결문 너비에 상관없이 모두 피난완료시간이 연기확산시간 보다 작아 안전한 것으로 판단되었다. 피난연결통로 간격이 170 m를 넘는 시나리오에서는 피난연결문의 너비에 상관없이 모두 피난완료시간이 연기확산시간보다 길어 위험한 것으로 판단되었다.

두 번째로 종단경사 0 %인 본선부 구간의 피난 시뮬레이션 결과는 Table 4와 같으며, 피난연결문의 너비가 0.9 m일 경우 피난연결통로 간격 250 m에서 지체시간 81.6초, 피난완료시간 586초로 나타났으며, 피난연결통로 간격 150 m에서 지체시간은 44.3초, 피난완료시간 260초로 나타나 지체시간은 약 37초, 피난완료시간은 326초의 차이를 보였다. 차단문 유효폭 1.2 m일 경우에는 피난연결통로 간격 250 m에서 지체시간 44.1초, 피난완료시간 545초로 나타났으며, 피난연결통로 간격 150 m에서 지체시간 19.7초, 피난완료시간 227초로 나타나 지체시간은 약 24초, 피난완

Table 3. Results of Simulation (Vertical Grade 6 %)

Classification	250 m-0.9 m	250 m-1.2 m	230 m-0.9 m	230 m-1.2 m	210 m-0.9 m	210 m-1.2 m	190 m-0.9 m	190 m-1.2 m	170 m-0.9 m	170 m-1.2 m	150 m-0.9 m	150 m-1.2 m
Delay time (sec)	55.6	37.4	53.1	32.8	54.8	30.3	56.7	27.1	35.0	18.7	33.5	15.4
Evacuation time (sec)	645	637	599	590	551	543	482	469	442	437	341	323
Smoke diffusion time (sec)	446	446	436	436	430	430	420	420	408	408	398	398
Total result	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	safe	safe

Results graphs

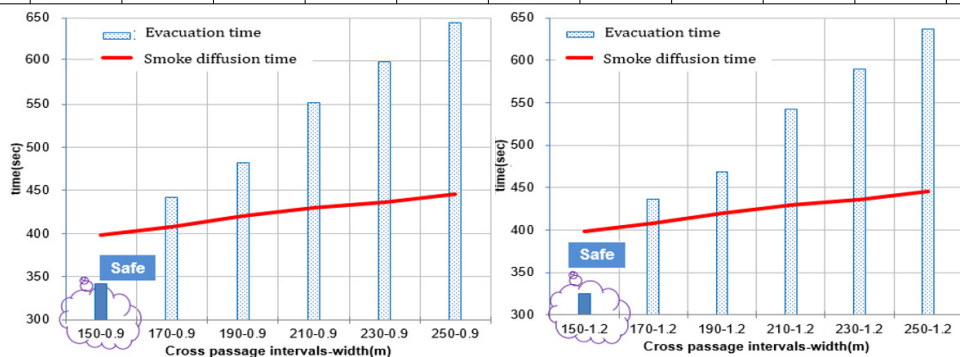


Table 4. Results of Simulation (Vertical Grade 0 %)

Classification	250 m-0.9 m	250 m-1.2 m	230 m-0.9 m	230 m-1.2 m	210 m-0.9 m	210 m-1.2 m	190 m-0.9 m	190 m-1.2 m	170 m-0.9 m	170 m-1.2 m	150 m-0.9 m	150 m-1.2 m
Delay time (sec)	81.6	44.1	78.1	39.8	71.2	35.2	73.5	34.2	47.5	22.2	44.3	19.6
Evacuation time (sec)	586	545	536	514	455	445	368	353	327	314	260	226
Time of smoke diffusion (sec)	440	440	430	430	426	426	416	416	406	406	396	396
Total result	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	safe	safe	safe	safe	safe	safe

Results graphs	Evacuation time and Smoke diffusion time vs. Cross passage intervals-width(m)						Evacuation time and Smoke diffusion time vs. Cross passage intervals-width(m)					
	150-0.9	170-0.9	190-0.9	210-0.9	230-0.9	250-0.9	150-1.2	170-1.2	190-1.2	210-1.2	230-1.2	250-1.2

Table 5. Results of Additional Simulation in Border Section (Vertical Grade 6 %)

Classification	Delay time (sec)	Evacuation time (sec)	Distance of smoke diffusion (m)	Time of smoke diffusion (sec)	Result
160 m_0.9 m	19.0	417	160	403	unsafe
160 m_1.2 m	13.9	381	160	403	safe

료시간은 318초의 차이를 보였다. 차단문 유효폭 1.2 m일 때 모든 피난연결통로 간격에서의 지체시간과 피난완료시간은 정도의 차이는 있지만 피난연결문의 너비가 0.9 m 일 때보다 작은 것으로 나타났다. 앞서 분석된 종단경사 0 %인 본선부 구간의 연기확산거리 250 m 일 때 440초, 연기확산거리 150 m일 때 396초이다. 피난연결통로 간격이 190 m를 초과하는 시나리오에서는 피난연결문 너비와 관계없이 모두 피난완료시간보다 길어 위험한 것으로 나타났다.

시나리오는 피난연결통로 간격을 20 m씩 구분하였기 때문에 추가적으로 “안전”과 “위험”의 경계치에 있는 피난연결통로 간격에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 종단경사 6 %의 진출입부는 160 m 간격, 경사 0 %의 본선부에서는 200 m 간격에 대해서 추가로 시뮬레이션 하였다. 그 결과 종단경사 6 %의 진출입부는 피난연결통로 간격 160 m_차단문 유효폭 1.2 m인 경우, 종단경사 0 %의 본선부는 피난연결통로 간격 200 m_차단문 유효폭 1.2 m가 안전한 것으로 분석되었다.

4.3 통계 검정결과

일반 터널의 진출입부(종단경사 6 %) 구간에서 대피 안전성 분석결과, 피난연결통로 간격 170 m_차단문 유효폭 1.2 m 이상일

때는 “위험”으로 판단되었고, 피난연결통로 간격 150 m_차단문 유효폭 1.2 m 이하는 “안전”으로 판단되었다. 피난연결통로 간격 150 m와 170 m의 경계구간인 160 m에서 추가로 시뮬레이션한 결과는 Table 5와 같다. 차단문 유효폭이 1.2 m인 경우는 “안전”, 차단문 유효폭이 0.9 m인 경우는 “위험”으로 판단되어, 피난연결통로 간격 150 m_차단문 유효폭 0.9 m와 피난연결통로 간격 160 m_차단문 유효폭 1.2 m를 기준으로 하여 피난완료시간이 시나리오간 통계적 차이가 있는지 검증하였다.

통계적 검정 방법은 Shapiro-Wilk 검정을 통해 정규성을 검증한 결과 유의확률이 유의수준 0.05보다 작아 정규성을 따르지 않는 것으로 나타나 이때 사용할 수 있는 비모수검정 방법을 사용하였다. 비모수검정 방법 중 2개 집단씩 쌍대비교시 사용하는 Mann-Witney 검정을 사용하였다.

통계적 검정결과는 Table 6과 같으며, 피난연결통로 간격 150 m_차단문 유효폭 0.9 m를 기준으로 했을 때 위험으로 분석된 160 m_0.9 m, 170 m_1.2 m와 안전으로 분석된 160_1.2 m는 피난자들의 피난완료시간이 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 피난연결통로 간격 160 m_차단문 유효폭 1.2 m를 기준으로 했을 때는 170 m_0.9 m, 190 m_0.9 m, 190 m_1.2 m는 피난자들의 피난완료시간이 통계적으로 유의한 차이를 보였으

Table 6. Results of Statistically Significant Difference (Vertical Grade 6 %)

Classification	190 m-0.9 m	190 m-1.2 m	170 m-0.9 m	170 m-1.2 m	160 m-0.9 m	160 m-1.2 m	150 m-0.9 m	150 m-1.2 m
Result	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	unsafe	safe	safe	safe
base 150 m_0.9 m	sig. difference	sig. difference	sig. difference	no sig. difference	no sig. difference	no sig. difference	base	-
base 160 m_1.2 m	sig. difference	sig. difference	sig. difference	no sig. difference	no sig. difference	base	-	-

Table 7. Results of Additional Simulation in Border Section (Vertical Grade 0 %)

Classification	Delay time (sec)	Evacuation time (sec)	Distance of smoke diffusion (m)	Time of smoke diffusion (sec)	Result
200 m_0.9 m	47.9	434	200	421	unsafe
200 m_1.2 m	26.7	418	200	421	safe

Table 8. Results of Statistically Significant Difference (Vertical Grade 0 %)

Classification	210 m_0.9 m	210 m_1.2 m	200 m_0.9 m	200 m_1.2 m	190 m_0.9 m	190 m_1.2 m
Result	unsafe	unsafe	unsafe	safe	safe	safe
base 190 m_0.9 m	sig. difference	no sig. difference	no sig. difference	no sig. difference	base	-
base 200 m_1.2 m	sig. difference	no sig. difference	sig. difference	base	-	-

며, 170 m_1.2 m와 160 m_0.9 m는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 결론적으로 피난연결통로 간격 150 m_차단문 유효폭 0.9 m를 설치기준으로 권장하나, 경제성이나 교통특성 등을 고려하여 피난연결통로 간격 170 m_차단문 유효폭 1.2 m 또는 피난연결통로 간격 160 m_차단문 유효폭 0.9 m까지 확대 적용할 수 있다.

일반 터널의 본선부(중단경사 0 %)에서 대피 안전성 분석결과, 피난연결통로 간격 210 m_차단문 유효폭 1.2 m 이상일 때는 “위험”으로 판단되었고, 피난연결통로 간격 190 m_차단문 유효폭 1.2 m 이하는 “안전”으로 판단되었다. 피난연결통로 간격 190 m와 210 m의 경계구간인 200 m에서 추가로 시뮬레이션한 결과는 Table 7과 같다. 차단문 유효폭이 1.2 m인 경우는 “안전”, 차단문 유효폭이 0.9 m인 경우는 “위험”으로 판단되어, 피난연결통로 간격 190 m_차단문 유효폭 0.9 m와 피난연결통로 간격 200 m_차단문 유효폭 1.2 m를 기준으로 하여 피난완료시간이 시나리오간 통계적 차이가 있는지 검증하였다.

통계적 검증결과는 Table 8과 같으며, 피난연결통로 간격 190 m_차단문 유효폭 0.9 m를 기준으로 했을 때 210 m_0.9 m는 피난자들의 피난완료시간이 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 210 m_1.2 m, 200 m_0.9 m와 200 m_1.2 m는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 피난연결통로 간격 200 m_차단문 유효폭 1.2 m를 기준으로 했을 때는 200 m_0.9 m,

210 m_0.9 m는 피난자들의 피난완료시간이 통계적으로 유의한 차이를 보였으며, 210 m_1.2 m는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

결론적으로 피난연결통로 간격 190 m_차단문 유효폭 0.9 m를 설치기준으로 권장하나, 경제성이나 교통특성 등을 고려하여 피난연결통로 간격 210 m_차단문 유효폭 1.2 m까지 확대 적용할 수 있다.

5. 결론 및 한계점

피난연결통로 간격이 짧을수록 빠르게 대피할 수 있으나 경제적, 구조적인 문제로 연결통로를 촘촘하게 배치하기는 어렵다. 피난연결문의 폭이 1.2 m로 늘어난다면 0.9 m 폭인 경우와 비교하여 재실자들이 더 빠르게 대피가 가능할 것이다. 연결통로간격을 적정하게 유지하면서 1.2 m폭의 연결문을 적용한다면, 피난 안전을 확보하면서 경제성을 높이고 구조적인 안전까지 해결하는 방법이 될 것이다.

대심도터널의 경사도를 다양하게 적용하고, 터널 내 사고지점을 여러 곳으로 가정하여 시뮬레이션하여 다양한 상황을 예측해보지 못하였다. 그리고, 최근 차량들의 동력원이 전기, 수소 등으로 확장되고 있어 기존의 휘발유, 경유 차량들의 화재 특성과는 다를 것으로 예상된다. 추후 연구에서는 전기차, 수소차의 화재 강도나 화재

지속시간 등의 특성이 고려된 연기발생 분석 시뮬레이션이 결합된 다면 보다 다양한 상황을 예측해 볼 수 있을 것이다. 또한, 화재 시뮬레이션 분석에서 단일 차량의 화재로 설정하였으므로, 모든 터널사고의 화재 상황을 대변하기는 어렵다고 할 수 있다. 복합 추돌과 여러 차량의 화재 발생 상황이나 화재강도별 연기발생 예측시나리오 등은 시간적으로 부족함이 있어 다양한 화재 시나리오를 시뮬레이션하지 못한 점은 본 연구의 한계로 남는다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

References

- Bae, Y. H., Lee, S. H., Choi, J. H. and Hong, W. H. (2014). "Analysis of crowd walking speed according to smoke during underground space evacuation," *2014 Spring Conference, Architectural Institute of Korea*, pp. 215-216 (in Korean).
- Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M. and Lawrence, P. J. (1998). "Investigation of the aspects of occupant behavior required for evacuation modelling." *Journal of Applied Fire Science*, Vol. 8, No. 1, pp. 19-59.
- Hao, S. Q. and Yuan, Y. (2009). "Fire evacuation of underground tunnel based building EXODUS." *2009 World Congress on Computer Science and Information Engineering*, San Francisco, USA., Vol. 7, pp. 612-615.
- Jin, K. (2019). *A study on the improvements of risk index through the analysis of large road tunnel fire*, M.S. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea (in Korean).
- KOROAD (2020). *Traffic accident analysis system*, Available at: taas.koroad.or.kr (Accessed: April 1, 2020).
- Lee, S. H., Goo, S. H., Chun, Y. W. and Park, Y. J. (2015). "The spatial location analysis of disaster evacuation shelter for considering resistance of road slope and difference of walking speed by age-case study of seoul." *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, KSIS, Vol. 23, No. 2, pp. 69-77 (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019a). *Road tunnel disaster prevention facility installation and management guidelines* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2019b). *Road bridge and tunnel status information system*, Available at: <https://bti.kict.re.kr/bti/> (Accessed: April 1, 2020).
- Porzycki, J., Schmidt-Polończyk, N. and Wąs, J. (2018). "Pedestrian behavior during evacuation from road tunnel in smoke condition - Empirical results." *PLoS ONE*, Vol. 13, No. 8, pp. 1-20.
- Ryu, J. O. and Choi, P. G. (2018). "A study on the development and applicability of fire risk assessment method for small road tunnels passing only small cars." *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 6, pp. 917-930 (in Korean).
- Seo, D. G., Hwang, E. K. and Kwon, Y. J. (2010). "An investigation study on the walking speed of crowd for egress safety of PBD." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 26 No. 12, pp. 99-106 (in Korean).
- Seo, I. K., Park, J. J., Ahn, B. H. and Lee, J. Y. (2012). "A study on the traffic accident characteristics analysis in expressway longitudinal tunnel using a logit model." *KSCE Journal of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 32, No. 6D, pp. 549-556 (in Korean).
- Seoul Metropolitan Government (2019). *Seoul metropolitan road construction and management plan final report (2021~2030)* (in Korean).
- Yoo, Y. H., Yoon, C. H., Yoon, S. W. and Kim, J. (2005). "Experimental study on the interval of emergency exits in long traffic tunnels, tunnel and underground space." *Korean Society for Rock Mechanics and Rock Engineering*, KSRM, Vol. 15, No. 1, pp. 61-70 (in Korean).