

도시지역 네트워크형 지하도로의 환기방재대책



김남영
㈜삼보기술단 기전부
부사장



조종복
㈜삼보기술단 기전부
부장

1. 서론

우리나라의 자동차용 지하도로는 산지 환경보호와 통과거리 단축을 위해 간선도로망에 건설되는 산악터널이 주를 이루었으나, 최근에는 도시가 확장됨에 따라 증가되는 교통수요의 분산과 지상도로 축소를 통해 녹지를 확대하고자 하는 도시환경 개선 욕구를 만족시키기 위해 대도시지역에 지하도로가 건설되고 있다. 도시지역 지하도로는 도심을 통과하기 위해 길이가 길며, 토지보상비를 줄이고 지하의 장애물들을 피하기 위해 깊은 심도로 건설된다. 다수의 지하도로가 교차하거나 진출입로(IC : Inter Change)가 설치되어 외부 도로와 Network식으로 연결된다(그림 1, 그림 2). 따라서 장대화된 Network형 지하도로를 통과하기 위해 장시간 운전에 따른 집중력 저하와 진출입로를 이용하기 위한 교통류의 엇갈림(Weaving)에 의한 사고의 위험성이 상존한다.

본고에서는 도시지역 Network형 지하도로의 환기 및 방재 시설에 대한 경제성과 안전성을 확보하기 위한 대책을 소개하고자 한다.

2. 도시지역의 지하도로 현황

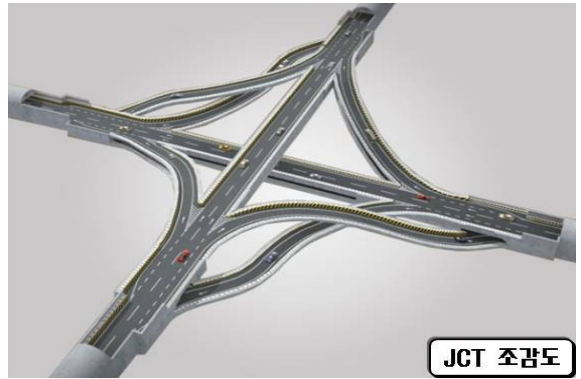
2.1 개요

‘도시지역 지하도로’란 과밀화된 도시의 재정비와 교통량 제어를 목적으로 도시지역에 건설되는 지하도로로 정의할 수 있는데, 도시기능의 효율화와 도시환경의 쾌적화, 교통소통의 원활화를 목적으로 건설이 추진되고 있다. 도시지역 지하도로는 산악터널에 비해 안전 측면에서 다음과 같은 특성을 갖는다.¹⁾

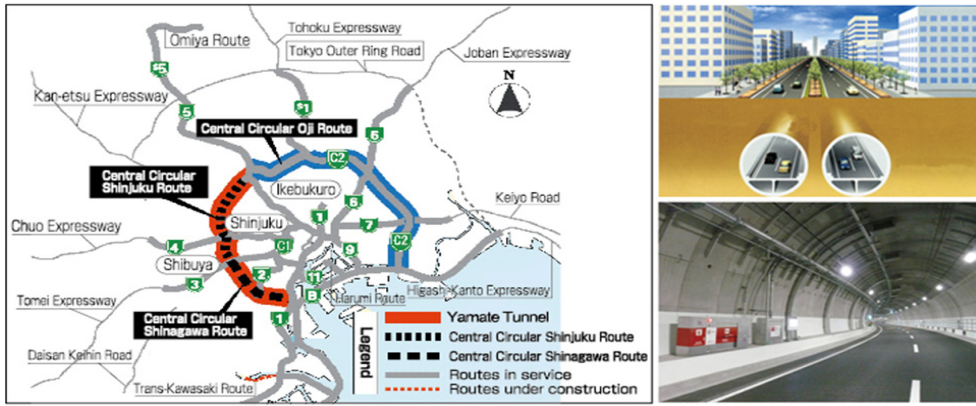
- 도시지역 지하도로는 연장이 길며 경제성을 고려하



〈그림 1〉 지하도로진출입부(Interchange)



〈그림 2〉 지하도로간 교차로(Juction)



〈그림 3〉 야마테 터널(yamate tunnel)

여 한계심도(限界深度) 이하에 건설된다.

- 네트워크화된 도로망 구조를 갖게 되므로 분기부, 합류부, 교차로 등의 취약구간이 발생한다.
- 입출구 보다 중앙부가 낮은 U자형 도로구조로 침수 우려가 있다.
- 외부 교통 정체에 의해 지하도로 내부에 차량이 정체할 수 있어 화재시 제연(制燃 : smoke control) 대책이 필요하다.
- 장시간 운전에 따른 주의력 개선을 위한 조명 및 안전 대책이 필요하다.

2.2 해외 사례

일본의 야마테 터널은 18.2km로 세계에서 가장 긴 도심지의 Network형 지하도로다(그림 3). 도쿄의 수도고속도로(首都高速道路) 중앙환상선(中央環狀線) 구간에 있고, IC에 의해 진출입이 가능하며 2015년 3월에 개통되었다.

프랑스 파리의 A86 도로는 소형차 전용 복층 지하도로로 연장은 10km이며 진출입로가 있다(그림 4).

스페인 수도 마드리드의 도심을 순환하는 M30은 4개의 지하도로로 구성되어 있으며, 그중 가장 긴 지하도로는 만사나레스 강변 지하도로로 연장이 12.5km이다.

당초 M30은 대부분 지상도로였으나, 마드리드가 팽창



〈그림 4〉 A86 순환로 노선



〈그림 5〉 SMART 터널의 진출입 시설



〈그림 6〉 서울 지하도로 계획



〈그림 7〉 부산 지하 고속도로 계획

하면서 M30 안쪽과 바깥쪽이 단절되어 발전이 저해되고 환경오염 문제가 심각하였다. 경부고속도로로 인해 강남권이 단절된 서울과 비슷한 상황이었다.

마드리드는 M30 고속도로의 지하화 필요성을 절감하고 2004년 9월에 착공하여 2007년에 준공하였다.

말레이시아 쿠알라룸푸르의 SMART(Storm Water Tunnel) 지하도로는 총 연장 12.7km이며, 홍수로 인한 도시의 침수를 예방하기 위한 배수 터널²⁾이 9.7km이고, 중간의 3.0km는 단면이 3개층으로 차량용 2개층과 수로(水路)용 1개층으로 사용되는 지하도로이다(그림 5).

2.3 국내 사례

시공중인 제물포 지하도로는 연장이 7.3km이며, 계획 중인 서울시의 U-Smartway 지하도로는 총연장 150km로 6개축에 9개의 Junction과 다수의 진출입로 형성될 예정이며, 서부간선 지하도로는 10.3km이다(그림 6).

실시설계 중인 부산시의 만덕센텀간 지하도로는 연장 9.3km이며 진출입로는 본선의 중앙부에 있다.³⁾

민자사업 제안 접수가 된 부산시 지하도로는 연장 22km에 진출입로 8개가 계획되고 있다(그림 7).

또한, 도심지 교통난 해소와 지상부 환경을 개선하고자 경부고속도로 서초구 구간 지하화, 경인고속도로 지하화 등 다수의 도시지하도로가 계획 중이다.

3. 환기 대책

3.1 개요

도시지역의 네트워크 지하도로는 도심을 통과하므로 연장이 길어지고 다수의 진출입로가 있으며, 터널내 오염 공기를 처리하기 위한 환기구설치 위치 선정은 원활한 사업성패의 중요한 요소 중 하나이다.

연장이 길어 통과시간이 길어지므로 이용객의 건강을 위한 지하도로내의 오염물질 허용농도 값에 대한 제고가 필요하고, 다수의 진출입로에 의한 환기 흐름의 간섭을 최소화하거나 진출입로를 활용하는 환기방식이 요구되며, 환기구 주변 민원을 해소할 수 있는 유해가스제거 시스템을 구현하기 위한 환기소 계획이 필요하다.

3.2 환기기준

도시지역에 건설되는 장대 지하도로의 경우에는 지하도로 내부에서 지정체가 발생할 가능성이 높고 이러한 경

우에는 운전자가 지하도로 내에 장시간 체류하게 되므로 유해가스에 의해 두통이나, 메스꺼움 등의 신체적 문제를 겪게 될 가능성이 높아진다.⁴⁾

따라서 지하도로 내 체류시간을 고려하여 국가별로 다양한 농도기준을 제시하고 있으며 지하도로(또는 터널) 내 체류시간이 증가할수록 강화된 환기기준 값을 적용하고 있다(표 1).

도시지역 지하도로 설계지침에 따르면 연장 10km 초과 15km 이하의 도시지역 지하도로는 해외 기준, 연장에 따른 체류시간 및 질소산화물 중 이산화질소의 비율 등을 고려하여 일산화탄소 50ppm, 질소산화물 15ppm을 설계농도 기준으로 적용할 것을 권장하고 있다. 국내 기준의 설계농도 기준 값은 <표 2> 에서와 같이 외국 기준에 비해서 낮은 편이다.

연장 15km를 초과하는 지하도로(또는 도로터널)는 연장의 증가에 비례하여 지하도로 내 체류시간이 증가하게 되므로 혈중 일산화탄소 농도인 CO-Hb를 이용하여 분석하는 방법과 유효복용분량(FED)를 이용하는 두 가지 방

<표 1> 통과시간에 따른 해외의 오염물질 농도 기준

구분	최저농도[ppm]	평균 시간	해당 국가(기관)
CO	100	15분	WRA(PIARC, 1995)
		5분	홍콩
	90	15분	프랑스
	70	15분	WRA(PIARC, 2010)
	50	30분	프랑스, 호주(시드니 Cross City and Lane Cove 터널)
NO ₂	1	15분	뉴질랜드
		5분	홍콩
	0.75(1.5)	15분	노르웨이(()안은 터널 종점부 기준)
	0.4	15분	프랑스(2010)

<표 2> 환기설계 허용기준(한국은 연장 10km~15km 기준)

기준	PIARC	한국	일본	프랑스	독일	미국
CO[ppm]	70	50	100	50	70	45
NO _x [ppm]	20	15	NA	4	20	20
매연%(100m 통과율)	60	60	50	60	60	60

법으로 검토하여 상대적으로 강화된 설계농도 기준을 적용하도록 규정하고 있다.

3.3 환기기준 개선안

도시지역 지하도로 설계지침에 따라 20km 지하도로를 FED 0.1 기준 시 NO_x 15 ppm에 따른 CO농도는 25 ppm 으로서 약 3km 횡류식 환기구역일 경우 급배기 풍도 단면적 합계는 12.4 m²에서 24.8 m²로 증가하여 굴착단면이 증가한다. 환기팬, 환기탑 등 환기시설 용량과 전기에너지 사용도 증가하여 통행료 상승의 요인이 되는 문제점이 있다(표 3).

아울러, 총연장 150km를 초과할 것으로 예상되는 서울지하도로(U Smartway)의 경우는 차도면적보다 풍도 면적이 더 넓을 수도 있어 허용농도만을 낮추는 방법은 현실적이지 못하다.

따라서, 15km를 초과하는 지하도로에 대한 오염 농도 대책으로는 교통시스템을 활용하여 진입차량을 통제 또는 중간 진출입로를 이용하여 차량 도피, 엔진 정지(Exceptional congested traffic, stopped on all traffic)⁵⁾ 등을 유도하여 과도한 환기시설이 적용되지 않도록 조항을 수정하는 것이 바람직하다.

WRA(World Road Association) 기준에서도 지나치게 엄격한 설계 값을 적용하면 환기 시스템의 크기가 과도하게 커질 수 있고, 또한 너무 낮은 오염농도 값 설정은 과도한 운영 비용을 초래할 수 있으므로 교통통제 등으로 통과속도를 조정할 수 있도록 하고 있다.

또한 차량에서 배출되는 오염물질의 양은 차량 엔진의 개선과 전기차량 증가에 따라 축소되므로 소요환기량 현실화를 위해 시간 계수값을 도입할 필요⁶⁾가 있다(표 4).

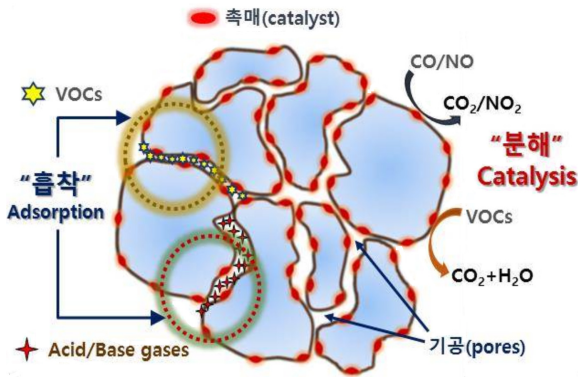
환기구 주변의 민원을 감소하기 위해 입자상, 가스상 오염공기를 처리하기 위한 필터를 설치하여 환기구로 배

〈표 3〉 CO농도에 따른 풍도 단면적

터널연장[km]	15	20
CO[ppm]	50	25
급기풍도 단면적[m ²]	6.2	12.4
배기풍도 단면적[m ²]	6.2	12.4
차도 단면적[m ²]	62	62

〈표 4〉 Time factor(WRA(PIARC Technical Committee C4 Road Tunnels Operation), 2012)

TABLE 11 - INFLUENCING FACTOR (FT) FOR PASSENGER CARS, TECHNOLOGY STANDARD A					
ft	CO		NO _x		Opacity
	Gasoline	Diesel	Gasoline	Diesel	Diesel
2010	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2015	0.75	0.74	0.65	0.76	0.55
2020	0.58	0.65	0.44	0.52	0.29
2025	0.46	0.60	0.30	0.40	0.17
2030	0.40	0.57	0.22	0.35	0.13



〈그림 8〉 CO와 NO_x, 유기화합물 제거 원리

출되는 공기를 정화시키거나, 환기구 수량을 최소화할 수 있는 방법을 모색할 필요가 있다(그림 8).

4. 방재대책

4.1 개요

지하도로내에서 화재가 발생하면 인명피해뿐만 아니라 차량과 터널구조물의 손상과 화재복구를 위한 통행 제한 등에 따른 인적 물적 피해가 발생한다.

화재는 발생한 후에 처리하는 것보다 예방하는 것이 더 현명한 방법이다. 그러나 불가피하게 화재가 발생한 경우에는 빠른 초동대응을 위해 신속한 감지와 경보 시스템이 필요하다. 초기의 화재는 소화기나 소화전으로 진압할 수 있으나 확대된 화재의 진화는 자동식 소화설비가 필요하고, 피난자를 위한 피난환경을 조성하기 위해 비상조명과 제연설비 등이 필요하다. 또한 외부 지원을 받기 위해 관리사무소, 소방대와 구급대 등 유관기관에 통보할 수 있는 시스템이 필요하며, 특히 지상의 교통 신호를 화재신호와 연동시켜 차량들을 외부로 신속히 탈출시키기 위한 경찰청의 지원이 필요하다. 그러므로 터널내부의 화재대응시스템 뿐만 아니라 외부 교통시스템과 유관기관 및 지하도로 외부의 개별 자동차도 연관된 시스템으로 통제되

면 안전하고 신뢰성있는 지하도로가 구축될 것이다.

지하도로의 방재시스템은 개별시스템간의 유기적 연동과 통합제어를 위해 연결과 융합, 인공지능의 기술이 절실히 필요한 부분 중의 하나이다.

4.2 예방대책

지하도로내의 사고 및 화재 최소화를 위한 대책은 운전자 주의력 개선방안과 이용자 홍보교육, 예방시설로 나눌 수 있다.

단조로운 장대지하도로를 주행하는 운전자들의 주의력 개선을 위해서는 경관조명이나 조명색상에 변화를 주는 방법과 광섬유를 이용한 태양광 채광 방식 등을 활용할 수 있다.

이용자 홍보를 위해 동영상 표시가 가능한 LCS(Lane Control System)와 방송매체 또는 네비게이션을 활용할 수 있다(그림 9).

예방을 위한 시설은 화재가 발생한 차량이 지하도로 입구로부터 진입하지 못하도록 지하도로 입구 전방에 차량 화재감지기를 설치(그림 10)하거나 위험물탱크차종 등을 구분하여 감시할 수 있는 위험물질 운송차량 관제 시스템(Hazmat Transport Vehicle Tracking System, HTVTS)과 차량의 진입을 통제하기 위한 장치 등을 설치할 수 있다.



〈그림 9〉 지하주차장 네비게이션



〈그림 10〉 진입차량 화재감지기



〈그림 11〉 물분무 소화전

4.3 화재의 조기감지

화재는 비상전화나 비상벨, 영상유고감지시스템에 의해 감지되며, 감지 수단별로 화재감지 빈도를 분석한 결과 CCTV에 의한 감지가 58.5%로 가장 많고, 다음으로는 전화 등에 의한 통행자의 사고접수(31.1%)로 나타나고 있으며, 자동화재 탐지설비 2.8%, 비상전화 1.9%, 비상경보 0.9%로 초기 감지수단으로 설치한 설비의 초기감지 효과가 저조한 것으로 나타나고 있다.⁷⁾

CCTV에 의한 영상유고감지는 화면의 형상에 대한 Big Data에 의해 정확도가 더욱 향상되어 활용도가 높아지고 있다.

아울러, 소화기나 소화전함에도 IoT 기술을 도입하여, 소화기를 들거나 소화전함 문짝을 열면 자동으로 CCTV가 그곳을 비추고, 프로그램이 자체적으로 화재여부를 판단하여 경보를 울리도록 하는 기술은 현재에도 적용되고 있다. 동시에 주변 차량의 네비게이션에 실시간 화재경보가 울리도록 해당 기술과 융합시키면, 대피 여부를 결정하는 지연시간이 단축되어 안전한 피난을 도모할 수 있다.

4.4 소화대책

화재 발생 시 초기에 소화기로 진화하는 것이 가장 경제적이다. 그러나 화재가 확대되어 연기가 발생하기 시작



〈그림 12〉 물분무소화설비

하면 일반인들은 당황하여 소화전을 사용하려해도 소화전함에 적재된 45m(15m×3본)의 호스를 활용하여 소화작업을 실행하기가 곤란하다. 따라서 호스가 꼬이거나 뒤틀리지 않고 근거리화재에도 사용이 가능한 호스릴소화전을 적용하는 것이 바람직하다(그림 11). 소화전은 포소화약제가 분사될 수 있는 겸용소화전을 설치하거나 미세물분무 소화전을 사용하여 유류화재에 대비하는 것이 바람직하다.

다만 호스릴이나 미세물분무 소화전에 대한 규정 정립이 필요하다.

화재가 더욱 확대되면 자동식 소화설비인 물분무소화설비가 가장 효과적인 소화설비다(그림 12). 물분무소화

설비는 화재확대를 방지하고 연기발생을 축소시킬 수 있기 때문에 사망률에 대한 위험도를 50배 이상 감소시킬 수 있다.

현재 국내에서 주로 사용하는 저압물분무소화설비는 소나기 형태로 물이 분사되고 있다. 물분무소화설비는 화재하중을 낮추어 화재 확산이나 연기 발생을 감소시켜 사망자 발생확률을 현저히 감소시키며, 소방대의 진입을 용이하게 하여 화재 진압에 큰 도움을 주는 자동식 소화설비이다.

다만 유류 누설에 의한 화재나 전기차 모터 구동부의 고전압에 대한 감전⁸⁾ 대응에 좀 더 효율적인 고압미세물분무소화설비 적용을 법적이나 기술적으로 적극 검토하여 반영할 필요가 있다.

4.5 피난대책

화재발생시 인명피해는 화재열보다 화재연기에 의해 많이 발생하므로, 인명피해를 줄이기 위해서는 연기로부터 안전한 대피환경을 만드는 것이 가장 중요하다.

초고층 건물의 경우에도 특별피난계단에 공기를 가압하여 연기 침입을 방지하는 전실을 설치하고 20층마다 외기와 면하는 피난안전구역을 설치한다(그림 13).

지하도로의 경우에도 가압에 의해 연기의 침입을 방지

하여 안전구역을 다중으로 설치할 수 있다. 이러한 차압에 의한 안전구역은 화재방 대피시설에도 유독가스가 침입하지 못하도록 적용하는 방법이다.

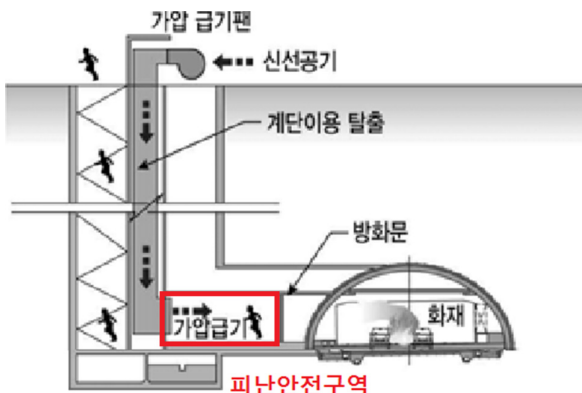
4.6 종합 제어시스템

지하도로의 종합 제어 시스템은 iTMS(Intelligent Tunnel Monitoring System, 지능형 터널 관리시스템)를 적용할 수 있다. iTMS는 지하도로내의 상태 정보수집을 u-IT(유비쿼터스 정보 기술 : ubiquitous Information Technology) 기반의 센서(온도, 습도, CO가스, CO₂가스, 연기, 화재(불꽃), 조도, 먼지, 인체감지 등)를 이용하여 실시간 수집 및 저장, 가공함과 아울러 영상 IP 카메라와 연동하여 모니터링 함과 동시에 지하도로의 상태를 실시간으로 관리한다.

iTMS는 차량정체, 사고, 화재, 동물 출현 등 긴급상황이 발생하면 실시간으로 관리자 모니터나 스마트폰으로 그곳의 상황을 알려주며, 진입 차단설비를 제어하고, 전광판에 상황을 알리며, 필요시 경고/안내 방송 송출, 경광등 작동, 비상조명 작동 등을 원격으로 제어하여 2차 사고를 방지한다. 사고 발생 상황이나 화재경보 신호가 해당 지하도로관리소 뿐만 아니라 여러 지하도로의 설비가 안정적이면서 효율적인 감시/제어가 가능하도록 군(郡)관리시스템을 통해 설비들을 유기적으로 통합 운영하여 신속, 정확하게 대응할 수 있어야 한다.⁹⁾

아울러 관리자와 경찰청의 교통정보센터, 소방서 등 관계기관에도 통보되도록 시스템을 확장하여 유기적 대응이 필요하다.

내부와 외부에 있는 자동차의 방송설비와 네비게이션에도 유사시 상황이 자동 통보되어 재해가 확대되는 것을 방지하여야 한다. 제어시스템의 서버에는 사후처리를 위해 사고 상황 영상과 소방, 방송, 전력 등 이력관리 데이터가 기록되어야 한다.



〈그림 13〉 피난안전구역

5. 결 언

서울시 및 부산시 등 대도시지역에 공사 중이거나 계획 중인 네트워크형 지하도로는 도심을 통과하기 위해 장대화, 대심도화 되고 다수의 지하도로와 다수의 진출입로(IC : Inter Change)가 설치되므로 환기와 화재에 대한 안전대책이 필요하다.

환기 분야는 지하도로 이용자의 건강을 위해 오염물질 허용농도를 낮추는 것이 바람직하나, 그러나, 현재의 15km 이상의 지하도로의 환기설계 허용기준이 현실적으로 과도하여 환기시설 설치에 필요한 토목구조와 환기설비의 초기 투자비와 운전비가 과다하여 지하도로 계획이 무산될 수 있다. 따라서, 환기량 계산시 자동차 엔진의 개선과 전기차량 등의 오염물질 배출량 감소를 반영하기 위한 시간계수 값을 적용하는 방법과 과도한 정체로 인한 오염물질 농도 증가시 진입 차량을 통제하는 방법 등을 제안한다.

방재 분야는 화재차량 진입방지를 위한 진입차량의 온도 감지기, 위험물차량 통과 관리를 위한 위험물 차량 감시 시스템, 대형유류화재와 전기차량의 소화를 위한 미세

물분무소화설비와 미분무수소화전설비, 지능형 터널 관리시스템을 적용할 수 있도록 관련 규정을 보완하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- 1) 국토교통부, 2016.06, 「도시지역 지하도로 설계지침」 pp.3-4.
- 2) 이진섭, 심락권, 2010.05, 「도시지하도로의 환기, 방재설비」 대한설비공학회 설비저널, pp.19-25.
- 3) <https://namu.wiki/w/만덕~센텀%20지하%20고속화도로>.
- 4) 국토교통부, 2016.06, 「도시지역 지하도로 설계지침」 pp.187-188.
- 5) WRA(PIARC Technical Committee C4 Road Tunnels Operation), 2012, Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand For Ventilation)pp. 16.
- 6) WRA(PIARC Technical Committee C4 Road Tunnels Operation), 2012, Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand For Ventilation), pp. 32.
- 7) 유지오, 김남영 외, 2015.12, 「도로터널 방재시설 설치 및 관리 지침 개 연구 최종보고서」 한국터널지하공간학회, pp.62.
- 8) 함양소방서, 2103, 「고속도로 차량화재소방활동 안전대책」 pp. 41.
- 9) 김태형, 김진 외, 2008, 「터널운영시스템 표준화 연구」 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp.75-79.