

도로터널 소요환기량 산정기준 변화에 따른 영향 분석

김효규^{1*} · 이창우²

¹정회원, (주)주성지앤비 대표이사

²정회원, 동아대학교 에너지·자원공학과 교수

A study on the effects of changes in the estimating criteria for ventilation requirements in road tunnels

Hyo-Gyu Kim^{1*} · Chang-Woo Lee²

¹CEO, JS G&B Inc.

²Professor, Dept. of Energy and Mineral Resource Engineering, Dong-A University

*Corresponding Author : Hyo-Gyu Kim, hgkim@gnbeng.com

Abstract

The ventilation rate (Qreq) requirement in road tunnels is not just a basic information for determining the tunnel cross-sectional area, but also a major factor for the ventilation system selection. The Qreq is predominantly dependent on the vehicle traffic volume, while among others, the vehicle exhaust emissions and permissible standards are critical. This paper analyzes the changes in the Qreq designing criteria and/or recommendations suggested by World Road Association and local authorities over the last 20 years, since the first local designing criteria was established in 1997 by Korea Expressway Corporation. Additionally, based on the updated vehicle emission standards of Ministry of Environment and recent recommendations of the World Road Association (WRA), changes in the Qreq and its effects are studied in terms of the length and grade of the tunnel.

Keywords: Required ventilation rate, Basic emission rate, Non exhaust emission, WRA (PIARC)

초 록

소요환기량은 터널단면을 결정하기 위한 기초적인 자료로, 터널 내 환기 시스템을 결정하기 위한 주요한 요소이다. 소요환기량은 터널 내 교통량 자료에 기초하고 있으며, 차량으로부터 배출되는 오염물질량과 터널 내 허용농도 기준에 의해 결정된다. 본 논문에서는 처음으로 국내 기준이 한국도로공사에 의하여 규정된 1997년 이후 20년간 변화한 도로터널 환기설계기준을 검토하고 최근의 환경부 ‘제작차 배출허용기준’과 세계도로

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(6)779-793(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.6.779>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received August 26, 2019

Revised September 18, 2019

Accepted September 25, 2019



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 © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

협회(WRA) 2019년 설계권고기준 등을 바탕으로, 터널의 특성, 특히 길이 및 종단경사를 고려하여 소요환기량 차이 및 영향을 비교분석하였다.

주요어: 소요환기량, 기준배출량, 비차량(엔진) 배출량, 세계도로협회(국제도로상설협회)

1. 서론

소요환기량(Required ventilation rate, Q_{req})은 터널단면을 결정하기 위한 기초적인 자료가 되며, 비상시 제·배연 용량과 함께 터널 내 환기·방재 시스템을 결정하기 위한 주요한 요소이다. 이러한 소요환기량은 터널 내 교통량 자료에 기초하고 있으며, 차량으로부터 배출되는 오염물질량과 터널 내 허용농도 기준에 의해 결정된다 (Ministry of Land Transportation, 2011, 2016).

국제도로협회(World Road Association, WRA) (구, 국제도로상설협회(Permanent International Association of Road Congresses, PIARC))에서는 터널 내 허용농도 기준으로 가시도(Visibility)와 CO 농도에 대한 권고치를 제시하고 있으며, 2010년을 기준으로 CO에 대한 권고치가 100 ppm에서 70 ppm 으로 강화되었고, 교통통제하의 계획된 유지관리 작업이 있는 경우에는 가시도가 3×10^{-3} (1/m), CO 농도가 20 ppm을 초과하지 않도록 권장하고 있으며, 환기설계조건은 아니지만, 운영중 가시도가 12×10^{-3} (1/m), CO 농도가 200 (ppm)을 초과하면 터널 내 차량의 운행을 제한하는 터널폐쇄조건을 권고하고 있다(WRA (PIARC), 1991, 1995, 2004, 2012).

1997년을 기준으로 국내에서는 일본식 소요환기량 산정기법 대신에 유럽식(PIARC) 소요환기량 산정기법에 기초한 환기설계기준을 정립하였고, 한국도로공사에서 처음으로 ‘고속도로 터널 환기시설 설계기준’(1997 제정)을 제시하였다. 국토교통부에서는 ‘도로법’에 기초해 ‘도로의 구조·시설기준에 관한 규칙’(1999 제정)에 일산화탄소 100 ppm과 질소산화물 25 ppm 기준을 제시하였으며, 도로설계편람(617, 환기시설) (1999 제정, 2011 개정)에 매연(차속별 $5 \sim 9 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$), CO (100을 70 ppm로 개정), NOx (25를 20 ppm로 개정)에 대한 허용농도 기준을 규정하였다. 더불어, 국내 차량배출량 기준은 환경부에서 ‘대기환경보전법 시행규칙’(1991 제정)의 별표(‘제작차배출허용기준’)를 통해 처음으로 제시하였고, 비주기적으로 2~3년 마다 제작차량의 제작년도를 기준으로 배출허용기준을 제시하고 있다(Korea Highway Corporation, 1997; Ministry of Land Transportation, 2015; Ministry of Government Legislation, 2013, 2017).

국제도로협회는 2000년 이후 입자상 물질인 매연에 대하여 차량엔진으로 배출되는 오염물질에 의한 소요환기량 외에 타이어 및 브레이크 마모분진, 도로표면 마모분진, 재부유분진 등 비엔진배출량(Non Exhaust Particles, NEP) 문제 등을 고려할 것을 권장하고 있으며, 국내에서도 2011년부터 이러한 경향을 고려하여 환기설계기준에 반영하고 있다(Ministry of Land Transportation, 2011).

최근 세계도로협회에서는 2019년 “ROAD TUNNELS: VEHICLE EMISSIONS AND AIR DEMAND FOR VENTILATION” (2019R02EN) 보고서를 통해 종전 2012년에 발표된 차량의 CO, NOx, 입자상물질(PM) 배출

량 기준 및 보정계수 등을 대폭 개정한 결과를 발표 하였다(WRA (PIARC), 2019). 따라서 본 논고에서는 1997년 이후 20년간 변화한 도로터널 환기설계기준에 따른 소요환기량 차이를 터널의 특성, 특히 터널길이 및 종단구배를 고려하여 비교분석하였다.

2. 터널환기 설계기준 동향

2.1 제작차 배출허용량기준의 변화

현재 도로설계편람의 환기설계기준이 되는 제작차 배출허용량기준은 환경부의 ‘2006년 이후’ 제작차 배출허용량 기준을 적용하여 차량의 오염물질 기준배출량으로 산정되었으나, 현시점에서는 2009년 이후, 2013/2014년 이후, 2016/2017년 이후로 적용기준이 단계별로 강화되어온 상태로 조사된다. 대체로 매연(PM) 및 CO 보다는 NOx 관련 허용규정이 강화된 것으로 분석된다. 주행모드의 경우, 경유차량은 ND-13/ETC 모드에서 소형 및 중형 차량은 WLTP 모드로, 대형 및 초대형은 WHSC/WHTC 모드로 변경되었고, 특이점은 2013년 이후부터 휘발유 승용차량에 대한 매연 배출량이 추가되었으며, 2016년 이후부터 질소산화물 배출량은 없는 것으로 조사 되었다 (Ministry of Government Legislation, 2013, 2017).

Table 1. Emission table in local standards

Case	Vehicle	Passenger car		S.Bus	L.Bus	S.Truck	M.Truck	L.Truck	Sp.Truck
	Fuel	Gasoline	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
	Unit	(g/km)		(g/km)	(g/kW.h)	(g/km)	(g/kW.h)		
Korea Expressway Corporation (1997, 2002)	PM	-	0.05	0.06	0.25	0.08	0.25	0.25	0.25
	CO	2.11	1	1.27	4.9	1.52	4.9	4.9	4.9
	NOx	0.25	0.62	0.64	6	0.71	6	6	6
Road design manual (2011)	PM	-	0.005	0.005	0.030	0.005	0.030	0.030	0.030
	CO	1.060	0.500	0.630	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.031	0.180	0.235	2.000	0.235	2.000	2.000	2.000
Emission standards (2013/14)	PM	-	0.0045	0.0045	0.010	0.0045	0.010	0.010	0.010
	CO	1.060	0.500	0.500	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.031	0.080	0.080	0.460	0.105	0.460	0.460	0.460
Emission standards (2016/17)	PM	0.0020	0.0045	0.0045	0.0100	0.0045	0.0100	0.0100	0.0100
	CO	1.060	0.500	0.630	4.000	0.630	4.000	4.000	4.000
	NOx	0.000	0.080	0.105	0.460	0.105	0.460	0.460	0.460
Emission factor (*) (2012)	PM	-	0.0010	0.0180	0.0081	0.0020	0.0049	0.0088	0.0072
	CO	0.0520	0.0090	0.4120	0.3737	0.0870	0.2234	0.2305	0.1931
	NOx	0.0010	0.1930	0.9490	0.5382	0.0620	0.3945	0.8277	0.6738

(*): Unit of emission factor is g/km

Table 1은 제작차 배출허용기준으로 연도별 변천과정을 정리하였다. Korea Highway Corporation (1997, 2002)는 환경부 2000년 이후, 도로설계편람(2011)은 환경부 2006년 이후 제작차 배출허용량기준을 적용하고 있으며, 환경부 2016/17년 이후 제작차 허용배출 기준에서는 휘발유 승용차의 매연에 대한 배출량 값은 제시하지 않았지만, 각주에서 “CVS-75 모드의 입자상물질 배출허용기준은 0.002 g/km 이하로 한다”라는 규정에 따라 0.002 g/km를 적용하였고, 배출계수(Emission factor)는 환경부 고시, ‘자동차 총 오염물질 배출량 산정방법에 관한 규정’의 2012년 7월 1일 이후 적용 ‘자동차 차종별 배출계수’를 참조하였다. 그러나 최근 규정을 재인용하면, “현재 배출계수는 실제 배출수준과 큰 차이를 보이는 배출계수 값이 존재하고, GDI 엔진의 입자상물질 등 신규 관리물질의 누락되어 있고, CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출계수와의 일관성 문제 등” 교통환경연구소(국립환경과학원)의 문제제기에 따라 2017년 이후 삭제된 상태이다(Ministry of Government Legislation, 2019).

2.2 비엔진 배출분진의 변화

2000년 이후 차량엔진의 발달과 더불어 매연 배출량은 급속하게 감소하는 추세에 있으며, 상대적으로 비차량(엔진) 배출분진(Non Exhaust Emission)에 대한 중요성이 부각되고 있다. 국내에는 아직까지 터널 내 비엔진 배출분진에 대한 연구가 전무하기 때문에 WRA (PIARC) (2004, 2012, 2019) 보고서의 최신 내용을 정리하면, 소형차량(PC)의 경우, 2004년 대비 2012년은 약 1.47배 증가, 2019년의 일방향 터널은 0.74배 감소, 양방향 터널은 1.25배 증가하였고, 대형차량(HGV)의 경우, 2004년 대비 2012년은 약 1.07배 증가, 2019년의 일방향 터널은 0.97배 감소, 양방향 터널은 1.11배 증가한 것으로 나타나고 있다.

2004년 보고서 대비 2012년도 보고서의 비엔진 배출분진 값이 상대적으로 높게 나타나고 있어, 2019년도 보고서는 일정 정도 조정된 것으로 판단된다. 또한 일방향 터널 보다는 양방향 터널에서의 비엔진 배출분진이 높은 것으로 나타나고 있는데, 소형차량의 경우는 약 1.69배 증가, 대형차량의 경우는 1.15배 증가하고 있다. 즉, 일방향 및 양방향 터널 간 배출량에는 상당한 차이가 있는데, 이는 터널에서 양방향으로 (대면)통행하는 차량들의 경우 터널 내 종방향 풍속이 훨씬 낮고, 입자상 물질인 분진(PM)의 체류시간이 길기 때문에 퇴적된 분진의 재비산

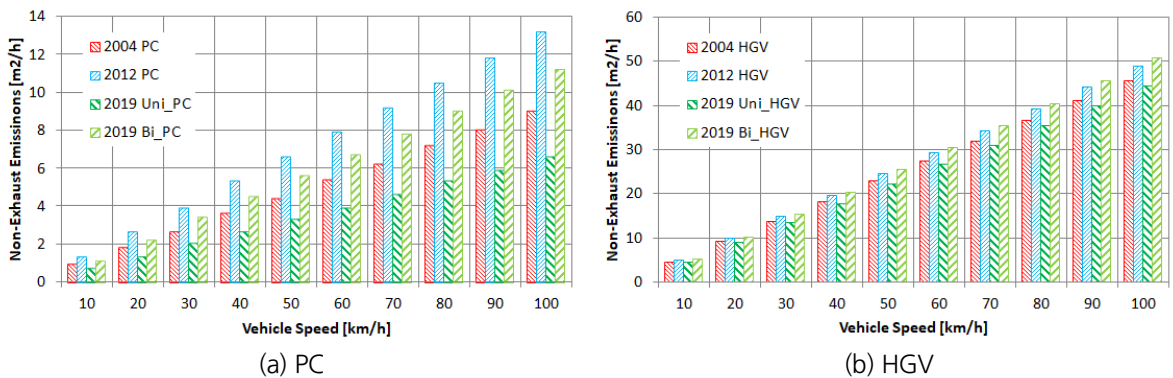


Fig. 1. Non-exhaust emissions

가능성이 증가한 것에 기인한 것으로 보인다. 또한 차량에서 발생하는 난기류(특히 대형차량에서 발생하는 난기류)가 덮개로 포장되지 않은 하중(예: 자갈 운송 등)에 영향을 미쳤을 가능성이 높기 때문으로 보이며, 이러한 사항을 Fig. 1에 나타내었다.

2.3 주행모드와 속도·구배 보정계수의 변화

오염물질별 기준배출량(Basic emissions; q_0)을 산정할 경우, 승용차의 경우는 원단위 제작차 배출허용기준(g/km ; E_s)을 밀도로 나누고, 주행모드의 평균 주행속도(km/h ; V_t)를 곱하여 계산할 수 있다. 반면, 대형차의 경우는 원단위 제작차 배출허용기준(g/kWh ; E_s)을 밀도로 나누고, 차량의 마력(Ps)을 곱하면 된다. 단, 가스상 물질은 원단위 제작차 배출허용기준(g/km or g/kWh ; E_s)에 대하여 해당 오염물질의 밀도(g/m^3 ; ρ_{Gas})를 나누어 주면 된다. 기준배출량 산정식과 관련한 자세한 내용은 이전 논문(Kim et al., 2007, 2017)을 참고할 수 있다.

종전 기준 배출량(q_0)은 제작차가 표고 0 m, 경사 0%에서 평균 주행속도 60 km/h를 기준으로 주행할 때 발생하는 오염물질의 량(기준배출량)을 기준으로하고 다른 차속과 다른 경사도에 보정계수(그래프) 값을 제시하고 있다. 현재 국내에는 차종별, 차속별, 경사별 보정계수에 대한 연구가 전무하기 때문에 종전 WRA (PIARC) (1991, 1995)에 제시하고 있는 속도·경사 보정계수(f_{iv}) 값을 사용하고 있다. 그러나 2000년 이후 WRA (PIARC)에서는 종전의 속도·경사 보정계수(f_{iv}) 그래프를 폐기하고 테이블 형태로 속도와 경사도에 따른 차종별 원단위 기준배출량(E_s)을 제시하고 있다. 따라서 이를 국내 기준배출량(q_0)로 환산하기 위해서는 속도 보정작업을 해야 한다. 즉, 현재 국내 환기설계기준(도로설계편람, 2011)은 환경부의 주행모드에 따른 제작차 배출허용기준(E_s)을 적용하고 있기 때문에, 주행모드에 따른 평균 주행속도를 알 필요가 있으며, 종전의 속도·경사 보정계수(f_{iv})를 사용하기 위해서는 주행모드에 따른 차량의 속도에 대한 보정작업을 수행하여야 한다.

즉, 현재 도로설계편람(2011)에서는 “국내의 제작차 배출량 측정을 위한 주행모드는 휘발유, 가스차는 CVS-75 (미국의 시가지 주행모드인 FTP-75와 동일)를 1987년부터, 경유를 사용하는 경차 및 소형·중형차량은 유럽에서 사용 중인 ECE15 + EUDC 모드를 2004년부터 단계적으로 적용하고 있다. 따라서 2009년 1월 1일 이후 제작되는 차량에 적용되는 배출량허용기준은 차종별로 이들 운전모드를 적용하고 있다. CVS-75 운전모드는 평균차속 34.2 km/h로, ECE15 + EUDC 모드는 평균차속 33.6 km/h로 주행하며 배출량을 측정한다. 이에 따라 본 편람에서 제시된 속도 및 경사 보정계수는 속도 30 km/h, 경사 0%, 표고 0 m를 1.0로 제시한다.” 라고 기술하고 있다.

주행모드의 평균 주행속도와 관련하여, 종전 CVS-75 모드는 34.2 km/h 이고, ECE15 + EUDC 모드는 33.6 km/h이며, 최근 변경된 WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure) 모드의 평균주행 속도는 Table 2와 같다. 따라서 최신의 WRA (PIARC) 보고서의 테이블 값을 적용하기 위해서는 테이블에서 제시된 속도에 대한 원단위 기준배출량(E_s) 값을 특정속도에 대한 상대비율로 계산한 후, 주행모드의 평균 주행속도값에 대하여 보정하고 오염물질별 기준배출량(q_0)을 산정하여야 한다.

Table 2. WLTP mode and weighted averaged speed

Class	1	2	3a	3b
Duration (sec)	1,611	1,800	1,800	1,800
Idle time (sec)	199	166	235	235
Avg. speed (km/h)	25.51	45.29	46.38	46.52
Weighted average (km/h)	41.34			

2.4 오염물질별 기준배출량의 변화

이상의 국내 차종별 원단위 배출허용기준으로부터 오염물질별 기준배출량(q_0)을 정리하면 Table 3과 같다. 입자상 물질인 매연(PM)의 경우는 가시도(1/m)의 허용농도기준으로 변환되어야 하기 때문에 기준배출량의 단위는 $[m^2/h]$ 로 표시되며, 가스상 물질인 CO, NOx의 단위는 $[m^3/h]$ 이다.

Table 3. Emission standards and Emission factor

Case		Passenger car		S.Bus	L.Bus	S.Truck	M.Truck	L.Truck	Sp.Truck
		Gasoline	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
Korea Expressway Corporation (1997, 2002)	PM (m^2/h)	-	18.893	29.606	172.195	31.594	83.018	208.750	265.832
	CO (m^3/h)	0.101	0.080	0.055	0.652	0.072	0.320	0.721	0.933
	NOx (m^3/h)	0.010	0.015	0.022	0.642	0.027	0.315	0.710	0.919
Road Design Manual (2011)	PM (m^2/h)	-	0.787	0.787	23.375	0.787	11.481	25.857	33.460
	CO (m^3/h)	0.030	0.014	0.018	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
	NOx (m^3/h)	0.001	0.003	0.004	0.166	0.004	0.082	0.184	0.238
Emission standards (2013/14)	PM (m^2/h)	-	0.708	0.708	7.792	0.708	3.827	8.619	11.153
	CO (m^3/h)	0.030	0.014	0.014	0.554	0.018	0.272	0.613	0.793
	NOx (m^3/h)	0.001	0.001	0.001	0.038	0.002	0.019	0.042	0.055
Emission standards (2016/17)	PM (m^2/h)	0.321	0.872	0.872	7.792	0.872	3.827	8.619	11.153
	CO (m^3/h)	0.030	0.017	0.022	0.554	0.022	0.272	0.613	0.793
	NOx (m^3/h)	0.000	0.002	0.002	0.038	0.002	0.019	0.042	0.055

종전에는 가솔린 엔진의 승용차량의 경우, 매연의 배출량을 고려하지 않다가 16/17년 이후로는 매연의 발생량을 고려한 것이 특징적이다. 또한 현행 환기설계 기준(2011) 대비 환경부 2016/17년 이후 기준을 적용할 경우, 매연의 경우는 소형차(디젤)의 매연 배출량이 1/10 수준으로 증가한 반면, 대형차(디젤)의 매연 발생량은 1/3 수준으로 낮아진 것으로 파악된다. CO의 경우는 대형차량은 변동이 없으나, 디젤엔진의 소형 승용차, 버스, 트럭은 약 20% 정도 증가한 것으로 분석되고, NOx의 경우는 전 차종에서 23~67% 수준으로 낮게 배출되는 것으로 파악된다.

3. 소요환기량의 변화 검토

3.1 대상터널

본 논문에서는 Table 4에 제시한 모델터널에 대해서 Table 6의 해석 Case 별로 소요환기량 변화를 검토하였다. 다만, 터널 내 허용농도 기준은 Table 5와 같이 현재의 허용농도 기준으로 동일하게 적용하였다.

Table 4. Input values for tunnel & traffic data

Type	Value		Layout							
Length (km)	5									
Cross Area (m ²)	75									
Diameter (m)	8.8									
Grade (%)	-6 ~ +6									
Lane (lane (s))	2									
Elevation (m)	400									
Type	Passenger car		Bus		Truck				AADT (veh/day)	HGV (%)
	G	D	Small	Large	Small	Medium	Large	Special		
Traffic	18,040	12,026	3,069	3,098	211	5,475	1,789	866	44,574	25.2
Comp. (%)	40.5	27.0	6.9	7.0	0.5	12.3	4.0	1.9	100.0	

Mmax = 2,200 pcu/h.lane, Do = 150 pcu/km.lane

Table 5. Permissible concentration limits

Vehicle speed	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
PM (1/m)	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO (ppm)	70							
NOx (ppm)	20							

Table 6. Case study

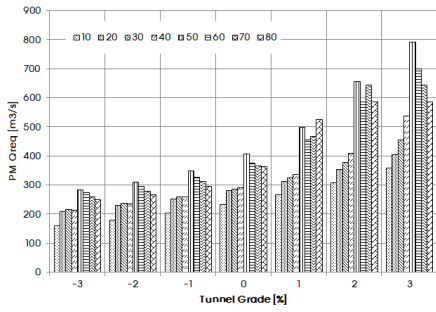
Case	1	2	3	4	5
Std.Vt (km/h)	60	30	30	30	40
Std.Gr (%)	0	0	0	0	0
q0_T (emission standards)	KEC1997 (ME1991~)	RDM2011 (ME2006~)	ME2013/14~	ME2016/17~	ME2016/17~
NEPM (PIARC year)	N/A	P2004	P2004	P2012	P2019
Correction factor (f _v) (PIARC year)	K1997 (P1991)	K2011 (modify P1991)	K2011 (modify P1991)	P2012	P2019

Case 1은 한국도로공사의 고속도로 터널 환기시설 설계기준(1997)으로, 기준배출량($q0_T$)은 환경부의 1991년 이후 제작차 배출허용기준(Emission standards)과 비엔진배출량(NEPM)은 고려하지 않은 경우이며, 속도구배보정계수(f_{iv})는 WRA (PIARC)의 1991년 보고서를 기준한 것이다. Case 2는 국토교통부의 도로설계편람(2011)에 제시된 현행 환기설계기준이며, 기준배출량($q0_T$)은 환경부의 2006년 이후 제작차 배출허용기준과 비엔진배출량은 WRA (PIARC)의 2004년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(f_{iv})는 WRA (PIARC)의 1991년 보고서를 기준으로 주행모드 30 km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 3는 가상의 환기기준으로, 기준배출량($q0_T$)은 환경부의 2013/14년 이후 제작차 배출허용기준과 비엔진배출량은 WRA (PIARC)의 2004년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(f_{iv})는 WRA (PIARC)의 1991년 보고서를 기준으로 주행모드 30 km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 4는 Case 3과 같이 가상의 환기기준으로, 기준배출량($q0_T$)은 환경부의 2016/17년 이후 제작차 배출허용기준(최신의 환경부 기준)과 비엔진배출량은 WRA (PIARC)의 2012년 보고서를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(f_{iv})는 WRA (PIARC)의 2012년 보고서를 기준으로 주행모드 30 km/h에 대하여 보정한 경우이다. Case 5는 가상의 환기기준으로, 기준배출량($q0_T$)은 환경부의 2016/17년 이후 제작차 배출허용기준(최신의 환경부 기준)과 비엔진배출량은 WRA (PIARC)의 2019년 보고서(최신 WRA (PIARC) 보고서)를 기준한 경우이며, 속도구배보정계수(f_{iv})는 WRA (PIARC)의 2019년 보고서를 기준으로 주행모드 40 km/h에 대하여 보정한 경우이다. 즉, Case 1은 과거 기준, Case 2는 현 기준, Case 3, 4는 가상의 기준으로 과도단계로 볼 수 있으며, Case 5는 최신의 국내 환경부 기준(제작차 배출허용기준)과 최신 WRA (PIARC)의 보정계수(비엔진배출량, 속도구배 보정계수 등)를 반영한 가상의 (향후 변경이 예상되는) 환기기준으로 볼 수 있다.

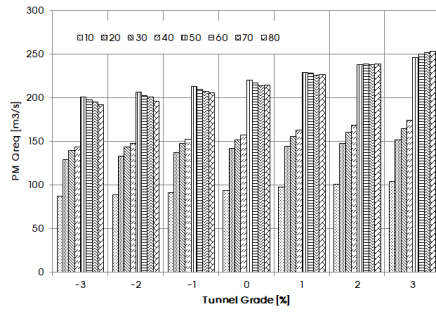
3.2 소요환기량 검토

Table 6과 같이 5가지 Case에 대하여 경사도를 1%씩 증가하면서 총 13개의 경사도(-6% ~ +6%)에 대한 오염물질별 소요환기량을 분석하였다. Figs. 2~4 (a)는 오염물질별로 Case 2에 대한 경사도별 소요환기량을 나타내고 있으며, (b)는 오염물질별로 Case 5에 대한 경사도별 소요환기량을 나타내고 있으며, (c)는 경사도 +1%일 경우, Case 2를 기준으로 Case별 소요환기량에 대한 상대비율을 나타내고 있다. (c)의 붉은색 막대와 레이블값은 전속도에 대한 평균값을 의미한다.

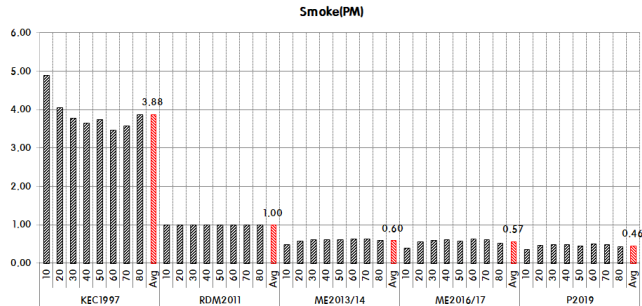
매연(PM)의 경우, Case 2 (현행 기준)에 대하여 Case 1 (도로공사 97)은 3.88배 높고, Case 3 (환경부 2013/14)은 0.6배 낮고, Case 4 (환경부 2016/17)는 0.57배 낮고, Case 5 (PIARC 2019)는 0.46배 낮은 분포를 보이고 있다. 일산화탄소(CO)의 경우, Case 2 (현행 기준)에 대하여 Case 1 (도로공사 97)은 1.4배 높고, Case 3 (환경부 2013/14)은 약 1.0배의 미소한 차이로 낮게 나타나고, Case 4 (환경부 2016/17)는 0.69배 낮고, Case 5 (PIARC 2019)는 0.83배 낮은 분포를 보이고 있다. 질소산화물(NOx)의 경우, Case 2 (현행 기준)에 대하여 Case 1 (도로공사 97)은 2.0배 높고, Case 3 (환경부 2013/14)은 0.24배 낮고, Case 4 (환경부 2016/17)는 0.19배 낮고, Case 5 (PIARC 2019)는 0.21배 낮은 분포를 보이고 있다.



(a) PM Qreq for Case 2

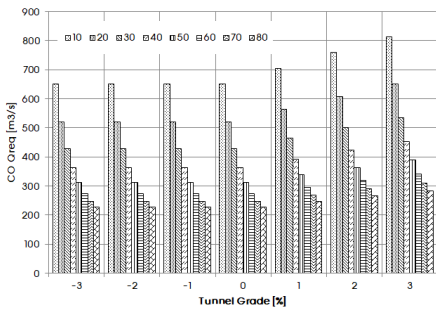


(b) PM Qreq for Case 5

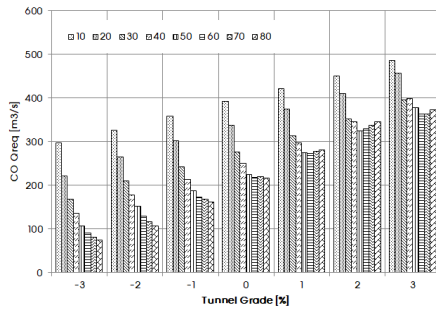


(c) PM Qreq ratio for all cases over Case 2 (Gr = +1%)

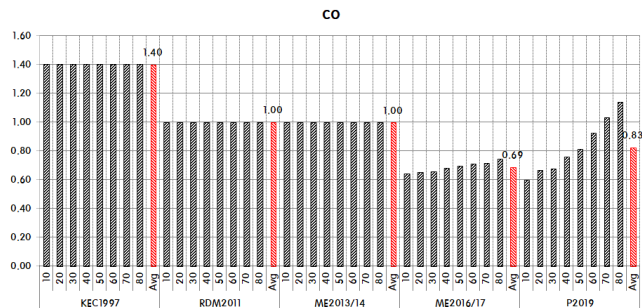
Fig. 2. Smoke (PM) Qreq profiles



(a) CO Qreq for Case 2

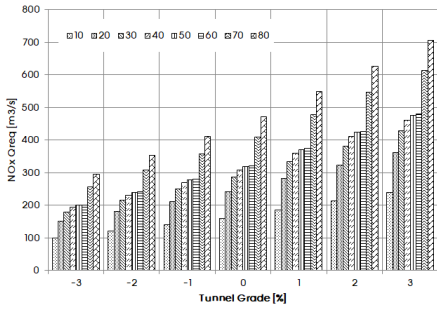


(b) CO Qreq for Case 5

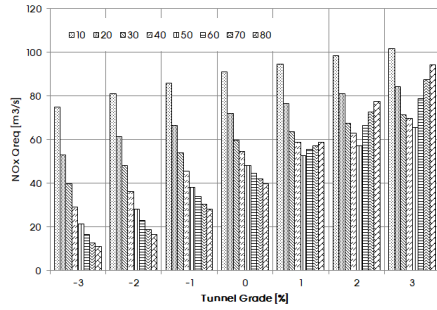


(c) CO Qreq ratio for all cases over Case 2 (Gr = +1%)

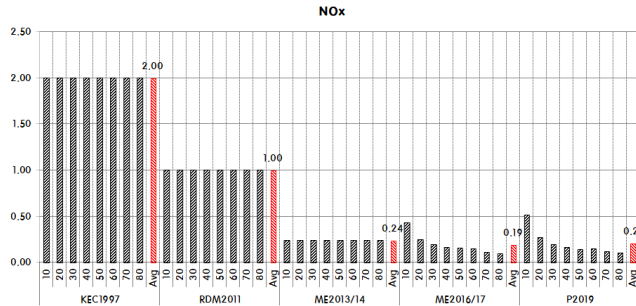
Fig. 3. CO Qreq profiles



(a) NOx Qreq for Case 2



(b) NOx Qreq for Case 5



(c) NOx Qreq ratio for all cases over case 2 (Gr = +1%)

Fig. 4. NOx Qreq profiles

경사도 +1%를 기준으로 향후 환기설계기준이 환경부의 최신 제작차 배출허용기준과 WRA (PIARC)의 최신 보정계수를 적용할 경우, 현행 설계기준 대비 매연(PM)은 약 46% 수준, CO는 약 83% 수준, NOx는 약 21% 수준으로 나타날 것으로 예상된다. 기타 경사도 -6%에서 +6%에 대한 소요환기량 변화비율은 Table 7에 나타내었다.

Table 7. PM, CO, NOx Qreq ratio for Case 5 over Case 2

Type	Grade	-6%	-5%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%
Smoke (PM)	10 km/h	0.68	0.63	0.59	0.55	0.50	0.45	0.41	0.37	0.33	0.29	0.25	0.21	0.17
	20 km/h	0.71	0.68	0.65	0.62	0.58	0.55	0.51	0.46	0.42	0.37	0.33	0.28	0.24
	30 km/h	0.76	0.74	0.69	0.65	0.61	0.57	0.53	0.48	0.42	0.36	0.30	0.26	0.27
	40 km/h	0.78	0.75	0.72	0.68	0.63	0.59	0.54	0.49	0.41	0.32	0.29	0.30	0.31
	50 km/h	0.80	0.78	0.74	0.71	0.67	0.61	0.54	0.46	0.36	0.31	0.32	0.33	0.34
	60 km/h	0.80	0.79	0.76	0.73	0.69	0.64	0.58	0.50	0.41	0.36	0.37	0.39	0.40
	70 km/h	0.82	0.80	0.78	0.76	0.72	0.67	0.58	0.48	0.37	0.39	0.41	0.43	0.45
	80 km/h	0.83	0.81	0.79	0.77	0.74	0.70	0.59	0.43	0.41	0.43	0.46	0.48	0.50
	Avg	0.77	0.75	0.71	0.68	0.64	0.60	0.54	0.46	0.39	0.36	0.34	0.34	0.33

Table 7. PM, CO, NOx Qreq ratio for Case 5 over Case 2 (continue)

Type	Grade	-6%	-5%	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%	5%	6%
CO	10 km/h	0.35	0.38	0.41	0.46	0.50	0.55	0.60	0.60	0.59	0.60	0.60	0.60	0.60
	20 km/h	0.30	0.32	0.34	0.42	0.51	0.58	0.65	0.66	0.68	0.70	0.73	0.75	0.78
	30 km/h	0.25	0.27	0.29	0.39	0.49	0.57	0.64	0.68	0.70	0.74	0.76	0.77	0.78
	40 km/h	0.18	0.22	0.26	0.37	0.49	0.59	0.69	0.76	0.82	0.88	0.93	0.96	0.99
	50 km/h	0.14	0.17	0.20	0.34	0.49	0.60	0.72	0.81	0.89	0.97	1.03	1.05	1.07
	60 km/h	0.12	0.16	0.19	0.33	0.47	0.63	0.80	0.92	1.03	1.06	1.09	1.10	1.11
	70 km/h	0.12	0.16	0.19	0.33	0.47	0.68	0.88	1.03	1.16	1.17	1.17	1.20	1.22
	80 km/h	0.13	0.16	0.19	0.33	0.47	0.71	0.95	1.14	1.30	1.31	1.31	1.35	1.38
	Avg	0.20	0.23	0.26	0.37	0.49	0.61	0.74	0.83	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99
NOx	10 km/h	0.83	0.85	0.87	0.76	0.68	0.62	0.58	0.51	0.47	0.43	0.40	0.37	0.35
	20 km/h	0.32	0.35	0.37	0.35	0.34	0.32	0.30	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.20
	30 km/h	0.17	0.20	0.22	0.22	0.23	0.22	0.21	0.19	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15
	40 km/h	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16
	50 km/h	0.07	0.08	0.09	0.11	0.12	0.14	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15
	60 km/h	0.05	0.06	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	0.16	0.17	0.17	0.18
	70 km/h	0.03	0.03	0.03	0.05	0.06	0.09	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15
	80 km/h	0.02	0.02	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14
	Avg	0.20	0.21	0.23	0.22	0.22	0.22	0.22	0.21	0.20	0.20	0.19	0.19	0.19

3.3 소요환기량 변화에 대한 고찰

최대 소요환기량 측면에서 현행 터널 내공단면적(75 m²) × 터널 내 최대풍속(10 m/s)인 Qreq_max = 750 m³/s 라인이 최대 가능한 종류식(제트팬) 환기방식의 영역이 될 것이다. 따라서 터널연장과 종단경사에 대한 관계로 최대 소요환기량(Qreq_max) 선도를 표시한다면, 기능적인 환기특성도(Qreq contour map)를 나타낼 수 있다 (Kim et al., 2003).

Table 8은 Case 2 (현행 기준)와 Case 5 (향후 예상기준)에 대한 환기특성도 테이블 값을 나타내고 있다. 현행 기준(Case 2)에 따르면 종단경사가 1% 이내일 경우는 최대 5 km 까지, 종단경사가 2%가 되면 4 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석되는데, 최신 WRA (PIARC) 보고서에 따라 향후 예상되는 가상 환기기준 (Case 5)을 적용하면, 종단경사 0.5% 이내에서 최대 9 km 까지, 종단경사 1~2%에서는 최대 8 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석된다. 따라서 일반적인 2차선 도로터널을 기준으로 현행 기준(Case 2)에 따른 최대 소요환기량은 약 150 m³/s 정도로 분석되며, 향후기준(Case 5)에는 약 90 m³/s 정도 낮아질 것으로 예상된다.

Table 8. Qreq contour map's table (at 750 m³/s)

Case 2	Lr (m)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
	0.30%	133.6	267.1	400.7	534.3	667.8	801.4	935	1068.5	1202.1	1335.7
	0.50%	135.7	271.5	407.2	543	678.7	814.4	950.2	1085.9	1221.6	1357.4
	1.00%	141.2	282.3	423.5	564.7	705.8	847	988.2	1129.3	1270.5	1411.7
	2.00%	152	304.1	456.1	608.1	760.1	912.2	1064.2	1216.2	1368.2	1520.3
Case 5	Lr (m)	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
	0.30%	80.3	160.6	240.9	321.3	401.6	481.9	562.2	642.5	722.8	803.2
	0.50%	81.5	163	244.5	326	407.4	488.9	570.4	651.9	733.4	814.9
	1.00%	84.4	168.9	253.3	337.7	422.1	506.6	591	675.4	759.8	844.3
	2.00%	90.3	180.6	270.9	361.2	451.5	541.8	632.1	722.4	812.7	903

Table 9는 최근 도심지 소형차 전용터널에 계획되고 있는 000 터널에 대한 입력제원 자료를 나타내고 있다. 검토를 위해 도심지 터널에 대한 정체시 교통밀도(D₀)는 165 pcu/km.lane를 적용하고, 터널 내 허용농도 기준은 Table 10과 같이 적용하였다. 다만 현재 국토교통부에서 도시지역 지하도로 설계지침(2016)에서 터널 연장이 15 km를 초과하는 구간은 FED 값(0.1)을 고려하여 CO와 NO_x의 허용농도 기준을 변경할 것을 권고하고 있지만 본 검토에서는 제외하였다. 소형차 전용터널의 내공단면적은 약 40 m² 정도이므로 최대 소요환기량(Qreq_max)은 400 m³/s 라인을 기준으로 검토하였다.

Table 9. Traffic data for small vehicle tunnel (example)

Type	Passenger car		Bus		Truck				AADT (veh/day)	HGV (%)
	G	D	Small	Large	Small	Medium	Large	Special		
Traffic	1,453	968	2,059	0	2,942	0	0	0	29,422	0.0
Comp.(%)	49.8	33.2	7	0	10	0	0	0	100	

Mmax = 2,000 pcu/h.lane, Do = 165 pcu/km.lane

Table 10. Permissible concentration limits for small vehicle tunnel

Vehicle speed	10 km/h	20 km/h	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60 km/h	70 km/h	80 km/h
PM (1/m)	0.009	0.007	0.007	0.007	0.005	0.005	0.005	0.005
CO (ppm)	50							
NO _x (ppm)	15							

Table 11에는 소형차 전용터널 기준으로 적용한 Case 2 (현행 기준)와 Case 5 (향후 예상기준)에 대한 환기특성도 테이블 값을 나타내고 있다. 현행기준(Case 2)에 따르면 종단경사가 0.3%일 경우는 최대 16 km 까지, 종단

경사가 0.5~1.0%가 되면 15 km 까지, 종단경사가 2%일 경우는 최대 14 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석되는데, 가상 환기기준(Case 5)을 적용하면, 종단경사 0.3%일 경우는 최대 20 km 까지, 종단경사 0.5%일 경우는 최대 19 km 까지, 종단경사 1.0%일 경우는 최대 18 km 까지, 종단경사 2%일 경우는 최대 16 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석된다. 따라서 일반적인 2차선 소형차 전용터널을 기준으로 현행 기준(Case 2)에 따른 최대 소요환기량은 약 30 m³/s 정도로 분석되며, 향후기준(Case 5)에는 약 25 m³/s 정도 낮아질 것으로 예상된다.

Table 11. Qreq contour map's table (at 400 m³/s)

	Lr (m)	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
	Case 2	0.30%	239.6	263.5	287.5	311.5	335.4	359.4	383.3	407.3	431.3	455.2
0.50%		251.6	276.8	301.9	327.1	352.2	377.4	402.6	427.7	452.9	478	503.2
1.00%		261.7	287.8	314	340.2	366.3	392.5	418.7	444.8	471	497.2	523.3
2.00%		281.8	310	338.2	366.3	394.5	422.7	450.9	479.1	507.2	535.4	563.6
Case 5	Lr (m)	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000
	0.30%	193.1	212.4	231.7	251	270.3	289.6	308.9	328.2	347.5	366.8	386.2
	0.50%	208.7	229.6	250.5	271.3	292.2	313.1	333.9	354.8	375.7	396.6	417.4
	1.00%	221.5	243.6	265.8	287.9	310.1	332.2	354.4	376.5	398.7	420.8	442.9
	2.00%	247	271.7	296.4	321.1	345.8	370.5	395.2	419.9	444.6	469.3	494

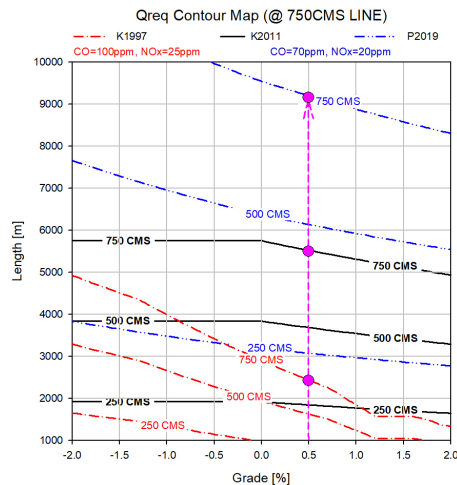


Fig. 5. Qreq contour map (HGV = 25.2%)

Fig. 5는 한국도로공사(1997), 도로설계편람(2011), WRA (PIARC) (2019)의 환기설계기준을 적용할 경우에 대한 소요환기량 특성도(Qreq CM)을 나타내고 있다. 내공단면적(Ar)이 75 m²이고, 종단경사(Gr)가 +0.5%인

2차로 도로터널의 경우, 종류식 환기방식의 적용한 가능한 최대 터널연장은 약 2.5 km (1997년)를 기준으로 현 기준(2011)은 약 2배 이상, 향후 WRA (PIARC) (2019)를 적용할 경우, 약 3.5배 이상 증가하여 약 9 km 까지 가능할 것으로 예상된다. 이는 최근 20년간 국내 도로터널의 환기설계기준에 따른 소요환기량의 변천을 나타내고 있으며, 이러한 추세는 향후 교통량, 대형차혼입률, 제작차 배출허용기준 등의 변화에 따라 종류식 환기방식의 적용이 가능한 터널연장은 더욱 증대될 것으로 예상된다.

4. 결론

본 연구에서는 현행 환기설계기준(2011) 대비 환경부의 제작차 배출허용기준(2016/17 이후)과 WRA (PIARC) 2019년 보고서에 제시한 각종 보정계수(비엔진 배출량, 속도경사 보정계수 등)를 반영하여 환기설계기준의 변천 내용을 정리하였다. 이에 따라 일반적인 도로터널 및 소형차 전용터널에 대한 소요환기량의 변화를 분석하였다. 이상의 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 현행 국토교통부 도로설계편람(2011)의 터널환기 설계기준은 환경부의 ‘제작차 배출허용기준(2006 이후)’을 근거하고 있으며, 환경부의 최신 기준에서는 2016/17년 이후의 제작차 배출허용기준을 제시하고 있다. 또한 환경부에서는 2012년 이후 ‘자동차 차종별 배출계수’를 제시하였으나, 2017년 이후 부터는 교통환경연구소(국립환경과학원)의 문제제기에 따라 배출계수는 삭제한 상태에 있다.
2. WRA (PIARC) (2004, 2012, 2019)의 권고기준에는 비차량(엔진) 배출분진을 제시하고 있으며, 2019년 발표된 2019R02EN에서는 일방향 터널과 양방향 터널에 대한 비엔진 배출분진 값을 구분하여 제시하고 있다. 소형차량의 경우, 2004년 대비 2012년은 약 1.47배 증가, 2019년의 일방향 터널은 0.74배 감소, 양방향 터널은 1.25배 증가하였고, 대형차량의 경우, 2004년 대비 2012년은 약 1.07배 증가, 2019년의 일방향 터널은 0.97배 감소, 양방향 터널은 1.11배 증가한 것으로 나타나고 있다.
3. 경사도 +1%를 기준으로 향후 환기설계기준이 환경부의 최신 제작차 배출허용기준과 WRA (PIARC)의 최신 (2019) 보정계수를 적용할 경우, 현행 설계기준(2011) 대비 매연(PM)은 약 46% 수준, CO는 약 83% 수준, NOx는 약 21% 수준으로 분석되었다.
4. 현행기준 의하면 종단경사가 1% 이내일 경우는 최대 5 km 까지, 종단경사가 2%가 되면 4 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석되나, 반면 WRA (PIARC)의 2019년 최신 환기기준을 적용하면, 종단경사 0.5% 이내에서 최대 9 km 까지, 종단경사 1~2%에서는 최대 8 km 까지 종류식 환기방식의 적용이 가능한 것으로 분석된다.
5. 일반적인 2차선 도로터널($Ar = 75 \text{ m}^2$, $Gr = 0.3\sim 2\%$) 기준으로 현행 기준에 따른 단위 km 당 최대 소요환기량은 약 $150 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 2 \text{ lane}$ 정도로 분석되며, 향후기준(Case 5)에는 약 $90 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 2 \text{ lane}$ 정도로 낮아질 것으로 예상되며, 일반적인 2차선 소형차 전용터널($Ar = 40 \text{ m}^2$)을 기준으로 현행 기준(Case 2)에 따른 단위 km 당 최대 소

요환기량은 약 $30 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 2 \text{ lane}$ 정도로 분석되며, WRA (PIARC)의 향후기준을 따를 경우, 약 $25 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 2 \text{ lane}$ 정도로 낮아질 것으로 예상된다.

감사의 글

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

References

1. Kim, H.G., Kim, H.S., Kim, J.D., Lee, C.W. (2003), "A study on a graphical method for determining the characteristics of jet-fan ventilation system using the contour map of required ventilation rate in local highways", Tunnel and Underground Space, Vol. 13, No. 3, pp. 235-243.
2. Kim, H.G., Ryu, J.O., Song, S.H., Jung, C.H. (2017) "A study on the effects of exhaust emission standards on the required ventilation rate in vehicle tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 19, No. 3, pp. 409-420.
3. Kim, H.G., Song, S.H., Kim, N.Y., Lee, C.W. (2007), "The effects of introduction of diesel passenger cars on the ventilation requirements for road tunnels", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 9, No. 3, pp. 309-321.
4. Korea Highway Corporation (1997, 2002), Design criteria for highway tunnel ventilation facilities.
5. Ministry of Government Legislation (2013, 2017), Regulations on the method of calculating the total emission of pollutants from the law, the Ministry of the Environment Notice.
6. Ministry of Government Legislation (2019), Air environment conservation act implementation regulations, Ministry of Environment.
7. Ministry of Land Transportation (2011), Road design manual (617. ventilation facility).
8. Ministry of Land Transportation (2015), Regulations on the structure and facility standards of roads.
9. Ministry of Land Transportation (2016), Urban underground design guidelines.
10. WRA (PIARC) (1991), Technical committee in road tunnels, 19.05.B, pp. 24-35.
11. WRA (PIARC) (1995), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, 05.02.B, pp. 24-35.
12. WRA (PIARC) (2004), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, (C5) 05.14.B, pp. 39-41.
13. WRA (PIARC) (2012), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee C4, pp. 33-34.
14. WRA (PIARC) (2019), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee D.5, pp. 22-32.