

오염물질 현장측정 및 사례조사를 통한 도로터널 환기기준의 적정성에 관한 연구

김효규^{1*} · 백두산² · 유지오³

¹정회원, (주)주성지앤비 대표이사

²정회원, (주)주성지앤비 대리

³정회원, 신한대학교 자동차공학과 교수

An appropriateness review on the road tunnel ventilation standards by pollutants site measurement and case study

Hyo-Gyu Kim^{1*} · Doo-San Baek² · Ji-Oh Yoo³

¹CEO, JS G&B INC.

²Researcher, JS G&B INC.

³Professor, Dept. of Automotive Engineering, Shin-Han University

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

Abstract

In this study, a series of site measurement of particulate and gases pollutants at five tunnels were carried out along with case studies to review the suitability of the current road tunnel ventilation design standards. Previous studies by other researchers have shown that the ratios of the level of measurement to the standard were 27.9%, 1.6% and 3.4% for TSP, CO and NO_x, respectively. Those measured in this site study shows even lower ratios; the ratios were 2.6%, 0.8% and 0.3%, for TSP, CO and NO_x, respectively. The particle size analysis of TSP for the five tunnels shows that PM₁₀ including tire wear and re-suspended road dust exceeded 20.4%. This implies that non-exhaust particulate matter must be taken into account, since the current design standards for the particulate matter (visibility) include only the engine emission. Based on the recent research results, for vehicle emission rate and slope-speed correction factors, revision of ventilation design standards for pollutants is required. WRA (PIARC) also emphasizes the necessity of the ventilation design standards for pollutants. In addition, enactment of a new road tunnel ventilation system operation standard or guideline is strongly recommended when considering the low operating rate of the ventilation system with jet-fans.

Keywords: In-situ measurement, Tunnel pollutants, CO, NO_x, PM (TSP)

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
22(3)323-335(2020)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2020.22.3.323>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received April 17, 2020

Revised May 8, 2020

Accepted May 12, 2020



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 © 2020, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

본 연구에서는 현행 도로터널의 환기설계기준의 적정성을 검토하기 위하여 사례조사를 수행하고, 5개 터널을 대상으로 입자상 및 가스상 물질의 농도를 현장측정 하였다. 사례조사 결과는 설계기준 대비 TSP (가시도)는 27.9%, CO는 1.6%, NOx는 3.4% 수준으로 분석되었고, 현장측정 결과는 각각 2.6%, 0.8%, 0.2%의 수준에 불과하였다. 또한 5개 터널에 대한 입자상물질(TSP)의 입경분석 결과, 타이어 마모, 재부유 분진 등의 입자라 할 수 있는 PM10 이상의 입경의 영역은 20.4%로 나타났다. 따라서 현행 도로터널 환기설계 기준으로 제시된 입자상물질은 엔진배출량 외에 비엔진배출량에 대한 고려가 반드시 필요하며, 최근의 연구결과를 통한 제작차 오염물질 배출량 및 경사속도 보정계수 등을 적용하여 대상 오염물질에 대한 설계기준의 합리적인 개정이 요구되며 WRA (PIARC)에서도 환기설계 기준의 개정 필요성을 권고하고 있다. 현행 터널 내 낮은 환기설비(제트팬) 가동율을 고려할 경우 향후 터널 내 운영상 관리기준의 신설에 대한 필요성이 제기된다.

주요어: 현장측정, 도로터널 오염물질, 일산화탄소, 질소산화물, 입자상물질(총부유분진)

1. 서론

최근 산간지방의 교통효율 증대와 도심지의 미관 등의 다양한 이유로 도로터널의 건설이 지속적으로 증대되고 있다. 이와 더불어 최근 국가경쟁력 성장에 따른 삶의 질 증대에 따라 주변 환경오염에 대한 관심이 많아지고 있는 실정이다. 서울시 서부간선 및 제물포로 지하도로 사업의 경우, 노선상 위치한 환기탑의 오염물질 배출로 인하여 주민들의 민원으로 인해 공사가 중지되는 사례도 발생하는 만큼 최근 미세먼지 등의 환경문제가 대두됨에 따라 터널 근처 주민들의 민원 역시 빈번하게 발생하고 있다. 이에 따라 도로터널 내 오염물질 측정과 비롯하여 터널 내 환경에 대하여 연구가 지속적으로 진행 중이다(Lee et al., 2009; Kim et al., 2018).

터널에서 발생된 오염물질의 대한 관련 연구는 현재 사회적으로도 큰 이슈를 불러일으키고 있으며, 터널의 운영기관이라 할 수 있는 지자체 및 지방 국토관리청, 한국도로공사 등에서도 정기적으로 터널에서 발생하는 오염물질에 대하여 지속적으로 측정 및 모니터링을 수행하고 있다(BIHE, 2000~2002; 2010~2016; KEC, 2017). 터널의 오염물질은 현재 관련 법령에서 지정하고 있듯이 크게 입자상 물질과 가스상 물질로 구분되어진다. 입자상 물질은 터널 내 운행의 영향을 줄 수 있는 미세분진 등으로 구분되어진다. 가스상물질의 경우 CO와 NOx를 지칭하며, 각 물질별로 농도를 제한함으로써 관리를 하고 있는 상태이다.

본 연구에서는 이전 모니터링자료와 함께 5개 터널에서 측정된 실측결과를 바탕으로 외기오염물질에 따른 터널 내부 오염물질 변화 추이와 현행 도로터널 환기관련 기준에 따른 터널 내 오염물질의 현황을 비교·분석하였다 (MOLT, 2011).

2. 본 론

2.1 주요 터널의 오염물질 측정 현황

주요 터널에 대한 오염물질 측정 분석은 부산광역시 보건환경연구원에서 측정한 국도터널의 측정결과(BIHE, 2000~2002; 2010~2016)와 한국도로공사에서 측정한 고속도로터널의 측정결과(KEC, 2017)를 비교 분석하였다.

Table 1에는 2000년부터 2002년까지 부산시에서 측정한 입자상물질에 대하여 측정한 결과와 현재 도로설계 편람에서 제시 중인 TSP에 대한 가시도 환산값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Measurements of TSP and visibility in Busan

		Tunnel 1	Tunnel 2
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	2000	355	431
	2001	467	486
	2002	366	428
Visibility ^{a)} (m^{-1})	2000	0.0016	0.0020
	2001	0.0022	0.0023
	2002	0.0017	0.0020

a) Equation for conversion of TSP to visibility, $\text{Visibility} = \text{TSP} (\text{g}/\text{m}^3) * 4.64$ (MOLT, 2011)

표에서 보는 것과 같이 두 개 터널에 대한 가시도 값는 최대 0.002 m^{-1} 를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이는 현재 도로터널에 적용 중인 가시도의 기준인 $0.005\sim 0.009 \text{ m}^{-1}$ 를 초과하지 않아 현재 기준에 만족하는 결과를 보여주고 있다.

한편, Tables 2, 3에는 2010년부터 2016년까지 부산시에서 측정한 가스상물질(CO, NOx)에 대한 측정결과를 나타내었다. Tables 2, 3에 음영처리 되지 않은 터널은 현재 기계환기방식을 적용하고 있으며, 음영처리된 터널은 자연환기 방식을 적용하고 있다.

Table 2. Measurements of CO in Busan (unit: ppm)

	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
A tunnel	0.6	0.4	0.6	-	-	-	-
B tunnel	1.0	1.4	1.5	1.3	1.3	2.0	1.5
C tunnel	1.5	1.3	1.9	1.7	1.9	2.9	2.1
D tunnel	1.0	1.7	1.7	1.7	1.8	2.0	1.4
E tunnel	3.0	1.5	2.0	2.3	2.1	2.1	2.2
F tunnel	0.8	1.4	1.3	-	-	-	-

Table 2. Measurements of CO in Busan (unit: ppm) (continue)

	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
G tunnel	2.2	2.0	1.3	1.3	1.8	1.8	2.2
H tunnel	0.9	0.7	0.8	1.3	-	-	-
I tunnel	0.9	0.9	0.5	-	-	-	-
J tunnel	0.6	0.4	0.5	-	-	-	-
K tunnel	1.4	0.7	1.2	1.2	1.2	2.0	1.2
L tunnel	0.8	1.9	0.9	-	-	-	-
M tunnel	0.9	1.3	2.3	1.0	1.3	1.3	1.8
N tunnel	1.9	1.9	0.4	0.8	-	-	-
O tunnel	0.8	0.8	0.6	-	-	-	-
P tunnel	0.6	0.6	0.8	0.4	-	-	-
Q tunnel	0.5	0.5	0.4	0.7	-	-	-
R tunnel	0.5	0.5	0.6	1.4	-	-	-
S tunnel	0.4	0.4	0.6	0.5	-	-	-
T tunnel	1.2	1.2	1.0	0.7	-	-	-
U tunnel	0.6	0.6	0.6	0.4	-	-	-
V tunnel	1.3	1.3	0.4	0.4	-	-	-
W tunnel	0.6	0.6	0.7	0.5	-	-	-
X tunnel	1.0	1.0	0.5	-	-	-	-
Y tunnel	0.8	0.8	0.5	0.6	-	-	-

Table 3. Measurements of NOx in Busan (unit: ppm)

	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
A tunnel	0.295	0.291	0.302	-	-	-	-
B tunnel	0.965	0.765	1.356	0.786	1.114	1.575	1.825
C tunnel	0.144	0.633	1.872	1.338	1.085	2.383	2.311
D tunnel	0.713	0.646	0.688	0.925	0.823	1.832	0.926
E tunnel	2.091	0.624	0.929	1.054	1.094	1.122	1.017
F tunnel	0.676	0.498	0.810	-	-	-	-
G tunnel	1.048	1.095	0.685	0.570	0.871	1.007	1.924
H tunnel	0.547	0.443	0.698	0.582	-	-	-
I tunnel	0.406	0.277	0.566	-	-	-	-
J tunnel	0.309	0.408	0.317	-	-	-	-
K tunnel	0.564	0.601	0.709	1.027	0.906	1.507	0.941
L tunnel	0.760	0.416	0.566	-	-	-	-
M tunnel	0.624	0.597	1.578	0.666	0.446	0.776	0.755

Table 3. Measurements of NOx in Busan (unit: ppm) (continue)

	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
N tunnel	0.389	0.388	0.321	0.504	-	-	-
O tunnel	0.078	0.216	0.158	-	-	-	-
P tunnel	0.397	0.470	0.359	0.519	-	-	-
Q tunnel	0.080	0.086	0.265	0.265	-	-	-
R tunnel	0.116	0.190	0.226	0.516	-	-	-
S tunnel	0.459	0.246	0.509	0.336	-	-	-
T tunnel	0.358	0.394	0.536	0.640	-	-	-
U tunnel	0.089	0.123	0.269	0.143	-	-	-
V tunnel	0.145	0.145	0.300	0.212	-	-	-
W tunnel	0.244	0.547	0.465	0.441	-	-	-
X tunnel	0.264	0.570	0.477	-	-	-	-
Y tunnel	0.099	0.121	0.148	0.578	-	-	-

각 그림과 표에서 보는 것과 같이 CO 농도의 경우에는 E터널이 비교적 높게 나타나고 있으며, A터널, J터널, S터널이 비교적 낮게 나타나고 있다. CO농도의 최대치는 E터널의 16년도 측정결과로 3.0 ppm이며 최소치는 P터널, N터널, Q터널, U터널, V터널의 13년, 14년도 측정결과로 0.4 ppm이며, 모두 자연환기터널에서 기록되고 있다. 또한 전체 평균치는 1.2 ppm으로 도로설계편람에 제시된 기준인 70 ppm 보다도 낮은 것으로 나타나고 있다.

NOx 농도는 터널별로는 C터널이 가장 높게 나타나고 있으며, O터널, Q터널이 상대적으로 낮은 값을 보이는 것을 나타나고 있다. 측정기간 동안에 최대농도는 C터널의 11년도 측정결과로 2.383 ppm을 나타나고 있으며, 전체평균농도는 0.659 ppm으로 나타나고 있어, 도로설계편람에 제시된 기준인 20 ppm보다 상당히 낮은 값을 보이고 있다. 또한, CO농도와 NOx농도의 분포에서 볼 수 있듯이 상대적으로 자연환기를 적용하는 터널이 기계환기를 적용하는 터널보다 가스상물질의 농도가 낮은 것으로 나타났다. 일반적으로 도로터널의 기계환기의 용량은 교통량의 최대를 기준으로 산정하여 일반적으로 도로터널 기계환기시설의 용량이 부족한 사례는 극히 드물기 때문에, 기계환기시설의 용량부족보다 기계환기시설의 가동률에 의해 발생하는 것으로 예측되어진다.

다음으로 한국도로공사(KEC, 2017)에서 측정한 고속도로 터널의 측정 결과는 Tables 4, 5에 나타내었다. 측정 대상인 5개 터널은 모두 기계환기를 적용하고 있으며, 각 표에서 보는 것과 같이 도로터널 내 가스상물질(CO, NOx)의 농도는 현재 도로설계편람에서 제시하고 있는 CO: 70 ppm, NOx: 20 ppm보다 낮은 수준을 나타내고 있다. 하지만 입자상물질(PM10, PM2.5)의 경우 교통량에 따른 일정 비율의 오염도 수준은 영향이 크게 없지만 터널 연장이 길수록 오염농도가 증가하는 경향을 나타냄에 따라 터널 연장과 상관성이 높은 것으로 분석된다. 이는 재비산먼지 등과 같은 터널 내 환경적 요소에 의해 추가적인 배출이 원인인 것으로 예측되어진다고 서술하고 있다(KEC, 2017).

Table 4. Measurements at the first visit

	Tunnel ①	Tunnel ②	Tunnel ③	Tunnel ④	Tunnel ⑤
CO (ppm) (Ave.)	1.1~2.3 (1.7)	1.0~3.3 (1.7)	0~0.7 (0.1)	1.1~2.3 (1.3)	0~4.4 (1.9)
NOx (ppb) (Ave.)	411~1,553 (883)	365~1,561 (939)	131~786 (402)	11.3~283 (101)	222~2,756 (1,198)
PM10 (µg/m ³) (Ave.)	N.D	31~153 (68)	42~164 (85)	41~106 (71)	16~169 (88)
PM2.5 (µg/m ³) (Ave.)	12~60 (34)	29~96 (50)	21~55 (32)	14~64 (32)	17~114 (64)
Length (m)	1,500	3,300	3,300	1,100	4,600
Traffic volume (veh/day)	74,015	18,886	13,645	5,524	8,967
Ventilation type	Mechanical ventilation				

Table 5. Measurements at the second visit

	Tunnel ①	Tunnel ②	Tunnel ③	Tunnel ④	Tunnel ⑤
CO (ppm) (Ave.)	0.3~1.5 (0.6)	0.4~2.0 (0.8)	0.5~2.3 (0.9)	0.3~2.4 (0.7)	0~3.6 (1.3)
NOx (ppb) (Ave.)	381~1,497 (884)	374~1,547 (1,016)	53~1,155 (318)	16~635 (113)	384~3,274 (1,235)
PM10 (µg/m ³) (Ave.)	45~92 (66)	36~81 (52)	41~140 (87)	26~69 (47)	60~152 (99)
PM2.5 (µg/m ³) (Ave.)	38~90 (60)	14~67 (36)	52~150 (91)	22~55 (32)	38~112 (65)
Length (m)	1,500	3,300	3,300	1,100	4,600
Traffic volume (veh/day)	76,395	19,580	13,497	7,677	8,682
Ventilation type	Mechanical ventilation				

이와 같이 현재 도로터널의 오염물질에 대한 모니터링 자료를 비교해보면 현재 도로설계편람에서 제시하고 있는 오염물질의 규제치 보다 매우 낮은 농도를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 1에는 2013년도 5개 도로터널의 환기설비(제트팬)의 연평균 가동율을 분석한 결과를 나타내었다. 연평균 가동율은 최대가 2.24%이며, 터널에 따라서 가동시간이 일일 10분 이하인 경우가 거의 대부분으로 나타나고 있다. 이러한 환기량 및 환기기 용량의 과다산정원인은 현행 환기설계를 위해 차량종별 오염물질별 기준배출량은 최신 기준이 아닌 2012년 제작차 허용배출량을 기준으로 산정하고 있기 때문이며, 최근 자동차의 오염물질 배출량 규제강화 및 자동차 제작기술의 발전을 반영하지 못하고 있기 때문으로 판단된다.

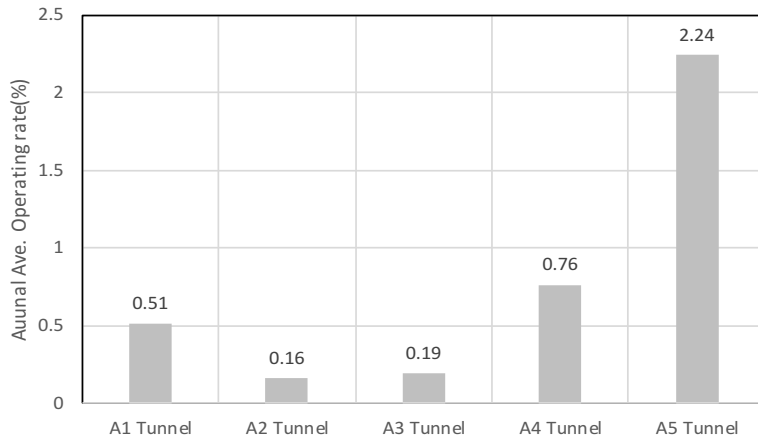


Fig. 1. Annual average operating rate

또한 터널 내 차량수 산정 시 도로용량에 근거한 설계시간 교통량을 적용하여 터널 내 차량수를 과다 산정하는 것이 원인으로 판단된다. 따라서 도로터널 환기설계기준 정립 과정에서 최신의 제작차 오염물질 배출량 및 경사 속도 보정계수의 적용이 필요한 것으로 분석되며, 도로터널과 같이 정속 주행 시 자동차 오염물질 배출량 분석 자료의 분석을 통한 오염물질 배출량 재산정이 필요한 것으로 분석된다. 또한 터널 내 차량수 산정을 도로용량에 근거하는 것을 지양하고 추정설계시간 교통량을 적용하는 것에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

추가적으로 설계기준 이외에 운영상 관리기준의 신설에 대한 필요성이 제기되는 부분이다. 즉, 기 설치된 환기 설비의 적정 가동율 통해, 현행 터널 내 환경을 보다 쾌적하게 유지할 수 있다는 시사점을 제공하고 있다.

2.2 도로터널 오염물질 현장측정

2.2.1 측정개요

현재 도로터널 내 오염물질의 현황을 파악하기 위하여 본 연구에서는 국도터널, 고속도로터널, 도심지터널에 대한 오염물질을 현장측정 하였다. 총 5개 터널에 대하여 조사를 수행하였으며, 측정대상 터널 모두 기계환기를 적용 중이다. 이에 대한 측정대상은 Table 6에 나타내었다.

Table 6. List of tunnels for site measurement

Tunnel	Location	Measuring date	Note
Tunnel I	Gyeonggi-do	03.15~03.16	National road
Tunnel II	Gyungsangnam-do	03.22~03.23	Highway road
Tunnel III	Gyungsangbok-do	03.26~03.27	Highway road
Tunnel IV	Gyeonggi-do	03.29~03.30	Urban road
Tunnel V	Seoul	04.04~04.05	Urban road

2.2.2 측정방법

터널 내 오염물질의 측정을 위하여 24시간 연속측정을 수행하였으며, 측정위치는 터널 내부 2개소(중앙부 및 출구부)와 터널 입출구에 각각 1개씩 2개소를 설치하여 총 4개소에 대하여 터널 내·외부의 오염물질 농도를 측정하였다. 측정항목은 TSP, PM10, PM2.5, CO, NOx를 대상으로 하였고 각 측정 개소마다 풍향, 풍속, 온도, 습도, 기압 등의 환경변수를 동시에 측정하였다.

또한, 모든 측정 장비는 통신을 통하여 관리동 베이스 캠프로 수신되도록 중계기를 설치하여 자료를 취득하였다. Tunnel I의 경우 터널 내 차량의 통행 대수(교통량) 및 차속을 측정하기 위해 교통량 측정 카메라를 설치하여 녹화하여 교통량을 실시간으로 측정하였다.

측정장소별 측정기기 위치는 주행차로측에는 오염물질 측정장치, 교통량 측정용 카메라, 차량주행속도 측정기를 설치하였으며, 터널 외부에는 환경변수(기압, 온·습도, 풍향, 풍속)측정장치, 오염물질 측정장치를 설치하여 터널 내·외의 오염물질의 농도를 측정하였다. 이에 대한 측정 개요도와 측정장비 제원 및 측정터널을 Figs. 2, 3 및 Table 7에 나타내었다.

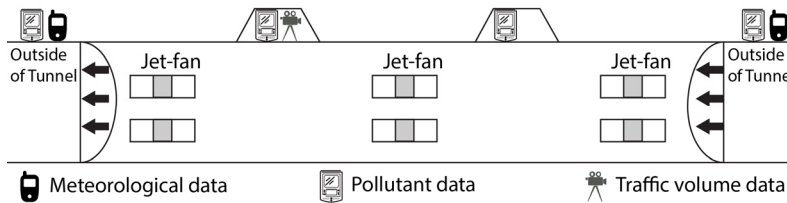


Fig. 2. Measurement layout

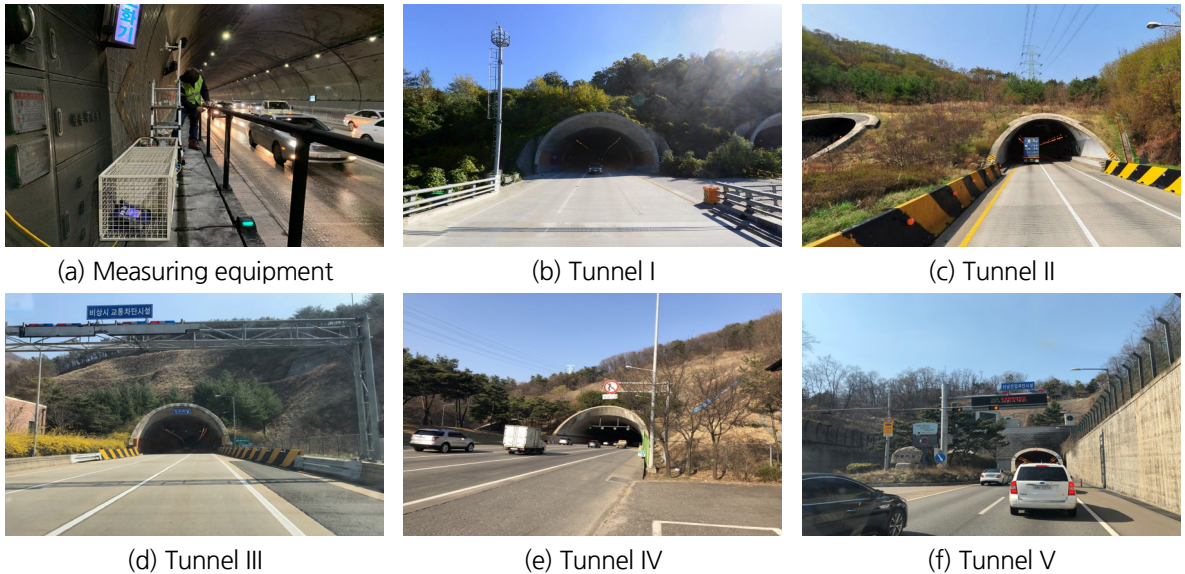


Fig. 3. Pictures of measurement instruments and tunnel portals

Table 7. Measurement equipment specification

Category	Parameter		Specification
CO	Sensitivity	nA/ppm in 2 ppm CO	220 to 375
	Response time	t ₉₀ (s) from zero to 10 ppm CO	<20
	Range	ppm limit of performance warranty	0~500
NOx	Sensitivity	nA/ppm at 2 ppm NOx	-175 to -450
	Response time	t ₉₀ (s) from zero to 2 ppm NOx	<60
	Range	ppm NOx limit of performance warranty	0~20
PM	Particle size range		0.1~15 µm
	Aerosol concentration range		0.001~150 mg/m ³
	Resolution		±0.1% of reading or 0.001 mg/m ³ , whichever is greater

2.2.3 측정결과

Fig. 4에는 현장측정을 진행한 5개 도로터널에 대한 TSP, CO, NOx의 측정결과를 나타내었다. 입자상 물질인 TSP의 최대치는 Tunnel I에서 824 µg/m³이 측정되었으며, 이를 가시도로 환산할 경우 0.004 m⁻¹임에 따라 도로 설계편람에서 제시하고 있는 규제치인 0.005~0.009 m⁻¹를 초과하지 않는 것으로 나타났다. Tunnel II에서 측정된 TSP의 최대값은 353 µg/m³ (0.002 m⁻¹)이고, Tunnel III에서 측정된 TSP의 최대값은 185 µg/m³ (0.001 m⁻¹)이고, Tunnel IV에서 측정된 TSP의 최대값은 467 µg/m³ (0.002 m⁻¹)이고, Tunnel V에서 측정된 TSP의 최대값은 134 µg/m³ (0.001 m⁻¹)로 나타났다.

또한, 가스상물질(CO와 NOx)의 측정결과는 Tunnel I에서 CO농도의 최대값은 1.9 ppm, NOx농도의 최대값은 0.07 ppm으로 나타났으며, Tunnel II에서 CO농도의 최대값은 0.9 ppm, NOx농도의 최대값은 0.025 ppm으로 나타났으며, Tunnel III에서 CO농도의 최대값은 1.4 ppm, NOx농도의 최대값은 0.089 ppm으로 나타났으며, Tunnel IV에서 CO농도의 최대값은 0.9 ppm, NOx농도의 최대값은 0.056 ppm으로 나타났으며, Tunnel V에서 CO농도의 최대값은 1.4 ppm, NOx농도의 최대값은 0.043 ppm으로 나타나 도로터널 환기관련 기준의 규제치보다 상당히 낮은 농도를 나타내고 있는 것을 확인 할 수 있다.

이처럼 현장측정의 결과 역시 지자체 및 한국도로공사에서 측정한 결과와 같이 각 오염물질의 차이는 존재할 수 있으나, 도로터널 환기관련 규제치보다 상당히 낮은 농도를 나타내었다.

한편 Fig. 5에는 측정대상의 입자상 물질을 TSP에 대한 입경별 비율을 나타내었다. 일반적으로 차량의 연소 시 발생하는 입경 이외의 분포영역 즉, PM 2.5 이상의 영역은 평균 35.7%로 나타났으며, 타이어 마모, 재부유 분진 등의 입자라 할 수 있는 PM10 이상의 입경의 영역은 20.4%로 나타났다.

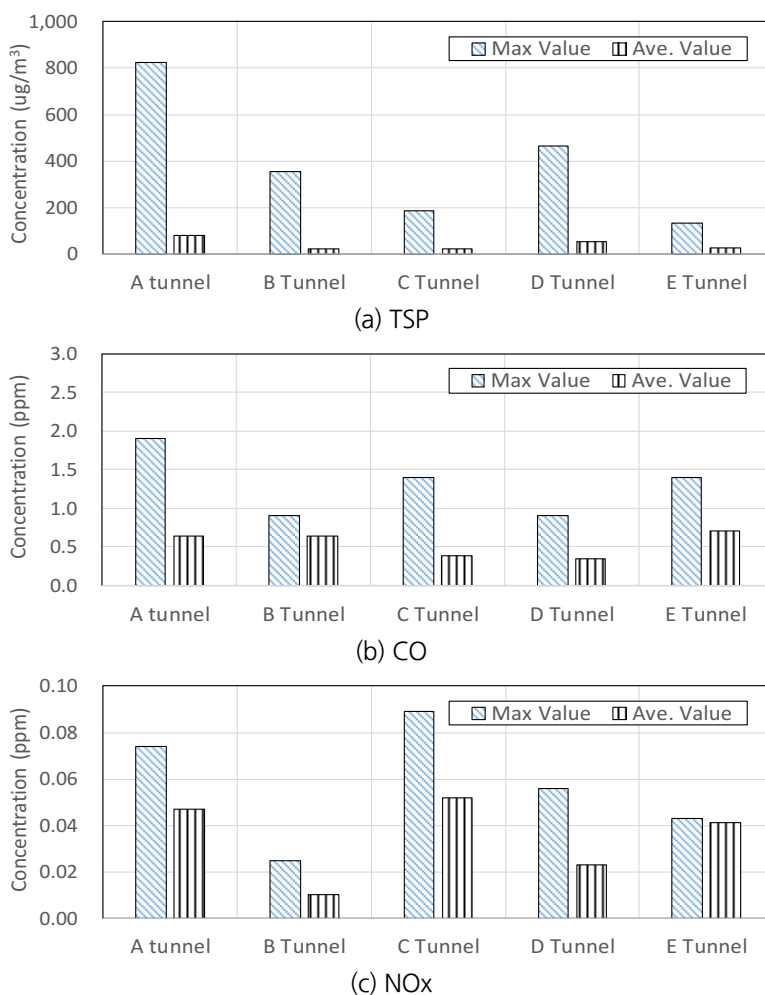


Fig. 4. Site measurements in Tunnel I~V

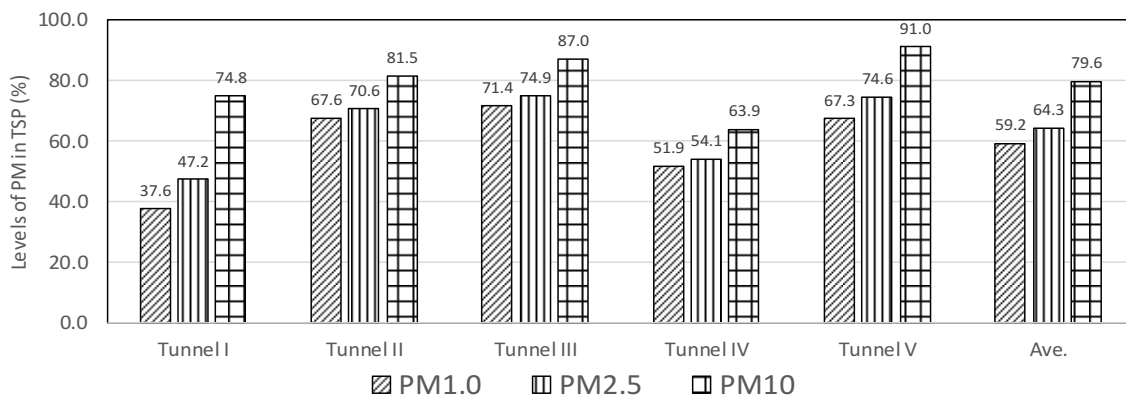


Fig. 5. Levels of PM1.0, PM2.5 and PM10 in TSP

2.3 대기농도와 교통량에 따른 터널 내부 농도의 변화

Fig. 6에는 Tunnel I의 내·외부에서 측정된 PM10와 교통량에 대한 결과를 보다 자세히 나타내었다. 측정기간 중 자정에서부터 새벽 04시까지의 결과를 관찰하면 교통량은 감소하지만 터널 내부의 PM10 농도는 지속적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 이와 함께 터널 외부의 PM10농도 역시 함께 증가하는 것으로 나타났다. 또한 정오에서부터 오후 3시까지의 결과는 교통량은 지속적으로 증가하지만, 터널 내부와 터널 외부의 PM10농도는 감소하는 양상을 보이고 있다. 이러한 결과는 터널 내부의 오염물질의 농도는 주행하는 차량에서 배출되는 오염물질에 따라 변화하기도 하지만, 외부에서 유입되는 오염물질에도 즉각적으로 영향을 받을 수 있음을 의미한다.

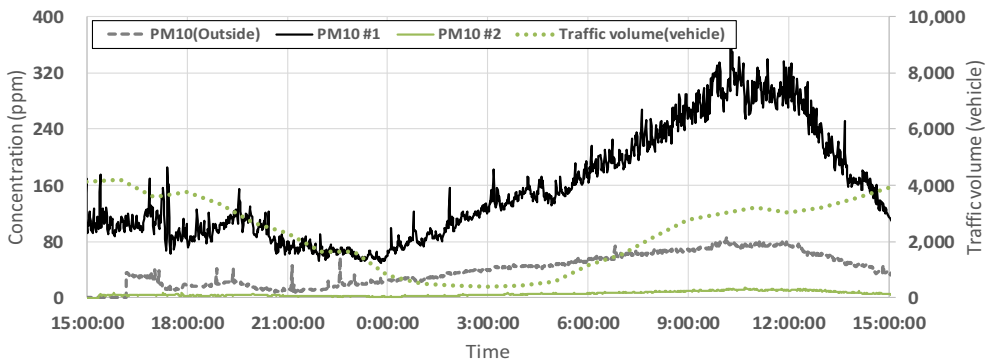


Fig. 6. Profiles of PM10 concentration and traffic volume inside and outside Tunnel I

2.4 오염물질 농도 현황과 설계기준값의 비교

Tables 8, 9에는 본 연구에서 인용 및 측정된 도로터널 내 오염물질의 모니터링 결과와 도로터널 환기관련 기준의 규제치를 정리하여 나타내었다. 모든 터널에서 현재 가스상물질인 CO와 NOx의 규제치(CO: 70 ppm, NOx: 20 ppm)를 상회하는 터널은 전무하였으며, 입자상물질의 측정결과 역시 동일한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 현재 도로터널 환기관련 기준의 규제치는 도로용량의 최대치를 기준으로 산정되기 때문이며, 이와 함께 소요환기량을 산정하는 배출량과 각종 계수들이 최신화 되지 못했기 때문으로 분석된다. 현재 도로터널의 환기시설 설계에 주로 참고 되고 있는 도로설계편람 역시 1991, 1995, 2004, 2012년에 발행된 WRA의 보고서(WRA, 1991; 1995; 2004; 2012)를 기준으로 작성되어있기 때문이며, 최근 WRA에서는 2019년 보고서를 새로 제시함에 따라 관련 인자를 개정하였으며(WRA, 2019), 환경부에서도 지속적으로 차량의 기준배출량을 개정하고 있는 추세이다(MOE, 2019). 이와 관련 하여서는 Kim and Lee (2019)가 보다 자세히 분석하고 있으며, 이와 관련되어 도로터널 오염물질 등 도로터널 환경에 대한 지속적인 현장검증이 필요 할 것으로 사료된다.

Table 8. Road tunnel pollutant measurements in studies by BIHE and KEC

Category	Standard	BIHE (2000~2016)	KEC (2017)
CO (ppm) (Ave.)	70	0.4~3.0 (1.2)	0.0~4.4 (1.1)
NOx (ppm) (Ave.)	20	0.078~2.383 (0.659)	0.011~3.274 (0.709)
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Ave.)	1,080~1,940 ^{a)}	335~485 (422)	-

a) Visibility standard ranges from 0.005 to 0.009 m⁻¹ when converted from TSP

Table 9. Summary of the site measurement results

Category	Standard	Tunnel I	Tunnel II	Tunnel III	Tunnel IV	Tunnel V
CO (ppm) (Ave.)	70	0.3~1.9 (0.64)	0.5~0.9 (0.64)	0.3~1.4 (0.39)	0.1~0.9 (0.35)	0.4~1.4 (0.70)
NOx (ppm) (Ave.)	20	0.015~0.074 (0.047)	0.000~0.025 (0.010)	0.000~0.089 (0.052)	0.000~0.056 (0.023)	0.021~0.043 (0.041)
TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Ave.)	1,080~1,940 ^{a)}	14~824 (78)	4~353 (22)	6~185 (22)	6~467 (51)	5~134 (25)

a) Visibility standard ranges from 0.005 to 0.009 m⁻¹ when converted from TSP

3. 결론

본 연구에서는 도로터널 오염물질에 관하여 사례조사와 현장측정을 통해 현재 도로터널 환기 관련 기준에서 제시하고 있는 입자상물질과 가스상물질의 농도를 모니터링 및 분석하였고, 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 도로터널 환기 관련 기준에서 규제하고 있는 입자상물질과 가스상물질에 대한 사례조사 결과는 설계기준 대비 TSP (가시도)는 27.9%, CO는 1.6%, NOx는 3.4% 수준으로 분석되었고, 현장측정 결과는 각각 2.6%, 0.8%, 0.2%의 수준에 불과하였다.
2. 현장측정을 통한 입자상물질의 입경분석 결과 타이어마모, 재부유 분진 등의 입자라 할 수 있는 PM10이상은 TSP를 기준으로 약 20.4% 정도로 분석됨에 따라 환기설계 시 비엔진배출량의 고려가 반드시 필요하다.
3. 또한 도로터널 내 오염물질의 농도는 터널 내 교통량 뿐 아니라 외부 공기질에도 민감하게 영향을 받으므로, 현행 낮은 환기설비의 가동율을 효율적으로 관리하기 위해 운영상의 관리기준의 신설이 필요성이 제기된다.
4. 최근 도로터널 환기와 관련된 연구결과 등을 준용 및 검토하여 현재 국내적용 중인 도로터널 환기설계 기준의 최신화 및 관련 설계인자의 개정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의글

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

저자 기여도

김효규는 연구개념 및 설계, 원고작성을 하였고, 백두산은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 유지오는 데이터 및 원고 검토를 하였다.

References

1. BIHE (2000~2016), Report of the Busan institute of health and environment in Busan metropolitan city, Busan Institute of Health and Environment.
2. KEC (2017), A study on the analysis of air quality and the efficient operation of ventilation facilities in highway tunnel, Korea Expressway Corporation.
3. Kim, H.G., Choi, P.G., Lee, H.H., Baek, D.S., Na, K.H. (2018), “The estimation of the wall friction coefficient in tunnels by in-situ measurement”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 20, No. 2, pp. 405-421.
4. Kim, H.G., Lee, C.W., (2019), “A study on the effects of changes in the estimating criteria for ventilation requirements in road tunnels”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 6, pp. 779-793.
5. Lee, C.W., Kim, S.H., Gil, S.W., Cho, W.C., (2009), “A case study for prediction of the natural ventilation force in a local long vehicle tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 4, pp. 395-401.
6. MLOT (2011), Road design manual (617. ventilation facility), Ministry of Land Transportation.
7. MOE (2019), Air environment conservation act implementation regulations, Ministry of Environment.
8. WRA (PIARC) (1991), Technical committee in road tunnels, 19.05.B, pp. 24-35.
9. WRA (PIARC) (1995), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, 05.02.B, pp. 24-35.
10. WRA (PIARC) (2004), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, (C5) 05.14.B, pp. 39-41.
11. WRA (PIARC) (2012), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee C4, pp. 33-34.
12. WRA (PIARC) (2019), Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation, PIARC Technical Committee D.5, pp. 22-32.