



기술자료

차량 배출량 산정을 위한 터널유동계수 연구

Determination of Tunnel Flow Coefficient for Car Emission Rate

김은영, 정택호¹⁾, 서석준³⁾, 정성운²⁾, 김선문¹⁾, 이승환¹⁾, 김정화¹⁾, 이종태¹⁾, 이용민, 송명기⁴⁾, 최운선⁴⁾, 박규태⁵⁾, 김경훈⁵⁾, 이태형⁵⁾, 배민석⁴⁾*

국립환경과학원 대기환경연구과, ¹⁾국립환경과학원 교통환경연구소,
²⁾국립환경과학원 지구환경연구과, ³⁾국립환경과학원 대기공학연구과
⁴⁾국립목포대학교 환경공학과, ⁵⁾한국외국어대학교 환경학과

Eunyoung Kim, Taekho Chung¹⁾, Seokjun Seo³⁾, Sungwoon Jung²⁾,
Sunmoon Kim¹⁾, Seunghwan Lee¹⁾, Jounghwa Kim¹⁾, Jongtae Lee¹⁾,
Yongmin Lee, Myoungki Song⁴⁾, Wunseon Choi⁴⁾, Gyutae Park⁵⁾,
Kyunghoon Kim⁵⁾, Taehyoung Lee⁵⁾, Min-Suk Bae⁴⁾*

Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

¹⁾Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

²⁾Global Environment Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

³⁾Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

⁴⁾Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Republic of Korea

⁵⁾Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Gyeonggi, Republic of Korea

접수일 2019년 12월 18일
수정일 2020년 1월 31일
채택일 2020년 2월 14일

Received 18 December 2019
Revised 31 January 2020
Accepted 14 February 2020

*Corresponding author
Tel : +82-(0)61-450-2485
E-mail : minsbae@hotmail.com

Abstract PM_{2.5} is well known to be greatly affected by the vehicle emissions, which can affect climate change and the human body. Recently, the number of vehicles has been increasing continuously in Korea. However, there are still very few studies on the relationships between chemical components actually emitted from vehicles. Therefore, this study aims to analyze the actual tunnel flow coefficient for car emission rate based on the measurements of individual physical parameters (e.g., tunnel wind speed and traffic volume). As a result, the average tunnel flow coefficient were shown as 187, 335, 294, and 219 m³/vehicle · km in Summer, Fall, Winter, and Spring, respectively. The overall average of tunnel flow coefficient was determined as 259 m³/vehicle · km for vehicle emission rate. The emission factors can apply to investigate the both seasonal and chemical unit of vehicle emissions in real atmosphere, which can contribute to calculate the total road emissions related to their environmental effects.

Key words: Car emission, Vehicle emission, Tunnel

1. 배 경

대기 중 미세먼지는 발생원에 따라 연소를 기반으로 한 인위적 발생과 자연적 발생으로 구분되며, 생성 기작에 따라 배출원에서 직접 배출되는 1차 물질과 가스상 물질의 광화학반응을 통해 만들어지는 2차 생성물질로 분류된다(Lee *et al.*, 2019). 특히, 미세먼지는 인체위해성, 시정거리 감소, 지구열수지, 생태계 교란 등 인간 및 환경에 매우 큰 영향을 주는 것으로 알

려져 있다(Park and Lim, 2006; Kelly *et al.*, 2002). 미세먼지 장기 노출과 관련된 최근 연구에 따르면, 대기 중에 존재하는 미세먼지 농도가 10 µg/m³ 증가할 때 마다 전체사망위험은 4% 증가하고, 심혈관계 사망은 6%, 암으로 인한 사망은 8% 증가되는 것으로 보고되고 있다(Shin, 2007; Pope III, 2002). 이는 미세먼지의 노출이 단순한 호흡기계 질환뿐만 아니라 암과 심혈관계 질환 등 인체 전반에도 영향을 미친다.

대기로 유입되는 미세먼지 총량의 39%는 차량 배

출을 포함한 도로변에서 발생하며, 특히 차량 배출 물질은 방향족탄화수소를 포함한 각종 유해 유기 화학종을 포함한다. 따라서 차량 배출에 따른 성분별 정량적 기여량에 대한 수립에 심도 있는 연구가 요구된다 (Park *et al.*, 2015; Bae *et al.*, 2013).

차량 배기가스를 포함한 도로변으로부터 대기 중으로 유입되는 분진은, 브레이크 및 타이어 마모, 엔진 및 브레이크 오일의 휘발, 그리고 배기관에서 직접 배출되는 각종 연소 성분과 도로 표면에서 재비산되는 분진으로 분류할 수 있다 (Goel and Guttikunda, 2015; Park *et al.*, 2015). 과거 국내 연구를 살펴보면, 서울시에서 자동차 연소 물질과 관련된 성분으로 Benzo(b) fluoranthene, Indeno(1,2,3-cd)pyrene, Benzo(g,h,i)perylene 등이 분석되었고 (Lee *et al.*, 2008), 서울 도로변 지역을 대표할 수 있는 PAHs 성분들의 표적물질 지시 화학성분으로는 Fluoranthene과 Pyrene, Chrysene, 1,3,5-Triphenylbenzene을 제시하였다 (Park *et al.*, 2015). 또한, 도로변을 중심으로 풍상 및 풍하 지역에서 두 대의 광학 입자 측정기 (optical particle counter, OPC & optical particle sizer, OPS)를 이용하여 분진 수 농도를 동시에 측정하고, 최종적으로 도로변으로부터 기여하는 질량 농도를 산출한 결과 벤젠고리 수가 네 개 이상의 PAHs 성분이 도로변에서 상대적으로 많이 발생하는 것으로 분석되었다 (Park *et al.*, 2016).

이와 같이 도로변에서 대기 중으로 유입되는 미세먼지의 총량에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 대기 중 정량적 기여량 산정에 대한 연구는 매우 미비하다. 대기 중 정량적 기여량 산정을 위해서는 대기 화학성분 측정을 기반으로 한 수용모델 (positive matrix factorization, PMF) 등을 바탕으로, 도심 지역 자료를 분석하는 것이 일반적인 방법이다 (Amato *et al.*, 2009). 하지만, 차량 배출 지표성분을 기반으로 한 수용모델 접근법은 최소 100여 개 이상의 자료와 지표성분을 포함한 다양한 화학성분이 필요하다. 따라서 이를 활용하여 서울시와 같이 넓은 지역의 대표성 있는 정량적 기여량을 산출하기는 어렵다. 다른 접근 방법으로는 차량에서 직접 배출되는 배출량 기반의 연구가 진

행되고 있다. 배출량 기반의 연구는 차량 한 대로부터 배출되는 성분을 분석하는 차대동력측정 및 실도로 측정기반의 차량도로배출측정으로 나뉠 수 있다 (Chang *et al.*, 2015). 차대동력측정의 경우 차량에서 배출되는 성분을 직접적으로 분석할 수 있다는 장점이 있으나, 측정차량의 배출량이 실제 지역에서 운행 중인 모든 차량을 대표할 수 없으며, 2차 생성물에 대한 측정이 제한적이다. 이에, 측정차량의 배출량에 대한 지역적 대표성을 반영하기 위해서는 차량도로배출 측정기반의 연구가 절실히 요구된다.

본 연구에서는 차량도로배출측정을 기반으로 차량 단위배출량 산정을 위한 터널유동계수 산정을 목적으로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 터널 내·외의 대기 오염물질 농도에 적용하여 배출량 산정에 영향을 미치는 차량의 속도 및 통행량, 온도 및 풍속 등의 여러 계수를 실측정하였다. 본 연구 결과는 향후 실도로 측정기반의 차량도로배출측정에 대한 유동계수를 제공함으로써 보다 정확한 차량 배출량 산정에 적용할 수 있는 기초자료를 제공함에 목적이 있다.

2. 연구 방법

2.1 배출량산정 개요

도로이동오염원에 대한 배출량 산정 방법은 국립환경과학원에서 제시하는 ‘대기오염물질 배출량 산정 방법 편람(2007)’에 제시되어 있다. 이 자료에 의하면 차량 이동 중 발생하는 도로이동오염원의 배출량 (엔진기열 배출)은 식(1)과 같이 배출계수와 주행거리로부터 산정한다.

$$\begin{aligned} \text{배출량(차종, 도로)} \\ = \text{배출계수(차종, 도로)} \times \text{주행거리(차종, 도로)} \end{aligned} \quad \text{식(1)}$$

여기서, 배출계수는 차량 이동에 따라 생산되는 먼지나 기타 오염물질이 어느 정도 발생하고 배출되는지를 나타내는 계수이며, 주행거리 (Vehicle Kilometer

Traveled, VKT)는 차량이 이동한 거리를 나타낸다. 정확한 배출량 산정을 위해서는 상기 배출계수와 주행 거리를 실측할 필요가 있지만, 배출계수와 주행거리를 실측하기 위해서는 국내에서 운행되고 있는 자동차 차종별, 연식별에 대한 모든 측정 결과가 있어야 하기 때문에 현실적으로 불가능하다. 이에 배출계수의 경우 개발된 일부 차종의 연구 결과를 유사 차종에 적용하여 사용하고 있으며, 주행거리의 경우 통계자료를 활용하여 계산한다.

배출량 산정에 사용되는 계수는 차량의 수, 주행거리 및 배출계수 등으로 나타난다. 배출량의 최종 결과는 배출항목에 대한 톤(ton) 단위로 제시되며, 세부적인 통계자료 및 배출계수 분배에 의해 차종별, 연료별 분배로 '승용차-경형-휘발유 A 항목; 배출 B ton'의 형식으로 제시한다. 상기 배출량 산정과정은 국내에서 이용되는 차량의 배출가스를 실측하여 전수조사할 수 없다는 점에서 합리적이다. 하지만 상기 과정은 운행 중인 차량에서 배출되는 실측 배출량을 고려하지 않기 때문에 선행 연구 결과 확인된 운전자의 운전 습관 및 연령, 성별, 차량의 속도, 도로의 상태에 따른 배출량 변화가 반영되지 않았다는 단점이 있다(Ma *et al.*, 2020; Khader and Martin, 2019; Koay *et al.*, 2019). 이에 본 연구에서는 상기 배출량 산정 방법을 개선하여 실측에 의한 도로이동오염원에 대한 배출량 산정 방법을 제시하고자 한다.

2.2 터널측정 차량단위배출량

본 연구에서는 터널을 이용하여 차량 운행 중 발생하는 대기오염물질을 실측하는 방법을 나타낸다. 즉, 터널 내 시간에 따른 차종 및 차량이동 수를 측정하여 실측기반 대기오염성분 측정 결과를 분배하는 방식을 사용한다. 이는, (1) 터널이라는 비교적 밀폐된 공간에서 대기오염성분을 측정함으로써 일반대기의 영향 및 차량 배출물질의 확산을 배제할 수 있으며, (2) 시간별 대기오염물질을 측정함과 동시에 동시간대 터널을 통과하는 차량의 개수와 종류를 파악함으로써 차종별 대기오염물질의 기여량을 평가할 수 있다. 다음의 식

(2)는 터널측정을 기반으로한 차량단위배출량 (mg/veh·km) 산정 방법을 나타낸다.

$$\begin{aligned} & \text{차량단위배출량(mg/veh} \cdot \text{km)} \\ & = \sum(C_{in} - C_{out}) \times A \times U \times t / [N \times L] \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

여기서, C_{in} 및 C_{out} 는 터널 입구 및 출구에서 측정된 각 오염물질의 농도이며, A 는 터널 단면적(m^2), U 는 터널 내 풍속(m/s), t 는 분석 기준 시간(s), N 은 포집 시간에 터널을 통과한 차량 수(#), L 은 터널의 길이(m)를 나타낸다. 위 식은 터널 내·외 대기오염물질 농도 차이를 운행 중 차량이 배출한 대기오염물질의 양으로 산정하고, 단위 터널 길이에서 터널을 통과하는 차량의 개수를 측정하여 단위 차량에 대한 배출량을 제시한다. 상기 식은 식(3)과 같이 간략화할 수 있다.

$$\text{차량단위배출량(mg/veh} \cdot \text{km)} = \Delta C \times \delta \quad \text{식(3)}$$

여기서, ΔC 는 터널 내·외의 대기오염물질 농도 차, δ 는 측정된 터널유동계수($m^3/\text{veh} \cdot \text{km}$, Tunnel Flow Coefficient, TFC)이다. 터널유동계수는 성분별로 측정된 시간별 대기오염물질 농도 차(ΔC)와 동일 시간에 터널을 통과한 차량의 종류를 이용하여 ΔC 의 주요 배출원을 평가할 수 있으며, 터널유동계수와 터널을 통과하는 차량의 속도, 운전자의 특성 등을 비교하여 각각의 변수가 대기오염물질 발생량에 미치는 영향을 평가할 수 있다.

2.3 측정위치 및 방법

본 연구는 도로이동오염원 단위배출량을 측정하기 위해 2018년 7월~2019년 4월까지 4차레에 걸쳐 계절별로 수행되었다. 1차 측정은 2018년 7월 28일부터 8월 6일로 여름철에 해당하였으며 측정은 10일 수행하였다. 2차 측정은 2018년 9월 27일부터 10월 7일로 가을철에 해당하였고 측정은 11일 수행하였다. 3차 및 4차 측정은 각각 겨울철과 봄철로 12일 및 14일 수행하였으며, 세부 기간은 2019년 1월 28일~2월 8일, 2019년 4월 14일부터 4월 27일이었다.

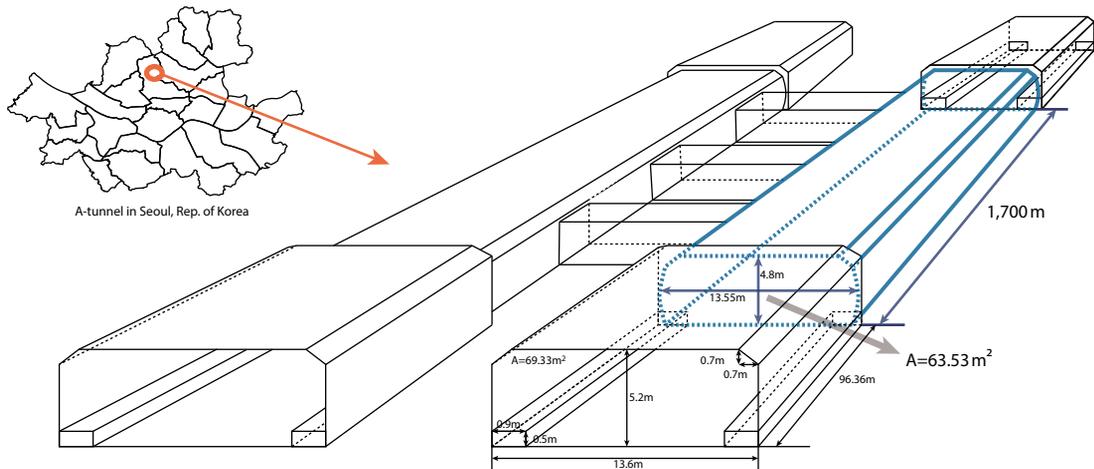


Fig. 1. Sampling location and schematic diagram of the A tunnel.

시료 포집 및 측정은 서울시 종로구에 있는 A 터널에서 하였다. A 터널은 서울시에서 두 번째로 긴 터널이며, 서울시 서대문구 홍은동에서 종로구 평창동에 이르는 내부순환도로에 위치하고 있다. 그림 1에서와 같이 A 터널은 두 개의 단방향 터널이며, 터널의 길이는 진입로와 출구가 약 96 m, 터널 내 길이가 1,700 m, 터널의 폭은 진입로 기준 약 13.6 m, 높이는 진입로 기준 5.2 m이다.

2.4 측정 항목 및 방법

차량단위배출계수는 식 (3)과 같이 ΔC 및 δ 에 의해 산정되며, 차량단위배출계수에 영향을 미치는 인자를 확인하기 위하여 터널 내 차량 종류, 속도 등의 측정이 필요하다. 본 연구에서는 ΔC 에 대한 측정 항목으로 1차 배출오염물질 (NO_x , CO , $\text{PM}_{2.5}$) 및 2차 생성 전구물질 (O_3 , SO_2 , NH_3 , VOCs), 블랙카본, 미세입자 입경 분포와 더불어 화학특성 (TC, nitrate, sulfate, ammonium, 중금속)을 측정·분석하였으며, 터널 내 풍속, 통행량, 체류시간 등의 기상조건을 통해 단위배출량을 최종 산정하였다. 본 연구에서는 단위배출량 산정을 위한 터널유동계수만을 최종 산정하여 나타냈으며, 향후 추가 논문에서 성분별 단위배출량을 보고할 예정이다. 또한, 측정된 도로이동오염원의 통행량 및 차

속의 직접 측정과 대기오염물질 배출량의 변화, 터널 내 대기오염물질의 농도를 측정하여 향후 도로이동오염원에 대한 정량적 발생량에 대한 교통환경정책의 대기환경 개선효과 분석 방법론을 제시한다.

본 연구에서는 δ 산정을 위해, 터널의 단면적, 길이, 터널 내 풍속, 차량이동 수를 측정하였다. 그 결과, 고정계수인 터널의 단면적 및 길이는 실측값인 각각 63.53 m^2 , $1,700 \text{ m}$ 를 적용하였다. 터널 내 이동 차량의 수 및 차속은 HD Digital Wave Radar (Smart Sensor HD Model 126, Wavetronix, Provo, UT, USA)로 측정하였다. 풍속은 터널 출구로부터 2 m 이내에 설치된 열선풍속계 (Digital Thermo Air Velocity Transmitter, FTS85, Eyc-tech inc., China)를 이용하여 실시간 측정하였다. 열선풍속계의 정확성을 확인하기 위하여 별도로 바람개비 풍속계를 이용하여 열선풍속계 측정 자료를 검증하였다. 차량의 종류는 비디오 판별법을 이용하여 통계 추출법을 사용하여 분석하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 도로이동오염원 단위배출량 산정을 위해 터널유동계수 (δ)를 산출하였다. 본 연구에서는

차량 속도, 차량의 종류를 실측하여 도로이동오염원 배출량에 영향을 미치는 터널유동계수 (δ)와 관련성을 분석하였다.

3.1 열선 풍속계 검증

터널유동계수 (δ , $m^3/veh \cdot km$)는 고정계수인 터널 단면적(A), 터널 길이(L), 포집 시간(t)과 변수인 터널 내 풍속(U), 차량 수(N)에 의해 결정되며, 식(4)에 나타내었다.

$$\delta = A \times U \times t / [N \times L] \quad \text{식(4)}$$

따라서 터널유동계수는 고정계수의 영향보다 변수인 풍속과 터널 내 이동 차량 수에 의해 결정된다. 두 변수 중 교통량은 HD Digital Wave Radar를 바탕으로 터널 내 이동 차량의 수를 오차 없이 산출하였다. 반면 풍속의 경우 열선 풍속계를 이용하여 초당 자동측정되기 때문에 측정기기의 정확도에 따라 편차가 발생할 수 있으며, 이는 터널유동계수 산정 과정에 오차로 반영된다. 열선 풍속계는 온도에 따른 열선의 온도저감률에 의해 풍속이 결정되므로, 온도 변이에 따른 측정 풍속의 오차가 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 정확한 풍속을 측정하기 위하여 열선 풍속계와 바람개비 풍속계를 비교하여 검증하였다.

열선 풍속계와 바람개비 풍속계의 측정 결과를 비교하여 그림 2에 나타내었다. 그림에서와 같이 열선 풍속계와 바람개비 풍속계의 비교 평가는 약 3 m/s, 4.8 m/s, 5.8 m/s에서 2% 미만의 오차율을 나타내었다. 또한 비교 실험은 상온 약 19.8°C 외에 여름철 온도를 대변하는 고온 약 36.8°C에서 열선 풍속계와 바람개비 풍속계는 약 2% 미만의 오차율을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 사용한 열선 풍속계는 바람개비 풍속계에 의해 검증되었다.

3.2 도로이동오염원 배출량에 미치는 영향 인자

도로이동오염원 배출량에 미치는 영향 인자를 확인하기 위하여 터널을 통과하는 차량의 속도 및 통행량, 터널 농도 및 풍속을 측정하였다(표 1). 터널을 통과

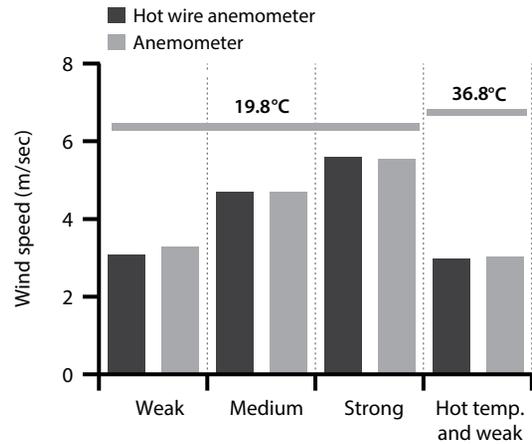


Fig. 2. Comparison of hot-wire and pinwheel anemometers.

Table 1. Seasonal average of car speed, traffic volume, temperature, and wind speed in tunnel.

	Unit	Summer	Fall	Winter	Spring
Car speed	(km/hr)	67.02	68.39	70.60	68.88
Traffic volume	(#/hr)	2,926	3,009	3,183	3,048
Temperature	(°C)	38.69	25.33	8.13	20.38
Wind speed	(m/sec)	3.47	6.15	4.96	3.80

하는 차량의 속도는 평균 68.72 km/hr로 나타났다. 계절별 차량의 속도는 겨울(70.6 km/hr) > 봄(68.88 km/hr) > 가을(68.39 km/hr) > 여름(67.02 km/hr)로 나타났다지만 큰 차이는 없었다. 터널의 차량 통행량은 겨울(3,183대/hr) > 봄(3,048대/hr) > 가을(3,009대/hr) > 여름(2,926대/hr)로 나타났으며 터널 내 차량 속도와 마찬가지로 큰 차이는 없었다. 반면 터널 내 온도와 풍속은 계절에 따른 차이를 나타내었다. 터널 내 온도의 경우 여름(38.69°C) > 가을(25.33°C) > 봄(20.38°C) > 겨울(8.13°C) 순으로 높았으며, 최대 온도와 최소 온도가 30°C 이상 차이가 났다. 풍속은 가을(6.15 m/sec) > 겨울(4.96 m/sec) > 봄(3.80 m/sec) > 여름(3.47 m/sec) 순으로 나타났다.

풍속은 터널유동계수(δ) 산정에 직접적인 영향을 미친다. 풍속에 영향을 미치는 요소는 터널 내 차량

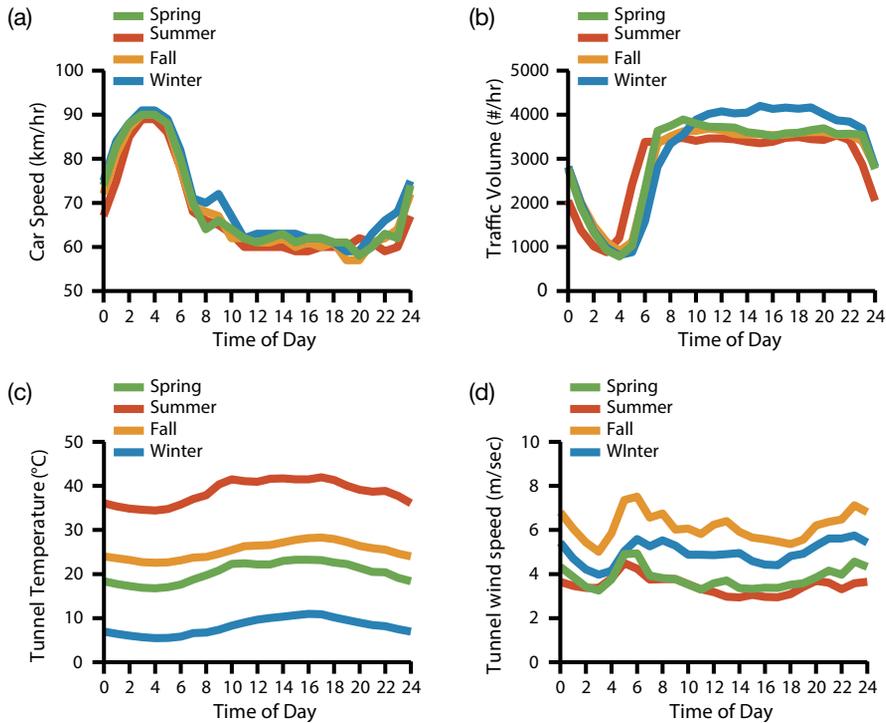


Fig. 3. Time-of-day average of (a) car speed, (b) traffic volume, (c) temperature, and (d) wind speed in season.

속도 및 통행량, 터널 내·외부 온도 차이에서 발생하는 기압 차 등이 있다. 터널 내 차량 통행량 및 속도, 온도가 터널 내 풍속에 미치는 영향을 확인하였다(그림 3). 그림에서와 같이 시간별 터널 내 차량 속도는 22~08시까지 비교적 높았으며 약 04시에 최대 속도인 92 km/hr를 나타내었다. 이후 08~20시까지 약 65 km/hr로 일정하였다. 차량 통행량은 터널 내 차량 속도와 반비례적 관계를 나타내었다. 즉, 차량 통행량은 08~20시까지 약 3,500대 정도로 일정하였고, 22~08시에는 약 2,000대로 나타났다. 온도는 여름>가을>봄>겨울의 순으로 나타났다.

이상의 결과를 터널 내 풍속과 비교한 결과 시간별 풍속의 크기에 영향을 미치는 요소는 터널 내 차량 속도 및 통행량으로 나타났으며, 평균 풍속의 크기는 터널 내·외부의 온도 차에 의해 영향을 받는 것으로 판단된다. 즉, 풍속은 차량 속도가 빠른 04~08시 및 22~24시에 강했으며, 차량 속도가 비교적 일정한 12~20

시에는 비교적 일정하였다. 터널 내 차량 속도가 가장 높은 04시경은 비록 터널 내 차량 속도가 빠를지라도 통행량은 1,000 이하로 나타나 비교적 적은 통행량에 의한 차량 속도는 풍속 변화에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 시간별 풍속과 별개로 평균 풍속 세기는 가을>겨울>봄>여름의 순으로 분석되었는데, 이는 터널 내·외부 온도 차에 의해 결정된 것으로 사료된다. 이는 터널 내부의 평균 풍속의 세기는 터널 내·외부의 온도 차로 형성되는 기압 차이에 의한 것으로 판단된다.

터널유동계수(δ)의 시간별, 계절별 크기를 그림 4에 나타내었다. 여기서 차량배출계수(δ)는 식(2)의 차량단위배출량을 터널 농도 차(ΔC)로 나눈 값으로서 측정항목의 농도를 제외한 값이다. 즉, 농도 차(ΔC) 이외에 차량단위배출량에 영향을 미치는 인자를 나타낸 값이다. 그림 4(a)에서와 같이 시간별 터널 유동계수는 약 23시부터 증가하여 약 04시에 최대값

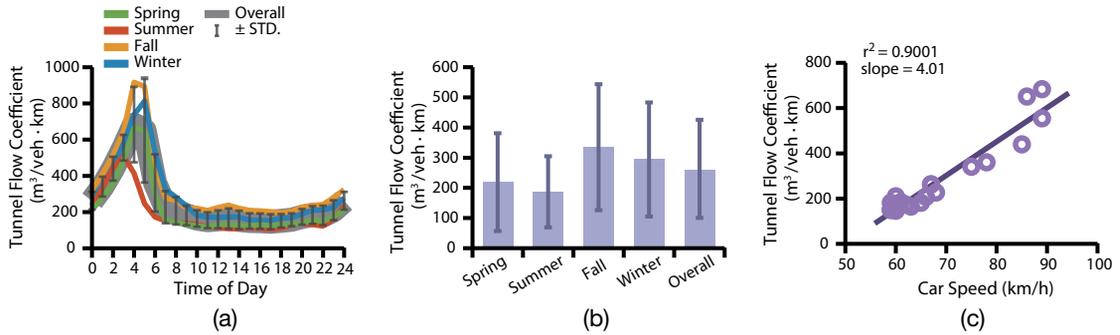


Fig. 4. (a) Time-of-day and (b) seasonal average of Tunnel Flow Coefficient (TFC), and (c) scatter plot between TFC and car speed.

을 나타낸다. 여름철 새벽 3시~4시 사이에 536 m³/veh·km로 최대값을 보였지만 다른 계절 동시간대에 비해 최대값이 가장 낮았고, 가을철에 새벽 4시~5시에 925 m³/veh·km로 가장 높은 최대값을 보였다. 터널유동계수의 각 계절의 전체 평균을 바그래프로 나타낸 것이다. 여름에는 187.122 m³/veh·km, 가을은 334.878 m³/veh·km, 겨울에는 294.26 m³/veh·km, 봄은 219.035 m³/veh·km로 분석되었고, 계절의 전체 평균은 258.82 m³/veh·km로 나타났다. 여름은 전체 계절의 최소값을 보였고 봄과 함께 전체 평균보다 낮게 나타났다. 가을은 전체 계절의 최대값을 보였고, 겨울과 함께 전체 평균보다 높게 나타났다. 이에, 계절별로는 가을 > 겨울 > 봄 > 여름의 순으로 터널유동계수가 높았다. 상기 결과를 터널 내 풍속과 온도, 차량 속도 및 통행량과 비교한 결과 그림 4(c)와 같이 터널유동계수는 터널 내 차량 속도와 0.9 이상의 상관성을 나타내었다. 이는 차량의 속도, 가속 등의 운전 조건에 따라 대기오염물질의 배출량이 달라진다는 선행 연구 결과와 일치하며 (Ma et al., 2020; Khader and Martin, 2019; Koay et al., 2019), 풍속에 의한 영향보다 차량 속도가 터널유동계수에 큰 영향을 미친다. 반면 계절에 따른 터널유동계수의 크기는 터널 내·외부의 온도 차와 동일하게 증가한 것으로 나타났다. 이는 시간에 따른 터널유동계수는 터널 내 이동차량의 속도에 영향을 받으며, 터널유동계수의 평균 크기는 터널 내·외부의 온도 차이에 의해 결정됨을 의미한다.

3.3 통행량 분석 결과

차종별 통행량이 차량단위배출량에 미치는 영향을 확인하기 위하여 연구기간 중 총 280만 대 차량 종류를 시간별, 일별 기준으로 조사하였다. 차량 분류 기준은 자동차, 택시 및 버스/RV/트럭 등 크게 3가지로 나누었고, 자동차는 휘발유, 택시는 LPG, 버스/RV/트럭은 경유 연료를 대변하는 것으로 간주하였다. 물론, 분류기준 중 자동차에 경유, 버스에 LNG, 트럭에 휘발유 등의 연료를 사용하기도 하지만, 본 연구에서는 이에 대한 분류는 수행하지 않았다. 다만 연구 결과의 활용이라는 측면에서 대략적인 경향에 따라 차종별 배출물질의 종류와 농도가 분류 가능한지를 살펴 보았다.

차종별 통행량은 표본추출법을 통해 검증하였다. 표본추출법을 위하여 1시간에 대한 차종별 통행량을 비디오 판별법으로 분석하였으며, 1시간(모집단) 중 1분간 통행량(1시간 내 6분 표본추출) 10개 사례 신뢰구간 및 표본 오차계산을 식(5)와(6)을 통해 계산하였다.

$$\sigma_s(6\text{분 표본표준편차}) = \sigma_m/n^{0.5} \tag{식(5)}$$

$$Z = (E - m) / \sigma_s \tag{식(6)}$$

(95% 신뢰구간: -1.96 < Z < 1.96)

여기서, E는 1시간 내 10개 사례에 대한 표본평균값을 나타내며, m은 모집단의 통행량 모평균을 나타

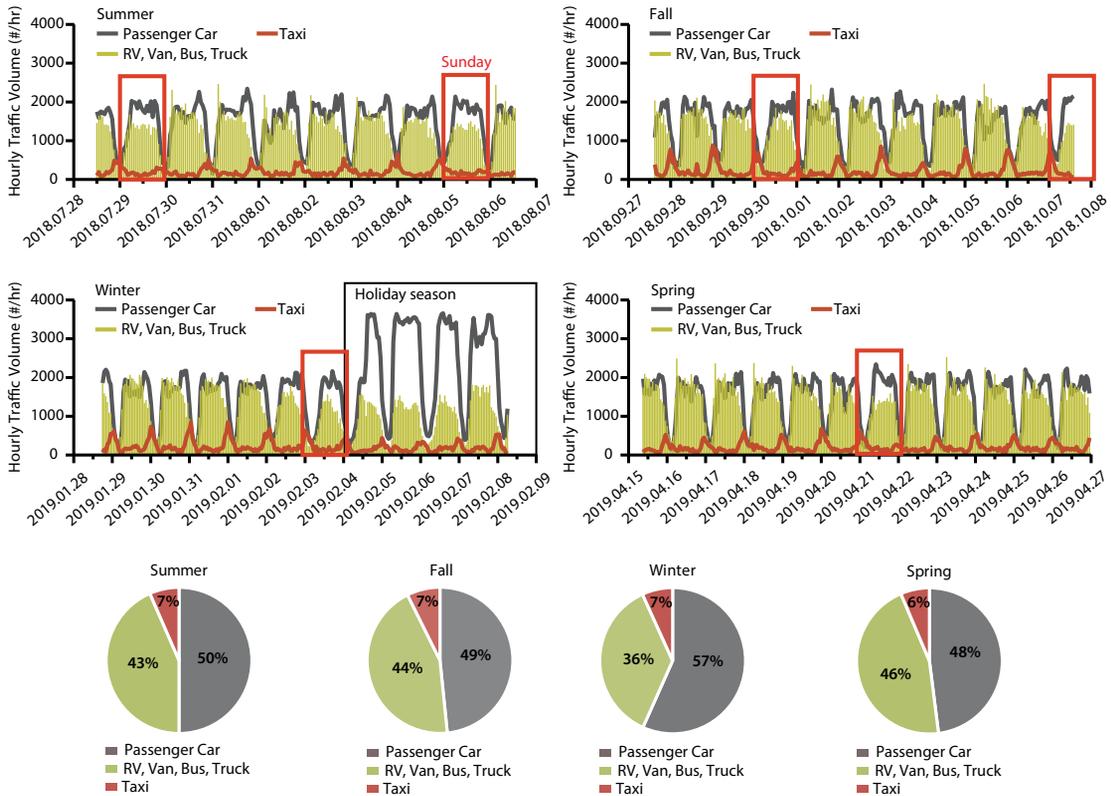


Fig. 5. Time series of hourly traffic volume and relative ratios based on types of vehicles in season.

낸다. σ_s 는 6분 표본표준편차를 나타내며, σ_m 은 전체 모집단의 통행량 표준편차를 나타낸다. 조사 결과 표본추출 시 95% 신뢰도 및 3.3% 오차가 확인되었으며, 이를 바탕으로 판단했을 때 조사 결과는 통계적으로 유의함을 알 수 있었다.

차종별 통행량 분석 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 터널을 통행하는 차종은 계절별로 큰 차이를 나타내지 않았다. 따라서 3가지 차종의 분류 기준을 해석하기 위해서 계절별 통계 결과는 큰 의미를 가지지 못하였다. 하지만 시간별, 일별 통행량의 경우 3가지 차종에 대한 구분이 가능하였다. 시간별 차량의 통행량을 살펴보면 택시의 경우 00시를 전·후로 통행량이 많았으며, 10~18시 사이에는 00시 전·후 통행량에 비해 50% 이하 수준의 통행량이 나타났다. 반면 승용차 및 버스/RV/트럭은 택시 통행량

과 반대로 10~18시 사이에 비교적 높고 일정한 통행량을 나타내었으며 00시를 전·후로 통행량이 감소하였다. 이를 바탕으로 판단할 때 00시 전·후에 차량 통행량 대비 고농도로 증가하는 측정 항목은 LPG 연료를 바탕으로 운행하는 차량이 주요 배출원으로 해석된다.

휘발유 연료를 대변하는 승용차와 경유 연료를 대변하는 버스/RV/트럭의 구분은 출퇴근 시간에 승용차 차량의 통행량 증가를 바탕으로 구분이 가능하지만, 일별 통행량 분석을 바탕으로 해석할 경우 보다 쉽게 구분할 수 있다. 그림 5에서와 같이 주중 승용차와 버스/RV/트럭의 차량 통행량은 비슷한 수준이다. 하지만 그림 5에 표시된 일요일의 경우 승용차의 통행량은 주중과 비슷하지만 버스/RV/트럭은 주중 대비 약 25% 이상 감소하였다. 또한 연휴의 경우 승용

차는 주중 대비 약 2배 증가한 반면 버스/RV/트럭은 주중 대비 약 25% 감소하여 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이를 바탕으로 판단할 때 주중과 휴일에 차이를 나타내는 측정항목 및 농도의 차이는 승용차와 버스/RV/트럭의 통행량 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 따라서 차량 통행량 대비 휴일에 증가하는 측정 항목의 농도는 휘발유 연료를 대변하는 승용차가 주요 배출원이다. 이를 바탕으로 측정된 시간에 따른 터널유동계수($\Delta\delta$)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\delta = A \times \Delta U \times t / [(\Delta N_1 + \Delta N_2 + \Delta N_3) \times L] \quad \text{식(7)}$$

여기서, ΔU 는 시간에 따른 터널 풍속의 변이를 나타내며, $\Delta N_{1,3}$ 은 본 연구에서 분류한 자동차, 택시 및 버스/RV/트럭 등의 시간에 따른 세 가지 차종에 대한 비율이다. 본 연구에서는 시간별, 일별에 따른 차종의 구분을 바탕으로 차량단위배출량 중 시간별 ΔC 에 대한 차종별 기여도를 산출할 수 있다. 이는 미세먼지 저감을 위한 차종의 선별, 연료의 선택 등 다양한 정책에 활용 가능할 것으로 예상된다. 또한 차량단위배출량에 영향을 미치는 터널유동계수, 차량의 종류, 차량의 속도 등을 바탕으로 계절별, 도로별 차량 속도 등을 관리하는 것이 미세먼지 저감을 위해 사용될 수 있음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구는 도로이동오염원에 대한 배출량 산정 방법을 개선하여 도로이동오염원 배출량에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. 연구 결과, 여름에는 $187.122 \text{ m}^3/\text{veh} \cdot \text{km}$, 가을은 $334.878 \text{ m}^3/\text{veh} \cdot \text{km}$, 겨울에는 $294.26 \text{ m}^3/\text{veh} \cdot \text{km}$, 봄은 $219.035 \text{ m}^3/\text{veh} \cdot \text{km}$ 로 분석되었고, 계절의 전체 평균은 $258.82 \text{ m}^3/\text{veh} \cdot \text{km}$ 로 나타났다. 여름은 전체 계절의 최소값을 보였고 봄과 함께 전체 평균보다 낮게 나타났다. 가을은 전체 계절의 최대값을 보였고, 겨울과 함께 전체 평균보다 높게 나타났다. 터널 내 차량단위배출량에 영향

을 미치는 인자는 차량의 속도 및 터널 내·외부의 온도 차, 차량의 통행량이었으며, 시간별 일별 차종을 분류함으로써 측정 항목의 배출량 기여도를 산정할 수 있었다. 향후 연구 결과를 세밀하게 분석하여 측정 항목에 따른 차량 연료 종류별 기여량 산출을 통해 차량단위배출량에 영향을 미치는 차량의 속도, 연료의 종류 등을 제시할 예정이다. 이러한 연구 결과는 향후 미세먼지 저감을 위한 규제 차종의 선별, 도로 구간별/시간별 교통량 규제, 배출량 저감을 위한 차량 속도의 제어 등 다양한 정책 기초 자료로 활용되기를 기대한다.

감사의 글

본 논문은 환경부 국립환경과학원의 지원(NIER-2019-04-02-024) 및 한국연구재단(NRF-2017M3D8A1092222)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., Hopke, P.K. (2009) Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2, *Atmospheric Environment*, 43, 2770-2780, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.02.039>.
- Bae, M.S., Jung, C.H., Ghim, Y.S., Kim, K.H. (2013) A Proposal for the Upgrade of the Current Operating System of the Seoul's Atmospheric Monitoring Network Based on Statistical Analysis, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29, 454-465, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.447>.
- Chang, Y.H., Zou, Z., Deng, C.R., Huang, K., Collett, J.L., Lin, J., Zhuang, G.S. (2015) The importance of vehicle emissions as a source of atmospheric ammonia in the megacity of Shanghai, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 15, 34719-34763, <https://doi.org/10.5194/acpd-15-34719-2015>.
- Goel, R., Guttikunda, S.K. (2015) Evolution of on-road vehicle

- exhaust emissions in Delhi, Atmospheric Environment, 105, 78-90, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.045>.
- Kelly, V.R., Lovett, G.M., Weathers, K.C., Likens, G.E. (2002) Trends in atmospheric concentration and deposition compared to regional and local pollutant emissions at a rural site in southeastern New York, USA, Atmospheric Environment, 36, 1569-1575, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00079-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00079-1).
- Khader, A.I., Martin, R.S. (2019) On-the-road testing of the effects of driver's experience, gender, speed, and road grade on car emissions, Journal of the Air & Waste Management Association, 69, 1182-1194, <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1640804>.
- Koay, L.K., Sah, M.J.M., bin Othman, R. (2019) Comparative Study of Fuel Consumption, Acceleration and Emission for Road Vehicle Using LPG or Gasoline, in: Ismail, A., Abu Bakar, M.H., Öchsner, A. (Eds.), Advanced Engineering for Processes and Technologies, Springer International Publishing, Cham, pp. 77-87, https://doi.org/10.1007/978-3-030-05621-6_6.
- Lee, J.Y., Kim, Y.P., Bae, G.-N., Park, S.M., Jin, H.-C. (2008) The Characteristics of Particulate PAHs Concentrations at a Roadside in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(2), 133-142, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2008.24.2.133>.
- Lee, Y., Kim, E., Oh, S.-H., Park, M., Chong, J., Lee, H., Song, H., Kwak, N., Lee, E., Kim, K., Park, K., Bae, M.-S. (2019) Assessment between MSA and Land Originated Secondary Organic Products of PM_{2.5} Using LC/MSMS in Gwangju Area, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35, 636-646, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.636>.
- Ma, Z., He, C., Liu, X., Li, J., Liu, M., Wei, H. (2020) Effect of the Engine Working Condition on the Vehicle Emissions Based on Real-World Driving, in: Jain, V., Patnaik, S., Popențiu Vlădicescu, F., Sethi, I.K. (Eds.), Recent Trends in Intelligent Computing, Communication and Devices, Springer Singapore, Singapore, pp. 975-981, https://doi.org/10.1007/978-981-13-9406-5_117.
- Park, D.-J., Cho, I.-H., Lee, K.-Y., Park, K., Lee, Y.-J., Ahn, J.-Y., Bae, M.-S. (2016) Analysis of Poly Aromatic Hydrocarbon (PAH) Pollutants Originated from Local Road Dust by Spacial Measurements, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32, 272-279, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.3.272>.
- Park, D.-J., Han, Y.-J., Lee, J.-Y., Lee, K.-Y., Cho, I.-H., Park, E.H., Yi, S.-M., Bae, M.-S. (2015) Source Profile of Road Dust for Statistical Apportionment Modeling in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31, 105-117, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.2.105>.
- Park, J.-Y., Lim, H.-J. (2006) Characteristics of Water Soluble Ions in Fine Particles during the Winter and Spring in Daegu, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 10, 627-641, (in Korean with English abstract), <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00768599>.
- Pope III, C.A. (2002) Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution, JAMA 287, 1132, <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>.
- Shin, D.C. (2007) Health Effects of Ambient Particulate Matter, Journal of the Korean Medical Association, 50, 175, <https://doi.org/10.5124/jkma.2007.50.2.175>.
- The Korea Transport Institute (KOTI) (2011) A Study on Evaluation Methodology of Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions on Road Network - Focusing on.
- The Seoul Institute (SI) (2008) A Study on Approaches to Effectively Link Traffic and Air Pollution Monitoring Data.

Authors Information

- 김은영 (국립환경과학원 전문위원)
 정택호 (국립환경과학원 전문위원)
 서석준 (국립환경과학원 연구사)
 정성운 (국립환경과학원 연구사)
 김선문 (국립환경과학원 연구사)
 이승환 (국립환경과학원 전문위원)
 김정화 (국립환경과학원 연구관)
 이종태 (국립환경과학원 교통환경연구소 소장)
 이용민 (국립환경과학원 전문위원)
 송명기 (국립목포대학교 연구교수)
 최운선 (국립목포대학교 석사과정연구원)
 박규태 (한국외국어대학교 박사과정연구원)
 김경훈 (한국외국어대학교 박사과정연구원)
 이태형 (한국외국어대학교 교수)
 배민석 (국립목포대학교 교수)