한국대기환경학회지 제 28 권 제 1 호
J. KOSAE Vol. 28, No. 1 (2012) pp. 94～104
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
DOI: http://dx.doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.1.094

# 이동식 배출가스 측정장비를 이용한 소형 경유 자동차의 실도로 질소산화물 배출특성 분석

# Evaluation of On-Road $NO_x$ Emission from a Light Duty Diesel Vehicle using a Portable Emissions Measurement System

이 태 우* · 이 종 태 · 김 정 수
국립환경과학원 교통환경연구소

(2011년 11월 24일 접수, 2011년 12월 30일 수정, 2012년 1월 25일 채택)

Taewoo Lee*, Jongtae Lee and Jeongsoo Kim
*Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon, 404-708, Korea*

(Received 24 November 2011, revised 30 December 2011, accepted 25 January 2012)

## Abstract

The purpose of this research is to quantify the compliance of on-road emission from a light duty diesel vehicle, based on a comparison to emission regulation standard. $NO_x$, CO and THC emissions were measured using a portable device on a selected real-world driving route with a length of approximately 22 km. On-road measurements were repeated by 10 times on a same route to reflect variability in traffic conditions. A test route was divided into 22 road links with length of 1 km to analyze emission results with higher spatial resolution.

The average emissions of $NO_x$, CO and THC over total travel distance, which is approximately 220 km, were quantified to be in compliance with emission regulation standards. Under higher spatial resolution, $NO_x$ concentration exceeded a standard in 92 links out of 220 links. The extended time in stop period and the stop-and-go driving cycle were identified as two important reasons for increased $NO_x$ emissions in observed cases. Heavy traffics showed higher $NO_x$ emissions than free flow. These results indicate that the real-world vehicle emissions might exceed the compliance level associate with traffic conditions.

Another interesting observation of this research is that the on-road emission characteristics can be independent to the average speed of road links with higher spatial resolution. Variability in on-road emission might not be fully described by solely relying on an average speed, because variability in traffic conditions and road conditions can influence on real-world vehicle emissions.

**Key words** : On-road measurement, Emission regulation standards, Portable emissions measurement system (PEMS), Nitrogen Oxide ($NO_x$), Diesel vehicles

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7609, E-mail : taewoolee@korea.kr

## 1. 서 론

본 연구는 실제 도로를 주행하는 소형 경유 자동차의 질소산화물($NO_x$) 배출량의 대기환경보전법 상에 규정된 제작자동차 배출허용기준 준수 여부를 파악하고, 배출허용기준 초과 사례에 대한 원인 분석을 목적으로 한다.

최근의 우리나라 도심 지역의 대기질은 입자상물질(PM) 농도가 점차로 감소하는 반면 $NO_x$ 농도는 감소하지 않는 경향을 보이고 있다. 예를 들어, 서울특별시 대기 중 이산화질소($NO_2$) 농도는 2003년 0.038 ppm, 2010년 0.034 ppm으로서 뚜렷한 증감 추세를 보이지 않는 안정화 경향을 나타내고 있다(NIER, 2011). 유럽 지역에서도 1999년부터 2008년까지 도로변 대기 측정소에서 측정된 $NO_2$ 농도가 안정적인 경향을 보이며, 유럽집행위원회는 이에 대한 원인의 하나로 제작자동차 배출허용기준 강화에 의한 대기오염물질 저감량이 교통량 증가 및 경유차 보급 비율 증가에 의해 부분적으로 반감되기 때문임을 지적한 바 있다(European Commission, 2011).

자동차에 의한 대기 오염물질 배출량은 자동차의 오염물질 배출 특성과 활동도에 의해 결정된다. 국내 자동차의 오염물질 배출특성은 대기환경보전법에 규정된 제작자동차 배출허용기준에 의해 관리된다. 바이오 디젤 도입과 같은 자동차용 연료의 다양화 및 품질 기준 강화에 의해서도 자동차의 오염물질 배출 특성은 변할 수 있다(Lim *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2010).

대표적인 이동 오염원 활동도인 자동차 등록대수는 수도권 특별법 제정 시점인 2003년 이후 2010년까지 14,587,333대에서 17,941,356대로 23% 증가하였다. 전체 등록 차량 중 차령 10년 이상의 노후 차량 비율은 2003년 13%에서 2010년 30%로 두 배 이상 증가하여 운행차의 기여도가 증가하고 있음을 알 수 있다(KAMA, 2010; KAMA, 2003). 우리나라 전체도로의 평균 일 교통량 또한 2003년 11,897대에서 2010년 12,733대로 7 % 증가하였다(Traffic Monitoring System, 2011).

활동도 증가가 배출량에 미치는 영향을 분석함에 있어, 차량 등록대수와 같은 수치화된 지표의 영향은 비교적 용이하게 정량화할 수 있다. 예를 들어, 2003～2010년의 국내 주요 7대 도시 대기 중 $NO_2$ 농도는 자동차 등록대수가 가장 많은 서울특별시에서 가장 높게 나타나고 있다(NIER, 2011). 일일 주행거리와 같은 활동도를 정확히 파악하는 것 또한 배출량 산정 결과를 개선하는 데 중요한 역할을 하고 있다(Jang *et al.*, 2010).

그러나 교통량과 교통 흐름의 변화가 배출량에 미치는 영향은 상대적으로 정량화하기 어렵다. 자동차 배출량 측정 실험에서 교통량이나 교통 흐름의 변화는 차속별로 규정된 실험용 주행패턴을 이용한 차대동력계 실험을 통해 재현하고 있으나(Jeon *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2002), 실제 도로상의 다양성을 반영하기에는 다소의 한계를 가지고 있다고 할 수 있다(Andre *et al.*, 2006; Brundell-Freij and Ericsson, 2005). 또한, 평균 주행 차속에 대한 함수 형태로 얻어지는 배출계수는 동일한 차속 범위에서 발생할 수 있는 배출량 산포를 충분히 표현하기 어려운 구조를 갖는다고 할 수 있다(Lee *et al.*, 2011).

미국 EPA의 배출량 모델인 MOVES(Motor Vehicle Emission Simulator)는 차량 운전 조건별 매 초당 배출량을 산정하고, 이를 오염원 활동 시간(Source Hours Operating, SHO)과 결합하는 모델로서, 다양한 주행 패턴에서의 배출량 산정이나 높은 공간적 해상도를 갖는 국지적 규모의 배출량 산정에 강점이 있음이 알려져 있다(U.S. EPA, 2010; California Department of Transportation, 2008; U.S. EPA, 2002). 이동식 배출가스 측정장비(Portable Emissions Measurements System, PEMS)는 주행 중인 자동차의 오염물질 배출량과 차속, 가속도 등의 활동도를 매 초당 측정할 수 있는 장비로서, MOVES 배출량 모델 구축 및 행정처분 목적의 배출가스 결함확인 검사용으로 활용되고 있다(Frey *et al.*, 2008; Zhai, *et al.*, 2008; Nakamura *et al.*, 2007; Gierczak *et al.*, 2006).

본 연구에서는 소형 경유 운행차의 실제 도로상에서의 오염물질 배출 특성을 분석하였다. 총 연장 220 km의 실제 도로를 주행하면서 PEMS를 이용하여 배출량을 측정하였다. 측정 결과를 제작차 배출허용기준과 비교하여 전체 주행 구간 중 허용기준을 초과하는 소구간의 비율을 오염물질 별로 정량화하였다. 오염물질 중 특히 문제가 되는 $NO_x$에 대해서는 기준을 초과하는 소구간의 $NO_x$ 배출 특징을 소구간 내의 체류시간, 주행패턴 및 도로의 입지 조건 측면에서 분석하였다.

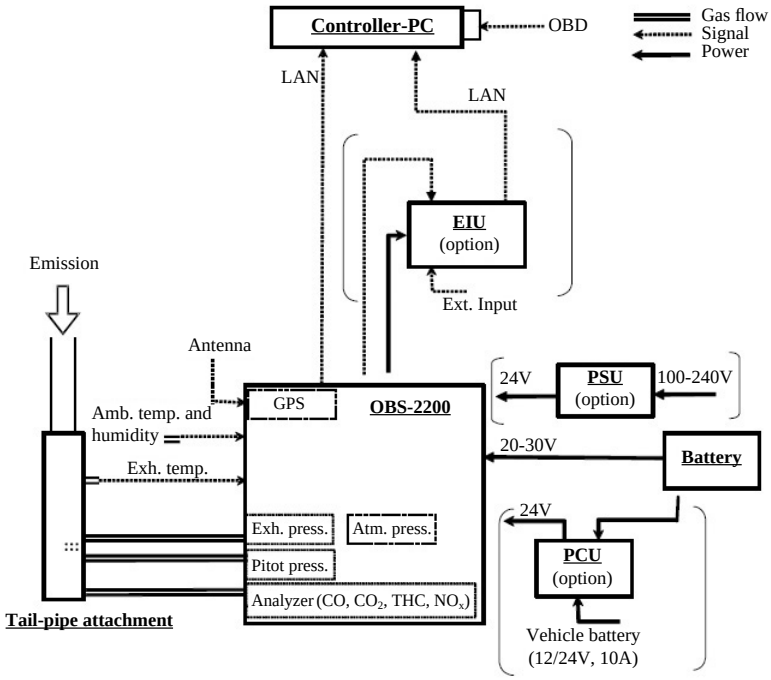



**Fig. 1. Schematic diagram of a selected Portable Emissions Measurements System, PEMS.**

## 2. 실험방법

### 2.1 실험 장비

본 연구에서 사용한 PEMS (Horiba OBS-2200)는 농도 분석기, 배출가스 부피 유량 측정기, 전원 공급기 및 주행변수 측정기로 구성된다. 그림 1은 PEMS의 전체 구성도이다. 그림 중 'OBS-2200'은 농도 분석기, 'Tail-pipe attachment'는 배출가스 부피 유량 측정기와 샘플링 포트를 함께 포함한 부분을 말한다. 'PSU (Power Supply unit)', 'PCU (Power control unit)' 및 'Battery'는 전원 공급기에 해당된다. 'EIU (External input unit)'는 주행변수 측정기에 해당된다.

농도 분석부에서는 이산화탄소 ($CO_2$), 일산화탄소 (CO), 탄화수소 (THC) 및 $NO_x$ 농도를 1 Hz 주기로 측정하며, PM은 측정하지 않는다. 농도 분석부의 주요 제원을 표 1에 요약하였다. FID 분석기의 화염 점화를 위해 수소-헬륨 혼합 연료 가스를 사용하였다.

측정된 농도를 질량으로 환산하기 위해서는 배출가스 부피 유량이 필요하므로 피토 튜브식 유량계를 사용하여 배출가스 부피 유량을 측정하였다 (Akard *et al.*, 2004). 측정된 유량은 배출가스의 온도와 압력을 이용하여 표준 상태의 값으로 환산하였다. 12 VDC 차량용 배터리 4개를 2개씩 직렬 연결하여 두 세트의 24 VDC 전원을 구성하였다. 두 전원을 자동 절환기로 연결하여 첫 번째 전원의 전력이 일정 수준 이하로 떨어지면 자동으로 두 번째 전원을 이용할 수 있도록 구성하였다. 주행변수 측정기를 이용하

**Table 1. Main specification of PEMS analyzer.**

| Pollutant | Item | Specification |
|---|---|---|
| $CO_2$ | Principal | Non-dispersive infrared (NDIR) |
| | Measuring range | 0 ~ 5 vol% to 0 ~ 20 vol% |
| CO | Principal | Non-dispersive infrared (NDIR) |
| | Measuring range | 0 ~ 0.5 vol% to 0 ~ 10 vol% |
| THC | Principal | Flame ionization detection (FID) |
| | Measuring range | 0 ~ 1,000 ppmC to 0 ~ 10,000 ppmC |
| $NO_x$ | Principal | Chemi-luminescence detection (CLD) |
| | Measuring range | 0 ~ 100 ppm to 0 ~ 3,000 ppm |

**Table 2. Main specification of the test vehicle.**

| Item | Specification |
|---|---|
| Model name / year | Terracan / 2002 |
| Manufacturer | Hyundai Motors |
| Vehicle type | Sport Utility Vehicle (SUV) |
| Fuel | Diesel |
| Gross vehicle weight (kg) | 2,430 |
| Mileage (km) | 109,036 |
| Transmission | 4AT |
| Engine displacement (cc) | 2,476 |
| Air intake | Turbocharged and Intercooled |
| Exhaust gas after-treatment | Diesel Oxidation Catalyst (DOC) |
| Max output (kW/rpm) | 103.0 / 3,800 |
| Max torque (Nm/rpm) | 235.2 / 2,000 |

여 차량 주행 속도를 측정하고 차량 전방의 도로 영상을 촬영하였다. 미국 연방 시험기준인 CFR 1065 기준에 의거하여 PEMS의 성능을 검증하였고, PEMS 오염물질 배출량 측정 결과는 인증용 차대동력계 장비 측정 결과와 비교하여 통계적으로 유의한 차이가 없음을 확인하였다(Lee *et al.*, 2011; Nakamura *et al.*, 2007).

### 2.2 실도로 주행 실험

실도로 주행 실험은 출퇴근 첨두(Peak) 시간대에 4회, 비첨두(Off-peak) 시간대에 6회를 실시하였다. 10회 모두 동일한 운전자가 교통 흐름에 맞춰 교통법규를 준수하며 운전하였고, 보조 인원 1인이 탑승하였다. 시험 차량은 2001년 1월 1일 이후 다목적 자동차 배출허용기준, 즉, CO 1.1 g/km 이하, THC 0.22 g/km 이하, $NO_x$ 0.95 g/km 이하 및 PM 0.11 g/km 이하의 배출허용기준 대응 차량이다. 시험 차량의 주요 제원을 표 2에 요약하였다. 차량은 에어컨과 히터 가동 없이 열간 상태로 주행되었다. PEMS는 시험 전에 충분히 예열되었고, 시험 전에 질소 가스 및 혼합가스($CO_2$ 19%, CO 0.48%, THC 980 ppmC, $NO_x$ 485 ppm)를 사용하여 분석기의 영점 및 스팬 교정을 실시하였다.

### 2.3 주행 시험 경로

주행 경로는 인천광역시 서구 국립환경과학원과 인천광역시 계양구 임학사거리 사이의 왕복 약 22 km의 경로이다. 주행 경로 상에 존재하는 교차로 및 교통 신호는 각각 13개 및 51개이다. 허용 최고 속도는 80 km/h이다. 출발지인 국립환경과학원 인근을 제외한 대부분의 구간은 경명대로 왕복 8차선 구간이다.

**Table 3. Area descriptions for each link in test route.**

| Area description | Links | |
|---|---|---|
| | O→D[a] | D→O[b] |
| National Institute of Environmental Research | 1, 2 | 21, 22 |
| Industrial complex (Seobu) | 3, 4 | 19, 20 |
| Intersections (Binjungnae & Gongchon) | 6 | 17 |
| Hill (Jingmay) | 8～10 | 13～15 |
| Subway stations (Geysan & Imhak) | 11 | 12 |

[a]From origin to destination
[b]From destination to origin

전체 주행 경로를 약 1 km 거리를 갖는 22개의 도로 소구간(Link)으로 분할함으로써 실험 경로 주변 입지 여건을 반영한 배출량 분석을 실시하였다. Link 1～11은 출발지(Origin, "O"로 표기)인 국립환경과학원에서부터 목적지(Destination, "D"로 표기)이자 회차 지점인 임학사거리 방면으로 주행하는 경로(O→D)이며, Link 12～22는 목적지로 복귀하는 경로(D→O)이다. 표 3은 소구간별 입지 여건을 요약한 것이다.

Link 3, 4 및 19, 20은 출퇴근 시간 교통량이 많은 소구간으로서 인천 서부산업단지 및 인천국제공항 고속도로 북인천 IC 인근에 위치한다. Link 6과 17에 위치한 빈정내 사거리와 공촌 사거리는 주행 경로 상에서 교통량이 가장 많고, 출퇴근 첨두시간의 교통 정체가 빈번한 곳이다. 2010년 인천광역시 자료에 따르면 공촌사거리의 주간(오전 7시～오후 6시) 교통량은 59,158대로서, 2010년 우리나라 전체도로 주간 평균 교통량인 9,382대 대비 6배 이상 많은 수준이다(Traffic Monitoring System, 2011). 특히 O→D 방면 소구간인 Link 6은 구배 약 +3% 경사로 구간이므로, 지형적인 요인에 따른 정체 효과도 있을 것으로 사료된다.

Link 8～10과 13～15는 계양산 인근 구간으로서, 교통 흐름이 원활하고 교통량의 변화가 적은 소구간이다. O→D 방면으로, Link 8부터 구배 약 +7%의 경사로가 시작되어 Link 9의 약 300 m 지점에서 최고 지점인 징메이 고개에 이르게 된다. 이후 내리막길은 Link 9의 잔여 구간과 Link 10까지 이어진다. D→O 방면으로는 Link 13부터 Link 14의 징메이 고개까지

구배 약 +7%의 경사로가 이어지고, 이후 Link 15까지 내리막길이 계속된다. Link 10과 15의 내리막길에서는 차량의 관성력을 이용한 타행주행이 가능하다.

회차 지점 부근의 Link 11, 12는 인천 지하철 1호선 임학역과 계산역이 위치하는 주거 및 상업 지역이다. 이 지역은 횡단보도 및 교통 신호가 많고, 교통량의 변화 또한 많은 지역이다.

### 2.4 실험 결과 분석

10회의 도로 주행 실험의 22개 소구간 별로 오염물질 배출량을 각각 구함으로써 오염물질 별로 총 220개의 소구간 배출량을 산정하였다. 산정된 배출량은 식(1)과 같은 허용기준 대비 비율의 형태로 무차원화하여 허용기준 대응 여부 및 초과 비율을 용이하게 확인할 수 있도록 하였다.

$$DR_{i,j,k}=\frac{ME_{i,j,k}}{ES_k} \quad (1)$$

$$ME_{i,j,k}=\frac{\sum_{t=1}^{n} ER_{i,j,k,t}}{D_{i,j}} \quad (2)$$

여기서 DR은 허용기준 대비 비율(Deviation ratio)이다. 아래 첨자 i는 주행 실험(1～10), j는 소구간(1～22), k는 오염물질(CO, THC, $NO_x$)을 의미한다. 허용기준 대비 비율이 1.0을 초과하면 해당 소구간의 배출량이 배출허용기준을 초과하는 경우이고, 허용기준 대비 비율이 1.0 이하이면 배출허용기준을 만족하는 경우이다. 허용기준 대비 비율은 실도로 상에서 측정된 배출량을 배출허용기준과 비교하기 위해 많이 사용되는데, 특히 배출허용기준이 단위 주행거리 당 오염물질 배출량, 즉 (g/km) 단위로 표현되는 소형 자동차에 대해 적합한 것으로 알려져 있다 (Weiss *et al.*, 2011).

ME는 측정된 배출량(Measured emission, g/km)으로서, 식(2)와 같이 계산된다. ER은 1 Hz 주기로 측정된 배출율(Emission rate, g/s)이고, D는 소구간의 거리(km)이다. t는 1 Hz 주기로 측정된 각 배출율의 측정 시각(s), n은 전체 측정 시간(s)을 의미한다. ES은 배출허용기준(Emission standard, g/km)으로서, $ES_{CO}$=1.1 g/km, $ES_{THC}$=0.22 g/km, $ES_{NO_x}$=0.95 g/km이다.

차량 전방 영상을 이용하여 화면상에 촬영된 차량 대수, 차량 간의 간격 등을 조사하여 정성적인 교통량 수준을 분석하였다. 교통량을 정량화하기 위한 지표로서 차량이 소구간에 진입하여 진출할 때까지 머무는 시간인 체류 시간(Travel time)을 선정하고, 두 변수 간의 상관성 여부를 조사하였다. 조사 결과 교통량과 체류 시간 사이의 상관성이 확인되어 정량적인 교통량을 측정하는 대신 체류 시간을 교통량의 지표로 활용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전체 주행 구간 및 소구간별 오염물질 배출량

10회의 주행 실험의 평균 차속은 25.9 km/h로 측정되었다. 10회 주행 중 최고 평균 차속은 32.3 km/h로서 주중 평일 오전 11시 경에 실험한 결과이다. 최저 차속은 19.1 km/h로서 주중 평일 오후 6시부터 약 1시간 30분 동안 주행한 결과이다.

주행 경로에서의 실험 차량의 오염물질 배출량 측정 결과는 평균적으로 배출허용기준을 만족하였다. 그림 2에 나타낸 바와 같이, 전체 실험의 배출량 평균은 $NO_x$ 0.91 g/km, CO 0.37 g/km, THC 0.14 g/km로서 배출허용기준 대비 각각 4%, 66% 및 36% 낮은 수준이다.

각 주행 실험별 CO와 THC는 10회의 주행 결과가 모두 배출허용기준을 만족하였다. $NO_x$ 배출량은

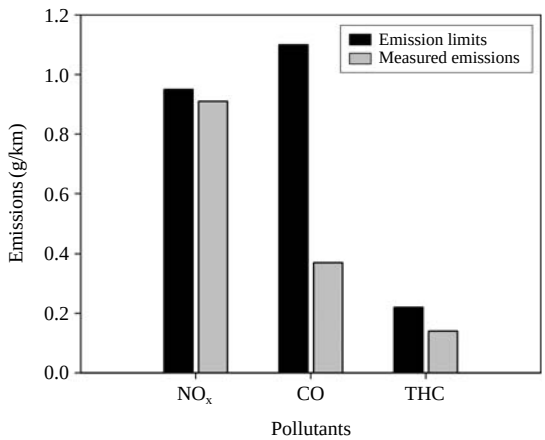
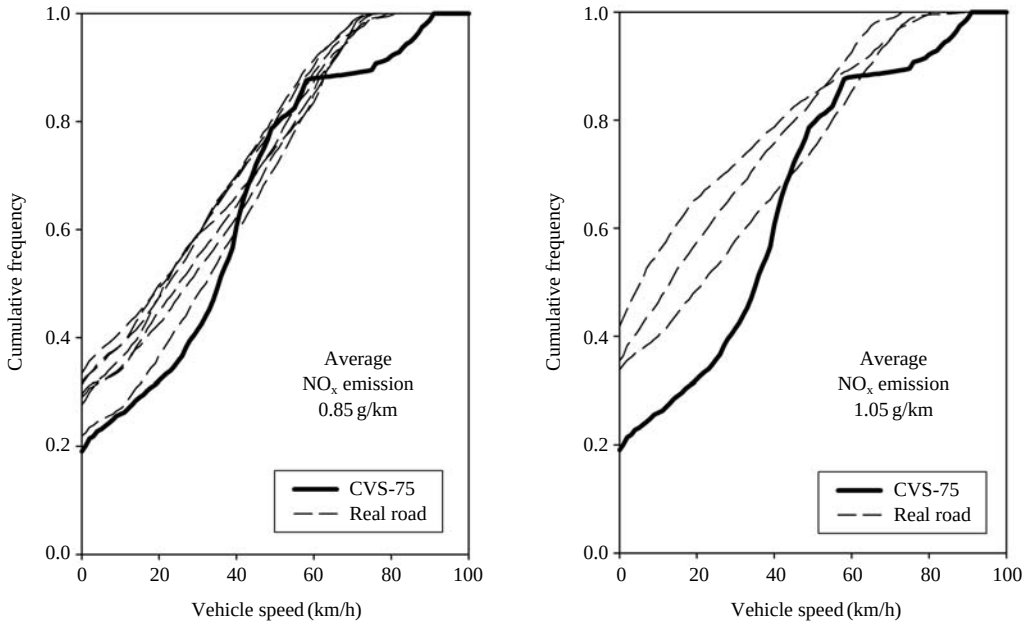



**Fig. 2. Comparison of emission limits and measured average on-road emissions for $NO_x$, CO, and THC.**




(a) $NO_x$ emission < limit (b) $NO_x$ emission > limit

**Fig. 3. Frequency distributions for the vehicle speed of 10 individual real road driving patterns and CVS-75 driving pattern.**

10회의 주행 중 7회의 주행에서는 배출허용기준을 만족하였으나, 3회 (첨두시간 2회, 비첨두 시간 1회)의 주행에서 배출허용기준을 5～14% 초과하였다. 허용기준을 만족한 7회 주행의 $NO_x$ 배출량 평균은 0.85 g/km이고, 초과한 3회 주행의 $NO_x$ 배출량 평균은 1.05 g/km이다.

실험 자동차의 배출허용기준은 인증 실험용 표준주행 패턴인 CVS-75 주행 패턴을 주행할 때의 오염물질 배출량을 기준으로 수립된 것이다. 주행 패턴은 자동차 오염물질 배출량에 영향을 미치므로, 실제 도로상의 배출량 측정결과를 배출허용기준과 비교하기 위해서는 주행 패턴에 대한 고찰이 선행되어야 할 것으로 사료된다. 그림 3은 실도로 시험시의 주행 패턴과 CVS-75 주행 패턴을 차속 누적 도수 비율로 비교한 것이다. 그림 3(a)에는 $NO_x$ 배출허용기준을 만족하는 7회의 주행 패턴을, 그림 3(b)에는 허용기준을 초과한 3회의 주행 패턴을 각각 도시하였다. 배출허용기준을 만족하는 경우의 주행 패턴은 CVS-75 주행 패턴 대비 공회전 비율이 다소 높고, 차속 70 km/h 이상의 고속 주행 비율이 낮은 경향을 보이고는 있지만 전체적으로 CVS-75 주행 패턴과 유사한 경향을 보이고 있다. 반면 배출허용기준을 초과하는 경우는 표준 주행 패턴 대비 저속 주행의 비중이 2배 이상까지 높아지는 경향을 보이고 있다. 예를 들어 CVS-75 주행 패턴의 차속 20 km/h 이하 비중이 32%인데 반해, 그림 3(b)의 주행 패턴에서의 비중은 48～66%에 이른다. 저속 주행의 비중이 높다는 것은 주행 중 정차를 반복하게 되는 경우가 많으며, 공회전의 비율도 높아짐을 의미하는 것이므로 $NO_x$ 배출 측면에서 바람직하지 않은 조건으로 사료된다. 따라서, 저속 주행의 비중이 높은 경우의 $NO_x$ 배출량이 많은 것은 일관성 있는 결과라 할 수 있다.

그림 2와 3의 결과를 통해 시험 차량이 제작 당시의 배출허용기준 대응 성능을 비교적 잘 유지하고 있음을 확인하였다. 동시에, 평균 배출량 결과가 배출허용기준을 만족하는 경우라 할지라도 주행 패턴의 특징이 상이한 개별 주행에서는 만족 여부가 달라질 수 있음을 파악하였다.

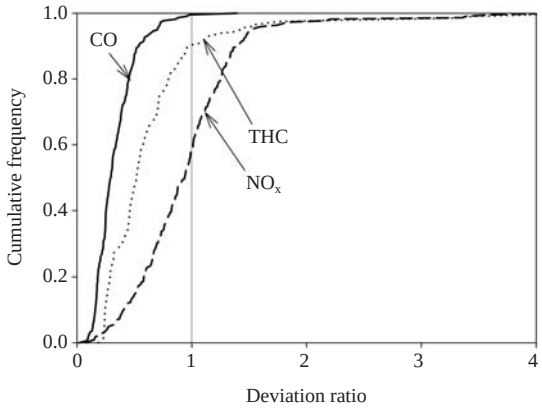



**Fig. 4. Frequency distributions for the deviation ratio of measured on-road $NO_x$, CO, and THC emissions to corresponding emission standards for 220 road links with length of 1 km.**

그림 4에 220개 소구간에서의 허용기준 대비 비율을 누적 도수 비율로 표시하였다. $NO_x$는 전체의 58 %인 128개 소구간, 거리 기준으로는 전체 주행거리 220 km 중 128 km의 주행 구간에서 배출허용기준을 만족하였다. 나머지 42%인 92개 소구간의 평균 배출량은 배출허용기준보다 평균 40% 높았고, 최대 4.3배 많은 배출량을 보인 소구간도 확인되었다. CO는 거의 전 구간에서 배출허용기준을 만족하였으며, 단 1개의 소구간에서만 허용기준을 40% 초과하는 배출량을 보였다. THC는 90%의 주행 구간에서 배출허용기준을 만족하였고, 나머지 10%에서만 배출허용기준을 초과하였다.

## 3. 2 소구간별 체류 시간 및 $NO_x$ 배출량 변동 고찰

그림 5는 각 소구간별 체류 시간과 $NO_x$ 배출량 분포 특성이다. CO와 THC는 대부분의 소구간에서 배출허용기준을 만족하였으므로 $NO_x$ 결과만을 검토하였다. 각 소구간이 1 km의 간격으로 정의된 것을 감안하면 그림 5는 1 km의 공간 해상도를 갖는 실험차량의 $NO_x$ 배출량 정보라 할 수 있다.

소구간 내의 체류 시간은 교통량의 지표이므로, 체류 시간의 변동이 크다는 것은 해당 구간에서의 교통량 변화가 크다는 것으로 해석될 수 있다. 체류 시간의 변동이 큰 지역은 서부산업단지 인근, 공촌 사거리 인근, 그리고 계산역 인근 지역이다. 이 중에서도 O→D 방면 공촌 사거리를 포함하는 Link 6의 체류 시간은 108～962초 범위에서 넓게 변동하고 있다. 이는 차속으로는 3.8 km/h와 33.1 km/h로서, 동일한 지점에서 최대 8.7배까지 평균 차속이 변하고 있음을 의미한다. 상대적으로 체류 시간의 변동이 작은 구간은 국립환경과학원 인근과 징메이 고개 부근이다.

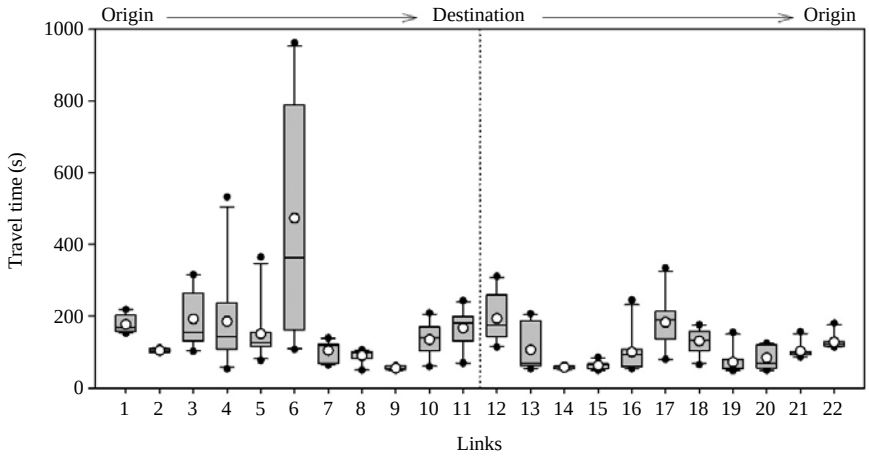
소구간별 체류 시간과 배출량 간의 사례별 특징을 두 가지 측면에서 분석하였다. 첫 번째는 체류 시간의 변동이 작은 소구간에서 관측되는 배출량 변동 특성이며, 두 번째는 체류 시간의 변동이 큰 소구간에서의 배출량 변동 특성이다.

### 3. 2. 1 체류 시간의 변동이 작은 소구간의 배출량 변동 특성

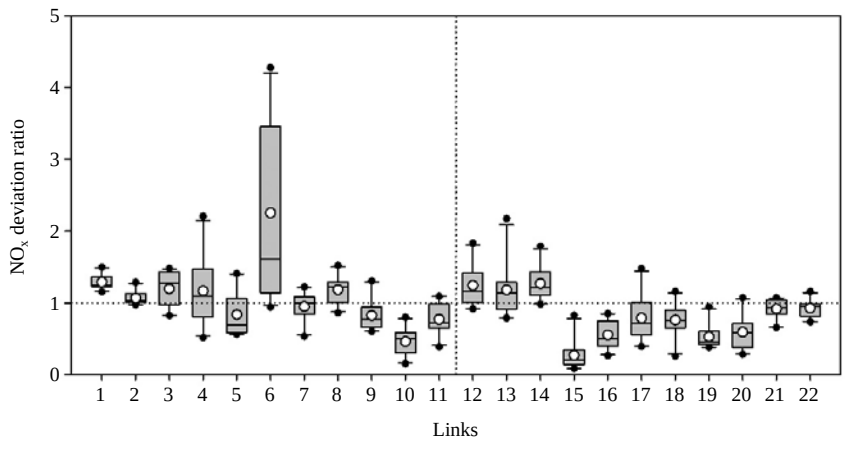
징메이 고개를 넘는 Link 9와 14는 체류 시간 변동이 매우 작은 소구간이며, 평균 차속도 각각 64.8 km/h, 63.2 km/h로 동등 수준이다. 현행 차속별 배출계수는 평균 차속을 독립변수로 하는 함수 형태를 갖고 있으므로, 만약 위 두 구간의 배출량을 차속별 배출계수를 이용하여 산정한다면 그 결과는 서로 유사할 것으로 기대된다. 그러나 도로상에서 실제로 측정된 Link 14의 $NO_x$ 배출량은 1.21 g/km로서 Link 9의 배출량인 0.78 g/km 대비 55% 높다. 유사한 평균 차속을 갖는 또 다른 소구간인 Link 15의 배출량도 Link 9, 14와는 차이를 보이고 있다. 이는 Link 15는 대부분이 내리막길 구간이므로 차량이 엔진에 부하를 거의 주지 않는 상태로 주행할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 이처럼 실제 도로상에서의 배출량 차이에는 도로의 특성, 주행 패턴의 변화 등이 복합적으로 영향을 미칠 수 있으므로, 이 영향을 현재의 차속별 배출계수에 반영하기 위해서는 적절한 보정계수의 개발과 활용 등이 필요할 것으로 사료된다.

### 3. 2. 2 체류 시간의 변동이 큰 소구간의 배출량 변동 특성

체류 시간의 변동이 상대적으로 큰 서부산업단지, 공촌 사거리 및 계산역 지역에서는 배출량의 변동도 증가하는 경향을 보이고 있다. 예를 들어, Link 6의 최대, 최소 배출량은 각각 0.89 g/km, 4.07 g/km이고, 이때의 체류 시간은 각각 127초, 962초이다. 이는 동일한 지점에서 교통량 증가에 따라 최대 4.6배까지 배출량이 증가 할 수 있으며, 자동차의 오염물질 배




(a) Travel time



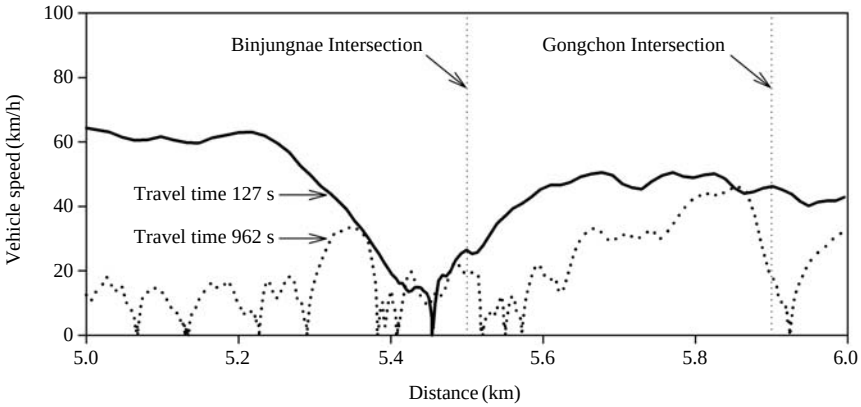

(b) $NO_x$ deviation ratio

**Fig. 5. Variability of travel time and $NO_x$ deviation ratio for 22 road links.[a,b]**
**[a]Blank circles denote average value of each link.**
**[b]The bottom and top of the box are the 25th and 75th percentile, respectively. The band near center of the box is 50th percentile. The upper and lower ends of the whiskers represent 95th and 5th percentile, respectively. Solid dots denote outliers.**

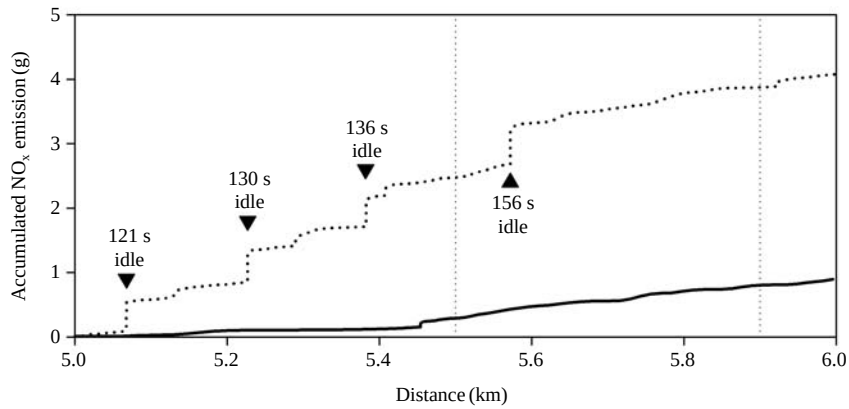
출 특성이 목표 수준으로 관리되는 경우라 할지라도 교통 상황에 따라 실제 배출량은 배출허용기준을 초과할 수 있음을 보여주는 사례이다.

그림 6과 표 4는 Link 6의 최대, 최소 배출량 사례에 대해 주행 거리에 따른 주행 패턴과 누적 $NO_x$ 배출량을 비교한 것이다. 체류 시간이 긴 경우, 시험 차량은 빈정내 사거리 전방부터 정차를 반복하며 주행하였다. 1분 이상 정차하는 경우는 총 4회 발생하였고, 정차 시간은 총 543초, 평균 약 136초로 나타났다. 반면 체류 시간이 짧은 경우에는 빈정내 사거리 전방에서 약 30초 간 정차한 것을 제외하면 전 구간을 원활히 주행하였다.

체류 시간이 길 때는 정차 시간도 길어지므로, 소구간 배출량에 기여하는 정차 시간의 비중이 커진다. 본 사례에서는 전체 배출량의 44%인 1.81 g이 정차 시간 중에 배출되는 것으로 확인되었다. 반면 체류 시간이 짧은 경우는 정차 시간의 기여율이 6% 정도로 낮다. 체류 시간이 긴 경우의 정차 시간 중 배출




(a) Vehicle speed profile




(b) Accumulated $NO_x$ emission

**Fig. 6. Comparison of vehicle speed profiles and accumulated $NO_x$ emissions in Link 6 according to travel time.**

**Table 4. Accumulated $NO_x$ emissions in Link 6 according to travel time and vehicle driving modes.**

| Item | | $NO_x$ emission | | |
|---|---|---|---|---|
| Vehicle driving mode | | Stop | Go | Total |
| Travel time | 127 s | 0.05 g | 0.84 g | 0.89 g |
| | 962 s | 1.81 g | 2.26 g | 4.07 g |

량은 그렇지 않은 경우에 비해 36배 더 많은 것으로 분석되었다. 주행기간 중에 배출되는 배출량 또한 두 사례 간에 차이를 보이고 있다. 체류 시간이 긴 경우는 교통량 증가로 인해 가속과 감속을 반복하면서 짧은 거리를 여러 번에 나누어 주행하게 된다. 이에 반해 체류 시간이 긴 경우는 차속의 변화량이 크지 않으며, 상당 부분의 주행 경로를 큰 속도 변화 없이 주행하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 주행 패턴의 차이는 배출량의 변화를 초래하여, 결국 가감속이 잦은 경우는 그렇지 않은 경우 대비 2.7배 많은 $NO_x$를 배출하는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 에어컨과 히터 가동 없이 열간 상태로 실제 도로를 주행하는 소형 경유 자동차의 대기오염물질 배출량이 대기환경보전법 상에 규정된 제작자동차 배출허용기준에 얼마나 잘 부합하고 있는지를 분석하고, 허용기준을 초과하는 사례에 대한 원인을 파악하였다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 차량이 제작 당시의 대기오염물질 저감 성능을 잘 유지하는 경우라 할지라도, 실도로 주행 패턴이 표준 주행 패턴과 상이한 경우 또는 개별 주행 소구간에서는 배출허용기준을 초과할 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 소구간별 배출량 변화에는 도로의 주변 여건이나 교통량 분포가 중요한 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 시험 차량의 평균 $NO_x$ 배출량은 제작 당시의 배출허용기준을 만족하였으나, 공간 해상도를 높여 분석한 소구간별 $NO_x$ 배출량은 전체 구간 중 42%에서 배출허용기준을 초과하였다. 실험 주행 구간에서 교통량 변화가 가장 심한 공촌 사거리 부근에서는 교통량 증가에 따라 $NO_x$ 배출량이 최대 4.6배까지 증가하는 사례가 관찰되었다. 이 결과는 총체적인 대기질 관리를 위해서는 자동차의 오염물질 배출 특성 관리와 함께 교통 시스템 상의 교통흐름 개선이 동반되어야 함을 보여주는 사례라 할 수 있다.

2) 교통량 증가에 따라 초래되는 배출량 증가에 영향을 미치는 대표적인 요소는 '장기간의 정차 기간' 및 '가감속을 반복해야 하는 열악한 주행 상황'으로 파악되었다. 교통량이 많은 경우는 교통량이 적은 경우보다 정차 기간에는 36배, 주행 중에는 2.7배 더 많은 $NO_x$ 배출량을 나타내었다. 교통량 증가에 의해 초래되는 이와 같은 실제 도로상의 배출량 증가는 차량 대수 및 주행거리와 같은 산술적인 활동도 증가와 함께 상호 작용하여 대기질 악화 정도 및 도로 입지 여건에 따른 지역적 불균형을 심화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3) 실제 도로상에서는 평균 차속이 유사한 경우라도 다른 배출량을 보이는 경우가 있음을 관찰하였고, 이를 평균 차속에 대한 함수 형태로 주어지는 현행 차속별 배출계수만으로는 설명하기는 어려움을 확인하였다. 향후 차속별 배출계수가 좀 더 다양한 주행 조건을 반영할 수 있도록 하기 위해서는 단기적으로는 도로 경사도 및 주행 패턴 변화 등을 감안 할 수 있는 보정계수의 활용이 요구되며, 장기적으로는 미시적인 배출량 산정 모델의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 교통환경연구소의 조사연구사업으로 수행되었습니다. 공촌사거리 교통량 조사 결과를 제공해 주신 인천광역시 관계자 분들께 깊이 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Akard, M., K. Oestergaard, S. Porter, M. Gautam, D. Carder, D. Love, T. Moye, and H. Garabedian (2004) Further investigation into the performance of two different on-board emission measurement system compared to laboratory measurement, Technical Paper of Society of Automotive Engineers, 2004-01-3480.

Andre, M., R. Joumard, R. Vidon, P. Tassel, and P. Perret (2006) Real world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars, Atmospheric Environment, 40, 5944-5953.

Brundell-Freij, K. and E. Ericsson (2005) Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns, Transportation Research Part D, 10, 213-229.

California Department of Transportation (2008) MOVES vs. EMFAC: A comparative assessment based on a LA county case study, Caltran Task Order 9 and 53.

European Commission (2011), Real driving emissions of vehicles, CARS 21 (Competitive Automotive Regulatory System for 21st century) Working group 4 meeting discussion paper, Brussels, 15 APRIL 2011.

Frey, H.C., K. Zhang, and N. Rouphail (2008) Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements, Environmental Science and Technology, 42 (7), 2483-2489.

Gierczak, C., T. Korniski, T. Wallington, and J. Butler (2006) Laboratory evaluation of the SEMTECH-G portable emissions measurement system (PEMS) for gasoline fueled vehicles, Technical Paper of Society of Automotive Engineers, 2006-01-1081.

Jang, Y., J. Kim, P. Kim, Y. Shin, W. Kim, and Y. Choi (2010) Estimation of vehicle kilometers travelled and air pollution emission from motorcycles, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 26 (1), 48-56. (in Korean with English abstract)

Jeon, S., M. Eom, and J. Hong (2010) A study on the comparison of emission characteristics of in-use urban bus by test modes, Journal of Korean Society for Atmos-

pheric Environment, 26(4), 403-411. (in Korean with English abstract)

KAMA, Korean Automobile Manufacturers Association (2003) Monthly statistic report of motor vehicle registration.

KAMA, Korean Automobile Manufacturers Association (2010) Monthly statistic report of motor vehicle registration.

Kim, S., M. Eom, and J. Hong (2010) The emission characteristics of bio-diesel fuel in heavy-duty engine, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 26(5), 499-506. (in Korean with English abstract)

Lee, T., J. Keel, J. Park, Y. Park, J. Hong, and D. Lee (2011) Speed-based emission factor regarding vehicle specific power and acceleration during on-road driving, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, 19(1), 73-81. (in Korean with English abstract)

Lee, Y., G. Kim, Y. Pyo, M. Sunwoo, and M. Eom (2002) Development of chassis dynamometer test modes to derive the emission factors for light duty vehicles, Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, 10(6), 117-124. (in Korean with English abstract)

Lim, C., J. Hong, J. Kim, J. Lee, Y. Lim, S. Kim, and S. Jeon (2011) A study on reduction effects of air pollutant emissions by automotive fuel standard reinforcements, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(2), 181-190. (in Korean with English abstract)

Nakamura, H., M. Akard, S. Porter, and I. Khalek (2007) Performance test results of a new on board gaseous emission measurement system conformed with CFR Part 1065, Technical Paper of Society of Automotive Engineers, 2007-01-1326.

NIER, National Institute of Environmental Research (2011) Annual report of air quality in Korea 2010.

Traffic Monitoring System (2011) Korean Institute of Construction Technology, accessed at http://www.road.re.kr/analysis/analysis_01.asp?main_no=5&sub_no=1.

U.S. EPA (2002) Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle & equipment emission system, EPA report 420-R-02-027.

U.S. EPA (2010) Official release of the MOVES2010 motor vehicle emissions model for emissions inventories in SIPs and transportation conformity, Federal Register 75(40).

Weiss, M., P. Bonnel, R. Hummel, U. Manfredi, R. Colombo, G. Lanappe, P. Le Lijour, and M. Sculati (2011) Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems, European Commission, Joint Research Centre report JRC 62639 (EUR 24697 EN).

Zhai, H., H.C. Frey, and N. Rouphail (2008) A vehicle-vpecific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses, Environmental Science and Technology, 42(21), 7985-7991.