

고속도로 영업소의 자동 요금 징수 시스템 도입에 따른 소형 경유 화물트럭의 배출가스 저감 효과 분석

An Analysis on the Emission Reduction Effect of Diesel Light-duty Truck by Introducing Electronic Toll Collection System on Highways

박준홍* · 이종태 · 이태우 · 김지영 · 김정수 · 길지훈
국립환경과학원 교통환경연구소

(2012년 5월 7일 접수, 2012년 7월 19일 수정, 2012년 8월 1일 채택)

Junhong Park*, Jongtae Lee, Taewoo Lee, Jiyoung Kim,
Jeongsoo Kim and Jihoon Kil

National Institute of Environmental Research, Transportation Pollution Research Center

(Received 7 May 2012, revised 19 July 2012, accepted 1 August 2012)

Abstract

Electronic Toll Collection System (ETCS), so called “Hi-Pass” in Korea, has improved traffic flow at toll gate of highways. It is known that the improvement of traffic flow should reduce air pollutants and CO₂ from vehicles. In this study, real driving emission of a light duty truck with Portable Emission Measurement System (PEMS) has been measured to evaluate the emission reduction effect due to ETCS. The correlations between driving variables and emissions have been analyzed to verify its effect on traffic flow improvement and emission reduction at toll gate. We considered average vehicle speed, Relative Positive Acceleration (RPA), and the distance of queue as driving variables. Compared to passing Manual Toll Collection System (MTCS) lane without queue, ETCS was able to reduce 38.7% of NO_x, 21.6% of soot, and 27.7% of CO₂. The results showed that the higher the average vehicle speed, the lower RPA and no queue in ETCS contributed to the emission reductions. Linear equation models with RPA and queue have been established by the multiple linear regression method. The linear models resulted in the higher coefficient of determination than those with only average vehicle speed used for establishing vehicle emission factors.

Key words : ETCS (Electronic Toll Collection System), MTCS (Manual Toll Collection System), Real driving emission, PEMS, Driving variables

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7610, E-mail : pjhy98@korea.kr

1. 서 론

국내 고속도로 영업소의 자동요금징수 시스템(ETCS-Electronic Toll Collection System)은 판교 등 3개 영업소에서 2000년 6월부터 시범운행을 거친 후, 2007년 12월부터 전국적으로 보급되었다. “하이패스”로 알려진 국내 ETCS는 한국도로공사에서 운영 중인데, 2012년 1월 현재 전체 영업소 통과 차량의 약 50%가 이용하고 있다. 유봉석 등(2010)이 외곽순환도로 김포영업소의 주행특성을 조사한 연구에 따르면, ETCS 주행로는 기존의 수동요금징수 시스템(MTCS-Manual Toll Collection System)보다 평균차속이 약 15% 정도 빠른 것으로 나타나는 등 고속도로 영업소의 교통흐름 개선에 상당히 기여하고 있다.

교통흐름의 개선으로 평균속도가 증가하면, 자동차의 단위 주행거리 당 대기오염 물질과 CO₂는 감소하는 것으로 알려져 있다. NIER(2009, 2000)에서 산출하고 있는 g/km 단위의 자동차 대기오염물질 배출계수는 평균 차속이 증가하면 대체로 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. Lyu *et al.*(2006)의 승용차 CO₂ 배출량 특성 연구에서도 이러한 경향이 확인된 바 있다. 한국도로공사(2009)는 ETCS 도입에 따라 기대되는 NO_x, CO₂의 저감효과를 산정할 때 국립환경과학원에서 산출한 평균속도 기반의 배출계수를 활용한 바 있다.

국립환경과학원은 NIER 모드라는 자동차의 평균속도 별 대표주행 패턴을 개발하여 배출계수를 산출하고 있는데, US EPA(2003)의 MOBILE 6와 유럽의 COPERT 4(Gktzoflias *et al.*, 2007) 모델도 각국의 대표 주행 패턴을 활용하여 자동차 배출량 산정에 적용되고 있다. Coelho *et al.*(2009)은 국가 또는 지역 단위 등 거시적 관점에서의 배출량 산정에는 이러한 방식들을 유용하게 활용할 수 있지만, 특정 주행 모드를 사용함에 따라 실제 도로 주행 중에 발생하는 다양한 운행 조건을 반영하는 데에는 한계가 있음을 지적하였다. US EPA(2004, 2001)는 미시적인 영역의 배출량을 예측할 때 자동차 배출가스에 영향을 주는 주행 인자들의 실시간 변화를 반영할 수 있도록, MOVES 모델을 개발하여 기존의 MOBILE 6 모델을 대체하고 있다. 미시적인 영역에 해당하는 고속도로 영업소의 주행패턴은 국내의 자동차 배출계수 산정 방법인 NIER 모드의 주행 패턴과는 다르므로, ETCS

도입에 따른 자동차 배출가스 변화를 타당하게 평가하기 위해서는 고속도로 영업소에서의 실제 주행특성 변화와 연계하여 분석하는 것이 필요하다.

고속도로 영업소의 자동차 배출가스 특성과 관련된 연구를 살펴보면, 특정 주행모드를 활용하기보다는 고속도로 영업소의 실제 도로 주행 패턴을 모델링하여 배출량을 예측하거나, 이동식 배출가스 측정장비(PEMS-Portable Emission Measurement System)를 이용한 실측 방법을 사용하고 있다. PEMS는 자동차에 탑재하여 도로 주행 중의 실시간 배출가스 측정이 가능한데, OBD(On-Board Diagnostics) 및 GPS 데이터를 함께 측정함으로써 주행 변수와 연계한 배출가스 특성을 분석할 수 있는 장점이 있다. Bartin *et al.*(2006)은 미국 뉴저지의 ETCS 도입 영향 분석에서 기존 MTCS와의 실 주행패턴 차이를 반영한 시뮬레이션 모델을 적용하여, ETCS 도입에 따른 자동차 대기오염물질 저감효과를 예측하였다. Coelho *et al.*(2005)은 포르투갈 리스본 고속도로의 ETCS와 MTCS의 실 주행패턴을 모델링하고, 이를 차량비출력(VSP-Vehicle Specific Power)에 기반한 자동차 배출가스 모델과 조합하여 정지시간, 대기거리 등의 변화에 따른 ETCS 도입효과를 예측하였다. Song *et al.*(2008)은 베이징 고속도로 영업소 평가에서 소형 휘발유 차량에 PEMS를 탑재하여 ETCS의 배출가스 저감효과를 실측하고, 주행인자 중 VSP 변화와 연계하여 분석하였다.

본 연구의 목적은 고속도로 영업소 교통흐름의 개선에 따른 소형 경유 화물트럭의 대기오염물질 및 CO₂ 저감 효과를 분석하는 것이다. 이를 위하여 소형 경유 화물트럭에 PEMS를 탑재하고 고속도로 영업소를 실제 주행하여 ETCS와 MTCS 주행 시의 배출가스 차이를 비교하였다. 또한, ETCS 도입에 따른 교통흐름의 개선이 배출가스 저감효과로 나타남을 규명하기 위하여 PEMS를 통해 측정된 도로 주행변수와 배출가스 간의 상호 연관성을 분석하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 고속도로 영업소의 요금 징수 시스템에 따른 주행 특성

대부분의 국내 고속도로 영업소는 그림 1에 제시한 바와 같이 ETCS와 MTCS가 함께 설치되어 있다.

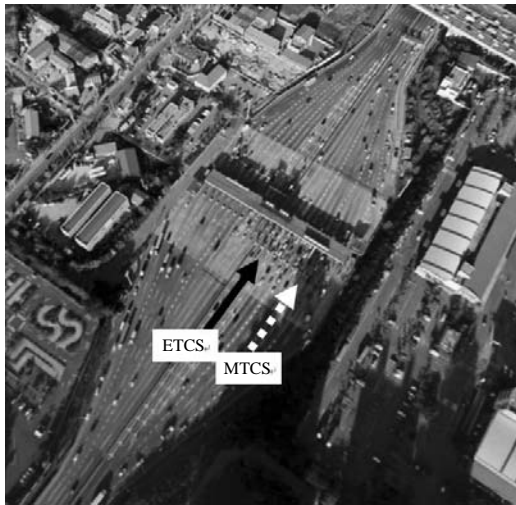


Fig. 1. Toll collection systems in the highway.

기존의 MTCS를 통과하는 차량은 요금 지급을 위해 정지하는 시간이 필요하고, 대기차량이 있는 경우에는 일정기간 가속과 정지를 반복하게 된다. ETCS는 고속도로의 교통 흐름이 원활한 상태에서는 대체로 요금지급을 위한 정지와 대기시간은 없다고 볼 수 있다. 영업소의 요금징수 형태에 따른 차량 주행특성은 MTCS는 감속 (deceleration) → 대기 (stop and go) → 정지 (idle) → 가속 (acceleration)으로, ETCS는 감속 (deceleration) → 가속 (acceleration)으로 요약할 수 있다. ETCS의 도입으로 통과차량의 대기, 정지가 사라지고 요금소 진출입 시의 감속 및 가속 특성도 달라진다고 볼 수 있다. 따라서 이러한 주행 특성 변화가 영업소 통과 시의 자동차 대기오염물질과 CO₂ 배출량에 영향을 줄 것으로 예상된다. 본 연구에서는 소형 경유 화물트럭에 PEMS를 탑재하여 ETCS와 MTCS를 각각 주행하고, 배출량을 비교함으로써 ETCS의 자동차 대기오염물질 및 CO₂ 저감효과를 분석하였다.

2.2 시험 자동차 및 시험내용

본 연구에서 활용한 PEMS는 대형차 배출가스 결합확인검사용으로 개발되었다. 장비가 다소 크고, 탑재 시 중량이 약 300 kg 정도 증가하므로, 점유율이 높은 소형 승용차에 탑재하기는 어려웠다. 이러한 이유로 시험 자동차로는 PEMS 장비의 탑재성이 용이한 1톤 경유 화물트럭을 이용하였다. 대기환경보전법



Fig. 2. Test vehicle equipped with PEMS.

Table 1. Main specifications of test vehicle.

Model name (year)	Porter II (2005)
Displacement	2497 cc
Vehicle type (fuel)	Light duty truck (diesel)
Fuel injection	Common rail direct injection
Rated power (revolution)	123PS (3800 rpm)
Gross vehicle weight	2955 kg
Emission level	EURO-3 equivalent
Emission reduction technologies	Diesel oxidation catalyst Exhaust gas recirculation

시행규칙 별표 17의 자동차 배출가스 허용기준 중 2002년 7월 기준 (Korean Ministry of Environment, 2009)에 따라 제작된 차량으로서 EURO-3 수준 (UN ECE, 2005)의 배출가스 제어 기술을 적용한 차량이다. 그림 2에는 시험차량에 PEMS를 탑재한 모습을, 표 1에는 시험차량 주요 제원을 제시하였다.

PEMS가 탑재된 시험 자동차로 경인고속도로 (인천 영업소), 제2경인 고속도로 (남인천 영업소), 서해안 고속도로 (서서울 영업소), 외곽순환도로 (김포 영업소)를 실제 주행하여 ETCS 5회, MTCS 12회 등 총 17회의 주행 데이터를 분석하였다. 시험을 수행한 영업소들은 경사가 거의 없는 평지에 위치하고 있고, 영업소 통과 전 후의 직선 구간이 상당히 길어서 요금 지급방식 이외의 다른 요인들에 의한 배출가스 영향은 배제할 수 있는 것으로 판단된다. 데이터 분석 구간은 영업소의 주행 특성인 감속-대기-정지-가속의 형태가 나타날 수 있는 거리로 선정하였는데, 요금소 전후 500 m, 총 1 km가 적정한 것으로 판단하였다. 영업소에서의 대기거리와 통과속도 등을 임

의로 재현하지 않고, 실차 주행 시험 시에 발생된 교통흐름에 따라 주행하였다.

2.3 도로 주행 중 배출가스 측정 방법

자동차 배출가스 인증과 배출량 산정을 위한 시험은 주로 차대동력계와 정용량 시료채취 장치(CVS-Constant Volume Sampler)를 활용하고 있다. 최근에는 도로 주행 시의 배출가스 평가 필요성이 높아지고, PEMS의 성능이 향상됨에 따라 실제 도로 주행 시의 배출가스 시험이 규제로 시행되는 단계에 이르렀다. US EPA (2005)는 대형차 배출가스 결함확인검사에 PEMS를 활용하기 위하여 2000년부터 시험방법 개발과 장비 신뢰성 평가를 진행하였다. 미국의 대형차 제작사는 2007년 이후 연식부터 PEMS를 이용하여 가스상 물질에 대한 실도로 배출가스 시험을 수행하고 그 결과를 EPA에 보고하여야 한다(US EPA, 2005). European Commission (2011)도 2004년부터 PEMS를 이용한 대형차 배출가스 결함확인검사 방법에 대한 연구를 추진해 왔고, EURO-6이 시작되는 2013년 신규 인증 차량부터 가스상 물질에 대해서 우선 시행하기로 결정하였다. 입자상물질은 미국은 2011년식 이후부터 시작하였지만, 유럽은 장비의 신뢰성에 대한 평가를 계속 진행 중에 있다.

그림 3에는 PEMS 장치의 구성에 대해서 나타내었다. PEMS는 배기가스 농도 분석기, 배기가스 유량계,

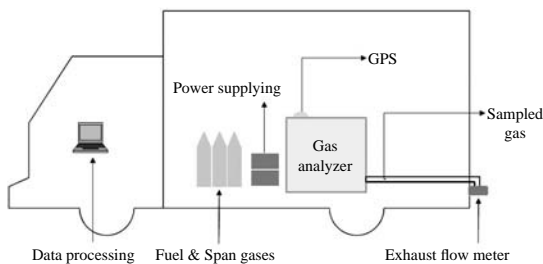


Fig. 3. Schematic diagram of a PEMS.

Table 2. Main specifications of PEMS.

Model	Items	Principle	Range	Manufacturer
OBS-2000	NO _x	Chemiluminescence detector	0 ~ 500 ppm	Horiba
	CO ₂	Non-dispersive infrared detector	0 ~ 19%	
	Exhaust flow	Pitot tube	0 ~ 4.5 m ³ /min	
Micro soot sensor	Soot	Photo-acoustic	0 ~ 50 mg/m ³	AVL

측정용 가스, 전원 공급장치, 제어 및 데이터 분석 장치로 구성된다. 배기가스 농도 분석기로 측정된 샘플 가스의 농도는 유량계에서 측정된 배기가스 유량과 조합하여 g/s 단위로 환산 가능하다. GPS를 통해 수신된 실시간 위치정보를 통해 차속을 산출할 수 있어서, 주행한 구간에 대해 g/km 단위의 배출량을 계산할 수 있다.

본 연구에서는 경유차의 주요 대기오염물질인 NO_x, Soot, CO₂를 분석 대상으로 하였다. 대기환경보전법 시행규칙 별표 17의 자동차 배출가스 허용기준은 입자상물질(PM, Particulate Matter)을 규제하는데, 엔진연소 중에 형성되는 탄소입자인 soot와 용해성 유기물질(SOF, Soluble Organic Fraction)을 포함한 것이다. 차량에 탑재하여 PM을 실시간 분석할 수 있는 장비는 구축되어 있지 않아서 soot 측정 장치를 활용하였다.

가스상 물질인 NO_x와 CO₂의 측정은 Horiba 사의 OBS-2000을 이용하였고, soot의 측정에 AVL 사의 Micro Soot Sensor를 사용하였다. 표 2에 PEMS 장비의 주요제원을 나타내었다. OBS-2000의 배출가스 분석기의 선형성과 반복성은 측정범위의 ±1% 이내이고, 영점 및 스펀 드리프트는 측정범위의 ±2% 이내 수준이다. 이는 자동차 배출가스 인증용 장비와 동일한 수준이다. 실제 도로 주행 배출가스 측정의 정도 관리를 위해 매 시험전후 영점 및 스펀의 드리프트가 기준 이내인지를 점검하였다. NIER (2010, 2009)은 PEMS를 이용한 실제 도로 주행 배출가스 측정 연구들에서 OBS-2000과 Micro Soot Sensor의 신뢰성에 대해 평가하였는데, 자동차 배출가스 인증 시험용 장비인 차대동력계-CVS 장비와 비교하여 양호한 결과를 나타내었다.

2.4 자동차 배출가스에 영향을 주는 주요 도로 주행 변수

Ericsson (2001)은 62가지의 도로 주행 변수를 선

정하여 요인분석법 (factorial analysis)을 통해 분석한 결과 9가지의 주행 변수가 자동차 배출 대기오염물질과 CO₂ 및 연료소비량에 큰 영향을 주는 것으로 보고하였다. 이들 변수는 가속을 위해 필요한 차량 출력 (power demand), 변속 특성, 자동차 속도의 3가지 특성과 관계된 변수들이다. Ericsson (2001)은 평균 속도만으로 배출량을 예측하는 방법의 한계를 지적하고, 배출가스에 영향을 주는 주행변수들을 포함하여 모델링할 것을 제안하였다.

Ericsson (2001)이 제시한 자동차 속도와 관계된 변수에는 차량 정지관련 변수가 있다. 고속도로 영업소에서는 MTCS의 요금 지급을 위해 가다 서다를 반복하는 대기거리 (queue)와 요금지급을 위해 정지하는 시간이 배출가스에 영향을 줄 수 있는 차량 정지관련 변수가 될 것으로 판단된다.

가속을 위해 필요한 차량 출력과 관계되는 대표적인 변수로는 RPA (Relative Positive Acceleration)가 있다. RPA는 식 (1)과 같이 속도와 양의 가속도의 곱을 시간에 대해 적분하여 주행거리로 나누어 준 값이다. 식 (2)에 나타난 바와 같이 속도와 양의 가속도의 곱은 차량단위 질량당 가속을 위해 필요한 출력의 의미를 가진다. RPA는 주행구간의 평균값이므로 본 연구와 같이 미시적 구간의 평균적인 특성을 분석하는데 용이하게 적용할 수 있다.

$$RPA = \frac{\int_0^T va^+ dt}{X} \tag{1}$$

$$va^+ = \frac{F_{accel}V}{m} = \frac{P_{accel}}{m} \tag{2}$$

여기서, RPA: 양의 상대가속도 [m/s²]

v: 자동차 속도 [m/s]

a⁺: 양의 가속도 [m/s²]

X: 주행거리 [m]

T: 주행시간 [s]

m: 차량 질량 [kg]

F_{accel}: 차량 가속에 요구되는 구동력 [N]

P_{accel}: 가속을 위해 요구되는 차량 출력 [W]

본 연구의 시험차량은 자동변속기를 장착한 차량으로서 변속과 관련된 영향은 고려하기가 어렵다. 따라서 고속도로 영업소 통과 시의 평균속도, RPA, 대

기거리를 주행변수로 하여 ETCS 도입 시의 주행변수 변화와 자동차 대기오염물질 및 CO₂ 배출량 변화 간의 관계를 분석하였다.

2.5 고속도로 영업소 통과 시 자동차 배출가스와 주행변수 간의 연관성에 대한 통계적 평가

자동차 배출가스와 주행변수 간의 연관성을 통계적으로 확인하기 위하여 다중 선형 회귀분석을 수행하였다. CO₂, NO_x, soot를 종속변수로 하고, 영업소 통과 시의 평균속도, RPA, 대기거리를 설명변수로 하였다. 종속변수 (Y)와 설명변수 (X_n) 간에 식 (3)과 같이 선형 모형을 적용하면, Y의 i번째 관측치 y_i는 X_n의 i번째 관측치인 x_i에 대하여 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \varepsilon \tag{3}$$

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \varepsilon_i \tag{4}$$

식 (3), (4)에서 β₀, β₁, β₂, β₃는 각 설명변수의 회귀계수이고, ε은 오차이다. 회귀계수를 추정하는 방법은 최소제곱법 (least squares method)을 일반적으로 적용한다. 식 (5)로 표현한 오차의 제곱합 S를 최소로 하는 β₀, β₁, β₂, β₃ 값을 구하는 방법이다.

$$S(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3) = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_{i1} - \beta_2 x_{i2} - \beta_3 x_{i3})^2 \tag{5}$$

모형의 통계적 유의성은 잔차에 대한 분산 분석을 통해 검증할 수 있다. 우선 3가지 주행변수를 모두 포함시켜 분석을 한 후 변수제거법 (backward elimination)을 적용하여 유의성이 낮은 변수들을 제거하고 추가 분석을 수행하였다. 모형의 결정계수 (R², coefficient of determination)는 모형과 평균의 차이의 제곱합을 SSR, 총변동을 SST라고 하였을 때 식 (6)과 같이 표현된다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \tag{6}$$

결정계수는 전체 변동에서 모형이 설명하는 부분의 비율을 의미하는데, 결정계수가 크다는 것은 모형의 설명력이 높은 것으로 해석한다. 모형의 회귀계수와 결정계수를 구하고 통계적인 유의성을 검증하기 위해 통계소프트웨어인 SPSS를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고속도로 영업소의 주행 특성

그림 4에 영업소 통과 시의 평균속도, 대기거리, RPA 범위를 나타내었다. ETCS 주행로의 평균속도는 54~69 km/h, RPA는 0.12~0.22 m/s²이었고, MTCS 주행로는 평균속도 18~53 km/h, RPA 0.19~0.29 m/s²이었다. 대체로 ETCS 주행로의 평균속도가 높고, RPA는 낮은 수준이었다. MTCS 주행로 통과 시 대기거리는 0~90 m 정도인데, 대기거리가 증가함에 따라 평균속도는 감소하는 경향을 나타내었다. 대기거리 10~30m에서는 평균속도가 35~37km/h로 큰 차이가 없었으나, 대기거리가 50 m 이상이 되면 평균속도가 25km/h 이하로 감소하였다. MTCS 주행로의 결과는 평균속도가 유사한 대기거리에 따라 대기거리 10m 미만을 MTCS-0, 대기거리 10~30m를 MTCS-1, 대기거리 50 m 이상을 MTCS-2의 3가지 조건으로 구분하여 분석하였다.

그림 5에 영업소 통과 시의 주행데이터를 감속(deceleration), 대기(stop and go), 정지(idle), 가속(acceleration) 주행 패턴으로 구분하였을 때 각 주행 패턴

의 점유 시간을 나타내었다. ETCS 주행 시에는 요금 지급을 위한 정지와 대기 시간이 없었고, MTCS에서는 요금지급을 위한 정지시간이 약 1~10초 정도로 전체 통과시간의 약 1~11% 정도였다. MTCS 통과 시에 요금 지급은 교통카드를 이용하였는데, 카드 인식기에 카드를 인식시키기 위한 준비 시간에 차이가 있고, 카드 인식기가 수차례에 걸쳐 카드를 인식하지 못하는 경우도 있어서 요금지급 시간에 상당한 편차가 나타났다. MTCS 통과 시에는 대기거리가 증가함에 따라 요금지급을 위한 대기시간이 점유하는 비율이 높아지는데 대기거리 10~30m인 경우에는 전체 통과시간의 약 15~31% 수준이었다. 대기거리가 50 m에 근접하면 대기시간은 전체 통과시간의 약 47%로서 50%에 근접하였고, 대기거리 90 m인 경우에는 59.1%로 영업소 통과 시 주행 패턴 중에서 가장 많은 시간을 점유하였다.

3.2 ETCS 도입에 따른 주행변수의 변화와 자동차 배출가스 특성

표 3에는 고속도로 영업소 통과 전후 500 m, 총 1 km 구간에서의 주행변수와 CO₂, NO_x, soot 배출량의 평균값을 비교하여 나타내었다. MTCS는 요금지급을

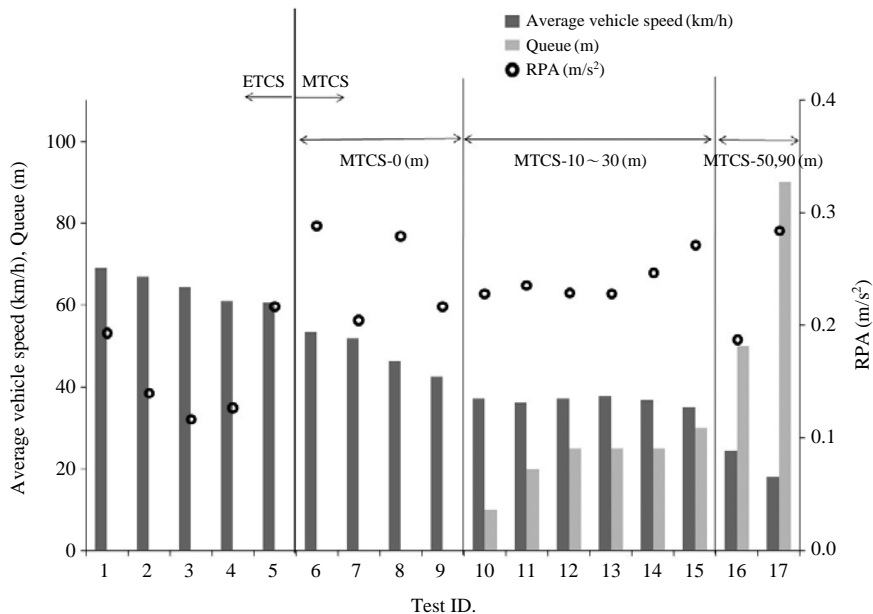


Fig. 4. Average vehicle speed, queue, and RPA in toll collection system area.

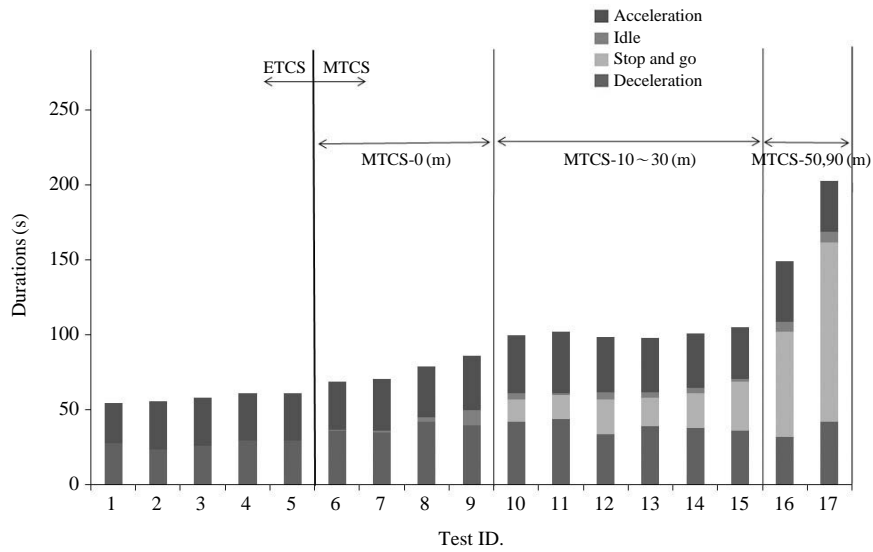


Fig. 5. Driving patterns in toll collection system area.

Table 3. Measured driving variables and emissions during passing toll collection systems.

Toll types	No. of tests	Queue [m]	Average vehicle speed (km/h)	RPA [m/s ²]	CO ₂ [g]	NO _x [g]	Soot [mg]
ETCS	5	0	64.5	0.159	177.4	1.444	14.81
MTCS	12	0~90	38.1	0.242	274.7	2.588	18.37
MTCS-0	4	0~10	48.6	0.248	245.5	2.355	18.89
MTCS-1	6	10~30	36.7	0.240	251.7	2.363	15.49
MTCS-2	2	50~90	21.3	0.236	402.4	3.731	25.94

위한 대기거리에 따라 3가지 경우로 구분하여 함께 나타내었다. 본 연구의 도로 주행시험에서 측정된 ETCS와 MTCS의 평균값들을 단순 비교해 보면, ETCS 주행 시에는 MTCS 대비 평균속도는 26.4 km/h 더 빠르고, RPA는 0.083 m/s² 낮았다. CO₂는 97.3 g 적게 배출되어 35.4%, NO_x는 1.144 g 적게 배출되어 44.2%, soot는 3.56 mg 적게 배출되어 19.4% 감소하였다. MTCS의 대기거리가 없는 통과 조건과 비교하더라도, ETCS 통과 시의 평균속도는 약 16 km/h 빠르고, RPA는 0.089 m/s² 낮게 나타났다. 자동차 배출가스 측면에서는 CO₂ 68.1 g (27.7%), NO_x 0.911 g (38.7%), soot 4.08 mg (21.6%)이 적게 배출되었다. MTCS는 대기거리 30m까지는 배출가스의 차이가 크지 않았지만, 대기거리가 50m를 초과하면 급

격히 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6에는 MTCS 주행 시의 주행패턴을 대기(stop and go), 정지(idle), 가속(acceleration) 주행 패턴으로 구분하고, 주행패턴 별 CO₂ 발생 비율을 나타내었다. 대기거리가 증가함에 따라 대기구간에서의 CO₂ 점유율이 대체로 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 대기거리 10~30m인 운행 조건에서는 대기 주행패턴의 CO₂ 점유율이 5~10% 정도이고, 50m에서 17%, 90m에서는 27.3% 수준으로 증가하였다. 요금지급을 위한 정지 운행 패턴의 CO₂ 점유율은 0.5~2.7%로 대기거리에 따른 차이는 나타나지 않았다.

그림 7에는 영업소 형태에 따른 주행변수 변화와 배출가스 특성을 나타내었다. (a)에는 평균속도, (b)에는 RPA, (c)에는 대기거리 변화에 따른 CO₂, NO_x,

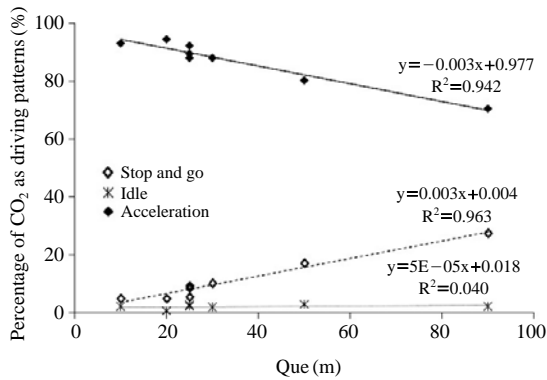


Fig. 6. CO₂ emissions by driving patterns passing MTCS.

soot 값을 각각 제시하였다. (a)와 (b)를 살펴보면, 동일한 형태의 영업소를 주행하는 경우에도 CO₂와 NO_x는 평균속도가 증가하고, RPA가 감소함에 따라 배출량이 줄어드는 경향이 뚜렷하게 나타났다. Soot도 동일한 경향을 보이지만, CO₂와 NO_x만큼 뚜렷하게 나타나지는 않았다. 표 3의 평균값에도 나타났듯이 ETCS 도입에 따라 평균속도가 증가하고, RPA는 떨어졌다. 이러한 주행변수의 변화에 따라 CO₂와 NO_x의 배출량이 감소하는 것으로 판단된다. (c)의 대기거리에 따른 영향을 살펴보면, MTCS 주행 시 대기거리 0~30m에서는 배출가스의 변화가 크게 나타나지 않지만, 대기거리가 이보다 더 길어지는 경우

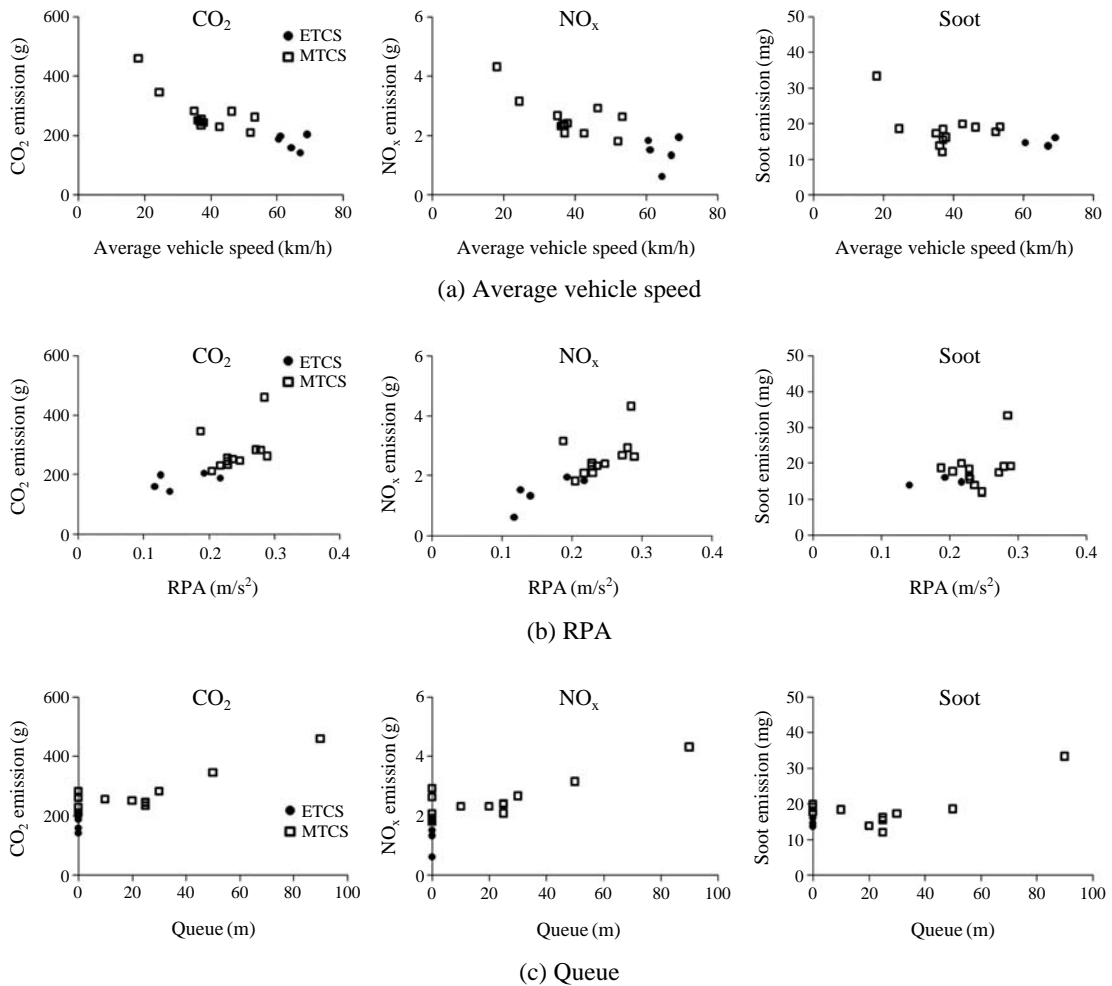


Fig. 7. Vehicle emissions depending on the driving variables for TCS types.

에는 배출가스도 증가하는 경향을 볼 수 있다.

CO₂와 NO_x의 경우 주행변수 변화에 대해 상당히 명확한 연관성을 보여 주지만, 일부 데이터들은 산포를 나타내는데, 이는 고속도로 영업소 주행 시의 주행변수와 배출가스 관계가 어느 하나의 주행변수에 영향을 받기보다는 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 판단할 수 있다. 예로, 그림 7(c)에서 대기거리가 10~30m인 경우에는 배출량의 차이가 거의 나타나지 않는데, 이는 대기거리뿐만이 아니라 평균속도와 RPA의 변화가 복합적으로 배출량에 영향을 주기 때문인 것으로 보인다. 그러므로 ETCS 도입에 따른 배출가스 저감 효과를 평가하기 위해서는 복수의 주행변수를 고려한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 다중선형회귀분석을 이용한 주행변수와 배출가스 간의 상관관계 고찰

표 4에 고속도로 영업소 통과 시의 주행변수와 배출가스 간의 다중선형회귀분석 결과를 나타내었다.

모형의 회귀계수를 살펴보면, CO₂와 NO_x 모형 1에서 평균차속의 회귀계수에 대한 유의확률(significance)이 각각 0.669, 0.990로 유의성이 가장 낮았다. 평균차속을 설명변수에서 제외하고 2차 분석을 수행한 결과, CO₂와 NO_x 모형 2의 RPA와 대기거리의 회귀계수는 모두 유의수준 5%에서 통계적으로 유의하였다. 그림 7에서 CO₂와 NO_x는 평균속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 뚜렷하게 보여주었다. 그러나 선형회귀 분석 결과, 평균속도의 회귀계수가 유의성이 없는 점을 고려하면, 평균속도에 의한 배출가스 영향은 선형적인 특성이 아닌 것으로 사료된다. RPA와 대기거리의 회귀계수는 양의 값을 가지는데, 이는 CO₂, NO_x의 증가 또는 감소는 RPA와 대기거리의 증가 또는 감소에 대해 선형적으로 관계되어 있다는 의미이다. 즉, ETCS 도입에 따른 CO₂, NO_x의 감소는 RPA와 대기거리의 감소와 연관된 것으로 해석할 수 있다. Soot는 모형 1에서 평균속도와 RPA의 회귀계수에 대한 유의확률이 각각 0.393, 0.199로 통계적으

Table 4. Results of multiple linear regression analysis.

Model no.	Summary of coefficients				Summary of models			
	Variables	Unstandardized coefficients	Standardized coefficients	Significance	R ²	Adjusted R ²	Significance	
CO ₂	1	Constants	133.931		0.123	0.875	0.846	0.0
		Avg. speed	-0.441	-0.090	0.669			
		RPA	453.759	0.319	0.026			
		Queue	2.063	0.681	0.002			
2		Constants	101.254		0.006	0.873	0.855	0.0
		RPA	496.746	0.350	0.004			
		Queue	2.253	0.744	0.000			
NO _x	1	Constants	0.075		0.935	0.873	0.844	0.0
		Avg. speed	0.000	0.003	0.990			
		RPA	8.5	0.543	0.001			
		Queue	0.019	0.584	0.006			
2		Constants	0.085		0.807	0.873	0.855	0.0
		RPA	8.487	0.542	0.0			
		Queue	0.019	0.582	0.0			
Soot	1	Constants	0.288		0.980	0.522	0.392	0.038
		Avg. speed	0.119	0.354	0.393			
		RPA	39.529	0.327	0.199			
		Queue	0.167	0.853	0.041			
2		Constants	8.882		0.160	0.488	0.402	0.018
		RPA	28.883	0.239	0.291			
		Queue	0.115	0.589	0.018			
3	Constants	15.291		0.000	0.435	0.392	0.007	
	Queue	0.129	0.660	0.007				

로 유의하지 않았다. 평균속도를 제외한 soot 모형 2에서도 RPA의 회귀계수에 대한 유의확률은 0.291로서 유의하지 않았다. 대기거리만을 설명변수로 한 soot 모형 3에서는 대기거리의 회귀계수에 대한 유의확률이 0.007로서 5% 유의수준에서 유의하였다.

표 4의 모형에 대한 결과를 살펴보면, CO₂와 NO_x 모형 2의 결정계수(R²)는 0.873으로서, RPA와 대기거리를 이용한 선형 회귀식은 CO₂와 NO_x의 변화를 87.3% 정도 설명한다고 할 수 있다. 선형회귀 분석의 경우 설명변수가 증가하면 설명변수의 상관성과 관계없이 모형의 결정계수는 높아질 수 있는데, 이런 문제점을 보완하기 위해 회귀변동과 총 변동을 자유도로 수정한 수정 결정계수(Adjusted R²)를 함께 고려한다. 수정 결정계수는 CO₂와 NO_x 모두 모형 2가 모형 1보다 더 높게 나타났다. 모형에 대한 통계적 유의성은 분산분석을 통해 확인할 수 있는데, CO₂와 NO_x 모형 2의 유의확률은 0.0으로서 통계적으로 유의하였다. Soot 모형의 결정계수는 CO₂, NO_x 모형들 보다는 상대적으로 낮게 나타났다. 그러나 soot 모형 2와 모형 3의 유의확률은 각각 0.018, 0.007로서 5% 유의 수준에서 유의하였다.

설명변수들 간의 상관성으로 인한 공선성(Collinearity) 문제를 확인하기 위해 분산팽창계수(Variation Inflation Factor, VIF)를 구하여 표 5에 나타내었다. 일반적으로 모형의 최대 분산팽창계수 값이 10보다 크면 공선성 문제가 있는 것으로 알려져 있다(전중우 등, 2011). 모형 1과 모형 2의 분산팽창계수들을 고려하였을 때, 본 연구에서 설명변수로 선정한 주행변수들 간의 공선성 문제는 없는 것으로 판단된다.

국내 자동차의 대기오염물질 배출계수 산정 시에는 평균속도에 대해 거듭제곱 함수를 이용하여 상관식을 도출한다. 표 6에는 도로주행 시험결과를 이용하여 평균속도의 거듭제곱 함수로 도출한 모형과 RPA, 대기거리를 변수로 하는 선형회귀식으로 도출한 모형의 결정계수를 비교하였다. CO₂, NO_x, Soot 모두 RPA-대기거리를 변수로 하는 선형회귀 모형의 결정계수가 더 높게 나타났다. CO₂는 평균속도만을 이용한 관계식의 결정계수가 0.804로 상당히 높았지만, NO_x의 경우에는 평균속도만을 이용한 모형의 결정계수는 0.547, RPA-대기거리 모형의 결정계수는 0.873으로서 RPA-대기거리의 모형이 NO_x 변화를 더 잘 설명하는 것으로 나타났다. 고속도로 영업소와 같

Table 5. Variation inflation factors (VIF) of driving variables.

Model no.	Variables	VIF
1	Avg. speed	4.420
	RPA	1.664
	Queue	3.310
2	RPA	1.169
	Queue	1.169

Table 6. Comparison of coefficients of determination for emission models regarding driving variables.

	Model equation	R ²
CO ₂	3038.062 V ^{-0.677}	0.804
	496.456 RPA+2.253 que+101.254	0.873
NO _x	52.174 V ^{-0.853}	0.547
	8.487 RPA+0.019 que+0.085	0.873
Soot	66.402 V ^{-0.364}	0.315
	28.883 RPA+0.115 que+8.882	0.488

이 배출계수 산정 시에 활용하는 주행모드와 다른 운행 특성이 나타나는 미시적인 영역의 배출량을 예측하는 경우에는 그 운행 특성을 반영할 수 있는 주행변수를 이용한 모형을 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형화물트럭에 PEMS를 탑재하고 고속도로 영업소의 ETCS와 MTCS를 실제 주행하여 CO₂, NO_x, Soot를 측정하였다. 측정된 주행변수와 배출가스 간의 연관성을 분석하여 ETCS 도입에 따른 자동차 배출가스 저감효과를 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) PEMS 탑재 차량으로 고속도로 영업소 통과 직후 각 500 m, 총 1 km 구간에 대한 측정결과, 대기거리가 없는 MTCS 주행 조건과 비교하였을 때 ETCS의 평균속도는 약 16 km/h 빨라지고, RPA는 0.089 m/s² 감소하며, 배출가스 평균값은 CO₂ 27.7%, NO_x 38.7%, soot 21.6% 적게 배출되었다. 실제 도로 주행 배출가스 측정을 통해 ETCS 도입에 따른 교통흐름의 개선과 자동차 배출가스의 감소를 확인할 수 있었다.

2) 고속도로 영업소 통과 시의 주행변수 변화에 따른 배출가스 영향을 분석한 결과 대체로 평균속도가 증가하고, RPA가 감소하고, 대기거리가 감소하면 CO₂와 NO_x 배출량은 뚜렷한 감소 경향을 나타내었다. Soot는 상대적으로 주행 변수의 변화에 따른 감소 경향이 명확하게 나타나지 않았다.

3) 평균속도, RPA, 대기거리를 설명변수로 하여 다중선형회귀 분석을 수행한 결과 CO₂와 NO_x는 RPA, 대기거리의 회귀계수가 5% 유의수준에서 유의하였고, 양의 상관관계를 나타내었다. 즉, 고속도로 영업소 ETCS 도입 시의 CO₂와 NO_x 저감은 RPA와 대기거리의 감소와 연관되어 있음을 확인하였다. Soot는 대기거리의 회귀계수만이 5% 유의수준에서 유의하였다.

4) 고속도로 영업소 통과 시의 배출가스 예측과 관련하여 평균속도의 거듭제곱함수를 이용한 모형과 RPA-대기거리의 선형회귀식을 이용한 모형을 비교한 결과 RPA-대기거리 모형의 결정계수가 대체로 높게 나타났다. 특히 NO_x의 경우 RPA-대기거리 모형의 결정계수가 0.873으로 평균속도 모형의 결정계수 0.547보다 상당히 높게 나타났다. 배출계수 산정 시의 주행모드와는 다른 주행특성을 가진 미시적인 영역의 배출가스를 예측할 경우에는 그 운전 특성과 관계되는 주행변수들을 이용한 모형을 개발하여 적용하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 2010년 조사연구사업 “교통수요 관리에 따른 대기오염 영향분석”의 연구비로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

류철호(2009) 하이패스 사업 백서, 편집 문보환기획, 한국도로공사, 249-272.
 유봉석, 이수범, 박완용, 도현구(2010) 고속도로 중앙하이패스차로 안전성 개선에 관한 연구-서울의곽순환고속도로 본선영업소를 중심으로-, 대한토목학회 논문집, 30(1D), 1-10.
 전종우, 전종준, 강병엽, 김재석, 오미애, 한상미(2011) SPSS

를 이용한 환경행정 통계분석, 국립환경인력개발원, 84-132.

Bartin, B., S. Mudigonda, and K. Ozbay (2006) Estimation of the Impact of Electronic Toll Collection Air Pollutions Levels Usig Microscopic Simulation Model of A Large Scale Transportation Network, 86th Transportation Research Board Annual Meeting.
 Coelho, M.C., C.H. Frey, N.M. Roupail, H. Zhai, and L. Pelkmans (2009) Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements, Transportation Research Part D, 14, 91-99.
 Coelho, M.C., T.L. Farias, and N.M. Roupail (2005) Measuring and modeling emission effects for toll facilities, transportation research record. Journal of the Transportation Research Board, 1941, 136-144.
 Ericsson, E. (2001) Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors, Transportation Research Part D 6, 325-345.
 European Commission (2011) Implementing and amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with respect to emissions from heavy duty vehicles (Euro VI) and amending Annex I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council, Commission Regulation (EU) No. 582/2011.
 Gkatzoflias, D., C. Kouridis, L. Ntziachristos, and Z. Samaras (2007) COPERT 4 (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) - User's Manual (Version 5.0).
 Jung, S.W., J.H. Ryu, Y.S. Lyu, and C.S. Lim (2006) A study on the exhaust characteristics of pollutants from recreational vehicle (RV) in Korea, 2006, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(1), 127-134. (in Korean with English abstract)
 Korean Ministry of Environment (2009) Regulation of Exhaust Gases from Automobiles, Ships, Etc., Clean Air Act Chapter 4.
 Lyu, Y.S., J.H. Ryu, M.S. Jeon, D.W. Kim, S.W. Jung, S.M. Kim, M.D. Eom, and J.C. Kim (2006) A study on characteristics of carbon dioxide emissions from passenger cars, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 22(4), 451-458. (in Korean with English abstract)
 National Institute of Environmental Research (2000) A study on the Estimation of Pollutant Emission Factors for Motor Vehicles (I), Administrative publication No. 38010-67730-36-24. (in Korean with English abs-

- tract)
- National Institute of Environmental Research (2009) A study on the National Emission Inventory for Air Pollutant by Transportation Type (II), NIER No. 2009-14-1070. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2009) A Study on the Optimal Inspection and Maintenance Program for In-Use Vehicle Part III, Administrative publication No. 11-1480523-000515-10. (in Korean with English abstract)
- National Institute of Environmental Research (2010) The Effect of Transportation Demand Management on Vehicle Air Pollutants, Administrative publication No. 11-1480523-000730-01. (in Korean with English abstract)
- Song, G., L. Yu, and X. Zhang (2008) Emission analysis at toll station area in Beijing with portable emission measurement system, Journal of the Transportation Research Board, 2058, 106-114.
- UN ECE (2005) Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to the Emission of Pollutants According to Engine Fuel Requirements, UN ECE Regulation No. 83.
- US Environmental Protection Agency (2001) EPA's New Generation Mobile Source Emissions Model: Initial Proposal and Issues, EPA420-R-01-007.
- US Environmental Protection Agency (2003) User's Guide to Mobile 6.1 and Mobile 6.2: Mobile Source Emission Factor Model, EPA420-R-03-010.
- US Environmental Protection Agency (2004) MOVES 2004 User's Guide, EPA420-P-04-019.
- US Environmental Protection Agency (2005) 40 CFR Part 9 and 86 Control of Emissions of Air Pollution From New Motor Vehicles: In-Use Testing for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles; Final Rule, Federal Register Vol. 70, No. 113.
- US Environmental Protection Agency (2005) Final Rule on In-Use Testing Program for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles, EPA420-F-05-021.