

실 주행 자료를 이용한 도로유형 · 시간대별 연료소모량 차이 검증 및 배출계수 보정 지표 분석

이규진^{1*} · 최기주²

¹아주대학교 TOD기반 지속가능 도시·교통연구센터, ²아주대학교 교통시스템공학과

Analysis on the Correction Factor of Emission Factors and Verification for Fuel Consumption Differences by Road Types and Time Using Real Driving Data

LEE, Kyu Jin^{1*} · CHOI, Keechoo²

¹TOD-based Sustainable City Transportation Research Center, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

²Department of Transportation System Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

Abstract

The reliability of air quality evaluation results for green transportation could be improved by applying correct emission factors. Unlike previous studies, which estimated emission factors that focused on vehicles in laboratory experiments, this study investigates emission factors according to road types and time using real driving data. The real driving data was collected using a Portable Activity Monitoring System (PAMS) according to road types and time, which it compared and analyzed fuel consumption from collected data. The result of the study shows that fuel consumption on national highway is 17.33% higher than the fuel consumption on expressway. In addition, the average fuel consumption of peak time is 4.7% higher than that of non-peak time for 22.5km/h. The difference in fuel consumption for road types and time is verified using ANCOVA and MANOVA. As a result, the hypothesis of this study - that fuel consumption differs according to road types and time, even if the travel speed is the same - has proved valid. It also suggests correction factor of emission factors by using the difference in fuel consumption. It is highly expected that this study can improve the reliability of emissions from mobile pollution sources.

현재 교통수요모형 기반의 자동차 배출량 추정 모형에서 교통 활동도 자료는 세부적으로 고려되는 반면, 배출계수는 평균적인 값만 반영되고 있기 때문에 배출량 산정 결과의 정확도를 저하시키는 문제가 있다. 본 연구는 도로유형 및 주행시간대와 무관하게 동일한 배출계수가 적용되는 부분을 개선하기 위해, 도로유형과 주행시간대별 연료소모량 차이에 대한 실증적 분석을 기반으로 각 유형별 배출계수의 보정 지표 제시를 목적으로 한다. 이를 위해, ‘이동식 차량활동도 모니터링 장비 (Portable Activity Monitoring System: PAMS)’를 이용해 도로유형 · 주행시간대별 실 주행 자료를 수집하였고, 각 유형별 연료소모량을 추정하여 이를 비교하였다. 연구 결과 평균 주행속도가 22.5km/h 일 경우, 도로 유형별 주행차량의 가감속도 변화 등의 차이에 따라 국도에서의 연료소모량(95g/km)은 자동차 전용도로에서(81g/km)보다 약 17.3% 높은 것으로 분석되었고, 침투시간대의 평균 연료소모량(86.73g/km)은 비침투시간대(82.84g/km)보다 약 4.7% 높은 것으로 분석되었다. 각 유형별 연료소모량의 차이는 공변량 분석 (ANCOVA)과 다변량 분산분석 (MANOVA)으로 검증하였으며, 그 결과 “주행속도가 동일할지라도, 도로유형과 주행시간대에 따라 연료소모량의 차이가 있다” 는 본 연구기설은 유의한 것으로 나타났다. 마지막으로 연료소모량의 차이를 활용하여 각 유형별 배출계수 보정 지표들을 제안하였다. 본 연구는 기존 차량 중심의 배출계수 연구에서 벗어나, 도로 · 교통 조건에 따른 배출계수 특성을 분석했다는 점에서 의의가 있으며, 본 연구결과를 활용하여 교통부문의 배출량 추정결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

Keywords

ANCOVA, emission factors, fuel consumption, MANOVA, portable activity monitoring system, real driving data, road types, 공변량 분석, 배출계수, 연료소모량, 다변량 분산분석, 이동식 차량활동도 모니터링 장비, 실 주행 자료, 도로유형

* : Corresponding Author
transjin@ajou.ac.kr, Phone: +82-31-219-3252, Fax: +82-31-219-3253

Received 11 August 2015, Accepted 26 October 2015

서론

1. 연구배경 및 목적

녹색교통은 교통 본연의 역할인 통행시간 감축 뿐 아니라 대기질 개선에 큰 목적성이 있기 때문에 녹색교통에 대한 대기질 평가의 심도 있는 접근이 요구된다. 또한 효율적인 교통-환경 정책을 수립하기 위해서도 교통부문에서 유발되는 배출량에 대한 객관적인 평가가 요구되나, 이에 대한 연구들은 해외 연구결과를 준용하거나, 차량 중심의 연구결과를 인용함으로써, 우리나라 교통특성을 현실적으로 고려하지 못하고 있는 문제가 있다.

가령, 교통시설 투자사업의 평가항목에 포함되고 있는 환경개선 편익 평가에서도 차량 중심의 배출계수가 적용되고 있을 뿐, 연속류 및 혼잡 등에 따른 배출계수의 다양성은 전혀 고려되지 못하고 있다. 이로 인해 상대적으로 연료소모에 효율적인 고속도로 등의 연속류 도로사업에 대한 대기질 영향은 과소평가 받게 되는 등의 문제를 야기 시킬 수 있다. 자동차 배출량은 가·감속에 따른 연료소모와 직접적인 관련성이 있기 때문에(Chen et al., 2007; Wang et al., 2008), 연속류와 혼잡 등에 따른 차등화된 배출계수의 고려가 필요한 것이다.

자동차 배출계수와 관련된 국외 연구흐름을 살펴보면, 2000년대 초반까지는 실험실 내에서 차량 특성 중심으로 연료소모량과 이에 대한 배출계수 연구가 주를 이루었지만, 최근에는 Chen et al.(2007) 등의 연구와 같이 실 주행 자료를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다. 이는 연료소모량과 배출계수 산출에 있어, 기존에 고려하지 못했던 도로·교통 여건을 고려할 수 효과적인 대안이 될 수 있기 때문에, 자동차 배출량 평가에 대한 보다 현실적인 연구결과를 얻을 수 있다는 점에서 긍정적인 흐름이다.

본 연구는 기존 차량 중심으로 연구되고 적용되어 왔던 배출계수의 적절성에 대한 문제인식을 바탕으로, 녹색교통에 대한 대기질 평가 결과의 현실성과 객관성을 향상시키기 위해 도로·교통 특성을 고려한 배출계수 추정을 목적으로 한다. 세부적으로는, 1) 실제 자동차주행 자료를 활용하여, 도로유형에 따라 연료소모량의 차이가 있는지 규명하며, 2) 주행시간대에 따라 연료소모량의 차이가 있는지 실증적으로 규명하고, 3) 현재 교통투자사업 평가 및 교통·환경 정책 평가에 적용되고 있는 차

종 중심의 배출계수를 보완할 수 있는, 다양한 도로유형 및 주행시간대에 적합한 배출계수 도출을 목적으로 한다.

2. 연구내용 및 절차

본 연구내용 및 절차는 다음과 같다. 첫째, 2,000cc SUV 차량에 '이동식 차량활동도 모니터링 장비 (Portable Activity Monitoring System: PAMS)'를 장착한 후, 2,319km 규모의 수도권 실 주행 자료를 랜덤하게 수집하였다. 그리고 수집 자료를 도로유형 및 주행시간대별로 분류하였다. 둘째, EPA(2002)의 차량비출력(Vehicle Specific Power: VSP) 함수식을 활용하여, 수집된 자료의 속도·가속도 값을 차량비출력 값으로 계산하였다. 셋째, Lee et al.(2009)의 연구에서 한국 도로·교통 환경을 반영하여 정립한 차량비출력과 연료소모율과의 관계식을 활용하여, 각 유형별 자료의 차량비출력 값을 연료소모량으로 변환하였다. 넷째, 공변량 분석 (ANOCOVA)과 다변량 분산분석 (MANOVA)기법을 활용하여, 각 주행속도 그룹별로 도로유형 및 주행시간대에 따른 연료소모량의 차이를 실증적 검증하였다. 다섯째, 교통계획 분야의 배출량 추정에 적용할 수 있는 도로유형 및 주행시간대별 배출계수를 제시하였다.

기존 문헌 고찰

1. 이론적 고찰

1) 주행패턴 (Driving pattern)

주행패턴 (Driving pattern)은 자동차의 속도와 가속도 정보를 이용하여 일정 시간 동안의 자동차 주행속도 변화를 그래프 등으로 나타낸 것이다. 주행패턴은 정지 상태에서부터 다음 정지 상태에 이르기까지를 통칭하는 'Short Trip'과 정지 상태를 통칭하는 'ldling'의 조합으로 이루어진다. 즉, 'Short Trip' 상태는 주행 중인 상황에서 차량이 움직이고 있는 상태이며, 'ldling' 상태는 주행 중 엔진이 무부하 상태로 공회전 하고 있는 상태이다. 주행패턴은 연료소모량에 민감한 영향을 주는 것으로 알려져 있으며(Joumarl et al, 1995; Ericsson, 2001), 차종 외에 도로유형과 주행시간대에 따라서도 그 차이가 있는 것으로 규명된 바 있다(Choi et al.,

2012). 따라서 현재 교통환경 분야에서 적용되고 있는 차종 및 차속별 배출계수는 일반화되어 정립된 주행패턴을 기반으로 평가되고 있다.

2) 차량비출력 (VSP)

차량비출력 (Vehicle Specific Power: VSP)은 차량의 속도 및 가속도를 포함하는 변수로써, 차량 총 중량 대비 엔진 출력량을 나타낸 값이며, 미국 EPA에서 배출량 추정에 사용하는 MOVES의 핵심 변수이기도 하다 (Koupal et al., 2002). 엄밀히 말해 차량비출력은 차량마다 모두 다르지만, 본 실험차량인 SUV와 같은 중소형 차량에 대해서는 대표 변수를 이용하여 식(1)을 적용할 수 있는 것으로 알려져 있다(Jiménez- Palacios, 1999/Lee, T.W., 2009/EPA, 2002). 최근에는 De Vlioger(1997), Holmen and Niemeier(1998), and Hart(2002)의 연구와 같이, 주행차량에서 배출되는 물질과 엔진성능을 실시간으로 측정할 수 있는 장비인 이동식 배출가스 측정 장비 (Portable Emission Measurement System: PEMS)를 이용한 차량비출력의 활용 연구가 확산되고 있으며, 실제 PEMS에 의한 실 주행 배출량의 측정은 편리하고 효율적인 접근법이라고 증명된 바도 있다(Chen et al., 2007).

$$\begin{aligned}
 VSP &= \frac{d}{dt}(KE + PE) + F_{rollong} \cdot v + F_{Aerodynamic} \cdot v \\
 &= \frac{\frac{d}{dt}(\frac{1}{2}m \cdot v^2 + mgh) + C_{R}mg \cdot v + \frac{1}{2}\rho_a C_D A (v + v_w)^2 \cdot v}{m} \\
 &= v \cdot (a \cdot (1 + \epsilon_i) + g \cdot grade + g \cdot C_R) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D \cdot A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v \\
 &= v \cdot (1.1 \cdot a + 9.81 \cdot grade + 9.81 \cdot 0.0135) \\
 &\quad + \frac{1}{2} \cdot 1.207 \cdot 0.0005 \cdot (v + v_w)^2 \cdot v \\
 &= v \cdot (1.1 \cdot a + 9.81 \cdot grade + 0.132) + 0.000302 \cdot (v + v_w)^2 \cdot v \\
 &= v \cdot (1.1 \cdot a + 9.81 \cdot grade + 0.132) + 0.000302 \cdot v^3 \quad (\text{맞바람을 무시하는 경우})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- 여기서, VSP : 차량비출력 (KW/Ton)
 KE : 운동 에너지
 PE : 잠재적 에너지
 m : 차량 중량
 v : 차량 속도 (m/s),
 a : 차량 가속도(m/s²),
 ϵ_i : 중량 계수에 의한 중력 보정계수
 h : 차량 고도

- $grade$: 도로 구배(%)
 g : 중력 가속도
 C_R : 회전저항계수
 C_D : 견인계수
 A : 차량 전면부 면적
 ρ_a : 주변공기밀도(20℃에서 1.207kg/m³)
 v_w : 차량 맞바람속도(m/s)

여기서 식(2)는 식(1)의 차량비출력 함수식에 대해 속도와 가속도 단위를 km/h, km/h/s로 환산한 것이며, 본 연구에서는 식(2)를 활용하였다.

$$\begin{aligned}
 VSP &= 0.278v \cdot [0.305a + 9.81(\sin(\text{atan}(r/100)))] + 0.132 \\
 &\quad + 0.000065 \cdot v^3
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

- 여기서, VSP : 차량비출력 (KW/Ton)
 v : 차량 속도(km/h)
 a : 차량 가속도(km/h/s)
 r : 도로구배(%)

2. 기존 연구 검토

Chen et al.(2007)은 PEMS를 장착한 대형 경유트럭에 의해 수집된 186km의 주행패턴 자료와 배출특성 자료를 수집한 후, 대형 경유트럭의 배출특성을 살펴보고 있다. 이 연구에서는 저속상황에서 더 빈번한 가감속이 일어나고, 이때의 배출량이 높은 수준이기 때문에 혼잡 완화를 통해 대기오염 배출량을 상당부분 감소시킬 수 있음을 제시하였다.

Frey et al.(2008)은 승용차, 소형 밴, 대형 SUV의 3개 차종에 대해 경로, 도로구배, 차량, 운행시간대, 속도, 가속도 등에 따른 배출량을 조건별로 비교하였다. 이때, 배출량을 일관되게 비교하기 위해 차량비출력을 기준으로 한 표준화 방법을 도입하였다. 연구결과 속도, 가속도, 도로구배가 배출량과 가장 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

Zhai et al.(2008)은 PEMS를 장착한 경유 버스를 통해 수집한 데이터에 차량비출력 함수식을 적용하여 도로별로 배출물질 발생율을 추정하여 비교하였다. 그 결과 배출율은 주행속도와는 밀접하게 관련되어 있으나 도로위계와는 관련이 없는 것으로 나타났다.

Yu et al.(2008)은 PEMS에 의해 수집된 자료를 활용하여 도로유형에 따른 주행패턴을 개발하였으며, 이를 차량비출력으로 연결시켜 각 주행패턴을 평가하였다.

Frey et al.(2007)은 차량비출력을 이용하여 디젤 버스와 수소연료 버스에 대한 실제 연료소모량을 비교하였는데, 낮은 차량비출력 구간에서는 수소연료 버스가, 높은 차량비출력 구간에서는 디젤 버스의 연료소모량이 많은 것으로 나타났다. 그리고 수소연료 버스는 차량비출력에 따라 연료소모량의 변화가 크지 않다는 결과를 제시하였다.

Boriboonsomsin et al.(2009)는 6개의 LOS 상태에 따른 속도, 가속도 등의 차이가 통계적으로 유의하다는 것을 보였으며, HOV 차로에서의 배출량을 추정하기 위한 모형을 개발하였다. 이를 위해 HOV 차로와 혼용차로에서의 배출량을 비교 평가하였다. 차속 45-105km/h에서 HOV차로의 CO 배출량은 혼용차로의 것보다 낮은 것으로 분석되었으며, 두 차선 간 CO와 CO₂ 배출량의 차이는 10-30% 수준인 것으로 나타났다.

Coelho et al.(2009)은 차량비출력 함수식을 이용하여 소형 휘발유·경유 차량의 연료소모율 및 배출물질 발생율을 비교하였다. 그 결과 차량비출력은 휘발유 차량뿐만 아니라 디젤 차량에 대한 배출물질 발생량과도 상관관계가 매우 높은 것으로 나타났으며, 차량비출력이 높을수록 연료소모율과 CO₂ 발생량이 급격히 증가하는 것으로 분석되었다.

Lee et al.(2009)은 기존 차대동력계 실험에 의해 추정된 배출계수의 경우 규정된 실험조건의 한계에 따라 도로상에서 차량이 겪게 되는 여러 가지 실제 교통상황을 반영할 수 없다는 문제점을 지적하며, 도로상에서의 배출가스 측정 실험을 통한 배출계수를 분석하였다. PEMS로 측정된 실제 도로상에서의 배출가스 측정결과를 표준화하여 단위 주행거리 당 배출율을 도출하였으며, 차량비출력 구간별 가중 비율이 반영된 표준 평균 배출율을 차속 구간별로 산출하였다. PEMS에 의해 추정된 배출계수를 기존 차대 동력계에 의해 추정된 배출계수와 비교한 결과 정량적, 정성적으로 잘 일치하는 것으로 나타나 PEMS에 의한 배출계수의 활용 가능성을 제시하였다.

Sonntag et al.(2009)은 도로유형과 차량 변수를 고려한 디젤 버스에 대한 미세먼지 발생량 추정모형을 구축하였다. 구축 모형은 도로유형(고속도로, 램프, 도심부 간선도로, 지방부 간선도로)과 엔진 부하, 엔진 속도, 배기온도, 차량 속도, 차량비출력으로 구성되었으며, 차량비출력은 엔진 부하량과 0.95의 상관성을 가지고,

엔진 부하량과 차량 속도는 0.98의 상관성이 있는 것을 보여주었다.

Darrell et al.(2009)은 도로유형과 차량 상태를 고려한 디젤 버스의 미세먼지 배출량 추정모형을 개발하였다. 구축 모형은 고속도로, 램프, 도시부 간선도로, 지방부 간선도로의 도로유형과 엔진 부하량, 엔진속도, 엔진 온도, 차량속도, 차량비출력으로 구성되었으며, 차량비출력은 차량속도와 엔진 부하량과 높은 상관관계가 있음을 증명하였다.

실 주행 조건에서의 자동차 연료소모량과 배출계수 평가에 대한 기존 연구를 검토한 결과, 도로위계, 차종, 사용연료 등에 따라 다양한 자동차 배출특성을 보였으며, 이는 다양한 도로·교통 여건에서의 우리나라 주행조건에 적합한 자동차 배출특성 연구가 필요함을 시사한다.

유형별 연료소모량 추정

1. 자료 수집

1) 자료 수집 장치

본 연구에서는 이동식 차량활동도 모니터링 장비(Portable Activity Monitoring System: PAMS)를 활용하여 도로유형 및 시간대 유형별 자동차 주행패턴 자료를 수집하였다. 해당 장비를 차량의 OBD(On Board Diagnostics) 커넥터에 연결하면 차량의 엔진부하, 냉각수 온도, 출력량, 엔진 RPM, 공기유량, 페달 밟힘량, 차속 정보가 1초 단위로 SD메모리에 저장된다. 또한 GPS 모듈과 연동되어 위치정보와 차속정보도 함께 저장된다. OBD를 통해 수집되는 차속은 차량 동력 장치에 의해 계산되는 정보로써 결측치와 오차가 없는 반면 1km/h 단위로만 측정되며, GPS를 통해 수집되는 차속은 시간별 이동위치에 따라 계산되는 정보로써 GPS 미수신 지역의 결측치와 GPS 고유의 오차가 존재하는 반면 0.01km/h 단위까지 측정되는 특징이 있다.

2) 자료 수집 내용

본 연구의 공간적 범위는 수도권이며, 도로유형은 수도권 수요분석용 네트워크(KTDB)상의 도로유형인 고속도로, 서울시 1급 도로, 2급 도로, 3급 도로, 경기도와 인천의 일반국도, 지방도, 일반도로로 구분하였다. 자료 수집의 시간적 범위는 수도권의 오전 침두시간대인

07-09시와 비침두시간대의 일부인 09-17시로 설정하였다.

Wang et al.(2008)와 Frey et al.(2007)의 연구결과와 같이, 차량 무게는 연료소모량에 유의한 영향을 주기 때문에, 자료 수집을 위한 조사 차량은 SUV인 투산 차량(2000cc, 2009년식)차종으로만 설정하였다. 운전자는 30대 남성이며, 운전 특성에 따른 주행패턴의 다양성을 최소화하기 위해 운전자에게 타 교통류 흐름에 맞춰 주행하도록 하였다. 그리고 날씨 또한 주행패턴에 영향을 미칠 수 있는 외생변수이므로, 날씨의 영향을 통제하기 위해, 맑은 날에만 주행하도록 실험을 설계하였다.

PAMS를 장착한 조사차량은 수도권 지역의 다양한 경로에 대해 총 2,319km(277,409초)를 주행하였으며, OBD 및 GPS 장비에 의한 주행속도, 가속도, 위치 정보 등을 1초 단위로 수집하였다. 도로유형 및 시간대별로 수집한 자료의 샘플수는 Table 1과 같다.

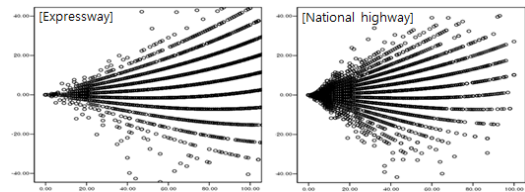
2. 도로유형 및 시간대별 연료소모량의 추정 결과

1) 차량비출력 (VSP)의 추정

도로유형 및 시간대별로 수집·가공된 277,409개의 횡단면 자료에 식(2)의 차량비출력 함수식을 적용하여

Table 1. Data collected for road types and time (unit: second)

Road Types		Peak time	Non-peak time
Expressway (r1)		12,970 (165.37km)	37,155 (818.19km)
Seoul	class 1 (r2)	17,433 (88.51km)	17,685 (131.83km)
	class 2 (r3)	34,329 (145.22km)	27,498 (150.14km)
	class 3 (r4)	17,352 (61.96km)	15,688 (59.85km)
	Gyeonggi-do/Incheon-si	National highway (r5)	9,070 (57.38km)
	Local road (r6)	9,349 (72km)	12,974 (140.59km)
	Road (r7)	11,424 (49.02km)	30,648 (166.51km)
Subtotal		111,927 (639.48km)	165,482 (1679.67km)
Total		277,409 (2,319km)	



note: horizontal axis(speed: km/h), vertical axis(VSP: kW/ton)

Figure 1. Scatter diagram of the relation between speed and VSP in expressway and national highway

각 횡단면 자료별로 차량비출력을 추정하였다.

가공자료를 차속에 대한 차량비출력으로 도식한 결과, Figure 1과 같이 대체로 국도의 차량비출력은 분산이 크게 퍼져 있으며, 자동차 전용도로의 차량비출력보다 전반적으로 높은 것으로 나타났다. 동일한 속도 영역에서 차량비출력이 높다는 것은 급가속이 빈번하게 발생하였다는 것을 의미하며, 이를 통해 국도에서의 단속류 지체로 인한 급가속 현상은 자동차 전용도로에서 보다 많다는 것을 판단할 수 있다.

2) 연료소모량의 추정

차량비출력은 연료소모량과 가장 일치하는 변수이므로(Yu et al., 2008), 본 연구에서는 이러한 개념을 활용하여 차량비출력을 연료소모량으로 재계산하였다. 이를 위해, 한국에서의 SUV 차량을 대상으로 차량비출력과 연료소모량의 관계를 규명한 Lee et al.(2009)의 연구결과를 함수식으로 표현한 식(3)을 적용하였다. 앞서 분석한 횡단면자료의 차량비출력 값을 연료소모량으로 추정하는 과정은 Table 2와 같다.

$$\begin{aligned} \text{연료소모율}(g/s) &= 0.268 + 0.1135 \text{ VSP}(KW/Ton) \\ &\quad (\text{for: VSP} > -2.36) \\ \text{연료소모율}(g/s) &= 0 \quad (\text{for: VSP} \leq -2.36) \end{aligned} \quad (3)$$

Table 2. Estimation of fuel consumption for driving data

Data ID	Vehicle speed (km/h)	Acceleration (km/h/s)	VSP (KW/Ton)	Fuel consumption rate (g/s)	Fuel consumption (g/km)
1	45	-	-	-	-
2	48	3	13.69028	1.82	136.6385
3	51	3	14.69002	1.94	136.6106
4	46	-5	-18.8877	0.26	20.34783
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
277,409	50	2	10.6201	1.47	106.0835

이와 같이 추정된 각 횡단면 연료소모량 자료를 각 도로유형과 시간유형으로 분류하였으며, 이를 각 차속군별로 연료소모량을 평균한 값은 Table 3, 4와 같다. 그 결과 속도그룹별 연료소모량은 도로유형에 따라 차이가 있으며, 가령 20-25km/h 속도 영역에서 국도에서의 연료소모량(95g/km)은 자동차 전용도로에서의 것(81g/km)보다 약 17.3% 높은 것으로 나타났다. 다만, 일부 도로

유형의 속도 그룹에서는 그 차이가 비논리적인 결과도 나타났으며, 이는 특정 속도 영역 대에서의 수집 자료가 충분하지 않거나 이상치가 포함되었을 개연성이 있으므로 향후 추가 연구를 통해 이를 보완할 필요가 있다.

유형별 연료소모량의 차이 검증

1. 도로유형별 연료소모량의 차이 검증

본 연구는 “자동차 주행속도가 동일하더라도, 자동차 연료소모량은 도로유형에 따라 다르다”의 실증적 검증 연구 목적으로 설정하였다. 이를 위해 “모든 도로유형 집단의 평균 연료소모량은 동일하다”는 귀무가설을 설정한 후 다변량 분산분석 (multivariate analysis of variance: MANOVA)을 시행하였고, 이때 도로유형을 변인으로, 속도 급간별 연료소모량을 종속변수로 설정하였다. 여기서, 도로유형에 따른 연료소모량(종속변수)은 속도 급간별로 여러 개 존재하며, 이와 같이 여러 개의 종속변수를 비교하기 위해 MANOVA를 활용하였다. 각 종속변수들의 상관관계가 높을 경우 분산분석 (analysis of variance: ANOVA)을 수차례 시행할 경우 1종 오류의 확률이 커지므로, MANOVA를 실시하는 것이 바람직하기 때문이다.

Table 3. Fuel consumption for road types and travel speed (peak time) (unit: g/km)

	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7
0-5	461	466	462	462	464	464	466
5-10	151	161	164	158	168	169	170
10-15	109	126	125	117	134	123	125
15-20	87	104	103	99	105	98	103
20-25	81	94	93	85	95	91	93
25-30	77	86	82	85	95	82	84
30-35	67	73	75	76	86	79	81
35-40	64	68	71	74	73	71	75
40-45	64	63	66	67	70	64	71
45-50	65	64	64	64	65	62	64
50-55	63	60	62	76	62	59	64
55-60	57	56	62	69	61	60	58
60-65	58	60	59	59	58	60	68
65-70	56	56	63	62	68	55	50
70-75	53	52	54	64	67	60	60
75-80	54	56	59	53	62	65	63

Table 4. Fuel consumption for road types and travel speed (non-peak time) (unit: g/km)

	r1	r2	r3	r4	r5	r6	r7
0-5	469	464	465	462	468	465	466
5-10	161	166	165	161	169	169	167
10-15	110	132	126	119	132	127	121
15-20	82	103	99	99	113	103	101
20-25	74	93	94	89	95	97	95
25-30	70	83	85	84	86	86	90
30-35	67	72	75	81	77	80	83
35-40	63	69	73	74	72	75	79
40-45	63	65	66	72	67	70	69
45-50	60	62	63	68	63	66	67
50-55	58	58	59	65	61	58	63
55-60	56	56	57	65	56	54	60
60-65	54	55	60	68	57	55	61
65-70	53	53	56	67	54	56	60
70-75	52	57	57	64	59	52	57
75-80	52	50	57	66	57	52	63

$$H_0: \begin{matrix} \langle \text{집단1} \rangle \\ \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{21} \\ \mu_{31} \\ \vdots \\ \mu_{p1} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \langle \text{집단3} \rangle \\ \begin{bmatrix} \mu_{12} \\ \mu_{22} \\ \mu_{32} \\ \vdots \\ \mu_{p2} \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} \langle \text{집단7} \rangle \\ \begin{bmatrix} \mu_{1k} \\ \mu_{2k} \\ \mu_{3k} \\ \vdots \\ \mu_{pk} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

여기서, μ : 평균 연료소모량
 p : 속도 급간
 k : 도로유형

침투시간대에 대한 도로유형별 연료소모량의 차이를 다변량 검증한 결과, Table 5와 같이 Pillai의 트레이스, Wilks의 람다, Hotelling의 트레이스, Roy의 최대 근 네 가지 통계량에 대한 유의수준이 모두 0.05 이하인 것으로 분석되어 도로유형에 따라 연료소모량의 차이가 있는 것으로 나타났다. 고정된 경로를 이용하는 버스노선 대상의 Zhai(2008)의 연구에서는 도로유형간 연료소모량의 차이가 없다는 연구결과를 제시하고 있는 반

Table 5. Multivariate analysis (peak time)

	Value	F	deg. free. for hyp.	deg. free. for err.	p-value	observed power	
Road types	Trace for Pillai	.935	69	42	15828	.000	1.0
	lambda for Wilks	.076	214	42	12353	.000	1.0
	Trace for Hotelling	11.942	748	42	15788	.000	1.0
	Maximum root for Roy	11.930	4495	7	2638	.000	1.0

Table 6. Difference verification of fuel consumption and road types by speed (peak-time)

	Dep. (Speed)	Type III square sum	Deg. of free.	Average square	F	p-value	eta	observed power
Model	10-20	42438186	7	6062598	1387	.000	.786	1.0
	20-30	21747829	7	3106833	773	.000	.672	1.0
	30-40	15991290	7	2284470	545	.000	.592	1.0
	40-50	11975853	7	1710836	571	.000	.603	1.0
	50-60	10202276	7	1457468	530	.000	.585	1.0
	60-70	9112006	7	1301715	534	.000	.587	1.0
	Area-Road types	10-20	42438186	7	6062598	1387	.000	.786
20-30		21747829	7	3106833	773	.000	.672	1.0
30-40		15991290	7	2284470	545	.000	.592	1.0
40-50		11975853	7	1710836	571	.000	.603	1.0
50-60		10202276	7	1457468	530	.000	.585	1.0
60-70		9112006	7	1301715	534	.000	.587	1.0
Error		10-20	11527522	2638	4370			
	20-30	10601083	2638	4019				
	30-40	11040920	2638	4185				
	40-50	7892126	2638	2992				
	50-60	7248287	2638	2748				
	60-70	6423514	2638	2435				
	Total	10-20	53965707	2645				
20-30		32348912	2645					
30-40		27032209	2645					
40-50		19867979	2645					
50-60		17450563	2645					
60-70		15535521	2645					

면, 본 연구는 다양한 경로와 다양한 차량이 혼재된 도로 유형별 신호지체 및 혼잡지체가 반영되었기 때문에 선행 연구결과와 차별된 결과가 도출된 것으로 판단된다.

속도 급간별로 도로유형과 연료소모량의 관련성을

Table 7. Multivariate analysis (non-peak time)

	Value	F	deg. free. for hyp.	deg. free. for err.	p-value	observed power	
Road types	Trace for Pillai	.932	162.61	42	37158	.000	1.0
	lambda for Wilks	.084	480.42	42	29027	.000	1.0
	Trace for Hotelling	10.70	1576.04	42	37118	.000	1.0
	Maximum root for Roy	10.68	9451.07	7	6193	.000	1.0

살펴보면, Table 6과 같이 모든 속도 급간에 대해 도로 유형에 따라 연료소모량의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 각 속도 급간별 효과크기를 파악할 수 있는 '부분 에타제곱' 지표의 경우, 속도 10-20km/h 영역에서 가장 크고, 속도 60-70km/h 영역에서 가장 작은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 평균 차속이 낮은 우리나라 교통여건에서의 자동차 배출량 평가에 시사 하는바가 크다. 낮은 차속일수록 배출계수가 높은 것으로 평가되고 있으며, 본 연구결과와 같이 차속이 낮을수록 도로유형별 연료소모량은 더 큰 차이를 나타내기 때문에 도로 유형에 적합한 배출계수를 적용하여 산정된 자동차 배출량은 기존의 배출량과 큰 차이가 발생할 수 있기 때문이다.

비침두시간대에도 Table 7과 같이, 네 가지 통계량에 대한 유의수준이 모두 0.05 이하인 것으로 분석되어 도로 유형에 따라 연료소모량의 차이가 있는 것으로 나타났다.

그리고 Table 8과 같이 비침두시간대에도 모든 차속에서 도로유형에 따른 연료소모량의 차이가 있는 것으로 규명되었다. 즉, 우리나라 수도권의 도로유형별 신호지체 및 혼잡지체는 자동차의 가·감속에 영향을 주며 (Choi et al., 2010), 이에 따라 본 연구에서와 같이 자동차 연료소모량은 도로유형에 따라 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다.

2. 시간대별 연료소모량의 차이 검증

주행시간대에 따른 연료소모량의 기술통계 분석결과, Table 9와 같이 침두시간대의 평균 연료소모량은 비침두시간대보다 더 높은 것으로 나타났는데, 이는 침두시간은 비침두시간대에 비해 교통류의 지정체

Table 8. Difference verification of fuel consumption and road types by speed (nonpeak-time)

	Dep. (Speed)	Type III square sum	Deg. of free.	Average square	F	p-value	eta	observed power
Model	10-20	97011011	7	13858716	2549	.000	.742	1.0
	20-30	52122905	7	7446129	1767	.000	.666	1.0
	30-40	37125887	7	5303698	1354	.000	.605	1.0
	40-50	28339661	7	4048523	1277	.000	.591	1.0
	50-60	22806017	7	3258002	1244	.000	.584	1.0
	60-70	20130135	7	2875734	1386	.000	.610	1.0
	Area-Road types	10-20	97011011	7	13858716	2549	.000	.742
20-30		52122905	7	7446129	1767	.000	.666	1.0
30-40		37125887	7	5303698	1354	.000	.605	1.0
40-50		28339661	7	4048523	1277	.000	.591	1.0
50-60		22806017	7	3258002	1244	.000	.584	1.0
60-70		20130135	7	2875734	1386	.000	.610	1.0
Error		10-20	33661934	6193	5435			
	20-30	26094954	6193	4214				
	30-40	24254257	6193	3916				
	40-50	19631702	6193	3170				
	50-60	16212235	6193	2618				
	60-70	12849431	6193	2075				
	Total	10-20	130672945	6200				
20-30		78217860	6200					
30-40		61380144	6200					
40-50		47971363	6200					
50-60		39018252	6200					
60-70		32979565	6200					

Table 9. Descriptive statistics of fuel consumption by time

	Ave.	Std.	N
Peak time	86.73	64.39	52,172
Non-peak time	82.84	64.89	66,959
Total	84.54	64.70	119,131

note: Dependent variable(fuel consumption)

에 따른 가감속이 더 빈번하게 발생하기 때문에 판단된다.

즉, 주행시간대에 따라 교통량의 수준이 다르며, 이에 따른 지정체의 차이로 인해 연료소모량이 다르게 도출된 것으로 판단되는 바, 본 연구에서는 “시간대에 따른 연료소모량(=배출계수)은 차이가 있다”에 대한 가설을 실증적으로 검증하였다. 이때, 주행속도는 연료소모량과 직접적인 인과관계가 있기 때문에, 주행속도를 외생변수(공변량)으로 처리하고, 시간대를 독립변수로,

Table 10. Levene's test for equality of variances

F	df1	df2	p-value
.307	1	119129	.579

note: Dependent variable(fuel consumption)

Table 11. Difference verification of fuel consumption and time

	Type III square sum	Deg. of free.	Average square	F	p-value
Model	899967701	3	299989233	79336.835	.000
Speed	47910146	1	47910146	12670.586	.000
Time	322056383	2	161028191	42586.418	.000
Error	450447986	119128	3781.210		
Total	1350415688	119131			

note: Dependent variable(fuel consumption)

연료소모량을 종속변수로 하는 공변량 분석 (analysis of covariance: ANOCOVA)을 시행하였다.

공변량 분석은 처치수준이 다른 집단 간에 종속변수 값의 차이가 있는지를 분석하기 위해 활용되는 통계적 기법이며, 실험설계 단계에서 외생변수를 직접 통제하는 것이 불가능한 경우 이를 공변량 (covariate)으로 처리하여 그 효과를 제거하여 분석할 수 있다는 특징이 있다.

공변량 분석에 앞서, 시간대별 연료소모량 집단들에 대한 분산의 동질성 가정에 대한 검증 결과, Table 10 과 같이 Levene의 통계량에 대한 p-value가 0.579로 나타나 집단 간의 등분산 가정에 문제가 없는 것으로 나타났다.

주행속도를 공변량으로 처리한 후 공변량 분석을 실시한 결과, Table 11과 같이 시간대에 따른 연료소모량의 차이는 통계적으로 유의한 것으로 나타났다(F=42586, p=0.00). 즉, 시간대에 따라 주행차량들의 가감속 정도에 대한 차이가 있으며, 이에 따라 주행시간대에 따른 연료소모량(또는 배출계수)의 차이가 있다는 것이 실증적으로 증명되었다. 이를 통해, 주행시간대에 적합한 배출계수의 적용은 배출량 추정 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

앞서 도로유형이 연료소모량에 영향을 주는 것으로 밝혀졌기 때문에, 7개의 도로유형으로 분석 자료를 분할한 후, 각각의 도로유형별로 주행시간대별 연료소모량의 차이를 공분산 분석하였다. 그 결과 Table 12와 같이 모든 도로유형에 대해서 주행시간대에 따라 연료소모량의 차이가 있는 것으로 확인되었다.

Table 12. Difference verification of fuel consumption and time for road types

	F	p-value
expressway	4564.304	0.000
Roads in class 1 for Seoul	6071.564	0.000
Roads in class 2 for Seoul	10580.533	0.000
Roads in class 3 for Seoul	5349.154	0.000
National highway for Gyeonggi-do	4629.800	0.000
Local road for Gyeonggi-do	3474.486	0.000
Road for Gyeonggi-do	6726.174	0.000

유형별 배출계수 추정을 위한 보정 지표

1. 도로유형별 배출계수 추정식

본 연구를 통해 “자동차 평균 주행속도가 동일하더라도, 자동차 연료소모량은 도로유형과 주행시간대에 따라 차이가 있다”는 것이 실증적으로 검증되었기 때문에, 도로이동오염원에 대한 현실적이고 정확성 높은 배출량을 추정하기 위해, 각 유형에 적합한 배출계수의 적용이 요구된다.

PEMS와 PAMS 장비를 활용하여 실 주행 조건에서의 다양한 대기오염물질과 차종별 배출계수를 수집·분석하는 것은 시간·비용 측면에서 많은 한계가 있다. 자동차의 대기오염물질들은 연료소모에 의해 발생하는 것으로서, 대기오염물질의 배출 증감 수준은 연료소모의 증감에 따라 결정된다고 전제할 수 있다. 따라서 본 연구는 기존 실험실에서 연구된 대기오염물질의 차속별 배출계수에 각 도로유형간 연료소모량의 상대적 차이(보정 지표)를 적용하여, 각 유형별 배출계수를 산정하는 방식을 제안하였다. 이를 수식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$EF_{e,r,k,t}(v) = EF_{e,r}(v) \times f_{k,t} \quad (4)$$

여기서, $EF_{e,r,k,t}(v)$: 대기오염물질(e), 차량유형(r), 시간대(t), 도로유형(k)에 대한 속도(v)의 배출계수

$EF_{e,r}(v)$: 대기오염물질(e), 차량유형(r)에 대한 속도(v)의 배출계수

$f_{k,t}$: 시간대(t), 도로유형(k)에 대한 배출계수의 보정 지표

Table 13. Weight (r_k) for road types focusing on road length

	Expressway	Road in class 1	Road in class 2	Road in class 3	Total
Seoul		0.04	0.05	0.04	1
Gyeonggi-do Incheon-si	0.24	0.13	0.15	0.35	

e : 대기오염물질(CO, NOx, PM, SOx, HC)

r : 차량유형(승용차, 버스, 트럭 등)

k : 도로유형(서울 1급·2급·3급·경기 국도·지방도·일반도)

t : 시간유형(침두시간·비침두시간)

2. 유형별 배출계수 보정 지표

1) 도로유형별 연료소모량의 일반화

앞서 설명한 바와 같이, 본 연구에서는 각 유형별 연료소모량의 상대적 차이를 식(4)에 적용되는 배출계수의 보정 지표로 적용한다. 이를 위해 기준이 되는 연료소모량을 먼저 결정하여야 하며, 이는 식(5)와 같이 각 유형별 도로연장에 대한 가중치를 달리하여 평균 연료소모량을 산출하였다. 이때 각 유형별 도로연장은 교통시설투자 평가 시 활용되고 있는 수요분석용 수도권 네트워크 자료를 활용하였으며, 각 유형별 도로연장 가중치(비중)은 Table 13과 같다.

$$\overline{f_{c_v}} = \sum_k (f_{c_{v,k}} \times r_k) \quad (5)$$

여기서, $\overline{f_{c_v}}$: 속도(v)에 대한 평균 연료소모량

$f_{c_{v,k}}$: 속도(v), 도로유형(k)에 대한 연료소모량

r_k : 도로유형(k)에 대한 도로연장 비중

Table 14. Average fuel consumption for speed($\overline{f_{c_v}}$)

Speed (km/h)	Fuel consumption (g/km)	Speed (km/h)	Fuel consumption (g/km)
0-5	464.95	40-45	67.36
5-10	164.99	45-50	64.16
10-15	121.63	50-55	61.68
15-20	98.35	55-60	58.22
20-25	89.90	60-65	59.90
25-30	83.30	65-70	56.35
30-35	76.99	70-75	56.93
35-40	71.96	75-80	58.69

Table 15. Correction factor of the emission factors for road types and time ($f_{k,t}$)

road types(k)	time(t)	
	Peak time	Non-peak time
Expressway	0.94	0.90
Roads in class 1 for Seoul	0.98	0.96
Roads in class 2 for Seoul	1.00	0.99
Roads in class 3 for Seoul	1.05	1.08
National highway for Gyeonggi-do	1.05	1.00
Local road for Gyeonggi-do	0.99	0.99
Road for Gyeonggi-do	1.03	1.05

Table 3, 4, 13, 그리고 식(5)로 산정된 수도권의 차속별 평균 연료소모량은 Table 14와 같다.

2) 각 유형별 배출계수 보정 지표의 추정 ($f_{k,t}$)

Table 14의 평균 연료소모량($\overline{f_{c_v}}$) 대비 각 유형별로 추정된 연료소모량($f_{c_{k,t,v}}$)을 각 유형별 배출계수 보정 지표로($f_{k,t}$)로 결정하며, 이를 분석한 결과는 Table 15와 같다. Table 15를 살펴보면, 지정체가 많을 것으로 예상되는 서울시 3급 도로와 경기도 국도, 일반도로의 보정 지표가 가장 높은 것으로 나타났으며, 연속류인 자동차 전용도로의 보정 지표가 가장 낮은 것으로 나타났다. 가령, 비첨두시간대의 서울시 3급 도로에 적용되는 배출계수는 고속도로 배출계수에 비해 1.2배(1.08/0.9) 높은 것으로 나타났다. 이는 직관적으로 인지하고 있는, “고속도로의 연비(=배출계수⁻¹)가 일반도로에 비해 높다”는 사실을 실증적으로 증명할 결과이다. 또한 고속도로의 배출계수 보정 지표는 0.90-0.94로 분석되었으며, 이는 기존 고속도로 사업에 대한 대기환경 편익이 90-94% 수준으로 과소 추정되었을 가능성을 시사한다.

이러한 도로유형별 배출계수 보정 지표는 교통사업의 배출량 및 사회적 편익 추정에 활용될 수 있으며, 이를 통해 교통사업의 대기오염 개선에 대한 타당성 평가결과의 정확성과 현실성을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

결론

본 연구는 도로이동오염원의 배출량 산정에 있어, 도로유형 및 주행시간대와는 무관하게 차량 중심으로 적용되어 왔던 배출계수의 적절성에 대한 문제인식을 바탕으로, 녹색교통에 대한 대기질 평가 결과의 현실성과 객관

성 확보를 목적으로 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 SUV 차량에 PAMS 장비를 장착하여 수집된 자동차 실주행 자료를 바탕으로, 도로유형과 주행시간대별 연료소모량 차이를 실증적으로 분석하였으며, 이를 기반으로 각 유형별 배출계수의 보정 지표를 제시하였다.

연구 결과, 평균 주행속도가 동일하더라도, 국도의 차량비출력은 자동차 전용도로보다 전반적으로 높은 것으로 분석되었다. 이는 국도에서 발생하는 단속류 지체 등에 따른 급가속 상태가 차량 출력에 영향을 미치기 때문으로 판단되며, 단속류에서의 연동신호와 같은 교통 운영 기술은 혼잡개선 외에 자동차에 의한 대기환경 개선에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 확인할 수 있다.

도로유형과 주행속도 영역별 연료소모량을 분석한 결과, 20-25km/h 속도영역에서는 자동차 전용도로의 연료소모량이 81g/km인데 반해 국도의 연료소모량은 95g/km로 추정되는 등 각 도로유형별 연료소모량은 약 1.73배까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 각 도로유형별 연료소모량 차이에 대해 다변량 분산분석(MANOVA)하였으며, 그 결과 주행속도가 동일하더라도 도로유형에 따른 배출계수는 유의한 차이가 있는 것으로 규명되었다. 즉, 우리나라의 도로유형은 자동차 배출계수에 유의한 영향을 미치므로, 고속도로와 같은 특정 도로유형의 건설 사업에 따른 대기환경 편익 산정 시 도로유형에 적합한 배출계수의 적용이 필요함을 확인할 수 있다.

주행시간과 주행속도 영역별로 연료소모량을 분석한 결과, 첨두시간대와 비첨두시간대의 평균 연료소모량은 각각 86.73g/km, 82.84g/km로 나타났다. 공변량 분석으로 검증한 주행시간과 주행속도별 연료소모량의 차이는 통계적으로 유의하였으며(F=42586, p=0.00), 이는 Coelho et al.(2006)의 연구에서 언급한 바와 같이 교통량의 증가에 따라 배출량이 증가한다는 것을 실증적으로 검증한 결과이다. 이를 통해, 주행시간대에 적합한 배출계수의 적용은 배출량 추정 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 점을 확인할 수 있으며, 대기질 관리 측면에서는 시간대별 교통수요관리 전략의 필요성을 시사한다.

마지막으로, 각 도로유형 및 주행시간대에 적합한 배출계수를 추정하기 위한 각 유형별 보정 지표를 제안하였다. 그 결과, 국도의 경우 첨두시간과 비첨두시간의 배출계수 보정 지표는 각 1.05, 1.00로 나타났으며, 비첨두시간의 경우 서울시 3급 도로와 자동차 전용도로에 대

한 배출계수 보정 지표는 각 1.08, 0.90으로 나타났다. 이것은 서울시 3급 도로에 적용되는 배출계수가 자동차 전용도로의 배출계수에 비해 1.2배(1.08/0.9) 높다는 것을 의미한다. 본 연구에서 제안한 도로유형별 배출계수 보정 지표는 교통사업의 배출량 및 사회적 편익 추정에 활용될 수 있으며, 본 연구는 교통부문의 대기환경영향평가 결과에 대한 현실성과 객관성 확보에 기여할 것으로 기대된다.

본 연구는 일부 실 주행 조건에서의 연료소모량에 대한 실험결과에 기반 하여 자동차 배출계수의 보정 방법을 제안하였으나, 향후에는 각 유형별 연료소모량의 차이가 대기오염물질의 배출수준에도 직접적인 영향을 미치는지에 대한 실질적인 규명이 필요하겠다. 또한 향후 연구를 통해, 공간적, 시간적으로 국한된 본 연구의 실 주행자료 한계를 극복하여 보다 일반화된 결과를 도출한다면, 연구결과의 활용가치가 더욱 높아질 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea government(MSIP) (NRF-2010-0028693).

REFERENCES

- Boriboonsomsin K., Barth M., Xu K. (2009), Improvements to On-road Emission Modeling of Freeways With High-occupancy Vehicle Facilities, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2123(1), 109-118.
- Chen C., Huang C., Jing Q., Wang H., Pan H., Li L., Streets D. G. (2007), On-road Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicles in Shanghai, *Atmospheric Environment*, 41(26), 5334-5344.
- Choi K. C., Park J. H., Lee J. T., Kim J. S., Lee K. J., Yi Y. J. (2012), Research on Domestic Driving Pattern for International Standardization of Light-duty Vehicles Emission Test Method, *J. Korean Soc. Transp.*, 30(1), Korean Society of Transportation, 31-43.
- Coelho M. C., Farias T. L., Roupail N. M. (2006), Effect of Roundabout Operations on Pollutant Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11(5), 333-343.
- Coelho M. C., Frey H. C., Roupail N. M., Zhai H., Pelkmans L. (2009), Assessing Methods for Comparing Emissions From Gasoline and Diesel Light-duty Vehicles based on Microscale Measurements, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(2), 91-99.
- Darrell B. (2009), Developing Link-based Particle Number Emission Models for Diesel Transit Buses Using Engine and Vehicle Parameters, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(4), 240-248.
- De Vlioger I. (1997), On Board Emission and Fuel Consumption Measurement Campaign on Petrol-driven Passenger Cars, *Atmospheric Environment*, 31(22), 3753-3761.
- Ericsson E. (2001), Independent Driving Pattern Factors and Their Influence on Fuel-Use and Exhaust Emission Factors, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), 325-345.
- Frey H. C., Roupail N. M., Zhai H., Farias T. L., Gonçalves G. A. (2007), Comparing Real-World Fuel Consumption for Diesel and Hydrogen-Fueled Transit Buses and Implication for Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(4), 281-291.
- Frey H. C., Zhang K., Roupail N. M. (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.
- Hart C. (2002), Evaluation of an Empirical Binning Approach for Analyzing on-board Emission Data for Moves, *Proceedings of the 12th Coordinating Research Council On-road Vehicle Emissions Workshop*, San Diego, CA.
- Holmén B. A., Niemeier D. A. (1998), Characterizing the Effects of Driver Variability on Real-World Vehicle Emissions, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 3(2), 117-128.

Jiménez-Palacios J. L. (1999), Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions With Vehicle Specific Power and Tildas Remote Sensing: Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Mechanical Engineering.

Joumard R., Jost P., Hickman J., Hassel D. (1995), Hot Passenger Car Emissions Modelling as a Function of Instantaneous Speed and Acceleration, Science of the Total Environment, 169, 167-174.

Koupal J., Michaels H., Cumberworth M., Bailey C., Brzezinski D. (2002), EPA's plan for MOVES: A Comprehensive Mobile Source Emissions Model, Proceedings: 12th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego.

Lee T. W., Lee B. H., Cho S. H., Park J. H., Eom M. D., Kim J. C., Lee D. U. (2009), On-Road Testing and Calculation of Emission Factor and Fuel Economy, Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, 17(3), 90-101.

Sonntag D. B., Oliver Gao H. (2009), Developing Link-Based Particle Number Emission Models for Diesel Transit Buses Using Engine and Vehicle Parameters, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 14(4), 240-248.

US EPA. (2002), Methodology For Developing Modal Emission Rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle & Equipment Emission System, EPA Report 420-R-02-027.

Wang H., Fu L., Zhou Y., Li H. (2008), Modelling of the Fuel Consumption for Passenger Cars Regarding Driving Characteristics, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 13(7), 479-482.

Yu L., Wang Z., Qiao F., Qi Y. (2008), Approach to Development and Evaluation of Driving Cycles for Classified Roads Based on Vehicle Emission Characteristics, Transportation Research Record(2058), 58-67.

Zhai H., Frey H. C., Roupail N. M. (2008), A Vehicle Specific Power Approach to Speed and Facility Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses, Environmental Science and Technology, 42(21), 7985-7991.

✉ 주 작성자 : 이규진
 ✉ 교신저자 : 이규진
 ✉ 논문투고일 : 2015. 8. 11
 ✉ 논문심사일 : 2015. 9. 30 (1차)
 2015. 10. 26 (2차)
 ✉ 심사판정일 : 2015. 10. 26
 ✉ 반론접수기한 : 2016. 2. 29
 ✉ 3인 익명 심사필
 ✉ 1인 abstract 교정필