

국내 차량의 동적 주행 특성을 반영한 미시적 온실가스 배출량 산정방법론

허혜정¹ · 윤천주^{1*} · 이태우² · 양인철¹ · 성정곤¹

¹ 한국건설기술연구원 도로교통연구실, ² 국립환경과학원 교통환경연구소

Instantaneous GHG Emission Estimation Method Considering Vehicle Characteristics in Korea

HU, Hyejung¹ · YOON, Chunjoo^{1*} · LEE, Taewoo² · YANG, Inchul¹ · SUNG, Junggon¹

¹ Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction and Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

² Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-170, Korea

Abstract

There are lots of variations on speed, acceleration and engine power during vehicle driving. It is well known that Green House Gas emissions by these dynamic driving properties are not precisely estimated by the average speed based emission estimation model which has been currently used in Korea. MOVES are selected as an appropriate transferable model among Micro-level emission estimation models. Based on MOVES, a novel emission estimation model can be used in Korea is developed. In this model, MOVES concept of emission estimation method and the MOVES method of estimating the Micro-level emission rate map is adopted. The results from the proposed model were compared with those from the average speed based emission model. The comparison results show the estimated base emission maps are good to be applied in Korea, but needed to be adjusted to consider the vehicle size differences between the two countries. Therefore, the factors for calibrating vehicle size difference were calculated and applied to acquired the micro-level emission maps for the Korean standard vehicle types.

자동차는 다양한 차속, 가속속도 및 출력의 변화를 겪게 된다. 이와 같은 동적 주행 특성에 의한 온실가스 배출특성은 현행 평균속도 기반의 방법만으로는 정확히 추정하기 어려운 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 미시적 주행 특성의 변화를 고려하는 국외의 미시 기반 배출량 산정방법론 중에서 MOVES를 국내에 도입하기에 가장 적합한 모형으로 선정하여 국내 적용 가능한 미시기반 온실가스 배출량 산정 모형을 개발하였다. 개발 모형에는 MOVES의 배출량 산정 개념을 도입하고, MOVES의 기본 배출을 맵을 활용하여 국내 차량 구분에 맞는 미시 배출맵을 추정하여 적용하였다. 본 개발 모형을 기존 우리나라 배출계수 산정 체계와 연계시켜 비교한 결과 MOVES로부터 추정된 미시 배출을 맵을 국내에 적용하는 것이 타당하나 양국간의 차량규모의 차이를 고려할 필요성이 있음을 발견하였다. 이에, 차종별로 미시배출맵 보정계수를 추정하여 적용함으로써 우리나라 대표 차종에 대응하는 미시기반 배출을 맵을 추정하여 개발모형을 실제로 국내에 활용할 수 있도록 하였다.

Keywords

average speed based emission rate, driving trace, green house gases, micro-level emission rate, MOVES
평균속도 기반 배출계수, 차량주행궤적, 온실가스, 미시레벨 배출계수, MOVES

* : Corresponding Author
cyjoon@kict.re.kr, Phone: +82-31-910-0533, Fax: +82-31-910-0746

Received 12 September 2013, Accepted 13 November 2013

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

기후변화의 주요 원인으로 지목되는 온실가스는 주로 인간의 화석 에너지 사용으로 인해 발생하는 물질로서 탄소라고도 일컬으며 이에 대한 배출량을 감소하려는 노력이 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFC_s), 과불화탄소(PFC_s), 육불화황(SF₆) 등을 포함하여 적외선 복사열을 흡수하거나 재방출하여 온실효과를 유발하는 대기 중의 가스 상태의 물질을 모두 일컫는 용어이다(저탄소 녹색성장 기본법 제2조 9항), 최근 국내에서 도시 및 교통 분야의 온실가스 연구에서 관심 있게 다루는 물질은 이산화탄소(CO₂)이다. 이는 이산화탄소가 지구온난화 지수는 낮지만 온실가스 전체 배출량에서 가장 큰 비율을 차지하고 있어 지구온난화에 실질적인 영향을 미치기 때문이다.

특히, 수송부문의 경우 2009년 에너지 소비부문 총 CO₂ 배출량의 약 13.6%를 차지하였으며, 이 중 도로교통 부문은 수송수단 온실가스 배출량의 94.4%인 것으로 보고되었다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 도로교통 부문의 온실가스 배출량을 감소시키기 위해 여러 가지 방안을 강구해오고 있으나, 높은 자동차 통행 선도로로 인해 자동차 통행 수요는 앞으로도 계속해서 높은 수준을 유지할 것으로 보여 통행 수요 전환 노력과 함께 운행 차량의 배출량을 최소화하는 교통정책을 시행해야 할 필요성이 있다.

다양한 교통정책 중 최선의 방법을 선택하여 시행하기 위해서는 각 대안들이 어느 정도의 배출량 감소효과를 가져올 수 있을지를 평가하여야 한다. 이 때, 정책 시행으로 인한 차량의 운행 특성 변화는 교통 시뮬레이션 모형을 활용하여 예측할 수 있으며, 그 결과를 배출량 산정 방법론에 대입하여 각 대안들의 배출량을 추정하여 감소효과를 비교할 수 있다. 배출량 산정 방법론은 크게 거시적 배출량 산정 방법론과 미시적 산정 방법론으로 나눌 수 있다. 거시적 방법론은 차량의 평균주행 속도와 배출량의 관계를 나타낸 함수식의 형태로서, 평균속도

기반 배출량 산정모형이라고도 불리며 국내외에서 도로 계획과 교통정책 평가시 널리 사용되고 있다. 미시적 방법론은 초단위의 동적차량 주행 특성인 순간 속도와 가속도 또는 차량비출력(Vehicle Specific Power, VSP) 등에 따른 배출량의 변화를 고려하는 방법으로 거시적 방법론보다 실제 배출량에 가까운 값을 추정할 수 있다. 미국의 경우 기존에는 평균속도 기반의 MOBILE¹⁾이라는 배출량 산정프로그램을 사용하였으나, 지금은 VSP 기반의 MOVES²⁾로 권장 모형을 전환하고 있다.

우리나라의 경우 평균속도 기반의 온실가스 배출량 산정방법론이 주로 사용되고 있으며, 배출계수는 단위 주행거리당 온실가스 배출량(g/km)을 해당 주행계적³⁾의 평균 차속에 대한 함수로 표현하는 구조를 가지고 있다. 이 방법은 광역적이고 장기적인 정책 평가에 효과적으로 적용될 수 있는 반면, 국지적이고 단기적인 배출량을 설명함에 있어서는 다소 충분치 않은 면이 있을 수 있다. 예를 들어 교통운영 정책의 하나인 신호연동 개선을 생각해 보면, 대상 교통축의 평균속도에는 큰 변화가 없는 경우 평균속도만을 고려하는 기존의 방법으로는 배출량 감소 효과가 없다는 결론이 나온다. 그러나, 실제로는 정지수와 감가속수가 감소하는 현상을 반영하지 못한 결과를 얻게 된다. 따라서, 이러한 교통운영 정책의 평가에는 자동차의 평균속도 외에 순간 속도, 감가속도 및 VSP와 같은 동적 운전 조건에 따른 배출량의 변화를 추정할 수 있는 미시적 배출량 산정 모형을 적용해야 그 효과를 추정할 수 있다.

현재 국내에서는 미시기반 배출량 산정방법론에 관심을 기울이기 시작하여, 미시적 배출계수 개발을 위한 실험을 시작한 단계이다(Lee et al., 2011; Kim et al., 2012). 그러나 다양한 차종과 도로조건에 따른 주행특성을 반영할 수 있는 차종별 도로별 미시기반 배출계수 맵을 구축하기 위해서는 수많은 주행 실험을 해야 하므로 가까운 시일 내에 국내에서 개발한 미시기반 배출계수를 사용하기는 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 외국의 미시기반의 배출량 산정 모형 중 국내에 가장 적합한 모형을 선정하여 활용함으로써 국내에 적용 가능한 미시 배출량 산정 모형을 개발하고자 하였으며, 적용 결과의 타당성을 평가하는 것을 목적으로 하였다.

1) MOBILE, <http://www.epa.gov/otaaq/mobile.htm>

2) Motor Vehicle Emission Simulator, <http://www.epa.gov/otaaq/models/moves/index.htm>

3) 주행계적: 차량이 실제 주행한 속도 프로파일(profile)로서, 배출량 기준 검사, 배출계수 개발 시 수차레에 걸쳐 같은 주행계적을 실험하여 값을 얻기 때문에 Driving Cycle 또는 Driving Trace라고도 함.

2. 연구의 내용 및 방법

국외에서는 수많은 차량 주행 실험을 통해 수집된 결과를 바탕으로 미시기반 배출계수를 개발하고 이를 기반으로 하는 배출량 산정 시뮬레이션 모형을 개발하여 사용하고 있다. 본 연구에서는 가장 먼저, 이러한 방법론을 기능적인 부분과 데이터 접근 가능성 및 비용적인 측면 등에서 비교한 후 국내에 적용하기에 가장 적합한 모형을 선정하였다. 다음으로, 선택된 모형을 국내에 도입하기 위한 여러 가지 방법론을 검토한 후, 미시기반 배출량 산정 개념과 기본 배출을 계수를 활용하여 국내 연구에 사용할 수 있는 미시기반 배출량 산정 방법론을 개발하는 방법을 선택하였다. 이를 위하여, 선택된 모형의 배출량 산정 방법론을 분석하였고, 국내와 국외 모형의 차종 구분을 비교한 후 국내 차량 구분에 맞는 기본 배출을 맵을 추정하여 배출량 산정 모형을 개발하였다. 마지막으로 개발된 방법론의 국내 적용성을 평가하기 위하여 국외 모형으로부터 추정된 미시기반 배출계수의 국내 적용의 타당성을 검증하였다. 이 과정에서 국내 평균속도 기반의 배출계수식을 개발할 때 사용하였던 차종별 평균속도별 시험 주행궤적의 주행 프로파일을 미시기반 활동도 자료로 이용하여 개발한 모형에 적용하여 배출량을 산출한 후 기존의 평균속도기반으로 산정한 배출량과 비교 평가하였다. 본 연구에서는 온실가스 중 이산화탄소에 대하여만 분석하였으며 국내의 평균속도 기반 배출계수식의 차종구분에 따른 차종과 연료에 한하여 평가하였다.

II. 기존 문헌 고찰

자동차 배출량 산출 방법론은 활동도 자료의 수준에 따라 다음과 같이 Tier 1, Tier 2, Tier 3의 방법론으로 나누어진다(IPCC, 2006). 국내외적으로 많이 사용되고 있는 평균속도기반 배출량 산정방법론은 이 중 Tier 3에 해당한다.

- Tier 1: 연료별 총판매량에 IPCC 배출계수를 적용하여 산출함
- Tier 2: 차종별 연료별 연료소비량에 해당 배출계수(국가 고유값)를 적용하여 산출함

- Tier 3: 차종과 연료 및 주행조건에 따른 배출계수를 차종별 연료별 주행조건별 주행거리에 적용하여 산출함

우리나라의 경우 온실가스(CO₂, H₄, N₂O)의 배출량은 현재는 “수송부문 온실가스 기후변화대응 시스템 구축 II” 연구(NIER, 2009)에서 개발한 차종별 속도별 배출계수식과 자동차의 등록대수 및 일평균 주행거리를 통해 계산되는 연간 총 주행거리를 활동도 자료를 이용하여 총배출량을 산정하는 방법을 사용하고 있다. 이러한 평균속도 기반의 배출계수는 자동차가 모의 주행 장치인 차대동력계로 실험 주행하면서 배출량을 실측하여 개발한다. 최근에 활발히 연구되고 있는 미시기반의 배출량 산정방법론(Instantaneous emission model)은 순간속도, 감가속도, 차량출력비 등의 순간적인 차량 주행 특성 변화를 고려하여 배출량을 산출하는 방법으로 평균속도 기반의 배출량 산정방법론과 비교하여 실제의 배출량에 보다 가까운 값을 산출한다는 장점이 있다. Kim et al.(2012)은 현행 평균 차속 모형을 통하여 산출된 배출량이 주행 여건에 따라 현실에서 발생하는 배출량과 많은 차이가 있음을 실제 데이터 분석을 통하여 확인하였으며, 소형 경유 트럭에 대한 주행 실험(NIER, 2012)으로 미시기반 배출계수 개발에 관련된 연구가 시작되었으나, 국내 배출량 산정 연구에 사용할 수 있는 미시기반 배출계수의 개발은 앞으로도 시간이 더 많이 소요될 것으로 보인다.

교통운영 정책의 배출량 감소효과를 평가한 국내 연구를 살펴보면, 다양한 교통운영 정책을 평가하기에 적합하며 차량주행 특성을 쉽게 얻을 수 있는 미시 교통 시뮬레이션 모형이 주로 사용되었다(Kim and Kim, 2012; Park et al., 2007; Seo et al., 2007). 그러나 배출량 산정 방법론으로 대부분 평균속도 기반의 모형을 사용하였기 때문에, 정차와 감가속도 등의 변화로 인한 배출량의 변화를 정확히 추정하기는 어려우며, 미시기반의 배출량 산정 방법을 적용한다면 보다 정확한 효과 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다.

국외에서는 다양한 배출량 산정 시뮬레이션 모형을 개발하여 사용하고 있는데, 미국의 경우 평균속도 기반의 모형인 EMFAC⁴⁾과 MOBILE이 있으며, 미시기반 배출량 산정모형인 MOVES가 개발되어 사용되고 있다.

4) California EPA, EMFAC2007 Release, http://www.arb.ca.gov/msei/onroad/latest_version.htm

영국에서는 DMRB⁵⁾의 환경영향 분석 방법론에서는 평균속도에 따른 배출계수식을 사용하도록 하고 있으며, 미시기반의 모형으로는 속도와 가속도를 고려하는 하는 모형인 MODEM⁶⁾과 자동차 파워의 변화를 고려하는 PHEM⁷⁾이 개발되어 사용되고 있다. 사실, 국가마다 배출가스에 대한 규제가 다르고 차종구성이 다르기 때문에 타국의 프로그램을 그대로 적용하는 것에는 한계가 있지만, 배출계수를 개발하기 위해서는 시간이 많이 소요되기 때문에 Potoglou and Kanaroglou(2005)는 캐나다에서 미국의 MOBILE를 사용하였으며, Li et al.(2006), Xie et al.(2006)은 중국 지역 배출량 분석에 MOBILE, COPERT 모형을 사용하였다.

미국에서는 교통 시뮬레이션 모형 기반의 배출량 산정 연구에 MOVES와 같은 배출량 산정 모형을 많이 활용하고 있는데(Lee et al., 2009), 실제로 교통 시뮬레이션 모형의 결과를 이용하여 배출량을 산정하는 경우, 필수 요소만을 추출하여 교통시뮬레이션 모형 내부에 통합하고자 하는 연구도 진행되었다. 대표적인 예로서 CMEM(Comprehensive Modal Emissions Model, Barth et al., 2001) 모형이 있는데, 미시 교통시뮬레이션 모형의 API 형태로 배출량 산정 모듈을 개발하여 교통시뮬레이션 모형 내에서 배출량을 직접 계산하도록 되어 있다. Lin et al.(2011)은 매조(Mesoscopic) 시뮬레이션 모형인 DynusT 모형에 MOVES의 감가속도 산정부분과 배출량 산출 부분을 모듈화 하여 모형 내에 통합하는 연구를 진행하였다.

또한, MOVES의 기본 배출맵을 활용하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. Claggett(2011)은 가상의 입력자료를 만들어서 MOVES를 실행하는 방법을 사용하여 미시기반 배출맵을 추출한 후 미시 교통모형에 통합하였으며, Ko(2011)는 도로의 기하구조에 따른 배출량 산정 연구에 MOVES의 산정방법론을 적용하기 위하여 Claggett(2011)과 유사한 방법을 사용하였다. 그러나 MOVES를 실행하여 배출맵을 추출할 경우 미국 특정 지역의 교통 통계, 연료 사용 통계, 기후 통계 등이 반영된 결과를 얻게 되므로 추출된 배출맵을 미국이 아닌 지역에서 직접 사용하는 것은 부적절하다.

관련 문헌 고찰 결과, 교통운영 정책 평가를 위한 보다 정확한 탄소배출량 산정을 위해서는 미시기반의 배출

량 산정 방법론의 개발 및 적용이 필요하지만, 국내 도로 교통 환경을 고려한 미시적 배출계수가 개발된다면 오랜 시간이 소요되므로 지금으로서는 국외에서 개발된 모형을 수정하여 사용하는 방법이 적합할 것으로 판단을 하였다. 본 연구에서는 기존 국외 미시기반 배출량 산정 모형을 활용하여 미시기반 배출맵을 추정하고 이를 국내 실정에 적합하도록 보정하는 작업을 수행함으로써 국내 적용 가능한 배출량 산정 모형을 개발하였다. 기존 연구에서는 배출량 산정 모형을 실행하여 미시기반 배출맵을 추출하였으나 이러한 방법은 국외의 통계가 반영되는 결과를 얻게 되는 문제점이 있기 때문에, 본 연구에서는 모형의 데이터베이스로부터 기본 배출계수를 직접 추출하여 사용하였으며 국내외 차종구분의 차이점을 고려하여 국내 차종 구분에 맞는 기본 배출계수를 추정하여 사용한 점에서 차별성이 있다.

III. 연구 방법론

1. 모형 비교 및 선정

미시기반의 배출량 산정방법론은 차량 주행 특성인 속도, 감가속도, 차량출력비 등의 순간적인 변화를 고려하여 배출량을 산출하는 방법으로 평균속도 기반의 배출량 산정방법론과 비교하여 실제의 배출량에 보다 가까운 값을 산출한다는 장점이 있다. 그러나, 현재는 국내 미시기반 배출계수와 산정모형이 부재하기 때문에 다음과 같은 국외의 모형을 비교 검토하여 국내에 적용하기에 가장 적합한 모형을 선정하였다.

- MODEM : 차량 엔진 출력이 배출량을 결정한다는 개념의 모형으로, 엔진 동력은 속도와 가속도를 나타내고, 시험주행을 통해 수집된 배출량 자료의 분석을 통해 차량의 속도와 가속도 조합에 따른 배출율표(배출맵)를 작성하였다. 차량의 주행궤적으로부터 매초간의 속도와 가속도의 변화를 구한 후, 배출율표에서 해당하는 배출계수를 찾아 대기 오염물질의 배출량을 산정하는 방식을 사용한다.
- PHEM : 차량의 주행궤적에서 차량의 엔진 출력 요구량과 엔진회전 속도에 따른 연료 소모량과 대

5) Design Manual for Roads and Bridges (Department of the Environment, Transport, and the Regions, 1999)

6) MODelling of EMISSIONS and consumption in urban areas(Jost et al., 1992; Joumard et al., 1995)

7) Passenger car and Heavy-duty Emission Model(Rexeis et al., 2005)

Table 1. Comparisons of Micro-Level emission models

	MODEM	PHEM	VeTess	CMEM	MOVES
Developer	TRL	TUG	MIRA/VITO	UC Riverside	US EPA
Cost	Not commercially available	7000 Euro	Not known	\$20	Free
Inputs	v(t)*	v(t), vehicle file, engine map, Full-load curve, gradient	v(t), vehicle file, engine file	v(t), gradient, use of auxiliaries, soak time	v(t), vehicle info, gradient
Outputs	FC**, Emissions	FC, Emissions	FC, Emissions	FC, Emissions	FC, Emissions
Pollutant	CO, HC, NO _x , CO ₂ , PM	CO, HC, NO _x , CO ₂ , PM	CO, HC, NO _x , CO ₂ , PM	CO, HC, NO _x , CO ₂	CO, HC, NO _x , CO ₂ , PM, etc.
Types of Program	DOS, Excel macro	user-friendly interface	user-friendly interface	user-friendly interface	user-friendly interface

* Driving cycle, 차량의 초단위 속도, **Fuel Consumption

기 오염물질의 배출량을 산출하는 모형으로, 엔진 출력 요구량은 차량 운행 저항 및 변속 손실에 근거하여 산출하며, 엔진회전 속도는 차량의 속도, 바퀴 지름, 변속비에 따라 계산한다. 엔진출력 요구량과 엔진회전 속도의 비율에 따른 배출을 맵을 이용하여 배출량을 산출한다.

- VeTess⁸⁾: 차량의 주행 중 엔진운행조건에 따라 배출량을 산정하는 모형으로 엔진운행조건은 차량의 힘으로 나타내며 가속저항, 구름저항, 오름저항, 공기저항의 합으로 나타낸다. 시험주행을 통해 배출 맵이 작성되었고, 이를 이용하여 오염물질의 배출량을 산출하며, 배출율은 네 개의 배출을 운행 모드 (Steady-state, Jump fraction, Time constant, Transient)로 구성되어 있어 각 모드에 해당하는 시간과 배출계수에 따라 배출량을 산정한다.
- CMEM: 차량의 출력 요구량에 따라 초당 연료소모량과 배출량을 추정하는 모형으로, 차량의 출력 요구량은 입력값인 차량의 운행조건과 모형변수에 따라 결정되며, 연료소모율은 차량의 출력 요구량, 엔진속도, 공기와 연료 비율에 따라 산출된다. 최종적으로 배출량은 연료소모율과 엔진출력비에 따른 배출계수(Engine-out emission index)와 촉매 통과 비율(Catalyst pass fraction)로 산출된다.
- MOVES: 차량의 운행조건인 초당 속도, 가속도, 차량출력비(Vehicle Specific Power, VSP)에 따라 배출량을 산정하는 모형으로 차량주행모드 (Operating Mode)에 따른 배출율표(배출맵)를 개발하여 이를 따라 주행궤적에 따른 연료소모량과 배출량을 산정한다.

Table 1은 Boulter et al.(2006)이 미시기반 배출량 산정 모형을 요약하여 정리한 표에 MOVES를 추가하여 나타낸 표이다. 미시기반의 배출량 산정모형을 기능적으로 살펴보면 배출맵과 산정 방식의 차이는 있으나 차량 운행의 미시적 변화에 따라 배출량을 산출하는 점에서는 큰 차이가 없다. 접근성, 비용, 사용의 편리성 측면에서 비교하여 보았을 때, 공개 프로그램으로서 모형 획득이 쉽고, 데이터베이스의 접근 및 모형 사용이 용이하며, 차량의 엔진맵 등을 요구하는 타모형에 비하여 교통 시뮬레이션 모형 등으로부터 활동도 자료 생성이 간편한 MOVES가 국내에 적용하기에 타당한 모형으로 판단된다.

2. 국내 적용 미시기반 배출량 산정 모형 개발

MOVES는 차량의 통행과 기상정보 등이 데이터베이스에 포함되어 있어 사용자가 분석지역과 시간 등을 선택하면 내부적 처리 과정에 의해서 배출량을 산정할 때 필요한 활동도 자료와 배출량 결과 보정에 필요한 자료를 생성할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 미국 외 타 국가에서 MOVES를 직접 사용하려면 차종과 도로 구성비, 주행 특성 등 MOVES의 데이터 구조를 모두 파악한 다음 데이터를 모두 해당지역의 자료로 재구성해야 올바른 결과를 얻을 수 있는데 이는 쉬운 일이 아니다. 또 다른 장점은 많은 종류의 대기오염 물질을 다루고 있고, 다양한 차량 운행 모드의 배출 특성을 분석이 가능함에 있다. 그러나 분석 대상이 일부 차량 운행 모드에 국한되고 관심 오염물질이 한정되어 있으며, 다양한 시나리오에 대해 링크별로 배출량을 필요로 하는 경우에는 비효율적이다. 교통운영정책의 시행으로 인한 배출량 변

8) Vehicle Transient Emissions Simulation Software(Pelkmans et al., 2004; MIRA, 2002).

화를 분석하는 경우가 이러한 경우에 해당한다. 이러한 점들을 고려했을 때, 국내에서 MOVES를 적용하는 가장 좋은 방법은 MOVES의 미시기반 배출량 산정 방법론을 따르되 국내 도로교통 환경에 적합한 활동도 맵 산출과 미시 배출맵 추정을 통한 별도의 모형을 개발하는 것이라 판단하였으며, 다음의 절차에 따라 국내 적용 미시기반 배출량 산정 모형을 개발하였다.

- 미시기반 활동도 맵 산출(Step1)
 - 링크내에서 개별차량이 주행한 초단위 VSP계산
 - 초단위 운행모드(OP-mode) 구분
 - 운행모드별 활동도 맵 산출
- 미시 배출맵 추정(Step2)
 - 국내 차종과 MOVES의 차종 구분 비교
 - 국내 차종에 맞는 오염물질별 미시배출맵 추정

1) 미시기반 활동도 맵 산출 (Step1)

(1) 링크내에서 개별차량이 주행한 초단위 VSP계산

어떤 링크를 개별차량이 주행한 초당 속도의 기록을 주행 궤적(Driving Cycle)이라고 한다. 주행궤적은 교통시뮬레이션 모형이나 실측자료로부터 획득할 수 있다. 먼저 식(1)에 의해 초당 가속도를 계산한다.

$$a_t = v_t - v_{t-1} \tag{1}$$

여기서, v_t : 속도(m/s), a_t : 가속도(m/s²)

식(2)에 의하여 VSP를 계산한다. 계수값 A, B, C는 차종에 따라 다르며 MOVES의 값(EPA, 2010)을 사용한다.

$$P_{V,t} = \frac{Av_t + Bv_t^2 + Cv_t^3 + mv_t(a_t + g\sin\theta_t)}{m} \tag{2}$$

여기서,

- $P_{V,t}$: 차량 V의 시간 t일 때의 VSP(kW/tonne)
- t : 시간(sec), v_t : 속도(m/s), a_t : 가속도(m/s²)
- m : 차량 중량(tonne), A: 구름 저항(KW-sec/m)
- B : 회전 저항(KW-sec²/m²),
- C : 공기 저항(KW-sec³/m³)
- g : 중력가속도(9.81m/s²), θ_t : 도로의 경사(degree)

(2) 초단위 운행모드(OP-mode) 구분

운행모드(Operating Mode, OP-mode)는 미시적

Table 2. Operating mode bin definitions

opMode ID	opModeName	VSP(kW/tonne)		Speed(mph)	
		Lower	Upper	Lower	Upper
0	Braking*	-	-	-	-
1	Idling	-	-	-1	1
11	Low Speed Coasting	-	0	1	25
12	Cruise/Acceleration	0	3	1	25
13	Cruise/Acceleration	3	6	1	25
14	Cruise/Acceleration	6	9	1	25
15	Cruise/Acceleration	9	12	1	25
16	Cruise/Acceleration	12	-	1	25
21	Moderate Speed Coasting	-	0	25	50
22	Cruise/Acceleration	0	3	25	50
23	Cruise/Acceleration	3	6	25	50
24	Cruise/Acceleration	6	9	25	50
25	Cruise/Acceleration	9	12	25	50
26	Cruise/Acceleration	12	-	25	50
27	Cruise/Acceleration	12	18	25	50
28	Cruise/Acceleration	18	24	25	50
29	Cruise/Acceleration	24	30	25	50
30	Cruise/Acceleration	30	-	25	50
33	Cruise/Acceleration	-	6	50	-
35	Cruise/Acceleration	6	12	50	-
36	Cruise/Acceleration	12	-	50	-
37	Cruise/Acceleration	12	18	50	-
38	Cruise/Acceleration	18	24	50	-
39	Cruise/Acceleration	24	30	50	-
40	Cruise/Acceleration	30	-	50	-

*Accel < -2mph or < -1mph for 3 consecutive second

차량 주행특성에 따라 배출율이 비슷하게 나타나는 그룹을 정의한 것이다. Table 2에서 보이는 바와 같이 속도(mph)와 VSP(kW/tonne)에 따라 운행모드가 구분되어 있다. 따라서 초단위 속도와 식(2)로 계산한 VSP에 따라 초단위 운행모드를 구분한다.

(3) 운행모드(OP-mode)별 활동도 맵 산출

초단위 운행모드 구분 결과에서 각 운행모드의 개수를 세어 한 링크를 주행한 시간 동안의 운행모드에 따른 활동도 맵을 작성한다. 활동도는 자동차 주행시 배출 활동의 정도를 나타내는 값으로, 미시기반 배출량 산정시의 활동도는 해당 운행모드로 주행한 시간이다. 본 개발 모형에서는 초(sec)를 사용하였다. 따라서 본 모형의 미시 배출맵의 단위는 g/sec이다.

2) 미시 배출맵 추정 (Step 2)

(1) 국내 차종과 MOVES의 차종 구분 비교

국내 차종은 기존의 평균속도 기반의 모형에서 구분하고 있는 차종(NIER Vehicle Type)을 기준으로 MOVES의 차종을 차량제원(승차인원, 중량) 정보를 바탕으로 가장 부합되는 차종을 찾아 Table 3에 정리하였다. 승용차의 경우 우리나라가 MOVES의 차종에 비해 매우 세분화되어 있으며, 화물차의 경우에는 MOVES가 중량에 따라 더욱 세분화되어 있어 일대일로 매칭하기에는 어려움이 있었다.

Table 3. Vehicle type matching results

Fuel Type	NIER Vehicle Type	MOVES Vehicle Type regClassID (SourceID)
Gasoline	Passenger Car_Mini(<1000cc)	Light Duty Vehicles 20(21)
	Passenger Car_Small (1000-1600cc)	
	Passenger Car_Medium (1600-2000cc)	
	Passenger Car_Big (>2000cc)	
Diesel	Passenger Car_Small (1000-1600cc)	Light Duty Vehicles 20(21)
	Passenger Car_Medium (1600-2000cc)	
	RV_Small(<2000cc)	Light Duty Vehicles 20(21)
	RV_Medium(>2000cc)	Light Duty Trucks 30(31)
	Bus_Small(<15persons)	Light Heavy Duty 41(31)
	Bus_Medium (15-35persons)	Light Heavy Duty 42(32)
	Bus_Transit	Urban Bus 48(42)
	Bus_Intercity Bus	Heavy Heavy Duty 47(41)
	Truck_Small (<1tone loading)	Light Duty Trucks 30(31)
	Truck_Medium (1-5tone loading)	Light Heavy Duty 41(32), 46(52)
	Truck_Big (>5tone loading)	Heavy Heavy Duty 46(52), 47(53)

(2) 국내 차종에 맞는 오염물질별 미시배출맵 추정

MOVES의 데이터베이스에는 다양한 오염물질에 대한 배출맵이 저장되어 있으나, 이산화탄소(CO₂) 배출맵은 없다. 따라서, MOVES 에너지 소모량 맵으로부터 총

Table 4. Emission rate for CO₂(g/sec) by OPmode

OP mode	MOVES regClassID							
	Gasoline				Diesel			
	RC20	RC20	RC30	RC41	RC42	RC46	RC47	RC48
0	0.99	0.95	1.79	1.91	1.94	4.43	4.43	4.43
1	0.89	0.88	1.33	1.43	1.41	2.18	2.18	2.18
11	1.39	1.53	1.99	2.13	2.16	2.93	2.93	2.93
12	1.88	2.22	2.63	2.82	2.83	8.52	8.52	8.52
13	2.72	3.09	4.31	4.62	4.47	15.61	15.61	15.61
14	3.48	3.88	5.98	6.4	6.11	22.78	22.78	22.78
15	4.22	4.66	7.6	8.14	7.69	28.8	28.8	28.8
16	5.22	5.86	10.19	10.91	10.21	39.62	39.62	39.62
21	1.82	2.18	2.44	2.63	2.73	2.36	2.36	2.36
22	2.15	2.52	3.06	3.28	3.28	10.95	10.95	10.95
23	2.69	3.07	4.51	4.83	4.71	18.16	18.16	18.16
24	3.49	3.89	6.21	6.65	6.41	26.29	26.29	26.29
25	4.55	5.30	7.91	8.48	8.1	33.81	33.81	33.81
27	6.01	6.97	10.9	11.69	11.06	46.7	46.7	46.7
28	8.09	9.06	14.28	15.29	14.7	65.38	65.38	65.38
29	11.08	12.71	19.13	20.46	19.92	84.06	84.06	84.06
30	13.89	15.90	20.81	22.25	21.74	102.73	102.73	102.73
33	2.72	3.14	4.67	5.01	5	9.74	9.74	9.74
35	4.34	5.06	7.36	7.86	7.75	29.8	29.8	29.8
37	5.65	6.55	10.19	10.9	10.55	46.64	46.64	46.64
38	7.36	8.49	12.58	13.43	13.14	65.29	65.29	65.29
39	9.81	11.20	15.52	16.56	16.33	83.94	83.94	83.94
40	12.52	14.26	20.21	21.54	21.42	102.6	102.6	102.6

에너지 소모량을 추정하여 식(3)에 의해 CO₂의 배출량을 산출한다. 이때 산화지수는 1, 탄소함량은 경우는 0.02, 휘발유는 0.0196를 사용하였다. 배출맵은 차종별로 차량 년식에 따라 추출할 수 있으나, 국내 배출계수는 년식의 구분이 없기 때문에 국내 적용과 모형 적용 결과의 타당성 검토를 위해 차종별로 1991년부터 2011년의 각 운행 모드별 배출율의 평균값을 추정하였다(Table 4).

$$CO_2(g) = EC \times OF \times CC \times CW \quad (3)$$

여기서, EC : 총에너지 소모량(KJ)
 OF : 산화지수, CC : 탄소함량(g/KJ)
 CW : 이산화탄소분자와 탄소분자 무게의 비

3. 모형의 국내 적용성 검토

배출량을 산정하는 방법은 간략하게는 활동도와 배출 계수의 곱으로 나타낼 수 있다. 본 연구의 개발 모형에서는 미시기반의 배출량을 산정할 때 필요한 활동도 자료를 국내의 주행 자료로 생성할 수 있도록 만들었기 때문에 활동도 측면에서는 국내 적용성에 문제가 없지만,

외국에서 개발한 배출계수인 MOVES의 기본 배출맵을 국내에 적용하였기 때문에 이 부분이 타당한 지에 대한 검토가 필요하다. 그러나 국내에서 사용하고 있는 평균 속도 기반의 모형과 본 연구에서 개발한 모형에서 사용하는 배출계수의 개념과 단위가 다르므로 직접 비교할 수 없다는 문제점이 있다. 또한, 두 방법론을 실제 네트워크에 적용하여 총량 측면에서 비교하는 것은 차종별 미시 배출맵의 국내 적용성을 평가하기에는 적합하지 않다. 따라서, 국립환경과학원(NIER)에서 평균속도 기

반의 배출계수를 개발할 당시 사용했던 차종별 평균 속도별 실험 주행 궤적(NIER Traces)의 배출량(g)을 미시기반의 개발모형으로 산정한 후 주행궤적의 주행 거리(km)로 나눈 값(g/km)을 해당 주행궤적의 평균속도 기반의 배출계수(g/km)와 비교하는 방법을 사용하였다.

1) 실험 주행 궤적 (NIER Traces)

평균속도 기반의 배출계수는 자동차가 모의 주행할

Table 5. NIER test traces for measuring emissions

Light Duty Vehicle (LDV)				Medium Duty Truck (MDT)				Heavy Duty Truck (HDT)				Medium Duty Bus (MDB)				Urban Bus (UB)			
Trace ID	Ave. Speed (kph)	Time (Sec)	Dist. (km)	Trace ID	Ave. Speed (kph)	Time (Sec)	Dist. (km)	Trace ID	Ave. Speed (kph)	Time (Sec)	Dist. (km)	Trace ID	Ave. Speed (kph)	Time (Sec)	Dist. (km)	Trace ID	Ave. Speed (kph)	Time (Sec)	Dist. (km)
n01	4.7	873	1.1	n01	4.7	908	1.19	n01	4.6	875	1.11	n01	4.6	872	1.11	n01	4.6	891	1.13
n03	10.8	878	2.6	n02	7.6	928	1.97	n02	7.2	871	1.74	n02	7.4	905	1.87	n02	7.7	910	1.94
n05	17.3	861	4.1	n03	10.4	937	2.7	n03	10.6	881	2.59	n03	11.3	904	2.85	n03	10.6	900	2.64
n07	24.6	875	6.0	n05	13.4	894	3.33	n04	14	902	3.52	n05	16.6	890	4.1	n04	14.1	880	3.45
n09	34.1	926	8.8	n06	19.7	904	4.95	n05	17.2	892	4.27	n06	20.2	872	4.89	n05	16.3	899	4.08
n12	64.1	840	14.9	n07	23.5	891	5.86	n06	19.8	891	4.91	n07	23.6	872	5.73	n06	19.9	919	5.08
n13	77.4	849	18.2	n08	28	915	7.11	n07	24.2	863	5.8	n08	28.1	910	7.11	n07	24.2	892	6
n14	93.6	917	23.8	n09	35	937	9.13	n08	27.8	873	6.75	n09	35.3	905	8.88	n08	27.8	887	6.86
n15	108.5	935	28.2	n10	45	955	11.96	n09	34.4	851	8.13	n10	44.5	873	10.81	n09	32.3	925	8.32
				n11	55.2	833	12.79	n10	45	955	11.96	n11	54.5	919	13.94	n10	37.8	890	9.35
				n12	63.4	913	16.1	n11	55.2	833	12.79	n12	65.9	867	15.88	n11	42.7	865	10.28
				n13	78.1	846	18.38	n12	63.4	913	16.1	n13	78.6	992	21.69	n12	47.3	898	11.81
				n14	91.2	875	22.2	n13	77.8	914	19.78	n14	91.6	1024	26.09				
				n15	104.3	902	26.17	n14	91.9	921	23.55	n15	105.3	1018	29.8				
								n15	103.8	956	27.59								

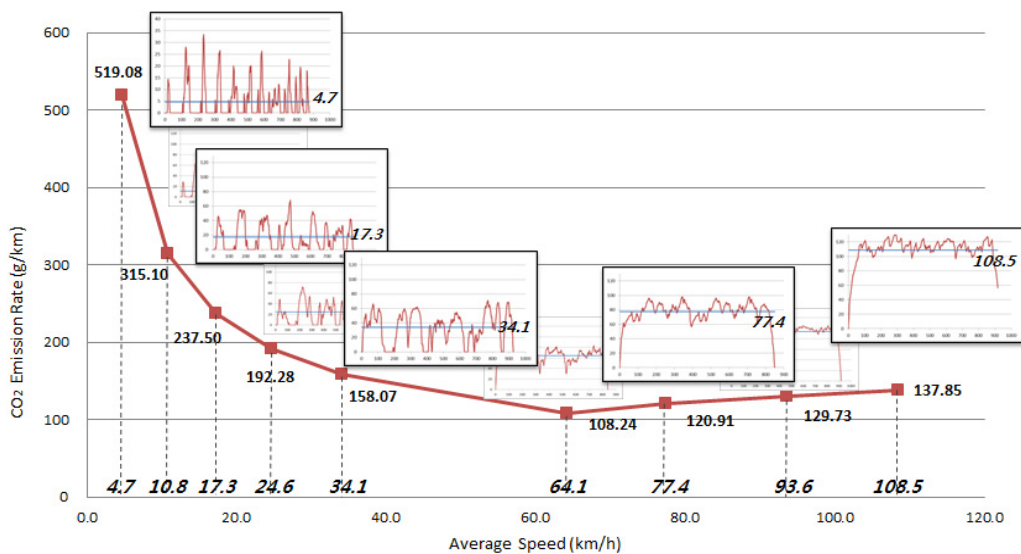


Figure 1. Developed emission rate curve and NIER test traces for small size passenger car

수 있도록 자동차에 부하를 걸어주는 장치인 차대동력 계로 실험 주행 시 배출량을 실측한다. 이 때, 실제 도로를 주행할 때와 같이 정지, 가속, 정속, 감속 등을 반복하는 과정을 대표화된 주행모드를 선정하여 주행하는데, 국립환경과학원에서 차종그룹별(LDV, MDT, HDT, MDB, UB)로 평균속도별로 선정한 각 주행궤적에 대한 평균속도와 주행시간과 주행거리에 대한 정보를 Table 5에 정리하였다. 예를 들어, 소형 휘발유 승용차는 LDV에 속하는데, 이 차종에 대한 평균속도 기반 배출 계수식은 Table 5에서 LDV의 주행궤적으로 차량을 주행 실험 하면서 배출되는 오염물질을 포집하여 각각의 평균속도에서의 배출계수(g/km)값을 회귀 분석하여 얻은 식이다. Figure 1은 실험 주행궤적과 평균 속도 기반 배출 계수식의 연관성을 잘 보여주는 그림이다. 각 평균속도에서의 주행궤적은 Figure 1에 작게 삽입된 그림에서 보는 바와 같이 해당 평균속도를 대표하는 가감속의 특성을 갖도록 선정한 대표 주행궤적이며, 평균속도에 따른 배출계수는 개발한 배출계수식에 평균속도를 대입하여 얻은 값이다. 다른 차종에 대해서도 같은 방법으로 해당하는 주행궤적으로 주행하여 얻은 결과를 이용하여 평균속도 기반의 배출계수식을 개발한다.

2) 실험 주행 궤적 자료를 활용한 적용성 검토 방법론

차종그룹별 주행 궤적은 초당 속도 형태의 자료이므로 이를 이용하여 미시 기반 활동도 맵을 산출하고, 본 연구에서 추출한 차종별 미시 배출맵을 적용하여 차종별 평균속도별 주행궤적의 배출량(g)을 계산하였다. 다음으로 산출된 배출량을 해당 주행궤적의 주행거리(km)로 나누어 거리당 배출량(g/km)을 산정하였다. 이 값과 차종별 평균속도별 해당 주행궤적의 평균속도 기반의 배출계수(g/km) 비교함으로써, MOVES에서 추정된 차종별 미시 배출맵이 국내의 차량에 적용되는 것이 적합한지에 대해 평가하였다.

3) 타당성 검토 결과

Table 6은 차종별로 평균속도별 주행 궤적에 대하여 평균속도 기반의 모형의 계수값("AV"로 구분)과 본 연구에서 개발한 미시기반으로 모형으로 거리당 배출량을 계산한 값을 보여준다. Figure 2, 3, 4는 결과값을 보다 쉽게 비교할 수 있도록 차종별로 그래프를 나타낸다. 먼저, 국내 계수와 모형으로 계산한 값이 전체적인 경향

에서 매우 유사함을 볼 수 있다. 이는 두 결과를 얻어낸 방법론상의 차이를 감안할 때 매우 흥미로운 결과이며, 이는 MOVES로부터 추정된 미시기반의 배출맵을 이용하여 국내 상황을 예측하는 것이 가능하다는 것을 보여주는 것이라 할 수 있다.

좀 더 자세히 살펴보면, 휘발유 승용차(Figure 2)의 경우, 국내의 CO₂ 배출계수는 차량 크기가 커짐에 따라 증가하는 경향을 보이며, 모형을 이용하여 예측한 결과 값은 국내 대형 승용차의 결과 대비 9-30% 정도 높은 배출수준을 보이고 있다. 이미 널리 알려진 바대로 자동차의 CO₂ 배출 수준이 차량의 배기량에 따라 증가한다는 사실과 미국의 휘발유 승용차 배기량이 국내의 경우 보다는 좀 더 큰 쪽으로 치우쳐 있음을 감안한다면, 이는 MOVES로부터 추정된 배출맵을 이용하여 국내 휘발유 승용차 배출량을 효과적으로 예측할 수 있음을 다시 한번 보여주는 결과로 판단된다. 경유 중형 RV의 모형 산정 결과 역시 국내 평균속도 기반 계수와 훌륭한 일치를 보이고 있으며, 경유 승용차 및 소형 RV도 유사한 경향을 보인다. 경유 RV의 CO₂ 배출량은 승용차보다 다소 높는데, 이는 경유 RV와 승용차의 엔진 사양이 비교적 유사한 반면, RV는 차량 중량이 상대적으로 무겁기 때문인 것으로 판단된다. RV의 경우 모형 산정 결과값은 국내 계수보다 약간 높은 결과를 보이며, 이는 앞의 휘발유 승용차 사례와 마찬가지로 양국의 차량 규모에 기인한 것으로 판단된다.

버스(Figure 3)의 경우는 전체적인 경향은 유사하지만 중형 버스를 제외하고는 두 방법론의 값의 차이가 크다. 또한 트럭(Figure 4)의 경우를 살펴보면, 경유 소형 트럭의 경우는 국내 계수가 MOVES 배출맵 활용 결과와 대비하여 낮은 경향을 보이고 있으며, 이는 소형 경유 승용차 및 RV 결과에서 관찰된 것과 유사한 원인 때문인 것으로 판단된다. 중형 트럭의 배출수준은 잘 일치하고 있으며, 대형 트럭의 경우는 오히려 국내 계수가 더 높은 배출수준을 보이고 있다. 경유 트럭과 버스에서의 편차가 상대적으로 크게 발생하는 원인은 크게 세 가지 정도로 요약할 수 있다. 첫 번째로, 자동차 오염물질 저감 기술 수준의 차이이다. 세계 각국은 자국의 여건과 필요에 따라 자동차 배출허용기준을 수립하여 적용하고 있다. 배출허용기준의 수준과 적용 일정은 차량의 대기오염물질과 온실가스 배출량에 중요한 영향을 미친다. 휘발유 자동차의 경우, 우리나라와 미국의 배출허용기준 수준 및 적용 시기가 거의 차이가 없다. 하지만 대형 경유 자

Table 6. Comparison of CO2 emission rate (g/km) by vehicle types

Passenger Car-Gasoline							Passenger Car-Diesel			RV-Diesel					
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Mini	AV _Small	AV _Medium	AV _Big	Model 20(21)*	AV _Small	AV _Medium	Model 20(21)	LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model 20(21)	AV _Medium	Model 30(31)
n01	4.7	367	519.1	635.9	756.2	970.8	456.82	650.34	1026.99	n01	4.7	766.89	1026.99	924.40	1420.63
n03	10.8	228.4	315.1	393.1	452	506.87	280.32	374.21	542.64	n03	10.8	467.81	542.64	640.55	770.79
n05	17.3	174.6	237.5	299.4	337.7	367.2	212.59	273.64	398.29	n05	17.3	353.59	398.29	520.40	579.46
n07	24.6	142.8	192.3	244.3	271.6	299.71	172.90	216.58	328.34	n07	24.6	286.86	328.34	445.58	484.65
n09	34.1	118.5	158.1	202.3	221.9	242.24	142.74	174.34	268.31	n09	34.1	236.27	268.31	385.83	393.84
n12	64.1	82.7	108.2	140.4	150.2	177.04	98.55	114.64	199.68	n12	64.1	162.39	199.68	292.11	304.31
n13	77.4	102.8	120.9	150.4	158.9	175.05	110.27	120.30	198	n13	77.4	175.93	198	326.19	308.91
n14	93.6	117.9	129.7	151.6	161.8	174.59	120.28	125.46	198.44	n14	93.6	193.19	198.44	329.70	320.38
n15	108.5	131.8	137.8	152.8	164.5	195.6	129.48	130.21	220.77	n15	108.5	209.08	220.77	332.92	351.6
Adjustment Factor		0.519	0.650	0.800	0.882	-	0.533	0.636	-	Adjustment Factor		0.875	-	0.919	-
Bus-Diesel															
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model 41(31)	MDB Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Medium	Model 42(32)	UB Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Local	Model 48(42)	AV _Intercity	Model 47(41)		
n01	4.7	766.89	1524.18	n01	4.6	933.21	1459.08	n01	4.6	2104.48	3183.58	1606.84	3183.58		
n03	10.8	467.81	826.32	n02	7.4	756.74	1028.33	n02	7.7	1611.66	2319.89	1352.56	2319.89		
n05	17.3	353.59	621.1	n03	11.3	627.90	753.64	n03	10.6	1365.78	2003.17	1215.45	2000.5		
n07	24.6	286.86	519.47	n05	16.6	529.96	576.51	n04	14.1	1178.17	1804.65	1104.84	1804.65		
n09	34.1	236.27	422.14	n06	20.2	486.03	512.67	n05	16.3	1092.94	1667.03	1052.55	1663.49		
n12	64.1	162.39	326.23	n07	23.6	453.81	486.22	n06	19.9	985.62	1578	984.61	1576.93		
n13	77.4	175.93	330.71	n08	28.1	420.20	438.1	n07	24.2	890.65	1506.4	922.26	1496.44		
n14	93.6	193.19	342.53	n09	35.3	379.99	384.1	n08	27.8	828.93	1383.71	880.46	1382.55		
n15	108.5	209.08	375.53	n10	44.5	343.11	331.66	n09	32.3	766.96	1318.35	837.38	1309.46		
				n11	54.5	313.77	303.46	n10	37.8	706.97	1236.43	794.49	1225.73		
				n12	65.9	323.71	313.81	n11	42.7	663.73	1176.87	762.75	1161.64		
				n13	78.6	326.45	307.67	n12	47.3	631.55	1197.5	737.10	1179.35		
				n14	91.6	329.26	323.4								
				n15	105.3	332.23	346.47								
Adjustment Factor		0.545	-	Adjustment Factor		0.935	-	Adjustment Factor		0.617	-	0.616	-		
Truck-Diesel															
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model 30(31)	MDT Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Medium	Model 41(32)	Model 46(52)	HDT Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Big	Model 46(52)	Model RC47(53)		
n01	4.7	551.24	1420.63	n01	4.7	730.97	1473.42	2969.53	n01	4.6	3478.85	2972.18	2986.98		
n03	10.8	373.83	770.79	n02	7.6	691.32	1011.03	2264.96	n02	7.2	2930.44	2303.16	2321.45		
n05	17.3	300.02	579.46	n03	10.4	654.68	796.81	1837.09	n03	10.6	2527.06	1969.91	1990.35		
n07	24.6	254.56	484.65	n05	13.4	617.22	665.16	1590.65	n04	14	2271.71	1626.99	1650.98		
n09	34.1	218.57	393.84	n06	19.7	544.58	520.6	1350.3	n05	17.2	2099.53	1473.1	1494.59		
n12	64.1	162.79	304.31	n07	23.5	504.71	495.27	1330.49	n06	19.8	1989.36	1384.46	1411.54		
n13	77.4	198.42	308.91	n08	28	461.34	443.19	1227.94	n07	24.2	1842.22	1276.82	1300.46		
n14	93.6	234.55	320.38	n09	35	402.16	411.69	1154.17	n08	27.8	1746.95	1201.69	1222.48		
n15	108.5	267.79	351.6	n10	45	335.11	357.33	1006.69	n09	34.4	1610.12	1152.3	1179.73		
				n11	55.2	287.92	314.05	866.76	n10	45	1452.75	1006.69	1030.52		
				n12	63.4	265.51	305.88	830.82	n11	55.2	1344.44	866.76	899.81		
				n13	78.1	259.97	309.45	773.07	n12	63.4	1274.05	830.82	870.46		
				n14	91.2	292.51	330.93	813.08	n13	77.8	1178.01	760.1	793.61		
				n15	104.3	360.37	355.2	957.43	n14	91.9	1105.23	804.17	853.18		
									n15	103.8	1054.88	894.41	965.97		
Adjustment Factor		0.571	-	Adjustment Factor		0.891	-	-	Adjustment Factor		1.394	-	-		

*Model RegClassID(Source Use ID)

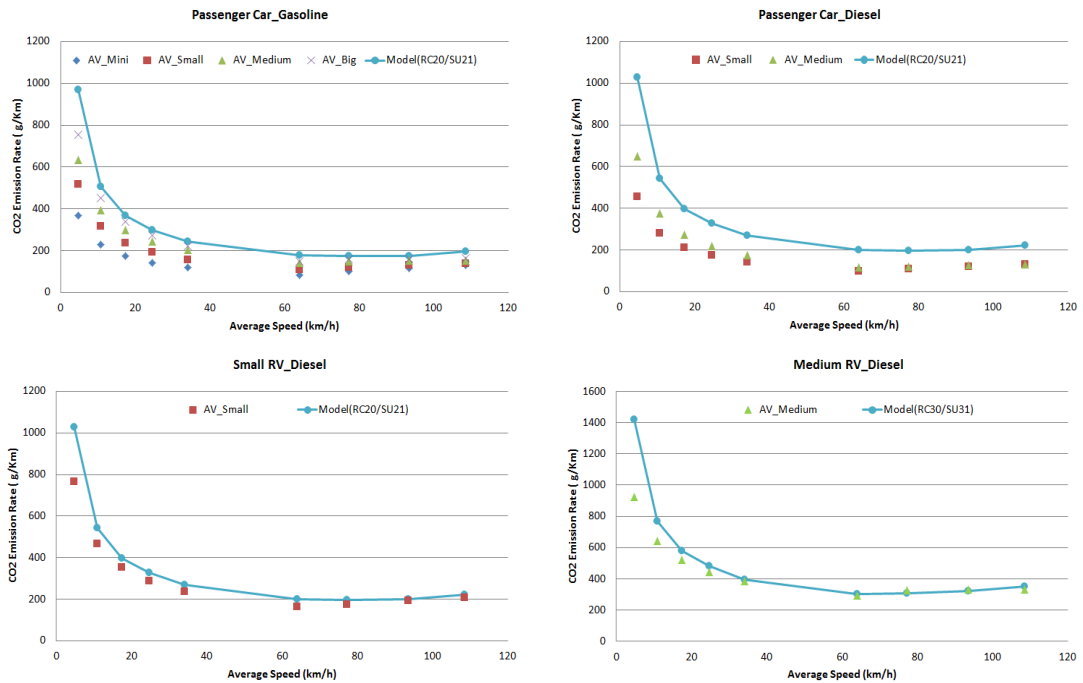


Figure 2. Comparison of emission rate for passenger cars and RVs

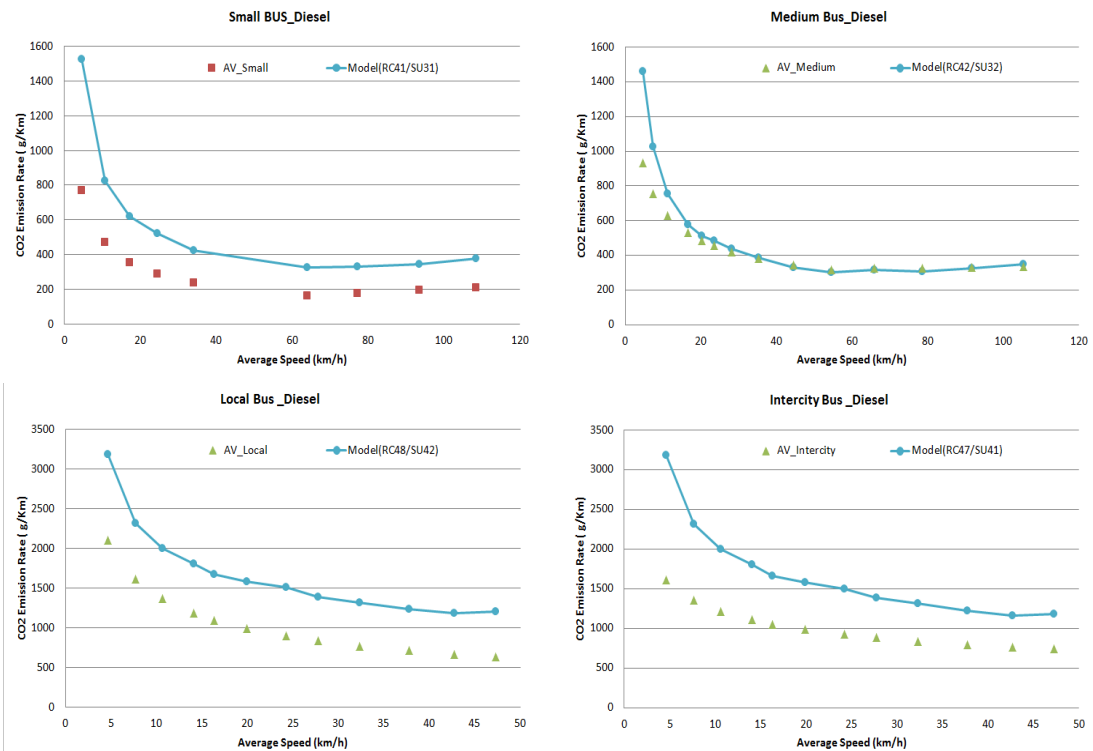


Figure 3. Comparison of emission rate for buses

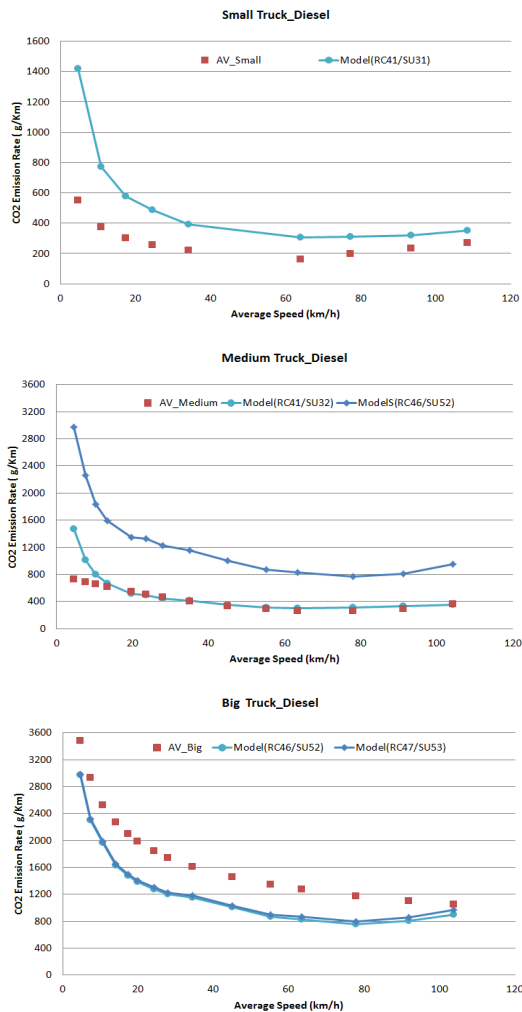


Figure 4. Comparison of emission rate for trucks

동차 배출허용기준의 경우는 양국 간의 차이가 상대적으로 크다고 말할 수 있다. 두 번째 이유는 배출계수 산정에 사용된 차량의 차이에 의해 발생된 편차를 들 수 있다. 배출계수의 대표성을 위해서는 각 차종별로 가장 많이 사용되는 차량을 선정하여 배출가스를 평가하게 되는데, 대표 차량의 종류는 각국의 여건에 따라 각각 다르다. 특히, 버스와 트럭 같은 대형 차량의 경우는 승용차나 RV 같은 소형 차량에 비해 국가별로 여건에 따라 대표 차종의 편차가 좀 더 크게 벌어진다고 할 수 있다. 세 번째 이유는 배출계수를 갱신하는 주기이다. 배출가스 실험의 비용, 측정장비, 실험 대상차량 확보 등과 같은 현실적인 측면에서 볼 때, 대형 차량의 배출가스를 평가하는 것은 소형 차량에 비해 매우 어렵다. 따라서 국내 계수와 MOVES

의 배출계수 개발 시점에서 차이가 있을 수 있다.

국내 계수와 개발모형으로 산정한 결과 값을 비교 분석한 결과, MOVES 로부터 추정된 미시기반의 배출맵을 국내에 적용하는 것이 가능하다는 결론을 내렸다. 그러나, 양국의 대표 차량 크기 차이를 고려하여 국내 대표 차종에 맞도록 추정된 미시배출맵을 차종별로 보정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4) 보정계수 추정 및 적용결과

국내 대표 차종에 맞는 MOVES의 미시배출맵을 보정하기 위한 계수를 추정하였다. 각 차종에 대하여 평균 속도별 주행궤적에 대하여 평균속도 기반의 배출계수와 개발모형으로 계산한 값의 비율을 구한 후 평균 비율을 계산함으로써 차량 규모를 보정하는 보정계수를 산출하였다. 이를 계산식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\beta_{vt} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{vt}} (ER_{Model, MOVES' vt, trace_{vt,i}}) / ER_{AV, vt, trace_{vt,i}}}{N_{vt}} \quad (4)$$

여기서, β_{vt} : 차량규모 보정계수, vt : 차종

MOVES' vt : vt 차종과 가장 근접한 MOVES의 차종

$trace_{vt,i}$: 차량 vt 의 i 번째 주행궤적

N_{vt} : vt 차종의 NIER trace 개수

$ER_{AV, vt, trace_{vt,i}}$: 차량 vt 의 해당 주행궤적 i 에서의 평균속도 기반의 배출계수(g/km)

$ER_{Model, MOVES' vt, trace_{vt,i}}$: 차량 vt 의 해당 주행궤적 i 에 대하여 개발모형으로 계산한 거리당 배출량(g/km)

Table 6에 나타난 바와 같이 휘발유 승용차의 경우 기준 차종 RC20/SC21의 휘발유 기본 미시 배출맵에 대한 보정계수로, 경형은 0.519, 소형은 0.650, 중형은 0.800, 대형은 0.882로 산정되었다. 경유 승용차의 경우 기준 차종 RC20/SC21의 경유 기본 미시 배출맵에 대한 보정계수로서 소형은 0.650, 중형은 0.636으로 산정되었다. 그 외의 차종에 대해서도 해당 기준 차종으로부터 추정된 미시 배출맵에 대한 보정계수를 Table 6에 나타내었다. 두 개의 기준 차종이 있는 중형 트럭은 차종 RC41/SC32으로부터 추정된 미시 배출맵에 대한 보정계수를 구하였고, 대형 트럭의 경우는 차종 RC46/

Table 7. Comparison of CO₂ emission rate (g/km) by vehicle types after calibrating

Passenger Car-Gasoline										Passenger Car-Diesel							
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Mini	Model _Mini	AV _Small	Model _Small	AV _Medium	Model _Medium	AV _Big	Model _Big	AV _Small	Model _Small	AV _Medium	Model _Medium				
n01	4.7	367	503.85	519.1	631.02	635.9	776.64	756.2	856.25	456.82	547.39	650.34	653.17				
n03	10.8	228.4	263.07	315.1	329.47	393.1	405.5	452	447.06	280.32	289.23	374.21	345.12				
n05	17.3	174.6	190.57	237.5	238.68	299.4	293.76	337.7	323.87	212.59	212.29	273.64	253.31				
n07	24.6	142.8	155.55	192.3	194.81	244.3	239.77	271.6	264.35	172.90	175.01	216.58	208.83				
n09	34.1	118.5	125.72	158.1	157.46	202.3	193.79	221.9	213.66	142.74	143.01	174.34	170.65				
n12	64.1	82.7	91.89	108.2	115.08	140.4	141.63	150.2	156.15	98.55	106.43	114.64	127.00				
n13	77.4	102.8	90.85	120.9	113.78	150.4	140.04	158.9	154.4	110.27	105.54	120.30	125.93				
n14	93.6	117.9	90.61	129.7	113.48	151.6	139.67	161.8	153.99	120.28	105.77	125.46	126.21				
n15	108.5	131.8	101.52	137.8	127.14	152.8	156.48	164.5	172.52	129.48	117.67	130.21	140.41				
R ² value		0.977		0.992		0.989		0.991		0.991		0.994					
Bus-Diesel																	
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model _Small	MDB Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Medium	Model _Medium	UB Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Local	Model _Local	AV _Intercity	Model _Intercity				
n01	4.7	766.89	830.68	n01	4.6	933.21	1364.24	n01	4.6	2104.48	1964.27	1606.84	1961.09				
n03	10.8	467.81	450.34	n02	7.4	756.74	961.49	n02	7.7	1611.66	1431.37	1352.56	1429.05				
n05	17.3	353.59	338.50	n03	11.3	627.90	704.66	n03	10.6	1365.78	1235.96	1215.45	1232.31				
n07	24.6	286.86	283.11	n05	16.6	529.96	539.04	n04	14.1	1178.17	1113.47	1104.84	1111.66				
n09	34.1	236.27	230.07	n06	20.2	486.03	471.97	n05	16.3	1092.94	1028.56	1052.55	1024.71				
n12	64.1	162.39	177.79	n07	23.6	453.81	454.62	n06	19.9	985.62	973.63	984.61	971.39				
n13	77.4	175.93	180.24	n08	28.1	420.20	409.62	n07	24.2	890.65	929.45	922.26	921.81				
n14	93.6	193.19	186.68	n09	35.3	379.99	359.13	n08	27.8	828.93	853.75	880.46	851.65				
n15	108.5	209.08	204.66	n10	44.5	343.11	310.10	n09	32.3	766.96	813.42	837.38	806.63				
				n11	54.5	313.77	283.74	n10	37.8	706.97	762.88	794.49	755.05				
				n12	65.9	323.71	294.42	n11	42.7	663.73	726.13	762.75	715.57				
				n13	78.6	326.45	287.67	n12	47.3	631.55	738.86	737.10	726.48				
				n14	91.6	329.26	302.38										
				n15	105.3	332.23	323.95										
R ² value		0.992		R ² value		0.979		R ² value		0.988		0.974					
RV-Diesel						Truck-Diesel											
LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model _Small	AV _Medium	Model _Medium	LDV Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Small	Model _Small	MDT Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Medium	Model _Medium	HDT Trace ID	Ave. Speed (kph)	AV _Big	Model _Big
n01	4.7	766.89	898.62	924.40	1305.56	n01	4.7	551.24	811.18	n01	4.7	730.97	1312.82	n01	4.6	3478.85	4143.22
n03	10.8	467.81	474.81	640.55	708.35	n03	10.8	373.83	440.12	n02	7.6	691.32	900.82	n02	7.2	2930.44	3210.6
n05	17.3	353.59	348.5	520.40	532.52	n05	17.3	300.02	330.87	n03	10.4	654.68	709.96	n03	10.6	2527.06	2746.06
n07	24.6	286.86	287.3	445.58	445.40	n07	24.6	254.56	276.74	n05	13.4	617.22	592.66	n04	14	2271.71	2268.03
n09	34.1	236.27	234.77	385.83	361.94	n09	34.1	218.57	224.88	n06	19.7	544.58	463.85	n05	17.2	2099.53	2053.5
n12	64.1	162.39	174.72	292.11	279.66	n12	64.1	162.79	173.76	n07	23.5	504.71	441.29	n06	19.8	1989.36	1929.94
n13	77.4	175.93	173.25	326.19	283.89	n13	77.4	198.42	176.39	n08	28	461.34	394.89	n07	24.2	1842.22	1779.89
n14	93.6	193.19	174.64	329.70	294.43	n14	93.6	234.55	182.94	n09	35	402.16	328.56	n08	27.8	1746.95	1675.16
n15	108.5	209.08	193.17	332.92	323.12	n15	108.5	267.79	200.76	n10	45	335.11	273.55	n09	34.4	1610.12	1606.3
										n11	55.2	287.92	279.82	n10	45	1452.75	1403.33
										n12	63.4	265.51	272.54	n11	55.2	1343.44	1208.26
										n13	78.1	259.97	275.72	n12	63.4	1274.05	1158.16
										n14	91.2	292.51	294.86	n13	77.8	1178.01	1059.58
										n15	104.3	360.37	316.48	n14	91.9	1105.23	1121.02
														n15	103.8	1054.88	1246.81
R ² value		0.991		0.979		R ² value		0.950		R ² value		0.776		R ² value		0.974	

SC52으로부터 추정된 미시 배출맵에 대한 보정계수를 산출하였다.

이렇게 산출된 보정계수는 차종별 기본 미시배출맵에 적용하여 배출맵을 보정한 후, 각 차종에 대하여 평균속도별 주행 궤적에 대하여 개발 모형으로 거리당 배출량을 다시 계산한 후 평균속도기반의 배출계수와 다시 비교하였다. Table 7에서 평균속도 기반의 모형의 배출계수는 “AV_차종”으로 나타내었으며, 보정한 미시배출맵을 적용하여 개발모형으로 계산정한 거리당 배출량은 “Model_차종”으로 구분하여 나타내었다. R^2 을 계산하여 부합 여부를 분석한 결과 Table 7에 나타낸 바와 같이 경형 휘발유 승용차는 0.977, 소형 휘발유 자동차는 0.992, 중형 휘발유 자동차는 0.989, 대형 휘발유 자동차는 0.991, 소형 경유 승용차는 0.991, 중형 경유 자동차는 0.994 등 거의 대부분의 차종들에서 R^2 가 1에 가까운 값을 보여 차량 규모에 대한 보정이 잘 되는 것을 볼 수 있었다. 그러나 유일하게 중형 트럭의 경우 R^2 값이 0.776로 낮은 수치를 보였는데, 이는 Figure 4에서 보는 바와 같이 평균속도가 저속일 때만 큰 편차를 보이기 때문에 다른 속도 지점에서는 오히려 보정전보다 보정후가 좋지 않은 결과를 보이므로 중형트럭의 경우 보정전 그대로의 MOVES 미시배출맵을 사용하는 편이 나을 것으로 보인다.

IV. 결론

국내에서도 교통운영 전략의 평가 등의 연구에 미시기반의 배출량 산정 방법을 도입할 필요성을 인식하고 있으나 가까운 시일 내에 국내에서 개발한 미시기반 배출계수를 사용하기는 어렵다. 또한, 국가 간의 활발한 차량 수출입으로 인해 차종과 차량에 대한 대기오염 배출규제도 점점 유사해지고 있기 때문에 외국의 기 개발된 배출계수를 국내에 적용하는 것이 가능하다고 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 국외에서 개발된 미시기반의 배출량 산정방법론 중에서 국내에 적용하기에 가장 적합한 모형으로 MOVES를 선정하여 국내 적용이 가능한 미시기반 배출량 산정 모형을 개발하고 기존 평균속도기반의 모형과 비교하여 적용가능성에 대한 타당성 평가를 수행하였다.

본 연구는 MOVES의 강점인 미시기반 배출량 산정 개념을 도입하고, MOVES의 미시기반 기본 배출맵으로부터 국내 차종에 부합하는 미시기반 배출맵을 추정하여

사용함으로써 국내 최초로 MOVES를 실질적으로 국내에 적용하는 방법론을 개발한 연구이다. 기존 우리나라 배출계수 산정 체계와 연계시켜 개발 모형의 타당성을 평가한 결과, MOVES로부터 추정된 미시기반의 배출맵을 국내에 적용하는 것이 가능하다는 결론을 내렸다. 다만, 양국의 대표 차량의 크기 차이를 보정해야 할 필요성을 발견하여, 차종별로 미시 배출맵 보정계수를 추정하고 적용함으로써 개발 모형의 신뢰도를 향상시켰다.

향후 연구 항목으로는 본 연구에서 다루지 못한 주변 기후, 에어컨 사용 등에 따른 배출량 보정 방법 개발이 있다. 또한, 버스, 화물트럭과 같은 대형차량의 경우 국내는 물론 MOVES에서도 배출계수를 충분히 확보하지 못한 상황이므로, 향후, 주행 실험을 통한 실측 자료를 확보하여 배출맵의 완성도를 높여야 할 것으로 보인다.

본 연구에서 개발한 모형은 실제 네트워크에서 교통운영 정책 등의 평가에 적용되어 정책 결정에 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 본 연구의 개발 방법론은 향후 이산화탄소 외의 다른 대기 오염물질에 대한 미시 배출량 산정 모형 개발에 적용할 수 있을 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant (11 High-tech Urban G06) from High-tech Urban Development Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

REFERENCES

- Barth M., An F., Younglove T., Scora G., Levine C., Ross M., Wenzel T. (2001), Comprehensive Modal Emissions Model (CMEM) User's Guide, University of California Riverside Center for Environmental Research and Technology.
- Boulter P. G., McCrae I. S., Barlow T. J. (2006), A Review of Instantaneous Emission Models for Road Vehicles, TRL Unpublished Report UPR/IE/030/06, TRL Limited.
- Claggett M. (2011), OpMode Distribution Table for Linking Output with MOVES and Microsimulation Models, TRB 90th Annual Meeting.

- Department of the Environment, Transport, and the Regions (1999), Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), 11(3), Part 1-Air Quality.
- IPCC (2006), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Jost P., Hassel D., Webber F. J., Sonnborn K. S. (1992), Emission and Fuel Consumption Modelling Based on Continuous Measurements, Deliverable 7, DRIVE Project V1053, TUV Rhineland, Cologne.
- Joumard R., Jost P., Hickman J. (1995), Influence of Instantaneous Speed and Acceleration on Hot Passenger Car Emissions and Fuel Consumption, SAE Paper 950928, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania.
- Kim W. C., Kim J. T. (2012), Carbon Reduction Effect of Traffic Operational Methods Itemized in National Project for Advanced Traffic Operation and Management, Korean Society of Civil Engineers, 32(1D), 1-12.
- Kim Y. H., Hong S. J., Lee T. W., Park J. H. (2012), Improvement of the Emission Model Based on Average Speeds in the Transportation Sector, J. Korean Soc. Transp., 30(2), Korean Society of Transportation, 117-126.
- Ko M. H. (2011), Incorporating Vehicle Emission Models Into the Highway Design Process, Doctoral Dissertation, Texas A&M University.
- Lee G., You S., Ritchie S.G., Saphores J.-D., Sangkapicahi M., Jayakrishnan R., (2009), Environmental Impacts of a Major Freight Corridor, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2123, 119-128.
- Lee T. W., Keel J. H., Park J. H., Park Y. H., Hong J. H., Lee D. Y. (2011), Speed-Based Emission Factor Regarding Vehicle Specific Power and Acceleration During On-road Driving, Transactions of KSAE, 19(1), 73-81.
- Li X., Yang X., Wang W., Deng X. (2006), Motor Vehicles Exhaust Emission Factors for Urban Transportation Planning, Journal of Traffic and Transportation Engineering, 33(4), 87-91.
- Lin J., Chiu Y., Bai S., Vallamsundar S. (2011), Integration of MOVES and Dynamic Traffic Assignment Models for Fine-Grained Transportation and Air Quality Analysis, TRB 90th Annual Meeting Workshop #137.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), Survey Report for Transport Greenhouse Gas Emissions in 2011.
- MIRA (2002), VeTESS Simulation Procedure.
- NIER(National Institute of Environmental Research) (2009), Establishment of Climate Change Responding System for Transportation Sector(II) - Development of Bottom-up Type GHGs Emission Factor for Vehicles.
- NIER(National Institute of Environmental Research) (2012), Analysis of On-road Air Pollutants Emissions From Light Duty Diesel Vehicles.
- Park J. H., Kim W. H., Nam D. H., Lee Y. I. (2007), A Study on the Strategy and the Evaluation of Traffic Operation Considering the Environmental Justice in Emission, J. Korean Soc. Transp., 25(3), Korean Society of Transportation, 7-17.
- Pelkmans L., Debal P., Hood T., Hauser G., Delgado M. R. (2004), Development of a Simulation Tool to Calculate Fuel Consumption and Emissions of Vehicles Operating in Dynamic Conditions, SAE Paper 2004-01-1873, Society of Automotive Engineers.
- Potoglou, D., Kanatoglou P. S. (2005), Carbon Monoxide Emission From Passenger Vehicles: Predictive Mapping With an Application to Hamilton Canada, Transportation Research Part D, 10, 97-109.
- Rexeis M., Hausberger S., Riemersma I., Tartakovsky L., Zvirin Y., Erwin C. (2005), Heavy-duty Vehicle Emissions, Final Report of WP400 in ARTEMIS (Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems), University of Technology, Graz.
- Seo I. K., Lee B. J., Wang W. J., Namgung M. (2007), Feasibility Analysis of Traffic Policy Alternatives for the Depreciation Effect Analysis of Automotive Exhaust Gas Using Microscopic Simulation, J. Korean Soc. Transp., 25(6), Korean Society of Transportation, 89-97.

US EPA (2010), MOVES2010 Highway Vehicle-Population and Activity Data, 71.

Xie S., Song X., Shen X. (2006), Calculating Vehicular Emission Factors With COPERT Model in China, Environmental Science, 27(3), 415-419.

♣ 주 작성자 : 허혜정

♣ 교신저자 : 윤천주

♣ 논문투고일 : 2013. 9. 12

♣ 논문심사일 : 2013. 10. 24 (1차)

2013. 11. 13 (2차)

♣ 심사판정일 : 2013. 11. 13

♣ 반론접수기한 : 2014. 4. 30

♣ 3인 익명 심사필

♣ 1인 abstract 교정필