

# 한국형 운행 모드 기반 배출량 산정 모형 개발에 관한 연구

허혜정<sup>1\*</sup> · Christopher Frey<sup>2</sup> · 윤천주<sup>1</sup> · 양충현<sup>1,3</sup> · 김진국<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 도로연구소, <sup>2</sup>NCSU 토목공학과, <sup>3</sup>과학기술연합대학원대학교 교통물류 및 ITS공학과

## A Study for Developing an Operating Mode-Based Emission Model for Korea

HU, Hyejung<sup>1\*</sup> · FREY, Christopher<sup>2</sup> · YOON, Chunjoo<sup>1</sup> · YANG, Choongheon<sup>1,3</sup> · KIM, Jinkook<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Highway Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi 10223, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh 27606, USA

<sup>3</sup>Logistics System & ITS Engineering, University of Science & Technology, Daejeon 34113, Korea

\*Corresponding author: hhu@kict.re.kr

### Abstract

Atmospheric pollutants such as Nitrogen Oxides(NOx), Carbon Monoxide(CO), Carbon Dioxide(CO<sub>2</sub>), Particulate Matter(PM) and Hydrocarbons(HC) come from vehicle exhaust gases. Emission curves based on average travel speeds have been employed for estimating on-road emissions as well as evaluating environmental impacts of transportation plans and policies in Korea. Recently, there is a growing interest in estimation methods of vehicle emissions considering relationship between vehicle dynamic driving characteristics and emissions, and incorporating such emission estimators into traffic simulation models. MOVES Lite, a simplified version of MOVES, is one of the estimation methods. In this study, the authors performed a study to develop an adaptable version of MOVES Lite for Korea, called MOVES Lite-K. Vehicle types, driving characteristics, emission rates, and emission standards of Korea were reflected in MOVES Lite-K. The characteristics of emission calculation of MOVES Lite-K and NIER emission curves were compared and the adaptability of MOVES Lite-K were examined.

**Keywords:** air pollutions, CO<sub>2</sub>, MOVES lite, operating mode based emission estimation model, vehicle trajectory

### 초록

차량의 배기가스에는 질소산화물(NOx), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 입자상 물질(PM), 탄화수소(HC)와 같은 대기 오염물질이 포함되어 있다. 이러한 도로이동오염원의 배출량을 산정하기 위하여 한국에서는 평균속도 기반의 배출계수 곡선식을 사용하고 있으며 교통 계획과 교통 정책의 대안 평가에서 환경적 영향을 분석할 때 활용하고 있다. 그러나 최근에는 차량의 동적 운행 특성과 배출량의 관계를 보다 정확하게 반영하여 배출량을 산정할 수 있는 방법론과 이 방법론을 교통 시뮬레이션 모형에 통합하는 것에 대한 관심이 증가하고 있다. MOVES Lite는 MOVES의 간략 버전으로서 교통 시뮬레이션 모형에 통합될 수 있도록 개발된 운행모드 기반 배출량 산정모형이다. 본 연구에서는 한국의 차종, 주행특성, 배출계수, 배출규

제등을 반영하여 MOVES Lite를 개량한 MOVES Lite-K를 개발하기 위한 연구를 수행하였고, 국내의 대표적 배출량 산정 방법인 평균속도 기반의 배출계수 곡선식과 MOVES Lite-K의 배출량 산정 특성을 비교하여 두 방법론의 차이와 국내 적용성을 살펴보았다.

**주요어:** 대기오염물질, CO<sub>2</sub>, MOVES Lite, 운행모드 기반 배출량 산정 모형, 주행궤적

## 서론

차량의 배기가스에서는 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 입자상 물질(PM), 탄화수소(HC)와 같은 대기 오염물질이 배출된다. 이러한 도로이동오염원의 배출량을 산정하기 위하여 한국에서는 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, 이하 NIER)의 차종별 배출계수(NIER 2010, 2011)를 사용한다. 배출계수가 평균 주행 속도와 배출량의 관계를 나타낸 함수식으로 표현되어 있어 배출계수 곡선식 또는 평균속도 기반 배출량 산정 모형이라고도 불리며 도로 계획과 교통 정책의 대안 평가 시 배출량의 변화를 추정할 때 사용된다.

국외에서는 보다 정확한 배출량 산정을 위하여 차량의 동적 운행 특성과 배출량의 관계를 고려하는 배출량 산정 모형을 사용하고 있다. 미국에서 사용하고 있는 MOVES(Motor Vehicle Emission Simulator, U.S.EPA, 2010)가 대표적인 예이다. 이 모형은 차량의 초 단위 속도와 가속도, 차량 중량, 도로의 경사도에 따라 변화하는 차량의 출력을 나타내는 변수인 차량비출력(Vehicle Specific Power, VSP)에 따라 배출량을 산정하는 방법을 사용한다. 차량속도와 VSP값으로 구분되는 운행모드에 따른 배출계수를 사용하기 때문에 운행모드 기반 배출량 산정 모형이라고 한다. 오랜 기간에 걸친 다수의 실험과 연구 결과에 근간을 두고 배출량 산정 방법론을 개발하였고 관련 데이터베이스가 상세하게 구축되어 있다는 것과 공개 소프트웨어라는 점에서 미국 외의 다른 국가에서도 활용하기에 좋은 조건을 갖추었다.

실제로 중국과 홍콩 등에서 MOVES를 활용하는 연구가 다수 진행되었으며, 한국에서도 MOVES 관련 연구가 수행되었다. Lee et al.(2011), Lee et al.(2012), Lee et al.(2014), Park et al.(2013)은 실제 도로 주행 조건에 따른 국내 차량의 배출량을 측정하는 실험 등에서 MOVES의 VSP 개념을 도입하였다. Hu et al.(2013)의 연구에서는 MOVES의 방법론과 배출계수 관련 데이터베이스를 활용하여 한국의 차량 특성과 주행조건을 반영한 운행모드 기반 배출량 산정 방법론을 제안하기도 하였다.

한편, Frey와 Liu(2013)는 MOVES의 간략 버전인 MOVES Lite를 개발하였다. 계산 절차가 많고 데이터 집약적인 MOVES를 교통 시뮬레이션 모형에 직접 통합할 수 없기 때문에 필수적인 요소만으로 간략화하여 개발한 프로그램이다. Rouphail과 Frey(2014)는 Mesoscopic 교통 시뮬레이션 모형인 DTALite(2014)에 MOVES Lite를 탑재하는 연구를 수행하였고 교통 운영 전략에 따른 효과를 교통 시뮬레이션 모형으로 예측하는 과정에서 배출량의 변화도 함께 산정할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 한국의 교통 운영 및 정책 분석 과정에서 차량 배기가스 배출량을 운행모드 기반으로 보다 편리하고 정확하게 산정할 수 있도록 교통 시뮬레이션 모형과 통합하여 사용될 수 있는 배출량 산정 방법론을 개발하는 것을 목적으로 하였다. 이에 따라, MOVES Lite의 한국형인 MOVES Lite-K를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 이 논문에는 MOVES Lite의 개발 개념에 대한 고찰과 한국의 차종, 주행특성, 배출계수, 배출규제 등을 MOVES Lite에 반영하여 수정되는 절차가 설명되어 있고, 이러한 과정을 거쳐 수정된 배출량 산정 방법론인 MOVES Lite-K와 NIER 배출계수 곡선식의 배출량 산정 특성을 비교한 결과가 제시되어 있다.

## 방법론

### 1. MOVES Lite의 개발 배경

MOVES는 주행궤적(Driving Cycle)에 따른 배출량을 산출한다. 주행궤적이란 초 단위 차량 속도를 의미한다. 개별 차량의 주행궤적을 입력하여 배출량을 산정하는 기능을 갖추고 있지만, 교통시뮬레이션 모형의 결과를 활용하여 네트워크 전체의 배출량을 분석하는 경우에는 사용되지 않는다. 차량 수만큼 MOVES를 실행해야 되는데 차량수가 많고 네트워크가 클 경우 현실적으로 불가능하기 때문이다. 그러나 MOVES의 배출량 산정 모듈을 교통시뮬레이션 모형과 통합하면 네트워크 전체의 배출량을 분석하는 경우에도 개별차량의 주행궤적을 고려하여 배출량을 산정할 수 있게 되므로 통합이 가능하게 하는 간략한 모형인 MOVES Lite를 개발하게 되었다.

MOVES는 교통상황, 차종, 차량 정기 검사제도, 연료의 특성, 기후 조건 등 다양한 조건을 고려하여 배출량을 평가할 수 있도록 만들어져 있기 때문에 정확한 배출량 분석 시 매우 유용하지만, 수많은 종류의 입력 자료를 준비해야 하고 분석 시간도 오래 걸린다. 그러나 일반적으로 교통시뮬레이션 모형은 몇 시간 정도의 짧은 시간 동안의 교통 상황을 평가하기 위해 사용되므로 MOVES에서 고려하는 다양한 요소의 대부분은 고정변수로 두고 분석하여도 무방하다. 따라서, MOVES Lite는 차량의 주행 특성을 고려하여 배출량을 산정하는 모듈을 중심으로 개발되었고 다른 특성을 고려하는 요소들은 간략화 되었다. MOVES Lite와 통합된 교통시뮬레이션 모형을 사용하게 되면 MOVES 프로그램을 거치지 않고 배출량을 산정하기 때문에 시뮬레이션 결과 입력과 분석에 필요한 시간을 크게 감소시킬 수 있다는 이점도 있다.

### 2. MOVES Lite의 개발 개념

Figure 1은 MOVES Lite의 배출량 산정 개념도이다. 차량 한 대가 한 도로구간을 주행한 주행궤적(Any Driving Cycle)에 대한 평균 배출율( $CE_{p,c}$ , g/km)을 산정하는 절차이다. 평균 배출율에 총 주행거리(km)를 곱하면 해당 차량의 배출량(g)이 계산된다.

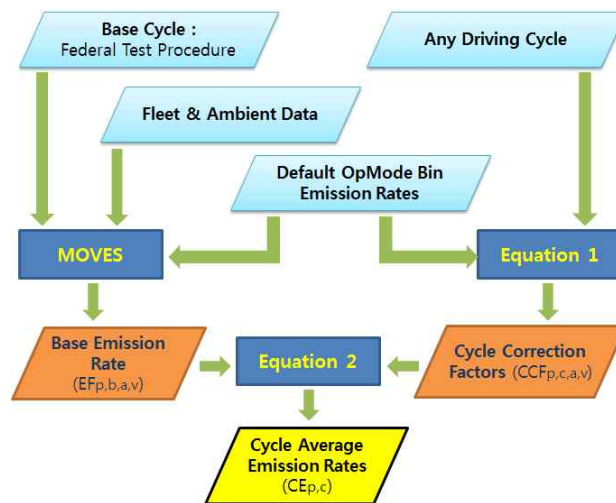


Figure 1. Procedures for estimating emissions in MOVES Lite (source: Roupail and Frey, 2014)

#### 1) 대분류 차종과 세부 차종(Fleet vs. Vehicle)

대분류 차종이란 승용차, 버스, 트럭으로 구분되는 교통 시뮬레이션 모형에 입력되는 교통 수요의 차종으로 볼 수 있다. 세부 차종은 차종별 배출 특성의 차이를 반영하기 위해 구분된 차종으로서 연료, 크기, 연식에 따

라 세분화되어 있다. MOVES의 운행모드 기반 배출계수표는 세부 차종에 대하여 작성되어 있다.

교통 시뮬레이션 모형에서 추정되는 차량 주행궤적은 대분류 차종의 주행궤적이므로, 해당 차량의 배출량을 산정하기 위해서는 해당 차량이 속한 대분류 차종에 속하는 세부 차종의 비율과 세부 차종별 운행모드 기반 배출계수를 고려하여 해당 주행궤적의 평균 배출량을 산정하게 된다.

### 2) 기준 배출율(EF, Base Emission Rate)

분석 대상 시간 동안 큰 변화가 없는 고정변수인 차량 정기 검사제도, 연료의 특성, 기후 조건 등의 영향이 반영된 배출율을 기준 배출율( $EF_{p,b,a,v}$  g/km)이라고 하였다. 주행궤적 배출율( $CE_{p,c}$  g/km)을 산정할 때 기준 배출율을 기준으로 하고 주행특성을 반영하여 배출율을 보정함으로써 고정변수의 영향이 반영되도록 하였다.

대상지가 미국의 도시인 경우, 미국 주행 조건을 대표하는 Federal Test Procedure-75(FTP-75)를 기준 주행궤적(Base Cycle)으로 삼아 MOVES 프로그램을 실행하여 기준 배출율 값을 구한다. 대분류의 차종을 구성하는 모든 세부 차종에 대하여 기준 배출율을 산정하여 MOVES Lite의 배출량 산정 기초 자료로 구축한다.

### 3) 주행궤적 보정계수(CCF, Cycle Correction Factor)

주행궤적 보정계수는 차량 주행 상태에 따른 배출 특성을 반영하기 위한 계수이다. 해당 주행궤적의 배출 특성과 기준 주행궤적의 배출 특성을 운행모드 기반으로 비교하여 나타낸 값으로서, Equation 1(Rouphail and Frey, 2014)에 따라 산출한다.

$$CCF_{p,c,a,v} = \left( \frac{\sum_m f_{m,c} \times ER_{p,a,v,m}}{\sum_m f_{m,b} \times ER_{p,a,v,m}} \right) \left( \frac{V_b}{V_c} \right) \quad (1)$$

여기서,  $CCF_{p,c,a,v}$  : 주행궤적 보정계수(오염물질 p, 주행궤적 c, 차령 a, 세부차종 v인 경우)  
 $ER_{p,a,v,m}$  : 운행모드 기반 배출계수(오염물질 p, 차령 a, 세부차종 v, 운행모드 m인 경우), g/hr  
 $f_{m,c}$  : 주행궤적 c에서 운행모드 m인 시간의 점유율  
 $f_{m,b}$  : 기준 주행궤적 b에서 운행모드 m인 시간의 점유율  
 $V_c$  : 주행궤적 c의 평균주행 속도, kph  
 $V_b$  : 주행궤적 b의 평균주행 속도, kph

### 4) 주행궤적 평균 배출율(CE, Cycle Average Emission Rates)

차종분포 특성이 반영되도록 Equation 2(Rouphail and Frey, 2014)에 따라 세부차종의 비율을 반영하여 주행궤적 평균 배출율을 산정한다.

$$CE_{p,c} = \sum_v \left\{ \left[ \sum_a (EF_{p,b,a,v} \times CCF_{p,c,a,v} \times f_{a,v}) \right] \times f_v \right\} \quad (2)$$

여기서,  $CE_{p,c}$  : 주행궤적 평균 배출율(오염물질 p, 주행궤적 c 인 경우), g/km  
 $EF_{p,b,a,v}$  : 기준 배출율(오염물질 p, 주행궤적 c, 차령 a, 세부차종 v인 경우), g/km  
 $f_{a,v}$  : 세부차종 v 중 차령이 a인 비율  
 $f_v$  : 해당 차종에서 세부차종 v의 비율

주행궤적 평균 배출율은 길이에 따른 배출계수이므로 해당 차량의 배출량은 주행궤적 평균 배출율에 주행거리를 곱하여 산정한다. 해당 도로의 총 배출량은 분석 시간 동안 통과한 개별차량의 주행궤적의 배출량을 산정한 후 합산하여 구할 수 있으므로 Equation 3과 같이 표현하였다.

$$E_p = \sum_c (CE_{p,c} \times l) \quad (3)$$

여기서,  $E_p$  : 도로의 총 배출량, g  
 $l$  : 주행거리, km

### 3. MOVES Lite의 국내 적용 방법론

MOVES Lite를 한국에 적용할 경우 고려해야 하는 세 가지 문제점과 해결 방안은 다음과 같다. 첫 번째, 기존 주행궤적으로 사용한 FTP-75는 미국의 주행궤적이므로 이를 대체하여 한국의 주행 조건을 대표할 수 있는 주행궤적인 국립환경과학원에서 사용하고 있는 NIER 주행모드에서 선택하여 사용하였다. 두 번째, MOVES Lite에서는 MOVES를 활용하여 기존 주행궤적의 배출량을 산정하기 때문에 미국 차량의 배출 특성을 반영한 배출계수를 이용하여 기존 배출율을 산정하였지만, 국내 차량의 배출 특성을 반영한 기존 배출율을 산정하기 위하여 국내의 배출계수를 적용하여 기존 주행궤적의 배출량을 산정하여 사용하였다. 마지막 세 번째는 MOVES의 운행모드 기반 배출계수를 활용할 때 생기는 문제로서, 한국과 미국의 세부 차종 분류와 배출규제 특성 등을 고려하여 가장 유사한 차종의 배출계수를 찾아 사용함으로써 문제를 해결하였다.

Figure 2는 MOVES Lite의 배출량 산정 개념을 한국에 적용하기 위해 필요한 절차를 나타낸 그림으로서 Figure 1의 MOVES Lite 산정 절차에 위의 제시한 세 가지 해결방안을 반영한 그림이다.

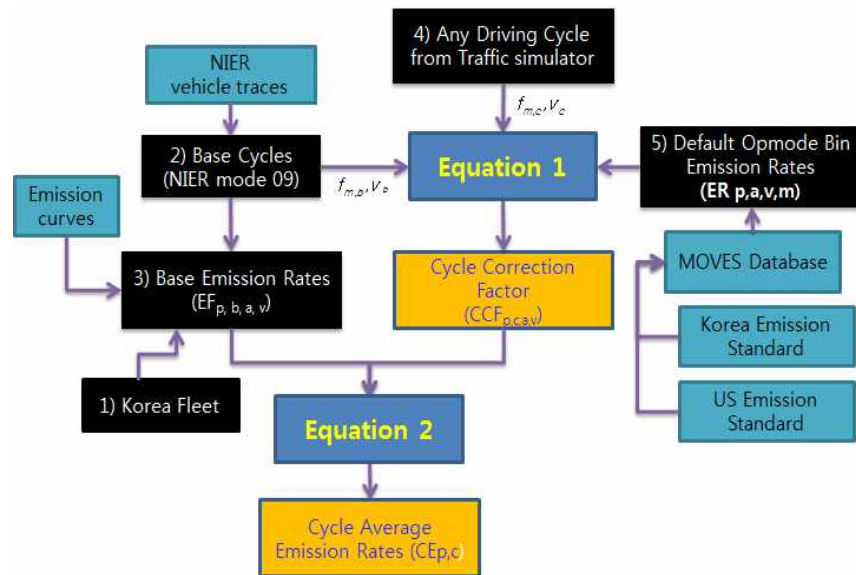


Figure 2. Procedures for estimating emissions in MOVES Lite-K

#### 1) 차종 구분(Korea Fleet)

MOVES 운행모드 기반 배출계수에서 사용하는 차종과 NIER 배출계수식의 차종의 CO<sub>2</sub> 배출량과 차량 중량을 비교하여 세부차종을 선택하였다. CO<sub>2</sub> 배출량은 연료 사용량에 비례하는 값으로 차량의 크기를 구분하는 가장 적당한 지표이다. 최종적으로 선택한 한국의 11개 차종과 미국의 6개 차종을 매핑한 결과를 Table 1에 나타내었다. 미국의 6개 세부 차종의 운행모드 기반 배출계수는 해당되는 한국 차량의 CCF를 구할 때 사용된다.

승용차에 대응하는 미국의 차량 분류는 한 가지 뿐이므로 미국 승용차 휘발유 차량의 운행모드 기반 배출계수는 한국의 세 가지 가솔린 승용차 차량과 매칭하고 미국의 경유 승용차의 배출계수는 한국의 세 가지 경유 승용차와 매칭하였다. 미국의 경유 대중교통 버스는 CO<sub>2</sub> 배출량 측면에서 한국의 경유 대중교통 버스와 유사하며, 미국과 한국의 차량의 크기가 비슷하므로 두 차량을 매칭하였다. 미국의 소형 트럭(passenger truck)은 한국의 소형 경유 트럭보다는 약간 크고 한국의 중형 트럭보다는 작아 한국의 소형 경유 트럭과 중형 경유 트럭의 CCF를 구할 때 적용되었다. 미국의 경유 “single unit long haul truck” 은 CO<sub>2</sub> 배출량 면에서 한국의 “대형 트럭”과 가장 유사하므로 대형 트럭과 매칭하였다.

**Table 1. Vehicle types for MOVES Lite-K**

Fuel Type	Korea Vehicle Type			US Vehicle Type		
	Korean Vehicle Type	CO <sub>2</sub> Emission Rate (g/km)	Weight	US Vehicle Type	CO <sub>2</sub> Emission Rate (g/km)	Weight (kgs)
Gasoline	PC-mini	118,537	<1000 cc	Passenger car	200	-
Gasoline	PC-small	158,068	1000-1600 cc			
Gasoline	PC-medium and large	208,842	>1600 cc			
Diesel	PC-mini	118,537	<1000 cc	Passenger car	200	-
Diesel	PC-small	142,739	1000-1600 cc			
Diesel	PC-medium and large	174,345	>1600 cc			
Diesel	Bus-large	766,957	-	Transit bus	820	8815
CNG	Bus-large	721,522	-	Transit bus	700	8815
Diesel	Truck-small	218,566	<1 ton loading	Passenger truck	260	5100-7500
Diesel	Truck-medium	423,789	1-5 ton loading			
Diesel	Truck-large	1610,116	>5 ton loading			
				Single unit long haul truck	1430	>16500

**2) 기본 주행 궤적(Base Cycle) 선택**

미국의 기본 주행궤적인 FTP-75의 평균 속도는 34.1 km/h이며 다양한 감속 특성을 포함하는 주행궤적이다. 이에 대응하는 한국의 기본 주행궤적은 NIER 주행궤적에서 선택하였다. NIER 주행궤적은 한국의 주행패턴을 반영하여 차종별 속도별 배출율을 산정하기 위하여 국립환경과학원에서 개발한 주행 모드이다. 승용차와 소형 트럭은 LDV(Light duty vehicle), 버스는 UB(Urban bus), 중형 트럭은 MDT(Medium duty truck), 대형 트럭은 HDT(Heavy duty truck)로 구분되어 있고 차종별로 저속부터 고속까지 평균속도에 따라 최대 15개의 주행궤적이 있다. 이 중 기준 주행궤적(Base Cycle)으로 NIER 09번을 선택하였다. 각 차종의 NIER 09번 주행궤적은 34km/h 근처의 유사한 평균 속도 값을 가지며, 다양한 주행상황을 포함하고 있기 때문에 기준 주행궤적으로 적합하다고 판단하였다.

**3) 기본 배출계수(Base Emission Rate) 산정**

대표 차종으로 선택된 11개 세부차종의 오염물질별 기본 배출율(g/km)은 Table 2에 나타나 있다. 세부 차종별로 NIER 오염물질별 차종별 배출율 곡선계수식(NIER 2009, 2010)을 이용하여 해당 차종의 기준 주행궤적인 NIER 09모드의 평균속도에 해당하는 배출율을 구한 값이다.

**Table 2. Base emission rate by vehicle type**

Fuel Type	Korean Vehicle Type	US Vehicle Type	Base Cycle	Avg. Speed (km/h)	Cycle Emission Rate (g/km)			
					CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
Gasoline	PC-mini	Passenger car	LDV NIER 09	34.1	118,537	0.127	0.027	0
Gasoline	PC-small	Passenger car			158,068	0.385	0.061	0
Gasoline	PC-medium and large	Passenger car			208,842	0.289	0.04	0
Diesel	PC-mini	Passenger car	LDV NIER 09	34.1	118,537	0.206	0.741	0.064
Diesel	PC-small	Passenger car			142,739	0.206	0.741	0.064
Diesel	PC-medium and large	Passenger car			174,345	0.206	0.741	0.064
Diesel	Bus-large	Transit bus	UB NIER 09	32.3	766,957	2.839	10.94	0.217
CNG	Bus-large	Transit bus			721,522	4.925	5.715	0
Diesel	Truck-small	Passenger truck	LDV NIER 09	34.1	218,566	0.143	0.211	0.027
Diesel	Truck-medium	Passenger truck	MDT NIER 09	35	423,789	1.080	2.999	0.072
Diesel	Truck-large	Single unit long haul truck	HDT NIER 09	34.4	1610,116	2.471	14.41	0.309

**4) 주행궤적(Any Driving Cycle) 추출 및 운행모드 비율( $f_{m,c}$ ) 산정**

개별차량의 주행궤적인 초단위 속도자료를 이용하여 Equation 4에 따라 차량의 초 단위 차량비출력(VSP,  $P_{v,t}$ )을 산정한다. 차종에 따른 A, B, C, m의 값은 MOVES의 값(US EPA, 2010)을 사용하였다.

$$P_{V,t} = \frac{Av_t + Bv_t^2 + Cv_t^3 + mv_t(a_t + g\sin\theta_t)}{m} \tag{4}$$

여기서,  $P_{V,t}$ : 차량 V, t초일 때의 VSP(kW/tonne)  
 $v_t$ : 속도(m/sec)  
 $a_t$ : 가속도(m/sec<sup>2</sup>)  
 $m$ : 차량 기준 중량(tonne)  
 $A$ : 구름 저항(KW-sec/m)  
 $B$ : 회전 저항(KW-sec<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)  
 $C$ : 공기 저항 (KW-sec<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)  
 $g$ : 중력가속도(9.81m/s<sup>2</sup>)  
 $\theta_t$ : 도로의 경사(degree)

산정된 VSP와 속도에 따라 해당되는 MOVES의 운행모드(US EPA, 2010)를 초 단위로 찾은 다음 주행궤적의 전체 주행시간 중 각각의 운행모드에 해당하는 비율( $f_{m,v}$ )을 산출한다.

### 5) 국내차량 기준에 맞는 운행모드 기반 배출계수 표 선택

배출규제가 변화한 시점에 따라 배출계수가 달라지기 때문에 MOVES의 운행모드 기반 배출계수는 차종별 뿐만 아니라 연식별로도 구분되어 있다. 따라서 한국의 차량에 적용할 운행모드 기반 배출계수 표를 MOVES에서 선택하기 위하여 미국차량의 배출규제와 한국차량의 배출규제를 비교하여 비슷한 특성을 보이는 차량 연식을 선택하고자 하였다.

배출규제와 관련하여 미국은 FTP-75를 사용하고 한국은 환경부가 고시한 다양한 인증 주행궤적을 사용하고 있다. 두 국가의 인증 절차가 다르기 때문에 직접적인 비교는 어렵지만 이러한 차이에도 불구하고 두 국가 간 배출량 기준은 대부분의 오염원에 대해서 전체적으로 유사한 것으로 나타났다(Table 3 참조). 소형 및 중형 차량(가솔린)에 대한 최신 배출량 기준을 미국 차량의 배출량 기준과 비교하여 나타낸 Table 3을 보면 CO의 기준은 두 국가 간에 상당히 비슷하며, NOx(질소산화물) 기준도 마찬가지로 비슷하다. THC(탄화수소)에 대한 한국 기준은 미국 기준보다 훨씬 엄격하며, HCHO(포름알데히드) 배출량 기준도 미국과 한국이 유사하다. 국내차량과 미국 차량의 배출규제를 비교한 결과, 최근의 한국의 배출규제는 미국과 매우 근접하기 때문에 2014년 기준 운행모드 기반 배출계수 표를 사용하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

**Table 3. Comparison of emission standards (Korea vs. US)**

Pollutant	Korean Emission Standards <sup>1)</sup>	US Emission Standards <sup>2)</sup>
CO (g/km)	2.11	2.1
NOx(g/km)	0.031	0.043
THC (g/km)	0.0009	0.00932
HCHO (g/km)	0.047	0.05

## MOVE-Lite의 검증

차종별 NIER 주행궤적별 CCF를 MOVES Lite-K와 NIER 방법으로 각각 산출하여 비교하였다. CCF는 배출량 산정 값의 평균속도에 대한 민감도를 나타내는 값으로 두 방법의 배출량 산정 특성을 비교하기에 적절한 지표이다. MOVES Lite-K와 NIER 배출계수곡선식으로 산출한 차종별 오염물질별 CCF의 값이 유사하다면 MOVES Lite-K가 한국에서 적용될 수 있다고 가정하였다.

1) 2013.1월 이후 적용 규제 (KAIDA, 2014)

2) 2004-2009년에 적용된 Tier 2 미국 규제

### 1. 차종별 CCF 비교

선택한 11개 차종의 오염물질 별 CCF를 모두 산정하였으나 본 논문에는 대분류 차종의 대표 차종으로 경유 승용차, 경유 버스, 경유 중형 트럭을 선택하여 CCF 비교 그래프를 Figure 3, 4, 5에 나타내었다. 휘발유 승용차는 경유 승용차와 유사한 경향을 보이며 PM<sub>10</sub>의 배출이 없으므로 경유 승용차를 선택하여 결과를 나타내었다.

Figure 3은 경유 승용차의 CCF 비교 결과로써 실선은 MOVES Lite-K로 산정한 CCF이고 나머지 두 개 계열은 경유 승용차 소형과 중대형의 CCF를 NIER 배출계수 곡선식으로 산정한 배출량을 근거로 산출한 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 CO<sub>2</sub>의 경우 두 방법으로 산정한 CCF는 매우 유사한 경향을 보이나 나머지 대기 오염 물질인 CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>의 경우 기준 주행궤적을 기준(CCF가 1인 곳)으로 저속부분과 고속부분으로 CCF의 변화 경향이 차이가 있음을 확인할 수 있다. 즉, MOVES Lite-K로 배출량을 산정할 때 경유 승용차의 CO와 NO<sub>x</sub>는 NIER 배출계수식으로 계산한 값보다 저속에서는 작게 고속에서는 크게 산정될 것으로 보이며, PM<sub>10</sub>의 경우 반대 경향을 보인다.

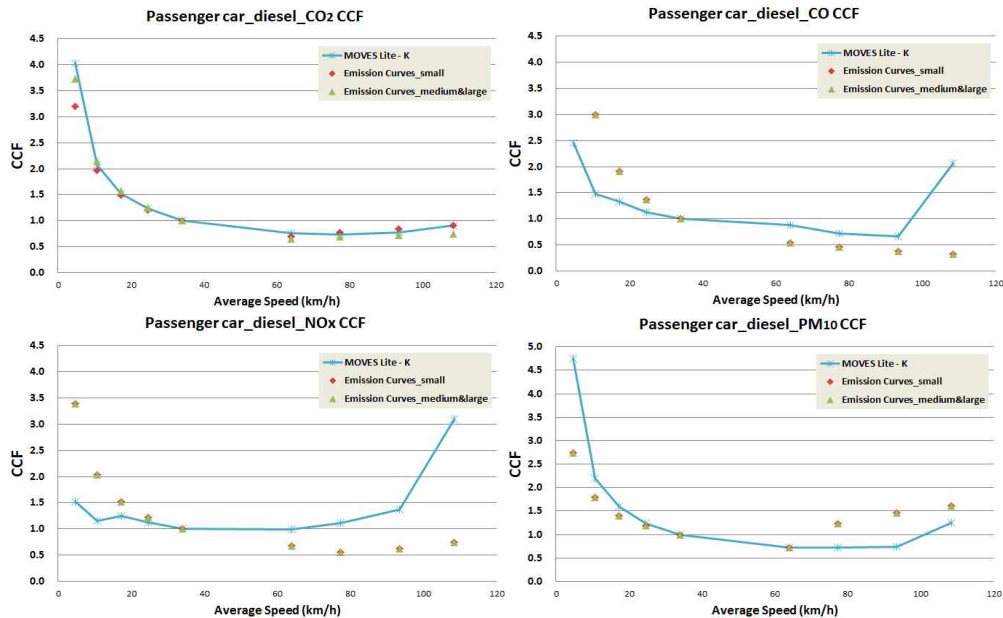


Figure 3. Comparison of CCF\_passenger car diesel

Figure 4의 경유 버스의 경우를 보면, 비록 저속 부분의 비교만 가능하였지만 두 방법으로 산출된 CCF가 매우 유사한 경향을 보인다. 다만, NO<sub>x</sub>의 경우 NIER 배출계수식이 직선식으로 추정되어 있어 다른 오염물질에 비하여 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Figure 5에서 보는 바와 같이 경유 중형 트럭의 CCF는 모든 오염물질에서 대체적으로 유사한 경향을 보이거나 기준 주행궤적을 기준으로 저속부분과 고속부분에서 CCF의 변화 경향에 차이가 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 경유 중형 트럭에서 동적 주행 특성을 고려하여 산정한 배출량은 배출계수 곡선식으로 산정한 결과와 차이가 있을 것으로 생각된다.

대기오염 물질 배출량의 저속과 고속 부분에서 발생하는 차이는 MOVES Lite-K와 평균속도 기반의 배출량 산정 방법론의 근본적인 차이로 인한 것으로 판단된다. MOVES Lite-K에서 운행모드 기반 배출계수표를 활용하여 산정할 때 저속모드와 고속모드에 따른 배출량 특성의 차이가 반영되는데 CO<sub>2</sub>보다 대기오염물질에서 더 큰 차이가 있는 것으로 보인다.



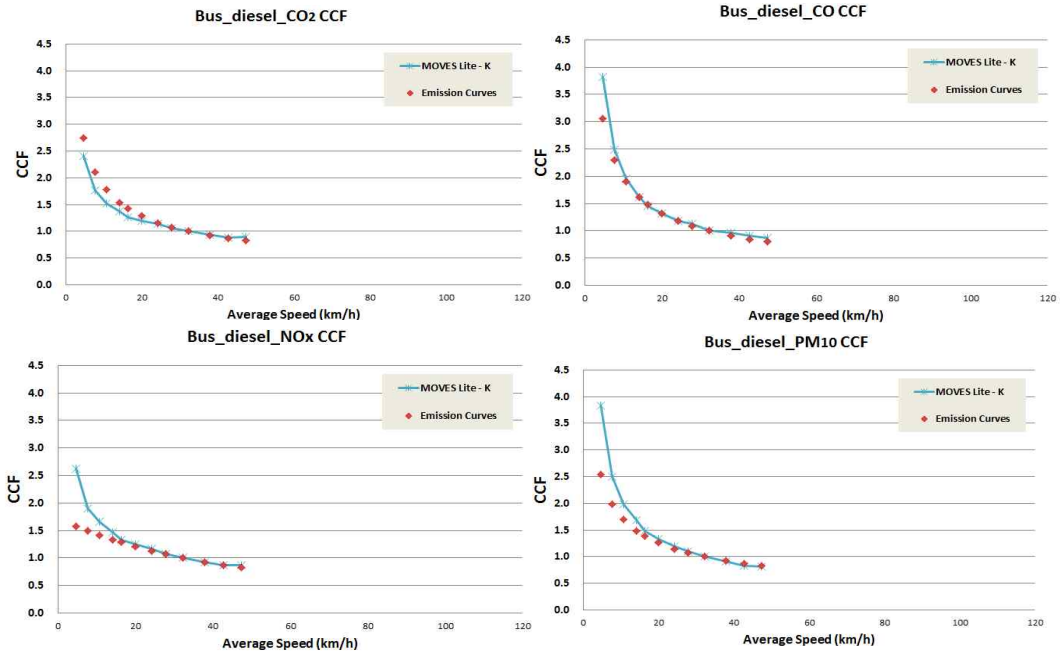


Figure 4. Comparison of CCF\_bus diesel

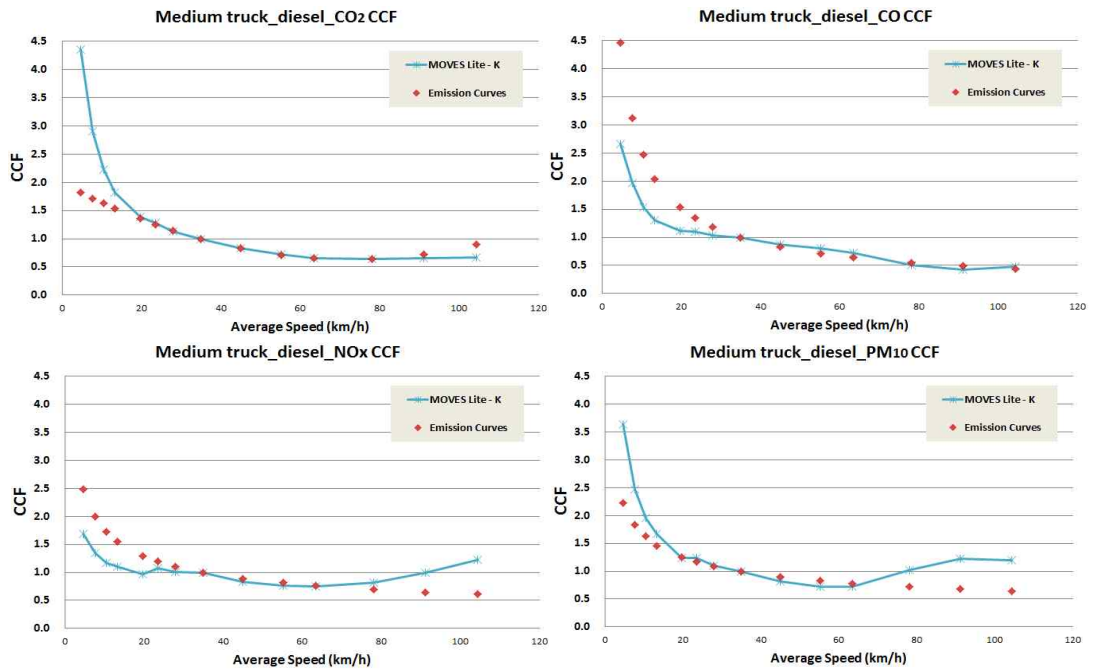


Figure 5. Comparison of CCF\_medium truck diesel

## 2. 적용성 검증 결과

Table 4에는 두 가지 방법으로 산출한 차종별 오염물질별 CCF의 유사성을 통계적으로 분석한 결과가 정리되어 있다. 상관관계를 나타내는 R<sup>2</sup>값을 보면 CO<sub>2</sub>와 PM<sub>10</sub>의 경우 대부분의 차종에서 1에 가까운 값을 보여 상관관계가 매우 높음을 알 수 있다. 즉, 두 가지 방법으로 산정한 CCF가 전체적으로 유사한 경향을 보인다고 말할 수 있으므로 MOVES Lite-K은 한국 차량의 배출량 특성을 반영하였다고 판단할 수 있다.

그러나 CO와 NO<sub>x</sub>는 일부 차종에서는 1에 가까운 값을 보이지만 대부분의 경우 R<sup>2</sup> 값이 1에 가깝지 않게 나온다. 이는 Figure 3, 4, 5의 CCF 그래프 비교를 통해 볼 수 있었던 경향과 동일하다. CO와 NO<sub>x</sub>의 운행모드 기반과 평균 속도기반의 배출계수와 배출량 산정 방법의 차이가 있음을 보여준다.

**Table 4.** Comparison of CCF (Korea vs. NIER curves)

Fuel Type	Korean Vehicle Type	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>
		R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>
Gasoline	PC-mini	0.981	0.723	0.006	-
Gasoline	PC-small	0.989	0.425	0.048	-
Gasoline	PC-medium and large	0.984	0.475	0.034	-
Diesel	PC-mini	-	-	-	-
Diesel	PC-small	0.989	0.522	0.003	0.832
Diesel	PC-medium and large	0.990	0.522	0.003	0.832
Diesel	Bus-large	0.990	0.977	0.837	0.979
CNG	Bus-large	0.991	0.317	0.927	-
Diesel	Truck-small	0.951	0.335	0.022	0.740
Diesel	Truck-medium	0.787	0.975	0.660	0.829
Diesel	Truck-large	0.971	0.998	0.993	0.994

## 결론

본 연구에서는 MOVES의 운행모드 기반 배출량 산정 방법론을 교통 시뮬레이션 모형에 결합할 수 있도록 간략화한 배출량 산정 모형인 MOVES Lite의 개념을 한국에 적용한 모형인 MOVES Lite-K를 개발하기 위한 연구를 수행하였다. 즉, MOVES Lite의 배출량 산정 과정에서 한국의 차종, 주행특성, 배출계수, 배출규제 등을 반영할 수 있는 절차를 수행하였다.

MOVES Lite-K와 한국의 배출계수 곡선식의 배출량 산정 특성을 비교한 결과 전체적으로 유사한 경향을 보여, MOVES Lite-K가 한국에서 적용될 수 있음을 검증하였다. 그러나 두 개 방법론의 본질적인 배출량 산정 특성의 차이가 있음을 대기오염물질의 CCF 비교 과정에서 확인할 수 있었으며, 이는 향후 한국의 평균속도 기반 배출계수식의 보완과정에서 참고할 만한 사항으로 보인다.

MOVES Lite-K는 개별차량의 통행을 시뮬레이션하는 미시 교통 시뮬레이션 모형이나 개별차량의 주행궤적을 추정할 수 있는 메조 교통 시뮬레이션 모형과 통합되어 사용될 수 있다. 교통시뮬레이션 프로그램 내에서 배출량 산정이 동시에 이루어질 수 있기 때문에 사용자가 보다 쉽고 빠르게 운행모드 기반으로 배출량을 산정할 수 있다는 장점이 있다.

국외에서는 동적 운행 특성과 배출량의 관계를 고려하는 배출량 산정 모형의 사용이 권장되고 있다. 본 연구에서 개발된 MOVES Lite-K를 활용하게 된다면, 국내에서도 차량의 운행특성 변화를 반영한 배출량 산정이 가능하며 교통 계획과 교통 정책의 대안 평가에서 환경적 영향을 분석할 때 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

그러나, 본 연구에서 제안한 방법론은 다음과 같은 한계점이 있으므로 향후 연구에서 보완되어야 할 것이며 활용 시 주위를 기울여야 할 것이다.

- 첫 번째, 실제 도로에서 주행하는 차량은 다양한 연식과 차령의 차량이 있으므로 향후 연구에서는 이러한 다양한 차종을 반영할 수 있도록 하는 연구가 필요하다.

- 두 번째, 한국의 차종, 주행특성, 배출계수, 배출규제 등이 변경되면 MOVES Lite-K에서 이를 반영하여야 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있다.

- 세 번째, 교통 시뮬레이션 모형에서 추출한 주행궤적의 신뢰도에 따라 MOVES Lite-K로 산정한 배출량 값의 정확도가 높아지기 때문에 실제의 주행특성을 잘 반영하는 주행궤적을 추정하는 방법론을 적용하여야 한다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from the Urban Development Program funded by the Ministry of Land, Infrastructure, and Transport of Korea.

**알림:** 본 논문은 대한교통학회 제73회 학술발표회(2015.10.16)에서 발표된 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

## REFERENCES

- DTALite, <https://sites.google.com/site/dtalite/>, 2014.12.15.
- Frey H. C., Liu B. (2013), Development and Evaluation of a Simplified Version of MOVES for Coupling With a Traffic Simulation Model, Paper 13-1201, Proceedings, 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, January 22-26.
- Hu H., Yoon C., Lee T., Yang I., Sung J. (2013), Instantaneous GHG Emission Estimation Method Considering Vehicle Characteristics in Korea, *J. Korean Soc. Transp.*, 31(6), Korean Society of Transportation, 90-105.
- KAIDA (2014), Enforcement Regulations of Atmospheric Environment Preservation Act MOE Ordinance 585.
- 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.
- Lee T., Kim J., Park J., Jeon S., Lee J., Kim J. (2014), Influence of Driving Routes and Seasonal Conditions to Real-driving NOx Emissions From Light Diesel Vehicles, *Transactions of KSAE*, 22(1), 148-156.
- Lee T., Lee J., Kim J. (2012), Evaluation of On-Road NOx Emission From a Light Duty Diesel Vehicle Using a Portable Emissions Measurement System, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), 94-104.
- National Institute of Environmental Research (2010), National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual II.
- National Institute of Environmental Research (2011), GHG-CAPSS Green House Gas Emission Calculation Method Manual.
- Park J., Lee J., Kim S., Kim J., Ahn K. (2013), A Study on the Emission Characteristics of Korean Light-duty Vehicles in Real-road Driving Conditions, *Transactions of KSAE*, 21(6), 123-134.
- Roughail N., Frey H. C. (2014), Framework for Context-Sensitive Spatially- and Temporally- Resolved Onroad Mobile Source Emissions Inventories, EPA.
- U.S. EPA, MOVES 2010, <http://www.epa.gov/otaaq/models/moves/index.htm>, 2014.12.15.