

# 친환경 교통운영전략을 위한 차량 연료소모량 예측모형 평가

박상준 · 이정범\*

조선대학교 토목공학과, 대전발전연구원

## Evaluation of Fuel Consumption Models for Eco-friendly Traffic Operations Strategies

PARK, Sangjun<sup>1</sup> · LEE, Jung-Beom<sup>2</sup>\*

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

<sup>2</sup>Daejeon Development Institute, Daejeon 34863, Korea

\*Corresponding author: rutgerskg@gmail.com

### Abstract

As the necessity of the evaluation of environmentally-friendly traffic operations strategies becomes obvious, the characteristics of fuel consumption models should be comprehended in advance. This study selected three fuel consumption models developed in Korea and another three models widely used in North America, and compared their applicabilities. Specifically, the national institute of environmental research (NIER) drive modes and the VISSIM software were utilized to model various driving patterns, and their fuel consumptions were estimated using the fuel consumption models. Based on the results, all the models showed the similar results in the analysis of the most fuel efficient cruising speed. On the other hand, caution should be taken when using the KR-1 and KR-2 models in microscopic analyses because they are not sensitive to instantaneous power requirements of vehicles.

**Keywords:** environmental modeling, eco-friendly transportation, fuel consumption model, green traffic operations, NIER drive mode

### 초록

교통운영전략의 친환경성 평가의 필요성이 대두되고 있는 가운데, 정확한 평가를 위해서는 분석에 사용되는 차량연료소모 예측모형에 대한 이해가 선행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 3개 모형과 외국에서 사용되고 있는 모형들 중 광범위하게 사용되는 동시에 비교적 취득이 용이한 3개 모형을 선정하여 모형의 특성을 응용측면에서 비교하였다. 구체적으로, 국립환경연구원의 차량주행기록인 NIER 차속모드와 미시교통류시뮬레이션 소프트웨어인 VISSIM을 이용하여 차량의 운행패턴을 모델링하였으며, 이를 차량연료소모 예측모형에 입력하여 연료소모량을 예측하였다. 본 연구를 통해 정속주행의 경우 국내외의 모든 모형이 유사한 결과를 보이는 것으로 분석되었으나, NIER 차속모드와 VISSIM 모형을 이용한 분석결과 국내모형 중 KR-1, KR-2 모형은 순간적인 차량의 비출력에 민감하지 못하여 미시적인 분석을 요하는 경우에는 사용에 주의할 기울여야 하는 것으로 분석되었다.

**주요어:** 환경모델링, 친환경교통, 차량연료소모 모형, 그린교통운영, NIER 차속모드

J. Korean Soc. Transp.  
Vol.34, No.3, pp.234-247, June 2016  
<http://dx.doi.org/10.7470/jkst.2016.34.3.234>

pISSN : 1229-1366  
eISSN : 2234-4217

Received: 17 December 2015

Revised: 18 February 2016

Accepted: 29 April 2016

Copyright ©  
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 서론

### 1. 연구의 배경

전 세계적으로 발생하고 있는 이상기후현상으로 인하여 화석연료사용 감축을 통한 온실가스 배출량을 저감하려는 노력은 다양한 분야에서 지속적으로 이루어지고 있다. 특히, 교통분야는 화석연료 사용량의 상당 부분을 차지하고 있기 때문에 에너지사용의 효율성을 향상시키기 위한 친환경적인 교통정책과 교통운영전략의 개발은 국가적인 차원에서 중요한 의미를 가지고 있다. 우리나라의 경우 2014년 기준 국가전체 에너지소모량의 18%를 수송분야에서 소비하는 것으로 조사되었으며, 이중 상당부분이 도로수송부문에 소비되므로, 도로수송부문의 연료효율성 향상은 국가에너지 효율성향상과 온실가스 감축에 있어 매우 중요한 분야라고 할 수 있다(Korea Energy Economics Institute, 2014).

환경측면에서 교통정책과 교통운영전략의 평가를 위해서는 교통여건 변화에 따른 교통활동을 예측하고, 이에 따라 수반되는 에너지소모량과 온실가스를 포함한 배기가스 방출량을 산정하게 된다. 구체적으로 교통활동의 경우 분석의 규모 및 요구사항에 따라, 4단계 교통수요예측모형, 또는 미시교통류시물레이션 모형 등을 이용하여 거시적, 혹은 미시적으로 교통변화를 모델링하고, 교통류를 구성하고 있는 차량들의 속도, 가속도, 엔진에서의 출력요구량 분포와 같은 모델링의 결과를 환경모형의 입력자료로 활용하여 교통여건 변화가 환경에 미치는 영향을 산정하게 된다.

환경모형의 경우에도 교통모형과 마찬가지로 지역단위 총량을 예측하는 경우 평균통행속도에 따라 단위거리당 배출량으로 표현되는 배출계수(g/km)를 산출하는 거시적인 모델링을 수행하는 것이 일반적인 반면, 좀 더 시공간적으로 상세한 분석을 요하는 소규모의 교통운영 또는 개별차량의 효과분석에는 미시적인 모형을 사용하는 것이 일반적인 실정이다. 국내의 경우 과거에는 국립환경연구원에서 개발된 모형(National Institute of Environmental Research, 2008)과 같이 교통류의 평균속도를 이용한 거시적인 모형이 주류를 이루고 있었으나 ITS기술을 응용한 친환경 교통운영의 평가를 위한 개별차량 수준의 미시적인 모형의 필요성이 연구자들에 의해 제기되면서 최근에 가속도를 반영한 차량연료소모량 예측모형에 관한 연구가 수행되었다(Won et al., 2011).

차량연료소모량에 영향을 미치는 요소에는 차량의 제원, 운전자의 행태, 도로의 특성, 통행의 특성 등과 연관된 요소들이 포함되는데, 교통류 전체의 연료소모량을 비교적 정확하게 예측하기 위해서는 현장에서 수집한 자료와 함께 이들 요소들에 민감한 모형을 사용하여야 한다. 하지만 친환경 교통정책과 교통운영전략의 평가를 위해 모형을 적용함에 있어 현실적으로 제반 자료수집과 환경모형개신의 어려움으로 인하여, 대안들의 시행에 따른 절대적인 예측량의 정확성 보다는 대안들의 상대적인 효율성을 평가하는데 중점을 두고 있는 실정이다.

국내에서도 교통정책과 교통운영전략에 대한 친환경성에 대한 평가에 대한 필요성이 점점 대두되고 있는 가운데, 친환경 교통구현을 위해 차량연료소모량 예측모형을 사용되고 있으나, 거시모형과 미시모형 특성에 대한 이해 부족으로 인하여 주로 적절한 모형의 선택과 적용에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

### 2. 연구의 목적

본 연구의 목적은 차량연료소모량 예측모형들을 비교 분석하여 친환경성 평가 시 효율적인 모형의 선택과 적용에 도움을 주는 것이다. 일반적으로 거시적인 모형을 거시적인 분석에만 사용하는 것이 타당하겠지만 만약 미시적인 분석에서도 미시모형과 동일한 결과를 보인다면 상대적으로 입력자료 수집과 모형의 실행측면에서 용이한 거시적인 모형을 사용하는 것이 효율적일 것이다. 본 연구에서는 국내에서 사용되고 있는 예측 모형들과 외국에서 광범위하게 활용이 되고 있는 모형들을 교통정책 친환경성 평가와 같은 거시적인 분석과 순간적인 연료소모특성과 같은 미시적인 측면에서 비교하여, 친환경성 평가 시 모형의 선택을 합리적으로 할 수 있도록 한다.

본 연구를 위하여 우선 국내 및 북미지역에서 사용되고 있는 예측모형들에 대하여 문헌고찰을 수행하여 모형을 선정하고, 국립환경연구원의 모형개발 시 사용하는 차량주행기록인 National Institute of Environmental

Research(NIER) 차속모드의 연료소모량을 각 모형을 이용하여 예측하고 비교 분석한다. 마지막으로 NIER 차속모드가 가지는 평균적인 차량운행특성의 한계를 극복하기 위하여 미시교통류시물레이션 모형인 VISSIM 프로그램을 이용하여 다양한 교통소통상황에서의 차량운행특성을 모델링한다. 구체적으로 전형적인 4지 교차로에서 신호운영, 비신호운영, 회전교차로운영 상황을 시물레이션하고 각각의 모형을 이용하여 이들 운영방식의 친환경성을 상대적으로 평가한다. 마지막으로 결론을 도출하고 향후 연구에 대하여 논한다.

## 문헌고찰

### 1. 국내 차량연료소모예측모형

국내에서 사용되고 있는 차량 연료소모량 모형은 국립환경연구원(National Institute of Environmental Research, 2008)에서 개발된 모형, 한국철도시설공단과 한국교통연구원의 “철도투자평가편람 전면개정 연구”에서 사용하는 모형(Korea Rail Network Authority and The Korea Transport Institute, 2010), 원민수(Won et al., 2011)가 개발한 차량 속도와 가속도에 민감한 모형이 있다.

국립환경연구원(National Institute of Environmental Research 2008, 2009)에서는 2008년부터 수송부문 온실가스 기후변화대응 시스템 구축을 위한 일환으로 자동차 온실가스 배출계수 개발을 위한 사업을 수행하였다. 1차년도에는 배출계수 개발을 위해 총 282대의 차대동력계 시험결과를 이용하였고, 2차년도에는 총 56대의 차량을 실험하였다. 시험결과를 이용하여 다양한 차종의 온실가스배출계수와 연비계수식을 개발하였는데, 본 연구에서는 휘발유를 사용하는 대형의 승용차의 연비식을 사용하였다. 이는 도로상을 운행하고 있는 차량 중 휘발유를 사용하는 승용차의 비율이 가장 높고, 대형의 승용차가 외국모형의 승용차 모형과 가장 비슷한 엔진크기를 갖고 있기 때문이다. 연비식은 차량속도에 대한 2차 다항식으로 Equation(1)과 같다(이하 본 모형은 KR-1모형이라 한다).

$$FC = -0.0021 V^2 + 0.3465 V + 1.5868 \quad (1)$$

여기서, FC는 차량의 연비(km/L)이며, V는 차량의 속도(km/h)이다.

“철도투자평가편람 전면개정 연구”에 기술된 차량 연료소모모형은 Equation(2)에서 보는 바와 같이 승용차량의 연료소모량을 차량속도에 대한 2차 다항식으로 설명하고 있다(이하 본 모형은 KR-2모형이라 한다).

$$FC = -0.00325338 V^2 + 0.47782761 V + 2.28593762 \quad (2)$$

여기서, FC는 차량의 연비(km/L)이며, V는 차량의 속도(km/h)이다.

원민수(Won et al., 2011)는 기존의 차량연료소모모형들이 가속도를 포함한 차량의 미시적인 주행패턴을 고려하지 못하는 단점을 극복하기 위하여 새로운 연료소모모형을 개발하였다. 구체적으로 차량시물레이션 모형인 AVL Cruise를 이용하여 차량의 연료소모량을 모델링하고 이를 이용하여 새로운 차량연료소모모형을 Equation(3)과 같이 개발하였다(이하 본 모형은 KR-3모형이라 한다).

$$FC = \begin{cases} 0.64151854 + 0.00087249 V^2 + 4.52898163A & (\text{for } A \geq 0) \\ 0 & (\text{for } A < 0) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, FC는 연료소모량(kg/h), V는 차량의 속도(km/h), A는 차량의 가속도(m/s<sup>2</sup>)이다.

## 2. 국외 차량연료소모 모형

차량의 연료소모량과 배기가스방출량을 예측하는 모형들은 심각한 환경오염문제를 겪은 북미지역과 유럽의 개발국가들을 중심으로 개발되어 사용되어 왔다. 대표적인 거시모형으로는 미국에서 개발된 MOVES(US EPA, 2014)와 EMPAC(California Air Resources Board (CARB), 2014)이 있으며, 유럽에서는 COPERT, DMRB, HBEFA 등이 있다(Boulter et al., 2007). 한편 미시모형에는 북미지역에서 개발되어 사용되고 있는 CMEM(Scora and Barth, 2006)과 VT-Micro(Rakha et al., 2004)이 있으며, 유럽의 경우 PHEM, VeTESS, EMPA 등이 사용되고 있다(Boulter et al., 2007). 본 연구에서는 이들 모형들 중 연구분야에서 활발히 사용이 되는 동시에 비교적 취득이 용이한 모형인 MOVES, CMEM, VT-Micro를 국내모형과의 비교를 위하여 선정하였다.

MOVES모형은 미국환경청(U.S. Environmental Protection Agency 이하 US EPA)에서 기존의 MOBILE 계열의 모형을 대체하여 캘리포니아 주를 제외한 모든 주에서 차량에 의한 배기가스 방출량과 에너지사용량을 공식적으로 산정하기 위하여 2010년 공식적으로 개발하여 발표한 모형이다. 간략하게 MOVES 모형을 설명하자면, 모형은 미국 전역에서 수집된 도로교통기반 에너지 및 배기가스 데이터베이스로서, MySQL 데이터베이스 관리시스템으로 설계되었다(US EPA, 2014).

이전의 MOBILE 계열의 모형은 거시적인 모델링만 가능한 반면, MOVES 모형은 국가전체수준, 카운티수준, 프로젝트수준의 모델링이 가능하다. 특히, 프로젝트수준의 분석기능을 이용하여 차량의 운행패턴을 모형에 입력하여 미시적인 분석을 수행할 수 있다. 구체적으로 차량의 속도이력자료를 이용하여 속도와 비출력(Vehicle Specific Power) 값을 계산하고 이를 이용하여 MOVES모형의 데이터베이스에 저장되어 있는 배출계수를 산정하게 된다. MOVES모형에 대한 구체적인 사용법과 배출계수 산정 알고리즘은 미국환경청 보고서에 자세히 설명되어 있으며, 소프트웨어는 EPA 웹사이트에서 무료로 다운받을 수 있다.

Comprehensive modal emissions model (CMEM)은 University of California Riverside에서 미국 FHWA의 연구지원을 받아 개발된 모형이다(Scora and Barth, 2006). 모형의 구조를 살펴보면, 차량의 배기관을 통해 방출되는 오염물질의 방출량은 Equation(4)와 같이 연료사용량에 Engine-Out Index (EOI)와 CPF라는 모형의 계수를 곱하여 산출한다.

$$E_{tailpipe} = FC \times EOI \times CPF \quad (4)$$

여기서,  $E_{tailpipe}$ 는 차량배기관에서 방출되는 배기가스량(g/s),  $FC$ 는 연료소모율(g/s),  $EOI$ 는 단위 연료소모량에 따른 엔진방출 오염물질량 비율,  $CPF$ 는 배기관에서 방출되는 배기가스와 엔진에서 방출되는 배기가스의 비율이다.

연료소모량,  $CO_2$ , HC, CO,  $NO_x$ 와 같은 배기가스방출량의 예측이 가능하며, 차량의 무게, 엔진크기, 최대토크, 최대파워 등과 같은 차량특성과 관련된 자료와 차량의 속도, 가속도, 도로구간의 경사도, 에어컨 사용유무 등과 같은 차량의 운행상태와 관련된 자료를 입력하여야 한다.

VT-Micro모형은 EPA에서 개발된 MOBILE모형의 개발에 사용된 차량시험결과를 이용하여 Equation(5)와 같이 차량의 속도와 가속도로 독립변수로 차량의 배기관에서 방출되는 배기가스량을 종속변수로 하여 회귀모형을 이용하여 개발된 통계적모형이다(Rakha et al., 2004).

$$MOE_e = \begin{cases} \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 L_{e,i,j} \times u^i \times a^j & \text{for } a \geq 0 \\ \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 M_{e,i,j} \times u^i \times a^j & \text{for } a < 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $MOE_e$ 는 연료소모량(L/s),  $HC$ ,  $CO$ ,  $NO_x$ ,  $CO_2$  방출량(g/s),  $u$ 는 차량속도(km/h),  $a$ 는 차량가속도(km/h/s),  $i$ 는 속도의 거듭제곱,  $j$ 는 가속도의 거듭제곱,  $L_{e,i,j}$ ,  $M_{e,i,j}$ 는 속도  $i$  거듭제곱, 가속도  $j$  거듭제곱 일때의  $MOE_e$ 의 회귀모형의 계수이다.

모형의 구조를 살펴보면 속도와 가속도의 3차 다항식함수를 이용하여 회귀모형의 계수를 산정하였으며, 차량의 가속 및 감속에 따라 별도의 모형을 사용한다.

## 차량연료소모량 예측모형 비교분석

### 1. 예측모형의 단위변환과 보정계수 산정

차량연료소모량은 운행시간 또는 주행거리에 대한 부피 혹은 무게 단위의 연료소모량을 나타내는 단위로 표현된다. 본 연구에서 비교하는 모형들 중 VT-Micro와 CMEM 모형은 L/s를 KR-1과 KR-2모형은 km/L, KR-3모형은 kg/h, 마지막으로 MOVES모형의 경우 차량연료소모량을 직접적으로 산출하는 것이 아니라, 1차적으로 차량의 에너지소모량을 KiloJoules/h 단위로 계산하고 가솔린의 저위발열량(lower heating value)으로 나누어 연료소모량인 g/s로 변환하게 된다.

본 연구에서는 차량의 연료소모율은 L/s로 통일하였으며, 이를 위하여 KR-1과 KR-2모형의 경우 Equation(6)을 이용하여 차량연료소모량을 L/s 단위로 변환하였다.

$$FC_{L/s} = \frac{V}{3600 \times FC_{km/L}} \quad (6)$$

여기서,  $FC_{L/s}$ 는 차량연료소모량(L/s),  $FC_{km/L}$ 는 KR-1과 KR-2에 의해 산출된 차량연료소모량(km/L),  $V$ 는 차량속도(km/h)이다.

KR-3모형의 경우 차량연료소모량이 kg/h의 형태로 예측되므로 일반적인 가솔린의 밀도인  $719.7\text{kg/m}^3$ 를, MOVES모형의 경우 가솔린의 저위발열량인  $44.0\text{KJ/g}$ 를 적용하여 L/s 단위로 변환하였다.

전술한 국내외 차량연료소모량 예측모형들은 그 목적에 따라 다양한 종류와 규모의 차량들의 현장실험결과를 바탕으로 개발되었다. 따라서, 동일한 차량운행기록의 연료소모량을 예측하더라도 모형개발에 사용된 차량들의 평균 연비가 동일하지 않기 때문에 모형의 예측결과는 서로 다를 수 밖에 없다.

하지만 본 연구의 목적은 각 모형의 예측특성을 비교하는 것으로, 각 모형에 보정계수를 적용하여 표준적인 차속 모드 주행 시 동일한 연비를 보이도록 통일하는 것이 비교의 편의를 위해 바람직하다. 이에, 본 연구에서는 각각의 모형을 이용하여 현재 국내에서 시행되고 있는 차량연비산정방법에 따라 연비를 산정하고 이를 기준으로 예측모형의 보정계수를 산정하였다.

차량의 연비산정을 위하여 "자동차의 에너지소비효율 및 등급표시에 관한 규정"에 정의된 방법 중 5-cycle 보정식을 사용하였다(Ministry of Trade, Industry and Energy, 2013; Korea Energy Economics Institute, 2013). 구체적으로 차량의 연비를 산정하기 위해서는 우선 도심주행 및 고속도로주행 에너지소비효율을 각각 산출하여야 한다.

도심주행 에너지소비효율은 US EPA의 도심주행모드인 FTP(Federal Test Procedure)-75에 따라 1,874초 동안 17.77km를 34.1km/h의 평균속도로 주행하며 에너지소비효율을 측정하고 최종적인 효율은 Equation(7)을 이용하여 산정한다.

한편, 고속도로주행 에너지소비효율은 US EPA의 고속도로주행모드인 HWFET(Highway Fuel Economy Driving Schedule)에 따라 765 초 동안 16.45km를 77.7km/h의 평균속도로 주행하며 에너지소비효율을 측정하고 최종적인 효율은 Equation(8)을 이용하여 산정한다. 최종적으로 복합 에너지소비효율은 Equation(9)를 이용하여 산정한다.



$$FE_{city} = \frac{1}{0.007639 + \frac{1.1886}{FE_{FTP-75}}} \tag{7}$$

$$FE_{highway} = \frac{1}{0.004425 + \frac{1.3425}{FE_{HWFET}}} \tag{8}$$

$$FE_{composite} = \frac{1}{\frac{0.55}{FE_{city}} + \frac{0.45}{FE_{highway}}} \tag{9}$$

여기서,  $FE_{composite}$ ,  $FE_{city}$ ,  $FE_{highway}$ 는 복합, 도심, 그리고 고속도로주행 에너지소비효율(km/L)이며  $FE_{FTP-75}$ 와  $FE_{HWFET}$ 는 각각 FTP-75와 HWFET모드의 측정 에너지소비효율(km/L)이다.

전술한 연비산정방법에 의해 산정된 각 모형의 연비는 Table 1과 같으며, CMEM모형의 경우 8.79km/L로 가장 연비가 나쁜 것으로 분석되었다. 따라서, CMEM모형을 기준으로 각 모형의 보정계수를 산정하였다. 즉, KR-1모형의 경우 1km 주행시 0.098 L의 연료를 소모하는데, 이를 CMEM모형의 연료소모량인 0.114 L로 보정하기 위해서는 Table 1에서 보는 바와 같이 보정계수 1.16을 곱하여야 한다.

**Table 1. Adjustment factors**

Model	KR-1	KR-2	KR-3	VT-Micro	MOVES	CMEM
Fuel Efficiency (km/L)	10.21	12.83	9.05	9.61	10.25	8.79
Reciprocal of Fuel Efficiency (L/km)	0.098	0.078	0.111	0.104	0.098	0.114
Adj. Factor	1.16	1.46	1.03	1.09	1.17	1.00

## 2. 모형의 에너지 소비효율 특성비교

각 모형의 에너지 소비효율 특성을 분석하기 위하여, 산정된 보정계수를 각 모형에 적용하여 속도변화에 따른 모형들의 에너지 소비효율을 계산하였다. 분석에서의 속도는 차량의 정속주행속도로서 가감속이 포함되지 않은 경우를 말하며, 일반적으로 이러한 정속주행속도 분석은 거시적인 분석에 해당한다.

일반적으로 승용차의 경제속도는 70km/h에서 80km/h 구간이라고 알려졌는데, Figure 1에서 보는 바와 같이 다수의 모형들이 이 구간에서 최적의 연료효율을 가지는 것으로 분석되었다. 모형 간 속도에 따른 에너지 소비효율은 다소 차이가 있었으나, 30km/h이하의 저속구간에서는 효율이 현저히 떨어지고 속도가 증가함에 따른 효율이 증가하는 유사한 패턴을 보이는 것으로 나타났다.

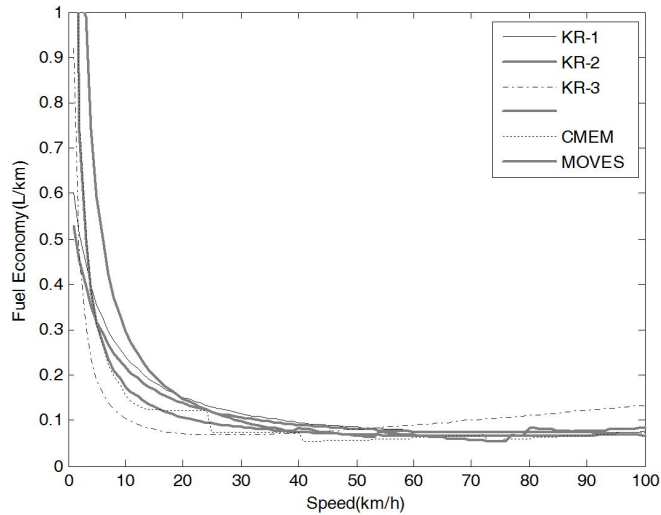


Figure 1. Fuel economy as a function of speed

하지만 Table 3에서 보는 바와 같이 KR-3모형과 CMEM모형의 경제속도는 각각 27km/h와 41km/h로 분석되어 다른 모형과는 다른 패턴을 보이는 것으로 분석되었다. 가장 연료효율이 좋은 모형으로는 MOVES모형으로 76 km/h로 정속주행 시 1km당 0.053L를 소모하고, 1L의 연료로 약 18.9km를 주행할 수 있는 것으로 분석되었다.

결론적으로, 가감속이 관계되지 않은 정속주행 차량의 연료소모량 산정과 같은 거시적인 분석에는 어떤 모형을 선택하더라도 거의 유사한 결과를 도출할 것으로 판단된다. 예를 들면 교통수요예측모형을 이용하여 도로구간별 평균통행속도를 산정하고 이를 모형에 입력하여 연료소모량을 예측할 수 있다. 다만 KR-3모형과 CMEM모형의 경우 최적경제속도 산정 시 사용하기 위해서는 많은 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다.

Table 2. Maximum fuel efficiency speed

Classification	KR-1	KR-2	KR-3	VT-Micro	CMEM	MOVES
Max. Fuel Efficiency Speed(km/h)	83	73	27	73	41	76
Fuel Economy (L/km)	0.073	0.074	0.068	0.064	0.055	0.053

### 3. NIER 차속모드를 이용한 모형특성비교

#### 1) NIER 차속모드

NIER 차속모드는 국내에서 운행 중인 소형자동차들의 대기오염물질 배출계수를 산출하기 위하여 국립환경과학원에서 개발한 차량의 속도운행 패턴이다. 본 연구에서는 Table 3에서 보는 바와 같이, 저속에서 고속까지 다양한 차량의 평균속도에 따라 총 8개의 차속모드를 이용하였다. NIER-1부터 NIER-14까지 차속모드의 번호가 증가함에 따라 평균속도와 최고속도가 증가하고, 반대로 공회전의 경우 저속의 차속모드가 정체로 인하여 공회전 비율이 높은 것을 알 수 있다.

속도의 변동정도를 살펴보면 NIER-1의 경우 평균주행속도에 대한 속도의 표준편차의 비율인 변동계수가 152%로 가장 많은 변동을 보이고 있으며, 속도가 증가함에 따라 변동의 정도가 감소하는 것으로 나타났다. 특히 상대적으로 고속주행모드인 NIER-12, -13, -14의 경우 변동계수가 16-19% 수준으로 저속주행모드에 비해 속도의 변동이 적은 것으로 나타났다.

**Table 3.** Characteristics of NIER driving cycles

Cycle number	Average speed (km/h)	Maximum Speed (km/h)	Standard deviation of speed	Coefficient of Variation (%)	Idle duration (%)	Driving time (s)	Driving distance (km)
NIER-1	4.7	33.4	7.2	152	54.3	873	1.1
NIER-3	10.8	63.0	13.3	123	40.0	878	2.6
NIER-5	17.3	68.1	18.0	104	31.0	861	4.1
NIER-7	24.6	72.1	20.8	84	23.7	875	6.0
NIER-9	34.1	70.9	20.8	61	13.2	926	8.8
NIER-12	64.0	83.3	12.2	19	0	840	15.0
NIER-13	77.3	98.1	13.9	18	0	849	18.2
NIER-14	93.5	104.5	14.7	16	0	917	23.8

## 2) NIER 차속모드의 연료소모량 산출결과

각 모형을 이용하여 NIER 차속모드의 단위거리 연료소모율(L/km)을 산출한 결과는 Table 4와 같다. 가장 먼저 주목할 점은 국내모형 중 KR-1과 KR-2의 경우 NIER-1과 NIER-3 차속모드와 같이 지정체가 심하여 공회전 비율이 높은 경우 다른 모형에 비하여 상대적으로 아주 적은양의 연료를 소모하는 것으로 산출되었다. 이는 두 모형의 구조에서 기인하는 것으로, Equation(6)에서 보는 바와 같이 속도가 0인 경우 연료를 전혀 소모하지 않는 것으로 계산하기 때문이다. 또한 이러한 이유로 인해 저속의 차속모드에서의 모형들 간의 연료소모량 변동계수가 고속모드에 비하여 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. NIER-13 차속모드의 연료소모율 산출결과에서 보는 바와 같이 상대적으로 공회전 비율이 없는 고속모드의 경우 모형들이 거의 유사한 결과를 보여, 변동계수의 값이 3%에서 10%로 저속모드에 비해 모형의 예측치간 변동이 적은 것으로 나타났다.

한편 차속모드별 연료소모량의 순위를 살펴보면 모든 모형들에서 공통적으로 중저속 차속모드 (NIER-1, -3, -5, -7, -9)의 경우 저속일수록 연료효율이 나쁜 것으로 나타났다. 반면 고속의 차속모드(NIER-12, -13, -14)의 경우 대체적으로 연료효율이 좋지만 모형에 따라 가장 연료효율이 좋은 차속모드에는 차이가 있는 것으로 분석되었다. 하지만 고속모드에서의 연료효율의 차이가 크지 않은 점을 감안한다면 교통류 소통상태의 상대적인 효율성 평가에는 어느 모형을 사용해도 타당한 결과를 보일 것으로 판단된다. 하지만 KR-1과 KR-2모형의 경우 저속모드에서 다른 모형에 비해 상대적으로 연료효율이 좋은 것으로 분석되므로, 사용에 주의를 기울여야 할 것이다.

**Table 4.** Fuel consumption(L/km) of NIER driving cycles

Classification	KR-1	KR-2	KR-3	VT-Micro	MOVES	CMEM	Avg	Std	COV
NIER-1	0.219	0.198	0.326	0.376	0.450	0.491	0.343	0.119	35%
NIER-3	0.151	0.139	0.179	0.200	0.226	0.244	0.190	0.041	22%
NIER-5	0.122	0.113	0.132	0.148	0.162	0.168	0.141	0.022	16%
NIER-7	0.106	0.099	0.106	0.123	0.127	0.131	0.115	0.013	11%
NIER-9	0.096	0.090	0.083	0.099	0.101	0.100	0.095	0.007	7%
NIER-12	0.077	<b>0.075</b>	<b>0.068</b>	0.074	0.073	0.070	0.073	0.003	5%
NIER-13	<b>0.075</b>	0.076	0.075	0.072	0.072	<b>0.069</b>	0.073	0.003	3%
NIER-14	0.076	0.082	0.079	<b>0.066</b>	<b>0.065</b>	0.074	0.074	0.007	10%

교통운영 혹은 교통소통 상황에 따른 총량적인 차량연료소모량을 산출하여 상대적인 효율성을 평가하는 것도 모형의 한 적용분야이지만, 에코드라이빙과 같이 차량의 주행패턴에 따른 순간적인 연료소모패턴을 분석하여 차량운행의 친환경성을 평가하는 것도 모형의 다른 적용분야이다. 이러한 분석이 가능하기 위해서는 모형이 차량의 순간적인 주행상태에 민감하게 반응하여야 한다. 즉, 차량의 속도와 가속도로 표현되는 운행패턴과 동시에 차량에 순간적으로 작용하는 공기저항, 경사저항, 구름저항에 따라 변화하는 힘에 민감하게 반응하여야 한다.



Figure 2는 NIER-14 차속모드 일부분의 속도, 비출력(Vehicle Specific Power: 이하 VSP라 한다) 및 연료소모량을 보여주고 있다. 비출력은 차량의 질량으로 표준화된 차량에 작용되는 힘으로 J. L. Jimenez에 의해 개발되었다 (Jimenez et al., 1999). 본 연구에서는 Equation(10)과 차량의 제원에 따라 결정되는 A, B, C 계수의 경우 일반적인 승용차가 가지는 값을 사용하여 VSP를 계산하였다.

$$VSP = \frac{Av + Bv^2 + Cv^3}{m} + va + 9.81\sin(\text{atan}(G))v \quad (10)$$

여기서, A는 구름저항계수, B는 회전저항계수, C는 공기저항계수, v는 속도(m/s), m는 질량(Tone), a는 가속도(m/s<sup>2</sup>), G는 도로경사도이다.

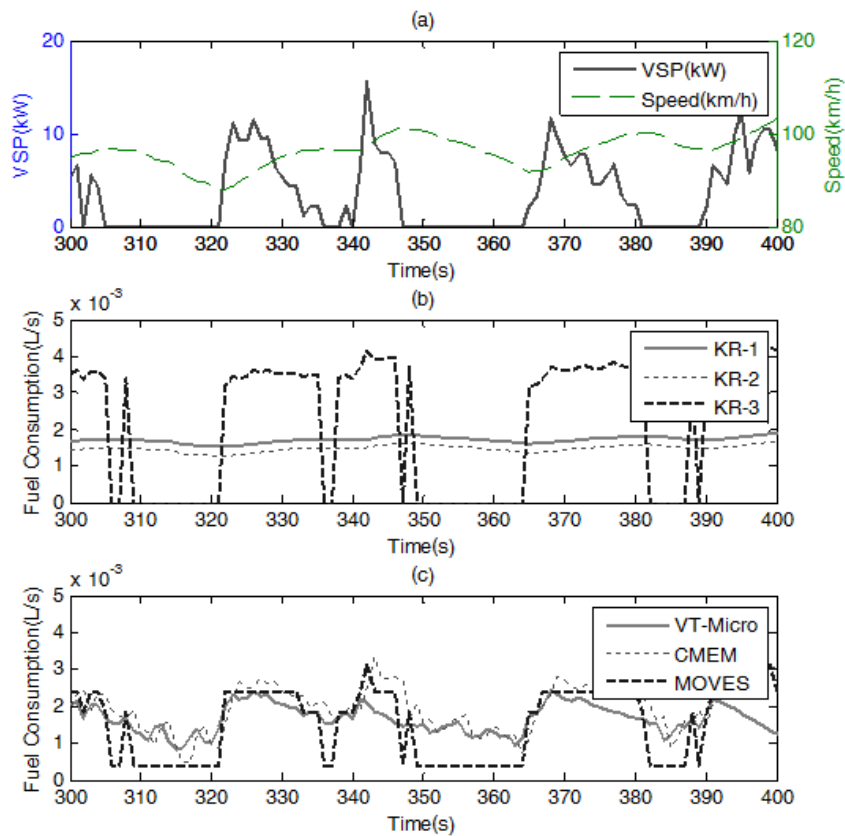


Figure 2. A sample of NIER-14

속도의 경우 88km/h에서 103km/h구간에서 증감을 보이고 있으며, 비출력은 주행패턴에 따라 0kW/Ton에서 15.4kW/Ton의 범위에서 변화를 보이고 있다. KR-1, KR-2모형의 경우 다른 모형에 비해 비출력에 민감하게 반응하지 못하는 것을 Figure2(b)와 (c)를 통해 명확하게 알 수 있다. KR-3모형의 경우 그래프의 마루와 골이 MOVES 모형과 유사한 패턴을 보이고 있으나 MOVES모형에 비해 연료소모량이 높게 산출되었으며, 감속 시에는 연료를 전혀 소모하지 않는 것으로 나타났다. 한편 VT-Micro와 CMEM모형의 경우 서로 상당히 유사한 패턴을 보이고 있으며, 두 모형 모두 비출력에 상당히 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 특히, 두 모형은 MOVES모형이 감속 시에는 일정한 연료소모율을 보이는 반면 감속 시에도 주행패턴에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다.

한편 Figure3은 NIER-14 주행 시 비출력에 따른 순간적인 연료소모량의 산포도로써, KR-1과 KR-2 모형의 경우 다른 모형들과는 다르게 비출력과 연료소모량의 뚜렷한 상관관계를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 또한 KR-3의 경우 연료소모량이 0 L/s인 예측치 들이 많고 대체적으로 다른 모형에 비해 연료소모율이 높은 것으로 나타났다. 한편 VT-Micro, MOVES, CMEM 모형의 경우 동일한 연료소모율에서 비출력의 변동하는 정도는 다소 차이가 있으나 뚜렷한 상관관계를 보이는 것으로 나타났다.

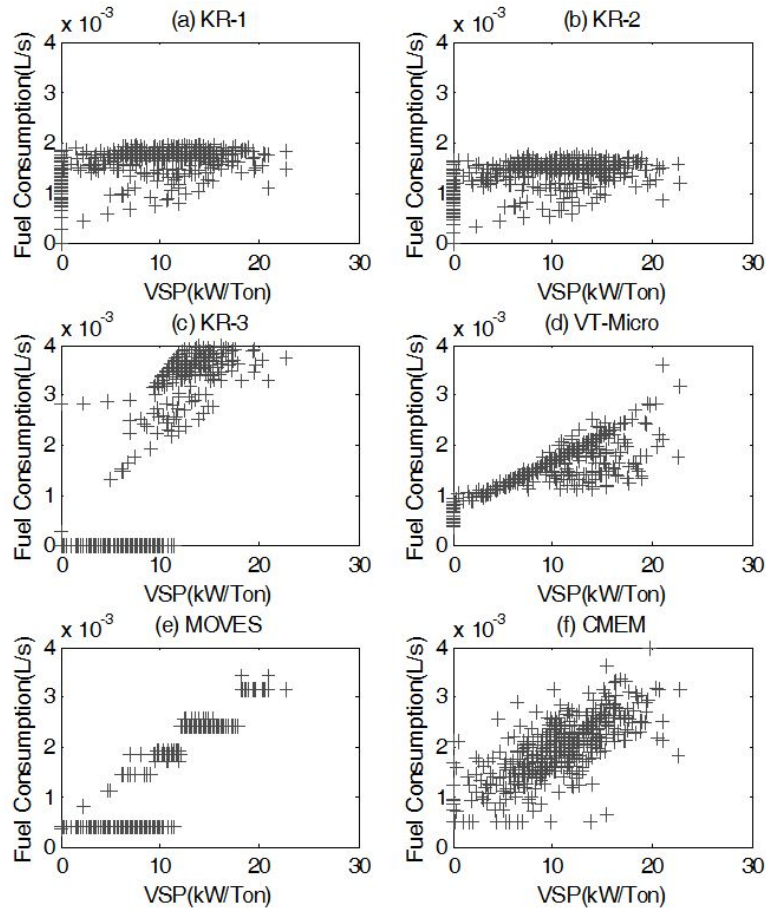


Figure 3. Fuel consumption as a function of VSP

각 모형을 이용해 예측한 NIER 차속모드의 연료소모량과 차량비출력의 상관관계를 정량적으로 알아보기 위하여 Table 5에 보는 바와 같이 상관계수를 산출하였다. KR-1과 KR-2 모형의 상관계수는 모든 NIER 차속모드에서 모두 0.49이하로 분석되어 저속과 고속모드 모두에서 상관관계가 약한 것으로 분석되어 미시적인 분석에 부적합한 것으로 판단된다. KR-3과 CMEM 모형의 경우 모든 상관계수가 0.65 이상으로 분석되었으며 KR-3모형이 좀더 명확한 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. VT-Micro와 MOVES모형은 가장 명확한 상관관계를 보이는 모형으로서 저속부터 고속모드까지 모든 영역에서 명확한 상관관계를 보이는 것으로 분석되었다. 이를 통해 순간적인 차량움직임의 친환경성분석과 같은 미시적인 분석을 위해서는 VT-Micro모형과 MOVES모형을 이용하는 것이 타당한 것으로 분석되었다.

**Table 5.** Correlation coefficients of fuel consumption and VSP

Classification	KR-1	KR-2	KR-3	VT-Micro	MOVES	CMEM
NIER-1	0.47	0.47	0.68	0.94	0.84	0.65
NIER-3	0.47	0.47	0.77	0.98	0.95	0.73
NIER-5	0.48	0.49	0.84	0.99	0.95	0.70
NIER-7	0.47	0.47	0.86	0.99	0.97	0.75
NIER-9	0.37	0.37	0.87	0.99	0.97	0.72
NIER-12	0.17	0.17	0.92	0.99	0.96	0.68
NIER-13	0.25	0.25	0.90	0.99	0.94	0.76
NIER-14	0.35	0.35	0.78	0.81	0.84	0.79

## 4. 시뮬레이션을 이용한 모형특성비교

### 1) 시뮬레이션 시나리오 개발

앞 절에서 NIER 차속모드를 이용하여 모형들을 비교하였으나, NIER 차속모드는 평균적인 차량운행특성을 가정하여 개발되어 다양한 교통상황에서의 차량운행특성을 종합적으로 반영하기에는 한계가 있다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위하여 시뮬레이션을 이용하여 다양한 교통상황에서의 차량의 운행행태를 모델링하고 궁극적으로 교통운영방안 평가 시 합리적인 모형을 도출하고자 한다.

구체적으로 미시교통류시뮬레이션 소프트웨어인 VISSIM을 이용하여 단일 4지 교차로에서의 세 가지 운영방안, 즉 신호운영, 비신호운영, 회전교차로운영을 모델링하였다. 동서도로와 남북도로는 모두 양방 2차로 도로로서 교차로의 접근부에 좌회전 및 우회전 전용차로가 없는 1차로로 운영되는 것으로 모델링하였다. 특히 회전교차로의 경우 회전교차로 설계지침상의 1차로형 4지 회전교차로 설계예시도의 제원을 적용하였다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2010).

교차로에서의 각 접근로별 교통수요는 시간당 100대, 350대, 600대로 설정하였으며, 좌회전, 직진, 우회전 교통류의 비율을 10%, 80%, 10%로 설정하였고 모두 승용차로 구성하였다. 이는 설계지침서상 시간당 1차로 평균 교통량에 따라 소통측면에서 바람직한 운영방안을 제시하고 있는데, 시간당 1차로 평균교통량이 100대일 경우 비신호 교차로가 권장되고, 350대일 경우 회전 교차로, 600대일 경우 신호교차로가 권장되기 때문이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2010). 따라서 본 연구에서는 시나리오를 설정함에 있어 세 가지 소통상태에 따른 연료소모량을 예측하고 각각의 모형이 대안평가에 있어 동일한 결과를 도출하는지에 대한 답을 얻고자 한다.

본 시뮬레이션 모형은 실제 교차로를 대상으로 한 것이 아닌 가상의 교차로를 대상으로 한 것으로, 대부분의 시뮬레이션 파라미터들은 디폴트 값을 사용하였으며, 차량 간의 우선권을 설정하는 파라미터 값의 경우 우선권에 맞게 조정하였다. 우선 화면을 통해 교통류 간 운행이 정상적으로 이루어지는지 확인을 하였으며, 그 이후에는 평균지체를 감안하여 희망속도(desired speed), 간격수락모형, 우선권과 관련된 파라미터 들을 조정하였다.

참고로 본 절에서 시뮬레이션을 수행하는 목적은 실제 현장에서의 교통류들의 소통상태를 동일하게 재현하는 것이 아니라, 다양한 소통상태에 따른 차량 연료소모모형의 입력자료를 준비하는 것으로, 본 논문에서 비교한 교통운영안의 효과를 종합적으로 판단하기 위해서는 별도의 연구가 필요하다. 시뮬레이션은 모든 차량이 네트워크에서 사라질 때까지 수행하였다.

### 2) 시뮬레이션 결과분석

시뮬레이션 수행을 통해 산출한 차량평균지체는 Table 6과 같다. 분석결과를 보면 접근로별 교통량에 따라 지체 측면에서 효율적인 운영방식이 다름을 알 수 있다. 접근로별 교통량이 100대인 경우 비신호운영이 7.1초/대로 가장 우수하고, 교통량이 350대인 경우에는 회전교차로 운영이, 교통량이 600대인 경우에는 신호운영이 가장 우수한 것으로 분석되었다.

**Table 6. Simulated average delay**

Volume (pcph)	Non-signal (s/pc)	Roundabout (s/pc)	Signal (s/pc)
100	7.1	8.9	37.1
350	187.3	39.2	42.6
600	191.1	92.2	73.9

한편 시뮬레이션을 통해 모든 교통수요를 처리했을 때의 연료소모량을 각 모형을 이용하여 산출한 결과는 Table 7과 같다. 주목해야 할 사항은 VT-Micro, MOVES, CMEM 모형은 접근로 별 교통수요가 100대인 경우 비신호운영이, 350대와 600대인 경우 신호운영이 연료소모 측면에서 가장 우수하다는 동일한 결론을 도출한 반면, KR-1, KR-2 모형의 경우 교통수요와는 상관없이 항상 신호운영이 가장 우수한 운영방안으로 분석되었다. KR-3 모형의 경우 교통수요가 100대인 경우에는 회전교차로가 우수한 운영방안으로 분석되었다. Table 7에서 진하게 표시된 부분이 연료소모량이 가장 적은 운영방안이다.

Figure 4는 신호운영시 연료소모량을 100%로 하였을 때 비신호운영과 회전교차로운영의 상대적인 연료소모량을 각 모형과 접근로의 교통수요별로 나타낸 것이다. 여기에서도 VT-Micro, MOVES, CMEM 모형의 경우 각각의 운영방안에 대한 상대적인 연료소모정도가 다소 차이는 있으나 매우 유사하고 일관된 것을 확인할 수 있는 반면, KR-1, KR-2, KR-3 모형은 다른 결과를 보이고, 특히 KR-3 모형의 경우 교통수요가 350대, 600대일 때 비신호운영의 상대적인 연료소모량이 다른 모형에 비해 월등히 많은 것을 확인할 수 있다.

특히 KR-1, KR-2 모형의 경우 다른 모형에 비해 총연료소모량이 매우 적게 예측되었는데, 예를 들면 교통수요가 100대이고 신호운영 시 다른 모형들의 평균소모량인 19.0L의 45%, 42%만 소모하는 것으로 분석되었다. 이와 같이 미시 시뮬레이션을 이용한 연료소모량의 효과 산정 시 KR-1, KR-2 모형은 다른 모형들과는 상이한 결과를 보이고 있어 시뮬레이션 분석에는 사용하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

**Table 7. Estimated total fuel consumption (L)**

Volume	Model	No-signal	Roundabout	Signal
100	KR-1	8.9	11.4	<b>8.5</b>
	KR-2	8.3	10.5	<b>8.0</b>
	KR-3	15.3	<b>14.7</b>	19.1
	VT-Micro	<b>14.4</b>	15.0	19.3
	MOVES	<b>11.1</b>	12.9	15.7
	CMEM	<b>15.5</b>	16.5	21.7
350	KR-1	53.8	45.6	<b>31.0</b>
	KR-2	49.0	41.7	<b>28.9</b>
	KR-3	290.3	106.6	<b>66.3</b>
	VT-Micro	208.8	86.2	<b>69.0</b>
	MOVES	175.3	71.2	<b>55.7</b>
	CMEM	277.1	104.6	<b>78.6</b>
600	KR-1	93.7	93.0	<b>56.4</b>
	KR-2	85.3	84.7	<b>52.3</b>
	KR-3	514.2	318.1	<b>145.8</b>
	VT-Micro	366.1	233.9	<b>150.1</b>
	MOVES	307.1	196.2	<b>124.9</b>
	CMEM	487.1	300.0	<b>179.3</b>

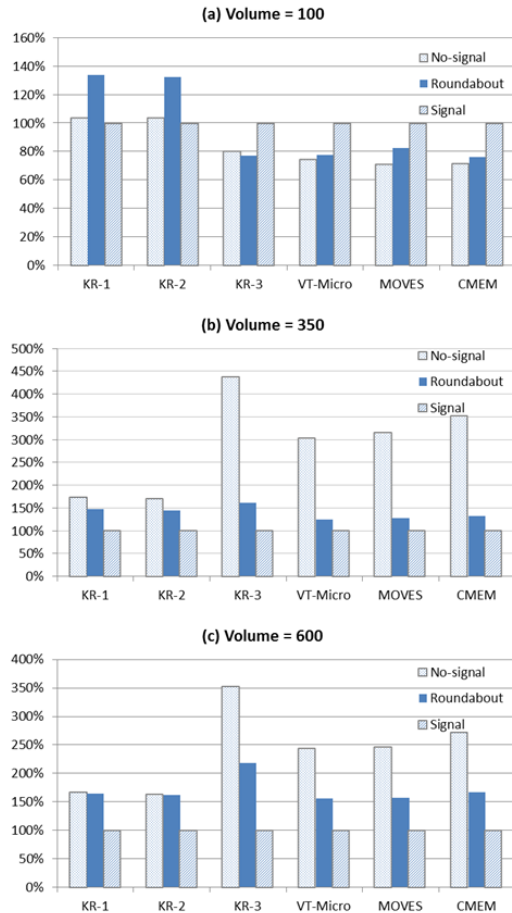


Figure 4. Relative differences in fuel consumption

## 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 교통정책, 교통운영전략 등 교통분야 친환경성 평가 시 모형선택을 위해 국내외에서 사용되고 있는 연료소모량 예측모형들의 특성을 정속주행, NIER차속모드, 미시교통류시물레이션 모형을 이용하여 분석하였다. 분석결과 정속주행과 같은 거시적인 분석의 경우 본 연구에서 사용한 모든 모형이 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

한편 차속모드 분석결과 국내에서 사용되는 모형인 KR-1과 KR-2모형의 경우 공회전이 많이 포함되어 있는 차속모드의 경우 연료소모량이 상당히 과소하게 예측되었으며, 순간적인 차량의 비출력에 민감하지 못한 것으로 나타났다. 또한 교통류 시물레이션 모형과 통합하여 대안을 평가함에 있어 다른 모형들과 상이한 결과를 보이는 것으로 분석되었다.

한편 KR-3모형의 경우 차량의 비출력에 민감하게 반응하나 공회전시 연료를 소모하지 않고 다소 과대하게 연료소모량을 예측하는 것으로 분석되었다. VT-Micro, MOVES, CMEM모형의 경우 NIER 차속모드를 이용한 실험 및 교통류 시물레이션 모형을 이용한 실험에서 연료소모량 절대값에서 다소의 차이를 보이기는 하나, 모두 유사한 결과를 보이고 있어, 친환경성의 상대평가에 적용하기에 무리가 없는 것으로 판단된다. 하지만 CMEM모형과 VT-Micro모형의 개발이 2000년대 초에 이루어진 점과 MOVES모형은 비교적 최근에 개발된 점을 감안하면 MOVES모형이 최근에 실제 도로상을 주행하는 차량들의 특성을 보다 잘 반영할 것으로 사료되어 바람직할 것으로 판단된다. 하지만 VT-Micro, CMEM, MOVES모형은 북미지역에서 운행중인 차량들의 특성을 반영한 모형으로



서 모형을 사용함에 있어 이러한 점을 감안하여야 할 것이며, 장기적으로는 국내에서 운행중인 차량들의 특성을 반영한 모형을 개발하거나 외국모형을 국내실정에 맞게 적용할 수 있는 방안을 연구하여야 할 것이다.

모형의 선택과 관련하여 KR-1, KR-2 모형의 경우 신호최적화, 램프미터링, 회전교차로운영, 혹은 최근 많은 연구가 진행되고 있는 에코드라이빙, 친환경 자율주행 등과 같은 미시적인 분석에 사용하기에 적합하지 않고, 도로건설 혹은 교통정책 변화의 친환경성 분석과 같은 거시적인 분석에만 사용하여야 할 것이다. 그 외의 모형의 경우에는 거시적인 분석과 미시적인 분석에 모두 사용할 수 있으나, 거시적인 분석의 경우 모형이 요구하는 입력자료의 양과 모형에서 예측 가능한 차종들을 고려하여 선택하여야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 도로에서 가장 많은 비중을 차지하고 있는 승용차에 한정하여 모형을 비교하였으므로 본 연구의 결과를 승용차 이외의 차량이 상당한 비중을 차지하고 다양한 차종으로 구성된 교통류의 친환경성 분석 시 적용하기에는 한계가 있다. 향후에는 승용차를 포함한 버스, 화물차 등의 차량들도 포함하여 모형들을 비교하는 것이 필요하며 향후 연구과제로 남겨둔다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by research fund from Chosun University, 2013.

## REFERENCES

- Boulter P., McCrae I. S. et al. (2007), A Review of Instantaneous Emission Models for Road Vehicles, TRL Limited.
- California Air Resources Board (CARB) (2014), EMFAC2014 User's Guide.
- Jimenez J. L., McClintock P. et al. (1999), Vehicle Specific Power: A Useful Parameter for Remote Sensing Andemission Studies, Ninth CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, CA.
- Korea Energy Economics Institute (2013), Analysis of Correlation of Transport Fuel and Automobile Fuel Economy.
- Korea Energy Economics Institute (2014), 2014 Yearbook of Energy Statistics.
- Korea Rail Network Authority and The Korea Transport Institute (2010), Revision of Railway Investment Evaluation Handbook.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), Roundabout Design Guidelines.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (2013), Regulations on Fuel Economy Tests, Rating and Labeling of Vehicles.
- National Institute of Environmental Research (2008), Building a Responding System to Climate Change: Greenhouse gas From Transport Sector (I).
- National Institute of Environmental Research (2009), Building a Responding System to Climate Change: Greenhouse gas From Transport Sector (II).
- Rakha H., Ahn K. et al. (2004), Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 9(1), 49-74.
- Scora G., Barth M. (2006), Comprehensive Modal Emissions Model(CMEM), Version 3.01 User Guide, Centre for Environmental Research and Technology, University of California, Riverside.
- US EPA (2014), Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) User Guide for MOVES2014
- Won M.-S., Gang G.-P. et al. (2011), A Estimation Model of The Fuel Consumption Based on The Vehicle Speed Pattern, J. Korean Soc. Transp., 29(4), Korean Society of Transportation, 65-71.