

평균차속을 이용한 교통부문 온실가스 배출량 산출 모형의 보완방향

김영호^{1*} · 홍성진¹ · 이태우² · 박준홍²

¹ 한국교통연구원 국가교통전략기획본부, ² 국립환경과학원 교통환경연구소

Improvement of the Emission model Based on Average Speeds in the Transportation Sector

KIM, Youngho^{1*} · HONG, Sungjin¹ · LEE, Taewoo² · PARK, Junhong²

¹ Dept. of Transportation Strategic Planning, The Korea Transportation Institute, Gyeonggi 411-701, Korea

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

Abstract

The transportation sector accounts for 33% of the total CO_2 emissions. Effective control measures for reducing CO_2 emissions are urgently needed to address global warming. Objective and reliable methods to estimate CO_2 emissions are a prerequisite for the implementation of such effective control measures. However, existing models have not been successful. Even though the average-speed model is one of the most convenient and useful methods for estimating CO_2 emissions, it cannot distinguish between a variety of roads as well as traffic conditions in the model. The results of this study found that there may be significant discrepancies between emissions estimated by the current average-speed model and those measured in real driving conditions. This paper proposed the subdivision of emission factors in the average-speed model depending on both traffic and road conditions.

교통부문에서 발생하는 CO_2 배출량이 전체 CO_2 배출 총량의 33%를 차지하고 있는 상황에서 지구 온난화를 방지할 수 있도록 교통부문 온실가스 저감 대책을 마련하는 것은 매우 중요하다. 효과적인 교통부문 온실가스 저감대책을 수립하기 위하여 자동차의 오염물질 배출량을 객관적이고 정확하게 산출할 수 있는 방법론 개발이 선행되어야 하지만, 현재까지 표준화된 교통부문 오염물질 배출량 산출 방법론이 정립되어 있지 못한 실정이다. 세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 평균 차속 모형은 빠르고 간편하게 대기오염 영향을 산출할 수 있다는 장점을 갖지만, 다양한 도로조건과 교통조건을 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 논문에서는 현행 평균 차속 모형을 통하여 산출된 배출량이 주행 여건에 따라 현실에서 발생하는 배출량과 많은 차이가 있음을 실제 데이터 분석을 통하여 확인하였으며, 향후에는 평균 차속 모형의 배출계수가 도로 유형과 교통 상황에 따라 구분될 필요가 있음을 제기하였다.

Key Words

Emission Model, Average-speed Model, Operation Mode-based Model, Road Type, Driving Conditions
배출량 산출 모형, 평균 차속 모형, 운전행태 기반 모형, 도로유형, 교통상황

* : Corresponding Author

ykim@koti.re.kr, Phone: +82-31-910-3279, Fax: +82-31-910-3228

1. 서론

지구는 간빙기와 빙하기를 거치며 주기적인 온도 변화를 보였지만, 근래와 같이 급격한 지구 표면 및 대기 온도의 상승은 그 유례를 찾아보기 힘들다. 최근 연구 결과 (Dieter Luethi et al. 2008)에 따르면 지표면의 온도는 대기 중의 CO_2 의 농도와 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 밝혀졌으며, 지구 온난화문제를 완화하기 위하여 대기 중의 CO_2 농도 조절이 가장 중요한 대책 중의 하나로 거론되고 있다. 교통부문에서 발생한 CO_2 배출량이 전체 CO_2 배출 총량의 33%를 차지하고 있는 상황에서 교통부문의 온실가스 저감 대책 개발이 매우 시급한 실정이다. 실효성 있는 교통부문 온실가스 저감대책을 수립하기 위하여 무엇보다도 자동차의 오염물질 배출량을 객관적이고 정확하게 산출할 수 있는 방안이 필요하지만, 현재까지 세계적으로 표준화할 수 있는 오염물질 배출량 산출 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다.

전 세계적으로 온실가스 배출량 산출과 관련된 연구는 1960년대에 시작되었으며, 독일, 영국, 미국 등 주요 국가들은 '기후변화에 관한 정부간 협의체 (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.)가 제안한 배출량 산출방식인 Tier system을 사용하고 있다. Tier system은 배출량 산출방법론의 복잡도에 따라 Tier 1, Tier 2, Tier 3로 구분된다. 복잡도가 가장 높은 Tier 3 방법론은 연료타입, 운송수단의 종류, 촉매전환기 부착유무, 운전조건에 따른 배출계수(Emission factor)¹⁾와 활동도(Activity data)²⁾ 자료를 활용하여 온실가스 배출량을 산출한다.(IPCC, 2006) Tier 3 방법론 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 배출량 산정모형은 COPERT, MOBILE, EMFAC 등에서 사용하는 "평균 차속 모형 (Average-speed model)"이다. 이 모형은 대상 차량의 평균 주행속도 (km/h)의 함수 형태로 표현한 표준 배출계수와 활동도를 사용하여 단위 주행거리 당 오염물질 배출량(g/km)을 산출한다 (Robin Smit et al, 2010). 평균 차속 모형은 광역적이고 장기적인 배출량 산출에 적절히 활용될 수 있는 반면, 국지적인 공간에서 시간에 따른 교통류 변화가 빈번하게 발생하는 경우 배출량 산출의 정확성이 현격히 떨어진다.

평균 차속 모형과는 달리, 미국 환경보호청의 MOVES

모형은 기본 배출율 (base emission rates, g/s)을 활동시간과 결합하여 배출량을 산출한다 (EPA, 2011). MOVES의 기본 배출율은 차속, 가속도, VSP (Vehicle Specific Power)와 같이 차량의 운전 조건을 잘 표현할 수 있는 변수를 이용하여 운전 행태(operation modes)를 영역별로 구분하고, 이 영역에서의 오염물질 배출율을 계수 형태로 모형화한 것으로서, 차량의 배출가스 측정 시험을 통해 확보한다. MOVES와 같이 차량 운전행태의 배출율과 활동시간을 이용한 운전행태기반 (operation mode-based) 배출량 산정 모형은 교통특성을 보다 자세하게 반영하여 현실적인 배출량을 산정할 수 있다. 그러나 정보통신기술의 급격한 발달로 인하여 개발차량의 주행패적 자료의 취득은 가능하지만, 모든 차량의 궤적 자료를 수집하는 것은 현실적인 측면에서 많은 제약이 따른다. 따라서, 대상 지역의 배출총량을 산출하기 위하여 평균 차속 모형을 사용하는 것이 현실적인 측면에서 타당하다. 그러나 평균 차속 모형은 도로 및 교통상황에 따라 정확도 측면에서 많은 한계를 가지고 있기 때문에 다양한 조건에서 평균 차속 모형의 정확도를 높인다면 도로교통에서 발생하는 배출가스 총량을 산출하는데 매우 유용할 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 다양한 도로, 교통조건에서 산출된 교통자료를 평균차속모형과 운전행태기반모형에 적용하여 예측 정확도가 현저히 떨어지는 조건을 산출함으로써 평균차속모형의 한계점을 진단하고 향후 보완이 필요한 부분에 대한 개선 방향을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 도로교통부문의 온실가스 배출량 산출 관련 선행 연구 검토, 미시적 방법에 의한 배출량 산출, 미시적배출량 모형과 거시적 배출량 모형의 정확성 분석 및 비교, 거시적 모형의 보완방향 제시로 이루어져 있다.

II. 선행연구 검토

도로교통부문의 온실가스 배출량은 개별차량의 주행 궤적을 기초로 하는지 또는 교통류의 거시적 변수를 활용하여 산출하는지에 따라 거시적 모형과 미시적 모형으로 분류할 수 있다. 거시적 모형은 단위 구간을 주행한 차량의 평균속도 변수만을 고려하여 배출량을 산출하는

1) 배출계수(Emission Factor)는 단위 활동 당 가스의 배출 또는 흡수를 정량화하는 계수이다.

2) 활동도 (Activity data)란 특정 기간 동안에 발생하는 배출 또는 흡수를 야기하는 인간 활동의 크기에 대한 자료이다. 주어진 작동 조건 하에 주어진 활동 수준에 대한 대표성 있는 배출량을 개발하기 위해 평균화된 수치이다.

방법이다. 미시적 모형은 고려하는 변수와 산출 방법에 따라 다양한 모형이 개발되어 사용 중에 있다. 본 절에서는 거시적 모형 중의 하나인 평균 차속 모형과 미시적 모형의 일종인 MOVES 모형과 미시적 배출을 맵을 이용한 모형에 대하여 살펴본다.

1. 거시적 배출량 산출 모형

거시적인 수준에서 배출량 산출은 대상구간을 통과하는 총 차량대수와 평균주행속도에 대응되는 거시적 배출계수를 곱하여 산출된다. 거시적 배출계수는 평균주행속도에 따라 온실가스 배출량을 표현하는 함수 형태로 표현된다.

영국의 TRRL model은 영국의 대기오염 측정 기법인 DMRB(Design Manual for Roads and Bridges)를 기본으로 한 가장 간단한 거시적 배출량 산출 방법이다. 이 모형은 일산화탄소(CO) 배출량을 차량평균속도와 교통량의 비례함수로 정의하며 다른 오염원(HC, NO_x, Pb)에 대해서도 유사한 관계식으로 표현한다. 속도에 따른 배출량의 편차를 반영하기 위해 각 속도별 보정계수를 적용하며 차종은 휘발유와 경유로 제한한다. 일산화탄소 배출량의 속도별 보정계수는 일반적으로 저속에서는 높은 값, 고속에서는 낮은 값을 사용하며, 시속 80km/h 이상에서는 비슷하거나 약간 증가하는 모습을 보인다.

미국의 MOBILE 모형은 미국의 EPA(Environmental Protection Agency)의 배출을 맵으로 8가지의 차량 범주를 구분하여 다양한 조건(주위 온도, 평균속도, 휘발성)을 고려한 배출 수준을 제공한다. 이 모형은 VOC(휘발성 복합체), CO(일산화탄소), NO_x(질소산화물)의 배출량을 계산하며 오염물질의 양은 [g/mile] 형식으로 산출된다. 배출량을 산출하기 위해 움직이는 차량의 평균속도를 입력하는데 이는 단순히 총 이동거리를 총 통행시간으로 나눈 값을 적용한다.

국토해양부의 교통시설 투자평가지침(2009)에서 제시하는 방법론은 차량의 배출량 및 크기를 고려하여 승용차, 버스(소형, 중형, 대형), 트럭(소형, 중형, 대형) 총 7개의 차종으로 구분한다. 오염원의 구분은 CO, NO_x, HC, PM, CO₂ 5개로 구분되며 거시적 수준의 차종별, 오염원별 해당 평균속도에 대응하는 오염물질 배출계수 [g/km]를 표 형식으로 제시하고 있다. 위와 같은 다양한 평균 차속 모형은 빠르고 간편하게 대기오염

영향을 산출할 수 있다는 장점이 있어 대규모 교통시설 사업 시행시 발생할 것으로 예상되는 배출가스를 추정하는데 널리 사용되고 있다. 그러나 차량의 다양한 속도변화와 교통상황을 반영하지 못하는 한계가 있다.

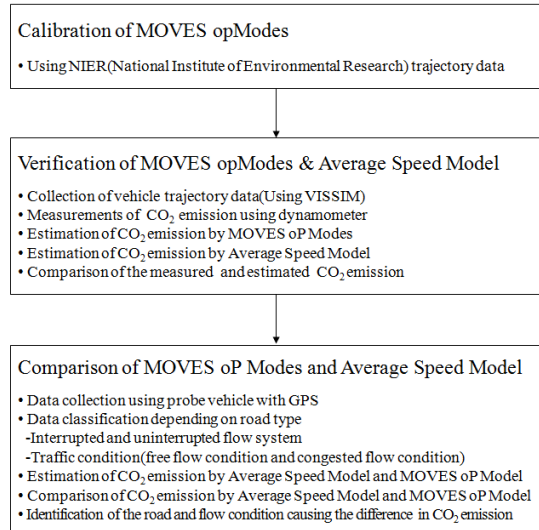
2. 미시적 배출량 산출 모형

총 차량대수와 평균통행속도를 이용하는 거시적인 산출방법론과 달리 개별차량의 구체적인 행태를 이용하여 배출량을 구하는 방법이 미시적 수준의 배출량 산출 모형이다. 미시적 수준의 배출량 산출 모형 중 가장 대표적인 것이 운전행태기반모형(MOVES 모형)과 미시적 배출을 맵을 활용한 모형이다. 미국 환경보호청의 운전행태기반모형(MOVES 모형)은 매 초단위로 차량의 속도와 도로 구배에 따른 주행상황을 반영하여 배출량을 예측한다(EPA, 2009). 이 모형은 엔진 부하에 따른 배출량의 관계를 나타내는 VSP(Vehicle Specific Power)라는 개념을 근본으로 한다(Zhai et al., 2008). VSP를 근간으로 하는 배출량 산출 모형은 연료와 파워트레인, 도로 유형을 고려하여 배출량을 예측하는 모형이다.

미시적 배출을 맵은 속도와 가속도에 따른 배출계수를 나타내는 행렬로써 일정시간 단위로 측정한 차량의 속도-가속도의 시간대별 변화와 결합하여 배출총량을 산출하는데 이용된다. 미시적 배출을 맵은 주행경로의 개념보다는 '해당주행 조건에서의 배출율' 개념을 갖기 때문에 일반적으로 [g/s]의 단위를 사용한다. 미시적 배출을 맵을 구축하기 위하여 다양한 도로, 교통상황을 포함하는 형태의 궤적자료나 분석하고자하는 대상지를 미시적 교통 시뮬레이션으로 구현하여 주행궤적자료를 확보한다. 주행궤적자료가 확보되면 시험차량을 통해 주행궤적자료와 동일하게 운행하여 배출가스를 포집하고, 포집된 가스는 배출가스 측정장비를 통해 농도와 질량을 분석하며 이 결과를 토대로 특정 속도-가속도 상황에서의 배출계수를 각각 산출, 조합하여 행렬화한다. 분석대상지의 단위시간당 속도, 가속도 정보를 수집하면 속도-가속도의 2차원 행렬로 표현하여 각각의 교통상황에 따른 배출량을 합하여 총 배출량을 산출한다(Park, 2005). 박진영은 교통네트워크에서 다양한 주행상태에 따른 배출량 측정이 가능한 미시적 배출을 맵을 개발하였다. 미시적 시뮬레이터인 VISSIM을 통해 주행궤적자료를 확보하고 실제 차량주행을 통한 배출량 측정방법을 통합하는 방법으로 수행되었으며, 실험 구간과 동일한 SCOOT 교

통데이터 결과와 비교하여 유의수준안에 포함되는 결과를 산출하였다.(Park, 2007)

그러나 모든 차량의 궤적 자료를 수집하는 것은 현실적으로 많은 제약이 따르기 때문에, 평균 차속 모형을 사용하여 배출총량을 구하는 것이 현실적으로 타당하다. 현실적인 평균 차속 모형을 제시하기 위하여 현재 사용되고 있는 평균 차속 모형이 어떤 한계를 갖는지를 파악하여 평균 차속 모형의 개선방향을 제시하는 것이 필요하다. 현재까지 동일한 주행 시나리오를 바탕으로 실제 배출가스 측정결과를 이용하여 거시적 산출방식과 미시적 산출방식을 비교 분석한 후 거시적 산출방식의 개선방향을 도출한 연구는 시도되지 않았다. 다음은 본 연구에서 사용된 거시적 배출계수와 미시적 배출율의 도출 및 검증 과정이다.



<Figure 1> Outline of the research

III. 자료수집 및 운전행태기반모형의 신뢰성 검증

1. 개요

본 연구는 거시적 배출량 산출 모형과 미시적 배출량 산출 모형을 비교한 후 거시적 배출량 산출 모형의 개선점을 제시한다. 본 연구에서 사용된 거시적 배출량 산출 모형은 교통시설 투자평가 지침에서 제시된 평균 차속 모형을 사용하였으며, 미시적 배출량 산출 모형은 운전행태기반모형(MOVES 모형)을 사용하였다. 평균 차속 모형의 배출계수는 교통시설 투자평가 지침에 제시된 값을 활용하고, 운전행태 기반 모형의 기본 배출율(base emission rates)은 우리나라 조건에 맞는 값을 본 논문을 통하여 도출하였다. 본 논문의 자료 분석은 다음과 같이 3 단계로 이루어졌다.

첫째, 기본 배출율은 각 국가별로 다르게 제시되어 있으므로, 국내 배출량 예측에 MOVES 모형을 그대로 사용할 수는 없다. 본 연구를 위해 국내 소형 경유 트럭의 오염물질 측정결과를 MOVES 모형의 운전행태 정의를 준용하여 우리나라에 적합한 기본 배출율을 도출하였다.

둘째, 투자평가지침의 평균 차속 모형과 운전행태기반모형의 정확성을 검증하기 위하여 미시적 시뮬레이터인 VISSIM(Ver 4.30)을 통하여 다양한 상황에서 차량 주행궤적을 도출하고, 이 주행궤적에 따라 차대동력계를 작동시켜 실제 배출량을 측정하였다. 이 값을 교통시설 투자평가지침의 평균차속 모형과 운전행태 기반 모형에 의

한 배출량과 비교하여 두 모형의 정확도를 측정하였다.

셋째, 평균 차속 모형의 보완방향을 제시하기 위하여 서울시 도로를 주행한 택시차량의 속도자료를 입수하여 운전행태 기반 모형과 평균 차속 모형에 적용하고, 어떤 도로 및 교통 상황에서 평균 차속 모형과 운전행태 기반 모형의 배출량 값에 차이가 발생하는지 분석하였다.

2. 기본 배출율의 도출

기본 배출율이란 차량의 운전 행태(operation modes)에 따라 도출된 배출계수로 오염물질의 시간당 배출량 [g/sec)을 나타낸다. 분석 대상 차량의 주행궤적으로부터 각각의 운전 행태로 주행한 시간으로 표현되는 주행근간 활동도가 구해지면, 오염물질 배출총량은 기본 배출율과 주행근간 활동도 곱의 총합으로 구해진다.

본 연구의 운전행태기반 모형에 사용된 기본 배출율은 차량 시험을 통해 측정된 매초당 배출율을 순간 차속과 가속도, VSP값으로 정의된 총 23개의 운전행태로 분류하고 재조합하여 작성하였다. 운전행태는 MOVES 모형의 운전행태에 대한 정의를 준용하였다(EPA, 2009). 일반적으로 VSP는 kinetic energy, 도로의 구배, 타이어의 구름 마찰력, 공기저항을 고려하여 산출되지만, 본 연구에서는 연구대상지의 특성(특히 서울도시고속도로)을 고려하여 구배에 의한 영향을 생략하여 실험하였다.

본 연구에서 이용된 소형 경유 트럭(배기량 2497cc

의 2005년형 소형 경유 트럭 : 현대자동차 포터Ⅱ)의 VSP는 다음과 같이 정의된다 (Frey et al. 2006).

$$VSP = v \times [1.1 \times a + 9.81 \times (\sin(\tan^{-1}(\phi))) + 0.132] + 0.000302 \times v^3$$

여기서,

VSP : vehicle specific power (kW/t)

v : 주행속도 (m/s)

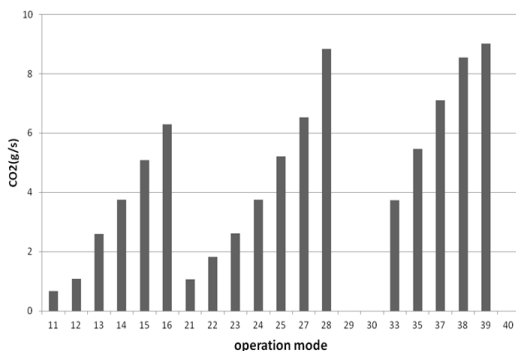
a : 가속력 (m/s²)

ϕ : 도로구배 (%)

차대동력계 상에서 시험차량 (Euro-3 수준의 소형 경유 트럭)을 주행하며 이 때 배출되는 매초당 배출가스를 이동식 배출가스 측정장비 (PEMS)를 이용하여 측정한다. 시험용 주행궤적으로는 국내의 주요 도로별 주행궤적을 모사하여 차속별로 분류시켜 만든 국립환경과학원 주행궤적 (Y. Lee et al., 2002) 9개를 사용하였고 CO₂, CO, HC, NO_x 4개의 오염원을 대상으로 기본 배출율을 개발하였으며 실측데이터 분석에 활용한 CO₂의 기본배출율은 (Figure 2)와 같이 도출되었다. 국립환경과학원 주행궤적 자료로 도출한 기본 배출율에는 operation Mode 29, 30, 40의 자료가 관측되지 않았다. 향후 실측데이터와 운전행태기반 모형을 이용하여 배출량을 산출할 때 해당 operation Mode가 포함되는 시나리오는 삭제하여 분석하였다.

3. 운전행태기반 모형과 평균 차속 모형의 신뢰성 검증

앞의 과정을 통하여 도출된 운전행태기반 모형의 기본 배출율과 평균차속모형을 시뮬레이션으로부터 취득한



<Figure 2> Basic Emission Rate for CO₂ depending on the MOVES operation mode

주행궤적에 적용하여 신뢰성을 검증하였다. 즉 시뮬레이션으로부터 도출된 주행궤적을 운전행태기반 모형과 평균차속모형에 적용하여 배출량을 산출하고, 차대동력계를 활용하여 실측배출량을 산출하였다. 두 모형으로부터 산출한 배출량과 실측배출량을 비교함으로써 신뢰성을 검증하였다.

1) 신뢰성 검증을 위한 시나리오 구성

운전행태기반 모형과 평균 차속 모형의 정확성 검증에 활용한 차량의 주행궤적을 도출하기 위하여 미시적 시뮬레이터인 VISSIM(Ver 4.30)을 활용하였다. 경부고속도로 서울 영업소를 통과하는 차량을 하이패스와 일반톨게이트(발권을 위한 대기행렬 길이에 따라 0m부터 1km까지 100m 단위로 11개)로 구분하여 고속주행과 감가속, 정체 상황의 특성을 다양하게 나타내는 시나리오 12개로 구성하였다. 즉 하이패스를 통과하기 위해 속도를 줄이는 시나리오와 일반톨게이트 발권을 위해 stop-and-go 상황을 겪는 연장에 따라 변화되는 배출량을 고려하여 고속주행, 저속주행과 감가속 정도와 길이, 정체상황, 대기행렬 길이 등 다양한 조합의 교통상황이 포함되도록 시나리오를 구성하였다. 시뮬레이터로부터 도출된 주행궤적을 차대동력계에 입력하여 실제 차량이 주어진 환경에서 주행할 때 발생하는 배출가스를 포집하였으며, 이 결과는 동일한 주행궤적 자료를 운전행태기반 모형과 평균 차속 모형을 이용하여 산출된 결과와 비교하였다.

2) 평균차속모형

본 연구에서 활용한 평균 차속 모형은 투자평가지침에서 교통부문 사업의 시행에 따른 환경영향의 측정을 위해 표준으로 제시하고 있는 거시적 수준의 배출계수를 사용한다. 이 계수는 한국환경정책평가연구원에서 수행한 “육상교통수단의 환경성비교분석”(2002) 연구를 통해 산출된 표 형식의 배출계수로써 7개(승용차, 소형버스, 중형버스, 대형버스, 소형트럭, 중형트럭, 대형트럭)의 차종과 5개(CO, NO_x, HC, PM, CO₂)의 오염원별로 단위구간 1km에 해당하는 평균속도만을 고려하여 배출계수(g/km)를 제시하고 있다. 본 연구에서 사용된 차량은 소형트럭으로 거시적 방법의 산출에 활용된 배출계수는 (Table 1)과 같고, 평균속도별로 CO₂의 배출계수를 표현하면 (Figure 3)과 같다.

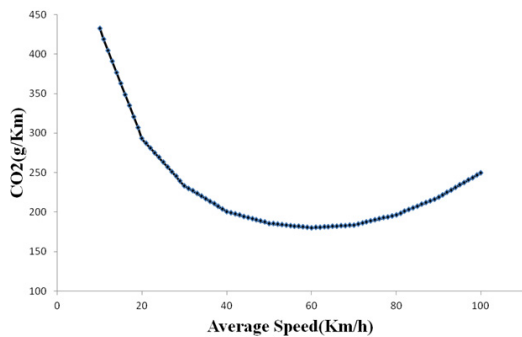
3) 운전행태기반모형의 신뢰성 검증 결과

시뮬레이션을 통해 확보한 총 12개의 시나리오에 대하여 차대동력계를 이용하여 도출한 실측치와 운전행태기반모형, 평균차속모형에 적용하여 예측한 결과를 비교하였다. 각각의 시나리오 대하여 운전행태기반 모형의 배출량 산출 결과(y축)를 실측치(x축)와 정량적으로 비교하면 <Figure 4>와 같다. CO_2 와 NO_x 에 대해서는 운전행태기반 모형의 배출량 값과 실측 배출량이 거의 일치하고 있으나, CO , HC 의 경우 대기행렬이 길 경우 모형이 실측치에 비해 과소평가 되었다. 이는 시험차량에 부착된 DOC라는 산화촉매가 운전조건에 따라 CO 와 HC 의 배출을 저감하는데, 운전행태기반 모형에서 고려하고 있는 속도, 가속도, VSP 변수만으로는 이러한 영향을 반영하는데 한계가 있기 때문에 실측값과 모형을 통한 산출 값에 차이가 발생된 것으로 분석된다. 즉, 운전행태기반모형의 기본 배출율은 고속고부하 영역에서 저감효율이 높고, 저속저부하 영역에서 저감효율이 낮은

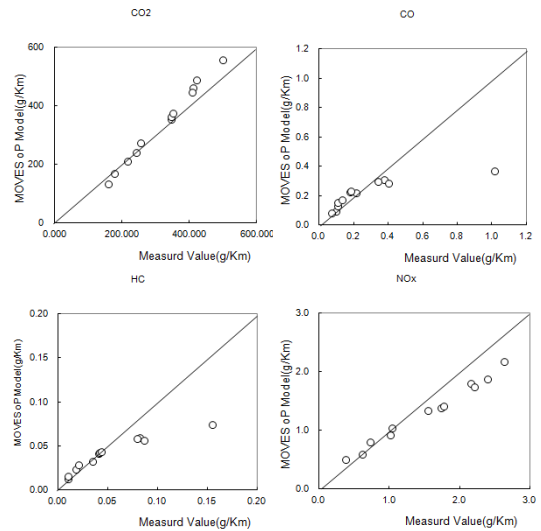
DOC의 영향을 평균하여 산출한다. 이는 배출량이 많아지는 대기행렬이 긴 경우의 측정결과를 낮게 예측하여 <Figure 4>와 같은 결과를 나타내는 것으로 분석된다. 그러나 운전행태기반 모형을 이용하여 CO_2 를 산출할 경우, 최소자승법을 사용하여 분석한 결과 $R^2=0.9936$ 로 실측 데이터와 일치하는 것으로 확인되었다. DOC의 영향을 거의 받지 않는 CO_2 와 NO_x 에 대하여 예측력이 우수한 점을 감안할 때, 이 결과는 운전행태기반모형의 기

<Table 1> Emission Factor of Average Speed Model (unit : g/km)

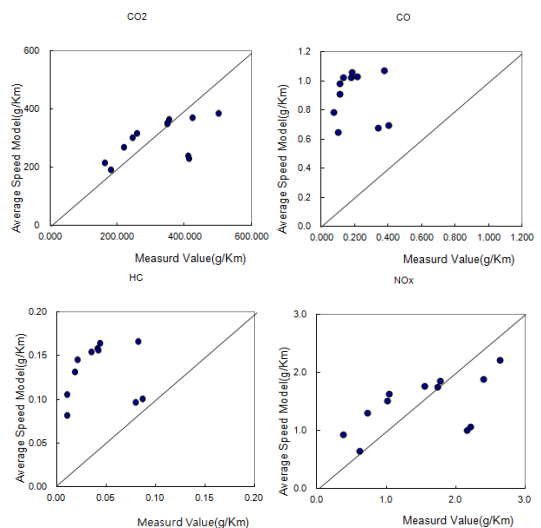
Type	Speed (km/h)	CO_2	NO_x	HC	PM	CO_2
Light	10	1.370	2.539	0.223	0.208	432.384
	20	1.048	1.558	0.156	0.175	282.860
	30	0.896	1.171	0.126	0.159	233.174
	40	0.802	0.904	0.109	0.148	200.422
	50	0.736	0.771	0.097	0.140	185.550
Truck	60	0.686	0.678	0.088	0.134	179.918
	70	0.646	0.625	0.082	0.129	183.526
	80	0.614	0.612	0.076	0.125	196.374
	90	0.586	0.639	0.072	0.121	218.462
	100	0.563	0.706	0.068	0.118	249.790



<Figure 3> Emission Factor of Average Speed Model (CO_2)



<Figure 4> Comparison of the Measured Value and MOVES oP Model



<Figure 5> Comparison of the Measured Value and Average Speed Model

본배출율을 사용한 배출량 계산방법의 문제점을 나타내는 결과가 아니며, 그 보다는 본 연구에서 사용한 기본 배출율이 반영하고 있는 차속과 가속도 이외의 제 3의 변수인 DOC 저감효율의 고려 필요성을 보여주고 있는 의미있는 사례로 간주할 수 있다.

반면에, 평균 차속 모형의 배출량 값을 실측 배출량과 비교하면 <Figure 5>와 같다. 그림의 x축은 실측배출량이고 y축은 평균 차속 모형의 배출량 값이다. 모형에 의한 CO₂ 배출량 값이 다른 물질에 비하여 실측치에 접근하고 있으나, 이마저도 상당한 차이가 나타났다. 평균 차속 모형은 일반적으로 대표적인 주행패턴을 선정하여 배출계수 산출용 시험모드를 개발한 후 이를 주행 시험용 차량을 통해 주행하여 배출량과 평균차속과의 관계를 산출하기 때문에, 본 연구와 같이 시공간 해상도가 높은 경우 예측결과에 상당한 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

IV. 평균차속모형과 운전행태기반 모형의 비교

1. 자료의 수집

시물레이션으로부터 도출된 주행계적자료를 이용하여 모형을 통하여 산출된 배출량 값과 실제 측정한 배출량과의 절대백분율오차평균(MAPE: Mean absolute percentage error)을 산출하면 운전행태기반 모형의 경우 8%, 평균차속모형은 20%로 나타났다. 본 절에서는 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형을 다양한 조건에서 비교함으로써 어떤 상황에서 많은 차이가 발생하는지 확인하고자 한다. 즉 신뢰성이 검증된 운전행태기반 모형을 실측치로 간주하여 동일한 시나리오에 대하여 평균차속모형은 어떠한 특성을 보이는지 분석하였다.

분석에 활용된 자료는 SK M&C가 2011년 4월 22일과 4월 23일에 걸쳐 이들 동안 서울 시내 연속류 구간(올림픽 대로)과 단속류 구간(서울시 성북구 회화동부터 도봉구 쌍문동까지)을 주행한 택시의 위도와 경도이다. 기하구조 및 운전 특성, 교통상황에 따른 배출량 추이를 분석하기 위하여 수집된 차량의 위치자료를 5개의 시나리오로 구분하였다. 시나리오의 구성은 연속류 구간에서는 교통상황에 따라 자유류, 혼잡류, Stop & go 상황으로 구분하고, 단속류 구간은 자유류, 혼잡류로 구분하였다. 이 과정에서 80개의 분석 단위 구간 중 평균차속모형에서 제공하지 않는 속도구간(10km/h 이하와 100

km/h 이상인 구간)을 제외하여 최종 68개의 분석 구간을 도출하였다. 68개의 분석 구간은 단속류 정체 구간 8km, 소통원활구간 24km, 연속류 정체 혹은 stop-and-go 30km, 소통원활구간 6km로 구성되었다.

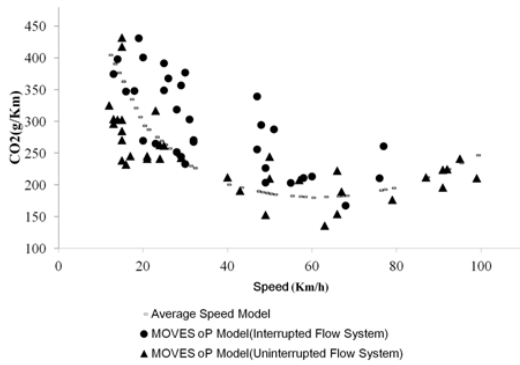
2. 자료의 가공 및 분석방법

차량계적자료는 GPS단말기를 설치한 시험차량들(probe vehicles)이 도시고속도로와 시내도로에 걸쳐 총 연장 80km 구간을 운행할 때 3초 간격으로 수집된 속도자료를 가공하여 산출하였다. 수집된 자료를 이용하여 두 가지 방법에 의하여 배출량을 산출하였다. 첫 번째 방법은 단위구간(1km)별 평균 주행속도를 산출하고 평균 차속 모형을 이용하여 배출량을 산출하였고, 두 번째 방법은 같은 단위구간에서 초당 속도, 가속도, VSP 값에 해당하는 값을 운전행태기반 모형에 적용하여 예측된 배출량을 합산하였다.

평균 차속 모형과 운전행태기반 모형을 비교하기 위하여 서울시 도로에서 다양한 교통상황별로 1시간동안 주행한 차량들의 속도, 가속도 정보를 수집하여 실제 어떤 특성을 보이는지 분석하였다. 운전행태기반 모형의 배출량 산출 결과를 실측치로 간주하고, 현행 평균 차속 모형과의 차이를 분석하였다. 모든 오염원에 대하여 배출 특성을 분석하기에는 무리가 따르므로, 기후변화에 가장 큰 영향을 미치는 오염원인 CO₂만을 대상으로 분석하였다.

3. 평균속도 및 도로유형에 따른 배출량 비교

속도에 따른 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형의 배출량은 어떠한 경향을 보이는지 알아보기 위해 <Figure 6>과 같이 68개의 자료를 속도(X축)-CO₂ 배출량(Y축)관계에 표시하였다. 평균차속모형으로부터 도출된 배출량을 표시한 경우 앞서 제시한 교통시설 투자평가지침의 배출계수와 동일한 형태를 보이며 일정한 경향성을 보인 반면, 운전행태기반 모형은 해당 실험구간의 교통상황이나 주행상태에 따라 다양한 결과를 나타내었다. 특히 운전행태기반 모형을 평균 차속 모형과 비교하였을 경우 저속에서 차이가 크게 나타났고 고속에서는 차이가 작게 나타났다. 또한 운전행태기반 모형의 결과를 단속류와 연속류로 구분하여 평균차속모형 결과와 비교



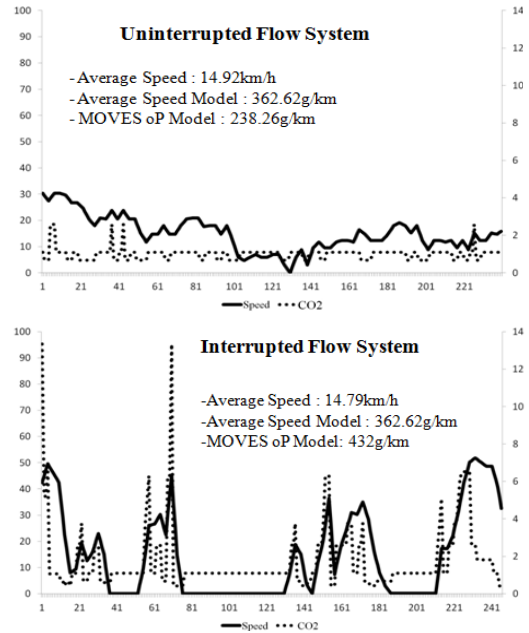
<Figure 6> Comparison of Average Speed Model and MOVES oP Model depending on the speed

한 결과, 단속류의 경우 신호제어로 인한 감가속 상황으로 인해 평균차속모형에 의해 예측된 배출량보다 더 많은 CO₂ 배출량을 보인 반면, 연속류의 경우 일정한 속도로 주행하는 운행특성 상 평균차속모형과 유사하거나 다소 적게 배출되었다. 즉, 도로유형(단속류 or 연속류)에 따라 평균차속모형으로부터 예측된 배출량과 실제 배출량은 일정한 패턴에 의한 차이를 나타낸다. 이는 도로 유형에 따라 평균차속모형이 구분되어야 한다는 것을 의미한다.

4. 주행계적을 통한 배출량 비교

두가지 모형으로 산출된 배출량에 많은 차이를 보이는 교통상황과 주행상태를 파악하기 위해 평균 차속 모형을 통한 배출량 산출 결과가 유사하면서 운전행태기반 모형을 통한 배출량 산출 결과가 큰 차이를 보이는 교통상황을 선정하여 분석하였다. 즉, 1km 단위로 시간에 따른 속도변화를 그래프화하여 해당 구간에서의 교통상황을 유추하고 속도의 변화폭 및 패턴에 따라 어떤 보완점이 있는지 도출하였다.

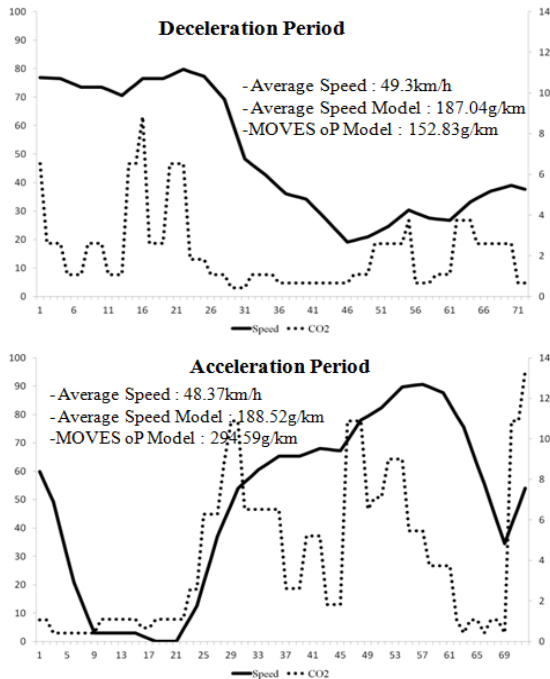
68개의 분석 자료 중 평균차속 모형의 배출량이 유사한 구간 (평균속도가 유사한 구간)을 추출하였다. 평균차속 모형은 평균속도만을 고려하기 때문에 평균속도가 유사하다면 유사한 배출량을 나타내지만 운전행태기반 모형은 속도와 가속도, VSP의 특성을 고려하기 때문에 같은 평균속도를 나타내더라도 교통상황이나 주행특성에 영향을 받게 된다. 따라서 일정한 평균속도를 나타내는 구간일 경우 평균 차속 모형의 배출량은 유사하지만, 운전행태기반 모형을 적용한 배출량에 차이가 많이 발생하



<Figure 7> CO₂ Emission depending on the Road Type

는 구간을 분류하여 교통상황 및 주행특성에 대하여 분석하였다. 아래의 그래프는 68개의 분석 구간 중 도로의 유형이나 주행특성 등에 따라 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형 결과 간에 특정한 경향성이 보이는 구간을 정리한 것이다.

<Figure 7>은 도로 유형에 따른 배출량의 차이를 나타낸 그래프이다. 평균 속도가 약15km/h이며 평균 차속 모형을 통한 배출량이 거의 동일하게 363g/km로 산출되었다. 그러나 위의 경우는 도시고속도로에서 stop & go를 반복하는 상황으로 운전행태기반 모형을 통하여 예측할 경우 238g/km이 산출되었으며, 아래의 경우 신호차로에서 신호대기를 한 후 가속과 감속을 반복한 경우로 약 432g/km이 산출되었다. 동일한 평균 속도이지만 신호차로 때문에 도시부에서 급격한 가감속을 수행할 경우 도시고속도로의 stop-and-go 상황에서 완만한 가감속을 반복할 때보다 약 2배 가량의 CO₂가 배출됨을 확인하였으며, 이는 Rakha and Ding (2001)에 의해 수행된 연구결과와 유사한 결과이다. 그러나 현행 평균 차속 모형으로는 이를 반영하지 못한다. <Figure 8>은 감가속 상황에 따른 배출량의 차이를 나타낸다. 실제 위의 상황은 정속주행과 감속주행을 한 반면 아래의 상황은 가속주행을 한 경우이다. 이때 역시 운전행태기



<Figure 8> CO₂ Emission during the Acceleration and Deceleration periods in the uninterrupted flow system

반 모형을 통해 예측할 경우 가속 상황이 약 2배 가량 많은 배출량을 보였다. 이와 같이 가속주행은 배출량 정도에 많은 차이를 보이지만 평균 차속 모형은 이를 반영하지 못하는 한계가 있다. 이 밖에 도로의 구배, ITS 시스템의 적용, 신호연동여부 등에 따라 배출량에 많은 변화가 발생하지만 평균 차속 모형은 이러한 변화를 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다.

V. 평균차속모형의 보완방향 제시

평균 차속 모형은 평균속도만을 고려한 예측방법으로 운전행태기반 모형 예측방법과 예측 정확성을 비교하기에는 무리가 있다. 그러나 ITS 교통제어장비 발전에 따른 주행 패턴 변화, 차량 성능 향상에 따른 감가속 능력 변화 등으로 인해 차량의 주행 패턴은 변화하였고, 향후에는 차량 주행 패턴이 더욱 급변할 것으로 예측된다. 이런 현실에서 기존의 평균 차속 모형으로 산출된 차량 오염물질 배출량은 현실과 많은 차이를 보이고 있다.

우리는 도로수송부문에서 효과적인 온실가스 저감 정책을 도출하고 실행하기 위하여 실제 도로 주행 자료를 수집하여 주행특성 및 도로 유형, 교통상황 등에 따른 배

출량 변화를 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형에 적용해 분석하였고, 향후 평균 차속 모형을 이용하여 배출량을 보다 정확하게 산출할 수 있도록 개선 방안을 제시하고자 한다.

첫째, 현행 평균 차속 모형은 차종과 속도별로 분류하여 배출량을 예측하고 있지만, 향후 도로의 유형에 따라서도 분류할 필요가 있다. 도시고속도로의 자료와 시내의 신호교차로의 자료를 분석한 결과 동일한 평균속도일지라도 도시고속도로에 비해 신호교차로에서 훨씬 더 많은 배출량을 보이는 것을 확인하였다. 이는 교통신호에 의하여 급격한 감가속이 발생하기 때문으로 추정된다. 따라서, 평균 차속 모형은 도로시설의 유형에 따라 연속류 시설과 단속류 시설로 구분하여 적용되어야 한다.

둘째, 주행상황에 따라 평균 차속 모형을 세분화할 필요가 있다. 실제 동일한 평균속도로 주행할지라도 그 상황이 가속상황인지 정속주행상황인지 감속주행 상황인지에 따라 배출량에는 많은 차이가 있다. 따라서 평균 차속 모형을 도로의 구배, 가속상황, 정속주행 상황, 감속주행 상황으로 분류하여, 향후 교통전문가가 배출량을 예측할 때 대상지에 따라 적합한 배출계수표를 사용할 수 있도록 해야 한다.

VI. 결론

본 논문에서는 교통부문 온실가스 배출량 산정 모형으로 가장 많이 사용되고 있는 거시적 배출량 산출 모형의 하나인 '평균 차속 모형'의 정확도를 제고하기 위한 개선 방안을 제시하였다. 평균 차속 모형은 대표적인 주행 패턴 대로 주행하는 차량의 배출계수에 기반한 모형으로 개별차량의 구체적인 행태에 기반한 미시적 배출량 산출 모형과 모형의 정확성을 비교하는 것은 무리가 있다. 그러나 ITS의 현장 적용에 따른 주행 패턴 변화, 차량 성능 향상에 따른 감가속 능력 변화 등 차량의 주행 패턴이 과거와 비교할 때 많이 변화하여 기존의 평균 차속 모형으로 산출된 차량 오염 물질 배출량이 현실과 많은 차이를 보이고 있다. 향후 이러한 차이가 더욱더 심화될 것이라는 측면에서 현재의 평균 차속 모형에 대한 개선의 필요성을 본 논문을 통하여 제기하였다.

현행 평균 차속 모형은 차종과 속도별로 분류하여 배출량을 예측하고 있는데 이와 같은 방식으로 배출량을 산출할 경우 현실에서 발생하는 배출량과 많은 오차가 있음을 실제 데이터 분석을 통하여 확인하였다. 따라서

향후에는 평균 차속 모형의 배출계수가 도로 유형과 교통 상황에 따라 구분하여 제시되어야 할 것이다.

본 논문은 동일한 주행 시나리오를 바탕으로 측정된 실제 배출가스 발생량을 이용하여 거시적 배출량 산출모형과 미시적 배출량 산출모형을 비교 분석한 후 실측데이터를 기반으로 거시적 배출 산출모형의 취약성을 진단하고 개략적인 개선방안을 제시하였다는 점에서 의미를 갖는다. 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형은 국가별로 모형 구조나 계수 측면에서 다소간 차이가 있기 때문에, 본 연구의 평균 차속 모형과 운전행태기반 모형으로부터 산출된 배출량 값 자체를 외국의 사례에 그대로 적용시킬 수는 없다. 그러나 거시적 모형과 미시적 모형의 구분이 개념적으로 동일하고 모형의 입출력 구조가 유사하기 때문에 본 논문의 결과를 향후 연구로 보완하여 정량화한다면 해외에서 사용되는 평균 차속 모형의 보완 방향을 제시하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. EPA, "Development of Emission Rates for Light-Duty Vehicles in the Motor Vehicle Emissions Simulator (DraftMOVES2009)". EPA420/P-09-002: AnnArbor, MI, 2009.
 2. Y. Lee, G. Kim, Y. Pyo, M. Sunwoo, M. Eom, "Development of chassis dynamometer test modes to derive the emission factors for light duty vehicles", Trans. of KSAE, Vol.10, No.6, pp.117-124, 2002
 3. Dieter Luethi, et al. (2008) "High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present", Nature 453, 379-382
 4. EPA (2011) "Inventory of U.S Greenhouse Gas Emission and Sinks : 1990-2009", EPA
 5. Jin Young Park (2005), "Microscopic Modelling of Air Pollution from Road Traffic", Graduation thesis of University of London Centre for Transport Studies, Imperial College London.
 6. IPCC, "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories"
 7. Robin Smit, Leonidas Ntziachristos, Paul Boulter(2010). "Validation of road vehicle and traffic emission models e A review and meta-analysis", Atmospheric Environment 44 (2010) 2943-2953
 8. Rakha, H.A. and Y.Ding (2001), "Impact of stops on vehicle consumption and emissions", 80th Annual Meeting of Transportation Research Board, Jan.2001, Washington DC. United States
 9. Frey, H.C.; Roupail, N.M.; Zhai, H. Speed- and facility-specific emission estimates for on-road light-duty vehicles based on real-world speed profiles. Transp. Res. Record. 2006, 1987, 128-137.
 10. Zhai, H.; Frey, H.C.; Roupail, N.M. A vehicle-specific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses. Environ. Sci. Technol. 2008, 42, 7985-7991.
 11. Jin Young Park, Robert B. Noland, John W. Polak (2007) "Microscopic Model of Air Pollutant Concentrations" Transportation Research Record 1750, Paper No.01-3099 64-73
 12. 한국개발연구원(2009) "교통시설 투자평가지침 제 3차 개정", 국토해양부
 13. 한국환경정책평가연구원(2002) "육상교통수단의 환경성비교분석"
- ✉ 주 작성자 : 김영호
 - ✉ 교신저자 : 김영호
 - ✉ 논문투고일 : 2012. 1. 5
 - ✉ 논문심사일 : 2012. 2. 13 (1차)
2012. 2. 25 (2차)
2012. 3. 13 (3차)
2012. 3. 19 (4차)
 - ✉ 심사판정일 : 2012. 3. 19
 - ✉ 반론접수기한 : 2012. 8. 31
 - ✉ 3인 익명 심사필
 - ✉ 1인 abstract 교정필