

## 개별 속도자료기반 도로구간 CO2 배출량 원단위 산정 방안

# Method for the evaluation of Unit Load of Road - Section CO2 Emission Based on Individual Speed Data

Chahgwaha Park<sup>a,1</sup>, Byoungjo Yoon<sup>b,\*</sup>, Hyunho Chang<sup>c,2</sup>

<sup>a</sup> Incheon National University, Incheon 406-772, Republic of Korea

<sup>b</sup> Incheon National University, Incheon 406-772, Republic of Korea

<sup>c</sup> Seoul National University, Seoul 406-772, Republic of Korea

### ABSTRACT

Global warming, mainly caused by CO<sub>2</sub>, is one of the on-going cataclysms of the human race. The nation-wide policy to reduce greenhouse gases (GHG) has been enforced, for which it is crucial to estimate reliable GHG emissions. The unit load of road-section CO<sub>2</sub> emission (URSCE) is a prerequisite for the evaluation of GHG emissions from road mobile source, and it is mainly computed using vehicular velocity source. Unfortunately, there is real-world limitations to collect and analyse representative speed data for nation-wide road network. To tackle this problem, a method for the evaluation of URSCE, proposed in this study, is based on a disaggregated way using big GPS vehicle data. The method yields more accurate URSCE than an current aggregated data based approach and can be directly employed for nation-wide road systems.

### KEYWORDS

Greenhouse Gases  
CO<sub>2</sub>  
Road Mobile  
Emission  
Big Vehicle-GPS  
Data  
Disaggregated  
Method

지구 온난화는 인류의 재앙이며, 그 주된 원인은 이산화탄소이다. 따라서 온실가스 저감을 위한 범국가적 정책이 수행되고 있으며, 정책의 수립/집행에 있어 정확한 온실가스 배출량 산정은 매우 중요하다. 도로이동오염원에 의한 온실가스 배출량 산정을 위해서는 도로구간 별 CO<sub>2</sub> 배출 원단위가 필요하며, 이는 차량의 속도자료를 이용하여 산정된다. 그러나 전국 도로망에 대한 속도자료의 수집 및 분석에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 방대한 양의 차량 내비게이션 자료를 이용한 비집계방식의 도로구간 CO<sub>2</sub> 배출량 원단위 산정방법을 제시한다. 제시된 방법론은 기존 집계방식에 의한 CO<sub>2</sub> 배출 원단위보다 정확하며, 전국 도로망에 직접적으로 적용이 가능하다.

온실가스  
CO<sub>2</sub>  
도로이동오염원,  
대용량 차량  
내비게이션 자료  
비집계 방식

© 2017 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

\* Corresponding author. Tel. 82-32-835-8778. Email. [bjyoon63@inu.ac.kr](mailto:bjyoon63@inu.ac.kr)

1 Tel. 82-32-835-8774. Email. [pcwgreen@inu.ac.kr](mailto:pcwgreen@inu.ac.kr)

2 Tel. 82-2-880-5666. Email. [nettrek@hanmail.net](mailto:nettrek@hanmail.net)

### ARTICLE HISTORY

Received Feb. 23, 2017

Revised Feb. 24, 2017

Accepted Mar. 29, 2017

## 1. 들어가기

온실가스(Greenhouse gases, GHG)에 의한 지구온난화는 현재 및 미래 인류의 대재앙으로 인식되고 있다. 따라서 '교토의 정서(1992. 6)'로 시작된 범세계적 기후변화 대응 노력은 2016년 11월에 발효된 신기후체제인 '파리협정(2015. 12)'으로 확대·강화됨으로써 신기후체제(Post2020)로 접어들었다. 신기후체제는 지구온난화 책임국들의 GHG 의무감축을 주요 내용으로 하고 있다. 이에 대한 대응으로 우리나라도 BAU대비 37%의 감축목표(2030년)를 발표하였다.

국내 총 GHG 배출량의 16.7%인 85.1(백만톤 CO<sub>2</sub>eq.)가 수송부문에서 배출되고 있으며, 이는 파리협정 의무감축국 중 11위에 해당한다(ME, 2013). 도로는 수송부문(도로, 철도, 해운, 항공) 배출량의 77.8%를 차지하고 있다(MOLIT, 2009). 따라서 정부는 2030년까지 수송부문 감축목표를 14.6%로 발표하였다. 이러한 감축목표 달성을 위한 정책의 수립·추진 그리고 지속적인 정책효과 모니터링을 위해서는 도로이동오염원에 의한 GHG 배출량의 정확한 추정이 선행되어야 한다.

도로이동오염원 GHG 배출량은 도로조건, 교통조건, 기상조건, 차량특성, 운전자 특성, 연료특성에 의해 복합적으로 영향을 받으며, 도로망 상에서 동적으로 변화하기 때문에 타(비이동)배출원의 경우와 같이 GHG 배출량 추정이 용이하지 않다. 예로서 화력발전소의 경우 일개 화력발전소를 하나의 배출원으로 분석이 가능한 반면, 도로의 경우 도로상을 주행한 익명의 모든 개별 차량에 대한 분석이 필요하다. 따라서 도로이동오염원에 의한 정확한 GHG 배출량을 산정하기 위해서는 전국 도로구간에 대한 개별 차량의 속도 및 교통량 자료가 요구된다. 그러나 전국 도로구간에 대한 속도 및 교통량 자료는 수집되지 않고 있으며 일부 도로구간에 한정되고 있는 실정이다. 이러한 자료수집의 한계는 차량에 의한 GHG 배출량 추정에 있어 방법론의 한계 및 부정확한 추정의 결과로 이어진다.

이상의 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구에서는 비집계방식의 도로구간별 차종별 GHG 배출원단위를 미시적 수준에서 정확하게 산정할 수 있는 방법론을 제시하도록 한다. 제시된 방법론은 (분포의 제약은 받지않는) Speed-profile를 기반으로 대용량의 개별차량 속도자료를 이용하도록 설계되었으며, 전국 도로망에 직접 적용이 가능하도록 개발되었다. 또한 기존의 집계속도자료를 이용할 수 있기 때문에 속도자료의 제약은 받지 않는다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법론은 도로이동오염원에 의한 GHG 산정에 용이하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 기존연구 고찰 및 문제점 도출

### 2.1 현행 방법론

기본연구 검토결과, 도로이동오염원의 GHG 배출량 산정 방법론은 미시적 접근법과 거시적 접근법으로 양분화 되어 수행되고 있으며, 최종 목표는 두 접근법의 통합이라고 판단된다.

미시적 방법론은 차량의 지속적인 차속변화에 따른 배출상태를 고려하여 배출량을 산정하며, 소수의 연구가 보고되었다. Rakha et al.(2000)은 차량의 순간 차속에서 주행상태(순행, 가속, 감속)에 따른 연료소모량과 연소율에 따른 CO<sub>2</sub> 배출량 행태를 도출하고, 이를 이용하여 배출량을 산정하였다. 미환경청(USEPA)의 MOVES(MOTOR Vehicle Emission Simulator)는 대표적인 미시적 방법론을 기반으로 하는 차량 배출가스 시뮬레이터이다. MOVES는 다양한 차종, 운전상태, 도로의 기하구조 상태, 노면상태, 교통운영조건 등의 다양한 환경에서 차량의 배출가스를 미시적으로 평가하도록 개발된분석도구이다. Han et al.(2012)은 하이패스 장차량과 비장차량의 요금소 이용시 차량궤적을 미시적 시뮬레이터를 이용하여 추출하고, 추출된 자료와 MOVES의 배출가스 모형을 이용하여 GHG 배출량을 산정함으로써 전자요금징수체계(ETCS)의 GHG 배출량 감소 효과를 제시하였다.

거시적 방법론은 도로망 수준의 GHG 배출량 추정을 위해 개발되어 왔으며, 이용 가능한 자료의 조건에 따라 다양한 방법론이 제시되고 있다. 거시적 방법론은 비활동기반 접근법과 활동체계기반 접근법으로 구분할 수 있다(Ryu and Bae, 2012). 대표적인 거시적 접근법으로 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 Tire 모형(IPCC, 2006), 미환경청(USEPA)과 미도로국(USDOT)의 EPA모형(California EPA, 1996), 그리고 유럽환경청(EPA)의 COPERT-III 모형(EEA, 1999)을 들 수 있다.

Tier모형은 가용자료의 수준에 따라 I, II, III로 구성되어, 국가별로 모형을 선택하여 적용할 수 있다. Tier-I 모형은 식 2.1과 같이 에너지부문의 배출량 산정방법과 동일하며, 기초자료가 미비할 때 연료사용량 만을 이용한다.

$$ECDO_a = ce_a \times ef_a \times br_a \times 44/12 \quad \text{식 2.1}$$

여기서,  $ECDO_a$ (kg): 연료종류 a의 CO2 배출량(ton/yr) a={연중},  $ce_a$ (TJ): a의 에너지 소모량(천TOE/yr),  $ef_a$ (kg/TJ): a의 CO2 배출계수,  $br_a$ : a의 연소율(석유제품=0.99, 가스=0.995)이다.

Tier II와 III 모형은 식 2.2와 같이 활동도(Activity)의 반영형태에 따라 구분되며, Tier III는 Tier II에 운전조건 (도로조건 등)을 추가적으로 고려한다. 활동도로서 Tier II는 차종별 연비식을 이용한 차종별 에너지 소모량( $ce$ )과 교통량을 적용하며, Tier III는 차종별 차속별 배출계수를 이용한 차종별 교통량을 적용한다. Tier III 모형은 차종별 속도에 따른 배출량을 고려할 수 있기 때문에 Tier 모형중에 가장 정확한 모형이다.

$$ECDO = \sum ef_{a,b,c,d} \times act_{a,b,c,d} \quad \text{식 2.2}$$

여기서,  $ECDO$ (kg): CO2 배출량(ton/yr), a: 연중(휘발유, 경위, LPG 등), b: 수송수단(승용차, 버스, 트럭 등), c: 배출저감기술, c: 운전조건(도로조건 등),  $ef_{a,b,c}$ : a, b, c, d에 따른 배출계수,  $act_{a,b,c}$ : a, b, c, d에 해당하는 활동도이다.

미국의 EPA모형은 IPCC Guideline(IPCC, 2006)에 기초하고 있으며, 연구결과와 실험데이터를 이용하여 배출계수 및 활동도 자료를 지속적으로 보완하고 있다. 유럽환경청의 COPERT(Computer programme to calculate emission from road transport) 모형은 유럽대기오염배출연구센터에서 개발되어 유럽환경청 회원국에게 제공하고 있으며, 현재 식 2.3의 COPERT-III로 발전하였다.

$$ECDO_i = \sum_v A_{i,v}(q_v, l) \times EU_{i,v} + \sum_v C_{i,v} \quad \text{식 2.3}$$

$$EU_{i,v} = \sum_b O_b \times EF_{i,b}(s)$$

여기서,  $E_i$ : 배출가스( $i$ )의 총 배출량,  $i$ : 온실가스 종류( $CO_2, CH_4, N_2O, HFC_s, PFC_s$ ),  $v$ : 차종(승용차, 버스, 트럭),  $A_{i,v}(q_v, l)$ :  $v$ 의 교통량( $q_v$ , 대/시간길이)\*도로망의 길이( $l$ , km)로 설명되는 거리 활동도,  $EU_{i,v}$ :  $v$ 의 배출량 원단위,  $C_{i,v}$ : 연료의 종류, 배출제어기술, 도로 및 환경조건에 의해 설명되는  $v$ 의 예열 중 배출량( $g$ ),  $b$ : 연료별 차종별 구분,  $O_b$ :  $b$ 의 도로망 점유율(%),  $EF_{i,b}(s)$ :  $b$ 의 속도( $s$ )에 따른  $i$ 의 배출계수( $g/대*km$ )이다.

국내의 경우, 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)의 도로이동오염원 배출가스 산정방법은 COPERT-III를 근간으로 개발/적용되고 있다(NIER, 2013). 국가별 GHG의 추정 모델, Tier I~III, COPERT III 등 다양한 방법론이 적용되고 있으며(MOLIT, 2009; Kim et al., 2010), 방법론별 요구 자료의 구득여부와는 관련성이 깊지 않은 것으로 판단된다. 또한 Top-down 방식인 Tier I은 Bottom-up 방식인 Tier II에 비하여 CO2 배출량은 높게 평가된다(MOLIT, 2009).

## 2.2 문제점 및 개선방향

Tier-III, COPERT-III와 같은 Bottom-up 방법론은 배출저감기술, 교통조건(운전, 도로 등)을 고려할 수 있기 때문에 보다 정확한 GHG 배출량 산정을 위한 지속적인 연구가 수행되고 있으며, Bottom-up 방법론의 문제점을 고찰해 보면 다음과 같다.

첫째, Bottom-up 방법론은 공통적으로 활동도와 배출원단위의 곱으로 총 배출량을 산정한다. 이는 추정오차의 측면에서 활동도와 배출원단위 추정오차의 오차증폭을 의미한다. (본 연구는 배출원단위의 정확한 평가에 연구의 목적이 있음으로 활동도는 정확하다고 가정하면) 배출원단위 평가오차는 근본적으로 평균속도의 적용에서 발생한다. 시간대별 평균속도는 반복적/비반복적 교통혼잡으로 인해 상이하게 나타나며, 동일요일 동일시간대에서도 반복성을 보이지 않는다(Stathopoulos and Karlaftis, 2001; Yoon and Chang, 2014). 따라서 365일 24시간에 대한 대표 속도로 시간평균속도를 적용하더라도 차속별 GHG 배출량 곡선은 선형성(Linearity)을 보이지 않기 추정된 GHG 배출량 원단위는 대표성을 담보할 수 없으며, 과대/과소 추정문제가 발생한다.

둘째, 동일 교통류 상태에서 차량의 속도는 동질적/이산적 현상을 보이며, 교통류의 시간적 진화(Temporal Evolution)은 카오스 상태(Chaos State)를 보인다(Disbro and Frame, 1989; Vlahogianni et al., 2006). 예를 들어, 신호교차로를 통과하는 교통류인 단속류(Interruptive Traffic Flow)내에 포함된 개별차량의 속도는 신호운영과 도착행태에 결정되기 때문에 정규분포 또는 그와 유사한 분포를 따르지 않는다. 따라서 (도로이동오염원에 의한 GHG 발생량은 저속도에서 기여도가 높기 때문에) 교통신호로 제어되는 도시부의 대다수 도로구간을 고려하면, 도로구간의 차속을 평균속도로 대표할 수 없으며, 이를 이용하여 산정된 도로구간 배출원단위는 대표성을 가진다고 말하기 어렵다.

셋째, 속도자료의 이질성 문제이다. 지능형교통체계의 속도수집기술은 지점과 구간검지 기술로 구분된다. 엄밀히 말해 두 검지기술에 의해 수집된 속도를 다르다. 다시 말해, 지점검지 기술에 의해 수집된 속도는 대표 통행속도가 아니며, 구간검지 기술에 의해 수집된 속도자료는 일부 도로망에 한정되고 있다. 그러나 두 자료의 구분 없이 가용 가능한 속도자료를 이용함으로써 이용 자료의 일치성을 확보하지 않고 있다.

마지막 문제점은 가장 치명적 문제점으로서, 전국 도로망의 모든 도로구간에 대한 속도자료는 수집되고 있지 않다. 지능형 교통체계에서 수집되는 속도자료는 주요도로에 집중되어 있으며, 비주요도로는 수집되고 있지 않다. 추가로, 주요도로의 속도는 집계자료이며 다량의 누락자료를 포함하고 있다. CAPSS의 도로이동오염원 GHG 배출량 산정 방법론의 경우, 속도 미수집 도로구간에 대해서는 인접도로의 평균속도 또는 제한속도의 85% 속도를 적용하고 있으며, 이로 인해 GHG 배출량을 과소 추정할 수 있다(Chang and Lee, 2016).

이상의 문제점은 COPERT III에 기반을 둔 CAPSS의 도로이동오염원 GHG 배출량 산정방법론의 당면문제이기도 하다(Chang and Lee, 2016). 이를 해결하기 위해서는 [조건1] 전국 도로구간에 대한 속도자료가 필요하며, [조건2] 수집된 속도자료는 시공간적 일치성을 확보하면서 [조건3] 개별 차량의 속도특성을 반영할 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 개별 차량 내비게이션 속도자료를 이용하여 도로구간 CO<sub>2</sub> 배출 원단위(URSCE, Unit load of Road-Section CO<sub>2</sub> Emission)를 추정함으로써 이상의 문제점을 해결하고자 한다. 스마트폰의 급속한 보급과 더불어 스마트 단말 기반의 차량 내비게이션은 광범위하게 보급되어 있으며 향후 자율주행차량기술은 정확한 GPS Point-to-Point 위치정보에 기반을 둔다. 따라서 차량 내비게이션 속도자료 기반의 URSCE 산정방법론은 현재 및 미래에도 적합한 접근법이라 판단된다.

### 3. 방법론

#### 3.1 요구조건 분석 및 개발방향 정립

방법론 개발에 앞서, 차속에 따른 CO<sub>2</sub> 배출특성, 차량 내비게이션 개별 속도자료의 특성, 그리고 (모델링 측면에서) 대용량 속도자료의 효율적인 관리/분석 방안에 대한 고려를 통해 방법론의 개발방향을 정립하도록 한다.

차량의 CO<sub>2</sub> 배출량은 Fig. 3.1와 같이 차속에 따라 비선형성(Nonlinearity)을 보이며, 임계점을 기준으로 다른 배출특성을 보인다. 특히, 임계속도이하의 경우 차속이 감소함에 따라 배출량은 차속이 낮아짐에 따라 Exponential하게 증가한다. 이러한 비선형 CO<sub>2</sub> 배출량 특성은 개별 차량 속도분포의 대푯값 즉, 도로구간 평균속도를 이용하여 대표 URSCE를 추정할 경우, 과소추정의 문제가 발생한다. 따라서 개발 방법론은 비집계 기반으로 개별차량의 차속을 고려하도록 한다.

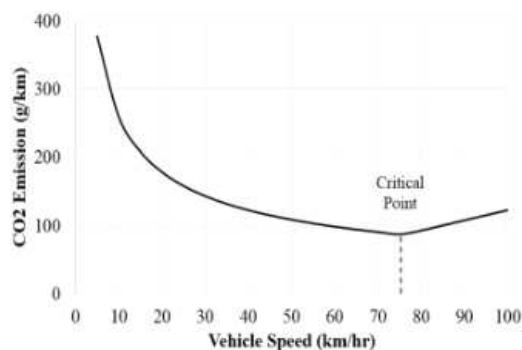


Fig. 1 Nonlinearity of CO<sub>2</sub> Emission

신호화된 도로구간에서 차량의 구간통행속도는 (분산의 측면에서) 이질적 특성과 동질적 특성을 동시에 보이며(Fig. 3.2), 이는 교통신호의 강제적 간섭으로 인한 정지신호의 경험여부 그리고 정지시 대기시간의 양이 차량의 도착시간행태에 따라 다양하게 나타나기 때문이다. 이질성은 비혼잡상태(Time 0~370, 1200~1400)에서 발생하며, 차량의 속도는 동일 교통상태에서 5~70km/hr까지 분포한다. 반면 동질성은 혼잡상태(Time 550~1100)에서 발생하며, 속도는 비혼잡상태의 속도에 비하여 낮은 변동을 보인다. 특히, 동질적 상태에서 속도는 2~16km/hr로 분포하고 있으나 Fig. 3.1의 CO2 배출량 곡선으로 산정된 개별 배출량은 결코 동질적이지 않다. 따라서 개별 차량의 미시적 속도특성을 고려하여 보다 정확한 URSCE를 추정을 추정하기 위해서는 비집계기반의 방법론이 요구된다.

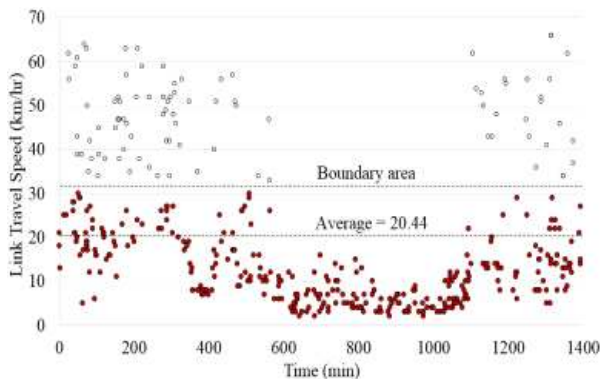


Fig. 2 Features of Individual Vehicle Velocity

위에서 살펴본 속도의 이질성과 동질성이 혼재된 특성 때문에 동일 도로구간일지라도 속도의 분포는 Fig. 3.3과 같이 다봉의 형태를 보이며 어떤 특정한 분포를 따른다고 말하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 계급길이가 1km/hr인 Speed-Profile을 이용하여 개별속도분포의 특성을 고려하도록 한다. 이러한 비집계방식 자료구조는 전국 도로망에서 수집되는 방대한 양의 차량 내비게이션 자료를 효과적으로 유지/관리/분석할 수 있는 방안이기도 하다. 예를 들어 60만개 도로구간에 365일 동안 1일 5분 동안 평균속도자료를 288개 시퀀스로 구축할 경우,  $63.072 \times 10^9 (=6 \times 10^5 \times 365 \times 288)$ 의 자료구조가 요구된다. 반면 계급길이가 1km/hr와 최대속도 150km/시로 Speed-Profile를 이용할 경우, 필요한 자료구조는  $9 \times 10^7 (=6 \times 10^5 \times 150)$ 로서 집계자료구조에 비하여 14.27%의 수준이다.

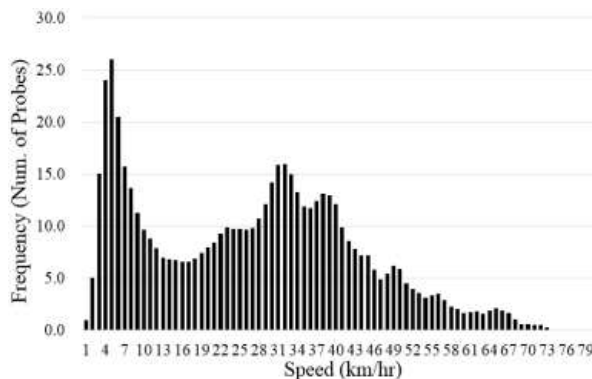


Fig. 3 Speed Distribution

### 3.2 배출원단위 산정 방법

일개 도로구간의 차종( $v$ )별 CO2 배출량 원단위인 URSCE (이하  $UCE_v$ , g/km)를 산정하기 위해서는 차종별 차속( $s$ )에 따른 CO2 배출량 함수,  $ce_v(s)$ ,와 (Speed-Profile로 산정된) 차속의 밀도함수,  $k(s)$ 가 요구되며, 식 3.1와 같다.

$$UCE_v = \int_{0+\epsilon}^{s_{\max}} e_v \times k(s) ds \quad \text{식 3.1}$$

여기서,  $e$ 는  $ce_v(s)$ 로 산정된 차종( $v$ )의 차속( $s$ ) 상태에서 배출량(g/km),  $s_{\max}$ 는 차량의 최대속도,  $\epsilon \rightarrow +0.0$ 이다. 실제 적용에 있어 Speed-Profile Database을 이용하여 산정되는 차속( $s$ )별 밀도( $k_s, 0 \sim 1.0$ )는 이산적이며, 식 3.2와 같이 산정된다.

$$k_s = n_s / \sum_{s=1}^{s_{\max}} n_s \quad \text{식 3.2}$$

여기서,  $n_s$ 는  $s$ 에 대한 내비게이션 표본개수이고,  $\sum k_s = 1.0$ 이다.

산정된  $k_s$ 와  $ce_v(s)$ 을 이용해 산정되는 차종별 차속별  $e_{v,s}$ 을 이용하여  $UCE_v$ 는 식 3.3과 같이 산정된다.

$$UCE_v = \sum_{s=1}^{s_{\max}} e_{v,s} \times k_s \quad \text{식 3.3}$$

산정된  $UCE_v$ 와 차종별 구성비( $r_v, 0 \sim 1.0$ )을 이용하여 대표  $UCE$ (g/km)는 식 3.4과 같이 산정된다.

$$UCE = \sum_v r_v \times UCE_v \quad \text{식 3.4}$$

여기서,  $v = \{\text{승용차, 버스, 트럭 등}\}$ 이고,  $\sum r_v = 1.0$ 이다.

적용에 있어 도로구간별 차종구성비 자료가 부재한 경우, 교통안전공단의 해당지역의 차종별 운행 Mileage을 이용하여 차종별 Mileage 점유율을 산정하여 차종별 구성비를 대체할 수 있다. 그러나 도로종별, 노선특성, 도로구간 특성에 따라 차종 구성비는 변화함으로 적용에 유의해야 한다.

## 4. 적용 및 분석

### 4.1 적용 설계

개발 방법론의 적용을 위한 Test Bed는 적용의 대표성을 담보하고 연구를 위한 개별 속도자료 구득의 한계를 고려하여 서울특별시 강남구에 위치한 강남역사거리의 4개 접근로를 대상으로 선정하였으며, Fig. 4.1와 같다.



Fig. 4 Test Bed

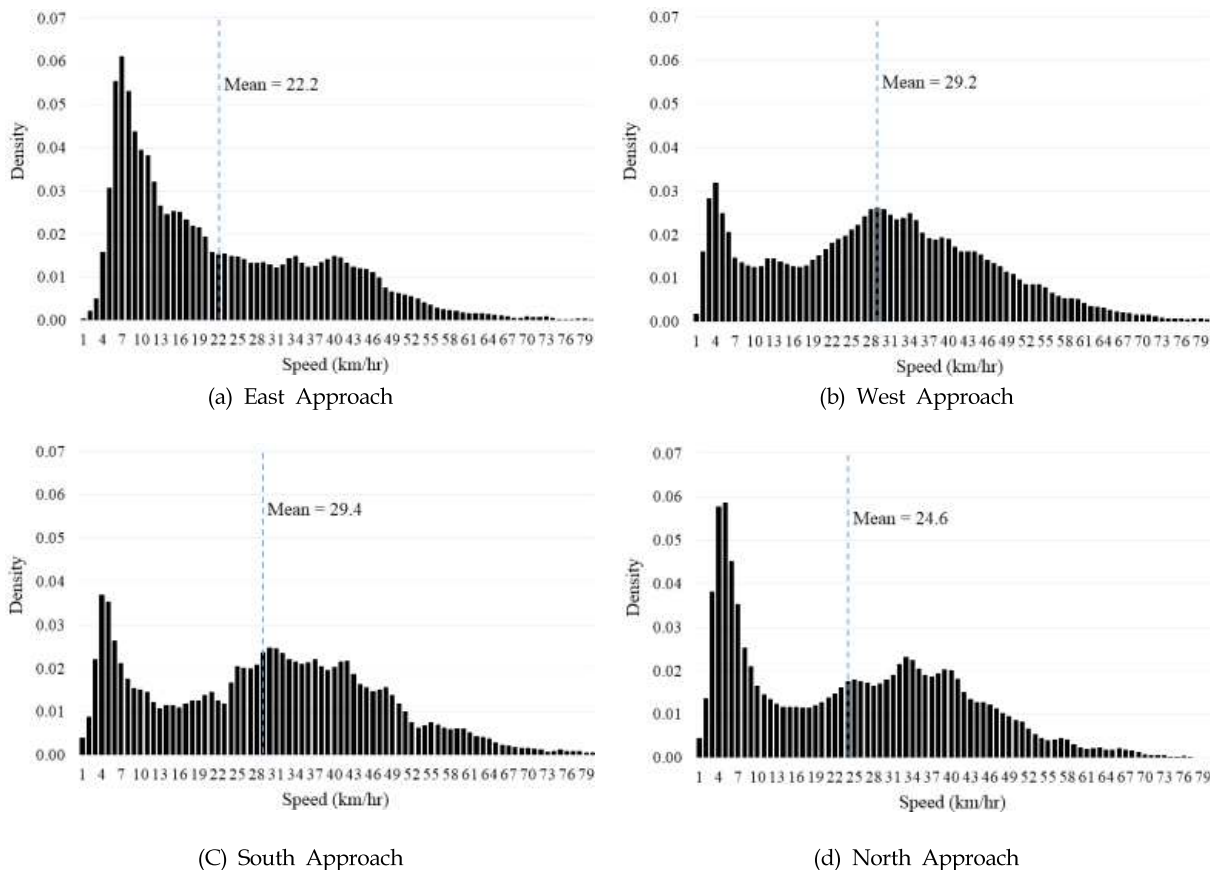


Fig. 5 Density Profile of Speed

4개 대상구간에 대한 차량 내비게이션 속도자료는 2014년 6월 1일 ~ 7일까지 일주일의 자료를 수집하였다. 수집된 자료는 총 7,291건이며, [동, 서, 남, 북] 접근로에 대하여 각각 [2,387, 1,727, 1,335, 7,291]건이다. 수집된 자료를 이용하여 Fig. 3.3과 같은 Speed-Profile를 각각 구축하였으며, 구축된 Speed-Profile과 식 3.2를 이용하여 산정된  $k_s$ 로 구성되는 Density-Profile은 Fig. 4.2와 같다. 저속도 구간의 밀도는 통행량이 높은 동측과 북측 접근로가 높게, 상대적으로 통행량이 낮은 서측과 남측 접근로는 낮게 나타나고 있다. 기존의 집계속도기반 GHG 배출량 산정을 위한 평균속도(km/hr)는 [동, 서, 남, 북] 접근로에 대하여 각각 [22.2, 29.2, 29.4, 24.6]으로 분석되었다. 추가로 동/북과 서/남 접근로의 평균속도 차이는 2.4와 0.2로 큰 차이를 보이지 않지만 Density의 분포는 다르게 나타나고 있다. 이는 평균속도를 이용하여 GHG 배출량을 산정할 경우 편향된 결과를 초래할 수 있음을 의미한다. 그리고 차종별 연료의 종류별 CO2 배출량 곡선은 NIER (2009)에서 제시된 9개 차종 중 교통안전공단의 차량 Mileage가 높은 3개 차종(승용차, 버스, 트럭)을 Table 1과 같이 선정하였다.

Table 1. CO2 Emission Function

Vehicle Type	Fuel Type	CO2 Emission	
		Speed(km/hr)	fomula
Car(Midsize)	gasoline	Less than 65.4	$Y=1555.5 \times V^{(-0.578)}$
		More than 65.4	$Y=0.0797 \times V + 144.19$
Bus(Urban Type)	CNG	-	$Y=5019.8 \times V^{(-0.5582)}$
Truck(Small-size)	diesel	Less than 65.4	$Y=1135.2 \times V^{(-0.4668)}$
		More than 65.4	$Y=2.2307 \times V + 25.76$

### 4.2 결과 분석

분석결과, 집계방식(Aggregated method)에 기반의 평균속도를 이용한 URSCE(g/km)는 본 연구에서 제시된 방법인 비집계방식(Disaggregated method)에 기반한 URSCE보다 과소평가되었으며, 분석결과는 Table 2.와 같다. 집계방식에 의한 URSCE는 [승용차, 버스, 트럭]에 대하여 각각 [236.3, 813.4, 247.7]로 분석된 반면, 비집계방식은 [319.6, 1082.6, 309.2]로 분석되어 집계방식의 과소평가 정도는 비집계방식 대비 [73.9%, 75.1%, 80.1%]로 나타났다.

이상의 결과는 현재의 집계기반 평균속도를 적용하여 산정된 국내 도로이동오염원에 의한 GHG 추정량의 2030년 감축목표인 14.6%의 오차범위를 벗어나고 있다. 다시 말해, 현행의 방식은 교통혼잡 개선사업 등을 통한 사업효과를 왜곡할 수 있다고 해석할 수 있다. 승용차를 예로 들면, 동측 북측 접근로는 개선대상에 포함되며, 동측 접근로는 서측 접근로의 속도분포로 그리고 북측 접근로는 남측 접근로의 속도분포로 개선되었다고 가정하면 두 접근법의 개선효과는 상이하게 분석된다. 집계방식에 의한 개선효과는 동측과 북측 접근로의 경우 259.1→221.4(-14.6%)와 244.5→220.3(-9.9%)로 분석되는 반면에, 비집계방식에 의한 개선효과는 동측과 북측 접근로에 대하여 331.3→296.7(-10.4%)와 351.6→298.6(-15.1%)로 각각 분석된다. 이와 같은 상이한 분석결과는 버스와 트럭에서도 유사하게 나타난다고 할 수 있다.

이상에서 언급한 CO2감축 시나리오 분석은 도로이동오염원에 의한 GHG 배출량 감축과 관련된 전략적 측면에서 본 연구에서 제시한 방법론이 현행의 집계기반 방식보다 유리함을 보여준다. 다시 말해, 집계방식에 의한 효과는 평균 -12.2%인 반면 비집계방식에 의한 효과는 -12.7%로서 보다 우호적이다.

실제 개별 속도기반의 분석결과, 차속의 URSCE 기여도는 10km/hr 이하에서 매우 높게 나타나고 있다(Fig. 4.3). 속도 10이하의 Density 기여도는 0.25인 반면 CO2 배출량 기여도는 전체의 0.46에 달하고 있으며, 속도 20이상의 경우 Density 기여도는 0.59인 반면 CO2 배출량 기여도는 0.37로 나타났다. 따라서 URSCE를 감소시키기 위해서는 주된 CO2 배출영역인 속도 10이하의 CO2 배출기여도는 감소시켜야 한다. 추가로 차량의 속도를 Table. 1.에서 설명된 CO2 배출곡선의 임계점±30km/hr 이내로 집중시켜야 할 것으로 판단된다.

Table 2. Results of CO2 Emission Unit Load

Vehicle Type		Car			Bus			Truck		
Methodology		Agg.	Disagg.	Diff(%)	Agg.	Disagg.	Diff(%)	Agg.	Disagg.	Diff(%)
Approach Road Section	East	259.1	331.3	78.2	889.0	1123.3	79.1	266.9	321.0	83.1
	West	221.4	296.7	74.6	763.8	1007.0	75.8	235.1	290.8	80.8
	South	220.3	298.7	73.8	760.1	1013.3	75.0	234.1	292.3	80.1
	North	244.5	351.6	69.5	840.7	1186.8	70.8	254.7	332.8	76.5
Average		236.3	319.6	73.9	813.4	1082.6	75.1	247.7	309.2	80.1

Where, Agg. and Disagg. means average speed based and disaggregated speed based methods respectively, and Diff(%) = Agg. / Disagg. \* 100.0

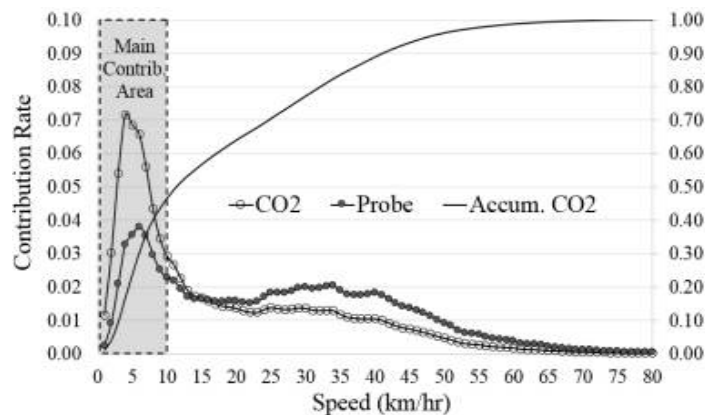


Fig. 6 Speed Contribution to CO2 Emission



## 5. 결론 및 향후 연구

### 5.1 결론

기존의 도로이동오염원 GHG 배출량 산정모형은 2000년 이전에 주된 개발이 완료되었으며, 당시의 가용자료 여건을 고려하여 개발되었다. 따라서 Tier I과 같은 Top-down 방식과 더불어 Tier III와 COPERT III와 같은 Bottom-up 방식의 적용여부를 해당국가의 자료여건에 따라 고려할 수 있도록 하였다. 그러나 지능형교통체계에서 수집되는 속도자료는 일부 도로구간에 대하여 수집/관리/분석되었으며, 수집된 속도자료는 집계자료로 관리됨으로써 개별차량의 속도행태를 고려할 수 없는 한계를 가지고 있었다.

오늘날의 교통자료 수집기술은 스마트폰의 급속한 보급으로 인해 스마트단말을 기반으로 하는 차량 내비게이션의 급속한 보급과 더불어 방대한 양의 개별 차량 속도자료 수집이 가능해졌다. 그리고 수집자료의 공간적 Coverage는 경로안 내정보가 제공되는 전국 모든 도로망을 포함함으로 99.9에 달한다. 따라서 본 연구에서는 방대한 양의 차량 내비게이션 개별 속도자료를 기반으로 하는 비집계방식의 URSCE 산정방법론을 제시하였다. 제시된 방법론은 개인의 사생활 문제로 P2P(Point-to-point) 차속자료를 이용할 수 없는 상황에서 가장 정교한 방법론이라 할 수 있다. 그리고 제시된 방법론은 대용량 자료의 수집/관리/분석을 고려하여 개발되었으므로 현장 적용에 있어 기존 방법론에 비하여 장점을 가진다. 추가로 본 연구에서 제시된 방법론은 현행의 전 지구 위치 파악 시스템(GPS, Global Positioning System)을 기반으로 수집되는 자료를 기반으로 하기 때문에 향후 GPS 위치정보를 기반으로 하는 자율주행차량시대가 도래하면 그 적용성과 정확도가 향상될 것으로 판단된다.

실제 차량 내비게이션 속도자료를 이용한 분석결과, 현행의 집계기반 URSCE 산정방식은 과소평가되고 있으며, 도로부분 CO2 절감을 위한 사업의 우선순위와 사업의 효과를 왜곡할 수 있는 것으로 나타났다. 반면 본 연구에서 제안된 비집계기반 URSCE 산정방식은 산정 정확도 향상과 더불어 차속 분포의 변화에 따른 CO2 절감효과를 사전/사후에 평가할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 일개 도로에서 국토수준까지 도로이동오염원에 의한 GHG 배출량 평가 및 절감사업에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 추가로 제안된 방법론은 차속의 Density-Profile을 기반으로 개발되었으므로 CO2 이외의 타 배출가스(PM10, PM2.5, NOx 등) 함수와 직접교체가 가능하다. 따라서 도로이동오염원에 의한 대부분의 배출가스를 산정할 수 있는 확장성을 가진다.

본 연구에서 적용된 방법론은 개별 차량기반의 도로구간 통행속도자료와 차량엔진이 가열된 상태인 Hot Time상태에서 적용을 고려하였다. 그러나 실제 미시적인 차량의 운행특성을 고려하기 위해서는 P2P자료를 이용한 가감속 특성, 가감속 특성에 따른 CO2 배출자료, Cool Time 고려, 도로의 구배조건, 그리고 배출저감기술을 고려한 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 이러한 향후연구는 국립환경과학원의 Inventory 개발이 완료되면 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2016년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

- Chang, H.H., and Lee, Y.I.(2016). Big data and paradigm change in Air Pollutants Emission Evaluation: focused on PM10 from road mobile resource. *Journal of Environmental Studies*, vol.58, pp.36-47.
- Han, D.H., Hong S.H., and Lee S.B.(2012) Development of CO2 emission estimating methodology of electronic toll collection system based on instantaneous speed and acceleration. *Journal of Transport Research*, vol.19, no.3, pp.63-76.

- California EPA(1996). Methodology for estimating emissions from on-road moter vehicles.
- Disbro, J.E., Frame, M.(1989) Traffic flow theory and chaotic behavior. Transportation Research Record, vol.1225, pp.109-115.
- IPCC(2006), 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories volume 1, general guidance and reporting.
- Kim, T.H., Lee, S.I., Kim, Y.I., and Rho, J.H.(2010). Comparison study of generated greenhouse gas(GHG) amount estimation from road transportation. Korean Society of Civil Engineers, vol.58, no.9, pp.67-73.
- ME(2013). National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- NIER(2013). National Air Pollutants Emission Evaluation Manual.
- USEPA. MOVES, <https://www.epa.gov/moves>.
- Rakha, H., Van, A.M., Ahn, K., and Trani, A.A.(2000) Requirements for evaluating traffic signal control impacts on energy and emissions based on instantaneous speed and acceleration measurements. Transportation Research Record, no.1738, pp.56-67.
- Ryu, B.Y. and Bae, S.H.(2012) Estimation of greenhouse gas in the urban area by using advanced traffic management systems. Journal of Transport Research, vol.19, no.3, pp.119-134.
- Stathopoulos, A., Karlaftis, M.G.(2001) Temporal and spatial variations of real-time traffic data in urban areas. Transportation Research Record, vol.1768, pp.135-140.
- Vlahogianni, E.I., Karlaftis, M.G., Golias, J.C. (2006) Statistical methods for detecting non-linearity and non-stationarity in univariate short-term time-series of traffic volume. Transportation Research Part-C, vol.14, no.5, pp. 351-367.
- Yoon, B.J., Chang, H.H.(2014) Potentialities of data-driven nonparametric regression in urban signalized traffic flow forecasting. Journal of Transportation Engineering, vol.140, no.7, p. 04014027.
- Park, C.H.,Yoon, B.J., Kang, B.S. (2015) A Study on Installation of U-Turn Lane for Efficient Operation of Left Turn at Signalized Intersections. Journal of Korea Society of Disaster Information, Vol.11, No.4, pp.597-606.