

지능형교통체계(ITS) 정보를 이용한 지역 간 도로의 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정

우승국* · 김영국 · 박상조

한국교통연구원 국가교통미래전략본부

Calculation of Greenhouse Gas and Air Pollutant Emission on Inter-regional Road Network Using ITS Information

WU, Seung Kook* · KIM, Youngkook · PARK, Sangjo

Dept. of National Transport Strategic Planning, The Korea Transport Institute, Gyeonggi 411-701, Korea

Abstract

Conventionally, greenhouse gas (GHG) emissions in the transport sector have been estimated using the fuel consumption (i.e. Tier 1 method). However, the GHG emissions on road networks may not be practically estimated using the Tier 1 method because it is not practical to monitor fuel consumption on a road segment. Further, air pollutant emissions on a road may not be estimated efficiently by the Tier 1 method either due to the diverse characteristics of vehicles, such as travel speed, vehicle type, model year, fuel type, etc. Given these conditions, the goal of this study is to propose a Tier 3 level methodology to calculate CO₂ and NO_x emissions on inter-regional roads using the information from ITS infrastructure. The methodology may avoid the under-estimation issue caused by the concavity of emission factor curves because the ITS speed or volume information is aggregated by a short time interval. The proposed methodology was applied to 4 road segments as a case study. The results show that the management of heavy vehicles' speed is important to control the CO₂ and NO_x emissions on road networks.

교통부문에서 온실가스 배출량은 주로 연료사용량에 의해 산정되었다(Tier 1 방식). 그러나 이 방법은 연료사용량을 측정할 수 없는 도로 구간에서 발생하는 배출량 산정에 사용되기 어렵다. 도로구간의 대기오염물질 배출량 또한 연료사용량에 의해 정확히 측정되어질 수 없는데 이는 대기오염물질 배출량이 속도, 차종, 차령, 유종 등의 함수이기 때문이다. 이러한 배경에서 본 연구의 목적은 ITS 정보를 이용하여 지역 간 도로에서 발생하는 이산화탄소와 질소산화물의 배출량을 Tier 3 수준으로 산정하는 방법론을 정립하는 것이다. 이 방법론은 집계단위가 작은 ITS 검지기 정보를 이용하기 때문에 배출계수의 오목한 형태에서 기인하는 과소추정의 오류를 피할 수 있는 장점을 갖는다. 제시된 방법론을 4개 사례 도로구간에 적용한 결과는 중차량의 속도관리가 이산화탄소 또는 질소산화물 배출량 관리에 매우 중요함을 시사하였다.

Key Words

Air Pollutant, CO₂, Emission Factor, Greenhouse Gas, ITS Information, NO_x, Tier 3
대기오염물질, 이산화탄소, 배출계수, 온실가스, 지능형교통체계 정보, 질소산화물, 티어 3

* : Corresponding Author
wsk115@koti.re.kr, Phone: +82-31-910-8422, Fax: +82-31-910-3228

Received 7 February 2013, Accepted 20 March 2013

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

1992년 지구온난화라는 범세계적 문제에 대응하기 위해 UN을 중심으로 기후변화에 관한 국제연합기본협약(UNFCCC¹⁾)이 출범하였다. 정부는 이러한 국제 환경 변화에 능동적으로 대응하기 위해 「저탄소녹색성장기본법」을 제정(2010. 1.)하였으며 동법 시행령에서 국가 온실가스 감축목표(2020년 BAU²⁾ 배출량 대비 30% 감축)를 제시하였다. 정부는 또한 「지속가능교통물류발전법」을 제정(2009. 6.)하여 교통부문에서 이러한 여건 변화에 선제적으로 대응할 수 있는 기반을 마련하고자 하였고 「지속가능국가교통물류발전기본계획」(2011. 6.)을 통하여 교통부문의 온실가스 감축목표를 34.3% 수준으로 확정된 바 있다

2009년 기준 교통부문의 온실가스 배출량은 약 8,260만 톤(국제 병커링을 통해 해외에서 배출되는 양 제외 시)이며 도로부문이 철도, 해운, 항공 등 타 수단보다 절대적으로 높은 약 94%를 차지하고 있다(Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, Korea Transportation Safety Authority, 2011). 도로부문은 지구온난화의 원인인 온실가스 외에도 자동차에서 배출되는 대기오염물질의 주요 배출원이다. 대표적 대기오염물질인 질소산화물의 경우 호흡기 질환을 유발하는 원인 물질이며 서울을 포함한 수도권 대기오염도는 이산화질소(NO₂)의 경우 선진국의 1.7배에 달하는 것으로 알려져 있다.

교통부문에서 온실가스 배출량의 산정은 연료소모량을 통한 산정법(Tier 1)이 일반적으로 사용되어 왔다. 이 방법은 유류사용량이 모니터링 되는 지역 범위의 배출량 산정 또는 연료사용량이 측정, 관리되는 항공, 해운, 철도 수단의 배출량 산정에는 쉽게 적용된다. 그러나 자가용 자동차가 주류를 이루는 도로부문의 특성을 고려할 때 연료소모량을 통한 배출량 산정은 적용하기 매우 어렵다. 도로부문의 대기오염물질 배출량은 차량의 유종(油種), 속도, 연식 등의 특성에 따라 상당한 차이를 보인다. 따라서 연료소모량을 통해 배출량을 산정할 경우 이러한 도로부문의 특성을 제대로 반영할 수 없으며 유

종의 변화, 속도 개선 등에 따른 배출량 변화량을 추정하기 어렵다. 전술한 바와 같은 이유로 연료소모량을 이용한 방법이 아닌 속도, 교통량 등의 활동도 자료를 이용한 도로네트워크의 온실가스 및 대기오염물질의 배출량 산정 방법론을 정립할 필요가 있다.

지역 간 도로를 대상으로 한 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정의 중요성은 「지속가능교통물류발전법」에 의해 시행될 예정인 기간교통물류권역의 지속가능성 평가에서도 찾을 수 있다. 「지속가능교통물류발전법」(제12조 1항)에 의하여 지정되는 기간교통물류권역은 동법 시행령(제10조 1항)에 의해 고속국도, 일반국도, 국도 대체우회도로 등 지역 간 도로를 대상으로 하고 있다. 「지속가능교통물류발전법」은 기간교통물류권역의 지속가능성 측정, 평가, 관리(제14조, 15조)를 규정하고 있으며, 주요한 지속가능성 조사의 지표로서 온실가스 배출량과 대기오염물질 배출량이 포함되어 고시되었다.³⁾ 따라서 지역 간 도로를 대상으로 온실가스 및 대기오염물질 배출량을 산정할 수 있는 방법론의 제정이 필요하다.

이상과 같은 배경에서 본 연구의 목적은 지역 간 고속국도와 일반국도(기간교통물류권역에 포함) 상에 설치되어 있는 ITS 검지기로부터 수집되어 제공되는 교통량과 속도 정보를 활용하여 지역 간 도로로부터 발생하는 온실가스 및 대기오염물질 배출량을 산정하기 위한 Tier 3수준의 방법론을 정립하는 것이다. 정립된 방법론은 선택된 사례 도로에 적용되어 배출량 특성 분석에 활용되었다.

2. 연구의 범위

배출량 산정의 시설적 범위는 기간교통물류권역으로 규정되는 고속국도와 일반국도이고 배출량 산정의 대상 범위는 이산화탄소와 질소산화물로 한정한다.

IPCC⁴⁾의 국가 온실가스 인벤토리 가이드가 규정하는 교통부문의 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소이다(NO₂)(IPCC, 2006). 메탄과 아산화질소는 이산화탄소보다 강력한 온실효과를 야기하나(IPCC, 2007) 이산화탄소의 배출량이 자동차에 의한 전체 온실가스 배출량의 95%이상을 차지하는 것을 고려하여 이산화탄소만을 연구대상에 포함하였다.

1) United Nations Framework Convention on Climate Change
 2) Business As Usual, "개선을 위한 조치가 시행되지 않았을 경우"를 의미함
 3) 국토해양부 고시 제2010-206호
 4) Inter-governmental Panel on Climate Change

도로교통은 일산화탄소(CO), 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 휘발성유기화합물, 미세먼지(PM10)와 같은 도시 내 대기오염물질의 상당 부분을 배출하는 것으로 알려져 있다. 다만 이산화황의 경우 현재 사용되는 자동차 연료가 탈황 처리되어 연소과정에 황산화물을 거의 배출하지 않으므로, 다른 오염물질에 비해 대기오염에 미치는 영향은 적다(Ministry of Environment, 2009, Gyeonggi-do, 2006). 도시화 지역에서 대기오염물질의 배출의 주요인이 자동차에 의한 것이지만 중요 오염물질 가운데 일산화탄소와 이산화황의 경우 시간 스케일별(연평균, 일평균, 시간평균) 오염량 평균값이 기준치를 초과하는 경우가 발생하지 않아 별도의 모니터링이 필요한 상황이 아니다. 미세먼지의 경우 계량이 가능한 범위 내에서는 자동차로 인한 오염 비중이 높으나, 실제로 미세먼지의 발생원이 황사나 꽃가루 같은 자연현상에서부터 건설 현장이나 도로의 날림먼지 등 비계량적인 분야가 워낙 광범위하여 이들을 제외하고 분석하는 것은 분석기술의 신뢰성을 확보하기에 한계가 있다. 질소산화물의 경우 차량에 의해 배출되는 양이 전체 배출량에서 차지하는 부분이 상당하고, 오염기준치를 초과하는 경우도 종종 발생한다. 또한 이산화질소는 오존 발생의 전구물질로 작용할 뿐 아니라, 눈과 목에 자극을 주며 호흡기 질환을 심화시키는 유해 물질이다. 따라서 본 연구에서는 자동차 배출 대기오염물질 중 질소산화물만을 연구 대상으로 선택하였다.

II. 방법론 정립

1. 선행 연구 검토

온실가스 및 대기오염물질 배출량은 유류소비량에 IPCC가 제시하는(IPCC, 2006) 연료사용량 당 배출량(Tier1 배출계수)을 적용하여 산정하는 것이 지역 기준의 배출량 산정에 적합한 방법이나 이는 전술한 바와 같이 유류소비량을 계속할 수 없는 도로구간의 배출량 산정에 적용될 수 없다. 도로구간의 배출량은 속도에 따른 단위 거리당 배출량(Tier 3 배출계수)에 교통량과 통행거리를 곱하여 산정된다. 여기서 배출계수가 가장 중요한 요소이며 우리나라의 경우 국립환경과학원에서 그 개발을 담당해 왔다(National Institute of Environmental Research, 2005-2010, Ministry of Environment, 2008).

국토해양부는 「지속가능교통물류발전법」에 의거하여

매년 교통부문의 지역별 온실가스 배출량을 조사하고 있다. 조사위탁기관인 교통안전공단은 2011년 조사 보고서에서 유류사용량 기반의 Tier 1 방식과 함께 Tier 3 방식을 사용한 배출량 또한 제시하고 있다(Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, Korea Transportation Safety Authority, 2011). 배출량 산정의 주요한 입력 자료인 속도는 도로별/지역별 일 평균 속도를 적용하고 있다(Shin et al, 2010). Jang (Jang, 2011)과 Kim(Kim, 2011)의 연구에서도 도로별 또는 지역별 평균 속도가 배출량 산정의 주요 입력 자료로 사용되었는데 이러한 방식은 2절에 기술하는 배출계수(오목한 곡선 형태의 함수)의 특성에 기인하여 속도의 과대 집계(over-aggregation)에 따른 배출량 과소 추정의 가능성이 있다.

도로구간의 대기오염물질 배출량 산정은 국립환경과학원이 제시하는 방법을 일반적으로 따르고 있다(National Institute of Environmental Research, 2010). 산정방식은 온실가스 배출량의 Tier 3 산정방식과 동일하며 주요 입력 자료인 속도는 지역별/도로별 일 평균속도를 적용하도록 추천하고 있고 이 방식으로 우리나라 지자체별 대기오염물질이 조사된 바 있다(Korea Transport Institute, 2010). 이러한 방식은 온실가스 배출량 산정에서와 마찬가지로 과대 집계된 속도자료가 배출계수의 입력 자료로 사용되어 배출량 과소 추정의 결과를 가져올 가능성이 있다.

Kim(Kim, 2010)과 GRI(Gyeonggi Research Institute, 2002)의 연구에서는 교통수요예측 모형을 사용하여 추정된 도로구간의 속도 자료가 배출계수에 적용되었다. 이러한 접근은 모든 도로구간에 대하여 고유 속도를 적용하는 이점이 있으나 교통계획모형의 추정 속도 또한 일평균 속도이기 때문에(1일 O-D적용) 배출량 과소 추정의 가능성을 피하기 어렵다.

2. 배출계수 특성

1) 배출계수 형태

온실가스 또는 대기오염물질 배출량의 미시적 산정(Tier 3 수준)을 위해 개발된 배출계수는 차량의 속도에 따른 단위 거리당 배출량을 나타내는 함수로서 실험을 통해 산출된다. Figure 1은 비선형이며 오목한(concave) 배출계수의 전형적인 형태를 보여 주고 있다. 차량 한 대의 배출량은 차량의 속도에 따른 배출계수 값에 주행거

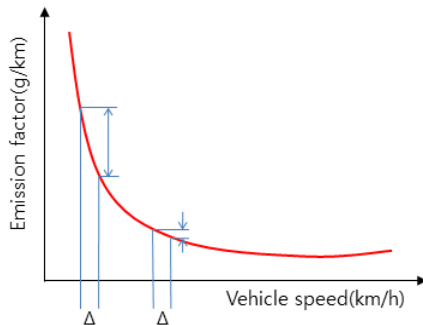


Figure 1. Typical shape of tier 3 emission factor

리를 곱해서 얻어진다. 단위 거리당 배출량은 차량의 속도가 매우 낮을 때는 높은 값을 나타내나 속도가 증가하면서 그 값이 낮아지되 한계감소량 또한 속도가 증가함에 따라 낮아져 오목한 형태를 갖는다(65km/h까지 음지수 함수의 형태로 나타나며 65km/h를 넘어서 고속으로 갈수록 소폭 상승). 따라서 통행속도가 낮은 범위에서 Δ만큼 속도가 변화한다면 속도가 높은 범위에서 같은 양의 속도가 변화하는 것보다 배출량의 변화가 현저히 크다고 할 수 있다.

특정 온실가스 또는 대기오염물질 저감정책이 혼합 시간대의 속도개선에 효과를 나타낸다고 가정한다면, 배출계수 곡선의 특성은 정책 평가를 위한 배출량 변화 산정 시 유의해야 함을 시사한다. 예를 들어 하루 동안의 배출량 감소를 산정하는 과정에서 일평균 속도 값으로 구한 배출계수에 하루 동안의 총 대-km를 적용하는 경우는 매 시간대의 속도 평균값에 따른 배출계수 분포와 그에 따른 대-km 분포를 적용하는 경우에 비해 언제나 배출량을 과소 산정하게 된다. 즉 속도자료의 집계(aggregation)가 미시적으로 이루어질 경우 일평균 값을 적용하는 것보다 정책 효과를 더 정확하게 측정한다고 할 수 있다. 이상과 같은 배출계수의 특성을 고려하면 본 연구에서 활용하고자 하는 미시적 ITS 정보(최소 5분 간격 집계)를 이용한 배출량 산정방법을 통해 교통운영 또는 수요관리 정책이 도로구간 또는 네트워크에 미치는 영향을 보다 정확히 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

2) 배출계수 개발을 위한 실험

배출계수는 해당 차량을 차대동력계(Figure 2 참조)



source: Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning, 2010.

Figure 2. Experiment with dynamometer

Table 1. Examples of NIER driving mode

Mode	time (sec)	distance (km)	ave speed (km/h)
Nier 1	873	1.14	4.7
Nier 3	878	2.36	10.8
Nier 7	875	5.98	24.6
Nier 9	926	8.76	34.1
Nier 12	793	14.41	65.4
Nier 14	807	21.82	97.3

source: National Institute of Environmental Research, 2009.

위에서 다양한 속도의 시험주행모드로 운행 후 배출량을 측정하여 회귀식 형태로 추정된다. 현재 우리나라에서 개발된 온실가스와 대기오염물질 배출계수들은 국립환경과학원에서 개발된 주행모드(NIER5) 모드라고 칭함)를 통해 개발되었으며 Table 1은 승용차 주행모드 사례를 보여 준다. 보는 바와 같이 해당 속도의 배출계수 개발을 위한 자료단위는 약 850초에서900초간의 시험주행을 통해 얻어진다.

3) 배출계수의 분류

이산화탄소(CO₂)와 질소산화물(NO_x)의 배출량은 차량의 엔진 크기, 연료 종류, 오염물질 저감장치 등의 요인에 의해 결정되고 배출계수는 차종별, 유종별, 연식별(오염물질 저감장치의 기술수준 및 성능은 최근 차량일수록 높음)로 분류된다. 본 연구에서 적용한 이산화탄소 배출계수는 24개 차종별, 유종별로 구분되고 질소산화물의 배출계수는 연식별 분류가 추가되어 이륜차를 제외하고도 89개에 이른다(Wu et al., 2011).

5) National Institute of Environmental Research(국립환경과학원)

3. 배출량 산정식

특정시간대(j), 특정도로구간(i)을 통행하는 자동차에서 배출되는 온실가스 및 대기오염물질은 구간거리, 교통량, 배출계수의 함수이며 식(1)에 의해 계산된다. 식(1)에서 배출계수는 단위 거리당 배출량을 나타내며 속도, 차종(연식 포함), 연료 종류 등에 따라 결정된다. 따라서 배출량 산정을 위해 배출계수 이외에 교통량, 차종비, 연식, 유종비, 속도, 구간거리 등의 자료가 필요하다.

$$E_{ij} = \sum_{ijkl} l_i v_{ijkl} f_{kl}(s_{ij}) \quad (1)$$

여기서,

- E : 배출량
- l : 구간 길이
- v : 교통량
- f : 배출계수
- s : 속도
- i : 구간 index
- j : 시간 index
- k : 차종 index
- l : 유종 index

4. ITS 자료수집 체계

1) 고속국도 교통관리시스템 수집 자료

한국도로공사는 교통정보제공, 돌발상황관리 서비스를 제공하는 고속국도 교통관리시스템을 구축·운영하고 있다. 고속국도 교통관리시스템은 고속국도 전 구간에 1 km 간격으로 전체 차로에 설치된 루프검지기를 이용하여 30초 단위의 교통량과 지점평균속도를 산출한다. 2006년 하이패스를 전체 요금소로 확대한 후 하이패스 이용 차량이 꾸준히 증가하고 있다. 한국도로공사는 하이패스 장차량량을 정보 수집원으로 활용하기 위해 DSRC 노변 장치를 설치하는 하이패스 기반 교통정보시스템 구축사업을 추진하고 있고 1,804km, 약 500개 구간의 평균속도를 산출하고 있다

2) 일반국도 교통관리시스템 수집 자료

국토해양부 5개 지방국토관리청은 교통정보제공, 돌발상황관리 서비스를 제공하는 일반국도 교통관리시스템을 구축·운영하고 있다. 일반국도 교통관리시스템은 일반국도 2,552km(18.5%) 구간에 지점검지기를 이용하여 1분 단위의 교통량과 지점평균속도를 산출한다. 일반국도 교통관리시스템은 지점검지기와 함께 차량 번호판을 인식

하는 장치(AVI, Automatic Vehicle Identification)를 이용해 구간통행시간 자료를 산출한다.

3) 국가교통정보센터 연계자료

국토해양부는 한국도로공사, 지방국토관리청, 지방자치단체가 운영하는 교통관리시스템을 연계하여 고속국도, 일반국도, 도시부도로의 교통정보를 통합하여 교통정보서비스를 제공하는 국가교통정보센터를 운영하고 있다. 교통정보연계는 'ITS 표준 노드·링크 구축·관리 지침', '기본교통정보교환 기술기준Ⅳ'에 따라 표준화된 항목과 형식으로 이루어지므로, 국가교통정보센터의 교통량, 평균 속도자료는 각 교통관리센터의 자료를 ITS 표준 노드 링크의 도로구간(link) 단위, 5분 단위로 집계된 것이다.

4) 활용대상 자료 선정

한국도로공사와 지방국토관리청의 교통관리시스템 수집 자료와 국토해양부 국가교통정보센터 연계자료의 속성이 온실가스와 대기오염물질 산정을 위한 자료요구사항 충족도에는 큰 차이가 없다. 따라서 본 연구는 자료 취득의 용이성을 고려하여 5분단위로 집계된 국가교통정보센터 연계자료를 활용하였다.

5. 자료의 보완

앞서 기술한 바와 같이 집계단위가 작은 평균 속도를 적용한 배출계수가 집계단위가 큰 평균속도를 적용한 배출계수보다 더 정확한 배출량을 산정할 수 있다. 따라서 하루 또는 그 이상의 기간 동안 배출량 산정을 하기 위해 교통량, 차종비, 유종비, 속도, 구간거리, 연식 등의 자료 외에 시간대별 차종비가 요구된다. Table 2는 배출량 산정을 위해 요구되는 자료와 국가교통정보센터 정보가 생성할 수 있는 자료, 미생성 자료, 제한적으로 생성할 수 있는 요구 자료의 특성을 비교 제시하고 있다.

교통량, 속도, 구간거리 등의 자료는 국가교통정보센터의 검지기 정보로부터 매 5분 간격으로 획득 가능하나 검지기 인프라가 구축된 고속국도 전 구간과 국도 2,552km(전체 18.5%)에 한정된다. 검지기 정보는 차종비를 제공하지 않고 차종계 만을 제공하고 있으며 따라서 국토해양부의 교통량 상시/수시 조사지점 조사자료로부터 차종비를 1차적으로 구하였다(12개 차종). 교통량 상시/수시 조사지점 조사자료의 차종구분의 세밀함은 배출계수 적용을 위한 차종(유종, 연식

Table 2. Required and available data from ITS

Pollutant type		CO ₂	NO _x
required data	volume	○	○
	volume ratio by time	○	○
	vehicle type ratio	×	×
	vehicle type by fuel	×	×
	speed	○	○
	distance	○	○
	model year	-	×

Note: '○' available, '×' unavailable, '-' not required

포함) 구분에 미치지 못하기 때문에 전국 자동차등록통계에 의하여 보정하였다. 도로가 위치한 지역의 자동차등록통계를 사용하지 않고 전국 자동차등록통계를 이용한 이유는 지역 간 간선도로를 연구의 대상으로 하기 때문이다. 현재 국내에서 특정 도로구간 교통량의 유종비, 연식 자료는 구축되어 있지 않으며 따라서 전국 자동차등록통계를 통해 보완하였다.

6. 배출량 산정 과정

특정 도로구간에 대하여 배출량을 산정하는 과정은 Figure 3과 같다. 국가교통정보 센터의 속도자료와 국토해양부 상시/수시 조사지점 자료 및 전국 자동차등록통계에 의한 차종비(유종, 연식 포함) 자료를 이용해 배출계수를 정하고 이를 교통량, 구간거리 등에 곱하여 배출량을 산정한다.

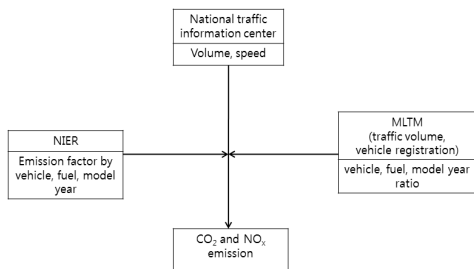


Figure 3. Emission calculation process

III. 배출량 특성 분석

1. 분석대상 자료

획득된 자료는 수도권 및 경기도 지역 고속국도와 일반국도의 5분 간격 속도와 교통량이 기록된 자료이다. 기록된 시간은 2010년 10월 17부터 23일까지의 1주일 간이다. 고속국도 및 일반국도의 상시/수시 조사지점에 대응하는 표준 링크에 해당하는 자료를 추출하여 대상구간 선정을 위한 자료로 사용하였다.

2. 대상구간 및 요일 선정

1) 대상 구간 선정

수도권 및 경기도 지역을 통과하는 서울외곽순환고속도로 남측 구간, 영동고속도로, 중부고속도로, 서해안고속도로, 경부고속도로, 평택음성고속도로 등의 고속국도와 국도 1호선, 3호선, 42호선, 43호선, 45호선 등 일반국도의 속도, 교통량 자료를 그래프로 작성하여 속도, 교통량 패턴을 검토하였고(Figure 4, 5의 예시 참조), 상시/수시 조사 교통량과 1일로 집계된 검지기 교통량을 비교하여 자료의 품질이 우수한 4개 구간을 선정하였다. 선정된 고속국도 구간은 서울외곽순환고속도로 학의→판교, 평촌→산본 구간이며 일반국도 구간으로서 국도 3호선 실촌→광주, 국도 43호선 봉담→덕 구간이 선정되었다.

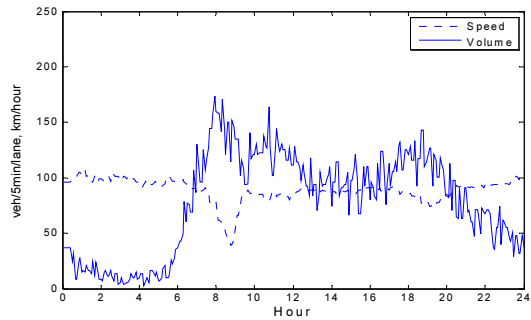


Figure 4. Speed and volume profile on Seoul Ring Road, Hakeu-Pangyo segment

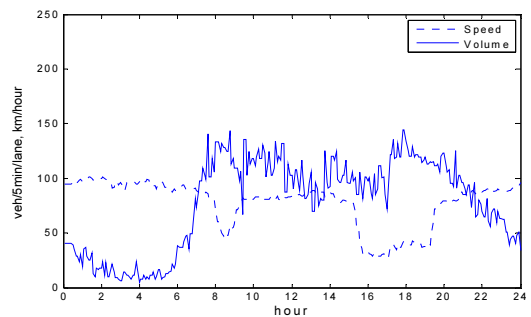


Figure 5. Speed and volume profile on Seoul Ring Road, Pyeongchon-Sanbon segment

2) 대상 요일 선정

고속국도 상시 조사자료는 2010년 10월 21일 목요일에 관측된 자료이다(매년 10월 셋째 목요일 조사 시행). 따라서 일주일간의 자료 중 목요일 자료를 사용하

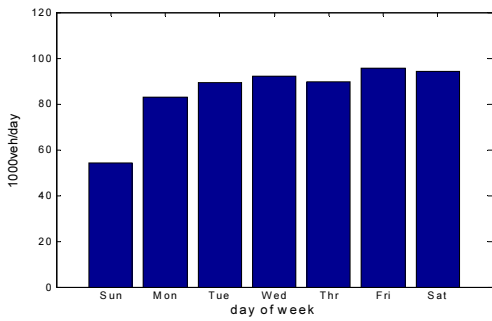


Figure 6. Day of week traffic volume distribution on Seoul Ring Road, Hakeu-Pangyo segment

는 것이 상시 조사자료의 차종비 사용을 위해 바람직하다고 할 수 있다. 주중 요일별 교통량 분포는 선정된 4개 구간에 대하여 Figure 6과 같이 거의 동일한 수준으로 나타났다. 또한 검지기 자료가 수집된 1주간 날씨는 소량의 비가 내렸거나 양호하였다. 따라서 본 연구의 모든 분석을 위해 10월 21일 목요일 자료가 사용되었다.

3. 대상구간 속도-교통류율 관계

선정된 구간의 목요일 검지기 자료의 품질을 확인하

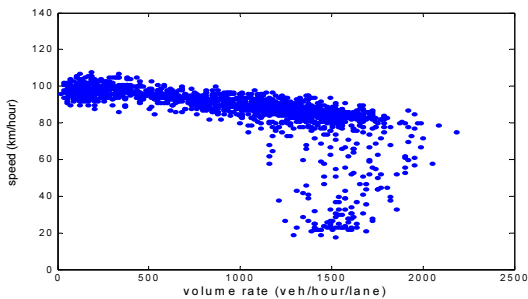


Figure 7. Speed-flowrate relationship on Seoul Ring Road, Hakeu-Pangyo segment

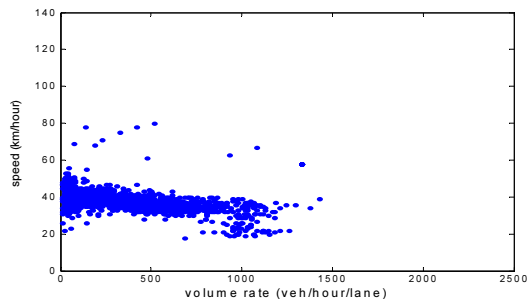


Figure 8. Speed-flowrate relationship on National road No 43, Bongdam-Deok segment

기 위하여 매 5분 간격의 평균속도, 교통류율의 관계를 그래프로 작성하였다(Figure 7, 8). 그래프에서 보는 바와 같이 전형적인 교통류율-속도 관계 형태를 나타낼 수 있다. 최고 관측 교통류율은 외곽순환고속도로 학의→판교 구간이 약 2,000대/시로서 가장 높게 관측되었고 일반국도 43호선 봉담→덕 구간이 약 1,300대/시로서 가장 낮게 나타났다. 이 구간의 경우 항공사진 판독 결과 다수의 신호교차로를 포함하고 있으며 이 때문에 용량에 제약이 있을 것으로 판단된다.

4. 집계 수준별 배출량 산정 결과

이산화탄소와 질소산화물의 배출계수는 65km/h 이하 속도에서 속도가 감소될수록 그 배출량이 기하급수적으로 또는 비선형적으로 증가한다. 이러한 배출계수의 특성을 감안하면 속도의 변화에 대한 미시적 집계 배출량을 더욱 정확히 예측할 수 있음을 시사한다. Table 3은 서울외곽순환고속도로 평촌→산본 구간의 속도 집계수준별 1일 배출량 산정 결과를 보여 준다. 보는 바와 같이 서울외곽순환고속도로 평촌→산본 구간의 경우 1일 평균속도로 산정된 배출량은 5분 평균속도로 산정된 배출량의 1일 총합보다 약 10%까지 배출량을 과소 추정하게 됨을 알 수 있다(다른 3개 구간, 약 1%-6% 과소 추정). Figure 5에서 제시된 속도, 교통량 변화 그래프를 보면 이 구간의 속도와 교통량 변화가 시간대에 따라 상당한 수준이었음을 알 수 있고 이러한 자료에 대하여 집계수준이 정확한 배출량 예측을 위해 중요함을 알 수 있다. 이러한 배경에서 어떠한 집계수준이 적절한지 판단할 필요가 있다. 앞서 검토한 바와 같이 배출계수의 개발 실험시 약 15분의 시험 주행이 이루어진다. 또한 통상적으로 구간 또는 교차로의 용량 분석 시 15분간의 집계 자

Table 3. Emission by aggregation level(Seoul Ring Road, Pyeongchon-Sanbon segment)

Aggregation level	CO ₂		NO _x	
	ton/day	ratio to 5min (%)	kg/day	ratio to 5min (%)
5min	77.2	100.00	379.3	100.00
15min	77.1	99.85	378.9	99.92
30min	77.0	99.75	378.4	99.78
60min	76.3	98.78	376.4	99.26
90min	75.9	98.33	374.9	98.84
120min	75.1	97.20	370.7	97.75
1day	70.2	90.84	349.0	92.01

료가 안정적 교통상황으로서의 최소 단위로 사용된다. 따라서 본 연구는 15분간의 속도, 교통량 집계가 배출량 산정을 위해 적절한 집계단위라고 판단하였고 이후 자료 분석 시 15분간의 집계자료를 사용하였다.

5. 속도, 교통량, 배출량 관계

대상 구간에 대한 속도, 15분 교통류율, 이산화탄소 및 질소산화물 배출량의 시간대별 변화 패턴을 분석해보면 이산화탄소와 질소산화물 모두 교통량 증가, 속도 감소에 민감하게 반응하여 증가하며 이산화탄소의 경우 그 민감도가 더 크게 나타난다(Figure 9). 이는 저속에서 속도 감소에 따른 이산화탄소 배출계수 한계 증가분이 크기 때문이다. 이와 같은 결과는 온실가스 배출량 관리를 위해 지체 또는 운행속도를 철저히 관리해야 함을 시사한다.

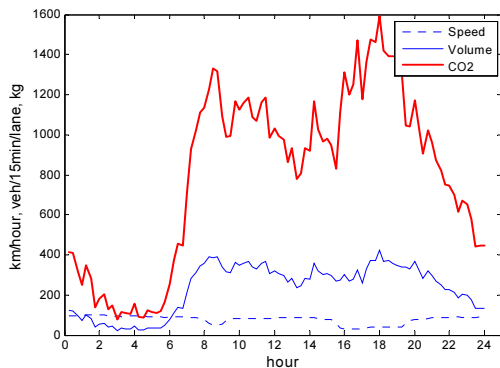


Figure 9. Speed-flowrate-CO₂ emission on Seoul Ring Road, Pyeongchon-Sanbon segment

6. 시간대별 차종별 배출량

1) 시간대별 차종별 이산화탄소 배출량

시간대별 차종별 이산화탄소 배출량을 산정해보면 교통량이 증가하고 속도가 저하되는 시간대에 배출량이 증가하는 패턴을 보인다. 각 구간의 버스, 화물차 등 중차량 비율은 21%-37% 수준이다. 그러나 중차량의 배출계수 값이 같은 수준의 속도에서 승용차보다 매우 높으므로 특히 화물차 비중이 높은 국도 3호선 실촌→광주 구간의 경우 중차량의 배출량이 전체의 약 60%를 차지하는 것으로 나타났다(Figure 10).

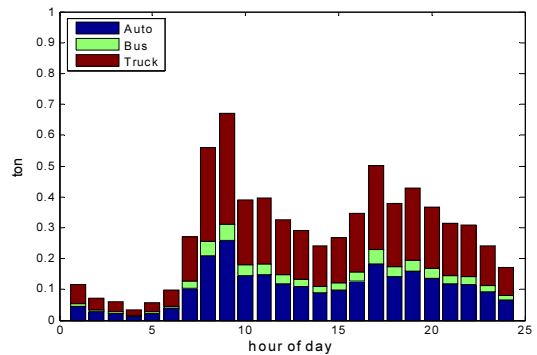


Figure 10. CO₂ Emission by vehicle type and TOD on National road No 3, Silchon-Gwangjoo segment

2) 시간대별 차종별 질소산화물 배출량

질소산화물의 배출량은 이산화탄소의 배출량보다 중차량의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났으며 국도 3호선 실촌→광주 구간의 경우 중차량의 비율은 약 37%이나 배출량은 전체의 약 90%를 차지하는 놀라운 결과를 보여 준다(Figure 11).

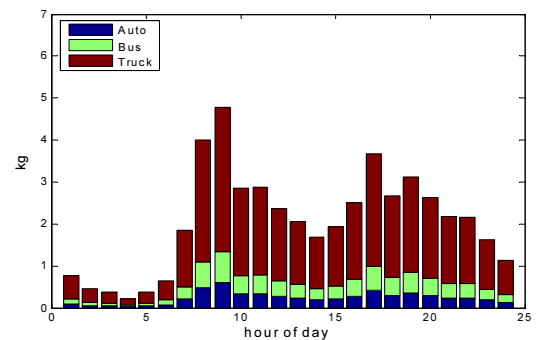


Figure 11. NO_x Emission by vehicle type and TOD on National road No 3, Silchon-Gwangjoo segment

7. 배출량과 혼잡도와의 관계

배출량과 혼잡도와의 관계를 알아보기 위해 15분 관측 단위의 V/C 비율과 이산화탄소 및 질소산화물 배출량을 연계하여 그래프로 나타내보면 배출량은 불안정류에 해당하는 관측치를 제외하고 혼잡도와 선형의 관계를 갖는다(Figure 12). 이는 배출계수 값이 일정 수준 이상의 특정 속도 구간에서 거의 변화하지 않아 배출량의 계산식에서 교통량에 곱해지는 상수로 작용하기 때문이다. 불안정류에 해당하는 관측치는 이러한 속도 구간보

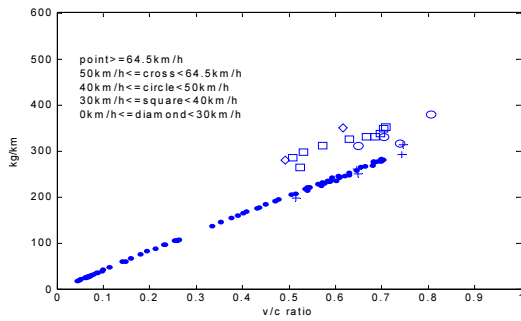


Figure 12. CO₂ Emission versus V/C on Seoul Ring Road, Pyeongchon-Sanbon segment

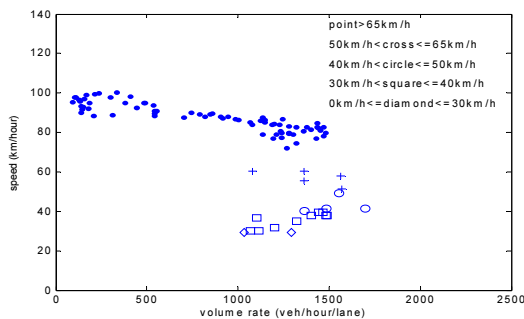


Figure 13. Speed-flowrate relationship on Seoul Ring Road, Pyeongchon-Sanbon segment

다 비교적 낮은 속도를 보이며 주류의 관측치가 보이는 V/C 대비 배출량 선형관계의 기울기와 다른 넓게 분포된 관계를 갖는다. 이상의 분석은 이산화탄소 및 질소산화물 배출량의 관리를 위해 교통류를 안정류 상태로 유지할 필요가 있다는 것을 보여 준다.

IV. 결론

1. 요약

ITS 정보를 이용해서 이산화탄소 및 질소산화물 배출량을 산정하는 방법론을 정립하고 이를 사례 도로에 적용하는 과정에서 도출된 시사점을 정리해 보았다.

ITS 검지기 정보는 미시적 속도 자료 및 교통량을 제공할 수 있으나 배출계수를 적용하기 위한 차종비, 유종비, 연식비율 등은 제공하지 못한다. 따라서 자동차등록통계, 상시/수시 조사자료 등을 참조해 비율을 적용하는 방법을 사용하였고 이는 시간대별 차종비가 동일해지는 한계를 갖는다.

승용차에 비해 낮은 차종비를 구성하는 버스, 화물차 등 중차량의 이산화탄소 또는 질소산화물 배출량은 그

구성비에 비해 매우 높으며 따라서 중차량의 속도 관리가 배출량 관리를 위해 매우 중요하다.

이산화탄소나 질소산화물의 배출량은 교통량에 선형으로 비례하여 높아지나 불안정류에서는 비선형의 관계(지수적 형태)로 높아진다. 교통류가 불안정류 상태가 되지 않도록 하는 교통운영 및 수요관리가 배출량 저감을 위해 중요하다고 할 수 있다.

2. 정책 제언 및 향후 연구 과제

ITS 정보를 사용하여 도로구간의 이산화탄소 또는 질소산화물 배출량을 산정하는 방법은 미시적 집계간격으로 배출량을 산정할 수 있기 때문에 혼잡시간대에 교통관리 기법 또는 수요관리기법을 적용했을 때 그 효과를 보다 정확하게 측정할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 현재 도로공사, 국가종합교통정보센터 등에서 제공하고 있는 도로구간 실시간 속도정보와 같이 검지기 정보를 활용한 실시간 이산화탄소, 질소산화물 배출량 정보 제공에 적극 활용할 수 있다. 또한 서론에서 기술한 바와 같이 정립된 방법론은 현재 구득 가능한 자료수준에서 기간교통물류권역의 지속가능성 평가 지표의 정확한 산정을 위해 채택 가능한 대안이다. 그러나 이를 위해서는 일반국도 전 구간에 대하여 ITS 인프라를 구축해야 하는 과제가 따른다.

중차량은 그 구성비에 비하여 매우 높은 비율로 이산화탄소와 질소산화물을 배출한다. 중차량 배출량을 정확히 추정하기 위해서는 교통량, 속도 정보를 다양한 차종별로 구분하여 제공하는 것이 매우 중요한 선결 과제이다. 현재 속도, 교통량 검지를 위해 많이 사용되고 있는 루프검지기, 레이더검지기, 영상검지기 등의 검지 정밀도를 높여 차종별 교통량, 속도를 제공하기 위한 연구가 필요하다.

또한 집계수준별 배출량 변화 패턴을 다양한 도로구간 자료에 대하여 검토할 필요가 있다. 배출량이 급격히 변화하는 브레이크포인트 집계수준이 공통적으로 존재한다면 집계수준 설정을 위한 주요한 참고자료가 될 것이다.

REFERENCES

Gyeonggi Research Institute (2002), Estimating Automotive Emission Levels in SMA and Evaluating Transport-related Environment Policies (수도권 자동차 대기오염물질 배출량 추정 및 대기오염 저감정책방안 연구). Gyeonggi-do (2006), 2006 Gyeonggi-do Environment

White Paper (2006년도 경기도 환경백서).
 IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
 IPCC (2007), 2007 IPCC Fourth Assessment Report (AR4) by Working Group 1.
 Jang Y. J. (2011), A Study on Estimation Method for Greenhouse Gas Emission from Vehicles Considering Statistical Distribution (통계적 분포를 고려한 온실가스 배출량 산정방법론 연구), National University of Seoul.
 Kim D. Y. (2010), Spatial Analysis of Air Pollutants Emission in the Seoul Metropolitan Area (수도권 대기오염물질 배출의 공간분포 분석), Gyeonggi Research Institute.
 Kim G. D. (2011), A New Methodology to Estimate Greenhouse Gas Emissions Emitted from Road Transportation in Gyeonggi Province (신규방법론에 입각한 경기지역 도로수송부문의 온실가스 배출량 추정), Gyeonghee University.
 Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning (2010), Development of Greenhouse Gas Reduction and Management Technology in Transport Sector (교통 부문 온실가스 저감 및 통합관리기술 개발).
 Korea Transport Institute (2010), Survey and Analysis of Transport Sector GHG and Air Pollutant Emissions (교통부문 온실가스 및 대기오염물질 조사분석).
 Ministry of Environment (2008), GHG Emission Inventory and Emission Factor Development in Environment Sector (환경부문 온실가스 배출량 인벤토리 작성 및 배출계수 개발).
 Ministry of Environment (2009), Environment White Paper (환경백서).
 Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (2011), Sustainable National Transportation and Logistics Master Plan (지속가능 국가교통물류발전 기본계획).
 National Institute of Environmental Research (2005), Study on Automobile GHG Mitigation Measures (자동차 온실가스 저감대책 연구).
 National Institute of Environmental Research (2006),

Study on Transport Sector GHG Emission Factor Calculation (수송부문 온실가스 배출계수 산정 연구). National Institute of Environmental Research (2007), Study on National Transport Sector GHG Emission Statistics (수송부문 온실가스 국가배출통계 구축 연구). National Institute of Environmental Research (2008), System for Climate Change in Transport Sector (I) (수송부문 온실가스 기후변화대응 시스템 구축 (I)). National Institute of Environmental Research (2009), System for Climate Change in Transport Sector (II) (수송부문 온실가스 기후변화대응 시스템 구축 (II)). National Institute of Environmental Research (2010), Calculation Guide for National Air Pollutant Emissions (국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람 (II)).
 Shin Y. I., Jung H., Lee J. G., Choi S. H., Jung A. R., Lee H. J., et al. (2010), Estimation of the Greenhouse Gas Emission from Road Source by the Tier 3 (Tier 3 수준의 도로부문 온실가스 배출량 산정, 2010 한국자동차공학회 학술대회), KSAE 2010 Annual Conference, pp.699-704.
 Wu, S. K., Kim Y., Park S., Kim M., Han D. (2011), A Study on Evaluation Methodology of Greenhouse Gas and Air Pollutant Emissions on Road Network (도로 네트워크의 온실가스 및 대기오염물질 산정방법론 연구), Korea Transport Institute.

알림 : 본 논문은 "우승국, 김영국, 박상조 외 2인, 도로 네트워크의 온실가스 및 대기오염 물질 산정 방법론 연구(차량에서 발생하는 이산화탄소와 질소산화물 배출량 산정을 중심으로), 한국교통연구원, 2011"의 일부 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

- ☞ 주 작 성 자 : 우승국
- ☞ 교 신 저 자 : 우승국
- ☞ 논문투고일 : 2013. 2. 7
- ☞ 논문심사일 : 2013. 3. 5 (1차)
2013. 3. 20 (2차)
- ☞ 심사판정일 : 2013. 3. 20
- ☞ 반론접수기한 : 2013. 10. 30
- ☞ 3인 익명 심사필
- ☞ 1인 abstract 교정필