

# 기종점 기반의 도로이동오염원 배출량 추정모형

## Development of O/D Based Mobile Emission Estimation Model

이규진\* · 최기주\*\* · 류시균\*\*\* · 백승걸\*\*\*\*

Lee, Kyu jin · Choi, Keechoo · Ryu Sikyun · Baek seung kirl

### Abstract

This study presents O/D based emission estimation model and methodology under cold- and hot-start conditions. Contrasting with existing link-based model, new model is able to estimate cold-start emissions with actual traffic characteristics. The results of the case study with new model show similar amount of emission with existing model under hot-start conditions, but five times much more than existing model under cold-start conditions. The annual social benefit estimated by this model is 56.2 hundred million won, which is 48% higher than the result from existing model. It means current green transportation policies are undervalued in terms of air quality improvement. Therefore, New model is expected to improve the objectivity of air quality evaluation results regarding green transportation policies and be applied in various transportation-environment policies.

**Keywords :** hot start emission, cold start emission, mobile emission, O/d based model, green transportation, air quality assessment

### 요 지

본 연구에서는 기종점 기반의 열간·냉간 시동 배출량 추정 모형과 기법을 제시하였다. 본 모형은 기존 링크 기반의 모형과 달리, 교통특성을 현실적으로 고려한 냉간 시동 배출량을 함께 추정할 수 있는 장점이 있다. 본 모형을 가상의 녹색교통 정책에 적용한 결과, 열간 시동 배출량은 기존 모형의 적용결과와 큰 차이가 없는 것으로 나타난 반면, 냉간 시동 배출량은 기존 모형의 적용결과에 비해 약 5배 많은 것으로 나타났다. 그리고 본 모형에 의해 추정된 연간 사회적 편익은 기존 모형에 의한 37.9억원 보다 약 48% 많은 56.2억원으로 추정되어, 기존 녹색교통 정책이 대기질 개선 측면에서 저평가 받았던 것을 확인할 수 있었다. 본 연구결과는 녹색교통 정책에 대한 대기질 평가 결과의 객관성을 향상시킬 수 있으며, 보다 다양한 교통-환경 정책에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**핵심용어 :** 열간 시동 배출량, 냉간 시동 배출량, 도로이동오염원, 기종점 기반 모형, 녹색교통, 대기질 평가

## 1. 서 론

### 1.1 연구 배경 및 목적

최근 선진국을 중심으로 세계 많은 국가들은 녹색 변환(Green Conversion)을 통해 경제성장과 환경보호를 동시에 추진하는 새로운 패러다임으로의 전환을 추구하고 있으며, 우리나라 또한 건국 60년을 맞아 '저탄소 녹색성장'을 국가의 새로운 비전으로 제시하는 등 환경 친화적인 경제성장을 추구하고 있다. 그 일환으로 교통 분야에서도 철도, BRT, 자전거, 녹색교통 수요관리와 같은 녹색교통 정책을 추진하기 위한 많은 시도가 진행되고 있다.

그러나 다양한 교통정책 중 효과적인 정책을 선별하기 위한 타당성 평가에서 녹색교통 정책의 상당수가 타당성이 부족하여 추진에 큰 걸림돌이 되고 있는 것으로 나타났다. 이

는 녹색교통의 주요 추진 목적인 대기질 개선 평가에 대한 연구가 부족한 것도 큰 원인으로 작용하고 있다. 가령, 현재 교통사업에 대한 대기질 평가는 한국개발연구원(2008)의 「도로철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정 보완 연구(제5판)」, 국토해양부(2009)의 「교통시설 투자평가 지침 개정안」, 한국철도도시공단(2006)의 「철도투자 평가지침」과 같은 타당성평가 지침을 통해 이루어지고 있으나, 해당 지침에 반영된 대기질 평가 모형은 환경 중심으로 접근하여 연구되었기 때문에 교통특성을 효과적으로 고려하지 못하고 있다. 이에 따라 대기질 개선 기여가 큰 목적인 녹색교통 정책은 제평가를 받지 못하고 있으며, 기존 교통정책과 마찬가지로 수송 효율성 중심으로 평가가 이루어지고 있는 문제가 있다.

이는 그간 국가 교통-환경 정책을 수립하는데 있어서도 마찬가지로이다. 효율적인 교통-환경 정책을 수립하기 위해서는

\*정회원 · 교신저자 · 아주대학교 TOD기반 지속가능 도시교통 연구센터 연구교수 (E-mail : transjin@ajou.ac.kr)

\*\*정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수 (E-mail : keechoo@ajou.ac.kr)

\*\*\*경기개발연구원 교통정책연구부 연구위원 (E-mail : ryu@gri.re.kr)

\*\*\*\*한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (E-mail : bsktrans@ex.co.kr)

교통부문에서 유발되는 배출량에 대한 객관적인 정보가 요구되지만, 교통부문의 배출량 추정 방법론의 하나인 CAPSS (Clean Air Policy Support System: 대기정책지원시스템)의 경우도 개략적인 수준에 머무르고 있으며, 관련연구 또한 개선점이 많은 것으로 나타나고 있다(최기주 등, 2009).

통행지체와 같은 교통특성을 반영할 수 있도록 교통망에 의해 추정된 결과를 기반으로 한 링크 기반의 배출량 추정 기법이 그 대안으로 제시되고 있으며, 그와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있지만, 해당 모형은 냉간 시동 배출량을 고려하지 못하는 문제점이 존재한다. 특히, BRT(Bus Rapid Transit), 경전철, 자전거 등과 같은 녹색교통 정책과 더불어 TOD(Transit Oriented Development) 정책은 중단거리 통행 외에 단거리 통행의 큰 변화를 발생시킬 것으로 예상되며, 단거리 통행의 변화는 냉간 시동 배출량에 많은 영향을 미치게 되는데, 링크 기반의 기존 대기질 평가 모형으로는 각 차량들의 출발·도착간 단일 통행거리 변화의 반영에 한계가 있기 때문에 냉간 시동 배출량의 현실적인 평가가 어려운 문제가 있다. 또한 기존 링크 기반의 배출량 추정 모형은 추정 결과도 링크 기반으로 도출되기 때문에, 그 활용성 또한 현 링크에서 배출된 배출량을 파악하는 것으로만 국한된다.

따라서 본 연구에서는 교통특성을 현실적으로 고려할 수 있는 기존 링크 기반의 배출량(열간 시동 배출량) 추정 기법을 응용·연계하여 교통특성을 반영한 냉간 시동 배출량도 함께 추정할 수 있는 기중점 기반의 배출량 추정모형을 제시하여, 녹색교통 및 TOD 등에 대한 대기질 평가결과의 객관성 향상에 기여하는 것을 목적으로 한다. 아울러 교통정책 평가 측면에서 본 모형의 활용방안을 제시하여, 본 연구가 다양한 교통환경 정책에 활용될 수 있도록 기여하는 것을 목적으로 한다.

## 1.2 연구 방법 및 범위

본 연구에서는 기존 관련 연구와 모형을 먼저 검토한 후, 기존에 충분히 고려되지 못했던 교통특성이 반영된 냉간 시동 배출량이 함께 추정될 수 있도록 한다. 도로이동오염원 배출량은 차량들의 통행거리 패턴에 많은 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 교통계획분야에서 적용 가능한 자료와 방법론의 수준을 고려하여 실질적인 차량들의 통행거리가 반영될 수 있도록 접근한다. 다음으로 본 연구에서 구축한 모형을 실제 교통사업에 적용하여 대기질 개선효과 평가하고, 이를 기존 결과와 비교하여 본 모형이 가지는 의미를 찾아본다. 그리고 본 기중점 기반의 구축 모형에 대한 정책적 활용방안을 제시한다.

본 연구의 범위는 도로이동오염원 배출량 중 열간·냉간 시동 배출량을 대상으로 한다. 그리고 기존 연구된 모형에서 환경부문과 관련된 부분은 그대로 반영하되, 교통특성과 관련된 부분을 중심으로 개선한다.

## 2. 관련연구 고찰

### 2.1 기존 연구의 검토

조역수(1993)는 우리나라에서 처음으로 교통수요예측모형을 통해 분석구간의 통행량을 추정하고 하루 중 차종별 통

행량 변화를 파악하여 각 차종별 시간대별 통행량을 산출하였으며 대기확산모형을 이용하여 배출량을 추정하였다.

Barth et al.(1996)은 EPA(Environmental Protection Agency)의 MOBILE과 CARB(California Air Resources Board)의 EMPAC은 다양한 교통상황의 영향 하에서의 대기오염물질 배출량 분석에는 한계가 있음을 인식하고, 차량주행모드의 차량상태를 반영해야 한다고 하여, NCHRP(Development of a Modal Emission model)모형을 제시하였다.

Peter R. Stopher et al.(1996)은 하루를 오전 침두, 정오, 오후 침두, 야간으로 구분하여 교통수요예측모형에 의해 VMT 및 속도를 구하고 배출량 추정모형인 MOBILE 5를 이용하여 분산된 배출량을 추정하였다.

김현명(1997)은 기존 통행배정모형의 경우 승용차 단위로 통행량을 예측함에 따라 각 차종에 대한 세분화된 대기오염물질 배출량 분석을 할 수 없었던 것에 착안하여 복수수단 통행배정모형을 이용함으로써 버스나 트럭과 같은 대형 차종의 배출량을 추정하였다.

김동영(1998)은 자동차등록대수에 일평균주행거리를 곱하여 총 VKT(Vehicle Kilometer Traveled)를 산출한 후 도로연장에 차선을 고려한 ‘차선×길이’를 할당지표로 이용하여 대상공간에 VKT를 할당하고 여기에 배출계수를 적용하여 격자별 배출량을 산정하였다.

김운수 등(1999)은 교통·환경부문의 통합 연계 분석에 의해 서울시 차종별 배출량을 산정하였으며, 환경주행세 부과에 따른 대기환경 개선효과를 분석하였다.

Hesham Rakha et al.(2001)은 연료소비와 배출량이 속도와 가속도에 민감하게 반응함을 증명하고, ITS 상에서 연료소비의 영향에 따른 배출량을 산정하기 위한 방법론을 제시하였다.

Park et al.(2001)은 개별 차량의 운전행태를 반영할 수 있는 Microscopic Emission Model을 개발하였다. VISSIM을 이용하여 개별차량들의 교통류 특성을 분석한 후 속도를 기반으로 한 MODEM(Microscopic emission inventory)과 결합하여 차량 배출량을 산정하였다.

엄정화(2002)는 통행배분모형을 이용하여 시간대별 통행속도와 VKT를 산정하였으며, 이를 통해 시간대별 자동차 대기오염물질 배출량을 산정하였다.

조규탁(2003)은 TDA에 기초하여 지역별 통행량과 통행속도를 평균화하여 자동차 배출량의 공간해상도 개선방안을 제시하였다.

Hesham Rakha et al.(2003)은 차량배출량 산출모형인 MOBILE5a, MOBILE6, VT-Micro, CMEM(Comprehensive Modal Emissions Model)을 비교분석하였다. 신호시스템 및 지능형교통체계에서의 미시적 교통류의 배출량 산정에 적합한 모형은 VT-Micro모형인 것으로 분석한 바 있다.

Coelho(2005)는 주행속도를 제어하기 위한 신호제어에 활용될 수 있는 차량 배출량 추정 방법론을 구축하였다.

$$DE = EF_i \times t_i + EF_a \times t_a + EF_d \times t_d + EF_c \times t_c \quad (1)$$

여기서,  $i$ : 정지시동,  $a$ : 가속,  $d$ : 감속,  $c$ : 순항

최기주 등(2009)은 차량의 통행특성을 반영하는 배출량 분

석기법을 기반으로 실측치로 보정한 총 주행거리가 반영된 교통모형과 차량의 특성에 적합한 배출계수를 적용할 수 있는 대기모형을 결합한 모형을 제시하였다.

환경부에서는 배출량 분석을 위한 기초자료로 활용될 수 있도록 국내 실정에 맞게 개발된 대기보전정책지원시스템을 활용하고 있으며, 이는 자동차등록대수와 일평균주행거리를 기본데이터로 활용하여 도로이동오염원에 의한 배출량을 산정하고 있다.

미국의 경우 차량 평균속도와 차량 누적주행거리를 기반으로 지정된 실험조건에서 얻어진 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하며, 연방환경청(EPA: Environmental Protection Agency)이 개발해오고 있는 MOBILE라는 배출량 산정 프로그램을 활용하고 있다.

$$Q = \text{평균속도} \times EF \times VMT \quad (2)$$

여기서,  $Q(\text{kg/day})$ : 배출량

$EF(\text{kg/mile, 대})$ : 배출계수

$VMT(\text{mile/day, 대})$ : 총 주행거리

유럽의 경우 연간 시동 배출에 대해 속도를 고려한 배출계수를 작성 후 다양한 인자에 대해 보정하는 방식을 취하며, 반영되는 교통특성인 차량의 속도자료는 도로상을 주행하는 평균 주행속도가 사용되고 있다.

### 2.1.3 기존 연구의 한계

기존 연구 대부분은 연간 시동 배출량 추정을 목적으로 접근하였으며, 단거리 통행에서 주로 발생하는 냉간 시동 배출량에 대해서는 관련연구가 미미하다. 즉, 기존 연구는 대부분 링크 기반으로 연간 시동 배출량을 추정하고, 이를 지역 단위로 집계하여 특정 지역의 연간 시동 배출량을 추정하는 것에 활용범위가 국한되어있다. 링크에는 다양한 통행거리 패턴을 지닌 차량들이 포함되어 있기 때문에, 링크 기반으로 차량들의 통행거리를 반영한 냉간 시동 배출량 추정모형을 구축하는데 한계가 있기 때문에 새로운 접근 방법의 시도가 요구된다. 또한 새로운 접근 방법으로 구축된 모형을 통해 보다 다양한 정책적 활용방안을 모색할 필요가 있다.

## 2.2 기존 모형의 검토

도로상에서 발생하는 대기오염물질은 연간 시동 배출량, 냉간 시동 배출량, 증발 배출량, 도로비산먼지 배출량, 타이어 마모 배출량으로 구분할 수 있으며, 본 연구범위인 연간·냉간 시동 배출량 추정 모형은 일반적으로 아래와 같이 구성되어 있다.

### 2.2.1 연간 시동 배출량 추정 모형

연간 시동 배출량은 자동차 냉각수 온도가 70°C 초과할 때 발생하는 배출량이며, 각 링크의 총 주행거리에 링크에 해당하는 속도별 배출계수를 곱하여 추정하고 있다. 환경 분야에서는 VKT를 지역의 평균값을 적용하고 있으나, 교통 분야에서는 기종점 통행량을 도로 네트워크에 통행 배정하여 통행지체 등이 반영된 실제 통행거리에 의한 VKT를 적

용하고 있다.

$$E_{e,m}^{hot} = \sum_i vkt_{m,i} \times EF(v)_{e,m,i} \quad (3)$$

여기서,  $E_{e,m}^{hot}$ : (m)차종에 의해 배출된 (e)배출물질의 연간 시동 배출량

$vkt_{m,i}$ : (i)링크의 (m)차종에 대한 총 주행거리

$EF(v)_{e,m,i}$ : (i)링크의 (m)차종, (e)대기오염물질에 대한 속도(v)에 해당 하는 연간 시동 배출계수

### 2.2.2 냉간 시동 배출량 추정 모형

냉간 시동 배출량은 자동차 냉각수 온도가 70°C 이하 일 때 연간 시동 배출량 외에 추가로 배출되는 배출량이며, 해당 추정 모형은 총 연간 시동 배출량에 냉간 엔진 상태의 주행거리 분율과 연간 대비 냉간 배출량 비율을 곱하여 추정하는 구조이다. 해당 모형에서 교통특성인 총 주행거리가 중요한 변수로 작용되는데, 현재는 수도권 지역의 승용차 평균 1회 주행거리인 12.35km를 적용하고 있으며(국립환경과학원, 2007), 유럽의 경우도 평균 12.4km를 적용 하고 있다 (Andre et al., 1998). 기존의 냉간 시동 배출량 추정 모형을 정리하면 다음과 같다(EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, 2009).

$$E_{e,m}^{cold} = \beta \times N_m \times kt_m \times E_{e,m}^{hot} \times ((E_{e,m}^{cold}/E_{e,m}^{hot}) - 1) \quad (4)$$

여기서,  $E_{e,m}^{cold}$ : (m)차종에 의해 배출된 (e)배출물질의 냉간 시동 배출량

$\beta$ : 냉간 상태의 주행거리 분율

$N_m$ : (m)차종의 차량 대수

$kt_m$ : (m)차종의 총 주행거리

$E_{e,m}^{cold}/E_{e,m}^{hot}$ : (m)차종에 의해 배출된 (e)배출물질의 연간 시동 배출량 대비 냉간 시동 배출량 비율

위 모형에서  $\beta$ 는 온도(월 평균 온도)와 자동차 통행거리 특성(1회 평균 주행거리)에 의해 좌우되며, 산출식은 아래와 같으며, 자동차의 1회 평균 주행거리가 짧을수록 냉간 상태의 주행거리 분율인  $\beta$ 는 구조적으로 커지게 되며, 이는 곧 냉간 시동 배출량이 크게 산출되는 것을 의미한다. 즉, 단거리 통행시 냉간 상태 비율이 크기 때문에 이에 따른 냉간 시동 배출량이 크게 산출되는 구조이다.

$$\beta = 0.647 - 0.025 \times d - (0.00974 - 0.000385 \times d) \times T \quad (5)$$

여기서,  $d$ : 자동차의 1회 평균 주행거리

$T$ : 평균 기온

$E_{e,m}^{cold}/E_{e,m}^{hot}$ 은 온도와 배출물질의 종류에 따라 결정된다. 고

표 1. 연료·배출물질별  $E_{e,m}^{cold}/E_{e,m}^{hot}$

구분	가솔린	경유	LPG
CO	9.04-0.09T	1.9-0.03T	3.66-0.09T
NOX	3.66-0.006T	1.3-0.013T	0.98-0.006T
VOC	12.59-0.06T	3.1-0.09T	2.24-0.06T
PM	-	3.1-0.1T	

T: 평균 기온

온조건에서는 해당값이 1보다 작아서 냉간 시동 배출량이 음으로 산정되는데 이 경우에는 해당 배출량은 0으로 가정한다.  $E^{cold}/E^{hot}$ 의 산정식은 연료와 배출물질별로 표 1과 같다.

그리고 기존 교통 분야에서는 이러한 냉간 시동 배출량을 따로 분석하지 않고 있으며, 기존의 링크기반 배출량 추정 기법으로는 차량당 1회 주행거리를 반영할 수 없는 모형의 구조적인 문제가 내재되어 있다.

### 2.2.3 기존 모형의 한계

열간 시동 배출량 추정 모형의 경우 통행지체가 반영된 각 링크별 주행거리와 통행속도 등이 고려되기 때문에 교통 특성을 반영하고 있으나, 냉간 시동 배출량 추정 모형은 전체 자동차 평균 주행거리를 반영한 냉간 상태의 주행거리 분율을 적용함에 따라 교통특성 즉, 자동차의 1회 주행거리의 변화를 제대로 고려하지 못하고 있다.

국가의 총 냉간 시동 배출량을 추정하기 위해 평균 주행거리를 적용하는 것은 큰 문제가 되지 않지만, 현재 모형으로는 특정 지역 또는 특정 사업의 교통 정책에 대한 배출량 평가결과의 객관성을 확보하는 것에는 한계가 있다. 가령, 중장거리 통행의 전환이 발생하는 고속화도로 사업에 따른 냉간 시동 배출량 감소분을 추정할 경우, 전환되는 통행자들의 실제 평균 통행거리가 수도권 전체 평균 통행거리보다 길기 때문에 기존 모형으로 추정되는 냉간 시동 배출량은 다소 과대 추정될 여지가 있다. 모형에 반영하는 평균 1회 주행거리가 실제보다 낮은 값이 적용되면, 높은  $\beta$ 값이 적용됨에 따라 냉간 시동 배출량도 실제보다 높게 추정되기 때문이다. 반면, 단거리 통행의 전환이 발생하는 도심 경전철과 같은 사업에 따른 냉간 시동 배출량 감소분을 추정할 경우, 전환되는 통행자들의 평균 통행거리는 수도권 전체 평균 통행거리보다 짧기 때문에 냉간 시동 배출량은 과소 추정될 여지가 있다.

또한 기존 열간·냉간 배출량 추정 모형은 모두 링크 기반으로 산정된 배출량이기 때문에, 활용범위는 도로상에서 발생하는 배출량 분석으로 국한되어 있다. 즉, 기존 모형은 각 도로에서 발생한 배출량 외에 배출원의 근원지(가령, 차고지, 출발지 등)분석을 통한 교통수요관리 등의 교통정책 활용에는 한계가 있다.

## 3. 모형 개발

### 3.1 모형의 구축

배출량 추정기법의 분류에 있어 총 주행거리를 기준으로 총 배출량을 추정한 후 하위 지역으로 배출량을 배분하는 방식을 하향식 추정기법으로 정의하고, 링크별 배출량을 합산하여 총 배출량을 추정하는 방식을 상향식 추정기법으로 정의하고 있다. 교통특성을 보다 세부적으로 반영할 수 있는 모형이 상향식 추정기법으로 알려져 있으며(최기주 등, 2009), 본 연구에서는 평균화된 지표를 반영하지 않고 하위 단의 상세 자료 입력을 통해 배출량을 추정하는 상향식 추정기법으로 모형을 구성하였다. 그러나 기존에는 일반적으로 기종점 자료의 통행배정 결과를 통해 추정되는 링크별 배출

량을 합산하여 총 배출량을 추정하고 있는데, 여기서 산출되는 각 링크에는 1회 통행거리가 다양한 모든 주행 차량들이 포함되어 있기 때문에, 각 차량들의 출발·도착시간 통행거리를 분류할 수 없는 추정 모형의 구조적인 문제가 내재되어 있다.

본 연구에서는 교통특성을 반영한 열간 시동 배출량과 더불어 냉간 시동 배출량을 함께 추정하는 것이 근본 목적이다. 교통특성을 반영한 냉간 시동 배출량의 경우 차량들의 1회 통행거리가 핵심 인자인데, 기종점 자료를 통해서 차량들의 통행거리를 기종점 기준으로 파악할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 차량들의 통행거리 변화가 세부적으로 반영할 수 있도록 기종점 기반의 배출량 추정 모형을 구축하였다. 이때, 도로지체 등에 따른 차량들의 우회현상을 반영하여 추정된 링크별 통행시간을 기준으로 기종점간 최단 통행경로를 추정하고, 이때의 기종점간 통행거리를 기종점 기반의 배출량 추정 모형에 반영하여 도로지체 등의 교통특성이 반영되도록 하였다. 또한 열간 시동 배출량의 경우 기존의 기종점 통행량 자료를 교통망 네트워크에 통행배정 후 산출되는 링크 기반의 배출량 자료를 최소 통행시간 기반의 기종점 자료로 변환하고, 이를 기반으로 배출량이 추정되도록 모형을 구성하였다. 즉, 본 모형은 기존 통행저항을 반영할 수 있는 링크 기반의 열간 시동 배출량 추정 모형과 연계·응용하되, 기존에 교통특성을 반영하여 추정해내지 못했던 냉간 시동 배출량에 대해서도 통행저항을 반영하여, 열간과 냉간 시동 배출량을 함께 추정할 수 있는 특징이 있으며, 해당 모형식은 다음과 같이 정리된다.

$$E_e = E_e^{hot} + E_e^{cold} \quad (6)$$

$$E_e^{hot} = \sum_i \sum_j EF_e \left( \frac{d_{ij}}{t_{ij}} \right) \times Trip_{ij} \times d_{ij}$$

$$E_e^{cold} = \sum_i \sum_j (0.647 \times 0.025 - d_{ij} \times (0.00974 - 0.00385 \times d_{ij})) \times T_i \times E_{eij}^{hot} \times (E_e^{cold}/E_e^{hot} - 1)$$

여기서,  $E_e$ : 대기오염물질( $e$ )의 배출량

$E_e^{hot}$ : 대기오염물질( $e$ )의 열간 시동 배출량

$E_e^{cold}$ : 대기오염물질( $e$ )의 냉간 시동 배출량

$EF_e$ : 대기오염물질( $e$ )의 열간 시동 배출계수

$d_{ij}$ : 기종점  $ij$ 간 최소 통행거리

$t_{ij}$ : 기종점  $ij$ 간 최소 통행시간

$Trip_{ij}$ : 기종점  $ij$ 간 통행량

$E_e^{cold}/E_e^{hot}$ : 대기오염물질( $e$ )의 열간 시동 배출량 대비 냉간 시동 배출량 비율

$T_i$ : 기점( $i$ )의 평균 기온

여기서, 대기오염물질( $e$ )의 열간 시동 배출량 대비 냉간 시동 배출량 비율인  $E_e^{cold}/E_e^{hot}$ 은 기존 국립환경과학원 편람을 활용하여 수도권 평균값인 표 2를 적용한다.

### 3.2 모형의 적용기법

기종점 기반의 배출량 추정 기법 및 절차는 그림 1과 같다. 기종점간 통행량 자료를 교통망에 기종점간 통행비용을 최소로 하는 이용자 균형 통행배정 후, 이때의 기종점간 통

표 2.  $E_e^{cold}/E_e^{hot}$

구분	CO, CO <sub>2</sub>	NOx	VOC	PM
$E_e^{cold}/E_e^{hot}$	5.71	2.75	8.45	1.80

자료: 국립환경과학원(2007), “대기오염물질 배출량 산정방법 편람”.

주1: 수도권 승용차의 휘발유 차량 비율(66%)과 경유 차량 비율(34%) 적용하여 추정

주2: 수도권 평균 기온 13°C 적용하여 추정

주3: CO<sub>2</sub>의  $E_e^{cold}/E_e^{hot}$ 은 CO와 동일하다고 전제함



그림 2. 가상의 수원권 경전철 사업 개요

량 추정 모형을 그림 2와 같은 가상의 수원권 경전철 사업에 대해 적용하여 추정된 배출량과 변화량을 살펴본다. 가상의 수원권 경전철 사업은 광교신도시~범원사거리~카톨릭대병원~정자지구~성균관대역을 경유하는 노선으로 총 연장은 10.6km, 역사수는 10개로 구성되어 있다. 수단별 기종점 통행량 자료를 도로망과 철도망에 교통수요예측 시뮬레이션인 T-CAD을 활용하여 통행 배정하였고, 차종별·링크별 통행 시간, 총 통행거리, 통행속도 등을 추정하였다.

#### 4.2 연간 시동 배출량 및 사회적 비용의 추정

현재 교통 분야의 타당성 평가에서 적용되고 있는 배출계수와 대기질의 사회적 비용 원단위를 기초로, 기존 모형과 본 연구에서 구축한 모형을 적용하여 추정한 사업 시행 전·후의 연간 시동 배출량과 사회적 비용은 표 3-4와 같다.

기존 모형을 적용한 결과, 2015년 기준의 사업 미시행시 사업 영향권의 총 연간 시동 배출량은 34,758,798(톤/년), 사업 시행으로 총 15,866(톤/년)의 배출량이 감소되는 것으로 추정되었다. 그리고 이에 따른 사회적 비용의 감소분은 37.9(억원/년)으로 추정되었다.

표 3. 2015년 기준의 연간 시동 배출량과 사회적 비용 추정 결과(기존 모형)

구분	배출량(톤/년)			사회적 비용(억원/년)		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	185,434	185,259	175	15,715	15,701	14.8
NOx	203,565	203,460	105	20,756	20,745	10.7
PM10	11,767	11,761	5	3,917	3,915	2.0
VOC	33,256	33,223	33	3,275	3,272	3.2
CO <sub>2</sub>	34,324,776	34,309,228	15,548	15,659	15,652	7.1
합계	34,758,798	34,742,932	15,866	59,322	59,284	37.9

표 4. 2015년 기준의 연간 시동 배출량과 사회적 비용 추정 결과(본 모형)

구분	배출량(톤/년)			사회적 비용(억원/년)		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	180,212	180,053	159	15,273	15,259	13.5
NOx	197,461	197,372	89	20,133	20,124	9.8
PM10	11,579	11,575	4	3,854	3,853	1.7
VOC	32,651	32,623	28	3,215	3,213	2.7
CO <sub>2</sub>	33,311,149	33,296,130	15,019	15,197	15,190	6.9
합계	33,733,053	33,717,754	15,299	57,673	57,638	34.6

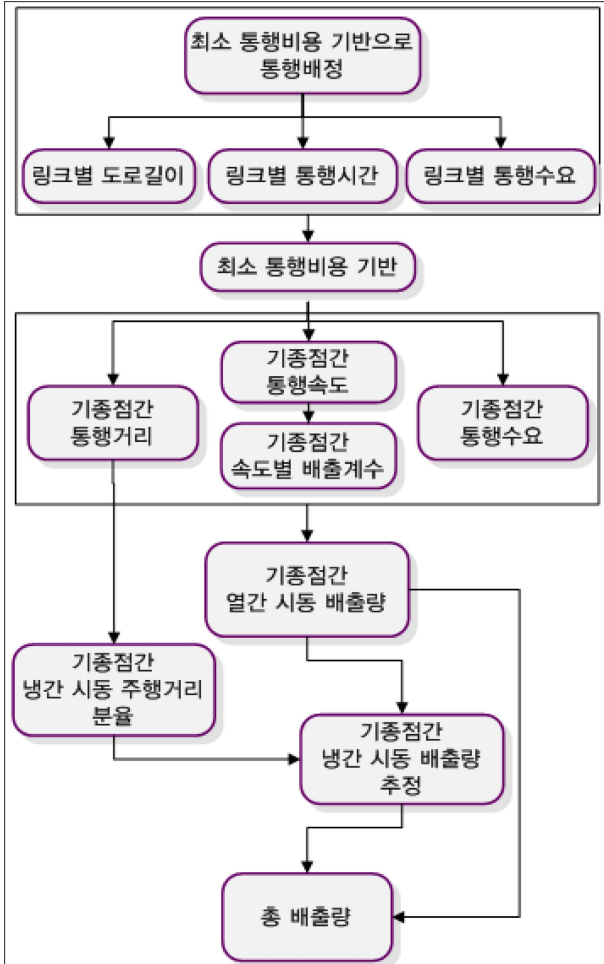


그림 1. 기종점 기반의 배출량 추정 절차

행거리( $d_{ij}$ )와 통행시간( $t_{ij}$ ), 통행량( $Trip_{ij}$ )을 산출한다. 이를 통해 기종점간 총 통행거리( $VKT_{ij}$ )를 산출하고, 여기에 기종점간 평균 통행속도( $d_{ij}/t_{ij}$ )에 해당하는 배출계수( $EF_e(d_{ij}/t_{ij})$ )를 적용하여 기종점간 연간 시동 배출량을 추정한다. 그리고 이를 기종점별로 집계하여 총 연간 시동 배출량( $E_e^{hot}$ )을 추정한다.

다음으로, 기종점별로 추정된 연간 시동 배출량과 기종점간 통행거리가 반영된 냉간 상태의 주행거리 분율을 적용하여 기종점간 냉간 시동 배출량을 추정하고 이를 집계하여 총 냉간 시동 배출량( $E_e^{cold}$ )을 추정한다.

## 4. 모형의 적용

### 4.1 사업 개요

본 연구에서 구축한 기종점 기반의 연간·냉간 시동 배출

본 연구에서 구축한 모형을 적용한 결과, 2015년 기준의 사업 미시행시 사업 영향권의 총 연간 시동 배출량은 33,733,053(톤/년), 가상의 사업 시행으로 총 15,299(톤/년)의 배출량이 감소되는 것으로 추정되었다. 그리고 이에 따른 사회적 비용의 감소분은 34.6(억원/년)으로 추정되었다.

본 모형에 의한 연간 시동 배출량은 기존 링크 기반의 연간 시동 배출량과 비교해 약 3.6%의 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 기존 모형의 경우 링크별 속도에 해당하는 배출계수가 적용되는 반면, 본 모형의 경우 기종점간 평균 통행속도에 해당하는 배출계수가 적용되었기 때문에 이러한 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 추정 결과의 신뢰성 측면에서는 본 모형과 같이 여러 링크별 평균 통행속도가 아닌 각 링크의 통행속도를 그대로 반영한 기존 모형의 결과가 더 높다고 할 수 있다. 그러나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며, 본 모형에 의한 배출량이 냉간 시동 배출량을 추정하기 위한 현실적인 입력값으로 적용되며, 본 모형의 활용성을 고려할 때 그 의미를 찾을 수 있다.

표 5. 기존 모형의 연간 시동 배출량과 사회적 비용 대비 본 모형의 연간 시동 배출량과 사회적 비용(표 4/표 3)

구분	배출량			사회적 비용		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	97.2%	97.2%	90.9%	97.2%	97.2%	91.2%
NOx	97.0%	97.0%	84.8%	97.0%	97.0%	91.6%
PM10	98.4%	98.4%	80.0%	98.4%	98.4%	85.0%
VOC	98.2%	98.2%	84.8%	98.2%	98.2%	84.4%
CO2	97.0%	97.0%	96.6%	97.0%	97.0%	97.2%
합계	97.0%	97.0%	96.4%	97.2%	97.2%	91.3%

#### 4.3 냉간 시동 배출량 및 사회적 비용의 추정

기존 모형을 적용하여 추정한 2015년 기준의 사업 영향권의 냉간 시동 배출량은 1,409,399(톤/년), 가상의 사업 시행으로 총 833(톤/년)의 배출량이 감소되는 것으로 추정되었다. 그리고 이에 따른 사회적 비용의 감소분은 2.4(억원/년)으로 추정되었다.

표 6. 2015년 기준의 냉간 시동 배출량과 사회적 비용 추정 결과(기존 모형)

구분	배출량(톤/년)			사회적 비용(억원/년)		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	5,744	5,739	5	487	486	0.6
NOx	938	937	1	96	96	0.3
PM10	12	12	0	4	4	0.3
VOC	1,251	1,250	1	123	123	0.3
CO2	1,401,454	1,400,627	827	1,109	1,108	0.9
합계	1,409,399	1,408,566	833	1,818	1,816	2.4

본 연구에서 구축한 모형을 적용할 결과, 2015년 기준의 사업 미시행시 총 냉간 시동 배출량은 7,102,851(톤/년), 가상의 사업 시행으로 총 10,037(톤/년)의 배출량이 감소되는 것으로 추정되었다. 그리고 이에 따른 사회적 비용의 감소분은 21.6(억원/년)으로 추정되었다.

표 7. 2015년 기준의 냉간 시동 배출량과 사회적 비용 추정 결과(본 모형)

구분	배출량(톤/년)			사회적 비용(억원/년)		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	29,196	29,091	105	2,474	2,466	8.8
NOx	4,687	4,676	12	478	476	1.9
PM10	59	59	0	20	20	0.0
VOC	6,380	6,350	30	628	625	2.9
CO2	7,062,528	7,052,638	9,890	5,587	5,579	7.9
합계	7,102,851	7,092,814	10,037	9,188	9,167	21.6

본 냉간 시동 배출량 추정 모형에 의해 추정된 배출량은 기존 모형에 의한 배출량과 비교해 약 5배 정도의 큰 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 기존 모형의 경우 수도권 평균 통행거리가 반영된 반면, 본 모형에서는 차량들의 통행거리 변화패턴을 실질적으로 반영하기 때문에 이러한 차이는 발생하는 것으로 판단된다.

그리고 본 모형의 냉간 시동 배출량 감소분은 기존 모형 결과와 비교해 약 12배 정도의 큰 차이가 나타났다. 이는 모형을 적용한 경전철 수단의 특성상 단거리 통행의 통행패턴 변화가 많이 발생하는데, 본 모형은 이러한 교통패턴의 특성이 반영되었기 때문으로 판단된다.

표 8. 기존 모형의 냉간 시동 배출량과 사회적 비용 대비 본 모형의 냉간 시동 배출량과 사회적 비용(표 7/표 6)

구분	배출량			사회적 비용		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	508.3%	506.9%	2,176%	508.0%	507.0%	1,459%
NOx	499.7%	498.8%	1,968%	497.9%	497.6%	558%
PM10	491.7%	492.0%	0%	500.0%	546.0%	0%
VOC	510.0%	508.0%	2,854%	510.6%	509.2%	1,160%
CO2	503.9%	503.5%	1,196%	503.8%	503.5%	921%
합계	504.0%	503.5%	1,204%	505.4%	504.7%	904%

그리고 본 모형에 의해 추정된 냉간 시동 배출량은 연간 시동 배출량의 약 21.1% 수준이며, 사업 시행에 따른 냉간 시동 배출량의 감소분은 연간 시동 배출량 감소분의 약 65.6% 수준인 것으로 나타났다. 냉간 시동 배출량은 단거리 통행에 의해 많은 배출량이 유발되는데, 도심내 경전철 사업의 경우 비교적 공로의 단거리 통행이 녹색교통 수단인 경전철로 전환되기 때문에 본 연구 결과와 같이 냉간 시동 배

표 9. 본 모형의 연간 시동 배출량과 사회적 비용 대비 냉간 시동 배출량과 사회적 비용(표 7/표 4)

구분	배출량			사회적 비용		
	미시행	시행	차이	미시행	시행	차이
CO	16.2%	16.2%	66.0%	16.2%	16.2%	65.2%
NOx	2.4%	2.4%	13.5%	2.4%	2.4%	19.4%
PM10	0.5%	0.5%	0%	0.5%	0.5%	0.0%
VOC	19.5%	19.5%	107.1%	19.5%	19.5%	107.4%
CO2	21.2%	21.2%	65.8%	36.8%	36.7%	114.5%
합계	21.1%	21.0%	65.6%	15.9%	15.9%	62.4%

출량의 큰 감소가 발생하는 것으로 나타났다.

즉, 평균 통행거리보다 짧은 단거리 통행이 녹색교통 수단 등으로 전환되는 경우 냉간 시동 배출량의 감소분은 총 배출량 감소분에서 큰 부분을 차지하므로 대기질 평가 결과에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났기 때문에 지금까지 교통사업에 따른 도로이동오염원 배출량에서 고려되지 않은 냉간 시동 배출량을 반영할 필요가 있다.

#### 4.4 모형의 활용방안

본 연구에서 제시한 기종점 기반의 배출량 추정 모형은 통행지체가 반영된 차량들의 통행거리를 기종점별로 반영함에 따라 보다 현실적인 배출량 추정결과를 기대할 수 있다. 즉, 경전철, 자전거와 같이 단거리 통행의 수단전환효과가 큰 녹색교통에 대한 대기질 개선효과의 객관성을 향상시키기 위해 본 연구 모형이 활용될 수 있다.

또한 본 모형은 버스노선 결정 및 지자체별 교통수요관리 등 정책적 측면에서도 활용될 수 있다. 현재 다양한 요소를 고려하여 버스노선을 결정하고 있지만, 녹색 성장시대에 요구되는 대기질 개선효과는 고려되지 못하고 있다. 본 연구에서 구축한 모형은 기종점간 추정 배출량의 비교를 통해 상대적으로 높은 대기질 개선효과가 기대되는 버스 노선을 결정하는데 활용될 수 있다. 특히 대기질 개선 측면에서 결정된 노선은 대기질 개선효과 외에 구축 모형의 특성상 승용차 교통량이 많고 지체가 많다는 것을 의미하기 때문에 승용차에서 버스로의 전환 이용객이 상대적으로 많을 것으로 기대된다.

그리고 현재까지는 도로상의 배출량만을 분석하여 이를 활용하는데 국한하고 있는데, 본 연구 모형으로는 각 배출원의 배출지(출발지역)에서 유발된 도로이동오염원 배출량을 분석할 수 있으며 이를 활용할 수 있다.

최근 국가나 기업이 스스로 배출한 오염물질 배출량을 관리하기 위해 오염물질 배출 총량제, 탄소 배출권 제도가 논의되고 있는데, 이와 같은 제도는 향후 지자체별 도로이동오염원 관리에도 적용될 수 있다. 즉, 본 연구 모형을 통해 각 지자체별로 유발되는 도로이동오염원의 배출량을 객관적으로 파악할 수 있으며, 이를 통해 등록 차량을 관리하거나, 지방세인 등록세·취득세·자동차세 등을 탄력적으로 결정하는데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이와 같은 정책들이 실제 시행되기에는 제도적으로도 많은 개선이 필요하지만, 본 연구에서 구축한 기종점 기반의 배출량 추정모형이 향후 다양한 교통수요관리 정책에 활용되는데 기여할 수 있다는 점에서 그 의의를 찾을 수 있다.

### 5. 결론 및 향후 연구과제

녹색교통 정책에 대한 객관적인 타당성 평가결과를 기대하기 위해서는 현실적인 교통특성을 반영한 배출량 추정 모형이 요구된다. 본 연구에서는 교통계획 분야에서 요구되는 자료의 수준을 검토하였으며, 기존 링크 기반의 배출량 추정 기법으로는 냉간 시동 배출량을 객관적으로 추정할 수 없는 한계를 확인하였고, 통행지체 등을 고려하여 열간 시동 배출량과 냉간 시동 배출량을 함께 추정할 수 있는 방법론과 구

축모형을 제시하였다.

그리고 대기질 개선을 위한 버스노선결정 및 지자체별 교통수요관리 등 정책적 측면에서 본 제안 모형의 활용방안을 제시하였다.

본 연구에서 구축한 모형을 가상의 녹색교통 사업에 적용한 결과, 기존 모형과 비교해 본 모형에 의한 열간 시동 배출량 추정결과는 약 3.6% 적은 것으로 나타난 반면, 냉간 시동 배출량은 약 5배 정도 많은 것으로 나타났다. 특히, 본 모형에 의해 추정된 냉간 시동 배출량 감소분은 기존 모형의 적용 결과와 비교해 약 12배 정도 많은 것으로 나타났다. 이는 본 모형이 기존 모형과 달리 단거리 통행전환 등과 같은 교통특성을 반영하여 냉간 시동 배출량을 추정하는 결과라 판단된다. 즉, 본 모형은 녹색교통 정책에 따른 교통특성의 변화를 현실적으로 고려하여 열간·냉간 시동 배출량을 추정할 수 있기 때문에, 본 연구 결과를 통해 교통정책에 대한 대기질 평가 결과의 객관성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

그러나 본 연구에서 구축한 냉간 시동 배출량 추정 모형의 경우 냉간 엔진 상태의 통행거리 분율을 반영하여 추정하고 있으나, 냉간 엔진 상태는 통행거리보다는 엔진 가열 시간에 따라 좌우될 것으로 예상되는 바, 상대적인 통행거리 분율이 아닌 절대적인 엔진 가열 시간을 고려하도록 냉간 시동 배출량 추정식을 개선할 필요가 있다. 그리고 열간 시동 배출량 추정 모형의 경우 기존의 링크 기반으로 접근하는 것이 보다 현실적인 교통특성을 반영할 수 있는바, 링크 기반의 열간 시동 배출량 추정모형과 기종점 기반의 냉간 시동 배출량 추정모형을 결합한 모형의 개발 등 대기질을 객관적으로 평가할 수 있고 대기질 개선정책에 보다 효율적으로 활용될 수 있는 다양한 연구가 요구된다.

### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(NRF-2011-0000859)입니다.

### 참고문헌

강중호, 이청원(2007) 교통환경분야의 국내외 연구동향 및 시사점:차량배출량 관련 연구를 중심으로, **대한교통학회지**, 대한교통학회, Vol. 25, No. 6, pp. 7-18.

국립환경과학원(2007) **대기오염물질 배출량 산정방법 편람**.

국립환경연구원(2004) **대기보전정책수립지원시스템 구축4차년도: 배출량 산정방법론**.

국도해양부(2009) **교통시설 투자평가지침 개정안**.

김동영(1998) **시간 및 격자단위 대기오염물질 배출량: 수도권외 광화학스모그 선구물질들 중심으로**, 박사학위논문, 서울대학교.

김운수, 엄진기, 황기연, 장지희(1999) **교통수요관리 기법을 활용한 환경오염비용의 내부화 방안연구**, **대한교통학회지**, 대한교통학회, Vol. 17, No. 4.

김현명(1997) **복수수단 통행배정모형에 의한 대기오염물질의 배출량 산정에 관한 연구**, 석사학위논문, 서울대학교.

엄정화(2002) **통행배분모형을 이용한 자동차대기오염물질 배출량 추정연구**, 석사학위논문, 명지대학교.

조강래, 엄명도, 김종춘, 홍유덕, 김종규, 한영출(1993) **자동차에**

- 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구, **한국 대기환경학회지**, 한국대기환경학회, Vol. 9, No. 1, pp. 69-77.
- 조규탁(2003) **자동차 배기오염물질 배출량의 공간해상도 개선을 위한 Nested Top Down Approach 개발**, 박사학위논문, 서울대학교.
- 조역수(1993) **선오염원에 의한 대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구: 서울지역을 대상으로**, 석사학위논문, 서울대학교 환경대학원.
- 최기주, 이규진, 안성채(2009) 도로이동오염원 배출량 산정을 위한 Bottom-Up Approach 기법의 개선에 관한 연구, **대한교통학회지**, 대한교통학회, Vol. 27, No. 4, pp. 183-193.
- 한국개발연구원(2008) **도로·철도 부문사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완연구(제5판)**, pp. 240-254.
- 한국철도도시공단(2006) **철도투자 평가지침**.
- Barth, M., F. An, J. Norber, M. Ross (1996) Modal Emissions Modeling: A Physical Approach, *Transportation Research Record* 648, pp. 74-76.
- Coelho, M. C., Tiago L. f., and Nagui, M. R. (2005) Impact of speed control traffic signals on pollutant emissions, *Transportation Research Part D*, Vol. 10, No. 4, pp. 323-340.
- Andre, M., Hammarstrom, U., and Reynaud, I. (1998) Driving statistics for the assessment of air pollutant emissions from road transport, *INRETS report*, Bron, France, 186.
- EMEP, EEA (2009) *Air pollutant emission inventory guidebook*.
- IPCC (2006) *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*.
- Hesham Rakha, Michel Van Aerde Verde, K. Ahn, and Antonio A. Trani (2001) Requirements for Evaluation Traffic Signal Control Impacts on Energy and Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Measurements, *Transportation Research Record* 1738, paper No. 00-1133.
- Hesham Rakha, Kyungho Ahn, and Antonio Trani (2003) Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO and CMEM models for Estimating Hot-stabilized Light-duty Gasoline Vehicle Emissions, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 30, No. 6, Dec., pp. 1010-1021.
- Jin young Park, Robert B. Noland, and John W. Polak (2001) Microscopic Model of Air Pollutant Concentrations (Comparison of Simulated Results with Measured and Macroscopic Estimates, *Transportation Research Record* 1750, Paper No. 01-3099.
- Peter R. Stopher and Haoqiang Fu (1996) Travel Demand Analysis Impacts on Estimation of Mobile Emissions, *Transportation Research Record*, pp. 104-113.

(접수일: 2011.9.14/심사일: 2011.11.11/심사완료일: 2012.1.12)