

서울시 대기질 모니터링 자료를 활용한 도로부문 대기질 영향 평가 방법론 개발*

허혜정** · 팀 발로우*** · 이유화**** · 조혜진***** · 김명규*****

Developing a Roadside Air Quality Assessment Methodology Using Seoul Air Quality Monitoring Data*

Hyejung Hu** · Tim Barlow*** · Yuhwa Lee**** · Hyejin Cho***** ·
Myounggyou Kim*****

요약 : 본 연구에서는 도로교통 정책의 대기환경 영향 평가를 위한 Screening-level의 도로교통부문 대기질 영향 분석 방법론을 개발하였다. 개발 모형은 준경험적(Semi-empirical) 모형으로서, 자동차 오염물질 배출계수와 함께 영국의 ADMS(Atmospheric Dispersion Modelling System)와 서울시 대기질 모니터링 자료(기상 및 대기오염물질 농도)를 이용하여 도출한 확산함수와 화학함수가 결합되어 있다. 확산함수는 배경 오염물질 농도, 도로교통으로부터의 배출량 및 도로로부터의 이격 거리의 함수로서 차량 배출가스로 인한 오염물질의 농도를 추정하기 위한 식이며, 화학함수는 도로교통으로부터 발생된 NO_2 농도를 추정하기 위한 함수로서 NO_x 와 NO_2 실측값으로부터 도출한 관계식이다. 개발 모형은 서울시 대기질 모니터링 자료를 이용하여 보정되었으며, 보정 전과 비교하여 서울시 주요도로 주변의 오염물질 CO , NO_2 , PM_{10} 의 농도를 실측값에 좀 더 가깝게 추정하는 것으로 나타났다. 개발 모형은 외국의 복잡한 확산모형에 의존하지 않고 도로변의 오염도를 추정할 수 있어, 교통부문 대기질 개선 정책의 효과를 대략적으로 신속하게 분석할 필요성이 있을 때 효율적으로 적용될 수 있는 방법론이다.

주제어 : 자동차 오염물질 배출량, 대기오염물질, 대기질 모니터링 자료, 확산함수, 화학함수

ABSTRACT : This research has been performed to develop an air quality screening-level modeling methodology for testing an environmental feasibility of transportation policies. The model developed is a semi-empirical tool combining vehicle emission factor data with a dispersion function and a chemistry function derived from ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System) of U. K. using air quality monitoring data in Seoul. The dispersion function was derived to estimate pollution levels

* 본 연구를 공동으로 진행한 영국 TRL(Transport Research Laboratory)의 연구진과 서울시 대기질 모니터링 자료를 제공해 주신 서울시 보건환경연구원 및 수도권 네트워크 모형 수요예측 결과를 제공해 주신 경기개발연구원에 감사드립니다.

** 한국건설기술연구원 도로교통연구실 수석연구원(Senior Researcher, Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction and Technology)

*** 영국 TRL 차량연소배출연구실 책임연구원(Senior Consultant, Exhaust Emissions, Transport Research Laboratory)

**** 한국건설기술연구원 도로교통연구실 수석연구원(Senior Researcher, Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction and Technology), 교신저자(E-mail: ylee@kict.re.kr, Tel: 031-910-0763)

***** 한국건설기술연구원 도로교통연구실 연구위원(Research Fellow, Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction and Technology)

***** 한국건설기술연구원 도로교통연구실 연구원(Researcher, Highway & Transportation Research Division, Korea Institute of Construction and Technology)

as a function of background pollution, road emissions and distance from road link; and the chemistry function which is a relationship between NO_x and NO_2 was derived from measured values to estimate road NO_2 . Then, the model has also been calibrated using the air pollution monitoring data of Seoul. The calibrated model is expected to provide reasonable estimates of CO , NO_2 and PM_{10} concentrations in the vicinity of major roads in Seoul. The screening-level tool is designed to produce estimates of pollution levels in the vicinity of roads, without recourse to detailed dispersion models. The developed model could be applied for evaluating environmental effects of traffic related projects easily and quickly before performing detailed environmental assessment.

Key Words : vehicle emissions, air pollution, air quality monitoring data, dispersion function, chemistry function

I. 서론

전 세계적으로 에너지 소비와 차량 이용의 증가로 인해 온실가스와 대기오염물질의 배출량이 증가하고 있으며 이는 기후변화와 환경오염의 주요 원인이 되고 있다. 『2010 서울 대기질 평가보고서』(서울특별시, 2011)에 의하면 서울시의 PM_{10} , NO_2 , O_3 의 농도가 대기환경 국내 기준치를 초과하는 경우가 빈번히 발생하고 있다고 한다. 이에 따라 ‘수도권 대기환경관리 기본계획’ 등과 같은 대기환경 개선 정책을 시행함으로써 다소 오염물질의 농도가 낮아지고 있는 것은 사실이나 여전히 기준치를 초과하고 있어 보다 다양하고 적극적인 대기환경 개선 정책의 개발과 시행이 필요하다.

특별히, 도로교통부문은 온실가스와 대기오염물질의 주요 배출원이며, 『2011년도 교통물류 온실가스 배출량 조사 보고서』(국토해양부, 2011a)에 의하면 수송부문이 2009년 에너지 소비부문 총 CO_2 배출량의 약 13.6%를 차지하였으며, 이중 도로부문이 수송수단 온실가스 배출량의 94.4%인 것으로 나타났다. 또한, 국립환경과학원의 대기오염물질 배출량 2009년 통계자료(국립

환경과학원, 2009)를 통해 분석한 결과 전국 배출량에서 도로이동오염원이 차지하는 비율은 CO 의 경우 약 73.1%, NO_x 의 경우 36.6%, PM_{10} 의 경우 13.3%에 이르는 것으로 나타났다. 이러한 통계치는 대기환경 개선을 위한 도로교통부문의 노력이 절대적으로 필요함을 뒷받침하고 있다.

실제로 도로교통부문에서는 대기환경 개선을 위하여, 온실가스와 대기오염물질의 주요 배출원인 자동차 배출가스를 저감하고자 다양한 정책을 개발하고 제안하는 등 많은 노력을 기울여 왔다. 그러나 이렇게 제안된 저감정책의 효과를 판단할 수 있는 적절한 방법론이 부재하여, 정책 집행 전에 효과를 미리 예측하고 우선순위를 결정하여 효율적인 정책을 최종적으로 집행하는데 어려움을 겪고 있다. 현재 적용할 수 있는 평가 방법론으로는 도로 사업의 환경영향 평가시 사용하는 분석 방법론이 있다. 그러나 이 방법론은 배출량 산정시 차종을 매우 단순화하고 있다는 단점과 배출로 인한 도로변의 농도를 추정하기 위하여 별도의 대기확산 모형을 사용하여야 하는 번거로움이 있어 개선과 보완이 필요하다.

따라서 본 연구는 기존의 배출량 산정 방법론

을 보완하고 대기확산 분석을 위한 화학함수와 확산함수를 개발하여 이와 통합함으로써, 정책 평가자가 유용하게 활용할 수 있는 Screening-level의 도로교통부문 대기질 평가 방법론을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 이후 본 논문에서는 II. 선행연구 고찰, III. 연구 방법론, IV. 자료 수집 및 조사, V. 모형 개발 및 검증, VI. 결론의 순으로 수행된 연구에 대하여 기술한다.

II. 선행연구 고찰

1. 연구동향

교통부문 대기질 평가 방법론은 크게 두 가지 요소로 구성되어 있다. 첫 번째는 자동차 통행으로 인한 대기오염 물질 배출량을 예측하는 모형이고 두 번째는 배출된 오염물질의 확산을 예측할 수 있는 모형으로, 최종적으로 주변 지역으로 확산된 대기오염 물질의 농도를 예측하여 대기환경 기준치와 비교하는 등의 평가를 할 수 있다.

먼저 배출량 산정 방법론을 살펴보면 활동도 자료 수준에 따라 Tier 1, Tier 2, Tier 3의 방법론(IPCC, 2006)으로 크게 분류된다.

- Tier 1: 연료별 사용량과 배출계수를 적용하여 산출
- Tier 2: 차종과 연료를 구분하여 배출량을 산출하는 것으로 차종별 연료별 사용량과 배출계수를 적용하여 산출

- Tier 3: 차종과 연료를 구분하며 차종별 주행 거리와 차량속도를 적용하여 산출

현재 국내에서는 주행거리와 평균통행속도 기반의 배출계수를 곱하여 배출량을 산정하는 Tier 3의 방법을 사용하고 있으며 다양한 차종, 사용연료, 연식에 따른 배출계수식이 개발되어 있다(국립환경과학원, 2010). 국외의 경우 평균속도 기반의 배출계수뿐만 아니라 차량의 미시적 주행특성을 반영하는 미시적 배출계수의 개발과 적용이 활발하며 미국의 MOBILE¹⁾, MOVES²⁾와 EMFAC³⁾, 유럽의 COPERT⁴⁾ 등과 같은 배출량 산정 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 평가자가 쉽게 배출량을 산정할 수 있도록 하고 있다. 그러나 국가마다 배출가스에 대한 규제가 다르고 차종구성이 다르기 때문에 타국의 프로그램을 그대로 사용할 수 없어 현재 국내에서는 환경영향 평가시 직접 수식을 사용하여 배출량을 산정하고 있는 실정이며 차종 구분을 단순화하여 산출하고 있다(국토해양부, 2011b).

다음으로 대기확산모형에 대하여 살펴보면 미국 EPA에서 배포하고 있는 모형 중에 CALINE⁵⁾, CALINE4⁶⁾ 등이 도로의 선오염원에 적용하기 적당한 모형으로 알려져 있다. 영국은 ADM S⁷⁾(Atmospheric Dispersion Modelling System)라는 모형을 개발하여 사용하고 있으며 도로부문의 분석에는 ADMS-Roads라는 프로그램으로 도로의 교통량에 의한 대기확산정도를 평가한다. 국내에서는 자체적으로 모형을 개발하여 사용하기 보다는 미국 EPA의 모형 중 CALINE3를 주

1) US EPA, MOBILE Model (on-road vehicles), <http://epa.gov/OMS/mobile.htm>

2) US EPA, MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), <http://epa.gov/otaq/models/moves/index.htm>

3) California EPA, EMFAC2007 Release, http://www.arb.ca.gov/msei/onroad/latest_version.htm

4) Emisia, Download COPERT 4 - Version 10.0 and Data, <http://www.emisia.com/copert/>

5) US EPA, CALINE3 User's guide, <http://www.epa.gov/scram001/userg/regmod/caline3.pdf>

6) US EPA, CALINE4, http://www.dot.ca.gov/hq/env/air/pages/cl_license.htm

7) CERC, ADMS, <http://www.cerc.co.uk/environmental-software/ADMS-model.html>

로 사용하고 있다. 그러나 이 모형은 배출량 산정 부분이 포함되어 있지 않아 외부적으로 배출량을 산정해야 하며 확산모형에 NO 의 화학반응이 포함되어 있지 않아 인체에 매우 유해한 물질인 NO_2 의 농도를 평가할 수 없다는 단점이 있다.

마지막으로 통합 모형에 대한 연구 사례를 살펴 보았다. 이러한 통합모형은 교통모형, 배출량 산정 모형, 확산모형으로 구성되어 있다. 대표적인 예로, Potoglou and Kanaroglou(2005)가 캐나다 해밀턴 대도시권역을 대상으로 개발한 IMULATE인데, 차량의 배출량을 측정하는 방법론으로는 미국 EPA의 MOBILE5C를, 확산모형은 CALINE4를 적용하여 오염지도를 작성하였다. 그 밖에도 영국의 TEMMS(Namdeo et al., 2002), 홍콩의 TEIS(Xia and Shao, 2005), 핀란드의 FMI(Karppinen et al., 2000)도 이와 비슷한 통합 모형이다. 한편, 통합모형 중 가장 간략한 방법론은 영국에서 사용하고 있는 도로 설계에 대한 매뉴얼인 DMRB(Design Manual for Roads and Bridges)(Department of the Environment, Transport and the Regions, 1999)에 포함되어 있는 도로부문 사업에 대한 대기질 평가 방법론이다. 이 방법론에서 사용하는 확산모형은 도로와의 이격거리와 농도변화의 관계를 나타낸 간략한 함수이므로 정교한 확산모형과는 달리 기상과 지형 조건의 변화에 대한 미시적인 분석은 불가능하나 요구되는 입력 자료가 많지 않고 사용방법이 간단하여 대안을 쉽고 빠르게 분석할 수 있는 장점이 있어 Screening-level의 분석시 사용되는 방법론이다.

2. 연구의 차별성

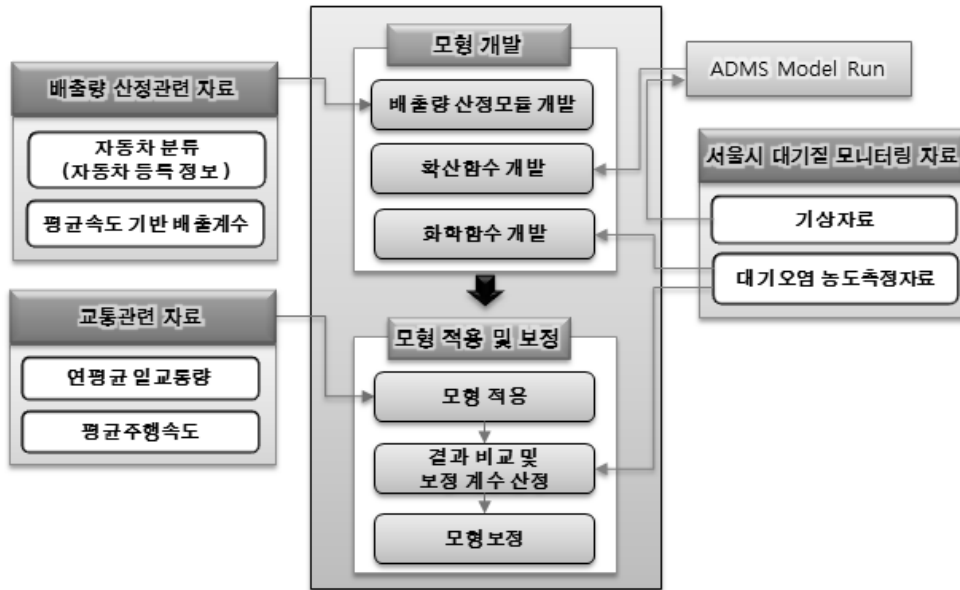
국내의 관련 연구 동향을 살펴본 결과 국내자료로 구축된 교통모형, 배출량 산정모형, 대기확산 모형의 통합모형 개발이 시급하다고 판단하였

다. 이와 관련하여 구체적으로 언급하자면, 김규일 외(2010)는 토지이용과 교통모형의 통합모형을 통해 탄소배출량을 산출하였으나 대기확산 분석은 고려하지 않았으며, 현재까지는 배출량 산정모형과 대기확산모형의 통합 모형을 개발한 연구 사례는 국내에서 찾을 수 없었다.

또한, 연구동향 분석결과 통합모형 개발시 평가의 목적과 시기에 따라 선택하여 사용할 수 있도록 Screening-level의 분석 모형과 상세 분석 모형을 각각 개발할 필요성이 있다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 Screening-level의 통합 모형 개발을 목적으로 하여 영국 DMRB의 대기질 평가 방법론을 모델로 삼아 국내 최초로 배출량 산정모형과 화학-대기 확산 통합 모형을 개발하였다. 이를 위하여, 국내 자료로서 자동차 대기오염물질 배출량 산정 모듈을 구축하였고, 배출된 오염물질이 주변 대기에 미치는 영향을 분석할 수 있는 확산함수와 화학함수를 서울시의 대기질 모니터링 자료를 기반으로 도출하였다. 이렇게 개발된 분석 방법론을 Visual Basic으로 프로그래밍화하여 분석자가 편리하게 대안 정책에 대한 자료를 입력하고 결과물을 확인할 수 있도록 구축하였다. 즉, 본 연구는 기존의 국내 연구에서는 시도되지 않은 Screening-level의 도로부문 대기질 평가 모형을 국내 자료를 활용하여 개발한 점에서 연구의 차별성을 제시할 수 있다.

III. 연구 방법론

<그림 1>은 연구 흐름도를 나타낸 것으로 모형개발은 배출량 산정모듈과 확산함수 및 화학함수의 개발을 통해 이루어진다. 먼저 배출량 산정 부분은 국내의 자동차 분류정보와 평균속도기반의 배출계수식을 이용하여 링크의 교통량과 속도



〈그림 1〉 도로부문 대기질 평가방법론 개발 연구 흐름도

입력값에 따라 배출량이 자동 산정되도록 개발하였다. 확산함수는 영국에서 개발된 대기 확산 분석 프로그램인 ADMS에 국내의 기상자료와 NO_X 의 배출량 $1g/km/s$ 를 입력하여 농도 변화를 시뮬레이션한 결과로부터 이격거리에 따른 오염물질 농도를 추정하는 함수를 도출하였다. 다음으로 화학함수는 서울시 대기질 모니터링 자료의 오염물질 측정 농도를 이용하여 NO_2 와 NO_X 의 관계식을 도출하여 도로교통으로 인한 NO_2 를 추정하는 함수식을 개발하였다. 이렇게 개발된 모형은 적용 및 보정단계에서 실제 도로변 12개소에 적용하여 배출량을 산출하고 화학 및 확산함수를 이용하여 예측한 오염물질의 농도와 실측값으로부터 보정계수를 추정하여 모형을 보정하였다. 모형적용을 위한 입력값은 링크의 연평균일교통량(AADT)과 평균통행속도이며, 결과비교 및 보정 계수 산정을 위한 자료로 서울시 대기질 모니터링 자료의 대기오염물질 측정농도가 사용되었다.

IV. 자료 수집 및 조사

1. 배출량 산정관련 자료

배출계수식은 국립환경과학원(2010)에서 개발한 자료를 사용하였다. 배출계수식은 다음과 같은 형태의 식으로 오염물질별, 차종별, 연료별, 연식별로 식의 형태와 계수 a, b, c 가 다르며 해당 차종과 조건에 맞는 식에 의해 배출계수를 구하도록 되어 있다.

- Type 1 : $y = ax^b$
- Type 2 : $y = ax^2 + bx + c$
- Type 3 : $y = ax + b$
- Type 4 : $y = ae^{bx}$
- Type 5 : $y = a$

여기서, y 는 배출계수 ($g/km/대$),

x 는 속도 (km/hr),

a, b, c 는 계수

따라서 정확한 배출량을 산정하기 위해서는 배출계수식과 동일하게 분류되어진 차종분포 자료가 필요하다. 국토해양부(2012)에서는 국토해양누리 웹사이트에서 자동차 등록현황 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 이 중 2011년 서울지역에 대한 차량 등록 정보의 세부차종과 『국가 대기오염물질 배출량 산정방법편람 II』 부록 1. 도로이동오염원 배출계수(국립환경과학원, 2010)의 차종분류와 일치하도록 재분류하여 사용하였다.

2. 서울시 대기질 모니터링 자료

서울시 보건환경연구원에서는 도시 대기측정망과 도로변 측정망을 설치⁸⁾하여 다음의 기상자료와 대기오염물질의 농도를 24시간 온라인으로 측정하여 저장하고 있다. 본 연구에서는 그 중 최근 3년(2009~2011년)간의 자료를 수집하여 사용하였다.

- 오염물질: SO_2 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO , NO_2 , NO_X , CO , O_3 , CH_4 , THC 를 측정하고 있으며, 본 연구에서는 PM_{10} , NO_2 , NO_X , CO 농도 활용
- 기상자료: 온도, 습도, 풍향·풍속, UV, SOLA

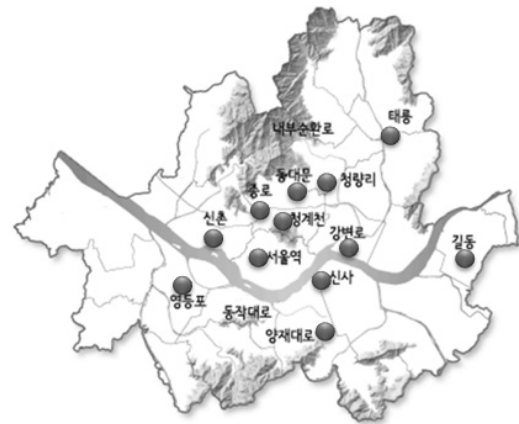
〈그림 2〉에 보이는 도시 대기측정망 25개소에서 측정된 오염물질의 농도는 배경 농도(도로 오염물질의 영향이 없다고 간주되는 농도)의 실측값으로 활용하고, 〈그림 3〉의 도로변 측정망 12개소에서 측정된 오염물질의 농도는 도로교통에

의한 배출이 반영된 실측값으로서 개발모형의 보정과 평가에 활용하였다.



출처: <http://cleanair.seoul.go.kr>

〈그림 2〉 도시대기측정망 25개소



출처: <http://cleanair.seoul.go.kr>

〈그림 3〉 도로변 측정망 12개소

8) 도시대기측정망 및 도로변 측정망 설치기준: “대기오염측정망 설치·운영지침 (환경부, 2011)”에 따라 측정소의 입지 및 위치를 선정하고 시료채취구의 위치를 결정한 후 자문회의를 거쳐 최종 결정함. 도시대기측정망의 경우 원칙적으로 주위에 건물이나 수목 등의 장애물이 없고 그 지역의 오염도를 대표할 수 있다고 생각되는 곳을 선정하며, 도로변 측정망 설치기준은 자동차에서 배출되는 대기오염물질이 일반 대기질에 미치는 영향을 파악하기에 적절한 지역을 선정하여 설치함.

3. 교통 관련 자료

모형의 적용 및 보정을 위해서 실제 도로변을 대상으로 개발한 배출량 산정 모형을 적용하여 오염물질의 배출량을 산출하였다.

이를 위해, 대기오염물질 농도 실측값이 확보된 <그림 3>의 도로변 측정망 12개소를 대상 지점으로 선정하였다. 모형적용을 위해서는 인접한 도로의 연평균일교통량(AADT)과 링크 평균통행속도가 필요하다. 교통량의 경우 실측값을 사용하는 것이 바람직하나, 자료 수집과 관련한 연구 여건상 수도권 네트워크(5차 배포)의 2011년도 수요예측 결과에 따라 통행배정을 한 결과로부터 대상지점의 통행관련 자료인 링크 교통량과 속도를 추출하였다.

V. 모형 개발 및 검증

1. 모형 개발

1) 배출량 산정 모듈 개발

앞서 기술한 바와 같이 배출계수식(국립환경과학원, 2010)의 구분에 따라 차종을 구분하고 이러한 분류에 따른 세부차종 구성비(차종, 연료별 구성비)를 차량 등록 정보로부터 산출하였다. 차량 연식에 따라 다른 배출 계수식을 적용해야 하는 세부 차종에 대해서는 연식에 대한 구성비를 차량 등록 정보로부터 추가적으로 산출하여 적용하였다.

그러나 사용자의 편의를 위하여, 링크별 경차량(Light Duty Vehicle) 대수와 중차량(Heavy Duty Vehicle) 대수 및 각각의 평균통행속도만 입력하면 배출량이 산정될 수 있도록, 세부차종을 내부적으로 경차량과 중차량으로 분류하여,

그에 따른 세부차종 구성비를 적용한 후 세부차종별 차량대수를 산출하도록 하였다.

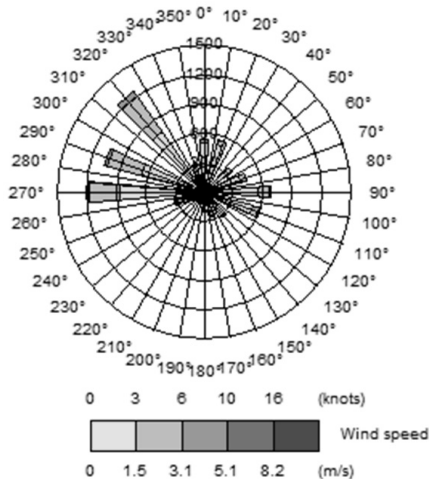
다음으로, 대기오염 물질별로 세부차종과 해당 속도에 따른 배출계수를 배출식으로부터 구한 후에 세부차종별 차량대수와 배출계수를 곱하고 합계를 구하여 오염물질 CO , NO_x , PM_{10} 의 총 배출량(g/km/day)을 산정하도록 하였다.

2) 확산함수 개발

Screening-level의 대기확산 함수식으로 영국의 DMRB 확산함수식을 활용할 수 있으나, 이 식은 영국의 기상 및 도로교통조건에서 측정된 자료를 기반으로 개발된 함수이기 때문에 국내에 그대로 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 해당 모형 구조는 동일하되, 국내의 기상조건과 도로교통조건을 반영한 확산함수를 추정하고자 하였다. 이를 위하여 도로변 대기오염물질 확산분석 시뮬레이션에 국내 기상조건을 입력하여 NO_x 의 농도 1g/km/s의 확산을 분석한 결과값으로부터 기본 확산함수를 도출한 후 국내 도로교통 조건하에 실측된 농도 자료를 활용하여 함수를 보정하는 절차를 거쳤다. 본 연구에서는 영국에서 개발된 가우시안 연기모델(Gaussian Plume Model) 기반의 ADMS라는 모형을 사용하였으나 같은 성능의 타 모형을 활용하여도 무방하다.

입력한 기상 자료는 도시 대기측정 지점(배경 농도 측정 지점)에서 수집된 국내자료를 이용하였다. 25개의 서울시 일반 대기측정 지점 중 성동구와 광진구 지점이 도로로부터의 이격 거리가 충분히 크고 주변녹지 비율이 높아 서울시 배경 농도 측정지점을 대표하는 지점으로서 가장 적합하다고 판단되었다. 그러나 최종적으로 ADMS 모형의 확산분석을 위한 입력 자료인 온도, 풍속, 풍향, 태양복사 등의 수집률이 더 높은 성동구의

자료를 이용하였다. <그림 4>는 성동구의 바람 장 분석결과 도표로서 연평균 풍속은 1.0m/s, 최대 풍속은 4.9m/s로 나타났다.



<그림 4> 성동구 바람장 분석 도표

풍속 외의 기상자료인 온도, 풍속, 풍향, 태양 복사는 연평균 값을 계산하여 입력하였고 기타 입력변수는 도로변 대기질 측정지점의 일반적인 설치 조건을 반영하여 다음과 같이 설정하였다.

- Monin-Obukhov length = 100m
- 지형 = 평탄
- 풍속 풍향 측정 높이 = 14m
- 확산지역의 표면 거칠기 = 2m
- 기상측정지점의 표면 거칠기 = 0.2m
- 도로폭 = 20m
- 도로교통으로 인한 NO_X 농도 = $1g/km/s$
- 도로오염원 = 2,000m 길이
(x축: 0, y축: -1000~+1000)
- 각 방향별 0~200m 사이에 1m 단위로 Receptor 지정
- 위도 = 북위 37°

가상의 도로에 대하여 상기 언급한 입력변수에 대해 도로의 방향을 달리하여 ADMS의 확산모

형을 18회 적용하여 각 방향별로 0~200m구간에 대하여 1m 단위의 Receptor 위치에 따라 NO_X 의 농도를 예측하고 각 거리에 대한 평균값을 구하였다. <그림 5>의 그래프는 위치에 따른 평균값과 이를 기반으로 도출된 확산함수식을 보여주며, 도출된 확산함수식과 영국의 DMRB 확산함수식을 비교하여 보았다. 두 함수는 거리에 따라 농도가 감소하는 점에서는 비슷한 형태를 보이나 성동구의 오염물질이 확산현상이 덜 활발하게 일어나는 경향을 보이고 있다. 이는 두 지역의 기상 조건과 지형조건이 다르기 때문에 나타나는 차이점으로 보인다.

도출된 확산함수식은 식 (1)~(3)과 같다. 대기 오염 물질은 배출원으로부터 매우 가까운 거리에서는 오염물질의 확산이 영향을 미치지 않으므로 도로로부터 6m까지는 확산모형을 고려하지 않는다. 또한 거리가 168m 이상에서 400m의 지점은 농도의 변화가 선형형태를 보여 6m 이상 168m 이하 구간의 식과 별도의 식을 도출하였다. 따라서, 식 (1)에 나타낸 바와 같이 도로로부터 6m 미만 지점까지의 농도는 식 (2)에서 6m지점의 값을 구하여 사용하고, 6m 이상 168m 이하 구간에 위치한 지점의 확산함수는 식 (2)로 표현되며, 168m를 초과한 지점의 확산함수는 식 (3)으로 도출되었다.

$$d < 6m \text{ 일 때, } DF_d = DF_{d=6m} \quad (1)$$

$$6m \leq d \leq 168m \text{ 일 때,}$$

$$DF_d = 206.48448 - 6.950197647d + 0.117637968d^2 - 0.001012215d^3 + (4.00634 \times 10^{-6})d^4 - (3.8571 \times 10^{-9})d^5 - (9.72 \times 10^{-12})d^6 \quad (2)$$

$$d > 168m \text{ 일 때,}$$

$$DF_d = -0.075(d - 168) + DF_{d=168} \quad (3)$$

여기서, DF_d : 확산계수 ($ug/m^3 per g/km/s$)

d : 거리 (m)

거리에 따른 오염물질의 농도는 식 (4)에 의하여 산정되며, 보정계수 α 는 모형보정 단계에서 추정된 값을 사용하였다.

$$C_d = CR_d + CB = E \cdot DF_d \cdot \alpha + CB \quad (4)$$

여기서, C_d : 거리 d의 오염물질 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CR_d : 교통으로 인한 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

CB : 배경농도 측정값($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

E : 배출량(g/s)

DF_d : 확산계수($\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ per g}/\text{km}/\text{s}$)

α : 모형보정계수

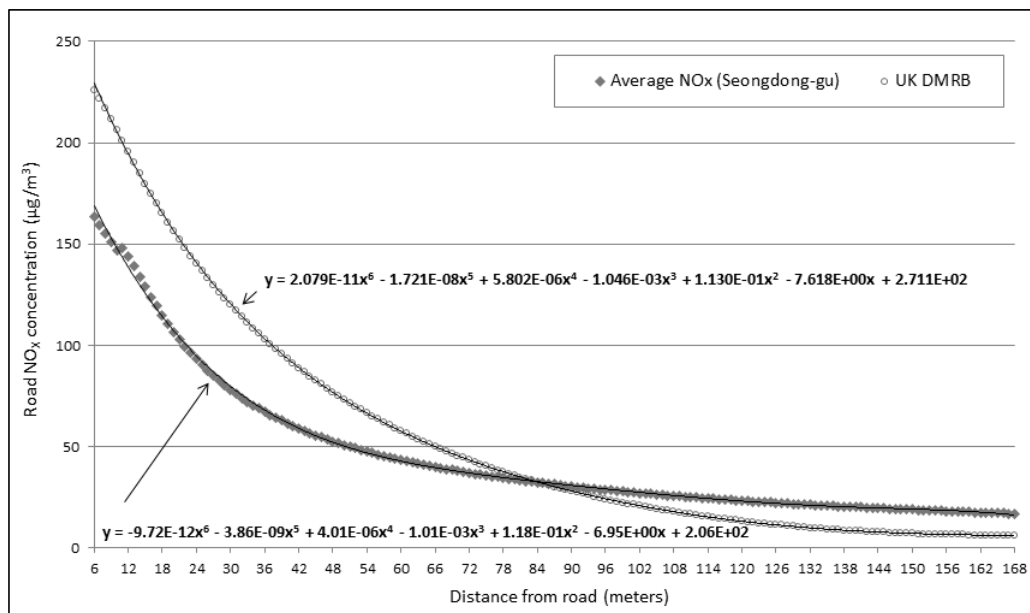
3) 화학함수 개발

NO_2 는 차량에서 직접적으로 배출되는 양은 적으나 차량에서 배출되는 대기오염물질 중 NO 가 대기 중의 오존과 반응하여 화학변화를 통해 주로 발생하게 된다. 매우 유해한 물질이므로 이

러한 화학변화를 고려하여 배출량을 예측 관리할 필요성이 있다.

NO_2 예측하기 위한 다양한 접근방법으로는 복합 화학적 반응 모형인 UK primary NO_2 모형 (Abbott, 2006), 모니터링 자료기반 준경험적 예측 모형(Laxen and Wilson, 2002) 등이 있다. 본 연구에서는 DMRB에서 사용하는 준경험적 방법을 적용하였는데, 이 방법론은 측정된 연평균 NO_x 와 NO_2 농도의 관계식을 도출하여 배경지역 NO_x 농도와 도로변 NO_x 농도로부터 NO_2 농도를 추정하는 것이다.

화학함수 도출에 사용된 대기질 데이터는 2009년~2011년 서울시의 12개 도로변 측정 지점과 도로변 측정 지점과 쌍이 되는 배경농도 측정지점 데이터이다. 함수식을 개발하기 위하여 도로변 측정 지점과 배경농도 측정지점 중 가장 가까운 지점을 찾았으며 12개 도로변 지점과 쌍을 이루는 배경농도 측정지점은 <표 1>에 나타내었다.



<그림 5> 성동구 기상조건을 ADMS에 적용하여 분석한 결과에 따라 거리에 따른 NO_x 농도변화 추세선

〈표 1〉 12개 도로변 측정지점과 배경농도 측정지점 쌍

도로변 측정지점	도로변 측정지점과 도로와의 거리(m)	배경농도 측정지점	도로변 측정지점과 배경농도 측정지점간 거리(km)	배경농도 측정지점과 도로와의 이격거리(m)
신촌	20	마포구	0.9	30
청계	<5 & 40	종로구	0.7	43
영등포	40 & 65	영등포구	0.9	67
신사	25 & 45	서초구	1.7	15
청량리	50	동대문구	1.5	57
서울역	<5	마포구	2.3	30
동대문	<5	종로구	0.75	43
종로	<5 & 90	종로구	0.7	43
길동	19 & 25	강동구	1.2	7
양재	0	강남구	2.3	42
강변북로	15 & 80	성동구	0.5	120
태릉	20 & 30	중랑구	3.4	26

쌍을 이루는 도로변 측정지점과 배경농도 측정 지점의 3년간의 데이터의 수집률이 90% 이상인 26개의 데이터 포인트를 찾고 연평균 도로교통 배출로 인한 NO_2 농도와 NO_X 농도의 비율을 각각의 쌍에 대하여 계산하고 총 NO_X 의 관계를 〈그림 6〉에 나타낸 바와 같이 관계식을 도출하였다.

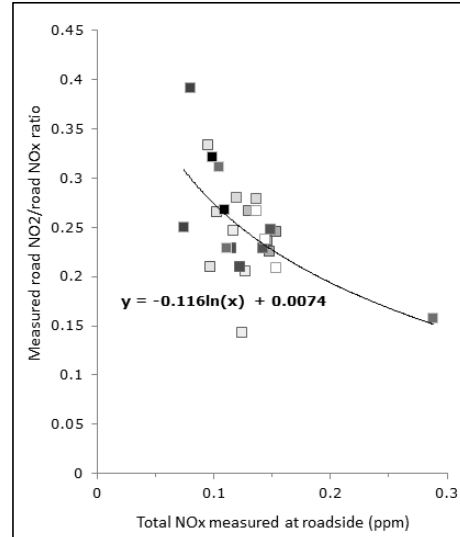
이러한 관계식에 의하여 NO_2 농도를 추정하는 식은 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} roadNO_2 = & (-0.116(\ln[total NO_X]) + 0.0074) \\ & \times [road NO_X] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $roadNO_2$: 도로교통배출 NO_2 농도

$road NO_X$: 도로교통배출 NO_X 농도

$total NO_X$: 총 NO_X 농도

〈그림 6〉 측정 NO_2 농도와 NO_X 의 관계 그래프

2. 모형 검증

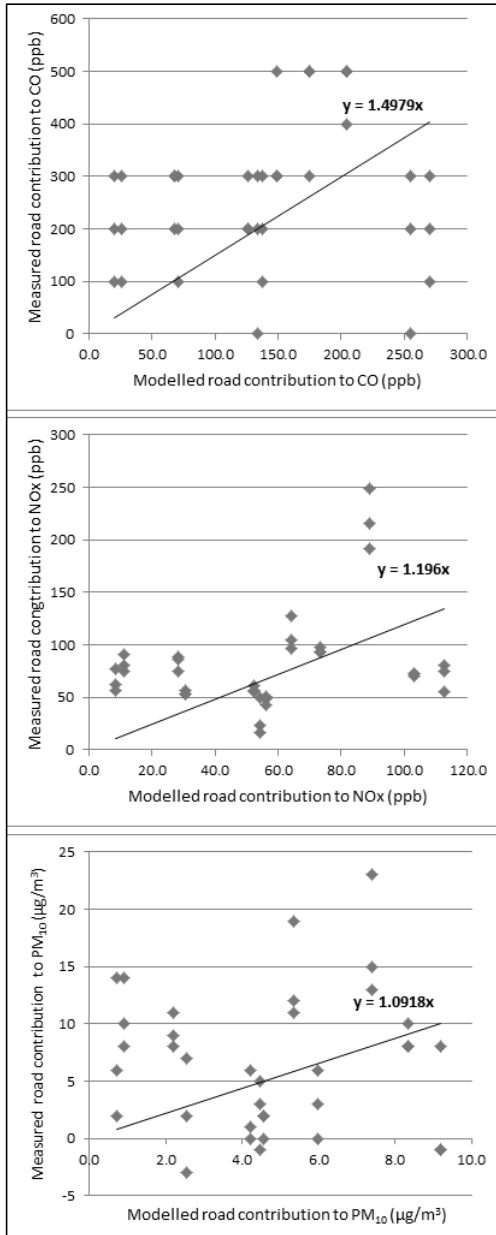
1) 모형 적용

도로변 측정 지점 12곳에 대하여 개발한 배출량 산정모형, 확산함수식을 적용하여 오염물질 CO , NO_X , PM_{10} 의 도로교통으로 인한 농도를 추정 한 값과 대기질 모니터링 자료로부터 계산한 실측 값(=도로변농도-배경농도)을 비교한 결과 추정 값이 실측값에 비해 낮은 농도를 예측하는 것으로 나타났다. 〈표 2〉에 보는 바와 같이 RMSE(Root Mean Squared Error)와 Fractional bias 값도 이를 뒷받침하고 있어 화학함수의 보정이 반드시 필요 하다고 판단되었다.

2) 보정계수 산정 및 모형보정

〈그림 7〉은 〈표 2〉의 값을 기초로 작성된 그래프로써 도로교통으로 인한 오염물질의 추정농도와 실측값의 관계를 보여준다. 보정계수를 추정하기 위하여 원점에서 시작하는 선형 추세선의 기울기를 구한 결과 CO , NO_X , PM_{10} 의 보정

계수는 각각 1.50, 1.20, 1.09로 추정되었다. 이 값은 식 (4)의 α 값에 해당하는 값이다.



〈그림 7〉 오염물질 농도 모형값과 측정값 비교

3) 모형검증

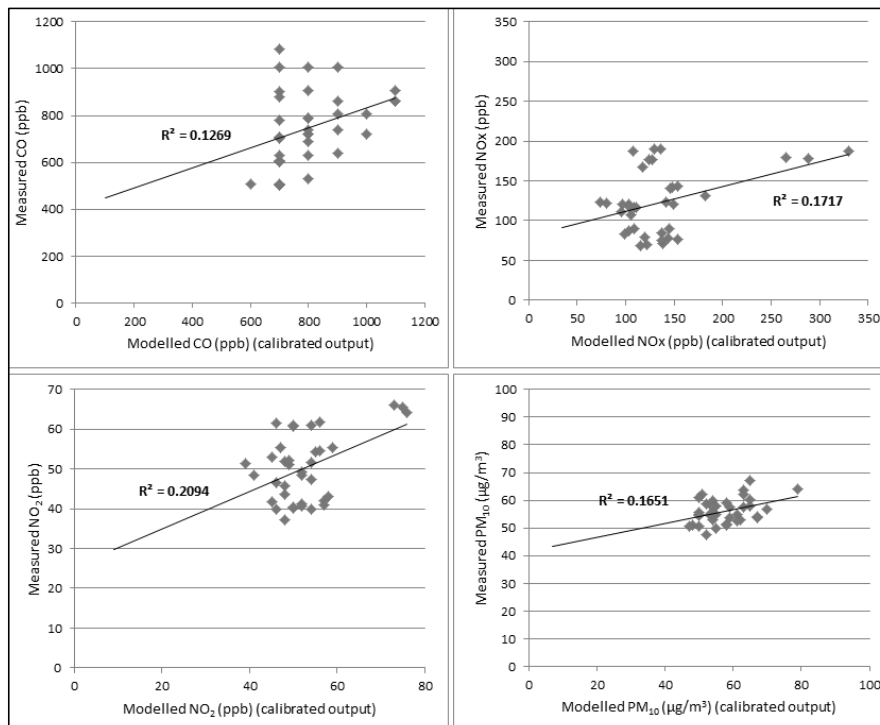
오염물질 CO , NO_X , PM_{10} 농도는 각각의 보정계수를 적용하여 식 (4)에 의해 도로변 12개 지점의 농도를 예측하였고 NO_2 의 농도는 식 (5)에 의하여 추정하였다. 각 오염물질의 연도별 추정농도와 모형 적용값을 〈표 3〉에 정리하고 〈그림 8〉의 그래프에 보이는 바와 같이 상관관계를 분석하였다. PM_{10} 과 NO_2 의 경우 개발 모형이 도로변에서의 오염물질의 농도를 실측값과 대체적으로 가깝게 예측하고 있는 것으로 보이나, CO 와 NO_X 의 경우 예측력이 매우 낮은 것으로 보인다. 그러나, 오염물질 CO , NO_X , NO_2 , PM_{10} 에 대하여 R^2 값이 0.1269, 0.1717, 0.2094, 0.1651로 매우 낮아 모형의 보완이 필요하다고 판단된다.

먼저, 모형의 정확성 및 적용성을 높이기 위해서는 좀 더 많은 지역의 대기오염물질 측정 자료가 필요하며 데이터의 질을 높여야 한다. 그러나 본 연구에서는 적합한 배경농도 측정자료 확보가 가장 큰 제약이 되었다. 배경농도는 도로교통에 의한 배출의 영향이 없는 농도이어야 하나 본 연구에서 배경농도 측정지점이라고 간주한 서울시의 일반 대기 측정소는 위치상으로 도로와 인접하지 않다고 하더라도 도로의 영향을 완전히 배제할 수 없다는 단점이 있었다. 이로 인하여 측정된 배경농도 값이 도로변 측정농도보다 높은 일부 지점의 경우 〈표 2〉와 〈그림 7〉의 그래프에서 보듯이 ‘도로에 의한 오염물질 농도’의 실측값이 음수가 되는 문제가 발생하게 되어 모형의 보정계수 추정에 영향을 주었다. 더불어, 본 연구에서 사용한 화학합수 도출방법론이나 보정계수 추정방법론보다 더 발전된 방법론을 도입하여 모형의 예측력을 높이는 방법도 고려해야 할 것으로 보인다.

〈표 2〉 도로로 인한 농도 기여치 비교 - 측정치와 모형치 비교

지점명	CO 도로교통 기여 농도(ppb)						NO _x 도로교통 기여 농도(ppb)						PM ₁₀ 도로교통 기여 농도(μg/m ³)					
	2009년		2010년		2011년		2009년		2010년		2011년		2009년		2010년		2011년	
	Mea.*	Mod.**	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.
신촌	500	174	500	174	300	174	98	73	93	73	93	73	6	6	0	6	3	6
청계	100	137	300	137	200	137	49	56	43	56	51	56	2	5	0	5	2	5
서울역	300	270	200	270	100	270	80	112	75	112	55	112	8	9	-1	9	-1	9
동대문	0	134	300	134	200	134	55	53	57	53	61	53	6	4	0	4	1	4
종로	0	255	300	255	200	255	73	103	70	103	73	103	10	8	8	8	8	8
청량리	200	20	300	20	100	20	77	9	62	9	57	9	14	1	2	1	6	1
강변북로	200	68	300	68	300	68	89	28	86	28	75	28	8	2	9	2	11	2
태릉	500	149	300	149	300	149	128	64	105	64	96	64	19	5	12	5	11	5
영등포	200	26	300	26	100	26	91	11	80	11	75	11	14	1	10	1	8	1
신사	200	126	300	126	200	126	50	54	23	54	16	54	-1	5	5	5	3	5
길동	300	71	200	71	100	71	56	31	53	31	53	31	-3	3	2	3	7	3
양재	500	204	500	204	400	204	249	89	216	89	192	89	23	7	13	7	15	7
RMSE***	212		210		126		63		53		47		9		6		6	
Overall RMSE	187						55						7					
FB****	0.59		0.80		0.42		0.46		0.34		0.27		0.62		0.07		0.28	
Overall FB	0.62						0.36						0.35					

*Mea. : 측정값, **Mod. : 모형값, *** Root mean squared error, ****Fractional bias



〈그림 8〉 모형치와 측정치 비교

〈표 3〉 대기 중 오염물질 농도 비교 - 측정치와 모형치 비교

지점명	CO 농도(ppb)						NO _x 농도 (ppb)					
	2009년		2010년		2011년		2009년		2010년		2011년	
	Mea.*	Mod.**	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.
신촌	1,100	861	1,100	861	900	861	154	143.6	148	142.6	146	140.6
청계	800	905.5	700	605.5	700	705.5	103	121.2	97	121.2	95	111.2
서울역	900	1005	800	1005	700	1005	136	190.4	130	189.4	108	187.4
동대문	700	901	700	601	700	701	109	117.6	111	117.6	105	107.6
종로	700	1082.5	700	782.5	700	882.5	127	177.6	124	177.6	117	167.6
청량리	800	630	800	530	700	630	138	71.8	122	70.8	115	68.8
강변북로	700	602	700	502	700	502	145	89.6	137	84.6	120	78.6
태릉	1,000	723.5	800	723.5	800	723.5	182	130.8	149	120.8	142	122.8
영등포	900	739	900	639	800	739	154	76.2	144	77.2	137	75.2
신사	800	789	800	689	800	789	103	117.8	80	121.8	74	122.8
길동	700	506.5	600	506.5	700	706.5	109	90.2	103	87.2	99	83.2
양재	1,100	906	1,000	806	900	806	330	187.8	288	178.8	265	179.8
RMSE***	200.4		210.5		126.016		59.8		51.3		47.5	
Overall RMSE	168.3						53.1					
FB****	0.06		0.15		0.005		0.17		0.09		0.05	
Overall FB	0.07						0.11					

지점명	NO ₂ 농도 (ppb)						PM ₁₀ 농도 (μg/m ³)					
	2009년		2010년		2011년		2009년		2010년		2011년	
	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mea.	Mod.	Mod.	Mea.
신촌	60	60.4	60	50.4	60	50.6	63	63.5	52	58.5	54	57.5
청계	50	56.9	50	56.9	50	47.6	55	58.5	50	55.5	48	51.5
서울역	60	66.9	50	56.9	50	57.1	65	66.8	51	61.8	50	60.8
동대문	50	56.3	50	56.3	50	46.9	59	57.4	50	54.4	47	50.4
종로	50	65.7	50	65.7	50	56.5	63	61.7	58	58.7	54	54.7
청량리	50	43.4	50	43.4	50	43.4	67	54.1	54	53.1	55	50.1
강변북로	50	39.7	50	39.9	50	40.2	63	57.2	58	51.2	61	52.2
태릉	50	48.7	50	49.4	50	49.3	70	56.5	61	54.5	59	53.5
영등포	60	44.0	60	44.0	60	44.1	67	54.1	62	53.1	58	51.1
신사	50	46.6	40	46.3	40	56.2	54	59.4	55	54.4	53	54.4
길동	50	40.7	50	40.8	50	41.0	50	56.3	50	51.3	52	48.3
양재	80	61.5	80	62.1	70	62.0	79	63.6	65	59.6	65	57.6
RMSE***	10.1		10.5		9.1		8.5		5.8		5.8	
Overall RMSE	9.9						6.8					
FB****	0.05		0.04		0.06		0.06		0.00		0.02	
Overall FB	0.05						0.03					

*Mod. : 모형값, **Mea. : 측정값, *** Root mean squared error, ****Fractional bias

VI. 결론

본 연구를 통해 교통부문의 자동차 배출가스 저감을 위한 다양한 정책의 효과를 사전에 예측할 수 있는 도로교통부문 대기질 평가 방법론을 정립하였다. 먼저, 국내 자동차 오염물질 배출계수와 자동차 등록 정보를 이용하여 배출량 산정 모듈을 구축하였으며 국내 기상 및 대기오염 물질 농도 측정 데이터를 이용하여 확산함수와 화학함수를 도출하여 대기확산 모형을 개발하고 통합하였다.

본 연구에서 개발한 도로변 대기질 평가 방법론은 복잡한 확산모형 등에 의존하지 않고 자동차 배출 오염물질이 도로 주변에 미치는 영향을 분석할 수 있다는 장점이 있으며, 또한 필수 입력 자료가 많지 않고 분석 과정이 간편하여 여러 가지 대안을 신속하게 분석하고 평가하는 과정에서 유용하게 사용될 것으로 보인다.

그러나 도로교통 대기오염 배출량의 영향이 포함되지 않은 서울시 배경농도 측정이 중요함에도 불구하고, 자료 수집 및 취득 상의 한계로 인해 정확한 자료를 확보할 수 없었기 때문에 개발함수의 검증과 보정단계에서 문제점을 확인할 수 있었다. 이 점이 도로변 오염물질 농도 모형 추정결과가 실측값과 차이를 보이는 주요 원인이 되었다고 판단되므로, 모형의 재검증과 보완을 위하여 양질의 도시 배경농도를 측정할 수 있는 지속적인 모니터링 자료를 구축하는 시스템이 필요하다.

또한, 향후 연구에서는 모형의 예측력을 높이기 위해, 본 연구에서 사용한 화학함수 도출방법론이나 보정계수 추정방법론보다 더 발전된 방법론을 도입을 고려할 필요성이 있으며, 모형의 적합도를 높일 수 있는 추가적인 변수는 없는지도 판단해 보아야 할 사항이다. 또한, 기존 확산분석

모형과의 비교를 통해 개발된 모형의 적용성을 평가하고 문제점을 찾아 보완하는 연구도 수행될 필요성이 있다.

결론적으로, 본 연구를 통해 개발된 모형은 향후 보완 과정이 필요하나, 기존 연구에서는 등한시 되었지만 정책 평가 단계에서의 활용 가능성이 높은 Screening-level의 통합모형을 국내 최초로 국내 자료를 이용하여 개발한 것에 의의가 있다. 개발된 모형은 서울지역의 기후와 도로교통조건과 비슷한 지역에 적용하는 것이 가장 타당하겠지만, 거시적인 레벨의 분석에 사용되는 틀이므로 국내의 경우 서울시 외 타 지역에 적용하여도 무방할 것으로 보인다. 또한, 이 방법론은 향후 교통계획 모형과 결합하여 교통부문의 중장기 계획에 대하여 대기질에 미치는 효과를 효율적으로 평가하는 데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 국립환경과학원, 2009, 대기오염물질 배출량 통계,
<http://airemiss.nier.go.kr/nape/statistics>
 _____, 2010, 「국가 대기오염물질 배출량 산정 방법편람 II」,
 국토해양부, 2011a, 「2011년도 교통물류 온실가스 배출량 조사 보고서」,
 _____, 2011b, 「교통시설 투자평가지침」,
 _____, 2012, 자동차 등록현황 보고,
<http://stat.mltm.go.kr/>
 김규일 · 이승일 · 이창효, 2010, “DELTA모형을 이용한 교통에너지 및 탄소배출 시나리오 분석: 네덜란드 Delft시를 사례로”, 『국토계획』, 45(6): 117~136.
 서울특별시, 2011, 「2010 서울 대기질 평가보고서」,
 Abbott, J., 2006, *Primary Nitrogen Dioxide Emissions from Road Traffic: Analysis of Monitoring Data*,

- Report to Defra, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, DoE Northern Ireland, AEA Technology, National Environmental Technology Centre, Report AEAT/ENV/R/1925.
- Department of the Environment, Transport and the Regions, 1999, *Design Manual for Roads and Bridges(DMRB)*, Volume 11, Section 3, Part 1.
- IPCC, 2006, *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, The National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- Karppinen, A., Kukkonen, J., Elolähde, T., Konttinen, M., and Koskentalo, T., 2000, "A modelling system for predicting urban air pollution: Comparison of model predictions with the data of an urban measurement network in Helsinki", *Atmospheric Environment*, 34(22): 3735~3743.
- Laxen, D. and Wilson, P., 2002, *A New Approach to Deriving NO₂ from NO_x for Air Quality Assessments of Roads*, On behalf of Defra and the Devolved Administrations.
- Namdeo, A., Mitchell, G., and Dixon, R., 2002, "TEMMS: An integrated package for modelling and mapping urban traffic emissions and air quality", *Environmental Modelling and Software*, 17: 179~190.
- Potoglou, D. and Kanatoglou, P. S., 2005, "Carbon monoxide emission from passenger vehicles: predictive mapping with an application to Hamilton Canada", *Transportation Research Part D*, 10: 97~109.
- Xia, L. and Shao, Y., 2005, "Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong island", *Environmental Modelling and Software*, 20(9): 1175~1188.

원 고 접 수 일 : 2013년 2월 14일
1 차 심 사 완 료 일 : 2013년 3월 12일
최 종 원 고 채 택 일 : 2013년 4월 2일