

교통환경정책의 대기질 개선효과 분석 방법론 연구

이건우¹ · 한진석^{2*}¹한국해양수산개발원, ²한국환경정책·평가연구원

Analysis Method for Air Quality Improvement Effect of Transport and Environment Policy

LEE, Gunwoo¹ · HAHN, Jin-Seok^{2*}¹Korea Maritime Institute, Busan 49111, Korea²Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea

*Corresponding author: jshahn@kei.re.kr

Abstract

This study proposes an analysis methodology for air quality improvement effect of transport and environment policy that are used for mobile pollution sources. The methodology considers the changes of traffic of road transport sources and air pollutant emission, the changes of atmospheric dispersion of air pollutants and the effects on the health of local residents in response to policy implementation. Especially, the changes to traffic flow must be considered in evaluating the effects on atmospheric environment as it has a direct connection to the effects of the policy in this study. We used bottom-up approach (BUA) based on the travel demand model to reflect the changes of travel behavior in detail in response to the policy implementation compared to the top-down approach (TDA) when calculating the changes of emission level of road transport. We showed the applicability of the proposed analysis methodology through a policy scenario analysis, and the analysis method can be effectively applied to the cases in which travelers' behavior changes are expected.

Keywords: air quality, bottom-up approach, mobile source, transport and environment policy, top-down approach

초록

본 연구에서는 도로이동오염원을 대상으로 추진하는 교통환경정책의 대기질 개선효과 분석 방법론을 제시하였으며, 해당 방법론은 정책 추진에 따른 도로이동오염원의 통행량과 대기오염물질 배출량 변화, 대기오염물질의 공간적 확산과 이로 인한 노출인구의 건강영향을 순차적으로 고려한다. 특히 도로이동오염원의 통행량 변화는 정책 효과와 직접적인 연관이 있기 때문에 대기질 개선효과 분석시 반드시 고려되어야 하며, 본 연구에서는 교통수요모형 기반의 상향식 방법을 적용하여 기존 하향식 방법 대비 정책 추진에 따른 통행자의 통행행태 변화를 상세하게 반영하고자 하였다. 정책 시나리오 분석을 통하여 본 연구에서 제시한 분석 방법론의 활용가능성을 검토하였으며, 통행자의 통행행태 변화가 예상되는 정책의 대기질 개선효과 분석은 본 연구의 분석 방법론 적용이 필요한 것으로 판단된다.

주요어: 대기질, 상향식, 도로이동오염원, 교통환경정책, 하향식

J. Korean Soc. Transp.
Vol.35, No.1, pp.37-49, February 2017
<https://doi.org/10.7470/jkst.2017.35.1.037>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

Received: 8 November 2016

Revised: 26 December 2016

Accepted: 20 February 2017

Copyright ©
Korean Society of Transportation

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

1. 연구배경 및 목적

국내의 경우 교통 부문이 대기환경에 미치는 영향이 적지 않으며¹⁾ 도로이동오염원인 자동차는 2030년 기준 약 2,500만대까지 증가하고(한국교통연구원, 2012), 자동차 중에서도 사회적 비용이 높은 미세먼지(PM10)와 질소산화물(NOx)²⁾의 배출 기여도가 높은 경유차의 비중이 최근 10년간 40% 수준을 유지한다는 점³⁾ 등을 감안하면 교통환경정책의 효과적도로 대기질 개선효과를 검토해야 할 필요가 있다.

교통환경정책의 대기질 개선효과는 도로이동오염원의 배출량에 영향을 받으며, 해당 배출량은 도로이동오염원의 통행량에 영향을 받는다. 또한 통행량은 대상지역의 도로인프라 수준, 통행자의 사회경제적 특성 등에 영향을 받기 때문에, 정책 시행에 따른 효과는 지역별로 상이할 수 있다. 따라서 대기질 개선효과를 분석하기 위해서는 우선 대상지역의 공간적 특성(도로인프라 수준, 대중교통 접근성, 연령대별 비중 등), 통행자의 통행행태(통행발생률, 통행수단, 평균 통행거리 등) 등을 고려하여 정책 시행 전·후의 통행량 변화를 추정하는 과정이 선행되어야 한다.

또한 도로이동오염원에서 배출된 대기오염물질은 한 지점에 누적되는 것이 아니라 기상조건 등에 따라 확산하는 특성을 가지며, 이는 대기오염물질 노출인구에 영향을 미친다. 이와 같은 노출인구는 정책 수혜 규모를 가늠하기 위한 기초자료로 정책 수립 단계에서 충분히 검토되어야 한다. 국내의 경우 도로에서 발생한 대기오염물질의 확산과 이에 따른 노출인구 오염도를 순차적으로 추정하는 방안은 마련되어 있으나, 배출량 산정은 국가 대기오염물질 배출량 산정을 위한 대기정책지원시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System)과 같은 하향식(TDA: Top-Down Approach) 방법을 활용하기 때문에, 앞서 언급한 대상지역의 공간적 특성, 정책 추진에 따른 통행자의 통행행태 변화 등을 민감하게 고려하지 못하는 한계가 있다.

본 연구에서는 교통수요모형 기반의 상향식(BUA: Bottom-UP Approach) 배출량 산정을 바탕으로 교통환경정책의 대기질 개선효과 분석 방법론을 제시하고자 하며, 해당 방법론은 정책 추진에 따른 도로이동오염원의 통행량과 대기오염물질 배출량의 변화, 대기오염물질의 공간적 확산과 이로 인한 노출인구의 건강영향을 순차적으로 고려한다.

2. 연구의 내용 및 방법

교통환경정책에 따른 대기질 개선효과 분석 방법론을 제시하기 위하여 도로이동오염원 배출량 및 대기질 분석 방법론, 건강영향 분석 방법론을 검토하였으며, 정책 시나리오 분석을 통하여 현재 상용화되고 있는 교통수요모형, 대기확산모형, 공공보건모형에 대한 연계 가능성을 검토하였다. 정책 시나리오 분석의 대상지역은 대전광역시, 정책 시나리오는 최근 “미세먼지 관리 특별대책”의 세부이행계획으로 확정된 공해차량 운행제한지역(LEZ: Low Emission Zone) 제도를 검토하였다. 또한 대기오염물질은 사회적 비용이 높은 PM₁₀과 NO_x만을 고려하였으며, 대기질 개선에 따른 건강영향 대상은 대전광역시 인구로 한정하였다.

선행연구 검토

국내·외 도로이동오염원 배출량 및 대기질, 건강영향 관련 선행연구는 다음과 같다. 국내의 경우 Choe et al.(2009)는 GIS를 활용한 도로이동오염원 배출량 산정 방법을 제시하였으며, Lee et al.(2012)는 열간/냉간 시동 배

1) 2013년 기준 대기오염물질(PM₁₀, 초미세먼지(PM_{2.5}), NO_x, 일산화탄소(CO), 황산화물(SOX), 휘발성 유기화합물(VOC), 암모니아(NH₃), 먼지(TSP)) 배출량 중 주요 대기오염물질인 PM₁₀과 NO_x 배출량에 대한 도로이동오염원 비중은 각각 10%, 31%(수도권의 경우 각각 40%, 46%)임(국립환경과학원, <http://airemiss.nier.go.kr>)
 2) 2014년 기준 대기오염물질 사회적 비용은 PM_{2.5} 451.284원, SO₂ 37.459원, CO 27.719원, NO_x 45,971원, NMVOC 2,825원으로 PM_{2.5}와 NO_x의 비용이 상대적으로 높음(환경부, 2015)
 3) 2013년 기준 도로이동오염원의 PM₁₀과 NO_x 배출량 중 경유차의 비중은 각각 100%, 85%이며, 최근 10년간(2005-2014년) 자동차 등록대수 중 경유차 비중은 37-39%임(국립환경과학원, <http://airemiss.nier.go.kr>, 통계청, <http://kostat.go.kr>)

출량을 고려하여 기종점 기반 도로이동오염원 배출량을 산정하였다. 또한 Ryu and Bae(2012)는 ATMS를 활용한 도로이동오염원 온실가스 배출량을 산정하였으며, Yang et al.(2013a)는 도로이동오염원 외 배출량도 함께 고려한 도로변 대기질 분석 방안을 제시하였다.

Yang et al.(2013b)는 교통수요모형과 대기확산모형을 연계하여 도로이동오염원 배출량에 따른 대기질을 분석하였으며, Hu et al.(2013)은 서울시 대기질 모니터링 자료를 활용하여 서울시 주요 도로변 오염물질 농도를 분석하였다. 또한 Park and Ko(2014)는 서울시 가구통행실태조사 결과를 활용하여 BUA 기반(Tier 3)의 교통부문 온실가스 배출량을 산정하였으며, 교통정책에 따른 온실가스 감축효과 분석시 통행행태 반영이 가능한 BUA(Tier 3) 접근 방법을 활용하는 것이 적합함을 제시하였다.

국외의 경우 Borrego et al.(2000)은 BUA 방법과 TDA 방법으로 도로이동오염원 배출량을 각각 산정한 후 대기질 분석 결과를 비교하였으며, 지역 단위의 통행행태 변화를 고려하기 위해서는 BUA 방법이 보다 적합한 것으로 검토하였다. Borrego et al.(2003)은 도로이동오염원 배출량 모형과 대기확산모형 연계방안을 제시하였으며, Cook et al.(2008)은 도로이동오염원 배출량에 따른 대기질 분석 뿐 아니라 도로변 대기질 예보 가능성을 검토하였다.

Rader(2009)는 승용차 VMT 감소에 따른 건강영향을 분석하였으며, Hatzopoulou and Miller(2010)은 도로이동오염원에 따른 대기질을 요일별 시간대별로 세분화하여 검토하였다. 또한 Liu et al.(2013)은 택시 GPS 자료를 활용한 도로변 대기질을, Batterman et al.(2014)은 도로이동오염원에 따른 대기질이 천식 어린이 환자에 미치는 영향을 검토하였으며, James et al.(2014)은 버스요금 인상 및 노선조정에 따른 건강영향을 검토하였다.

선행연구 검토 결과 국내에서는 아직까지 도로이동오염원의 배출량 산정에 대한 연구가 대부분인 반면, 국외에서는 도로이동오염원 배출량 산정 방법론과 대기확산모형의 연계, 도로이동오염원에서 배출되는 오염물질로 인한 건강영향 분석 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다는 점에서 도로이동오염원에 대한 교통환경정책 효과를 포괄적으로 검토할 수 있는 방안 마련이 시급한 것으로 판단된다.

Table 1. Literature review

Author	Research Range		
	Emission	Diffusion	Health Benefit
Choi et al.(2009)	○	-	-
Lee et al.(2012)	○	-	-
Ryu and Bae(2012)	○	-	-
Yang et al.(2013a)	-	○	-
Yang et al.(2013b)	○	○	-
Hu et al.(2013)	-	○	-
Park and Ko(2014)	○	-	-
Borrego et al.(2000)	○	○	-
Borrego et al.(2003)	○	○	-
Cook et al.(2008)	○	○	-
Rader(2009)	-	-	○
Hatzopoulou and Miller(2010)	○	○	-
Liu et al.(2013)	○	○	-
Batterman et al.(2014)	○	○	-
James et al.(2014)	○	-	○

교통환경정책 대기질 개선효과 분석 방법론

1. 단계별 분석 방법론

1) 도로이동오염원 배출량 분석 방법론

(1) CAPSS(TDA 접근 방법)

CAPSS는 에너지산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 에너지수송 및 저장, 유지용제사용, 도로이동오염원, 비도로이동오염원, 폐기물처리, 농업, 기타 면오염원, 비산먼지 등의 12개 배출원과 CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, VOC, NH₃ 등의 7개의 대기오염물질을 고려한다. 도로이동오염원의 경우 승용차, 택시, 승합차, 버스(영업용 대형), 화물차, 특수차, RV, 이륜차와 같이 8개 차종을 고려하며, 배출 유형은 엔진 가열(hot-start) 배출, 엔진 미가열(cold-start) 배출, 휘발유 증발 배출과 같이 3개 유형을 고려한다.

(2) 교통수요모형(BUA 접근 방법)

교통시설개발사업의 경제적·재무적 타당성 평가, 도로 및 철도 부문 사업에 대한 예비타당성조사 수행 등에서 각각 “교통시설 투자평가지침(5차개정)”, “도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제5판)”을 준용하여 교통수요모형의 교통수요 예측 결과인 링크 단위의 통행배정 산출물(차종별 교통량, 통행속도, 통행거리 등)을 기반으로 도로이동오염원의 대기오염물질 및 온실가스에 대한 배출량을 산정한다. 분석을 위한 기초자료는 한국교통연구원의 국가교통데이터베이스(KTDB: Korea Transport Data Base)를 이용한다.

이와 같은 TDA 접근 방법과 BUA 접근 방법의 장·단점을 정리한 결과는 Table 2와 같으며, TDA의 경우 총량 관점에서 배출량 산정 결과에 대한 정확성은 확보하는 반면, 지역단위 또는 도로단위 단위 배출량 추정에는 한계가 있는 반면, BUA의 경우는 교통분석모형 또는 차량 배출가스 산정 모형을 이용하여 지역 및 도로 단위 배출량 산정에 유용한 장점을 가진다.

Table 2. Comparison between TDA and BUA

Mobile Emission	TDA	BUA
Feature	After calculating the total emission on the source of pollution based on the national statistics data, the total emission amount is allocated to each region based on the regional unit indicator	Calculate the emission for regional unit based on the traveler's average activity data (traffic volume, travel distance/speed, etc.)
Strength	Obtain accuracy on the results of the emission calculation from the view point of the total amount	Obtain accuracy on the results of emission calculation for regional unit or road segment unit
Weakness	Limitation on estimating the emission for regional unit or road segment unit	Limitation on reflecting the travel behavior of individual vehicle (acceleration /deceleration, trajectory, etc.), characteristic of road, etc.
Data	National statistics data (total travel distance, average travel speed, no. of registered cars, etc.)	Travel behavior of each road segment (traffic volume, travel speed, travel distance, etc.)

2) 도로이동오염원 대기질 분석 방법론

대기질 모형에서 고려하는 오염원은 점 오염원(point source), 선 오염원(line source), 면 오염원(area source) 등으로 구분이 가능하며, 도로이동오염원에 대한 대기질 분석은 도로망에서 발생하는 주행배출가스(running exhaustive emission)에 대한 분석이 대부분이기 때문에, 선 오염원 분석이 가능한 모형을 적용하는 것이 바람직하다. 이와 같은 모형으로는 AERMOD, CALPUFF, CALINE4 등이 있으며, 해당 모형들은 모두 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 개발된 대기확산모형이다(EPA 2004a; EPA 2004b; EPA, 2008). 특히,

CALPUFF의 경우 타 모형과 달리 시공간에 따라 변화하는 동적 기상조건을 고려할 수 있으며, 복잡한 지형 및 장거리(최대 200km) 확산 모사가 가능한 장점을 가진다.

Table 3. Comparison of atmospheric diffusion model

Model	Characteristics
AERMOD	Limitation on considering dynamic weather condition Expanded simulation of short distance of less than 50km Possible to analyze the point, line and surface source of pollution Consideration of CO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , TSP etc.
CALPUFF	Consideration of dynamic weather condition Expanded simulation of complex topography and long-distance (maximum of 200km) Possible to analyze the point, line and surface source of pollution Consideration of O ₃ , CO, NO _x , SO ₂ , PM ₁₀ , odor etc.
CALINE4	Limitation on considering dynamic weather condition Estimation of the receptor of air quality concentration within 500m of street-side (maximum of 20, limitation on applying to corridors) Limitation on considering the point and surface source of pollution Consideration of CO, NO ₂ etc.

3) 건강영향 분석 방법론

건강영향을 분석하기 위한 공공보건 모형은 환경이 인체 건강에 미치는 영향을 체계적이고 과학적인 방법으로 설명하는 모형이다. 특히, 천식, 만성호흡기질환 등 인체의 호흡기에 주로 영향을 미치는 대기오염의 개선에 따라 부수적으로 발생하는 지역 주민의 건강 개선에 대한 편익 추정이 주된 목적이며, BenMAP 등이 주로 활용된다.

BenMAP은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 공공보건 개선 편익을 분석하고자 개발한 지리정보시스템(GIS: Geographic Information System) 기반 모형이며, 분석 과정은 분석 대상지역 인구 추정, 대기질 변화에 영향을 받는 노출 인구 추정, 농도반응함수(C - R function: Concentration - Response Function) 선택과 건강피해 추정, 편익산정을 위한 경제적 가치추정 등 4단계로 구성된다.

BenMAP의 주된 결과물은 대기환경 개선에 따른 지역주민의 건강개선 편익이며, 편익 항목으로는 대기환경 개선으로 인한 조기사망자 감소 수(number of cases avoided), 조기사망자 감소에 따른 경제적 가치추정(monetary value) 등이 있다. 경제적 가치를 추정하는 과정에서 가장 큰 영향을 미치는 요인은 통계적 인간생명가치(VSL: Value of Statistical Life)이며, 이와 같은 VSL은 국가마다 상이하기 때문에 BenMAP을 국내 연구에 적용할 경우에는 VSL 추정에 대한 국내 연구결과를 반영하는 것이 바람직하다.

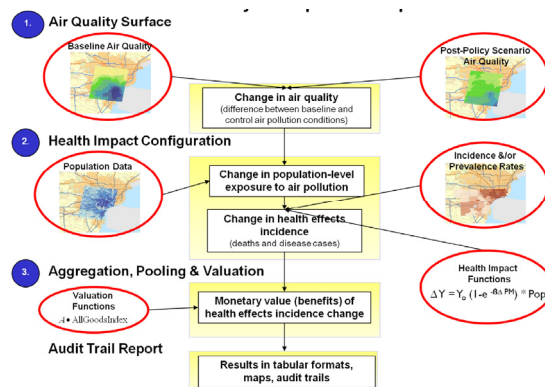


Figure 1. The process of BenMAP analysis(EPA, 2015)

2. 통합 분석 방법론

도로이동오염원 배출량 분석 방법론은 접근 방향에 따라 TDA 방법(CAPSS 등)과 BUA 방법(교통수요모형 등)으로 구분이 가능하다. TDA 방법은 도로이동오염원의 총 통행거리, 평균 통행속도 자료를 활용하여 국가 단위의 총 배출량 산정에는 유용한 반면, 관련 정책 시행에 따른 통행행태 변화 고려, 지역 및 도로구간 단위의 배출량 분석 등에는 한계가 있다. 지역단위의 도로이동오염원에 대한 고해상도 배출량 산정을 위해서는 BUA 방법이 적용될 수 있다.

도로이동오염원에서 배출되는 오염물질의 대기 중 확산 분석에 적용 가능한 모형은 AERMOD, CALPUFF, CALINE4 등이 있으며, AERMOD, CALINE4 등의 가우시안 플럼 모형은 평균의 개념이 고려된 정적인 기상조건을 고려하는 모형인 반면, CALPUFF 등의 가우시안 퍼프 모형은 시공간에 따라 변화하는 동적인 기상조건을 고려하는 모형이다. 해당 모형들은 지역 단위 또는 도로구간 단위의 고해상도 분석을 위하여 도로이동오염원 배출량 산정 방법론 중 BUA 방법의 배출량 산정 결과를 입력 자료로 고려할 수 있다.

교통환경정책의 대기질 개선효과 분석을 위해서는 도로이동오염원의 배출량 뿐 아니라 대기 중 확산 범위, 확산에 따른 노출인구 영향 등에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 교통환경정책의 대기질 개선효과 분석을 위하여 앞서 검토한 도로이동오염원의 배출량 산정 방법론 중 지역 단위 또는 도로구간 단위의 고해상도 분석이 가능한 BUA 방법과 대기확산모형, 그리고 대기질 개선으로 인한 경제적 편익을 산정하는 공공보건 모형을 연계한 분석 방법론을 Figure 2와 같이 제시하였다.

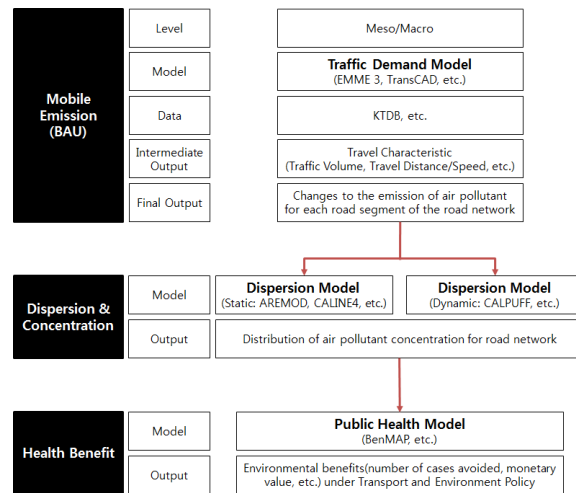


Figure 2. Proposed analysis method for air quality improvement effect

교통수요모형을 활용하는 해당 과정은 교통환경정책 추진에 따른 통행자의 통행행태 변화를 고려할 수 있을 뿐 아니라 장래 개발 계획(도로·철도 건설사업, 토지이용계획 등)에 따른 통행자의 통행행태 예측도 가능하기 때문에, 기존 TDA 방법 기반의 도로이동오염원 대기질 개선효과 분석 방법론 대비 다양한 분석이 가능하다.

정책 시나리오 분석

앞서 제시한 교통환경정책 대기환경 개선효과 분석 방법론의 활용 가능성을 검토하기 위하여 정책 시나리오에 따른 대기환경 개선효과 분석을 개략적으로 수행하며 교통수요모형은 지역 단위 분석이 가능한 EMME 3를, 대기확산분석은 동적 기상조건, 복잡한 지형 및 장거리 확산 모사가 가능한 CALPUFF를 활용하였다.

1. 현황 분석(2014년 기준)

1) 도로이동오염원 배출량

교통수요모형을 이용한 배출량 분석 과정은 기초자료 구축, 네트워크 현황 정산, 교통서비스 특성 산출, 대기오염 물질 배출량 산정과 같이 4단계로 구분되며, 첫 번째 단계인 기초자료 구축에서는 KTDB 대전광역시 네트워크 및 기종점 통행량(여객O/D, 화물O/D) 자료를 활용하여 네트워크 수정 및 O/D 보완 작업을 수행하였다. 두 번째 단계에서는 대전광역시 주요 도로를 중심으로 총 26개 지점에 대한 네트워크 정산 작업을 수행하였으며, 관측교통량과 배경교통량의 오차율은 한국개발연구원(2008)에서 제시하는 허용 오차율 30%를 적용하였다. 또한 도로 등급별 허용 오차율은 모두 동일하게 고려하였으며 정산 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. The result of traffic volume calibration

Error rate	Number of Calibration Point	Ratio
0-5%	5	19%
5-10%	7	27%
10-20%	13	50%
20-30%	1	4%
Total	26	100%

세 번째 단계에서는 통행배정 결과를 바탕으로 도로이동오염원 대기오염물질 배출량 산정을 위한 네트워크 링크별 교통량(대/일), 통행속도(km/h), 통행거리(km) 등의 교통서비스 특성을 산출하였으며, 네 번째 단계에서는 관련 서비스 수준과 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(Ⅲ)에서 제시하는 도로이동오염원 배출량 산정방법⁴⁾을 바탕으로 오염물질별 배출량을 산정하였다.

국립환경과학원의 배출계수는 속도(km/h)에 따른 배출량(g/km)을 산출하는 함수이며, 차량의 차종(승용차, RV, 승합차, 버스, 화물차)과 차급(경형, 소형, 중형, 대형), 연료유형(휘발유, 경유, LPG, CNG)과 연식에 따라 별도의 함수로 구분된다. 본 연구에서는 대전광역시 도로망을 통행하는 차량의 차종과 차급, 연료유형과 연식의 비율은 교통안전공단에서 제공하는 2014년 기준 자동차 등록대수 통계자료를 활용하였으며, 도로구간 및 위계에 상관없이 모두 동일한 것으로 가정하였다.

이상의 과정을 토대로 대전광역시 도로이동오염원에 따른 오염물질별 배출량을 산정한 결과, 2014년 기준 PM₁₀은 243톤, NO_x는 5,661톤이 추정되었다. 해당 결과를 국립환경과학원의 CAPSS에서 제공하는 도로이동오염원 배출량⁵⁾과 비교한 결과 PM₁₀은 약 8%, NO_x는 약 14% 과소 산정된 것으로 나타났으며, 이는 배출량 산정시 적용한 차종별 교통량 및 주행거리 수준의 차이, 교통수요모형의 속도 정산에 대한 한계 등이 주요 요인으로 판단된다.

Table 5. The result of mobile emission estimates

(unit: ton, %)

Air Pollution	Traffic Demand Model	CAPSS		Error rate
		2013	2014	
PM ₁₀	243	257	263	-7.7%
NO _x	5,661	6,454	6,611	-14.4%

4) 국립환경과학원(2013)

5) 국립환경과학원의 CAPSS에서는 2013년 기준 배출량을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 2013년 기준 대전광역시 자동차등록대수(606,283대)와 2014년 기준 자동차등록대수(621,035대)의 증가율(약 2.4%)을 이용하여 2014년 기준 CAPSS 배출량을 추정하였음

2) 오염물질별 대기확산

대기확산모형을 기반으로 대전광역시 도로이동오염원에 대한 PM₁₀, NO_x 농도를 산정하였으며, 분석 소프트웨어는 CALPUFF를 활용하였다. 분석 과정은 지형 및 기상자료 수집, CALMET(기상자료의 전처리 과정), 네트워크 구축, CALPUFF(대기확산 분석), CALPOST(대기확산 결과 표출) 등의 5단계로 구분되며, 앞서 검토한 도로이동오염원 배출량 분석 결과는 네트워크 구축 단계에서 입력자료로 활용된다.

첫 번째 단계에서는 분석 대상지역인 대전광역시의 토지이용자료(Land Use Data)와 지형자료(Terrain Data)의 수집⁶⁾ 및 처리를 수행하였으며, 두 번째 단계에서는 기상자료의 전처리 과정인 CALMET을 구현하였다. 기상자료는 2014년 기준이며, 대전광역시를 중심으로 100km×100km 범위의 MM5 자료를 활용하였다.

세 번째 단계에서는 대전광역시 네트워크 구축과 도로이동오염원 배출량 입력을 수행하였다. 본 연구에서는 대전광역시 고속도로와 주요 간선도로는 선 오염원으로, 시내도로는 대전광역시 행정구역을 기준으로 면 오염원의 형태로 네트워크를 구축하였으며, 이는 CALPUFF에서 구현 가능한 링크수가 200개로 한정되어 있어 교통수요모형의 네트워크 수준을 동일하게 구현하지 못하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 교통수요모형에서 분석한 링크 단위 배출량의 확산 결과는 다소 정밀함이 떨어지는 한계를 가진다.

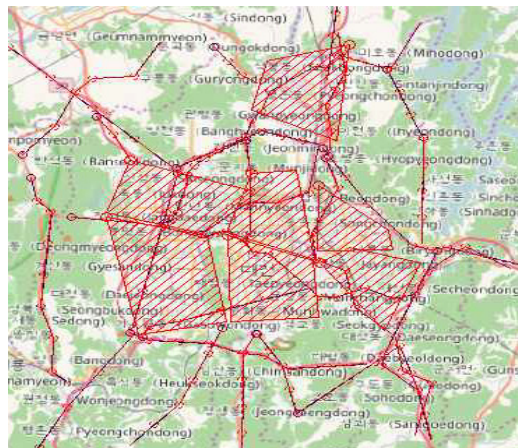


Figure 3. The result of CALPUFF network

도로이동오염원 배출량은 CALPUFF의 분석 단위인 단위시간당 면적당 발생량(g/h/m²)으로 변환하여 입력하였으며, 교통수요모형에서 추정된 배출량은 연평균 일교통량을 기반으로 산정되었기 때문에 CALPUFF에서 시간당 배출량 발생량은 동일한 것으로 가정하였다. 본 연구에서는 대기질 분석의 시간적 범위를 분기별(1월, 4월, 7월, 10월)로 구분하였으며, 분석 결과인 대기오염물질의 농도는 각 분기의 1-3일에 발생하는 평균치를 활용하였다.

이상의 과정을 토대로 대전광역시 도로이동오염원 배출량에 따른 오염물질별 농도를 분기별로 산정한 결과는 Table 6과 같으며, 2014년 기준 PM₁₀은 8.9-22.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_x는 188.2-450.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 분기별 변동이 있는 것으로 검토되었다.

Table 6. The result of concentration estimates

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Air Pollution	January	April	July	October
PM ₁₀	22.3	11.5	10.2	8.9
NO _x	450.1	232.6	214.9	188.2

6) www.WebGIS.com

2. 시나리오 분석

LEZ 제도는 노후경유차에서 발생하는 PM₁₀을 줄이기 위한 정책으로 서울시 전역은 2017년, 인천시(옹진군 제외)와 경기도 17개 시는 2018년, 나머지 수도권 대기관리권역은 2020년부터 시행될 예정이다. 운행제한 대상 차량은 2005년 이전에 수도권 대기관리권역에 등록된 총중량 2.5톤 이상 경유차이며, 수도권 이외 지역에 등록된 노후 경유차의 수도권 운행 제한은 장기적으로 검토될 예정이다.

본 연구에서는 2014년 LEZ 제도 시행으로 대전광역시 전역을 노후경유차 운행제한지역으로 가정하였으며, 대상 차량은 2005년 이전에 제주도를 제외한 16개 시도에 등록된 총중량 2.5톤 이상 경유차 중 승합차와 화물차로 한정하였다. 대상차량 중 대전광역시 등록 차량은 모두 저공해조치(DPF: Diesel Particulate Filter)를 이행하여 대전광역시 운행제한 대상에서 제외되는 것으로, 대전광역시 이외 지역의 등록 차량⁷⁾은 대전광역시 운행이 제한되는 것으로 가정하였다.

LEZ 제도 시행에 따른 도로이동오염원 배출량 분석 결과는 Table 7, Table 8과 같으며, 배출량은 교통수요모형에서 고려하는 차종별로 대전광역시 등록 차량의 저공해조치에 따른 저감 효과(A)와 대전광역시 이외 등록 차량의 운행제한에 따른 저감 효과(B)로 구분하여 산정하였다. 대전광역시 이외 등록차량의 운행제한에 따른 저감 효과(B)는 Figure 4와 같이 LEZ 제도 시행 전에는 대전광역시를 통과하던 통행량 중 일부가 제도 시행 후 대전광역시를 우회함으로써 발생된다. Figure 4에서 검정색 박스 내부는 앞서 분석한 교통수요모형의 네트워크 현황 정산 범위를 의미하며, 네트워크 링크 중 연두색 부분은 제도 시행으로 통행량이 증가한 구간을, 붉은색 부분은 제도 시행으로 통행량이 감소한 구간을 의미한다.

분석 결과 대전광역시 도로이동오염원의 PM₁₀ 배출량은 제도 시행 전 대비 약 25톤, NO_x 배출량은 제도 시행 전 대비 약 125톤 감소하는 것으로 나타났다. 또한 승용차의 PM₁₀ 배출량과 NO_x 배출량은 제도 시행 전 대비 다소 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 교통수요모형의 통행배정 단계에서 O/D 총량은 변화가 없으나 승합차 및 화물차의 운행제한으로 인하여 대전광역시 도로망의 통행속도가 개선되어 기존에 대전광역시를 통과하는 승용차 통행량이 증가하였기 때문으로 판단된다.

Table 7. LEZ effects(PM₁₀ emission, 2014)

(unit: ton)

Effects	Car	Van	Truck	Total	
Do-nothing	68	21	154	243	
Do-action	A	68	20	150	238
	B	68	15	140	223
	A+B	68	15	135	218

Table 8. LEZ effects (NO_x emission, 2014)

(unit: ton)

Effects	Car	Van	Truck	Total	
Do-nothing	2,303	407	2,951	5,661	
Do-action	A	2,303	403	2,817	5,544
	B	2,324	405	2,945	5,653
	A+B	2,324	401	2,811	5,536

7) 교통수요모형의 도로 네트워크 링크 데이터의 자료구조 수정을 통하여 대전광역시 이외 지역의 등록 차량 중 대전광역시를 통과하던 노후경유차(총중량 2.5톤 이상, 2005년 이전 등록 차량)는 LEZ 제도 시행으로 대전광역시를 우회하고, 나머지 경유차는 대전광역시 진출입이 가능한 것으로 모사

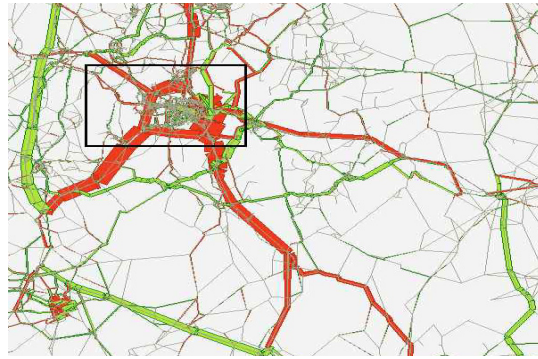


Figure 4. The change of travel behavior under LEZ

또한 LEZ 제도 시행에 따른 대전광역시 대기질 분석 결과는 Table 9, Table 10과 같으며, 미시행시 대비 PM₁₀과 NO_x의 평균농도는 각각 최대 약 14%, 4% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 LEZ 제도 시행에 따른 저공해조치의 NO_x 저감률이 매우 미비하고, 대전광역시 이외 등록차량의 운행제한에 따른 저감 효과는 대전광역시 외부에서 발생하여 대기질 분석시 고려되지 않기 때문이다. 한편, 분기별로 오염물질별 평균농도가 변화한다는 점에서 도로이동오염원 오염물질별 배출량이 동일하게 발생하더라도 오염물질의 대기확산은 바람의 방향과 세기의 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. Table 9, Table10에서 미시행시와 시행시 모두 오염물질별 평균농도가 분기별로 최대 50% 이상 변화한다는 점이 이를 뒷받침한다.

Table 9. LEZ effects(PM₁₀ concentration, 2014)

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Effects	January	April	July	October
Do-nothing	22.3	11.5	10.2	8.9
Do-action	19.3	9.9	8.9	7.7

Table 10. LEZ effects(NO_x concentration, 2014)

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Effects	January	April	July	October
Do-nothing	450.1	232.6	214.9	188.2
Do-action	431.9	222.9	207.8	180.6

마지막으로 LEZ 제도 시행에 따른 대전광역시 인구의 건강영향 분석 결과는 Table 11, Table 12와 같으며, 앞서 검토한 대기확산 분석 결과는 오염물질별 대기질 개선에 따른 노출인구 추정 단계에서 입력자료로 활용된다. 본 연구에서는 분석의 편이성을 감안하여 LEZ 제도 추진에 따른 건강영향 기준을 조기사망자 감소 수로 선정하였으며, 조기사망자 감소에 따른 경제적 가치 추정은 PM₁₀만을 고려하였다.

Table 11. LEZ effects(reduction of premature death, 2014)

(unit: persons)

Effects	Daejeon					Total
	Dong-gu	Jung-gu	Seo-gu	Yuseong-gu	Daedeok-gu	
January	0.45	0.48	0.90	0.57	0.37	2.8
April	0.24	0.25	0.48	0.30	0.20	1.5
July	0.19	0.21	0.39	0.25	0.16	1.2
October	0.18	0.19	0.36	0.23	0.15	1.1

Table 12. LEZ effects(potential health benefits, 2014)

(unit: million won)

Effects	Daejeon					Total
	Jung-gu	Jung-gu	Seo-gu	Yuseong-gu	Daedeok-gu	
January	15.1	16.0	30.2	19.1	12.3	92.7
April	8.0	8.5	16.1	10.2	6.6	49.4
July	6.5	6.9	13.1	8.3	5.4	40.2
October	6.0	6.4	12.1	7.6	4.9	37.1

분석 결과 LEZ 제도 시행에 따른 조기사망자 감소 수는 PM₁₀의 평균농도가 가장 높았던 1월에 가장 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 이로 인한 경제적 가치는 약 93억원 규모이다⁸⁾. 이와 같은 분석 결과는 LEZ 제도 추진에 따른 대기질 개선효과 뿐 아니라 제도 시행에 필요한 재정 규모와의 비교를 통하여 공공보건 차원에서 정책 추진을 위한 근거로도 활용이 가능하다.

결론 및 제언

도로이동오염원의 배출량 분석 방법론은 정책 유형에 따라 TDA 방법, BUA 방법 모두 적용이 가능하다. 그러나 LEZ 제도와 같이 통행자의 통행행태 변화가 예상되는 정책의 경우 도로이동오염원 배출량 산정은 TDA 방법보다는 BUA 방법이 적합한 것으로 판단된다. 특히, 정책 추진에 따른 도로이동오염원 배출량 분석은 대기환경 개선효과 분석을 위한 이후 단계인 대기확산분석, 건강영향분석에 영향을 미치기 때문에 통행자의 통행행태 변화는 가능한 현실적으로 반영되어야 한다.

국내 주요 교통환경정책으로는 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」을 근거로 2013년에 수립된 2차 수도권 대기환경관리 기본계획의 자동차 관리대책이 있으며, 해당 대책 중 저탄소차협력금제도 도입, 노후 차량 저공해화 사업 보완·발전(건설기계 포함), 공해차량 운행제한지역 보완·발전, 나홀로 자동차 감축 대책 추진, 교통유발을 억제하는 인센티브 및 디스인센티브 강화 등의 정책으로 인한 대기질 분석시 본 연구의 방법론 적용이 필요하다.

이는 저탄소차협력금제도의 경우 친환경차 및 경·소형차 증가에 따른 주행거리 변화, 노후 차량 저공해화 사업 보완·발전(건설기계 포함)의 경우 도로구간별 통행속도 차이, 공해차량 운행제한지역 보완·발전의 경우 운행제한지역에 대한 internal↔internal 통행, internal↔external 통행, external↔external 통행행태 변화, 나홀로 자동차 감축 대책 추진의 경우 대중교통 수단분담률 제고에 따른 수단간(승용차↔대중교통) 전환행태, 카셰어링(차량공동이용) 활성화에 따른 도로구간별 통행속도 증가, 교통유발을 억제하는 인센티브 및 디스인센티브 강화의 경우 교통유발부담금, 도심 혼잡통행요금 현실화로 인한 교통혼잡 완화 등이 정책 추진에 따른 대기질 개선효과 분석시 고려되어야 하기 때문이다.

이 외에도 본 연구에서 제시한 방법론은 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사에서도 활용이 가능하다. 예비타당성조사에서는 경제성 분석을 위한 편익항목으로 차량운행비용 절감편익, 통행시간 절감편익, 교통사고비용 절감편익, 환경비용 절감편익 등을 고려하며, 환경비용 절감편익 중 대기오염 절감편익은 개별 링크의 교통량과 통행속도 등을 이용하여 분석 대상지역의 전체 링크에 대한 대기오염비용을 추정한 후, 사업 전·후에 대한 차액으로 산정된다.

그러나 산정 과정에서 사업의 공간적 범위(도심지, 외곽 등), 대상 지역의 기상조건 등에 따라 대기오염 절감편익이 달라질 수 있다는 점을 충분히 고려하지 못하는 것으로 판단된다. 즉, 대기오염물질 배출량은 동일한 수준으로 감소하더라도 공간적 범위, 기상조건 등에 따라 파급효과(건강영향 등)는 상이할 수 있다. 특히, 도심지에서 시행되는

8) 경제적 가치 산정을 위한 통계적 인간 생명가치는 “한국형 BenMAP을 활용한 대기질 개선정책 건강편익 연구”(환경부, 2008)의 결과를 참고하였으며, 소비자 물가지수를 고려하여 2014년 기준으로 계상하였음

사업의 경우 도로변 거주자 등으로 인하여 배출량 감소에 따른 파급효과는 외곽에서 시행되는 사업 대비 클 수 있다. 마지막으로 본 연구에서 제시한 분석 방법론은 순차적으로 진행되기 때문에 단계별 분석결과에 대한 오차가 누적되는 문제점을 가진다. 이러한 문제를 완화하기 위해서는 단계별 분석결과의 정확도를 높이기 위한 방안이 지속적으로 검토되어야 하며, 큰 틀에서는 국내 특성을 고려할 수 있는 각 단계별 모형의 개발, 미시 수준의 도로이동오염원 배출량 분석을 위한 기초자료 구축 등을 위한 후속 연구의 진행이 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was funded by the Korea Environment Institute project (RE2016-09).

REFERENCES

- Batterman S., Ganguly R., Isakov V., Burke J., Arunachalam S., Snyder M., Robins T., Lewis T. (2014), Dispersion Modelling of Traffic-Related Air Pollutant Exposures and Health Effects Among Children With Asthma in Detroit, Michigan, *Transp Res Rec*, 2452, 105-112.
- Borrego C., Tchepel O., Barros N., Miranda A. I. (2000), Impact of Road Traffic Emissions on Air Quality of the Lisbon Region, *Atmospheric Environment*, 34, 4683-4690.
- Borrego C., Tchepel O., Costa A. M., Amorim J. H., Miranda A. I. (2003), Emission and dispersion modelling of Lisbon air quality at local scale, *Atmospheric Environment*, 37, 5197-5205.
- Choi K. C., Lee K. J., Ahn S. C. (2009), An Improvement of Bottom Up Approach for Estimating the Mobile Emission Level, *J. Korean Soc. Transp.*, 27(4), Korean Society of Transportation, 183-193.
- Cook R., Isakov V., Touma J. S., Benjey W., Thurman J., Kinnee E., Ensley D. (2008), Resolving Local-Scale Emissions for Modeling Air Quality near Roadways, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(3), 451-461.
- EPA (2004a), AERMOD, Description of Model Formulation.
- EPA (2004b), User's Guide for the AMS/EPA Regulatory Model-AERMOD.
- EPA (2008), Emission and Air Quality Modeling Tools for Near-Roadway Applications.
- EPA (2015), BenMAP-CE User's Manual.
- Hatzopoulou M., Miller E. J. (2010), Linking an Activity-based Travel Demand Model With Traffic Emission and Dispersion Models: Transport's Contribution to Air Pollution in Toronto, *Transportation Research Part D*, 15, 315-325.
- Hu H. J., Barlow T., Lee Y. H., Cho H. J., Kim M. G. (2013), Developing a Roadside Air Quality Assessment Methodology Using Seoul Air Quality Monitoring Data, *Seoul Studies*, 14(2), 115-129.
- James P., Ito K., Buonocore J. J., Levy J. I., Arcaya M. C. (2014), A Health Impact Assessment of Proposed Public Transit Service Cuts and Fare Increases in Boston Massachusetts, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 11(8), 8010-8024.
- Lee K. J., Choi K. C., Ryu S. K., Baek S. K. (2012), Development of O/D Based Mobile Emission Estimation Model, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 32(2D), 103-110.
- Liu H., Chen X., Wang Y., Han S. (2013), Vehicle Emission and Near-Road Air Quality Modeling for Shanghai, China(Based on Global Positioning System Data From Taxis and Revised MOVES Emission Inventory),

- Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2340, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C. 38-48.
- Park J. H., Ko J. H. (2014), Comparing Methods for Apportioning Transport CO₂ Emissions to Sub-Regional Areas in Seoul, Seoul City Research, 15(4), 65-78.
- Park S. J., Kim H. G., Ju J. H. (2012), A Study of Long-Term Car Ownership in Korea, The Korea Transport Institute.
- Rader M. (2009), Health Impact Assessment on Policies Reducing Vehicle Miles Traveled in Oregon Metropolitan Areas, Upstream Public Health.
- Ryu B. Y., Bae S. H. (2012), Estimation of Greenhouse Gas in the Urban Area by Using Advanced Traffic Management Systems: Case study of Daejeon, Journal of Transport Research, 19(3), 119-134.
- Yang C. H., Koo Y. S., Kim I. S., Sung J. G. (2013), Studies on the Methodology of a Hybrid Model for Emission Dispersion Analysis, J. Korean Soc. Transp., 31(2), Korean Society of Transportation, 69-79.
- Yang C. H., Yang I. C., Yoon C. J., Sung J. G. (2013), Impact Analysis of Air Quality Mobile Sources Using Microscopic Emission and Dispersion Model, Journal of the Korean Society of Road Engineers, 15(4), 167-175.