

차량배출가스로 인한 일반국도 NO_x 대기오염 추정 모형

A Model for Estimating NO_x Emission Concentrations on National Road

오 주 삼 Oh, Ju sam | 정회원 · 한국건설기술연구원 첨단교통연구실 수석연구원 (E-mail : jusam@kict.re.kr)
김 병 관 Kim, Byung kwan | 한국철도공사연구원 경영연구처 책임연구원 (E-mail : kimbk@korail.com)

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the relationship between observed traffic data and NO_x concentrations from not an ideal condition but a real road in real-time. Also we aim to develop an estimation model for NO_x emission concentrations due to vehicle exhaust gas, and it can be applied to monitor the degree of air pollution on National Road in real-time. To eliminate outliers which are occurred due to errors of equipments and other variables, we use the robust analysis and develop two models, which are considering and not considering wind impact. The result of this research can be used for understanding present condition of air pollution caused by vehicle exhaust gas and evaluating for environmental effects of transportation policy.

KEYWORDS

air pollution, nitrogen oxide (NO_x), vehicle exhaust gas, national road

요지

본 연구는 이상적인 실험환경이 아닌 실제 일반국도(국도 3호선)를 분석 대상으로 실시간으로 수집된 교통자료와 NO_x 대기오염 측정 자료를 이용하여 이들 사이의 관계를 규명하고 그 특성을 분석하고자 한다. 또한 이러한 관계를 이용하여 현장에서 실제 적용이 가능하며 대기오염도를 모니터링을 할 수 있는 일반국도의 차량배출가스로 인한 NO_x 대기오염도 추정 모형을 개발하고자 한다. 모형의 구축에 있어서 측정 장비 및 기타 변동요인으로 인한 특이점을 제거하기 위하여 로버스트 분석을 이용하였고 바람의 영향을 고려하지 않은 경우와 바람의 영향을 고려한 경우에 대해서 모형을 구축하였다. 본 연구의 결과는 교통정책 시행에 따른 차량배출가스로 인한 대기오염 현황을 파악하고 교통정책의 환경적 효과를 평가하는데 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어

대기오염, 질소산화물(NO_x), 차량배출가스, 일반국도

1. 서론

국립환경과학원(2007)의 대기오염 배출량 연보에 따르면 도로이동오염원과 비도로이동오염원을 합한 교통부문의 대기오염물질 배출량은 1,582천 톤으로 우리나라 전체 대기오염물질 배출량 3,372천 톤의 47%를 차지하고 있는 실정이다. 특히, 차량배출가스로 인한 도로이동오염원의 배출량은 1,161천 톤으로 전체 배출량에서 가장 많은 34%를 차지하고 있어 차량 통행이 대기오염에 미치는 영향이 매우 크고 심각한 수준임을 알 수 있다.

향후 국가 온실가스 및 대기오염물질 감축 목표의 달성을 위해 교통부문에서의 대폭적인 감축이 불가피한 실정이며 특히 차량에 의한 대기오염물질이 차지하는 비중이 크므로 차량으로 인한 대기오염물질의 관리가 매우 중요하다 할 수 있다.

현행 교통부문과 관련된 녹색성장 정책시행 상의 문제점 가운데 하나로 제시되고 있는 것은 교통정책별 대기오염물질 저감효과 측정 방법의 미비점이 제기되고 있다. 교통부문의 도로 지·정체 해소방안, 용량개선사업, 도류화 사업, 순환도로 건설, 교통정보제공 등 현재

이뤄지고 있는 각종 저탄소 도로정책의 시행에 따른 대기오염감소 정책효과를 분석하기 위해서는 차량배출가스로 인한 실질적인 대기오염도를 추정하기 위한 연구가 필요하다 할 수 있다.

차량배출가스의 대기오염 추정과 관련한 대부분의 연구는 평균화된 개념을 도입하여 총량단위(광역시 및 도 단위)로 배출량을 추정하고 자동차보유대수 또는 교통량 통계치를 이용하여 도로연장이나 통계자료에 의해서 할당하는 방법을 이용하고 있다. 그리고 이상적 조건하에서 실내 차량동력계의 실험을 통한 배출계수를 산출하고 실험환경에서 얻어진 배출계수를 일괄적으로 적용하고 있다. 이러한 방법은 현실성이 떨어지며 도로를 관리하는 기관에서는 정책시행에 따른 도로부문의 대기오염 저감효과를 측정하는데 해당 자료의 활용 가치가 떨어진다 할 수 있다.

본 연구에서는 총량단위와 이상적인 실험환경이 아닌 실제 일반국도를 분석 대상으로 실측된 교통자료와 대표적인 차량대기오염물질 중 질소산화물(NO_x)의 대기오염도 실측자료를 이용하여 현실적으로 적용 가능한 일반국도의 NO_x 차량배출가스로 인한 대기오염도 추정모형을 개발하고자 한다. 일반적으로 질소산화물(NO_x)은 질소와 산소의 화합물로, 연소과정에서 공기 중의 질소가 고온에서 산화돼 발생하며 광학스모그의 원인이 되고 있다. 이러한 질소산화물(NO_x)은 대기오염문제 중 중요하게 여겨지는 일산화질소(NO), 이산화질소(NO_2)를 합하여 통칭하는 용어로 2007년 대기오염배출량 연보 기준 차량(도로이동오염원)에 의한 전체 대기오염물질 중 NO_x 가 차지하는 비율은 42%로 큰 비중을 차지하고 있다. 따라서 본 연구는 일반국도에서 이러한 NO_x 의 오염도를 실시간으로 측정 가능한 도로변 대기오염 측정 장비와 실시간으로 교통자료의 수집이 가능한 차량검지기를 설치하여 실제 교통량과 대기오염도의 관계를 규명하고 일반국도의 교통상황에 따른 대기오염도를 추정할 수 있는 모형을 개발하고자 한다.

2. 기존연구 고찰

차량배출가스로 인한 대기오염을 추정하기 위해서 차량배출량 산정과 관련한 연구가 수행되어져 왔다. 가장 이상적인 차량배출량 산정방법은 실측·원격탐사 등을 통한 교통자료와 대기오염자료를 직접 이용하는 방법이지만 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 이런 이유로 대부분의 방법이 보다 평균화된 개념을 도입하여 전체적인 배

출량을 추정한 다음 지역현황에 따라 배분하는 방법이 이용하고 있다. 이는 총량단위의 총 주행거리(VKT: Vehicle Kilometer Travel)를 산정하고 자동차 등록대수 또는 교통량통계에 의해 해당지역별로 주행거리를 할당하고 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하는 방법이라 할 수 있다. 이러한 접근방식을 Top Down Approach(TDA)라 하며 적용이 용이하지만 대상지역을 평균화시키는 단점을 가지고 있다. 일반적으로 이런 방법과 관련한 연구들은 배출계수 산정과 총배출량을 지역에 할당하는 방법에 관한 연구가 주로 수행되어 왔다.

이와 관련한 대표적인 국외연구는 미국 Environmental Protection Agency의 MOBILE, California Air Protection Agency의 MVEI, 유럽 EU CORINAIR의 Emission Inventory Guidebook을 들 수 있다.

MOBILE은 지정된 실험조건에서 얻어진 기준배출율(basic emission rate: BER)을 기준으로 차량 누적 주행거리에 대해서 보정한 배출계수를 사용하며 속도는 가속, 감속, 정속, 정지 등을 모두 고려한 평균속도 개념을 이용한다. 기본적인 개념은 다음과 같다.

$$\text{배출량} = \text{평균속도} \times \text{차종별 배출계수} \times \text{VMT(Vehicle Miles Traveled)} \quad (1)$$

MVEI는 MOBILE과 같이 미국에서 널리 이용되고 있는 이동오염원의 배출량 산출모형이며 MOBILE과 마찬가지로 평균차량속도와 배출량간의 관계를 통계적으로 이용하고 있는 것으로 다양한 교통상황의 영향하에서의 대기오염물질 배출량 분석에는 한계가 있다. MVEI는 크게 CALIMFAC, WEIGHT, EMFAC, BUREDN의 4가지 모듈로 구성되어 있으며 기본원리는 MOBILE과 같으나 VMT, 속도, 출발형태, 차량대수, 온도, 남/황 자료에 대한 모듈인 BURDEN이 포함되어 있는 것이 차이로 할 수 있다.

유럽의 Emission Inventory Guidebook은 배출량을 크게 엔진가열(hot)배출량, 엔진미가열(cold)배출량, 중발배출량으로 구분하며 엔진가열배출량에 대해 속도를 고려한 배출계수를 산정 후 다양한 인자에 대해서 보정하는 방식을 취한다. 배출계수는 미국의 배출계수 산정과 마찬가지로 속도, 차종, 연료, 도로경사, 부하 등을 고려하고 배출량 산정을 위하여 기본적으로 다음과 같이 적용되고 있다.

$$\text{배출량} = f(\text{도로종류, 차종별 연료소모량}) \times \text{배출계수} \quad (2)$$

이와 관련한 국내연구로는 장영기 외(1995)는 ARC/INFO를 활용한 도로망 DB를 이용하여 격자단위의 도로종류별 차선길이를 추출하고 격자단위의 도로종류별 주행거리를 산정한 후 곱하여 격자단위 오염물질 배출량을 산출하였다.

김동영(1998)은 GIS DB를 구축하여 광역단체 단위 배출원별 활동도(차종별 평균주행거리 및 자동차 등록대수)와 배출계수를 이용하여 평균화된 배출량 산정체계를 개발하였다.

조규탁(2002)은 기존의 TDA 방법을 개선하고자 대상공간을 균일하게 평균화하지 않고 통행특성과 관련이 있는 도로기능 및 용량을 기초로 네스티드 수준을 설정하여 대상공간을 세분함으로써 배출량 산정의 공간해상도를 높이고자 하였다.

대상지역의 좀 더 정확한 배출량산정을 위하여 교통시물레이터를 이용한 연구가 있어왔는데 홍창의(1996)는 서울시의 송파구 교차로와 링크를 대상으로 TRAF-NETSIM 시물레이션을 통하여 교통량, 지체시간, 링크 길이, 정지횟수, 운행속도, 주행속도 등을 고려하여 대상지역의 배출량을 산정하였다. 하지만 TRAF-NETSIM 시물레이션을 사용한 배출량은 현실이 아닌 시물레이션의 교통특성자료를 반영하고 있다.

유지열(1997)은 정밀한 배출량 추정과 장래 차량에 의한 오염물질 배출량 예측을 위해 교통수요모형인 EMM/2와 차종별 O/D자료를 도입하여 오염물질 배출량 산정 방법론을 개발하였다. 배출량은 차량별 배출계수×링크별 차량대수×링크 길이로 계산되며 이렇게 계산된 배출량을 격자별로 할당하여 지역별 오염물질 배출량을 산정하였다.

최근은 기존의 평준화된 거시적 관점이 아닌 실시간 개별차량의 주행상태에 따른 배출량 산정을 위한 미시적 접근방식에 관한 연구가 수행되고 있다. Barth, M. et al(1996)는 MOBILE과 EMPAC은 다양한 교통상황의 영향하에서 대기오염물질 배출량 분석에 부적절하다고 언급하고 ITS, 대체연료차량 등의 영향을 분석하기 위해서는 정속, 가속, 감속, 등의 개별차량주행모드를 반영해야할 필요성이 있다고 주장하여 NCHRP(Modal Emission Model)모형을 제시하였다.

Park(2001)은 미시적 시물레이터인 VISSIM을 이용하여 개별차량들의 주행형태 및 교통류 특성을 분석한 후 차량의 속도, 감속도를 기반으로 영국의MODEM(Microscopic Emission Inventory)과 결합하여 개별차량 단위의 배출량을 산정하였다.

이영인 외(2004)는 개발된 미시적 시물레이터를 이용하여 개별차량의 운행 패턴과 교통류의 특성 변화를 모사하고, 이러한 변화에 따라 발생하는 배기가스 배출량 추정 방법론을 제시하였다. 개별차량의 주행상태에 따른 배출량 산정을 위하여 영국의 MODEM 자동차 배출량 표를 이용하여 속도와 가속도에 따른 회귀식의 배출량 모형을 구축하였다.

그 밖에 좀 더 현실적인 연구를 위하여 실시간 교통자료와 대기오염자료를 이용하고자 시도한 연구가 있어왔다. N. Jenkins(1995)는 런던의 Old Kent Road를 대상으로 교통량, 풍속자료와 NO, NO₂ 오염도를 실측하여 이들 간의 상관관계를 분석하였다.

박성규(2001)는 환경부에서 채택중인 기존의 일일평균주행거리 방법은 교통량에 따른 시간배출량 변동 특성을 고려할 수 없다고 판단하여 실시간 교통자료를 이용하고자 시도하였다. 교차로 검지기에서 수집되는 실시간 교통자료를 이용하여 서울 강남구 지역의 도로별, 시간대별로 자동차 오염물질 중 CO의 배출량을 산정하였는데 실시간 교통자료를 사용하였지만 대기오염 배출량은 실시간 자료가 아닌 국립환경연구원의 배출계수를 이용하였다.

박정수(2010)는 교통사업에 따른 환경성 평가를 위하여 5분 단위의 실측 교통량 자료와 환경부의 대기측정망 자료의 관계를 분석하여 대기측정망이 없는 지역에도 적용할 수 있는 모형을 도출하고자 하였다. 연구에서는 기 설치된 대기측정망을 이용하여야 함으로 다른 오염원이 상당히 존재하는 도심에서 실험이 수행되었고 교통량이 수집되는 도로변에서 거리상 떨어진 대기측정망을 이용하여야 하였기에 실질적인 관계 정확도에 한계가 있다.

기존 연구를 분류하여 정리하면 다음 표 1과 같다.

표 1. 기존 연구의 방법론 분류

방법론	기존연구	특징
거시적 분석	MOBILE(1996) MVEI(1996) Emission Inventory Guidebook(1999) 장영기(1995), 김동영(1998) 조규탁(2002), 유지열(1997)	실험조건에서 얻어진 기준 배출계수를 적용하여 해당 지역별로 배출량을 할당 Top Down Approach
미시적 분석	홍창의(1996) Modal Emission Model(1996) Park(2001) 이영인(2004)	개별차량의 주행특성을 반영하여 개별차량의 배출량을 합산하여 해당지역 배출량 산정
현장실측 분석	N. Jenkins(1995) 박성규(2001) 박정수(2010)	실시간 교통자료와 대기오염자료를 이용하여 관계를 분석하고 차량 배출가스로 인한 대기오염도를 추정

기존 대부분 국내 연구를 살펴보면 실제 주행특성 자료가 아닌 통계자료 및 상용화된 미시적 교통시뮬레이터를 이용하고 있으며 현재까지 실제 교통특성에 따른 대기오염도 자료를 구축하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구는 총량단위와 이상적인 실험환경이 아닌 실제 국도를 대상으로 동일한 도로구간에서 측정된 교통자료와 대기오염물질 중의 오염도를 이용하여 교통특성과 오염도간의 관계를 규명함으로써 차량배출가스로 인한 대기오염 추정 모형을 개발하고자 한다.

3. 수집자료 및 분석방법

3.1. 수집자료

실험현장은 곤지암 ITS 성능평가센터가 위치해 있는 국도 3호선 구간을 대상으로 하였다. 실험대상 구간인 3번 국도는 서울·광주방향의 편도 2개 차로로 양방향 4차로로 구성되고 4개 차로에 설치된 루프검지기를 이용하여 대상구간의 교통량, 속도의 교통정보를 수집하였다. 또한 실험대상 구간인 국도 3호선의 NO_x 대기오염도를 실시간으로 수집하기 위하여 도로변 10m 이내에 도로변 대기오염 측정장비를 설치하였다.

실험구간을 통과하는 차량에 의한 NO_x 대기오염도를 대기오염 측정 장비를 이용하여 실시간으로 측정하게 된다. NO_x 측정 장비는 화학발광법을 이용하여 0.5ppb 미만의 정확도로 1초 단위로 NO 와 NO_2 농도의 측정이 가능하다. 하지만 자료의 용량과 교통자료와의 관계 분석시 1초 단위 시간간격은 유의미한 관계분석이 어려울 것으로 판단되어 1시간의 집계간격을 설정하여 도로변 NO_x 대기오염도 측정자료를 수집하였다.



그림 1. NO_x 대기오염 측정장비

루프식 차량검지기를 이용하여 실험구간을 통과하는 개별차량의 통과 교통정보를 수집하였고 대기오염 측정

자료와 관계분석을 위하여 1시간의 분석시간에 맞게 시간집계 자료(시간 교통량, 속도)로 가공하였다. 또한 추가적으로 실험구간의 풍속자료를 함께 수집하였다.

본 연구는 이러한 실험현장을 구축하고 2010년 12월 24일 부터 2011년 1월 11일 까지 19일간 교통자료와 NO_x 대기오염도 자료를 수집하여 분석을 수행하였다.

3.2. 분석방법

수집된 교통자료, NO_x 대기오염자료, 풍속자료를 이용하여 이들 간의 관계를 규명하고 최종적으로 차량배출가스에 의한 NO_x 대기오염도 추정을 위한 모형을 구축하고자 한다. 교통자료에서 속도가 아닌 교통량을 이용한 이유는 통과차량(교통량) 자체가 대기오염물질의 직접적인 발생원이기 때문이고 교통량과 속도가 매우 높은 상관관계를 보이고 있어 이 두 개의 변수를 같이 사용하는 것은 다중공선성 문제를 발생시킬 수 있기 때문이다.

이후 분석과정은 기초 통계량 분석을 통하여 교통량, 속도, 풍속, NO_x 오염도간 연관성을 살펴보고 NO_x 대기오염도 추정을 위한 모형을 구축하게 된다. 그 수행 과정은 다음과 같다.

첫째, 교통량, 속도, 풍속, NO_x 대기오염도간의 기초 통계량 및 상관관계 분석을 수행한다.

둘째, 이들 변수간의 관계를 이용하여 NO_x 대기오염도 추정을 위한 모형을 구축하게 된다. 대기오염도는 바람에 의한 대기오염물질의 확산 정도에 가장 크게 영향을 받기 때문에 바람의 영향을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우로 나누어 분석을 수행하였다.

바람의 영향을 고려하지 않은 경우는 풍속의 영향을 배제하기 위하여 보퍼트 풍력계급표의 풍력계급이 1인 1.6m/s 미만(light air)의 풍속이 유지되는 시간대의 측정 자료만을 이용하였고 교통량을 독립변수로 하여 대기오염도 추정 모형을 개발하였다. 이렇게 바람의 영향을 고려하지 않은 모형은 차량배출가스에 의한 직접적인 오염도를 확인해 볼 수 있을 것이고 대기오염물질의 농도와 배출량과의 관계를 이용하여 차량배출가스의 배출량을 추정하는데 적용될 수 있을 것이다.

바람의 영향을 고려한 경우는 교통량/풍속을 독립변수로 하여 NO_x 대기오염도를 추정하는 것이고 대기오염물질의 확산에 가장 큰 영향을 미치는 바람의 영향을 고려하였기 대상지역의 대기오염도를 직접적으로 추정하는데 이용될 수 있을 것이다.

수집된 NO_x 대기오염도는 다양한 요인에 의해서 변동이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 특이점(outlier)을 분석하고 탐지하기 위한 방법으로 Rousseeuw(1984)가 제안한 로버스트 회귀(robust regression)중 최소절단제곱(LTS:Least Trimmed Squares)추정을 이용하였다. 로버스트 회귀추정의 잔차(e_i^2) 분포를 분석하여 안울타리값(Inner Fence)을 벗어나는 자료를 특이점으로 검출하였다. 여기서 로버스트는 사전적의미로 '강건'함을 의미하는데 통계학에서는 추정량이 특이점에 민감하지 않다는 뜻으로 사용된다. 본 연구에서 특이점 탐색을 위하여 이용된 LTS 추정은 제곱잔차들을 순서화한 후 그 값이 큰 제곱잔차들을 잘라버리고 나머지 잔차들의 제곱합을 최소화하는 회귀계수($\hat{\beta}$)를 찾는 기법이다.

$$\hat{b} = b^{\min} \sum_{i=1}^h e_i^2, h = [(3 \times \text{자료수} + \text{독립변수 수} + 1) / 4] \quad (3)$$

최종적으로 LTS 추정을 이용하여 특이점을 제거한 후 다음과 같이 직선, 로그, 지수, 거듭제곱 형태의 대기오염도 추정을 위한 모형을 구축하고자 한다.

$$\text{모형 1: } NO_x = b_0 + b_1 \cdot X \quad (\text{직선}) \quad (4)$$

$$\text{모형 2: } NO_x = b_0 + b_1 \cdot \ln(X) \quad (\text{로그}) \quad (5)$$

$$\text{모형 3: } NO_x = b_0 \cdot \exp(b_1 \cdot X) \quad (\text{지수}) \quad (6)$$

$$\text{모형 4: } NO_x = b_0 \cdot (X)^{b_1} \quad (\text{거듭제곱}) \quad (7)$$

$X =$ 교통량, 교통량/풍속

4. 자료분석 및 모형구축

4.1. 기초 통계량 분석

2010년 12월 24일~2011년 1월 11일 19일간의 시간 교통량, 속도, 풍속, NO_x (NO , NO_2)의 관계를 분석하고자 한다. 24(시간)×19(일)인 456개의 자료가 측정되었으며 기초 통계량은 다음과 같이 분석되었다.

표 2. 전체 수집자료의 기초 통계량

구 분	교통량 (대/시)	속도 (km/시)	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO _x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	풍속 (m/s)
자료수(n)	456	456	456	456	456	456
최대값	3,160	74.98	390.22	155.10	533.97	6.45
최소값	174	27.23	0.15	17.25	17.54	0.16
평 균	1,740	63.99	110.98	88.60	199.58	1.81
표준편차	983	7.43	84.18	29.77	109.71	1.47

교통량, 속도, 풍속, NO_x 대기오염도간의 연관성이 있는지 알아보기 위해 변수간의 상관성을 분석하였고 그 결과인 Pearson 상관계수는 표 3과 같다.

표 3. 전체 교통자료, 풍속과 NO_x 간 상관분석

구 분	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO _x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
교통량	0.147	0.259	0.183
속 도	-0.129	-0.206	-0.155
풍 속	-0.566	-0.597	-0.597
교통량/풍속	0.749	0.650	0.751

주) 교통량 - 속도 상관관계:0.604

전체 456개 수집자료의 교통량, 속도, 풍속, 교통량/풍속과 NO_x 대기오염도의 상관관계를 보여주고 있다. 교통량과 NO_x 농도는 양의 상관관계, 속도와 NO_x 농도는 음의 상관관계를 보여주고 있다. 속도보다는 교통량이 더 큰 영향을 미치고 있지만 바람의 영향으로 인해 상관관계가 크게 나타나지 않고 있다. 풍속과 NO_x 농도는 강한 음의 상관관계를 보이고 있으며 바람의 세기가 NO_x 농도에 매우 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. NO_x 농도가 교통량과 비례, 풍속에 반비례 관계이므로 교통량/풍속은 매우 높은 양의 상관관계를 보이고 있다. 이러한 이유로 바람의 영향을 고려한 NO_x 대기오염도 추정 시의 경우는 교통량/풍속을 독립변수로 고려하고자 한다.

표 4는 바람의 영향을 제외한 보퍼트 풍력계급이 1인 1.6m/s 미만(light air)의 수집자료 248개를 분리하여 교통량, 속도와 NO_x 대기오염도의 상관관계를 보여주고 있다. 바람의 영향이 없기에 표 3에서 보다 높은 교통량과의 양의 상관관계, 속도와 음의 상관관계를 보이며 속도보다는 교통량이 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 바람의 영향을 제외하였기에 풍속과의 상관관계는 낮게 분석되었다. 따라서 바람의 영향을 고려하지 않을 경우의 NO_x 대기오염도 추정의 경우는 교통량을 독립변수로 고려하고자 한다.

표 4. 풍속 1.6m/s 미만 교통자료, 풍속과 NO_x 간 상관분석

구 분	NO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO _x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
교통량	0.448	0.546	0.484
속도	-0.237	-0.241	-0.245
풍속	-0.166	0.001	-0.133

주) 교통량 - 속도 상관관계:0.684

4.2. NOx 차량배출가스 추정

NOx 차량배출가스 추정 모형은 바람의 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우로 나뉘서 구축되어진다. 바람의 영향을 고려할 경우는 교통량/풍속을 독립변수로 고려하고 바람의 영향을 고려하지 않은 경우는 교통량을 독립변수로 고려하였다.

두 가지 경우에 대해서 직선모형, 로그모형, 지수모형, 거듭제곱모형 각각에 대해서 LTS 추정의 로버스트 분석을 통하여 특이점을 제거한 후 최종모형을 구축하게 된다.

4.2.1. 바람의 영향을 고려하지 않은 경우

교통량에 대한 NO, NO2, NOx 추정의 4가지 모형식에 대한 LTS 회귀모형의 잔차분포와 안울타리값(IF)을 벗어나는 자료를 그림 2~5의 상자그림(box-and whisker plot)으로 나타내었다. IF값은 다음과 같이 계산되고 IF값을 벗어나는 자료를 특이점으로 검출하였다(허명희, 2009).

$$IF_L = H_L - 1.5_{spr}(H), IF_U = H_U - 1.5_{spr}(H) \quad (8)$$

여기서, $_{spr}(H) = H_U - H_L =$ 사분위간 범위
(잔차의 산포도)

$H_L =$ 1사분위수; $H_U =$ 3사분위수

질소산화물별 직선, 로그, 지수, 거듭제곱 형태의 로버스트 회귀 모형(LTS추정)의 IF값과 IF값을 벗어난 특이점의 개수는 다음 표 5와 같다.

표 5. LTS 추정의 잔차 분포 IF값 및 특이점 개수

모형	구분	NO	NO ₂	NO _x
직선	IF _L	-199.32	-67.29	-282.87
	IF _U	142.97	45.66	202.33
	특이점	21	2	11
로그	IF _L	-177.60	-66.44	-223.77
	IF _U	155.13	46.46	205.17
	특이점	11	2	6
지수	IF _L	-1.50	-0.67	-1.10
	IF _U	1.01	0.44	0.79
	특이점	10.00	5.00	7.00
거듭제곱	IF _L	-1.48	-0.61	-1.05
	IF _U	1.01	0.41	0.73
	특이점	11	5	8

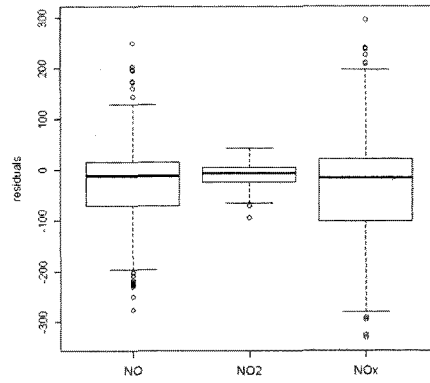


그림 2. LTS 직선모형으로 부터의 잔차 분포

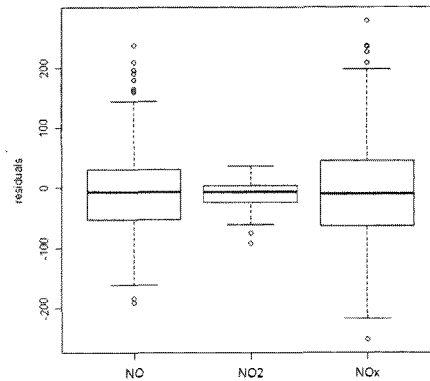


그림 3. LTS 로그모형으로 부터의 잔차 분포

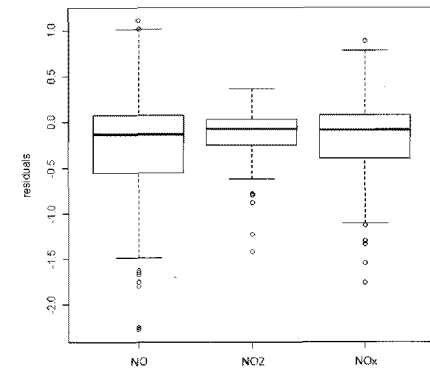


그림 4. LTS 지수모형으로 부터의 잔차 분포

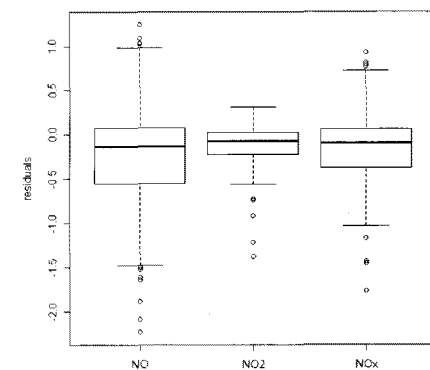


그림 5. LTS 거듭제곱모형으로 부터의 잔차 분포

검출된 특이점을 제거한 후 유의확률 $p \leq 0.05$ (95% 신뢰수준)를 기준으로 교통량에 대한 NO, NO₂, NO_x, 차

량배출가스 추정모형에 대해서 회귀분석을 수행하고 모형의 유효성과 모형 추정결과를 요약하면 다음과 같다.

표 6. 풍속 미고려시 NO_x 차량배출가스 추정 모형의 유효성

구분	모형	특이점 제거전		특이점 제거 후	
		R ²	R ²	분산분석	
				F	유의확률
NO	직선	0.20	0.45	180.98	1.2E-30
	로그	0.24	0.35	125.38	1.3E-23
	지수	0.19	0.27	87.93	5.8E-18
	거듭	0.24	0.35	126.95	7.9E-24
NO ₂	직선	0.30	0.33	119.91	5.8E-23
	로그	0.35	0.38	150.91	2.5E-27
	지수	0.26	0.33	116.95	1.8E-22
	거듭	0.31	0.38	145.99	1.4E-26
NO _x	직선	0.23	0.36	131.77	1.7E-24
	로그	0.27	0.35	128.61	3.8E-24
	지수	0.23	0.28	94.47	5.0E-19
	거듭	0.28	0.39	149.50	5.3E-27

각 모형의 분산분석 결과 F값의 유의확률이 모두 $p \leq 0.05$ 로 회귀식에 의미가 있다고 볼 수 있다. 하지만 NO₂의 로그식은 R² 값이 가장 높음에도 불구하고 표 7에서 b₀의 추정값이 $p(0.10) > 0.05$ 로 모형의 회귀계수가 통계적으로 유의하다고 볼 수 없다는 결론이 나왔다.

표 7. 풍속 미고려시 모형의 계수 추정 결과

구분	모형	b ₀ 계수 추정			b ₁ 계수 추정		
		계수	t	p	계수	t	p
NO	직선	73.42	10.37	7.4E-21	0.06	13.45	1.2E-30
	로그	-227.05	-6.71	1.5E-10	54.00	11.20	1.3E-23
	지수	87.69	80.73	6.9E-174	0.00	9.38	5.8E-18
	거듭	9.06	9.13	3.1E-17	0.39	11.27	7.9E-24
NO ₂	직선	82.41	37.35	6.8E-103	0.01	10.95	5.8E-23
	로그	-16.05	-1.65	1.0E-01	17.04	12.29	2.5E-27
	지수	83.54	211.71	9.2E-276	0.00	10.81	1.8E-22
	거듭	33.30	37.96	1.2E-103	0.16	12.08	1.4E-26
NO _x	직선	163.70	17.28	9.7E-44	0.06	11.48	1.7E-24
	로그	-236.78	-5.44	1.3E-07	70.29	11.34	3.8E-24
	지수	176.10	133.50	1.8E-226	0.00	9.72	5.0E-19
	거듭	29.24	19.60	1.5E-51	0.30	12.23	5.3E-27

바람의 영향을 고려하지 않았기에 모형의 설명력이 그리 높지는 않았지만 로버스트 추정을 통해 특이점을 제거하는 것이 모형 설명력을 높일 수 있음을 볼 수 있다. NO 추정모형은 직선식 NO₂와 NO_x는 거듭제곱식이 가장 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

4.2.2. 바람의 영향을 고려한 경우

교통량/풍속에 대한 NO, NO₂, NO_x 추정의 4가지 모형식에 대한 LTS 회귀 모형의 잔차분포와 IF값을 벗어나는 자료를 상자그림으로 나타내면 그림 6~9와 같다.

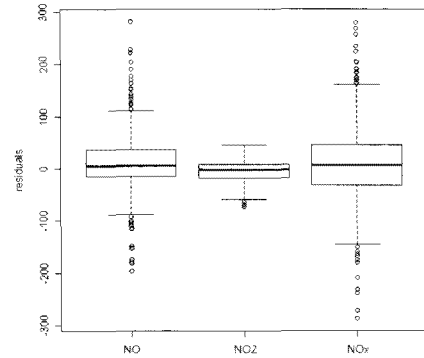


그림 6. LTS 직선모형으로 부터의 잔차 분포

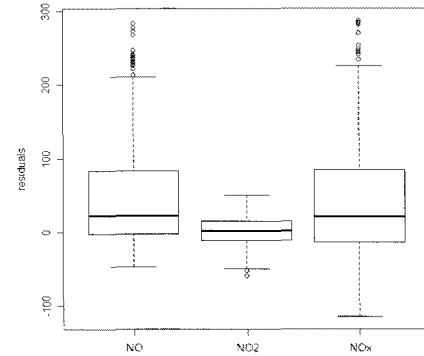


그림 7. LTS 로그모형으로 부터의 잔차 분포

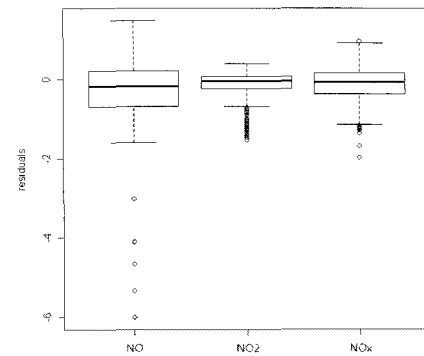


그림 8. LTS 지수모형으로 부터의 잔차 분포

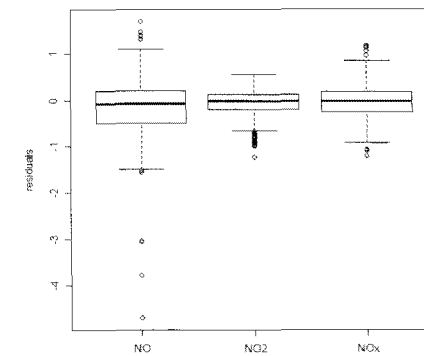


그림 9. LTS 거듭제곱모형으로 부터의 잔차 분포

각 모형의 IF값과 이를 벗어나 특이점으로 검출된 자료의 개수는 표 8과 같고 이렇게 검출된 특이점을 전체 456개 수집 자료에서 제거하였다.

표 8. LTS 추정치의 잔차 분포 IF값 및 특이점수

모형	구분	NO	NO ₂	NO _x
직선	IF _L	-89.87	-59.90	-148.48
	IF _U	110.33	48.65	161.43
	특이점	39	3	30
로그	IF _L	-130.81	-51.00	-162.07
	IF _U	210.90	55.36	233.55
	특이점	15	2	13
지수	IF _L	-2.05	-0.72	-1.14
	IF _U	1.57	0.55	0.91
	특이점	5	38	14
거듭 제곱	IF _L	-1.52	-0.66	-0.93
	IF _U	1.23	0.58	0.87
	특이점	11	25	8

상관분석에서 풍속과 대기오염도는 음의 상관관계가 존재함을 알 수 있었고 이러한 풍속의 영향을 고려하기 위하여 교통량/풍속을 독립변수로 고려하였다. 차량배출가스로 인한 NO, NO₂, NO_x 대기오염도 추정을 위한 4가지 모형의 회귀분석을 수행하였다. 유의확률 $p \leq 0.05$ (95% 신뢰수준)를 기준으로 각 모형의 유효성과 모형추정결과를 요약하면 표 9와 10과 같다.

모형의 분산분석 결과에서 F값의 유의확률이 모두 $p \leq 0.05$ 로 모든 회귀식에 의미가 있다고 볼 수 있다. 독립변수로 바람의 영향까지 고려한 교통량/풍속을 사용하였기에 모형의 설명력이 높아지고 풍속 미고려시와는

표 9. 풍속 고려시 NO_x 차량배출가스 추정 모형의 유효성

구분	모형	특이점 제거전		특이점 제거 후	
		R ²	R ²	분산분석	
				F	유의확률
NO	직선	0.56	0.76	1333.29	1.1E-131
	로그	0.51	0.54	505.72	4.5E-75
	지수	0.42	0.49	425.73	5.1E-67
	거듭	0.59	0.65	811.17	3.7E-102
NO ₂	직선	0.42	0.45	370.25	1.1E-60
	로그	0.55	0.56	580.95	3.8E-83
	지수	0.33	0.36	229.08	1.5E-41
	거듭	0.53	0.52	458.49	1.0E-69
NO _x	직선	0.56	0.71	1041.42	3.0E-116
	로그	0.56	0.59	623.32	2.1E-86
	지수	0.47	0.48	403.27	3.9E-64
	거듭	0.63	0.68	925.65	7.2E-111

다르게 NO와 NO_x 추정모형은 직선식, NO₂는 로그식이 가장 설명력이 높은 것으로 분석되었다.

표 10. 풍속 고려시 모형의 계수 추정 결과

구분	모형	b ₀ 계수 추정			b ₁ 계수 추정		
		계수	t	p	계수	t	p
NO	직선	21.05	7.31	1.4E-12	0.06	36.51	1.1E-131
	로그	-317.47	-16.82	2.4E-49	60.49	22.49	4.5E-75
	지수	41.14	84.73	2.6E-278	0.00	20.63	5.1E-67
	거듭	0.39	-4.99	8.7E-07	0.76	28.48	3.7E-102
NO ₂	직선	64.12	39.03	1.1E-146	0.02	19.24	1.1E-60
	로그	-81.21	-11.42	1.1E-26	24.33	24.10	3.8E-83
	지수	73.33	241.99	0.0E+00	0.00	15.14	1.5E-41
	거듭	12.95	28.44	9.3E-101	0.27	21.41	1.0E-69
NO _x	직선	83.95	19.63	1.6E-61	0.07	32.27	3.0E-116
	로그	-402.07	-16.75	4.2E-49	85.25	24.97	2.1E-86
	지수	108.75	151.88	0.0E+00	0.00	20.08	3.9E-64
	거듭	3.33	9.24	1.1E-18	0.56	30.43	7.2E-111

NO와 NO₂를 합한 NO_x 추정모형의 설명력은 NO 추정모형 보다는 높고 NO₂ 추정모형보다는 낮게 나타났다. NO₂의 경우는 교통량/풍속에 의해서 설명력이 가장 높은 반면 NO의 경우는 이보다 설명력이 낮기 때문에 두 물질을 합한 NO_x는 중간정도의 설명력을 갖게 되기 때문으로 보인다.

5. 결론

본 연구는 총량단위와 이상적인 실험환경이 아닌 실제 일반국도(국도 3호선)를 분석 대상으로 실시간으로 수집된 교통자료와 NO_x 대기오염 측정자료를 이용하여 실험환경이 아닌 실제 현장에서의 둘 사이의 관계를 규명하고 이를 이용하여 실제 현장에서 적용가능하고 대기오염도를 모니터링을 할 수 있는 일반국도의 차량배출가스로 인한 NO_x 대기오염 추정 모형을 개발하고자 하였다.

NO_x의 대기오염도는 교통량, 속도의 교통자료 및 풍속자료와 높은 상관관계가 있음을 확인할 수 있었고 모형의 구축에 있어서 측정 장비 및 기타 변동요인으로 인한 특이점을 제거하기 위하여 로버스트 분석을 이용하였다. 풍속 1.6m/s 이하의 자료만을 이용하여 바람의 영향이 없는 교통특성만을 고려할 경우의 NO_x 대기오염 추정 모형을 구축하였고 독립변수로 교통량/풍속 변수를 고려하여 바람의 영향을 함께 고려한 모형을 구축하였다. 본 연구의 결과는 교통정책을 시행한 전후의 실제

현장에서 차량 배출가스의 대기오염도 현황 파악과 교통 정책의 환경적 효과 평가에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 대기오염 심각도가 높은 구간에 대한 정의가 가능하여 환경적 측면에서의 도로관리 및 개선에 적용될 수 있을 것이라 생각된다.

향후 차량배출가스 이외의 오염원을 제거하여 보다 명확한 교통특성과 대기오염특성과의 관계를 규명하기 위해서는 수도권 외곽지역등의 좀 더 다양한 도로 구간에서의 연구가 수행될 필요가 있겠고 장기간의 자료를 축적하여 기상조건, 차종에 따른 영향 등의 추가적인 분석 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

참고 문헌

- 김동영(1998), "시간 및 격자단위 대기오염물질 배출량: 수도권 광화학스모그 선구물질을 중심으로", 박사학위논문, 서울대학교.
- 박성규, 김신도, 김종호(2001), "자동차 대기오염물질 산정 방법론 설정에 관한 비교 연구 (강남구의 실시간 교통량 자료를 이용하여)", *대한교통학회지*, 대한교통학회, 제19권, 제4호, pp.35-47.
- 박정수(2010), "관측 교통량과 대기오염간의 관계 분석", 석사학위논문, 서울시립대학교.
- 유지열, 동종인, 윤근덕, 공부주, 채경순, 최재성(1997), "통행 예측기법을 이용한 이동오염원의 대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구", *대기환경학회 학술대회 논문집*, 대기환경학회, 제1권, pp.65-66.
- 이영인, 조혜진, 박준환(2004) "차량의 개별주행 행태를 고려한 자동차 배출가스 산정 방법론 연구", *서울도시연구*, 서울시정개발연구원, 제5권 제4호, pp.43-59.
- 장영기, 김동영, 조규택(1995), *면 및 이동오염원 대기오염배출량 산정 지침에 관한 연구*, 환경부.
- 조규택(2002), "자동차 대기오염물질 배출량의 공간해상도 개선을 위한 *Nested Top Down Approach* 개발", 박사학위논문, 서울대학교.
- 홍창의, 황상호, 안호혁, 김윤지(1996) "교통량에 따른 배기가스량 산정에 관한 연구(교차로를 중심으로)", *대한교통학회 제29회 학술발표논문집*, 대한교통학회, pp.29-58.
- 허명희(2009), *R을 활용한 탐색적 자료 분석*, 자유아카데미.
- Barth, M. et. al.(1996), "Modal Emissions Modeling: A Physical Approach", *Transportation Research Record* 648, pp.74-76.
- California Air Resource Board(1996), *Methodology for Estimating Emissions from On-Road Motor Vehicles*.
- Environmental Protection Agency(1996), *Emissions Estimation Techniques Report*.
- EU CORINAIR(1999), *Emission Inventory Guidebook*.
- Jin young Park et. al.(2001), "Microscopic Model of Air Pollutant Concentrations(Comparison of Simulated Results with measured and Macroscopic Estimates)", *Transportation Research Record* 1750, Paper No. 01-3099.
- N. Jenkins et. al.(1995), "Correlation between NO and NO2 roadside concentrations, traffic volumes and local meteorology at major London route", *Transactions on Ecology and the Environment*, Vol. 6, pp.405-412.

접 수 일 : 2011. 3. 30
 심 사 일 : 2011. 3. 31
 심사완료일 : 2011. 5. 20