

■ 論 文 ■

도로이동오염원 배출량 산정을 위한  
Bottom-Up Approach 기법의 개선에 관한 연구

An Improvement of Bottom Up Approach for Estimating the Mobile Emission Level

최 기 주

(아주대학교 교통시스템공학전공  
교수)

이 규 진

(아주대학교 건설교통공학과  
박사과정)

안 성 채

(아주대학교 건설교통공학과  
박사과정)

목 차

- I. 서론
    - 1. 연구배경 및 목적
    - 2. 연구범위 및 방법
  - II. 기존문헌의 고찰
    - 1. 배출량산정 관련문헌
    - 2. 기존 연구의 한계 및 차별성
  - III. 분석기법의 정립
    - 1. 분석기법의 개요
    - 2. 분석기법의 내용
  - IV. 배출량 산정결과 및 시사점
  - V. 결론 및 향후과제
- 참고문헌

Key Words : 도로이동오염원, 배출량, 대기보전 정책지원 시스템, 상향식 기법, 총주행거리  
Road Mobile Pollution Sources, Emission Level, CAPSS, Bottom-Up Approach,  
Vehicle Kilometer Traveled

요 약

교통·환경문제로 대표되는 차량의 배기가스에 의한 대기오염은 삶의 질과 국민보건에 대한 관심뿐 아니라 범세계적인 문제로 인식되고 있다. 본 연구에서는 교통수요모형과 GIS를 이용하여 도로이동오염원에 대한 시공간적 고해상도의 배출량 산정 방식을 제시하여 정부와 지자체가 효과적으로 대기 질 개선 정책을 수립·추진할 수 있는 기반을 마련하고자 하였다. 이에 차량의 통행특성을 반영하는 Bottom-Up Approach 기법을 기반으로 총 주행거리를 실측치로 보정한 교통모형과 차량의 특성에 적합한 배출계수를 적용할 수 있는 대기모형을 이용한 개선된 기법을 제시하였다. 즉, 새로운 대안으로 교통-대기 통합패러다임에 의해 이를 연계한 도로이동오염원의 배출량 산정기법을 제시함으로써, 도로이동오염원 배출량의 신뢰도 개선이 기대되어진다.

Air pollution due to vehicle exhaust gas is considered to be a main contributor to the issues of transportation & environment. Furthermore it is raising concern over life quality and public health and is also perceived as a global issue. This research aims at providing helping hands for both central and local governments to set up and promote efficient atmospheric quality improvement policies, with the help of the travel demand forecasting model and GIS. More specifically, it tries to produce the overall emission level with time and space-based high resolution framework. This research, based on bottom-up approach reflecting vehicular traffic characteristics, suggested an improved approach to estimating emission level, by using a traffic model with a total of vehicular mileage revised by surveyed value and atmosphere model. Summing up, using the method proposed, the improvement of the reliability of the emissions inventory from the mobile pollutions sources is expected by the proposed integrated paradigm of transportation and atmosphere modeling approach as a new alternative.

## I. 서론

### 1. 연구배경 및 목적

우리는 도로교통의 발전으로 빠르고 편리한 삶을 영위하게 되었다. 그러나 그 반면으로 교통혼잡, 교통사고, 배기가스에 의한 대기오염 등 도로교통에서 유발되는 각종 사회문제와도 맞닥뜨리고 있다. 안타깝게도 우리나라는 그동안 급변하는 사회 분위기에 편승하여 안전과 환경보전보다는 소통과 성장위주의 편향된 교통정책을 수행하여 왔다.

전국 대기오염물질 배출량 중 도로이동오염원이 차지하는 비중은 12.8%~36.9%<sup>1)</sup>로 비교적 높은 수준을 차지하는 등 교통 환경문제로 대표되는 차량의 배기가스에 의한 대기오염은 삶의 질과 국민보건에 대한 관심뿐 아니라 범세계적인 문제로 인식되고 있다. 또한 최근 기후변화에 기인된 예상하기 힘든 자연재해의 발생으로 인한 피해와 더불어 1997년 국가 간 이행협약으로 체결된 교토기후협약의 본격적인 확대시행 움직임은 국내 교통정책에 있어 환경문제에 대한 적절한 대응을 요구하고 있다.

기존의 문제점을 인식하고 소홀했던 교통-대기 정책에 대한 지원 및 연구가 진행되고 있지만 오래전부터 심각성을 인식하고 많은 시행착오 속에서 효율적인 교통정책을 마련해온 교통선진국에 비하면 그 행보가 아직은 더딘 편이라 할 수 있다. 더욱이 기존의 전공중심으로 치중된 독립적인 연구는 다른 분야를 간과하게 되어 정책시행의 효과예측 및 평가를 과소 또는 과대평가하는 한계를 가지고 있다.

환경부에서는 배출량 자료의 중요성을 인식하고 2000년부터 5개년 계획으로 추진하고 있으며, 이러한 일환으로 대기보전정책지원시스템(이하 CAPSS: Clean Air Policy Support System)을 개발하여 학계 및 연구기관에서 배출량분석을 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 배출량산정시스템을 구축하고 있다. CAPSS에서는 자동차의 등록대수 및 일평균 주행거리를 통해 계산되는 연간 총주행거리와 평균통행속도로 도출되는 배출계수를 곱하여 총배출량을 산정한 후 적절한 대체지표를 이용하여 배출량을 각 지역에 할당하는 Top-Down Approach

(이하 TDA) 방식을 적용하고 있다.

그러나 현행 사용되고 있는 CAPSS의 이동오염원에 대한 배출량 산정방식은 평균통행속도, 평균주행거리와 같은 단순화된 평균개념의 적용으로 차량의 통행특성을 제대로 고려하지 못함에 따라 총배출량에 대한 충분한 신뢰를 부여하지 못하고 있다. 또한 현재 시행중인 지자체별 자동차 저공해 사업이나 향후 환경지역(친환경 교통수요관리 정책 중 하나로 영국의 Low Emission Zone과 유사개념)과 같은 대기 질 개선정책의 효율적인 계획 및 운영상 효과에 대한 정확한 분석에 있어서 고해상도<sup>2)</sup> 배출량 산정의 필요성이 대두되고 있음에도 불구하고 배출량의 지역별 배분시 대체지표를 적용하고 있기 때문에 시공간적 고해상도 배출량 산정에 한계성을 드러내고 있다.

이와 같이 도로이동오염원의 배출량 산정에 있어서 TDA 기법이 가지는 한계를 극복하고자 Bottom-Up Approach(이하 BUA) 기법에 대한 연구가 하나의 대안으로 제시되었다. 하지만 기존 BUA 기법 연구에서는 교통모형에 의해 추정된 총 주행거리를 배출량 산정에 그대로 적용하고 차종과 연식과 같은 차량 특성에 적합한 배출계수를 적용하지 못하였기에 배출량 산정기법의 보완이 필요하다고 검토되고 있다.

따라서 본 연구에서는 차량의 통행특성을 반영하는 BUA 기법을 기반으로 총 주행거리를 실측치로 보정한 교통모형과 차량의 특성에 적합한 배출계수를 적용할 수 있는 대기모형을 이용하여 개선된 기법을 제시하고자 하였다. 즉, 시공간적 고해상도의 배출량을 산정하기 위한 새로운 대안으로 교통-대기 통합패러다임에 의해 이를 연계한 도로이동오염원의 배출량 산정기법을 제시하여 도로이동오염원 배출량의 신뢰도를 개선시키고자 하였다.

### 2. 연구범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 수도권으로 설정하고 시간적 범위는 2006년으로 설정하였다. 교통분석 툴로는 Trans-CAD를 이용하였으며 구득할 수 있는 교통자료의 한계를 고려하여 거시적 교통모형을 적용하였다. 도로이동오염원의 배출물질은 최근 피해에 대한 관심이 깊어진 질소산화물(NOx)과 미세먼지(PM10), 휘발성 유

1) 국립환경과학원 내부자료(2006) - NOx: 35.3%(전체 배출량: 1,274천톤, 도로이동오염원 배출량: 450천톤), PM10: 36.9%(전체 배출량: 64천톤, 도로이동오염원 배출량: 23천톤), VOC: 12.8%(전체 배출량: 794천톤, 도로이동오염원 배출량: 101천톤)

2) 세분화된 수준으로 인해 분석의 설명도가 높은 상태

기화합물(VOC)로 한정하였으며, 자세한 연구의 방법은 다음과 같다.

첫째, 현행 배출량 산정 관련연구를 고찰함과 동시에 기존 연구와의 차별성을 제시한다.

둘째, 본 연구에서의 분석기법을 정립하며, 정립된 분석기법을 기반으로 도로이동오염원 배출량을 산정한다. 이는 교통분석모형과 격자분석모형을 통한 지역별 속도별 VKT 산정, 다양한 자료를 활용한 VKT의 보정 및 세분화, 대기모형을 통한 세부배출량 산정의 단계로 구성된다.

셋째, 개선된 BUA기법에 의해 산정된 수도권 도로이동오염원 배출량을 통해 대기 질 개선을 위한 정책적 시사점을 도출하며, CAPSS에 의해 분석된 배출량과 비교 분석한다.

## II. 기존문헌의 고찰

### 1. 배출량산정 관련문헌

도로이동오염원 배출량산정 연구는 크게 TDA 기법과 BUA 기법으로 분류할 수 있으며, BUA 기법의 경우 교통수요예측모형에 의한 방법과 실시간 실측 교통자료를 이용하는 방법으로 구분된다.

#### 1) Top-Down Approach (TDA)

TDA 기법은 평균주행거리와 통행속도 등을 현실적으로 사용할 수 있는 평균화된 개념을 적용하여 전체적인 배출량을 추정한 다음 지역현황에 따라 배분하는 방법으로 현재 환경부에서는 이 방법을 통해 도로이동오염원 배출량을 산정하여 발표하고 있다.

조강래 등(1993)은 서울시내 평균속도에 해당하는 배출계수를 추정하고 이를 자동차등록대수 및 일일주행거리를 곱하여 전체 자동차의 오염물질 배출량을 산정하였다.

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

김운수 등(1999)은 교통·환경부문의 통합연계 분석에 의해 서울시 차종별 배출량을 산정하였으며, 환경주

행세 부과에 따른 대기환경 개선효과를 분석하였다.

조규탁(2002)은 TDA에 기초하여 지역별 통행량과 통행속도를 평균화하여 자동차 배출량의 공간해상도 개선방안을 제시하였다.

CAPSS는 환경부에서 배출량 분석을 위한 기초자료로 활용될 수 있도록 국내 실정에 맞게 개발된 대기보전정책지원시스템이다. 자동차등록대수와 일평균주행거리를 기본데이터로 활용하여 도로이동오염원에 의한 배출량을 산정하고 있다.

미국의 경우 차량평균속도와 차량 누적주행거리를 기반으로 지정된 실험조건에서 얻어진 기준 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하며, 유럽의 경우 연간시동 배출에 대해 속도를 고려한 배출계수를 작성 후 다양한 인자에 대해 보정하는 방식을 취한다.

#### 2) 거시적 Bottom-Up Approach (BUA)

거시적 BUA 기법은 교통수요예측모형을 통해 각 도로구간의 교통량을 추정하고 도로의 연장과 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하는 방법이다.

조억수(1993)는 우리나라에서 처음으로 교통수요예측모형을 통해 분석구간의 통행량을 추정하고 하루 중 차종별 통행량 변화를 파악하여 각 차종별 시간대별 통행량을 산출하였으며 대기확산모형을 이용하여 배출량을 추정하였다.

Peter R. Stopher 등(1996)은 하루를 오전침두, 정오, 오후침두, 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.

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

#### 3) 미시적 Bottom-Up Approach (BUA)

미시적 BUA 기법은 도로에 설치된 검지기와 미시적 시뮬레이션을 통한 미시적 교통량 및 운영현황 자료를 활용하여 도로상황 및 개별차량의 주행행태에 따른 배출

량을 산정하는 방법이다.

박성규 등(2001)은 교차로 검지기에서 수집되는 실시간 교통정보 중 시간대별 통과 교통량과 통과속도자료를 이용하여 시간대별 평균주행속도에 따른 배출계수와 각 도로의 연장을 고려하여 각 도로별·시간대별로 자동차 오염물질 중 일산화탄소(CO)의 배출량을 산정하였다.

Hesham Rakha 등(2001)은 연료소비와 배출량 가속도와 가속도에 민감하게 반응함을 증명하였으며, ITS 상에서 연료소비의 영향에 따른 배출량을 산정하기 위한 방법론을 제시하였다.

이영인 등(2004)은 실시간으로 변화하는 도로상황 및 개별차량의 주행행태에 따른 배출량 산정을 위한 미시적 접근 방식을 택하여 차량의 속도와 가속도에 따른 배출량 산정 모형을 제안하였다.

박준환 등(2007)은 VISSIM을 이용하여 교통운영 측면의 변화에 따른 차량 배출량을 산정하였다.

## 2. 기존 연구의 한계 및 차별성

TDA 기법을 적용한 연구를 살펴보면, 차량의 연료별·연식별 배출계수를 세부적으로 적용하고 있다는 점에서 배출량의 신뢰도를 높이고 있다. 하지만, 통행속도에 따른 배출계수의 차이가 크게 존재함에도 불구하고 평균화된 통행속도의 배출계수를 일괄적으로 적용하고 있는 문제가 있다. 또한 배출량을 해당지역의 자동차등록대수, 혹은 '차선×길이' 중심으로 배분함에 따라 실제 차량의 통행패턴을 반영하지 못하여 공간적 해상도의 한계가 있으며, 첨두·비첨두의 차별된 통행특성을 반영하지 못하여 시간적 해상도에도 한계가 있다.

거시적 BUA 기법을 적용한 연구를 살펴보면, 해당 연구들은 각 도로구간의 교통량과 주행속도를 고려하여 배출량을 산정함으로써 대기오염물질 배출량의 공간적 분포를 파악할 수 있기 때문에 시공간적 해상도가 높은 장점이 있다. 그러나 교통수요예측모형에 의해 추정된 도로구간의 교통량과 통행속도가 현실과 차이가 발생할 수 있음에도 불구하고 실측 보정을 하지 않았다는 점에서 분석결과에 대한 신뢰성의 한계가 있다. 해당 연구사례로 임정화(2002)는 교통수요예측모형에 의해 산정된 수도권 VKT가 환경부 자료의 약 57%이며, 추정된 배출량도 환경부 자료의 약 68%임을 밝힌바 있다. 또한 배출계수의 적용에 있어서도 차량의 지역별·차종별·연료별·연식별 배출계수가 상이함에도 불구하고 이를 세

부적으로 고려하지 못한 한계가 있다.

미시적 BUA 기법을 적용한 연구의 경우 개별차량의 가속속 등 미시적인 차량의 움직임까지 고려할 수 있다는 점에서 큰 의미가 있으나, 현재 ITS검지기의 설치수준과 미시적 시뮬레이션에서 요구되어지는 방대한 자료의 양을 고려할 때 현실 적용 측면에서 다소 한계가 존재한다. 또한, 국가적인 차원에서 교통-환경정책을 수립하기 위해서는 CAPSS에서 제공하는 수준의 종합적인 배출량이 제공되어야 하는바, 미시적 BUA 기법에 의한 배출량을 집합화하는 과정에서 추정오차가 누적되는 문제가 발생할 우려가 있다.

본 연구에서는 국가정책 차원에서 요구되어지는 이동오염원 배출량을 산정하기 위해 거시적 BUA 기법을 기반으로 교통모형과 대기모형을 융합함과 동시에 BUA 기법에서 발생하는 예측오차를 보정하여 도로이동오염원 배출량의 신뢰도를 향상시키도록 하였다. 기존 연구와의 큰 차이점은 다음과 같이 세 가지로 요약된다.

첫째, 일반적으로 TDA 기법에서는 대기모형 중심으로, BUA 기법에서는 교통모형 중심으로 적용되었으나, 본 연구에서는 두 모형의 이점을 최대한 융합한 기법을 정립하였다.

둘째, 교통모형에 의해 추정된 VKT의 추정오차를 줄일 수 있는 기법을 적용하였다. 즉, 시공간적 해상도가 높은 배출량 산정을 위해 거시적 BUA 기법을 적용하되, 지역별로 실측된 VKT를 활용하여 BUA 기법에 의해 추정된 VKT를 현실적으로 보정하였다.

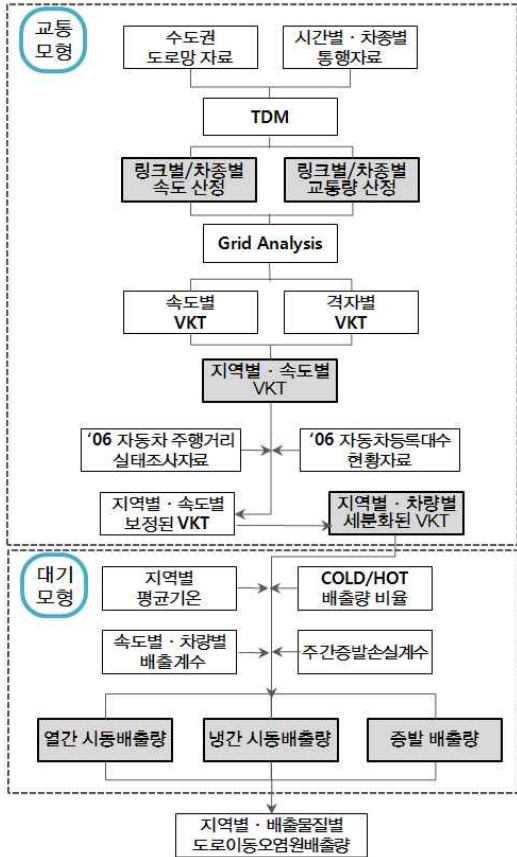
셋째, 지역별로 산정된 VKT를 차종별·연료별·연식별 VKT로 재분류한 후, 각 차량에 적합한 배출계수를 세부적으로 적용하여 도로이동오염원의 배출량에 대한 신뢰성을 향상시키도록 하였다.

## III. 분석기법의 정립

### 1. 분석기법의 개요

현실적이고 정확한 도로이동오염원 배출량의 산정에는 배출량의 주체가 되는 차량의 통행특성이 반영된 VKT의 산정과 세부차량별 배출계수의 적용이 중요한 쟁점이 된다.

본 연구에서는 차량의 통행특성이 반영된 VKT를 산정하기 위해 교통수요예측모형을 적용하여 지역별·속도별 VKT를 산정하였으며, 실측된 VKT를 활용하여 모형



<그림 1> 배출량 분석절차

에 의해 산정된 VKT를 보정하였다. 즉, 차량의 통행특성을 최대한 반영하면서 모형에 의한 예측오차를 보정한 VKT를 산정하였다. 그리고 배출계수를 세부차량별로 적용하기 위해 지역별·속도별로 산출된 VKT를 “2006년 자동차 주행거리 실태조사” 자료와 “2006년 국토해양부 자동차등록대수현황” 자료를 이용하여 지역별·속도별·차종별·연료별·연식별로 VKT를 재분류하였다. 이와 같이 세분류된 차량별 VKT에 대해 해당 차량에 적합한 배출계수를 적용하여 열간시동 배출량과 냉간시동 배출량, 증발 배출량을 산정한 후 이를 합한 도로이동오염원의 총배출량을 산정하였다. 본 연구에서의 배출량 분석절차는 <그림 1>과 같다.

2. 분석기법의 내용

1) 지역별·속도별 VKT 산정

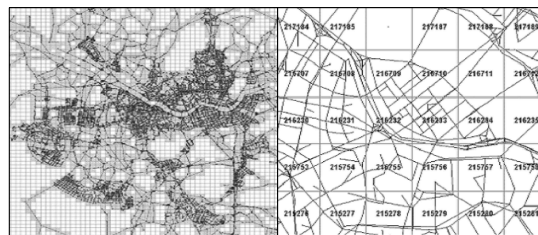
수도권의 도로별·차종별·시간별 통행속도와 VKT

를 산정하기 위해 시정개발연구원에서 작성한 2006년 수도권 교통DB자료를 활용하였다. 수도권 교통DB자료는 링크 23,009개, 노드 17,200개로 구성되어 있으며, 링크에는 도로 유형, 용량, 길이 등의 자료가 포함되어 있고 네트워크의 Centroid와 O/D자료의 기준점은 1,142개로 설정되어 있다. 수도권 네트워크 자료와 통행 자료를 현실에 맞게 가공한 후 4단계 수요예측기법을 적용하여 <그림 2>와 같이 통행배정하였으며, 분석결과를 가공하여 수도권의 도로별·차종별·시간별 통행속도와 VKT를 산정하였다.



<그림 2> 수도권 통행배정 결과

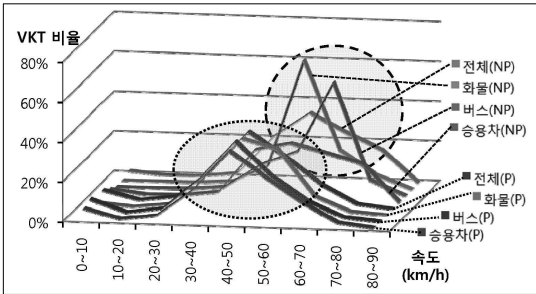
공간적 고해상도 VKT 및 배출량 산정을 위해 <그림 3>과 같이 1km×1km 단위의 격자를 이용하여 MOBILE 5의 Grid Analysis를 수행하였으며, 격자별·차종별·시간별·속도별 VKT를 산정하였다.



<그림 3> 격자(1km×1km)로 구분된 네트워크

침두시간과 비침두시간의 통행속도별 VKT 분포가 <그림 4>와 같이 다른 것으로 나타나 통행속도에 따른 배출계수의 적용에 있어서 시간적 해상도도 고려하였다.

격자별로 산출된 VKT에 대해 수도권 지역으로 집합화한 차종별·속도별 VKT를 나타낸 결과는 <표 1>과 같다.



\* P : 침두시간, NP : 비침두시간

<그림 4> 속도별 VKT 비율 (수도권)

<표 1> 차종별 · 속도별 VKT (수도권) (단위 : 대 · km)

구분 (km/h)	승용차	버스	화물차	전체
0~10	7,021,895	386,662	417,582	7,826,139
10~20	893,684	47,344	107,055	1,048,083
20~30	3,524,889	195,442	517,699	4,238,030
30~40	19,597,947	1,062,845	3,979,511	24,640,303
40~50	49,698,067	2,363,216	8,461,287	60,522,570
50~60	36,075,870	1,557,370	10,955,008	48,588,248
60~70	21,054,171	1,531,066	3,078,446	25,663,683
70~80	8,123,225	222,670	717,801	9,063,696
80~90	3,942	585	396	10,393
합계	145,993,690	7,367,200	28,234,785	181,595,675

수도권을 대상으로 교통모형에 의해 산정된 차종별 VKT를 살펴보면, 승용차 145,993,690(대 · km), 버스 7,367,200(대 · km), 화물 28,234,785(대 · km)로 분석되어 <표 2>와 같이 2006년 자동차 주행거리 실

<표 2> VKT 비교 (주행거리실태조사와 교통모형) (단위 : 천대 · km)

구분	서울시	인천시	경기도	수도권
실태 조사	승용차	121,891	31,798	141,891
	버스	11,866	3,871	17,160
	화물차	24,459	9,790	41,883
	전체	158,216	45,460	211,873
교통 모형	승용차	45,454	10,965	89,574
	버스	2,082	435	4,850
	화물차	5,170	2,197	20,867
	전체	52,691	13,594	115,261

\*주 : 1) '실태조사' : 주행거리실태조사에 의한 VKT  
 2) '교통모형' : 교통모형에 의한 VKT

태조사에 의한 VKT와 비교할 때 차종별로 약 22~49% 수준인 것으로 추정되었다. 이는 교통모형에 의해 추정된 VKT에 대한 현실적 보정의 필요성을 시사한다.

2) VKT의 보정 및 세분화

앞서 산정된 차종별 VKT는 교통모형에 의해 추정된 값으로 승용차의 경우 zone 내부 통행량 중 이면도로의 통행이 반영되지 않았으며, 버스와 화물의 경우 교통모형에서는 최소통행시간 기반으로 통행 배정되기 때문에 과소 추정될 여지가 있다. 이에 식(1)과 같이 교통모형에 의해 산정된 속도별 VKT 패턴을 활용하되, 해당 속도별 VKT에 대해 “교통모형에 의한 지역별 · 차종별 VKT” 대비 “2006년 자동차 주행거리실태조사에 의한 지역별 · 차종별 VKT”를 기준으로 보정하였다. 가령, 교통모형에 의해 분석된 서울시 승용차 주행속도 0~10km/h의 VKT(0, 서울시, 승용차)가 2,186,235 대 · km일 경우, 해당 지역과 차종에 해당하는  $\frac{WIMS\ VKT}{TDM\ VKT}$  (서울시, 승용차)는 <표 2>를 참조하여 2.68(=121,891/45,454)이기 때문에 보정 VKT(서울시, 승용차)는 5,862,684 대 · km로 산정된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{보정 } VKT(\alpha, \beta, \gamma) \quad (1) \\
 & = TDM\ VKT(\alpha, \beta, \gamma) \times \frac{WIMS\ VKT(\beta, \gamma)}{TDM\ VKT(\beta, \gamma)}
 \end{aligned}$$

여기서, WIMS VKT : 자동차주행거리실태조사의 VKT  
 TDM VKT : 교통모형에 의한 VKT  
 $\alpha$  : 속도,  $\beta$  : 지역,  $\gamma$  : 차종

대기모형의 배출계수는 지역의 온도, 차량의 운행속도, 세부차종, 사용연료, 연식에 따라 다르게 산출되는바, 각 분류에 적합한 배출계수의 적용이 필요하다. 이에 따라 앞서 산출된 지역별 · 속도별 · 차종별 VKT에 대해

<표 3> 세부 배출계수 적용을 위한 VKT의 재분류

구분	교통모형의 보정된 VKT의 분류	대기모형의 적용을 위한 VKT의 재분류
지역	서울, 인천, 경기	서울, 인천, 경기 (좌동)
속도	10km/h 단위	10km/h 단위 (좌동)
차종	승용차 버스 화물차	승용차(경차, 소형, 중형, 대형), 버스(경형, 소형, 중형, 대형, 시내, 시외, 전차, 고속, 기타) 화물(소형, 중형, 대형, 특수차)
연료	미분류	휘발유, 경유, LPG
연식	미분류	매년

<표 3>과 같이 지역별·속도별·세부차종별 연료별 연식별 VKT로 세분화하였다.

본 연구에서는 VKT의 재분류를 위해 교통안전공단 자동차검사통합시스템(VIMS)과 국토해양부의 지역별·세부차종별·연료별·연식별 평균주행거리와 자동차등록대수 자료를 활용하였다.

3) 배출계수 및 세부배출량 산정

도로이동오염원에 의한 배출은 열간시동 배출, 냉간시동 배출, 증발 배출, 도로비산먼지, 타이어마모로 구분되어진다. 도로비산먼지와 타이어마모의 경우 비산먼지를 배출하게 되는데, 도로이동오염원에 의한 비산먼지의 경우 타 오염원에 비해 극히 적은 양으로 본 연구에서는 제외하였다. 즉, 본 연구에서는 열간시동 배출량, 냉간시동 배출량, 증발 배출량에 의한 NOx, PM, VOC를 산정하였다.

열간시동 배출량(Hot-start Emission)은 자동차 한대에서 배출되는 일일 오염물질 배출량(g/day-veh)으로 식(2)와 같이 차종별 총 주행거리(VKT)에 차량별 열간시동 배출계수(g/km)를 곱하여 산출한다.

$$E_{hot} = m \times \theta \times 365\text{일/년} \times 10^{-6} \quad (2)$$

여기서,  $E_{hot}$  : 열간시동 배출량(톤/년)  
 $m$  : 차종별 일일 총 주행거리(km)  
 $\theta$  : 차종별·연료별·속도별·연식별 열간시동 배출계수(g/km)

이때 열간시동 배출계수는 1999년, 2000년에 운행 중인 자동차를 표본 추출하여 측정한 배출가스 자료를 이용하며, 1997년 이전 연식의 배출계수를 기준으로 1998년 이후의 연식에 대해서는 <표 4>의 차종별 보증기간을 바탕으로 <표 5>의 배출가스 보증기간 초과정도와 차종에 따른 열화계수 보정계수를 적용하여 열간시동 배출계수를 추정하였다. 그리고 2003년 이후 연식에 대해서는 열화비용 자료가 없기 때문에 식(3)과 같이 제작차 배출허용기준을 고려하여 열화비용 배출계수를 보정하였다.

$$\text{당해 배출계수} = 2003\text{년 식 차량의 배출계수} \quad (3)$$

$$\times \left( \frac{\text{당해 배출허용}}{2003\text{년 배출허용 기준}} \right)$$

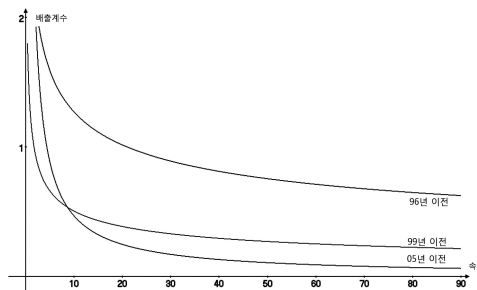
<표 4> 차종별 보증기간

차종	배출가스보증기간	
	휘발유 및 LPG 승용차와 소형RV	2000년 이전
	2001년 이후	10년
중형RV, 중소형 승합차	2005년 이전	4년
	2006년 이후 (휘발유 및 LPG)	8년
경유승용차	5년	
특수차(소방차, 트랙터 등)	5년	
경형 및 소형화물차	4년	
중대형화물차	3년	
특수차(청소차, 구난트럭, 트레일러)	3년	
대형승합차	3년	
택시	2년	

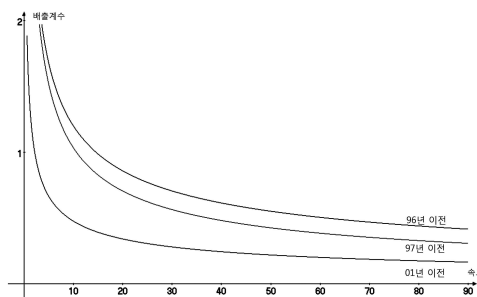
<표 5> 차종별·보증기간별 열화계수

차종	배출가스 보증기간		
	이내에 운행	2배 이내에서 운행	2배 초과하여 운행
휘발유 및 LPG 승용차	1.0	1.3	2.0
경유자동차	1.0	1.2 (NOx는 1.1)	1.5 (NOx는 1.2)

이와 같이 추정된 열간시동 배출계수는 주행속도, 차종, 사용연료, 연식에 따라 다르게 산정된다. 예를 들어, 휘발유 경차의 연식과 속도에 따른 배출계수는 <그림 5>



<그림 5> 화물차(경유, 중형)의 PM 배출계수



<그림 6> 승용차(휘발유, 경형)의 NOx 배출계수

처럼, 화물차의 연식과 속도에 따른 배출계수는 <그림 6>처럼 나타나고 있다.

냉간시동 배출량(Cold-Start Emission)은 엔진이 예열되지 않은 상태에서 불완전 연소에 의해 발생하는 오염물질과 배기온도가 촉매의 활성화 온도 이하일 때 촉매의 정화효율의 저하로 인하여 엔진에서 배출되는 발생오염물질로 식(4)와 같이 총 주행거리에 열간시동 배출량, 냉간시동 배출량 환산계수와 식(5)에 의해 유도된 냉간시동엔진 주행거리 분율을 곱하여 산출한다.

$$E_{cold} = m \times E_{hot} \times \beta \times (E_{cold}/E_{hot}-1) \quad (4)$$

여기서,  $E_{cold}$  : 냉간시동 배출량(톤/년)  
 $m$  : 총 주행거리(km)  
 $E_{hot}$  : 열간시동 배출량  
 $E_{cold}/E_{hot}$  : Cold/Hot 배출량 비율  
 $\beta$  : 냉간시동엔진 또는 촉매 Light-off이하 온도상태에서의 주행거리 분율

$$\beta = 0.647 - 0.025 \times L_{trip} - (0.00974 - 0.000385 \times L_{trip}) \times T_a \quad (5)$$

여기서,  $L_{trip}$  : 1회 평균주행거리  
 $T_a$  : 평균기온  
 (서울 10.2°C, 인천 9.6°C, 경기 9.3°C)

증발 배출량은 휘발유 차량의 운행에 따른 휘발유 증발에 의한 VOC배출량을 의미하며, 주차시 태양열에 의하여 연료탱크나 엔진의 가열로 연료가 증발되어 배출되는 주간 증발손실(Diurnal loss)과 주행 중 가열된 엔진에 의하여 연료탱크 및 엔진에서 배출되는 주행손실(Running loss)로 구분되어진다. 이에 대한 산정식은 식(6)과 같이 정리되며, 증발배출량 관련계수인 p와 w는 <표 6>과 같다.

$$E_{eva} = Diurnal\ loss + Running\ loss$$

$$Diurnal\ loss = 0.2 \times 9.1 \times \exp[0.0158(RVP - 61.2) + 0.0574 \times (t_{a,min} - 22.5) + 0.0614 \times (t_{a,rise} - 11.7)]$$

$$Running\ loss = m \times [p \times e^{r.hot} + w \times e^{r.warm}] \quad (6)$$

여기서,  $E_{eva}$  : 증발 배출량(톤/년)

RVP : 56.2(2006년도 회사별 휘발유 증기압의 평균)

$t_{a,min}$  : '06년도 최저온도 평균  
 (서울 9.3°C, 인천 9.4°C, 경기 8.7°C)

$t_{a,rise}$  : '06년도 평균 온도차  
 (서울 7.9°C, 인천 7.2°C, 경기 9.3°C)

$m$  : 총 주행거리(km)

$p$  : 가열엔진 상태로 끝나는 trip의 비율

$w$  : 미가열엔진 상태로 끝나는 trip의 비율

$$e^{r.hot} = 0.1 \times [0.136 \times \exp(-5.967 + 0.04259RVP + 0.1773t_a)]$$

$$e^{r.warm} = 0.1 \times [0.1 \times \exp(-5.967 + 0.04259RVP + 0.1773t_a)]$$

<표 6> 증발배출량 관련계수

구분	w	p
서울	0.237	0.763
인천	0.237	0.763
경기	0.238	0.762

주 : p(가열엔진 상태로 끝나는 trip의 비율)  
 w(미가열엔진 상태로 끝나는 trip의 비율)

#### IV. 배출량 산정결과 및 시사점

본 연구에서 제시한 방법으로 도로이동오염원 배출량을 산정한 결과는 <표 7>과 같으며, 절대배출량은 NOx,

<표 7> 배출량 산정결과 (단위 : 톤/년)

구분	NOx	PM10	VOC	
서울시	승용차	18,031	485	13,154
	버스	10,817	643	2,156
	화물차	17,699	1,146	2,058
	전체	46,546	2,274	17,368
인천시	승용차	3,886	161	2,159
	버스	3,329	135	759
	화물차	8,746	608	1,089
	전체	15,960	904	4,007
경기도	승용차	14,190	678	9,514
	버스	17,206	1,008	2,159
	화물차	42,360	2,143	3,894
	전체	73,756	3,829	15,567
수도권	승용차	36,107	1,324	24,827
	버스	31,351	1,786	5,074
	화물차	68,804	3,897	7,041
	전체	136,262	7,007	36,942



VOC, PM10의 순서로 많은 것으로 분석되었다. 가장 배출량이 많은 NOx는 화물차에 의한 발생비중이 높은 것으로 분석되었다. 이는 수도권 대기 질 개선을 위해서는 화물차의 집중적 관리가 필요함을 시사하며 다른 차종에 비해 배출량이 비교적 적은 버스의 경우 약 32%가 CNG와 같은 천연연료를 사용하기 때문인 것으로 검토된다. 따라서 대기 질 개선을 위한 교통수요·운영관리 외에 하이브리드 승용차의 상용화, 경유 화물차의 LPG 개조와 같은 정책추진의 필요성을 시사한다.

서울시의 경우, 타 지역에 비해 승용차에 의한 배출량이 많은 것으로 분석되었기에 승용차에 의한 배출량 감소정책이 가장 시급한 것으로 사료되며, 화물기지가 많은 경기도의 경우 타 지역에 비해 화물차에 의한 배출량이 많은 것으로 분석되었기에 화물차에 대한 배출량 감소정책이 필요할 것으로 판단된다.

현재 대기 질 개선을 위한 정책이 대부분 서울시를 중심으로 추진되고 있지만, 서울시에 비해 경기도에서 발생하는 배출량이 약 두 배 정도 많은 것으로 분석되었기에 경기도 지역에 대한 대기 질 개선정책의 확대추진이 필요할 것으로 검토된다.

<표 8~10>과 같이 본 연구에서 제시한 기법에 의해 산정한 배출량은 CAPSS에 의한 배출량에 비해 약 12~18% 적은 것으로 분석되었다. 이와 같은 차이는 TDA에 기반한 CAPSS의 배출량 산정기법과 본 연구에서 제시한 개선 BUA기법의 근본적인 차이 때문이며, 그 원인의 하나로 차량 주행속도에 대응하는 배출계수의 적

용방식이 상이함을 들 수 있다. 즉, CAPSS에서는 수도권 평균주행속도인 약 20km/h에 대응하는 배출계수를 일괄적으로 적용하였지만, 본 연구에서는 교통모형에 의한 주행속도별 배출계수를 세부적으로 적용한 차이점이 있다. 특히, <그림 4>에서와 같이 수도권의 평균주행속도는 전반적으로 20km/h보다 높은 것으로 분석되었는데, 이는 배출량 산정의 감소요인으로 작용된다. 가령, 1997년~1999년식 중대형 승용차에 대한 주행속도 20km/h의 배출계수는 0.507g/km인 반면, 주행속도 30km/h에 해당하는 배출계수는 0.367g/km이기 때문

<표 9> CAPSS 결과와 비교(PM10) (단위 : 톤/년)

구분	본 연구	CAPSS	차이	
서울시	승용차	485	535	▽ 9%
	버스	643	688	▽ 7%
	화물차	1,146	1,407	▽ 19%
	전체	2,274	2,631	▽ 14%
인천시	승용차	161	174	▽ 7%
	버스	135	167	▽ 19%
	화물차	608	759	▽ 20%
	전체	904	1,101	▽ 18%
경기도	승용차	678	800	▽ 15%
	버스	1,008	1,035	▽ 3%
	화물차	2,143	2,943	▽ 27%
	전체	3,829	4,778	▽ 20%
수도권	승용차	1,324	1,510	▽ 12%
	버스	1,786	1,890	▽ 6%
	화물차	3,897	5,110	▽ 24%
	전체	7,007	8,510	▽ 18%

<표 8> CAPSS 결과와 비교(NOx) (단위 : 톤/년)

구분	본 연구	CAPSS	차이	
서울시	승용차	18,031	19,338	▽ 7%
	버스	10,817	11,470	▽ 6%
	화물차	17,699	23,312	▽ 24%
	전체	46,546	54,120	▽ 14%
인천시	승용차	3,886	4,308	▽ 10%
	버스	3,329	3,404	▽ 2%
	화물차	8,746	12,350	▽ 29%
	전체	15,960	20,062	▽ 20%
경기도	승용차	14,190	16,499	▽ 14%
	버스	17,206	19,476	▽ 12%
	화물차	42,360	53,859	▽ 21%
	전체	73,756	89,834	▽ 18%
수도권	승용차	36,107	40,144	▽ 10%
	버스	31,351	34,350	▽ 9%
	화물차	68,804	89,522	▽ 23%
	전체	136,262	164,016	▽ 17%

<표 10> CAPSS 결과와 비교(VOC) (단위 : 톤/년)

구분	본 연구	CAPSS	차이	
서울시	승용차	13,154	14,341	▽ 8%
	버스	2,156	2,495	▽ 14%
	화물차	2,058	2,573	▽ 20%
	전체	17,368	19,408	▽ 11%
인천시	승용차	2,159	2,705	▽ 20%
	버스	759	821	▽ 8%
	화물차	1,089	1,429	▽ 24%
	전체	4,007	4,956	▽ 19%
경기도	승용차	9,514	9,923	▽ 4%
	버스	2,159	2,775	▽ 22%
	화물차	3,894	4,994	▽ 22%
	전체	15,567	17,692	▽ 12%
수도권	승용차	24,827	26,968	▽ 8%
	버스	5,074	6,091	▽ 17%
	화물차	7,041	8,996	▽ 22%
	전체	36,942	42,055	▽ 12%

에 주행속도 10km/h의 증가에 따른 배출량의 감소분은 약 28%까지 나타날 수 있다. 이를 통해서도 배출량 산정시 객관적인 주행속도의 반영이 필요하다는 것을 재확인할 수 있다. 또한 차량속도에 따른 배출계수가 <그림 5, 6>에서와 같이 직선식이 아닌 곡선식을 따르기 때문에 CAPSS에서와 같이 평균주행속도에 해당하는 배출계수의 적용은 배출량 산정의 큰 오차발생요인으로 작용됨을 확인할 수 있다.

한편, 화물차의 경우는 타 차종에 비해 CAPSS에서의 배출량보다 더 적게 산정되었는데, 이는 본 연구에서 적용한 교통모형의 한계로 검토된다. 일반적인 교통모형에서는 차종별 통행속도가 동일하다는 가정 하에 차종별로 통행배분하며, 이에 따라 화물차의 통행속도가 실제보다 높게 추정될 여지가 있으며, 이는 상대적으로 낮은 배출계수의 적용을 요하기 때문에 배출량이 낮게 산출된 것으로 사료된다.

따라서 승용차의 경우 본 연구에서의 기법을 통한 배출량 산정이 세부적인 통행속도의 반영으로 인해 좀 더 현실적인 것으로 판단되지만, 화물차의 경우 교통모형에서 승용차와 통행속도가 동일하게 적용되기에 현실과 차이가 발생하는 것으로 검토되어 CAPSS에서의 배출량 분석기법과의 상호보완이 필요한 것으로 사료된다.

## V. 결론 및 향후과제

갈수록 심각해지는 환경오염과 국제사회의 친환경 정책방향에 부응하기 위한 국가 차원의 교통-대기 정책을 수립하기 위해서는 대기오염배출량의 큰 비중을 차지하고 있는 도로이동오염원 배출량에 대한 신뢰도 높은 산정이 기본적으로 가능하여야 한다. 본 연구는 교통-대기 통합패러다임의 도로이동오염원 배출량 산정 기법을 제시함으로써 도로이동오염원 배출량의 신뢰도를 향상시키도록 하였다. 특히, 본 연구는 차량의 통행특성을 반영하여 시공간적 고해상도의 배출량을 산정하기 위한 방법인 거시적 BUA 기법을 기반으로 지역별로 실측된 VKT를 활용하여 기존 BUA기법에 의해 추정된 VKT를 현실에 맞게 보정한 점과, 지역별로 산정된 VKT를 차종별·연료별·연식별 VKT로 재분류한 후, 각 차량에 적합한 배출계수를 세부적으로 적용하여 도로이동오염원의 배출량에 대한 신뢰성을 향상시킨 점에서 기존 연구와 크게 차별된다.

본 연구의 개선된 BUA 기법을 통해 수도권 도로이동

오염원 배출량을 산정한 결과, NO<sub>x</sub>는 136,262(톤/년), PM<sub>10</sub>은 7,007(톤/년), VOC는 36,942(톤/년)으로 산정되었다. 이는 기존 CAPSS에 의해 산정된 배출량과 약 12~18%의 차이가 발생하는 것이며, 이는 CAPSS의 경우 차량속도에 대한 배출계수의 적용에 있어 배출계수가 상대적으로 높은 차량속도 20km/h내외에 해당하는 배출계수를 적용한 반면, 개선된 BUA기법의 경우 교통모형에 의한 주행속도별 배출계수를 비교적 현실적으로 적용하였기 때문에 기존 CAPSS의 도로이동오염원 배출량 산정기법에 대한 문제점을 개선한 결과라 할 수 있다.

그러나 본 연구의 한계점도 분명 존재하며, 이를 해결하기 위한 향후 연구과제는 다음과 같다. 첫째, 본 연구에서는 교통모형에 의한 VKT를 보정하기 위해 교통안전공단 자료에서의 VKT를 이용하였으나, 이는 해당지역에 등록된 차량을 기준으로 산출되었기 때문에 완전한 실측 VKT라고 하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 교통모형에 의한 VKT의 보정에 대해 보다 신뢰성 있는 보정 기법 연구가 필요하다. 둘째, 통행특성을 반영하기 위해 본 연구에서는 4단계 교통수요예측기법을 적용하여 차량의 통행속도와 통행량 등을 추정하였으나, 향후 이와 같은 거시적 교통모형과 더불어 ITS의 실시간 교통자료를 활용하는 미시적 교통모형과의 융합을 통해 교통모형의 현실 반영정도를 향상시킬 수 있는 기법의 개발을 모색해 볼 수 있겠다.

더불어 본 연구에서의 배출량 산정기법은 기존 CAPSS에서의 배출량 산정기법의 한계를 모두 불식시키는 배출량 산정모형이 아님을 분명히 하고, 활용목적에 따라 배출량 산정기법이 달리 개발되고 적용될 수 있어야 하겠다.

## 참고문헌

1. 강정호·이청원(2007), “교통환경분야의 국내외 연구동향 및 시사점 (차량배출량 관련 연구를 중심으로)”, 대한교통학회지, 제25권 제6호, 대한교통학회, pp.7~18.
2. 경기개발연구원(2002), “수도권 자동차 대기오염 물질 배출량 추정 및 대기오염 저감정책방안 연구”.
3. 교통안전공단(2007), “2006자동차주행거리 실태 조사연구”.
4. 국립환경연구원(2004), “대기보전정책수립지원시스

템 구축4차년도 : 배출량 산정방법론”.

5. 김동영(1998), “시간 및 격자단위 대기오염물질 배출량 : 수도권 광화학스모그 선구물질 중심으로”, 서울대학교 박사학위논문.
6. 김운수·엄진기·황기연·장지희(1999), “교통수요관리 기법을 활용한 환경오염비용의 내부화 방안연구”, 대한교통학회지, 제17권 제4호, 대한교통학회, pp.99~110.
7. 김현명(1997), “복수수단 통행배분모형에 의한 대기오염물질의 배출량 산정에 관한 연구”, 서울대학교 석사학위 논문.
8. 박성규·김신도·이영인(2001), “자동차 대기오염물질 산정 방법론 설정에 관한 비교 연구 (강남구의 실시간 교통량 자료를 이용하여)”, 대한교통학회지, 제19권 제4호, 대한교통학회, pp.35~47.
9. 박준환·김원호·남두희·이영인(2007), “환경정의를 고려한 교통운영 전략 및 평가에 관한 연구”, 대한교통학회지, 제25권 제3호, 대한교통학회, pp.7~17.
10. 엄정화(2002), “통행배분모형을 이용한 자동차대기오염물질 배출량 추정연구”, 명지대학교 석사학위 논문.
11. 이영인·조혜진·박준환(2004), “차량의 개별주행 행태를 고려한 자동차 배출가스 산정방법론 연구”, 서울도시연구 제5권 제4호, pp.43~59.
12. 조강래·엄명도·김중훈·홍유덕·김종규·한영출(1993), “자동차에 의한 오염물질 배출계수 및 배출량 산출에 관한 연구”, 한국대기환경학회지, Vol.9.
13. 조규탁(2002), “자동차 대기오염물질 배출량의 공간해상도 개선을 위한 Nester Top Down Approach 개발”, 서울대학교 박사학위 논문.
14. 조역수(1993), “선오염원에 의한 대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구 : 서울지역을 대상으로”, 서울대학교 환경대학원 석사 논문.
15. 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.
16. Peter R. Stopher and Haoqiang Fu(1996), “Travel Demand Analysis Impacts on Estimation of Mobile Emissions”, Transportation Research Record, pp.104~113.
17. Taylor, M. A. P., and T. M. Young(1996) “Developing a Set of Fuel Consumption and Emissions Models for Use in Traffic Network Modelling”, 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, July 24~26, Lyon, France.

✉ 주 작 성 자 : 최기주  
 ✉ 교 신 저 자 : 이규진  
 ✉ 논문투고일 : 2009. 3. 18  
 ✉ 논문심사일 : 2009. 5. 15 (1차)  
                   2009. 6. 3 (2차)  
 ✉ 심사판정일 : 2009. 6. 3  
 ✉ 반론접수기한 : 2009. 12. 31  
 ✉ 3인 익명 심사필  
 ✉ 1인 abstract 교정필