대기오염 확산분석을 위한 복합모형 방법론 연구

양충헌^{1*} · 구윤서² · 김인수¹ · 성정곤¹

¹ 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 도로연구실, ² 안양대학교 환경에너지공학과

Studies on the Methodology of a Hybrid Model for Emission Dispersion Analysis

YANG, Choong Heon^{1*} · KOO, Youn Seo² · KIM, In Su¹ · SUNG, Jung-Gon¹

¹ Highway Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Gyeonggi 411-712, Korea

² Environment and Energy Engineering, Anyang University, Gyeonggi 708-113, Korea

Abstract

This study suggests a specific methodology to analyze how emission impacts on regional emission concentrations in accordance with the change of weather conditions, and the need of its application. The suggested methodology was applied to a transportation network of Pochun area in Gyeonggi-do as an example. The methodology contains two types of analytical models; 1) dispersion analysis based on emission from traffic, and 2) dispersion analysis based on the combination between emission from traffic and existing emission in the air. By doing so, it is expected that the comprehensive influence of emission on traffic network and its surrounding areas can be identified. In addition, it might be useful for us to apply environmental risk assessment based on the effect of emission on the people.

본 연구에서는 대기오염 물질이 대기 변화에 따라 주변 지역의 오염농도에 미치는 영향 분석에 대한 필요성과 구체적인 방법론을 제시하였다. 이에 대한 사례연구로서 경기도 포천지역 도로망을 대상으로 본 방법론을 적용하였다. 본 연구에서 제시한 방법론은 1) 교통에서 배출된 오염물질만을 고려한 확산 분석, 2) 교통에서 배출된 오염물질과 주변오염물질농도를 결합하여 분석하는 두 가지 분석 모형을 포함하고 있다. 이를 통해 교통에 의해 발생된 대기오염물질이 교통망과 교통망 주변지역에 미치는 영향을 분석하는데 유용 할 것으로 판단된다. 또한, 교통에 의해 발생된 대기오염원과 대기오염원이 인체에 미치는 영향을 본 분석에 근거하여 도로주변 고농도의 대기오염물질에 의한 위해성(危害性)을 평가하는데 유용할 것으로 판단된다.

Key Words

Air Dispersion Model, CALPUFF, CMAQ, Emission Estimation Model, Hybrid Model
대기확산모형, CALPUFF, CMAQ, 배출량 추정 모형, 복합모형

* : Corresponding Author
chyang@kict.re.kr, Phone: +82-31-910-0184, Fax: +82-31-910-0746

Received 24 October 2012, Accepted 27 February 2013

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

1970년대에 대기오염 배출되는 오염물질의 대부분은 석탄연소와 같은 굴뚝산업에 의한 것이 지배적 이었으나, 최근에는 교통부문의 대기오염물질을 대량으로 배출하고 있고(약 100만 톤), 이는 전체 배출량 중 약 40%로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것이 현실이다(Ministry of Environment, 2012).

대기오염물질 뿐만 아니라 2008년까지 세계 9위였던 국내 온실가스 즉, CO₂ 배출량이 2009년에는 한 단계 더 상승해 세계 8위를 기록한 것으로 조사되었다. 이는 산업의 발달, 급격한 자동차 사용인구 증가, 그리고 도시화에 기인한 것으로 추정된다(U.S. EIA, 2011). 이러한 추정은 자동차 사용인구의 증가와 빠른 도시화는 교통 활동의 증가를 가져왔고, 교통 활동이 증가할수록 배출량도 증가한다고 볼 수 있기 때문에 가능하다. 특히, 디젤연료를 사용하는 차량의 경우는 통행 중 다량의 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)를 대기 중에 배출한다.

그동안 교통 분야에서 교통에 의해 발생하는 오염물질배출량을 추정하고 예측하기 위한 연구가 많이 진행되어왔다(Cho, 1993; Kwon, 1997; Park, 2001; Lim, 2004). 현재까지 진행되어 온 연구 결과의 대부분은 교통에 의한 오염물질 배출량의 총량을 추정하는 것에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 최근 삶의 질의 향상과 복지문제가 새로운 사회이슈로 대두되고 있는 현실에서 교통에 의해 대기 중으로 배출되는 오염물질에 대한 총량(emission total)뿐만 아니라 주변 기상조건에 따라 확산되는 집중도(concentration)를 추정하는 것은 공공보건·도시계획·토지이용측면에서 매우 중요한 것으로 인식되고 있다. 이와 관련하여 이진우(Lee, 2009; Lee, 2012)의 연구에서는 미국 캘리포니아 LA 및 Long Beach 항구를 중심으로 내륙으로 이어지는 I-710에 대한 오염물질 배출량을 추정하고 이에 대한 확산분석을 통해 공공보건문제와 연결하는 연구를 진행한 사례가 있다. 국내에서도 수도권 지역의 대기개선훈책 시행에 따른 대기 오염도를 평가하기 위한 방법을 연구한바 있으며, 특히 대기질 모형 중 하나인 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions), CMAQ 등을 활용하여 수도권의 오존(O₃)만의 농도를 모사하였다(Lee, 2010).

본 연구에서는 대기오염 배출된 오염 물질이 주변 대기 변화에 따라 주변 지역의 오염농도에 미치는 영향에 대한 분석의 필요성과 한 가지 사례 연구를 통한 분석 방법론을 제시하였다. 사례연구로 제시된 방법론은 서울지방국토관리청 산하 국도 43호선, 국지도 78호선, 지방도 387호선을 대상으로 적용하였다. 국립환경과학원에서 제공하는 국내 오염물질 배출 총량 자료를 대기확산모형(dispersion model)의 입력 자료로 사용하였다. 이를 통해 분석구간 주변의 기상조건과 더불어 확산되어 가는 정도 및 농도를 추정하였다. 본 연구에서 제시하는 방법론은 대기오염원의 주요 배출지와 그 도로주변 환경에 미치는 영향을 보다 과학적으로 예측하고 평가하는데 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위해 두 가지 모형을 이용하였는데, 1) 교통에서 배출된 오염물질만을 고려한 확산 분석과 2) 교통에서 배출된 오염물질과 주변오염물질농도를 결합하여 분석하는 것이다. 이를 통해 교통에 의해 발생된 대기오염물질이 교통축은 물론 교통축 주변 지역에 미치는 영향을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

II. 모형의 개요

1. 대기오염 배출량 산정 모형

대표적인 거시적 모형은 미국 California Air Resource Board(CARB)에서 개발한 EMFAC (Emission Factor Model)이 있다. 이 모형을 통해 일산화탄소(CO)를 포함한 총 10가지의 대기오염 배출량을 추정할 수 있다(Matthew, 1999). 거시적 모형은 일반적으로 차량의 평균주행속도를 입력 자료로 이용하는 특징이 있어, 보다 넓은 지역적 관점에서의 대기오염 배출량을 추정하는데 적합하다. 반면, 미시적 모형은 차량의 순간속도, 감속속도, 차량의 궤적과 같은 자료를 이용하여 배출량을 산정하는데, 대표적으로 CMEM(Comprehensive Modal Emission Model)과 VT-Micro가 있다. CMEM의 경우 초당 배출량을 계산할 수 있는 장점이 있으나, 디젤연료를 사용하는 차량에서 방출되는 PM량을 추정할 수 없는 단점이 있다(Matthew, 2004). 또한 미국 환경보호국(US Environmental Protection Agency)에서 개발한 MOVES(Motor Vehicle Emission Simulator)모형이 있다. 이는 차량의 배출가스를 분석하고 추정할 수 있는 모형으로써, 기존의 거시적 배출가스 분석 모형인

MOBILE6를 대체하기 위해 만들어졌다. MOVES 모형의 주된 장점은 미시적·거시적 분석 모두 가능하다는 것이다. 즉, 3개의 다른 위계(national, county, project)에서 차량 배출량 분석이 가능하다. 즉, National과 county 수준에서는 거시적 분석 방법 적용이 가능하고 project 수준에서는 도로 링크별 평균속도를 고려한 거시적 분석은 물론 차량배출자료를 바탕으로 한 미시적 분석이 가능하다.(U.S. EPA, 2009)

국내에서 개발된 다양한 형태의 대기오염 배출량 추정 모형들이 있다. 1) 차종별 일일평균주행거리 2) 교통수요 모형(Emme/2, TransCAD 등) 이용 3) 실시간 교통량 이용 등이 3가지를 이용하여 산정하는 것이 대부분이다(Kim, 1999; Uhm, 2001; Park, 2001; Cho, 2009).

본 연구의 진행을 위해서는 사례연구를 위해 지정된 분석지역 도로구간에 대한 대기오염배출량 자료가 필수적인데, 본 연구에서는 특정 대기오염물질 배출량 모형을 통해 총량을 추정하는 대신, 국립환경과학원에서 제공하고 있는 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPSS)의 2009년 이동오염원자료를 이용하였다. 본 연구가 사례연구를 위해 지정된 분석지역에 대한 정확한 대기오염물질 추정 및 확산을 분석하기보다는 전체적인 필요성과 분석방법을 제시하는 것을 목적으로 하기 때문에 특정 모형에 의한 배출량 추정정보는 국가기관에서 공인된 자료를 이용하는 것이 연구의 분석 목적에 부합하다고 판단하였다. 또한, 외국의 모형은 배출계수(Emission Factor)자체가 국내 상황에 맞지 않는 문제가 있다.

2. 대기확산모형

미국은 1950년대부터 EPA를 중심으로 대기확산에 대한 연구를 본격적으로 수행하였다(U.S. EPA, 1993). 그 결과 전 세계 대기확산모형에 대한 활용에 크게 기여를 하고 있다. 실제로 우리나라를 포함한 많은 나라에서 미국의 모형을 직접 또는 수정·보완한 형태로 사용하고 있다.

대기확산모형이란 분석 대상지역의 지형조건과 기상변화에 따른 대기오염물질의 확산 및 이동을 계산하는 시뮬레이션 프로그램을 의미한다. 이 모형은 기본적으로 화학반응이 없는 모든 대기오염물질을 계산할 수 있으며, 화학반응이 있는 오염물질의 경우 해당 화학반응을 고려할 수 있는 모형을 선택해야한다. 대기확산모형을 통해 평가할 수 있는 오염물질은 아황산가스(SO_2), 이산화질소

(NO_2), 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10})이고, 최근에는 화학수송모형을 이용한 오존(O_3)의 평가도 이루어지고 있다.

국내 대기확산모형은 미국 EPA의 것을 주로 사용하며, 그 예측방식에 따라 크게 가우시안모형(Gaussian model), 수치모형(Numerical Model), 통계 혹은 경험 모형(Statistical or Empirical Model) 및 물리모형(Physical Model) 등으로 구분된다(Karl, 1999). 대기질 평가와 관련해서는 국내에서도 다양한 연구가 진행되었다(Cho, 2012; Koo, 2005; Koo, 2008, Choi, 2009).

이 중 가우시안 확산모형이 가장 많이 사용된다. '환경영향예측모델 활용지침 마련을 위한 연구(III)'(Ministry of Environment, 2009)에서 미국 EPA의 모형을 바탕으로 하여 국내 현황에 맞추어 모형을 선정하였다. 대표적인 모형에 대한 설명은 다음과 같다.

1) CALINE(California LINE source model)

CALINE은 미국 캘리포니아 교통국(Caltrans)에 의해 개발된 모형이다. 이 모형은 소규모 지역에서 주변 교통시설에 따른 대기 질 영향을 평가하기 위한 모형으로 배출강도, 기상 조건, 지형 조건 등의 입력 자료를 이용하여 도로로부터 약 500m 이내에 대해 신뢰성 할 만한 오염농도를 예측할 수 있으며, 일산화탄소(CO)나 입자상 물질과 같은 비반응성 오염물질을 예측할 수 있는 특징이 있다.

2) CALPUFF(California Puff model)

CALPUFF은 일반화된 비정상상태 대기 질 모형 시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로 Sigma Research Corporation에서는 CALMET 기상모형을 포함하는 CALPUFF 확산 모형과 이와 연관된 여러 프로그램들을 개발하였다(Earth Tech, 2000). 이는 퍼프모형의 하나로 퍼프모형이란 굴뚝에서 연속적으로 배출되는 연기를 잘게 나누어진 연기덩어리(PUFF)의 형태로 배출된다고 가정하고, 배출된 PUFF들이 3차원 공간 해상도를 갖는 바람장에 따라 이동 확산하면서 수용지점에 미치는 영향을 농도 형태로서 나타내는 모형이다. CALPUFF는 시간 및 공간에 따른 바람장의 변화를 퍼프의 이동에 고려할 수 있기 때문에 비정상상태(Unsteady state) 모형이다. 따라서 정상상태(Steady state) 모형보다 정확히 시간에 따른 풍향 및 풍속의 변화를 확산에 반영할 수 있

고 모형의 대상영역은 수십 m의 상세영역부터 수백 km의 광범위한 영역까지 계산이 가능하다.

3) AERMOD(American meteorological society/united Environmental protectin agency Regulatory Model Improvement Committee)

AERMOD는 실외 대기오염물질의 농도를 예측하는 가장 최근 모형으로 EPA에서 지정하는 공식적인 모형이다. 특히, 대상영역이 50km 이하인 경우 사용하도록 권장하고 있다. 이는 단순지형과 복잡지형을 모사하는 모형들의 복잡성을 보완하기 위해 미국 기상학회(AERMIC)와 미국 환경부가 공동으로 개발한 것이다(Zou, 2009). AERMOD는 실제 대기에서는 고도에 따라 수평연기확산계수와 연직연기확산계수가 크게 변하는 특성을 대기경계층 상사이론을 이용하여 계산할 수 있도록 설계되었다.

3. 화학수송모형

화학수송모형이란 대기 중의 화학물질을 시뮬레이션하기 위한 수치해석적 모형을 의미한다. 일반적인 대기순환모형은 대기 흐름의 역동성(예: 유체와 열의 흐름)을 시뮬레이션 하는데 초점을 두는 반면, 화학수송모형은 대기 중 1개 또는 그 이상의 화학물질 흐름에 초점을 맞춘다. 화학수송모형은 본 연구에서 사용될 복합모형(Hybrid model)수행에 필수적인 역할을 한다.

최근 국내·외에서 널리 이용되고 있는 화학수송모형은 CMAQ과 CAMx가 있다. CMAQ은 기상모형, 배출량 모형 및 화학수송모형으로 구성된다(www.cmaq-model.org). 기상모형은 시간별, 격자별로 바람장, 온·습도 장을 비롯한 3차원 기상자료를 생성하며, 생성된 기상자료는 배출량 모형과 화학수송 모형의 입력 자료로 이용된다. 배출량 모형은 기상자료와 각 배출원의 특성을 고려하여, 대기 확산모형에 적용할 수 있는 화학종별·시간별·공간별 배출량을 생성한다. 최종적으로는, 생성된 기상 및 배출량 입력 자료를 바탕으로 화학수송 모형을 수행하여 대기오염물질 농도를 평가하게 된다. PM_{2.5}와 NO₂는 화학반응이 크게 나타나는 오염물질로 이에 대해 정확한 확산농도를 산정하기 위해서는 화학반응을 고려할 수 있는 CMAQ과 같은 화학수송모형의 사용이 필요하다. CAMx에서는 모델링 과정 및 결과를 분석하기 위한 다양한 분석기능을 제공하고 있다. CMAQ에 비해 CAMx는 다양한 기여도 분석도구가 잘 갖추어져 있다는 장점을 가지고 있다.

일반적으로 지역·도시 규모에 대한 모형수행을 위해

서 지역규모의 모델링 절차를 따르게 된다. 전체 시스템은 기상모형(WRF), 배출량 모형(SMOKE), 화학수송모형(CMAQ)으로 구성된다. WRF는 CMAQ 모형 수행을 위한 3차원 기상자료를 산출하고, SMOKE는 화학수송모형을 위한 화학종별·격자별·시간별 배출량 자료를 산출한다. 이 밖에도 영국에서 주로 사용되는 모형은 ADMS(atmospheric dispersion modeling system)로 Surrey 대학교, 영국기상청이 공동으로 Cambridge Environmental Research Consultants (CERC)를 구성하여 개발하였다. 이 모형은 1993년에 개발되어 2007년에 버전4까지 발전되었다. European Union Air Quality Directive, UK Air Quality Str, U.S. National Ambient Air Quality Standards(NAAQS), World Health Organization(WHO) Air Quality Guidelines에 사용할 수 있는 모형이다. ADMS의 기본개념은 AERMOD와 비슷하나 해당 제품의 특징에 맞게 배출원 입력 자료의 형태를 다양하게 구성하여 배출원의 형태에 맞는 모형의 선택이 중요하다. ADMS-Roads의 경우 도로의 교통량을 입력 자료로 하며, 배출량의 단위를 g/km/s로 입력가능한 장점이 있으나 도로 외의 오염원 개수에 제한을 받는다. 따라서 도로에 대한 평가에는 장점이 있으나 다른 오염원과의 복합적인 평가에는 바람직하지 않다.

앞에서 언급하였듯이, 국내 모형은 EPA의 대기확산모형을 주로 사용한다. 이 중 통계 혹은 경험모형인 수송모형의 경우 오염원에 대한 피해지점(Receptor)의 오염물질 농도와 성분분석을 통하여 배출원별 기여율을 산정한다. 따라서 기존의 오염원에 대한 피해영향 정도를 예측할 수 있어 주로 대기질 정책수립을 위한 오염원파악 등에 활용하고 있다.

수치 및 물리모형으로서 대표적인 광화학모형인 CMAQ, CAMx, UAM-V, REMSAD 등의 광화학 모형은 대기 중에 일어날 수 있는 오염물의 농도를 결정짓는 모든 과정(이류, 확산 및 반응)을 고려해 줄 수 있는 종합적인 대기 질 예측모형이다. 그러나 예측범위가 크고 모형에 입력되는 바람장 구현과 모형에 입력되는 광범위한 배출량 자료 확보가 어려운 문제가 있어 주로 대도시의 대기환경보전실천계획 평가 등 대기정책평가에 사용하고 있다.

4. 복합모형(Hybrid Model)

최근, 대기오염물질에 대한 인체노출 및 그에 따른 건

강영향을 평가하기 위한 수단으로 지역 규모 화학수송모형과 상세 규모 대기확산모형을 결합한 복합모형을 이용한 분석 방법이 주목받고 있다. 이를 통해 도로에서 배출되는 오염원뿐만 아니라 주변 배경이 되는 대기오염원도 함께 고려하여 보다 상세한 대기오염의 집중도를 분석한다.

한 가지 사례를 예를 들어 보면, 영국에서는 런던지역을 대상으로 CMAQ v4.6 모형 수행 결과를 배경농도로 적용하고 ADMS-Roads를 이용하여 교통상황을 반영한 20m격자의 상세 복합모형을 수행하였다. 이를 통해 런던지역의 대기오염의 집중도를 Figure 1과 같이 표현하였다(Nutthida, 2011).

미국의 New Haven, Atlanta, Baltimore, Detroit에서는 Figure 2와 같이 CMAQ과 AERMOD를 이용한 복합모형(Hybrid model)을 적용하여 CO, NO_x, PM_{2.5}, Elemental Carbon(EC)등에 대한 상세 해상도 농도를 산출하였다(Vlad Isakov, 2010).

(Source: Coupling CMAQ-urban for fine scale air pollution and its impacts modeling for london, Presented at the 10th Annual CMAS Conference)

Figure 1. Hybrid model performed in the UK

(Source: Air Quality and Exposure, 2010, US/UK Collaboration Meeting)

Figure 2. Hybrid model performed in the U.S.A

III. 분석 및 결과도출

1. 방법론 정립

본 연구에서는 Figure 3과 같은 절차를 분석의 방법론을 제시하며, 이와 같은 절차를 통해 사례연구를 진행하였다.

본 연구에서 사용된 기상모형은 WRF(Weather Research Forecast)이며, 디지털 경사도를 나타내는 DEM(digital elevation map)과 토지이용 자료, NCEP FNL Analysis Data: National Centers for Environmental Prediction Final Analysis Data) 등의 전지구 기상자료, 자료동화를 위한 측정자료 등이 주요 입력 자료로 사용된다. 기상 모델링에서 생성된 기상 자료는 점오염원 및 자연배출량 산정을 위한 입력 자료로 이용되며 화학수송모형의 입력 자료로 사용된다. 배출량 모형은 주로 SMOKE가 이용되며 주어진 배출량 인벤토리를 화학수송모형에서 요구되는 화학종별, 격자별, 시간별 배출량으로 생성한다. 기상 및 배출량 모델링에 의한 산출된 자료는 화학수송 모델링에 입력되어 대기질 농도를 계산하게 된다.

CMAQ을 수행하기 위해서는 모델링 격자에 대한 초기 및 경계조건이 필요하며 초기 및 경계조건은 GEOS-CHEM과 같은 전지구 화학수송모형으로부터 추출하거나 특정 값을 측정값 등에 근거해 임의로 적용할 수 있다. 최종적으로 산정된 결과는 측정 자료와 비교하거나 모형수행 결과를 분석도구 활용을 통해 검증·분석하게 된다. 최종적으로는 생성된 기상 및 배출량 입력 자료를 바탕으로 화학수송 모델링을 수행하여 대기오염의 원인 파악, 미래 대기질의 예측, 정책의 효과 분석 등에 이용한다. 이와 같이 화학수송 모델링은 복합모형 수행에 반드시 필요하다.

Figure 3. Overall methodology

Figure 4. Analysis area

2. 자료수집

방법론 적용을 위해 선정된 지역은 Figure 4와 같이 경기도 포천 영북면의 서울지방국토관리청 산하 일반국도 43호선과 국지도 78호선, 지방도 387호선이다.

분석기간은 2009년 1월 1일~12월 31일까지의 매시간(24시간) 관측 자료를 이용하였다. 공간적 해상도는 수평해상도 0.1km 간격의 90×90 격자체계로 구성하였고, 수직해상도는 지표면으로부터 20m 간격으로 최소 0~최대 3,500까지 구성하였다. 지형자료는 환경부에서 제공하는 상세지형 및 토지이용 자료를 이용하였다. 지표 기상자료 수집을 위해 총 5군데(철원, 동두천, 문산, 서울, 양평)기상대의 자료 및 고층기상관측소(오산)의 자료를 이용하였다.

3. 모형수행

1) CMAQ 모형 과정

앞서 언급한 대로, 본 연구의 대기오염원에 대한 배출량 자료는 국립환경과학원에서 제공하는 대기정책지원시스템의 2009년 자료를 이용하였다.

대기정책지원시스템이란 우리나라의 대기오염물질 배출량을 산정하는 것으로 7개의 대기오염물질(CO , NO_x , SO_x , PM_{10})을 대상으로 하고 있다.

CAPSS는 배출량 인벤토리(Emission Inventory)에 근거한 대기질 관리 종합시스템으로, 체계적인 기초자료 수집관리를 통하여 대기오염총량관리제, 대기보전시책의 효율성 평가 등 정책 수행에 필요한 정보 및 시스

템을 제공하고, 양질의 정보를 제공하는 대국민 정보서비스를 실시하고 있다. 배출량을 산정하기 위해 현재 150여개 유관기관으로부터 250여종의 자료를 입수하고 있으며 입수기간이 상이함에 따라 2년의 시간 간격을 두고 배출량을 산정하고 있다.

대기환경보전법에서는 대기환경관리를 위한 대기오염물질 배출량 산정을 법률로 규정하고 있다. 대기환경보전법 「제17조 대기오염물질 배출원 및 배출량 조사」, 시행규칙 「제16조 배출시설별 배출원과 배출량 조사」에 규정되어 있으며 그 외 배출량 산정과 관련한 법률은 아래와 같다.

- 환경보전중기종합계획의 수립·시행(환경정책기본법 제14조의 2)
- 수도권 대기환경관리기본계획의 수립·시행(수도권 대기환경개선에 관한 특별법제8조)
- 대기환경개선 종합계획의 수립(대기환경보전법 제11조)
- 대기환경규제지역의 지정(대기환경보전법 제18조)
- 대기오염물질 총량규제(대기환경보전법 제22조)

CAPSS 배출원 분류체계는 유럽 CORINAIR 배출원 분류체계(SNAP 97)를 기초로 하고 있으며, 2007년부터 배출원 분류 체계를 국내 현실에 맞추어 변경, 기존 11개 대분류에서 12개의 대분류로 변경하였다. 2009년 현재 대분류12개, 중분류 58개, 소분류 334개, 세분류 578개이다. 교통에서 발생하는 이동오염원은 도로에서 주행하는 자동차로 인한 대기오염물질배출원으로 규정하며, 배출량 산정방법은 다음과 같다.

차종에 대한 분류는 국내의 자동차 관리법 규칙에 따르며(승용차, 승합차, 화물차, 특수자동차, 이륜차) 차종에 따라 경형, 소형, 중형, 대형으로 나누어 차종별 엔진가열(hot-start) 배출량, 엔진 미가열(cold-start) 배출량, 증발 배출량 등으로 분류하여 산정한다. 이륜차, 화물차 대형 등 일부는 엔진가열 배출량만 산정한다. 또한 차종별로 이용되는 연료도 구분하여 산정한다.

배출계수(Emission Factor)의 경우 자동차 차종별, 연식별 모든 차종에 대하여 개발된 것이 아니기 때문에 일부 차종에 대해서는 다른 유사차종의 배출계수를 적용한다. 국립환경과학원 교통환경연구소에서 제공하는 자료를 사용하며 CAPSS 차종에 포함되지 않은 차종의 배출계수, 엔진 미가열 배출 및 증발 배출계수는 유럽 CORINAIR에서 제공하는 배출계수를 적용한다. CAPSS는 국내의 각 해당기관의 공신력 있는 자료를 바탕으로 실측자료 및

Table 1. Emission results

Contents	PEC	PMC	PMFINE	POA	NO ₂
Emission (kg/hr)	62.71	476.54	67.73	21.98	6.09

각종 통계자료로 광역적으로 계산된 자료로 매우 신뢰도가 높은 자료이다.

CAPSS의 2009년 도로이동오염원 배출량자료는 CALPUFF와 CMAQ 수행을 위한 입력 자료로 사용하기 위해 Table 1과 같이 SMOKE를 이용하여 해당 지역의 화학수송모형 배출량을 산출하였다.

2) CALPUFF 모형을 이용한 대기확산 분석

(1) 바람장 모형 검증

대기확산모형 수행을 위해서는 우선, 바람장에 대한 분석이 선행되어야 한다. 분석대상지역 인근 자동기상관측장비(2009년 01월 01일부터 2009년 12월 31일까지)의 관측결과와 CALMET 결과를 비교하여 바람장 모형의 신뢰도를 검증하였다. 그 결과 지표기상대 관측 자료에서는 북서풍(NW)계열, 북풍(N)계열, 북동풍(NE)계열이 주로 발생하는 것으로 나타났으며, CALMET 결과에서는 북서풍(NW)계열, 북풍(N)계열, 북동풍(NE)계열이 주로 발생하여 대체적으로 유사한 계열의 풍향을 가지는 것으로 나타났다. Table 2는 모형결과에 대한 통계분석 결과를 나타낸다.

위 결과 중 IOA는 두 변수 상관관계를 나타내는 수치로 “1”에 가까울수록 상관성이 높으며 0에 가까울수록 상관성이 낮은 것이다. 온도와 풍속 모두 “1”에 가까운 수치를 보이고 있다. 또한, 기온의 경우 상관계수가 0.96으로 매우 양호하다고 판단되며, 풍속의 경우도 0.83으로 나타나, 주거지역 주변이 산악지형으로 이루어져 있어, 지역적 특성을 고려하면 비교적 양호한 것으로 판단할 있다.

Table 2. Results of the statistical analysis

Content	Actual average	Model average	IOA	RMSE	MBIAS	NMB
Temp. (°C)	14.144	12.986	0.961	3.875	-1.157	-8.183
Wind (m/s)	1.244	1.107	0.830	0.776	-0.136	-10.970

(2) 바람장 모형 결과

지표기상 자료와 고층기상대 자료를 활용하여, 격자

(a) 2009.09.14 12:00

(b) 2009.09.14 16:00

Figure 5. Results of CALMET model

100m 간격으로 바람장 모형을 수행하였다. 바람장을 분석하기 위하여 2009년 09월 14일 04시부터 24시까지의 4시간 간격으로 시간별 바람장을 Figure 5와 같이 나타내었다.

이 영역은 포천의 농업지역으로 일중 일사량에 따른 바람장을 분석하기 위하여 일사량의 차이가 가장 많이 나는 계절인 봄, 가을 중 2009년 09월 14일의 바람장을 분석하였으며, 그 결과 주거지역 주변의 바람장이 주변지형에 의한 큰 영향을 미치고 있지 않아, 대체로 원활히 소통되는 것으로 나타났다. 그러나 일부 내륙의 산악지형의 경우에는 풍속이 대부분 약하게 나타났다. Figure 6

Figure 6. Statistical results

은 모형을 통해 도출한 결과와 관측 자료에 대한 비교를 보다 가시적으로 나타내고 있다.

(3) 이동오염원 대기확산 결과

본 연구에서는 미세먼지(PM_{2.5})와 이산화질소(NO₂), 2가지 오염물질을 대상으로 확산을 분석하였다. Figure 7은 이 2가지 오염물질에 대한 배출량을 GIS지도를 통해 나타난 것이다. CAPSS 배출량은 1km×1km 격자에 대해 PM₁₀, SO_x, NO_x, CO의 배출량으로 되어 있다. 이를 SMOKE를 이용하여 PM_{2.5}, NO₂로 화학종분배를 하고, 도로면적에 따라 도로위에 재분배한 결과이다.

포천시에서 의정부시로 이어지는 국도43호선의 경우 교통량이 많은 만큼 오염물질 배출량도 많은 것으로 나타났다. 이는 통과교통량이 외부도로에 많기 때문이다.

분석지역을 대상으로 한 대기오염 산출량이 기상상태에 따라 주변에 이동하면서 어떠한 집중도(concentration)를 보이는지 알아보기 위해 CALPUFF 모형을 이용하였다. 이를 통해 PM_{2.5}와 NO₂ 농도를 모사하였다. 분석 결과, Figure 8에서와 같이 분석지역의 도로를 따라 대기오염배출량의 농도가 표현되고 있다. 도로를 따라 대

Figure 7. GIS-Map about air pollution emissions through CAPSS

기오염의 농도가 높게 나타나고 바람의 영향을 받아 주변지역으로 퍼져나가는 현상을 나타내고 있다.

3) 복합모형 수행

앞에서 수행한 CALPPUF 모형 결과는 도로주변에 대한 위해성(危害性) 평가를 하기위해 도로에서 배출되는 대기오염의 양(量)만으로 대기오염물질의 농도가 포천 시내에 얼마만큼 영향을 미치는지 정확히 알 수는 없다. 따라서 모형 수행 결과에 도로를 제외한 분석 당시의 오염물질 농도를 배경농도로 하여 가중하여 계산한 최종 농도를 재산정하였다. 이러한 방식의 모형을 복합모형(Hybrid model)라고 하는데, 이는 이미 산정된 CALPUFF 모형 결과와 결합하여 고해상도의 결과를 도출한다. 기본적인 공식은 다음과 같다(Karen, 2010).

$$C = CMAQ_{primary} \times \left(\frac{CALPUFF_{rec}}{CALPUFF_{gridavg}} \right) + CMAQ_{secondary}$$

Figure 8. Results of CALPUFF model

Figure 9. Results of hybrid model

여기서, C =오염물질농도

$CMAQ_{primary}$ = CMAQ primary 오염물질농도

$CALPUFF_{rec}$ = CALPUFF 격자농도

$CALPUFF_{gridavg}$ = CALPUFF 격자평균농도

$CMAQ_{secondary}$ = CMAQ secondary 오염물질농도

Figure 9는 2가지 오염물질에 대한 복합모형 수행의 결과를 나타낸다.

PM_{2.5}의 경우, 도로에서 배출되는 대기오염과 기존 배경오염과 합쳐져 포천시내 내부의 농도가 주변에 비해 높은 것으로 판단된다. 이 결과는 충분히 예상할 수

있는 결과이긴 하나, 도시계획 또는 교통계획, 교통대안 평가 시에 적용된다면, 상당한 의미를 가질 수 있다. 예를 들어, 계획 전에 대상지역 (또는 도시)의 배경농도가 높은 곳에 대규모 산업단지 또는 교통유발시설 등이 계획된다면, 그 지역의 대기환경은 상당히 부정적인 결과를 초래할 수 있을 것으로 판단할 수 있고, 현재 대기오염의 집중도가 높은 곳이라면, 과연 이 문제를 교통대안을 통해 감소할 수 있는지 아니면 교통이 아닌 다른 원인으로 인해 감소하는 것이 어려운지를 판단할 수 있을 것이다.

NO₂의 경우, 산악지역 주변 농도의 집중도가 상대적

으로 높은 것으로 나타났다. 이는 통과교통량이 외부도로에 많기 때문이다

IV. 결론

본 연구에서는 최근 환경에 대한 관심 증가에 따라 기존 교통에 의한 대기환경오염 결과를 바탕으로 기상조건과 더불어 주변으로 확산되는 과정에 대한 분석 연구의 필요성 및 전체적인 방법론을 제시하였다. 이러한 연구가 필요한 이유를 교통측면에서 요약하면 다음과 같다.

- 교통에 의해 발생된 대기오염원과 인체에 미치는 영향 분석에 근거한 도로주변 농도의 대기오염물질에 의한 위해성(危害性) 평가 (예: PM과 NOx의 경우 노약자와 어린이 그리고 일반 성인에게도 농도에 따라 호흡기에 치명적인 영향을 줄 수 있음)¹⁾
- 거시적 또는 미시적 교통 시뮬레이션 결과 (링크교통량 등)에 따른 대기오염물질 총량 추정과 이에 따른 확산모형의 연계 시스템 개발을 통해 도로부 환경평가 (도시계획, 교통계획, 교통대안 평가 단계에 적용)
- 복합 모형을 적용할 경우, 도시배경농도를 반영한 보다 상세하고 정확한 도로변 평가가 가능 (토지이용 측면 고려 가능)

결과적으로 교통에 의한 대기오염원과 주변 대기환경에 따른 확산을 통해 특정 지역의 오염 집중도를 고려하여 공공보건(health effect)에 대한 공론화 및 이를 통한 환경정책 수립·교통영향 평가 등이 가능할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant(11 High-tech Urban G06) from High-tech Urban Development Program funded by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs of Korean government.

REFERENCES

Cho E. S. (1993), A study on the estimation of air pollutants emissions by line source, Master's thesis,

Seoul National University.

Cho H. J., Choi D. Y. (2009), Effects of Road and Traffic Characteristics on Roadside Air Pollution, J. Korean Soc. Transp., Vol.27, No.6, Korean Society of Transportation, pp.139-146.

Cho J. S., Koo Y. S., Choi D. R. (2012), A Study of Wind-blown Dust Emissions Estimation in Asia Region Using CMAQ Dust Module, Proceeding of the Meeting of KOSAE (2012), KOSAE, p.118.

Cho J. S., Koo Y. S., Yoon H. Y., Shin M. J. (2011), Fine Scale Air Quality Modeling by Hybrid Approach of CMAQ and CARPUFF, Proceeding of the 53rd Meeting of KOSAE (2011), KOSAE, pp.292-292.

Choi D. R., Koo Y. S. (2009), The Sensitivity Analysis of Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Model according to Meteorological Input Data and Chemical Mechanism, Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE (2009), KOSAE, pp.177-178.

Earth Tech, Inc. MA. (2000), User's Guide: CALPUFF Dispersion Model (version 5).

Karen W., Neal F., Mark M., Tyler F., Bryan H. (2010), A Multi-pollutant, risk-based approach to air quality management: Case Study for Detroit, Atmospheric pollution research, U.S. EPA, pp.296-304.

Karl B. S., Partha R. D. (1999), Atmospheric Dispersion Modeling Compliance Guide (1st Edition ed.), McGraw-Hill Professional.

Kim W. S., Eom J. K., Hwang K. Y., Jang J. H. (1999), Internalizing Environmental Cost using TDM Alternatives, J. Korean Soc. Transp., Vol.17, No.4, Korean Society of Transportation, pp.99-110.

Koo Y. S., Moon Y. S., Yoon H. Y., Kim S. T., Choi S. M. (2003), Development of a Real-time Air-quality Forecasting System, Proceeding of the 36th Meeting of KOSAE (2003), KOSAE, pp.135-136.

Koo Y. S., Yoon H. Y., Yoon M. J., Choi D. R., Ko G. J. (2008), Comparison of MM5 with WRF in the Seoul Metropolitan Area, Proceeding of the 46th Meeting of KOSAE (2008), KOSAE, pp.564-565.

Koo Y. S., Yoon W. J., Kwon H. Y., Yang J. M., Choi

1) 환경정책기본법시행령 (2011. 3월)

- J. H., Yoon H. Y. (2005), Development of a PM10 Forecasting System of the Day Before, Proceeding of the 39th Meeting of KOSAE (2005), KOSAE, pp.403-404.
- Kwon W. T., Kim H. C. (1997), Distribution of NOx and CO among the Ambient air by traffic volume characteristics and distance from roadside, Korean J. Sanitation, Vol.12, No.3, KOSESE, pp.41-49.
- Lee D. G., Lee Y. M., Yoo C., Lee M. H., Han S. S., Hong J. H. (2010), Development of air quality assessment methods for evaluating air pollution level in the Seoul metropolitan area(I), National Institute of Environmental Research.
- Lee G. W., You S., Stephen G. R., Jean-Daniel S., Jayakrishnan R., Oladele O. (2012), Assessing air quality and health benefits of the Clean Truck Program in the Alameda corridor, CA, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol.46, pp.1177-1193.
- Lee G. W., You S., Stephen G. R., Jean-Daniel S., Mana S., Jayakrishnan R. (2009), Environmental Impacts of a Major Freight Corridor: A Study of I-710 in California, TRR, 2123, TRB, pp.119-128.
- Lim C. S., Eom M. D., Ryu J. H., Han J. S., Yoo Y. S., Kim G. H., Kim Y. E. (2004), A Study on the Calculation Method of Pollutant Emission Factors for Vehicles, Proceeding of the 37th Meeting of KOSAE (2004), KOSAE, pp.117-118.
- Matthew B., George S., Theodore Y. (1999), Estimating Emissions and Fuel Consumption for Different Levels of Freeway Congestion, TRR, 1664, TRB, pp.47-57.
- Matthew B., George S., Theodore Y. (2004), Modal Emissions Model for Heavy-Duty Diesel Vehicles, TRR, 1880, TRB, pp.10-20.
- Ministry of Environment (2009), Guidelines for the utilization of Environmental Impact Forecasts Model.
- Ministry of Environment (2012), Air Pollution Emissions Statistics.
- National Institute of Environmental Research (2005), A Study on the Calculation of Pollutant Emission Factors for Vehicles(III).
- Nutthida K., Sean B. (2011), Coupling CMAQ-urban for Fine Scale Air Pollution and ITS Impacts Modelling for LONDON, Presented at the 10th Annual CMAS Conference.
- Park S. K., Kim S. D., Lee Y. I. (2001), Comparative Study on the Methodology of Motor Vehicle Emission Calculation, J. Korean Soc. Transp., Vol.19, No.4, Korean Society of Transportation, pp.35-47.
- U.S. Energy Information Administration (2011), International Energy Statistics.
- U.S. Environmental Protection Agency (1993), Guidance on the Application of Refined Dispersion Models for Hazardous/Toxic Air Releases. Office of Air Quality Planning and Standards, EPA-454/R-93-002.
- U.S. Environmental Protection Agency (2009), Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES) 2010 User Guide, EPA-420-B-09-041.
- Uhm J. H. (2001), Vehicle Emission Estimation by Trip Assignment Model, Master's thesis, Myongji University.
- Vlad Isakov (2010), Air Quality and Exposure, US/UK Collaboration Meeting, EPA.
- Zou B., Wilson J. G., Zhan F. B., Zeng Y. (2009), Spatially differentiated and source-specific population exposure to ambient urban air pollution, Atmos. Environ., 43, pp.3981-3988.
- <http://www.cmaq-model.org>
- ✉ 주 작 성 자 : 양충현
- ✉ 교 신 저 자 : 양충현
- ✉ 논문투고일 : 2012. 10. 24
- ✉ 논문심사일 : 2012. 12. 6 (1차)
2013. 2. 7 (2차)
2013. 2. 27 (3차)
- ✉ 심사판정일 : 2013. 2. 27
- ✉ 반론접수기한 : 2013. 8. 31
- ✉ 3인 익명 심사필
- ✉ 1인 abstract 교정필