

기후변화를 고려한 화학물질거동모형의 도시·산단지역 적용성 연구

유선녀* · 이우균**†

*고려대학교 기후환경학과, **고려대학교 환경생태공학부

Applicability Analysis of Chemical Fate Model Considering Climate Change Impact in Municipal and Industrial Areas in Korea

Ryu, Sun-Nyeo* and Lee, Woo-Kyun**†

*Dept. of Climate Environment, Korea University, Seoul, Korea

**Dept. of Environment Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, Korea

ABSTRACT

As the temperature has changed by climate change, changes in its own characteristic values of the chemical substance or the movement and distribution of chemicals take place in accordance with the changes of hydrological and meteorological phenomena. Depending on the impact of climate change on the chemical behavior, it is necessary to understand and predict quantitative changes in the dynamics of the environment of pollutants due to climate change in order to predict in advance the occurrence of environmental disasters, and minimize the impact on the life and the environment after the incident. In this study, we have analysed and compared chemical fate models validated by previous studies in terms of model configuration, application size and input/output factors. The potential models applicable to municipal and industrial areas were selected on the basis of characteristic of each model, availability of input parameters and consideration for climate change, identified the problems, and then presented an approach to improve applicability.

Key Words : *Chemical Fate Model, Climate Change Impact, Harzardous Chemicals*

1. 서 론

최근 연이은 환경사고로 인명과 재산 피해를 동반하는 사회재난의 규모는 날로 커지고 있어 안전사회에 대한 범사회적 관심과 정책적 노력이 확대되는 추세이다. 한편, 기후변화에 의한 다양한 현상들은 전 지구에 걸친 광범위한 영역에서 영향을 주고 있어 기후변화에 의해 환경에 노출되는 유해물질 거동과 위해성에 영향을 주어 생명과 환경에 미치는 피해를 키울 수 있다(Park *et al.*, 2011).

이미 선진국에서는 자국의 유해화학물질 관리를 위한 정책 수립과 평가를 위해 다양한 화학물질거동 모델을 사용하고 있다. 따라서 그동안의 기후변화 연구를 토대로 연관성을 살핀다면 유해물질을 효과적으로 관리하고, 환경재난을 사전에 예방하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

이에 사업장에서의 유해물질 관리와 사후 대응이 효과적으로 이루어지고, 기후변화에 따른 잠재적 환경재난 발생을 사전에 예측할 수 있도록 기후변화를 고려한 도시·산단지역 규모 대매체 환경거동 모형을 선정하고, 그에 따른 문제점을 모색하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기후변화와 화학물질 거동 예측

최근 우리나라에 폭염과 폭설, 폭우와 같은 이상 기상 현상이 자주 발생하고 있는데, 우리가 앞으로 100년 동안 지속적으로 온실가스를 배출할 때 지구의 온도는 계속 증가하여 구조는 점점 더 불안해지고, 한파나 폭염 등 이상기후 횡수도 증가할 것으로 예측된다. 기후변화로 변화된 기상은 우리 삶의

† Corresponding author : E-mail: leewk@korea.ac.kr

Received May 7, 2015 / Revised June 5, 2015 / Accepted June 15, 2015

방식뿐만 아니라, 산업재해 발생에도 지금과는 다른 영향을 미칠 가능성이 높다. 기후변화로 기온이 변함에 따라 화학물질 자체 특성 값이 변하기도 하고, 기상 현상 등이 변함에 따라 화학물질의 이동과 분포에 변화가 일어난다(Lohmann *et al.*, 2007; Noyes *et al.*, 2009). 따라서 기후변화에 의해 변하는 오염물질의 환경 중 동태에 대한 정량적 이해와 예측이 필요하다.

2.2 다매체 환경거동 예측과 모델링

1960년대 이후 우리나라는 급속한 경제 발전을 이룩하는 과정에서 도시를 중심으로 수많은 산업공단이 건설되었고, 이를 중심으로 급속한 산업화가 이루어졌다. 이들 도시와 산업 시설에서 진행되는 여러 가지 인간의 활동에 따라 유해한 화학물질들이 발생하게 되어 다양한 경로를 통해 환경으로 유입되었다. 유해 화학물질에 의한 오염은 다매체에서 동시에 진행될 수 있으나, 오염의 심각성은 매체마다 다르며, 더욱이 이들에 의한 악영향은 사람뿐 아니라, 생태계에도 미치게 되므로 이들을 모두 고려한 복합적인 관리가 이루어져야 한다. 이를 위해 대기, 물, 토양, 적토, 식생 등 환경 내의 모든 매체를 동시에 대상으로 고려하는 다매체 환경거동의 파악 및 예측이 가능한 접근방법이 요구된다.

다매체 환경거동 예측 시 환경매체별 오염물질 농도를 직접 측정하려면 대부분의 경우 많은 비용과 시간이 소요되기에, 오염물질의 거동 및 특성을 평가하기 위한 수학적 모델 이용은 신속하고 경제적인 수 있다. 또한 향후에 나타날 수 있는 새로운 유해화학물질이 환경 영향과 위해성을 미리 예측할 수 있는 가능성을 제공해준다는 점에서 사전예방의 원칙에 부합되는 환경관리 수단을 확보할 수 있게 된다(Shin *et al.*, 2004).

2.3 다매체 거동모델의 일반적 사항

다매체 거동모델은 특히 환경 잔류성이 강하고, 국가 간 장거리 이동을 하거나, 환경매체에서 오랫동안 축적되는 특성을 가진 미량 유해물질의 거동 연구에 많이 활용되고 있다. 이와 같은 모델링을 통한 모사과정을 통해 유해오염물질의 매체별 이동기작과 주요 영향 인자를 파악할 수 있으며, 오염물질의 배출 양태와 각 환경매체에서의 농도 분포 상황에 대한 물질 흐름과 인과관계를 이해할 수 있다.

지금까지 개발된 다매체 거동모델의 종류는 여러 가지 측면에서 분류된다. 일반적으로 모델에 포함된 기작의 범위에 따라서 ‘기작 모델’과 이보다는 단순한 형태의 ‘평가모델’로 구분할 수 있다(Wania and Mackay, 2000). 또한 적용 대상지역

의 규모에 따라 ‘국지적 규모 모델’과 ‘광역적 규모 모델’, 그리고 ‘지구적 규모 모델’ 등으로 나눌 수 있다. 또한 다매체 거동모델은 오염물질의 거동기술방식에 따라 크게 ‘물질수지 모델’과 ‘fugacity 모델’로 나눌 수 있다(Wania and Mackay, 2000). 이들 모델들은 시스템 내 변화과정에서 시간 변동성(혹은 의존성)을 고려하는 수준에 따라 Level I에서 Level IV까지 구분할 수 있다(OECD, 2004). 즉, 다매체 거동모델에서 다루는 오염물의 변화 및 이동의 고려범위 및 정상·비정상상태 등에 따라 단계별로 나뉜다.

주로 환경매체는 크게 대기·수체·토양·퇴적물의 4개의 환경매체로 구성되며, 식생을 추가하거나, 모델의 공간규모, 토지이용도 등에 따라 대기, 수체 혹은 토양 공간이 보다 세분화 되는 추세이다. 모델 내에서 각 환경매체는 몇 개의 부매체로 구성되며, 일반적으로 대기에서는 가스상-입자상, 수체에서는 용존상-부유고형상, 토양은 토양입자-간극수-토양공기, 퇴적물은 간극수-퇴적물입자 등으로 세분화된다(Mackay *et al.*, 2001).

다매체 거동모델이 포함되는 매체 내, 매체 간 거동기작의 종류는 모델의 종류에 따라 매우 다양하다. 매체 내 거동기작으로는 이류, 확산, 분해, 반응 등을 포함한다. 매체 간 거동기작에는 분해, 이동(건식침적, 습식침적, 휘발), 흡·탈착 등을 포함한다(Mackay *et al.*, 2001).

3. 연구 방법

기후변화에 대응하기 위해서는 대상지역의 규모, 기후, 지형 등에 적합한 다매체 거동모델을 통하여 미래의 화학물질 거동과 분포에 미치는 기후변화 영향을 예측하여 기후변화 대응 및 화학물질 관리 대책 마련에 있어 과학적 근거를 제시하여야 할 것이다. 본 연구에서는 기존 연구를 통해 정확성이 검증된 다매체 거동모델을 문헌 분석하였고, 화학물질 거동 및 분포 예측에 사용되는 모델을 14개 선정하였다. 선정된 다매체 모델에 대하여 모델의 구동 특징, 적용지역 규모 및 분석 대상물질 등의 측면에서 분석하고, 입력자료 확보 가능성과 기후변화 영향 고려 여부에 따라 국내 도시·산단에 대한 모델의 적용 가능성을 검토하고, 기존 모델의 한계점을 바탕으로 대안을 제시하고자 하였다(Fig. 1).

4. 결과 및 고찰

4.1 모델 구성면 의미

본 연구에서는 다양한 다매체 모델 중 대표적으로 활용

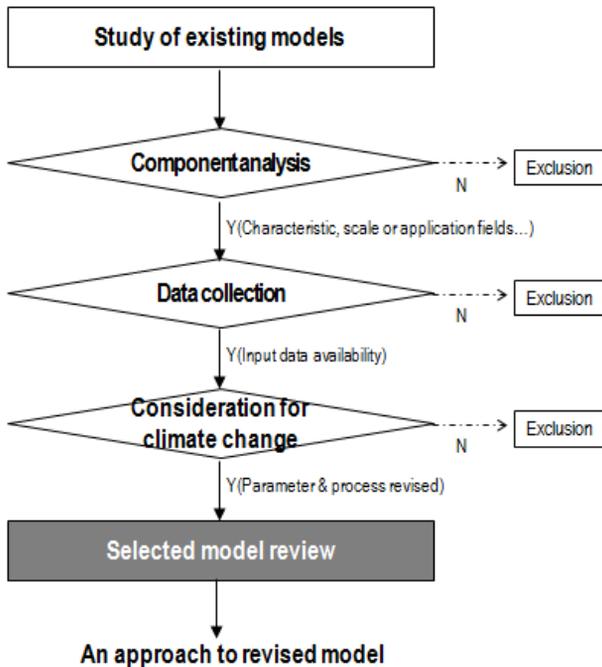


Fig. 1. Scheme for analysing models.

되고 있는 14개의 모델을 비교하였다(Table 1). 물질 거동 방식별로 구축된 모델의 수를 분석한 결과, 물질수지 모델 10개, 퓨가시티 모델은 2개로 나타났다. 모델들의 수량 예측의 지리적 규모는 지역규모 8개와 국가규모가 3개가 있었으며, 전지구모형이 3개로 나타났다. 대부분의 모델에서 화학물질의 일반적 다매체 거동을 모두 포함하고 있으며, 일부 모델은 위해성 평가에 널리 사용되고 있다.

4.2 모델 특징 및 활용분야

CALTOX은 오염된 토양 및 공기, 수체 퇴적물, 지하수의 오염에 따른 인체 위해도를 평가하기 위한 목적으로, 유해화학물질의 물리화학적 특성이나 혹은 지역적 특성이 오염물질의 환경 중 이동경로 및 중국적인 농도 분포를 계산할 뿐 아니라, 인체에 어떤 영향(노출량)을 미치는지 정량적으로 평가하는데 널리 사용된다(McKone *et al.*, 2002).

ChemCAN은 캐나다의 24개 지역을 대상으로 화학물질의 다매체 거동을 예측하고, 인체노출을 평가할 수 있도록 1991년에 개발된 광역규모의 정상상태 Level III 모델이다(Webster *et al.*, 2003).

CoZmo-POP 모델은 특별히 장기간에 걸친 POPs의 대기 및 토양 배출원 사이를 구분하기 위해서, 해양 해안선 또는 큰 호수에 해당하는 유역에서 잔류성 유기오염물질(POP)의 장기 거

동을 연구하는데 목적을 두고 개발되었다. 이 모델은 퓨가시티 접근에 기초한 비정상상태 균형 모델로 수체의 공간 분해능의 관점에서 사용자에게 상당한 유연성을 허용한다(Choi, 2008).

ECO2는 국내 주요 도시 및 공단지역 12곳을 대상으로 유해화학물질의 다매체 거동 및 인체 위해도를 평가하기 위하여 개발된 물질수지 방정식에 기초한 다매체 거동모델로 방향족 탄화수소(PAHs) 이외에 휘발성 유기화합물(VOCs)에 대해서도 모델링이 가능하도록 개발되었다. 5개의 주매체에는 서울 지역의 환경특성을 고려한 매체별 면적 및 용적 등의 공간 환경에 대한 자료가 입력되며, 기상 및 기후 조건은 계절적 변동성을 고려하여 조사된 통계치가 입력된다(Shin *et al.*, 2004).

EDCSeoul은 내분비계 장애물질의 다매체 환경 중 거동특성에 대한 종합적이고 보편적인 이해를 돕기 위하여 개발된 비정상 상태 다매체 거동모델로, 매체 내 기작과 매체 간 기작을 포함하는 물질수지 식을 세워 매체별 오염물질의 시간적 농도 변화의 예측이 가능하다(Shin *et al.*, 2004).

EQC은 EU 및 미국과 일본 등 대다수의 나라들에 의해 사용되고 있는 다매체 환경거동 예측 모델로서, 신규 및 기존화학물질의 환경에서 안정성, 환경거동 및 배출결과에 대한 잠재적인 영향을 평가하고, 환경위해성 평가를 수행하기 위하여 환경거동 평가가 이용되고 있다. 특히, 한 화학물질이 다수의 매체로 동시에 배출되거나, 또는 한 매체로 배출된 후에 다른 매체로 이동하여 전체 환경에서의 화학물질거동 연구에 많이 이용되고 있으며, 적은 입력 자료를 이용하여 간편히 이용할 수 있다는 점이 특징이다(Shin *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2003).

EUSES Local 모델은 EU 국가들이 1990년 신규 화학물질의 위해성 평가에 관한 일반 원칙과 절차에 관한 문서를 채택한 것을 계기로 네덜란드에서는 신규화학물질, 농약, 살생물제 등의 위해성 평가를 위한 시스템으로써 개발되었다. 특정 장소나 지역의 상황에 따라 입력변수들을 조정하여 사용할 수 있도록 설계되었다. 화학물질의 인체 및 환경에 대한 잠재적인 위해성을 평가함으로써 정부, 연구기관, 산업체 등의 위해성 관리자들에게 의사결정을 위한 정보를 제공하는데 활용되고 있다(Lijzen *et al.*, 2004).

GlobeTox 네덜란드의 의사결정시스템인 targets를 구성하는 한 부분으로 SimpleBox를 기본모델로 하여 개발된 전지구 규모의 다매체 거동모델로 시간에 따른 환경 매체 별 농도변화 추이를 모델링할 수 있고, 온도 등의 모델 입력변수들의 변화에 따른 모델 예측치의 영향을 파악 가능하다(Verbruggen *et al.*, 1997).

Globo-POP은 대기 중 POPs에 대한 산림필터 효과를 평가하는데 사용되었다. 본 모델의 공간해상도는 일반적인 기후

Table 1. Characteristics of chemical fate model

Model	Characteristic	Type	Area	Scale	Sustance
CalTOX	To calculate the concentration and eventual migration path of the contaminant distribution in the environment, and be utilized for the risk assessment for the humnan body on the basis of chemical and physical characteristics of hazardous chemicals, as well as regional feather.	Level III model	California	R	TCE, PCE, Titume, PAHs
ChemCAN	To predict a multi-media behavior of the target chemicals in Canada and evaluate the human exposure, regarding a spatial target as one of the countries.	Level III model	Canada	R	a-HCH, Atrazine, B[a]P, Chlordane, Chlorobenzene, Hexachlorobenzene, LAS, Benzo(a)pyrene, pp-DDT, PCB52, TCE, etc
Cozmo-POP	To study behavior of PCBs in a domestic environment, and be applicable to various regions around the world adding brackish zone, offshore, and the pelagic to basically targeted terrestrial environment.	Level IV fugacity model	Urban areas	L	PCBs
ECO2	Similar to POPsME in terms of principles and structure of the model, it is to evaluate a multi-media behavior and human health hazard of chemicals in domestic major cities and industrial areas targeted on the basis of material balance equations.	Level IV model	Urban areas/watershed	L	PAHs, VOCs, OCIs, PCBs, Alkylphenols, Phthalates
EDCSeoul	To study the environmental behavior of Endocrine disrupting chemicals(EDCs).	Level IV model	South Korea/watershed	L	Alkylphenols, Phthalates, Ocls, PCBs, PAHs
EQC	To compare between chemicals, and evaluate the behavior of the new and existing chemicals (with only a small input data).	Level I, II, III model	Virtual environments	-	Existing and new chemical substances
EUSES	To do site-specific assessment and human exposure assessment via the environment, food and consumption of products.	Level III model	Europe	N	New chemicals, pesticides, biocides, etc.
GlobeTox	To identify concentration trends by environmental media and the impact of changes in model input parameters over time.	Global model	Global	G	DDT, PCB, DEHP, Pb
Globo-POP	Developed based on SimpleBox as a part of the primary targets, the Dutch decision-making system, it is to predict concentration trends over time by medium and identify the impact of the model forecasts due to changes in input parameters.	Non-steady state nested model (fugacity model)	Global	G	a-HCH, PCBs
KoEFT-PBTs	To reflect the meterological and geographical characteristics in the entire area simultaneously, simulate the environmental fate of organic pollutants, and identify the spatial and temporal variability of contaminants at the same time.	Non-steady state model	South Korea	R	PCDDs./DFs, PAHs
KPOP-CC	To forecast the concentration of the chemical in accordance with changes in the weather factor such as temperature, short-wave solar radiation, wind speed and direction, and precipitation patterns etc by reflecting the conditions of climate change.	Non-steady state model	South Korea	R	VOCs, PHAs, PCDDs./DFs

Table 1. Continued

Model	Characteristic	Type	Area	Scale	Sustance
POPsME	POPs long distance prediction	Level IV model	Seoul/Kyeonggi-do	R	PAHs, PCBs, Phthalates, PCDD/Fs
SimpleBox	To review the media-specific EQO set to be harmonized with each other by predicting the concentration ratio between the media and take advantage of the prediction and evaluation of the chemical's concentration in the local environment.	Level III, IV model	Netherlands/Global	G/C/R	VOCs, DEHP, DBP, Cd, Cu
TRIM.Fate	To predict environmental concentration of the contaminants in the medium that are required for human exposure and risk assessment.	Dynamic mass balance model	United States	N	VOCs, PAHs, Hg

* Level I (equilibrium, steady), Level II (equilibrium, non-steady), Level III (non-equilibrium, steady), Level IV (non-equilibrium, non-steady).

** G (global), C (continental), N (national), R (regional), L (local).

모델과 비교하여 매우 낮은 수준이다. 그러므로 이 모델은 측정값과의 비교를 위한 정량적인 연구로는, POPs의 전 지구적 분포경향과 거동에 영향을 미치는 환경인자들을 파악하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 전 지구적 다매체 환경모델의 특징은 POPs 배출량 자료의 한계에서 주로 기인한다. 고해상도 공간에서 전 지구적 배출 인벤토리가 작성된 POPs의 예가 매우 드물며, 다양한 환경인자들의 신뢰성 있는 데이터베이스가 구축되어 있지 않다(Choi *et al.*, 2008).

KoEFT-PBTs 모델은 남한 전역을 대상으로 국내의 지형특성 및 기상조건을 동시에 반영할 수 있는 지역규모 다매체 모형으로, 유기오염물질의 환경거동을 모사하며, 남한을 대상 공간으로 하는 비정상모형으로 오염물의 시공간적 변이를 전국 규모로 동시에 파악할 수 있다(Lee, 2005).

POPsME는 최근 30년 동안의 급격한 산업화가 이루어진 수도권 지역을 대상으로 PAHs 등 POPs의 환경중 거동을 예측하고자 개발된 비정상상태 모델이다. POPs의 장거리 이동과 장시간 동안 환경 내에 머무르면서 축적되는 특성을 잘 반영한 모델이라고 할 수 있다(Lee, 1999).

SimpleBox는 매체 간 농도비를 예측하여 대기, 수체, 토양, 퇴적물 등 매체별 서로 조화되게 설정되었는지 검토하고, 지역 환경 중 화학물질들의 농도를 예측하여 대상 화학물질에 대한 평가가 이루어질 수 있도록 하기 위한 목적으로 개발되었다. 주요한 입력 값은 환경조건, 화학물질의 물성, 그리고 배출량으로 모형은 지역규모, 국가규모, 전지구 규모 각각의 대기, 수체, 저질, 식생, 그리고 토양 개별 매질에서의 화학물질의 정상상태의 농도 값으로 출력한다(Park *et al.*, 2011; Struijs *et al.*, 2002).

TRIM.Fate 모델은 다매체 환경과 생물체에서 오염물질의 농도 분포를 예측하는 다매체 거동모델이며, TRIM.Expo는 다매체 환경에서 인체 노출, TRIM.Risk는 인체의 다매체 노출 경로 및 노출량 정보로부터 위험정도 및 생태계 위해도를 알아내기 위한 모델이다. 유기화합물 이외에도 수은과 무기화합물의 거동 예측에도 사용할 수 있도록 알고리즘이 추가되었다(Shin *et al.*, 2004).

4.3 모델 입출력 인자

다매체 거동모델을 실행하기 위해선 모델의 각 수식에 포함된 변수 값을 지정해 주어야 한다. 문헌자료를 근거로 Table 2 및 Table 3과 같이 입출력 인자를 비교분석하였다. 그 결과, 모형의 주요한 입력 자료는 크게 대상지역의 기상자료, 지역환경자료, 대상물질의 물리·화학적 특성 자료 및 배출량 자료 등으로 구분되고(Table 2), 기상 특성인자로는 기온, 풍속, 습도 등이 포함되어 있고, 10개 모델에서 사용된다. 물리·화학적 특성 값으로는 대표적으로 대상물질의 옥탄올-물 분배계수, 증기압, 헨리상수 등이 포함된다. 이는 14개 모델 중 7개 모델에 사용하는 것으로 나타났다. 매체 특성인자로는 토양공극률, 토양 유기물 함량, 수체속도, 수체중 부유고형물 농도 등이 포함된다. 출력인자로는 개별 환경매질 내에서 화학물질 농도 값과 시간에 따른 농도 변화를 쉽게 파악할 수 있다(Table 3).

4.4 입력자료 확보가능성

환경오염 물질의 잔류성과 이동범위는 다중매질 내에서 의 대상물질의 물리·화학적 성질, 화학반응, 전달현상 및 매질

Table 2. Input factor of models

Model	Input factors
CalTOX	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : average annual rainfall, average annual wind speed, air temperature · Environmental data : runoff, soil infiltration, groundwater recharge, groundwater depth, amount of sediment, soil apparent density, porosity, moisture content, weathering speed, depth of root area, dry deposition velocity, and mixing height, etc. · Physical-chemical properties : molecular weight, melting point, vapor pressure, water solubility, Henry's law constant, octanol-water partition coefficient(Kow), sorption coefficient, mass transfer and diffusion coefficient
ChemCAN	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : temperature, rainfall · Topographical data : total surface area, total area of region · Environmental data : mean depth of the soil, deposits and the coast, length of the coastline, width of the coast, subcompartment's volume fraction and density, residence time, organic carbon content of a mass fraction, fish and plants liquid content of the mass fraction · Physical-chemical properties : emissions, solids-water partition coefficient, transfer coefficient
Cozmo-POP	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : temperature, soil surface temperature, wind speed, precipitation · Topographical data : Land use fact heet · Environmental data : precipitation evaporation rate by media, deposition rates · Physical-chemical properties : partition coefficient, monthly average concentrations of atmospheric OH
ECO2	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : monthly statistic considering the seasonal variability · Topographical data : topography, soil, road networks, rivers, land use, administrative district · Physical-chemical properties : molecular weight, vapor pressure, octanol-water partition coefficient(Kow), diffusion rate, the decomposition rate constant, emissions
EDCSeoul	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : wind direction, wind speed, precipitation, cloud cover, the intensity of light · Topographical data : basin area, land use, land pibokdo, topographic maps, digital elevation data · Environmental data : water depth, flow rate, flow rate, porosity, inlet concentration of mercury, PH, DOC, DOM, SS etc. · Physical-chemical properties : reaction rate constant, the moving speed constant between the medium
EQC	<ul style="list-style-type: none"> · Physical-chemical properties : temperature, molecular weight, melting point, boiling point, vapor pressure, vapor density, water solubility, Henry's law constant, half-life, octanol-water partition coefficient(Kow), distribution coefficient, emisson rate
EUSES	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : wind direction, wind speed, precipitation · Topographical data : land area(excluding or include the sea), the area ratio(water, natural soil, agricultural, urban areas) · Physical-chemical properties : molecular weight, melting point, boiling point, vapor pressure, water solubility, Henry's constant, octanol-water partition coefficient(Kow), characteristics of raw resolution, the specific degradation rate constant of OH, emissions
GlobeTox	<ul style="list-style-type: none"> · Physical-chemical properties : molecular weight, Henry's law constant, vapour pressure, solubility, melting point, degradation, heat of vaporisation/heat of solution, octanol-water partition coefficient(Kow), emission scenarios
Globo-POP	<ul style="list-style-type: none"> · Physical-chemical properties : half-life, partition coefficients, energy of phase transfer, vapor-OH reaction rate
KoEFT-PBTs	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : temperature, soil surface temperature, wind speed and precipitation · Environmental data : land cover change, advection in air, wet deposition from air to the surface beneath, velocity of soil leaching, organic carbon fraciton in natural solids, porosity, rates of sediment settling and re-suspension, burial rate, photolysis rate, biodegradation · Physical-chemical properties : Henry's Law constants, vapor pressure, octanol-water partition coefficient(Kow), mass transfer coefficient
KPOP-CC	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : rainfall, precipitation frequency · Topographical data : land cover, land slope, length of slope, soil properties · Environmental data : organic matter content of the soil, soil-soil particle distribution balance function, etc. · Physical-chemical properties : total suspended pending deals(TSP) and the vapor pressure, solubility, etc.

Table 2. Continued

Model	Input factors
POPsME	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : temperature, wind speed, and mixing height · Topographical data : land use, the particle size distribution data · Environmental data : velocity of river and the lake, concentration of the water body, organic matter content of the water body, depth, bed slope · Physical-chemical properties : molecular weight, vapor pressure, Henry's constant, octanol-water partition coefficient(Kow), dissociation constant
TRIM.Fate	<ul style="list-style-type: none"> · Meteorological data : wind direction, wind speed, precipitation, cloud cover, the intensity of light · Topographical data : land use, land coverage, topography, elevation levels · Environmental data : porosity, depth, flow rate, basin area, the mercury inlet concentration, PH, DOC, DOM, SS, water temperature, tide level, water density, cloud water content, diffusivity in air, diffusivity in water, settling velocity, resuspension velocity, etc. · Physical-chemical properties : Henry's law constant(Kow), partition coefficient

Table 3. Output factor of models

Model	Output factors
CalTOX	Each media-specific amount of substance, concentration, material distribution
ChemCAN	Partition coefficient, residence time, the concentration and amount of each medium
Cozmo-POP	Concentration prediction in the environment
ECO2	Density calculation in each medium
EDCSeoul	Concentration prediction by media
EQC	Prediction of environmental distribution
EUSES	Concentration predicted by media in each scale
GlobeTox	Concentration change of the chemical over time
Globo-POP	Pollution trends and distribution by environmental media
KoEFT-PBTs	Prediction of of environmental concentration and distribution
KPOP-CC	Prediction of pollutant's concentration change
POPsME	The amount of contaminants in the medium inlet or outlet
TRIM.Fate	Concentration prediction by media

간의 분배(partitioning) 등에 복합적으로 관계되며, 이들 특성은 오염 물질의 배출지점 분포, 배출빈도 및 지속시간과 같은 배출 특성과 계절에 따른 기온 및 강수량의 변화와 같은 기후 특성에 의해서도 영향을 받는다. 따라서 다중매질 내에서 오염물질 거동을 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 설정함에 있어 상기와 같은 영향인자들이 종합적으로 고려되어야 한다.

이러한 입력 인자와 다중매질 내에서의 이동특성 및 반응 특성에 대한 자료를 근거로 모델 구축이 가능한 요소를 도출하였다. 그 결과, 우리나라(해역 포함) 전역(Continental)과 대

상지역(Regional), 해당지역(Local)에 위치한 사업장에 대한 지역특성값 및 기상인자는 국내 국토해양부, 기상청, 환경부 등 기관에서 확보하며, 국내의 지역환경 정보는 기본적으로 행정 구역 단위로 제공되므로, 이를 소유역별 및 격자별 환경 및 기타 정보로 전환하는 과정이 요구되는데, 이를 효과적으로 수행하기 위해 지리정보체계를 활용할 수 있다. 지리정보체계의 활용에 필요한 기본도에는 지형도와 토양도, 도로망도, 하천도, 토지이용도, 행정구역이 포함된다. 한편, 강수량, 대기 중 분진농도 등의 기상 및 환경 인자에 대해서는 계절적 변동이

크므로 월별 통계치를 활용하여 조사하게 된다.

다매체 모형의 거동 특성 값들을 추정하는데 필요한 물리·화학적 특성에 대한 자료는 일부를 제외하고, 대부분 U.S. ATSDR(Agency for Toxic Substances and Disease Registry), UNEP Screening Information Datasets for High Volume Chemicals, European Union Risk Assessment Report 등에서 확보 가능한 인자로 분석되었다. 이는 기후변화에 따른 화학물질 거동 예측을 위한 다매체 지역모델의 구축에 있어 기초적인 자료로 제공될 수 있는 것으로 예상된다.

4.5 기후변화 영향 고려

앞에서 언급된 대부분의 모델에는 환경거동 및 위해성 평가 과정에서 환경인자들이 고려되어 이미 다양한 환경인자 값들이 들어있지만, 기후변화 특성에 대한 고려는 부족하다. 기후변화 영향을 반영하여 모형에서 보완이 필요한 파라미터 및 처리과정으로는 태양 단파복사, 기온, 풍속 등의 영향을 반영한 혼합고, 수평 및 수직 난류 확산 과정과 강우 유출에 강수 패턴, 증발량 변화를 반영하여 토양에서 수체로의 오염물 이동 과정이 있다. 또한, 강수 세기, 지속기간 변화에 따라 유역이 반응하도록 하여 토사 유출 등 기상 극값을 모사하거나, 분석 물질에 따라 처리과정에 온도 영향을 반영한 히드록시칼 농도나 헨리상수 및 대기 습도에 의한 영향을 반영한 특성을 사용할 수 있다(Table 4).

4.6. 도시·산단지역 구동가능모델의 분석 결과와 문제점

국내의 화학물질의 환경 중 동태에 미치는 기후변화 영향에 대한 연구와 기후변화가 주요 대도시 및 산업단지 대상 오염물질의 매체 간 이동특성에 끼치는 변화에 대한 탐구사례들을 토대로 모델의 적용결과와 한계점을 살펴보았다.

Oh(2013)은 CoZmo-POP 모델을 이용하여 기후변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 파악하였다. 이 연구에 따르면, 기후변화에 의한 POPs 거동은 화학물질의 물리화학적 특성과 기상 현상에 의해 복잡한 양상을 보이는 것으로 조사되었다. 예를 들어, 대기의 경우에는 많은 경우, 기온이 증가할수록 지표매체에서의 휘발이 증가하여 대기 농도가 증가하는 경향을 보였다. 그러나 입자상에 많이 존재하는 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)의 경우에는 오히려 강수량의 증가로 인한 습식침적으로 인해 담수와 토양으로 더 많이 유입되었고, 토양에 유입된 POPs는 강수량 증가로 인한 토양유출이 증가하여 담수에 더 많이 유입될 수 있다고 나타났다. 그러나 물질별로 지

Table 4. Process and parameter to account for climate change

Climate change impact	Process and parameter
Temperature effect	Henry's law constants
	Vapor pressure
	Octanol-water partitioning coefficient(Kow)
	Gas-atmospheric particle partition coefficient
	Dissolved -suspended solids partition coefficient
	Air-soil partition coefficient
	Partition coefficient between plant tissue and gas
	Partition coefficient between sediment particle and water
	Mass transfer coefficient (in combination with wind)
	Reaction with OH radical for gas-phase PAHs in air
Wind effect	Photolysis rate in air, water, soil and sediment
	Air-water mass transfer coefficient
	Air-soil mass transfer coefficient
Rain effect	Advection in air
	Wet deposition from air to the surfaces beneath
	Velocity of soil leaching
	Wet interception fraction by leaf surfaces
	Wash-off of PAHs from leaf surfaces to soil

Ref: Cai J.J. 2013. Assessment of the impacts of climate change on the contamination levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in multi-media environments, South Korea. Dissertation. Seoul National University.

표환경매체에서의 대기 중으로의 휘발, 습식침적, 토양 유출의 강도가 상이해 기후변화의 영향을 일반화하기는 매우 어려운 것으로 나타났고, 이에 보다 다양한 물질과 환경조건에서의 확대 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Lee(2005)이 남한지역을 대상으로 기후변화가 환경 중에서 배출된 PAHs의 농도 수준과 환경 거동에 미치는 영향 평가를 위해 KoEFT-PBTs 모형을 사용한 연구에서 모든 지역에서 기후변화를 반영하지 않은 시나리오(NCC) 대비 A1B 시나리오 연평균 농도비가 대기, 토양, 수체 내에서 두 배 이내로 변화되었다. 특히, 기상 인자 중 온도의 변화보다는 풍속이나 강우 변화에 따른 농도비의 상관관계가 더 강하게 나타났다.

Lee et al.(2004)은 시간에 따른 오염물질의 변화를 설명하

Table 5. Description of models applied to industrial region

Model	Description	Application fields
CoZmo-POP (Oh, 2013)	A non-steady state balance model based on a fugacity approach to target terrestrial environment, being applied in various regions around the world including brackish, coastal and ocean area.	To distinguish between the atmosphere and soil emission sources of POPs over a long period of time and study the long-term behavior of POPs in the watershed for large marine shoreline or the lakes.
KoEFT-PBTs (Lee, 2005; Lee <i>et al.</i> , 2004)	A regional scale non-steady state model to reflect the meteorological and geographical feature throughout South Korea at the same time, simulate the behavior of the organic pollutants in the environment, and determine the spatial and temporal variation of the contaminants at the same time.	To evaluate climate change impact on the behavior and concentration levels of PAHs emissions in the environment, targeting South Korea.
KPOP-CC (Jang, 2013)	A non-steady state model to predict the concentration of the chemical according to changes in the weather factor such as temperature, short-wave solar radiation, wind speed and direction, precipitation patterns considering climate change.	To track changes in the dynamics of pollutants caused by climate change.

는 비정상상태 오염물질의 분배, 이동, 제거기작을 포함하는 물질수지모델로서 KoEFT-PBTs 모형을 적용하여 전국 주요 대도시 및 산업단지 지역에 대한 PAHs 16종, VOCs 12종에 대해 오염물질의 노출량과 매체 간 이동량을 평가하였다. 그 결과, 지역의 농도 결과와 매질의 농도 분포 변이는 물질에 따라 차이를 보였고, 물질의 매질별 분포의 경우 토양이 다른 매질에 비해 높은 농도를 나타냈다. 이 연구에서 각 지역과 매질에 상관없이 예측농도가 실측농도보다 작게 예측되었는데, 배출량 산정 시 사용한 배출 계수가 미국 및 유럽 등 외국자료를 그대로 차용해 우리나라 실정에 적합한지 여부를 평가할 수 없어 상당한 불확실성을 내포하는 요인이 되었다. 따라서 향후 모형의 향상된 예측력을 위해서는 배출량 추정에 있어서, 특히 오염원이 밀집되어 있는 지역을 대상으로 할 때, 충분한 해상도의 배출량 데이터 확보가 필요하다.

Jang(2013)은 KPOP-CC 모델을 적용하여 물리·화학적 성질이 다른 VOCs와 다이옥신류화합물(PCDDs/DFs)을 대상으로 기후변화 영향에 따라 나타나는 환경 중 동태 차이를 비교 평가하였다. 그 결과, 기후변화에 따른 VOCs의 대기 농도비는 바람에 의한 제거의 증가로 감소하고, PCDDs/DFs의 경우 강수 빈도의 증가로 인해 대기에서 하부 매질로의 이동을 증가시켜 감소하였다. 그러나 이 연구에서는 서울 지역을 포함하는 하나의 격자를 대상으로 3시간별 기상자료를 월평균 한 농도 값을 주로 사용하였는데, 시간해상도를 달리해 오염물의 환경 중 노출영향을 보다 정확히 분석할 필요가 있다. 또한, 화학물질의 환경 중 동태는 물성 및 기상인자 변화의 영향 뿐 아니라, 배출량의 크기, 분석 지역의 자체 배출량과 외부 지역 배출의 유무와 배출량 정도에 따른 영향을 동시에 받는다. 따라

서 향후 환경 중에 오염물이 배출될 때 다양한 배출조건에 따라 기후변화 영향이 환경 중 동태에 어떠한 변화와 차이를 일으키는지에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

4.7 도시·산단 적용 다매체 모형을 위한 접근방법

다매체 모형과 관련된 소프트웨어들은 GIS 기술, IT 기술의 접목을 통해 국가 정책적으로 시스템화되어 가고 있으며, 이를 지역 환경의 오염물질 관리의 의사결정지원 시스템으로 발전시켜가고 있다. 특히, 선진국의 경우, 화학물질의 환경 중 관리를 위한 법적, 제도적 근거가 이미 마련되어 있는 상황에서 이를 범용화하고 효율적으로 시스템을 개선하기 위한 노력이 활발히 진행 중에 있다. 최근 IT 기술의 발전으로 오염도 예측모형에 대한 연구가 다양하게 시도되고 있는데, 선진국에서 개발된 모델 및 프로그램들은 국내 현실에 직접 이용하기에 어려움이 많다.

앞에서 언급된 대부분의 모델에는 환경거동 및 위해성 평가 과정에서 환경인자들이 고려되어 이미 다양한 환경인자 값들이 들어있지만, 기후변화 특성에 대한 고려는 부족하다. 또한, 환경 중에 오염물이 배출될 때 물성 및 기상인자 변화의 영향 뿐 아니라, 다양한 배출조건에 따른 영향 등 파악이 복잡하고, 모형의 검증 및 유용성을 평가하는 과정에서 사용하는 배출 계수는 대부분 외국 자료를 그대로 이용하고 있어 우리나라 실정에 적합한지 여부를 평가하기 어렵다.

따라서, 주요 도시 및 산단 지역에 범용적으로 적용 가능한 모델 구축 시 공간(환경)-기상-물성 특성 등을 입력 파라미터로 하는 구성요소를 포함하고, 배출량, 다중 매질 내에서 오염물질 이동 및 배출특성과 기후변화에 따른 양상을 종합적으로

고려하여야 한다. 또한, 시·공간적 확장이 손쉬운 구조로 시·공간 해상도의 변형이 유연하도록 입력 자료가 구축이 되면 지역환경조건에 따라 다양한 분석물질을 대상으로 연구를 진행할 수 있어 화학물질 거동 예측이 유리할 것으로 판단된다.

5. 결 론

화학물질 거동에 끼치는 기후변화의 영향이 분명해짐에 따라 환경재난 발생을 사전에 예측하고, 사고 발생 후 생명 및 환경상의 피해를 최소화하기 위해서는 화학물질 분포 예측에 보다 높은 정확성이 필요하다.

본 연구는 상대적으로 사고 발생이 취약한 산단 지역에 대한 기후변화 영향을 고려한 국내외 화학물질 다매체 거동모형들의 적용성을 목적으로 기존 연구를 통해 정확성이 검증된 다매체 모델들을 문헌 분석 후, 모델의 특징 및 입출력자료를 파악하였고, 이를 바탕으로 자료 확보 가능성과 기존 연구들의 한계점 그리고 도시·산단지역에 적용가능한 모델을 위한 접근방법을 제시하였다.

총 14가지 주요 다매체 모델의 활용분야, 입출력자료, 자료 확보 가능성 등을 면밀히 파악하였다. 먼저, 주요 모델들의 특징은 적용 규모, 모델 구동 특성, 분석 대상 물질 등의 요소로 정리되었다. 다매체 모델들의 입력 자료는 크게 공간(환경)자료, 기상자료, 물성자료 등으로 구분되며, 출력자료는 환경 중 분포 예측을 기본으로 시간에 따른 농도 변화에 대한 정보도 확인되었다.

국내외에서 기적용된 일부 다매체 모델의 연구에서는, 특정 지역과 물질을 대상으로 한 연구에 그치거나 입력 자료의 정확성 혹은 출력 결과의 신뢰성 등에 한계점을 발견하여, 실제 화학물질 관리 및 기후변화 대응 정책 결정과정에 범용적으로 활용하기에는 보완할 부분이 많다.

기후변화에 따른 다매체 거동모형의 적용성을 높이기 위해서는 다음 사항이 고려되어야 한다.

첫째, 오염도의 변화에 대한 기후변화 영향을 정확하게 예측할 수 있는 수단을 확보하고, 오염도의 증가가 발생하는 조건을 분석하여 사전에 예측할 수 있는 체계를 구축해야 한다.

둘째, GIS 기술을 접목해 화학물질 분포를 예측할 수 있어야 한다.

셋째, 공간(환경)-기상-물성 특징을 비롯해 배출량과 환경매체에서의 이동 및 분포 특성과 기온, 풍속, 강수 패턴과 증발량의 변화, 강수 세기 및 지속시간 등 기후변화의 영향을 종합적으로 고려한 입력 파라미터를 구성 요소로 하고, 시·공간적 확장성이 고려된 구조를 가지고 있어야 한다.

넷째, 구축된 모델의 결과 값을 해석할 수 있는 신뢰성 있는 실측치를 확보해 비교 검증하여야 한다. 특히 기상 및 배출량 자료 등의 입력 자료의 경우 체계적 데이터 확보가 요구된다.

화학물질 분포와 확산에 기후변화 영향에 대한 고려가 불가피하고, 연이은 화학사고에 따른 안전기준 강화로 화학물질 관리에 있어 새로운 국면을 맞이할 국내 상황을 고려할 때, 본 연구의 수행은 시의 적절하였다고 판단된다. 본 연구를 통해 제시된 결과가 국내 도시·산단지역의 기후변화에 따른 화학물질거동 예측을 위한 다매체 환경거동모델의 도시·산단지역 적용과 도시·산단지역 모형 개발의 기초자료로 활용되고, 기후변화 적응을 위한 화학물질 관리 대책 마련에 활용될 수 있기를 기대한다.

REFERENCES

- Brandes LJ, den Hollander H, van de Meent D. 1996. Simple-Box 2.0: A nested multimedia fate model for evaluating the environmental fate of chemicals. National Institute for Public Health and the Environment(RIVM).
- Cai JJ. 2013. Assessment of the impacts of climate change on the contamination levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in multi-media environments, South Korea. Dissertation, Seoul National University
- Choi SD, Jang YS. 2008. Global fate of persistent organic pollutants: Multimedia environmental modeling and model improvement. Journal of the Korean Society of Oceanography 12(1):24-31.
- Choi SD. 2008. Prediction of concentrations and congener patterns of polychlorinated biphenyls in Korea using historical emission data and a multimedia environmental model. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 24(2):249-258.
- Jang LA. 2013. Assessment of climate change impacts on multimedia distribution of PCDDs/DFs and VOCs. Seoul National University.
- Kim MK, Bae HK, Song SH, Koo HJ, Kim HM, Choi KS, Jeon SH, Lee MS. 2005. Estimation of multimedia environmental distribution for benzoyl peroxide using EQC model. Journal of the Korean Society Environmental Engineers 27(10):1090-1098.
- Lee YA. 2005. Regional scale assessment of environmental fate and transport of dioxins by a multimedia model(Ko-

- EFT-PBTs). Dissertation, Seoul National University.
- Lee YA. 1999. Fate and transport of dioxin as predicted by a multimedia model in Seoul metropolitan area. Dissertation, Seoul National University.
- Lijzen J, Rikken M. 2004. European union system for the evaluation of substances 2.0(EUSES 2.0) background report. National Institute for Public Health and the Environment(RIVM).
- Mackay D, Webster E, Cousins I, Cahill T, Foster K, Gouin T. 2001. An introduction to multimedia model. Canadian Environmental Modelling Centre(CEMC).
- McKone TE, Enoch KG. 2002. A multimedia total exposure model spreadsheet user's guide version 4.0. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Noyes P, McElwee M, Miller H, Cark B, Van Tiem L, Walcott K, Erwin K, Levina E. 2009. The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. *Environment International* 35:971-986.
- OECD. 2004. Guidance document on the use of multimedia models for estimating overall environmental persistence and long-range transport. OECD series on testing and assessment no.45.
- Oh JE. 2013. Prediction of the fate of persistent organic pollutants by climate change (POPs) influenced. Busan National University.
- Park JK, Seo YW. 2011. Chemical risk management in a climate change. Korea Environment Institute.
- Shin YS, Lee DS, Koo HJ. 2004. Multimedia environmental quality criteria for the integrated environmental management of hazardous chemicals. Korea Environment Institute.
- Struijs J, Peijnenburg W. 2002. Predictions by the multimedia environmental fate model SimpleBox compared to field data: Intermedia concentration ratios of two phthalate esters. National Institute for Public Health and the Environment(RIVM).
- Verbruggen E, Bensen A, Hollander A. 1997. GLOBETOX Modelling the global fate of micropollutants. National Institute for Public Health and the Environment(RIVM).
- Wania F, Mackay D. 2000. The global distribution model: A non-steady state multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants in the global environment. University of Toronto at Scarborough.
- Webster E, Mackay D, Hubbarde J. 2003. Development of tools to improve exposure estimation for use in ecological risk assessments using ChemCAN. Canadian Environmental Modelling Centre(CEMC).