

배출량산정모델과 다중매질모델링을 이용한 환경오염물질의 노출평가 및 위해도 평가

김종호 · 곽병규 · 신치범* · 전원진* · 이종협†

서울대학교 화학생물공학부
151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1
*아주대학교 화학공학과
433-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지
(2009년 2월 21일 접수, 2009년 3월 11일 채택)

Prediction of Exposure and Risks of Environmental Pollutants via Emission Assessment and Multimedia Transport Modeling

Jong Ho Kim, Byoung Kyu Kwak, Chee Burm Shin*, Won Jin Jeon* and Jongheop Yi†

Chemical & Biological Engineering, Seoul National University, San 56-1, Sillim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-742, Korea
*Department of Chemical Engineering, Ajou University, Wonchen-dong, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 433-749, Korea
(Received 21 February 2009; accepted 11 March 2009)

요 약

본 연구에서는 배출량산정모델과 다중매질모델을 활용하여 환경오염물질의 노출도를 예측하였으며 위해도를 평가하였다. 연구대상 화학물질로써 8종(아세트알데히드(acetaldehyde), 아크릴로니트릴(acrylonitrile), 아닐린(aniline), 벤젠(benzene), 사염화탄소(carbon tetrachloride), 디클로로메탄(dichloromethane), 포름알데히드(formaldehyde), 염화비닐(vinyl chloride))의 물질을 선택하였으며, 대상지역은 공단지역을 포함하는 도심 지역을 선택하였다. 배출량은 지리지형정보를 활용하여 점배출원과 비점배출원을 동시에 고려하여 산정하였으며, 다중매질모델은 지역적 특성을 반영할 수 있는 모델을 선택하였다. 유해성 자료는 미국 환경청의 IRIS(Integrated Risk Information System) 유해성 데이터베이스를 활용하였다. 모델링 자료와 유해성 자료를 이용하여 위해성을 평가한 결과, 물질별로 위해도가 높은 지역을 발견할 수 있었으며 우선적으로 관리해야 할 물질을 선별할 수 있었다.

Abstract – In this paper, human exposure and risk of environmental pollutants were predicted using an emission assessment model and multimedia fate model. Eight environmental pollutants, acetaldehyde, acrylonitrile, aniline, benzene, carbon tetrachloride, dichloromethane, formaldehyde and vinyl chloride, were selected for the risk assessment in an urban and industrial area in Korea. The emission rate of target pollutants were estimated after considering a variety of point and non-point emission sources including geographical information. A spatially refined multimedia fate model was applied to predict the environmental concentration and fate of pollutants. Hazard data of target materials were obtained from the IRIS(Integrated Risk Information System) database. Using the modeling results with hazard data, the human risks were assessed. Modeling results demonstrate that the considerable risks were observed for several pollutants.

Key words: Environmental Modeling, Exposure, Fugacity, Hazard, Risk, Simulation

1. 서 론

화학 산업의 발달에 따라 인류는 편의를 제공받고 경제적인 풍요로움을 누리게 되었으나, 유해한 화학물질로 인하여 다양한 위해 가능성에 노출되게 되었다. 위해로부터 국민을 보호하기 위해, 세계 각국은 법적·제도적 장치를 마련하고, 화학물질로 인한 위해도(Risk)

를 관리하고자 노력하고 있다. 우리나라 정부도 1990년 8월 1일 유해화학물질관리법을 제정하고, 다양한 화학물질의 등록·허가제도를 바탕으로 유해성(hazard)을 판단하고 있으며, 배출량보고제도 및 유통조사제도 등을 통하여 화학물질의 사용 및 배출 실태에 대한 정보를 축적하여 왔다. 그러나 축적된 다양한 정보를 활용하여 실질적인 관리·규제 방법을 도출하기까지는 어려움이 따른다. 특정 화학물질을 관리·규제한다는 것은 상당한 경제적·사회적 노력이 필요한 일이며, 정량적인 위해도를 먼저 판단해야만 적합한 관리·규제 방법을 이끌어 낼 수 있기 때문이다.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jyi@snu.ac.kr

*이 논문은 서울대학교 최창균 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

화학물질의 위험도를 판단하기 위해서는 정량적인 유해성자료와 함께 노출도(Exposure) 자료(또는 환경 중 농도자료)도 확보되어야 한다[1]. 특정한 화학물질이 어디서 배출되어 어떠한 경로를 거쳐 사람에게 어느 정도 노출되는지를 파악하는 일은 매우 중요한 일이다. 화학물질의 노출도를 평가하는 방법은 실측(Observation)하는 방법과 모델링(Modeling)하는 방법으로 나눌 수 있다. 실측하는 방법은 현재의 노출도를 판단하는데 가장 정확한 방법이 될 수 있으나, 이는 실측자료가 신뢰성을 얻을 수 있을 만큼 많은 양이 확보되어야 한다는 전제가 우선된다. 국내에서 제조·수입·유통되고 있는 다양한 화학물질에 대해서 모두 실측한다는 것은 상당한 경제적 부담이 있는 일이며, 현실적으로 불가능에 가깝다. 또한 특정장소에서의 실측자료만으로는 배출원(Emission Source)과의 인과관계를 파악하기 어려우며, 환경 중 화학물질은 대부분 낮은 농도로 존재하므로 실측자체가 불가능한 경우도 많다. 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안이 모델링을 이용한 방법이다. 모델링을 활용하여 일차적인 선별(Screening) 작업을 실시하면 위해 우려가 있는 물질을 먼저 추려낼 수 있으므로, 추려진 물질에 한하여 추가적인 모니터링이나 세부적인 평가를 실시하여 위해 물질을 효과적으로 관리할 수 있다. 모델링은 다양한 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 배출량산정모델(Emission Assessment Model)과 다중매질모델(Multimedia Fate Model)을 활용하였다.

배출량 산정은 특정지역의 통계적 데이터를 바탕으로 산정되므로, 통계 데이터의 일관성을 유지하기 용이한 국가 수준에서 산정되며, 국가별로 산정방법이 다르다[2-4]. 최근 다양한 국가의 다양한 연구자들이 다양한 물질에 대한 배출량 산정 연구를 진행하였다[5-10]. 우리나라도 1998년 이후 배출량보고제도를 시행하여 현재 2,892개 회사 388종 물질에 대한 TRI(Toxic Release Inventory) 자료가 축적되어 점배출원(Point Source)의 배출량 산정이 가능하다[11]. 또한 화학물질유통량[12], 도로통행현황[13, 14], 에너지 사용현황[15] 등에 대한 다양한 데이터베이스가 구축되어 있어 비점배출원(Non-point Source)에 대한 배출량 평가가 가능한 기초자료들이 있으며, 이를 바탕으로 2002년 이후로는 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소, VOCs(Volatile Organic Compounds), 먼지 등에 관한 비점배출량을 산정하고 있다[16]. 최근에는 GIS(Geographical Information System)를 기반으로 각 물질별 - 물질군(VOCs, PAHs 등)이 아닌 - 배출량을 산정하려는 연구가 진행되었다[17,18].

다중매질모델은 배출된 화학물질이 다양한 환경매질에서 이동, 축적, 소멸, 반응하는 양상을 예측하는데 활용할 수 있는 모델이다. 박스모델(Box Model)을 기반으로 한 다중매질모델이 Mackay에 의해서 제시된 후[19], 다양한 다중매질모델이 개발되고 활용되어

왔다[20-26]. 박스모델은 지리·지형적 차이에 따른 농도차이를 계산할 수 없는 모델로, 대략적인 농도수준을 확인하기에 적합한 모델이다. 이러한 한계점을 극복하고자 최근에는 국가 또는 지역 수준의 단위에서 농도 차이를 확인할 수 있는 다양한 다중매질모델(BTER, CHEMGL, G-CIEMS, GEFM 등)이 개발되었으며[27-32], 국소지역의 농도변화를 파악할 수 있는 LSRMF(Multimedia Fate Model) 모델이 개발되었다[33].

본 연구에서는 GIS 기반의 물질별 배출량 산정방법과, 관련 데이터베이스를 활용하여, 국내에서 제조·수입·유통되고 있는 8종의 화학물질을 대상으로 배출량을 산정하였다. 산정된 배출량을 LSRMF 모델의 입력자료로 활용하여 특정 지점에서의 대기, 수계, 토양, 퇴적층, 유기층과 식생에서의 농도를 계산하였다. 계산된 농도를 바탕으로 인체노출도를 계산하였으며, 각 물질의 유해특성과 결합하여 위험도를 산출하였다. 계산된 위험도를 바탕으로 각 물질의 관리우선순위(Priority)를 선별하였고, 물질별 관리방안을 도출하였다.

2. 대상물질 및 지역

2-1. 물질선정 및 유해성 자료

본 연구에서는 배출량보고제도를 통하여 국가기관에서 보고받고 있는 배출 물질 388종 중, 위해가 우려되는 발암 물질을 선별한 후, 미국환경청(United States Environmental Protection Agency)의 IRIS(Integrated Risk Assessment System)[34]에서 유해성 - 단위위해도(Unit Risk)로 표현됨 - 데이터를 검색할 수 있는 물질을 선별하였다. 선별된 물질의 종류, 단위위해도와 물질별로 발현될 수 있는 종양의 종류를 Table 1에 나타내었다. 노출경로에 따라 흡입(Inhalation)과 경구섭취(Ingestion) 위험도 두 가지 모두를 정리하였다. 두 가지 노출경로에 따른 단위위해도 중 한가지가 없을 경우, 물질별 경로에 따른 흡수율을 - 예를들어 벤젠의 흡입흡수율은 50%, 경구 흡수율은 100%로 추정한다 - 고려하고, 미국환경청에서 기준으로 하고 있는 표준체중 70 kg과 표준공기흡입률 20 m³·day를 적용하여 흡입과 경구 위험도 상호간의 단위위해도를 환산하였다. 벤젠의 경우 단위위해도 자료가 특정 숫자가 아닌 영역으로 정의되었다. 대부분 많은 양의 유해성 자료가 주어질 경우 그 중에서 가장 유해도가 높게 나타난 실험자료를 사용하게 된다. 본 연구에서도 벤젠의 단위위해도 범위 중, 최고값을 사용하였다. 경피접촉(Dermal)을 통한 단위위해도 자료는 데이터베이스에 존재하지 않아, 경구섭취 단위위해도 값과 동일하다고 가정하였다.

Table 1. Unit risks and tumor types of target materials

Material	Unit risk by exposure pathway		Tumor type
	Inhalation(m ³ /μg)	Ingestion(kg·day/mg)	
Aniline	1.63E-6	5.7E-3	Spleen, combined fibrosarcoma, stromal sarcoma, capsular sarcoma and hemangiosarcoma
Acetaldehyde	2.2E-6	7.7E-3	Nasal squamous cell carcinoma or adenocarcinoma
Acrylonitrile	6.8E-5	5.4E-1	Respiratory cancer
Benzene	2.2E-6~7.8E-6	1.5E-2~5.5E-2	Leukemia
Carbon tetrachloride	1.5E-5	1.3E-1	Hepatocellular carcinomas/hepatomas
Dichloromethane	4.7E-7	7.5E-3	Hepatocellular adenomas or carcinomas (NTP) and hepatocellular
Formaldehyde	1.3E-5	4.6E-2	Squamous cell carcinoma
Vinyl chloride	4.4E-6	7.2E-1	Liver angiosarcomas, angiomas, hepatomas, and neoplastic nodules

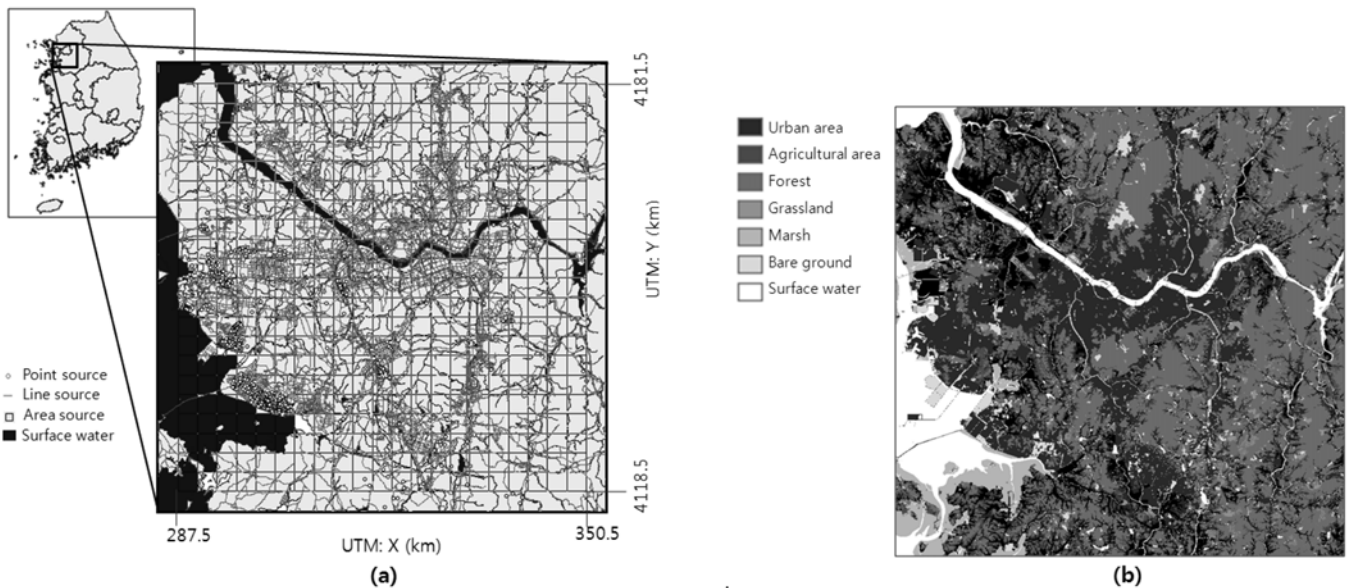


Fig. 1. Simulation area (a) and landuse (b).

2-2. 대상지역

Fig. 1에 모델링을 위한 대상지역과 토지피복지도를 나타내었다. Fig. 1(a)에 대상지역의 좌표범위가 표시되어 있다. 좌표체계는 UTM(Universal Transverse Mercator) 52 N 좌표체계를 사용하였으며, X 축으로 287.5~250.5 km; Y축으로 4,118.5~4,181.5 km의 지역을 대상으로 하였다. 이 지역은 2천만여 명의 인구가 살고 있는 지역으로, 도심지역과 농업지역, 공단지역을 함께 포함하고 있으며, 산, 숲, 강, 바다 등 다양한 환경매질이 혼합되어 있는 곳이다. 다양한 배출원과 다양한 환경매질 존재하는 지역으로 다중매질모델을 활용한 위해성 평가가 필요한 지역이라 할 수 있다. 모델링을 위한 지역적 해상도는 대상지역을 441개의 격자로 나누어 3 km×3 km로 하였다.

3. 모델이론 및 적용방법

3-1. 배출량산정모델

배출량을 계산하기 위한 일반적인 방법은 식 1과 같이 배출량 활동도(Activity)에 배출계수(Emission Factor)를 곱하여 산정한다[18]. 활동도는 특정한 물질을 제조, 수입, 사용 및 유통하는 양(Mass)을 뜻하며, 배출계수란 각 배출원에서 특정물질이 활동도에 비례하여 배출되는 양의 비율(Ratio)을 뜻한다.

$$\text{배출량} = \text{활동도} \times \text{배출계수} \quad (1)$$

배출원은 대부분 점배출원과 비점배출원으로 분류한다. 비점배출원은 또한 지리적 특성에 따라 선배출원과 면배출원으로 분류된다. Fig. 1에 대상지역에 포함된 점, 선 및 면배출원이 표시되어 있으며, Table 2에 배출원의 지리적 특성에 따른 각 배출원의 분류와, 활동도, 배출계수의 출처를 나타내었다. 본 연구에서는 5개의 대분류와 12개의 세부분류로 나누어 배출량을 산정하였다.

배출량 산정자료는 점, 선, 면배출원의 형태를 띄므로, 지리지형

정보역시 벡터(Vector) 형의 자료(점, 선, 면)를 사용하였다. 그러나 모델에 사용될 자료는 격자(Raster or Grid) 형 자료이기 때문에, 벡터형 자료를 격자형 자료로 변환하는 공간할당(Spatial Allocation) 과정이 필요하다[35]. 공간할당과정은 자료 형태의 변환 효과도 있지만, 지리적 해상도를 높일 수 있는 장점도 가지고 있다. 점 및 선 배출원은 지리적 위치가 실제 배출되는 위치와 동일하지만, 면배출원은 행정구역별로 산정이 되므로 실제 배출되는 위치와 비슷한 지리적 위치가 다르다. 면배출원의 공간할당시 특정지역의 인구수, 건축허가면적, 토지피복도를 고려하여 공간할당과정을 수행할 경우, 지리적위치가 보정되는 효과가 있다. Table 2에 공간할당 시 사용한 배출원별 공간할당요소가 정리되어 있다.

3-2. 다중매질모델

LSRMFM은 기존의 일반적인 다중매질모델에 지역적 차이를 계산할 수 있도록 삼차원으로 확대함과 동시에, 확산(Dispersion) 항을 포함하여 좁은 지역에 다중매질모델을 적용할 수 있도록 개선한 모델이다. 본 연구에서는 단기간의 노출에 따른 위험도보다는 장기간 노출에 따른 위험도를 평가하므로, 장기적인 예측이 가능하면서 계산시간이 비교적 짧은 정상상태(Steady-state) 모델을 사용하였다.

다중매질모델에서는 매질간의 이동량을 계산하기 위하여 열역학적 계수의 일종인 휘발성(Fugacity, f_L 과 $f_M(\text{Pa})$) 개념을 이용한다. L 매질에서의 농도 $C_L(\text{mol}/\text{m}^3)$ 은 L 매질에서의 휘발성 f_L 에 휘발성 수용력(Fugacity Capacity or Z Value, $Z_L(\text{mol}/\text{m}^3\text{Pa})$)을 곱하여 얻어진다. 휘발성 수용력은 '특정 환경매질에서 대상물질이 벗어나려고 하는 경향성'으로 정의할 수 있다[36].

$$C_L = f_L Z_L \quad (2)$$

LSRMFM은 이류, 확산, 생성, 소멸, 매질간 이동을 나타내는 항을 포함하고 있다. 각 매질에서의 휘발성을 계산하기 위한 지배방정식은 아래와 같다.

Table 2. Categories, activities, emission coefficients and spatial allocation factor by emission sources

Geographical Shapes	Categories of sources	Sub-categories of sources	Origin of activities	Origin of emission coefficients	Spatial allocation factors
Point	Industrial Installations	Facilities, Incinerators, Factories	Toxic Release Inventory (n)		
Line	Road	Major Roads, Minor road networks	Traffic census (a-e)	(j)	
	Trail	Network of railways	Amount of fuel consumption (f)	(k)	Railway network map
Polygon	Household	Domestic solvent use	Amount of product sales (g)	(l)	Population, Landuse
		Domestic fossil fuel consumption	Amount of fuel consumption (h)	(k)	Population, Landuse
		Solid waste	Amount of product sales and recovery (g)	(g)	Population, Landuse
	Small-sized enterprises and establishments	Coating/painting in the construction industry and other industries	Amount of product consumption (g)(g)		Workplace size, Population, Landuse
		Dry cleaning/cleaner	Amount of product consumption (g)(g)		Population, Landuse
		Retail fuel sales (gas stations)	Amount of fuel sales (i)	(l)	Population, Landuse
		Publishing/printing	Amount of product consumption (g) by company (g)		Population, Landuse
	Agriculture	Agricultural chemicals	Amount of agricultural product consumption (m)	(l)	Agricultural area

a) Korea Transport Database, <http://www.ktdb.go.kr>b) Traffic Monitoring System, <http://www.road.re.kr>c) National Transport Information Center, <http://road.moct.go.kr>d) Seoul Expressway Traffic Information, <http://www.smartway.seoul.kr/english/index.html>e) Seoul Beltway, <http://www.seoulbeltway.co.kr>f) Korea Railroad, <http://www.korail.com>g) Korea Chemicals Management Association, <http://www.kcma.or.kr>

h) Ministry of Knowledge Economy, Report on energy census (2006)

i) Korea Oil Station Association, <http://www.ikosa.or.kr>j) National Institute of Environmental Research, <http://www.nier.go.kr/>k) Australian National Pollutant Inventory, <http://www.npi.gov.au>l) Emission Inventory Improvement Program Document Series Volumes I-X (EPA-454/R-97-004); available at <http://www.epa.gov/ttn/chief/eiip/index.html>

m) Crop Protection Information Center, Agrochemical Year Book (2006)

n) Toxic Release Inventory, <http://tri.nier.go.kr>

$$\begin{aligned}
& \frac{-\frac{\partial u_L f_L}{\partial x} - \frac{\partial v_L f_L}{\partial y} - \frac{\partial w_L f_L}{\partial z}}{\text{Advection (Convection)}} + \frac{\frac{\partial}{\partial x} \left(Ex_L \frac{\partial f_L}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Ey_L \frac{\partial f_L}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(Ez_L \frac{\partial f_L}{\partial z} \right)}{\text{Dispersion}} \\
& + \frac{\frac{q_L}{Z_L}}{\text{Emission}} + \frac{\frac{\sum_{M=1}^N f_M D_{M,L} - f_L \sum_{M=1}^N D_{L,M}}{V_L Z_L}}{\text{Intercompartmental Transport and Degradation}} = 0
\end{aligned}
\quad (3)$$

여기에서, u_L, v_L, w_L (m/s)은 x, y, z 축 방향으로의 L 매질의 유속 (Velocity Component)이고, Ex_L, Ey_L, Ez_L (m²/s)은 확산계수(Dispersion Coefficient), V_L (m³)은 부피, q_L (mol/m³·s) L 매질로의 배출량, $D_{M,L}, D_{L,M}$ (mol/Pa·s) L 에서 M 매질로, M 에서 L 매질로의 이동속도(D value)를 뜻한다.

본 연구에서는 대기는 표층(Surface Layer)과 상층(Upper Layer)으로 나누어서 계산하고, 나머지 매질은 깊이를 고려하여 표층에서의 농도를 계산하였다. 각 매질에서의 유속과 확산계수는 측정자료를 바탕으로 추가적인 추산을 실시하여 확보하였다. 본 연구에서는 대기와 수계만을 이동하는 매질로 가정하였으며, 나머지 매질의 이류 및 확산은 고려하지 않았다. 대기에서의 유속과 확산계수는 지리지형정보(고도, 토지피복도)와 기상청의 기상측정자료[37] 바탕으로, Senfeld와 Pandis가 설명한 방법[38]을 활용하여, 층별 바람유속과 확산계수를 계산하였다. 수계에서의 유속은 수자원관리종합정보시스템의 실측자료[39]와 함께 ARCHYDRO 프로그램을[40, 41]을 활

용하여 계산하였으며, 확산계수는 실측자료를 바탕으로 Chapra가 설명한 방법[42]을 활용하여 산정하였다.

매질간 물질의 이동량은 플가시티 수용력과 매질간의 이동속도에 의해서 계산된다. 본 연구에서는 대기, 수계, 토양, 침전층, 유기막과 식생 여섯 가지 매질을 고려하였으며, 각 매질간 화학물질이 이동하도록 하는 요소로서, 분자확산(Diffusion), 강우(Rainfall or Washoff), 건식침착(Dry Deposition), 습식침착(Wet Deposition), 지표흐름(Runoff), 부유(Suspension), 양수(Uptake), 낙엽(Litter-fall), 매장(Burial) 등 다양한 현상을 고려하였다. 이 때 화학반응에 의한 대상물질의 매질별 소멸속도를 함께 고려하게 된다. Fig. 2에 대상물질의 매질간의 이동과 소멸에 대한 매커니즘(Mechanism)을 표시하였다. 각 매질의 플가시티 수용력을 추산하기 위해, 대기, 수계, 토양, 침전층의 경우는 Mackay가 제시한 방법[35]을 따랐으며, 유기막은 Priemer와 Diamond가 제시한 방법[43]을, 식생은 Trapp과 Matthies가 제시한 방법[44]을 채용하였다. 각 매질간의 이동속도를 추산하기 위해, 대기-수계, 대기-토양, 토양-수계와 수계-침전층의 이동 및 제거(반감기)는 Mackay의 방법[35]을, 대기-유기막과 유기막-물간의 이동은 Priemer와 Diamond가 제시한 방법을[42], 그리고 대기-식생과 토양-식생간의 이동은 Cousins와 Mackay[26]가 제시한 방법을 활용하였다.

본 연구에서 활용하는 모델은 정상상태 모델이나, 대기의 흐름은 시간이 변함에 따라 지속적으로 변하게 된다. 이를 고려하기 위하여 LSRMFModel에서는 풍향을 36개 방향으로 나누어 모델링을 실시

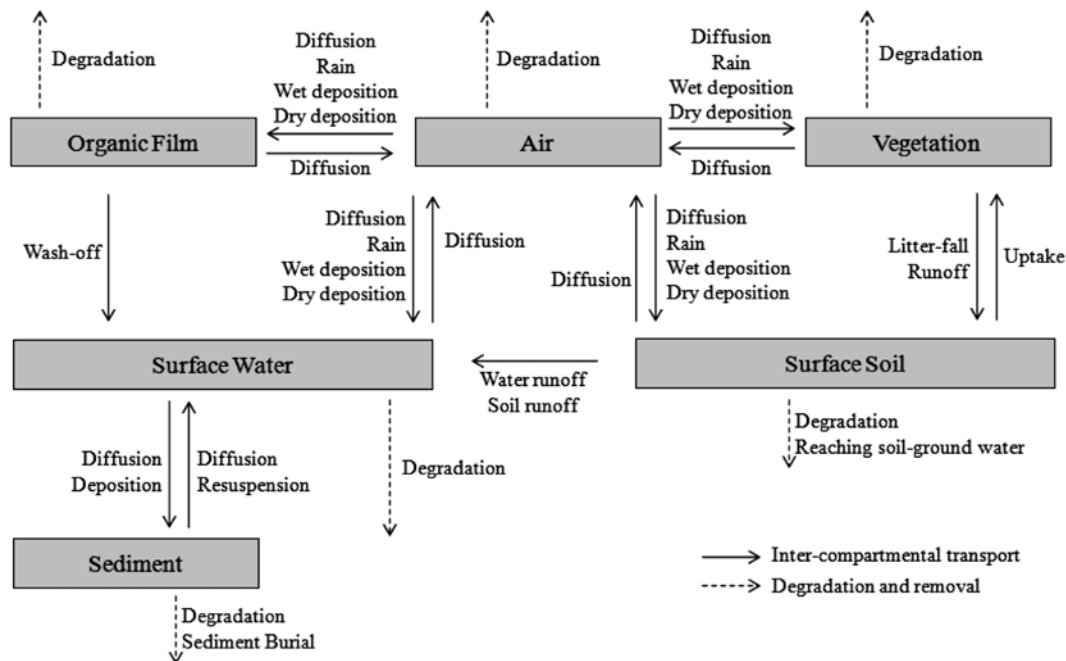


Fig. 2. Intercompartmental transport and removal processes among the six environmental compartments.

하고, 방향에 따라 계산된 퓨가시티에 풍향의 빈도수를 고려한 가 평균을 취하여 최종적인 결과값을 산출하게 된다.

3-3. 인체노출량 산정 및 위해도 평가

위해도는 유해성과 노출도의 함수로 설명된다. 본 연구의 범위에서 유해성이란 앞에서 제시한 IRIS의 단위위해도(Unit Risk, UR)를 뜻한다. 노출도는 각 환경 매질의 예측환경농도(Predicted Environment Concentration, PEC)를 다중매질모델을 활용하여 계산한 후, 흡입, 경구섭취, 경피접촉 등의 경로를 통해 인체에 노출되는 량을 산정하였다. 단위위해도와 노출농도를 계산하게 되면 둘을 곱하여 초과 발암위해도(Excess Cancer Risk, ECR)를 산출할 수 있다. 초과발암위해도란, 대상물질에 인체가 지속적으로 노출되었을 경우, 대상물질에 의하여 발현될 수 있는 추가적인 발암 위해의 가능성을 뜻한다. 본 연구에서는 흡입, 경구섭취, 경피접촉의 경로를 통하여 나타날 수 있는 초과발암위해도를 각각 계산하여 합산하는 방법으로 초과발암위해도를 산출하였다. 대상물질의 흡입 노출량은 다중매질모델로부터 계산된 대상물질의 농도를 그대로 활용하였다. 대기를 통한 흡입 초과발암위해도는 아래의 식을 사용하여 계산하였다.

$$ECR_{Ih} = UR_{Ih} \times C_{A,Ih} \quad (4)$$

여기에서 ECR_{Ih} 은 대기 중 오염물질의 흡입을 통한 초과발암위해도이고, $UR_{Ih}(m^3/\mu g)$ 은 단위위해도, $C_A(\mu g/m^3)$ 는 대기에서의 농도를 뜻한다. 경구섭취 및 경피접촉을 통한 노출량은, 토양의 섭취와 접촉으로 인한 노출량으로 계산하였으며, 수계를 통한 경구섭취 및 경피접촉은 배제하였다. 현실적으로 수계에 포함된 대상물질이 그대로 사람에게 노출되기 어려우며, 정수된 물을 마시거나 지하수를 마시게 되므로, 먹는 물을 통한 대상물질의 경구섭취량은 따로 계산되어야 할 것으로 판단된다. 토양 중 대상물질의 경구섭취 및 경피접촉을 통한 초과발암위해도는 다음과 같은 수식을 활용하여 계

산하였다.

$$ECR_{IgD} = UR_{IgD} \times (ADD_{S,Ig} + ADD_{S,D}) \quad (5)$$

여기에서 ECR_{IgD} 은 토양 내 오염물질의 경구섭취 및 경피접촉으로 인한 초과발암위해도이고, $UR_{IgD}(kg \cdot day/mg)$ 은 단위위해도, $ADD_{S,Ig}(mg/kg \cdot day)$ 와 $ADD_{S,D}(mg/kg \cdot day)$ 는 각각 경구섭취 및 경피접촉 노출도를 뜻한다. 경구섭취 및 경피접촉에 의한 노출도는 다음 식을 이용하여 계산된다.

$$ADD_{S,Ig} = \frac{C_s \times IR_s \times FI \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (6)$$

$$ADD_{S,D} = \frac{C_s \times SA \times AF \times ABSd \times ED}{BW \times AT} \quad (7)$$

여기에서 $C_s(mg/kg)$ 는 토양 중 대상물질의 농도를 뜻하고, $IR_s(kg/day)$ 는 토양섭취량(=1E-4), FI 는 섭취흡수계수(=1), $EF(day/year)$ 는 노출빈도(=365), $ED(year)$ 는 노출기간(=70), $BW(kg)$ 는 체중(=62), $AT(days)$ 는 평균노출기간(=28,900), $SA(m^2)$ 는 노출체표면적(=0.57), $AF(kg/m^2)$ 는 토양-피부간 흡착계수(=7E-8), $ABSd$ 는 피부 흡수계수(=0.5)를 뜻한다.

4. 결과 및 고찰

4-1. 배출량 산정 결과

Fig. 3에 대상지역의 물질별 배출량, 배출량분포도, 배출원별 배출 기여도를 나타내었다. 대상물질들의 경우 대부분의 배출경로가 대기로 배출되고 있으며, 수계나 토양으로 배출되는 양은 매우 적은 것으로 나타나있다. 대상물질 내에서 배출량이 많은 순서를 확인해보면, 포름알데히드(2,274 tons/yr)가 가장 많이 배출되고 있으며, 벤젠(950 tons/yr), 아세트알데히드(684 tons/yr), 디클로로메탄

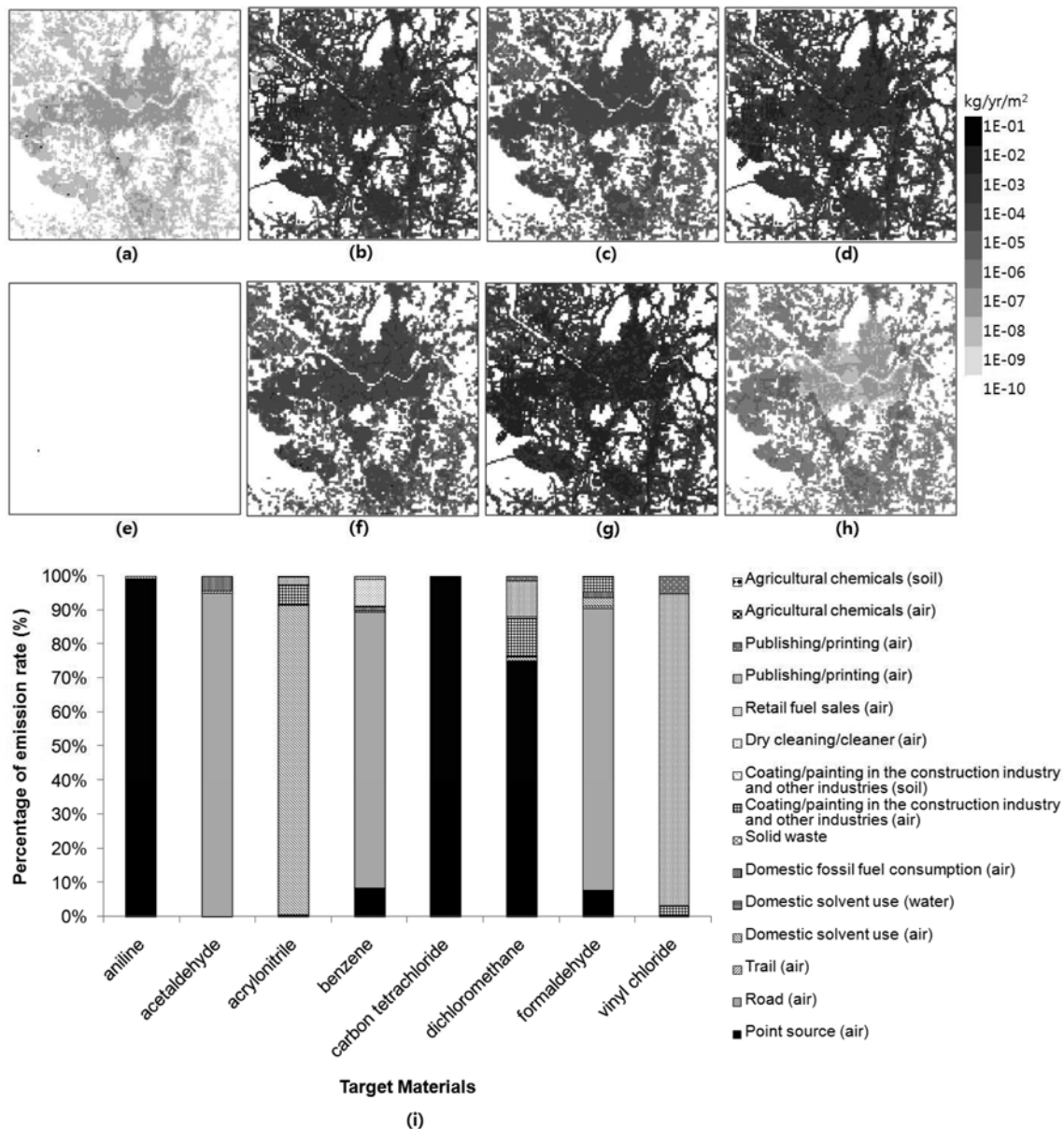


Fig. 3. Emission rates for aniline (a), acetaldehyde (b), acrylonitrile (c), benzene (d), carbon tetrachloride (e), dichloromethane (f), formaldehyde (g), vinyl chloride (h), and contribution of emission rate by source categories (i).

(199 tons/yr), 아크릴로니트릴(30 tons/yr), 아닐린(1.6 tons/yr) 순으로 배출되고 있다. 염화비닐과 사염화탄소는 1 tons/yr 이하로 소량 배출되고 있다. 배출원별 배출 기여도를 확인한 결과, 모든 물질이 농약사용이나 고형폐기물로 인한 배출량은 없는 것으로 나타나 있다. 아닐린, 사염화탄소, 디클로로메탄의 경우 점배출원의 배출기여도가 99%, 100%, 75%로 대부분 대형 산업체로부터 배출되고 있으며, 디클로로메탄의 경우 도장, 인쇄, 출판 관련업 등 소규모 산업체에서 22%를 배출하고 있다. 아세트알데히드, 벤젠, 포름알데히드의 주요 배출원은 도로상 이동배출원(각각 94%, 81%, 83%)이며, 벤젠과 포름알데히드의 경우 점배출원이 약 8%의 기여도를 가지고 있다. 대상물질을 배출하고 있는 배출원의 분포를 살펴보면, 점배출원은 대부분 대상지역 내 왼쪽 하단부근에 대부분 배치되어 있으며, 도로배출원은 대상지역의 중앙부근에 위치해 있고, 대상물질을 많이 배출하는 면배출원은 중앙 부분의 둘레에 주로 존재한다. 이는

대상지역의 왼쪽과 왼쪽하단이 공업단지로서 규모가 큰 사업체가 많은 지역이며, 중앙부근은 극 도심지역이고, 도심지역을 중심으로 주변지역에 거주인구가 많기 때문이다.

4-2. 다중매질모델링 결과

Fig. 4에 LSRMFM 모델을 실행하여 산출된 각 매질에서의 평균, 최대 및 최소농도를 나타내었다. 대기에서의 평균 농도는 대부분의 배출이 대기로 이루어지기 때문에, 배출량이 높은 순위에 비례하여 농도분포가 높게 나타나는 경향을 보인다. 그러나 다른 매질에서의 농도는 화학물질의 특성으로부터 기인하는 매질과의 친화력 차이로 인하여 다른 분포특성을 보여주고 있다. 대기, 수계, 침전층에서 가장 높은 농도를 나타내는 물질은 포름알데히드이지만, 토양과 유기층에서 가장 높은 농도를 나타내는 물질은 아세트알데히드이며, 식생에서 가장 높은 농도를 나타내는 물질은 벤젠이다. 지역적인 농도

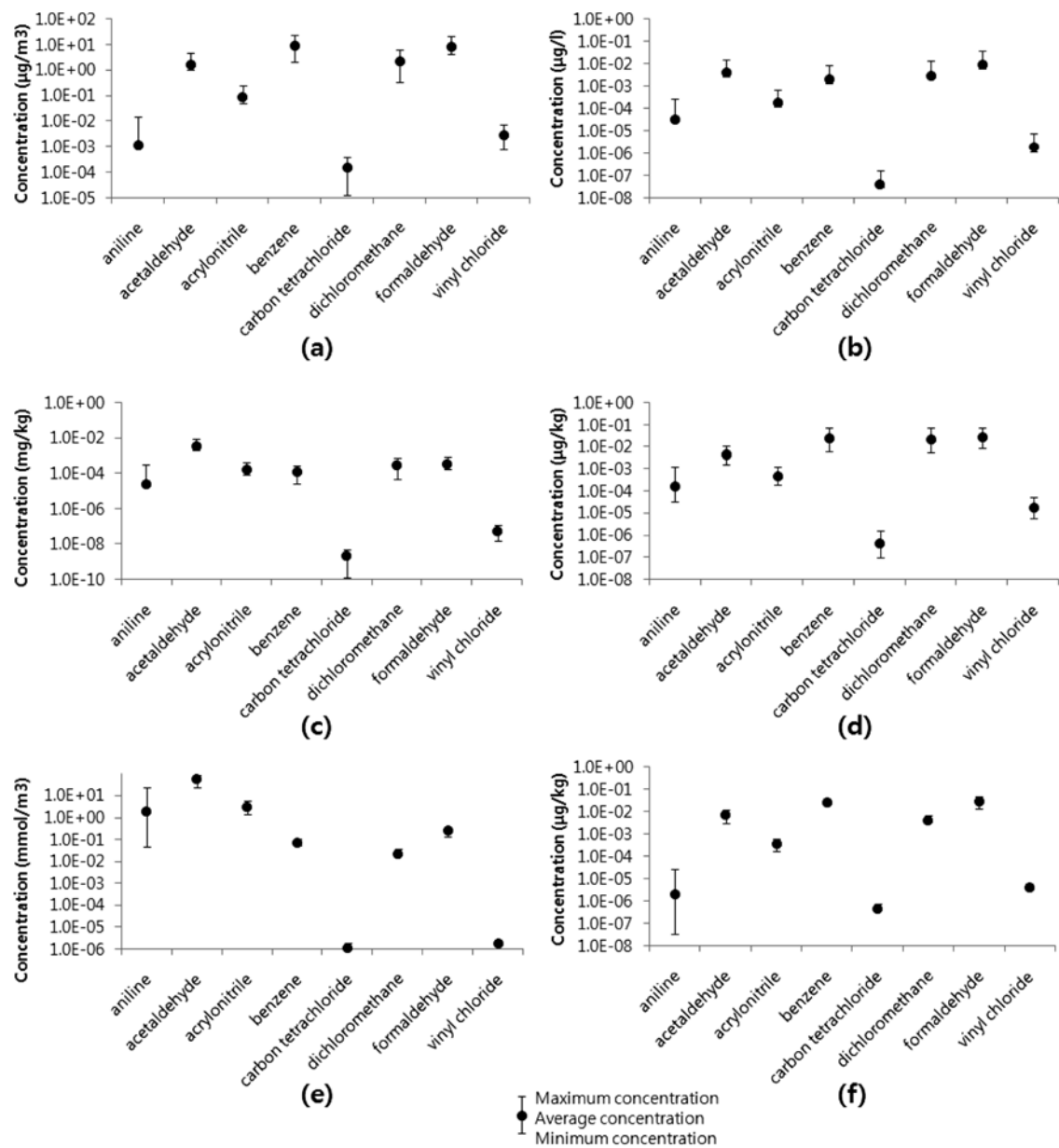


Fig. 4. Environmental concentrations of target materials by environmental compartments [(a) air, (b) water, (c) soil, (d) sediment, (e) organic film, (f) vegetation].

Table 3. Excess cancer risks of target materials

Priority		1	2	3	4	5	6	7	8
Materials		formaldehyde	benzene	acrylonitrile	acetaldehyde	dichloromethane	vinyl chloride	carbon tetrachloride	aniline
Excess Cancer Risk (Inhalation)	Ave.	1.06E-04	7.35E-05	6.20E-06	3.75E-06	1.09E-06	1.29E-08	2.39E-09	1.88E-09
	Max.	1.72E-04	1.06E-04	1.07E-05	6.40E-06	1.81E-06	1.84E-08	3.88E-09	2.21E-08
	Min.	5.20E-05	5.72E-05	2.81E-06	1.45E-06	9.24E-07	9.42E-09	2.20E-09	3.05E-11
Excess Cancer Risk (Ingestion)	Ave.	2.27E-11	8.64E-12	1.23E-10	3.75E-11	3.01E-12	5.01E-14	3.85E-16	1.89E-13
	Max.	3.28E-11	1.19E-11	2.19E-10	6.06E-11	4.64E-12	6.83E-14	5.56E-16	2.23E-12
	Min.	1.20E-11	6.62E-12	5.32E-11	1.51E-11	2.48E-12	3.38E-14	3.63E-16	4.75E-15
Excess Cancer Risk (Dermal)	Ave.	4.53E-15	1.72E-15	2.46E-14	7.46E-15	6.00E-16	9.97E-18	7.70E-20	3.76E-17
	Max.	6.56E-15	2.37E-15	4.38E-14	1.21E-14	9.25E-16	1.36E-17	1.11E-19	4.44E-16
	Min.	2.39E-15	1.32E-15	1.06E-14	3.01E-15	4.93E-16	6.73E-18	7.26E-20	9.46E-19
Excess Cancer Risk (Total)	Ave.	1.06E-04	7.35E-05	6.20E-06	3.75E-06	1.09E-06	1.29E-08	2.39E-09	1.88E-09
	Max.	1.72E-04	1.06E-04	1.07E-05	6.40E-06	1.81E-06	1.84E-08	3.88E-09	2.21E-08
	Min.	5.20E-05	5.72E-05	2.81E-06	1.45E-06	9.24E-07	9.42E-09	2.20E-09	3.05E-11

차를 살펴보면, 점배출원이 주요배출원인 경우 지역간의 농도차가 크게 나타나며(점배출원 주변지역에만 높은 농도를 보임), 선배출원이나 면배출원이 주요배출원인 경우 상대적으로 지역간 편차가 적은 경향성을 보인다. 이렇듯 배출원의 지역적인 위치 및 배출형태, 매질의 지역적인 특성, 대상물질의 물리화학적 특성에 따라 지역적 농도분포에 영향을 받게 된다.

4.3. 초과발암위해도

Table 3에 LSRMFM 전산모사 결과를 활용하여 계산한 초과발암위해도의 평균, 최대, 최소값을 평균이 가장 높은 순으로 나열 하였다. Table 3에 초과발암위해도가 10^{-6} 을 초과할 경우 굵은 글씨로 표시하였으며, 초과발암위해도가 10^{-5} 이상일 경우 굵은 글씨에 밑줄로 표시하였다. 초과발암위해도를 활용한 환경 개선(Remediation) 여부를 결정하는 명확한 규칙은 없으나, 대부분의 경우 10^{-6} 수준 이하의 위해도를 허용 가능한 수준의 위해도로 판단하고 있다. 우리나라의 경우 국립환경과학원 고시 제 2006-30호에 따르면[45], 초과발암위해도가 10^{-3} 이상이면 발암위해가 있다고 보며 10^{-6} 이하이면 무시할만한 수준으로 간주한다. 즉 10^{-6} 이상의 초과발암위해도가 있을 경우 발암위해가 무시할 수 없는 수준으로 간주되며, 환경에 대한 개선의 필요성이 있는 것으로 판단할 수 있다.

Table 3에서 나타나듯이, 대상물질에 대한 대부분의 위해도는, 흡입을 통한 노출에 의하여 발생됨을 알 수 있다. 대상물질은 휘발성이 강한 성분이 많으므로, 대기에 많은 양이 존재하기 때문인 것으로 판단된다. 포름알데히드와 벤젠의 경우 대부분의 지역에서 10^{-5} 대의 초과발암위해도를 나타내고 있으며, 지역에 따라 10^{-4} 수준의 초과발암위해도를 나타내고 있다. 아크릴로니트릴, 아세트알데히드의 경우는 10^{-6} 대의 초과발암위해도를 나타내고 있으며, 아크릴로니트릴의 경우 국지적으로 10^{-5} 수준의 위해도를 나타내는 지역이 있다. 이 4가지 물질은 발암위해를 무시할 수 없으며, 실측을 통한 상세한 위해성 평가 등 추가적인 발암위해도 평가를 실시하여 환경 개선활동이나 규제를 실시해야 하는 것으로 판단된다. 디클로로메탄의 경우는 10^{-6} 안팎의 결과를 보여주고 있다. 현재의 모델링 결과로는 디클로로메탄의 환경 규제여부를 결정하기 어려운 것으로 판단된다. 염화비닐, 시아놀화탄소, 아닐린의 경우는 10^{-7} 보다 적은 수준의 초과발암위해도를 나타내고 있어, 이 물질들에 대한 발암위해 확률은 매우 희박한 수준으로 판단된다.

Fig. 5는 초과발암위해도를 평가한 결과의 등고선 지도를 나타내고 있다. 초과발암위해도가 허용가능한 수준을 넘어서 포름알데히드, 벤젠, 아크릴로니트릴, 아세트알데히드, 디클로로메탄의 위해도 분포를 살펴보면, 포름알데히드와 벤젠의 경우 높은 위해도가 대상지역의 왼쪽편에서 나타나기는 하지만, 대상지역 전체에서 높은 수준의 위해도가 나타남을 알 수 있다. 아크릴로니트릴, 아세트알데히드의 경우 도심 지역에서 높은 위해도 결과를 보이고 있다. 디클로로메탄의 경우, 공단지역의 네 부분에서 높은 위해도 결과가 분포되어 있음을 알 수 있다. 이러한 분포결과는 배출원의 분포특성 때문이다. 포름알데히드, 벤젠과 아세트알데히드는 도로배출원이 주요 배출원이어서 대상지역 전체적으로 높은 위해도 분포가 형성되어 있지만, 포름알데히드와 벤젠의 경우 무시할 수 없는 수준의 점배출원 배출량(약 10%)이 공단지역(대상지역의 왼쪽 부근)에 분포되어 있으므로, 그림과 같은 분포특성이 나타나는 것으로 판단된다. 아크릴로니트릴의 경우 대부분의 배출이 가정용 용제 함유제품으로

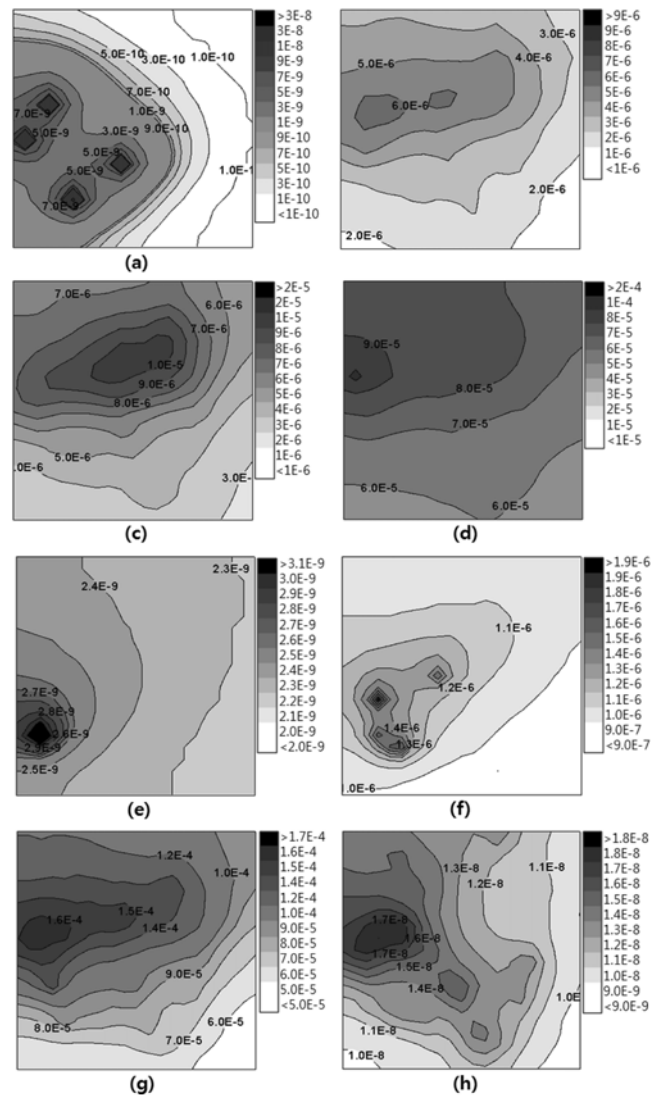


Fig. 5. Contour plots of excess cancer risks for aniline (a), acetaldehyde (b), acrylonitrile (c), benzene (d), carbon tetrachloride (e), dichloromethane (f), formaldehyde (g), vinyl chloride (h)

부터 기인하므로, 도심지역과 그 주변지역에 더 높은 위해도 분포를 나타내는 것으로 판단된다. 디클로로메탄의 경우, 점배출원으로부터의 배출이 대부분을 차지하고 있으며, 점배출원이 공단지역 네 부분에 집중되어 있기 때문에 높은 위해도가 공단지역에서 나타나는 것으로 보인다.

4.4. 환경 개선 우선순위 및 불확실성

계산된 초과발암위해도와 위해 확률의 순위(Table 3)를 살펴보면, 네 종의 물질(포름알데히드, 벤젠, 아크릴로니트릴, 아세트알데히드)에 대해서는 환경 개선의 필요성이 나타나있다. 주요배출원의 특성을 살펴보면, 아크릴로니트릴의 경우 가정용 제품의 용제로부터 배출되는 양이 많으므로, 가정용 용제 제품에 아크릴로니트릴의 함유량을 줄이는 등의 노력이 필요하다. 더욱이 가정용 용제의 경우, 밀폐된 공간인 실내에서 사용하고 있는 경우가 많으므로, 주변 대기환경으로 인하여 나타나는 위해성보다 더 클 가능성이 있는 것으로 판단된다. 포름알데히드, 벤젠과 아세트알데히드의 경

우 주요 배출원이 도로상 이동배출원이므로, 도로상 이동배출원에 의한 배출량을 줄이는 것이 안전한 것으로 판단된다. 그러나 현대인의 생활특성상 도로상 이동배출원에 의한 배출량을 단기간에 줄이는 것은 매우 어려운 과제로 생각된다. 이는 단기간의 개선방향을 찾기가 어려우므로, 장기적인 개선노력이 필요한 것으로 판단된다.

본 연구의 초과발암위해도는 전적으로 모델을 활용한 예측결과로부터 파생되었다. 모델의 정확도가 다양한 연구자들에 의하여 지속적으로 개선되어온 결과이기는 하지만, 아직 많은 불확실성이 내포되어 있다. 예를들면 배출량 산정 시, 제시된 배출원 이외에 더 많은 배출원이 존재할 수 있으며, 배출계수에 대한 불확실성은 매우 크므로, 실제 배출량은 계산된 배출량보다 많을 수도 적을 수도 있다. 다중매질모델의 경우, 모델링을 실시한 지역 외곽으로부터 유입된 물질의 양은 계산하지 않았으며, 환경에서의 화학반응은 모델에서 활용한 방법보다 더 복잡하게 일어나게 된다. 노출도 평가 시 본 연구에서는 대기와 토양을 통한 흡입, 경구섭취, 경피접촉 등의 경로만을 분석하였으나, 먹는 물이나 음식 등을 통하여 추가적으로 노출되는 양이 있을 수 있다. 이렇듯 다양한 불확실성이 있기에, 본 연구의 결과나 방법론은 위해 우려가 있는 물질을 선별하는데 활용하기를 권고하며, 더 명확한 결론을 얻기 위해서는 환경(대기, 수질, 토양 등) 실측 자료를 활용한 모델 결과와의 상호비교 분석, 인체(혈액, 소변 등) 실측을 통한 대사산물(metabolite) 파악 및 노출량 검증, 추가적인 경로를 통한 대상물질의 노출도 파악, 대상물질과 관련한 종양의 발현률을 확인할 수 있는 환자 데이터 등과의 상호분석 등, 추가적인 조사와 상세한 위해도 평가가 필요하다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내에서 제조·수입·유통되고 있는 주요 화학물질 중 8종을 선별, 모델링 기법을 활용하여 도심과 공단지역에 대한 환경농도 계산 및 위해도 평가를 실시하였다. 모델링은 배출량산정모델과 다중매질모델을 활용한 농도파악, 인체 노출량 추정, 초과발암위해도 평가의 순으로 수행하였다. 위해도 평가결과 네 종의 물질(포름알데히드, 벤젠, 아크릴로니트릴, 아세트알데히드)에 대한 위해가능성을 확인하였으며, 한 종의 물질(디클로로메탄)에 대해서는 위해가능성에 대한 결정을 하기 어려웠고, 세 종의 물질(아닐린, 사염화탄소, 염화비닐)에 대해서는 위해가능성이 매우 낮음을 확인할 수 있었다. 위해도 평가결과와 각 물질별 주요 배출원을 분석한 결과, 포름알데히드와 벤젠의 경우는 도로배출원과 점배출원, 아세트알데히드의 경우는 도로배출원, 아크릴로니트릴은 가정용 용제 제품에 대한 분석과 규제가 실시되어야, 환경개선이 이루어질 수 있을 것으로 분석되었다. 본 연구결과에서 제시된 방법을 활용하면 위해도를 선별할 수 있음을 확인하였고, 추가적인 위해도 분석이 실시되면 더 명확한 환경개선방법, 규제대상 등을 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 환경부의 차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)으로 지원받은 과제입니다.

참고문헌

- Allen, D. T. and Shonnard, D. R., *Green engineering - environmentally conscious design of chemical processes*, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ07458(2002).
- Symeonidis, P., Ziomas, I. and Proyou, A., "Development of An Emission Inventory System from Transport in Greece," *Environ. Modell. Softw.*, **19**, 413(2004).
- Pai, P., Niemi, D. and Powers, B., "A North American Inventory of Anthropogenic Mercury Emissions," *Fuel Process. Technol.*, **65-66**, 101(2000).
- Zhihui, W., Yuhua, B. and Shuyu, Z., "A Biogenic Volatile Organic Compounds Emission Inventory for Beijing," *Atmos. Environ.*, **37**, 3771 (2003).
- Baldasano, J. M., Guereca, L. P., Lopez, E., Gasso, S. and Jimenez-Guerrero, P., "Development of a High-resolution (1 km × 1 km, 1 h) Emission Model for Spain: the High-Effective Resolution Modelling Emission System (HERMES)," *Atmos. Environ.*, **42**, 7215(2008).
- Buzcu-Guven, B. and Fraser, M. P., "Comparison of VOC Emissions Inventory Data with Source Apportionment Results for Houston, TX," *Atmos. Environ.*, **42**, 5032(2008).
- Kim, N. T., Martel, O. M., Pongkiatkul, P. and Berkowicz, R., "Determination of Fleet Hourly Emission and On-road Vehicle Emission Factor Using Integrated Monitoring and Modeling Approach," *Atmos. Res.*, **89**, 223(2008).
- Prish, D. D., "Critical Evaluation of US On-road Vehicle Emission Inventories," *Atmos. Environ.*, **40**, 2288(2006).
- Skjoth, C. A., Geels, C., Hvidberg, M., Hertel, O., Brandt, J., Frohn, L. M., Hansen, K. M., Hedegard, G. B., Christensen, J. H. and Moseholm, L., "An Inventory of Tree Species in Europe-An Essential Data Input for Air Pollution Modeling," *Ecol. Model.*, **217**, 292(2008).
- Wang, H., Chen, C., Huang, C. and Fu, L., "On-road Vehicle Emission Inventory and Its Uncertainty Analysis for Shanghai, China," *Sci. Tot. Environ.*, **398**, 60(2008).
- Toxic Release Inventory Support System, <http://tri.nier.go.kr>.
- Korea Chemicals Management Association webpage, <http://www.kcma.or.kr>.
- Traffic Monitoring System, <http://www.road.re.kr>.
- Korea Transport Database, <http://www.ktdb.go.kr>.
- Korea Energy Economics Institute, *Report on Energy Census, Ministry of Commerce, Industry and Energy*, GOVP1200629004 (2004).
- National Air Pollutants Emission, <http://airemiss.nier.go.kr>.
- Kim, M.-S., Kim, J. H., Park, H.-S., Sun, Y. S., Kim, H.-S., Choi, K. H. and Yi, J. h., "Emission Inventory of VOCs from Mobile Sources in a Metropolitan Region," *Korean J. Chem. Eng.*, **23**, 919(2006).
- Kim, M.-S., Kim, J. H., Park, H.-S., Sun, Y. S., Kim, H.-S., Choi, K. H. and Yi, J., "A New Approach for Estimating VOC Emissions from Anthropogenic Non-point Sources in Urban Communities," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**, 763(2007).
- Mackay, D., "Finding Fugacity Feasible," *Environ. Sci. Technol.*, **13**, 1219(1979).
- Mackay, D. and Diamond, M., "Application of the QWASI (quantitative water air sediment interaction) Fugacity Model to the Dynamics of Organic and Inorganic Chemicals in Lakes," *Chemosphere*, **18**, 1343(1989).

21. Mackay, D. and Paterson, M., "Evaluating the Multimedia Fate of Organic Chemicals: A Level III Fugacity Model," *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 427(1991).
22. van de Meent, D., *SimpleBOX: A Generic Multi-media Fate Evaluation Model*. RIVM Report No. 6727200001. Bilthoven, The Netherlands(1993).
23. Deviller, J. and Bintein, S., "CHEMFRANCE: A Regional Level III Fugacity Model Applied to France," *Chemosphere*, **30**, 457(1995).
24. Fenner, K., Scheringer, M. and Hungerbuhler, K., "Persistence of Parent Compounds and Transformation Products in a Level IV Multimedia Model," *Environ. Sci. Technol.*, **34**, 3809(2000).
25. Tao, S., Yang, Y., Cao, H. Y., Liu, W. X., Coveney, R. M., Xu, F. L., Cao, J., Li, B. G., Wang, X. J., Hu, J. Y. and Fang, J. Y., "Modeling the Dynamic Changes in Concentrations of g-hexachlorocyclohexane (g-HCH) in Tianjin Region from 1953 to 2020," *Environ. Pollut.*, **139**, 183(2006).
26. Cousins, I. T. and Mackay, D., "Strategies for Including Vegetation Compartments in Multimedia Models," *Chemosphere*, **44**, 643(2001).
27. Suzuki, N., Murasawa, K., Sakurai, T., Nansai, K., Matsushashi, K., Moriguchi, Y., Tanabe, K., Nakasugi, O. and Morita, M., "Geo-Referenced Multimedia Environmental Fate Model (G-CIEMS): Model Formulation and Comparison to the Generic Model and Monitoring Approaches," *Environ. Sci. Technol.*, **38**, 5682(2004).
28. Wania, F., "Spatial Variability in Compartmental Fate Modelling, Linking Fugacity Models and GIS," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **3**, 39(1996).
29. Woodfine, D., Macleod, M. and Mackay, D., "A Regionally Segmented National Scale Multimedia Contaminant Fate Model for Canada with GIS Data Input and Display," *Environ. Pollut.*, **119**, 341(2002).
30. Zhang, Q., Crittenden, J. C., Sonnard, D. and Mihelcic, J. R., "Development and Evaluation of an Environmental Multimedia Fate Model CHEMGL for the Great Lakes Region," *Chemosphere*, **50**, 1377(2003).
31. Prevedouros, K., MacLeod, M., Jones, K. C. and Sweetman, A. J., "Modelling the Fate of Persistent Organic Pollutants in Europe: Parameterisation of A Gridded Distribution Model," *Environ. Pollut.*, **128**, 251(2004).
32. Luo, Y., Gao, Q. and Yang, X., "Dynamic Modeling of Chemical Fate and Transport in Multimedia Environments at Watershed Scale-I: Theoretical Considerations and Model Implementation," *J. Environ. Manage.*, **83**, 44(2007).
33. Yi, J., Shin, C. B. and Lee, W. G., Development of National Pollution Map using Multi-media Fate Model with Emission Inventories for the Construction of Pollutant Source Management System, ECO-Technopia-21 project of Ministry of Environmental, Korea, 091051039(2008).
34. USEPA, Integrated Risk Information System(IRIS), <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm>.
35. Dai, J. and Rocke, D. M., "A GIS-based Approach to Spatial Allocation of Area Source Solvent Emissions," *Environ. Model. Soft.*, **15**, 293-302(2000).
36. Mackay, D., *Multimedia Environmental Fate Model: The Fugacity Approach*, Second ed. Lewis publishers, Boca Raton, Florida (2001).
37. Korea Meteorological Administration webpage, <http://www.kma.go.kr>.
38. Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., *Atmospheric Chemistry and Physics from Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, INC., New York(1998).
39. Water Management Information System, <http://www.wamis.go.kr>.
40. Jenson, S. K. and Domingue, J. O., "Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis," *Photogramm. Eng. Rem. S.*, **54**, 1593(1988).
41. Maidment, D. R., *ARC Hydro - GIS for Water Resources*, First ed. ESRI Press, Redlands, California(2002).
42. Chapra, S. C., *Surface Water-quality Modeling*, Second ed. McGraw-Hill, New York(1997).
43. Priemer, D. A. and Diamond, M. L., "Application of the Multimedia Urban Model to Compare the Fate of SOCs in an Urban and Forested Watershed," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 1004(2002).
44. Trapp, S. and Matthies, M., *Chemodynamics and Environmental Modeling: An Introduction*. First ed. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg(1998).
45. National Institute of Environmental Research, <http://www.nier.go.kr>.