

산업단지 VOC 저감 최적가용기법(BAT) 선정을 위한 다매체 거동모델 기반 인체위해성·환경성·경제성 평가

김예린[‡] · 이가희[‡] · 허성규[‡] · 남기전 · 리 첸 · 유창규[†]

경희대학교 공과대학 환경학 및 환경공학과
17104 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732
(2020년 1월 29일 접수, 2020년 3월 12일 수정본 접수, 2020년 4월 7일 채택)

Human Health Risk, Environmental and Economic Assessment Based on Multimedia Fugacity Model for Determination of Best Available Technology (BAT) for VOC Reduction in Industrial Complex

Yelin Kim[‡], Gahee Rhee[‡], Sungku Heo[‡], Kijeon Nam, Qian Li and ChangKyo Yoo[†]

Department of Environmental Science and Engineering College of Engineering, Kyung Hee University,
1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17104, Korea
(Received 29 January 2020; Received in revised form 12 March 2020; accepted 7 April 2020)

요 약

본 연구에서는 다매체 평가시뮬레이션 모델을 기반으로 Volatile organic compounds (VOCs) 방지기술의 인체위해성·환경성·경제성 평가를 수행하여 석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 최적가용기법(Best available technology, BAT)을 선정하였다. 다매체 평가시뮬레이션 모델을 이용하여 U-city에 소재한 석유화학 산업단지에서 배출되는 VOCs 중 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene (BTEX)의 다매체 거동 특성과 잔류농도 분포를 예측하였다. 매체 통합 인체위해성 평가 및 민감도 분석을 이용해 BTEX의 물질별 인체위해성을 예측하고 주요 영향 변수를 규명하였으며, 다매체 환경시뮬레이션 내 잔류농도 기준의 환경성 평가와 비용-편익 경제성 평가를 수행하여 우수환경관리기법군(BAT군)을 선정하였다. BTEX의 다매체 거동 분석 결과, 토양 매체에서 높은 잔류 분포 특성(60%, 61%, 64%, 63%)을 보였으며, Xylene은 모든 다매체 환경에서 가장 높은 잔류성을 보였다. BAT후보군 중에서 흡수법은 가장 높은 인체위해성을 보여 BAT 선정에서 제외하였으며, 민감도 분석 결과 대기 매체에서의 물질 반감기와 경로별 노출계수가 인체위해성과 높은 상관성이 있는 것으로 판단되었다. 환경성 평가와 비용-편익 경제성 평가를 고려하여, 재생 열산화법, 재생 촉매산화법, 바이오 필터법, UV 산화법, 활성탄 흡착법을 석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT군으로 선정하였으며, 본 연구에서 제시한 매체통합적 접근 방식의 BAT 선정 방법론은 사업장에서 오염물질 저감을 위한 최적의 배출시설 선정과 통합환경관리제도 운영에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Determination of Best available technology (BAT) was suggested to reduce volatile organic compounds (VOCs) in a petrochemical industrial complex, by conducting human health risk, environmental, and economic assessment based on multimedia fugacity model. Fate and distribution of benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX) was predicted by the multimedia fugacity model, which represent VOCs emitted from the industrial complex in U-city. Media-integrated human health risk assessment and sensitivity analysis were conducted to predict the human health risk of BTEX and identify the critical variable which has adverse effects on human health. Besides, the environmental and economic assessment was conducted to determine the BAT for VOCs reduction. It is concluded that BTEX highly remained in soil media (60%, 61%, 64% and 63%), and xylene has remained as the highest proportion of BTEX in each environment media. From the candidates of BAT, the absorption was excluded due to its high human health risk. Moreover,

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

[‡]The first, second, and third authors have identical collaboration in this research paper.

[‡]이 논문은 POSTECH 이인범 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

it is identified that the half-life and exposure coefficient of each exposure route are highly correlated with human health risk by sensitivity analysis. In last, considering environmental and economic assessment, the regenerative thermal oxidation, the regenerative catalytic oxidation, the bio-filtration, the UV oxidation, and the activated carbon adsorption were determined as BAT for reducing VOCs in the petrochemical industrial complex. The suggested BAT determination methodology based on the media-integrated approach can contribute to the application of BAT into the workplace to efficiently manage the discharge facilities and operate an integrated environmental management system.

Key words: Integrated environmental management, Best available technology (BAT), VOCs control technology, Multi-media fugacity model, Cost-benefit analysis, Human risk assessment

1. 서 론

1960년대 이후 급격한 산업발전에 따라 환경오염문제가 복잡·다원화되고 있으며, 특히 화학물질 제조를 포함한 산업 생산 공정에서 인체에 유해한 오염물질이 다량 배출되고 있다[1]. 이에 따라 유럽연합(Europe Union, EU)은 1996년 9월 산업배출로 인한 오염을 효과적으로 최소화하기 위해 매체통합적 접근(Integrated approach)을 기반으로 한 통합환경관리제도(Integrated Pollution Prevention and Control, IPPC)를 도입하였다[1,2]. EU의 통합환경관리제도는 다매체 환경시스템에서 오염물질의 다매체적 특성 및 매체 간 이동을 고려하여 대기·수질·토양 등 오염매체별로 분산된 오염원 규제를 하나로 통합하여 관리하는 제도이다[3]. 우리나라에서도 대기·수질·토양·유독물 등 매체(Media)와 오염물질별로 분리 되어있던 기존의 단일 매체적 오염배출시설 관리의 문제점을 해결하고자 통합환경관리제도를 도입하였으며 2017년 1월 1일부터 시행하였다[4].

우리나라의 통합환경관리제도는 기존의 매체·오염물질별 분산형 환경관리에서 다매체 통합 기반의 사업장별 ‘통합환경관리’로 전환하며, 과학기술 기반의 최적가용기법(Best Available Technology, BAT)을 적용하고 실효성 있는 맞춤형 배출허용기준을 설정하여 환경오염물질 배출과 환경사고 발생을 실질적으로 줄일 수 있도록 제정되었다[5]. 통합환경관리제도에서 오염물질 배출은 획일적인 기준이 아닌 과학기술 기반의 배출영향분석 및 BAT 적용을 통해 설정된 사업장별 맞춤형 허가배출기준에 의해 관리된다[6]. 허가배출 기준은 배출시설에 BAT을 적용한 경우의 오염물질 배출 최대치인 업종별 최대배출기준 이하로 설정하도록 하였다[6]. 통합환경관리에서 BAT는 오염물질의 배출을 효과적으로 줄이며 비용과 편익을 고려했을 때 기술·경제적으로 각 사업장에 적용 가능한 기법들을 말하며, 기술뿐만 아니라 배출시설을 설계·구축·유지·보수·운영·해체하는 종합적인 방법을 의미한다[7,8]. 따라서 각 사업장의 기술 및 경제적 수준에서 최대의 오염물질 저감효과를 실현할 수 있는 BAT의 적용은 사업장별 허가배출기준을 기존의 획일적인 배출기준보다 낮춤으로써 사업장 단위의 실질적인 오염물질 배출량 저감을 야기하며, 효과적인 오염배출 시설 관리를 가능하게 한다. 이와 같이 BAT는 통합환경관리제도에서 핵심적인 역할을 수행하며 각 업종과 사업장에서의 적용이 중요시되고 있다[3,6].

통합환경관리제도의 대상 업종은 2021년까지 업종별로 단계적으로 확대되며, 화학물질 및 화학제품 제조업의 경우 2019년에 통합환경관리제도 대상 업종으로 추가되었다[4]. 화학물질 및 화학제품 제조업은 2014년 기준 제조업 전체 생산액의 36.3%를 차지하는 우리나라 주요 산업분야이며, 그 중에서 석유화학산업의 생산액은 101조원으로 전체 화학물질 및 화학제품 제조업 생산액의 가장 많은 부분인 약 65%를 차지하고 있다[9]. 하지만 석유화학산업의 원유 투입량 및 생산량 증가로 인해 다량의 유해화학물질이 환경매체

로 배출되었고, 특히 2016년 전국의 석유화학 관련 제조업 생산공정에서 배출된 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 양은 105,351 tons이며, 이 중 우리나라 3대 석유화학 산업단지가 위치해 있는 울산, 여수, 대산에서의 VOCs 배출량은 국내 총 배출량의 94.5% (울산 41.8, 여수 33.5%, 대산 19.1%)를 차지하였다[10]. VOCs는 증기압이 낮아 쉽게 휘발되며 대기 중에서 질소산화물과 광화학반응을 통해 오존과 같은 광화학산화물을 유발하며, Benzene과 같은 발암물질을 포함하기 때문에 호흡기 흡입 및 피부 접촉을 통해 신경계에 장애를 일으키는 등 인체에 직접적으로 유해한 물질이다[11,12]. 또한 대기 매체로 배출된 VOCs는 수계, 토양 및 침전물 등의 다양한 환경매체로 이동하며 최종적으로 여러 환경매체에 잔류함으로써 환경 및 인체에 유해한 영향을 준다[13].

따라서 VOCs 방지기술들의 저감효율과 소요비용을 분석하고 통합환경관리의 관점에서 다양한 방지기술의 환경성 및 경제성을 비교·평가하여, 고비용 또는 저효율 기술이 아닌 각 사업장의 기술·경제적 여건을 충족시키는 동시에 가장 우수한 저감효율을 갖는 방지기술을 BAT로 선정하고, 이를 사업장에 적용함으로써 VOCs를 저감해야 한다. 이에 따라 다양한 평가 기법을 활용하여 VOCs 방지 기술들의 기술·경제적 효율 및 현장 적용성을 분석한 연구들이 진행되었다. Choi 등은[14] 공단지역 내에 소재한 배출시설 전·후단부의 VOCs를 포함한 악취성분을 GC-FID (Gas chromatography with flame ionization detector)와 열탈착 기법(Thermal desorption unit)을 조합한 방식으로 측정하고, 방지기술 중 흡착법 및 흡수법의 VOCs 처리효율을 조사하였다. Cha 등은[15] VOCs 방지기술 중 비교적 신기술로 분류되는 기술들의 중·소형 배출원에서의 현장 적용가능성을 파악하였으며, GC-FID를 이용하여 실제 현장에서 방지시설의 저감효율을 분석하고, 각 방지기술의 투자 및 운영비용을 산정하였다. 하지만 기존의 연구들은 방지기술의 소요비용을 산정하는 데에만 그쳤으며, 통합환경관리제도에서 제안하고 있는 비용·편익 경제성평가를 수행하지 않았다. 또한 VOCs 방지기술들의 저감효율을 방지시설 전·후단부에서의 농도 측정을 통해 산출하여, 환경매체에서의 분포특성을 고려하지 않고 일시적인 VOCs 저감효율만을 분석하였다는 한계점이 있다. VOCs를 포함한 유해화학물질은 물리적, 화학적 및 생물학적 반응에 의해 다양한 환경매체로 이동·분배하는 다매체적 거동 특성을 가지고 있으므로[16], VOCs의 환경매체 내 거동을 고려하기 위하여 다매체 거동모델(Multimedia fate model) 기반의 인체위해성·환경성·경제성 평가를 통한 BAT를 선정이 필요하다.

다매체 거동모델은 화학물질이 다수의 매체로 동시에 배출되거나 또는 단일매체로 배출된 후에 다른 매체로 이동·분배하는 다매체적 거동 특성을 고려하여 환경시스템에서의 상대적 분포 및 거동을 모사하는 방법론이며, 매체통합적 접근 방식의 화학물질 거동 연구

에 많이 이용되고 있다[17,18]. Rhee 등은[17] 다매체 플러그시티 모델(Multimedia fugacity model) Level III을 통해 정상상태에서의 PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)의 분포 특성을 분석하고, Level IV에서 자동차 등록대수 변화에 따른 비정상상태에서의 PAHs의 환경매체 내 농도 분포를 예측하였으며, 이를 매체별 농도 기준치와 비교하였다. Li 등은[19] 중국 정저우 지역 내 자동차에서 배출된 PAHs의 환경 거동 및 인체 건강 위험을 분석하기 위하여 다매체 플러그시티 모델(Level III, IV)과 인체 발암위해성 평가 모델을 수행하였으며, 회귀분석을 통해 자동차에 의한 PAHs 농도와 지역 주민의 폐 질환 사망률 사이의 상관관계를 분석하였다. 기존의 연구들은 자동차에 의해 배출된 PAHs의 다매체 거동 특성을 파악하였으며, 영향 및 인체위해성 평가에서 수용체 집단으로 성인 집단만을 고려하였다. 하지만 본 연구의 대상 물질인 VOCs의 주된 오염원은 도로 이동오염원이 아닌 생산공정이므로[10], 생산공정에 의해 배출된 VOCs의 다매체 거동 특성을 고려해야 한다. 또한 인체위해성 평가에서 유해화학물질의 위해성은 수용체에 따라 달라질 수 있으므로 여러 수용체 집단의 특성을 고려하여 수용체 중심의 인체위해성 평가를 수행해야 한다. 이에 본 연구에서는 화학물질 및 화학제품 제조업 공장에서 배출되는 VOCs의 다매체 거동 특성을 다매체 플러그시티 모델로 파악하고, 수용체 중심의 매체 통합 인체위해성 평가를 수행하였다. 또한 이를 포함한 환경성 및 경제성 평가를 통해 석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT를 선정하고 그 방법론을 제시하였다.

석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 다매체 거동 모델 기반의 인체위해성·환경성·경제성 평가를 고려한 BAT 선정 방법론은 Fig. 1과 같다. U-city를 대상지역으로 설정하고 석유화학 산업단지의 VOCs 배출량 통계와 BAT 후보군의 저감효율을 고려하여 VOCs 배출량을 산정하였다. 이를 다매체 플러그시티 모델 적용하여 다매체 환경시스템 내에서 VOCs의 분포 특성 및 잔류농도를 분석하였으며, 각 BAT 후보 방지기술의 환경매체 내 VOCs 잔류농도 저감효율을 산출하여 BAT 후보군의 환경성을 평가하였다. 다매체-다수용체 인체위해성 평가를 통해 각 BAT 후보 방지기술에 따른 환경매체 내 VOCs 잔류농도가 인체 건강에 미치는 영향을 예측하

였으며, BAT 후보 방지기술 중에서 비용-편익의 경제성 평가를 통해 환경성 및 경제성이 균형을 이루는 방지기술을 파악하였다. 이를 바탕으로 환경성·인체위해성·경제성을 동시에 고려한 석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT를 선정하였다.

2. 연구이론

2-1. 다매체 플러그시티 모델

다매체 플러그시티 모델은 플러그시티 개념을 사용하여 대기, 수계, 토양 등 환경매체에서의 물질 거동을 모사하고 정량화 하기 위한 모델이다[20,21]. 플러그시티 개념은 물질수지 이론을 바탕으로 하는 열역학적 물질 평형의 기준을 고려한다. 물질의 물리·화학적 특성, 반응성, 이동 특성 및 확산 범위 등의 정보를 기반으로 물질의 환경적 거동을 제시하고 물질의 매체간 분배 계수를 산정하여 다매체 환경시스템에서의 물질의 평형 분배를 모사할 수 있다[17]. 다매체 플러그시티 모델의 다매체 환경은 크게 대기(Air), 수계(Water), 토양(Soil), 침전물(Sediment)로 구분하며, 세부적으로는 수서생물(Fish), 부유물질(Suspended sediment), 에어로졸(Aerosol)의 총 7개 매체를 고려한다. 각 환경매체에서의 물질 농도인 C (mol/m^3)은 특정 환경매체에서 물질의 부분압인 플러그시티 값 f (Pa)와 물질이 환경매체에 머무르는 정도인 플러그시티 용량 Z ($\text{mol}/\text{m}^3 \cdot Pa$)을 통해 식 (1)과 같이 계산된다[17,18].

$$C = f \cdot Z \tag{1}$$

이때 플러그시티 용량은 각 환경매체에 대한 물질의 친화성을 표현하는 값으로써 Table 1와 같이 계산된다[18]. 증기압 및 용해도를 이용하여 헨리 상수 및 수계에서의 플러그시티 용량을 구하며, 토양 또는 수서생물과 같은 유기체로의 흡착성을 대표하는 계수인 K_{OW} (Octanol-water partition coefficient)를 통해 K_{OC} (Organic carbon partition coefficient) 및 토양, 침전물, 수서생물의 플러그시티 용량을 구한다[17]. Bulk Z값은 대기 중의 Aerosol과 토양 내의 공기와 물, 침전물 내의 고형물 및 공극수를 고려하여 ‘Bulk phase’ 형태의 대기, 수계, 토양 및 침전물을 나타낸 것이다[17]. 플러그시티 값은 다매체 플러그시티 모델의 일련의

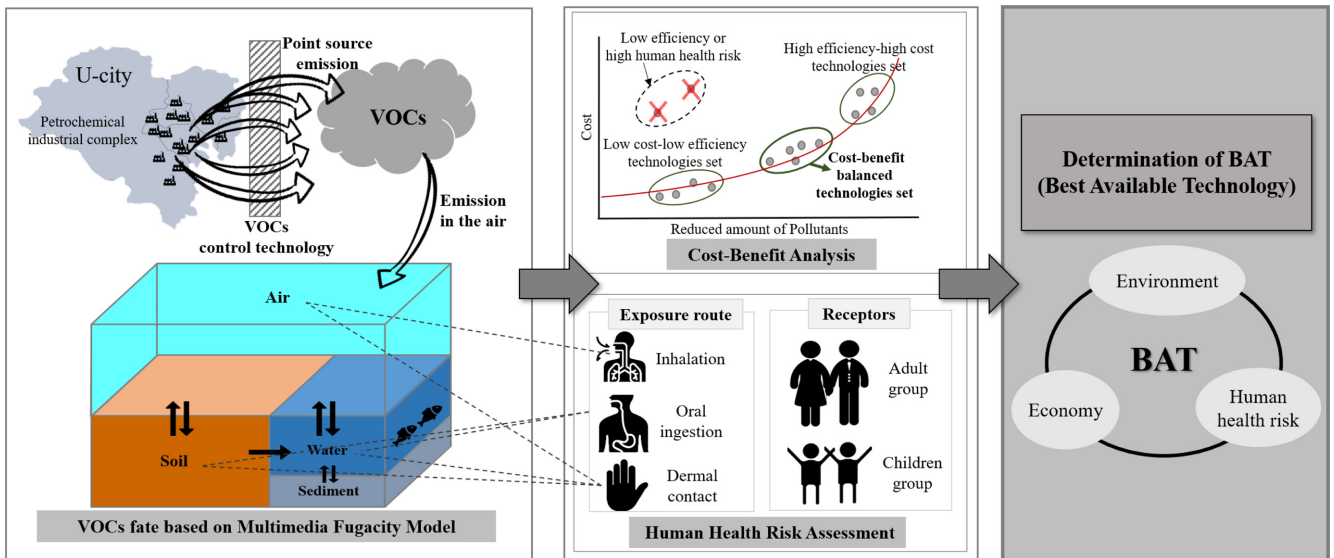


Fig. 1. Schematic diagram of BAT determination for VOCs reduction in petrochemical industrial complex using human health risk, environmental and economic assessment based on multimedia fugacity model.

Table 1. Equations of fugacity capacities [17, 20].

Compartment	Z values
Air	$Z_1 = 1/RT$
Water	$Z_2 = 1/H = C^S/P^S$
Soil	$Z_3 = Z_2 \cdot \rho_3 \cdot \phi_3 \cdot K_{OC}/1000$
Sediment	$Z_4 = Z_2 \cdot \rho_4 \cdot \phi_4 \cdot K_{OC}/1000$
Suspended Sediment	$Z_5 = Z_2 \cdot \rho_5 \cdot \phi_5 \cdot K_{OC}/1000$
Fish	$Z_6 = Z_2 \cdot \rho_6 \cdot L \cdot K_{OW}/1000$
Aerosol	$Z_7 = Z_1 \cdot 6 \times 10^6 / P_L^S$
Where	R = gas constant (8.314J/mol · K)
	T = absolute temperature (K)
	C^S = solubility in water (mol/m ³)
	P^S = vapor pressure (Pa)
	H = Henry's law constant (Pa m/mol)
	P_L^S = liquid vapor pressure (Pa)
	K_{OW} = octanol-water partition coefficient, K_{OC} = organic carbon partition coefficient
	$K_{OC} = 0.41 K_{OW}$
	ρ_i = density of phase i (kg/m)
	ϕ_i = mass fraction organic-carbon in phase i (g/g)
L = lipid content of fish	
Note for solids $P_L^S = P_S^S / \exp \{6.79(1 - T_M/T)\}$ where T_M is melting point (K) of the solute	
Bulk air	$Z_{B1} = Z_1 + 2 \times 10^{-11} \cdot Z_7$ (approximately 30 mg/m ³ aerosols)
Bulk water	$Z_{B2} = Z_2 + 5 \times 10^{-6} \cdot Z_5 + 1 \times 10^{-6} \cdot Z_6$ (5 ppm solids, 1 ppm fish by volume)
Bulk soil	$Z_{B3} = 0.2Z_1 + 0.3Z_2 + 0.5Z_3$ (20% air, 30% water, 50% solids)
Bulk sediment	$Z_{B4} = 0.8Z_2 + 0.2Z_4$ (80% water, 20% solids)

Level에서 고려하는 화학물질의 반응 및 거동 특성에 따라 산출 방법이 달라진다.

다매체 퓨가시티 모델은 각 Level에서 구현하고자 하는 화학물질의 환경매체 내/간 이동 및 반응의 복잡성에 따라 Level I, II, III 및 IV로 구분된다[17]. Level I은 정해진 양의 화학물질이 유입되고 폐쇄계, 평형상태, 정상상태(Steady-state)이며 분해 및 이류(Advection) 현상이 일어나지 않는다고 가정하며[18], 화학물질의 일시적 누출에 대한 계산을 하고자 할 때 유용하게 사용된다. Level I에서의 퓨가시티 값은 식 (2)와 같이 계산된다[20,21].

$$f = M / \sum (V_i \cdot Z_i) \quad (2)$$

여기서 M (mol)은 화학물질의 i 매체에서의 총량, V (m³)은 환경매체의 부피를 나타낸다. 이를 통해 Level I 다매체 환경시스템 내의 화학물질 분배 경향과 화학물질의 대략적인 분포를 계산할 수 있다.

Level II 모델은 정상상태와 환경매체 내 및 매체 간의 평형상태를 유지하며, 화학물질의 연속적인 유입과 유출이 발생하는 시스템을 고려한다. 따라서 환경매체 밖으로의 손실을 고려하며, 이는 정상상태에서의 이류에 의한 유입과 출입, 퇴적물의 손실, 분해와 반응과 같은 변형과정을 포함한다[21]. 환경매체에서의 이류 속도를 고려하고, 반응에 의한 손실은 물질의 반감기를 고려하여 물질 이동 변수인 D (mol/Pa·hr)로 나타낼 수 있으며, 이는 식 (3)-(4)와 같이 계산된다[17,18].

$$D_{Ai} = G_i \cdot Z_i \quad (3)$$

$$D_{Ri} = V_i \cdot Z_i \cdot k_i \quad (4)$$

여기서 D_{Ai} (mol/Pa·hr)와 D_{Ri} (mol/Pa·hr)는 각각 이류와 반응 현상에 대한 이동 변수이며, G_i (m³/h)는 이류속도, k_i (h⁻¹)은 물질의

반감기를 나타낸다. 이때 다매체 환경시스템의 총 유입량 E (mol/hr)를 물질 이동 변수 D (mol/Pa·hr)와 퓨가시티 값으로 표현할 수 있으며, 이는 식 (5)와 같다. 따라서 다음의 식 (5)를 통해 Level II에서의 퓨가시티 값이 정해진다.

$$E = \sum (D_{Ai} \cdot f) + \sum (D_{Ri} \cdot f) \quad (5)$$

Level III에서는 Bulk phase 형태의 대기, 수계, 토양 및 침전물 네 가지 환경매체에서의 농도를 계산하여 보다 실질적인 오염물질의 거동 및 이동 과정을 고려한다[17,21]. Level III 모델은 Level II에서 무시된 환경매체 간의 이동 과정을 고려하여, 매체 간의 비평형 이동 및 매체 내의 정상상태 조건을 만족하도록 고안되었다[21]. Level III에서의 다매체 환경시스템의 매체 간 물질 이동 과정을 모식화하여 Fig. 2에 나타냈다. 물질은 대기에서 수계로 흡착, 비에 의한 용해 또는 에어로졸 침전 과정에 의해 이동하며, 수계에서 대기로는 증발 과정을 통해 이동한다. 대기에서 토양으로는 확산, 비에 의한 용해 및 침전 과정에 의해, 토양에서 대기로는 증발 과정에 의해 이동한다. 수계와 침전물 간의 이동은 침전과 재부유에 의해 상호적으로 이루어지며, 토양에서 수계로는 지표수 및 고형물의 비에 의한 유출에 의해 이동한다[17,19]. 이러한 매체 간의 확산 및 비확산 과정에 대한 물질 이동 변수 D 는 Table 2과 같이 표현된다 [17,20]. Table 2에서 물질 이동 변수 D 는 환경매체 간 물질 질량 이동 속도(Mass Transfer Coefficient, MTC)를 포함하는 물질 전달 계수(Intermedia transport parameters, U), 물질이 잔류 및 이동하는 매체의 면적(A)과 물질이 잔류하는 환경매체의 퓨가시티 용량(Z)을 이용하여 계산된다[17]. 네 가지 환경매체(Air, Water, Soil, Sediment) 간의 물질 이동 변수는 D의 아래 첨자 1, 2, 3, 4로 구분하였으며, 환경매체(Air, Water, Soil) 및 불투수층(Impervious area)의 면적은 각각 A의 아래 첨자 A, W, S, Imp로 나타냈다. 이때 침전물 매체의

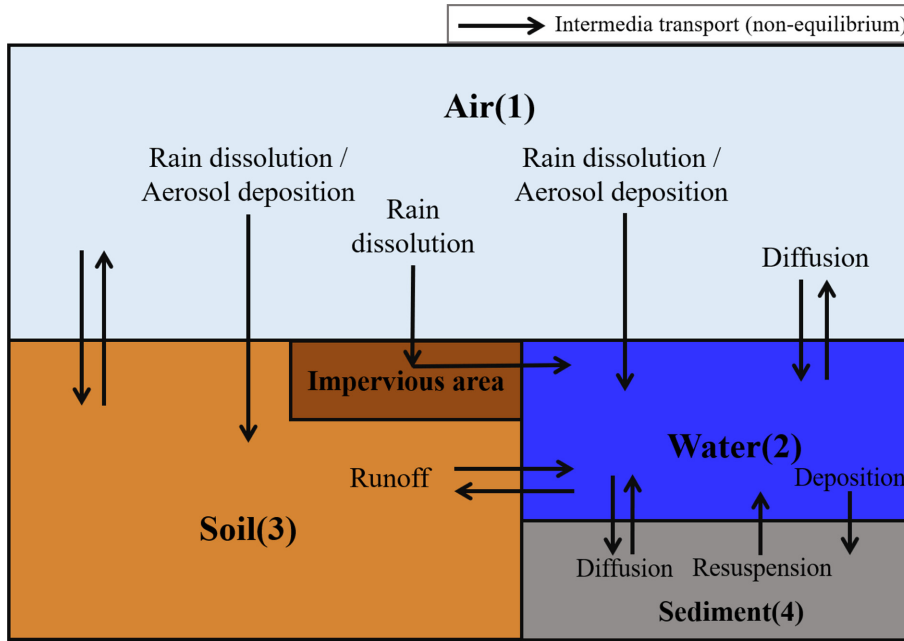


Fig. 2. Intermedia transport process of pollutants in environment multimedia: (1) air, (2) water, (3) soil and (4) sediment [19].

Table 2. The equations of intermedia transport D value [17, 20]

Environmental media		Process	Intermedia transport D value equation
From	To		
Air (1)	Water (2)	Total (D_{12})	$D_{12} = D_{VW} + D_{RW} + D_{QW}$
		Absorption (D_{VW})	$D_{VW} = A_W / (1/U_1 Z_1 + 1/U_2 Z_1)$
		Rain dissolution (D_{RW})	$D_{RW} = U_3 A_W Z_2$
		Aerosol deposition (D_{QW})	$D_{QW} = U_4 A_W Z_7$
Water (2)	Air (1)	Volatilization (D_{21})	$D_{21} = D_{VW}$
Air (1)	Soil (3)	Total (D_{13})	$D_{13} = D_{VS} + D_{RS} + D_{QS}$
		Absorption (D_{VS})	$D_{VS} = 1 / [1/D_S + 1/(D_W + D_A)]$
		Air boundary layer (D_S)	$D_S = U_7 A_S Z_1$
		Air phase diffusion in soil (D_A)	$D_A = U_5 A_S Z_1$
		Water phase diffusion in soil (D_W)	$D_W = U_6 A_S Z_2$
		Rain dissolution (D_{RS})	$D_{RS} = U_3 A_S Z_2$
Soil (3)	Air (1)	Deposition (D_{QS})	$D_{QS} = U_4 A_S Z_7$
		Volatilization (D_{31})	$D_{31} = D_{VS}$
Water (2)	Sediment (4)	Diffusion plus deposition (D_{24})	$D_{24} = D_{WS} + D_D = U_8 A_W Z_2 + U_9 A_W Z_5$
Sediment (4)	Water (2)	Diffusion plus resuspension (D_{42})	$D_{42} = D_{WS} + D_R = U_8 A_W Z_2 + U_{10} A_W Z_4$
Soil (3)	Water (2)	Runoff of water and solids (D_{32})	$D_{32} = D_{SW} + D_{SS} = U_{11} A_S Z_2 + U_{12} A_S Z_3$
Where (Intermedia transport parameters)	Parameters	Definition	Value
	U_1	Air side, Air-water MTC	5 m/h
	U_2	Water side, Air-water MTC	0.05 m/h
	U_3	Rain rate	10^{-4} m/h
	U_4	Aerosol deposition	6×10^{-10} m/h
	U_5	Soil-air phase diffusion MTC	0.02 m/h
	U_6	Soil-water phase diffusion MTC	10×10^{-6} m/h
	U_7	Soil-air boundary layer MTC	5 m/h
	U_8	Sediment-water MTC	10^{-4} m/h
	U_9	Sediment deposition	5.0×10^{-7} m/h
	U_{10}	Sediment resuspension	2.0×10^{-7} m/h
	U_{11}	Soil-water run-off	5.0×10^{-5} m/h
U_{12}	Soil-solids run-off	10^{-8} m/h	

면적은 수계 매체의 면적과 동일하다고 가정하였다[17]. Level III 모델의 물질량 변화는 매체 간 물질 이동 변수들을 대입하여 식 (6)의 물질수지 식에 의해 구현되며, 이를 통해 Level III 모델에서의 퓨가시티 값을 구할 수 있다[17,21].

$$\frac{d(V_i \cdot Z_i \cdot f_i)}{dt} = E_i + \sum (f_i \cdot D_{ji}) - \sum (f_i \cdot D_{ij}) + f_i \cdot \sum D_i \quad (6)$$

식 (6)에서, Level III에서는 정상상태 유입을 가정하므로 미분항은 0이 되고 총 유입량은 총 유출량과 같다[17]. Level IV 모델은 정상상태를 가정했던 Level III에 대해 비정상상태 유입에서의 물질 거동을 조작하기 위해 확장된 모델이다[17,21].

2-2. 매체 통합 인체위해성 평가

다매체 거동 특성을 가진 유해화학물질의 환경매체 내 잔류량은 다양한 노출 경로를 통해 인체 건강에 영향을 줄 수 있다. 따라서 배출된 유해화학물질의 인체위해성을 평가하고 그에 대한 다매체적 관리방안을 수립하기 위해서는 유해화학물질의 다매체 거동 특성을 고려한 인체위해성 평가가 수행되어야 한다. 매체 통합 인체위해성 평가는 다매체 환경에서 다양한 경로에 노출된 복합적인 수용체 집단의 특성을 고려해 인체 위해도를 평가하는 방법이며, 다매체(Multi-media), 다경로(Multi-route) 및 다수용체(Multi-receptor)을 고려한 노출 시나리오를 기반으로 수행된다[1].

일반적인 인체위해성 평가 방법은 유해성 확인(Hazard identification), 노출 평가(Exposure assessment), 용량-반응 평가(Dose-response assessment) 그리고 위해도 결정(Risk characterization)의 4단계로 수행된다[22]. 유해성 확인 단계에서는 화학물질의 특성, 유해성 및 작용기 등에 대한 연구자료를 바탕으로 화학물질의 인체 건강 및 환경 영향에 대한 위험성을 확인한다[23,24]. 노출 평가 단계에서는 유해물질의 배출특성과 생활환경 중 노출특성을 바탕으로 노출 시나리오를 수립하고, 노출 시나리오에 따른 수용체의 노출계수를 활용해 일일 평균 노출량(Average Daily Intake, ADI)을 산정한다[25]. 용량-반응 평가에서는 화학물질의 노출수준과 이로 인한 인체 영향과의 상관성을 규명하며, 인체독성시험자료를 활용하거나 동물독성시험자료를 정량적으로 평가하여 위해도 결정에 활용될 독성 값 또는 기준 값을 도출한다[24,26]. 발암물질의 경우 실험적으로 구해진 고용량 독성실험 데이터의 용량-반응 곡선(Dose-response curve)에 대해 역치(Threshold)가 존재하지 않는 선형 모델(Linear non-threshold model)을 이용하여 저용량 영향을 외삽(Extrapolation)하며, 독성 물질의 발암 인자(Cancer slope factor, SF)는 저용량 범위에서의 가장 큰 선형 기울기로 평가한다[22]. 비발암물질의 경우 역치가 존재하는 용량-반응 곡선에서 실험적으로 결정된 무영향관찰용량(No Observed Adverse Effect Level, NOAEL)으로부터 독성 참고치(Reference Dose, RfD)를 구하여 비발암물질의 만성 또는 급성 영향을 평가한다[22]. RfD는 화학물질이 인체에 유입되었을 경우 유해한 영향이 나타나지 않는다고 판단되는 노출량이며, 식 (7)과 같이 계산된다[22].

$$RfD = \frac{NOAEL}{UF \times MF} \quad (7)$$

UF (Uncertainty Factor)은 불확실성 계수로 동물실험과 종내 및 종간 다양성을 고려하여 민감한 수용체까지 적용하기 위한 임의적

보정 값을, MF (Modifying Factor)은 자료의 신뢰성 등과 같은 과학적 불확실성에 대해 전문적인 판단에 의해 추가적으로 고려되는 첨가계수를 뜻한다[24,26].

위해도 결정 단계에서는 노출 평가와 용량-반응 평가의 결과를 바탕으로 유해화학물질의 노출에 의한 정량적인 위해도를 산출하며, 위해도는 유해화학물질 노출에 따른 수용체의 유해반응 발생률을 의미한다[22,24]. 발암물질의 경우, 발암물질 노출에 따른 전생애 동안의 암 발생 가능성을 나타내는 초과발암위해도(Cancer Risk, CR)를 산출하며, CR는 ADI와 노출 경로별 발암 인자인 SF를 곱하여 식 (8)과 같이 계산한다[19]. 비발암물질의 경우, 식 (9)와 같이 ADI를 RfD와 비교하여 유해지수(Hazard Index, HI)를 계산한다[23].

$$CR_i = SF_i \times ADI_i \quad (8)$$

$$HI_i = \frac{ADI_i}{RfD} \quad (9)$$

여기서, ADI_i (mg/kg/day)는 노출 시나리오에 따른 노출경로에 관련된 노출인자들에 대한 대표 값을 적용하여 식 (10)과 같이 산출한다[19].

$$ADI_i = \frac{C_i \times \sum_j IR_{ij} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (10)$$

C_i (mg/m³)는 각 환경매체(i)에서의 위해 물질 노출 농도를, IR (m³/day)는 각 노출 경로(j)에 따른 위해물질 일일 섭취량(Intake rate)를, EF (days/year)는 노출빈도(Exposure frequency)를, ED (years)는 노출기간(Exposure duration)를, BW (kg)는 대상 인구의 평균 몸무게(Body weight)를, AT (days)는 평균적용시간(Average time)을 의미한다. 산출된 CR 값을 이용하여 유해화학물질 노출에 대해 세 가지 우려 수준(위해 없음, 잠재적 위험, 확인된 위험)으로 평가할 수 있다[19]. CR 값이 10⁻⁴ 이상인 경우는 건강에 위해 영향이 있고, 10⁻⁶ 이하인 경우는 위해가 없다고 판단한다. 또한 HI 값의 경우, 1보다 크면(HI > 1) 비발암 위해 유발가능성이 있다고 판단하며, 1보다 작으면(HI ≤ 1) 비발암 위해 유발가능성이 없으므로 현재 노출수준은 허용 가능하다고 평가한다[27].

2-3. 민감도 분석

모델 입력변수 값들의 동시적인 변동이 모델 결과값에 영향을 줄 때, 입력변수와 출력변수 간의 상관관계를 모델 변수들의 순위상관 분석을 통해 나타낼 수 있다[17]. 순위상관분석은 두 변수들 사이의 양방향 선형 상관성의 정도를 나타내는 상관계수를 통해 그 상관성을 평가하는 통계 방법이다[28]. 순위상관분석에서 Spearman 순위상관계수는 순위를 이용한 비모수적 상관계수로, 입력변수와 출력변수의 각 값들을 순위로 대체하여 계산한다[17,29]. 예를 들어 각각의 입력 및 출력 변수들은 가장 작은 값을 1로, 그 다음으로 작은 값을 2로 대체되는 방식으로 모든 변수 값이 변환되고, 변환된 변수 값을 이용하여 식 (11)과 같이 순위상관계수 ρ 를 구한다[17,28].

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

식 (11)에서 x_i 는 변수 i 번째 X 변수의 데이터 순위, y_i 는 i 번째 Y 변수의 데이터 순위이며, \bar{x}, \bar{y} 는 X, Y 변수의 평균값이다. 변수들 간의

상관성은 -1~1 사이의 순위상관계수 ρ 값에 따라 파악할 수 있다[28]. ρ 값이 0일 경우 입력 및 출력 변수 간의 상관관계는 없으며, ρ 값의 절대값이 높을수록 강한 상관성을 나타낸다. 이때 부호는 증감 방향을 나타내는 것으로, 양의 값은 입력변수와 출력변수의 증감 방향이 같음을, 음의 값은 그 방향이 반대임을 뜻한다[17,28].

본 연구에서는 다매체 플러그시티 모델 기반의 매체 통합 인체위해성 평가 모델 변수 간의 상관관계를 파악하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 다매체 플러그시티 모델과 인체위해성 평가 모델의 변수는 변동성이 커 불확실성이 높으며 낮은 평균 값과 높은 분산을 가지므로, 편향된 분포를 갖는다고 가정할 수 있다[17]. Spearman 순위 상관계수는 변수가 정규 분포가 아닌 편향된 분포나 서열적 특성을 가진 변수에 대해 사용되므로[17,28], 본 연구에서는 Spearman의 순위 상관계수(Spearman's rank correlation coefficient)를 사용하여 입력변수들의 민감도를 산정하였다. 민감도 분석을 통해 다매체 모델 기반의 매체 통합 인체위해성 평가 모델의 주요변수를 규명함으로써, 유해화학물질 노출에 의한 수용체의 건강 위해도에 중요하게 작용하는 물질 거동 기작, 노출 경로 및 노출 계수를 알 수 있다.

3. 연구 방법

석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 다매체 플러그시티 모델 기반의 인체위해성·환경성·경제성을 고려한 BAT 선정을 위한 본 연구의 순서는 Fig. 3과 같다. 먼저, 연구 대상 지역의 화학물질 및 화학제품 제조업으로 인한 VOCs 배출량 통계를 수집하였으며, 석유화학 산업단지의 VOCs 저감을 위한 BAT 후보군을 정하고, 후보군의 VOCs 물질별 저감효율 정보를 수집하였다. VOCs 배출량 정보와 후보군의 VOCs 저감효율을 이용하여 방지기술을 거치지 않고 배출된 VOCs의 양과 BAT 후보 방지기술을 통해 배출된 VOCs의 양을 산정하였다. 또한 다매체 플러그시티 거동모델에 필요한 연구 대상 물질의 물리·화학적 특성과 대상 지역의 특성에 대한 정보를

수집하였다. 이를 기반으로 정상상태의 물질 거동 모델링 및 시뮬레이션인 다매체 플러그시티 모델 Level III를 수행하여, 다매체 환경시스템에서 VOCs의 물질 거동과 환경매체 내 잔류농도를 파악하였다. 다매체 플러그시티 모델 결과를 바탕으로 매체 통합 인체위해성 평가를 수행하여 방지기술별로 환경매체 내 잔류농도에 대한 인체 건강 위해도를 예측하였으며, 위해도가 높게 산출된 방지기술을 BAT 선정에서 제외하였다. 또한, 민감도 분석을 통해 인체위해성 평가 모델 결과에 대한 변수의 상관성을 파악하여 주요 변수를 규명하였다. 마지막으로 다매체 환경시스템 내 오염물질 잔류농도를 기준으로 방지기술별 오염물질 저감효율을 산출하여 BAT 후보군의 환경성을 평가하였고, 비용-편익 경제성 평가를 수행하여 산업단지 내 VOCs 저감에 우수한 환경관리기법군(BAT군)을 선정하였다.

3-1. 연구 대상 물질, BAT 후보군 및 배출량 산정

연구 대상 지역인 U-city의 화학물질 및 화학제품 제조업은 2016년 한 해 동안 VOCs를 대기 중으로 716,073 kg 만큼 배출하며, 이 중 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 배출량은 각각 22,371 kg, 58,421 kg, 9,642kg, 65,498kg으로 전체 VOCs 배출량의 21.78%를 차지한다[30]. Benzene은 U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) 분류체계에 의해 발암성 A등급(Human carcinogen), IARC (International Agency for Research on Cancer)에 의해 Group 1으로 분류된 인체에 대해 발암성이 확인된 물질이다[31]. 체내에 흡수된 Benzene은 주로 지방조직에 분포하며, 급성중독일 경우 마취 증상이 강하게 나타나고 만성중독일 경우 혈액장애 및 백혈병 등을 일으킨다[32]. Ethylbenzene은 U.S.EPA에 의해 발암성 D등급(Not classifiable as to human)이며, Toluene 및 Xylene은 IARC에 의해 Group 3으로 인체에 대한 발암성이 나타나지 않은 비발암물질이다[31]. 하지만 이 세 가지 물질은 인체 건강에 유해성을 가진 유해화학물질로써 Toluene, Ethylbenzene 및 Xylene에 노출되면 공통적으로 현기증, 졸음 및 두통을 느낄 수 있다. 특히 유독물질인 Toluene과 Xylene의 경우,

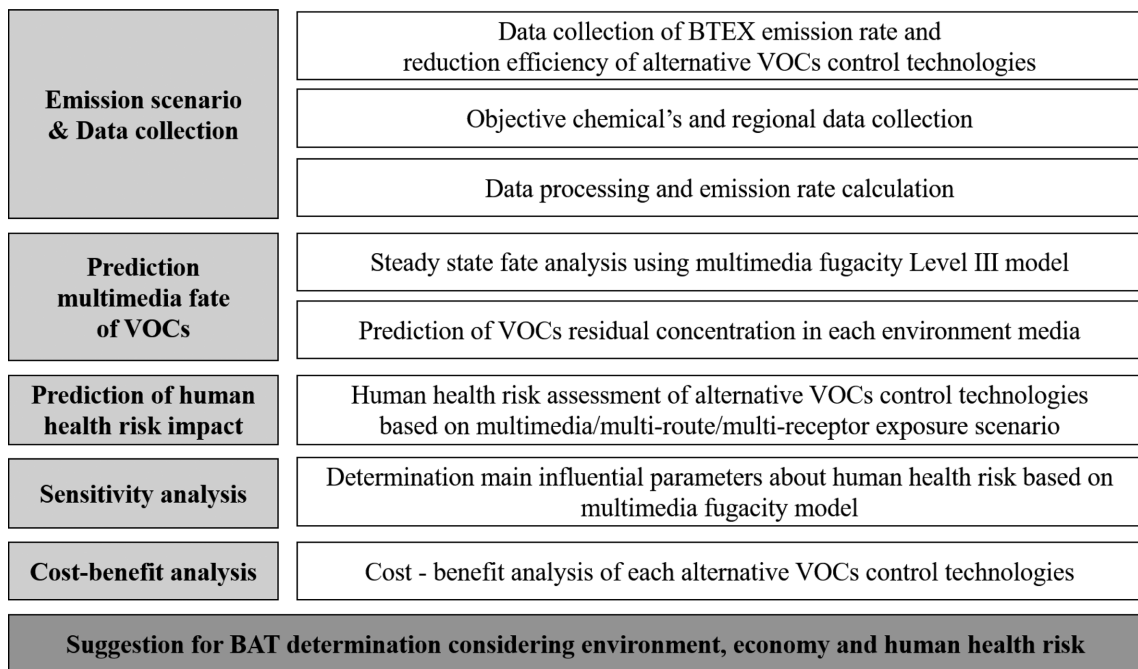


Fig. 3. The proposed framework of BAT determination for VOCs reduction based on multimedia fugacity model.

Table 3. Physicochemical properties of BTEX in the environment media [20]

BTEX	MW (g/mol)	Vapor pressure (Pa)	Aqueous solubility (g/m ³)	Log Kow	Melting point (°C)	Degradation Half-lives (h)				Rat oral LD ₅₀ (mg/kg)
						Air	Water	Soil	Sediment	
Benzene	78.11	12700	1780	2.13	5.53	17	170	550	1700	930
Toluene	92.13	3800	515	2.69	-95	17	550	1700	5500	5000
Ethylbenzene	106.2	1270	152	3.13	-95	17	550	1700	5500	5460
Xylene	106.2	1170	214.9488	3.18	13.2	17	550	1700	5500	4300

고농도의 Toluene에 노출되면 마비증상을 느끼고 의식을 상실하며, Xylene에 의해서는 성장장애, 태아독성영향, 임신독성 등의 영향을 받는다[32]. 이와 같이 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene (BTEX)는 연구 대상 지역의 산업 생산 공정에서 대량으로 배출되며 유해성이 높은 물질이므로 본 연구의 대상 물질로 선정하였다. BTEX의 분자량, 증기압, 용해도, K_{OW} , 녹는점, 각 환경매체에서의 반감기와 같은 물리·화학적 특성과 유해화학물질의 독성 정보인 반수치사량(Lethal Dose 50, LD₅₀)은 Table 3와 같다.

BAT 선정을 위한 VOCs 방지기술 후보군은 현재 석유화학공정에서 사용되고 있거나 실제 공정에 대해 도입 연구 사례가 있는 기술 중에서 7가지 기술을 선별하였다. 본 연구에서 선정된 BAT 후보군은 산업공정에서 상용되고 있는 기존 기술(Existing technologies) 중에서 재생 열산화(Regenerative thermal oxidation, RTO)법, 재생 촉매산화

(Regenerative catalytic oxidation, RCO)법, 활성탄 흡착법(Activated carbon adsorption, AC), 흡수법(Wet scrubber, WS) 4가지 기술과, 비교적 최근에 기술개발이 이루어진 신기술(Emerging technologies) 중에서 바이오 필터법(Bio-filtration, BF), UV 산화법(UV oxidation, UV), 전자빔법(Electron beam, EB) 3가지 기술을 선별하였다. 각 BAT 후보 방지기술에 대한 작동 원리, 장·단점 및 BTEX 물질별 저감효율은 Table 4에 나타났다. 이 중에서 RTO법과 RCO법은 분해연소 기술로 VOCs와 같이 혼합물질 형태에 대해 주로 사용하는 기술이므로[33] 물질별 저감효율은 VOCs 전체에 대한 저감효율과 동일하다고 가정하였다. 또한 WS법은 VOCs 흡착효율을 높이기 위해 활성탄 표면 및 세공 표면에 특수화학약품을 처리한 침착 활성탄을 사용한 기술로 설정하였다[15].

VOCs의 환경매체 내 물질 거동 및 농도 분포를 파악하기 위해,

Table 4. The principles, advantages, disadvantages and reduction efficiency of the alternative VOCs control technologies for BAT determination

Control Technologies	Symbol	Principles ^{a, b}	Advantages ^b	Disadvantages ^b		
Regenerative thermal oxidation	RTO	Oxidation the VOCs at high temperature and heat recovery using ceramic accumulator.	- High efficiency and heat recovery efficiency - Long device life and waste heat recovery - Simple structure and easy operation	- High installation and operation cost - Corrosion possibility - Large space required (compared to RCO)		
Regenerative catalytic oxidation	RCO	Using catalyst to oxidize VOCs at relatively low temperature (300 °C) and oxidizing VOCs by passing ceramic accumulator.	- Low fuel consumption - High efficiency - Waste heat recovery	- Limited coverage - High installation and operation cost - Inactivation of catalysts by poisoning - Corrosion possibility		
Activated carbon adsorption	AC	Attaching of adsorbate(VOCs) to the active site of adsorbent by diffusion.	- High efficiency, low operation cost - Enough data - Recovering technology	- Difficulties in application at high temperature and humidity - Drastic decrease of efficiency for long-use		
Wet scrubber	WS	Decontamination gas is treated by contacting the contaminated gas and the liquid that can absorb it.	- Low installation and operation cost - Simultaneous removal of aerosol - Small area needed	- Low efficiency - Wastewater treatment facility needed - Unpracticable for VOCs recovery		
Bio-filtration	BF	Biochemical decomposition of VOCs using microorganisms immobilized in porous media (filter media bed).	- Low operation cost - Favorable for low VOCs concentration	- Unfavorable for high VOCs concentration - Inefficient for halogenated VOCs - Clogging phenomena for porous media		
UV Oxidation	UV	Oxidation of VOCs by UV irradiations in photoactivate catalysts (TiO ₂).	- Applicable for wide concentration ranges - Low operation cost	- Refined lifetime for lamp - Unfavorable for fast and high flow rate - Unfavorable for chlorinated VOCs treatment		
Electron beam	EB	Decomposition of VOCs by rapid reaction with activated oxygen, nitrogen and radicals generated by electron beam accelerator.	- Treatment of various VOCs and applicable for wide concentration ranges - High efficiency - Low operation cost - Rapid reaction time	- Noneconomic for small facility - High initial installation cost - Possibility of by-product formation		
Control technologies			Efficiency (%)			
		Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	Ref.
	RTO	95	95	95	95	[43]
	RCO	90	90	90	90	[43]
	Adsorption	64.2	62.56	64.94	74.29	[15]
	Absorption	9.55	15.4	29.6	30.2	[14, 44]
	Bio-filtration	86.6	76.24	94.54	82.55	[15]
	UV Oxidation	76.71	64.48	78.2	78.2	[15]
	Electron beam	50.6	61.6	55	55	[45]

^aReference [15]; ^bReference [44].

석유화학 산업단지에서 방지기술을 거치지 않고 배출되는 BTEX의 양과 방지기술을 거치고 배출되는 BTEX의 양을 산정하였다. 대상 지역에 위치한 화학물질 및 화학제품 제조업의 점오염원에서 2016년 한 해 동안 배출된 BTEX의 배출량은 화학물질 배출·이동량 정보(Pollutant Release and Transfer Register, PRTR)[30]에서 수집하였다. 이때 BTEX는 화학물질 및 화학제품 제조업에 의해 대기 중으로 최초 배출되었으며, 토양 및 수계로 배출되지 않았다[30]. 일반적으로 방지시설에서 배출되는 화학물질의 양은 점오염원에서 배출된 전체 화학물질 양의 약 36%이며[34], 방지기술을 거치지 않았을 때의 배출량은 방지시설 배출량에 방지기술 효율을 역으로 곱하여 계산하였다. 따라서 방지시설을 거치지 않고 배출되는 양(Emission 1)과 본 연구의 평가 대상인 BAT 후보 방지기술에서의 배출량(Emission 2)을 각각 식 (12)-(13)와 같이 산정하였다.

$$\text{Emission 1} = \text{PRTRdata} \times (1 - 0.36) + \text{PRTRdata} \times \frac{0.36}{(\text{EF}_{\text{avg}} / 100)} \quad (12)$$

$$\text{Emission 2} = \text{PRTRdata} \times (1 - 0.36) + \text{PRTRdata} \times \frac{0.36}{(\text{EF}_{\text{avg}} / 100)} \times (1 - \frac{\text{EF}}{100}) \quad (13)$$

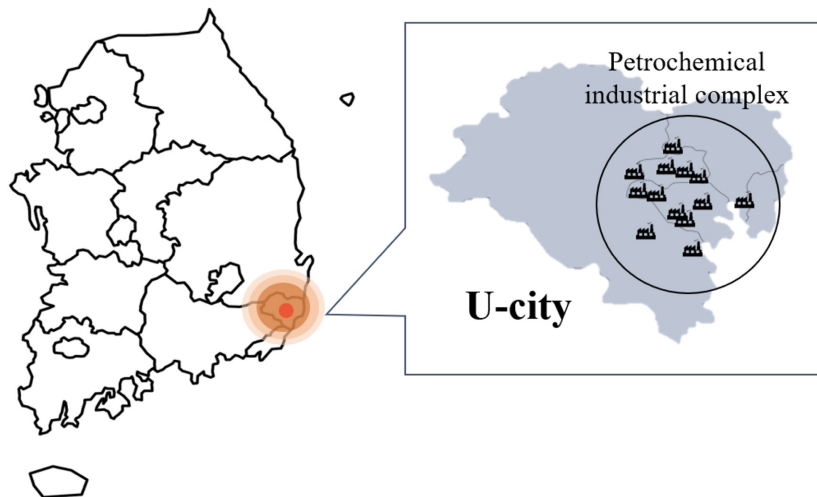
PRTRdata는 화학물질 배출·이동량 정보에서 수집한 2016년 한 해 동안 U-city 내 화학물질 및 화학제품 제조업에서 배출된 BTEX의 양이고, EF_{avg} (%)는 평가 대상 방지기술의 물질별 효율의 평균이며, EF (%)는 평가 대상 방지기술의 물질별 효율이다. 방지기술의 물질별 효율의 평균은 Table 4를 바탕으로 각 물질에 대해서 Benzene 60%, Toluene 68%, Ethylbenzene 74%, Xylene 73%으로 적용하였다.

3-2. 연구 대상 지역 내 다매체 평가시티 모델을 이용한 BTEX 물질 거동 해석

U-city의 산업단지 내에 위치한 VOCs 배출 점오염원에서 2016년 한 해 동안 배출된 BTEX의 정상상태에서의 환경매체 내/간의 비평형 이동을 고려하기 위해 다매체 평가시티 모델 Level III을 이용하였다. Level I은 폐쇄계에서의 물질 거동을 모사하고 Level II는 정상상태에서 매체 간의 평형 이동을 가정하여 이상적인 물질의 거동을 모사하므로[17,21], 실제 환경시스템에서의 현실적인 다매체 거동을 모사하는데 한계가 있기 때문이다. 대상 지역으로 선정된 U-city는 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 대한민국 남동부 해안에 위치해 있는 광역시로 자동차·조선 및 석유화학 공업이 발달해 있는 도시이며, 대기업 중심의 대규모 산업단지가 집중되어 있다. U-city의 총 지역면적은 1,061 km²이며, 통계자료에 근거한 대기, 수계, 토양, 침전물 및 불투수층의 특징을 Fig. 4 하단에 나타냈다. Fig. 4에서와 같이 대상 지역에는 포장도로 및 건물로 인해 불투수층 면적이 17.22%의 높은 비율로 존재하므로[35], 불투수층에서는 화학물질의 빗물에 의한 토양 흡수가 제한되고, 이때 토양으로 흡수하지 못한 양은 빗물과 함께 수계로 흘러가므로 대기에서 토양으로 비에 의한 용해 및 침전 과정을 통한 이동 대신 대기에서 수계로 이동하는 양이 증가한다[17,36]. 따라서 다매체 평가시티 모델 Level III에서 고려되는 매체 간 물질 이동에서 대상 지역의 불투수층 특성을 고려한 물질 이동 과정을 포함해야 하며, 이러한 물질 이동 과정은 식 (14)과 같이 물질 이동 변수 D 로 표현된다[17].

$$D_{\text{rain-imp}} = U_3 A_{\text{imp}} Z_2 \quad (14)$$

식 (14)에서 $D_{\text{rain-imp}}$ 은 불투수층에서 대기에서 토양으로의 빗물에 의한 물질 이동 제한에 상응하는 빗물에 의한 대기에서 수계로의 물질 이동 변수를 나타내며, U_3 는 빗물에 의한 물질 전달 계수, A_{imp} 와



	Environment media characteristic of U-city				
	Air	Water	Soil	Sediment	Impervious area
Area (m ²) ^a	1.06 × 10 ⁹	3.85 × 10 ⁷	8.40 × 10 ⁸	3.85 × 10 ⁷	1.83 × 10 ⁸
Depth (m) ^b	1000	20	0.2	0.05	-
Volume (m ³)	1.06 × 10 ¹²	7.70 × 10 ¹⁰	1.68 × 10 ⁸	1.93 × 10 ⁶	-

^aReference [35]; ^bReference [17].

Fig. 4. Target site location and environment media characteristics in the petrochemical industrial complex of the study area.

Z₂는 각각 대상 지역의 불투수 면적(m³)과 수계의 퓨가시티 용량을 나타낸다.

3-3. BAT 후보군에 대한 매체 통합 인체위해성 평가

방지기술에서 배출된 BTEX의 인체위해성 평가는 매체통합적 접근의 다매체-다경로-다수용체 노출 시나리오를 기반으로 수행되었다. 물질의 다매체 거동 특성을 고려하기 위해 매체 통합 인체위해성 평가에서 BTEX의 ADI 산출 시 다매체 퓨가시티 거동모델의 결과인 각 환경매체 내 BTEX의 잔류농도를 적용하였다. 대기, 수계 및 토양 매체 내 BTEX 잔류농도에 대한 다양한 노출 경로로써 호흡(Inhalation), 물, 토양 및 어류 섭취(Oral ingestion), 그리고 피부에서의 공기, 토양 및 물과의 접촉(Dermal contact)을 고려하였다. 또한 유해화학물질 노출에 대한 수용체 집단은 19~70세의 성인 집단과 유해인자 노출에 보다 민감한 18세 이하의 어린이 집단으로 설정하였다. 본 연구에서의 호흡, 섭취 및 피부접촉에 대한 ADI와 총 ADI 산출 식은 Table 5과 같다. Table 5에서와 같이 총 ADI는 세 가지 노출 경로의 ADI를 합하여 계산되며, 각각의 노출 경로에 따른 ADI는 몸무게, 노출 빈도, 호흡률, 물질 섭취량, 신체 표면적 및 물질 접촉 시간과 같은 노출 계수를 이용하여 산출된다. ADI 산출 시 유해화학물질에 대한 전생애 동안의 만성적인 위해 영향을 평가하기 위해 수용체의 평균 수명을 70년으로 가정하였으며, 이에 따라 Table 5에서 노출 기간(ED) 및 평균적용시간(AT)에 대해 각각 70년,

25550일을 적용하였다. 또한 피부 접촉 경로에 대한 ADI 산출 시 대기 중에 잔류하는 BTEX에 대한 피부 접촉 시간(Dermal exposure time, t_d)은 24시간으로 가정하였다. 수용체 집단에 따른 노출 계수는 수용체 집단에 따라 달라지며, 성인 및 어린이 집단에 대한 노출 계수는 Table 8에 나타났다. 인체위해성 평가에서는 각 수용체 집단의 평균(Mean) 값을 적용하여 ADI를 산출하였다. 또한 Table 5에서 인체위해성 평가의 정확도와 현실성을 높이기 위해 ADI 산출 시 각 노출 경로에 따른 물질별 인체 내 흡수지표를 이용하였으며, 물질별 인체 내 흡수지표는 Table 6에 나타났다. Table 6에서 각각의 흡수지표는 BTEX의 호흡을 통한 폐에서의 흡수 정도, 경구 섭취를 통한 위에서의 흡수 정도, 피부에서의 흡수 정도 및 피부 침투율을 나타낸다.

유해화학물질의 노출량에 대한 위해 영향을 판단하기 위해서 CR 및 HI를 산출해야 한다. 물질별 SF 및 RfD 값은 EPA's IRIS (EPA's Integrated Risk Information System)를 참고하여 Benzene의 SF 값은 Table 8에 나타냈으며, Toluene, Ethylbenzene 및 Xylene에 대한 RfD (mg/kg/day) 값은 각각 0.08, 0.1, 0.2 이다[37-39]. Benzene의 노출 경로별 SF 값은 식 (15)-(16)을 통해 계산된다.

$$\text{Inhalation SF} = \frac{\text{Inhalation unit risk}}{(1 \mu\text{g}/\text{m}^3) \times (20 \text{ m}^3/\text{day}) \times (1/70 \text{ kg}) \times 0.5} \quad (15)$$

$$\text{Dermal SF} = \text{Oral SF} \div \text{GI factor} \quad (16)$$

이때, Benzene의 SF 값은 범위로 표현되어 있기 때문에 범위의

Table 5. Equations of average daily intake of BTEX through multi-route exposure [19]

Exposure pathways	Equation
Total	$ADI = ADI_i + ADI_o + ADI_d$
Inhalation	$ADI_i = \frac{C_a \times IR_i \times EF \times ED}{BW \times AT} \times AIF$
Oral ingestion	$ADI_o = (ADI_{o_water} + ADI_{o_soil} + ADI_{o_fish} \times AOF)$
	$ADI_{o_water} = \frac{C_w \times IR_w \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6}$
	$ADI_{o_soil} = \frac{C_s \times IR_s \times EF \times ED}{BW \times AT \times 2300 \times 10^6}$
	$ADI_{o_fish} = \frac{C_f \times IR_f \times EF \times ED}{AT \times 10^6}$
Dermal contact	$ADI_d = ADI_{d_air} + ADI_{d_water} + ADI_{d_soil}$
	$ADI_{d_air} = \frac{C_a \times IR_{d_air} \times EF \times ED}{BW \times AT}$
	$ADI_{d_water} = \frac{C_w \times IR_{d_water} \times EF \times ED}{BW \times AT}$
	$ADI_{d_soil} = \frac{C_s \times IR_{d_soil} \times EF \times ED}{BW \times AT \times (2400 \times 0.5 + 1.2 \times 0.2 + 1000 \times 0.3)}$
Subscript notations	$IR_{d_air} = A_i \times K_p \times t_a$
	$IR_{d_water} = A_i \times K_p \times t$
	$IR_{d_soil} = A_s \times ADF \times ABF$
a, w, s: Air, water, soil of environmental media i, o, d: Inhalation, oral ingestion, dermal contact of exposure routes o_soil: Exposure through oral ingestion of soil o_fish: Exposure through oral ingestion of fish d_air: Exposure through dermal contact of air d_water: Exposure through dermal contact of water during shower time d_soil: Exposure through dermal contact of soil	

Table 6. Absorption factors of inhalation, ingestion and dermal permeability coefficient according to each exposure route of BTEX

	Absorption factor of Inhalation (AIF) (%)	Absorption factor of Ingestion (AOF) (%)	Absorption factor of dermal (ABF) ^e (%)	Dermal permeability coefficient (K _p) ^f (cm/h)
Benzene ^a	50	100	1.5	0.021
Toluene ^b	50	80	3.6	0.045
Ethylbenzene ^c	64	84	4	0.074
Xylene ^d	63.6	90	15	0.08

^aReference [46]; ^bReference [47]; ^cReferenc [48]; ^dReference [49]; ^eReference [50]; ^fReference [51].

중간 값을 대푯값으로 가정하여 계산하였다. Benzene의 Inhalation unit risk는 2.2×10^{-3} 에서 $7.8 \times 10^{-3} (\text{mg}/\text{m}^3)^{-1}$ 의 범위를 갖으며[40], Benzene의 GI factor (Gastrointestinal absorption factor) 값은 0.9700 이다[41].

3-4. 민감도 분석을 통한 매체 통합 인체위해성 평가의 주요 변수 결정

인체위해성 평가는 변수들의 변동성으로 발생하는 불확실성에 의하여 영향을 받는다[42]. 따라서 유해화학물질의 인체위해성에 중요하게 영향을 미치는 변수를 결정하기 위해 매체 통합 인체위해성 평가 모델에 대해 민감도 분석을 수행하였다. 본 연구에서는 모델 시뮬레이션에 중요하게 작용하고 불확실도가 높아 보다 정확한 값이 요구되는 총 20개의 모델 변수를 민감도 분석에 사용하였다. 다매체 퓨가시티 모델에서 퓨가시티 용량을 구하기 위한 기본 열역학적 변수인 증기압, 용해도, K_{ow} 와 화학물질 및 환경매체의 조건에 따라 불확실성이 높은 각 환경매체(Air, water, soil, sediment)에서의 물질 반감기를 포함한 7가지 변수를 선정하였다[19]. 또한 인체위해성 평가 모델에 사용된 변수 중 동일 수용체 집단 내 개체별 변동성이 큰 몸무게, 노출 빈도, 호흡률, 물, 토양 및 어류 섭취량, 신체 표면적, 토양 흡착 계수, 샤워시간에 대한 변수 및 노출 경로 (Inhalation, oral ingestion, dermal contact)의 SF 값에 대한 변수 13개를 선정하였다[53-55]. 입력 변수의 높은 불확실도를 고려하기 위하여 다매체 퓨가시티 모델 변수에 대해서는 각 변수의 Confidence factor (Cf)를 이용한 Log-normal 분포를 통해 입력변수의 범위를 산정하였다[17]. 또한 인체위해성 평가의 변수 범위는 각 수용체 집단에 대한 노출 계수의 평균 값, 표준편차 값 및 허용 범위를 이용하여 산정하였다. 20가지 변수의 기본 값과 범위 값은 모델에 따라 Table 7과 Table 8에 나타냈으며, 변수의 95% 신뢰수준은 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다[17].

$$\text{Probability} \{ \min < X < \max \} = 0.95 \quad (17)$$

민감도 분석은 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 변수에 10,000번

의 동시적인 변화를 주었을 때 입력변수들과 인체위해성 평가의 출력변수 간의 상관관계를 Spearman 순위상관분석 방법을 통해 상관 계수 ρ로 나타내어 변수들의 민감도를 산정하였다.

3-5. BAT 후보군에 대한 다매체 퓨가시티 모델 기반 비용-편익 경제성 평가

본 연구에서는 통합환경관리제도에서 제시한 경제성 평가법인 비용-편익 경제성 평가(Cost-benefit analysis)를 이용하여 BAT 후보군 중에서 환경성 및 경제성이 우수한 방지기술을 파악하여 BAT를 선정하였다. 비용-편익 경제성 평가는 각 BAT 후보 방지기술의 비용 측면의 처리유량당 투자비 및 운영비와 편익 측면의 오염물질 저감량을 비교함으로써 수행되었다.

비용 측면의 총 비용(Total Cost, TC)은 총 투자비(Total Capital Investment, TCI) 및 총 연간소요비용(Total Annual Cost, TAC)로 나뉘며 식 (18)과 같이 계산한다. 총 투자비(TCI)에는 크게 장치 구입비와 설치비용, 토지매입과 부대설비비, 설비운영비 등이 포함되며, 연간소요비용(TAC)은 방지시설의 내구연한 동안에 매년 소요되는 모든 비용의 총계이며 식 (19)와 같이 산출한다[15].

$$TC = TCI + TAC \quad (18)$$

$$TAC = DAC + IAC - RC \quad (19)$$

DAC는 직접비용(Direct cost)을, IAC는 간접비용(Indirect cost)을, RC는 회수이익(Recovery cost)을 의미한다. 직접비용은 원료, 공공 설비, 폐기물 및 최종처리, 인건비, 유지보수, 교체부품에 대한 비용을 포함하며, 간접비용은 회수자금, 시설간접비, 재산세, 보험료, 관리 비용을 포함한 것이며, 회수이익은 사용원료나 연료를 통제함으로써 회수하여 얻어질 수 있는 비용이다[15]. 방지기술별 비용 산출은 선행연구를 참고하였다[15]. 방지기술별 투자비는 각각의 방지기술을 구성하는 시설에 대한 비용을 포함하며, 운영비용 산출에 있어서 처리용량은 300 m³/min, 처리효율은 95%, 총 가동시간은 8,000 hr/yr 일 때를 기준으로 하였고, 전력비는 1,200원/watt, 전기비용은 72원/kWh, 인건비 및 보수비는 기술마다 비교적 비슷한 비용이 소요되는 것으로

Table 7. Parameters of value, confidence factor and intervals for the sensitivity analysis of multimedia fugacity model

Parameters	Default value (μ)	Confidence factor (Cf) ^a	Interval of 95% of all sample value	
			Min	Max
Vapor pressure	12700	1.5	8467	19050
Solubility (g/m ³)	1780	1.5	1187	2670
Multimedia fugacity model parameters	Log K _{ow}	2.13	1.94	2.34
	Half-life in air (h)	17	6	51
	Half-life in water (h)	170	57	510
	Half-life in soil (h)	550	183	1650
	Half-life in sediment (h)	1700	567	5100

^aReference [52].

Table 8. Parameter values of the receptor groups of adults and children for the sensitivity analysis

Parameters	Symbol	Receptor	Mean	Standard deviation (SD)	Interval of 95% of all sample value		
					Min	Max	
Population parameter	Body weight (kg)	BW	Adults ^a	62.8	10.9	51.9	73.7
			Children ^b	34.8	20.27	14.53	55.07
	Exposure frequency ^c (days/year)	EF	-	345	-	180	365
Inhalation parameter	Inhalation rate (m ³ /day)	IR _i	Adults ^a	14.25	-	11.9	16.9
			Children ^b	12.74	2.41	10.33	15.15
Oral ingestion parameter	Ingestion rate of water (mL/day)	IR _w	Adults ^a	1502.3	785.3	717	2287.9
			Children ^b	797.87	98.1625	699.7075	896.0325
	Ingestion rate of soil (mg/day)	IR _s	Adults ^a	50	-	20	100
			Children ^a	118	-	20	200
	Ingestion rate of fish (mg/kg-day)	IR _f	Adults ^a	1350	2160	0	3510
			Children ^b	1520	3240	0	4760
Dermal contact parameter	Total skin surface area (m ²)	A _t	Adults ^a	1.7084	0.176	1.5324	1.8844
			Children ^b	1.1752	0.4771	0.6981	1.6523
	Exposed skin surface area* (cm ²)	A _s	Adults ^a	9430	971	8459	10401
			Children ^b	6547	2973	3574	9520
	Adherence factor of soil (mg/cm ² -day)	ADF	Adults ^c	0.49	-	0	1.03
Children ^c			0.65	1.2	0	1.85	
Shower time (min/day)	t	Adults ^c	10.4	-	3	61	
		Children ^c	18.41	-	17.09	19.73	
SF value parameter ^d	Inhalation [(mg/kg/day) ⁻¹]		3.495E-02	-	1.54E-02	5.45E-02	
	Oral ingestion [(mg/kg/day) ⁻¹]		3.50E-02	-	1.50E-02	5.50E-02	
	Dermal contact [(mg/kg/day) ⁻¹]		3.61E-02	-	1.55E-02	5.67E-02	

*The exposed skin surface area is the sum of the arms, hands, legs and feet.

^aReference [53]; ^bReference [54]; ^cReference [55]; ^dReference [40].

가정하여 산출되었으며, 현장 여건과 처리 조건에 따라 투자비 및 운영비 산출은 변경될 수 있다[15].

4. 결 과

4-1. 연구대상지역 및 물질 배출량 분석

본 연구에서 산정한 U-city에서의 BTEX 최초 대기 배출량은

Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 PRTR data는 대상 지역의 화학물질 및 화학제품 제조업에서 대기로 배출된 BTEX의 양이며, Emission 1은 생산 공장에서 방지기술을 거치지 않고 배출된 BTEX의 양이며, Emission 2는 각각의 BAT 후보 방지기술을 거쳐 배출되는 BTEX의 배출량이다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이, Emission 1에서 Xylene의 배출량은 74,219 kg/yr으로 BTEX 전체 배출량의 가장 많은 부분인 41.0%를 차지한다. Toluene의 배출량은 전체의 37.7% (68,318 kg/

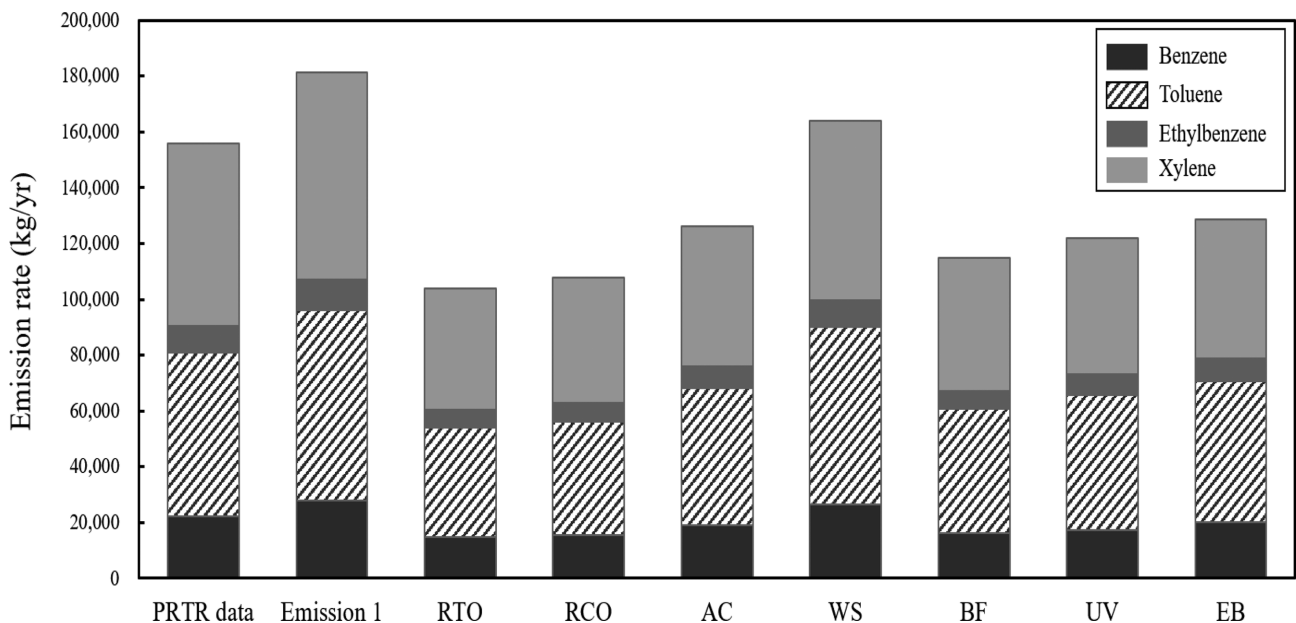


Fig. 5. Comparison result of BTEX emission rates into the air with the alternative VOCs control technologies.

yr)이며 Xylene 다음으로 많이 배출된다. 발암물질인 Benzene은 전체의 배출량의 15.3%를 차지하며, Ethylbenzene은 6%의 가장 낮은 비율로 배출된다.

BAT 후보 방지기술별로 BTEX 배출량을 비교해보면, RTO법은 BTEX 네 가지 물질을 가장 적게 배출한 기술이며, 배출량이 가장 많은 기술은 WS법이다. 각 BAT 후보 방지기술의 물질별 배출량에서 Benzene, Toluene 및 Ethylbenzene을 가장 많이 배출한 기법은 WS법이며, 그 다음으로 많은 양을 배출한 기법은 EB법이다. 하지만 대상 지역의 화학물질 및 화학제품 제조업에서 배출된 BTEX의 배출량에서 가장 많은 부분을 차지했던 Xylene에 대해서는 AC법의 저감율이 EB법 보다 더 낮았으며, 따라서 AC법의 Xylene 배출량이 EB법의 Xylene 배출량 보다 더 많았다. BTEX 배출 총량에 대해 RTO법과 RCO법은 BTEX 배출 총량을 각각 42.6%, 40.4% 저감하였으며, 이에 반해 WS법은 9.5%, EB법은 29.0%, AC법은 30.4%의 비교적 낮은 저감율을 보였으며, BF법과 UV법은 각각 36.6%, 32.7%의 수준으로 BTEX를 저감하여 배출하였다.

4.2. 다매체 거동 모델 기반 방지기술별 BTEX의 환경매체 중 분포 특성 예측

본 연구에서는 산업단지 내 화학물질 및 화학제품 제조 공정에서 발생하는 BTEX의 배출량인 PRTR data를 이용하여 다매체 평가시 Level III 모델을 수행하였으며, 다매체 환경시스템(Air, water, soil, sediment)에서 각 물질의 매체 내 거동 및 분포 특성과 정상상태에서 반응 및 이류현상으로 인한 손실률을 파악하였다. Level III 모델 수행 결과인 환경매체 간 물질 이동, 다매체 환경시스템 밖으로의 손실 및 환경매체 내 잔류농도 등을 종합적으로 고려하여 Fig. 6에 물질별로 나타냈다.

Fig. 6(a)에서와 같이, Benzene은 제조업 생산 공정에서 2.554 kg/hr의 속도로 대기 매체로 유입되며, 대기 중 Benzene의 19.69%는 0.503 kg/hr의 이류 속도로 환경매체 밖으로 유출되고, 80.26%는 2.050 kg/hr의 비교적 빠른 생화학적 반응 속도로 분해되었다. 따라서 대기 매체로 유입된 Benzene의 대부분(99.95%)이 다매체 환경시스템에서 손실되었으며, 대기 유입량의 단 0.05%만이 다른 환경매체로 이동하였다. 이는 Benzene이 다른 유기화합물에 비해 증기압이 높고 가벼운 물질이므로 다른 환경매체에서 쉽게 증발되어 대기 매체로 이동하고 이류 현상에 의해 쉽게 다매체 환경시스템 밖으로 빠져나갈 수 있기 때문이다. 또한 Benzene은 오존 전구 물질로써 대기 내에서의 반감기가 짧아 대기 중에 공존하는 다른 물질과 활발하게 반응하므로 이류 현상 및 반응에 의한 손실 작용이 우세하게 발생한 것으로 판단된다. 확산, 비에 의한 용해 그리고 침전 과정을 통해서 8.13×10^{-4} kg/hr의 빠른 속도로 대기 매체에서 토양 매체로 이동하였고, 이 중에서 90.49%는 증발되어 다시 대기 매체로 이동하였다. 나머지 1.01%는 지표수 및 비에 의해 유출되어 수계 매체로 이동하였고, 8.50%는 생화학적 반응에 의해 토양 매체에서 제거되었다. 토양 매체에서는 대기 매체로부터 유입량이 많은데 비해, 이류 현상에 의한 물질 손실이 발생하지 않고 생화학적 반응에 의한 제거 기작이 상대적으로 적게 발생하여 전체 환경매체 내 잔류농도의 60.05%가 토양 매체에 축적되었다. 또한 Benzene은 대기 매체에서 3.93×10^{-4} kg/hr의 속도로 비 또는 에어로졸 침전 및 흡착과정에 의해 수계 매체로 이동하였으며, 수계 매체 유입량의 32.02%는 다시 대기 매체로 증발되었고, 유입량의 67.91%는 반응

및 이류 현상으로 수계 매체에서 손실되었으며, 나머지는 현탁물질로 침전되어 침전물 매체로 이동하였다. 침전물 매체에서 수계 매체로 유입된 양의 71.74%는 2.09×10^{-7} kg/hr의 속도로 재부유하여 다시 수계 매체로 이동하였으며, 수계 매체와 침전물 매체 간의 상호작용이 활발하게 나타났다.

Toluene, Ethylbenzene 및 Xylene의 다매체 환경시스템 내의 물질 거동은 Fig. 6(b)-(d)에 나타냈으며, Benzene의 다매체 거동과 비슷한 경향을 보였다. 산업단지에서 다매체 환경시스템으로 유입된 BTEX의 대부분(99.97%)은 대기 매체에서 이류 현상과 생화학적 반응에 의해 다매체 환경시스템에서 손실되었으며, 나머지는 매체 간 비평형 이동에 따라 토양 및 수계 매체로 이동하였다. 이때 대기 매체에서 토양 매체로 이동하는 과정은 매체 간 이동 과정에서 가장 우세하게 발생하였다. 각 물질의 토양 매체 유입량 중 7~20%가 생화학적 반응에 의해 제거되었으며, 수계 및 침전물 매체에서는 각각의 매체에 대한 유입량의 48~68%가 이류 및 반응 현상에 의해 다매체 환경시스템 밖으로 손실되었으며, 나머지는 환경매체 내에 잔류하였다. 각 물질의 환경매체 내 잔류농도 비율은 Fig. 6(a)-(d)에서 볼 수 있듯이, BTEX 모두 전체 환경매체 내 잔류농도의 60% 이상이 토양 매체에 잔류하였으며, 유류계 오염물질로써 토양에 대한 강한 흡착 특성을 보였다. 또한 Benzene은 전체 잔류농도의 12.84%, 18.83%가 수계 및 침전물 매체에 잔류하는 반면에 Toluene, Ethylbenzene, Xylene은 수계 매체에 각각 6.67%, 2.88%, 2.75%의 비교적 낮은 비율로, 침전물 매체에는 각각 29.28%, 31.01%, 32.90%의 비교적 높은 비율로 분포하였다. 수계와 침전물 매체에서의 잔류농도 분포 차이는 각 물질의 물에 대한 용해도와 고형물 및 유기체에 대한 흡착 계수인 K_{OW} 의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 물에 대한 용해도는 Benzene의 용해도 보다 3~12배 낮으므로 수계에서 낮은 비율로 잔류하고, 물에 용해되지 않은 물질은 현탁된 고체물질로써 침전되며 Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 K_{OW} 은 비교적 높기 때문에 침전물 내 고형물질에 보다 강하게 흡착된 것으로 사료된다. 또한 Benzene은 전체 잔류농도의 8.73%가 대기 매체에 존재하였으며 Toluene, Ethylbenzene, Xylene은 각각 3.43%, 1.93%, 1.21%가 대기 매체에 잔류하였는데, 이는 Benzene의 증기압이 다른 세 물질의 증기압 보다 3~11배 높아 수계 및 토양 매체에서 증발하여 대기 매체로 유입되는 과정이 다른 물질에 비해 더욱 활발하게 발생하였기 때문이다.

네 가지 환경매체에서 환경매체별 BTEX의 상대적 잔류 분포 비율은 다르게 나타났다. 대기, 수계, 토양, 침전물 매체에서 Xylene은 각각 42%, 48%, 69%, 72%의 비율로 모든 환경매체에서 가장 높은 비율로 잔류하였다. Toluene은 각각 37%, 37%, 21%, 20%의 비율로 존재하여 두 번째로 높게 나타났다. 또한 Benzene과 Ethylbenzene은 각각 14~2%, 7~5%의 비교적 낮은 비율로 잔류하였으며, 이러한 환경매체별 BTEX 분포 비율은 최초 대기 유입량(Xylene > Toluene > Benzene > Ethylbenzene)과의 상관성을 보인다. 하지만 대기 및 수계 매체에서 Benzene은 각각 14%와 11%, Ethylbenzene은 각각 6%와 5%의 비율로 잔류하는 것에 반해, 토양 및 침전물 매체에서는 Ethylbenzene은 각각 7%와 6%, Benzene은 각각 3%와 2%의 비율로 잔류하였다. 이는 Benzene의 상대적으로 높은 증기압 및 용해도의 영향 때문으로 판단된다. 따라서 다매체 환경시스템 내 매체 이동, 손실률 및 환경매체 내 잔류 등의 BTEX 물질 거동은 각 물질의 물리·화학적 특성 및 BTEX 최초 대기 유입량에 영향을 받으므로 각

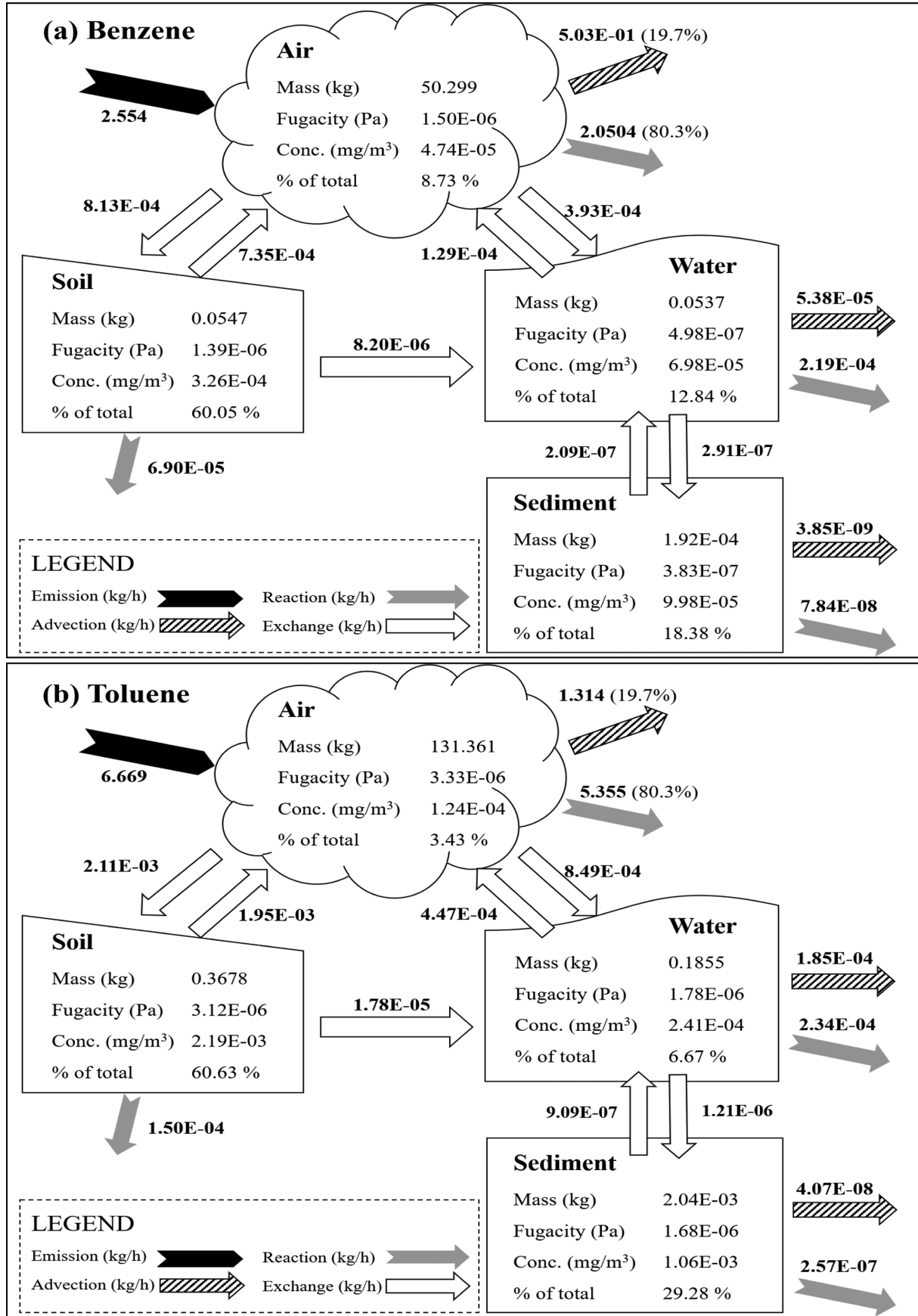


Fig. 6. Fate and transport of BTEX in environment multimedia using Level III multimedia fugacity model: (a) benzene, (b) toluene, (c) ethylbenzene and (d) xylene.

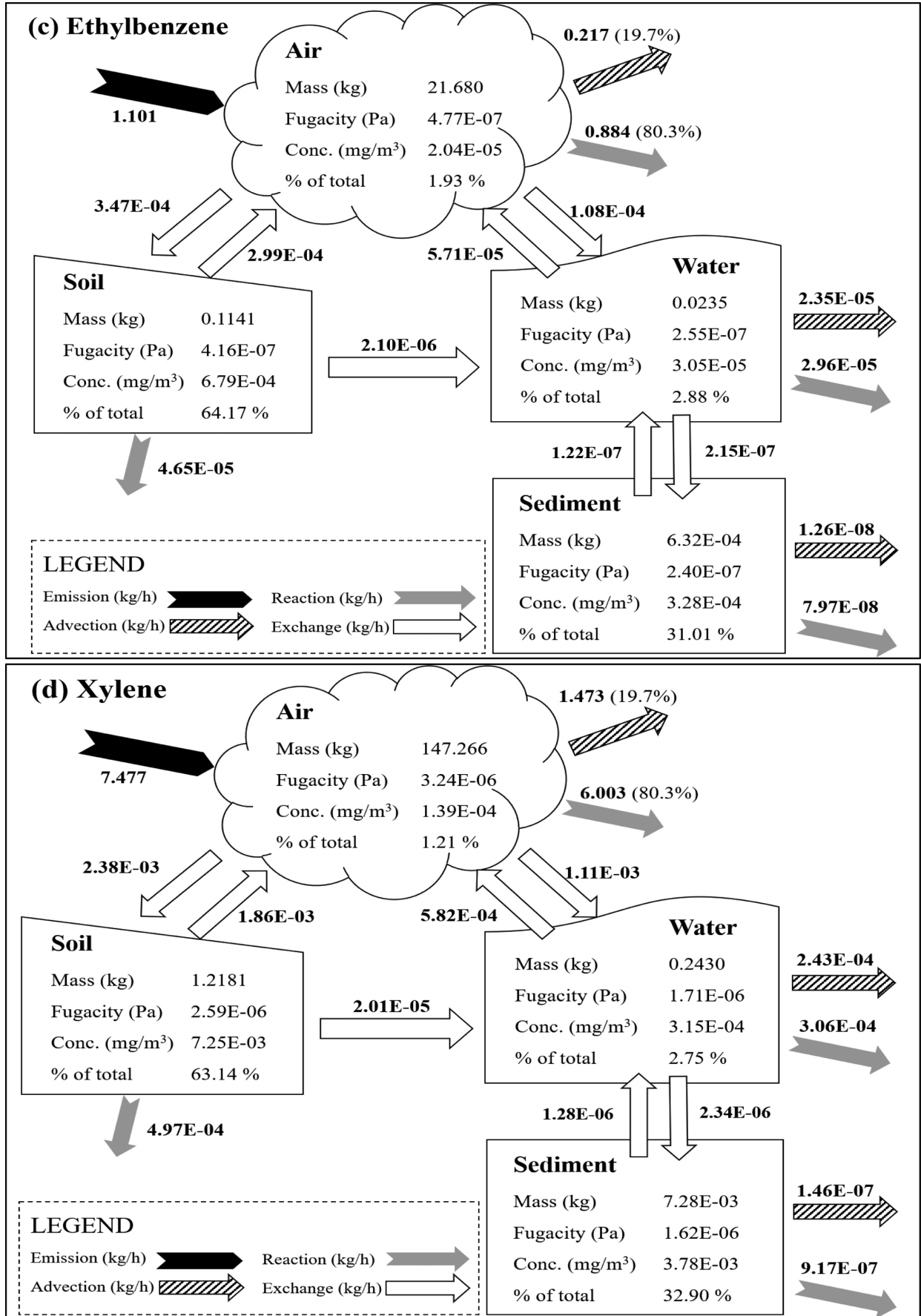


Fig. 6. (continued).

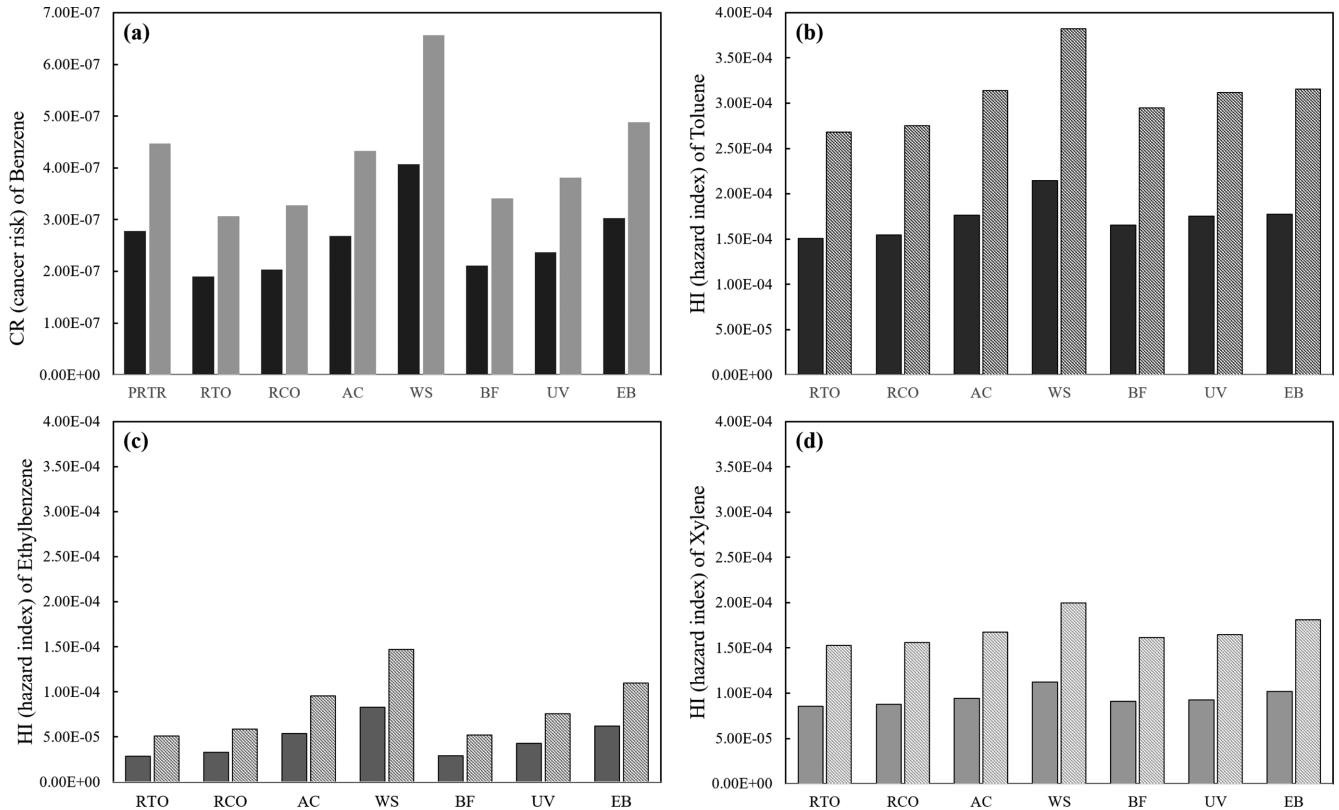


Fig. 7. Comparisons of human health risk assessment on the adult and children groups by residuals in environment multimedia with the alternative VOCs control technologies (a) benzene, (b) toluene, (c) ethylbenzene and (d) xylene.

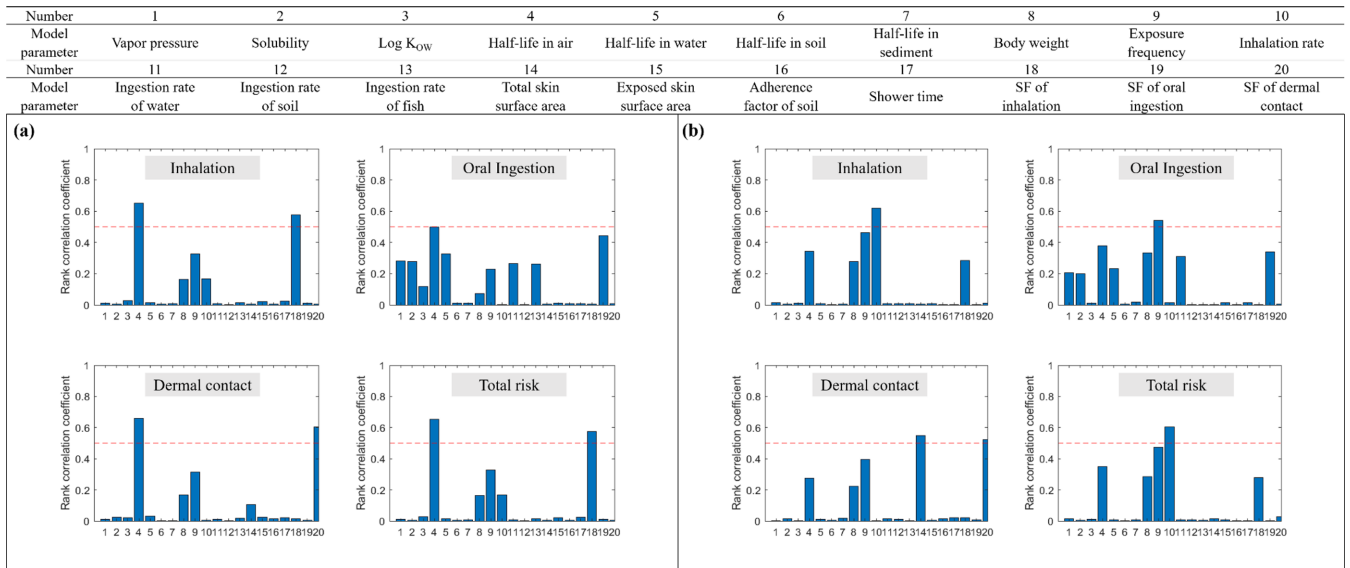


Fig. 8. Sensitivity analysis of model parameters of multimedia fugacity model with respect to human health risk assessment according to the exposure route of inhalation, oral ingestion, dermal contact and total risk for (a) adult and (b) children groups.

BAT 후보 방지기술을 거쳐 다매체 환경시스템 내로 유입된 BTEX 배출량을 다매체 평가모델에 적용하여 환경매체 내 잔류농도를 산출하고 이를 기반으로 BAT를 선정해야 한다.

4.3. 다매체-다경로-다수용체 노출 시나리오를 고려한 방지기술별 인체위해성 평가

석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT 선정에 앞서, 각

BAT 후보 방지기술을 통해 배출된 BTEX의 환경매체 내 잔류농도가 인체 건강에 미치는 영향을 평가하기 위해 다매체-다경로-다수용체 노출 시나리오 기반의 인체위해성 평가를 수행하였으며, 높은 인체위해성을 갖는 방지기술은 BAT 선정에서 제외하였다. 먼저 발암물질인 Benzene의 성인 및 어린이 집단에 대한 인체위해성 평가 결과는 Fig. 7(a)와 같다. 성인 집단의 경우, RTO법, RCO법, BF법은 각각 1.90×10^{-7} , 2.03×10^{-7} , 2.11×10^{-7} 의 CR 값을 가지며 비교적

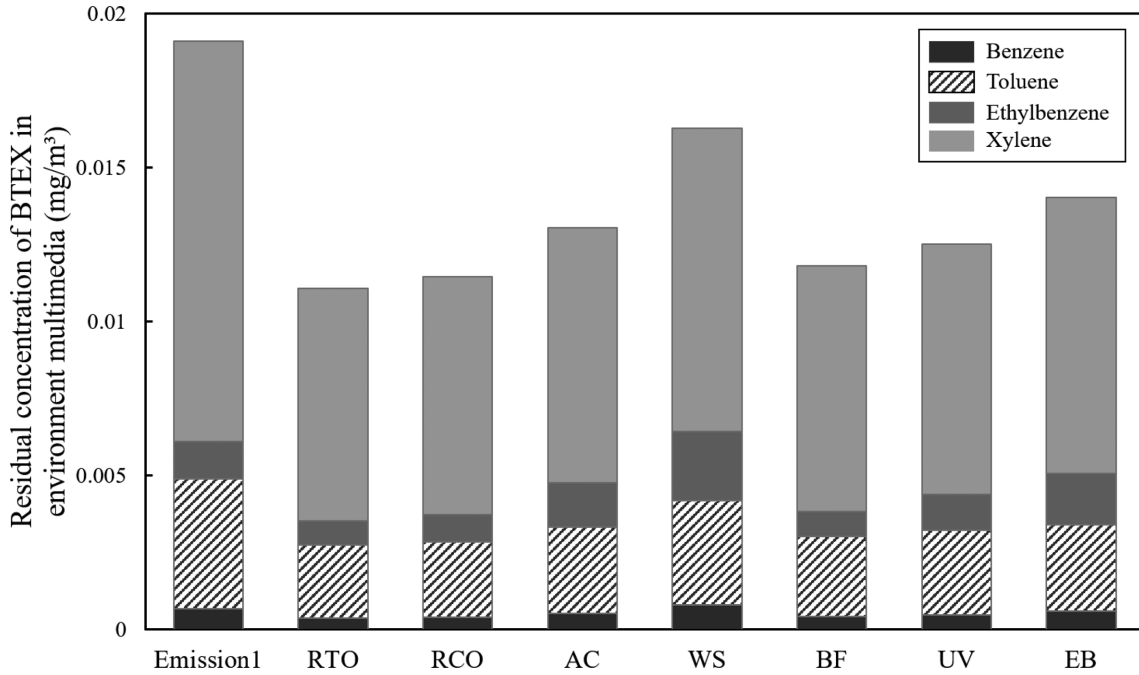


Fig. 9. Comparisons of residual cocentrations of BTEX in environment multimedia emitted from the alternative VOCs control technologies.

낮은 인체위해성을 보였다. 이와는 반대로 WS법의 CR 값은 4.70×10^{-7} 으로 평가 대상 방지기술 중 가장 높았으며, EB법, AC법 및 UV법의 CR 값은 $2.37 \times 10^{-7} \sim 3.03 \times 10^{-7}$ 로 비슷한 수준의 인체 위해성을 보였다. 성인 집단에 대한 CR 값과 마찬가지로, 어린이 집단에 대한 RTO법, RCO법, BF법의 CR 값은 3.07×10^{-7} , 3.28×10^{-7} , 3.41×10^{-7} 로 BAT 후보군 중에서 낮은 위해성을 보였으며, 그 다음으로 UV법, AC법, EB법 순으로 낮은 위해성을 보였다. WS법의 CR 값은 6.56×10^{-7} 로 가장 높은 위해성을 보였다. 18세 이하의 어린이 집단은 모든 BAT 후보 방지기술에 대해 성인 집단보다 1.6배 높은 발암위해성을 보였다. 이는 성인 집단에 비해 어린이 집단의 단위 체중당 호흡률과 토양 및 어류 섭취량이 많으며 오염물질 접촉 시간 및 흡착 계수가 높기 때문에 Benzene 노출에 따른 발암위해도 영향에 더 민감하게 반응한 것으로 사료된다. BAT 후보 방지기술에 대한 CR 값이 1.0×10^{-6} 이하이므로, 환경매체 내 잔류하고 있는 Benzene에 대해 발암 위해가 없다고 판단되나, 어린이 집단에 대한 WS법의 CR 값은 발암 위해 영향 임계 값 (1.0×10^{-6})에 근접하였다.

성인 집단과 어린이 집단에 대하여 비발암물질인 Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 인체위해성 평가 결과는 Fig. 7(b)-(d)와 같다. Fig. 7(b)에서 볼 수 있듯이, BAT 후보군의 Toluene에 대한 HI는 Benzene의 CR 산출 결과와 비슷한 경향을 보였다. 성인 집단에 대해 RTO법, RCO법 및 BF법의 HI는 1.66×10^{-4} 이하로 낮았으며, WS법의 HI는 2.15×10^{-4} 로 가장 높았으며, 나머지 BAT 후보기술들에 대한 Toluene의 HI는 약 1.75×10^{-4} 으로 비슷하였다. Ethylbenzene에 대한 HI 산출 결과는 Fig. 7(c)와 같은데, BTEX에서 Ethylbenzene을 제외한 물질에 대해서는 RCO법의 인체 위해 영향이 BF법에 비해 낮았던 반면에 Ethylbenzene에 대해서는 BF의 HI는 2.92×10^{-5} 으로 RCO법의 HI (3.30×10^{-5}) 값 보다 낮았다. Ethylbenzene의 HI가 가장 높은 BAT 후보 방지기술은 WS법이었으며, 성인 및 어린이 집단에 대한 HI는 각각 8.27×10^{-5} , 1.47×10^{-4} 이다. Xylene에 대한

BAT 후보군의 HI는 Fig. 7(d)과 같다. BAT 후보군 중에서 인체위해성이 높은 기술은 WS법과 ES법으로 성인 집단에 대해 각각 1.12×10^{-4} , 1.02×10^{-4} 의 HI 값을, 어린이 집단에 대해 2.00×10^{-4} , 1.81×10^{-4} 의 HI 값을 보였다. Toluene, Ethylbenzene 및 Xylene의 HI 값을 비교해보면, 다매체 환경시스템 내 잔류량은 Xylene, Toluene, Ethylbenzene 순으로 많았지만, HI 값은 Toluene, Xylene, Ethylbenzene 순으로 높았다. 이는 세가지 발암물질 중에서 Toluene의 독성이 가장 강하기 때문에 일일 허용 수준이 낮은 것으로 사료된다. 따라서 Toluene, Ethylbenzene, Xylene의 인체위해성 평가에서 유해화학물질에 대한 노출 수준이 동일하더라도 일일 허용 수준 참고치가 낮을수록 HI가 높게 평가될 수 있다.

이를 통해 각각의 BAT 후보 방지기술들의 성인 집단과 어린이 집단에 대한 BTEX 물질의 인체위해성 영향을 종합해보면, 비발암물질인 Xylene, Toluene, Ethylbenzene의 경우 RTO법과 RCO법은 성인 집단에 대해 각각 2.65×10^{-4} , 2.75×10^{-4} , 어린이 집단에 대해 4.72×10^{-4} , 4.90×10^{-4} 으로 낮은 HI 값을 보였다. EB법, AC법, UV법 및 BF법은 성인 집단에 대하여 각각 3.41×10^{-4} , 3.24×10^{-4} , 3.10×10^{-4} , 2.86×10^{-4} 의 HI 값을 나타냈고, 어린이 집단에 대해서는 6.07×10^{-4} , 5.77×10^{-4} , 5.52×10^{-4} , 5.08×10^{-4} 의 HI 값을 보였다. WS법은 성인에 대해 4.09×10^{-4} , 어린이에 대해 7.29×10^{-4} 의 HI 값으로써 가장 높은 인체위해성을 나타냈다. 이때 Benzene의 CR 값과 마찬가지로 어린이 집단에 대한 Xylene, Toluene, Ethylbenzene의 HI는 성인 집단에 비해 1.8배 높았으며, 이는 비발암물질에 대해 어린이 집단이 성인 집단보다 더 민감하게 위해 영향을 받는다는 것을 의미한다. 또한 Xylene, Toluene, Ethylbenzene의 HI 총 합은 1보다 작으므로, BAT 후보 방지기술에 따른 BTEX 노출 수준은 건강 위해 유발 가능성이 없다고 판단될 수 있지만, BAT 후보 방지기술 중에서 WS법의 성인 및 어린이 집단에 대한 BTEX 위해도는 발암 및 비발암 위해 영향 임계 값에 근접하였다. 수용체의 민감성에 따라 인체위해 정도는 달라질 수 있으며, 환경매체 내 BTEX에

대한 노출이 많고 민감하게 반응하는 수용체 집단에 대하여 본 연구의 성인 및 어린이 집단 보다 더 높은 인체위해성이 발생할 수 있으므로, 본 연구에서는 WS법을 BAT 후보군에서 제외하였다.

4.4. 다매체 평가시티 모델 기반 인체위해성 평가 모델의 주요 변수 결정

성인 및 어린이 집단의 노출 경로별 인체 위해도에 영향을 미치는 변수를 결정하기 위해서 몬테카를로 시뮬레이션과 순위 상관분석을 이용한 매체 통합 인체위해성 평가 모델의 민감도 분석을 실시하였다. 노출 시나리오의 대상 유해화학물질은 BTEX 중 유일한 발암 물질인 Benzene으로 설정하였으며, 노출 경로는 호흡, 경구 섭취 및 피부 접촉을 고려하였다. Table 7과 Table 8에 나타난 바와 같이, 다매체 평가시티 모델에 대한 7가지 변수와, 인체위해성 평가 모델에 사용된 변수 13개를 민감도 분석에 사용하였다. 민감도 분석 결과는 순위 상관계수 값의 절대값으로 표현하여 변수 간의 상관성 유무와 상관성 크기를 나타냈다. Benzene에 대하여 매체 통합 인체위해성 평가 모델의 변수와 노출 경로에 따른 위해도의 상관성은 Fig. 8과 같다.

Fig. 8(a)은 성인 집단에 대한 Benzene의 노출 경로별 인체위해성 평가 모델의 민감도 분석 결과를 나타낸다. 민감도 분석 결과, 모든 노출 경로에서 성인 집단의 인체위해도는 대기 매체에서의 Benzene의 반감기와 가장 높은 상관성을 보였다. Benzene의 다매체 거동 중 손실 작용은 대기 매체에서 가장 활발하게 발생하였으며 대기 매체에서의 반감기는 반응 속도에 관여하므로, 대기 매체에서의 반감기가 길수록 물질의 반응 손실 작용이 제한된다. 결과적으로 Benzene의 반감기는 대기 매체 내 Benzene 물질 잔류농도에 영향을 미치기 때문에 Benzene 물질의 인체위해도와 높은 상관성을 보인 것으로 판단된다. 또한 각 노출 경로에 대한 SF 값이 그에 상응하는 노출 경로에 따른 인체위해도와 높은 상관성을 보였다. SF 값은 노출 경로의 특이적 발암 인자로서 노출 경로별 위해도 값에 직접적으로 영향을 주기 때문으로 사료된다.

한편 Fig. 8(b)은 어린이 집단에 대한 Benzene의 노출 경로별 인체위해성 평가 모델의 민감도 분석 결과를 나타내는데, 이는 앞서

설명한 성인 집단에 대한 인체위해성 평가 모델의 민감도 분석 결과와 다른 경향을 보였다. Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이, 호흡, 경구 섭취 및 피부 접촉의 노출 경로에 따른 인체위해도와 각각 호흡률, 노출 빈도 및 신체 표면적이 높은 상관성을 보였다. 이러한 어린이 집단에 대한 인체위해성 평가 모델의 주요 입력변수들은 노출 시나리오의 노출 계수로써 Benzene 물질에 대한 노출량 즉, 체내 흡수량에 관여한다. 따라서 어린이 집단에 대한 인체위해도는 다매체 환경시스템 내 Benzene 물질의 잔류량 보다 각 노출 시나리오에 따른 노출량에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 성인 집단과 어린이 집단 모두 총 위해도의 민감도 분석 결과와 호흡 경로에 대한 민감도 분석 결과가 매우 유사한 경향을 가졌으며, 따라서 다양한 노출 경로 중에서 호흡 경로가 Benzene 물질의 발암위해성과 가장 높은 상관성을 보인다.

4.5. 다매체 거동을 고려한 평가 대상 방지기술의 환경성 평가

BAT 후보군의 환경성을 평가하기 위해서 BTEX의 다매체 거동을 고려해 방지기술 배출량 기준이 아닌 다매체 환경시스템 내 오염물질 잔류농도를 기준으로 방지기술별 오염물질 저감효율을 산출하였다. 방지기술을 거치지 않고 배출된 BTEX의 양인 Emission 1과 방지기술을 거쳐 배출된 BTEX 양인 Emission 2를 이용하여 다매체 평가시티 모델을 수행하였으며, 다매체 환경시스템 내 방지기술별 BTEX의 잔류농도는 Fig. 9와 같다.

Emission 1의 결과와 비교하여, BAT 후보군은 BTEX 전체 잔류농도를 저감하였으며, 전반적으로 Benzene과 Ethylbenzene에 대해서는 낮은 저감효율을, Toluene과 Xylene에 대해서는 높은 저감효율을 보였다. RTO법은 평가 대상 방지기술 중 환경매체 내 BTEX 잔류농도에 대한 저감효율이 42.1%로 가장 높았으며, WS법의 저감효율은 13.3%로 가장 낮았다. RCO법과 BF법의 환경매체 내 BTEX 잔류농도 저감효율은 각각 40.1%, 37.4%로 비교적 높았으며, 그 외의 UV법, AC법, EB법의 저감효율은 각각 33.6%, 31.6%, 30.5% 순으로 높았다. BAT 후보군의 BTEX 잔류농도에 대한 저감효율은 기존의 배출량 기준의 저감효율과 비슷한 경향을 보였으나,

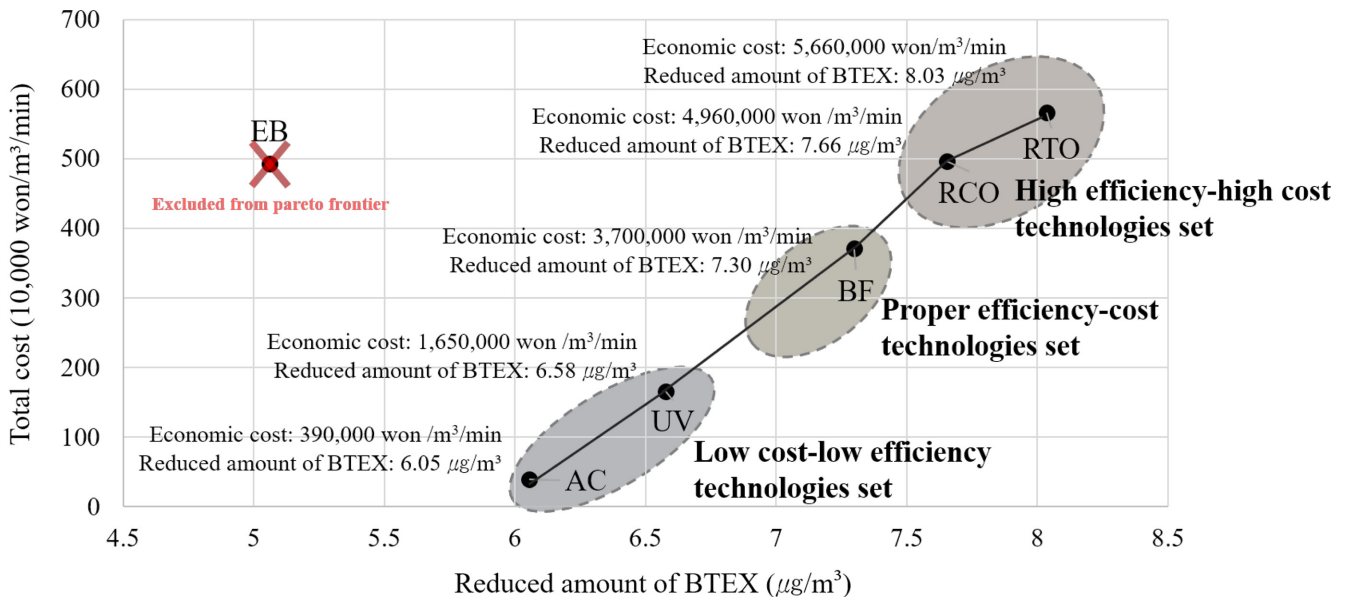


Fig. 10. Best available technology of economic costs and amounts of VOCs emission reduction with the alternative VOCs control technologies.

물질별 잔류농도 저감효율은 환경매체 내 거동 특성 및 방지기술의 물질별 저감 특성에 따라 달라졌다. 환경매체 내에 잔류하는 Benzene에 대해서 EB법은 11.97%의 낮은 저감효율을 보였으며, WS법으로 처리했을 경우에는 오히려 환경매체 내 Benzene의 잔류농도가 증가하였다. 또한 WS법, EB법 및 AC법은 환경매체 내 존재하는 Ethylbenzene의 잔류농도를 약 1.2~1.8배 증가시켰으며, UV법은 Ethylbenzene에 대해 2.14%의 낮은 저감효율을 보였다. 따라서 BAT 후보 기술들의 물질별 잔류농도 저감효율은 Emission 2 저감효율에 비해 Benzene과 Ethylbenzene에 대해서는 낮은 저감효율을, Toluene과 Xylene에 대해서는 높은 저감효율을 보였다.

4.6. VOCs 저감을 위한 BAT 후보군의 BAT 선정을 위한 비용·편익 경제성 평가

BAT는 오염물질 배출을 가장 효과적으로 줄이는 동시에 경제적으로 실현성이 있어야 하므로[8], 각 BAT 후보 방지기술들에 대해 비용·편익 경제성 평가를 수행하였다. 앞서 실시한 인체위해성 평가 결과를 반영하여 WS법을 BAT 선정 후보군에서 제외하였으며, 환경성 평가의 결과를 고려하여 각 BAT 선정 후보군의 환경매체 내 BTEX 잔류농도 저감량과 방지기술의 소요비용을 비교·분석하여 환경성 및 경제성이 우수한 방지기술을 선별하였다.

BAT 후보 방지기술의 비용·편익 경제성 평가 결과는 Fig. 10과 같다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, RTO법과 RCO법은 환경매체 내 BTEX의 저감농도에 대하여 8.03 µg/m³, 7.66 µg/m³의 가장 높은 저감 성능을 보이며 환경성 측면에서는 고효율 기술이지만, 경제성 측면에서 이 두 기술은 산화장치와 재생장치로 구성되어 있어 많은 설비 비용을 필요로 하기 때문에 많은 투자 및 운영 비용이 소요되는 고비용 기술군으로 판단된다. BF법은 7.30 µg/m³의 저감성능을 보이며 고비용 기술 군인 RTO법 및 RCO법과 비슷한 오염물질 저감 성능으로 환경적 편익이 크며, 총 소요비용을 최대 1,960,000 원/m³/min을 절감할 수 있어 환경성과 경제성이 모두 우수하다. UV oxidation법은 6.56 µg/m³의 BTEX 잔류농도 저감 성능을 보이며, 고효율 기술군에 비하여 상대적으로 적은 비용이 소요되는 경제성이 우수한 기술이다. AC법의 경우 소요비용은 390,000 원/m³/min으로 가장 낮아 경제성 측면에서 가장 우수하지만, 6.05 µg/m³의 BTEX 잔류 농도 저감 효과를 보여 BAT 후보 방지기술 중 상대적으로 낮은 환경적 편익을 보인다.

BAT 후보군의 소요비용과 잔류농도 저감효율은 서로 파레토 최적(Pareto optimality) 관계에 있다. BAT 후보 방지기술 중 RTO법, RCO법, BF법, UV법 및 AC 법은 파레토 프론티어(Pareto frontier)를 이루며, EB법은 파레토 프론티어에 포함되지 않는데 이는 다른 BAT 후보 방지기술들에 비하여 저감 성능이 떨어지며 상대적으로 고비용 기술이므로 환경적 및 경제적 측면에서 모두 이점이 없기 때문이다. 그러므로 U-city 내 석유화학 산업단지의 VOCs 배출 저감을 위한 BAT는 RTO법, RCO법, BF법, UV법, AC법으로 선정할 수 있다. 선정된 BAT군 중에서 상대적으로 RTO법, RCO법은 저감효율은 뛰어나지만 소요비용이 큰 고비용-고효율 기술군으로, UV법과 AC법은 저감효율은 낮지만 소요비용이 적은 저효율-저비용 기술군으로 분류할 수 있다. 또한 BF법은 BAT 기술 중에 우수한 저감효율과 적정 수준의 소요비용의 기술이므로 적정효율·비용 기술로 분류할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 BAT 선정 방법론은 인체위해성, 환경성, 경제성을 고려해 VOCs 저감을 위한 최적의

환경관리기술군을 분류하였으며, 사업장별로 다매체 환경시스템과 인체건강에 미치는 영향을 판단해 오염물질 배출시설에 가장 효율적인 BAT을 선정할 수 있다. 나아가, 다매체 거동모델 기반의 BAT 선정 방법론은 화학물질 및 화학제품 제조업뿐만 아니라 통합환경관리제도 대상 업종에 적용될 수 있으며, 이는 사업장의 효율적인 방지시설 운영을 통한 실질적인 환경개선과 우리나라 환경관리의 선진화에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구는 다매체 플러그시티 모델 기반의 인체위해성·환경성·경제성 평가 방법을 이용하여 화학물질 및 화학제품 제조 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT 선정 방법을 제시하였다. 연구 대상 지역인 U-city의 산업단지에서는 VOCs 중 BTEX가 Xylene, Toluene, Benzene, Ethylbenzene 순으로 많이 배출되었으며, 다매체 플러그시티 Level III 모델을 수행한 결과, 다매체 환경시스템으로 유입된 BTEX는 토양, 대기, 수계, 침전물 매체 순으로 높게 잔류하는 분포를 보였으며, 손실 작용에서는 반응에 의한 분해가 우세하게 발생하였다. 다매체, 다경로, 다수용체를 고려한 매체 통합 위해성 평가를 수행한 결과, 어린이 집단에서 WS법의 위해도 값이 인체 위해 영향 임계 값에 가장 근접하여 BAT 선정 기술군에서 제외하였으며, 인체위해성의 민감도 분석 결과, 성인 집단에 대하여 대기 매체에서의 물질 반감기와 노출 경로별 SF값이, 어린이 집단에 대해서는 호흡률, 노출 빈도, 신체 표면적과 같은 각 노출 경로의 노출 계수가 인체위해성에 중요하게 작용하는 모델 변수로 판별되었다. 다매체 플러그시티 모델 기반의 환경성 평가는 BTEX의 환경매체별 잔류농도를 파악하여 각 BAT 후보 방지기술의 저감효율을 산출하였으며, RTO법, RCO법 및 BF법은 약 37% 이상의 비교적 높은 잔류농도 저감효율을, UV법, AC법 및 EB법은 약 30~33%의 저감효율을, WS법은 약 13%의 낮은 저감효율을 보였다. 마지막으로 비용·편익 경제성 평가를 고려하여, RTO법, RCO법, BF법, UV법, AC법이 석유화학 산업단지 내 VOCs 저감을 위한 BAT 군으로 선정되었으며, 이는 환경통합관리제도의 대상업종인 화학물질 및 화학제품 제조업에서 효율적인 VOCs 저감을 위한 BAT 선정 자료로써 활용되며, 더 나아가 모든 대상업종에 적용되어 우리나라 통합환경관리제도 운영과 환경관리의 선진화에 기여할 것으로 기대된다.

감 사

이 논문은 2017년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사를 드립니다(No. 2017R1E1A1A03070713).

Nomenclature

- A : area (m²)
- AC : activated carbon adsorption
- ADI : average daily intake (mg/kg/day)
- AT : average time (days)
- BAT : best available technology
- BF : bio-filtration

BTEX : benzene, toluene, ethylbenzene, xylene
 CR : cancer risk
 D : intermedia transport variable (mol/Pa·hr)
 EB : electron beam
 ED : exposure duration (years)
 EF : exposure frequency (days/year)
 HI : hazard index
 K_{OC} : organic carbon partition coefficient
 K_{OW} : octanol-water partition coefficient
 RCO : regenerative catalytic oxidation
 RfD : reference dose
 RTO : regenerative thermal oxidation
 SF : cancer slope factor (mg/kg/day)⁻¹
 t_a : dermal exposure time (hours)
 U : intermedia transport parameter (m/h)
 UV : UV oxidation
 VOCs : volatile organic compounds
 WS : wet scrubber
 Z : fugacity capacity (mol/m³·Pa)

Reference

- Shin, Y. S., "The Necessity and Status of Media Integrated Risk Assessment for Integrated Environmental Management," *Env. L. P.*, **2**, 145-166(2009).
- Kim, K. Y., Hong, J. S., Kim, H. Y. and Kwon, O. S., "Environmental Policy: A Case Study on the Multi-media Integrated Environmental Management," *Spring Conference on Korea Society of Waste Management*, **1**, 27-30(2009).
- Han, D. H., "Future Tasks and Prospects on Integrated Pollution Prevention & Control," *Spring Conference on Korean Society on Water Environment & Korean Society of Water and Wastewater*, **2016**, 625-626(2016).
- Kim, K. Y., Shin, S. J., Moon, H. S., Jeon, T. W. and Shin, S. K., "A Study on the Understanding and Consideration of the European Union's Integrated Environmental Management Guidelines (IED) and the Best Available Technology Reference (BRef)," *Journal of Korean Society of Urban Environment*, **17**(1), 109-117(2017).
- Lee, C. H., Moon, H. J., Lee, M. S., Han, D. H., Seo, E. J., Kim, M., Jeong, A. Y. and Jeong, S. H., "A Study on the Improvement of Emission Fee for Integrated Environmental Management," Ministry of Environment of Korea (2015).
- Lee, C. H., "Major Content and Significance of the Integrated Environmental Management Act," *Spring Conference on Korean Society on Water Environment & Korean Society of Water and Wastewater (2000~)*, **2016**, 623(2016).
- Park, J. H., "Evaluation and Selection Method of Best Available Techniques for Integrated Environmental Management System," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **33**(3), 348(2017).
- Yoo, S. J., Park, S. J., Jung, D. H., Jung, H. M., Kim, H. J., Jung, Y. J., Park, J. H., Kim, H. J., Kim, K. Y., Jang, S. J., Kim, Y. S. and Kwon, O. S., "Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Economics and Cross-Media Effects," National Institute of Environmental Research, NIER-GP2013-441(2013).
- "Submit a Supplemental Report on the Analysis of the Current Status of Industrial Manpower in the Chemical Sector," A report from Industrial Skills Council (ISC, Republic of Korea) (2016).
- Yeo, S. Y., Choi, S. W., Lee, H. K., Sul, S. H., Jin, H. A. and Lim, J. H., "2016 National Air Pollutants Emission," National Institute of Environmental Research, NIER-GP2018-131(2019).
- Moon, J. Y., Lee, K. S. and Kim, S. M., "A Study of the Temperature Dependency for Photocatalytic VOC Degradation Chamber Test under UVLED Irradiations," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(6), 755-761(2015).
- Kang, S. C., Lee, H. Y., and Park Y. H., "A study on Dealumination of NaY Zeolite and its VOCs Adsorption Properties," *Korean Chem. Eng. Res.*, **53**(3), 339-349(2015).
- Cohen, Y., "Volatile Organic Compounds in the Environment: A Multimedia Perspective," in *Volatile Organic Compounds in the Environment*, ed. W. Wang, J. Schnoor, and J. Doi (West Conshohocken), PA: ASTM International, 7-32 (1996).
- Choi, Y. J., Jeon, E. C. and Kim, K. H., "A Study of Control Efficiency for Odorous Pollutants in Various Emission Control Units in the Ban-wall Industrial Complex," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **23**(1), 110-124(2007).
- Cha, J. S., Chung, I. R., Hong, J. H., Seok, K. S., Kim, D. G., Lee, D. G. and Kim, J. I., "A Study on the Emerging Technologies for the Reduction of Volatile Organic Compounds," National Institute of Environmental Research, Air Quality Research Department, Air Pollution Engineering Division, NIER-2001-09-601(2001).
- Shin, Y. S., Lee, D. S. and Koo, H. J., "Multimedia Environmental Quality Criteria for the Integrated Environmental Management of Hazardous Chemicals," *Korea Environment Institute*, **2004**, 1 (2004).
- Rhee, G. H., Hwangbo, S. H. and Yoo, C. K., "Fate Analysis and Impact Assessment for Vehicle Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Emitted from Metropolitan City Using Multimedia Fugacity Model," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(4), 479-495(2018).
- Kim, M. K., Bae, H. K., Song, S. H., Koo, H. J., Kim, H. M., Choi, K. S., Jeon, S. H. and Lee, M. S., "Estimation of Multimedia Environmental Distribution for Benzoyl Peroxide Using EQC Model," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **27**(10), 1090-1098 (2005).
- Li, Q., Kim, M. J., Liu, Y. and Yoo, C. K., "Quantitative Assessment of Human Health Risks Induced by Vehicle Exhaust Polycyclic Aromatic Hydrocarbons at Zhengzhou via Multimedia Fugacity Models with Cancer Risk Assessment," *Sci. Total Environ.*, **618**, 430-438(2018).
- Mackay, D., *Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach, Second Edition*, CRC Press(2001).
- Koo, J. H., "Fate of Benzo(a)pyrene in Masan Bay for using the Dynamic Multimedia Fugacity Model," *Department of Environmental Engineering, Graduate school, Pukyong National University*(2005).
- Lee, J. H., Kim, Y. S., Ryu, Y. T. and Yoo, I. S., "A Study on the Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in a Petrochemical Complex," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **13**(4), 257-267(1997).
- "Guidance for Risk Assessment" National Institute of Food and Drug Safety Evaluation(2007).

24. NIER Notification No.2014-48 on Regulations on Methodology for Risk Assessment of Chemical Substance.
25. Seo, J. K., Kim, T. S., Jeo, A. R., Kim, P. J. and Choi, J. H., "A Study on the Human Risk Assessment of Perchloroethylene Considering Multi-media Exposure," *Korean J. Environ. Health Sci.*, **40**(5), 397-406(2014).
26. Kim, C. Y., Roh, J. H., Won, J. W., Roh, Y. M., Kim, K. Y., Yang, J. Y., Kim, G. Y., Lee, K. J., Yoo, S. H. and Lee, S. Y., "Risk Assessment of Hazardous Chemicals," Occupational Safety & Health Research Institute of Korea Occupational Safety & Health Agency(2011).
27. "Manual of Data on the Risk of Chemicals (2017)," National Institute of Environmental Research, NIER-GP2016-163(2017).
28. Mukaka, M. M., "Statistics Corner: A Guide to Appropriate Use of Correlation Coefficient in Medical Research," *Malawi Med. J.*, **24**(3), 69-71(2012).
29. Kim, J. H. and Kim, J. S., "Statistical Methods used in the Journal of Korean Academy of Rehabilitation Medicine," *J. Korean Acad. of Rehab. Med.*, **22**(1), 46-55(1998).
30. <https://icis.me.go.kr>.
31. <https://www.nifds.go.kr/toxinfo/carcinogenicity/info/list.do>.
32. Kang, J. H., "A Study on the Concentration Distribution of Volatile Organic Pollutants (VOCs) in the Air in Urban Area," *Department of Environmental Health, Graduate School, Yonsei University* (2003).
33. Noordally, E., Richmond, J. R. and Tahir, S. F., "Destruction of Volatile Organic Compounds by Catalytic Oxidation," *Catalysis Today*, **17**(1-2), 359-366(1993).
34. "2016 Chemical Emission Results Report," A report from National Institute of Chemical Safety of Korea(2017).
35. Choi, J. Y., Joe, S. H., Kim, J. W., Lee, M. S., Han, C. K., Ko, J. W., Chun, S. H. and Lee, S. M., "A Study on the Investigation and Improvement of Impervious Area Ratio in Korea," Korea Environment Corporation(2013).
36. Pintó, R. and Couso, D., European Science Education Research Association International, Conference 2005, *Contributions from Science Education Research [Electronic Resource]*, Springer Netherlands, Dordrecht(2007).
37. "Chemical Assessment Summary: Toluene," A report from Integrated Risk Information System, United States Environmental Protection Agency(2005).
38. "Chemical Assessment Summary: Ethylbenzene," A report from Integrated Risk Information System, United States Environmental Protection Agency(1987).
39. "Chemical Assessment Summary: Xylene," A report from Integrated Risk Information System, United States Environmental Protection Agency(2003).
40. "Chemical Assessment Summary: Benzene," A report from Integrated Risk Information System, United States Environmental Protection Agency(2000).
41. https://rais.ornl.gov/tox/profiles/benzene_ragsa.html.
42. Kim, T. S., Seo, J. G., Yoon, H. J., Jo, A. R., Kim, J. G., Kwon, J. T., Han, H. J., Choi, J. H. and Kim, P. J., "Uncertainty Analysis to Improve Reliability of Risk Assessment," National Institute of Environmental Research, NIER-RP2013-129(2013).
43. "Reference for Best Available Technologies for the Organic Chemical Industry," A report from Korea Environmental Industry Technology Institute(2015).
44. Ministry of Environment, "A Study on the Reduction Efficiency and Concentration Criteria of VOC Emission Control and Prevention Facilities," Seoul, Korea(2001).
45. Son, Y. S., Kim, K. J. and Kim, J. C., "A Review on VOCs Control Technology using Electron Beam," *Asian J. Atoms. Environ.*, **4**(2), 63-71(2010).
46. "Toxicological Profile for Ben-zene," A report from Agency for Toxic Substance and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service(2007).
47. "Toxicological Profile for Toluene," A report from Agency for Toxic Substance and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service(2017).
48. "Toxicological Profile for Ethyl-benzene," A report from Agency for Toxic Substance and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service(1999).
49. "Toxicological Profile for Xylene," A report from Agency for Toxic Substance and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service(2007).
50. <https://echa.europa.eu>.
51. "Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications," A report from United States Environmental Protection Agency, EPA/600/8-91-011B(1992).
52. Macleod, M., Fraser, A. J. and Mackay, D., "Evaluating and Expressing the Propagation of Uncertainty in Chemical Fate and Bioaccumulation Models," *Environ. Toxicol. Chem.*, **21**(4), 700-709(2002).
53. Jang, J. Y., Jo, S. N., Kim, S. Y., Kim, S. J. and Jung, H. K., "Korean Exposure Factors Handbook," Ministry of Environment of Korea(2007).
54. Seo, J. G., Yoon, H. J., Kim, T. S., Kim, J. H., Jo, A. R., Lee, B. W., Lim, H. W., Kim, P. J. and Choi, K. H., "Korean Exposure Factors Handbook for Children," National Institute of Environmental Research(2016).
55. Qu, C., Li, B., Wu, H., Wang, S. and Giesy, J., "Multi-pathway Assessment of Human Health Risk posed by Polycyclic Aromatic Hydrocarbons," *Environ. Geochem. Health*, **37**(3), 587-601(2015).