

## 기후변화(기온 상승)가 염소계 잔류성유기오염물질의 거동에 미치는 영향

이호영 · 오주연 · 최성득<sup>†</sup>  
울산과학기술원 도시환경공학부

### Influence of Temperature Change on the Fate of Chlorinated Persistent Organic Pollutants (POPs): A Preliminary Study

Ho-Young Lee, Joo-Yeon Oh, and Sung-Deuk Choi<sup>†</sup>

*School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST),  
Ulsan, 44919, Korea*

Received March 26, 2020 / Revised May 5, 2020 / Accepted May 26, 2020

In this study, the influence of climate change on the fate of chlorinated Persistent Organic Pollutants (POPs) in Ulsan, South Korea was evaluated using a multimedia environmental fate model (CoZMo-POP 2). PCB-28 and PCB-153, representative POPs, were selected for the modeling with the temperature changes ( $\pm 5.0^\circ\text{C}$  and  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ ). Results indicate that the long-term trends of PCB concentrations reflect an emission scenario, with the exception of PCB-153 in soil and sediment. In particular, when the temperature increased, the concentrations of PCBs in the atmosphere also increased; however, those of PCBs in other media (canopy, soil, water, and sediment) decreased. In contrast, the concentration of PCB-153 in a deciduous canopy increased with an increase in temperature due to the high deposition velocity. Due to the temperature changes, the accumulation amounts of PCB-153 showed larger variations from the current levels in the atmosphere, whereas PCB-28 showed larger variations in other media. More specifically, high-chlorinated PCBs mainly accumulated in forest soil, but their levels in the atmosphere demonstrated the high impact caused by the temperature changes. Low-chlorinated PCB levels in the canopy and atmosphere were also highly impacted by the temperature changes. The results of this study can be applied to establish long-term monitoring plans and regulatory policies of POPs according to climate changes such as increases in temperatures.

**Keywords:** POPs, PCBs, Climate change, Multimedia environmental model, CoZMo-POP 2

### 1. 서 론

기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC)는 기후변화를 기후 인자(기온, 강수량, 풍속 등)의 변화 가능성 또는 평균 값 변화가 장기간 지속하는 상태로 정의한다.<sup>1)</sup> 기후변화의 다양한 증거들이 전 지구적으로 발견되고 있는데, 기온과 지표 온도증가와 빙설량 감소와 같은 직접적인 변화와 강수량 변화와 폭우와 폭풍 빈도 증가 등 이차적인 변화가 있다. 또한, 세계기후연구 프로그램(World Climate Research Programme: WCRP)과 기후 모델 진단과 상호비교 프로그램(Program for Climate

Model Diagnosis and Intercomparison: PCMDI)은 기후변화의 영향을 예측하기 위한 모델링 기초자료를 제공하고 기후변화 예측모델을 개발하고 있다.<sup>2)</sup>

잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants: POPs)은 대표적인 미량 독성물질로서 2005년 스톡홀름 협약이 발효되어 많은 관심을 받기 시작했다. 이후 대기, 토양, 수계 등 다양한 환경매체에 잔류하고 있는 POPs 모니터링 연구가 활발히 수행되고 있다. POPs는 환경매체에서 오랜 기간 잔류하며 매체 간 거동을 거치므로, POPs 모니터링 연구에는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 오염물질 거동을 평가하고 예측하는 다매체 환경모델이 POPs 연구에 효율적으로 활용될 수

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

있다. 특히, 기후변화에 의한 기상 조건과 환경 변화는 POPs 거동에 영향을 줄 수 있다.<sup>3-7)</sup> 기온은 기후변화의 대표 기상인자로서 POPs의 분배계수와 분해속도를 변화시키며,<sup>3,4)</sup> 대기-지표 물질교환에 영향을 미친다.<sup>5)</sup> 또한, 기후변화에 의한 강우 강도와 빈도 변화는 대기침적과 강우 유출에 의한 화학물질의 표층수와 지하수로의 유입을 증가시키고,<sup>6)</sup> 풍향-풍속 변화는 대기 중 오염물질의 이류와 확산에 영향을 준다.<sup>7)</sup>

최근에는 기후변화가 POPs 거동에 미치는 영향에 대한 정성적인 연구뿐만 아니라, 농도변화를 예측하는 정량적인 연구가 수행되고 있다. 국외 선행연구에서는 폴리염화비페닐류(Polychlorinated Biphenyls: PCBs), 헥사클로로벤젠(Hexachlorobenzene: HCB), 헥사클로로사이클로헥산(Hexachlorocyclohexane: HCH) 등을 대상으로 기후변화에 의한 전 지구적인 POPs 농도변화를 예측하였다.<sup>8-10)</sup> 국내 선행연구에서는 서울과 강원 지역 등을 대상으로 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: PAHs)의 농도변화를 예측하였으며,<sup>11)</sup> 구체적인 기후변화 시나리오를 적용하여 PAHs와 다이옥신류(Polychlorinated Dibenzo Dioxins/Furans: PCDD/Fs)의 농도변화를 파악하였다.<sup>12)</sup> 그러나 국내 환경에서 중요한 산림과 기수역과 같은 환경매체에 대한 고려가 부족하고, 모델 대상 화학물질도 제한적이다.

토론토대학교에서 개발한 다매체 환경모델인 CoZMo-POP 2 (Coastal Zone Model for Persistent Organic Pollutants 2)는 산림과 기수역을 포함한 다양한 환경매체를 구성할 수 있으므로 국내 환경을 반영하기에 적합하다. 또한, PCBs는 대표적인 POPs로서 화합물에 따라 매우 넓은 범위의 물리·화학적 특성을 가지며 대부분 대기로 배출되어 환경거동을 거치므로 다양한 다매체 환경모델 연구에 활용되었다. 선행연구에서는 CoZMo-POP 2를 이용하여 국내 대기 중 PCBs 농도 및 패턴을 예측하고, 산림을 포함한 다매체 환경 중 PCBs의 장기경향을 추정하였다.<sup>13-15)</sup> 특히, PCB-28 (2,4,4'-trichloro)과 PCB-153 (2,2',4,4',5,5'-hexachloro)은 장기간 모니터링 연구 대상 화학물질로서<sup>2)</sup> POPs를 대표할 수 있는 물리·화학적 특성을 갖고 있으므로, 기후변화의 영향을 평가하기에 적합한 물질이다.

본 연구에서는 기후변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 기초연구로서 지역 규모 모델인 CoZMo-POP 2를 활용하여 PCBs의 정성·정량적인 변화를 평가하였다. 저염화 물질인 PCB-28과 고염화 물질인 PCB-153을 대상으로 모델링을 수행하였으며, 온

도변화에 따른 환경매체별 농도추세와 화합물에 따른 환경매체별 축적량과 축적비율 변화를 예측하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 다매체 환경모델

다매체 환경모델은 휘산도(fugacity)를 사용하여 화학물질의 매체 간 거동(이동, 분해, 축적 등)을 예측하며, 대기, 토양, 수계 등 다양한 환경매체에서 오랜 기간 잔류하는 미량오염물질 거동연구에 활용되고 있다. 본 연구에서는 모델링 공간규모 선택과 입력자료 변경이 용이한 CoZMo-POP 2를 사용하였다. 모델의 자세한 개념과 이론은 선행연구에 제시되었다.<sup>16,17)</sup>

CoZMo-POP 2는 기본적인 육상환경부터 기수역, 연근해, 원양까지 모델링 대상지역 규모를 선택할 수 있으며, 다양한 환경매체(대기, 산림, 토양, 담수·기수, 퇴적물)를 포함한다. 본 연구에서는 총 10개(대기, 활엽수, 침엽수, 산림토양, 농업토양, 미경작토양, 담수, 담수 퇴적물, 기수, 기수 퇴적물)의 환경매체를 구성하여 모델링을 수행하였다. 모델 입력자료로 대상물질의 물리·화학적 특성과 배출량 자료와 모델링 대상지역의 환경매체 자료와 기상자료를 사용하였다. CoZMo-POP 2는 윈도우용 프로그램으로서 해당 입력자료를 쉽게 입력하고 변경할 수 있다.

### 2.2. 모델 입력자료

#### 2.2.1. 물리·화학적 특성

PCBs는 두 개의 벤젠고리가 탄소-탄소 단일결합으로 연결된 비페닐 구조에 염소가 1개부터 10개까지 치환된 화합물 209종을 포함하며, 치환된 염소 개수에 따라 매우 넓은 범위의 물리·화학적 특성(휘발성, 분배계수, 반감기)을 가진다. 특히, PCBs의 분배계수는 다이옥신과 유기염소계농약류를 포함한 염소계 POPs의 분배계수 범위와 중복된다.<sup>18)</sup>

본 연구에서는 PCBs 화합물의 분배계수를 고려하여, 저염화 PCBs의 다매체 거동을 평가할 수 있는 PCB-28과 고염화 PCBs를 대표할 수 있는 PCB-153을 모델링 대상물질로 선정하였다. PCB-28과 PCB-153은 각각 염소가 3개와 6개가 치환된 화합물로서, 분자량은 257.5와 360.9이다. 모델링에 사용한 대상물질의 분배계수와 반감기 등 자세한 물리·화학적 특성 자료를 Table 1에 제시하였다.

**Table 1.** Input parameters for the physicochemical properties of PCB-28 and PCB-153.<sup>19)</sup>

Parameter		PCB-28	PCB-153
Molecular mass (g/mol)		257.5	360.9
Partition coefficient at 25°C	logK <sub>OW</sub>	5.67	6.87
	logK <sub>AW</sub>	-1.93	-2.10
	logK <sub>OA</sub>	7.60	8.97
Heat of phase transfer (J/mol)	dU <sub>OW</sub>	-21,000	-31,100
	dU <sub>AW</sub>	61,800	61,800
	dU <sub>OA</sub>	-82,800	-92,900
Half-life at 25°C (h)	Forest canopy	5,500	55,000
	Soil	10,000	550,000
	Water	5,500	55,000
	Sediment	17,000	170,000

### 2.2.2. 배출량 입력자료

POPs는 환경 중에 배출되어 오랜 기간 잔류하므로, 다매체 환경모델의 입력자료로서 장기간 배출량 자료가 필요하다. 특히, 배출량 시나리오의 불확도는 다른 입력자료에서 기인한 불확도보다 매우 크므로,<sup>15)</sup> 신뢰도 높은 배출량 자료가 요구된다. 국내 PCBs 배출량 자료를 확보하기 위해 배출량 예비평가 연구가 수행되었으나,<sup>20)</sup> 배출계수의 불확도가 크고 활동도와 관련된 통계자료도 정확하지 않아 산정된 PCBs 배출량의 불확도 역시 매우 클 것으로 예상된다. 따라서 선행연구에서는 노르웨이 대기연구소에서 작성한 전 세계 국가별 배출량 자료를 활용하여 국내 배출량을 산정하고 모델링을 수행하였다.<sup>21)</sup> 국가별 배출량 자료는 1930년부터 2100년까지 인구에 비례하여 할당된 자료로서, 추가적으로 더 높은 시공간 해상도 자료로 가공하여 활용

할 수 있다.

본 연구에서는 기후변화의 영향을 직관적으로 평가하기 위해, 실제 PCB-28과 PCB-153의 배출량이 아닌 가상의 동일한 배출량 시나리오를 설정하여 모델의 입력자료로 사용하였다. 가상의 배출량 시나리오에서는 1950년에 PCBs 배출이 시작되어 25년간 증가하여 1975년에 최대값(5 tonne/y)을 보이며 이후 25년 동안 감소하여 2000년에 배출이 중단되는 가우시안 분포의 시나리오를 가정하였다.<sup>18)</sup>

### 2.2.3. 환경인자 입력자료

모델링 대상지역으로 울산시를 선정하였다. 울산시의 총 면적을 연근해를 포함한 1,061 km<sup>2</sup>로 설정하였다. 모델의 물리-환경 입력자료는 국가수자원관리 종합정보 시스템, 산림청, 통계청 등 웹사이트에서 제공하는 값을 사용하였으며, 모델에서 제공되는 기본값(default)을 제외한 입력값을 Table 2에 제시하였다. 기온, 풍속, 강

**Table 2.** Environmental parameters of Ulsan in 2015 used as input for CoZMo-POP 2.

Media	Parameter	Value
Hydrology	Surface area of drainage basin (m <sup>2</sup> )	1.06 × 10 <sup>9</sup>
	Surface area of estuary (m <sup>2</sup> )	3.50 × 10 <sup>7</sup>
	Fraction covered by lakes and rivers	0.03
Forest	Fraction of drainage basin covered by forest	0.60
	Fraction of forest area covered by coniferous trees	0.55
	Canopy volume per ground area of coniferous trees (m <sup>3</sup> /m)	0.0059
	Canopy volume per ground area of deciduous trees (m <sup>3</sup> /m)	0.0036

**Table 3.** Meteorological parameters of Ulsan used as input in CoZMo-POP 2 (monthly averages over 30 years between 1985 and 2015).

Month	Temperature (°C)	Wind speed (m/s)	Precipitation (mm)	OH concentration (molecules/cm <sup>2</sup> ) <sup>14,16)</sup>
Jan	1.9	2.4	34.5	120,000
Feb	3.8	2.4	42.1	175,000
Mar	7.9	2.4	67.8	250,000
Apr	13.5	2.4	95.6	400,000
May	18.0	2.1	106.4	550,000
Jun	21.4	1.9	166.3	650,000
Jul	25.1	2.0	227.5	650,000
Aug	25.9	2.0	238.4	550,000
Sep	21.5	2.0	168.8	400,000
Oct	16.2	1.9	58.2	250,000
Nov	10.1	1.9	45.1	175,000
Dec	4.1	2.2	23.6	120,000

수량 등 기상자료는 기상청에서 제공하는 울산시 30년 평균값을 사용하였으며, 대기 중 OH 농도는 모델 기본값을 사용하였다(Table 3).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 환경매체별 농도추세

선행연구에서는 환경매체에서 비교적 고농도로 검출

되는 11종 PCBs (8, 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180, 194)의 매체별 장기 농도를 예측하였다.<sup>15)</sup> 본 연구에서는 대표물질로 PCB-28과 PCB-153을 선정하고 모델 입력자료인 월평균 온도값 변화(30년 평균 기온  $\pm 5.0^{\circ}\text{C}$ 와  $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ )에 따른 농도추세 변화를 매체별로 파악하였다(Figs. 1 and 2). PCB-28의 농도추세는 모든 매체에서 배출량 증가를 즉각적으로 반영하였으며, 2000년대 이후 배출 중단에 따라 매우 낮은 농도

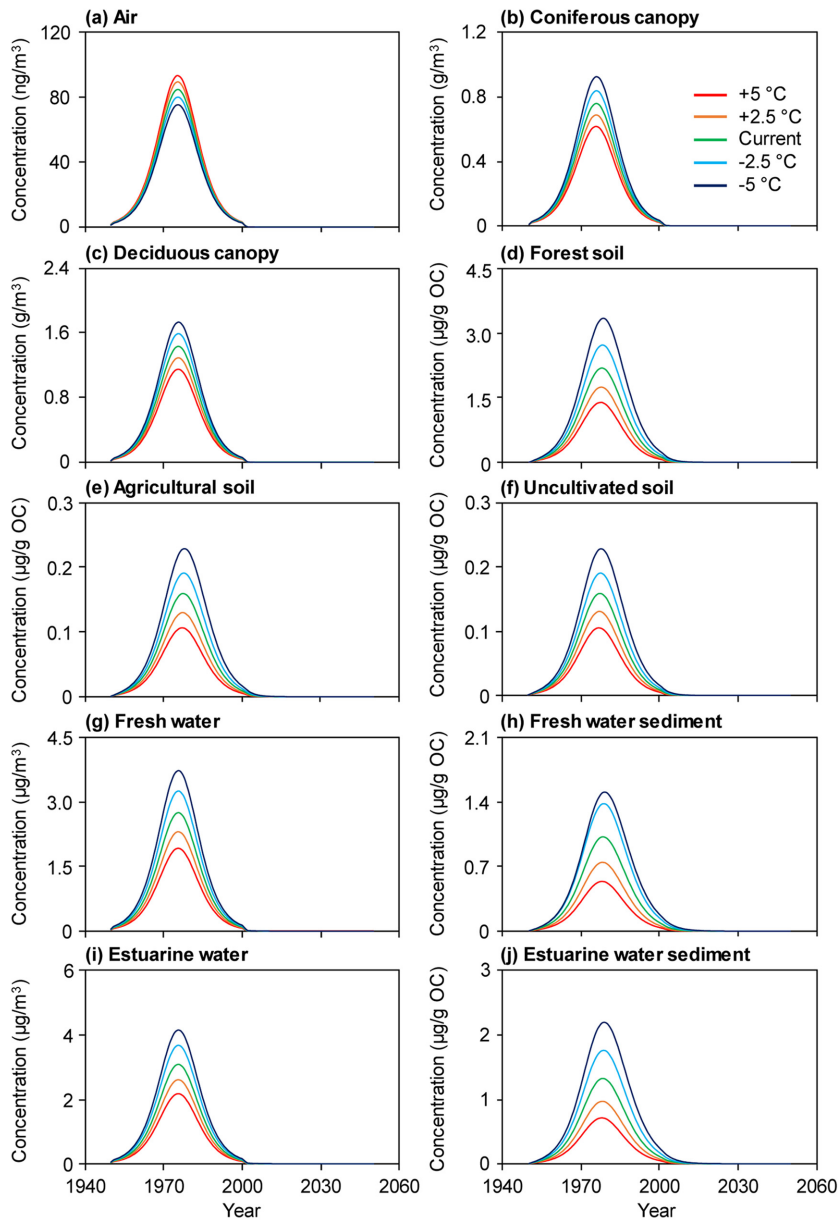


Fig. 1. Time trends of PCB-28 concentrations in 10 environmental media based on temperature changes.

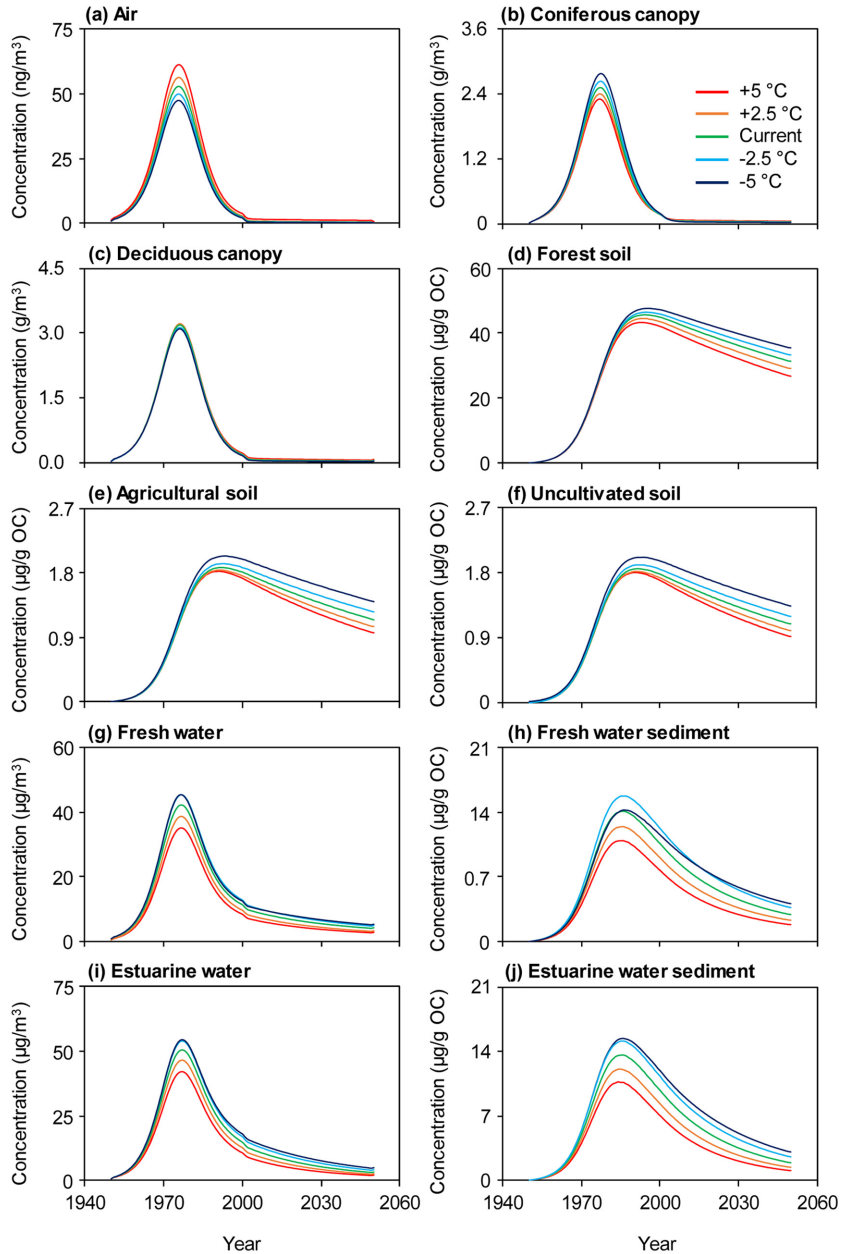


Fig. 2. Time trends of PCB-153 concentrations in 10 environmental media based on temperature changes.

수준을 보였다. PCB-153은 대기, 산림, 담수, 기수에서 비교적 짧은 반감기를 가지며 배출량 추세와 유사한 농도추세를 보였으나, 긴 반감기를 가지는 토양과 퇴적물에서는 배출량 감소 이후에도 장기간 매체에 축적되어 완만하게 감소하는 농도추세를 보였다.

### 3.1.1. 대기

대기 중 PCBs 농도는 배출량 추세를 직접 반영하여

1970년대에 가장 높은 수준을 보였으며, 배출량 감소에 따라 급격하게 감소하였다. 온도가 증가, 감소함에 따라 대기 중 PCBs 농도도 증가, 감소하였다. 온도증가는 대기 중 기체/입자 분배(Gas/Particle partitioning)와 대기-지표(토양, 수계, 산림) 교환에 영향을 주어, 대기 중 PCBs 농도를 증가시킨 것으로 해석된다.<sup>16)</sup> 또한, 직접적인 배출이 중단될 경우에는 대기-지표 기체교환이 대기 중 PCBs의 주요 배출원이 되어,<sup>14,15)</sup> 온도증가

에 따라 지표의 영향이 증가한 것으로 추정된다.<sup>5,15)</sup> 특히, 온도변화에 따른 대기 이외 매체의 농도추세는 대기의 농도추세와 반대 경향을 보이므로, 기후변화 측면에서 PCBs의 대기-지표 기체교환을 주목해야 한다.

### 3.1.2. 산림

PCB-28과 PCB-153의 옥탄올/공기 분배계수( $\log K_{OA}$ )는 각각 7.60과 8.97이며, 공기/물 분배계수( $\log K_{AW}$ )는 각각 -1.93과 -2.10로서, 이러한 범위의 화학물질은 산림필터효과와 영향을 받는다.<sup>22)</sup> 이에 따라 산림(침엽수와 활엽수)은 대기와 같이 배출량 추세의 직접적인 영향을 받는다. 또한, 침엽수는 활엽수보다 온도변화에 따라 큰 농도변화를 보였으며, 이 결과는 생육주기 차이 때문으로 판단된다.<sup>16)</sup> 활엽수는 1년의 생육주기로 잎에 흡착된 PCBs를 낙엽의 형태로 토양으로 이동시키며, 침엽수는 생육주기가 3~4년으로 지속적으로 대기 중 PCBs를 흡착한다. 따라서 침엽수는 활엽수보다 온도변화에 의한 대기 중 PCBs 농도변화를 잘 반영하는 것으로 해석된다. 또한, 휘발성이 강한 PCB-28은 온도증가에 따라 침엽수와 활엽수에서 감소하는 경향을 보였으며, PCB-153 농도는 침엽수에서 감소하였으나, 활엽수에서 감소하지 않고 소량 증가하였다. 이러한 차이는 온도변화에 따른 침엽수와 활엽수 간 PCBs 거동(휘발, 분해, 대기침적)의 변화량 차이 때문으로 판단된다. PCB-28 농도는 온도증가에 따른 휘발과 분해량 증가의 영향을 크게 받아 침엽수와 활엽수에서 감소하였으나, PCB-153 농도는 큰  $K_{OA}$ 값과 활엽수에서의 빠른 침적속도에 비해 낮은 휘발성의 영향으로 감소하지 않은 것으로 판단된다.<sup>23)</sup> 즉, 온도변화에 따라 활엽수와 침엽수는 각각 대기침적과 휘발-분해의 영향을 크게 받는 것으로 해석된다.

### 3.1.3. 토양

일반적으로 휘발성이 약한 고염화 PCBs는 토양에 다량 축적되며, 울산의 경우에는 산림토양이 전체 면적의 65%를 차지하여 PCBs 축적의 중요한 역할을 담당한다. 산림토양, 농업토양, 미경작토양은 배출량 추세에 따라 유사한 장기경향 추세를 보였다. 온도증가에 따라 토양 중 PCBs 농도는 낮아졌으며, 활발해진 대기-토양 기체 교환 때문으로 해석된다.<sup>16)</sup> PCB-28은 토양에서 비교적 짧은 반감기(1년)를 가지므로 배출량과 유사한 농도추세를 보였으나, PCB-153은 큰  $K_{OA}$ 값과 긴 반감기 영향으로 토양에 지속적으로 축적되는 경향을 보였다. 울

산 토양 모니터링 결과에 따르면, 토양 중 PCBs 농도는 산업지역에서 교외와 주거지역보다 매우 높은 수준이었으며<sup>24,25)</sup> 국내 다른 지역과 비교해도 높은 수준이므로,<sup>25)</sup> 토양 중 PCBs에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### 3.1.4. 담수와 기수

담수와 기수에서 PCB-28과 PCB-153은 유사한 장기 농도추세와 농도수준을 보였으나, 담수보다 기수에서 높은 농도를 보였다. 기수역에서는 기수가 담수와 연결되어 담수 오염에 직접적인 영향을 받으므로, 대기침적 이외에도 담수를 통한 유기탄소 유입으로 기수의 PCBs 농도가 높은 것으로 해석된다.<sup>6,15)</sup> 담수와 기수의 PCBs 농도는 온도증가에 따라 낮아졌으며, 토양과 유사하게 대기-담수/기수 기체교환의 영향으로 해석된다. PCB-153은 PCB-28에 비해 반감기가 길기 때문에 직접적인 대기배출이 중단된 2000년 이후에도 완만한 감소 경향을 보였으며, 온도변화에 따른 농도의 진폭변화는 비교적 작았다. PCB-28과 같은 저염화 PCBs의 경우, 대기-담수/기수 기체교환을 통한 수계 유입 비중이 크고, 고염화 PCBs의 경우에는 기체교환보다 대기침적과 토양 유출을 통한 유입이 중요하다.<sup>15)</sup>

### 3.1.5. 퇴적물

퇴적물의 PCBs 농도추세는 토양과 담수/기수의 PCBs 농도추세와 비슷한 경향을 보였다. 퇴적물은 토양과 유사한 특성과 물질별 반감기를 가지며, 담수 또는 기수와 직접 연결되어 있으므로 해당 매체의 농도를 반영한 것으로 판단된다.<sup>16)</sup> 온도증가에 따라 PCBs의 수계 유입이 감소되었으며 담수 퇴적물과 기수 퇴적물의 PCBs 농도도 감소하였다.

## 3.2. 화합물에 따른 환경매체별 축적경향

### 3.2.1. PCBs 화합물별 장기경향

서로 다른 단위를 갖는 매체의 장기경향을 비교하기 위해, PCB-28과 PCB-153의 매체별 농도를 표준화(normalization)하여 Fig. 3에 나타내었다. 매체별 연평균 PCBs 농도를 전체 연평균 PCBs 농도 총합으로 나누어 표준화하였다. PCB-28은 모든 매체에서 배출량과 유사한 장기경향을 보였으며, 반감기에 따라 최고 농도 수준 차이를 보였다. 휘발성이 낮은 PCB-153은 매체별 반감기 차이에 따라 축적되는 경향이 뚜렷한 차이를 보였다.<sup>15)</sup> 퇴적물과 토양에서는 PCB-153의 긴 반감기로 인해 농도가 증가한 후 완만한 감소추세를 보였다. 반

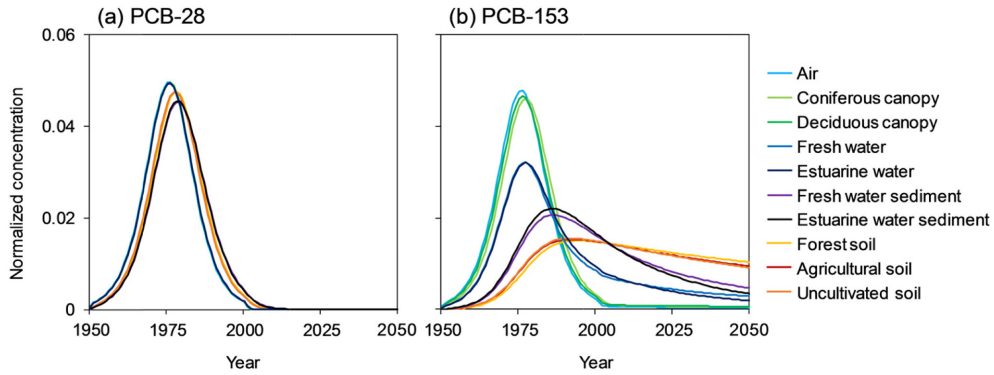


Fig. 3. Time trends of normalized concentrations for (a) PCB-28 and (b) PCB-153. Concentrations in each year are divided by the sum of the concentrations between 1950 and 2050.

면에 대기와 산림 중 PCB-153은 배출의 직접적인 영향으로 가장 높은 상대농도를 보였으며, 다른 매체에 비해 짧은 반감기로 인해 배출량 감소에 따라 농도가

급감하였다. 담수와 기수의 PCB-153 반감기(약 6년)는 산림에서의 반감기와 같으나, 분배계수 차이로 인해 비교적 작은 농도 진폭을 보였고 토양으로부터 지속적인

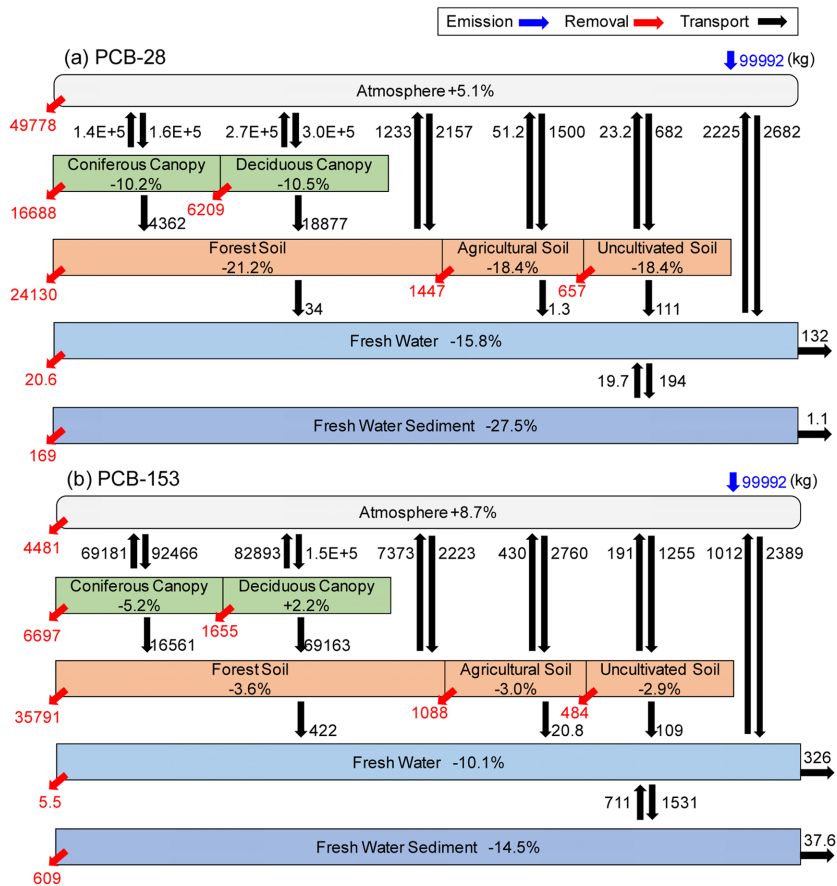


Fig. 4. Mass balance of (a) PCB-28 and (b) PCB-153 in the terrestrial environment accumulated between 1950 and 2050. Percent values in each media segment represent the accumulation variations as a result of a 2.5°C increase in temperature.

유입으로 인해 일정한 농도수준을 유지하였다. 자세한 화합물별 장기경향은 선행연구에 제시되었다.<sup>15)</sup>

### 3.2.2. 온도변화에 따른 매체별 축적량 변화

온도변화에 따른 축적량 변화를 파악하기 위해, 온도가 2.5°C 증가한 경우의 PCB-28과 PCB-153의 매체별 축적량 변화를 물질수지(Mass balance) 그림으로 나타내었다(Fig. 4). PCB-28의 경우, 온도증가에 따라 축적량이 대기(+5.1%)에서 증가하였고, 이외 모든 매체에서 감소하였다. 축적량은 퇴적물(-27.5%)에서 가장 크게 감소하였으며, 산림토양(-21.2%) > 농업토양, 미경작토양(-18.4%) > 담수(-15.8%) > 활엽수(-10.5%) > 침엽수(-10.2%) 순으로 감소하였다. PCB-28은 PCB-153보다 높은 휘발성으로 인해 온도변화에 민감하게 반응한 것으로 판단된다. PCB-153은 PCB-28과 유사한 매체별 축적량 변화를 보였으나, 활엽수의 경우에는 온도증가에 따라 축적량이 증가하였다. PCB-153의 큰  $K_{OA}$  값과 빠른 침적속도로 인해 온도증가에 따라 침적량이 증가하고, 대기로의 휘발량은 감소함에 따라 축적량이 증가

하였다.<sup>13)</sup>

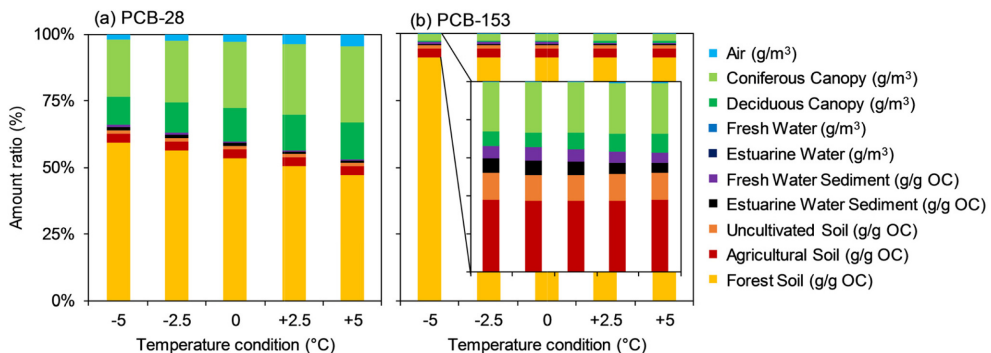
자세한 비교를 위해 온도변화에 따른 PCB-28과 PCB-153의 축적량 변화율을 Table 4에 제시하였다. 대기 중 PCB-153 축적량이 PCB-28 축적량보다 온도변화에 따라 큰 폭으로 변화하였다. 반면에 대기 이외의 매체에서는 PCB-28 축적량이 PCB-153 축적량보다 크게 변화하였다. 즉, 고염화 PCBs는 대기에서 온도변화에 민감하게 반응하였으며, 저염화 PCBs의 경우에는 대기 이외의 매체에서 온도변화 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

### 3.2.3. 온도변화에 따른 매체별 축적비율 변화

온도변화에 따른 PCB-28과 PCB-153의 매체별 축적비율을 나타내었다(Fig. 5). 선행연구에서는 고염화 PCBs는 대부분 산림토양에 축적되며, 저염화 PCBs는 대기에 잔류하거나 산림에 축적되었다.<sup>13,15)</sup> 본 연구에서 PCB-28은 산림토양 > 침엽수 > 활엽수 순으로 축적되었으며, 온도변화에 따른 매체별 총량 비율은 일정하게 변화하였다. 온도증가에 따른 PCB-28 축적비율은

**Table 4.** Accumulation variations (%) of PCB-28 and PCB-153 in 10 environmental media at each temperature condition.

Compartments	PCB-28				PCB-153			
	+5°C	+2.5°C	-2.5°C	-5°C	+5°C	+2.5°C	-2.5°C	-5°C
Air	+5.1	+5.0	-5.5	-8.6	+15.0	+8.7	-6.9	-10.1
Coniferous canopy	-19.0	-10.2	+10.8	+19.3	-8.7	-5.2	+6.1	+12.8
Deciduous canopy	-19.0	-10.5	+10.9	+20.3	+3.9	+2.2	-2.3	-3.9
Forest soil	-33.6	-21.2	+26.3	+53.5	-6.1	-3.6	+3.2	+6.2
Agricultural soil	-31.5	-18.4	+21.4	+41.5	-5.8	-3.0	+4.2	+11.1
Uncultivated soil	-31.5	-18.4	+21.3	+41.4	-5.7	-2.9	+4.1	+11.1
Fresh water	-28.1	-15.8	+18.1	+30.2	-18.5	-10.1	+10.4	+6.5
Fresh water sediment	-45.7	-27.5	+37.1	+45.9	-26.1	-14.5	+15.7	+7.3
Estuarine water	-28.3	-15.9	+18.0	+31.2	-20.3	-11.1	+11.5	+13.3
Estuarine water sediment	-44.4	-26.6	+34.8	+65.2	-26.0	-14.5	+15.3	+19.0



**Fig. 5.** Amount ratios of (a) PCB-28 and (b) PCB-153 in 10 environmental media at each temperature condition.

토양과 퇴적물에서 감소하였으며, 산림과 대기에서 증가하였다. 특히, PCB-28의 경우에는 온도증가에 따라 산림에서 농도가 다소 감소하였으나, 축적비율이 증가하였다. PCB-153은 산림토양에서 매우 높은 비율(91%)을 차지하였으며, 농업토양 > 침엽수 > 미경작토양 순으로 축적되었다. 산림토양이 PCB-153 축적에 중요한 역할을 담당하여, 축적비율은 온도변화의 영향을 거의 받지 않았다.<sup>15)</sup>

### 3.3. 추가 연구사항

본 연구에서는 온도변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 직관적으로 파악하기 위해 간단한 가우시안 분포의 배출 시나리오를 선택하였으나, 신뢰성 있는 국내 장기 PCBs 배출량 시나리오를 사용하여 POPs 거동을 예측하여야 한다. PCBs 배출량은 배출원별 배출계수와 활동도를 곱하여 계산되며,<sup>20)</sup> 국내 배출량을 반영하기 위하여 신뢰성 있는 배출계수와 활동도 산정이 우선되어야 하며, 실측 자료와 모델링 결과의 비교를 통해 배출량 시나리오의 신뢰성을 확보해야 한다.<sup>14)</sup> 또한, CoZMo-POP 2의 신뢰성을 검증하기 위해 민감도 분석을 수행할 필요가 있다. 선행연구에서는 토양 입력자료(토양 깊이, 유기탄소 비율, 물질전달 계수)와 수계 입력자료(퇴적속도, 입자침적속도, 유출수 입자 비율)에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 대기와 토양에서는 토양의 깊이와 유기탄소 비율, 수계에서는 유출수 입자 비율을 가장 중요한 입력자료로 예측하였다.<sup>18)</sup> 따라서 국내 환경에 적합한 입력자료를 마련하여 모델링 결과의 신뢰성을 확보해야 한다.

본 연구에서는 월평균 온도의 30년 평균값을 모델링 전체 기간에 일괄적으로 적용하였으나, 실제 연도별 월평균 온도값을 적용하여 현실적인 온도변화를 적용할 필요가 있다. 또한, 기후변화 시나리오에는 온도 이외의 강수량과 풍향 등 다양한 인자가 포함되므로, POPs 모델링에도 다양한 인자를 고려한 기후변화 시나리오 적용이 필요하다.

CoZMo-POP 2는 지역별 환경자료를 쉽게 입력하고 수정할 수 있는 장점이 있으나, 단일박스 모델로서 국내 환경에 대한 고해상도 공간분포 모델링 환경을 구축하기 어렵다. 선행연구에서는 국내 환경을 고려하여 30 km × 30 km 격자의 다매체 모델을 개발하였으며, 다익신의 국가규모 환경거동을 평가하였다.<sup>26)</sup> 또한, 지리정보시스템(Geographic Information System: GIS) 기반의 국내형 다매체 환경모델을 개발하였으며, 고해상

도 격자의 환경자료를 구축하였다.<sup>27)</sup> 기존에 개발한 국내형 다매체 환경모델을 더욱 활발히 활용하기 위해서는 측정 자료와 비교하여 신뢰성을 확보해야 하며, 이후 기후변화 영향 평가 연구에 활용할 필요가 있다.

## 4. 결 론

기후변화 대표인자인 온도는 POPs의 환경매체 분배와 매체 간 거동에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 온도변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해, 울산지역을 대상으로 다매체 환경모델인 CoZMo-POP 2를 이용하여 온도변화에 따른 PCB-28과 PCB-153의 다매체 환경거동을 평가하였다. PCB-28의 매체별 장기 농도추세는 모든 매체에서 배출량 추세를 직접 반영하였으나, PCB-153의 경우에는 비교적 긴 반감기를 가지는 매체에서 장기간 축적되어 완만하게 감소하는 농도 추세를 보였다. 또한, 온도증가에 따라 PCB-28과 PCB-153 농도는 대기에서 증가하고 다른 매체에서 감소하였으며, 예외적으로 활엽수에서는 침적량 증가 방향으로 PCB-153 농도가 증가하였다. 온도변화에 따른 매체별 축적량의 경우, 대기에서는 PCB-153이 PCB-28에 비해 큰 폭으로 변화하였으며, 대기 이외의 매체에서는 PCB-28의 축적량이 온도변화에 따라 크게 변화하였다. PCB-28은 산림토양, 침엽수, 활엽수 순으로 축적되었으며, PCB-153은 산림토양에 대부분(91%) 축적되었다. 즉, 고염화 PCBs는 산림토양에 대부분 축적되어 있으나 대기에서 온도변화 영향을 크게 받았으며, 저염화 PCBs는 침엽수, 활엽수, 대기에서 온도변화에 큰 영향을 받았다. 이와 같이 기온 상승을 포함한 다양한 기후변화 효과가 POPs의 환경거동에 미치는 영향을 파악함으로써, POPs의 장기 모니터링 계획과 규제정책 수립에 도움이 될 것이다.

본 연구는 기후변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 평가하기 위한 기초연구로서 수행되었다. 향후, 국내 POPs 배출량 자료 확보, 구체적인 기후변화 시나리오 작성, 국내형 다매체 환경모델 활용 등이 진행되어야 하며, 이를 통해 기후변화와 POPs 환경거동에 대한 충분한 이해가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 울산과학기술원(1.090029.01), 한국연구재단(2020R1A2B5B01002669), 산업통상자원부 에너지인

력양성 사업(No. 20164030201010, 20184030202250)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), "Climate change synthesis report", **2007**, 1-103.
2. L. Lamon, H. V. Waldow, M. MacLeod, M. Scheringer, A. Marcomini, and K. Hungerbühler, "Modeling the global levels and distribution of polychlorinated biphenyls in air under a climate change scenario", *Environmental Science and Technology*, **2009**, 43, 5818-5824.
3. M. D. Valle, E. Codato, and A. Marcomini, "Climate change influence on POPs distribution and fate: A case study", *Chemosphere*, **2007**, 67, 1287-1295.
4. C. J. Halsall, B. Gevao, M. Howsam, R. G. M. Lee, W. A. Ockenden, and K. C. Jones, "Temperature dependence of PCBs in the UK atmosphere", *Atmospheric Environment*, **1999**, 33, 541-552.
5. R. W. Macdonald, T. Harner, and J. Fyfe, "Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data", *Science of the Total Environment*, **2005**, 342, 5-86.
6. J. P. Bloomfield, R. J. Williams, D. C. Gooddy, J. N. Cape, and P. Guha, "Impacts of climate change on the fate and behaviour of pesticides in surface and groundwater—A UK perspective", *Science of the Total Environment*, **2006**, 369, 163-177.
7. A. B. Boxall, A. Hardy, S. Beulke, T. Boucard, L. Burgin, P. D. Falloon, P. M. Haygarth, T. Hutchinson, R. S. Kovats, G. Leonardi, L. S. Levy, G. Nichols, S. A. Parsons, L. Potts, D. Stone, E. Topp, D. B. Turley, K. Walsh, E. M. Wellington, and R. J. Williams, "Impacts of climate change on indirect human exposure to pathogens and chemicals from agriculture", *Environmental Health Perspectives*, **2009**, 117, 508-514.
8. M. MacLeod, W. J. Riley, and T. E. McKone, "Assessing the influence of climate variability on atmospheric concentrations of polychlorinated biphenyls using a global-scale mass balance model (BETR-Global)", *Environmental Science and Technology*, **2005**, 39, 6749-6756.
9. J. Ma and Z. Cao, "Quantifying the perturbations of persistent organic pollutants induced by climate change", *Environmental Science and Technology*, **2010**, 44, 8567-8573.
10. T. Gouin, J. M. Armitage, I. T. Cousins, D. C. Muir, C. A. Ng, L. Reid, and S. Tao, "Influence of global climate change on chemical fate and bioaccumulation: the role of multimedia models", *Environmental Toxicology and Chemistry*, **2013**, 32, 20-31.
11. J. J. Cai, J. H. Song, Y. Lee, and D. S. Lee, "Assessment of climate change impact on the fates of polycyclic aromatic hydrocarbons in the multimedia environment based on model prediction", *Science of the Total Environment*, **2014**, 470-471, 1526-1536.
12. 이지선, "기후변화에 기인한 유기오염물질의 환경 동태 변화에 배출조건과 토지 특성이 끼치는 영향", **2014**, 서울대학교, 석사학위논문, 1-68.
13. 최성득, 장윤석, "국내 산림이 잔류성 유기오염물질의 거동에 미치는 영향: 다매체 환경모델링", *한국환경분석학회지*, **2008**, 11, 181-188.
14. 최성득, "장기 배출량 자료와 다매체 환경모델을 이용한 국내 대기 중 PCB 농도 및 패턴 예측", *한국대기환경학회지*, **2008**, 24, 249-258.
15. 최성득, 장윤석, "국내 다매체 환경 중 폴리염화비페닐 (PCB)의 장기경향 추정", *한국환경분석학회지*, **2008**, 11, 144-154.
16. F. Wania, K. Breivik, N. J. Persson, and M. S. McLachlan, "CoZMo-POP 2 - A fugacity-based dynamic multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants", *Environmental Modelling and Software*, **2006**, 21, 868-884.
17. F. Wania, J. Persson, A. D. Guardo, and M. S. McLachlan, "CoZMo-POP: A fugacity-based multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants in the coastal zone", **2000**, 1-26, WECC Report.
18. S.-D. Choi and F. Wania, "On the reversibility of environmental contamination with persistent organic pollutants", *Environmental Science and Technology*, **2011**, 45, 8834-8841.
19. F. Wania and Y. Su, "Quantifying the global fractionation of polychlorinated biphenyls", *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, **2004**, 33, 161-168.
20. 김경미, 조규탁, 이지윤, 이지은, 이동수, "국내 부산물 다염화비페닐 (PCBs) 배출량 예비 평가", *한국환경독성학회지*, **2004**, 19, 227-233.
21. K. Breivik, A. Sweetman, J. M. Pacyna, and K. C. Jones, "Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners—A mass balance approach 3. An update", *Science of the Total Environment*, **2007**, 377, 296-307.
22. K. Welsch-Pausch and M. S. McLachlan, "Fate of airborne polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in an agricultural ecosystem", *Environmental Pollution*, **1998**, 102, 129-137.
23. F. Wania and M. S. McLachlan, "Estimating the influence of forests on the overall fate of semivolatile organic compounds using a multimedia fate model", *Environmental Science and Technology*, **2001**, 35, 582-590.
24. T. N. T. Nguyen, H.-O. Kwon, Y.-S. Lee, L. Kim, S.-E. Lee, and S.-D. Choi, "Spatial distribution and source

- identification of indicator polychlorinated biphenyls in soil collected from the coastal multi-industrial city of Ulsan, South Korea for three consecutive years”, *Chemosphere*, **2016**, 163, 184-191.
25. T. N. T. Nguyen, H.-Y. Lee, and S.-D. Choi, “Contamination profiles of polychlorinated biphenyls (PCBs) in the atmosphere and soil of South Korea”, **2016**, 193-218, *Persistent Organic Chemicals in the Environment: Status and Trends in the Pacific Basin Countries I Contamination Status*.
26. 이윤아, “다매체 모형 (KoEFT-PBTs)을 통한 다이옥신류 화합물의 국가규모 환경거동평가”, **2005**, 서울대학교, 박사학위논문, 1-141.
27. 환경부, “신규 POPs 물질 다매체 통합노출평가 및 대체물질 모니터링 기술개발”, **2016**, 1-156.