

## 잔류성 유기오염물질의 전 지구적 거동: 다매체 환경모델의 결과해석 및 개선방안

최성득<sup>1</sup> · 장운석<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>토론토대학교 물리·환경과학과

<sup>2</sup>포항공과대학교 환경공학부

## Global Fate of Persistent Organic Pollutants: Multimedia Environmental Modelling and Model Improvement

SUNG-DEUK CHOI<sup>1</sup> AND YOON-SEOK CHANG<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical and Environmental Sciences, University of Toronto at Scarborough, Toronto, Canada, M1C 1A4

<sup>2</sup>School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH),  
Pohang, 790-784, Korea

본 연구에서는 다매체 환경모델인 Globo-POP (persistent organic pollutant)을 이용하여, 1930년대부터 대기 중으로 배출된 polychlorinated biphenyl (PCB)의 전 지구적 환경거동에 대해서 살펴보고, 다매체 환경모델의 보완사항을 논의하였다. 각 환경매체의 PCB 축적은 대기 중으로의 배출패턴에 직접적인 영향을 받는 것이 확인되었으며, 이외에도 환경매체의 면적, 분배계수, 분해율 등에 따라서 결정되었다. 지난 70년 동안 각 기후대의 배출량 분포는 일정하게 유지되었으나, 고위도 환경매체로의 축적량이 시간에 따라 증가하는 저온응축 현상을 확인하였다. 북반구 온대지역은 PCB 배출량과 환경매체로의 축적량에 있어서 가장 중요한 지역으로 평가되었으며, 대부분의 PCB는 토양과 해양으로 축적되는 것으로 예측되었다. 한편, 남극에는 중요한 오염원이 없음에도 불구하고, 매우 낮은 온도로 인해 전 지구적인 오염원 위치와는 크게 상관없이 POPs가 축적되는 것으로 추정되었다. 남극을 포함한 극지와 계절적 강설이 있는 북반구 고위도 지역의 POPs 거동을 신뢰성 있게 파악하기 위하여, 설빙을 포함한 water balance의 작성을 제안하였다. 이와 같이 개선된 다매체 환경모델은 미래의 기후변화에 따른 전 지구적 POPs 거동을 예측하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

Global fates of polychlorinated biphenyl (PCB) were investigated with a fugacity based multimedia transport and fate model, Globo-POP (persistent organic pollutant). The accumulation of PCB was directly affected by the emission patterns of PCB into the atmosphere and surface areas of environmental compartments. Partition coefficients and reaction rates also influenced on the accumulation patterns of PCB. The emission patterns of PCB in 10 climate zones were consistent for the past 70 years, while the contribution of PCB in high-latitude zones to the globe has increased by cold condensation. Considering the amounts of emission and accumulation of PCB, the North temperature zone is regarded as an important source and sink of PCB. Meanwhile, in spite of no significant sources, POPs accumulate in Antarctic environments mainly due to extremely low temperature. Finally we suggested that a global water balance accounting for snow/ice should be incorporated into multimedia environmental models for high-latitude zones and polar regions with the seasonal snow pack and/or permanent ice caps. The modified model will be useful to evaluate the influence of climate change on the fate of POPs.

**Keywords:** Persistent Organic Pollutant, Multimedia Environmental Model, PCB, Globo-POP

### 서 론

잔류성 유기오염물질 (Persistent Organic Pollutants: POPs)은 polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/dibenzofurans (PCDD/Fs), polychlorinated

biphenyls (PCBs), 유기염소계 농약류 등을 지칭하는 용어로서, 환경 및 생체에 비교적 장기간 잔류하며 장거리 이동성을 갖는 독성 유기화학물질을 의미한다. POPs는 대기와 해양을 통한 장거리 이동 (long-range transport)으로 전 지구적으로 분포하며 (Fig. 1), 극지방에서는 저온응축 (cold condensation)에 의해 환경 중에 축적되는 것으로 알려졌다 (Wania and Mackay, 1993). 주로 저위도 지역

\*Corresponding author: yschang@postech.ac.kr

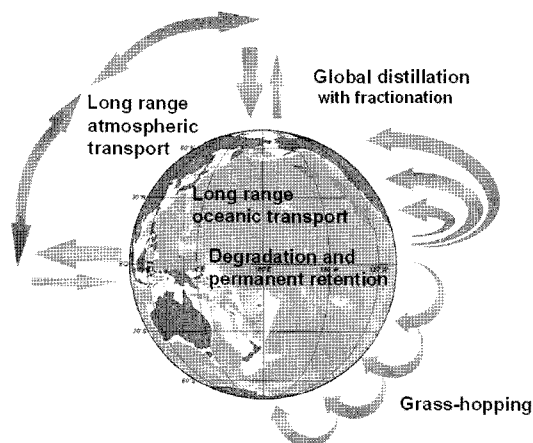


Fig. 1. Global transport and fate of persistent organic pollutants. Modified from Wania and Mackay (1996).

에서 배출된 POPs는 고위도로 이동하면서 각 물질별 물리·화학적 특성에 따라 이동 정도가 다르므로, 위도대에 따라 조성비가 달라진다. 예를 들어, PCBs의 경우에는 고위도로 갈수록 저염화 congener의 비율이 증가하는데, 이 현상을 global fractionation이라고 한다. 또한 저위도에서 고위도로 이동하는 POPs는 계절적인 기상조건 변화 등의 영향으로 지표면으로 침적되었다가 휘발되는 과정을 반복하는데, 이 현상을 메뚜기 효과 (grass-hopping effect)라고 한다 (Wania and Mackay, 1993).

POP의 전 지구적 거동연구는 북유럽과 캐나다 과학자들에 의해 활발히 진행되고 있다. 이들 국가는 북극과 인접하고 있기 때문에, 대기, 담수, 해수, 설빙 등 모든 환경매체의 POPs 오염에 대한 연구들이 진행되어 왔다 (Halsall, 2004). 반면, 남극은 북극에 비해 접근성이 떨어지므로 POPs 모니터링 연구들이 비교적 적은 편이다. 남극대륙에는 특별한 오염원이 존재하지 않으며 북극과 비교해서 매우 청정한 지역이므로, 남극에서 검출되는 POPs는 장거리 이동에 의한 전 지구적 오염을 반영한다. 물론, 여러 국가에서 운영하고 있는 남극 과학기지에서 배출된 POPs가 주변지역을 오염시키는 경우가 보고되었으나 (Sweet *et al.*, 2006), 전반적으로는 주변 환경에 큰 영향을 미치지 않는다. 일반적으로 극지에서 환경매체별로 시료를 채취하고 기기분석을 하기 위해서는 많은 시간과 비용이 요구된다. 특히, 대기시료의 경우에는 악기상에 따른 장기 시료채취에 많은 어려움이 있다. 최근에는 다양한 종류의 passive air sampler (PAS)들을 개발하여 이러한 제약을 극복하려는 연구들이 수행되고 있지만 (최와 장, 2005), POPs의 다매체 환경거동을 연구하기에는 여전히 무리가 있다.

대부분의 POPs는 다매체에 분포하기 때문에 기존의 대기나 해양 등의 단일 매체 모델들은 POPs 거동을 평가하는데 상당한 제약이 있다. 따라서 최근에는 다매체 환경모델 (multimedia environmental model)의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 모델들 대부분은 fugacity를 기본 개념으로 한 물질수지식 (mass balance equation)을 이용하여 다양한 환경매체에 축적된 POPs의 양, 농도, 이동, 분해 등을 계산한다 (Mackay, 2001). 다매체 환경모델의 공간규모는 특정 오염지역이나 도시지역에서부터 대륙이나 전 지구 규모까지 매우 다양하다. 그러나 다매체 공간규모가 증가할수록 다

양한 환경인자의 시공간적인 변화를 고려하기 어려우므로, 오염물질 거동에 대한 정량적인 분석 (실측값과의 비교 등) 보다는 정성적인 이해에 중점을 두고 있다. 다매체 환경모델의 개발과 적용은 1990년대 이후로 매우 활발하며, 캐나다 환경모델링 네트워크 (Canadian Environmental Modelling Network) 등을 중심으로 다양한 모델의 개발과 보완이 이루어지고 있다. 그러나 국내에서는 서울대 연구팀에서 일부 모델들을 개발한 것 이외에는 관련 연구가 활성화되지 않은 실정이다 (신 등, 2004). 현재 가장 활발히 사용되고 있는 전 지구적 다매체 환경모델로는 1990년대 중반에 토론토 대학교에서 개발되어 지속적으로 수정·보완되고 있는 Globo-POP이 있으며 (Wania and Mackay, 1995), 스위스 취리히 연방공과대학교에서 개발한 CliMoChem 모델이 있다 (Scheringer *et al.*, 2000). 한편, 최근에는 연근해 POPs 거동 연구를 위해 CoZMo-POP 2 (Wania *et al.*, 2006)가 개발되었으며, 현재 본 연구진이 국내 연안 환경 (예, 포항 영일만)에 적용할 수 있도록 환경변수 및 배출량 설정 등과 관련된 연구를 진행 중이다.

본 연구의 주요 목적은 국내에 생소한 전 지구적 다매체 환경모델을 소개하고, 그 결과를 설명함으로써 다매체 환경모델 기법에 대한 이해를 증진시키고, 더 나아가 극지를 비롯한 해양환경에의 적용 필요성을 알리는데 있다. 이를 위해서 전 지구적 배출량 자료가 있으며, 다양한 물리·화학적 특성이 밝혀졌고, 환경 중에서 대부분 검출되는 PCB 101의 환경거동에 대해 살펴보고, 새로운 환경매체로서 추가되어야 할 설빙 (snow/ice)과 관련된 모델의 개선 방안을 소개하였다.

## 연구방법

### 다매체 환경모델

본 연구에서는 캐나다 토론토대학교에서 개발한 다매체 환경모델인 Globo-POP을 사용하였다. 이 모델은 1990년대 중반에 Visual Basic을 이용하여 개발되었으며, 사용설명서와 프로그램이 웹사이트에 공개되어 있다 (Wania and Mackay, 2000). 최근에는 새로운 환경매체로서 산림과 산림토양이 추가되어 대기 중 POPs에 대한 산림필터효과를 평가하는데 사용되었다 (Su and Wania, 2005). 그러나 이 수정버전에는 출력양식에 오류가 있거나 일부 변수가 추가되지 않았으므로, 인터넷에 공개된 이전 버전 (Version 1.1)을 사용하였다.

Globo-POP에는 10개의 기후대별로 대기, 토양, 담수, 담수 퇴적물, 표층 해수 (< 200 m)의 환경매체가 있으며, 이들 매체에 축적되고 분해되는 POPs의 양과 매체 사이의 이동량이 계산된다. 각 매체의 다양한 환경인자와 기상인자들은 시간에 따른 함수로 주어지거나 상수로 주어지므로 계절변화를 잘 반영하고 있다. 그러나 각 기후대 내의 모든 환경매체는 균질화되어 있으므로 (대기는 4개의 층으로 구분), 본 모델의 공간 해상도는 일반적인 기후모델과 비교하여 매우 낮은 수준이다. 그러므로 이 모델은 측정값과의 비교를 위한 정량적인 연구보다는, POPs의 전 지구적 분포경향과 거동에 영향을 미치는 환경인자들을 파악하는데 효과적으로 사용될 수 있다. 이러한 전 지구적 다매체 환경모델의 특징은 POPs 배출량 자료의 한계에서 주로 기인한다. 다매체 환경모델의 공간 단위 (일반적인 모델에서의 박스)를 증가시키면 얼마든지 해상도를 증가

시킬 수 있다. 그러나 고해상도 공간에서 전 지구적 배출 인벤토리가 작성된 POPs의 예가 매우 드물며, 다양한 환경인자들의 신뢰성 있는 데이터베이스가 구축되어 있지 않다. 물론, 러시아 연구그룹 등에서 사용 중인 MSCE-POP 모델의 공간 해상도는 2.5°×2.5°이며, 각 국가별 인구수를 근거로 PCB 배출량을 산정했다 (Malanichev *et al.*, 1995). 그러나 모델링 대상 공간이 북유럽을 중심으로 북반구에 한정되어 있으며, 고해상도 배출량 자료가 없는 POPs에 대해서는 적용할 수 없는 한계가 있다.

**PCB 101의 물리·화학적 특성**

PCBs는 두 개의 벤젠고리 (biphenyl)가 연결되어 있으며, 염소가 1에서 10개까지 치환된 화합물이다. 전체 209개의 congener가 있으며, 치환된 염소의 개수가 같은 이성질체 (isomer)들을 동족체 (homologue)라고 부른다. PCBs는 전기 전도도가 낮으며 열과 화학 반응에 안정하므로 1930년대부터 다양한 산업에 사용되었다. 그러나 PCBs는 다른 POPs와 마찬가지로 다양한 환경매체와 생태계에 축적되며, 생체독성과 내분비계 장애를 유발하므로, 우리나라에서도 생산을 금지하였다. 하지만 여전히 변압기나 산업폐기물 등에서 누출되고 있으며, 소각공정 등에서는 비의도적으로 합성되어 대기 중으로 배출되고 있다.

PCB 101 (2,2',4,5,5'-Pentachloro)은 염소가 5개 치환된 구조를 갖고 있으며 분자량은 326.4이다. 25 °C에서의 분배계수 ( $K_{OA}$ ,  $K_{AW}$ ,  $K_{OW}$ )를 고려할 때, PCB 101은 저염화 혹은 고염화 PCB와는 달리 다매체 거동을 평가하는데 적합한 congener이므로 모델링 대상 화합물질로 선정하였다. Globo-POP에서 입력자료로 사용되는 PCB 101의 물리·화학적 특성을 Table 1에 나타내었다.

**PCB 101의 배출량**

실측이나 배출인자에 근거한 장기간 배출량 자료는 전 지구적 다매체 환경모델의 필수입력 자료이다. 그러므로 지금까지는 배출량이 산정된  $\alpha$ -HCH나 PCBs에 관한 연구가 주를 이루었다 (Wania *et al.*, 1999a; Wania *et al.*, 1999b; Wania and Su, 2004). 최근 10년 동안 가장 많은 주목을 받은 다이옥신의 경우에도, 신뢰성 있는 배출량 자료가 없기 때문에 전 지구적 모델링의 예가 없다. 본 연구에서는 지난 70년 동안의 전 지구적 PCB 배출량 자료 (Breivik *et al.*, 2002a; Breivik *et al.*, 2002b)로부터 10개의 기후대별로 재산정한 자료 (Wania and Su, 2004)를 사용하였다. PCB 101은 1940년대 중반 이후로 급격하게 대기 중으로 배출되었으며, 북반구 온대지역 (N-Temperate)과 아열대지역 (N-Subtropic)이 주요 배출원이다 (Fig. 2). 배출량은 1980년을 전후로 최고를 보이다가 1987년을 정점으로 급격히 감소하였으며, 감소추세를 고려할 때 2007년 현재 배출량은 1930년대 수준으로 예상된다.

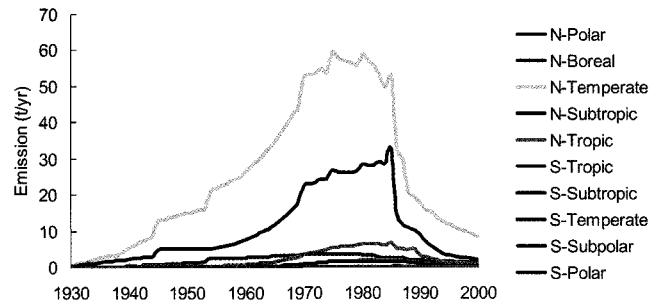


Fig. 2. Annual emission of PCB 101 in 10 climate zones from 1930 to 2000 derived by the high estimates by Breivik *et al.* (2002).

**남극 오염도 계산**

1930년부터 2000년까지의 PCB 101 모델링과 더불어, 1990년부터 10년 동안 가상 오염물질의 지속적인 배출을 가정하여 Antarctic Contamination Potential (AAPC)을 계산하였다. AAPC란 이전 연구 (Wania, 2003)의 ACP (Arctic Contamination Potential) 개념과 동일하다. 즉, 식 (1)에서와 같이 전 지구적으로 배출된 오염물질이 장거리 이동을 거쳐 남극환경에 축적되는 비율을 의미한다 (대기 제외). 이 때 오염물질의 종류는 특정 POPs가 아니라 다양한 범위의  $\log K_{OW}$ 와  $\log K_{AW}$  값을 갖는 가상의 화합물질들이며, 이들 분배계수 조합에 따른 AAPC를 계산하여 chemical space map을 작성하였다. 연간 배출량은 각 기후대별로 인구를 고려하여 전체 합 100으로 만든 가상의 자료를 사용하였으며 (10개의 기후대별 (북극-남극) 배출량 비율: E(1)=0.18, E(2)=3.43, E(3)=21.68, E(4)=34.15, E(5)=29.62, E(6)=8.81, E(7)=2.06, E(8)=0.07, E(9)=0.008, E(10)=0), 모든 오염물질은 대기 중으로 배출되었다고 가정하였다. 식 (1)의 분모인 총 배출량에는 오염물질이 중위도 환경매체 (주로 토양)에 침적되었다가 휘발되는 양은 고려되지 않았으며, 대기 중으로 배출된 오염물질은 분배계수에 따라 기후대별 환경매체들에서 분배과정을 거치면서 휘발과 침적을 반복하면서 극지로 이동하게 된다.

$$AAPC = 100\% \times \frac{\text{Chemical amount in Antarctic surface media}}{\text{Total chemical amount emitted globally}} \quad (1)$$

**결과 및 고찰**

**환경매체별 오염경향**

북반구 온대지역의 환경매체들에서 가장 많은 양의 PCB 축적량이 계산되었다 (Fig. 3). 시간에 따른 환경매체들의 PCB 축적경향은 대기 중 PCB 배출경향 (Fig. 2)을 반영하였다. 대기 중 PCB 101

Table 1. Input parameters of physico-chemical properties of PCB 101. OW: octanol-water, AW:air-water, OA:octanol-air

Properties	Values									
Partition coefficients	$\log K_{OW}$	6.33	$\log K_{AW}$	-2.01	$\log K_{OA}$	8.73				
Energy of phase transfer (J/mol)	$\Delta U_{OW}$	-23,800	$\Delta U_{AW}$	59,700	$\Delta U_{OA}$	-83,500				
Half-life at 25 °C (h)	air	-	soil	100,000	fresh water	31,000	ocean water	31,000	Sediment	55,000
Activation energy (J/mol)	air	10,000	soil	30,000	fresh water	30,000	ocean water	30,000	sediment	30,000
Reaction rate of vapor with OH	$3 \times 10^{-13}$									

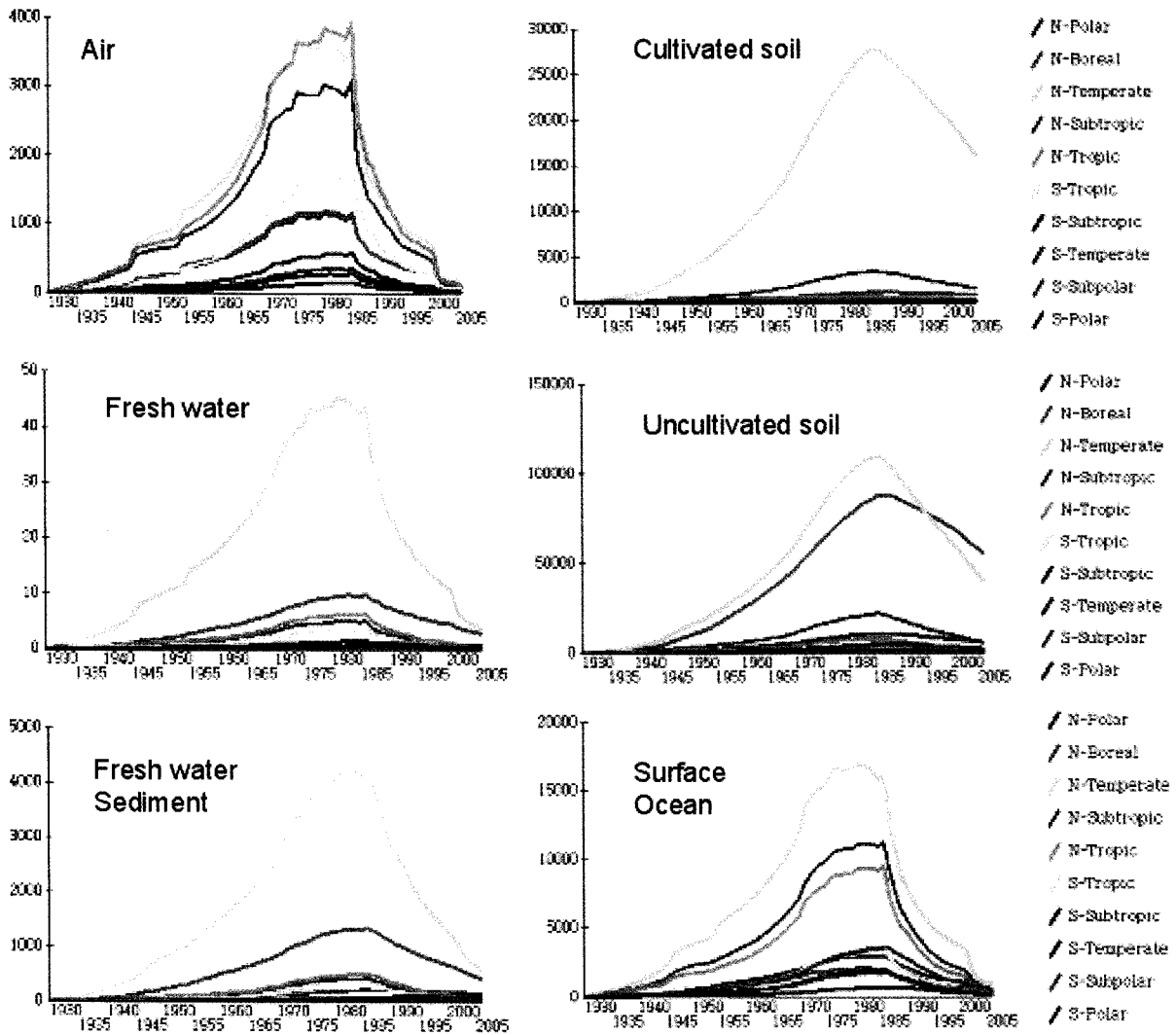


Fig. 3. Amounts of PCB 101 (kg) accumulated in environmental compartments.

의 양은 1960년대에 급격히 증가하여, 1980년 전후로 최대값을 보이다가 1980년대 후반에 급격히 감소하였다. 그러나 기후대별 대기 중 총량과 배출량 경향에는 차이점이 발견되었다. 배출량은 북반구 온대 > 북반구 아열대 >> 북반구 열대의 순서이지만, 대기 중 총량은 북반구 온대 ≈ 북반구 열대 > 북반구 아열대 순이다. 이 결과는 북반구 온대와 아열대에서 배출된 PCB 101 상당량이 수직·수평 확산을 통해 북반구 열대로 이동한 것으로 해석될 수 있다. PCB 101이 거의 배출되지 않은 남반구의 대기에도 북반구에서 상당량의 PCB가 이동한 것으로 추정되었다. 이 결과는 북반구 온대로부터 아열대와 열대로 이동하는 대기 이동량 (total air flux)이 반대 방향의 이동량보다 크며, 북반구 열대의 면적이 아열대와 온대보다 2배 이상 크기 때문에 열대지역의 대기 중 PCB 101 총량이 상대적으로 증가한 결과로 해석할 수 있다. 이 외의 다양한 PCB congener의 경우에도 (PCB 8, PCB 52, PCB 153, PCB 194) 전반적으로 열대에서의 PCB 총량이 아열대보다 큰 결과를 얻을 수 있었다. 반면에 극지의 경우에는 중위도에서 유입되는 대기 이동량이 적으며, 저온응축으로 인해 상당량의 PCB가 지표환경으로 침적되

므로 대기 총량이 작은 것으로 해석된다.

한편, 대기 중의 PCB 101의 분포가 해양에서의 분포 (북반구 온대 > 북반구 아열대 > 북반구 열대)와 차이를 보이는 이유는 해양 순환으로 설명할 수 있다. 열대의 해수 이동량은 아열대와 온대보다 1.5배 크다. 따라서 북반구 열대 대기에 다량으로 축적된 PCB가 열대 해양으로 유입된다. 해수 순환에 의한 희석효과가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 북반구 온대 토양은 다른 환경매체들과 비교적 다른 경향을 보였다. 다른 매체들에서의 PCB 101 총량은 1980년대 이후 대기 중으로의 배출이 급감함에 따라 2000년 전후로는 1940년대 수준으로 감소했다. 그러나 토양은 1990년대에도 여전히 높은 수준의 PCB 101 총량을 보였다. 이 결과는 토양이 PCB 101을 가장 많이 축적하고 있으며, 분해율 (reaction/degradation rate)이 담수 퇴적물을 제외한 다른 매체보다 상대적으로 작은 것에 기인한 것으로 해석될 수 있다. 이 외의 다른 환경매체들에서 관찰되는 기후대별 PCB 101 총량 차이는 각 매체의 기후대별 면적과 배출량에 의해 결정된 것으로 판단된다.

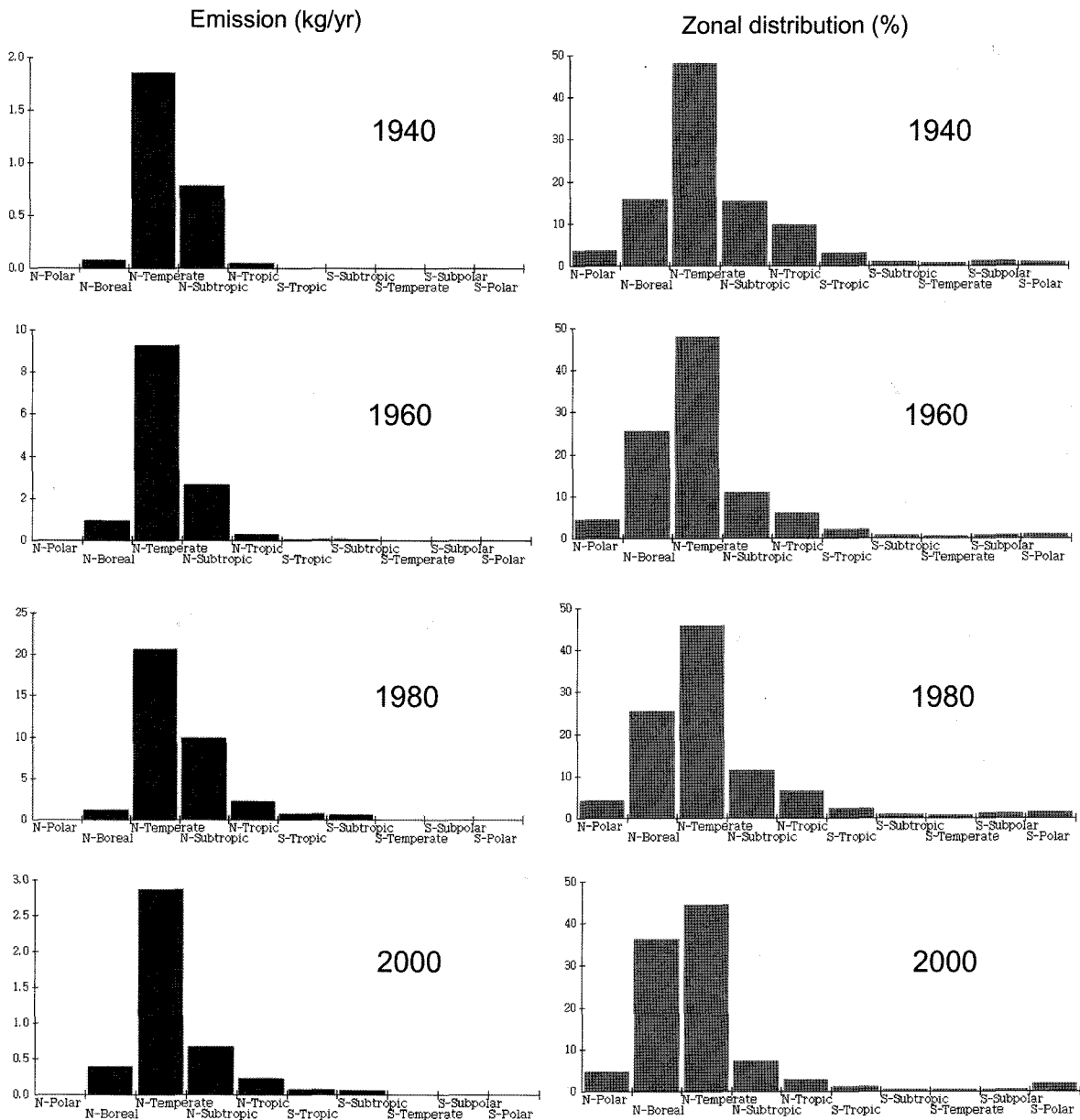


Fig. 4. Zonal emissions (left) and distribution (right) of PCB 101.

**전 지구적 장거리 이동**

Fig. 4는 1940년부터 2000년까지 20년 간격으로 나타난 기후대별 배출량과 분포도이다. PCB 101은 북반구 온대와 아열대에서 주로 배출되었으며, 계속 비슷한 경향을 유지하였다. 반면에 기후대별 분포에서는 중요한 차이점들을 발견할 수 있었다. 시간이 지남에 따라 극지(북극과 남극)와 북반구 냉대(N-Boreal)에서의 분포 비율은 증가하고, 북반구 온대, 아열대, 열대에서의 분포 비율은 감소하였다. 이 결과는 POPs가 장거리 이동을 통해 북반구와 남반구의 고위도 지역으로 이동하며 저온응축에 의해 고위도 지역에 축적되는 것을 의미한다. PCB 101 이외의 congener들에 대해 모델링을 할 경우에는 global fractionation 현상을 확인할 수 있으나, 이전 연구(Wania and Su, 2004)에서 상세히 보고되었으므로 생략하였다.

**북반구 온대지역에서의 매체별 분포**

북반구 온대지역은 PCBs가 가장 많이 배출되고 축적되는 지역이며, 우리나라를 포함한 동북아시아 공업지역이 모두 포함되는 지역이기도 하다. 중국의 급속한 산업화를 고려할 때, 장거리 이동 모니터링을 포함한 종합적인 POPs 거동연구가 필요한 시점이다. 그러나 지금까지 이 지역을 대상으로 개발된 다매체 환경모델은 전무하다. 따라서 조만간 동북아시아 규모에서 종합적인 POPs 모니터링 및 모델링 연구계획의 수립이 필요할 것으로 보인다. 본 연구에서는 북반구 온대지역 전체에 대한 PCB 101의 환경매체별 분포 경향에 대하여 알아보았다.

환경매체들에 축적된 PCB 101의 총량을 고려할 때, 토양과 해수가 가장 큰 축적량을 보였다(Fig. 5(a)). 대기/토양의 분배에 의해 대기 중의 PCB 101이 대부분 토양으로 축적되고, 면적이 가장

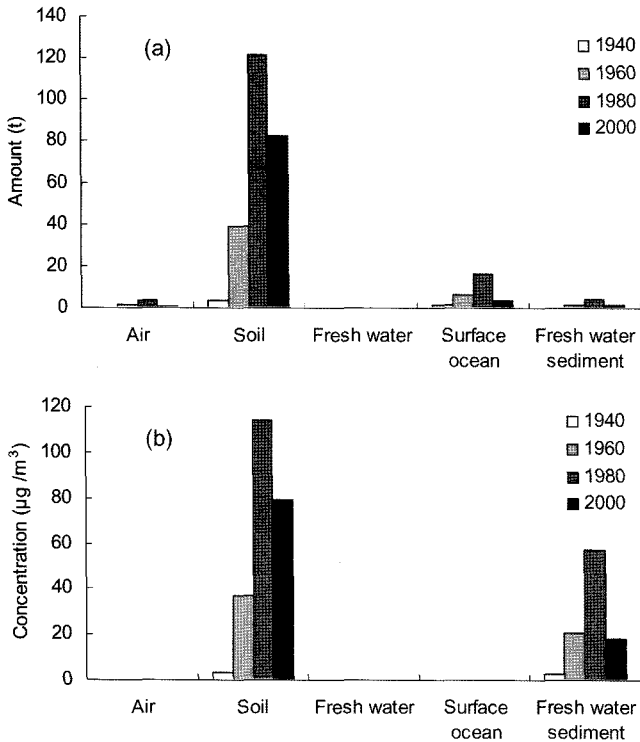


Fig. 5. Amounts and concentrations of PCB 101 in environmental compartments of the North temperature zone.

큰 해수로도 상당량의 PCB 101이 유입되었다. 담수에 유입된 PCB 101 상당량은 퇴적물로 축적되는 것으로 보인다. 농도의 경우에는 토양과 퇴적물이 가장 높은 값을 보였다 (Fig. 5(b)). 즉, 퇴적물은 PCB 배출원의 직접적인 영향을 받지 않지만 PCBs가 고농도로 검출될 가능성이 있다. 실제로 국내에서도 다양한 POPs가 담수 및 해양퇴적물에 축적되는 사실이 밝혀졌다 (Oh *et al.*, 2003; Koh *et al.*, 2004).

환경매체 사이의 PCB 101 이동과 축적 경로를 파악하기 위해 2000년도의 물질수지 (mass balance)를 살펴보았다 (Fig. 6). 대부분의 PCB 101은 (93.5%) 토양으로 축적되었으며, 대기 중에 남아 있는 총량은 0.8%에 불과했다. 대기 중으로 새롭게 유입된 양 (8,186 kg/yr)과 다른 기후대 대기와의 확산 및 이류에 의한 유출입량은 비슷한 수준으로서, 2000년도 배출량의 기여도가 작음을 알 수 있었다. 특이한 점은, 대기로부터 직접 담수에 유입되는 양보다 담수와 퇴적물 사이의 이동량이 많다는 사실이다. 이 결과는 담수로 유입되는 POPs의 양이 감소하더라도 담수와 퇴적물 사이의 물질교환은 이전의 유입량을 반영하여 비교적 높은 값을 보이는 것으로 해석할 수 있으며, 수생환경매체 (생물체 포함) 사이에서는 비교적 많은 이동량이 유지될 가능성을 제시한다. 이점에 대해서는 추후에 보다 상세한 모델링과 실측자료의 문헌조사가 필요할 것이다.

전 지구 다매체 환경모델의 개선방안

대기 중의 POPs는 겨울철에는 눈에 의한 흡착침적으로 상당량 제거되고, 봄에는 눈이 녹으면서 휘발되거나 토양이나 담수로 유출된다 (Gouin *et al.*, 2005). 기존의 다매체 환경모델들은 설빙을 환

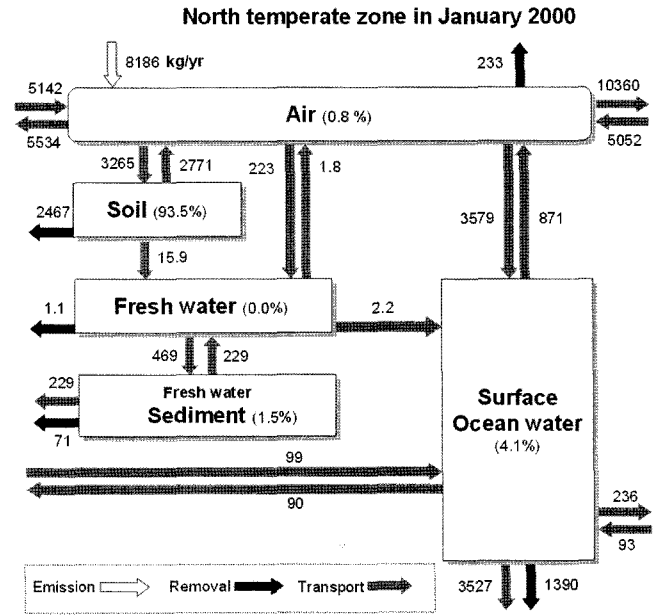


Fig. 6. Unsteady state mass balance of PCB 101 in the North temperature zone in January 2000.

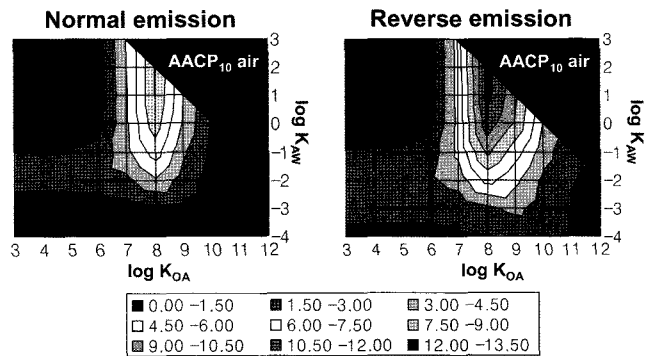


Fig. 7. Chemical space map for Antarctic contamination potential (AACP) of hypothetical chemicals after 10 year-steady emissions.

경매체에 포함시킨 경우가 거의 없었으며, 최근에 CoZMo-POP 모델에 설빙 인자들을 추가한 것이 최초의 본격적인 연구이다 (Daly and Wania, 2004). 그러나 이 모델은 오대호 주변과 같은 특정 지역만을 대상으로 하기 때문에 전 지구 환경에 적용하기에 부적합하다. 최근에는 CliMoChem 모델에 설빙을 포함시킨 연구가 발표되었으나 (Stocker *et al.*, 2005), 설빙이 포함된 water balance를 작성하지 않고 기존의 인공위성 데이터를 이용한 계절평균값을 사용하였다. 따라서 시간에 따른 설빙의 높이와 부피 등의 변화를 적절히 반영할 수 없으므로 snow hydrology 측면에서 POPs 거동을 파악하기에는 무리가 있다. 특히, 남극 대륙의 98%는 설빙이 덮고 있으므로 기존의 전 지구 다매체 모델로서는 신뢰성 있는 결과를 얻기 힘들다. 또한 계절적 강설이 있는 북반구 고위도 지역에도 기존의 모델들을 사용하는데 어려움이 있다.

본 연구에서는 설빙이 가장 중요한 역할을 할 것으로 예상되는 남극의 환경매체에 POPs가 축적되는 정도인 AACP (Antarctic Contamination Potential)를 계산하여 chemical space map을 작성하

였다 (Fig. 7). 좌측의 지도는 각 기후대의 인구에 비례한 배출량 (normal emission)에 따른 AACP 값이며, 우측은 역 배출량 (reverse emission: 북반구와 남반구의 배출량을 반대로 설정)에 따른 AACP 값이다. 두 경우 모두  $\log K_{OA}=8$ ,  $\log K_{AW}=1$ 을 중심으로 세로 방향으로 높은 값을 보이고 있다. 이러한 범위의  $\log K_{OA}$ ,  $\log K_{AW}$  값을 갖는 화학물질들은 대부분 토양이나 퇴적물에 축적되는 특징을 갖고 있으며,  $-3 < \log K_{AW} < -1$ ,  $6 < \log K_{OA} < 8$  범위의 화학물질은 대기, 토양, 담수 및 해수 등의 다매체로 축적되는 경향을 갖고 있다. 이 범위에는 저염화 PCBs가 포함되므로, 본 결과는 중위도에서 배출된 PCBs가 장거리 이동으로 청정지역인 남극에 축적되는 사실 (Fuoco *et al.*, 1996)을 뒷받침한다. 한편, Fig. 7에서 중요한 점은, 역 배출량 자료를 사용한 경우에는 남극에 축적되는 POPs의 양이 전반적으로 증가하지만, 정상 배출량 사용에 따른 축적량과 비교하여 두 배 이상을 넘지 않았다는 것이다. 더구나 저염화 PCBs가 해당되는  $\log K_{OA}$ ,  $\log K_{AW}$  범위에서는 거의 일정한 값들을 보이고 있다. 북반구의 배출량이 전체 배출량의 89%를 차지하는 것을 고려할 때, 오염물질의 배출지점이 남극으로의 축적량에 큰 영향을 미치지 않는다는 해석이 가능하다. 이는 낮은 온도로 인해 fugacity 용량을 의미하는 매체별 Z value (Mackay, 2001)가 매우 크며 분해율은 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 본 결과의 문제점은 AACP 계산에 있어서 동토가 남극의 설빙을 대신한다는 것이다. 극지의 토양과 설빙은 POPs 축적에 있어서 비슷한 특징이 예상되지만 이에 대한 확인이 필요하다.

위에서 언급한 문제점을 해결하기 위해서는 설빙을 포함한 global water balance equations를 작성해야 한다. 이를 위한 기초 작업으로 Fig. 8과 같이 각 매체 간의 water flux ( $m^3/h$ )를 산정해야 한다. 강수와 증발, 토양에서의 유출 (runoff from soil), 하천유량 (global river discharge) 등에 대한 기본 자료를 입수해야 하며, 설빙의 계절변동 (seasonal snow hydrology)을 설명할 수 있는 수식을 작성해야 한다. 이 과정에서 중요한 점은 강수량과 기온의 변화에 따라서 Fig. 8의 모든 플럭스 값이 자동으로 변경되어야 한다는 것이다. 현재 본 연구진에서는 이러한 water balance equations를 작성하고 있으며, Globo-POP에 추가할 계획이다. 이 수정 버전이 완성될 경우, 보다 신뢰성 있는 전 지구 모델링이 가능할 것으로 예상되며, 미래 기후변화로 인한 water balance 변화를 고려한 POPs 거동 예측도 가능할 것이다.

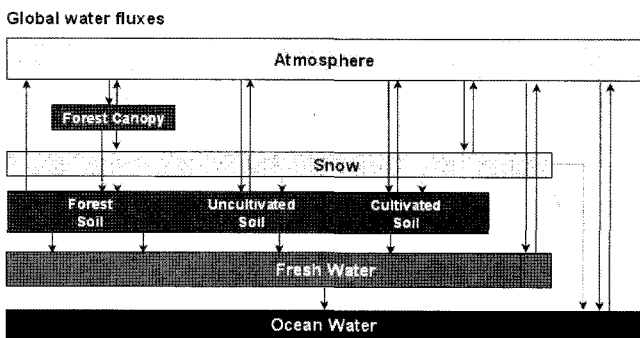


Fig. 8. Global water fluxes to be incorporated into new Globo-POP. Seasonal snow and permanent snow/ice caps should be considered in a global water balance.

## 요약 및 결론

본 연구의 요약과 결론은 다음과 같다.

(1) 개별 환경매체들의 PCB 오염경향은 대기로의 배출패턴에 직접적인 영향을 받으며, 각 기후대별 차이는 환경매체들의 면적, 분배계수, 분해율 등에 따라서 결정되었다. 대기 중으로의 배출량은 크게 감소했음에도 불구하고 토양은 높은 수준의 PCB 축적량을 보였다. 지난 70년 동안 각 기후대의 배출량 분포는 일정하게 유지되었으나, 고위도 환경매체로의 축적량이 시간에 따라 증가하는 저온 응축 현상을 확인하였다.

(2) 북반구 온대지역은 PCB 총 배출량과 환경매체로의 축적량에 있어서 가장 중요한 지역으로 판단되었다. 축적량 측면에서는 토양과 해양이 가장 큰 비중을 차지했으며, 농도 측면에서는 토양과 퇴적물이 중요한 비중을 차지했다. 한편, 대기로부터의 유입량은 적지만 담수와 퇴적물 간 PCB 이동의 중요성이 제시되었다.

(3) 남극에는 중요한 오염원이 없음에도 불구하고, 낮은 온도로 인해 전 지구적 오염원 위치와는 크게 상관없이 POPs가 축적되는 것으로 예측되었다. 남극을 포함한 극지와 계절적 강설이 있는 북반구 고위도 지역의 POPs 거동을 파악하기 위하여, 설빙을 포함한 water balance의 작성이 필수적이다.

다매체 환경모델은 과거와 현재의 POPs 거동연구에 유용하게 사용될 수 있으며, 더 나아가 미래의 기후변화에 따른 전 지구적 POPs 거동 예측을 위해 사용될 수 있다. 그러나 이러한 목적을 위해서는 설빙 알고리즘을 추가하는 등 기존 다매체 모델들의 한계를 개선하는 일이 시급하다. 궁극적으로는 대기 및 해양순환 모델과 다매체 환경모델을 결합하여, POPs 거동 예측의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (KRF-2005-214-D00304). 다매체 환경모델의 수정은 한국해양연구원 극지연구소의 “국제 IPY 남극대륙중단 빙하 프로그램과 빙하기반기술 개발사업”의 일부 지원을 받았습니다. 다매체 환경모델의 수정작업에 도움을 주시는 토론토대학교의 Frank Wania 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

신용승, 이동수, 구현정, 2004. 오염매체 통합관리를 위한 유해화학물질의 다매체 환경기준 설정에 관한 연구, 한국환경정책·평가연구원, KEI RE-06.

최성득, 장윤석, 2005. Passive Air Sampler를 이용한 잔류성 유기오염물질의 대기 모니터링. 한국대기환경학회지, 21: 481-494.

Brevik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna and K.C. Jones, 2002a. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners - A mass balance approach. 1. Global production and consumption. *Sci. Total. Environ.*, 290: 181-198.

Brevik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna and K.C. Jones, 2002b. Towards a global historical emission inventory for selected PCB

- congeners - A mass balance approach. 2. Emissions. *Sci. Total Environ.*, **290**: 199–224.
- Daly, G. L. and F. Wania, 2004. Simulating the influence of snow on the fate of organic compounds. *Environ. Sci. Technol.*, **38**: 4176–4186.
- Fuoco, R., M.P. Colombini, A. Ceccarini and C. Abete, 1996. Polychlorobiphenyls in Antarctica. *Microchem. J.*, **54**: 384–390.
- Gouin, T., T. Harner, G.L. Daly, F. Wania, D. Mackay and K.C. Jones, 2005. Variability of concentrations of polybrominated diphenyl ethers and polychlorinated biphenyls in air: implications for monitoring, modeling and control. *Atmos. Environ.*, **39**: 151–166.
- Halsall, C.J., 2004. Investigating the occurrence of persistent organic pollutants (POPs) in the arctic: their atmospheric behaviour and interaction with the seasonal snow pack. *Environ. Pollut.*, **128**: 163–175.
- Koh, C.-H., J.S. Khim, K. Kannan, D.L. Villeneuve, K. Senthilkumar and J.P. Giesy, 2004. Polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), biphenyls (PCBs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and 2,3,7,8-TCDD equivalents (TEQs) in sediment from the Hyeongsan River, Korea. *Environ. Pollut.*, **132**: 489–501.
- Mackay D., 2001. Multimedia environmental models, 2nd ed., Lewis publishers, Boca Raton, Florida.
- Malanichev, A., E. Mantseva, V. Shatalov, B. Strukov and N. Vulykh, 2004. Numerical evaluation of the PCBs transport over the Northern Hemisphere. *Environ. Pollut.*, **128**: 279–289.
- Oh, J. R., M.G. Ikonou, M.P. Fernandez and S.-H. Hong, 2003. PCB and PCDD/F Totals, TEQs, and Congener Patterns in Korean Coastal Marine Environments, 1987, 1988, 1990, and 1996–1999. *Arch. Environ. Con. Tox.*, **44**: 224–236.
- Scheringer, M., F. Wegmann, K. Fenner and K. Hungerbühler, 2000. Investigation of the cold condensation of persistent organic pollutants with a global multimedia fate model. *Environ. Sci. Technol.*, **34**: 1842–1850.
- Stocker, J., F. Wegmann, M. Scheringer and K. Hungerbühler, 2005. Influence of snow and ice on the distribution of POPs in a global multi-media model. *Organohalogen Compounds*, **67**: 1809–1811.
- Su, Y. and F. Wania, 2005. Does the forest filter effect prevent semi-volatile organic compounds from reaching the Arctic?. *Environ. Sci. Technol.*, **39**: 7185–7193.
- Sweet, S.T., J.L. Sericano, G. Denoux, A.G. Klein, M.C. Kennicutt and T.L. Wade, 2006. Spatial and temporal variability of contamination in the marine environment at McMurdo Station, Antarctica. In: Proceedings of the Society of Environmental Toxicology and Chemistry 27th Annual Meeting in North America, Montréal, Québec, Canada, pp. 143.
- Wania, F. and D. Mackay, 1993. Global fractionation and cold condensation of low volatility organochlorine compounds in polar regions. *Ambio*, **22**: 10–18.
- Wania, F. and D. Mackay, 1995. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Sci. Total Environ.*, **160/161**: 211–232.
- Wania, F. and D. Mackay, 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Technol.*, **30**: 390A–396A.
- Wania, F., D. Mackay, Y.-F. Li, T.F. Bidleman and A. Strand, 1999a. Global chemical fate of  $\alpha$ -hexachlorocyclohexane. 1. Evaluation of a global distribution model. *Environ. Toxicol. Chem.*, **7**: 1390–1399.
- Wania, F. and D. Mackay, 1999b. Global chemical fate of  $\alpha$ -hexachlorocyclohexane. 2. Use of a global distribution model for mass balancing, source apportionment, and trend predictions. *Environ. Toxicol. Chem.*, **18**: 1400–1407.
- Wania, F. and D. Mackay, 2000. The global distribution model. A nonsteady state multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants in the global environment, Technical Report and Computer Program”, <http://www.utoronto.ca/~wania>.
- Wania, F., 2003. Assessing the potential of persistent organic chemicals for long-range transport and accumulation in polar regions. *Environ. Sci. Technol.*, **37**: 1344–1351.
- Wania, F. and Y. Su, 2004. Quantifying the global fractionation of polychlorinated biphenyls. *Ambio*, **33**: 161–168.
- Wania, F., K. Breivik, N.J. Persson and M.S. McLachlan, 2006. CoZMo-POP 2 - A fugacity-based dynamic multi-compartmental mass balance model of the fate of persistent organic pollutants. *Environ. Modell. Softw.*, **21**: 868–884.

2007년 1월 16일 원고접수

2007년 2월 23일 수정본 채택

담당편집위원: 김기범