

국내 산림이 잔류성 유기오염물질의 거동에 미치는 영향: 다매체 환경모델링

최성득 · 장윤석*[†]

토론토대학교 물리 · 환경과학과, *포항공과대학교 환경공학부

Influence of Korean Forests on the Fate of Persistent Organic Pollutants: Multimedia Environmental Modeling

Sung-Deuk Choi and Yoon-Seok Chang*[†]

*Department of Physical and Environmental Sciences, University of Toronto Scarborough,
1265 Military Trail, Toronto, Ontario, Canada, M1C 1A4*

**School of Environmental Science and Engineering, POSTECH (Pohang University of Science and Technology),
San 31, Nam-gu, Hyoja-dong, Pohang, 790-784, Korea*

The influence of forests on the long-term (1930-2030) fate of persistent organic pollutants (POPs) in South Korea, i.e. forest filter effect, was evaluated using a regional dynamic multimedia environmental model, CoZMo-POP 2. Chemical properties for eleven selected polychlorinated biphenyls (PCB-8, 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180, 194), emissions data, and physical parameters for environmental compartments were used as input data for the model. The model results (long-term trends of PCB concentrations and amount fractions) indicated that the levels of PCBs could be reduced in a factor of two to three in air, water, soil, and sediments by forest canopies and forest soil. We conclude that forests, as a buffer zone for POPs storage, play an important role in determining the levels and fate of POPs in South Korea, resulting from the successful implementation of reforestation and forest management programs since the early 1970s. For more reliable evaluation of the role of Korean forests, an improved multimedia environmental model has to be developed to reflect the long-term changes in climate and forest parameters.

Key words: forest, forest filter effect, POPs, PCBs, multimedia environmental model

1. 서 론

잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs)은 대부분 대기 중으로 배출되어 지표로 침적된 후 휘발과 침적을 반복한다. 휘발성이 낮은 POPs는 배출원 주변의 지표로 침적되어 장기간 축적될 가능성이 크며, 휘발성이 높은 물질들은 장거리 이동을 통해 청정지역으로 유입된다. 이 과정에서 육지면적의 80%를 차지하고 있는 식생(vegetation)이 중요한 역할을 한다.^{1,2)} 대기 중 POPs는 기체 및 입자침적(gas and particle deposition)을 통해 식물의 잎으로 이동한다.

잎에는 지질성분으로 구성된 큐티클(cuticle)이 있으므로 대기 중 POPs는 화학평형을 이룰 때까지 잎에 수동흡수(흡착)된다. 따라서 솔잎이나 다양한 식물의 잎에 침적된 POPs를 분석하는 연구들이 국내에서도 활발히 진행되고 있다.³⁻⁷⁾

산림은 나무를 비롯한 다양한 식물로 구성되어 있으므로, 대기 중 POPs를 효과적으로 흡수하여 산림토양에 저장하는 역할을 하는데, 이를 산림필터효과(forest filter effect)⁸⁻¹⁰⁾라고 한다. Fig. 1에서와 같이, 대기 중 POPs는 주로 수관(canopy)에 침적되고 일부분은 휘발된다. 이후 낙엽, 빗물 등을 통해 수관에 침적되었던

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yschang@postech.ac.kr

POPs는 산림토양으로 유입된다. 산림이 POPs 거동에 많은 영향을 미칠 수 있다는 것은 (1) 대부분의 식생시료에서 POPs가 검출되고 있으며,^{1,7)} (2) 산림토양에서도 비교적 고농도의 POPs가 검출되는 사실¹¹⁾에 근거한다. 최근에는 보다 직접적인 방법으로 수관에 의한 POPs 흡수 플럭스를 산정하는 방법들이 제안되었다. 첫째, 대용량 시료채취기(bulk sampler)를 나무 아래와 나무가 없는 곳에 설치하여 POPs 침적량 차이를 보는 방법이 있으며,¹²⁾ 둘째로는 산림타워에서 높이별로 대기시료를 채취하고 미기상 자료를 이용하여 플럭스를 산정하는 방법이 있다.¹³⁾ 이러한 플럭스 산정 방법, 산림에 의한 POPs의 흡수과정, 캐나다 온타리오 산림의 연구사례 등은 본 연구진의 이전 논문에 수록되어 있다.¹⁴⁾

산림에 의한 POPs 거동을 종합적으로 파악하기 위해서는 실측자료뿐만 아니라 다매체 환경모델(multimedia environmental model)을 사용할 필요가 있다. POPs 거동은 다양한 산림환경인자, 식물의 종류, 생육 조건 등으로부터 많은 영향을 받으므로, 일부 실측자료만으로는 국가, 대륙, 전 지구 규모의 산림이 POPs 거동에 미치는 영향을 정성·정량적으로 규명하는데 한계가 있다. 따라서 산림을 다매체 환경모델의 새로운 환경매체로 추가하는 연구들이 진행되어 왔으며,^{8,10)} 이들 연구를 통해 북반구 중위도의 산림이 POPs 흡수원 역할을 하여 전 지구적 POPs 거동에 영향을 미치는 것이 밝혀졌다.

우리나라 산림은 일제 강점기와 한국전쟁을 거치며

황폐화되었다가, 1970년대 초반부터 전국적인 재조림 사업을 통해, 지난 30년 동안 단위면적 당 산림탄소량(Mg C/ha)이 7배나 증가하였다.¹⁵⁾ 이는 세계에서 유례를 찾아볼 수 없을 정도로 성공적인 산림녹화로 평가된다. 특히, 산림이 전국토의 65%를 차지하며 침엽수와 활엽수의 연령이 30-40년 생 이하인 경우가 대부분이므로, 최근에도 상당량의 이산화탄소를 대기로부터 흡수하여 산림에 저장하는 역할을 한다.¹⁶⁾ 한편, 우리나라는 1970년대 이후 본격적인 공업화 과정을 거치면서, POPs를 비롯한 다양한 오염물질이 배출되고, 이러한 오염물질의 상당량이 산림에 축적되었을 가능성이 크다. 그러나 지금까지 국내에서는 이에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 산림을 환경매체로 포함하는 다매체 환경모델을 이용하여, 국내 산림이 POPs 거동에 미치는 영향을 파악하고, 산림의 장기변화를 고려한 모델개발의 필요성에 대해 논의하였다.

2. 연구방법

2.1. 다매체 환경모델

본 연구에서는 지역규모 다매체 환경모델인 CoZMo-POP 2를 사용하였다. 다매체 환경모델은 주로 반휘발성 유기화합물(semivolatile organic compounds: SVOCs)을 대상으로 개발되었으며, 대부분 fugacity 개념을 사용하고 있다. 다매체 환경모델의 기본이론은 이전 논문¹⁷⁾에 간단히 언급되어 있으며, 보다 자세한 모

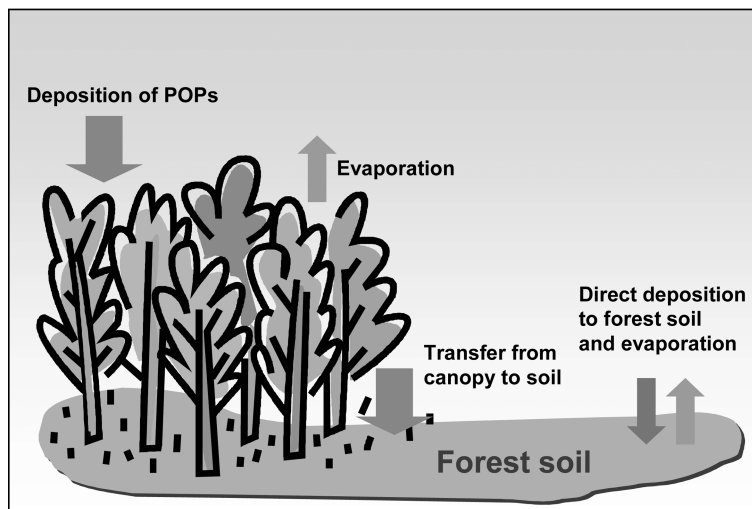


Fig. 1. Transfer of persistent organic pollutants (POPs) in a forest.

텔이론 및 응용에 대해서는 참고문헌¹⁸⁾에 수록되어 있다. CoZMo-POP 2는 토론토대학교 물리·환경과학과의 Frank Wania 교수가 개발한 윈도우용 프로그램으로서,¹⁹⁾ 모델링 대상지역의 환경인자, 화학물질 데이터베이스, 배출량, 모델결과 등의 입출력 윈도우로 구성된다. 이 모델은 산림, 대기, 토양, 담수, 해수, 퇴적물 등 대부분의 환경매체를 포함하므로, 국내환경에 적용하기에 적합하다. 본 연구진은 이 모델을 사용하여 국내 대기 및 다매체 환경에서의 폴리염화비페닐 (polychlorinated biphenyls: PCBs) 농도의 장기경향을 추정하였으며, 모델결과와 실측결과가 상당히 일치하는 것을 확인하였다.^{17,20)}

2.2. 모델 입력자료

모델의 공간규모는 한반도와 제주도를 포함한 연근해로 정하였으며(Fig. 2), 모델링 대상 화학물질로는 전 지구 배출량 자료가 있으며 최근에 국내에서도 이슈가 되고 있는 PCBs를 선택하였다. PCBs는 염소 개수에 따라 넓은 범위의 물리·화학적 특성을 지니므로 다양한 다매체 거동을 보인다. 따라서 PCBs의 거동특성을 파악함으로써 다른 POPs의 거동을 예상할 수 있다. 모델의 물리환경 입력자료로는 국토이용 현황에 근거한 환경매체별 자료(대기, 침엽수, 활엽수, 산림토양, 농업토양, 일반토양, 담수, 해수, 담수 및 해수 퇴적물)를 사용하였으며, 기상자료로는 지난 30년 동안의 평년값을 사용하였다. 국내에서는 PCB 배출량이 산정되지 않았으므로, 해외연구진이 산정한 전 지구 배출량 자료에

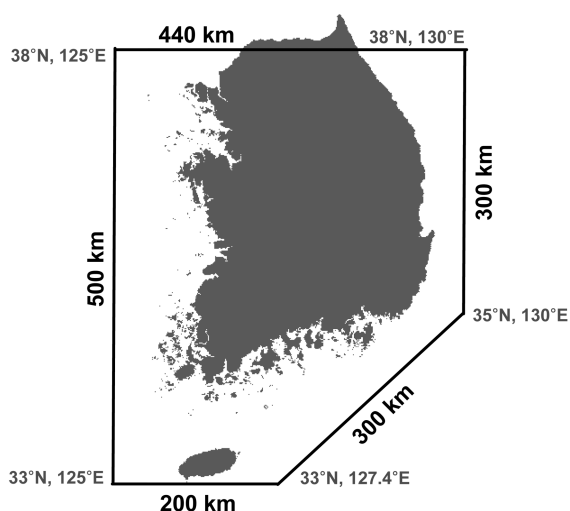


Fig. 2. Modeling area of South Korea including Jeju island and littoral sea.

서 남한 자료만 추출하여 사용하였다.²¹⁾ 배출량이 산정된 22개의 PCBs 중에서 이전 연구들^{17,20,22)}에서 주로 사용된 11개 PCBs(8, 28, 31, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180, 194)를 선택하였다. 모델 입력자료에 대한 자세한 사항은 이전 연구²⁰⁾에 제시되었다. 본 연구에서는 대기 중 배출량 추세와 침엽수/활엽수와 산림 토양의 농도추세에 대해서 살펴본 후, 산림의 역할을 평가하기 위하여 산림유무에 따른 모델결과들을 비교하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 산림에서의 PCB 농도추세

침엽수, 활엽수, 산림토양의 장기 PCB 농도추세를 Fig. 3에 나타내었으며, 비교를 위해 배출량 추세(Fig. 3d)도 나타내었다. 이 그림을 포함한 모든 환경매체에서의 PCB 농도추세는 이전 연구¹⁷⁾에 자세히 설명되어 있으므로 본 절에서는 산림과 산림토양의 농도추세에 대해서만 언급하고자 한다. 침엽수와 활엽수의 농도추세는 배출량 추세와 상당히 비슷한 경향을 보이지만, 산림토양의 추세와는 확연한 차이를 보인다. 이러한 차이는 각 환경매체의 특성과 PCBs의 물리·화학적 성질에 기인한다. 식물의 잎은 옥탄올/공기 분배계수(log K_{OA})가 7에서 11 범위이고 공기/물 분배계수(log K_{AW})가 -6 이상일 때 산림필터효과의 영향을 받는 것으로 보고되었는데,⁸⁾ 본 연구의 대상물질인 11개 PCB 화합물은 모두 이 범위의 분배계수를 갖는다. 따라서 PCB 배출량 추세는 대기농도와 산림농도에 직접적인 영향을 주는 것으로 해석할 수 있다. 그러나 PCB-8의 산림 농도와 배출량을 살펴보면, PCB-8은 11개 PCBs 중에서 가장 많이 배출되었으나, 산림에서는 다른 저염화 PCBs와 비슷한 농도수준을 보인다. 이 결과는 중간 정도의 휘발성을 갖는 PCBs가 더욱 효과적으로 산림에 흡수되는 것을 의미한다. 이전 버전인 CoZMo-POP을 이용한 연구에서도 log K_{OA} 가 9~10이고 log K_{AW} 가 -2에서 -3의 값을 갖는 경우, 대기농도가 산림에 의해 최대 5배 감소하는 것으로 보고되었다.⁹⁾ 한편, 침엽수와 활엽수에 따른 차이도 발견할 수 있다. 두 종류의 산림 모두 저염화 PCB 농도의 상하진폭이 크지만, 활엽수의 경우 침엽수에 비해 그 정도가 확연히 크다. 이는 침엽과 활엽의 생장기간의 차이로 해석된다. 침엽의 경우, 다년간 나뭇가지에 부착되어 일정기간 지속적으로 POPs를 축적할 수 있지만, 활엽은 매년 가을에 낙

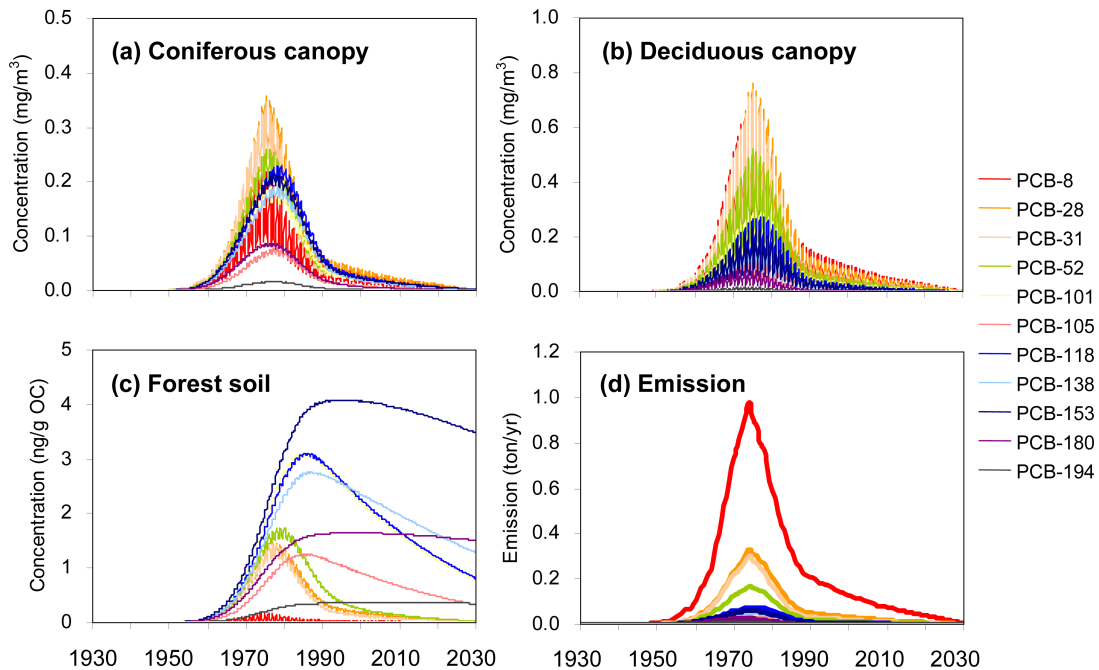


Fig. 3. Time trends of 11 PCB congener concentrations for coniferous and deciduous canopies, and forest soil, and those of emission in South Korea between 1930 and 2030.

엽이 되어 산림토양으로 떨어지기 때문이다.

산림토양은 수관과는 달리 고염화 화합물이 주로 축적되는 것으로 예측되었다. 산림토양은 지속적인 낙엽의 유입으로 유기탄소량이 많기 때문에 소수성(hydrophobic) 화합물이 축적되기 좋은 조건을 가지고 있다. 이러한 소수성 화합물은 대부분 고염화물로서 물리·화학적 분해뿐만 아니라 생물학적 분해에도 비교적 안정하므로(즉, 토양 중 반감기가 길므로) 2030년 이후에도 여전히 고농도로 존재할 가능성이 크다.

3.2. 산림이 PCB 거동에 미치는 영향

산림이 PCB 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 산림유무에 따른 모델결과들을 비교하였다. 산림이 없다고 가정할 경우, 산림토양을 일반토양(uncultivated soil)으로 간주하였다. Fig 4에서 좌측 열은 산림을 고려한 모델결과이고, 우측 열은 산림을 환경매체에 포함하지 않은 결과인데, 두 결과들이 대체로 비슷한 것을 볼 수 있다. 즉, 산림이 없을지라도 대기, 토양, 담수, 해수, 퇴적물 등의 주요 환경매체에서 PCB 농도의 장기경향은 큰 영향을 받지 않는다. 그러나 농도수준과 총량 측면에서는 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 대기로 배출된 PCBs 상당량은 산림을 비롯한 지표매체에 일차

적으로 침적되고, 강수로 인한 토양유출로 담수와 해수에 유입되고 최종적으로 퇴적물에 저장된다. 산림은 PCBs를 효과적으로 흡수하여 산림토양으로 전달하는 역할을 하지만, 산림이 없는 경우에는 이러한 산림필터 효과가 사라지므로 대기 중 PCB 농도는 증가한다. PCB-8의 경우, 산림이 있을 때는 1970년대 최고 농도가 70 pg/m^3 이지만 산림이 없을 때는 120 pg/m^3 으로서 약 1.7배 정도 증가했다. 토양(농업토양 및 일반토양) 역시, 산림이 없을 때 PCB-153 농도가 2.7배 정도 증가한 결과를 보였다. 이 결과는 대기에서 산림으로 유입된 PCBs가 직접 토양으로 유입되어 토양 중 PCB 농도가 증가한 것으로 해석된다.

담수의 PCB 농도도 산림이 없는 경우에 증가했지만 대기와 토양보다는 산림유무의 영향을 적게 받았다. 담수는 남한 육지면적의 1.4%를 차지하고, 연근해까지 고려하면 전체 모델영역의 0.7%만을 차지하므로, 담수가 전체 PCB 거동에서 차지하는 비중은 비교적 작다고 할 수 있다. 한편, 산림이 없을 때 다른 모든 환경매체에서는 PCB 농도가 증가했으나, 담수 퇴적물의 경우에는 오히려 농도가 감소하였다. 그러나 Fig. 4에 표시된 농도단위는 유기탄소 당 PCB 양(ng/g OC)이므로 결과 해석에 주의할 필요가 있다. 산림이 없는 경우, 토양유

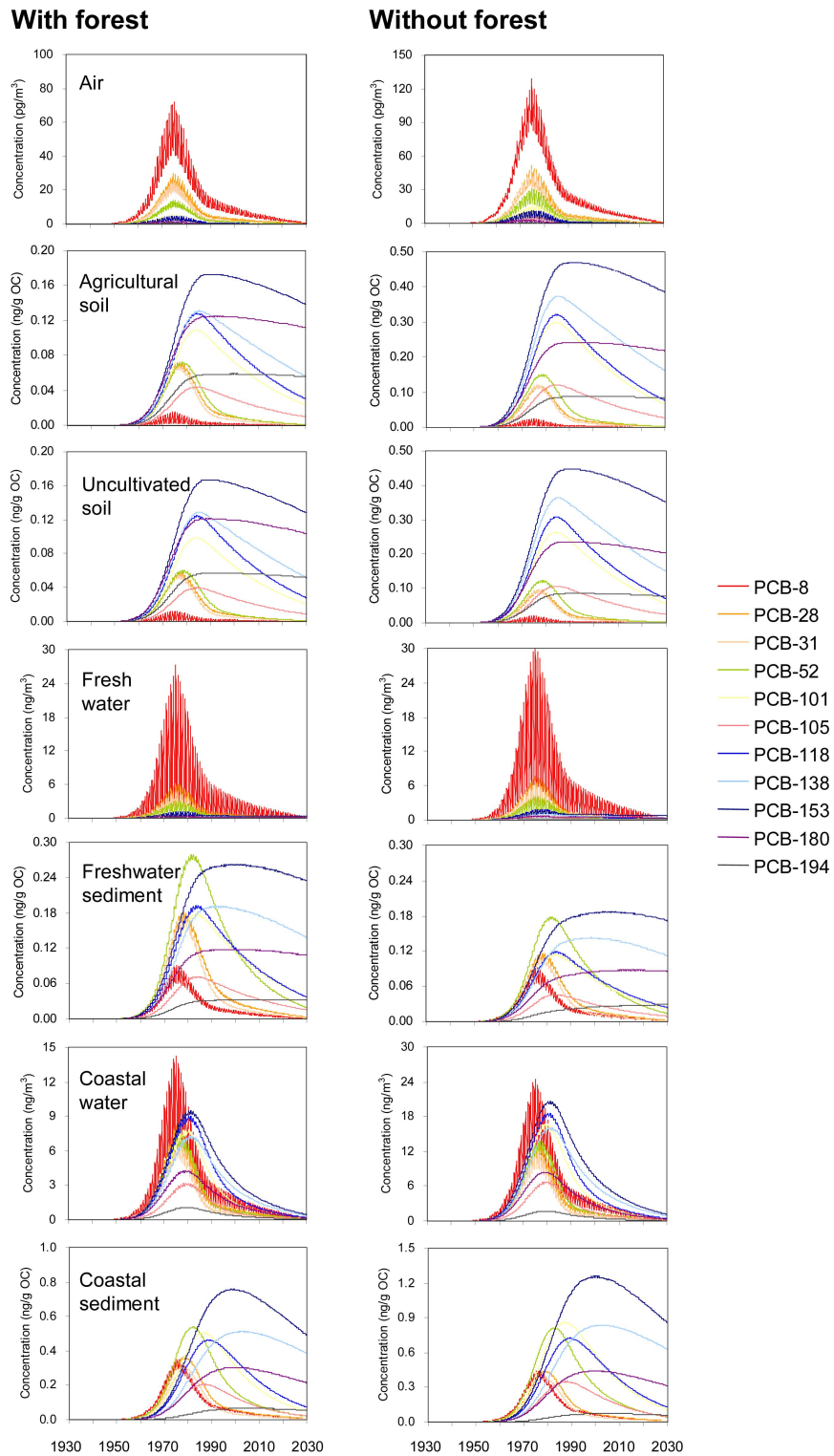


Fig. 4. Time trends of 11 PCB congener concentrations for various environmental compartments modeled with and without forest compartments.

출에 의해 담수로 유입되는 PCB 양은 증가하므로 퇴적물 내의 PCB 양도 증가한다. 그러나 이 때 토양 유입량이 PCB 유입량보다 더 많이 증가하므로, 퇴적물에 공급된 유기탄소량에 비해 PCB 양은 상대적으로 적은 결과가 나왔다.

해수의 PCB 농도 역시 산림이 없을 때 2배 정도 증가하였으며, 해수 퇴적물은 담수 퇴적물과 달리 유기탄소 당 PCB 양이 증가하였다. 이 결과는 본 연구에서 설정한 남한의 연근해 면적은 육지면적과 비슷하며, 해수는 담수와는 달리 토양 유입량에 따른 유기탄소량의 변화가 크지 않기 때문이다. 해양은 전 지구 면적의 70%를 차지하므로 해수의 PCB 흡수량이 상당히 클 것으로 예상되며, 실제로 해양이 PCBs를 축적하는 주요 환경매체라는 것이 전 지구 다매체 모델을 이용하여 밝혀졌다.²²⁾

위의 결과들을 종합할 때, 우리나라에 산림이 전혀 없고 주변국으로부터 다량의 POPs가 유입되지 않는다

고 가정하면, 다양한 환경매체 중 POPs 농도는 2-3배 정도 증가할 것으로 보인다. 다시 말하면, 우리나라에서는 1970년대부터 급격히 증가한 산림으로 인해 대기를 포함한 다양한 환경매체의 POPs 오염수준이 2-3배 정도 감소했다는 해석이 가능하다. 물론 산림이 POPs를 분해하여 궁극적으로 환경 중에서 제거하는 것은 아니지만, 다른 환경매체로 이동하는 것을 억제함으로써 전반적으로 다른 환경매체의 오염을 저감하는 완충지대의 역할을 한다.

3.3. 매체별 PCB 축적경향 비교

개별 PCB 특성에 따른 매체별 축적경향을 파악하기 위하여, 휘발성 범위가 넓은 4개의 화합물(PCB-8, 52, 153, 194)을 선택하여 전체 모델링 기간 중의 총량 비율을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5a에 대한 자세한 설명은 이전 논문¹⁷⁾을 참고할 수 있으므로 여기에서는 이전에 언급하지 않은 내용을 다루고자 한다. 휘발성이

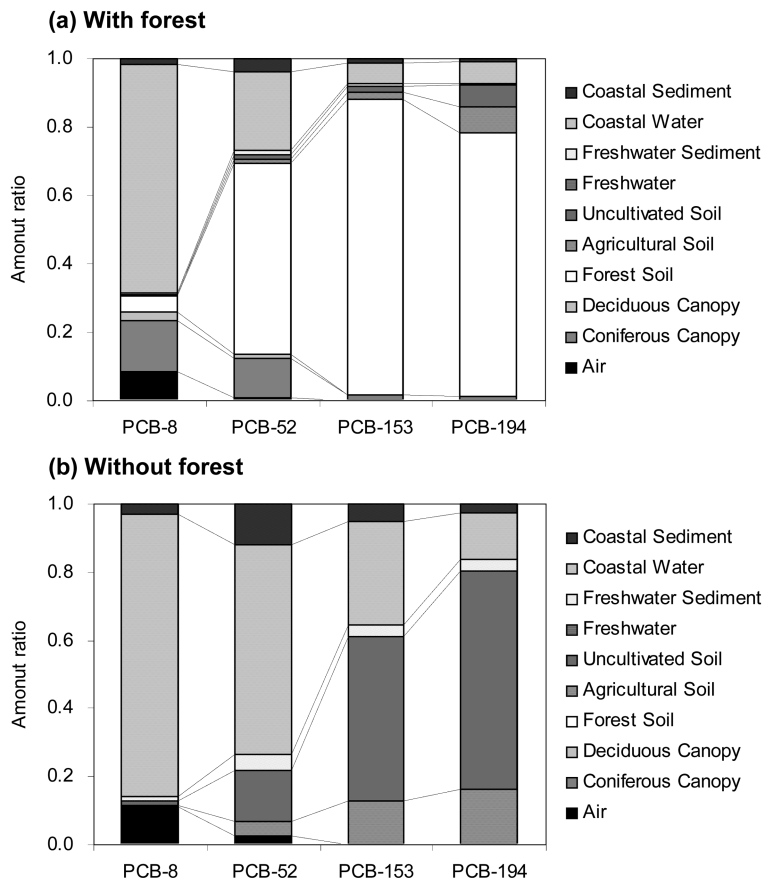


Fig. 5. Amount ratios of four PCB congeners in environmental compartments between 1930 and 2030.

낮은 고염화 PCBs는 대부분 산림토양에 축적되었으며, 저염화 PCBs의 상당부분은 대기에 잔류하거나 해수와 산림에 축적되었다(Fig. 5a). 해수 면적은 단일 매체 중(대기 제외) 가장 넓으므로 많은 양의 저염화 PCBs가 축적되었다. 해수의 역할은 모델의 공간규모에 따라서 차이가 많이 날 수 있다. 예를 들어, 육지만 고려한다면 PCB-8 대부분은 대기에 잔류하거나 산림에 저장되는 것으로 해석할 수 있다. 따라서 이러한 결과를 해석할 때는 모델 영역의 선택에 따라 매체별 축적 비율에 차이가 날 수 있다는 점에 유의해야 한다.

한편, 산림이 없는 경우에도 PCBs를 축적하는 주요 환경매체는 해수와 토양으로 나타났다(Fig. 5b). 그러나 산림이 있을 때보다 해수와 담수 퇴적물의 역할이 많이 증가했으며, 토양의 역할은 오히려 감소하였다. 이 결과는 두 가지 과정으로 설명이 가능하다. 첫째, 대기 중 PCBs를 흡수할 산림이 없으므로 보다 많은 양의 PCBs가 해수에 직접 흡수되었다. 둘째, 산림토양에 비해 일반토양과 농업토양은 강수에 의한 토양유실이 많으므로 토양에 축적된 PCBs가 담수로 더 많이 유입되어 담수 퇴적물에 축적되었다. 이 결과는 산림황폐화가 산림생태계와 이산화탄소 흡수 등의 문제만이 아니라 POPs 거동에도 중요한 영향을 줄 수 있음을 의미한다. 특히 녹지를 훼손하고 산업시설이 들어선 곳에서는 위에서 언급한 현상에 의해 주변 하천과 호수 등의 오염이 가속화될 것으로 예상된다. 실제로 산불 등으로 산림이 갑자기 황폐화되면 침식작용이 활발하므로, 산불에서 발생한 다이옥신과 다환방향족탄화수소 등이 재와 토양에 흡착되었다가 주변 하천과 연안을 오염시킬 가능성이 제기되었다.²³⁾

3.4. 산림의 변화를 고려한 모델 향상

기존 다매체 환경모델은 계절에 따른 수관의 변화(낙엽 등)를 고려하지만 연간 변화는 없는 것으로 간주한다. 다매체 환경모델은 주로 북미와 북유럽 환경을 대상으로 개발되었고 이곳의 산림은 대부분 안정화에 접어들었으므로, 재조림 사업 등으로 인한 인위적이고 급격한 산림환경의 변화는 고려하지 않는다. 그러나 우리나라는 Fig. 6에서 보듯이 1970년과 2006년 사이에 산림재적(m³)이 7.4배 증가했으며, 비교적 어린 임령으로 인해 다른 임업 선진국과 비교해도 높은 단위면적 당 탄소흡수량을 가지고 있다.¹⁵⁾

현재 CoZMo-POP 2는 산림인자의 장기 변화를 반영할 수 없으므로, 이전 연구들^{17,20)}과 본 연구에서는

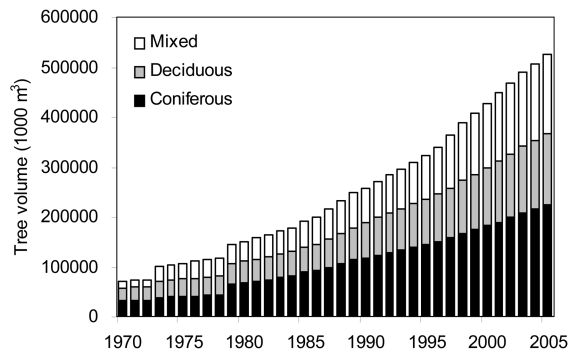


Fig. 6. Rapid increase of tree-trunk volume in South Korea between 1970 and 2006. Data from the Korea forest service (<http://www.forest.go.kr>).

2000년대 중반의 산림인자 상수(Table 3 in ref 20)를 전체 모델링 기간에 동일하게 적용하였다. 따라서 본 연구의 산림 PCB 농도는 특히 1970년대에 과대평가된 것으로 보인다. 국내 PCB 실측값은 대부분 1990년대 이후에 보고되었으므로, 최근의 실측값과 모델값의 비교에는 큰 무리가 없어 보인다. 그러나 과거 산림의 변화에 따른 PCB 거동을 추정하고, 향후 국내 산림이 POPs 거동에 미치는 영향을 예측하기 위해서는 산림 장기자료를 반영하는 모델을 개발할 필요가 있다. 국내 산림은 기후변화의 영향(예: 침엽수 감소 및 활엽수의 북방 이동)을 받을 것으로 예상되며, 임령이 증가함에 따라 향후 50년 후에는 산림재적이 정상상태(stationary state)에 도달할 것으로 보인다. 따라서 이러한 장기변화를 모두 고려하여 국내 환경에 적합한 한국형 산림-POP 모델 개발할 필요가 있다.

일반적으로 다매체 모델결과의 신뢰성을 평가하기 위해서는 실측자료와 비교하고 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통해 모델을 보정할 필요가 있다. 그러나 해외에서 산정한 국내 PCB 배출량 자체의 불확도가 매우 크며,²¹⁾ 국내에서는 실측자료에 근거한 배출량이 산정되지 않았으므로, 본 연구결과의 불확도를 산정하기는 무리가 있다. 그러므로 향후 PCBs를 비롯한 다양한 POPs의 국내 배출량이 산정된 후에 모델결과의 신뢰성을 평가하는 것이 타당할 것이다. 다만, 이전 연구에서 CoZMo-POP 2로 산정한 국내 PCB 농도가 실측농도와 10배 이내에서 일치하고 농도패턴도 비슷한 결과를 얻었으므로,¹⁷⁾ 본 연구의 주요 결과도 전반적으로 신뢰할 수 있을 것이다.

4. 결 론

우리나라에서는 1970년대 초반부터 시행된 재조립 사업을 통해 산림재적이 급속히 증가했으므로, 산림이 POPs 거동에 미치는 영향이 그 어느 나라보다 클 것으로 예상된다. 산림의 영향을 정성·정량적으로 파악하기 위하여 다매체 환경모델을 이용하여 PCBs의 장기(1930-2030) 농도추세를 산정한 결과, 산림이 존재할 경우에 대기를 포함한 주요 환경매체에서 2-3배 정도 낮은 농도가 예상되었다. 즉, 산림이 대기 중 PCBs를 효과적으로 흡수하고 산림토양에 저장함으로써 POPs 완충지대로 작용하는 것으로 판단된다. 이 결과에 의하면, 산림이 황폐화되면 POPs가 다른 환경매체로 유입될 가능성이 커지므로, 산림을 지속적으로 보호할 필요성이 있다.

국내 산림이 POPs 거동에 미치는 영향을 보다 신뢰성 있게 평가하기 위해서는, 산림의 장기변화를 고려한 모델 입력자료를 마련해야 한다. 궁극적으로는 산림의 장기변화가 POPs 거동에 미치는 영향을 추정할 수 있는 한국형 다매체 환경모델의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 두뇌한국 21 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. S. L. Simonich and R. A. Hites, *Environmental Science and Technology*, **1994**, 28, 939-943.
2. S. L. Simonich and R. A. Hites, *Environmental Science and Technology*, **1995**, 29, 2905-2914.
3. 김태욱, 여현구, 최민규, 천만영, *한국환경농학회지*, **2001**, 20, 99-107.
4. 심일용, 여현구, 최민규, 김태욱, 천만영, *대한환경공학회지*, **2003**, 24, 2227-2237.
5. 신은상, 여현구, *대한위생학회지*, **2006**, 21, 1-11.
6. 신은상, 여현구, 조기철, 천만영, *한국환경보건학회지*, **2006**, 32, 46-52.
7. 최민규, 천만영, *한국환경분석학회지*, **2008**, 11, 46-54.
8. M. S. McLachlan and M. Horstmann, *Environmental Science and Technology*, **1998**, 32, 413-420.
9. F. Wania and M. S. McLachlan, *Environmental Science and Technology*, **2001**, 35, 582-590.
10. Y. Su and F. Wania, *Environmental Science and Technology*, **2005**, 39, 7185-7193.
11. E. Matzner, *Water, Air, and Soil Pollution*, **1984**, 21, 425-434.
12. M. Horstmann and M. S. McLachlan, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 1799-1809.
13. S.-D. Choi, R. M. Staebler, H. Li, Y. Su, B. Geva, T. Harner, and F. Wania, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **2008**, 8, 4105-4113.
14. 최성득, 백송이, 장윤석, *한국환경분석학회지*, **2007**, 10, 91-97.
15. S.-D. Choi, K. Lee, and Y.-S. Chang, *Global Biogeochemical Cycles*, **2002**, 16, 1089, doi:10.1029/2002GB001914.
16. S.-D. Choi and Y.-S. Chang, *Environmental Science and Technology*, **2004**, 38, 484-488.
17. 최성득, 장윤석, *한국환경분석학회지*, **2008**, 11, 144-154.
18. D. Mackay, "Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach" 2nd ed., **2001**, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
19. F. Wania, K. Breivik, N. J. Persson, and M. S. McLachlan, *Environmental Modelling and Software*, **2006**, 21, 868-884.
20. 최성득, *한국대기환경학회지*, **2008**, 24, 118-127.
21. K. Breivik, A. Sweetman, J. M. Pacyna, and K. C. Jones, *Science of the Total Environment*, **2007**, 377, 296-307.
22. F. Wania and Y. Su, *Ambio*, **2004**, 33, 161-168.
23. 김은정, 오정은, 최성득, 장윤석, *대한환경공학회지*, **2001**, 24, 111-123.