

## 산림에 의한 반휘발성 유기화합물의 흡수

최성득 · 백송이\* · 장윤석\*

토론토대학교 물리·환경과학과, \*포항공과대학교 환경공학부

## Uptake of Semi-volatile Organic Compounds by Forests

Sung-Deuk Choi, Song-Yee Baek\*, and Yoon-Seok Chang\*

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

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

Forests have been known to act as a filter for semi-volatile organic compounds (SOCs). In this study, two methods estimating SOC's fluxes to forest canopies and three processes determining the uptake of SOC's by forests were introduced. An indirect method using bulk samplers is appropriate to estimate long-term fluxes, while a direct method using a vertical gradient of SOC's and the modified Bowen ratio (MBR) method can be used for the estimation of short-term fluxes. The uptake of compounds with intermediate  $K_{OA}$  values occurs mainly in the form of kinetically limited gaseous deposition. In addition, a case study carried out in a Canadian mixed deciduous forest was introduced. Vertical profiles and gas/particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) indicated that intermediate PAHs (such as phenanthrene, anthracene, and pyrene) were subject to net uptake by the forest canopy in early spring. Based on these results, further studies and applications to Korean forests were proposed.

**Key words** : forest filter, SOC's, POPs, PAHs

### 1. 서 론

스톡홀름협약에 의해 세계적으로 규제되고 있는 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs)의 상당수는 반휘발성 유기화합물(semi-volatile organic compounds: SOC's)의 범주에 해당한다. 이러한 SOC's는 기체상(gas-phase)과 입자상(particle-phase)에 공존하며, 건성침적(dry deposition)과 습성침적(wet deposition)의 영향을 동시에 받는다.<sup>1)</sup> 따라서 대기 중 SOC's의 종합 거동을 평가하기 위해서는 지표 환경매체의 역할을 이해하는 것이 중요하다. 특히 식생(vegetation)은 지표환경의 80%를 차지하며, 잎 표면에 지질(lipid) 성분이 있으므로 SOC's의 거동에 많은 영향을 줄 것으로 예상된다.<sup>2,3)</sup>

기체상으로 존재하는 SOC's는 기공(stomata)을 통한 능동흡수가 아니라 큐티클(cuticle)에 의한 수동흡수 과정을 거친다. 큐티클은 잎을 보호하고 수분 등의 직접적인 교환을 방지하기 위해 잎의 외곽에 존재하는 소수성 막을 의미한다(Fig. 1). 따라서 큐티클은 기체상 SOC's뿐만 아니라 입자상 SOC's의 침적에도 중요한 역할을 할 수 있다. 기체상 SOC's는 화학평형에 도달할 때까지 큐티클에 흡수되므로, 식물의 잎은 passive air sampler (PAS)와 같이 대기오염의 수준을 반영할 수 있다.<sup>4)</sup> 물론 인위적인 PAS와는 달리, 식생의 종류와 연령 등에 따라 잎에서 검출되는 SOC's의 양은 차이가 날 수 있으나,<sup>5)</sup> 일반적으로 대기오염의 지시자(indicator)로서 유용한 정보를 제공한다.

다매체 모델을 이용한 연구에 의하면, 북반구 산림이

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

E-mail: yschang@postech.ac.kr

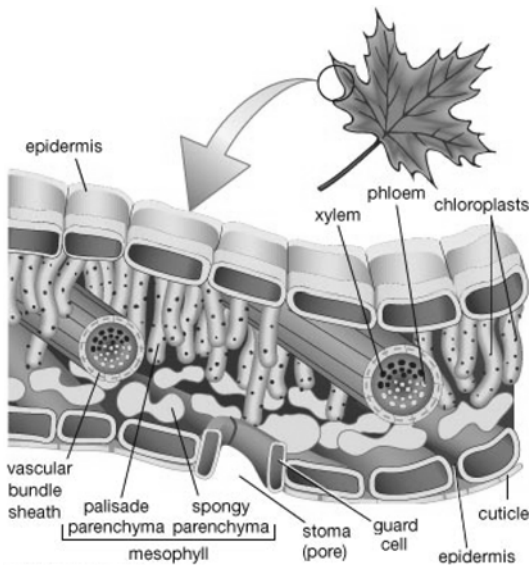


Fig. 1. Structure of a leaf. Retrieved on May 24, 2007 from Encyclopædia Britannica Online: <http://www.britannica.com/eb/art-66079>.

전 지구적 SOC<sub>s</sub>의 거동에 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.<sup>6)</sup> 이를 산림의 필터효과(forest filter effect)라고 하며, 산림 자체가 SOC<sub>s</sub>의 거대한 흡수원이 되어 저위도와 중위도에서 배출된 SOC<sub>s</sub>가 고위도로 이동하는 것을 억제하는 것으로 알려졌다. 한편, 상당수 산림은 고산지대에 위치하고 있으므로, 저온으로 인한 응축, 강우, 강설에 의한 습성침적의 영향이 예상된다. 실제로 식생과 산림토양에서 고농도 SOC<sub>s</sub>가 검출된 사례들이

보고됨으로써, 산림이 SOC<sub>s</sub>를 흡수하는 사실은 널리 알려졌다.<sup>7,8)</sup> 그러나 산림의 SOC<sub>s</sub> 흡수를 직접 측정하거나 단기 흡수량 등을 산정한 연구는 상당히 부족한 실정이다. 특히, 산림이 대표적 SOC<sub>s</sub>인 다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs)를 흡수한다는 사실은 이미 보고된 바 있으나,<sup>7,9)</sup> 높이에 따른 농도변화를 측정하여 PAH 흡수특성을 밝히고 플럭스(flux)를 산정한 예는 없었다. 그러나 최근 토론토대학교 연구진은 온타리오에 위치한 산림타워에서 높이 별로 대기시료를 채취하고, 미기상 자료를 이용하여 PAH의 흡수 플럭스를 산정하였다.<sup>10)</sup>

본 논문에서는 아직까지 선행연구가 부족한 산림에 의한 SOC<sub>s</sub> 흡수 플럭스를 측정하는 두 가지 방법과 침적과정 해석에 있어서 중요한 개념을 설명하였다. 또한 본 논문의 저자가 포함된 토론토대학교 연구진이 수행한 연구결과<sup>10)</sup>를 사례연구의 형식으로 소개하였다. 이를 바탕으로 본 연구방법의 국내 적용 가능성 및 추가 연구방향에 대해 논의하였다.

## 2. SOC<sub>s</sub> 흡수 플럭스 산정 이론

이전 연구에서는 산림 수관(forest canopy)에 의한 SOC<sub>s</sub> 흡수 플럭스를 산정하기 위하여 대용량 시료채취기(bulk sampler)를 이용하였다(Fig. 2a).<sup>9)</sup> 나무 아래와 나무가 없는 빈 공간(clearing)에 각각 다수의 대용량 시료채취기를 6개월 이상 설치하여 두 지점에서 측정된 SOC<sub>s</sub>의 농도 차이(concentration gradient)를 계산

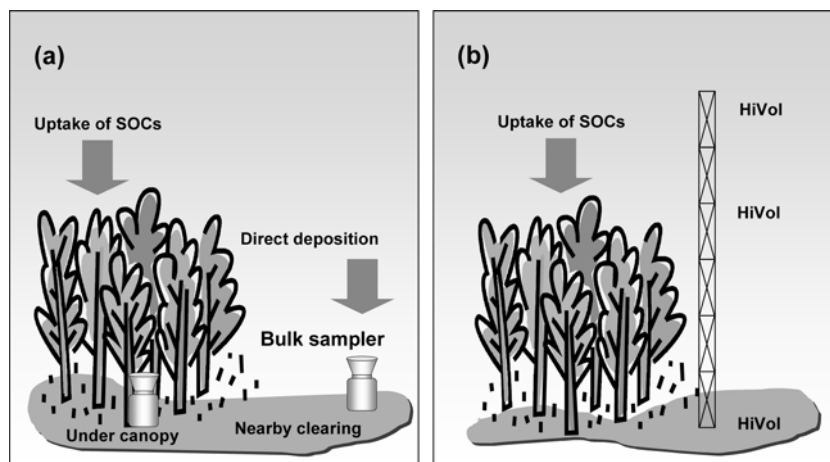


Fig. 2. Comparison of two method estimating uptake fluxes of SOC<sub>s</sub> by the forest canopy: (a) Indirect method using a difference in SOC amounts between bulk samples under the canopy and nearby clearing, (b) Direct method using a vertical gradient of SOC concentrations in high volume samples at different heights.

하였다. 이 차이를 산림에 의해 흡수된 양으로 간주하고, 단위면적 및 시간 당 흡수량으로 환산하여 플럭스를 계산하였다. 이 방법은 시료채취에 오랜 시간이 걸리지만, 설치 후 특별한 관리가 필요 없으므로 간단하게 장기 흡수량을 산정할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방법으로는 단기간 흡수량 변화를 모니터링 할 수 없으며, 두 지점의 미기상(micro-meteorology) 차이가 시료 채취량에 영향을 줄 수 있다.

흡수 플럭스를 산정하는 두 번째 방법으로 높이에 따른 농도구배(concentration gradient)를 사용할 수 있다 (Fig. 2b). 이 방법은 Modified Bowen Ratio (MBR) method 혹은 K-theory로 불리며 아래 식으로 플럭스 ( $\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )를 계산할 수 있다.

$$Flux = K_C \frac{dC}{dZ} \quad (1)$$

$K_C$  : eddy diffusivity ( $\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ ) for chemicals

$C$  : concentration ( $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$Z$  : height (m)

식 (1)에서 농도구배( $dC/dZ$ )는 높이별 농도를 측정함으로써 계산할 수 있으나, 화학물질의 확산계수( $K_C$ )는 직접적으로 측정할 수 없다. 대신, 동일한 지점에서 미기상 자료를 측정하고, 에디 공분산(eddy correlation)법을 이용하여 열(heat)과 모멘텀(momentum) 플럭스를 구할 수 있다. 이러한 플럭스를 결정하는 수직적 난류 메커니즘이 화학물질에도 동일하게 적용된다고 가정하면, 열과 모멘텀의 확산계수( $K_H, K_M$ )를 계산하여 이를 화학물질의 확산계수로 이용할 수 있다. 이 방법은 단기 플럭스를 계산할 수 있는 장점이 있으나, 정밀한 미기상 관측 장비들이 구비되어야 하고 기상자료를 이용하여 확산계수를 산정해야 하는 번거로움이 있다. MBR법에 대한 자세한 설명은 다음 문단에 제시된 참고문헌에 수록되어 있다.

MBR법은 산림도양에서 배출되는 수은이나 농약류의 배출량을 산정하는데 사용되었으며, 산림이 배출하는  $\alpha$ -pinene,  $\beta$ -pinene 등과 같은 휘발성 유기화합물 (VOCs) 연구에도 적용되었다.<sup>11-15</sup> 이러한 물질들은 단기간에 시료채취가 가능하거나 자동 분석법이 개발된 경우가 많으므로, 비교적 연속적인 플럭스를 계산할 수 있다. Fig. 3은 유기염소계 농약인 DDT의 농도구배 및 플럭스 계산을 위하여 시료채취 높이를 자연로그 단위로 변환한 예이다.<sup>15</sup> 전체 네 지점(5, 20, 72, 200 cm)에서 측정된 DDT 평균농도 그래프를 작성한 것으로서, 토양으로부터 대기 중으로 배출되는 DDT를 측정된 결과이다. Fig. 3(b)에서와 같이 Y축을 로그 단위로 변환하여 선형 회귀식을 구하면

$$\ln(Z) = aC + b \quad (2)$$

이며, 좌변과 우변을 각각  $Z$ 로 미분하면 아래 수식이 유도된다.

$$\frac{dC}{dZ} = \frac{1}{aZ} \quad (3)$$

즉, 식 (3)에 확산계수  $K_C$ 를 곱하면 플럭스 계산식 (1)이 되므로, 미기상 자료를 이용하여 확산계수를 구하면 플럭스 계산이 가능하다.

그러나 지금까지 MBR법을 이용하여 산림의 POPs 흡수량을 계산한 사례는 보고되지 않았다. 일반적으로 대기 중 POPs를 채취하기 위해서는 high volume air sampler (HiVol)를 하루 정도 작동시켜야 하며, 농도구배를 측정하기 위해 여러 대의 HiVol을 높이별로 설치하는 것 자체가 어렵기 때문이다. 따라서 기상장비가 갖추어졌고, 높이별로 HiVol을 설치할 수 있을 정도로 여유 공간이 있는 산림타워에서 이러한 연구가 가능하다.

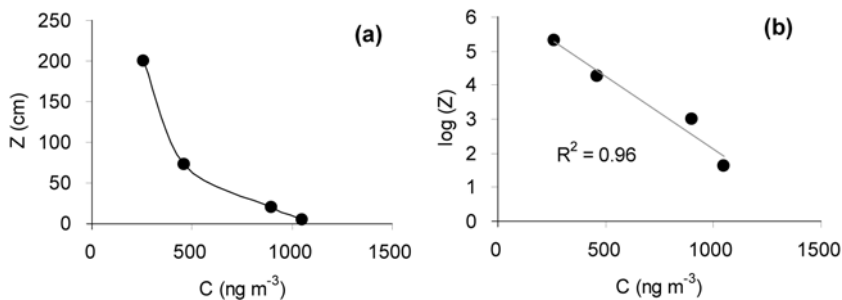


Fig. 3. Example of a concentration gradient (a) and log linearized height and concentration relationship (b) for the DDT flux calculation. Data from ref 15.

### 3. SOCs 특성에 따른 흡수과정

산림의 SOCs 흡수는 크게 세 과정(equilibrium partitioning, kinetically limited gaseous deposition, particle-bound deposition)으로 나뉜다(Fig. 4).<sup>16)</sup> 옥탄올-공기 분배계수(octanol-air partition coefficient:  $K_{OA}$ )가 작은 (휘발성이 큰) 물질은 빠른 시간 내에 대기와 산림(나뭇잎) 사이에서 평형에 도달한다(Class I). 그러므로 활엽수 잎이 새로 돌아나는 봄철에 즉각적인 평형상태에 도달하여 여름과 가을에는 더 이상 흡수(net uptake)가 일어나지 않는다. 이에 비해 상당수 기체상 SOCs는 평형상태에 도달하지 않으므로 지속적으로 산림에 흡수된다. 즉, 산림에 의해 제거되는 대부분의 SOCs는 Class II에 속하는 중간 휘발성을 갖는다. 마지막으로  $K_{OA}$ 값이 큰 물질들은 대부분 입자상으로 존재하여 침적된다(Class III). 이러한 세 가지 과정을 고려할 때, 식물의 큐티클에 흡수되는 물질은 주로 Class II에 속하는 물질이다.

위의 세 가지 과정은 간단한 모델식으로부터 도출되었으나 실측결과와 일치하는 현상이다.<sup>17)</sup> 또한 모델 계산에 의하면  $7 < \log K_{OA} < 11$ 와  $\log K_{AW} > -6$ 의 조건을 갖는 물질들이 산림필터 효과에 의해 주로 제거되는 것으로 나타났으며,<sup>18)</sup> 다매체 환경모델인 CoZMo-POP에 새로운 환경매체로 산림을 추가했을 때,  $\log K_{OA}$ 가 9~10이고  $\log K_{AW}$ 가 -2에서 -3의 값을 갖는 경우에 대기 중 농도가 5배 감소하였다.<sup>19)</sup>

이와 같은 SOCs 침적 이론은 최근에 대기 중 SOCs 모니터링을 위해 개발된 passive air sampler<sup>4)</sup>에도 적

용될 수 있다. Class I에 속하는 물질들은 PAS 설치 기간 중에 이미 평형상태에 도달하므로 평균적인 공기 채취율( $m^3 \cdot day^{-1}$ )과 시료채취일(day)을 곱하여 얻어진 공기채취량( $m^3$ )을 적용할 경우, 실제 대기 농도보다 과소평가될 가능성이 있다. 한편, 주로 기체상 SOCs를 채취하는 PAS 특성 상, Class III에 속하는 물질은 대부분 극미량으로 채취된다. 따라서 PAS에 선형 흡수되어 정상적으로 대기 중 농도 산정이 가능한 물질은 대부분 Class II에 속한 물질이다. 이러한 사실은 특히 SPMD (semi-permeable membrane device)를 이용하여 PAHs를 측정할 때 중요하게 고려되어야 한다. PAHs의  $K_{OA}$ 값의 범위는 매우 크므로 Fig. 4의 모든 범위에 해당한다. 따라서 SPMD를 이용하여 대기 모니터링을 한 경우, class II에 속하는 일부 PAHs에 대한 대기 중 환산농도만이 신뢰성이 있다.

### 4. 사례연구

본 사례연구의 목적은 캐나다 온타리오의 Borden forest에 설치된 산림타워에서 대기시료를 채취하여, 높이에 따른 PAH 농도, 기체/입자 분배 등을 고려하여 산림의 PAH 흡수특성을 파악하는 것이다. 또한 PAH 농도구배와 시료채취 당시의 미기상 자료를 이용하여 확산계수를 구하고 흡수 플럭스를 계산하였다. 본 장에서는 사례연구의 주요 결과만을 제시하고자 하며, 보다 자세한 사항(시료채취 당일의 기상자료, PAHs의 기체상/입자상 농도, 농도구배 그래프, 기체/입자 분배모델 결과, 흡수 플럭스 시나리오 등)은 참고문헌<sup>10)</sup>을 통해 제공될 예정이다.

#### 4.1. 시료채취 및 실험

시료채취는 활엽수의 새 잎이 돌아나는 시기인 2003년 4월말부터 6월초까지 총 12회에 걸쳐 토론토에서 북서쪽으로 약 75 km 떨어져 있는 Borden forest (44° 19' N, 79° 56' W)에서 실시되었다. 이 산림은 활엽수 혼합림 지역으로서 수관의 평균 높이는 22 m이다. 산림 가운데에 45 m 기상관측 타워가 설치되어 있으며, 높이별로 미기상 관측 장비들이 설치되어 있다. 타워의 세 지점(A: 44.4 m, B: 29.1 m, C: 16.7 m)과 지상의 한 지점(D: 1.5 m)에 HiVol을 설치하여 24시간 동안 네 지점에서 동시에 측정하였다.

PUF와 GFF 시료는 속실텐을 이용하여 16시간 동안 각각 petroleum ether와 dichloromethane으로 추출하였

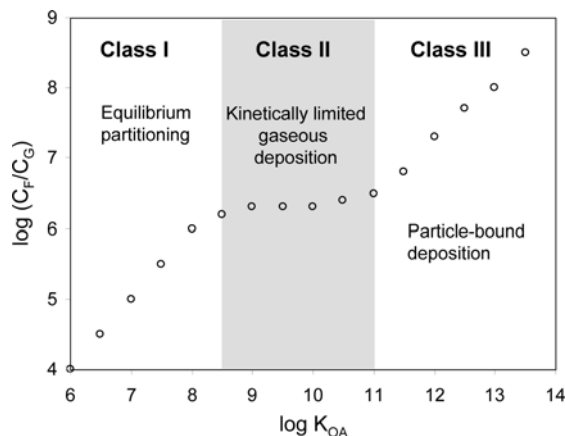


Fig. 4. Primary processes of the uptake of SOCs by forests.  $C_F$ : concentration in forests,  $C_G$ : gaseous concentration in air. Modified from ref 16.

다. 이후 silicic acid/알루미나 컬럼을 이용한 정제과정을 거쳤으며, GC/MS (Agilent 6890 GC/5973 MS)로 PAHs를 분석하였다. 또한 시료 채취일별 현장 공시료 (field blank)를 분석하였으며, 중수소로 치환된 PAH 표준물질을 이용하여 회수율을 측정하였다. 휘발성이 상대적으로 높은 PAHs의 breakthrough 효과를 확인하기 위하여 후단 PUF를 분석한 결과, naphthalene, acenaphthylene, acenaphthene 상당량이 검출되었다. 따라서 본 연구에서는 이들 세 PAHs를 제외한 13개의 PAHs를 이용하여 결과를 해석하였다. 자세한 기기분석 방법은 참고문헌<sup>20)</sup>에 수록되어 있다.

4.2. 결과 및 고찰

Fig. 5는 기체상 PAH 농도변화와 높이(A, B, C, D)에 따른 평균 조성을 나타낸다. 일반적으로 PAHs는 화석연료의 연소를 통해 배출되므로, 대기 중 농도는 기온에 반비례한다. 그러나 본 연구에서 시간에 따른 PAH 농도 변화는 기온과 높은 양의 상관관계를 가지고 있다. 이 결과는 대기의 장거리 이동과 관련이 있다. 역계적 분석에 의하면, PAH 농도가 높을 때는 주로 미국 동부와 토론토의 오염지역을 거친 따뜻한 공기가 유입되었으며, 농도가 낮을 때는 북극에서 청정한 찬 공기가 유입되었다. 가장 높은 PAH 농도가 검출된 5월 9일과 18일의 역계적 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

한편, Fig. 5(a)에 나타난 것처럼 기체상 PAH 농도는 시료채취 높이에 따라서 많은 차이가 있으나, 입자상 농도는 거의 차이가 없다(data not shown). 수관 근처인 B, C 지점의 기체상 농도가 A 지점에서보다 낮으므로, 산림이 PAHs를 흡수하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 가장 낮은 D 지점의 농도는 A 지점의 농도와 비슷한 수준이며, 이는 산림 토양에서 PAHs가 휘발된 결과로

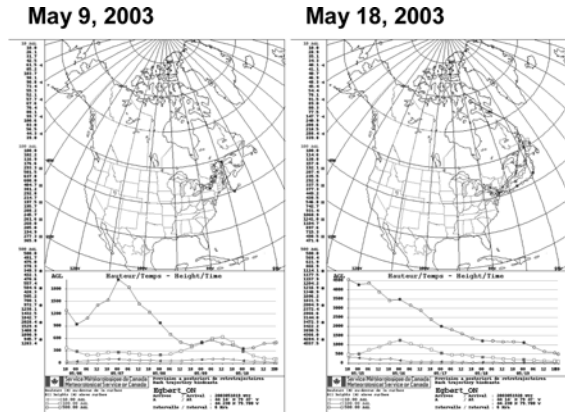


Fig. 6. Five-day back trajectories on May 9 and 19, 2003 when the highest levels of PAHs were measured. Data from ref 10.

보인다. 또한 높이별 PAH 평균 조성의 경우에도 기체상에서 많은 차이가 있었다. 각 PAH별 분석결과, 높이에 따른 농도구배(A>B>C)는 중간 휘발성을 지닌 phenanthrene, anthracene, pyrene에 의해 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 이들보다 휘발성이 강한 PAHs는 이미 대기와 수관간의 화학평형을 이루고 있으며, 휘발성이 약한 PAHs는 대부분 입자상에 존재하기 때문에 별다른 농도구배를 보이지 않는 것으로 판단된다. 이들 PAHs의 log K<sub>OA</sub>값은 약 8-9로서 나뭇잎이 충분히 자라지 않은 이른 봄에 kinetically limited gaseous deposition을 겪는 것으로 보인다. 이 결과를 이용하여 각 물질별로 농도구배를 구하고 확산계수를 곱하면 PAH 흡수 플럭스를 산정할 수 있다. 본 사례연구에서 계산된 평균 확산계수는 2.24 m<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>이며 phenanthrene, anthracene, pyrene의 평균 농도구배는 각각 37.2, 3.2, 8.4 pg·m<sup>-3</sup>·m<sup>-1</sup>이므로 플럭스는 83, 7, 19 pg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 계산되었다.

PAHs의 기체 및 입자상 거동을 평가하기 위해서는

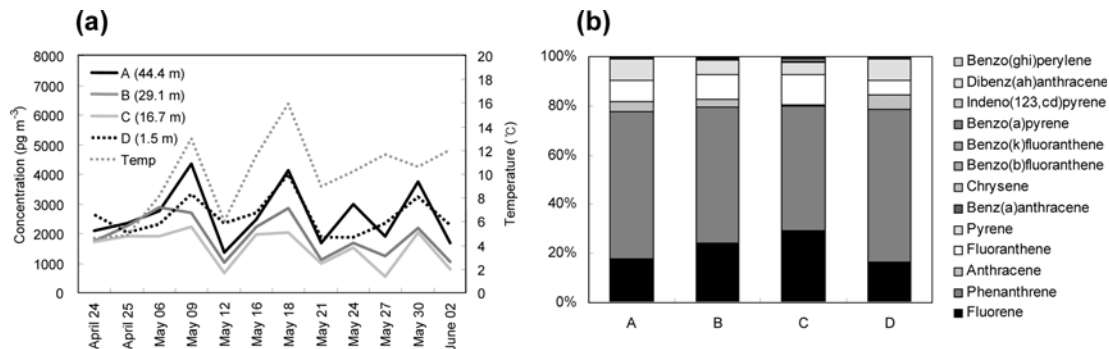


Fig. 5. Temporal variations of the total gaseous PAH concentrations (a) and the average compositions in the gaseous phase (b) at different heights. Data from ref 10.

기체/입자 분배 모델을 사용할 필요가 있다. 본 연구에서는 실측자료를 이용하여 입자상 비율( $\phi$ )에 근거한 두 가지 비선형모델 회귀식을 작성하였다.

One-parameter (Junge-Pankow) model:

$$\phi = A / (P_L + A) \quad (4)$$

$A$  : product of terms of  $c$  and  $c$

$\phi$  : surface area of particles in a unit of volume of air ( $\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$ )

$c$  : constant (Pa·cm)

$P_L$  : vapor pressure of the sub-cooled liquid (Pa)

Two-parameter model:

$$\phi = 1 / (1 + 10^{-m \log(P_L/P_a) - b'}) \quad (5)$$

$m$  : slope deviating from -1

$b'$  ( $= b + \log TSP$ ) : sum of a constant  $b$  and  $\log TSP$  (concentration of total suspended particle matters)

위의 두 가지 모델에 따른 회귀 결과와 실측값 그래프 예를 Fig. 7에 나타내었다. 전반적으로 두 모델이 거의 비슷한 결과를 산출하였으며, B 지점의 회귀식 S라인이 가장 오른쪽에 위치하고 있다. 즉, 수관에 인접한 지점에서 PAHs가 입자상에 더 많이 존재하는 것을 나타내며, 이는 수관에 의해 기체상 PAHs가 흡수된 결과로 해석할 수 있다.

### 4.3. 국내 적용

본 사례연구에서는 산림이 PAHs를 흡수하는 것을 농도구배를 통해 확인하고 플럭스를 계산했으며, 이로 인

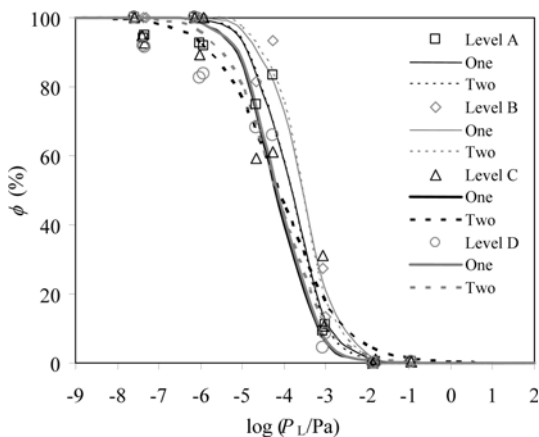


Fig. 7. Plot of gas/particle partitioning models and measured data on May 21, 2003. Data from ref 10.

해 기체/입자 거동에도 변화가 생긴 것을 확인하였다.<sup>10)</sup> 이러한 연구는 국내에도 직접 응용이 가능하며, 한국 산림이 POPs의 종합적인 거동에 미치는 영향을 파악하는데 도움이 될 수 있다. 한국 산림은 국토면적의 65%를 차지하며, 1970년대 이후로 산림녹화사업으로 인해 나무에 저장된 탄소량이 5배 이상 증가하였다.<sup>21,22)</sup> 산림 탄소량이 증가함에 따라, 1990년대 중반 이후로 강원도를 중심으로 대형 산불이 증가하여 산림 단위면적당 탄소 배출량 역시 증가하였다.<sup>23)</sup> 즉, 한국 산림은 SOC의 중요한 흡수원이자 산불로 인한 PAHs와 다이옥신 등의 배출원이기도 하다.<sup>24)</sup> 따라서 산림타위가 설치되어 있는 곳에서 이산화탄소, 산소, 증발산 등의 플럭스뿐만 아니라 SOC 플럭스에 관한 연구를 수행함으로써 산림에서의 SOC 거동에 관한 다양한 연구가 가능할 것이다. 한편, 본 사례연구에서는 HiVol을 사용하였으므로 다양한 산림에서 연구를 수행하기 어려운 측면이 있다. 따라서 passive air sampler를 이용할 경우, 비교적 수월하게 다양한 산림환경에서 장기간 SOC 모니터링을 할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

SOC의 침적 이론과 실측자료에 의하면, SOC는 주로 kinetically limited gaseous deposition으로 산림에 흡수되며 이러한 물질들은  $\log K_{OA}=9\sim 10$  전후의 값을 갖는다. 대용량 시료채취기를 이용한 간접적인 플럭스 측정 이외에도, 산림타위에서 농도구배를 측정하여 보다 직접적으로 단기 플럭스를 산정할 수 있다. 본 연구에서는 기체상 PAHs가 흡수되어, 산림 수관 근처에서 기체상 농도가 감소하고 기체/입자 분배에도 변화가 생긴 연구결과를 소개하였다.

본 연구에 소개된 방법은 국내에도 적용될 수 있으며, 국내 산림면적의 비율과 산림 탄소량 증가 등을 고려할 때, SOC를 비롯한 환경오염물질의 거동과 산림의 역할에 대한 다양한 연구가 필요하다. 더 나아가 산림의 종류(침엽수림, 활엽수림, 혼효림)와 연령 등에 따른 SOC 흡수에 관한 연구를 수행할 경우, 지역 및 전 지구 규모의 다매체 모델 입력 자료로도 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 교육인적자원부 두뇌한국 21 사업의 지원

으로 수행되었습니다. 시료채취 및 분석은 캐나다 기후 및 대기과학재단의 지원으로 수행되었습니다. 자료정리 및 결과해석에 도움을 준 토론토대학교 Wania 그룹 연구원들께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Y. D. Lei and F. Wania, *Atmospheric Environment*, **2004**, 38, 3557-3571.
2. S. L. Simonich and R. A. Hites, *Environmental Science and Technology*, **1994**, 28, 939-943.
3. S. L. Simonich, *Environmental Science and Technology*, **1995**, 29, 2905-2914.
4. 최성득, 장운석, *한국대기환경학회지*, **2005**, 21, 481-494.
5. F. Wania, L. Shen, Y. D. Lei, C. Teixeira, D. C. G. Muir, *Environmental Science and Technology*, **2003**, 37, 1352-1359.
6. Y. Su and F. Wania, *Environmental Science and Technology*, **2005**, 39, 7185-7193.
7. E. Matzner, *Water, Air, and Soil Pollution*, **1984**, 21, 425-434.
8. S. L. Simonich and R. A. Hites, *Nature*, **1994**, 370, 49-51.
9. M. Horstmann and M. S. McLachlan, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 1799-1809.
10. S.-D. Choi, H. X. Li, Y. Su, B. Gevao, F. Wania, T. Harner, and R. M. Staebler, *Environmental Science and Technology*, **2007**, Submitted.
11. M. S. Majewski, D. E. Glotfelty, K. T. U. Paw, and J. N. Seiber, *Environmental Science and Technology*, **1990**, 24, 1490-1497.
12. T. P. Meyers, M. E. Hall, S. E. Lindberg, and K.-H. Kim, *Atmospheric Environment*, **1996**, 30, 3321-3329.
13. J. H. Schween, R. Dlugi, C. N. Hewitt, and P. Foster, *Atmospheric Environment*, **1997**, 31, 199-215.
14. S. E. Lindberg, P. J. Hanson, T. P. Meyers, and K.-H. Kim, *Atmospheric Environment*, **1998**, 32, 895-908.
15. P. B. Kurt-Karakus, T. F. Bidleman, R. M. Staebler, and K. C. Jones, *Environmental Science and Technology*, **2006**, 40, 4578-4585.
16. M. S. McLachlan, *Environmental Science and Technology*, **1999**, 33, 1799-1804.
17. F. Böhme, K. Welsch-Pausch, and M. S. McLachlan, *Environmental Science and Technology*, **1999**, 33, 1805-1813.
18. M. S. McLachlan and M. Horstmann, *Environmental Science and Technology*, **1998**, 32, 413-420.
19. F. Wania and M. S. McLachlan, *Environmental Science and Technology*, **2001**, 35, 582-590.
20. Y. Su, Y. D. Lei, F. Wania, M. Shoeib, and T. Harner, *Environmental Science and Technology*, **2006**, 40, 3558-3564.
21. S.-D. Choi, K. Lee, and Y.-S. Chang, *Global Biogeochemical Cycles*, **2002**, 16, 1089, doi:10.1029/2002GB001914.
22. S.-D. Choi and Y.-S. Chang, *Environmental Science and Technology*, **2004**, 38, 484-488.
23. S.-D. Choi, Y.-S. Chang, and B.-K. Park, *Science of the Total Environment*, **2006**, 372, 225-235.
24. 김은정, 오정은, 최성득, 장운석, *대한환경공학학회지*, **2002**, 24, 111-123.