

## 나무껍질에 대한 대기 중 PCBs 침착 특성

천만영<sup>†</sup>

환경대학교 환경공학과

## Depositional Characteristics of Atmospheric PCBs on Tree Barks

Man Young Chun<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong 456-749, Korea

Received March 19, 2013/Revised May 16, 2013/Accepted June 14, 2013

This study was carried out to determine the depositional characteristics of several tree barks [Ginko (*Ginkgo biloba*), Pine (*Pinus densiflora*), Platanus (*Platanus*) and Metasequoia (*Metasequoia glyptostroboides*)], which are used as passive air samplers (PAS) of atmospheric polychlorinated biphenyls (PCBs). Tree barks were sampled from the same site and PCBs were analyzed by GC/MSD, and the lipid contents were measured using gravimetric method. Ginko contained the highest lipid contents (7.82 mg/g dry), whereas Pine (4.85 mg/g dry), Platanus (3.61 mg/g dry), and Metasequoia (0.97 mg/g dry) contained less. The total PCB concentration was the highest in Ginko (50.69 pg/g dry), followed by Pine (44.58 pg/g dry), Platanus (33.88 pg/g dry), and Metasequoia (15.78 pg/g dry). Highly significant correlations were found between the lipid contents and PCBs concentrations in tree barks ( $R^2 = 0.9417$ ,  $p = 0.0296$ ). Dominant PCB compounds in tree barks were the lower chlorinated biphenyls, particularly, PCB 28 and 52 was the main congener and accounted for 83.8-87.5% of the total PCBs.

**Key words:** Atmospheric PCBs, Passive air sampler, Tree bark, Lipid contents

### 1. 서 론

Polychlorinated biphenyls (PCBs)와 다이옥신/퓨란 (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins/furans, PCDD/Fs) 같은 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)는 반휘발성 유기화합물(semivolatile organic compounds, SOC)이다. 그러므로 대기를 통하여 장거리 이동되며 강우 때나 기온이 내려가면 대기에서 식물(잎과 껍질), 토양, 수계에 건조 및 습식 침착되며, 반대로 기온이 올라가면 이들 환경매체로부터 대기 중으로 휘발되므로 대기 중 POPs 농도를 아는 것은 POPs가 환경 즉 대기, 수계, 토양사이의 순환을 이해하는데 매우 중요하다.<sup>1-3)</sup>

대기 중 POPs 농도를 측정하기 위해서는 일반적으로 active air sampler인 polyurethane foam (PUF) 시료채

취기로 시료를 채취하는데, PUF 시료채취기는 전원이 필요한 고가 장비이므로 여러 장소에서 동시에 시료를 채취하거나 전원을 이용할 수 없는 지역에서는 사용이 어렵다. 이런 경우 간편하게 사용할 수 있는 것이 passive air sampler (PAS)이다.<sup>4-14)</sup>

지금까지 대기 중 POPs의 PAS로는 자연에서 쉽게 채취할 수 있는 나뭇잎, 나무껍질, 이끼와 토양이 많이 이용되어 왔다.<sup>6-14)</sup> 그러나 상술한 PAS에 침착된 POPs 농도는 자외선, OH radical에 의한 분해, 풍속, PAS의 대기 중 노출시간 등에 영향을 받고 노출 시간 산정도 어려워 PAS에 침착된 POPs 농도로 대기 중 POPs 농도를 추정하는 데에는 어려움이 많았다.<sup>15-18)</sup> 이러한 이유로 최근에는 보호용기(shelter) 안에 XAD-2 resin, PUF 및 semipermeable membrane devices (SPMDs)를 넣어서 바람과 광분해로 생기는 영향을 줄인 PAS를

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

개발하여 대기 중 POPs 농도를 추정하는데 이용하고 있다.<sup>4,5)</sup> 그러나 이러한 PAS 역시 제작단가가 비교적 높고 시료채취 전에 흡착제를 세척하고 밀봉하여 보관하여야 하며 시료채취를 위하여 시료채취기의 설치와 수거를 해야 하는 등 번거로운 점이 많다.<sup>4,5)</sup> 그러나 자연에서 채취하는 PAS는 보호용기의 제작이나 흡착제의 세척 같은 예비단계가 필요 없고, 언제 어디서나 쉽게 시료의 채취가 가능하므로 매우 편리하고 경제적이다. 그러므로 대기 중 POPs 농도를 계산하는 경우가 아니고 단순히 각 지역별 POPs 농도를 비교할 경우 상기의 매체들이 아직도 많이 이용되고 있다.<sup>6-14)</sup>

자연에서 채취할 수 있는 PAS 중 나뭇잎, 이끼와 토양에 침착된 대기 중 POPs의 특성에 대해서는 연구가 상당히 진행되었지만 나무껍질에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이다.<sup>6-14)</sup> 현재도 대부분의 연구자가 수종을 구분하지 않고 나무껍질을 채취하여 나무껍질에 침착된 지역별 POPs 농도를 상호비교 하는데 이용하고 있다.<sup>12-14)</sup> 그런데 나무껍질에 침착된 POPs 농도가 실제 대기 중 POPs 농도를 잘 반영하는지에 대해서는 연구가 이루어지지 않아 지역별로 서로 다른 종류의 나무껍질을 채취하여 POPs 농도를 비교한 결과에 대한 해석상 어려움이 있다.

본 연구는 대기 중 POPs의 PAS로 많이 이용되고 있는 나무껍질에 침착된 PCBs의 특성을 파악하여 나무껍질을 PAS로 사용할 때 나무껍질에 침착된 PCBs 농도가 대기 중 PCBs 농도를 잘 반영하는지에 대한 것과 수종별로 나무껍질에 PCBs가 침착될 때 차이가 있는지를 규명하기 위하여 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시약

정제용 내부표준물질(<sup>13</sup>C<sub>12</sub> PCBs mixture, IUPAC No. 28, 52, 101, 138, 153, 180, catalog No. EC-

4058)은 Cambridge Isotope Laboratories, Inc., (Andover, MA, U.S.A.), 첨가용 내부표준물질(recovery surrogate standard; 4,4'-dibromooctafluorobiphenyl)은 Supelco (Bellefonte, PA, U.S.A.)에서 구매하여 사용하였고 용매인 dichloromethane (DCM) 및 *n*-hexane은 HPLC grade (J.T.Baker, Philipsburg, NJ, USA)를 사용하였으며 *n*-hexane은 증류하여 사용하였다.

Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (anhydrous granular, Shinyo Pure Chemical, Osaka, Japan), silica (SiO<sub>2</sub>, 70-230 mesh ASTM, Merck, Darmstadt, Germany)는 130°C의 오븐에 24시간 이상 넣어 활성화시킨 후 사용하였다. GPC (gel permeation chromatography) 칼럼에 사용된 Bio-bead는 Bio Rad사의 S-X3, 40-80 μm (Hercules, CA, USA)를 사용하였으며, 분석에 사용된 PCBs 검량선 작성용 표준용액(calibration standard)는 Cambridge Isotope Laboratories, Inc.의 PCBs mixture (IUPAC No. 28, 52, 101, 138, 153, 180, catalog No. EC-5179)를 사용하였다. 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)은 유해금속측정용(Matsuneon Chemicals, Osaka, Japan)을 사용하였다. Table 1은 PCBs의 물리화학적 특성을 나타낸 것이다.

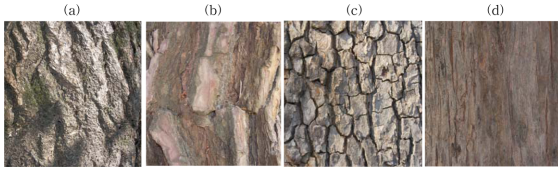
### 2.2. 시료채취

시료로 사용된 나무껍질은 은행나무(*Ginkgo biloba*), 소나무(*Pinus densiflora*), 플라타너스(*Platanus*), 메타세콰이어(*Metasequoia glyptostroboides*) 4종류이며 반경 50 m 이내의 통풍이 잘되는 곳에서 자라는 나무에서 채취하였다. 나무껍질은 외피에서 약 5 mm를 끝(chisel)로 벗겨내어 시료로 사용하였으며 토양의 영향을 배제하기 위하여 지상 1~1.5 m 높이의 모든 방향에서 골고루 시료를 채취하였고, 강우에 의한 입자상 물질의 세척효과를 줄이기 위하여 3주간 동안 강우가 없었던 10월 말경에 채취하였다.

시료는 채취 후 유리병에 넣은 후 알루미늄 호일을 덮고 뚜껑으로 밀봉한 다음 아이스박스에 담아 실험실로

**Table 1.** Physico-chemical properties of Selected PCB Congeners

Congeners (IUPAC No.)	Compound	Average molecular weight <sup>(22)</sup>	Vapor pressure (mmHg at 25°C) <sup>(22)</sup>	LogK <sub>oa</sub> (at 25°C) <sup>(19,22)</sup>
28	2,4,4'-Trichlorobiphenyl	257.6	7.7×10 <sup>-5</sup>	8.08
52	2,2',5,5'-Tetrachlorobiphenyl	292.0	8.6×10 <sup>-5</sup>	8.39
101	2,2',4,5,5'-Pentachlorobiphenyl	326.4	2.1×10 <sup>-5</sup>	9.03
138	2,2',3,4,4',5'-Hexachlorobiphenyl	360.9	4.0×10 <sup>-5</sup>	9.81
153	2,2',4,4',5,5'-Hexachlorobiphenyl	360.9	5.2×10 <sup>-6</sup>	9.69
180	2,2',3,4,4',5,5'-Heptachlorobiphenyl	429.8	9.7×10 <sup>-7</sup>	10.37



**Fig. 1.** Photograph of tree barks. (a) Ginkgo (*Ginkgo biloba*) (b) Pine (*Pinus densiflora*) (c) Platanus (*Platanus*) (d) Metasequoia (*Metasequoia glyptostroboides*).

운반한 후 분석 때까지  $-20^{\circ}\text{C}$  냉동고에 보관하였다. 유리병, 알루미늄 호일과 끈은 *n*-hexane과 DCM으로 각각 3회 세척한 것을 사용하였다. Fig. 1은 시료로 사용한 나무껍질을 나타낸 것이다.

### 2.3. 추출 및 시료 건조

시료는 스테인레스 파쇄기에서 파쇄시킨 후 체눈크기 2 mm (10 mesh) 스테인레스 체로 쳐서 통과한 것만 시료로 사용하였다. 추출에 사용된 시료는 소나무껍질 약 15 g, 은행나무껍질 약 10 g, 플라타너스껍질 약 25 g, 메타세콰이어껍질 약 9 g을 Cellulose thimble (Sigma-Aldrich, size 43 mm×123 mm)에 넣고 정제용 내부표준물질을 주입한 후 속슬렛에서 *n*-hexane:acetone (4:1) 혼합용액으로 20~24시간동안 추출하였다. 모든 시료는 2개의 부시료(duplicate)를 만들었다. 습/건시료 무게비는 습시료 약 3~13 g을  $95^{\circ}\text{C}$ 에서 24시간 이상 건조시킨 후 전후 무게차이를 이용하여 계산하였다. 지질농도는 오븐에서 건조시킨 시료를 속슬렛에서 *n*-hexane으로 20~24시간 추출하고 추출 용매를 회전증발 농축기에서 농축한 후 시료를 알루미늄 접시에 정량적으로 옮겨  $70^{\circ}\text{C}$  진공오븐에서 완전히 용매를 휘발시킨 다음 중량법으로 측정하였다.

### 2.4. 전처리

PCBs에 대한 전처리 및 분석법은 기존문헌에 기술되어 있으나 다시 간략하게 정리하면 아래와 같다.<sup>6)</sup>

#### 2.4.1. Acidic Silica 칼럼

속슬렛에서 추출한 추출액을 회전증발 농축기에서 약 2~3 mL까지 농축하였다. 시료는 내경 200 mm, 길이 300 mm인 유리 칼럼에 밑에서부터 acidic silica 20 g ( $\text{H}_2\text{SO}_4$  30 w/w %), 중성 silica 10 g, 무수  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  약 10 g을 차례로 넣고 *n*-hexane 500 mL로 세척한 후 농축한 시료를 넣고 *n*-hexane 500 mL로 용출시켜 방해물질을 제거하였다. 용출한 시료는 회전증발농축기에서

약 1 mL까지 농축하였다.

#### 2.4.2. GPC 칼럼

Acidic silica 칼럼만으로는 시료에 포함되어 있는 방해물질을 충분히 제거할 수 없으므로 내경 20 mm, 길이 220 mm 유리관에 bio-beads 12 g을 충전시킨 GPC 칼럼으로 다시 시료를 정제하였다. Acidic silica 칼럼으로 용출한 시료액을 *n*-hexane:DCM (1:1) 혼합용매 100 mL로 세척한 GPC 칼럼에 넣고 *n*-hexane:DCM (1:1) 혼합용매 90 mL로 용출시켰다. 용출액의 처음 34 mL에는 방해물질이 포함되어 있으므로 버리고 나머지 56 mL는 PCBs 분율(fraction)이므로 분석에 이용하였다.

### 2.5. 분석

GPC 칼럼의 PCBs 분율을 회전증발 농축기에서 약 1~2 mL까지 농축한 다음 10 mL vial에 정량적으로 옮기고 첨가용 내부표준물질과 최종농축용매로 *n*-nonane 50  $\mu\text{L}$ 를 가한 후 전열판(hot plate) 위에서 질소로 천천히 약 50  $\mu\text{L}$ 까지 농축하여 GC-MSD로 분석하였는데, Table 2는 GC-MSD의 PCBs 분석조건을 나타낸 것이다.

### 2.6. 정도관리(QA/QC)

PCBs의 정량 시 크로마토그램의 높이가 노이즈의 3배 이상인 것만 정량에 포함시켰으며, 정제용 내부표준

**Table 2.** GC/MSD operating parameters for PCBs analysis

GC	HP 6890
Detector	HP mass selective detector 5973
Electron energy	70 eV
Injector	splitless
Sample injection volume	1 $\mu\text{L}$
Carrier Gas	He 1 mL/min
Column	HP-5MS capillary column (5% diphenyl & 95% dimethylpolysiloxane) 30 m×0.25 mm×0.25 $\mu\text{m}$ Film thickness
Temperature Programme	150°C for 2 min 30°C/min. to 170°C 4°C/min. to 200°C for 13 min. 4°C/min. to 268°C 70°C/min. to 320°C for 4.09 min.
Ionization mode	EI
Detection mode	selected ion monitoring (SIM)
Total Run Time	45 min
Injector Temperature	300°C

물질로 사용된 6종의  $^{13}\text{C}_{12}$  PCBs를 이용하여 모든 전처리 과정에 대한 회수율을 총 5회 평가한 결과 회수율은 81.2~110.5%였으며, 분자량이 작을수록 회수율이 낮았다. 시료마다 두 개(duplicate)의 부시료를 만들어 분석하였는데, 두 부시료 간 변이계수(coefficient of variation, C.V)는 평균 26.2% (2.3~55.9%)였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 각 나무껍질에 침착된 PCBs 농도

Table 3과 Fig. 2(a)는 4가지 종류의 나무껍질에 침착된 PCBs 농도와 지질의 양을 나타낸 것으로 PCBs 총농도는 은행나무(50.7 pg/g dry) > 소나무(44.6 pg/g dry) > 플라타너스(33.9 pg/g dry) > 메타세콰이어(15.8 pg/g dry) 순으로 높았고, 지질의 농도도 은행나무(7.8 mg/g dry) > 소나무(4.9 mg/g dry) > 플라타너스(3.6 mg/g dry) > 메타세콰이어(1.0 mg/g dry) 순으로 높았다. Table 3과 Fig. 2(b)는 각 나무껍질에 침착된 PCBs의 congener별 농도를 나타낸 것으로 저염소(저분자량, tri-tetra) PCBs는 농도가 높고(전체 농도의 83.8~87.5%) 고염소(고분자량, penta-hepta) PCBs는 농도가 낮아 분자량이 적을수록 농도가 높은 경향을 보였다.

Pausch<sup>20)</sup> 등은 대기 중 POPs가 식물잎에 침착될 때 주된 침착경로는 건식 가스상 침착이라고 하였다. 천<sup>24,25)</sup> 등은 이전 연구에서 1~4년생 소나무잎에 침착된 PCDD/Fs와 PCBs 등 POPs 농도를 측정된 결과 대기 중에서 분자량이 적은 POPs는 잎에 누적침착이 일어나지만 분자량이 큰 POPs는 누적침착이 일어나지 않는다는 것을 확인하였는데 소나무잎에 침착된 POPs 농도와 나무껍

질에 침착된 POPs 농도분포는 비슷한 경향을 보였다. 소나무잎은 공중에 매달려 있으며 저염소 PCBs는 대기 중에서 가스상 분율은 높고 입자상 분율은 낮으며 고염소 PCBs는 반대로 가스상 분율은 낮고 입자상 분율은 높다.<sup>21,23)</sup> PCBs는 친유성(lipophilic)이므로 대기 중 가스상 PCBs는 소나무잎의 표면에 존재하는 지질에 계속적으로 누적침착이 일어나지만 입자상 PCBs는 나뭇잎에 입자가 부착되었다가 강우, 바람 등에 의하여 탈착이 일어나므로 일정양 이상은 부착이 되지 않기 때문에 누적침착이 일어나지 않는다.<sup>19,22,26)</sup> 나무껍질도 나뭇잎과 마찬가지로 공중에 매달린 상태로 대기에 노출되어 있으므로 입자상 물질은 나무껍질에 부착되었다가 강우나 바람에 의하여 탈착될 것으로 판단된다. Table 3과 Fig. 2(a)에서 보듯이 나무껍질에는 상당량의 지질이 함유되어 있다. 그러므로 나무껍질 역시 식물잎과 마찬가지로 대기 중 PCBs를 비롯한 POPs가 침착되는 주경로는 건식 가스상 침착이라 생각된다. 이것이 나무껍질 중 저염소(저분자량) PCBs 농도는 높고 고염소(고분자량) PCBs 농도는 낮은 원인이라 판단된다.

#### 3.2. PCBs 농도와 지질간 상관성

Fig. 3은 네 가지 종류의 나무껍질에 침착된 PCBs 농도와 지질양 사이의 회귀직선을 나타낸 것으로 두 값은 상관성이 큰 것으로 나타났다(결정계수  $R^2=0.9417$ ,  $p=0.0296$ ). 이것은 나무껍질에 침착된 대기 중 PCBs 농도는 나무의 종류보다는 나무껍질의 지질양에 비례한다는 것을 의미한다. Table 3과 Fig. 2(b)를 보면 저염소 PCBs는 나무껍질의 종류에 따라 농도 차이가 컸지만 고염소 PCBs 농도는 상대적으로 큰 차이를 보이지

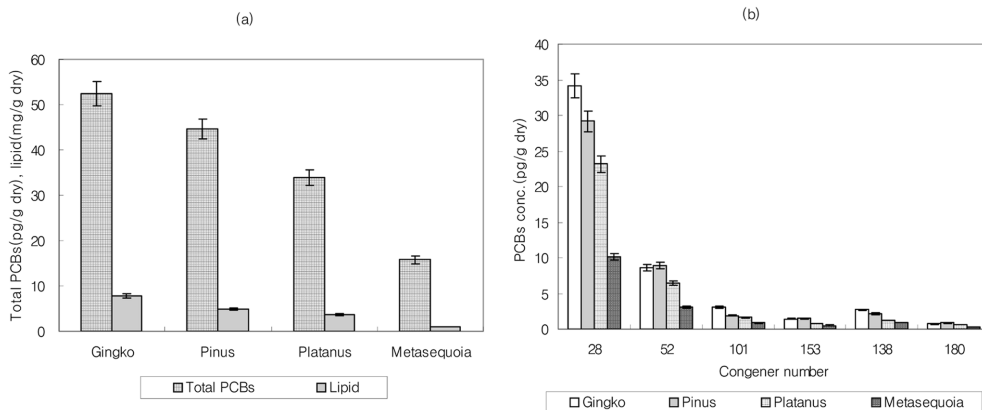


Fig. 2. Total PCBs concentrations and lipid contents (a) and distribution of PCBs congener concentrations (b) in four kinds of tree bark.

**Table 3.** PCBs concentrations (pg/g dry) and lipid contents (mg/g dry) in several tree barks

Ginko ( <i>Ginkgo biloba</i> )							
Congener	1	2	Mean	S.D	C.V (%)	Fraction (%)	lipid contents
28	35.7	32.7	34.2	2.1	6.2	67.4	7.8
52	9.6	7.6	8.6	1.4	16.5	16.9	
101	2.6	3.6	3.1	0.7	23.0	6.1	
138	3.2	2.2	2.7	0.7	26.1	2.8	
153	1.0	1.8	1.4	0.6	39.8	5.3	
180	0.6	0.9	0.7	0.2	29.5	1.4	
Total	52.6	48.7	50.7	2.8	6.6	100.0	
Min					6.2		
Max					39.8		
Pine ( <i>Pinus densiflora</i> )							
Congener	1	2	Mean	S.D	C.V (%)	Fraction (%)	lipid contents
28	30.7	27.7	29.2	2.1	7.3	65.5	4.9
52	8.6	9.2	8.9	0.5	5.2	20.0	
101	1.6	2.3	1.9	0.5	24.7	4.3	
138	2.2	2.1	2.2	0.1	2.3	3.4	
153	1.0	2.0	1.5	0.7	46.9	4.9	
180	0.8	1.0	0.9	0.2	17.0	2.0	
Total	44.8	44.3	44.6	0.4	0.8	100.0	
Min					2.3		
Max					46.9		
Platanus ( <i>Platanus</i> )							
Congener	1	2	Mean	S.D	C.V (%)	Fraction (%)	lipid contents
28	25.7	20.7	23.2	3.54	15.3	68.4	3.6
52	5.6	7.3	6.5	1.23	19.1	19.0	
101	1.2	2.1	1.6	0.58	35.4	4.8	
138	1.4	1.0	1.2	0.29	23.9	2.2	
153	0.9	0.6	0.7	0.21	28.7	3.6	
180	0.5	0.9	0.7	0.28	43.5	1.9	
Total	35.3	32.5	33.9	1.95	5.7	100.0	
Min					15.3		
Max					43.5		
Metasequoia ( <i>Metasequoia glyptostroboides</i> )							
Congener	1	2	Mean	S.D	C.V (%)	Fraction (%)	lipid contents
28	10.7	9.7	10.2	0.7	7.0	64.5	1.0
52	3.5	2.5	3.0	0.7	23.3	19.3	
101	0.5	1.2	0.9	0.5	55.9	5.4	
138	1.2	0.6	0.9	0.5	49.8	3.3	
153	0.4	0.7	0.5	0.3	46.3	5.7	
180	0.2	0.4	0.3	0.1	35.4	1.8	
Total	16.5	15.0	15.8	1.0	7.0	100.0	
Min					7.0		
Max					55.9		

S.D: Standard Deviation, C.V: Coefficient of Variance.

않았다. 이것은 PCBs는 친유성이며 대기 중 PCBs가 나무껍질에 침착될 때 주경로는 건식 가스상 침착이므로 대기 중에서 가스상 분율이 높은 저염소 PCBs가 고염소 PCBs보다 나무껍질의 지질에 상대적으로 많이 침

착되었기 때문에 생각된다. 주로 입자상으로 존재하는 고염소 PCBs도 가스상 분율이 낮을 뿐이지 100% 모두 입자상으로 존재하는 것은 아니므로 나무 종류별로 농도차이는 적지만 역시 지질양이 많은 나무껍질에 상

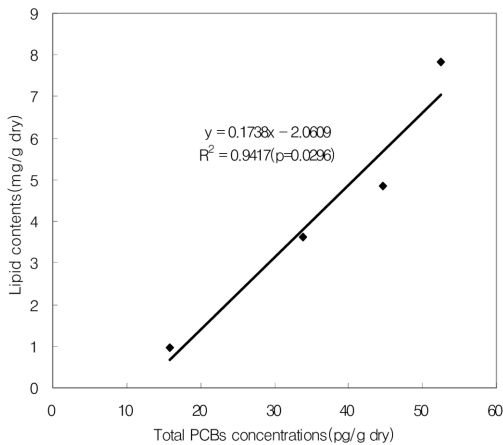


Fig. 3. Regression line between total PCBs concentrations and lipid contents in four kinds of tree bark.

대적으로 더 많이 침착된 것으로 생각된다.

이상에서 살펴 본 바와 같이 나무 종류가 다르면 나무껍질에 포함된 지질양도 다르고 대기 중 PCBs의 침착농도도 다르다는 것을 확인하였다. PCBs는 친유성이며 대기 중 PCBs가 나무껍질에 침착되는 주경로는 건식 가스상 침착으로 생각된다. 저염소 PCBs는 대기 중에서 가스상 분율이 높고 입자상 분율은 낮지만 고염소 PCBs는 그 반대이다. 그러므로 대기 중 PCBs는 지질양이 많은 나무껍질에 가스상 분율이 높은 저염소 PCBs가 많이 침착되고 상대적으로 입자상 분율이 높은 고염소 PCBs는 침착되는 양이 적었다. 만약 나무껍질을 여러 지역의 대기 중 PCBs의 PAS로 사용하고자 할 경우 이러한 사실을 감안하여 같은 종류의 나무껍질을 채취하고 고염소 PCBs에 대해서는 입자상 물질의 침착율이 높은 토양을 추가적으로 채취하여 동시에 분석하는 보완책이 필요하다. 그렇지 않을 경우 나무껍질에 침착된 PCBs 농도는 대기 중 PCBs 농도를 잘 반영하지 못하므로 해석상 오류를 범할 가능성이 크다.

#### 4. 결 론

이 연구는 대기 중 PCBs의 passive air sampler (PAS)로 자주 사용되고 있는 나무껍질에 대한 대기 중 PCBs의 침착특성을 규명하기 위하여 4가지 종류의 나무껍질(은행나무, 소나무, 플라타너스와 메타세콰이어)을 조사한 것이다.

나무껍질 중 지질농도는 은행나무(7.8 mg/g dry) > 소

나무(4.9 mg/g dry) > 플라타너스(3.6 mg/g dry) > 메타세콰이어(1.0 mg/g dry) 순으로 높았고 나무껍질에 침착된 PCBs 농도 역시 은행나무(50.7 pg/g dry) > 소나무(44.6 pg/g dry) > 플라타너스(33.9 pg/g dry) > 메타세콰이어(15.8 pg/g dry) 순으로 높았으며, 나무껍질에 침착된 PCBs 농도와 지질양 사이의 상관성은 매우 컸다(결정계수  $R^2=0.9417$ ,  $p=0.0296$ ). 나무껍질에 침착된 PCBs의 congener 농도분포는 저염소 PCBs(tri-tetra PCBs)가 상대적으로 농도분율(83.8~87.5%)이 높고 수종별 농도 차이도 컸으며 고염소 PCBs(penta-hepta PCBs) 농도는 상대적으로 낮고 수종별 차이도 크지 않았다. 그러므로 대기 중 PCBs의 PAS로서 나무껍질은 대기 중 저염소 PCBs는 잘 반영을 하지만 고염소 PCBs는 잘 반영을 하지 못하며 수종에 따라 나무껍질에 침착하는 양이 서로 다르기 때문에 사용할 때 신중을 기하여야 하며 그렇지 않을 경우 해석상 오류를 범할 가능성이 크다.

#### 참고문헌

1. B. D. Eitzer and R. A. Hites, *Environmental Science & Technology*, **1989**, 23(11), 1396-1401.
2. T. Gareth, A. J. Sweetman, W. A. Ockenden, D. Mackay and K. C. Jones, *Environmental Science & Technology*, **1998**, 32(7), 936-942.
3. E. Bacci, M. J. Cerejeira, C. Gaggi, G. Chemello, D. Calamari and M. Vighi, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **1992**, 48(3), 401-408.
4. S. D. Choi, and Y. S. Chang, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2005**, 21(5), 481-494.
5. M. Shoeib and T. Harner, *Environmental Science & Technology*, **2002**, 36(19), 4142-4151.
6. M. Y. Chun, *Korean Journal of Environmental Health Science*, **2012**, 38(4), 360-368.
7. I. Y. Shim, H. G. Yeo, M. K. Choi, T. W. Kim and M. Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2002**, 24(12), 2227-2237.
8. J. R. Aboal, J. A. Fernandez and A. Carballeira, *Environmental Pollution*, **2001**, 115(2), 313-316.
9. H. G. Yeo, K. C. Cho, M. K. Choi, M. Y. Chun and T. W. Kim, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **2006**, 28(8), 836-842.
10. M. Y. Chun and T. W. Kim, *Journal of Korean Society of Environmental Toxicology*, **2009**, 24(3), 251-259.
11. T. B. Lim, R. Xu, B. Tan and J. P. Obbard, *Chemosphere*, **2006**, 64, 596-602.
12. S. Wen, F. Yang, J. G. Li, Y. Gong, X. L. Zhang, Y. Hui,

- Y. N. Wu, Y. F. Zhao and Y. Xu, *Chemosphere*, **2009**, 74, 981-987.
13. F. Guegen, P. Stille and M. Millet, *Chemosphere*, **2011**, 85, 195-202.
14. M. H. Hermanson and G. W. Johnson, *Chemosphere*, **2007**, 68, 191-198.
15. L. I. Xue, F. Lei, H. Jun and Y. U. Gang, *Journal of Environmental Sciences*, **2008**, 20, 753-759.
16. F. C. Chang, T. C. Chiu, J. H. Yen and Y. S. Wang, *Chemosphere*, **2003**, 51, 775-784.
17. X. S. Miao, S. G. Chu, and X. B. Xu, *Chemosphere*, **1999**, 39(10), 1639-1650.
18. L. A. Totten, S. J. Eisenreich and P. A. Brunciak, *Chemosphere*, **2002**, 47, 735-746.
19. D. Mackay, W. Y. Shiu and K. C. Ma, "Illustrated Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals" 2nd ed., 1997, 250-251, Volume II, Lewis Publishers, U.S.A.
20. K. W. Pausch, M. S. McLachlan and G. Umlauf, *Environmental Science & Technology*, **1995**, 29(4), 1090-1098.
21. H. G. Yeo, M. K. Choi, M. Y. Chun, T. W. Kim and Y. Sunwoo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **2002**, 18(3), 193-204.
22. M. D. Erickson, "Analytical Chemistry of PCBs" 1st ed., **1992**, 1-7, Lewis Publishers, U.S.A.
23. R. L. Falconer and F. Bidleman, *Atmospheric Environment*, **1994**, 28(3), 547-554.
24. M. Y. Chun, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, **1998**, 20(10), 1377-1383.
25. T. Gouin, D. Mackay and K. C. Jones, *Environmental pollution*, **2004**, 128, 139-148.