

소나무 종별 대기 중 PCBs의 침착특성

신은상 · 여현구*[†] · 조기철** · 천만영*

동남보건대학 환경보건과, *한경대학교 환경공학과, **동남보건대학 환경생명과학과

Deposition Characteristics of Atmospheric PCBs by Type of Leaves in Pine Needles

Eun Sang Shin · Hyun-Gu Yeo*[†] · Ki-Chul Cho** · Man-Young Chun*

Department of Environmental Health, Dongnam Health College, 937 Jhangan-gu, Jhungja-dong,
Suwon-city, Kyonggi-do 440-714, South Korea

*Environmental Research Center, Environmental Engineering, National Hankyong University,
67 Sukjong-dong, Ansong-city, Kyonggi-do 456-749, South Korea

**Department of Environmental & Life Science, Dongnam Health College, 937 Jhangan-gu,
Jhungja-dong, Suwon-city, Kyonggi-do 440-714, South Korea

(Received October 20, 2005/Accepted November 15, 2005)

ABSTRACT

Results for the concentrations of total polychlorinated biphenyls (total PCBs) and the PCB profile with different types of leaves from four coniferous trees (pine needles) at the same sampling site are presented. Concentrations of total PCBs detected in pine needles were very similar among them regardless of their different types of leaves, which means a possibility for bio-monitoring regional contamination of PCBs. Correlation coefficients(r) of PCB congeners between pine needles were very significant ($r > 0.97$, $p < 0.001$), which showed that PCB congener's patterns of each pine needle were similar. Profiles of PCBs detected in pine needles showed correlation with gaseous phase PCBs in air, otherwise not with particle phase PCBs in air. Therefore, it was estimated that dry gaseous deposition was a principal pathway of PCBs accumulation in pine needles. In addition, although we analyse a different types of leaves in pine needles at the same region, they can be used to identify regional contamination patterns of PCBs for larger regions.

Keywords: PCBs, pine needles, deposition, bio-monitoring, regional contamination

I. 서 론

잔류성유기염소계물질(persistent organic pollutants: POPs) 또는 반휘발성 유기화합물(semivolatile organic compounds : SOCs)은 중간정도의 증기압(moderate vapor pressure), 비극성(nonpolar) 및 낮은 분해성(low degradability) 등의 특성으로 전 지구적으로 생성 및 소멸을 반복하며 대류권내에서 긴 체류시간을 가지고 존재한다(Yeo and Cho, 2003). POPs의 대표적인 오염물질인 polychlorinated biphenyls(PCBs), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), organochlorine pesticides (OCPs) 및 polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furan

(PCDD/F)은 대기, 식물, 수계등 여러 환경매체에서 계속 검출되고 있다(Marco *et al.*, 1993). 이 중 POPs의 대기 중 분포는 각각의 POPs 성분들의 물리/화학적 특성(예, 화학안정도, 증기압, 친지질성 정도, 용해도 등)에 의해 대기 중 농도에 영향을 준다. 이처럼 대기는 POPs의 국부적 및 광역적으로 오염물질을 이동시키고 환경중의 여러 매트릭스(matrix)인 식물, 토양, 수계 등에서 위 물질의 순환을 야기시킨다(Kim *et al.*, 1996; 민 등, 2000). 또한 POPs 화합물은 독성 및 암 유발물질로 알려지면서 1990년대 중반부터 이들 화학물질을 국제적으로 엄격히 규제하는 움직임이 활발히 진행되고 있다. 최근 들어 우리나라에서도 POPs 화합물 중 PCBs와 OCPs의 대기 중 농도 분포 및 온도 의존성에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 대기이외에 식물에서의 POPs에 관한 연구는 1980년대 중반에 처음 시작되어 연구가 미진한 실정이다

[†]Corresponding author : Environmental Research Center,
Environmental Engineering, National Hankyong University
Tel: 82-31-670-5446, Fax: 82-31-670-5170
E-mail : hgyeo@hknu.ac.kr

(Simonich and Hites, 1994). 지금까지 외국의 선행연구를 살펴보면, Bohme 등(1999) 독일의 교외지역에서 9종의 소 사료용 작물(예, 독보리(ryegrass), 서양톱풀(yarrow), 해바라기(sunflower) 등)을 재배하여 POPs 화합물의 축적정도를 살펴본 결과 대기중 가스상 POPs의 식물로의 침착이 주된 제거 메카니즘이라고 언급하였다. Howsam 등(2000)은 잎모양이 다른 침엽수에 침착되는 PAHs의 농도 및 프로파일을 살펴본 결과, 잎주위에 솜털이 있는 소나무잎이 그렇지 않은 소나무 잎에 비해 총 PAHs의 농도가 높았고 특히 입자상 성분으로 대기중에 주로 존재하는 고분자 PAHs(4-,5- 및 6-고리를 가진 PAHs)에 이런 특징이 나타났다. 천(1998)이 구주소나무 잎과 독일가문비 나뭇잎에 침착된 PCBs의 농도를 분석한 결과 성숙한 잎이 길면 길수록 대기 중에서 침착되는 PCBs 농도가 증가한다고 언급하였다. 이에 본 연구에서는 안성에서 자생하는 소나무 잎을 수종간의 자생기간, 잎의 길이, 유기물 및 수분량 등의 특성을 파악하고 이를 통해 대기 중 PCBs 침착 특성 및 소나무 종간의 관련성을 파악하고자 한다.

II. 실험방법

1. 시료채취 및 전처리

우리나라 전역에 분포되어 있고 상록수인 소나무 잎을 소나무 종별[적송(*Pinus densiflora*: A로 표시), 가문비나무(*Picea abies*: B로 표시), 오엽송(*Pinus paviflora*: C로 표시), 구주소나무(*Pinus sylvestris*: D로 표시)]로 1년생을 경기도 안성에 소재한 한경대학교에서 채취하여 PCBs의 소나무 종별 침착특성을 살펴본다. 본 연구의 전처리방법은 채취한 종별(4종의 소나무를 각각 5그루씩 선정) 소나무 잎 각각 15g과 헥산(hexane):아세톤(acetone) (4:1 v/v) 혼합용매 100 ml를 250 ml 갈색병에 넣고 초음파 추출기에서 2시간 연속 추출 후 추출액을 250 ml 플라스크로 옮긴 다음, 다시 헥산:아세톤 (4:1 v/v) 혼합용매 100 ml를 가하여 1시간 더 추출하여 추출액을 합한 후 회전증발농축기(rotavaporator: BUCHI社, R-124)에서 2~3 m까지 농축하였다. 이때 회수율 산정을 통한 농도 보정을 위해 시료에 ¹³C₁₂-labelled PCBs(surrogate standard)를 5 ng을 spiking하였다. 추출 전 농축된 시료는 분석 시 방해물질로 작용하는 지질 및 엽록소를 제거하기 위하여 실리카 칼럼을 통과시켰다. 실리카 칼럼 하단부터 산성 실리카(acidified silica) 3g, 활성 실리카(activated silica: Merck社, TA157134) 1.5g 및 무수 Na₂SO₄ (Dulksan社, GR grade)를 일정량 넣은 다음 헥산 30

Table 1. Analytical conditions of PCBs with HRGC/HRMS

HRGC/HRMS	Analytical conditions
Column	DB-5MS capillary column length 60 m × 0.25 mm, film thickness 0.25 μm
Inlet	Splitless
Aux temp.	300°C
Injection volume	1 μl
Temp. program	150°C for 2 min. 4°C/min. to 320°C 320°C for 10 min
Carrier gas	He(99.9999%)
Total run time	51 min.

ml로 충전 물질을 세척한 후 시료를 넣고 헥산 30 ml를 컬럼에 통과시켰다. 실리카 칼럼을 통과한 시료는 회전 증발농축기에서 약 1 ml까지 농축하였다. 그러나 실리카 컬럼 통과 후에도 제거되지 않는 오염물질 및 지질은 GPC(gel permeation chromatography) 컬럼(column)으로 다시 정제하였다. Bio-Bead(Bio-RAD社, 152-2750)가 충전된 GPC 컬럼은 헥산:DCM (1:1 v/v) 혼합용매를 90 ml를 사용하여 시료를 용출시키는데 용출시 처음 34 ml는 지질 및 불순물이 용출되는 부분이므로 버리고 나머지 56 ml를 취하여 회전증발농축기로 2ml 정도까지 농축하여 keeper로 dodecane(Sigma社, D-4259), internal standard로서 4,4'-dibromo-octafluorobiphenyl(4,4'-DBOB) 50 μl를 spike한 다음 hot plate 위에서 질소로 최종부피를 50 μl까지 증발시킨 후 HRGC/HRMS(high resolution mass spectrometry, Hewlett-Parkard 6890II/JMS-700)을 이용하여 PCBs의 성분분석을 분석하였다(Table 1, 심 등, 2002).

2. 정도관리

소나무 잎 중 PCBs의 분석을 위한 정도 관리는 회수율 실험(recovery analysis), 중복실험(duplicate analysis) 및 표준시료의 선형성평가(regression analysis)를 실시하였다. 회수율 실험은 시료의 전처리 과정(시료의 추출, 농축 및 정제)에서 필연적으로 수반되는 시료의 손실을 보정하기 위해 7종의 PCB 동위원소를 이용하여 시료의 전처리 과정과 동일한 조작을 행한 후 분석된 농도와 spiking한 농도를 비교하여 회수율을 산정하였으며 이를 농도에 보정하였다. 그 결과 PCB 동위원소 (¹³C PCBs)의 회수율(n=6)은 각각 PCB 28 (100.5 ± 8%), PCB 52(99 ± 19%), PCB 101(110 ± 17%), PCB 153(115 ± 19%), PCB 138(109 ± 17%),

PCB 180(119 ± 17%) 및 PCB 209(106 ± 15%)로 평균 108%의 양호한 결과를 나타내었다. 본 연구에서 산정된 소나무 잎 중 PCBs의 농도는 회수를 보정을 하여 사용하였다. GC/MSD의 재현성은 39종의 PCBs 표준물질을 10회 반복분석해서 얻은 상대표준편차(RSD: Relative Standard Deviation)를 이용하였으며 그 결과 2.5%-19.7% 결과를 나타내었다. 채취한 소나무 잎을 무작위로 2회씩 추출(sample-1, sample-2)하여 중복실험을 하였고 각각의 시료에서 검출된 PCB 동질체에 대한 회귀분석(SPSS version 10, SPSS Inc.)을 행하였다. 그 결과 결정계수(R^2)는 0.92($p < 0.001$)이었으며 회귀식의 기울기는 0.99($p < 0.001$)로 양호한 결과를 나타내었다.

PCBs의 검출한계인 LOD(limit of detection)는 예상되는 검출한계의 1.5배 정도로 조정하여 6회 반복 분석한 표준물질의 농도의 평균에 표준편차의 3배를 곱해서 산정하였다($LOD = \text{평균} + 3 \times \text{표준편차}$). 그 결과 식물 중 PCB 동질체별 LOD는 0.94(PCB 60) - 2.49 pg/g dry weight(DW)(PCB 52)이었다.

III. 결과 및 고찰

1. 총 PCBs의 농도

Table 2는 소나무 종별 1개의 시료를 중복 실험(duplicate analysis)한 결과를 나타낸 것이다. 소나무 잎에서 검출된 PCB congeners의 종류는 PCB 18, 28, 33(tri-CBs), 44, 38/47, 49, 52, 60, 61/74, 66, 77(tetra-CBs), 87, 101, 105, 110, 118(penta-CBs), 138, 151, 153, 155, 167(hexa-CBs), 170, 180, 187(penta-CBs)로 39종의 분석 대상 물질 중 24종이 검출되었다.

소나무 잎 형태에 따른 총 PCBs의 농도는 적송(A), 가문비나무(B), 오염송(C), 구주소나무(D)가 각각 1,321 pg/g DW, 1,530 pg/g DW, 1,999 pg/g DW 및 1,665 pg/g DW(dry weight: 건조질량)로 나타났다. 이는 소나무 종간의 물리·화학적 특징으로 설명할 수 있는데 친지질성 유기오염물질이 식물로 침착되는 주된 메카니즘은 수분함량, 식물종별 잎의 표면적(혹은 표면의 습털 유무), 유기물질 함량(지질의 양)에 의해 좌우되는데(Howsam *et al.*, 2000), 본 연구에서 조사된 적송, 가문비나무, 오염송, 구주소나무의 수분함량은 각각 48, 55, 56, 53%로 적송을 제외하고 50% 이상의 수분함량을 나타내었으며, 유기물 함량은 각각 51, 44, 42, 46%로 적송을 제외하고 50% 이하의 함량을 나타내었다. 특히 소나무종별 유기물 함량과 총 PCBs 농도의

Table 2. Concentration of PCB congeners in pine needles (pg/g DW¹⁾)

Homolog	Congener	<i>Pinus densiflora</i> (A)	<i>Picea abies</i> (B)	<i>Pinus paviflora</i> (C)	<i>Pinus sylvestris</i> (D)
Tri-CB ²⁾	18	138	174	283	161
	28	314	410	412	393
	33	116	126	142	100
Tetra-CB	44	51	39	90	58
	38/47	137	200	226	161
	49	40	49	58	54
	52	65	66	108	95
	60	37	55	74	70
	61/74	20	20	29	24
	66	65	67	90	79
77	24	26	28	31	
Penta-CB	87	21	21	37	27
	101	57	51	71	70
	105	27	20	34	25
	110	39	50	67	65
	118	42	35	59	46
Hexa-CB	138	1	16	44	38
	151	23	23	29	26
	153	26	22	22	27
	155	2	3	4	3
	167	18	12	19	27
Hepta-CB	170	17	26	23	32
	180	22	6	35	30
	187	17	11	17	22
Σ_{24} PCB		1321	1530	1999	1665

¹⁾DW: dry weight, ²⁾CB: Chlorinated Biphenyl.

상관계수는 -0.84($p < 0.01$)로 유의한 음의 상관성을 보였다. 이는 김 등(2001)이 뽕잎과 부추에서 구한 유기물 함량과 총 PCB 농도의 상관계수(r)가 0.703($p < 0.05$)으로 유기물 함량이 증가할수록 흡착 가능한 PCB 농도가 증가함을 보인 것과 다른 결과를 보였다. 즉, 잎의 유기물함량(지질함량)은 종(species)이 다른 식물 중 POPs의 농도를 비교할 때 매우 유용한 자료로 사용된다(Simonich and Hites, 1995). Hebert와 Keenlyside(1995) 및 Delbeke 등(1995)은 식물 중 POPs의 농도와 유기물함량(지질함량)과 직접적으로 상관성을 구하는 것은 잘못된 결과를 초래할 수 있다고 언급하였다. 이는 뽕과 부추 잎에서 조사한 유기물 함량이 각각 3.5, 1.3%로 본 연구에서 조사된 소나무종별 평균 유기물 함량인 48%에 비해 10배 이상 낮은 유기물 함량

을 가지고 있는 것으로 나타나 낮은 유기물 함량을 지닌 식물 중에 있어서는 PCBs의 식물 침착에 있어 중요한 역할을 하는 반면 충분한 유기물질 함량 지닌 식물에 있어서는 PCBs의 식물로 침착에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

국내·외에서 조사된 소나무 잎중 총 PCB의 오염도를 확인한 결과, 심 등(2002)이 서울(2,308 pg/g DW), 시화(2,230 pg/g DW), 강화(2,197 pg/g DW), 안성(865 pg/g DW), 영동(649 pg/g DW) 및 충주(600 pg/g DW)에서 조사한 총 PCBs의 농도는 본 연구의 평균 농도(1,629 pg/g DW)에 비해 서울, 시화, 강화보다는 낮은 농도를 안성, 영동, 충주에 비해서는 높은 농도를 보였다. 천(1998)이 영국에서 구주소나무 잎 1년생에서 조사한 총 PCBs(Σ_{17} PCB) 농도는 4,981 pg/g DW로 본 연구에 비해 3배 높은 농도를 보였다. Tremolada 등(1996)이 영국의 교외지역 9곳에서 채취한 소나무 잎중 총 PCBs(Σ_{16}) 농도의 농도범위는 340 pg/g DW - 8,700 pg/g DW로 본 연구와 차이를 나타내었다. 이는 측정지점 주변의 발생원 유무와 과거 PCBs의 사용량과 매우 밀접한 관련성을 가지는 것으로 판단된다.

2. 동족체(homolog)의 농도

Fig. 1은 소나무 종별 PCB homologs의 농도 분포를 나타낸 것이다. 소나무 종별 PCB homologs의 농도는 오염성(C)에서 모든 homologs가 최대농도를 보인 반면 적송(A)에서 모든 homologs가 최소농도를 보여 총 PCBs의 농도패턴과 일치하였다. 그리고 PCB homologs의 농도는 tri-CBs > tetra-CBs > penta-CBs >

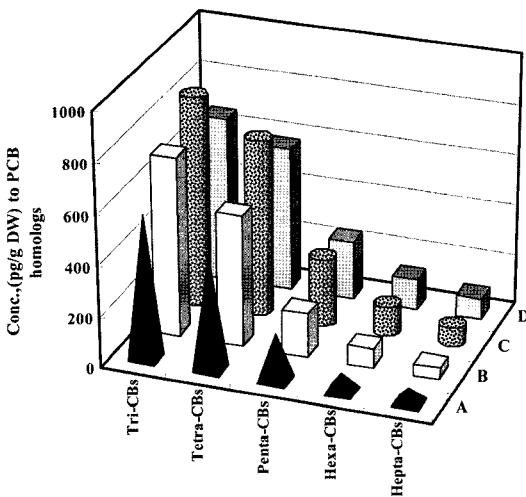


Fig. 1. Homologs concentration with a types of leaves in pine needles.

hexa-CBs > hepta-CBs 순으로 모든 종에서 동일하게 나타났으며 검출된 homologs 중 가장 저분자 PCBs인 tri-CBs가 최대농도를 고분자 PCBs인 hepta-CBs가 최소농도를 보였다. 이는 본 연구에서 조사한 동일지점의 대기 중 PCBs의 연구 결과와 homologs의 농도패턴이 매우 유사함($r=0.98, p<0.01$)을 확인할 수 있다. 그러나 대기 중 PCB homologs의 자료에서는 octa-CBs와 deca-CB가 검출된 반면 소나무 잎에서는 검출되지 않았다. 이는 SOCs 화합물의 식물로의 건성침착에 있어서 중요인자는 입자의 직경이며 100 μm 이하의 직경을 가진 화합물들이 식물의 잎에 침착될 수 있다고 하였다(Romney *et al.*, 1963). 그러나 대기 중의 존재하는 가스/입자상 SOCs의 식물로의 유입은 입자상 성분의 건성/습성침착(dry/wet deposition)보다는 가스상 성분의 침착이 중요한 경로라고 보고하였다(Bacci *et al.*, 1990a). Trapp와 Matthies(1997)는 토양 중 PCDD/F의 휘발실험을 통해 식물이 지표면에 접해 있거나, 오염이 심한 토양을 제외하고는 토양에 의한 영향은 매우 작다고 보고하였다. 또한 Tojo 등(1998)과 Ok 등(1999)은 소나무 잎에 침착되는 대기 중 유기염소계 화합물은 대부분 가스상 성분에 의해 좌우된다고 보고하였다. 위의 여러 연구자들의 보고와 같이 PCBs와 같은 SOCs의 식물로 이동경로는 토양에 의한 영향보다는 대기에 의한 가스상 성분의 침착이 주된 이동 메커니즘이라고 할 수 있다. Mackay 등(1992)에 의하면 25°C에서 tri-, tetra-, penta-, hexa-, hepta-, octa- 및 deca-CB의 포화증기압은 각각 1.0×10^{-2} Pa, 3.0×10^{-3} Pa, 4.0×10^{-3} Pa, 1.6×10^{-3} Pa, 1.3×10^{-4} Pa 및 4.8×10^{-7} Pa로 hepta-CBs이하의 PCB 동족체는 90% 이상이 가스상 형태로 대기 중에서 존재한 반면 octa-CBs와 deca-CB의 대부분 입자상 형태로 대기중에 존재하였다. 또한 Jon 등(1989)이 미국의 Great Lakes의 교외지역에서 조사한 총 PCBs(가스 + 입자) 농도는 가스상 PCBs가 92%를 차지하였으며, Jeffrey 등(2001)도 Lake Superior에서 1994-1996년에 조사한 총 PCBs중 가스상 비율이 92%로 나타나 대기 중 PCBs는 octa-CB와 deca-CB를 제외하고는 대부분 가스상으로 존재함을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서 조사된 소나무 잎에서 검출된 PCBs의 대부분은 대기 중 가스상 성분의 침착에 의한 결과로 판단된다(심 등, 2002).

Fig. 2는 총 PCBs 중 각각의 homologs가 차지하는 비율(%)을 나타낸 것이다. Tri-CBs와 tetra-CBs의 비율은 30% 이상으로 모든 소나무 종에서 동일하게 나타나 PCB homologs의 주요 성분임을 확인하였다. 반면 hexa-CBs와 hepta-CBs의 비율(%)은 10% 미만을

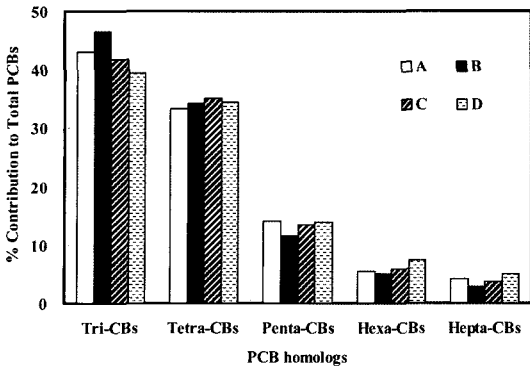


Fig. 2. Homologs contribution (%) of total PCBs with a types of leaves in pine needles.

모든 종에서 동일하게 나타났다.

3. 동질체(congener)의 농도

Fig. 3은 소나무 종별 PCB congeners의 농도 분포를 나타낸 것이다. 소나무종별 PCB congeners의 농도는 오염성(C)에서 거의 대부분의 congeners가 최대농도를 보인 반면 적송(A)에서 대부분의 congeners가 최소농도를 보였다. 그리고 PCB congeners중 최대농도를 보인 것은 PCB 28로 소나무종에 관계없이 동일하게 나타난 반면 최소농도는 소나무 종별로 다소 차이를 나타내었다. 소나무종별로 검출된 PCB congener간의 상관분석 결과, 모든 소나무종간의 상관계수가 0.97(p<0.001) 이상으로 나타나 매우 유의한 수준을 보였다. 이는 주변 대기중 PCBs의 침착 메카니즘이 침엽수인 소나무에 유사하게 작용한 결과로 판단된다. 그러므로 잎의 모양이 다소 차이가 있는 소나무 일지라도 같은 지역에서 자생하는 소나무는 매우 유사한 PCBs 프로파일을 나타

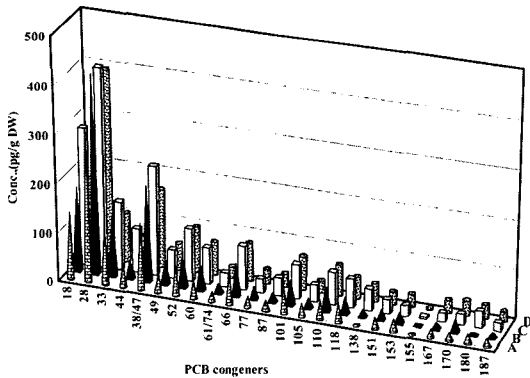


Fig. 3. Concentration of PCB congeners with a types of leaves in pine needles.

Table 3. Mean concentration of five pine needles (A, B, C, D) and atmosphere in Ansung city

Homologs	Congeners	Mean of		
		Pine needles pg/g DW	Atmosphere Particle phase (pg/m ³)	Atmosphere Gas phase (pg/m ³)
Tri-CBs	18	155	0.20	12.51
	47	181	0.60	17.25
Tetra-CBs	52	77	0.14	6.00
	60	59	0.58	1.29
	77	37	0.45	0.85
Penta-CBs	87	39	0.27	1.03
	101	70	0.43	3.23
	105	42	0.38	0.61
	110	66	0.39	1.71
Hexa-CBs	138	48	0.39	0.66
	153	50	0.34	0.84
	155	34	0.07	0.34
Hepta-CBs	170	54	0.31	0.20
	180	54	0.25	0.29

낼 것으로 판단된다. 그래서 동일지점에서 측정된 대기 중 PCB congeners의 농도와 소나무종 PCB congeners의 농도패턴을 확인하였다. 두 매트릭스(소나무와 대기)에서 동시에 검출된 PCBs congeners는 총 14종으로 대기 중 가스상 PCBs와 소나무 중 PCBs의 상관계수(r)는 0.98(p<0.001)로 나타난 반면 입자상 PCBs의 경우 상관계수가 0.23(p=0.51)로 유의한 값을 나타내지 않았다(Table 3). 또한, 심 등(2002)이 서울과 안성에서 채취한 소나무 잎 중 PCB homologs의 농도와 동일지점 대기 중 PCB homologs의 패턴을 파악한 결과, 소나무 잎과 대기에서 검출된 PCB homologs의 농도분포가 매우 유사하였다(r=0.91, p<0.001). 물론 심 등(2002)이 조사한 대기 중 PCBs의 농도는 가스와 입자를 동시에 분석한 자료이기 때문에 소나무 잎으로의 대기 중 PCBs 침착이 가스상 혹은 입자상의 기여율을 확인할 수 없었다는 한계가 있었다. 하지만 본 연구에서는 대기 중 가스상 PCBs의 소나무 잎으로의 침착이 주된 이동 메카니즘이라는 것을 확인 할 수 있었다.

Table 4는 전 세계적으로 검출빈도가 높은 ICES (International Council for the Exploration of the Seas: PCB 28, 52, 101, 118, 138, 180) congeners를 이용하여 안성지역 PCBs 오염도 수준과 외국의 농도 수준을 간접적으로 비교하기 위해 나타난 것이다. ICES 7 congeners의 합(\sum_7 ICES)은 646±98 pg/g DW으로

Table 4. Concentration of ICES congeners in this study and foreign countries in pine needles (pg/g DW)

ICES	This study	Borostrom and Lofgren (1998)	Wendy <i>et al.</i> (1998)	Sinkkonen <i>et al.</i> (1995)	Wenzel <i>et al.</i> (1998)
PCB 28	382	140	99	4,380	2,055
PCB 52	84	-	69	710	243
PCB 101	62	440	69	1,140	407
PCB 118	46	160	39	1,480	-
PCB 138	25	500	69	-	383
PCB 153	24	510	50	1,910	290
PCB 180	23	220	35	270	400
ΣICES	646	2,000	424	20,700	3,223

Brorstrom와 Lofgren(1998)이 스웨덴의 서부 해안에서 자생하는 전나무(spruce needle)에서 1991-1994년에 조사한 ICES 동질체의 합은 2,000 pg/g DW로 본 연구에 비해 3배 정도 높은 농도를 보였다. Wendy 등(1998)이 노르웨이의 교외지점 8곳에서 채취한 소나무 잎 중 Σ₇ICES congeners의 평균농도는 424±20.35 pg/g DW로 본 연구에 비해 1.5배 낮은 농도를 보였다. 또한 Sinkkonen 등(1995)이 핀란드의 중금속 제련 공장 부근 5지점에서 1991년 겨울철에 채취한 소나무 잎 중 ICES 동질체의 평균농도는 20,700 pg/g DW로 본 연구에 비해 32배 높은 농도를 보였는데 이 지역은 금속제련 시 부산물로 방향족 염소화합물이 발생하는 곳이어서 PCB의 잠재적인 발생원으로 판단되어 그 주변 소나무 잎에서 높은 농도를 보인 것으로 보고된다. Wenzel 등(1998)이 Caspian Sea 근처의 남부러시아에서 4지점에서 1997년에 채취한 소나무 잎에서 조사한 Σ₇ICES congeners은 3,223±1,825 pg/g DW로 본 연구에 비해 5배 정도 높은 농도를 보였다. 이처럼 소나무 잎을 이용하여 전 세계적으로 검출빈도가 높은 ICES congeners의 농도를 조사하면 각 국가별, 각 지역별(예, 도시지역, 산업지역, 교외지역, 배경지역 등) PCBs의 오염도를 간접적으로 파악할 수 있는 중요한 자료를 제공한다. 그러나 각 국가별, 지역별 PCBs의 오염도를 비교할 때에 같은 시기동안 대기에 노출된 소나무 잎(예, 1년생 소나무 잎)을 사용해야 하며 같은 노출기간일지라도 침엽수와 활엽수를 같이 비교하는 것은 많은 오차를 발생시킬 것으로 판단된다(천, 1998). 본 연구의 Σ₇ICES 농도는 외국의 교외지역과 유사하였으며 PCBs의 잠재적인 발생원 주변이나 도시지역에 비해서는 낮은 농도 수준을 보였다. 즉, 소나무 잎에서 검출된 Σ₇ICES 농도를 활용하면 측정지점간의 대기 중 PCBs의 오염도 수준을 간접적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

교외지역인 안성에서 자생하는 소나무 잎을 종별(적송, 가문비나무, 오엽송, 구주소나무)로 채취하여 잎모양에 따른 대기 중 PCBs의 침착특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소나무종별로 측정된 유기물함량, 수분량 등의 물리·화학적 특성은 대부분 비슷하게 나타나 대기 중 PCBs의 소나무 잎으로 침착특성에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.
- 2) 소나무종간 동질체(congeners)의 상관분석 결과 매우 유의한(p<0.001) 값을 나타내어 그 지역에 자생하는 어떤 소나무종을 선정하더라도 유사한 동질체 패턴 및 농도 프로파일을 확인할 수 있었다.
- 3) 소나무종별 동족체(homologs) 및 동질체의 침착특성은 대기 중 가스상 PCBs의 농도와 매우 유의한 상관성을 나타내었다. 즉, 소나무 잎 중 PCBs의 농도는 대기 중 가스상 PCBs의 침착이 주된 이동 메커니즘으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005년 교육인적자원 재정지원 사업으로 연구된 것임.

참고문헌

1. 김태욱, 여현구, 최민규, 천만영 : PCBs에 대한 식물 침착 특성. 한국환경농학회지, **20**, 99-107, 2001.
2. 천만영 : 대기중 PCBs의 침엽수잎 침착에 관한 연구. 대한환경공학회지, **20**, 1377-1383, 1998.
3. 심일용, 여현구, 최민규, 김태욱, 천만영 : 소나무잎을 이용한 PCBs의 공간적 분포. 대한환경공학회지, **24**, 2227-2237, 2003.

4. 민선영, 정문호, 이강숙, 노영만, 구정완 : 일부 한국 성인 여성들의 혈중 PCBs 농도 및 그 노출요인의 연구. *한국환경보건학회지*, **26**, 97-107, 2000.
5. Bacci, E., Cerejerira, M. J., Gaggi, C., Chemello, G., Calamari, D. and Vighi, M. : Bioconcentration of organic chemical vapors in plant leaves : the azalea model. *Chemosphere*, **21**, 525-535, 1990a.
6. Bohme, F., Kerstin, W.-P. and McLachlan, M. S. : Uptake of airborne semivolatile organic compounds in agricultural plants: Field measurements of interspecies variability, *Environ. Sci. Technol.*, **33**, 1805-1813, 1999.
7. Brorstrom, L. E. and Lofgren, C. : Atmospheric fluxes of persistent semivolatile organic pollutants to a forest ecological system at the swedish west coast and accumulation in spruce needles, *Environmental Pollution*, **102**, 139-149, 1998.
8. Delbeke, K., Teklemariam, T., De La Cruz, E. and Sorgeloos, P. : Reducing the variability in pollution data: the use of lipid classes for normalization of pollutant data in marine biota. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **58**, 147-162, 1995.
9. Hebert, C. E. and Keenlyside, K. A. : To normalize or not to normalize? Fat is the question, *Environmental Toxicology and Chemistry*, **14**, 801-807, 1995.
10. Jeffrey, C., James P., Ronald, S., Michael, M., Tina, B., Thomas M., Holsen, Y. H. and Phillip, H. : Enhanced airborne polychlorinated biphenyl(PCB) concentration and chlorination downtown of lake ontario. *Environ. Sci. Technol.*, **35**, 3280-3286, 2001.
11. Jon, B., Manchester, N. and Anders, W. : Seasonal variation in the atmospheric concentration of polychlorinated biphenyl congeners. *Environ. Sci. Technol.*, **23**, 1138-1148, 1989.
12. Howsam, W., Jones, K. C. and Ineson, P. : PAHs associated with the leaves of three deciduous tree species. I-Concentration and profiles. *Environmental Pollution*, **108**, 413-424, 2000.
13. Kim, J.-H., Choi, S.-K. and Kim, Y.-H. : Biodegradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) within insulating oil by Pseudomonas. *Korean Society of Environmental Health(KSEH)*, **22**, 1-7, 1996.
14. Mackay, D., Wan, Y. S. and Kuo, C. M. : Illustrated handbook of physical-chemical properties and environmental fate for organic chemicals. *Lewis Publisher*, 1992.
15. Ok, G., Moon, H. B. and Ji, S. H. : Concentration levels and behavior characteristics of PCDDs/Fs in atmosphere. *Organohalogen Compounds*, **43**, 209-212, 1999.
16. Romney, L. F., Hobbs, P. V. and Eltgorh, M. W. : Contamination of plant foliage with radioactive fallout. *Ecology*, **44**, 343-349, 1963.
17. Simonich, S. L. and Hites, R. A. : Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 939-943, 1994.
18. Simonich, S. L. and Hites, R. A. : Organic pollutant accumulation in vegetation. *Environ. Sci. Technol.*, **29**, 2905-2914, 1995.
19. Sinkkonen, S., Rantio, T., Vattulainen, A., Aittola, J.-P., Paasivirta, J. and Lahtipera, M. : Chlorohydrocarbons, PCB congeners, polychlorodioxins, furans and dibenzothiophenes in pine needles in the vicinity of a metal reclamation plant. *Chemosphere*, **30**, 2227-2239, 1995.
20. Tojo, T., Matsuda, M., Kawano, M. and Wakimoto, T. : Investigation on plant leaf as an indicator of air pollution by PCDDs/Fs. *Organohalogen Compounds*, **36**, 401-404, 1998.
21. Trapp, S. and Matthies, M. : Modelling volatilization of PCDD/F from soil and uptake into vegetation. *Environ. Sci. Technol.*, **31**, 71-74, 1997.
22. Tremolada, P., Burnett, V., Calamari, D. and Jones, K. C. : A study of the spatial distribution of PCBs in the UK atmosphere using pine needles. *Chemosphere*, **32**, 2189-2203, 1996.
23. Wendy, A. C., Steinnes, E., Parker, C. and Kevin, C. J. : Observations on persistent organic pollutants in plants: implications for their use as passive air samples and for POP cycling. *Environ. Sci. Technol.*, **32**, 2721-2726, 1998.
24. Wenzel, K.-D., Andrea, H., Michael, M., Ludwig, W., Werner, E. and Gerrit, S. : Accelerated solvent extraction of semivolatile organic compounds from biomonitoring sample of pine needles and mosses. *Analytical Chemistry*, **70**, 4827-4835, 1998.
25. Yeo, H.-G. and Cho, K.-C. : Gas/particle level and dry deposition flux of atmospheric PCBs. *Korean Society of Environmental Health(KSEH)*, **29**, 10-16, 2003.