

PCBs의 대기-식물간 분배 특성 인자들

Characteristic Factors of Air-Plant Partitioning of PCBs

여현구* · 최민규 · 천만영¹⁾ · 김태욱¹⁾ · 선우영
건국대학교 환경공학과, ¹⁾한경대학교 환경공학과
(2001년 7월 20일 접수, 2001년 10월 8일 채택)

Hyun-Gu Yeo*, Min-Kyu Choi, Man-Young Chun¹⁾,
Taewook Kim¹⁾ and Young Sunwoo
Department of Environmental Engineering, Konkuk University,
¹⁾Department of Environmental Engineering, National Hankyong University
(Received 20 July 2001; accepted 8 October 2001)

Abstract

The concentrations of PCBs (polychlorinated biphenyls) in air and plants (*Morus allba*, *Allum turberosum*) were measured every other week at Hankyong University located in Ansong, Kyoung-ki province, Korea from July to November in 1999. Total concentrations of PCBs in air ranged from 19.8 to 71.9 pg/m³. It was observed in air that the concentrations of tri-chlorinated biphenyls (CBs) were higher than those of other PCB homologs probably due to their higher vapor pressure. Total concentrations of PCBs in plants ranged from 245 to 1,287 pg/g dry weight for *Morus allba* and 26.5 to 337 pg/g dry weight for *Allum turberosum*.

A positive linear correlation was observed between log plant-air partition coefficients (m³ air/g plant dry weight-defined here as the scavenging coefficient[S.C]) and log octanol-air partition coefficients (K_{oa}) for each plant. In this study, slope of log S.C and log K_{oa} for *Morus allba*, *Allum turberosum* were 1.07 ($R^2=0.83$, $p<0.01$), 0.84 ($R^2=0.53$, $p<0.05$), respectively. This means that these plants may approach to equilibrium for air-plant partitioning.

Key words : PCBs, plants, rural area, scavenging coefficient, K_{oa}

1. 서 론

식물은 반휘발성 유기화합물 (semivolatile organic compounds; SOC)의 전지구적인 순환과 인간과 동물의 먹이연쇄에 있어서 중요한 역할을 하고 있어 최근 들어 관심의 대상이 되고 있다 (Simonich and

Hites, 1995). 식물은 대기 중의 가스상 및 입자상 SOC를 지질층 (cutin, wax, pectin 등)에 흡착시켜 제거하거나, 재회발에 의해 대기 중의 농도를 변화시킨다. 또한 식물은 난분해성 유기화합물 (persistent organic pollutants: POP)의 대기 중 이동과 지구적인 이송 및 순환을 야기시키는 중요한 matrix가 된다. 그러나 현재까지 SOC의 대기과 식물로 교환에 대한 확실한 mechanism이 규명된 것은 아니다 (Gareth *et al.*, 1998). SOC (예: PAHs (polycyclic

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-453-2706, E-mail : hgyeo@kkucc.konkuk.ac.kr

aromatic hydrocarbons), PCDD/F (polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furan), PCBs (polychlorinated biphenyls), OCs (organochlorine pesticides 등)의 식물로의 이동경로는 매우 다양하며 그 중 토양에서 휘발된 가스상 성분이 식물잎의 지질에 노출될 수 있고 또한 대기 중에 존재하는 SOCs의 습성/건성 침착에 의해 식물로 침착될 수 있다 (Trapp and Matthies, 1997). Trapp and Matthies는 토양 중 PCDD/F의 휘발실험을 통해 식물이 지표면에 접해 있거나, 오염이 심한 토양을 제외하고는 토양에 의한 영향은 매우 작다고 보고하였다. 또한 Gareth *et al.* (1998)는 SOCs의 건성침착에 의한 식물의 섭취 경로 (uptake pathway)를 1차 동력학 (kinetics)으로 설명하였는데, 식물로의 SOCs 섭취는 아직까지 확실히 정립된 상태는 아니고 이것은 식물의 미기상학적 측면, 온도 변화, 토양-대기-식물로의 이동경로에 의해 좌우될 것이라고 언급하였다. Macro *et al.* (1993)의 연구에 의하면 대기-식물의 SOCs의 이동은 세 가지 mechanism으로 분류할 수 있는데, 첫째 “가스 이동 (gas route)”은 대기 중 가스상 SOCs의 식물 표면의 외층과 내부층(기공 (stomatal)과 공기실 (air chamber))으로 흡착 및 흡수과정, 두 번째 “입자 이동 (particle route)”은 입자상 SOCs의 침착과정을 통한 식물잎으로의 이동과정, 세 번째 “수분 이동 (water route)”은 입자 및 가스상 SOCs가 식물잎 표면의 수분에 의해 흡수되는 과정으로 보고하였다. Romney *et al.* (1963)의 보고에 의하면, SOCs 화합물의 식물로의 건성침착에 있어서 중요인자는 입자의 직경이며 100 μm 이하의 직경을 가진 화합물들이 식물의 잎에 침착될 수 있다고 하였다. 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, b). 즉, SOCs의 이동경로는 식물의 뿌리를 통해 흡입되는 양은 미약하며 대기 중에서 식물잎의 지질층에 침착되므로 식물잎에 침착된 오염물질은 대기의 농도에 의존한다고 할 수 있다. 그래서 식물은 대기 중 SOCs의 농도를 예측할 수 있는 바이오 모니터링 (biomonitoring)으로 사용되고 있다. 특히 식물은 오염도가 심한 지역의 대기 중 SOCs의 간접 모니터링에 적합할 뿐만 아니라, 측정하기 어려운 지역의 대기오염도를 예측

하는데에도 중요한 역할을 하여 현재 여러 나라에서 식물을 바이오 모니터링에 이용한 오염도 조사가 실행되고 있다 (백성욱, 1999; 유시균 등, 1999; 천만영, 1998; 천만영과 김태욱, 1998; Bacci *et al.*, 1990a). 본 연구에서는 1999년 7월부터 1999년 11월까지 부추 (*Allium tuberosum*)와 측정지점에서 50 m 떨어진 곳에서 자생하는 뽕잎 (*Morus allba*) 및 대기시료를 동시에 채취하여 대기와 식물간 PCBs 이동에 있어서의 영향 인자를 파악하고자 한다. 또한 향후 본 연구의 결과는 PCBs의 대기/식물간의 실제 대기 예측 모델에 적용하여 검증 및 신뢰성 조사할 때 기초자료로 활용할 계획이다.

2. 실험방법

2.1 더기와 식물 채취

대기시료는 PUF (polyurethane form) 시료채취기를 이용하여 입자상 (Whatman $\phi 47$ mm glass fiber filter; 이하 GFF)과 가스상 (PUF)을 동시에 채취하였으며 전체 유량은 약 600 m^3 로 2주간 측정하였다. 측정전 PUF와 GFF는 디클로로메탄 (Dichloromethane; 이하 DCM) 250 ml를 이용하여 Soxhlet에서 세척하여 진공건조기에서 용매를 완전히 건조시킨 후 측정에 사용하였다. GFFs와 PUFs는 유리 초자에 넣어 -26°C 의 냉동고에 보관하였으며, 취급시 오염을 최대한 줄였다.

식물시료는 대기와 동일한 주기로 환경대학교 내의 밭에서 나무로 제작한 1 m^2 상자에서 키운 부추 (*Allium tuberosum*; 이하 A.T.)와 측정지점에서 50 m 떨어진 곳에서 자생하는 뽕 (*Morus allba*; 이하 M.A.)잎을 채취하였으며, 채취된 시료는 PE 봉지에 보관하여 대기시료와 마찬가지로 분석전까지 -26°C 의 냉동고에 보관하였다. 그리고 본 연구에서 사용된 기상시료는 환경대학교 교내에서 측정하고 있는 AWS (auto-weather system)을 이용하였다.

시료채취는 안성시 석정동에 위치한 환경대학교 내의 잔디밭에서 1999년 7월부터 1999년 11월까지 2주 간격으로 10회 측정하였다.

2.2 전처리 및 분석방법

식물시료 약 10 g과 헥산 (hexane): 아세톤 (acetone)

(4:1) 혼합용매 100 ml를 250 ml 갈색병에 넣고 초음파 추출기에서 2시간 연속추출 후 추출액을 플라스크로 옮긴 다음, 다시 hexan: 아세톤(4:1) 혼합용매 100 ml를 가하여 1시간 더 추출하여 추출액을 합한 후 회전증발농축 (rotaevaporator: BUCHI社, R-124)에서 2~3 ml까지 농축하였다. 농축된 시료는 분석시 방해물질로 작용하는 지질 및 엽록소를 제거하기 위하여 실리카 컬럼을 통과시켰고, 컬럼 하단부터 산성 실리카 (acidified silica) 3 g, 활성 실리카 (activated silica: Merck社, TA157134) 1.5 g 및 Na₂SO₄ (Dulksan社, GR grade)를 일정량 넣은 다음 hexan 30 ml로 충전 물질을 세척한 후 시료를 넣고 hexan 15 ml, 디클로로메탄 (DCM): hexan (1:1)을 10 ml 및 DCM 35 ml를 컬럼에 차례로 통과시켰다. 실리카 컬럼을 통과한 시료는 회전 증발농축기에서 약 1 ml까지 농축하였다. 그러나 실리카 컬럼 통과 후에도 제거 되지 않은 시료중의 오염물질 및 지질은 GPC (gel permeation chromatography)로 다시 정제하였다.

Bio-Bead (Bio-RAD社, 152-2750)가 충전된 GPC 컬럼은 hexan:DCM (1:1) 혼합용매를 사용하여 시료를 용출시키는데 용출시 처음 34 ml는 지질 및 불순물이 용출되는 부분이므로 버리고 나머지 106 ml를 취하여 회전증발농축기로 2 ml 정도까지 농축하여 keeper로 dodecane (Sigma社, D-4259)을 가하여 N₂농축기로 최종부피를 50 µl로 한 후 GC/MSD (HP社, HP-5973)로 분석하였다. 대기시료 중 PCBs

는 Soxhlet에서 hexan:DCM (9:1) 혼합용매 250 ml로 24시간 동안 GFF와 PUF를 함께 추출하였다. 추출된 시료는 회전증발농축기를 이용하여 2~3 ml까지 농축하고 실리카 컬럼과 GPC 컬럼을 이용하여 정제한 후 keeper로서 dodecane을 가하여 최종 부피를 50 µl로 하였고 GC/MSD로 분석하였다(표 1).

2.3 정도 관리(Quality Control/Assurance)

PCBs의 정도관리를 위해서 식물과 대기에서 회수율 실험, 중복실험 및 표준시료의 선형성평가를 실시하였다. 대기시료의 회수율은 5개의 PUF에 PCBs isotope (Cambridge Isotope Lab. ID-091)인 PCB 28, 52, 101, 153, 138, 180 및 209를 100 µl (50 pg/µl)씩 spiking한 후 시료의 전처리 과정과 동일한 방법을 실행한 결과를 표 2에 나타내었다. 그 결과 PCBs isotope의 회수율은 62.9±7.3 (PCB 52)~116.6±10.2 (PCB 180)으로 나타났다.

실제 식물시료간의 중복실험 (duplicate test)은 총 7개의 시료를 무작위로 2회씩 추출하여 두 시료에서 검출된 PCB congeners의 MPD (mean percent of difference)를 산정하였다. 그 결과, PCB 28, 52, 110, 153, 149 및 138의 MPD (R²)는 각각 10.7% (0.87), 9.8% (0.91), 7.4% (0.98), 12.2% (0.92), 13.9% (0.89) 및 8.6% (0.99)로 검출된 모든 PCBs의 MPD가 20% 미만을 나타내어 양호한 결과를 보였으나 R²는 PCB 28과 PCB 149에서 다소 낮았다.

PCBs의 표준시료에 대한 선형성 평가 결과, 총 33개의 분석대상 PCBs의 결정계수 (R²)는 0.9917 ~ 1.000의 양호한 결과를 나타내었으며, 영국의 Lancaster University (1995)에서 펴낸 PCBs QA/QC Protocol에서는 각 PCBs congeners별 결정계수를

Table 1. GC/MSD operating parameters for PCBs analysis.

Detector	MSD
Column	HP-5MS capillary column (5% diphenyl & 95% dimethylpolysiloxane) length 30 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 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
Carrier gas	He (99.9999%)
Total run time	45 min

Table 2. Recovery tests of air and plants [%].

PCB congeners	Air (n=5)	Plants	
		<i>Morus allba</i> (n=6)	<i>Allum turborusum</i> (n=6)
PCB 28	77.2±5.5	81.2±13.4	76.5±4.1
PCB 52	62.9±7.3	78.7±13.4	61.5±4.3
PCB 101	78.0±9.2	91.9±14.7	70.1±4.2
PCB 153	100.8±9.7	97.9±18.6	79.5±6.9
PCB 138	106.1±8.2	105.5±21.2	85.0±8.5
PCB 180	116.6±10.2	110.5±19.5	87.0±8.6
PCB 209	116.0±13.4	103.2±19.3	78.7±9.7

0.985 이상이 되어야 한다고 언급하고 있다. PCBs의 검출한계인 LOD (limit of detection)는 예상되는 검출한계의 1.5배 정도로 조제하여 6회 반복 분석한 표준물질의 농도의 평균에 표준편차의 3배를 곱해서 산정하였다 (LOD = 평균 + 3 × 표준편차). 그 결과 식물 중 PCB congeners별 LOD는 0.94 (PCB 60)~2.49 pg/g DW (PCB 52)이었고, 대기 중 LOD는 0.011 (PCB 18)~0.124 pg/m³ (PCB 52)을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대기 중의 PCBs (입자상+가스상) 농도

측정기간 중 온도, 풍속 및 강우량은 각각 8.00~28.5°C, 0.23~0.86 m/s 및 18.5~593 mm의 범위였으며, 8월 17일~8월 31일에 가장 높은 온도인 28.5°C를 나타내었으며, 7월 20~8월 4일에 가장 많은 강우량인 593 mm를 보였다. 그림 1은 대기 중 PCB congeners (가스+입자)의 농도 분포를 나타낸 것이다. 이 기간 중 검출된 PCB congeners는 총 24종 [tri- (PCB 18, 27, 28, 33, 38), tetra- (PCB 47, 49, 52, 60, 61/74, 66), penta- (PCB 87, 101, 110, 118, 126), hexa- (PCB 149, 153, 156, 157), hepta- (170, 180/193, 183, 187), deca- CB (PCB 209)]으로 Σ₂₄PCB (이하 총 PCBs)의 평균농도는 19.9 pg/m³ (6.13~71.9 pg/m³)이었으며, tri-CBs (9.29 pg/m³) > tetra-CBs (5.03 pg/m³) > penta-CBs (3.51 pg/m³) > hepta-CBs (1.24 pg/m³) > hexa-CBs (0.55 pg/m³) > deca-CB (0.20 pg/m³)의 순으로 높은 농도를 보였다. 즉, Cl의 수가 증가할수록 대기 중의 농도가 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 PCBs의 물리·화학적 특징인 K_{oa} (octanol-air partition coefficient), K_{ow} (octanol-water partition coefficient), 증기압 (vapor pressure) 및 용해도 (solubility) 등으로 설명할 수 있다 (표 3). 표 3에서 보는 바와 같이 Cl 수가 증가할수록 (> penta-CBs) K_{oa}와 K_{ow}가 증가하여 tri-, tetra-CBs에 비해 식물이나 토양 및 수계의 지질층에 잘 침적되는 친지질성 특성을 보였고, 또한 증기압은 낮은 값을 보여 대기로의 휘발능이 감소되는 경향을 보였다. 그러므로 대기 중에서 고농도를 보이는 PCB homologs는 대개 가스상 형태로 존재하

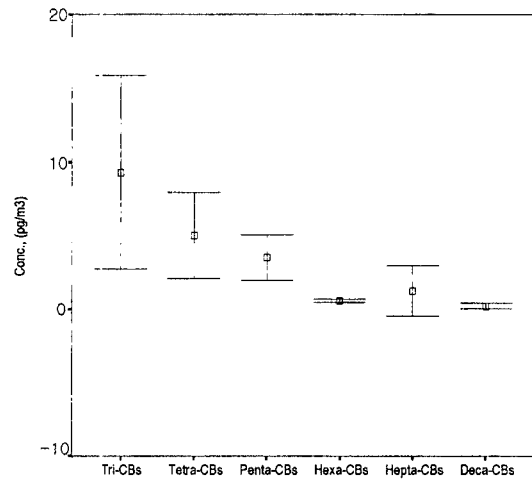


Fig. 1. Distribution of PCB homologs (error bar: 95% confidence interval).

Table 3. The physical-chemical properties of PCB homologs (Harner and Bidleman, 1996; Brodsky and Ballschmitter, 1988).

Homologs	logK _{oa}	logK _{ow}	Vapor pressure (mmHg)
Tri-CBs	8.19	5.47	1.1 × 10 ⁻⁴
Tetra-CBs	8.68	5.95	1.0 × 10 ⁻⁴
Penta-CBs	9.50	6.34	1.1 × 10 ⁻⁵
Hexa-CBs	9.94	6.75	5.5 × 10 ⁻⁶
Hepta-CBs	10.3	7.06	1.3 × 10 ⁻⁶
Deca-CBs	14.0	9.60	

는 tetra-CBs 이하의 PCBs가 주종을 이루었으며 이는 Gareth *et al.* (1998)이 조사한 결과와 일치하였다.

3.2 식물중의 PCBs 농도

측정기간 중 2주 간격으로 채취한 부추 및 뽕잎의 PCB congeners별 농도를 표 4에 나타내었다. Greath *et al.* (1998)은 영국에서 잔디 (grass)를 이용하여 대기노출 시간을 다르게 하여 (2주, 6주 및 12주) 노출시간에 따른 대기/식물간 PCBs의 평형실험을 하였다. 그 결과 거의 대부분의 PCB congeners는 2주 정도 대기에 노출된 후에 대기/식물간의 평형에 도달하였다. 물론 식물 종과 측정지점 및 대기질의 차이에 따라 대기와 식물간의 평형 도달 시간의 차이는 있겠지만 식물을 2주 정도 대기에 노출시키

배 높은 농도를 보였다. 이는 두 식물간의 물리·화학적 특징으로 설명할 수 있는데 친지질성 유기오염물질이 식물로 침착되는 주된 메카니즘은 수분함량, 식물종별 잎의 단면적, 지질의 양에 의해 좌우되는데 (Schreiber and Schonherr, 1992), 본 연구에서 조사된 뽕과 부추의 수분함량은 각각 76, 90%로 뽕이 부추에 비해 1.2배 낮았고, 지질의 양은 각각 3.4, 1.3%로 뽕이 부추에 비해 3배 정도 높았고, 또한 뽕과 부추 잎의 표면적/무게 비도 뽕이 부추에 비해 매우 크게 나타나 대기에서의 침착 (deposition) 및 토양에서의 휘발 (volatilization)에 의한 영향을 뽕이 부추에 비해 크게 받은 것으로 사료된다. 또한

식물내의 지질의 양과 두 식물에서 검출된 총 PCBs의 상관계수 (r)는 0.70 ($p < 0.05$)으로 지질의 양이 증가할수록 흡착가능한 PCB 농도가 증가함을 보였다. 그러나 뽕과 부추에서 조사된 수분함량 및 식물잎의 표면적/무게 비와 총 PCBs의 상관분석을 한 결과 유의한 상관성을 나타내지 않았다. 즉 본 측정기간 중 식물종 내의 수분함량과 식물잎의 표면적/무게비는 식물의 총 PCBs 농도변화에 영향을 주지 못한 것으로 판단된다. 그러므로 본 측정기간 중 식물 종 내의 지질의 양은 PCB와 같은 친지질성 화합물의 흡착에 중요한 인자로 작용한 것으로 판단된다.(그림 3).

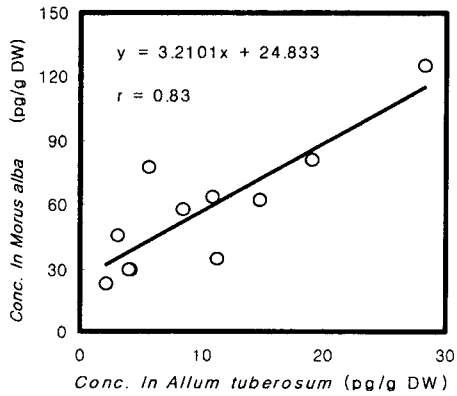


Fig. 2. Correlation of the amount for PCB congeners detected in plants ($p < 0.01$).

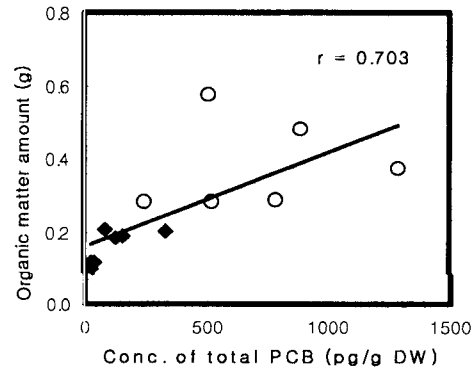


Fig. 3. Correlation between total PCB and organic matter amount in plants (○; *Morus alba*, ◆; *Allium tuberosum*).

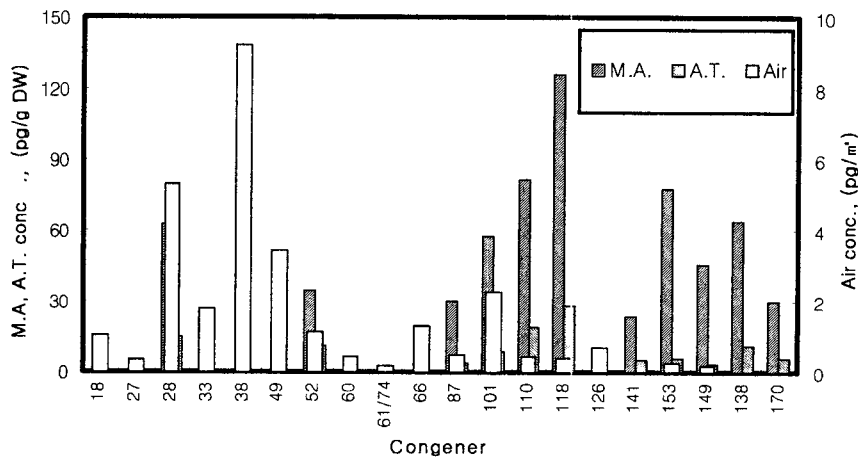


Fig. 4. Congeners concentration averaged over bi-weekly air and plant samples.

3. 3 식물과 대기 중 PCBs의 관련성

3. 3. 1 PCB congeners별 농도와 K_{oa} 의 관련성

그림 4는 대기와 식물중별로 검출된 PCB congeners별 농도를 나타내었다. 식물에서 검출된 PCB congeners는 총 13종(부추), 14종(뽕)으로 대기에서 검출된 24종에 비해 적게 나타났다. 특히 tetra-CBs 중 PCB 18, 27, 33, 38, 60, 61/74 및 66은 대기에서만 검출되고 식물에서는 검출되지 않았다. 또한 penta-CBs 이상의 congener는 대기보다는 식물에서 상대적으로 높은 증가율을 보였으며, 이는 PCBs의 대기-식물간 이동은 식물의 지질층에 위 성분이 분배(partitioning)됨으로서 나타나고 이것은 congeners별 K_{oa} 에 의해 침착율의 차이가 나타난다(Gareth *et al.*, 1998). 그래서 각 congeners별 log K_{oa} 값을 살펴본 결과, tetra-CBs 이하의 congeners는 8.39~9.82를 나타낸 반면 penta-, hexa-, hepta-CBs은 9.79~11.42를 보여 penta-CBs 이상의 congeners일수록 식물의 지질층에 잘 침착되는 친지질성경향을 뚜렷히 나타냈다. 그러므로 대기 중에서 penta-CBs 이상의 congeners의 농도가 식물에 비해 상대적으로 낮거나 검출한계 이하인 것은 K_{oa} 의 차이에 의해 기인된 것으로 판단된다. 즉, K_{oa} 는 대기-식물간의 PCB congeners별 침착 및 휘발특성을 파악하는데 있어서 매우 유용한 지표가 될 것으로 판단된다(Riederer, 1990).

3. 3. 2 온도와의 관련성

그림 5는 PCB homologs별로 두 식물과 대기에서 조사된 농도의 여름/가을 비를 나타낸 것이다. 측정

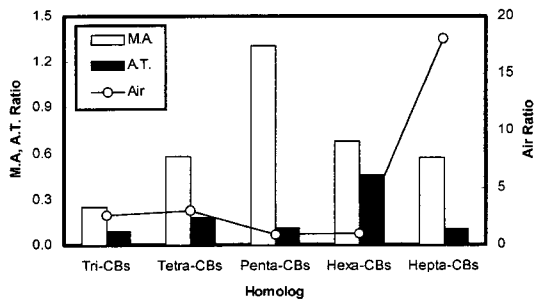


Fig. 5. Ratio of Summer/Fall concentration for PCB homologs.

기간 중 여름과 가을의 평균온도는 26.1, 15.5°C로 여름이 가을에 비해 10°C 이상 높아 온도 의존성을 크게 나타낼 것으로 판단되었다. 뽕과 부추의 PCB homologs 별 여름/가을 농도비는 대부분 1 이하(뽕에서 penta-CBs 제외) 값을 보여 여름보다 가을에 높은 농도를 보인 반면 대기 중 PCB homologs의 여름/가을 농도비는 대부분 1 이상(penta-CBs 제외)의 값을 보여 여름이 가을에 비해 높은 농도를 보였다. 그래서 계절별 대기 중 온도 변화에 따른 총 PCBs의 농도 및 온도와의 상관성을 살펴보았다. 그 결과, 두 식물종과 온도와의 상관계수(r)는 뽕에서 -0.34(p=0.51)으로 유의한 수준을 보이지 않았지만 음의 상관성을 나타낸 반면, 부추에서 -0.88(p<0.01)로 양호한 음의 상관성을 보였다. 즉 대기 중 온도의 상승은 식물 종내의 PCBs 농도의 감소 경향을 나타내고 식물에서 대기로 PCBs의 이동 및 분배를 야기 시킨다. 또한 대기 중 총 PCBs와 온도의 상관계수는 0.42(p<0.05)로 다소 양호한 상관관계를 나타내어 온도상승에 의한 대기 중 총 PCBs의 증가를 확인할 수 있다. 즉 두 식물종과 대기에서의 총 PCBs 농도는 온도의존성이 크게 나타내어, 대기 중의 온도가 상승함에 따라 식물 중 PCBs의 농도는 감소하는 경향을 보인 반면, 대기 중의 PCBs의 농도는 증가경향을 보였다. 즉 계절에 따른 대기온도의 변화는 PCBs의 대기-식물 분배에 있어서 주요 인자인 침착 및 휘발에 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 조사된 두 종의 식물종은 여름철에 자라서 가을철에 고사하는 식물이므로 사계절 특성을 잘 나타낼 수는 없지만 솔잎과 같이 사계절에 자생하는 식물을 이용한다면 계절별 온도변화에 따른 PCBs의 대기-식물 분배 및 이동특성을 좀 더 명확히 설명할 것으로 판단된다. 이 부분은 앞으로 좀 더 연구가 진행되어야 할 사항으로 생각된다.

3. 3. 3 대기에서 식물로의 PCBs 분배(partitioning)

대기 중 PCBs의 농도(pg/m^3)와 식물 중 PCBs 농도(pg/g dry weight or organic content)를 이용하면 식물중으로 대기 공기의 제거량(specific scavenged volume of air) 또는 식물 g당 흡입할수 있는 공기량(m^3/g , scavenging coefficient)을 확인할 수 있다. 이 변수(parameter)는 대기-식물 모델링의 목적으로

매우 유용한 자료가 된다. 이 계산은 대기과 식물시료에서 동일하게 검출된 8종의 PCB congeners (PCB 28, 52, 87, 101, 110, 118, 149, 153)에 적용하였으며 그 결과는 표 5에 나타내었다. 앞에서 언급한 바와 같이 Penta-CBs 이상으로 분자량이 큰 congeners의 분배는 분자량이 작은 congeners에 비해 식물 쪽에서 상당히 크게 나타났다. 예를 들어 측정기간 중 PCB congeners별 식물과 대기의 평형에 필요한 공기의 양은 PCB 28의 경우 0.4~15.5 m³/g인 반면 PCB 153의 경우 2.8~61.4 m³/g로 나타났다. 즉 고분자 PCB congeners일수록 대기과 식물간의 평형에 도달하기 위해서는 많은 양의 공기가 필요할 것으로 판단된다. 만일 위의 값이 PCB congeners별로 대기과 식물의 평형을 판단하는 인자로 표현할 수 있다면, 이것은 대기 중의 온도와 식물의 흡착표면에 의해서 좌우될 것이다 (Gareth *et al.*, 1998). 많은 연

구자들은 SOCs의 대기-식물의 이동을 묘사하는데에는 K_{oa} 를 이용하여 평형관계를 파악하는 것이 유용하다고 언급하였다 (Tremolada *et al.*, 1996; Marco *et al.*, 1993; Bacci *et al.*, 1990a). 표 5에 나타난 K_{oa} 값은 Harner and Bidleman (1996)이 제시한 값을 사용한 것이다.

그림 6은 log scavenging coefficient (m³ air/g plant dry weight; 이하 logS.C)와 log K_{oa} 의 회귀식을 나타낸 것이다. 팥과 부추에서 logS.C와 log K_{oa} 의 회귀식은 아래의 식 (1)과 식 (2)에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{Morus alba} : [\log S.C] &= 1.07 [\log K_{oa}] - 7.79 \quad (1) \\ \text{Allum tuberosum} : [\log S.C] &= 0.84 [\log K_{oa}] - 6.95 \quad (2) \end{aligned}$$

그림 6은 대기과 식물 2종간의 회귀식을 보여주고 있는데 특히 팥 ($R^2=0.83$)이 부추 ($R^2=0.54$)에 비해 매우 강한 선형성을 보여주고 있다. 즉 K_{oa} 값은 octanol을 이상적인 물질 (surrogate)로 가정하고, 대기과 식물이 평형을 이룬 상태에서 산정된 것이므로 회귀식의 기울기가 1에 가깝다는 것은 대기/식물이 평형을 이루었다는 것을 뒷받침해 주는 것이다. 만약 식물로 공급되는 공기의 양이 제한된다면 회귀식은 직선이며 기울기가 작을 수 있으며 또는 직선관계가 아닌 곡선관계를 나타낼 것이고 특히 높은 K_{oa} 값을 갖는 PCB congeners는 평형에 도달할 만큼의 공기를 공급받지 못해 대기/식물간의 평형에 도달하지 못할 것이다. 그러나 본 연구에서의 회귀식은 양호한 선형관계를 보였고, 특히 팥의 기울기는 거의 1에 가까워서 PCB congeners 중별 대기/식물이 평형에 도달하였지만, 부추의 기울기는

Table 5. Log scavenging coefficients of plants (*Morus alba*, *Allum tuberosum*), together with log K_{oa} data for selected congeners (July–October, 1999).

Congeners	log S.C. [m ³ /g] mean (range)		log K_{oa} ²⁾ at 10°C
	<i>Morus alba</i>	<i>Allum tuberosum</i>	
28	1.15 (-0.78~1.60)	0.54 (-0.69~1.19)	8.76
52	1.47 (0.66~1.73)	1.07 (0.05~1.53)	9.10
87	1.82 (1.10~2.21)	0.84 (0.14~1.19)	9.96
101	1.69 (0.37~2.18)	0.89 (0.26~1.28)	9.79
110	N.A. ¹⁾	1.80 (0.92~2.43)	10.0
118	3.49 (1.84~3.74)	2.98 (0.02~3.60)	10.7
149	2.59 (0.89~2.98)	1.47 (0.45~1.79)	10.3
153	2.79 (0.57~3.32)	1.41 (0.85~1.84)	10.5

¹⁾N.A. : Not analysed, ²⁾Harner and Bidleman (1996)

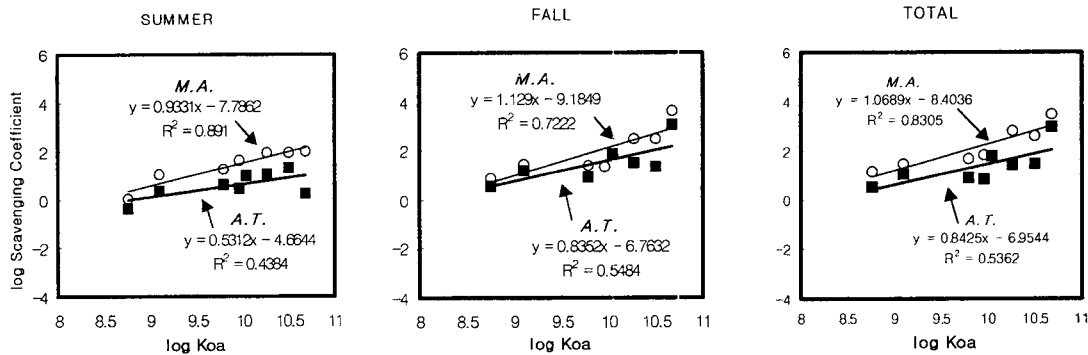


Fig. 6. Log plant-air partition coefficients against log octanol-air partition coefficients.

0.84로 대기/식물간의 평형에 다소 도달하지 못했다. Peter and Michael (1997)은 K_{oa} 와의 회귀식에서 기울기가 만약 1 이상일 경우는 식물 내의 지질이 가지는 친지질성(liphophilicity)이 octanol에 비해 큰 것이고 1 이하일 경우는 octanol의 친지질성이 식물 내의 지질에 비해 더 크다고 보고하였다. 그러므로 본 연구에서 조사한 두 식물종에서 $\log S.C$ 와 $\log K_{oa}$ 의 기울기 차이는 식물종별로 보유하고 있는 지질의 물리/화학적 특성의 차이로 판단 된다. Gareth *et al.* (1998)이 런던의 교외지역에서 2주간 키운 잔디와 대기의 농도를 이용해서 구한 $\log S.C$ 와 K_{oa} 의 회귀식의 기울기는 여름에 0.32, 가을에 0.44 및 겨울에 0.47로 나타나 본 연구에 비해 낮은 값을 보여 평형에 도달하지 못한 결과를 나타내었고 또한 Gareth *et al.* (1998)은 잔디와 목초를 2주, 6주, 12주간격으로 공기와 노출시간을 다르게 하여 평형관계를 조사한 결과 대부분의 PCB congeners들은 2주 내에 대기/식물간의 평형을 도달하였지만, 식물종과 PCB congeners 종별로 평형에 도달하는 기간의 차이를 보였다고 보고하였다. 특히 $\log K_{oa}$ 값이 10 이상이 되는 고분자 PCB congeners는 빵과 부추의 회귀식에서 벗어나는 경향을 보여주고 있는데 이는 저분자 PCB congeners일수록 식물잎의 내부로 빠르게 침투되어 대기/식물간의 평형관계에 도달하지만 고분자 PCB congeners는 식물잎의 내부로 침투되는 속도가 늦어 평형관계에 도달하기 어렵다(Peter *et al.*, 1997). 이처럼 본 연구에서 조사된 빵과 부추에서 PCB congeners별 대기/식물간의 평형관계는 식물종별로 다소 차이를 보였고 이는 빵이 부추에 비해 2주 이상 대기와 노출되었기 때문에 평형에 도달할 수 있는 충분한 공기를 식물의 지질층내로 흡착하여 빵이 부추에 비해 기울기가 1에 근접한 것으로 판단된다. 만일 위와 같은 대기-식물간의 평형관계가 측정변화, 계절변화 및 식물종의 변화에 관계없이 유의한 결과를 얻을 수 있다면 식물을 이용한 대기 중 PCBs의 바이오 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

결 론

경기도 안성시에 소재한 환경대학교에서 1999년

7월부터 1999년 11월까지 식물과 대기 중 PCBs의 농도 분포 및 분배특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 대기 중 총 PCB 중 tri-CBs 차지하는 비율은 44.5 %로 PCB homologs의 주요 종이었으며, 이는 tri-CBs의 증기압이 다른 homologs에 비해 커서 대기 중에서 가스상 형태로 존재하기 때문에 판단된다.

2. 빵과 부추에서 검출된 총 PCB의 평균농도는 지질의 양이 3배 정도 많은 빵이 부추보다 6.6배 높은 농도를 보였다.

3. 부추와 빵 중 총 PCB와 대기 온도는 모두 음의 상관성을 보여 온도 증가시 식물에서 대기로 PCBs의 분배 특성을 가속시킨 것으로 판단된다.

4. 대기와 식물종별 $\log S.C$ (scavenging coefficient)와 $\log K_{oa}$ 의 회귀분석 결과 두 식물 모두 기울기가 거의 1을 나타내어 대기/식물간의 평형관계를 확인하였다. 이처럼 대기-식물간의 평형식을 이용한다면 식물을 이용한 대기 중 PCBs의 바이오 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 백성욱(1999) 대기 중 다환방향족탄화수소- 환경학적 고찰, 한국대기환경학회지, 15(5), 525-544.
- 유시균, 김태욱, 천만영(1999) 다환방향족 탄화수소의 나뭇잎 침착, 한국환경농학회지, 18(2), 116-121.
- 천만영(1998) 대기 중 PCBs의 침엽수잎 침착에 관한 연구, 대한환경공학회지, 20(10), 1377-1383.
- 천만영, 김태욱(1998) 소나무잎에 침착된 PCBs의 샘플링 오차에 관한 연구, 한국환경농학회지, 17(2), 117-121.
- Bacci, E., M.J. Cerejerira, C. Gaggi, G. Chemello, D. Calamari, and M. Vighi (1990a) Bioconcentration of organic chemical vapors in plant leaves : the azalea model. *Chemosphere*, 21, 525-535.
- Bacci, E., D. Calamari, C. Graggi, and M. Vichi (1990b) Bioconcentration of organic chemical vapors in plant leaves: experimental measurement and correlation, *Environ Sci Technol*, 24, 885-889.
- Brodsky, J. and K. Ballschmitter (1988) Reversed phase liquid chromatography of PCBs as a basis for the calculation of water solubility and $\log K_{ow}$ for polychlorobiphenyls, *Fres Z Anal Chem*, 331, 295-

- 301.
- EPA/600/P-96/001F (1996) PCBs: Cancer Dose-Response Assessment and Application to Environmental Mixtures, National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency Washington, DC.
- Gareth Thomas, Andrew J. Sweetman, Wendy A. Ockenden, Donald Mackay, and Kevin C. Jones (1998) Air-Pasture Transfer of PCBs, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 936-942.
- Harner, T. and T.F. Bidleman (1996) Measurements of octanol-air partition coefficients for polychlorinated biphenyls, *J. Chem. Eng. Data*, 41, 895-899.
- Lancaster University (1995) PCB QA/QC protocol-Second draft.
- Marco Morosini, Jorn Schreltmuller, Ulrich Reuter, and Karlheinz Ballschmiter (1993) Correlation Between C-6/C-14 Chlorinated Hydrocarbons Levels in the Vegetation and in the Boundary Layer of the Troposphere, *Environ. Sci. Technol.*, 27, 1517-1523.
- Romney, L.F., P.V. Hobbs, and M.W. Eltgorth (1963) Contamination of plant foliage with radioactive fallout, *Ecology*, 44, 343-349.
- Peter Komp and Michael S. McLachlan (1997) Interspecies Variability of the Plant/Air Partitioning of Polychlorinated Biphenyls, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 2944-2948.
- Riederer, M. (1990) Estimating partitioning and transport of organic chemicals in the foliage/atmosphere system: discussion of a fugacity based model, *Environ. Sci. Technol.*, 24, 829-837.
- Schreiber, L. and J. Schonherr (1992) Foliar penetration and accumulation of organic chemicals in plant cuticles *Environ. Sci. Technol.*, 26, 153-159.
- Simonich, S.L. and R.A. Hites (1995) Organic pollutant accumulation in vegetation, *Environ. Sci. Technol.*, 29, 2905-2914.
- Trapp, S. and M. Matthies (1997) Modelling volatilization of PCDD/F from soil and uptake into vegetation, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 71-74.
- Tremolada, P., V. Burnett, D. Calamari, and K.C. Jones (1996) A Study of the Spatial Distribution of PCBs in the UK Atmosphere Using Pine Needles, *Chemosphere*, 32, 2189-2203.