

서울, 안성지역 소나무 잎 중 PCBs와 PBDEs

이 성 희 · 여 현 구*

충주대학교 환경공학부, *강원지방중소기업청 기술지원과
(2007년 4월 9일 접수; 2007년 7월 23일 채택)

PCBs and PBDEs in Pine Needles of Seoul and Ansong

Sung-Hee Lee and Hyun-Gu Yeo*

Division of Environmental Engineering, Chungju National University, Chungbuk 380-702, Korea

*Technical Support Department, Gangwon Regional Small and Medium Business Administration, Gangwon 200-944, Korea

(Manuscript received 9 April, 2007; accepted 23 July, 2007)

Polychlorinated biphenyls(PCBs) and polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) were measured in pine needles of Seoul, and Ansong(GyeongGi-do) to investigate composition, source, and regional concentration of PBDEs. Concentration of total PCBs in Seoul and Ansong showed 608, 945 pg/g DW (mean: 777 pg/g DW), respectively, also concentration of total PBDEs(pg/g DW) in Seoul and Ansong showed 7944, 14,255 pg/g DW(mean 11,100 pg/g DW). Tetrachlorinated biphenyls(Tetra-CBs) and Decabromodiphenyl ethers (Deca-BDE) were detected in relatively high concentration compared to other PBDE congeners in Seoul and Ansong. Correlation coefficients(r) of between PCB congeners in pine needles detected of Seoul and Ansong were significant ($r=0.85$, $p<0.01$). It suggested that PCBs concentration in pine needles may originate from secondary sources such as air-plant partition.

The similarity of between PBDE congeners profile to those of the technical mixture formulation (Bromkal 70-5DE) suggests a source of this product in these sites.

Key Words : PCBs, PBDEs, Pine needles, Technical mixture, Secondary sources

1. 서 론

잔류성유기염소계물질(persistent organic pollutants: POPs) 또는 반휘발성 유기화합물(semivolatle organic compounds : SOCs)은 중간정도의 증기압, 비극성 및 낮은 분해성등의 특성으로 전 지구적으로 생성 및 소멸을 반복하며 대류권내에서 긴 체류시간을 가지고 존재한다.

POPs의 대표적인 오염물질인 polychlorinated biphenyls(PCBs), orgnochlorine pesticides(OCPs) 및 polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furan(PCDD/F)는 대기, 식물, 수계 등 여러 환경매체에서 계속 검출 되고 있다¹⁾. 이 중 POPs의 대기 중 분포는 각각의 POPs 성분들의 물리/화학적 특성(예, 화학안

정도, 증기압, 친지질성 정도, 용해도 등)에 의해 재 휘발 및 침착을 통해 대기 중 농도에 영향을 준다.

또한, 브롬계 난연제(Brominated flame retardant [BFR])중 PBDEs(polybrominated diphenyl ethers)는 TV 세트, 개인 컴퓨터 외장, 전기회로 기판 등의 플라스틱 및 직물, 가정용품, 가구, 카펫벽 코팅, 자동차등의 화염방지제로서 사용되고 있다²⁾. 브롬계 난연제는 PBBs(polybrminated biphenyls), PBDEs 및 TBBPA(tetrabromo-bisphenol A)등 세 종류가 대표적이며, 이중 PBBs는 이미 1970년대부터 발암성과 간독성이 확인되어 사용이 금지되었다. PBDEs는 잠재적인(potential) 난분해성 유기염소계 화합물(Persistent Organic Pollutants: POPs)로 퇴적물, 육류, 어패류, 실내 공기, 혈액등 다양한 환경에서 검출되고 있다. PBDEs는 PCBs (polychlorinated Biphenyls)와 유사하게 환경에 확산되어 잘 분해되지 않는 잔류성, 난분해성 화합물이다. 또한 PBDEs는 높은 지용성(lipophilicity)때문에 환경 중 생체시

Corresponding Author : Hyun-Gu Yeo, Technical Support Department, Gangwon Regional Small and Medium Business Administration, Gangwon 200-944, Korea
Phone: +82-33-260-1631
E-mail: hgyeo@smba.go.kr

료에 잘 축적되며, 포유 동물조직에서는 조직 분해와 신진 대사가 상대적으로 적거나 느린 것으로 알려져 있다¹⁾. PBDE 함유제품(이하 technical mixture)은 penta-BDE, octa-BDE, deca-BDE technical mixture의 세 종류이며 이중 deca-BDE technical mixture는 97%가 deca-BDE이고 3% 정도가 nona-BDE이며, penta-BDE technical mixture는 BDE-47, -99, -100이 각각 37%, 35%, 6.8%로 구성되어 있다. 저 브롬화 화합물인 tetra-BDE와 penta-BDE는 상대적으로 고 브롬화 화합물보다 생물 농축이 잘 되는데 이는 생체내에서 고 브롬화 화합물의 분해 때문인 것으로 알려져 있다²⁾. 또한 deca-BDE는 실험실에서 고농도로 노출된 경우 암 유발 가능성이 보고 되었으며³⁾, octa-BDE와 penta-BDE는 deca-BDE보다 내분비계, 신경계, 생식기 등의 독성을 더 많이 미치는 것으로 알려졌다. 최근까지 PBDEs와 같은 브롬화 화합물은 환경 중에 대량으로 배출됨에 따라 대기, 토양, 수질 및 인체에서도 검출되고 있는 실정이다.

이처럼 PCBs와 PBDEs에 대한 환경 매트릭스(대기, 토양, 퇴적물, 수계)에서의 농도 및 거동 특성을 다양하게 파악하고 있으며 동물 및 어패류 실험을 통한 인체 유해성 평가를 지속적으로 연구하고 있다^{4~9)}. 그러나 현재 국내에서 환경 중 PCBs와 PBDEs에 대한 연구는 극히 미진한 상태이다. 이에 본 연구는 우리나라 전역에 자생하고 상록수로서 소나무 잎을 선정하여 서울과 안성지역에서 소나무 잎에 침착된 PCBs와 PBDEs의 동시 분석방법 정립 및 두 지역에서의 농도특성을 평가하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 전처리

소나무 잎은 서울(건국대학교)과 안성(한경대학교)에서 소나무 잎을 채취하였으며, 채취한 소나무 잎은 헥산과 디클로로메탄으로 미리 세척한 알루미늄 호일에 넣어 지퍼백에 보관하여 -26℃의 냉동실에 전처리 전까지 보관하였다.

소나무 잎의 전처리 방법은 채취한 소나무 잎 35g과 헥산(hexane):아세톤(acetone) (4:1 v/v) 혼합용매 100ml를 250ml 갈색병에 넣고 이때 농도보정 및 회수율 산정을 위해 시료에 surrogate로 ¹³C₁₂-labelled PCBs와 ¹³C₁₂-labelled PBDEs를 spike하였다. 시료는 초음파 추출기에서 2시간 연속추출 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(rota-evaporator: BUCHI 社, R-124)에서 2-3 ml

까지 농축하였다. 농축된 시료는 분석시 방해물질로 작용하는 지질 및 엽록소를 제거하기 위하여 다층(multi-layer) 실리카 칼럼을 통과시켰다. 실리카 칼럼 하단부터 중성실리카(neutral silica) 0.6 g, 알칼리 실리카(KOH coated silica) 1 g, 중성 실리카 0.6 g, 44% 산성실리카(acidic silica) 3 g, 22% 산성실리카 3 g, 중성 실리카 0.6 g, 질산은 실리카(AgNO₃ coated silica) 3 g, 무수 Na₂SO₄(Dulksan 社, GR grade) 6 g 넣은 다음 헥산 30 ml로 충전 물질을 세척한 후 시료를 넣고 헥산:디클로로메탄(9:1) 100 ml를 컬럼에 통과시켰다. 실리카 칼럼을 통과한 시료는 회전 증발농축기에서 약 1 ml 까지 농축하였다. 그러나 실리카 컬럼 통과 후에도 제거되지 않는 오염물질 및 지질은 GPC(gel permeation chromatography) 컬럼으로 다시 정제하였다. Bio-Bead(Bio-RAD 社, 152-2750)가 충전된 GPC 컬럼은 헥산:디클로로메탄(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 2 ml 정도까지 농축하여 keeper로 dodecane(Sigma 社, D-4259), internal standard로서 4,4'-dibromooctafluorobiphenyl (4,4'-DBOB) 25 μl를 spike한 다음 hot plate 위에서 질소로 최종부피를 25 μl까지 증발시킨 후 HRGC/HRMS(high resolution mass spectrometry, Hewlett-Parkard 6890 II/JMS-700)을 이용하여 PCBs와 PBDEs를 분석하였다(Table 1).

2.2. 정도관리

PCBs와 PBDEs의 정도관리를 위해서 회수율 실험(recovery analysis), 중복실험(duplicate analysis) 및 표준시료의 선형성평가(regression analysis)등을 실시하였다. PCBs의 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 회수율 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% 결

Table 1. Analytical conditions of PCBs and PBDEs with HRGC/HRMS¹⁰⁾

Instrument	PCBs	PBDEs
Column	DB-5MS capillary column length 60m× 0.25mm, film thickness 0.25 μ m	DB-5MS capillary column length 15m× 0.25mm, film thickness 0.1 μ m
Inlet	Splitless	Splitless
Aux temp.	300 $^{\circ}$ C	280 $^{\circ}$ C
Injection volume	1 μ l	2 μ l
Temp. program	150 $^{\circ}$ C for 2min. 4 $^{\circ}$ C/min. to 320 $^{\circ}$ C 320 $^{\circ}$ C for 10min	110 $^{\circ}$ C for 5min. 40 $^{\circ}$ C/min. to 200 $^{\circ}$ C, 200 $^{\circ}$ C for 5.5min. 10 $^{\circ}$ C/min. to 325 $^{\circ}$ C, 325 $^{\circ}$ C for 5min
Carrier gas	He(99.9999%)	He(99.9999%)
Total run time	51min.	32min.

과를 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(R²)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 조절하여 6회 반복 분석한 표준물질의 농도의 평균에 표준편차의 3배를 곱해서 산정하였다 (LOD = 평균 + 3× 표준편차). 그 결과 식물 중 PCB 동질체별 LOD는 0.94(PCB 60) - 2.49 pg/g dry weight(DW)(PCB 52)이었다. PBDEs의 회수율 실험은 시료의 전처리 과정(시료의 추출, 농축 및 정제)에서 필연적으로 수반되는 시료의 손실을 보정하기 위해 8종의 PBDEs surrogate(¹³C₁₂-labelled PBDEs)을 이용하여 시료의 전처리 과정과 동일한 조작을 행한 후 분석된 농도와 spike한 농도를 비교하여 회수율을 산정하였다. PBDEs surrogate의 회수율은 각각 BDE-3(116%), BDE-15(147%), BDE-28(149%), BDE-47(130%), BDE-99(130%), BDE-153(137%), BDE-154(126%) 및 BDE-183(100%)로 평균 129%로의 회수율을 보였다. 소나무 잎을 무작위로 2회씩 추출하여 중복실험을 하였고 각각의 시료에서 검출된 PBDEs 동질체에 대한 회귀분석을 행한 결과, 결정계수(R²) 및 회귀식의 기울기가 각각 0.99(p<0.001), 0.69(p<0.05)를 나타내었다. 또한 PBDEs 표준물질(calibration standard) 26종을 7단계로 희석하여 선형성을 파악한 결과 회귀식의 기울기가 0.991(BDE 85) - 1.000(BDE 126, 196, 207)로 나타났다. PBDEs의 검출한계인 LOD(limit of detection)는 예상되는 검출한계의 1.5배 정도로 조절하여 6회 반복 분석한 표준물질의 농도의 평균에 표준편차의

3배를 곱해서 산정하였다 (LOD = 평균 + 3× 표준편차). 그 결과 식물 중 PBDEs 동질체별 LOD는 0.08(BDE-7,-17,-28) - 10 pg/g dry weight(DW) (BDE-209)이었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PCBs와 PBDEs의 총농도

Fig. 1은 2곳의 소나무 잎에 침착된 총 PCBs와 총 PBDEs의 농도(pg/g DW)를 나타낸 것이다. 소나무 잎중 PCBs와 PBDEs는 각각 26종 및 20종이 검출되었고, 총 PCBs 농도(pg/g DW)는 서울과 안성에서 608, 945 pg/g DW 이었으며 총 PBDEs의 농도(pg/g DW)는 서울과 안성에서 각각 7944, 14,255 pg/g DW로 두 성분 모두 안성지역이 서울 지역에 비해 높게 나타났다. 국내·외에서 조사된 소나무 잎중 총 PCBs의 오염도를 확인한 결과, Shim et al.⁵⁾이 서울 (2,308 pg/g DW), 시화(2,230 pg/g DW), 강화(2,197 pg/g DW), 영동(649 pg/g DW) 및 충주 (600 pg/g DW)에서 조사된 총 PCBs의 농도는 본 연구의 서울과 안성의 평균농도(777

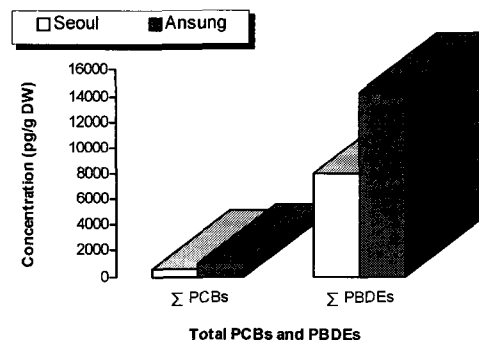


Fig. 1. Total concentrations of PCBs, PBDEs in pine needles of Seoul, Ansong.

pg/g DW)에 비해 서울, 시화, 강화보다는 낮은 농도를 영동, 충주에 비해 높은 농도를 보였다. Chun¹¹⁾이 영국에서 구주소나무 잎 1년생에서 조사한 총 PCBs 농도는 4,981 pg/g DW로 본 연구에 비해 6배 높은 농도를 보였다. Tremolada et al.¹²⁾이 영국의 교외지역 9곳에서 채취한 소나무 잎 중 총 PCBs의 농도는 340 pg/g DW — 8,700 pg/g DW로 측정지점별로 큰 농도차이를 보였다. 이는 측정지점 주변의 발생원 유무와 과거 PCBs의 사용량과 매우 밀접한 관련성을 가지는 것으로 판단된다. Yeo et al.¹⁰⁾이 국내 지역별로 1년생 소나무 잎을 채취하여 분석한 총 PBDEs의 농도는 청주 (94,227 pg/g DW), 대구(6,320 pg/g DW), 울산(4,067 pg/g DW), 부산 (2,752 pg/g) 및 파도리(2,160 pg/g DW)로 본 연구의 서울과 안성의 평균농도 (11,100 pg/g DW)에 비해 청주를 타지역보다 높은 농도를 보였다. 특히, 파도리 지역에서 총 PBDEs의 농도가 최소를 보인 이유는 이지역이 우리나라 배경농도지역으로 PBDEs에 관련된 특별한 점오염원이 없는 곳인 반면 청주 지역은 H사 반도체공장, L사 정유공장등 PBDEs의 잠재적인 발생원으로 평가되는 곳이기 때문이라 언급하였다¹²⁾. 이처럼 PBDEs도 PCBs와 마찬가지로 측정지점 주변의 발생원의 유무와 관련성이 있는 것으로 판단된다.

3.2. PCBs와 PBDEs 동족체 (homologs) 농도 특성

Fig. 2는 측정지점 별 PCBs와 PBDE homologs의 농도를 나타낸 것이다. 서울지역의 PCBs homologs의 농도는 tetra-CBs > penta-CBs > tri-CBs > hexa-CBs > hepta-CBs이었으며, 안성지역은 tetra-CBs > tri-CBs > hepta-CBs > penta-CBs > hexa-CBs로 두지역 모두 tetra-CBs가 최대농도를 보인 반면 최소농도를 보인 homologs는 차이를 보였다. 서울지역의 PBDE homologs 농도는 deca- > penta-

> tetra- > octa- > nona- > hexa- > tri- > di- > hepta-BDE 순이었으며, 안성지점은 deca- > nona- > penta- > octa- > tetra- > tri- > hexa- > di- > hepta-BDE 순이었으며, deca-BDE는 두 지점에서 모두 최대농도를 보였으며 hepta-BDE는 최소농도를 동일하게 나타내었다. 또한 측정지점 별 농도분율(%)을 살펴본 결과, 서울지점에서 PCBs homologs의 분율은 43%(tetra-), 23%(penta-), 21% (tri-CBs)이었으며 hexa-와 hepta-CBs는 10%미만을 나타낸 반면, 안성지역에서는 tri-CBs에서 hepta-CBs까지 17%-22%까지 매우 유사한 수준을 보였다. 또한 서울지점에서 PBDE homologs의 분율은 deca-BDE, penta-, tetra-가 각각 65%, 16%, 10%이고, 안성지점은 deca-BDE와 nona- 가 각각 87%, 5%의 농도 분율을 보였다. 특히 deca-BDE의 서울과 안성의 농도 분율은 65%, 87%로까지 높게 나타났다. Deca-BDE technical mixture의 구성 물질로 알려진 deca-BDE, nona-BDE, octa-BDE의 평균농도와 penta-BDE technical mixture의 구성 물질로 알려진 BDE-47(tetra-BDE), -99(hepta-BDE), -100(hepta-BDE)의 평균농도가 다른 congeners에 비해 높게 나타났다. 이는 국내에 수입된 브롬계 난연제 PBDEs의 사용량과 밀접한 관련성을 가질것으로 판단되었다. 그 결과, 국내에 수입된 브롬계 난연제 (TBBPA, PBDEs등)의 양은 1996년 31,000톤, 1997년 39,000톤, 1998년 38,000톤, 1999년 45,000톤, 2000년 53,000톤, 2001년 46,000톤, 2002년 55,000톤, 2003년 58,000톤, 2004년 69,000톤으로 최근 10년간 국내의 브롬계 난연제 수입량은 대략 100%이상 증가하였다. Tremolada et al.¹²⁾ 이 브롬계 난연제의 수입량 중(2003년자료) PBDEs가 차지하는 분율은 19.3%(deca-BDE), 0.1%(penta-BDE) 및 0.5%(octa-BDE)로 나타났으며, TBBPA가 36.5%로 가장 많고 기타 브롬화난연제가 15.7%으로 조사되었다.

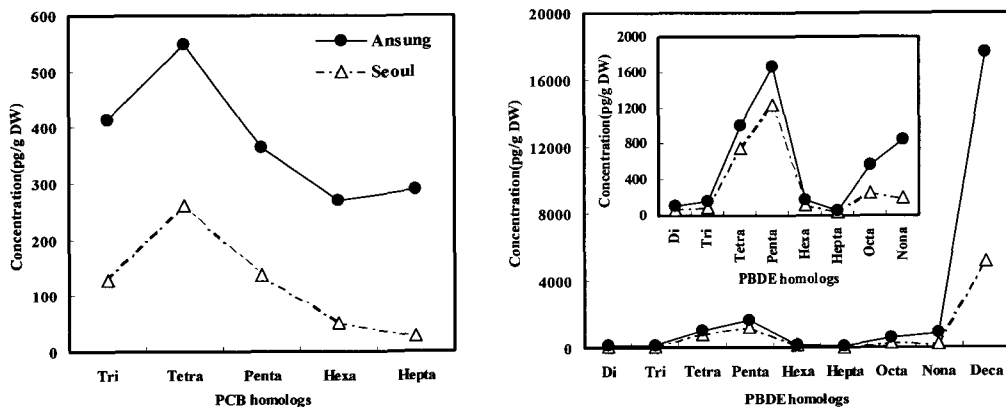


Fig. 2. Concentrations of PCBs, PBDEs homologs in pine needles of Seoul, Ansong.

Tremolada et al.¹²⁾ 즉, 국내에 자생하는 소나무 잎에서 deca-BDE가 다른 PBDE homologs에 비해 높게 나타난 것은 국내 브롬계 난연제의 수입량에 따른 사용량이 다른 technical mixture(penta-BDE와 octa-BDE)에 비해 높기 때문으로 판단된다.

서울과 안성지점간 PCB homologs 농도의 상관분석결과, 상관계수(r)가 0.54(p<0.05)로 나타난 반면, PBDE homologs 농도의 경우 homologs 간 상관관계수가 유의한 수준 (r = 0.97, p<0.01)을 보였다. 이는 Shim et al.⁵⁾이 우리나라 전역에 자생하는 소나무 잎을 채취하여 PCBs homologs 간의 상관분석(r=0.58, p<0.05)을 한 결과와 일치하였다. 또한 Chen et al.¹³⁾이 South China의 Guangzhou시 [공업지역 2곳, 도시지역 1곳 및 배경지역(city background site) 1곳]에서 대기 중 PBDEs의 성분별 상관분석을 행한 결과와도 유사(r=0.78, p<0.01)하였으며 이는 technical mixtures (penta-, octa- 및 deca-BDE)를 구성하는 성분들이 대기 중 발생원으로 작용하였기 때문으로 판단된다. 즉, 본 측정지점들의 지역 특성차이에도 불구하고 소나무 잎에 침착된 homologs의 농도 프로파일이 유사하게 나타난 것은 국내에서 사용 중이거나 과거에 사용된 PCBs와 PBDE technical mixtures가 유사한 조성을 가지고 있으며 이 성분들이 계속적으로 국내 환경 전역에 유입 되고 있음을 시사한다^{5,13)}.

3.3. PCBs와 PBDEs 동질체(congeners) 농도 특성

Fig. 3는 서울과 안성 소나무 잎에서 동시에 검출된 PCBs와 PBDEs의 상관분석 결과를 나타낸 것이다, PCBs congeners 사이의 상관계수(r)는 0.85 (p<0.01), PBDEs congeners 사이의 상관계수(r)는 0.53(p<0.05)로 두 성분 모두 유의한 수준을 보였다. PCBs의 상관계수가 PBDEs의 상관계수보다 높게 나타났는데 이는 PCBs의 경우 1970년대 이후 사용

이 금지된 화학물질이므로 지역에 관계없이 2차 발생원의 영향이 지배적으로 나타나지만 PBDEs의 경우 2004년 이후에 유럽을 중심으로 일부 technical mixtures에 대한 사용이 금지되어 2차발생원(secondary source)의 영향 보다는 1차발생원(primary source)의 영향이 크게 나타났기 때문에 지역적으로 PBDEs 농도분율의 차이를 나타낸 것으로 판단된다. 즉, 서울과 안성 소나무 잎에서 검출된 PBDEs congeners의 조성분율은 우리나라에서 사용된 technical mixture에 의해 좌우되는데, Sjodin et al.¹⁴⁾에 따르면 Bromkal 70-5DE(PBDEs technical mixture)의 조성 분율(%)은 BDE-47(37%, tetra- BDE), BE-99 (35%, penta-), BDE-100(6.8%, penta-), BDE-153 (3.9%, hexa-), BDE-154(2.5%, hexa-), BDE-85 (1.6%, penta-), BDE-138(0.41%, hexa-), BDE-66 (0.22%, tetra-), BDE-28(0.11%, tri-), BDE-17 (0.022%, tri-)로 보고하였다. 본 연구에서 조사한 소나무 잎 중 위 성분의 평균 분율은 BDE-47(26.4%), BDE-99(40.1%), BDE-100(13.1%), BDE-66(5.0%), BDE-28(4.8%), BDE-85(3.4%), BDE-153(2.5%), BDE-154(3.6%), BDE-17(1.0%)로 Bromka 70-5DE의 분율과 매우 유사하게(p<0.01) 나타났다. 즉, penta-BDE의 대표적인 technical mixture로 알려진 Bromkal 70-5DE¹⁴⁾의 조성 분율과 본 연구에서 조사한 소나무 잎 중의 분율은 매우 유사(r=0.89, p<0.01)하였다. 이는 PBDEs의 발생원에서부터 대기를 통해 소나무 잎으로 침착되는 이동 프로세스가 PBDE congeners에 대해 대체로 유사하게 영향을 준 것으로 판단된다¹⁵⁾.

4. 결 론

본 연구는 서울과 안성에서 자생하는 동일종의 소나무 잎을 채취하여 소나무 잎에 침착된 PCBs와

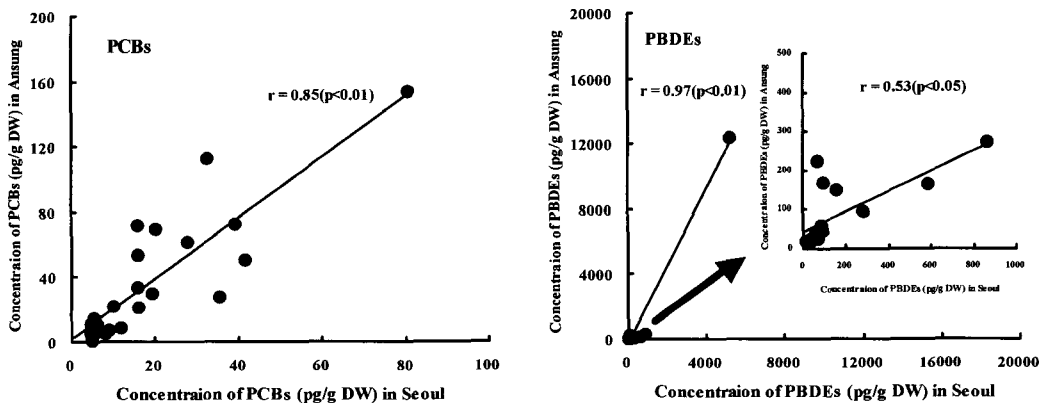


Fig. 3. Correlation coefficients between PCBs(n=22) and between PBDEs(n=18) in pine needles of Seoul, Anseong.

PBDEs의 조성, 농도 분포 및 발생원 특성을 조사하였다.

1) 총 PCB의 농도는 서울과 안성에서 각각 608, 945 pg/g DW (평균 777 pg/g DW)으로 나타난 반면 총PBDEs의 농도(pg/g DW)는 서울과 안성에서 각각 7944, 14,255 pg/g DW(평균 11,100 pg/g DW)로 두 성분 모두 안성지역이 서울지역에 비해 높게 나타나 지역적으로 다른 특성을 보였다

2) 서울과 안성 소나무 앞에서 동시에 검출된 PCBs와 PBDEs의 상관분석 결과, PCBs congeners 사이의 상관계수(r)는 0.85($p < 0.01$), PBDEs congeners 사이의 상관계수(r)는 0.53($p < 0.05$)로 유의한 수준을 나타내었다.

3) Bromkal 70-5DE의 조성 분율과 본 연구에서 조사한 소나무 잎 중의 PBDEs 분율은 매우 유사($p < 0.01$)하게 나타났는데 이는 PBDEs의 발생원에서부터 대기를 통해 소나무 잎으로 침착되는 이동 프로세스가 PBDE congeners에 대해 유사하게 영향을 준 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임

참 고 문 헌

- 1) Marco M., Schreltmuller J., Reuter U., Ballschmiter K., 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.
- 2) Zegers B. N., Wilma E. L., Booji K., Smittenberg R. H., Boea W., Boon J. D., Boon J. P., 2003, Levels of polybrominated diphenyl ether flame retardants in sediment cores from western Europe, *Environ. Sci. Technol*, 37, 3803-3807.
- 3) Stefan V., Adrian C., Paul S., 2003, Polybrominated diphenyl ethers in marine species from the Belgian North Sea and the Western Scheldt estuary: Levels, profile, and distribution, *Environ. Sci. Technol*, 37, 4338-4357.
- 4) Shin E. S., Yeo H.-G., Cho K.-Ch., Chun M.-Y., 2006, Deposition characteristics of atmospheric PCBs by type of leaves in pine needles, *Korea of Journal Environmental Health*, 32, 46-52.
- 5) Shim Il. Y., Yeo H.-G., Choi M.-K., Kim T.-W., Chun M.-Y., 2002, Spatial distribution of PCBs using pine needles, *J. of KSEE*, 24, 2227-2237.
- 6) Gareth T., Andrew J., Sweetman W. A., Ockenden D. M., Jones K. C., 1998, Air-pasture transfer of PCBs, *Environ. Sci. Technol*, 32, 936-942.
- 7) Trapp S., Matthies M., 1997, Modelling volatilization of PCDD/F from soil and uptake into vegetation, *Environ. Sci. Technol*, 31, 71-74.
- 8) Romney L. F., Hobbs P. V., Eltgorth M. W., 1963, Contamination of plant foliage with radioactive fallout, *Ecology*, 44, 343-349.
- 9) Bacci E., Cerejerira M. J., Gaggi C., Chemello G., Calamari D., Vighi M., 1990, Bioconcentration of organic chemical vapors in plant leaves: the azalea model, *Chemosphere*, 21, 525-535.
- 10) Yeo H.-G., Cho K.-C., Chun M.-Y., 2006, Composition, source, and regional concentration of PBDEs in pine needles, *J. of KSEE*, 28, 829-835.
- 11) Chun M.-Y., 1998, A study on the deposition of PCBs in air on coniferous needles, *J. of KSEE*, 20, 1377-1383.
- 12) Tremolada P., Burnett V., Calamari D., Kevin C. J., 1996, A study of the spatial distribution of PCBs in the UK atmosphere using pine needles, *Chemosphere* 32, 2189-2203.
- 13) Chen L.-G., Mai B.-X., Bi X.-H., Chen S., Wang X.-M., Ran Y., Luo X.-J., Sheng G.-Y., Fu J.-M., Zeng E. Y., 2006, Concentration levels, compositional profiles and gas-particle partitioning of polybrominated diphenyl ethers in the atmosphere of an urban city in south China, *Environ. Sci. Technol*, 40, 1190-1196.
- 14) Choi J.-W., Jun O., Kimiyoshi K., Shunji H., Hiroyasu I., Noriyuki S., Shin I. S., Masatoshi M., 2003, Modified clean-up for PBDD, PBDF and PBDE with an active carbon column- its application to sediments, *Chemosphere*, 53, 637-643.
- 15) Hassanin A., Knut B., Sandra N. M., Eiliv S., Gareth O. M., Kevin C. J., 2004, PBDEs in European background soil: Levels and factors controlling their distribution, *Environ. Sci. Technol*, 38, 738-745.