

## 토양 중 PBDEs와 PCBs의 농도분포

이성희 · 조기철\* · 여현구\*\*†

충주대학교 환경공학부, \*동남보건대학 바이오환경과, \*\*강원지방중소기업청 제품성능기술과  
(2009. 10. 30. 접수/2009. 11. 26. 수정/2009. 12. 17. 채택)

## Concentration Distribution of PBDEs and PCBs in Soil

Sung-Hee Lee · Ki-Chul Cho\* · Hyun-Gu Yeo\*\*†

*Division of Environmental Engineering, Chungju National University*

*\*Department of Bio & Environmental Science, Dongnam Health College*

*\*\*Product Performance & Technical Division, Gangwon Regional Small and Medium Business Administration*

(Received October 30, 2009/Revised November 26, 2009/Accepted December 17, 2009)

### ABSTRACT

Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) were measured in soil samples of Ansung in Kyonggi-province to investigate concentration distribution of PBDEs and PCBs. The 10 soil samples were collected using a stainless steel hand-held corer that was cleaned before and after each sample using hexane. Total concentration of PBDE and PCBs were 2,205.3 and 348.1 pg/g dry weight (DW) in soil sample, respectively. BDE-209 showed as the most abundant congener in soil samples which was related to imported amount and usage amount of deca-BDE technical mixture in Korea. Also, BDE-99, BDE-47, BDE-100 deposition in soil sample was higher than other congeners and was related to the imported and usage amount reported for penta-BDE technical mixture in Korea. Correlation coefficient between PBDE contribution and technical mixture formulation (Bromokal 70-5DE) were significant ( $r=0.91$ ,  $p<0.01$ ) which suggests the influence of sources in this technical mixtures.

**Keywords:** PBDEs, PCBs, soil, contribution, technical mixture

### I. 서 론

POPs의 대표적인 오염물질인 polychlorinated biphenyls (PCBs), organochlorine pesticides(OCPs) 및 polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furan(PCDD/F)는 대기, 식물, 수계 등 여러 환경 매트릭스에서 계속 검출 되고 있다. 이 중 잔류성유기화합물(Persistent Organic Pollutants: POPs)의 대기 중 분포는 각각의 POPs 성분들의 물리/화학적 특성(예, 화학안정도, 증기압, 친지질성 정도, 용해도 등)에 의해 재회발 및 침착을 통해 대기 중 농도에 영향을 준다.<sup>1)</sup> 또한, 브롬계 난연제(Brominated flame retardant[BFR]) 중 PBDEs(polybrominated diphenyl ethers)는 TV 세트, 개인 컴퓨터 외장, 전기 회로 기판 등의 플라스틱 및 직물, 가정용품, 가구, 카

페트릭 코팅, 자동차등의 난연제로서 사용되고 있다. 브롬계 난연제는 PBBs(polybrominated biphenyls), PBDEs 및 TBBPA(tetrabromo-bisphenol A) 등 세 종류가 대표적이며, 이중 PBBs는 이미 1970년대부터 발암성과 간독성이 확인되어 사용이 금지되었다.<sup>2)</sup> PBDEs는 잠재적인 잔류성 유기염소계 화합물로 퇴적물, 육류, 어패류, 실내 공기, 혈액등 다양한 환경에서 검출되고 있다.<sup>3)</sup> 또한 PBDEs는 높은 지용성 때문에 환경 중 생체 시료에 잘 축적되며, 포유 동물조직에서는 조직 분해와 신진 대사가 상대적으로 느린 것으로 알려져 있다. 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. deca-BDE는 실험실에서 고농도로 노출될 경우 암 유발 가능성이 보고되었으며, octa-BDE와 penta-BDE는 deca-BDE 보다 내분비

†Corresponding author : Product Performance & Technical Division, Gangwon Regional Small and Medium Business Administration  
Tel: 82-33-260-1634, Fax: 82-33-260-1639  
E-mail : hgyeo@smba.go.kr

계, 신경계, 생식기 등의 독성을 야기시킨다<sup>3)</sup>. 최근까지 PBDEs와 같은 브롬계 화합물은 환경 중에 대량으로 배출됨에 따라 대기, 토양, 수질 및 인체에서도 검출되고 있는 실정이다.<sup>3,4)</sup> 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 과거 10년간 국내의 브롬계 난연제 수입량은 대략 100% 이상 증가하였다<sup>3)</sup>. 이처럼 전세계적으로 PBDEs와 PCBs에 대한 환경 매트릭스(대기, 토양, 퇴적물, 수계)에서의 농도 및 거동 특성을 다양하게 파악되고 있으며 동물 및 어패류 실험을 통한 인체 유해성 평가를 지속적으로 연구하고 있다.<sup>4,7)</sup> 그러나 현재 국내 환경 중 PBDEs와 PCBs에 대한 연구는 극히 미진한 상태이며, 이에 본 연구는 토양에 침착된 PBDEs와 PCBs의 농도분포 및 침착특성을 평가하고자 한다.

## II. 실험방법

### 1. 시료채취 및 전처리

토양시료는 경기도 안성에 위치한 환경대학교 교내의 3곳(뽕나무군락 주변, 은행나무 군락 주변, 소나무군락 주변)에서 2006년 1월에 10개의 시료를 채취하였다. 시료는 표토층(0-5 cm)의 토양을 채취 후 각각 일정량(20 g)씩 잘 혼합하여 사용하였다. 토양시료는 지질 및 유기물이 충분하여 PBDEs와 PCBs가 다량 침착되기 쉬우며 장기간의 오염도 수준을 파악할 수 있을 것으로 판단되어 선정하였다. 시료의 전처리는 토양 40 g(wet weight)을 정확히 비이커에 분취하여 수분제거를 위해 무수황산나트륨(anhydrous sodium sulfate)과 혼합하였다. 혼합물은 200 ml glass timple로 옮겼으며, 이

때 농도보정 및 회수율 산정을 위해 시료에 surrogate로 <sup>13</sup>C<sub>12</sub>-labelled PBDEs와 PCBs를 spiking하였다. 시료는 헥산:디클로로메탄[dichloromethane:DCM] (9:1) 200 ml을 이용해서 soxhlet에서 24시간 추출하였다. 추출한 시료 중 수분을 다시 한 번 제거하기 위해, 컬럼에 무수황산나트륨 15 g을 충전하여 시료를 통과하였다. 통과된 시료는 회전증발농축기로 약 1 m까지 농축하여 보관하였다. 농축된 토양시료는 분석시 방해물질로 작용하는 지질 및 염색소를 제거하기 위하여 다층(multi-layer) 실리카 칼럼을 통과시킨다. 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(AgNO<sub>3</sub> coated silica) 3 g, 무수 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(Dulksan 社, GR grade) 6 g 넣은 다음 헥산 30 ml로 충전 물질을 세척한 후 시료를 넣고 헥산:디클로로메탄(9:1) 100 ml를 컬럼에 통과시킨다. 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 정제한다. 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 spiking한 다음 hot plate 위에서 질소로 최종부피를 25 µl까지 증발시킨 후 HRGC/HRMS(high resolution mass spectrometry, Hewlett-Parkard 6890/JMS-700)을 이용하여 PBDEs와 PCBs를

**Table 1.** Analytical conditions of PBDEs and PCBs with HRGC/HRMS

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

분석하였다(Table 1).<sup>8,9)</sup>

## 2. 정도관리

PBDEs와 PCBs의 정도관리를 위해서 회수율 실험(recovery analysis), 중복실험(duplicate analysis) 및 검출한계 실험(detection limit)을 실시하였다. PBDEs surrogate (<sup>13</sup>C<sub>12</sub>-labelled PBDEs)의 회수율(n=5)은 각각 BDE-3 (116±10%), BDE-15(147±15%), BDE-28(149±11%), BDE-47(130±7%), BDE-99(130±9%), BDE-153(137±5%), BDE-154(126±10%) 및 BDE-183(100±5%)로 평균 129±16%를 보였다. PCB surrogate의 회수율(n=5)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±7%의 결과를 나타내었다. 중복실험(duplicate test)은 토양시료를 무작위로 2회씩 추출(sample-1, sample-2)하여 각각의 시료에서 검출된 PBDEs와 PCBs congeners에 대한 회귀분석(SPSS version 10, SPSS Inc.)을 행하였다. 그 결과 PBDEs congeners사이의 회귀식 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.95(p<0.001), 기울기는 1.56(p<0.05)이었다. PCBs의 경우, 회귀식 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.92(p<0.001), 기울기는 0.99(p<0.001)이었다. PBDEs의 검출한계인 LOD(limit of detection)는 예상되는 검출한계의 1.5배 정도로 높게 제조하여 6회 반복 분석한 표준물질의 농도의 평균에 표준편차의 3배를 곱해서 산정하였다(LOD=평균+3건×표준편차).

**Table 2.** Concentrations of PBDE, PCB congeners and homologs in Ansung city

PBDEs(pg/g DW)				PCBs(pg/g DW)			
Congeners		Homologs		Congeners		Homologs	
BDE7	2.4	Di-BDE	6.5	PCB47	24.6	Tetra-CB	69.9
BDE15	4.1			PCB52	37.0		
BDE17	2.4	Tri-BDE	7.7	PCB60	8.3		
BDE28	5.4			PCB87	13.0		
BDE47	19.5	Tetra-BDE	29.8	PCB101	7.2	Penta-CB	95.9
BDE49	4.3			PCB105	12.5		
BDE66	6.0			PCB110	13.8		
BDE85	7.0	Penta-BDE	55.0	PCB114	6.2		
BDE99	32.4			PCB118	22.9		
BDE100	12.9			PCB126	20.2		
BDE119	2.7	Hexa-BDE	12.5	PCB138	12.9	Hexa-CB	109.9
BDE153	6.1			PCB141	4.9		
BDE154	6.4			PCB149	16.0		
BDE183	6.8	Hepta-BDE	9.8	PCB151	9.9		
BDE184	3.0			PCB153	21.5		
BDE196	12.1	Octa-BDE	26.3	PCB155	3.6		
BDE197	14.2			PCB156	9.9		
BDE206	33.6	Nona-BDE	60.5	PCB157	9.1	Hepta-CB	41.9
BDE207	26.9			PCB167	7.0		
BDE209	1997.1			PCB169	4.6		
		Deca-BDE	1997.1	PCB170	10.4		
				PCB180	13.5		
				PCB183	6.9		
				PCB185	7.3	Octa-CB	5.6
				PCB187	8.5		
				PCB189	5.7		
				PCB194	5.6	Deca-CB	24.9
				PCB209	24.9		
Sum	2205.3			348.1			

PBDEs congeners별 LOD는 0.08(BDE-7, -17, -28) -10 pg/g dry weight(DW)(BDE-209)이었다. PCBs congeners별 LOD는 0.94(PCB 60) -2.49 pg/g dry weight(DW)(PCB 52)이었다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. PBDEs와 PCBs의 총 농도 특성

Table 2는 토양 중 PBDE와 PCB의 congeners 및

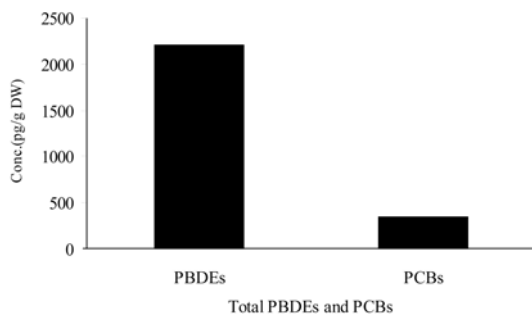


Fig. 1. Total concentrations of PBDEs, PCBs in soil.

homologs별 농도를 나타낸 것이다.

Fig. 1은 토양 중 침착된 총 PBDEs와 총 PCBs의 농도(pg/g DW)를 나타낸 것이다. 토양 중 PBDEs와 PCBs는 각각 20종 및 28종이 검출되었고, 총 PBDEs와 PCBs 농도(pg/g DW)는 각각 2,205.3, 348.1 pg/g DW이었다. 총 PBDEs의 농도가 총 PCBs에 비해 6.3 배 높게 조사되었는데 이는 PBDE 209의 농도가 1,997.1 pg/g DW으로 총 PBDEs의 90%를 차지하기 때문으로 판단된다. 즉, PBDE 209와 PCB 209를 제외한 농도는 각각 208, 323 pg/g DW으로 총 PCBs농도가 PBDEs에 비해 1.6배 높은 농도를 보였다.

#### 2. PBDE와 PCB homologs 농도 특성

Fig. 2와 3은 측정지점 별 PBDE와 PCB homologs의 농도 및 상관분석 결과를 나타낸 것이다. PBDE homologs 농도는 deca-(1997.1 pg/g DW) > nona-(60.5 pg/g DW) > penta-(55.0 pg/g DW) > tetra-(29.4 pg/g DW) > octa-(26.3 pg/g DW) > hexa-(12.5 pg/g DW) > hepta-(9.8 pg/g DW) > tri-BDE(7.7 pg/g DW) > di-(6.5 pg/g DW) 순이었으며, deca-BDE는 최대농도를, tri-

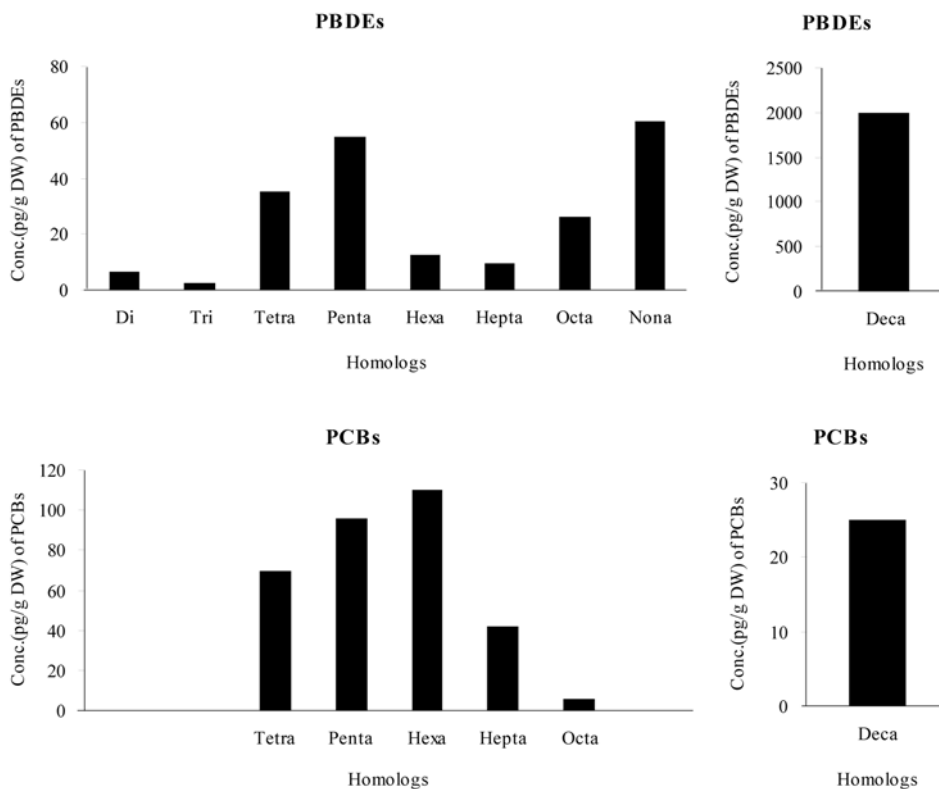


Fig. 2. Concentrations of PBDEs, PCBs homologs in soil.

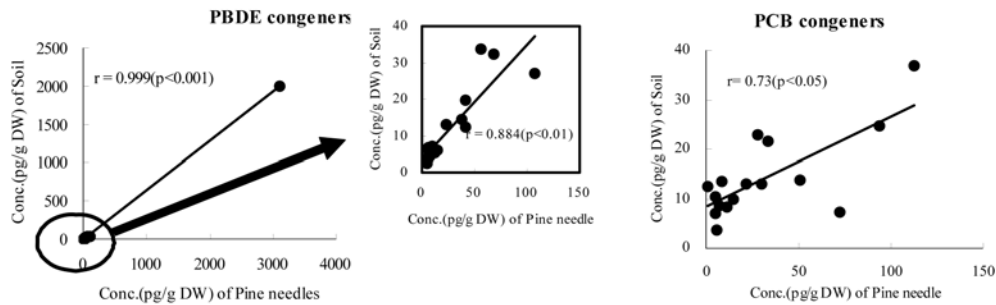


Fig. 3. Correlation coefficients of PBDE, PCB congeners between soil and pine needle.

BDE는 최소농도를 나타내었다. 이는 Lee *et al.*<sup>8)</sup> 동일 지역 소나무잎(1년생)에서 조사한 PBDE homologs 농도인 deca-(3103.9 pg/g DW) > nona-(162.5 pg/g DW) > penta-(106.3 pg/g DW) > octa-(79.2 pg/g DW) > tetra-(62.0 pg/g DW) > tri-(16.3 pg/g DW) > hexa-(14.8 pg/g DW) > di-(12.6 pg/g DW) > hepta-BDE (6.2 pg/g DW) 순으로 나타내어, 두 매트릭스(토양, 소나무 잎)에서 검출된 PBDE congeners 사이의 상관관계( $r$ )가 0.99( $p < 0.001$ )로 유의한 양의 상관성을 나타내었다(Fig. 3). 두 매트릭스에서 검출된 PBDE homologs의 절대농도는 소나무 잎의 농도가 토양중의 농도에 비해 6.5배 높았으나 농도 패턴은 유사하였다.

또한 PCB homologs의 토양중 농도는 hexa-(109.9 pg/g DW) > penta-(95.9 pg/g DW) > tetra-(69.9 pg/g DW) > hepta-(41.9 pg/g DW) > deca-(24.9 pg/g DW) > octa-CB(5.6 pg/g DW)로 Lee *et al.*<sup>8)</sup>이 동일지역 소나무잎에서 조사한 PCBs homologs 농도인 tetra-(287.2 pg/g DW) > tri-(285.5 pg/g DW) > hepta-(260.1 pg/g DW) > penta-(227.0 pg/g DW) > hexa-CB(218.8 pg/g DW)로 보여, 두 매트릭스에서 검출된 PCB congeners의 상관관계( $r$ )는 0.75( $p < 0.05$ )로 유의하게 나타내었다(Fig. 3). PBDEs와 마찬가지로 PCB homologs의 절대농도도 소나무 잎의 농도가 토양 중의 농도에 비해 2.9배 높게 나타내었다. Yeo *et al.*<sup>9)</sup>이 교외지역 대기 중에서 조사한 PCBs의 가스입자상 농도 분포는 저염화 PCBs(≤tetra-CBs) 대기 중에서 가스상 성분(조성분율 : 95%)으로, 고염화 PCBs(≥penta-CBs) 입자상 성분(조성분율 : 5%)으로 존재한다고 언급하였다. 이처럼 소나무잎 1년생에서 검출된 PCBs의 농도가 토양중에서 검출된 농도에 비해 높게 나타난 것은, 소나무 잎의 경우 대기중 가스상 PCBs의 침착에 영향을 크게 받은 반면, 토양은 장기간 대기중에 노출되어 있기 때문에 휘발성이 큰 저염소화 PCBs가 그렇지 못한 고염소화 PCBs에 비해 대기중으로 재회발 되

어 고염소화 PCBs의 농도가 소나무잎에 비해 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 즉, PBDE 및 PCB homologs 모두 토양 중 고염소화(=penta) homologs가 주성분이었으며, 소나무 잎중에는 저염소화 homologs가 주로 검출됨을 확인할 수 있었다.

PBDE homologs의 농도 분율은 di-, tri-, hexa-, hepta-BDE의 경우 1%미만이었으며, tetra-, penta-, octa-, nona-BDE는 1%~5%미만이었으며, deca-BDE가 90%이상으로 최대분율을 보였다. Deca-BDE technical mixture의 구성 물질인 deca-BDE, nona-BDE, octa-BDE의 평균농도와 penta-BDE technical mixture의 구성 물질인 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 가질 것으로 판단되었다. 그 결과, 국내에 수입된 브롬계 난연제(TBBPA, PBDEs 등)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 과거 10년간 국내의 브롬계 난연제 수입량은 대략 100%이상 증가하였다. Tremolada *et al.*<sup>10)</sup> 이 브롬계 난연제의 수입량 중 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%로 조사되었다. 즉, 안성지역 토양 중 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.<sup>10)</sup> 또한 본 연구에서 조사된 deca-BDE와 nona-BDE의 분율은 각각 97.1%, 2.9%로 technical deca-BDE mixture의 조성분율인 deca-BDE가 97%, nona-BDE가 3%와 유사하였다. 이는 몇 가지 원인으로 설명할 수 있는데 첫째는 PBDE의 발생원-대기-토양으

로의 이동 프로세스가 검출된 PBDE congeners에 대체로 유사하게 영향을 준 것으로 판단된다.<sup>11,12)</sup> 두 번째는 PBDEs 발생원에서 배출된 congener들이 대기 중이거나 토양으로 매우 안정화된 상태로 존재하여 기상(weathering) 변화나 분해(degradation) 과정, 변환(alteration) 과정에 큰 영향을 받지 않은 것으로 판단된다<sup>11)</sup>. 또는 브롬계 PBDEs의 국내 환경중 유입이 최근까지도 계속 진행되고 있고 이로 인해 시판되는 technical mixtures와 유사한 조성분율을 본 연구에서 나타낸 것으로 판단된다.

PCB homologs의 농도분율은 31.6%(hexa-) > 27.6%(penta-) > 20.1%(tetra-) > 12.0%(hepta-) > 7.2%(deca-) 및 1.6%(octa-CBs)로 저염소화 homologs (≤tetra)에 비해 고염소화(≥penta)의 분율이 6.5배 높게 나타내었다. 이는 대기중 PCBs의 토양으로 침착경로는 대기중에서 입자상 PCBs으로 존재하는 고염소화 PCBs가 주종을 이루고 있음을 알 수 있다.<sup>12)</sup>

**3. PBDE와 PCB congeners 농도 특성**

Fig. 4는 토양 중 PBDE congeners와 Bromokal 70-5DE(PBDE technical mixture)와의 상관분석 결과이다. Bromokal 70-5DE를 구성하는 각각의 성분분율<sup>13)</sup>과 본 연구에서 동시에 검출된 PBDE congeners 분율과의 상관계수(r)는 0.91(p<0.01)로 유의한 수준을 보였다. 즉, 토양 중 검출된 PBDE congeners의 조성분율은 우리나라에서 사용된 technical mixture(예, Bromokal 70-5DE)에 의해 좌우되는데, 이는 PBDEs 발생원에서 배출된 congeners가 대기중에서나 토양에서 매우 안정화된 상태로 존재하여 기상변화, 분해 및 변환 과정에 크게 영향을 받지 않은 결과로 판단된다.<sup>9,11)</sup> 토양 중 PCB congeners의 농도분포를 살펴본 결과, 저염소화 PCBs(≤tetra)는 PCB 47, 52, 60으로 3종이 검

출된 반면, 고염소화 PCB(≥penta)인 PCB 87, 101, 105, 110, 114, 118, 126, 138, 141, 149, 151, 153, 155, 156, 157, 167, 169, 170, 180, 183, 185, 187, 189, 194, 209 등 25종의 congeners가 검출되었다. 또한 PCB congeners중 최대와 최소농도를 보인 것은 각각 PCB 52와 PCB 169로 나타내었다. 저염소화 PCB congeners(20.1%)에 비해 고염소화 PCB congeners가 토양 중 높은 분율(79.9%)을 보였다. Christopher<sup>14)</sup>가 캐나다 Sagrek Bay 4지점에서 조사한 퇴적물(sediment) 중 저염소화 PCBs 및 고염소화 PCBs의 평균 분율은 각각 15%, 85%, Motelay *et al.*<sup>15)</sup>이 프랑스의 Seine River basin의 2개 지점에서 조사한 토양 중 저염소화 PCBs와 고염소화 PCBs의 평균분율은 각각 16.6%, 83.4%, Nadal *et al.*<sup>16)</sup>이 스페인의 산업지역 등 오염지역 3개 지점에서 조사한 저염소화 PCBs와 고염소화 PCBs 평균 분율은 각각 3.4%, 96.6%, Batterman *et al.*<sup>17)</sup>이 남아프리카의 산업지역 및 도시지역에서 조사한 저염소화 PCBs와 고염소화 PCBs의 평균분율은 각각 15.3%, 84.7%로 본 연구와 유사하거나 다소 높은 농도분율을 보였다. 이는 대기 중 PCBs의 토양 중 침착은 가스상과 입자상 PCB congeners가 건식과 습식으로 동시에 침착되지만 저염소화 PCBs는 토양에 침착되었다가 휘발성이 강하여 재휘발되므로 누적 침착율이 적다. 반면 고염소화 PCB congeners는 주로 입자상으로 존재하고 가스상에 비해 휘발성도 적기 때문에 토양에 지속적으로 누적 침착되기 때문으로 판단된다.

**IV. 결 론**

본 연구는 교외지역인 안성에서 토양 중 PBDEs와 PCBs의 농도 분포 및 침착특성을 조사한 것으로 결과

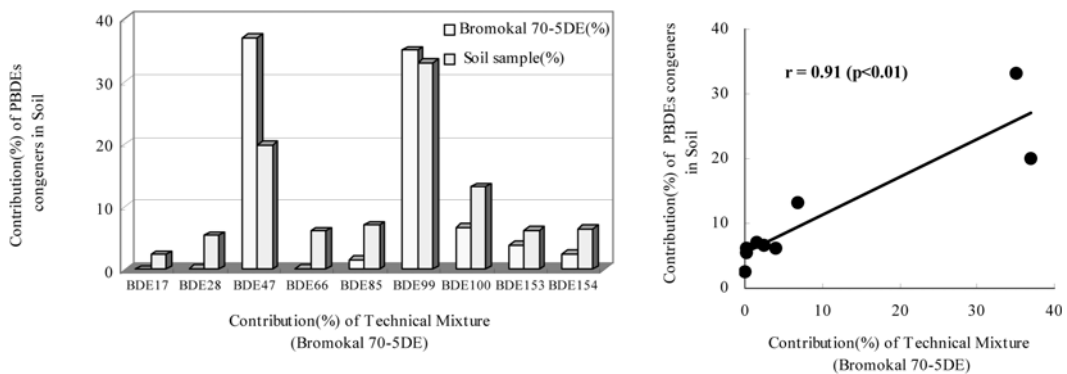


Fig. 4. Contribution and correlation coefficient between PBDEs in soil and Technical Mixture (Bromokal 70-5DE).

는 다음과 같다.

1. 총 PBDEs와 PCBs 농도(pg/g DW)는 각각 2,205.3, 348.1 pg/g DW로 PBDEs 농도가 PCBs에 비해 6.3배 높았으며, 특히 PBDE 209의 농도가 1,997.1 pg/g DW으로 총 PBDEs의 90%를 차지하였다.
2. PBDE와 PCB homologs의 농도분율을 살펴본 결과, 고염소화 homologs의 토양 중 농도가 저염소화 homologs에 비해 두 성분 모두 높게 나타내었다. 이는 저염소화 PBDEs와 PCBs는 토양에 침착되었다가 휘발성이 강하여 재취발 되어 누적 침착율이 적은 반면, 고염소화 PCB congeners는 주로 입자상으로 존재하고 가스상에 비해 휘발성도 적기 때문에 토양에 지속적으로 누적 침착된 결과로 판단된다.
3. Bromokal 70-5DE의 조성 분율과 본 연구에서 조사한 토양 중 PBDEs 분율은 매우 유사( $p < 0.01$ )하게 나타났는데, 이는 PBDEs의 발생원으로부터 대기를 통해 토양으로 침착되는 이동 프로세스가 PBDE congeners에 대해 유사하게 영향을 준 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육과학기술부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

### 참고문헌

1. Kouimtzi, T. H., Voutsas, D., Balafoutis, C. H., Muller, L. : PCDD/Fs and PCBs in airborne particle matter of the Greater Thessaloniki Area, N. Greece. *Chemosphere*, **47**, 193-205, 2000.
2. Zegers, B. N., Wilma E. L., Booi, K., Smittenberg, R. H., Boea, W., Boon, J. D., Boon, J. P. : Levels of polybrominated diphenyl ether flame retardants in sediment cores from western Europe. *Environmental Science & Technology*, **37**, 3803-3807, 2003.
3. Crispin, J., Halsall, Robert G. M., Lee, P. C., Victoria, B., Petter, H.-J., Kevin, C. J. : PCBs in UK. Urban Air. *Environmental Science & Technology*, **29**, 2368-2376, 1995.
4. Marco, M., Schreltmuller, J., Reuter, U., Ballschmiter, K. : Correlation between C-6/C-14 chlorinated hydrocarbons levels in the vegetation and in the boundary layer of the troposphere. *Environmental Science & Technology*, **27**, 1517-1523, 1993.
5. Stefan, V., Adrian C., Paul S. : Polybrominated diphenyl ethers in marine species from the Belgian North Sea and the Western Scheldt estuary: Levels, profile, and distribution. *Environmental Science & Technology*, **37**, 4338-4357, 2003.
6. Gareth, T., Andrew, J., Sweetman, W. A., Ockenden, D. M., Jones, K. C. : Air-pasture transfer of PCBs. *Environmental Science & Technology*, **32**, 936-942, 1998.
7. Trapp, S., Matthies M. : Modelling volatilization of PCDD/F from soil and uptake into vegetation. *Environmental Science & Technology*, **31**, 71-74, 1997.
8. Lee, S.-H., Yeo, H.-G. : PCBs and PBDEs in Pine Needles of Seoul and Ansong. *Journal of the Environmental Science*, **16**(9), 1071-1076, 2007.
9. Yeo, H.-G., Choi, M., Chun, M.-Y., Sunwoo, Y. : Gas/particle concentrations and partitioning of PCBs in atmosphere of Korea. *Atmospheric Environment*, **37**, 3561-3570, 2003.
10. Tremolada, P., Burnett, V., Calamari, D., Kevin, C. J. : A study of the spatial distribution of PCBs in the UK atmosphere using pine needles. *Chemosphere*, **32**, 2189-2203, 1996.
11. Hassanin, A., Knut, B., Sandra, N. M., Eiliv, S., Gareth, O. M., Kevin, C. J. : PBDEs in European background soil: Levels and factors controlling their distribution. *Environmental Science & Technology*, **38**, 738-745, 2004.
12. Shin, E.-S., Yeo, H.-G. : Concentration Characteristics of PCBs in Pine Needle and Soil at Rural Area. *Korean Society for Sanitation*, **21**(1), 1-11, 2006.
13. Sjodin, A., Jakobsson, E., Kierkegaard, A., Marsh, G., Sellstrom, U. : Gas chromatographic identification and quantification of polybrominated diphenyl ethers in a commercial product, Bromakal 70-5DE. *Journal of Chromatography. A.*, **822**, 83-89, 1998.
14. Christopher, C. : Spatial distribution and characterization of polychlorinated biphenyl contaminated sediment from Sagrek, Northern Labrador. *The Degree of Master Thesis*, 1-136, 2000.
15. Motelay-Massei, A., Oilivon, B. Garban, M. J., Blanchard, M., Cheveruil, M. : Distribution and spatial trends of PAHs and PCBs in soils in the Seine River basin, France. *Chemosphere*, **55**, 555-565, 2004.
16. Nadal, M., Schuhmacher, M., Domingo, Jose : Level of metals, PCBs, PCN, and PAHs in soils of a highly industrialized chemical/petrochemical area: Temporal trend. *Chemosphere*, **66**, 267-276, 2007.
17. Batterman, S., Chermyak, S., Gouden, Y., Hayey, J., Robins, T., Chetty, S. : PCBs in air, soil and milk in industrialized and urban areas of KwaZulu-Natal, South Africa. *Environmental Pollution*, **157**, 654-663, 2009.