

시화공단 인근 실내 더스트의 PBDEs 농도 분포

Concentration Distribution of PBDEs in House Dust on Si-Hwa Industrial Complex

김현승 · 김일규[†]

Hyun-Seung Kim · Il-Kyu Kim[†]

부경대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

(2013년 4월 23일 접수, 2013년 8월 23일 채택)

Abstract : Persistent Organic Pollutants (POPs) are chemical substances which persist in the environment, bioaccumulate through the food web, and pose a risk of causing adverse effects to human health and the environment. POPs are thermally stable, highly lipophilic and water-insoluble compounds which can induce various toxic influences including immunotoxicity, carcinogenicity adverse effects on reproduction, development and endocrine functions. Polybrominated diphenyl ethers or PBDEs, are organobromine compounds that are used as flame retardant. Because of their toxicity and persistence, the industrial production of some PBDEs is restricted under the Stockholm Convention, a treaty to control and phase out major POPs. In this study, PBDEs was measured in various site of Sihwa industrial complex to investigate concentration distribution of POPs. The levels of PBDEs in house dust samples were 0.722~44.024 ng/g-dry. In PBDEs congener, BDE-209 was relatively higher in the all sites. The concentration of BDE-209 measured over 80.0% of total PBDEs. In various site, high molecular PBDEs homologues are measured higher than low molecular.

Key Words : POPs, PBDEs, House Dust, PCA

요약 : 잔류성유기오염물질(POPs)은 환경에 잔류하며, 먹이 사슬을 통해 축적되고, 인간의 건강과 환경에 악영향을 일으키는 화학물질이다. 잔류성 유기 오염 물질은 열에 안정적이고, 친유화성, 불용성의 물질이며, 생식, 성장 및 내분비 기능에 면역독성 및 발암성 부작용 등 다양한 유해 영향을 일으킬 수 있다. 폴리브롬화디페닐에테르(PBDEs)는 방염제로 사용되는 유기브롬 화합물이다. 독성 및 잔류성으로 인해 일부 PBDE 생산품은 주요 POPs를 관리하고 단계적으로 제한하는 스톡홀름 협약에 의해 제한되었다. 본 연구에서는 잔류성유기오염물질의 농도분포를 조사하기 위해 시화산업단지의 여러 사이트에서 PBDEs를 측정하였다. 하우스더스트 샘플에서 PBDEs의 농도수준은 0.722~44.024 ng/g-dry로 나타났으며, PBDEs 동족체 중 BDE-209가 모든 지역에서 상대적으로 높게 나타났다. BDE-209의 농도는 총 PBDEs의 80.0 % 이상으로 나타났다. 대상 지역의 여러 사이트에서 고분자 PBDEs는 저분자 PBDEs 보다 높게 측정되었다.

주제어 : 잔류성유기오염물질, 브롬화난연제, 하우스 더스트, 주성분분석

1. 서론

현대사회의 다양한 산업공정에서 사용되고 있는 화학물질은 인간의 건강을 위협하거나 자연 생태계 내 생물체에 독성을 나타내는 등 다양한 영향을 미친다. 이러한 환경오염이 전 세계적인 문제로 인식되면서 국제연합환경계획(UNEP, United Nations Environment Programme)이나 경제개발협력기구(OECD, Organization for Economic Co-operation and Development) 등에서 환경유해오염물질의 안전관리를 위한 활발한 국제적인 논의가 진행 중이다.¹⁾

특히, 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, 이하 POPs)에 대한 논의와 연구가 활발히 진행 중이다. POPs란 자연환경 내에서 분해되지 않고 먹이사슬을 통해 동식물의 체내에 축적되는 유기화합물질을 일컫는다. POPs는 잔류성이 높아 환경 중에 배출 후 최종적으로 인간 및 생태계에 악영향을 미치는 농도까지 수십에서 수백만 배 농축될 수 있으며, 지방에 용해되고 체내에서 분해되지 않아 동물과

사람의 지방조직에 높은 농도로 발견되고 있다. 생체에 축적된 POPs는 그 독성으로 인해 암을 비롯한 신경계, 생식기능과 성장 발육, 유전 등에 영향을 미친다고 알려져 있다.²⁾ 이 물질은 면역체계 교란, 중추신경계 손상 등을 초래하는 유해물질로 대부분 산업생산 공정과 폐기물 저온 소각과정에서 발생한다. 또한, 이들 물질은 대기, 수질, 토양으로 이동하며, 장거리 이동성을 띄고 있어, 한 국가만의 국한적인 문제가 아니라 전 지구적인 문제로 확대되고 있다.

PBDEs는 대표적 브롬화난연제이며, 2009년에 열린 제 4차 스톡홀름협약 당사국회의에서 POPs 물질에 관한 스톡홀름 협약에 일부 PBDEs가 신규 사용금지 물질로 확정되었다. 또한 그 외의 난연제에 관해서도 유럽 등지에서 환경과 인간에 대한 독성 및 안정성에 관한 재검토가 이루어지고 있다. 인체가 PBDEs에 노출되는 주요 경로를 살펴보면 집 먼지, 식품 및 공기 등으로 추정되고 있으며, 유럽에서는 식품의 영향이 큰 것으로 보고되고 있으며, 미국의 경우는 집에서의 공기 및 먼지 등에 의해서 많은 영향을 받는 것으로

[†] Corresponding author E-mail: ikkim@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6528 Fax: 051-629-6523

보고되고 있다.³⁻⁷⁾ POPs물질에 관한 기존의 연구는 주로 Dioxine, PCBs, 유기염소/유기계 농약류에 대한 것으로 산업체 등의 주요오염발생원과 하천/대기/토양 등의 외부 환경에 대한 평가로 한정되어 있으며, 신규 등록물질인 PBDEs에 관한 연구는 이제 연구의 진행이 시작되고 있는 수준이다. 본 연구에서는 이러한 POPs 국내·외적인 규제 및 관리 그리고 대응전략에 관련하여, 오염발생이 클 것으로 예상되는 대상지점의 하우스 더스트에 대한 농도수준 및 분포특성을 밝혀 외부환경으로부터 실내 주거환경으로 침투하여 사람의 인체에 미치는 영향과 수준은 물론 실내에서 사용중인 POPs가 함유된 상업용 제품으로부터의 영향을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 조사지점의 선정

주요 대상 지점은 사전연구를 통해 검토된 대표 지역을 선정하여 시화공단을 중심으로 대표군을 선정하였다. 시료는 금속, 기계, 석유화학 및 일부 재활용 관련시설 등 다양한 소각시설과 산업시설이 밀집해 있는 시화공단지역을 위주로 반경 5 km 내의 지역을 대표할 수 있도록 채취하였다. 시료는 비의도적 잔류성유기오염물질 공정시험방법 중 ‘시료 중 비의도적 잔류성유기오염물질(UPOPs) 동시 시험방법’에 따라 실시하였다.

모든 시료의 채취 및 보관은 토양오염공정시험법, 잔류성유기오염물질 공정시험법 및 USEPA의 “Methods for collection, storage, and manipulation of sediments for chemical and toxicological analyses: Technical manual”에 준하여 채취하였다. 현장에서 채취한 후 냉장 보관한 상태로 즉시 이동하여 빠른 시간 내에 분석을 실시하였다. 시료분석과 관

련된 정도관리(QA/QC)는 미국 EPA(1995)의 “QA/QC guidance for sampling for analysis of sediments, water, and tissues for dredged material evaluations. Chemical evaluations”에 준하여 수행한다.

2.2. 시약 및 표준시료

본 연구에 사용된 모든 시약류는 분석대상물질의 측정분석 시 불순물에 의한 영향을 미치지 않는 것을 확인 후 사용하였다. 무수황산나트륨은 특급시약(Wako, Japan)을 사용하였으며, 유기용매(J. T. Baker, PPhillipsburg, USA)는 노말헥산, 디클로로메탄, 아세톤, 톨루엔 및 노란을 사용하였다. PBDEs를 정제하기 위해 Silicagel 60 (Merck, Darmstadt, Germany), Alumina oxide (SIGMA-ALDRICH, Saint Louis, USA), copper powder (SIGMA-ALDRICH, Saint Louis, USA)를 구입하였다. 정제용 표준물질과 정량용 내부표준물질, 실린지 첨가용 내부표준물질은 Wellington사(Guelph, Canada)에서 구입하였다. 시료측정 기기는 기체크로마토그래피질량분석기 GC/MSD (Agilent Technologies)를 사용하였다.

표준시약은 미국의 AccuStandard사와 Cambridge Isotope Laboratories사로부터 구입하였다. 시료전처리를 위해 구입하여 사용된 용매는 HPLC grade로 일본의 Wako Chemical Reagent Factory사로부터 구입되었다.

2.3. QA/QC

표준용액에 대하여 농도별로 7회 반복 분석하여 각 분석치의 평균 회수율을 구하고, 상대 표준편차를 구하여 정밀도를 조사하였다. Table 1과 같이 PBDEs의 회수율은 78.5~135.7%로 나타났으며, EPA 1614의 회수율 기준인 25~150% (tri~hepta), 20~200% (deca)를 만족하는 결과를 보였다.

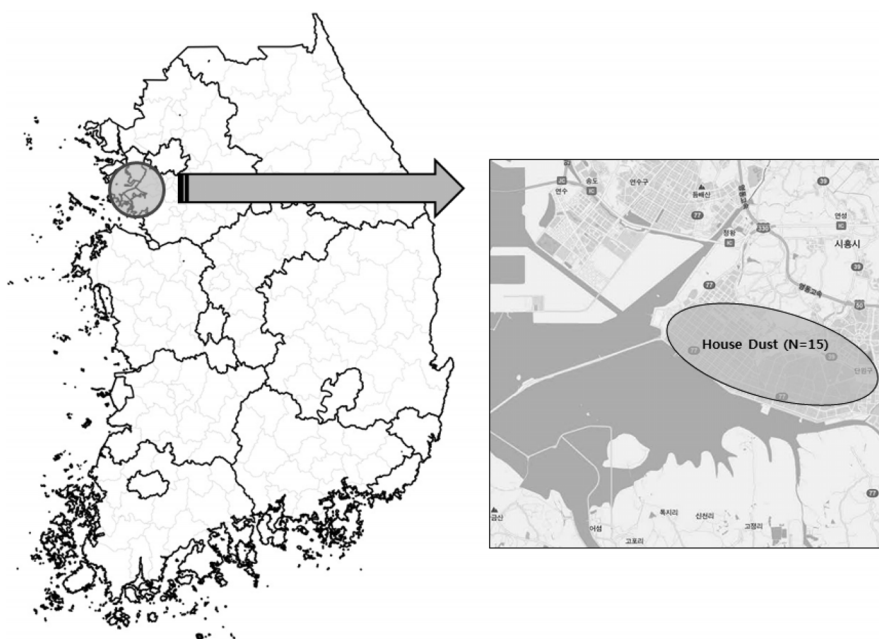


Fig. 1. Sampling point.

Table 1. Recovery rates and method detection limit achieved for the PBDEs

Homologue	Isomer	Recovery (%)	Precision (%RSD)	MDL (pg/g)
Tri-BDE	28	116.7	6.24	0.5
	49	135.6	6.41	0.5
Tetra-BDE	47	148.6	9.52	0.3
	66	134.3	4.58	0.4
Penta-BDE	100	149.5	6.51	1.2
	99	135.7	7.58	1.5
	85	132.5	5.29	1.0
	118	80.3	4.59	2.0
Hexa-BDE	153	80.5	5.62	2.0
	154	100.9	5.19	2.0
Hepta-BDE	183	78.5	6.43	4.0
	181	93.3	4.59	0.5
	190	91.8	3.18	1.0
Octa-BDE	197	88.6	2.28	5.0
	203	96.4	5.59	5.0
	205	85.2	5.54	3.0
Nona-BDE	208	91.5	4.35	6.0
	207	115.6	5.19	10.0
Deca-BDE	206	125.4	5.52	5.0
	209	135.6	7.16	15.0

3. 결과 및 고찰

3.1. 하우스 더스트 내 PBDEs 이성체 분포

실내 하우스 더스트 내의 PBDEs의 농도범위를 조사하여 Table 2와 3에 나타내었다. 그 결과는 0.722~44.024 ng/g-dry wt(평균 6.881 ng/g-dry wt)였으며, 검출 수준의 범위가 컸다. 각 지점의 지역적 특성과 배출원에 기인하여 농도의 차이가 나타났으며, 특히, 이러한 경향은 대용량의 브롬화 난연제를 사용하는 플라스틱, 자동차, 전기전자 등의 제조업체가 주변에 위치한 도시 지역에서 주로 나타난다. 아울러 일상생활에서 사용하는 많은 제품들이 브롬화 난연제가 포함되어 있는데, 그러한 경향이 높은 가정의 하우스 더스트에서 PBDEs 농도가 높게 나타난다.

PBDEs의 동족체(homologues)별 농도를 보면, 전 지역의 평균 PBDEs의 농도는 6.881 ng/g-dry wt. 중 BDE-209의 농도는 3.389 ng/g-dry wt.으로 총 PBDEs의 33.67%를 차지하고 있다. PBDE 동족체 농도는 penta-BDE > deca-BDE > tetra-BDE > hexa-BDE > nona-BDE > hepta-BDE > tri-BDE > octa-BDE 순이었다.

PBDE 동족체의 농도 분율은 tri-, octa-BDE의 경우 1% 미만이었으며, hexa-, hepta-, nona-BDE는 1%~10% 미만이었

Table 2. Concentration levels of PBDEs in house dust

Homologue	Isomer	HD 01	HD 02	HD 03	HD 04	HD 05	HD 06	HD 07	HD 08
Tri-BDE	28	0.031	0.010	0.004	0.006	0.021	0.005	0.022	0.035
	49	0.036	0.013	0.004	0.025	0.051	0.037	0.055	0.035
Tetra-BDE	47	1.310	0.407	0.172	0.243	1.431	0.191	0.877	0.876
	66	0.031	0.011	0.003	0.005	0.045	0.005	0.000	0.016
Penta-BDE	100	0.992	0.231	0.073	0.101	0.796	0.093	0.205	0.527
	99	1.520	0.513	0.429	0.524	1.634	0.665	0.000	1.400
	85	0.006	0.002	0.002	0.004	0.007	0.001	0.000	0.005
	118	0.041	0.016	0.009	0.014	0.001	0.000	0.862	0.007
Hexa-BDE	153	0.168	0.045	0.016	0.018	0.165	0.014	0.077	0.135
	154	0.178	0.051	0.019	0.027	0.212	0.020	0.178	0.171
Hepta-BDE	183	0.029	0.003	0.012	0.001	0.009	0.004	0.008	0.009
	181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	190	0.001	0.000	0.034	0.116	0.041	0.092	0.638	0.052
Octa-BDE	197	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	203	0.006	0.003	0.013	0.004	0.012	0.013	0.026	0.014
Nona-BDE	208	0.016	0.015	0.020	0.008	0.077	0.029	0.119	0.042
	207	0.027	0.024	0.029	0.015	0.132	0.049	0.209	0.076
	206	0.017	0.015	0.021	0.011	0.080	0.036	0.196	0.043
Deca-BDE	209	0.417	0.407	0.246	0.195	2.923	0.826	2.601	0.712
Σ Tri-BDE		0.031	0.010	0.004	0.006	0.021	0.005	0.022	0.035
Σ Tetra-BDE		1.377	0.430	0.180	0.272	1.526	0.232	0.932	0.927
Σ Penta-BDE		2.559	0.763	0.513	0.643	2.438	0.759	1.067	1.939
Σ Hexa-BDE		0.345	0.096	0.035	0.045	0.376	0.034	0.255	0.306
Σ Hepta-BDE		0.030	0.003	0.047	0.117	0.051	0.096	0.646	0.061
Σ Octa-BDE		0.006	0.003	0.013	0.004	0.012	0.013	0.026	0.014
Σ Nona-BDE		0.060	0.054	0.070	0.033	0.289	0.113	0.524	0.161
Σ Deca-BDE		0.417	0.407	0.246	0.195	2.923	0.826	2.601	0.712
Total		4.825	1.767	1.106	1.317	7.636	2.079	6.074	4.154

Table 3. Concentration levels of PBDEs in house dust-continued (ng/g dry wt.)

Homologue	Isomer	HD 09	HD 10	HD 11	HD 12	HD 13	HD 14	HD 15
Tri-BDE	28	0.033	0.027	0.011	0.003	0.005	0.005	0.021
	49	0.039	0.060	0.025	0.002	0.013	0.007	0.049
Tetra-BDE	47	0.855	2.503	0.838	0.043	0.638	0.354	1.835
	66	0.020	0.060	0.024	0.001	0.016	0.010	0.043
Penta-BDE	100	0.470	2.229	0.984	0.045	1.676	0.586	1.138
	99	1.004	2.844	1.670	0.063	1.716	0.779	1.834
	85	0.005	0.012	0.004	0.000	0.005	0.003	0.009
	118	0.034	0.067	0.024	0.001	0.022	0.010	0.160
Hexa-BDE	153	0.094	0.593	0.210	0.008	0.405	0.109	0.224
	154	0.134	0.517	0.218	0.008	0.372	0.106	0.361
Hepta-BDE	183	0.006	0.018	0.007	0.002	0.012	0.011	0.093
	181	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	190	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005
Octa-BDE	197	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049
	203	0.008	0.026	0.005	0.004	0.004	0.005	0.019
Nona-BDE	208	0.068	0.473	0.028	0.018	0.021	0.032	0.058
	207	0.123	0.765	0.050	0.030	0.032	0.058	0.116
	206	0.101	1.020	0.037	0.018	0.023	0.034	0.073
Deca-BDE	209	3.485	32.806	1.266	0.477	0.722	1.414	2.334
Σ Tri-BDE		0.033	0.027	0.011	0.003	0.005	0.005	0.021
Σ Tetra-BDE		0.914	2.623	0.888	0.046	0.666	0.371	1.927
Σ Penta-BDE		1.513	5.153	2.682	0.109	3.418	1.378	3.142
Σ Hexa-BDE		0.228	1.109	0.429	0.016	0.777	0.215	0.585
Σ Hepta-BDE		0.007	0.022	0.007	0.002	0.013	0.011	0.097
Σ Octa-BDE		0.008	0.026	0.005	0.004	0.004	0.005	0.068
Σ Nona-BDE		0.292	2.258	0.115	0.065	0.077	0.124	0.247
Σ Deca-BDE		3.485	32.806	1.266	0.477	0.722	1.414	2.334
Total		6.480	44.024	5.402	0.722	5.681	3.523	8.421

으며, deca-BDE가 33.67%, penta-BDE가 37.37%의 분율을 보였다. 이러한 경향은 deca-BDE technical mixture의 구성 물질인 deca-BDE, nona-BDE의 평균농도가 다른 동종체(congeners)에 비해 높게 나타났던 퇴적물과 토양 샘플과 차이점을 보이는 것으로, 주요 오염원 및 경로의 차이를 고려해야 할 것으로 판단이 된다.

산업체 등에서 사용하는 브롬화 난연제가 주원인이 되는 퇴적물/토양과는 달리 실내 하우스 테스트의 경우 이러한 요인뿐만 아니라 실내 환경에서 많이 사용하는 전기·전자제품, 섬유제품, 내부 장식물 등 브롬화 난연제에 노출되는 경로의 다양성과 노출빈도에 따른 차이로 인해 이러한 경향의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

PCDDs, PCDFs, PCBs 등 다이옥신 유사화합물에 대한 TEQ를 이용한 독성평가 연구가 진행되고 있지만 PBDEs는 아직 잠재독성의 평가기준이 없다. Eljarrat 등⁸⁾은 2,3,7,8-TCDD 보다 각각 등급이 낮은 ‘잠재적인 TCDD 독성 등가치’를 제안하였다. BFRs의 독성작용에 관한 연구는 상당히 제한되어 있으며, 일부 17종의 PBDEs는 Murk 등⁹⁾과 Chen 등¹⁰⁾의 연구에 의해 다이옥신 유사 잠재성에 대한 확인이 이루어졌으며, 잠재독성등가계수(Relative Potency, REP)값은 2,3,7,8-TCDD보다 각각 낮게 측정되었다(Table 4).

Table 4. Relative potency (REP) calculated for PBDEs

Isomer	REP	Reference
BDE #47	7.1×10^{-7}	Murk et al., 1996 ⁹⁾
BDE #77	3.2×10^{-3}	Chen et al., 2001 ¹⁰⁾
BDE #99	5.9×10^{-6}	Murk et al., 1996 ⁹⁾
BDE #100	2.4×10^{-5}	Chen et al., 2001 ¹⁰⁾
BDE #119	3.5×10^{-5}	Chen et al., 2001 ¹⁰⁾
BDE #126	2.4×10^{-3}	Chen et al., 2001 ¹⁰⁾
BDE #153	4.3×10^{-6}	Murk et al., 1996 ⁹⁾

본 연구에서는 이러한 PBDEs의 잠재독성등가계수인 REP 값을 이용하여 대상지역에 대한 독성평가를 진행하고 Table 5에 나타내었다. ΣTEQ가 $1.506 \times 10^{-6} \sim 7.461 \times 10^{-5}$ pg-TEQ/g-dry(평균 2.401×10^{-5} pg-TEQ/g-dry)로 나타났으며, BDE #100과 BDE #99는 각각 1.623×10^{-5} pg-TEQ/g-dry (62.62%), 6.528×10^{-6} pg-TEQ/g-dry (31.88%)로 가장 높은 기여도를 보이고 있다. 연구 대상지역에 대하여 전반적으로 BDE #100의 기여도가 높은 것으로 나타났다. 이것은 상대적으로 BDE #100의 REP값이 높고, 이보다 더 높은 REP 값을 가지는 #77, #119, #126의 검출이 되지 않은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Table 5. REP apply to PBDEs TEQ in house dust (pg-TEQ/g-dry)

Isomer	HD 01	HD 02	HD 03	HD 04	HD 05	HD 06	HD 07	HD 08	HD 09	HD 10	HD 11	HD 12	HD 13	HD 14	HD 15
BDE #47	9,302E-7	2,889E-7	1,224E-7	1,724E-7	1,016E-6	1,355E-7	6,229E-7	6,220E-7	6,074E-7	1,777E-6	5,953E-7	3,026E-8	4,529E-7	2,514E-7	1,303E-6
BDE #99	8,969E-6	3,028E-6	2,531E-6	3,092E-6	9,641E-6	3,923E-6	0,000E+0	8,261E-6	5,924E-6	1,678E-5	9,855E-6	3,742E-7	1,012E-5	4,594E-6	1,082E-5
BDE #100	2,380E-5	5,553E-6	1,753E-6	2,433E-6	1,910E-5	2,231E-6	4,925E-6	1,264E-5	1,128E-5	5,350E-5	2,361E-5	1,068E-6	4,022E-5	1,407E-5	2,732E-5
BDE #153	7,209E-7	1,952E-7	6,719E-8	7,729E-8	7,076E-7	6,195E-8	3,303E-7	5,817E-7	4,026E-7	2,549E-6	9,040E-7	3,334E-8	1,742E-6	4,681E-7	9,645E-7
ΣTEQ	3,442E-5	9,065E-6	4,473E-6	5,775E-6	3,047E-5	6,351E-6	5,878E-6	2,210E-5	1,822E-5	7,461E-5	3,497E-5	1,506E-6	5,254E-5	1,938E-5	4,041E-5

3.2. PBDEs 발생원 추정

본 연구에서는 하우스 먼지 내의 PBDEs의 오염원 추정을 위해 이성체 분포특성과 통계적 기법을 통해 오염원 해석을 수행하였다.

3.3. 이성체 분포 특성을 통한 발생원 추정

이성체의 분포패턴을 알아보기 위해 각각의 이성체 농도를 총 농도로 나누어 백분율로 환산하고 분포 패턴을 Fig. 2와 3에 나타내었다.

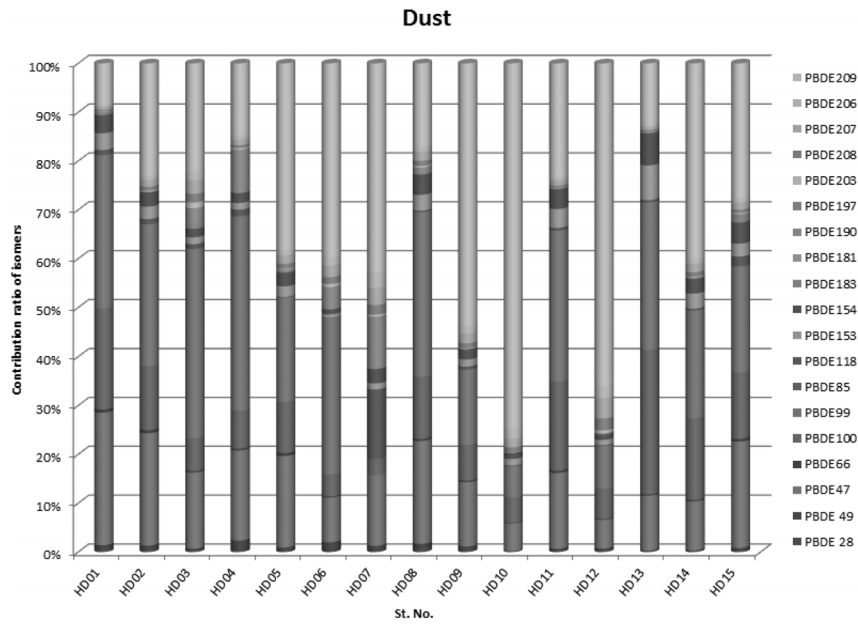


Fig. 2. Distribution ratio of congeners.

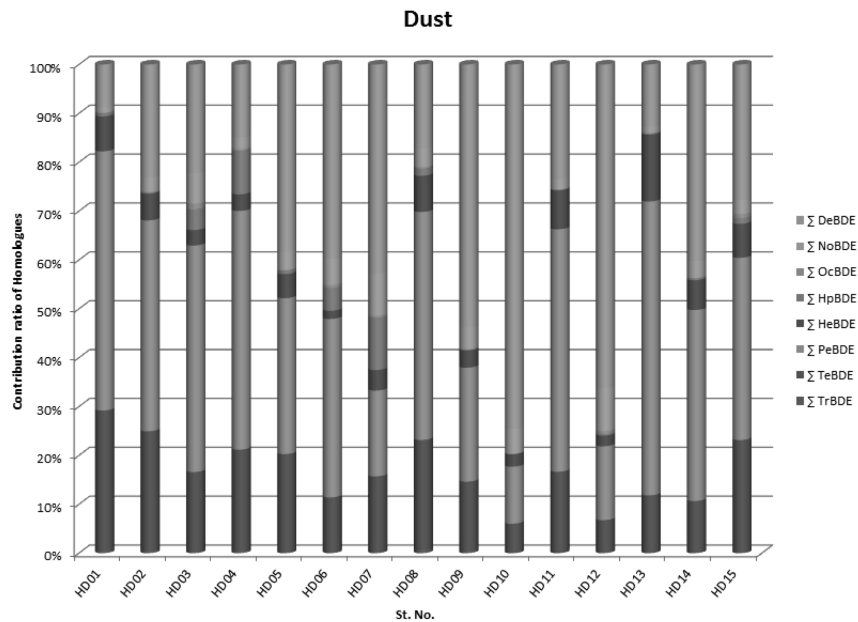


Fig. 3. Distribution ratio of homologues.

더스트의 경우, 개별 이성체의 경우 PBDE-209가 평균 33.67%로 가장 우세하였으며, PBDE-99와 PBDE-47, PBDE-100이 각각 평균 24.13%, 15.40%, 11.68%의 분포를 보였다. PBDE-206과 207은 각각 1.35와 1.82%로 penta-BDE인 PBDE-99와 100에 비해 낮게 나타났다.

Deca-BDE (BDE-209)을 제외한 PBDEs 이성체 중 BDE-99와 BDE-47, BDE-100이 우세하였는데, BDE-99는 상업용 penta-BDE에서 70% 이상을 차지하는 우세종이며, 이전 연구들을 통해 하수슬러지나 해양퇴적물, 물고기나 사람에게서 BDE-47이 가장 우세한 이성체로 조사된 바 있다.

3.4. 통계적 기법을 통한 발생원 추정

본 연구의 대상지역내 환경시료간의 유사성을 확인하고 각 지점에 따른 PBDEs 동족체 분포패턴의 차이를 알아보기 위해 통계학적 방법인 다변량통계분석 중 요인분석을 실시하였다. 본 연구에서는 요인분석의 추출방법 중 하나인 주성분분석(Principle Component Analysis, PCA)을 이용해 PBDEs 동족체에 대한 분석을 진행하였다.

더스트 시료의 경우, Fig. 4에서와 같이 Loading plot에서 주 성분 1과 상관성이 높은($r > 0.6$) 동족체는 hexa-BDE, penta-BDE, deca-BDE, nona-BDE로 나타났다. 퇴적물, 토양 시료와 달리 상업용 penta-BDE의 영향을 받은 것으로 판단이 되며, BDE-209와 BDE-47, BDE-99, BDE-100이 주성분이 되었다.

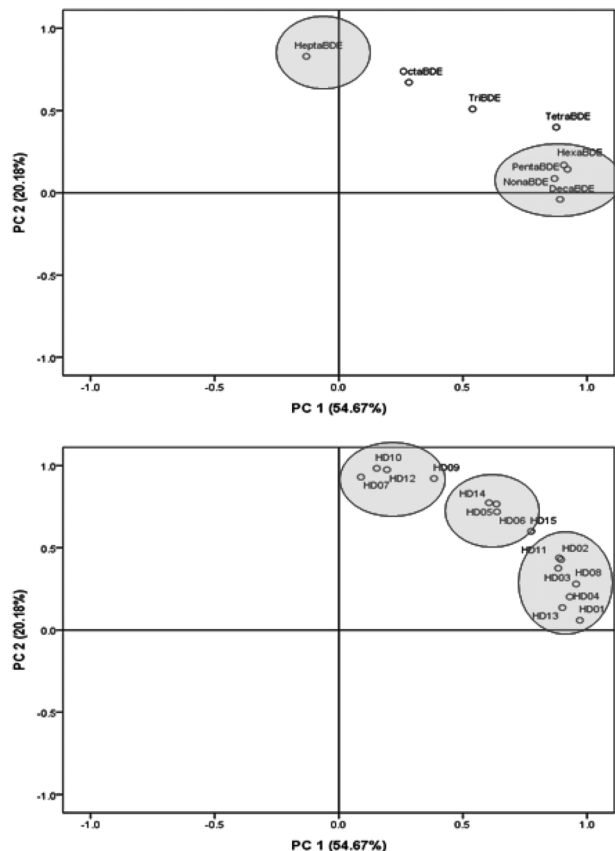


Fig. 4. Factor loading plot (upper fig.) and score plot (lower fig.) of PBDEs in house dust.

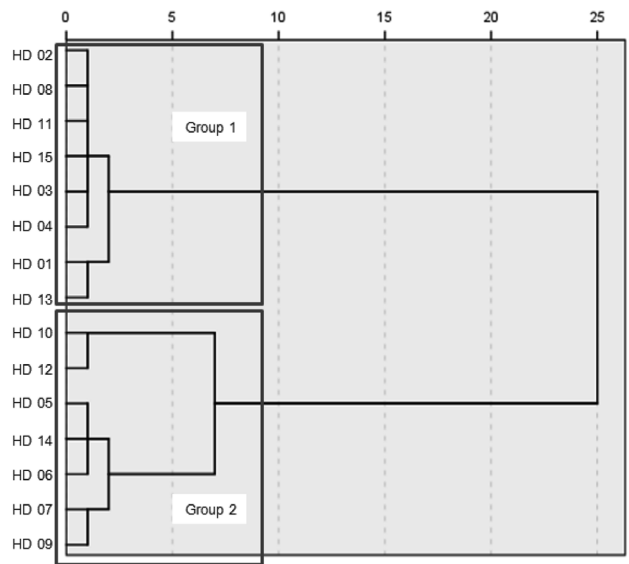


Fig. 5. Dendrogram using ward method of PBDEs.

전 시료에 대해, hexa-BDE와 연관성이 높으며, 상업용 deca-BDE, penta-BDE, octa-BDE와의 연관성도 있는 것으로 판단된다.

주성분분석을 통해 구분되는 패턴은 각 시료별로 거의 유사한 형태를 보이고 있으나, 주요 인자의 성분이 일부 차이가 발생하며, 특히, penta-BDE와의 연관성을 볼 수 있다.

상기의 요인분석 외에 또 다른 통계학적인 방법인 군집분석을 이용하여 유사성을 확인하였다. 군집분석은 분석대상들을 상호연관성에 근거하여 서로 동질적인 집단으로 분류하는 기법으로 주어진 분류기준에 의거하여 서로 유사성을 지닌 대상들을 하나의 집단으로 묶어 궁극적으로 집단간은 서로 이질적이면서 집단에 속한 대상들은 서로 동질적인 군집을 만들어내는 방법이다.

개별 동족체 자료를 토대로 군집분석한 결과 형성되는 그룹을 Fig. 5에서 살펴보면, 두 개의 그룹으로 나눌 수 있다. tetra-BDE와 penta-BDE가 전체 PBDEs 중 50% 이상의 비율로 많이 나타나 상업용 penta-BDE와의 관련성이 높은 것으로 판단된다. 전 지역을 대상으로 판단할 때 상업용 deca-BDE와 관련성이 가장 큰 것 나타났다. 이와 같은 결과는 국내 PBDEs 사용량 중 deca-BDE가 97% 이상을 차지하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 세계적으로 상업용 deca-BDE의 사용량이 penta-BDE와 octa-BDE의 사용량을 합한 것보다 5배 가까이 많아, 이전 국내의 선행연구에서 deca-BDE의 비중이 다른 동족체들보다 크게 나타난다.

4. 결론

하우스 더스트의 PBDEs 농도는 0.722-44.024 ng/g-dry로, 특히 PBDE 209의 농도가 총 PBDEs의 80% 이상을 차지하였다.

PBDE의 동종체의 농도분율을 살펴본 결과, 하우스 더스트에서 penta-BDE > deca-BDE > tetra-BDE > hexa-BDE > nona-BDE > hepta-BDE > tri-BDE > octa-BDE 순으로 나타났다. 고브롬화 동종체의 농도가 저브롬화 동종체에 높게 나타났다.

이성체 분포 패턴을 비교할 때, 저브롬화 PBDEs는 퇴적물/토양에 침적한 후 휘발성이 강하여 재취발되어 대기중에서 가스상으로 존재하고 실내 환경에 침투 후 하우스 먼지 등에 침착하는 것으로 판단이 된다. 상대적으로 고브롬화 PBDEs는 주로 입자상으로 존재하고 가스상에 비해 휘발성도 적기 때문에 퇴적물과 토양에 지속적으로 누적된 결과로 판단된다. 또한, 하우스 더스트의 경우 퇴적물/토양과 비교하여 상업용 penta-BDE와의 관련성이 높은 것으로 판단된다.

전 지역을 대상으로 할 때 상업용 deca-BDE와 관련성이 가장 큰 것 나타났다. 이와 같은 결과는 국내 PBDES 사용량 중 deca-BDE가 97% 이상을 차지하기 때문인 것으로 사료된다. 또한 세계적으로 상업용 deca-BDE의 사용량이 penta-BDE와 octa-BDE의 사용량을 합한 것보다 5배 가까이 많아, 이전 국내외 연구와 유사하게 deca-BDE의 비중이 다른 동족체들보다 크게 나타나는 결과를 얻었다.

사 사

본 연구는 “부경대학교 자율창의학술연구비 지원사업(과제번호 C-D-2013-0601)”의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. “Resolutions adopted by the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm Convention on Persistence Organic Pollutants,” UNEP(2001).
2. “Research of monitoring system installation for persistent organic pollutants, such as dioxins,” Ministry of Environment(2007).
3. Betts, K., “Why do PBDE levels vary widely?,” *Environ. Sci. Technol., Sci. News*, **37**(9), 164A~165A(2003).
4. Hale, R., Guardia, M., Harvey, E. and Mainor, M., “Brominated diphenyl ethers in land-applied sewage sludges in the US,” The second international workshop on brominated flame retardants, Stockholm, pp. 149~52(2001).
5. Ohta, S., Ishizuka, D. and Nishimura, H., “Comparison of polybrominated diphenylethers in fish, vegetables, and meats and levels in human milk of nursing woman in Japan,” *Chemosphere*, **46**(5), 689~96(2002).
6. Sjodin, A., Hagmar, L., Kiasson, W. E., Bjokr, J. and Bergman, A., “Influence of the consumption of fatty Baltic Seafish on plasma levels of alogenated environmental contaminants in Latvian and Swedish Men,” *Environ. Health Perspec.*, **108**, 1035~41(2000).
7. Strandman, T., Kiviranta, H., Kumpulainen, J., Koistinen, J. and Vartiainen, T., “Polybrominated Diphenyl Ethers in Finnish food items,” Brominated flame retardants conference, Burlington, Ontario, pp. 307~310(2001).
8. Eljarrat, E., Caizach, J. and Rivera, J., “Evaluation of dioxin contamination in sewage sludge discharges on coastal sediments from catalonia, spain,” *Water Res.*, **35**(11), 2799~2803(2004).
9. Murk, A. J., Legle, Jr., Denison, M. S., Giesy, J. P., Van de Guchte, C. and Brouwer, A., “Chemical-Activated Luciferase Gene Expression (CALUX): A Novel in Vitro Bioassay for Ah Receptor Active Compounds in Sediments and Pore Water,” *Fundam Appl. Toxicol.*, **33**, 149~160(1996).
10. Chen I. M., F. C. chang, M. F. Hsu and Y. S. Wang, “Comparisons PCBs dechlorination Occurrences in various contaminated Sediments,” *Chemosphere*, **43**, 649-654(2001).