

공단지역 주변 토양 중 PCBs 농도분포 및 발생원 추정에 관한 연구

박석운* · 김경수** · 김종국†

*전력연구원 환경구조연구소 환경화학분석센터 · **청주대학교 환경공학과 · 전북대학교 환경공학과

(2007년 1월 25일 접수, 2007년 4월 23일 채택)

Concentration Distribution of PCBs in Soil Around Industrial Complex and Relationship with PCBs Sources

Seok-Un Park* · Kyoung-Soo Kim** · Jong-Guk Kim†

*Environment & Structure Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

**Department of Environmental Engineering, Cheongju University

Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University

ABSTRACT : To investigate the relationship between PCB sources and concentration level in soil, PCBs concentration of 8 soil samples around Shiwa industrial complex were measured. The concentration of PCBs in soil samples were ranged from 2.43 to 274 ng/g dry (0.116 to 60.5 pg WHO-TEQ/g dry) and off-gas were ranged from 48.6 to 2872 ng/m³(0.00150~15.2 ng WHO-TEQ/m³); these are similar levels with results of previous study in Korea. The homologue patterns in soil samples were varied from sample to sample, but isomer patterns were very similar with each other. The two principal components were extracted by Principal Component Analysis(PCA) of 8 soil samples and cumulative factor loading was 95.7%. As the result of PCA, it could be expected that PCBs in soil samples of this study were more affected by PCB products than combustion process and mostly affected by already-known sources.

Key Words : PCBs, Soil, Principal Component Analysis, Aroclor

요약 : PCBs의 오염정도 파악과 발생원 추정을 위해 다양한 발생원이 밀집한 시화 공단지역을 중심으로 8개의 토양시료를 채취·분석하였다. 토양 중 PCBs의 농도는 2.43~274 ng/g dry(0.116~60.5 pg WHO-TEQ/g dry)의 범위로 검출되었고, 배가스 시료는 48.6~2,872 ng/m³(0.00150~15.2 ng WHO-TEQ/m³)의 범위로 조사되었으며, 이는 기존의 연구결과와 비교적 유사한 수준인 것으로 나타났다. 토양 중 PCBs의 동족체분포는 시료마다 다양한 패턴을 보였으나, 동족체 중 이성질체분포는 매우 유사한 경향을 나타내었다. 토양시료에 대한 발생원 추정을 위해 주성분분석을 수행한 결과 누적부하량이 95.7%인 주성분 1, 2를 추출할 수 있었다. 또한 Aroclors와 배출가스의 이성질체패턴 비교결과를 토대로 토양시료의 주성분분석 결과를 해석한 결과, 연소공정보다는 제품 PCBs에 의한 영향이 많은 것으로 추정되었고, 토양 중 PCBs의 많은 부분을 기존의 발생원인 제품 PCBs와 연소공정으로 설명할 수 있었다.

주제어 : PCBs, 토양, 주성분분석, Aroclor

1. 서론

PCBs는 1881년 Schmidt에 의해 최초로 합성되어 1929년 미국에서 상업적으로 생산이 시작된 이래, 사용이 중지될 때까지 Aroclor, Clophen, Phenoclor, Kanechlor 등의 상품명으로 '30~'70년대에 전 세계에서 130만 톤이 생산되어 변압기, 축전기의 절연유, 윤활유, 가소제, 도료, 복사지 등 다양한 용도로 사용되어 왔다.¹⁾ 그러나, PCBs가 잘 분해되지 않아 환경 중에 장기간 잔류하고 인체 및 생태계에 축적되는 위해성이 있으며, 장거리이동에 의해 지구적인 환경오염문제를 야기하는 대표적인 물질로 밝혀짐에 따라 세계 각 국가들은 1970년대부터 생산 및 사용을 금지, 규제하기 시작하였다. 또

한, UNEP, 바젤협약, 스톡홀름협약 등 국제기구에서도 PCBs를 잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants ; POPs)로 분류하여 PCBs에 의한 환경오염과 그 관리문제를 국제적인 현안으로 다루고 있다.^{2,3)}

PCBs는 염소가 들어있는 물질의 열 공정(thermal process) 도중 배출되기도 하며, 연소부산물(연료연소, 쓰레기소각, 철산화 공정)로써 대기 중으로 배출되기도 하나, 부산물 PCBs로서 별도로 취급된다. 생산물 중의 PCBs는 PCBs가 함유된 장비를 사용할 경우 유출되거나 PCBs 및 PCBs에 오염된 물질을 연소할 경우 환경으로 배출되나, PCBs는 축전기 및 변압기의 절연유, 유압·냉각장치, 가소제, 종이접착제 등으로 널리 사용되고 있으므로 PCBs의 배출경로는 매우 복잡하고 설명하기 어렵기 때문에 PCBs 배출원의 확인과 배출량 파악은 매우 어렵다. 또한, 우리나라는 PCBs의 사용을 법으로 금지하고 있으나, 법을 엄격히 집행하기 위한 후속체제의 미비와 사업체들의 인식부족 또는 경제적 여건들 때문에 아

† Corresponding author

E-mail: kjongguk@chonbuk.ac.kr

Tel: 063-270-2448

Fax: 063-270-4228

적도 일부 사용이 되고 있거나, 재고품 혹은 폐기물의 형태로 남아 제3의 발생원 역할을 하는 것으로 밝혀지고 있다.⁴⁾

국립환경연구원에서 변압기의 절연유에 한하여 “절연유 중 PCBs 세부분석 지침”을 마련하고, “PCBs 함유 제품 및 폐기물 중의 PCBs 분석방법 개발”의 연구사업을 수행하여 금속, 섬유, 슬러지 등의 13종의 폐기물에 대한 분석방법을 검토하기도 하였으나, 현재 국내에서는 PCBs 함유 제품과 폐기물에 대해서는 적절한 분석법의 검토가 미비한 실정이고, 배출실태나 환경매질 중 PCBs의 농도분포에 대한 연구 또한 국외의 여러 선진국들에 비해 미흡한 상황이다.^{5,6)} 다만, Breivik(2002)이 전 지구적인 PCBs 수입량과 수출량 및 각 국가의 PCBs 사용과 제한에 관한 제도 등을 토대로 114개 국가에 대해 연도별, PCBs 소비량을 조사한 내용에 우리나라의 자료가 포함되어 있다.⁷⁾

국내에서의 환경 중 PCBs에 대한 연구는 주로 대기를 위주로 수행되어 왔고 수질매체에 대해서도 수행된 바 있으나 토양에 대해서는 거의 진행된 바가 없다.⁸⁻¹⁰⁾ 여러 환경매질 중에서 토양매질은 단위무게 당 표면적이 커서 물질의 보관용량이 매우 크고, 이동·확산이 느린 특징을 보이고 있기 때문에 대부분의 오염물질은 토양매질에 보관되기 쉬우며, 온도의 상승과 하강에 따라 각각 오염물질의 배출원과 흡수원의 역할을 하기도 한다.¹¹⁾ 특히, 토양에는 다양한 미생물이 존재하고 있어 활발한 분해도 기대할 수 있으나, PCBs의 경우 토양에서의 생분해 가능성은 거의 없는 것으로 알려져 있다.¹²⁾

이에 본 연구에서는 발생원 주변 환경매질 중 토양에 대하여 PCBs의 오염실태를 조사하고, 각 발생원을 추정함으로써, 향후 배출량조사, 배출계수 산정 및 발생원 관리를 위한 기초를 마련하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 시료채취지점

토양시료는 금속, 기계, 석유화학 및 일부 재활용 관련시설 등 다양한 소각시설과 산업시설이 밀집해 있는 시화공단지역을 위주로 반경 5 km 내의 지역을 대표할 수 있도록 채취하였고, 배가스 시료는 도시폐기물 소각시설과 산업폐기물 소각시설을 각각 구분하여 채취하였다. 토양시료는 내분비계장애물질측정분석방법(2002)에 따라 채취하였고, 배가스 시료는 대기오염공정시험방법에 준하여 채취하였다.¹³⁾ Fig. 1에 토양 및 배가스 시료 채취지점을 나타내었다.

2.2. 전처리 및 정제

채취한 토양시료와 배가스 시료는 내분비계장애물질측정분석방법(2002)과 US EPA Method 1668a에 준하여 전처리 및 정제를 진행하였다. 각 시료의 추출액은 황산처리, 실리카겔 컬럼, 알루미늄 컬럼 및 활성탄 컬럼을 적절히 병행하여 정제를 수행하였고, 그 농축액을 기기분석에 사용하였다. 모든 시약 및 용매는 ‘잔류농약 분석용’ 또는 ‘PCBs 분석용’을

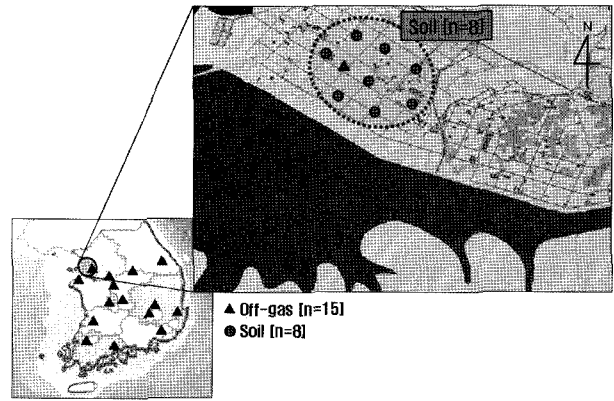


Fig. 1. Sampling sites of soil and off-gas samples.

사용하였고, 모든 유리초자는 아세톤과 헥산을 이용하여 미리 세척한 후 사용하였으며 매질별 공시험을 수행하여 외부 요인에 기인한 오염을 배제하였다.

2.3. 기기분석

모든 PCBs 이성질체를 완전하게 분리할 수 있는 컬럼은 존재하지 않기 때문에 PCBs를 분리·정량하기 위하여 2종류 이상의 컬럼을 병행하여 사용하나, 본 연구에서는 여러 컬럼 중 DB-5MS 컬럼을 사용하여 PCBs 분석을 수행하였다. 분석기기는 HP6890/MAT95XP(Thermo Finnigan)를 사용하였고, 극미량 화합물의 정량 및 검출에 널리 이용되고 있는 EI-SIM(Electron Impact/Selected Ion Monitoring)법으로 10,000 이상의 분해능에서 PCBs의 전이성질체 분석을 수행하였다. Table 1에 HRGC/HRMS의 자세한 기기분석 조건을 나타내었다.

2.4. 통계적 해석방법

여러 통계적 수법 중에서 주성분분석(Principal Component Analysis; PCA)과 군집분석(Cluster Analysis)은 환경역학적인 측면에서 널리 이용되는 통계적 수법이다. 주성분분석은 그 자체만을 이용하기도 하고, 수용체 모델링을 위한 중간단계로서 이용되기도 한다. 특히 다환방향족탄화수소(Polycy-

Table 1. HRGC/HRMS condition

Instrument	HP 6890 Series
Injector	Splitless
Carrier gas	He, 1 mL/min
Injected sample vol.	1 µL
column	DB-5MS
Temp. program	75°C(hold 1 min) - 40°C/min - 190°C(hold 0 min) - 1°C/min - 240°C(hold 0 min) - 10°C/min - 275°C(hold 6 min)
Instrument	MAT95XP, Thermo Finnigan
Ionization mode	Electron Impact(EI)
Detection mode	Selected Ion Monitoring(SIM)
Ionization voltage	35 eV,
Ionization current	380 uA
Acceleration voltage	4770 V
Resolution	> 10,000(5% valley)

clic Aromatic Hydrocarbons; PAHs), 휘발성유기오염물질(Volatile Organic Compounds; VOCs) 또는 중금속 등을 대상으로 한 발생원의 추정에 이용되기도 하였다.^{14,15)} 발생원들이 특정화학종(지표 이성질체)에 의해 대표되지 않는 경우, 개개 화학종의 분포를 살펴보는 것은 발생원 추정에 적합하지 않다. 그러나, 만일 발생원이 여러 화학종들에 의한 특정한 분포를 보인다면 다변량 통계기법을 통해 발생원을 추정할 수 있게 된다. 이때 가능한 많은 화학종을 이용한다면 좀더 정확한 발생원 추정이 가능하게 되는데, 본 연구에서는 국내에서는 거의 수행된 바가 없었던 토양시료와 발생원의 전 이성체 분석값을 이용하여 주성분분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PCBs 농도분포

토양 중 PCBs의 농도분포는 2.43~274 ng/g dry의 범위로 나타났고, 배가스 시료는 48.6~2872 ng/m³으로 나타났다. 토양시료의 경우 다른 시료들에 비해 PCBs 농도가 현저히 높은 HS-8, HS-14, HS-20을 제외하면 2.43~6.44 ng/g dry의 범위를 나타내고 있었다.

국립환경과학원의 '2004년 내분비계장애물질조사연구 결

과'에서는 토양 중 Total PCBs의 농도범위가 N.D.(2004)~2.6 ng/g(2002)인 것으로 보고되었는데,¹⁶⁾ 이 보고서의 총 38개 채취지점 대부분은 주거지역 및 일반토지(학교, 공원 등)였고 공단지역은 6개 지점에 불과하였으며 이 또한 공단밀집지역이 아니었기 때문에 본 연구의 농도범위에 비해 다소 낮은 범위로 검출된 것으로 사료된다. 한편, 국외에서는 A. A. Lovett 등¹⁷⁾이 다양한 산업시설 주변 토양(중양값; 7.8~77.6 ng/g, 최대값; 1237.4 ng/g)에 대해서 조사한 바가 있고, Melissa L. Whitfield Aslund 등¹⁸⁾은 변압기 제조시설이 위치했던 토양(0.6~200 ug/g, 중양값; 46 ug/g)에 대해서 조사한 바가 있는데 본 연구의 결과보다 현저히 높은 수준으로 나타났다.^{17,18)} Table 2에 본 연구의 토양 중 PCBs 농도분포를 나타내었다.

PCBs의 전체 209개의 이성질체 중 12개의 Co-PCBs(PCB#77, 81, 126, 169, 105, 114, 118, 123, 156, 157, 167, 189)를 WHO-TEQ(1997) 농도로 환산한 결과는 토양시료의 경우 0.116~60.5 pg WHO-TEQ/g dry의 범위로 나타났고 배가스 시료는 0.00150~15.2 ng WHO-TEQ/m³의 범위로 나타났다. 한편, Chang 등¹⁹⁾의 결과에 따르면 국내의 도시 및 산업폐기물 소각장 주변 토양 중 PCBs의 TEQ 농도범위는 0.18~1.47 pg I-TEQ/g의 범위로 보고한 바가 있고, 배가스 시료는 0.0046~

Table 2. PCBs concentration distribution in soil

		(Unit : ng/g dry, Co-PCBs : pg WHO-TEQ/g dry)							
Homologue	HS-1	HS-2	HS-8	HS-12	HS-14	HS-17	HS-20	HS-5	
1CB	0.0180	0.0233	0.0696	0.0158	0.423	0.0154	0.0968	0.0566	
2CB	1.03	1.54	1.29	0.919	28.4	0.470	8.22	0.597	
3CB	2.20	2.46	4.09	1.91	18.3	0.899	2.20	1.52	
4CB	0.397	0.948	9.50	0.521	62.0	0.350	3.53	1.10	
5CB	0.0991	0.294	46.5	0.140	36.9	0.160	6.58	1.02	
6CB	0.168	0.431	161	0.184	53.0	0.383	11.3	1.86	
7CB	0.0243	0.0886	44.4	0.0431	6.67	0.104	2.70	0.126	
8CB	0.0112	0.0342	4.39	0.0153	1.58	0.0200	0.570	0.0131	
9CB	0.00514	0.00968	0.409	0.00707	0.611	0.00685	0.269	0.0547	
10CB	0.0125	0.109	2.58	0.0128	1.11	0.0247	0.790	0.0931	
Total	3.97	5.93	274	3.76	209	2.43	36.2	6.44	
Co-PCBs	#77	0.000586	0.00365	0.105	0.00113	0.353	0.000867	0.0339	0.00511
	#81	0.000102	0.000485	0.0224	0.000164	0.0300	0.0000857	0.00544	0.000848
	#126	0.127	0.403	54.5	0.103	15.8	0.175	5.94	0.870
	#169	0.00843	0.0159	0.268	0.00389	0.480	0.00232	0.261	0.000
	#105	0.00110	0.00409	0.895	0.00166	0.540	0.00249	0.000	0.00830
	#114	0.000611	0.00196	0.225	0.000915	0.218	0.000686	0.308	0.000
	#118	0.00106	0.00273	0.733	0.00169	0.588	0.00148	0.0743	0.00829
	#123	0.000136	0.000628	0.0276	0.0000937	0.0408	0.000121	0.0855	0.00268
	#156	0.000882	0.00260	2.44	0.00125	0.352	0.00228	0.0711	0.0445
	#157	0.000969	0.00170	0.607	0.000823	0.0629	0.00133	0.0294	0.0163
	#167	0.000413	0.00132	0.6582	0.000619	0.175	0.00132	0.0359	0.00693
	#189	0.000155	0.000397	0.0582	0.000149	0.0183	0.000145	0.00732	0.00112
Total	0.141	0.439	60.5	0.116	18.7	0.188	6.86	0.964	

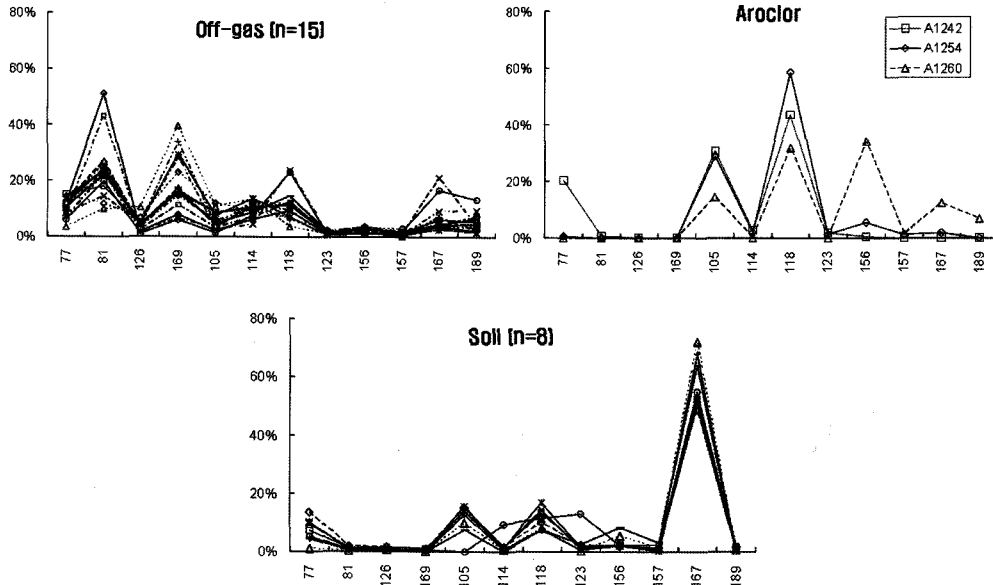


Fig. 2. Co-PCBs pattern of off-gas, Aroclors and soil samples.

12.00 ng I-TEQ/m³의 범위로 보고한 바가 있다.¹⁹⁾ 본 연구의 토양시료의 경우 PCBs의 농도가 상대적으로 고농도로 검출된 HS-8, HS-14, HS-20을 제외하면 본 연구의 결과를 I-TEQ 농도로 환산했을 경우 TEQ 농도범위는 0.116~0.983 pg I-TEQ/g dry, 배가스 시료의 경우 0.00140~14.4 ng I-TEQ/m³의 범위로서 Chang 등¹⁹⁾의 결과와 비교적 유사한 것으로 사료된다.

토양 중 Co-PCBs 이성질체분포는 시료마다 비교적 유사하였고, 이를 발생원(배가스, Aroclor(U.S. EPA))과 비교한 결과 각각 다른 패턴을 보였는데 Fig. 2에 배가스시료, Aroclor 및 토양시료의 Co-PCBs 패턴을 나타내었다. 배가스 시료에서는 PCB#81, 169, 118의 비율이 높았고, Aroclors는 PCB#105, 118이 높았으며 Aroclor 1260에서는 #156의 비율 또한 높았다. 토양의 경우 PCB#167을 비롯하여 #105, 118의 비율이 높았고 PCB#81은 그 비율이 매우 낮았는데, 이는 Aroclors와 유사하고 배가스 시료와는 대조되는 것이었다. 이를 종합해보면 토양 중 Co-PCBs는 주로 Aroclors의 영향을 받은 것으로 생각되고, PCB#167과 같이 Aroclors에서의 함유량이 적거나 거의 없는 이성질체를 통해 Aroclors 제품 이외의 발생원을 예상할 수 있었다.

3.2. PCBs 동족체 및 이성질체 분포

김 등⁹⁾에 의하면 대기시료의 경우 일반적으로 저염소치환체(1~4 CB)의 비율이 고염소치환체(5~10 CB)의 비율보다 상대적으로 높게 나타나는 것으로 보고된 바가 있다.⁹⁾ 본 연구의 토양시료 중 PCBs의 동족체별 농도분포 또한 전반적으로 저염소 치환체가 고염소 치환체보다 많은 비율을 차지하고 있는 것으로 나타났다. PCBs의 농도가 상대적으로 고농도인 시료들(HS-8, HS-14, HS-20)은 비교적 상이한 동족체분포를 보이고 있었는데, 특히 PCB#93, 89/90, 99, 110, 118/106, 136, 149/139, 153, 182/187, 180 등의 농도가 상

대적으로 높았다. 이들 이성질체들은 배가스 시료와 Aroclor의 이성질체분포 패턴을 비교한 결과 Aroclor에서 많은 비율을 차지하고 있는 이성질체들이었다. 또한, Kim 등²⁰⁾이 KC300&400과 KC500&600의 특징이성질체(representative isomer)로 제시한 결과와도 유사한 것으로 나타났다.²⁰⁾ Fig. 3에 토양 중 PCBs의 동족체별 농도분포를 나타내었다.

PCBs는 발생원으로부터 배출되어 환경매질에 이르기까지 매우 다양하고 복잡한 거동과정을 거치게 된다. 이때 각 발생원들과 각 매질별 이성질체분포 패턴을 비교하는 것은 PCBs 환경 중 거동과 발생원 해석을 위한 중요한 수단이 될 수 있다.

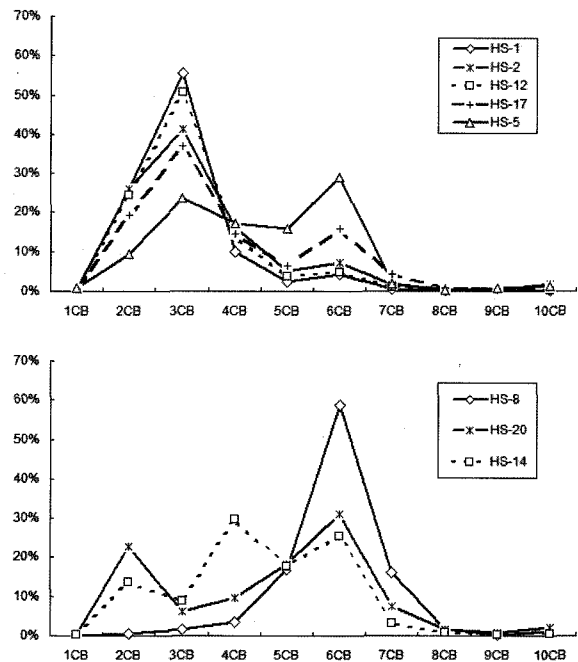


Fig. 3. Homologue distribution of PCBs in soil.

실제로 HS-8, HS-14, HS-20과 같이 각 시료의 총 농도가 현저히 다르고 각 동족체별 비율 또한 시료마다 달랐음에도 불구하고 동족체 중 이성질체 분포는 비교적 유사한 패턴을 보이고 있었다. 특히 6 CB 이상의 동족체의 경우는 이러한

경향이 더욱 두드러졌다. 본 연구에서 발생원으로써 사용된 배가스 시료에서도 같은 현상을 보이고 있었는데, 이러한 현상은 대기 중 PCBs에 대하여 김⁹⁾에 의해 보고된 바가 있다. 金²¹⁾는 다이옥신 및 PCBs의 환경 중 거동은 동족체별로 다

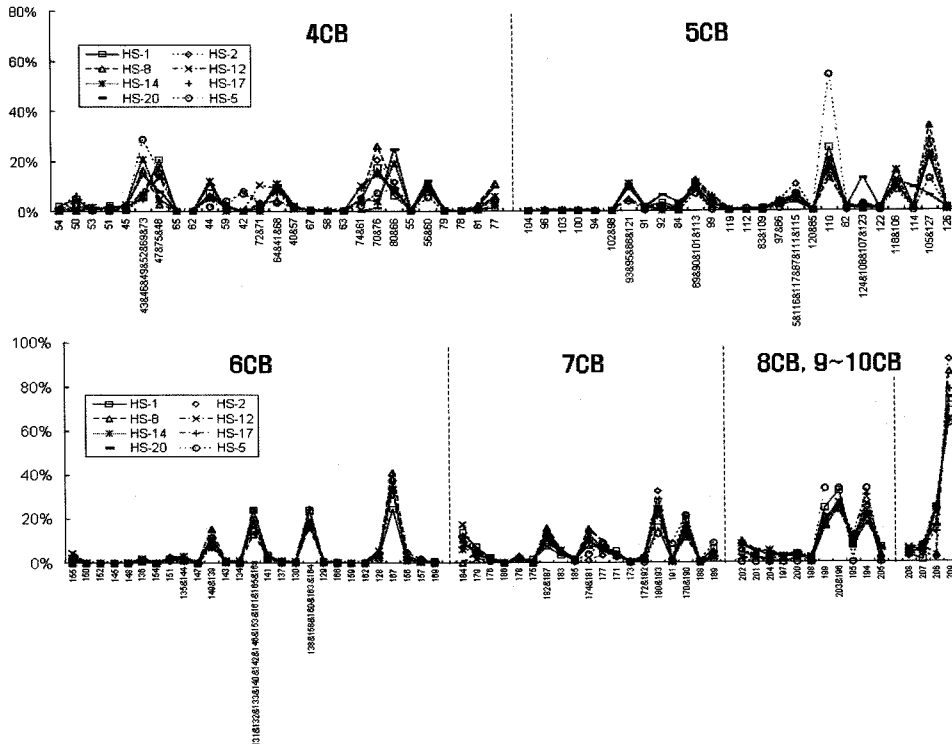


Fig. 4. Isomer distribution of PCBs in soil samples.

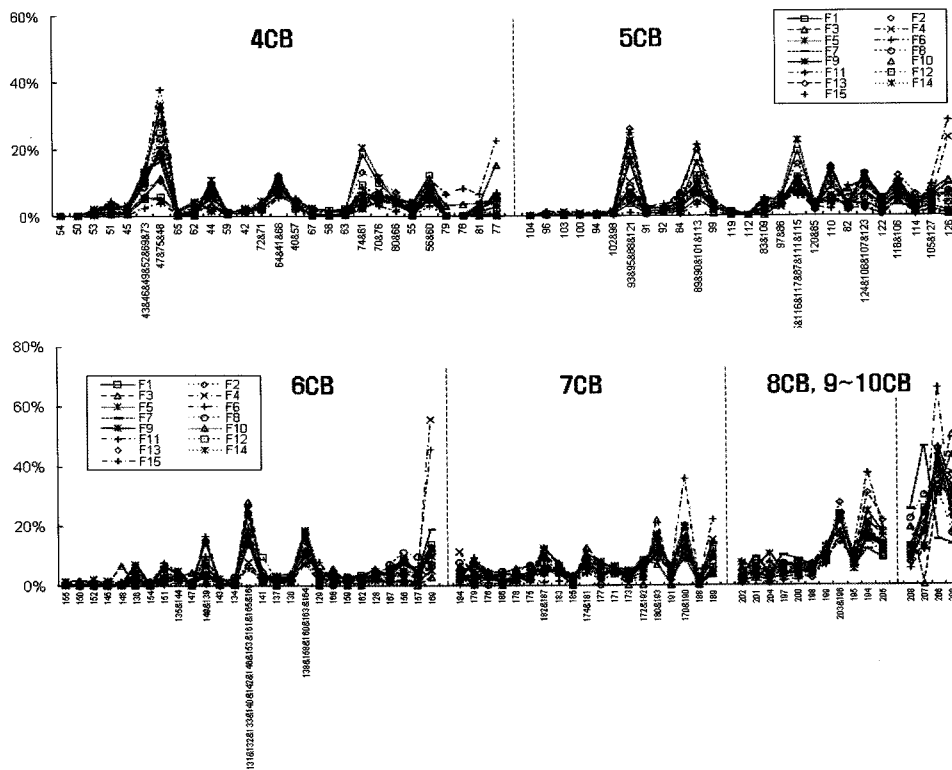


Fig. 5. Isomer distribution of PCBs in off-gas.

르다는 것을 보고하기도 하였는데,²¹⁾ 이는 PCBs의 환경 중 거동에 대한 특징 중 하나로 발생원과 환경매질 중의 PCBs와의 관계를 좀 더 명확하게 규명하는데 있어 중요한 단서가 될 수 있을 것으로 예상된다. 본 연구의 토양과 배가스 중 PCBs의 동족체 중 이성질체 분포를 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다.

3.3. 발생원추정

본 연구에서는 주성분분석(PCA)을 통해 토양시료와 발생원과의 관계를 규명하고자 하였다. 발생원으로써 변압기 절연유에 사용된 Aroclors(제품)와 본 연구의 배가스(연소공정)를 PCBs의 발생원으로 사용하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 제품 중의 PCBs는 그 사용처가 축전기 및 변압기의 절연유를 비롯하여 매우 다양하기 때문에 이들 제품들을 일일이 구분하는 것은 현실적으로 매우 복잡한 작업이다. 또한, 현재 폐기물공정시험법에서도 Aroclor 표준물질을 이용한 피크패턴법으로 폐기물 중 PCBs를 분석하도록 규정하고 있기 때문에, 본 연구에서는 제품 중 PCBs를 대표하여 Aroclor를 사용하였으며 세부적인 자료는 U.S. EPA의 자료를 이용하였다. 주성분분석은 통계분석프로그램인 SPSS 10.0을 사용하였으며 8개 토양시료의 결과 중 1~3 CB를 제외

한 동족체의 전 이성질체값을 사용하여 수행하였다. Fig. 6에 토양시료의 PCA 결과를 Factor loading plot과 Factor score plot으로 구분하여 나타내었다.

주성분분석 결과 본 연구의 토양시료에 대해서 인자부하량이 각각 58.1%, 37.6%인 2개의 주성분이 추출되었다. 주성분 1, 2의 누적부하량은 95.7%로써 상당히 높은 수치를 나타내고 있었다. Fig. 6(a)와 같이 Aroclor 1260과 1254을 대표하는 이성질체들(Aroclor 1254 : #110, #118&106, #125&116&117&87&111&115, #99, #105&127, Aroclor 1260 : #141, #138&158&160&163&164, #149&139, #179, #170&190, #174&181, #183, #177, #182&187)은 주성분 1의 양(+)의 방향으로 위치해 있었고, Aroclor 1242의 이성질체들(#53, #80&66, #64&41&68, #56&60, #43&46&49&52&69&73)은 주성분 2의 양(+)의 방향으로 위치해 있었다. 배가스 시료의 특징 이성질체(#77, #169, #122, #126, #131&132&133&140&142&146, #189, #205, #207)는 어느 정도 주성분 1의 양(+)의 방향으로 치우쳐있기는 하지만 비교적 주성분 1과 2에 골고루 퍼져있는 것으로 나타났다. 이에 따르면 주성분 1은 Aroclor 1,254와 1,260의 복합적인 패턴이고 주성분 2는 Aroclor 1,242로 간주할 수 있다. 제품 중에 사용된 PCBs로써 Aroclor는 특정 공정이나 단일배출원에서 배출되지 않고, 단일품 내지는 혼합품으로 사용되며, 더욱이 혼합품의 경우도 여러 가지 비율로 혼합되어 사용되어진다. 따라서 주성분분석결과와 해석을 연소공정과 제품 중 PCBs 간의 비교에 무게를 둔다면 개별 Aroclor 제품을 구분하는 것은 큰 의미가 없는 것으로 판단된다. 이러한 관점에서 보면 본 연구의 토양시료는 주로 제품 중 PCBs의 영향을 많이 받았으며, 배가스는 발생원으로서의 영향이 거의 없는 것으로 사료된다. 더욱이, Fig. 6(b)의 Factor score plot에서도 볼 수 있듯이 토양시료는 Aroclor 1,260과 약간 떨어져 있긴 하지만 Aroclors와 매우 근접하여 위치해 있고 배가스 시료와는 명확히 구분되는 것으로 나타났다.

그러나, Fig. 6(a)의 주성분 1, 2는 통계적 해석기법을 통해 8개의 토양시료에서 추출한 것으로써 실제 발생원의 profile이 입력된 결과가 아니기 때문에 정확한 정량적인 의미가 포함되지 않았음을 간과해서는 안 된다. 이러한 부분은 좀 더 많은 수의 시료분석과 이에 대한 심도있는 고찰 및 선형회귀모델과 같은 추가적인 분석기법을 수행한다면 발생원들과 토양시료와의 정량적인 관계를 좀 더 명확히 알 수 있고, 기존에 알려진 발생원 이외에 제3의 발생원의 존재에 대한 고찰도 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

발생원 주변 토양 중 PCBs 오염실태 및 농도분포를 파악하고 발생원을 추정하기 위하여 시화공단지역 토양을 중심으로 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 토양 중 PCBs의 농도분포는 2.43~274 ng/g dry의 범위

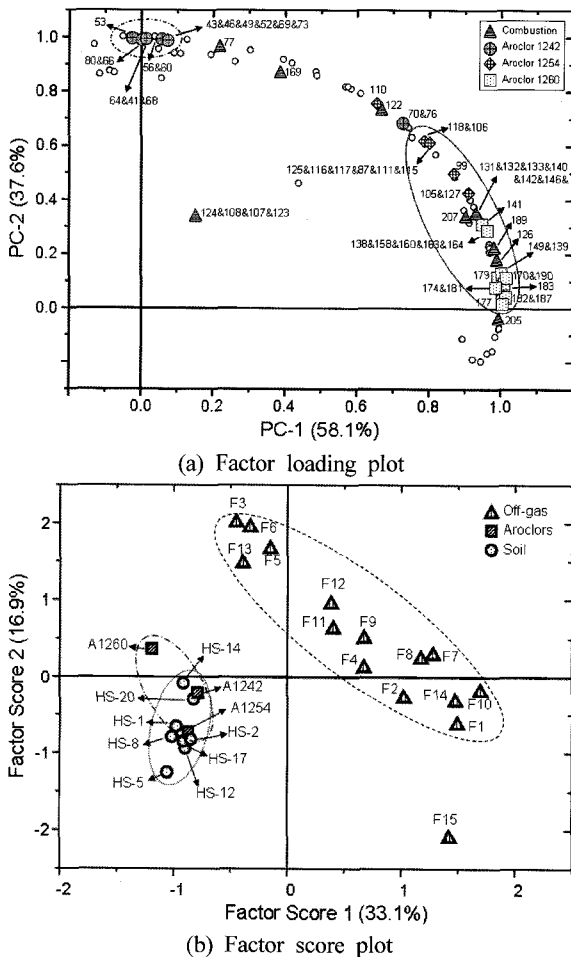


Fig. 6. Principal component analysis of soil samples.

로 나타났고, 배가스 시료는 48.6~2,872 ng/m³으로 나타났다. WHO-TEQ 농도로 환산할 경우 토양은 0.116~60.5 pg WHO-TEQ/g dry, 배가스 시료는 0.00150~15.2 ng WHO-TEQ/m³의 범위인 것으로 조사되었다. 이는 폐기물 소각시설 주변 토양 중 PCBs에 대한 기존의 연구결과와 비교적 유사한 것으로 조사되었다.

2) 토양 중 PCBs의 동족체분포는 시료마다 조금씩 다른 패턴을 보이고 있었으나, 크게 두 분류로 나눌 수 있었다. 그러나 동족체 중 이성질체 분포는 서로 매우 유사한 패턴을 보이고 있어 PCBs의 환경 중 거동을 해석하는데 중요한 단서가 될 것으로 판단된다.

3) PCBs의 주된 발생원으로 알려진 제품 PCBs와 연소공정을 대표하는 소각로 배가스 시료를 사용하여 토양 중 PCBs에 대한 주성분분석 결과를 해석한 결과, 명확한 정량적인 의미가 포함되지는 않았지만 연소공정보다는 제품 PCBs에 의해 영향을 많이 받은 것으로 추정된다.

참고문헌

- Dale, R. R., Andy, B., B. F., Corren, H., Dale, H., Katharine, K., Marlene, B., Terry, S., William, A. T., Henry, R., Eric, R., Liza, R., "Concentrations of dioxin-like PCB congeners in unweathered Aroclors by HRGC/HRMS using EPA Method 1668A," *Chemosphere*, **54**, 79~87(2004).
- Guidelines for the identification of PCBs and materials Containing PCBs, First Issue, UNEP Chemicals(1999).
- Preparation of a National Environmentally Sound Management Plan for PCBs and PCB-Contaminated Equipment, Basel Convention(2003).
- 이동수, 잔류성유기오염물질(POPs) 배출원 조사기법 개발(최종보고서), 서울대학교 환경계획연구소, 환경부(2003).
- 절연유 중 PCBs 세부분석 지침, 국립환경과학원(2004).
- PCBs 함유 제품 및 폐기물 중의 PCBs 분석방법 개발, 국립환경과학원(2005).
- Knut, B., Andy, S., Jozef, M. P., and Kevin, C. J., "Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners - a mass balance approach: 1. Global production and consumption," *The Science of The Total Environment*, **290**(1-3), 181~198(2002).
- 여현구, 최민규, 천만영, 선우영, 도시 및 교외지역에서 대기 중 PCBs의 온도 의존성을 이용한 발생원 특성, *대한환경공학회지*, **24**(5), 813~825(2002).
- 김경수, 송병주, 박석운, 김종국, 공단지역 대기 중 PCBs의 오염농도 및 발생원 추정, *대한환경공학회지*, **27**(4), 385~389(2005).
- 서용찬, 이석현, 김경심, 송병주, 김종국, 한강 수계 중 coplanar-PCBs의 잔류 농도 및 거동 특성 연구, *대한환경공학회지*, **26**(11), 1225~1231(2004).
- Harrad, S. J., Sewart, A. P., Alcock, R., Boumphery, R., Burnett, V., Duarte-Davison, R., Halsall, C., Sanders, G., Waterhouse, K., Wild, S. R., and Jones, K. C., "Polychlorinated biphenyls(PCBs) in the British environment; sinks, sources and temporal trends," *Environ. Pollut*, **85**, 131~146(1994).
- IPCS INCHEM/EHC 140, <http://www.inchem.org>, 2nd Edition(1992).
- 내분비계장애물질측정분석방법, 국립환경과학원(2002).
- Paul, C. H., James, G. Q., Robert, W. C., John, W. K., "The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Narragansett Bay surface sediments," *Marine Pollution Bulletin*, **48**, 351~358(2004).
- Guo, H., Wang, T., Simpson, I. J., Blake, D. R., Yu, X. M., Kwok, Y. H., and Li, Y. S., "Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural in eastern China," *Atmospheric Environment*, **38**(27), 4551~4560(2004).
- 내분비계장애물질조사연구, 국립환경과학원(2004).
- Lovett, A. A., Foxall, C. D., Ball, D. J., and Creaser, C. S., "The Panteg monitoring project: comparing PCB and dioxin concentrations in the vicinity of industrial facilities," *J. Hazard. Mater.*, **61**(1-3), 175~185(1998).
- Melissa L. Whitfield Aslund, Barbara A. Zeeb, Allison Rutter, Kenneth J. Reimer, In situ phytoextraction of polychlorinated biphenyl - (PCB) contaminated soil, *Science of the Total Environment*, **374**, 1~2(2007).
- Chang, Y. S., Kong, S. B., and Michael, G. I., "PCBs concentrations to the total TEQ released from Korean municipal and industrial waste incinerators," *Chemosphere*, **39**(15), 2629~2640(1999).
- Kim, K. S., Yusuke, H., Mika, K., Kouhei, U., and Shigeki, M., "Detailed PCB congener patterns in incinerator flue gas and commercial PCB formulations(Kanechlor)," *Chemosphere*, **55**(4), 539~553(2004).
- 金暻洙, 大氣中PCB의舉動及びMass Balanceに關する研究, 博士學位論文, 橫濱國立大學院, 環境情報學府(2004).