Journal of the Korean Chemical Society
1997, *Vol. 41, No. 5*
Printed in the Republic of Korea

활성탄에 의한 광유내 PCB Congeners의 흡착에 관한 비교 연구

柳 建 相
옥시(주) 연구소
(1996. 11. 30 접수)

A Comparative Study on Adsorption of PCB Congeners in Mineral Oil by Activated Carbon

Keon Sang Ryoo
Oxy Co., Ltd., 587-102, Hakik-Dong, Nam-Ku, Inchon 402-040, Korea
(Received November 30, 1996)

요 약. 광유로부터 polychlorinated biphenyls(PCBs)를 제거할 수 있는 가능성을 평가하기 위해 활성탄을 이용한 흡착반응을 연구하였다. 염소원자의 치환이 비교적 적은 PCBs로 구성되어 있는 Aroclor 1242의 흡착 효율은 95% 이상이었으나, 많은 염소원자들로 치환된 Aroclor 1260은 상당히 낮은 75%의 효율을 나타내었다. 관찰된 차이점은 평면이나 비평면 구조를 갖고 있는 PCBs의 기하학적인 구조에 기인한다. 실제로 평면구조 PCBs의 농도는 Aroclor 1260에서보다도 Aroclor 1242에서 훨씬 높다. PCBs의 독성은 주로 평면 구조와 관련되어 있기 때문에, 활성탄에 의한 평면구조 PCBs의 우선적인 흡착은 활성탄의 처리를 통해 독성의 감소가 성취될 수 있다는 것을 보여준다. 독성 감소의 효율은 Toxicity Equivalence Factor(TEF)를 써서 평가하였다.

ABSTRACT. The sorption kinetic was studied to evaluate feasibility of removing PCBs from mineral oil with activated carbon. Adsorption efficiency for Aroclor 1242 which is composed of lower chlorinated PCB formulations was ≥95%, whereas the adsorption efficiency for Aroclor 1260 having higher chlorinated constituents was considerably lower with the efficiency falling to 75%. The observed difference in the adsorption efficiency is attributed to the geometry of PCBs with non-planar and coplanar structure. The concentration of coplanar PCBs is appreciably higher in Aroclor 1242. Since toxicity is primarily associated with coplanar congeners, the preferential adsorption of coplanar congeners by activated carbon accounts for the fact that toxicity reduction can be achieved through this process. The efficiency of process was assessed in terms of Toxicity Equivalence Factor (TEF).

서 론

PCBs는 biphenyl frame 위에 염소원자의 수와 위치에 따라 congener라 불리우는 209개의 화합물로 구성된다. 일반적인 PCBs의 구조는 *Fig.* 1에 나타내었다. PCBs는 무극성 화합물이며 물에는 녹지 않으나 대부분의 유기용매에는 잘 용해된다. PCBs는 Schmidt & Schulz[1]에 의해서 1881년에 처음으로 합성되었으며 1929년 이래로 미국, 일본, 체코 및 소련 등 여러 나라에서 상업적으로 생산되었다. 이 국가들에서 생산된 전체 PCBs의 양은 1930~1970년 기간 동안 대략 1.2×10^9 kg이었다. 특별히 미국의 Monsanto Company에서 생산된 PCBs는 여러 PCBs의 혼합물로서 Aroclor란 상품명으로 판매되었다. 이 회사에 의해 공급된 PCB 제제들은 Aroclor 1221, 1232, 1242, 1248, 1254, 1260 그리고 1262이었으며 채택된 상품명의 네자리 숫자 중 처음 두 숫자는 biphenyl frame에 있는 탄소원자의 수를 나타내며 마지막 두 자리는 염소원자의 무게 %에 해당된다.

PCBs는 세균이나 효소 혹은 생화학적인 수단으로서 쉽게 분해되지 않고 열에 매우 안정하며 뛰어난 유전(dielectric) 성질을 갖고 있기 때문에 열전달용 액체, 유압장치용 액체, 방염제, 유기 희석제, 가소

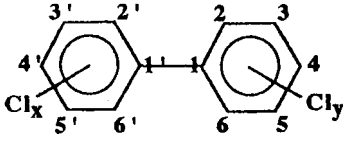

Fig. 1. General structure of polychlorinated biphenyl (PCB).

제, 윤활 잉크, 왁스, 페인트 첨가제, 그리고 특히 변압기나 고압 캐패시터에서 절연체로 유용하게 쓰여 왔다.[2,3] 그러나 PCBs의 물리화학적 성질은 지구의 환경오염 문제를 야기시켜 왔으며 또한 인간의 건강에 상당히 유해한 물질로 인식되고 있다. PCBs는 주로 매립지나 쓰레기 소각장으로부터 공기로 운반되어 환경으로 들어오며, 친유성 혹은 낮은 생분해 성질 때문에 PCBs의 존재는 공기, 물, 토양, 물고기, 야생동물 및 인간의 지방조직, 피, 그리고 모유와 같은 여러 가지의 환경 매개체와 생태계에서 광범위하게 탐지되어 왔다.[4,5]

PCBs는 다양한 동물들(쥐, 생쥐, 돼지쥐, 원숭이)에 대한 독성 실험으로부터 발암물질임이 증명되었으며, 특별히 209개의 congener 중에서 non- and monoortho PCBs는 2,3,7,8-tetra chlorinated dibenzo-p-dioxin(TCDD)과 유사한 평면 구조로 구성되어 있다.[6] 평면 PCB *congeners*의 경직성은 biphenyl bond에 대한 염소원자의 치환 위치에 의존한다. Ortho 치환이 없는 경우나, 단지 하나만의 ortho 치환이 있는 경우에 phenyl ring은 같은 평면 구조인 상태로 있다. 그러나 2개 이상의 ortho 위치에 염소원자가 치환된 경우는 염소 원자들간의 상호 입체효과로 인해서 phenyl ring의 회전을 야기시킨다. 이 경우는 PCB의 비평면 구조라 일컫는다.

일반적으로 "다이옥신"이라고 불리우는 TCDD는 쓰레기를 소각할 때 나오는 재나 배기가스 입자에서 발견되며 평면 구조인 PCBs와 더불어 공통 수용기 매개 응답(입체 선택성 리간드 수용기 반응 및 상응하는 구조 활동도 관계)을 나타내며 유사한 생물학적 효과나 독성 효과(신체 무게 감소, 흉선 위축증, 피부병)를 보인다.[7,8] Safe 등은 평면 구조를 갖고 있는 PCBs에 대해 독성 활동의 메카니즘을 연구했으며, 실험 동물들의 생물학적 응답을 바탕으로 하여 "TCDD-like" PCBs에 대한 toxicity equivalence factor(TEF)를 제안하였다.[9] 이들 TEF 값들은 *Table* 1에 도표화했다. TCDD가 염소원자로 치환된 방향족 화합물 중에서 가장 독성이 크기 때문에 이 분자의 TEF값을 1.0으로 정해 기준으로 삼았으며 PCBs에 대한 값은 TCDD에 비해 상대적인 독성의 정도를 나타낸다.

Table 1. Toxicity equivalence factor (TEF) values for TCDD and coplanar PCBs

Congener	IUPAC #	TEF
2,3,7,8-TCDD		1.0
PCBs		
Non-ortho coplanar		
3,3',4,4',5-pentaCB	126	0.1
3,3',4,4',5,5'-hexaCB	169	0.05
3,3',4,4'-tetraCB	77	0.01
Mono-ortho coplanar		
2,3',4,4',5-pentaCB	118	0.001
2,3,3',4,4'-pentaCB	105	0.001
2',3,4,4',5-pentaCB	123	0.001
2,3,4,4',5-pentaCB	114	0.001
2,3,3',4,4',5-hexaCB	156	0.001
2,3,3',4,4',5'-hexaCB	157	0.001
2,3',4,4',5,5'-hexaCB	167	0.001
2,3,3',4,4',5,5'-heptaCB	189	0.001

PCBs와 연관된 환경 손실과 건강 영향으로 인해서 1982년 미국에서 제정된 Toxic Substance Control Act(TSCA) 규정은 PCBs의 생산이나 상업적인 사용을 금지시켰다. 이러한 이유로 변압기에서 사용되어온 PCBs는 새로운 절연체인 광유로 대체되었으나 광유와 PCBs와의 교차오염은 일반적으로 100~2,000 ppm 정도로 미국 환경보호청(U.S. Environmental Protection Agency)이 규정한 수준(25~50 ppm)을 아직 넘어서고 있다.[10] 현재 상당히 많은 수의 변압기들이 PCBs와 교차 오염된 광유를 사용하고 있으며 환경에 심각한 위협이 되고 있다.

이 연구는 과거 PCBs의 제거를 위해 전통적으로 사용된 고온 소각법[11]이나 화학적 탈염소법[12]과 같은 접근 방법과는 다르게 물리적 제거 방법으로 활성탄의 흡착을 이용하였다. 활성탄은 강하고 선택성이 있는 흡착제로서 여러 environmental matrices에 있는 유기화합물들을 정제하거나 혹은 분별하는 성질을 갖고 있으며 특별히 PCBs를 분석하는 환경분야에서 널리 이용되고 있다. 여러 문헌들에 의하면 polyurethane foam이나 glass fiber에 분산된 활성탄을 컬럼에 충진시켜 유기용매로 추출할 때 environmental samples에 있는 여러 가지의 유기염소분자들

(pesticides, PCDDs, PCDFs, etc)로부터 PCBs를 분리할 수 있으며, 더 나아가서는 비평면구조보다는 평면구조를 갖고 있는 PCBs에 대해 높은 선택성을 갖고 있어 컬럼 크로마토그래피에서 용리가 느리게 일어나 독성인 PCBs의 분리 확인이 용이하다고 연구 발표하였다.[13,14] 본 연구는 광유에 대한 응용으로 활성탄을 이용하여 위에서 서술한 용매추출법이 아닌 회분식법으로 상업적으로 널리 사용되어 온 두 개의 Aroclor 제제들(Aroclor 1242와 Aroclor 1260)의 흡착 정도를 광유에 있는 PCBs의 전 농도(100~2,000 ppm)에 걸쳐 흡착 등온선을 이용해서 비교 연구하였고 궁극적으로는 평면 PCBs의 독성을 감소하거나 제거하는 것이다.

실 험

흡착실험. 광유에 있는 PCBs에 대한 활성탄의 흡착능력을 평가하기 위해서 회분식으로 흡착실험을 실시하였다. 모든 실험들은 비교적 넓은 표면적을 갖고 있는 활성탄을 이용하였다. 알고 있는 양의 활성탄을 플라스크에 넣은 후 PCBs로 오염된 광유를 플라스크에 도입하였다. 플라스크 안의 내용물들은 일정한 실내 온도에서 교반기를 이용하여 세차게 흔들어 섞었다. PCBs로 오염된 광유의 농도는 100~2,000 ppm 범위였으며, 일정시간 간격마다 일정한 양의 광유를 피펫을 이용해서 반응 용기로부터 회수하였다. 광유에 있는 검은 입자들은 1 μm Whatman 여과지를 이용해서 여과하였으며, 이어서 광유를 헥산에 넣어 흔들어 섞은 후 원심분리에 의해서 오일층을 제거하였다. 헥산층은 2 mL까지 농축시킨 후 분석을 방해하는 간섭 물질을 제거하기 위해 혹은 PCBs의 분별을 위해서 실리카 겔 크로마토그래피 칼럼(5 cm i.d.×50 cm long)에 도입하였다. PCBs는 컬럼을 통하여 디클로 메탄 용매를 이용해 실리카 겔로부터 추출하였으며, 추출액은 이소옥탄으로 용매 교환 후 증발기를 거쳐 질소 가스를 이용해서 2 mL까지 농축하였다.

시 약. 활성탄(Darco, granular, 20~40 mesh)은 Aldrich(Norit Co.)로부터 구입하였다. 활성탄은 모든 미세입자를 제거하기 위해 탈이온수로 여러 번 세척하였고, 하룻 동안 110 ℃ 오븐에서 탈수하였으며, 이어서 건조기에 저장하였다. 본 연구에서 사용한 두 가지의 시판 PCB 제제들과 평면 PCB congeners (non- and monoortho PCBs)은 모두 알고 있는 순도와 농도의 용액으로서 Ultra Scientific Inc., North Kingstown, RI에서 구입하였다. 사용된 용매들(이소옥탄, 디클로 메탄, 아세톤, 헥산, 아세토니트릴)은 모두 살충제 등급이었다. 실리카 겔(Davisil, Grade 923, 80~100 mesh)은 Aldrich Chemical Company, Inc., Milwaukee, WI로부터 구입하였다. 실리카 겔은 사용하기에 앞서 컬럼을 통해서 아세토니트릴/디클로 메탄(v/v 40 : 60) 혼합 용매를 이용하여 깨끗이 정제하였다. 정제된 실리카 겔은 48시간 동안 알루미늄 박으로 덮인 상태로 후드에서 공기로 건조시켰으며, 하룻 동안 130 ℃ 오븐에서 활성화시켰다. 활성화된 실리카 겔은 건조기에서 실내 온도까지 냉각하였다.

기 기. 추출액에 있는 PCB congeners의 정량적인 결정은 전자포획 검출기와 자동 시료채취기가 부착된 기체 크로마토그래피(Model 8500 GC, Perkin Elmer Corp., Norwalk, CT)로 행하였다. 각 성분 PCB congeners의 분리를 위해서 95% 메틸과 5% 페닐 폴리실록산으로 구성된 정지상 컬럼인 30 m×0.25 mm(i.d.) 용융 실리카 관(DB 5, Supelco Inc., Bellefonte, PA)을 사용하였다. GC는 2단계 온도 상승 방법을 통해서 온도 프로그램화되었다. 첫번째 온도 상승단계는 10 ℃/min로 80 ℃부터 180 ℃였으며, 이어서 3 ℃/min의 상승 속도로 260 ℃까지 온도를 증가하였다. 헬륨과 아르곤에 10% 메탄이 섞여 있는 혼합물을 운반 가스와 보충 가스로 사용하였다. PCBs의 크로마토그래피 피크들은 내부 표준물질인 PCBz (pentachloro benzene)의 상대 머무름 시간에 의해서 확인하였다. 분리된 PCB congenes의 정량은 외부 검정곡선과 상대적인 피크 높이에 의해서 결정하였다.

결과 및 고찰

활성탄의 흡착성질을 이용하여 광유로부터 PCBs의 제거에 대한 유용성을 검토하였다. Aroclor 1242와 Aroclor 1260의 흡착은 100~2,000 ppm 범위에 걸쳐 조사하였다. 일정한 온도에서 얻어진 흡착 정도의 비교 연구를 위해, 소모된 활성탄의 양과 PCBs 농도와의 상호관계는 Freundlich의 흡착 등온식을 이용하였다.[15]

$$\log_{10}(x/m)=\log_{10}k+(1/n)\log_{10}C$$

여기서, x/m은 활성탄의 단위질량당 흡착된 PCBs의

농도이고, C는 광유에 남아있는 PCBs의 농도이며, k(Freundlich 상수)는 평형에서 광유에 남아있는 PCBs의 농도(μg/g)와 활성탄에 흡착된 PCBs의 농도(μg/g)의 분배를 나타내며, 그리고 n은 전 농도 범위에 대한 직선성의 척도이다.

실험에서 행해진 전 농도에 걸쳐 얻은 결과를 Freundlich 식에 따라 *Fig.* 2에 나타내었는데 좋은 직선성을 보이고 있다. 상수 k와 n 그리고 Aroclor 1242와 Aroclor 1260에 대한 상호 연관계수는 *Table* 2에 나타내었다. 이러한 값들은 Aroclor 1242와 Aroclor 1260을 구성하는 PCB 혼합물의 일반화된 성격을 나타낸다. *Table* 2에서 Aroclor 1242의 $\log_{10}k$ 값은 Aroclor 1260보다 큰데, 이는 Aroclor 1242의 흡착 능력이 Aroclor 1260보다도 더 크다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 활성탄과 24시간 후의 평형 분배를 나타내는 Aroclor 1242와 Aroclor 1260의 크로마토그램들(*Fig.* 3 and 4)에서 나타내었다. Aroclor 1242와 Aroclor 1260은 크로마토그램에서 보듯 적어도 80개 정도의 PCBs로 구성되어 있으며, 흡착 효율의 차이는 일정시간의 평형 전과 후에서 각 성분 PCB의 상대적인 피크의 크기에 의해서 결정하였다. 대부분 3개 또는 4개의 염소원자로 치환된 PCB congeners로 구성되어 있는 Aroclor 1242의 흡착효율은 95% 정도였던 반면에 6개 또는 7개의 염소원자로 치환된 Aroclor 1260의 흡착효율은 대략 75%였다.

이와 같은 실험 결과는 토양 대 물과 같은 다른 계에서의 PCBs 흡착과는 서로 다른 현상을 나타낸다. 일반적으로 지질층을 매개로한 PCB congeners의 흡착 정도는 2개의 상수들, 즉 토양에 있는 유기탄소-물 분배 계수(k_{oc}) 그리고 옥탄올-물 분배계수(k_{ow})와 실험적 혹은 경험적으로 상호 연관되어 왔다. 그러나 k_{oc}의 측정값은 토양에 있는 유기탄소의 존재가 PCBs를 흡착하는데 중요한 영향을 끼치지 않기 때

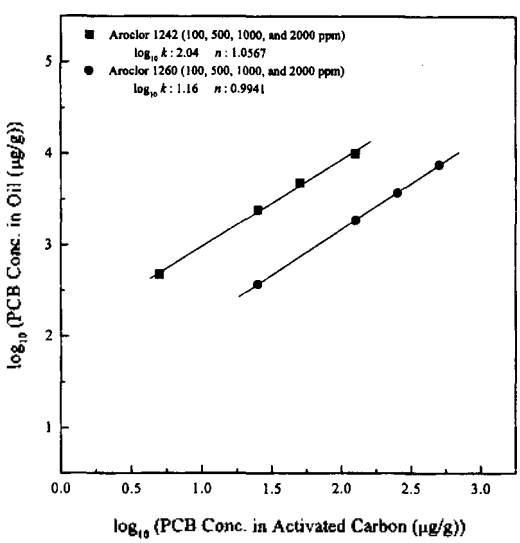

Fig. 2. Adsorption isotherm in oil/activated carbon system.

Table 2. Freundlich adsorption isotherm coefficients for Aroclor 1242 and Aroclor 1260

Carbon type	Aroclor 1242		Aroclor 1260	
	$\log_{10}k$	n	$\log_{10}k$	n
Darco activated	2.04	1.0567	1.16	0.9941

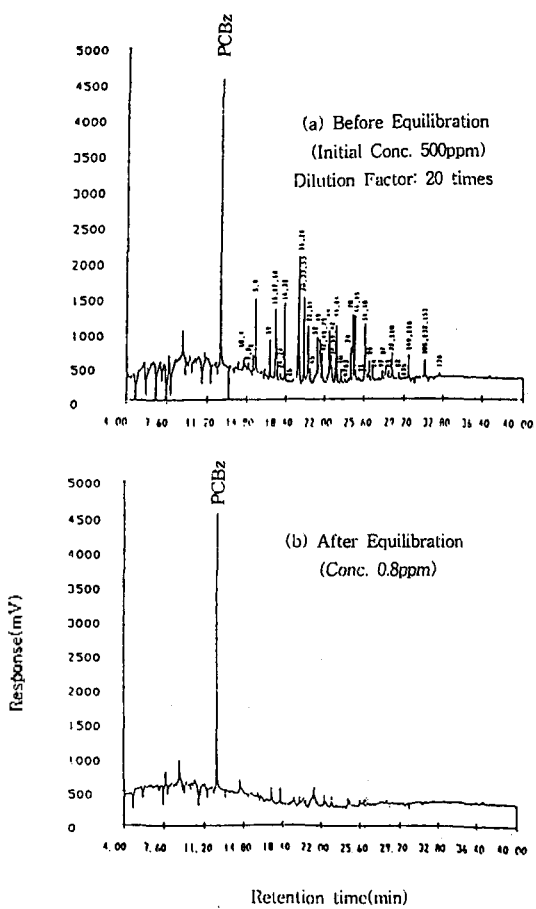

Fig. 3. Chromatograms of Aroclor 1242 in mineral oil (a) before, and (b) 1 day after equilibration with activated carbon.

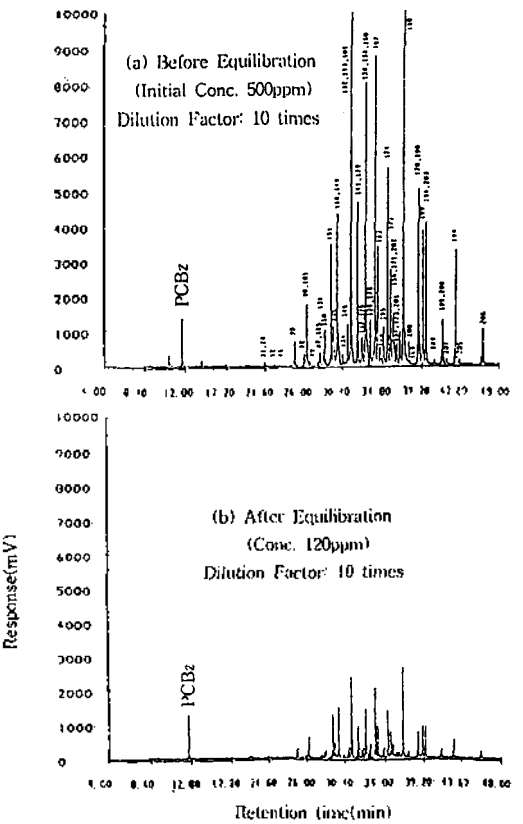

Fig. 4. Chromatograms of Aroclor 1260 in mineral oil (a) before, and (b) 1 day after equilibration with activated carbon.

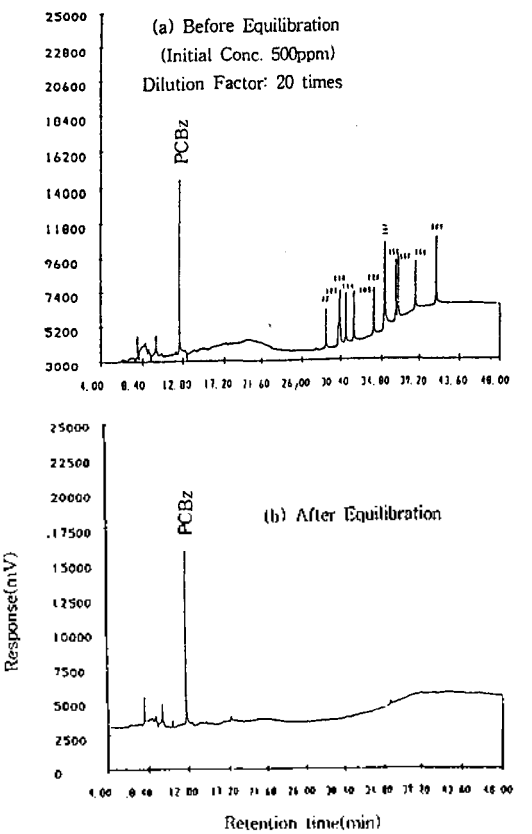

Fig. 5. Chromatograms of coplanar PCBs in mineral oil (a) before, and (b) 1 day after equilibration with activated carbon.

문에 대부분의 PCB congeners에 대해 유용한 분배계수 값을 제공할 수 없다고 알려져 있다. 반면에 k_{ow} 값은 용해도 및 토양 흡착 계수를 포함하는 여러 가지의 매개 변수들과 상호관련을 갖고 있다. 이 k_{ow}값은 환경을 통하여 PCBs의 운반과 운명을 평가하는데 있어 수학적인 자료들을 해석하는데 필요한 유용한 상수이다. 물에 있는 PCBs의 용해도는 상당히 낮고 biphenyl frame에 있는 염소원자의 치환 정도에 의존하며, 치환이 많으면 많을수록 용해도는 현저하게 감소한다. 위에서 언급한 바와 같이 PCBs가 유기용매에 잘 용해되기 때문에 물에 덜 녹는 PCB congeners 일수록 k_{ow}값이 커진다. Mackay 등에[16] 의하면 토양/물 계의 평형 분배에서 염소원자의 치환이 많은 PCBs가 치환이 적은 PCBs보다도, 즉 k_{ow} 값이 크면 클수록 지질 매개체에 더 강하게 흡착되며 지하수에서 상당히 이동성이 적을 것이라고 연구 발표하였다.

활성탄/광유계에서 Aroclor 1242와 Aroclor 1260의 흡착 효율의 관찰된 차이는 PCBs의 크기와 기하학적 구조에 의해 설명될 수 있다. 첫번째로, Aroclor 1260에 있는 PCBs의 분자량과 크기는 평균적으로 Aroclor 1242보다는 상당히 커서 광유 상에서 이동성이 느리며 이에 따라 활성탄으로의 확산 속도가 느리다. 결과적으로 활성탄에 의한 Aroclor 1260의 흡착은 Aroclor 1242보다도 동등한 조건(PCBs의 농도, 활성탄의 양, 온도 및 평형 시간)에서 감소됨을 뜻한다. 그러나 Aroclor 1260의 흡착 효율은 보름 동안의 흡착실험을 통해서도 더 이상 나아지지 않았다. 그러므로 활성탄/광유 계에서 관찰된 효율의 차이는 PCBs의 분자량과 크기에 의해서는 영향을 받지 않는다고 판단된다. 두번째로, 평면 구조인 PCB congener들은 Aroclor 1242에서는 대략 38%를 차지

Table 3. Concentration of non- and monoortho substituted PCBs in Aroclor 1242

IUPAC #	Substitution	TEF	Con.[a]	Relative toxicity[b]	
				Before	After
				Adsorption with Activated Carbon	
77	3,3',4,4'-	0.01	2.28	2.28×10^{-2}	2.28×10^{-4}
105	2,3,3',4,4'-	0.001	4.36	4.36×10^{-3}	8.72×10^{-5}
118	2,3',4,4',5-	0.001	8.21	8.21×10^{-3}	1.64×10^{-5}
156	2,3,3',4,4',5-	0.001	0.46	4.60×10^{-4}	0.92×10^{-5}

[a]Total PCB concentration on the basis of Aroclor 1242~500 ppm, [b]TEF x weight percent contribution of individual PCB congeners in Aroclor 1242 x concentration (before and after).

Table 4. Concentration of non- and monoortho substituted PCBs in Aroclor 1260

IUPAC #	Substitution	TEF	Con.[a]	Relative toxicity[b]	
				Before	After
				Adsorption with Activated Carbon	
169	3,3',4,4',5,5'-	0.05	0.24	1.20×10^{-2}	1.2×10^{-4}
105	2,3,3',4,4'-	0.001	0.34	3.40×10^{-4}	0.7×10^{-5}
118	2,3',4,4',5-	0.001	2.76	2.76×10^{-3}	5.5×10^{-5}
156	2,3,3',4,4',5-	0.001	4.26	4.26×10^{-3}	8.5×10^{-5}
157	2,3,3',4,4',5'-	0.001	0.68	6.80×10^{-4}	1.3×10^{-5}
167	2,3',4,4',5,5'-	0.001	1.26	1.26×10^{-3}	2.5×10^{-5}
189	2,3,3',4,4',5,5'-	0.001	0.53	5.30×10^{-4}	1.1×10^{-5}

[a]Total PCB concentration on the basis of Aroclor 1260~500 ppm, [b]TEF x weight percent contribution of individual PCB congeners in Aroclor 1260 x concentration (before and after).

하고 있으나, Aroclor 1260인 경우는 14.5%이다. 기대한 대로 non- and monoortho로 치환된 PCBs의 흡착의 정도는 99% 이상의 효율을 나타내었다. 이러한 결과는 광유에 있는 평면 PCB congeners와 활성탄과의 흡착 전과 후의 평형 분배를 나타내는 크로마토그램(*Fig.* 5)에 제시하였다.

Fig. 5에 있는 개개의 평면 PCBs는 3,3',4,4',5-pentachloro biphenyl(IUPAC # 126), 3,3',4,4',5,5'-hexa (#169), 3,3',4,4'-tetra(#77), 2,3',4,4',5-penta(#118), 2,3,3',4,4'-penta(#105), 2',3,4,4',5-penta(#123), 2,3,4,4',5-penta(#114), 2,3,3',4,4',5-hexa(#156), 2,3,3',4,4',5'-hexa(#157), 2,3',4,4',5,5'-hexa(#167), 그리고 2,3,3',4,4',5,5'-hepta(#189)이다. 크로마토그래피 데이타에 의하면 24시간 평형 후 대부분의 평면 PCBs은 활성탄에 의해 흡착되었다. 이러한 현상은 독성적인 관점에서 볼 때 대단히 중요한 현상이다. 실제로 PCBs의 독성은 PCBs의 평면 구조와 연관되어 있기 때문에 상당한 독성의 감소가 활성탄에 의해서 성취될 수 있다. 독성의 감소에 대한 측정은 Safe 등에 의해 제안된 독성 PCBs에 대한 Toxicity Equivalence Factor와 non- and monoortho로 치환된 PCBs의 흡착 전과 후의 농도 차이에 의해서 결정하였다. 활성탄의 흡착 전과 후의 독성의 비교는 *Table* 3와 4에 나타내었다.

결 론

본 실험에서는 Aroclor 1242와 Aroclor 1260에 대한 직선 흡착 등온선을 100~2,000 ppm의 PCB 농도에 걸쳐 얻었다. 활성탄에 의한 PCBs 흡착 실험은 흥미로운 결과를 나타내었다. 이 방법은 Aroclor 1242를 제거하는데 대단히 효과적이었으며 흡착 효율은 95% 이상이었다. Aroclor 1260의 흡착 효율은 대략 75% 정도로 Aroclor 1242에 비해 상당히 낮았다. 흡착 효율의 차이는 Aroclor 1242와 Aroclor 1260가 가지고 있는 congener들 구조의 평면성에서 비롯되며, 특별히 독성이 큰 PCB congeners(non- and monoortho PCBs)를 제거하는데 활성탄의 물리적 흡착이 효과적 방법이었다.

본 저자는 이 연구를 위해 여러 가지 조언을 해주신 인하대학교 김 유항 교수님께 진심으로 감사드립니다.

인 용 문 헌

1. Tenabe, S. *Environ. Poll.* **1988**, *50*, 5.
2. Mitchell, D. E. *Analytical Chemistry of PCBs*; Butterworth Publishers, Ann Arber Science, 1986.
3. Rappe, C.; Buser, H. R.; Bosshardt, H. P. *Ann NY Acad. Sci.* **1979**, *320*, 1.
4. Sullivan, J. R.; Delfino, J.; Buelow, C. R. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* **1983**, *30*, 58.
5. Safe, S.; Safe, L.; Mullin, M. J. *J. Agric. Food. Chem.* **1985**, *33*, 24.
6. Safe, S. *Crit. Rev. Toxicol.* **1984**, *13*, 319.
7. Safe, S. *Annu. Rev. Pharmacol. Toxicol.* **1986**, *26*, 371.
8. Safe, S.; Harris, C. *Chemosphere* **1989**, *18*(1), 942.
9. Safe, S. *Crit. Rev. Toxicol.* **1990**, *21*(1), 51.
10. Toni, K.; Allen, E. *Update on Fedral PCB Regulation, Electric Power Research Institute(EPRI), PCB Seminar, 1995.*
11. Ross, R. A.; Lemay, R. *Environ. Sci. Technol.* **1987**, *21*, 1115.
12. Brunelle, D. J.; Mendiralta, A. K.; Singleton, D. A. *Environ. Sci. Technol.* **1985**, *19*, 740.
13. Teichman, J.; Bevenue, A.; Hylin, J. W. *J. Chromatogr.* **1978**, *151*, 155.
14. Smith, L. M. *Anal. Chem.* **1981**, *53*, 2152.
15. Abu Zeid, N.; Nakhla, G.; Farooq, S.; Osei-Twum, E. *Wat. Res.* **1995**, *29*(2), 653.
16. Mackay, D.; Shiu, W. Y.; Billington, J.; Huang, G. L. *Physical Chemical Properties of Polychlorinated Biphenyl: in Physical Behaviour of PCBs in the Great Lakes*; Ann Arbor Science, 1983.