

## Note

## 남극 세종기지에서의 대기 중 PCB 모니터링

최성득<sup>1,2</sup> · 백송이<sup>2</sup> · 장윤석<sup>2\*</sup> · 윤영준<sup>3</sup> · 박병권<sup>3</sup> · 홍성민<sup>3</sup><sup>1</sup>토론토대학교 물리 · 환경과학과  
(M1C 1A4) 1265 Military Trail, Toronto, ON, Canada<sup>2</sup>포항공과대학교 환경공학부  
(790-784) 경상북도 포항시 남구 효자동 산 31<sup>3</sup>한국해양연구원 부설 극지연구소  
(406-840) 인천광역시 연수구 송도동 7-50 송도테크노파크

## Year-round Monitoring of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls (PCBs) at the King Sejong Station in the Antarctic

Sung-Deuk Choi<sup>1,2</sup>, Song-Yee Baek<sup>2</sup>, Yoon-Seok Chang<sup>2\*</sup>, Young-Jun Yoon<sup>3</sup>,  
Byong-Kwon Park<sup>3</sup>, and Sungmin Hong<sup>3</sup><sup>1</sup>Department of Physical and Environmental Sciences  
University of Toronto Scarborough, Toronto, Canada, M1C 1A4<sup>2</sup>School of Environmental Science and Engineering  
Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang 790-784, Korea<sup>3</sup>Korea Polar Research Institute, KORDI  
Songdo Techno Park, Incheon 406-840, Korea

**Abstract :** Atmospheric levels of polychlorinated biphenyls (PCBs) at the King Sejong station were monitored for one year using passive air samplers. Low-chlorinated PCB homologues were predominant in all samples. PCB levels were observed to decrease with distance from the station, which may indicate that a significant part of PCBs could be of local origin. Although the level of PCBs at the King Sejong station is very low ( $\Sigma_9\text{PCB}$  (18, 52, 101, 118, 128, 138, 153, 180, 187):  $2.3 \text{ pg m}^{-3}$ ) probably due to decrease in the global PCB emissions, it is one order of magnitude higher than a background level in the Antarctic. Based on this preliminary study, more interpretation on PCB data and meteorological conditions is required.

**Key words :** persistent organic pollutant, PCBs, passive air sampler, Antarctic

## 1. 서 론

대표적인 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants: POPs)인 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls: PCBs)은 독성 및 내분비계 교란의 특성으로 인해 생산이 금지되었다. 그러나 상당량의 PCBs는 소각을 통해 비의

도적으로 합성되거나 기존 제품에서 누출되고 있으므로, 스톡홀름협약에 의해 전 세계적으로 규제되고 있다(UNEP 2007). PCBs는 209개의 화합물(congener)을 가지고 있으며, 이들의 분배계수 범위( $6 < \log K_{OA} < 10$ ,  $-3 < \log K_{AW} < -1$ )를 고려할 때 상당수가 다매체에 분포한다. 따라서 PCBs는 대기와 해양을 통한 장거리 이동(long-range transport)이 수월하다. PCBs는 대부분 상업적인 용도로 합성되었으므로 국가별 생산량을 추정할 수 있으며,

\*Corresponding author. E-mail : yschang@postech.ac.kr

이에 근거하여 1930년부터 2000년까지의 전 세계 배출량 목록이 작성되었다(Breivik *et al.* 2002a, 2002b). 그러므로 PCBs는 시·공간적 분포경향을 파악하고 장거리 이동을 평가하는데 적합한 오염물질이다.

남극은 대표적인 청정지역으로서 지구환경 변화와 오염물질 거동에 민감하므로, 지속적인 환경 모니터링이 필요한 곳이다. 그럼에도 불구하고 극지에서의 POPs 오염연구는 북극에 집중되어 왔다(Halsall 2004). 주로 북반구 중위도 지역에서 배출된 PCBs는 장거리 이동을 통해 남극 환경매체에 축적된다. 특히, 저염화 PCB 화합물은 휘발성이 크므로 대기를 통해 비교적 쉽게 남극 상공으로 유입되고, 저온 응축(cold condensation)(Wania and Mackay 1996)으로 남극 지표환경으로 침적된다. 그러나 남극 대기 중 PCB 모니터링은 북극이나 중위도 지역에 비해 활발하지 않다. 우선 시료채취 지점에서의 접근성이 떨어지며, 악기상으로 인해 고용량 공기채취기(high volume air sampler: HiVol)를 이용한 지속적인 시료채취가 수월하지 않기 때문이다.

최근, POPs 모니터링을 위해 다양한 종류의 수동대기채취기(passive air sampler: PAS)들이 개발되고 있다. PAS 내부에는 XAD-resin, triolein, polyurethane foam (PUF) 등의 수착제(sorbent)가 장착되어, 장기간(수개월-1년) 다양한 POPs를 채취한다. PAS는 전원을 필요로 하지 않으며 비교적 작고 가벼운 장치이므로, 실내·외 다양한 지점에 설치할 수 있는 장점이 있다. 2000년대 초반부터 영국과 캐나다를 중심으로 PAS를 사용한 POPs 모니터링이 폭발적으로 증가하고 있으며, 국내에서는 본 연구진이 2004년에 최초로 PAS를 도입하여 다양한 모니터링을 수행하고 있다(Choi *et al.* 2007). PAS의 원리, 종류, 응용 등에 대한 자세한 내용들은 다음 논문들에 수록되어 있다(최와 장 2005; Bartkow *et al.* 2005).

본 연구진은 한국해양연구원 부설 극지연구소의 지원 하에 남극 세종기지와 북극 다산기지에 1년 주기로 PAS를 설치하여, PCBs를 비롯한 다양한 유기염소계 농약류의 장거리 이동을 모니터링하고 있다. 본 단보(note)에서는 2004-2005년에 채취한 남극 1차 시료의 PCB 분석결과를 소개하고, 본 연구의 의의와 추가 연구사항에 대해 논의하였다. 보다 자세한 세종기지 및 다산기지 PAS 모니터링 결과는 추후에 연구논문(full paper)으로 제공될 예정이다.

## 2. 재료 및 방법

### 수동대기채취기(PAS)

본 연구에서는 캐나다 토론토대학교에서 개발한 XAD-resin PAS를 사용하였다(Wania *et al.* 2003). 수착제인

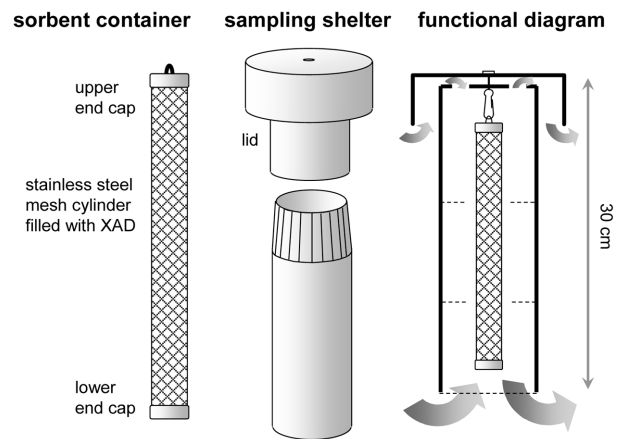


Fig. 1. Schematic diagram of XAD-resin passive air samplers (by Frank Wania at the University of Toronto).

XAD-resin의 세척을 위해 속슬렛(S Soxhlet) 장치에 아세톤과 함께 넣고 20시간 가열·환류시켰으며, 톨루엔으로 2회 반복 세척하였다. 세척한 XAD-resin은 스테인리스 재질의 망사 컨테이너(60 mL)에 넣고 PAS 내부에 장착하였다. Fig. 1에서와 같이 PAS 하단은 대기 중으로 개방되어 있으므로 어느 정도 공기가 순환할 수 있으나, 공기역학 시뮬레이션에 의하면 풍속의 영향은 거의 받지 않는다(Wania *et al.* 2003). 또한 기온의 영향도 거의 받지 않으므로 극지의 악기상에서도 안정적인 시료채취가 가능하다. XAD-resin PAS의 공기 채취율은 기존의 PUF-PAS나 반투과성막장치(semi-permeable membrane device: SPMD)의 공기 채취율보다 작으며, XAD-resin의 수착용량(sorption capacity)이 충분하므로 1년 이상의 장기 모니터링에 사용되어 왔다(Shen *et al.* 2004, 2005, 2006).

### 연구지역 및 시료채취

세종기지는 사우스 셰틀랜드 제도(South Shetland Islands)의 킹 조지 섬(King George Island) 남서해안(남위 62°13', 서경 58°47')에 위치하고 있다(Fig. 2). 2004년 12월에 세종기지 부근 세 지점에 PAS를 설치하였으며, 1년 주기로 시료를 회수하고 있다. 시료는 기지의 본관으로부터 가까운 순서로 A(60 m), B(140 m), C(270 m)로 표시하였으며, 기상타워 등의 안정한 구조물에 부착하였다(Fig. 3). 시료채취 기간(2005년) 평균 풍속은 7.1 m/s, 기온은 -1.8°C로서, 예상보다 비교적 온화한 기상조건에서 시료채취가 진행되었다.

PAS 설치 1년 후, 남극기지 내에 보관한 공시료(field blank)를 포함하여 전체 4개의 시료를 회수하였다. XAD-resin이 들어있는 망사 컨테이너는 현장에서 스테인리스관에 넣고 테플론 마개로 밀봉하였으며, 다시 지퍼백 안에

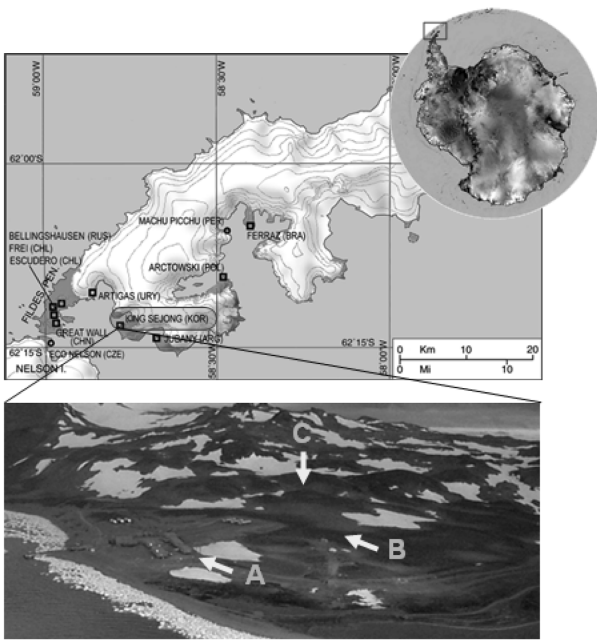


Fig. 2. Location of the King Sejong station in King George Island, Antarctica.

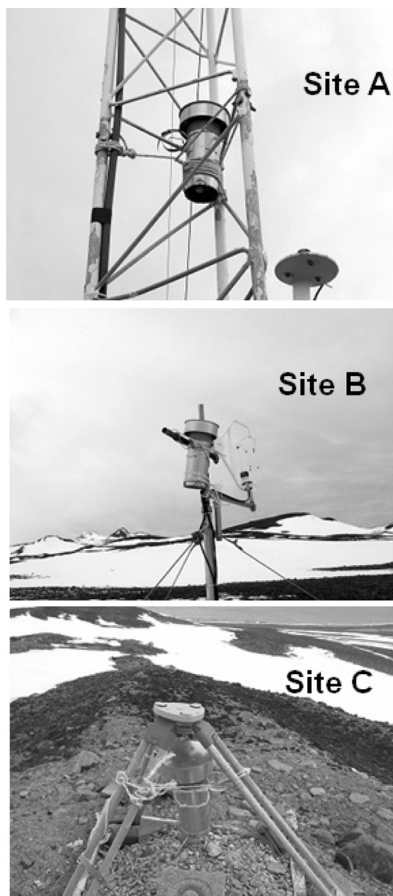


Fig. 3. XAD-resin passive air samplers at three sites near the King Sejong station (Distances from the station: A<B<C).

넣어 공기의 이동을 차단하여 실험실로 운반하였다. 극지 시료는 보통 비행기와 배를 번갈아 가면서 냉동상태로 운반하게 되는데, 이 과정에서 오염 가능성이 있다. 그러나 분석값에 큰 영향을 미칠 정도로 공시료에서 PCBs가 검출된 경우는 없었으므로, 운반과정에서 우려할만한 오염은 없었던 것으로 판단된다.

### 기기분석

XAD-resin은 속슬렛을 이용하여 용매추출하였으며, 실리카/알루미나/HPLC 활성탄 컬럼을 이용한 정제과정을 거쳤다. 정제된 시료 중에 함유된 PCBs는 세 종류의 컬럼(DB5, CP-Sil18, CP-Sil 19)을 이용하여 분리하였으며, 고분해능 질량분석기(HRGC/HRMS, Micromass, Autospec Ultima)로 정량하였다. 세 개의 PAS 시료 이외에 두 개의 공시료(procedure and field blank)를 추가로 분석하였다. 대부분의 PCB 화합물에 대해 현장 공시료(field blank)가 실험과정 공시료(procedure blank)보다 높은 값을 보였으므로 현장 공시료 값으로 분석결과를 보정하였다. 본 연구에서는 회수율이 낮은 mono-CBs를 제외한 206개의 PCB 화합물을 정량하였다. 보다 상세한 시료정제, HRGC/HRMS 분석, 정도관리(Quality Assurance/Quality Control: QA/QC) 절차 등은 이전 연구에 수록되어 있다(Ikonomou *et al.* 2001).

### 다매체 환경모델링

전 지구 다매체 환경모델인 Globo-POP을 이용하여 남극 대기 중 PCB 농도를 산정하였으며, 이를 기존 연구들과 본 연구의 측정농도와 비교하였다. 이 모델은 1990년대 중반에 토론토대학교에서 개발되었으며(Wania and Mackay 1995), 지속적으로 업데이트되고 있다. Globo-POP은 fugacity 개념을 이용하여(Mackay 2001) 기후대별 환경매체에서의 물질수지(mass balance)를 계산함으로써, 화학물질 추적, 이동, 분해량 등을 계산할 수 있다. 모델링 대상 PCB 화합물로는 1930년부터 2000년까지의 전 세계적 배출량이 산정되었으며(Breivik *et al.* 2002b), Globo-POP의 화학물질 데이터베이스에 등록되어 있는 PCB 52를 선택하였다. PCB 52는 네 개의 염소가 치환된 구조(2,2',5,5'-tetrachloro biphenyl)를 가지고 있으며, 대기를 포함한 다매체 거동을 평가하기에 적합한 화합물이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 대기농도 환산 및 동족체 패턴

PAS 농도( $\text{pg PAS}^{-1}$ )는 특정 기간에 채취한 POPs의 양을 의미하므로, PAS의 종류가 다르거나 HiVol을 사용한 경우에는 분석결과들을 직접 비교할 수 없다. 따라서 PAS

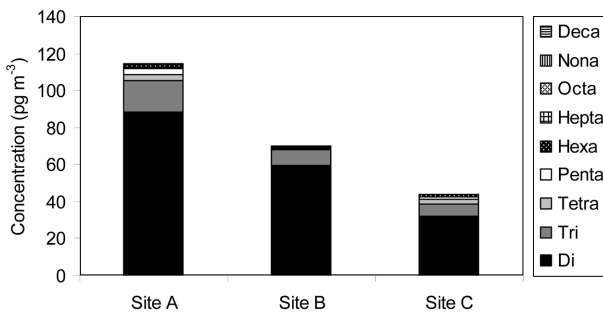


Fig. 4. Concentrations of PCB homologues at three sampling sites.

농도를 대기 농도( $\text{pg m}^{-3}$ )로 환산할 필요성이 있다. PAS 농도를 공기 채취율( $\text{m}^3 \text{ day}^{-1}$ )과 모니터링 기간( $\text{day}$ )으로 나누면 대기 농도를 계산할 수 있다( $\text{pg m}^{-3} = \text{pg PAS}^{-1} / (\text{m}^3 \text{ day}^{-1} \times \text{day})$ ). 본 연구에서는 기존에 알려진 XAD-resin PAS의 공기 채취율인  $0.52 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$ 를 사용하였다 (Wania et al. 2003).

세 지점에서 모두 저염화 PCBs 농도가 고염화 PCBs 농도보다 높은 결과가 나왔다(Fig. 4). 특히, 염소가 7개 이상 치환된 고염화 PCBs는 대부분 검출되지 않았다. 이는 global fractionation 이론(Wania and Mackay 1993)과 일치한다. 즉, PCBs가 주로 배출되는 북반구 중위도 지역에서 극지로 갈수록 대기 중 저염화 동족체의 비율이 높아진다. 증기압이 낮은 고염화 PCBs는 주로 입자상에 분배되므로 장거리 이동을 거치면서 건조 및 습식침적(dry and wet deposition)으로 인해 지표(주로 토양)로 제거되고, 상대적으로 가벼운 PCBs가 고위도 지방으로 이동하기 때문이다.

한편, 지점별 di-CBs와 tri-CBs의 농도 차이에서 알 수 있듯이, 기지로부터 거리가 멀어질수록 PCB 동족체 농도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 세종기지 자체가 PCB 오염원일 가능성이 크다는 것을 의미한다. 남극과 같이 청정한 지역에서는 장거리 이동을 통한 오염도 중요하지만, 과학기지 자체가 오염원일 가능성이 제기되어 왔다 (Larsson et al. 1992). 보다 확실한 결과해석을 위해서는

기지 주변의 환경시료를 거리별로 채취하여 장기간 PCB 오염 분포를 확인할 필요가 있다. 또한 킹 조지 섬은 남미 대륙과 가장 인접한 곳이므로, 전선계(frontal system)에 의해 남미대륙에서 공기가 유입될 때, 저염화 PCB 농도가 증가하는 것이 보고되었다(Montone et al. 2003). 따라서 세종기지의 PCB 농도는 중위도에서 배출된 PCBs의 장거리 이동뿐만 아니라, 남미대륙의 국지적 오염과 기지 자체의 배출로부터 영향을 받는 것으로 보인다. 앞으로 세종기지에서의 지속적인 모니터링을 통해 이러한 오염원들의 기여도를 밝히는 것이 중요한 연구과제가 될 것이다.

기존 측정결과 및 모델 결과와의 비교

Table 1은 본 연구(King George, 04-05)와 이전 연구의 PCB 분석결과(Larsson et al. 1992; Kallenborn et al. 1998; Montone et al. 2001, 2003; Gambaro et al. 2005)를 비교한 표이다. 이전 연구에서는 모두 HiVol을 사용하였다. 최근 10년 동안의 연구논문은 5편 이내로서, 남극에서 대기 중 PCB 모니터링이 상당히 부족한 것을 알 수 있다. 대부분의 기존 연구에서는 209개 PCB 화합물이 아닌 일부 화합물에 대한 분석값을 제공한다. 따라서 본 연구에서도 전체 PCB 자료가 아닌 일부 화합물 자료만 제시하였다. 세종기지에서 채취한 9개 PCB 화합물(18, 52, 101, 118, 128, 138, 153, 180, 187)의 농도 합( $\Sigma_9\text{PCB}$ )은 이전 연구들과 비교해서 상당히 낮은 수준으로서, 80-90년대에 측정된 농도( $11.1\text{-}33.1 \text{ pg m}^{-3}$ ) 보다 10배 정도 작은 값( $2.32 \text{ pg m}^{-3}$ )을 보였다. 그러나 비슷한 시기(2003-2004)에 Terra Nova Bay에서 측정된 값( $0.16 \text{ pg m}^{-3}$ )보다는 10배 이상 높았다. 이 결과는 남미대륙에 근접한 킹 조지 섬에는 각국 8개의 연구기지가 있는 반면에, Terra Nova Bay에는 한 개의 과학기지가 있으며 이 기지는 PCBs의 주요 오염원이 아니라는 보고(Gambaro et al. 2005)로 설명이 가능하다.

한편, 기존 연구에서 보고된 PCB 농도와 본 연구결과를 직접 비교하기에는 무리가 따른다. HiVol을 이용하여

Table 1. Comparison of atmospheric PCB congeners measured at Antarctic sites.

Location	Tri	Tetra	Penta	Penta	Hexa	Hexa	Hexa	Hepta	Hepta	Sum	Reference
	PCB 18	PCB 52	PCB 101	PCB 118	PCB 128	PCB 138	PCB 153	PCB 180	PCB 187	$\Sigma_9$ PCB	
Ross Island (88-90)	-	-	3.1	-	-	4.1	3.9	-	-	11.1	Larsson et al. (1992)
King George Island (93-94)	3.5	4.0	2.6	2.9		1.8	3.5	-	-	18.3	Montone et al. (2001)
Signy Island (94-95)	17.0	5.9	2.5	0.5	0.1	0.6	0.8	0.3	0.5	28.2	Kallenborn et al. (1998)
King George Island (95-96)	7.2	8.6	4.9	4.7	0.4	2.6	3.9	0.3	0.5	33.1	Montone et al. (2003)
Terra Nova Bay (03-04)	0.10	0.05	0.004	0.002	< 0.006	< 0.043	-	< 0.033	< 0.021	0.16	Gambaro et al. (2005)
King George Island (04-05)	0.82	0.52	0.27	0.21	0.04	0.23	0.14	0.08	0.00	2.32	This study

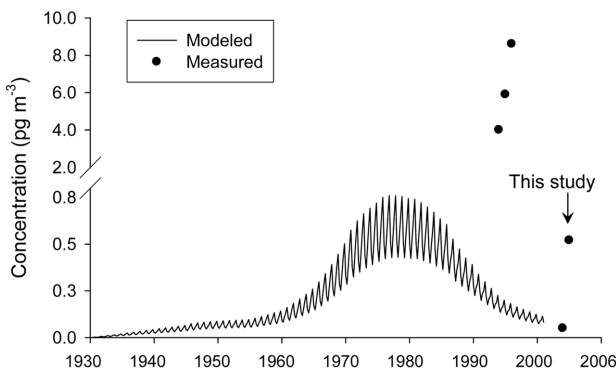


Fig. 5. Atmospheric levels of PCB 52 in Antarctica derived by a global multimedia model, Globo-POP, and the measured data in Table 1.

일부 기간에만 시료를 채취한 경우, 시료채취 당시의 기상 조건(풍향, 풍속, 기온 등)의 영향을 많이 받으므로, 시료 채취 지점의 대표 농도라고 하기 어려운 경우가 있다. 반면에 PAS를 이용한 경우에는 연평균 농도를 계산하기 때문에 보다 대표성 있는 농도를 산출할 수 있다. 또한 Table 1에서 비교한 이전 연구들의 시료채취 시기가 1980년대부터 2000년대까지 다양하다는 것에 주의해야 한다. 전 세계 PCB 배출량은 1980년대를 정점으로 급격히 감소하고 있는 추세이므로(Brevik *et al.* 2002b), 이를 고려하여 농도 수준을 비교해야 한다. 즉, 1980년대 이후에 남극 PCB 배경농도의 감소가 예상되므로, 실측자료에서도 이러한 감소 추세가 있는지 확인할 필요가 있다.

장기 PCB 농도 추세를 확인하고, 더 나아가 다양한 화합물의 연도별 실측값을 비교하기 위해서 다매체 모델을 활용할 수 있다. Fig. 5는 Globo-POP을 이용하여 1930년부터 2000년까지 남극대기 중 PCB 52의 농도변화를 묘사한 결과와 Table 1의 실측값을 동시에 나타낸 그림이다. 전반적으로 실측농도가 모델결과보다 10배 이상 큰 경향을 보인다. Globo-POP에서 기후대별 대기는 균질화되어 있으며, 남극은 하나의 기후대로 간주된다. 게다가 남극에는 PCB 오염원이 존재하지 않고 장거리 이동을 통해서만 유입되는 것으로 가정하고 있으므로, 남극 외곽에 위치한 과학기지 근처에서 얻은 측정농도가 Globo-POP 결과보다 큰 것은 타당하다. 이와는 달리, Terra Nova Bay에서 측정된 농도는 모델 결과와 상당히 비슷한 수준이다. 이 결과는 Terra Nova Bay의 대기가 지역 오염원보다는 장거리 이동의 영향을 받는다는 보고(Gambaro *et al.* 2005)와 일치한다. 앞으로 남극의 다양한 지점에 PAS를 설치하고, 이를 이용한 장기 모니터링 결과와 모델 결과를 비교할 경우, 장거리 이동과 지역 오염원의 기여도를 평가할 수 있을 것이다.

## 4. 결 론

세종기지에서 검출된 PCBs는 대부분 penta-CBs 이하의 저염화 PCBs로서, 대기를 통한 장거리 이동을 반영하였다. 또한 세종기지에서 멀어질수록 PCB 농도가 감소했으므로, 기지 건물에서 PCBs가 배출되는 것으로 판단된다. 앞으로 이 두 가지 요인(장거리 이동, 기지자체의 배출)에 대한 추가연구가 필요하다. 세종기지 대기 중 PCB 농도는 10여 년 전 기타 남극지역에서 측정된 농도보다 10배 정도 작았으며, 최근에 Terra Nova Bay에서 측정된 값보다는 10배 이상 컸다. 세종기지의 대기 중 PCB 농도는 전 세계 배출량 감소로 인해 이전 보다는 상당히 낮아졌을 것으로 판단되지만, 킹 조지 섬의 지리적 위치와 주변에 밀집한 과학기지들로 인해 남극 배경지역보다 높은 수준을 보였다. 본 연구결과를 기초로 세종기지에서도 지속적인 POPs 모니터링과 모델링을 통해, 장거리 이동을 평가하고 시·공간적 변화와 오염원 기여도를 파악하는 종합 거동연구를 수행할 필요가 있다.

## 사 사

본 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 “국제 IPY 남극대륙종단 빙하 프로그램: 빙하기반기술 개발사업 (PP06010)”의 지원으로 수행되었습니다. PAS를 제공해주시고 자료해석에 도움을 주신 토론토대학교의 Frank Wania 교수님께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- 최성득, 장윤석. 2005. Passive Air Sampler를 이용한 잔류성 유기오염물질의 대기 모니터링. *한국대기환경학회지*, 21, 481-494.
- Bartkow, M.E., K. Booij, K.E. Kennedy, J.F. Müller, and D.W. Hawker. 2005. Passive air sampling theory for semivolatile organic compounds. *Chemosphere*, 60, 170-176.
- Brevik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna, and K.C. Jones. 2002a. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners - A mass balance approach: 1. Global production and consumption. *Sci. Total Environ.*, 290, 181-198.
- Brevik, K., A. Sweetman, J.M. Pacyna, and K.C. Jones. 2002b. Towards a global historical emission inventory for selected PCB congeners - A mass balance approach: 2. Emissions. *Sci. Total Environ.*, 290, 199-224.
- Choi, S.-D., S.-Y. Baek, and Y.-S. Chang. 2007. Influence of

- a large steel complex on the spatial distribution of volatile polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) determined by passive air sampling using membrane-enclosed copolymer (MECOP). *Atmos. Environ.*, 41, 6255-6264.
- Gambaro, A., L. Manodori, R. Zangrando, A. Cincinelli, G. Capodaglio, and P. Cescon. 2005. Atmospheric PCB concentrations at Terra Nova Bay, Antarctica. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 9406-9411.
- Halsall, C.J. 2004. Investigating the occurrence of persistent organic pollutants (POPs) in the Arctic: Their atmospheric behaviour and interaction with the seasonal snow pack. *Environ. Pollut.*, 128, 163-175.
- Ikonomou, M.G., T.L. Fraser, N.F. Crewe, M. Fischer, I.H. Rogers, T. He, P. Sather, and R.F. Lamb. 2001. A comprehensive multiresidue ultra-trace analytical method, based on HRGC/HRMS, for the determination of PCDDs, PCDFs, PCBs, PCDEs, and organohalogen pesticides in six different environmental matrices. *Can. Data Rep. Fish Aquat. Sci.*, 2389, 1-95.
- Kallenborn, R., M. Oehme, D.D. Wynn-Williams, M. Schlabach, and J. Harris. 1998. Ambient air levels and atmospheric long-range transport of persistent organochlorines to Signy Island, Antarctica. *Sci. Total Environ.*, 220, 167-180.
- Larsson, P., C. Jarnmark, and A. Sodergren. 1992. PCBs and chlorinated pesticides in the atmosphere and aquatic organisms of Ross Island, Antarctica. *Mar. Pollut. Bull.*, 25, 281-287.
- Mackay, D. 2001. *Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach*, 2nd ed. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Montone, R.C., S. Taniguchi, J. Sericano, R.R. Weber, and W.H. Lara. 2001. Determination of polychlorinated biphenyls in Antarctic macroalgae *Desmarestia* sp. *Sci. Total Environ.*, 277, 181-186.
- Montone, R.C., S. Taniguchi, and R.R. Weber. 2003. PCBs in the atmosphere of King George Island, Antarctica. *Sci. Total Environ.*, 308, 167-173.
- Shen, L., F. Wania, Y.D. Lei, C. Teixeira, D.C.G. Muir, and T.F. Bidleman. 2004. Hexachlorocyclohexanes in the North American atmosphere. *Environ. Sci. Technol.*, 38, 965-975.
- Shen, L., F. Wania, Y.D. Lei, C. Teixeira, D.C.G. Muir, and T.F. Bidleman. 2005. Atmospheric distribution and long-range transport behavior of organochlorine pesticides in North America. *Environ. Sci. Technol.*, 39, 409-420.
- Shen, L., F. Wania, Y.D. Lei, C. Teixeira, D.C.G. Muir, and H. Xiao. 2006. Polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the North American atmosphere. *Environ. Pollut.*, 144, 434-444.
- UNEP. 2007. Stockholm Convention. <<http://www.pops.int/>> [cited 2007. 6. 18].
- Wania, F. and D. Mackay. 1993. Global fractionation and cold condensation of low volatility organochlorine compounds in polar regions. *Ambio*, 22, 10-18.
- Wania, F. and D. Mackay. 1995. A global distribution model for persistent organic chemicals. *Sci. Total Environ.*, 160/161, 211-232.
- Wania, F. and D. Mackay. 1996. Tracking the distribution of persistent organic pollutants. *Environ. Sci. Technol.*, 30, 390A-397A.
- Wania, F., L. Shen, Y.D. Lei, C. Teixeira, and D.C.G. Muir. 2003. Development and calibration of a resin-based passive sampling system for monitoring persistent organic pollutants in the atmosphere. *Environ. Sci. Technol.*, 37, 1352-1359.

---

Received Jun. 19, 2007

Accepted Oct. 15, 2007