

Passive Air Sampler를 이용한 잔류성 유기오염물질의 대기 모니터링

Air Monitoring of Persistent Organic Pollutants Using Passive Air Samplers

최 성 득 · 장 윤 석*

포항공과대학교 환경공학부

(2005년 5월 18일 접수, 2005년 10월 6일 채택)

Sung-Deuk Choi and Yoon-Seok Chang*

School of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology

(Received 18 May 2005, accepted 6 October 2005)

Abstract

The monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in the atmosphere is a basis for the study of the fate of POPs in multimedia environments. Recently, passive air samplers (PASs) for POPs have been developed. In this paper, we deal with the principle, properties, and applications of the PAS. The principle of PAS, which has no pump, is physical sorption of semi-volatile organic chemicals on various sorbent materials. The PAS is much smaller than a high-volume air sampler and does not need electricity. These properties of the PAS make it possible to conduct various-scaled environmental monitoring all over the world including the Arctic and Antarctic, but the major disadvantage of PAS is its long sampling periods up to 2 years. To date, four kinds of PAS have been developed: polyurethane foam (PUF), polymer-coated glass (POG), semi-permeable membrane devices (SPMDs), and XAD resin-based PAS. Among them, SPMDs have been commercialized and are most widely used now. Meanwhile, the POPs emitted from China have a large potential to influence the levels and fates of POPs in Korea. Since characteristics of PAS are quite useful to monitor long-range transport of POPs, the use of PAS is highly recommended.

Key words : Passive air sampler (PAS), Persistent organic pollutants (POPs), Air monitoring

1. 서 론

잔류성 유기오염물질 (persistent organic pollutants:

POPs)은 환경 중에 오랜 기간 잔류하며, 먹이 사슬을 따라 체내에 축적되어 암이나 내분비계 장애를 유발하며, 대기와 해양을 통한 장거리 이동성을 갖고 있는 유해화학물질이다. POPs의 규제를 위해, 2001년 UN의 주도 하에 “스톡홀름 협약(Stockholm Convention)”이 채택되었으며 2004년 5월 17일에 정식

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)54-279-2281, E-mail : yschang@postech.ac.kr

발효되었다(UNEP, 2004). 우리나라는 지난 2001년 10월 4일에 협약에 서명하였고, 이미 1999년부터 다양한 환경매체 중 다이옥신(PCDD/Fs) 및 POPs 분포 실태 조사를 실시하고 있으며(환경부, 2000), 최근에는 “다이옥신 등 잔류성 유기오염물질 관리에 관한 특별법”의 제정을 추진 중이다.

스톡홀름 협약에서는 우선규제 대상물질로서 12종의 POPs가 선정되었으며, 유기염소계 농약(organo-chlorine pesticides: OCPs)인 알드린(Aldrin), 디디티(DDT) 등과, 산업용 화학물질인 폴리염화비페닐(polychlorinated biphenyls: PCBs), 소각 또는 산업공정 부산물로 생성되는 다이옥신류(polychlorinated dibenzo-*p*-dioxin/furans: PCDD/Fs), 헥사클로로벤젠(hexachlorobenzene: HCB) 등 크게 세 가지 부류로 나뉜다(표 1). 그러나 실제로 POPs의 범주에는 방염제로 사용되고 있는 브롬화 화합물인 폴리브롬화디페닐에테르(polybrominated diphenyl ethers: PBDEs), 폴리브롬화비페닐(polybrominated biphenyls: PBBs) 등과 연소과정에서 주로 생성되는 다환방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs) 등 매우 다양한 화학물질들이 포함된다. 최근에는 PBDEs, PBBs 및 농약류인 lindane과 chlordecone이 정식으로 UNEP 규제 대상물질로 추천되었으며, 이외에도 기타 물질들이 추가될 가능성은 얼마든지 있다. POPs의 용도, 물리·화학적 특성, 대기 중 농도 현황 등은 기존의 총설 논문(김영성, 2003)에 자세히 정리되어 있다.

환경으로 배출된 POPs는 대기, 토양, 수질, 퇴적물에서 이동·축적·분해 과정을 거치게 되며, 먹이사슬을 통해 체내에 고농도로 축적된다. 따라서 POPs의 배출원을 파악하여 이들의 다양한 이동경로를 추적하고, 환경 및 생체 축적을 파악하기 위한 POPs 모니터링 및 거동 연구는 매우 중요하다. POPs는 오

염원 주변뿐만 아니라 해류나 기류에 의한 장거리 이동을 통해 수천 km 이상 떨어진 곳에도 영향을 미치며(Hermanson and Hites, 1989), 전 지구적 증류(global distillation)와 메뚜기 효과(grasshopper effect)에 의해 남극이나 북극과 같은 고위도 청정지역으로도 이동한다(Wania and Mackay, 1996). 휘발성이 작은 POPs는 상당량 토양에 저장되지만, 대부분의 POPs는 대기 중으로 배출되어 대기를 매체로 전 지구적으로 이동한다. 그러므로 대기환경 모니터링은 종합적인 POPs 거동연구에 있어서 가장 선행되어야 할 분야이다.

대기 중 POPs 시료채취의 경우, 일반적으로 high volume air sampler (HVS)를 이용하여 다량의 공기를 흡인하는 방법을 사용한다. 그러나 다양한 지점에서의 전원공급이 원활하지 않으며, 하루 이틀을 주기로 필터 등을 교체해야 하므로 다수 지점에서의 장기간 모니터링이 수월하지 않다. 더구나 우리나라는 계절에 따른 기상변화가 크므로, 단기간 채취한 시료를 분석하여 계절별 혹은 연도별 대표농도로 나타내기에는 부적절하다. 따라서 국외에서는 2~3년 전부터 passive air sampler (PAS)를 이용한 POPs 연구가 증가하는 추세이다. 그러나 국내에서는 PAS를 사용하여 POPs 모니터링을 한 예가 전무하다. 따라서 본 논문에서는 영국과 캐나다 연구진을 중심으로 사용되고 있는 PAS의 전반적인 사항에 대해 소개하고, 이를 이용한 연구동향 및 모니터링 결과와 국내 적용방안에 대해 논의하고자 한다.

2. PAS의 일반사항

2.1 PAS의 원리

PAS는 펌프가 탑재되어 있지 않으므로 물리적인

Table 1. Chemicals listed in the Stockholm Convention.

Use and source	Chemicals
Organochlorine pesticides (OCPs)	Aldrin, Chlordane, DDT, Dieldrin, Endrin, Heptachlor, Mirex, Toxaphene, Hexachlorobenzene (HCB)
Industrial chemical	Polychlorinated biphenyls (PCBs)
Waste incineration and byproduct of industrial process	Polychlorinated dibenzo- <i>p</i> -dioxin/furans (PCDD/Fs) Polychlorinated biphenyls (PCBs) HCB (Hexachlorobenzene)

확산현상(molecular diffusion)에 의해 POPs를 포함한 대기 중 반휘발성(semi-volatile) 물질을 채취하는 장치이다. 대기와 수착제(sorbent) 사이의 물질 전달은 식(1)의 Fick's first law를 따른다.

$$\frac{dm}{dt} = kA(C_{Air} - C_{Surface}) \quad (1)$$

dm : mass (pg) of POPs collected by a PAS during time interval (dt)

k : mass transfer coefficient ($m \text{ day}^{-1}$)

A : interfacial transfer area (m^2)

C_{Air} : concentration of POPs in the atmosphere ($pg \text{ m}^{-3}$)

$C_{Surface}$: concentration of POPs adjacent to the sorbent ($pg \text{ m}^{-3}$)

시료채취 기간 중 대기 중 농도인 C_{Air} 와 기온이 일정하다면, PAS에 채취되는 POPs의 양은 화학평형 이전까지 지속적인 선형증가를 보일 것이다. 현재 사용되고 있는 PAS의 설치기간(수개월~2년)은 선형 흡수기간보다 짧으며, POPs 탈착률(rate of desorption)은 매우 작다. 일반적인 기체교환(gas exchange)과는 달리, PAS에 채취된 POPs의 경우에는 대기 중으로 탈착되는 양이 극히 작으므로 $C_{Surface} = 0$ 으로 간주할 수 있다. 따라서 채취되는 POPs의 양($pg \text{ PAS}^{-1}$)은 식(2)에서와 같이 대기 중 농도, 공기채취율, 시료채취 기간에 정비례한다(Wania *et al.*, 2003).

$$C_{PAS} = C_{Air} R t \quad (2)$$

C_{PAS} : concentration of POPs in a PAS ($pg \text{ PAS}^{-1}$)

C_{Air} : concentration of POPs in the atmosphere ($pg \text{ m}^{-3}$)

R : sampling rate ($m^3 \text{ day}^{-1} \text{ PAS}^{-1}$)

t : deployment period (day)

한편, Bartkow *et al.* (2005)은 Whitman의 two-resistance mass transfer coefficient (Mackay, 2001)에 의해 두 개의 확산식(air and sampler sides)을 사용하여 PAS의 원리를 설명하였다. 이들 확산식은 기본적으로 Fick's first law를 따르므로 식(1)과 동일하며, 이후의 수식 전개과정에서 POPs의 탈착이 무시되고 있으므로 식(2)와 동일한 식이 유도되었다.

그림 1에서와 같이, PAS의 시료채취 단계에는 선

형흡수(linear uptake), 곡선형흡수(curvilinear stage), 평형상태(equilibrium) 세 가지가 있다(Bartkow *et al.*, 2005; Wania *et al.*, 2003). 실제 시료채취 기간(최장 2년)은 선형흡수 기간보다 짧으므로 개별 PAS에 채취된 POPs 농도($pg \text{ PAS}^{-1}$) 정량에는 별 어려움이 없다. 예를 들어, 공기 중 특정 POPs의 농도가 40 pg m^{-3} , PAS의 공기 채취율이 $1 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1} \text{ PAS}^{-1}$ 이고 수착제는 XAD-2 레진이라면, 20°C 에서 1년 동안 시료채취를 할지라도 채취농도($pg \text{ PAS}^{-1}$)는 화학평형 농도의 0.2% 정도에만 도달한다(Wania *et al.*, 2003).

동일한 시간대에 여러 지점에 PAS를 설치한 경우에는 각각의 POPs 농도($pg \text{ PAS}^{-1}$)를 비교하여 상대적인 오염 정도를 파악할 수 있으며, 공기 채취율($m^3 \text{ day}^{-1} \text{ PAS}^{-1}$)을 산정할 경우, 시간평균 대기 중 농도($pg \text{ m}^{-3}$)를 계산하여 HVS를 이용한 측정값과 비교할 수 있다. 공기 채취율($m^3 \text{ day}^{-1} \text{ PAS}^{-1}$)을 산정하기 위해서는 분자확산계수를 이용하거나 물질전달계수를 이용한 수식으로 구하는 방법이 있으며, 시료채취 전 수착제에 특정 화학물질을 첨가하여 탈착되는 양을 측정하여 채취율을 구하는 방법도 있다(Pozo *et al.*, 2004; Wania *et al.*, 2003). 물질전달계수, 선형흡수, 화학평형에 관한 수식유도 등 보다 자세한 PAS의 원리는 Bartkow *et al.* (2005)의 논문에 수록되어 있다.

2.2 PAS의 특징

PAS의 장점 중의 하나는 매우 간단한 장치이므로 가격이 저렴하다는 것이다. 다수의 지점에 저비용으

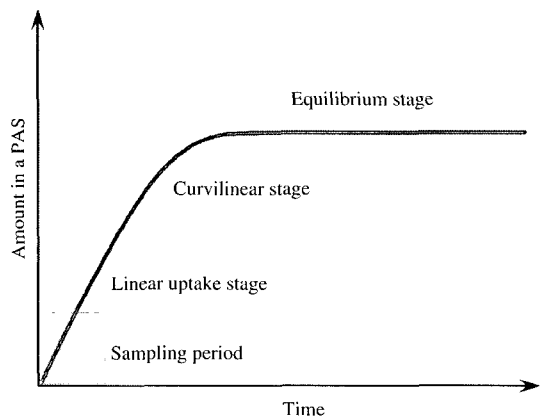


Fig. 1. Uptake curve of a passive air sampler.

로 별다른 기술 없이 설치가 가능하므로 대규모의 POPs 모니터링이 가능하다. 더구나 전력을 필요로 하지 않으므로 전력공급이 용이하지 않은 산간지역이나 극지(남극, 북극)에도 설치 가능한 장점이 있다(Wania *et al.*, 2003). 따라서 기존의 HVS를 이용한 대기 모니터링의 단점을 개선할 수 있는 새로운 시료채취 기법이다. 예를 들어 HVS를 이용하여 하루 정도 대기시료를 채취한 경우, 이 시료에서 검출된 POPs는 그 당시의 풍향, 풍속, 기온 등의 기상조건에 따라 농도 편차가 심할 가능성이 있다. 반면에 PAS를 이용한 장기 모니터링의 경우, 기상 조건에 비교적 덜 민감하게 되므로 보다 신뢰성 있는 POPs의 분포현황 파악이 가능하다. 그러나 시료채취 기간이 보통 한 달에서 일 년 정도로서 비교적 장시간이 소요되므로 신속한 모니터링의 수행에는 어려움이 있으며, 대부분의 PAS가 기체상(gas phase) 시료채취만을 목적으로 하고 있다.

표 2에 PAS와 HVS의 특징을 비교해 보았다. 두 시료채취 방법이 나름대로의 장단점을 가지고 있으므로 최근에는 두 가지 방법을 모두 사용하여 보다 종합적인 모니터링을 하는 것이 추세이다. 기존 연구들의 PAS 설치 기간은 3주에서 2년으로서 매우 범위가 넓으나, 시료채취 지점 및 분석항목에 따라 최소 1개월에서 최대 1년 정도의 기간이 적절할 것이다. 도시 지역에서 분석항목이 PAHs, PCBs, OCPs인 경우에는 시료채취 기간은 1~3개월 정도면 충분할 것으로 예상되나, 분석항목이 PCDD/Fs이거나 시료채취 지점이 청정지역인 경우에는 최소 6개월에서 1년 정도의 시료채취 기간이 적절할 것이다.

2.3 PAS의 종류

대기 중 POPs 모니터링에 사용되고 있는 PAS로는 크게 폴리우레탄 폼(polyurethane foam: PUF), polymer-coated glass (POG), semi-permeable membrane devices (SPMDs), XAD resin을 사용하는 네 가지 종류가 있다. 이 중 앞의 세 종류의 PAS는 주로 영국 랭커스터 대학교(Lancaster University)의 Jones 그룹과 캐나다 기상청(Meteorological Service of Canada)의 Harner 그룹에서 사용하고 있으며, XAD resin-based PAS는 캐나다 토론토 대학교(University of Toronto)의 Wania 그룹에서 사용하고 있다. 아래에 각 PAS 종류별 특징들에 대해 정리하였다.

2.3.1 Polyurethane foam (PUF)-based PAS

캐나다 Simon Fraser University의 Dr. Gobas와 캐나다 기상청의 Dr. Harner는 PUF를 이용한 PAS를 개발하였다. PUF 디스크는 반경 7cm 두께 1.35cm의 크기로서, 세척과 설치가 비교적 쉬운 장점이 있다. 시료채취 기간은 보통 3개월 이내이다. 이 샘플러에는 충분한 내부 공간이 있기 때문에 PUF와 SPMD를 동시에 탑재할 수 있고, 대신에 polymer coated glass jar (POG)를 넣을 수도 있다(그림 2). 따라서 최근 그 응용범위가 점차 넓어지고 있으며 전 지구적 모니터링에도 사용되고 있다(Harner *et al.*, 2004; Pozo *et al.*, 2004; Wilford *et al.*, 2004; Shoeb and Harner, 2002).

2.3.2 Semi-permeable membrane device (SPMD)

미 지질조사국(U.S. Geological Survey)에서는 물에 함유되어 있는 POPs를 채취하기 위해 SPMD를 개발하였다(Huckins *et al.*, 1993, 1990). 반투과성 폴

Table 2. Comparison between passive air sampler (PAS) and high-volume air sampler (HVS).

	PAS	HVS
Price	Very low	High
Operation and Maintenance	Very easy and no special maintenance is required	Electric power and highly qualified persons are required
Supplies	Resin, PUF, and SPMD etc.	PUF, GF
Target compounds	POPs in the vapor phase	POPs in vapor and particle phases
Sampling periods	1~24 months	1~2 days
Set-up sites	Unlimited	The sites where electricity can be supplied
Number of samplers	Unlimited	Only several HVSs are usually available in one research group

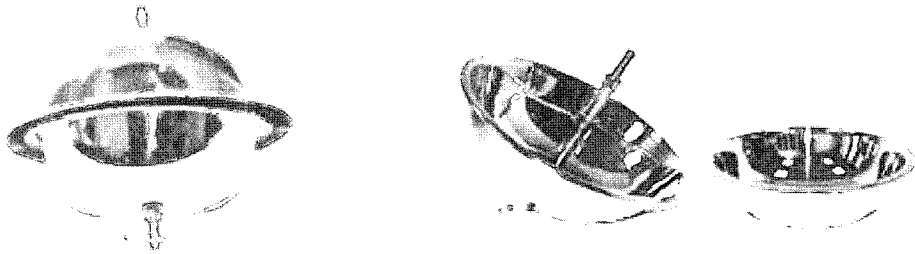


Fig. 2. PUF passive sampler designed by Dr. Harner at the Meteorological Service of Canada (MSC). The photo were obtained from the Research Centre for Environmental Chemistry and Ecotoxicology (RECETOX): <http://recetox.chemi.muni.cz>.

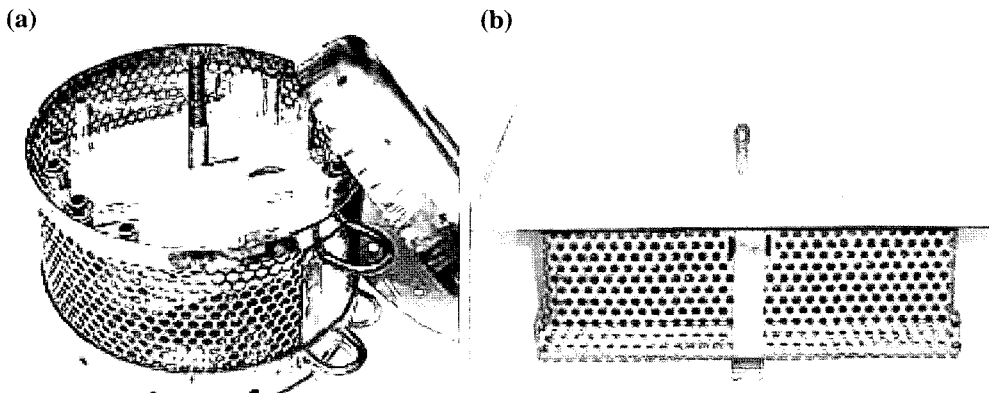


Fig. 3. Commercialized SPMD in a stainless steel canister (<http://www.est-lab.com>) (a) and in an exposure box (<http://www.passamtec.com>) (b).

리에틸렌 막(semi-permeable polyethylene membrane) 내부에 들어있는 중성 지방의 일종인 트리올레인(triolein) 필름이 POPs를 수착한다. 1990년대에 대기 중 POPs 채취에 SPMD를 사용하기 시작했으나(Ockenden *et al.*, 1998a, b; Prest *et al.*, 1995; Petty *et al.*, 1993), 샘플러 디자인, 수착 속도 및 평형, 환경 인자에 따른 시료채취 효율 등에 대한 전반적인 연구는 2000년대 이후부터 이루어졌다(Ockenden *et al.*, 2001). 이러한 기본적인 연구들이 수행된 후, SPMD를 이용한 대기 중 POPs 모니터링이 본격적으로 수행되기 시작하였다. SPMD를 이용한 연구는 최근 논

문 18편 중 9편으로서 가장 높은 비중을 차지하고 있다(Bartkow *et al.*, 2004b; Harner *et al.*, 2004; Jaward *et al.*, 2004; Söderström *et al.*, 2004; Meijer *et al.*, 2003; Söderström *et al.*, 2003; Shoeib and Harner, 2002; Lohmann *et al.*, 2001; Ockenden *et al.*, 2001).

SPMD는 이미 상용화 되어 다양한 종류로 판매되고 있으며 대부분 EST 제품이 사용되고 있다(Environmental sampling technologies Inc: <http://www.est-lab.com>). 그림 3a는 스테인레스 캐니스터(stainless steel canister)에 장착된 SPMD를 보여주고 있다. 이 외에도 독일에서도 SPMD의 개발이 완료되

어(Wenzel *et al.*, 2004) 판매 중이다(그림 3b).

한편, 여러 가지 이유로 인해 SPMD는 이상적인 PAS가 아니라는 견해가 있다. 휘발성이 강한 POPs인 경우, 선형흡수 기간이 시료채취 기간보다 짧을 가능성이 있다. 즉, SPMD가 빠른 시일 내에 평형에 도달할 수 있다(Ockenden *et al.*, 1998a, b). 게다가, 수착제가 폴리에틸렌 막과 트리올레인으로 구성되어 있기 때문에 흡수속도 산정이 복잡하며, 폴리에틸렌은 온도에 민감하고 영하 이하의 온도에서 흡수특징이 충분히 규명되지 않았다. 마지막으로, 전처리 과정에서 폴리머 조각들을 제거하기 위해 크기 배제(size-exclusion) 크로마토그래피를 추가로 거쳐야 하는 단점이 있다(Wania *et al.*, 2003). 그럼에도 불구하고 SPMD는 물과 공기 중의 POPs를 모두 채취할 수 있으며, 야외에서 재현성이 뛰어나고 설치하기 쉬우므로 가장 많이 사용되고 있다.

2.3.3 XAD resin-based PAS

XAD resin-based PAS는 캐나다 토론토 대학교의 Wania 그룹에서 제작되었다. 최근 많이 사용되고 있는 SPMD와 달리 XAD-2 resin이 수착제로 사용되고 있으며, 공기역학 시뮬레이션을 통해 풍속의 영향을 받지 않는 구조로 제작되었다(그림 4). 1년간의 야외설치를 통해 시간에 따른 OCPs 농도의 선형 증가를 확인했으며, 기존의 HVS를 이용한 연구와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이후 북미대륙에서의 HCHs와 OCPs의 대기 중 분포 연구가 수행되었다

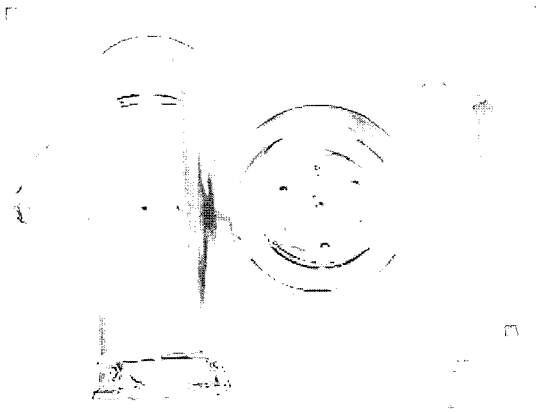


Fig. 4. Design of a resin-based PAS. The sampler was presented by Dr. Wania at the University of Toronto.

(Shen *et al.*, 2005, 2004). 그림 4는 resin-based PAS의 구조를 보여주고 있다. XAD-2 resin을 세척하여 가장 오른쪽에 있는 망사 홀더에 넣어 샘플러 내부에 고정시킨다. 보다 자세한 사항은 다음 논문에 수록되어 있다(Wania *et al.*, 2003).

2.3.4 Polymer coated glass (POG)-based PAS

비교적 최근에 개발된 PAS로는 thin film polymer-coated glass-based PAS가 있다. 유리 실린더에 마이크로 두께의 에틸렌 비닐 아세테이트(ethylene vinyl acetate: EVA)를 코팅했기 때문에 일반적으로 POG (polymer-coated glass) 샘플러로 불린다(Harner *et al.*, 2003). POG는 보통 PUF-based PAS 본체(그림 2)에 PUF 대신 장착된다. 필름 두께가 1 μm 미만으로 매우 작으므로 비교적 단기간에 시료채취가 가능한 것이 특징이다. POG를 실제 대기환경 모니터링에 사용한 연구논문은 두 편으로서(Farrar *et al.*, 2005a, b) 아직까지는 널리 사용되고 있지 않다.

2.3.5 기타 PAS

앞에서 설명한 네 종류의 PAS 이외에도 토양이나 식생, 치즈 등을 이용한 모니터링이 실시되었다(Meijer *et al.*, 2002; Kalantzi *et al.*, 2001; Tremolada *et al.*, 1996; Kylin *et al.*, 1994; Muir *et al.*, 1993; Calamari *et al.*, 1991). 그러나 이러한 PAS는 높은 분석 재현성을 기대하기 어려우며, 특히 식물의 잎을 이용할 경우에는 종, 나이, 지역, 계절 등 많은 변수들에 의해 흡수율이 다를 수 있다(Müller *et al.*, 2000). 이 외에 SPMD의 막으로 사용되는 폴리에틸렌을 PAS로 사용하여 PAHs를 분석하기도 했으나 아직까지 보편화되지는 않았으며(Bartkow *et al.*, 2004a), 가장 최근에는 SPMD와 마찬가지로 폴리에틸렌을 투과성 막으로 사용하고 실리콘 중합체(silicone elastomer)와 polydimethyl-siloxane 필름을 각각 수착제로 사용한 spiral-rod sampler와 stir-bar sampler가 개발되었다(Paschke and Popp, 2005).

3. PAS를 이용한 POPs 연구동향

국내에서도 PAS를 이용한 휘발성 유기화합물(volatile organic chemicals: VOCs)과 일부 환경기준 물질에 대한 연구가 수행되었지만(임봉빈 등, 2004;

Kim and Kim, 2002; 김학민과 김선태, 2001), POPs 모니터링 연구에 PAS를 도입한 경우는 없었다. 외국에서도 불과 4~5년 전부터 대기 중 POPs 모니터링을 위해 다양한 PAS가 개발되었으며, 1~2년의 성능 테스트를 거쳐 2003년 이후 본격적인 모니터링 결과들이 학술지에 발표되고 있다. 앞에서 기술한 여러 가지 장점들로 인해, PAS는 POPs 모니터링 분야의 신기술로서 주목받고 있으며 연구 결과들은 대부분 국제 학술지인 Environmental Science and Technology (ES & T)에 게재되고 있다.

현재, 전 세계적으로 PAS 연구는 영국 랭커스터 대학교의 Jones 그룹과 캐나다 기상청의 Harner 그룹, 토론토 대학교의 Wania 그룹이 선도적인 역할을 하고 있으며, 본 연구진을 포함한 여러 연구그룹이 이들로부터 PAS를 도입하고 있다. 따라서 2006년 이후에는 PAS의 사용이 전 세계적으로 보편화 될 것으로 예상되므로, 국내에서도 보다 활발한 연구 활동이 요구된다. 최근 진행된 PAS 관련 논문들을 정리하여 시료채취 지점, 논문 제목, 분석항목, PAS 종류, 시료채취 기간, 연구기관 등을 명시하여 최신 연구동향을 파악할 수 있게 하였다(표 3).

3.1 실내 모니터링

지금까지 대부분의 연구들은 실내 보다는 실외에서 수행되고 있다. 실내는 환경조건이 일정하기 때문에 HVS를 사용하는데 무리가 없으나, 보다 많은 수의 시료를 확보하고 다양한 실내 환경에서의 POPs 현황을 파악하기 위해서는 PAS 사용을 병행하는 것이 바람직할 것이다.

캐나다 기상청 연구진은 실내 PCBs 농도가 높은 것으로 알려진 실험실 내에서 POG를 이용하여 시료를 채취하였으며(Harner *et al.*, 2004), 영국 랭커스터 대학교와의 공동연구를 통해 캐나다 오타와의 74 가구의 실내에서 PUF-based PAS를 이용하여 PBDEs 모니터링을 실시하였다(Wilford *et al.*, 2004). 각각 3주 동안의 모니터링 결과, 비교적 단기간 내에도 충분히 실내 POPs 오염을 평가할 수 있었다. 따라서 PAS는 다수의 실내 공간에서 POPs 실태조사에 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

3.2 실외 모니터링

기본적으로 PAS는 야외 모니터링을 위해 제작되

었기 때문에 악기상 상태에서도 안정적인 시료채취가 가능하다. 측정망의 공간 규모는 도시에서부터 전 지구 규모까지 다양하다. 각 시료채취 지점의 지리적 조건과 시료채취 동안의 역격적 분석(back trajectory analysis)을 통해 오염원으로부터의 유입 가능성을 파악하는 것이 최근 연구 추세이다.

3.2.1 지방 모니터링 (city and province level)

랭커스터 대학교 연구진은 SPMD를 사용하여 잉글랜드 북서쪽의 19개 지점에서 PCDD/Fs와 PAHs 모니터링을 실시하였다(Lohman *et al.*, 2001). 이 연구는 PAS를 이용하여 PCDD/Fs를 모니터링한 유일한 예로서, 일반적으로 환경 중에 가장 극미량으로 존재하는 PCDD/Fs도 PAS를 이용하여 모니터링이 가능하다는 것을 보여주고 있다.

캐나다 기상청과 랭커스터 대학교 공동 연구진은 토론토에 위치한 CN 타워의 고도별 6개 지점에서 POG-based PAS를 이용하여 PCBs, PAHs, OCPs를 모니터링 하였다. 이 연구에서는 최초로 POG를 야외 시료채취에 사용하여, 1개월의 시료채취 기간으로도 다양한 POPs 분석이 가능하다는 것을 보여주었다(Farrar *et al.*, 2005a). 또한 캐나다 기상청은 토론토를 중심으로 온타리오주의 6개 지점에서 SPMD와 PUF-based PAS를 사용하여 PCBs와 OCPs 모니터링을 실시하였다(Harner *et al.*, 2004).

이 외에도 호주 University of Queensland 연구진에서는 환경청 대기관측소에 폴리에틸렌 PAS를 설치하여 PAHs의 흡수 속도에 대한 연구를 수행하였으며(Bartkow *et al.*, 2004a), 스웨덴 Umeå University 연구진은 태국 방콕의 6개 지점에서 SPMD를 사용하여 PAHs 모니터링을 실시하였다(Söderström and Bergqvist, 2003).

3.2.2 지역 모니터링 (national, regional, and continental level)

이탈리아 University of Siena 연구진의 주도로 PUF-based PAS를 이용하여 칠레의 여섯 지점에서 PCBs 모니터링이 실시되었으며(Pozo *et al.*, 2004), 랭커스터 대학교 연구진은 SPMD를 사용하여 잉글랜드와 노르웨이 연안 12개 지점에서 HCBs, PCBs, PBDEs, HCB, DDT, DDE 모니터링을 실시하였다(Jaward *et al.*, 2004; Meijer *et al.*, 2003)

토론토 대학교 연구진에서는 resin-based PAS를

Table 3. Recent studies using a PAS for POPs monitoring.

Site	Title	PAS type	Chemical	Sampling period	Institute	Reference
Indoor	Characterization of Polymer-Coated Glass as a Passive Air Sampler for Persistent Organic Pollutants	POG ¹⁾	PCBs	3 weeks	MSC ⁴⁾	Hamer <i>et al.</i> (2003)
	Passive Sampling Survey of Polybrominated Diphenyl Ether Flame Retardants in Indoor and Outdoor Air in Ottawa, Canada: Implications for Sources and Exposure	PUF ²⁾	PBDEs	3 weeks	MSC ⁴⁾	Wilford <i>et al.</i> (2004)
Outdoor	Characterizing Uptake Kinetics of PAHs from the Air Using Polyethylene-Based Passive Air Samplers of Multiple Surface Area-to-Volume Ratios	Polyethylene	PAHs	3 months	University of Queensland	Bartkow <i>et al.</i> (2004a)
	Field Deployment of Thin Film Passive Air Samplers for Persistent Organic Pollutants: A Study in the Urban Atmospheric Boundary Layer	POG ¹⁾	PAHs, PCBs, HCH, Chlordane	1 month	Lancaster University	Farrar <i>et al.</i> (2005a)
	Field Calibration of Rapidly Equilibrating Thin-Film Passive Air Samplers and Their Potential Application for Low-Volume Air Sampling Studies	POG ¹⁾	PCBs	18 days	Lancaster University	Farrar <i>et al.</i> (2005b)
	Further Developments in the Use of Semipermeable Membrane Devices (SPMDs) as Passive Air Samplers for Persistent Organic Pollutants: Field Application in a Spatial Survey of PCDD/Fs and PAHs	SPMD ³⁾	PCDD/Fs, PAHs	6 weeks	Lancaster University	Lohmann <i>et al.</i> (2001)
	Further Developments in the Use of Semipermeable Membrane Devices as Passive Air Samplers: Application to PCBs	SPMD ³⁾	PCBs	2 years	Lancaster University	Oeckenden <i>et al.</i> (2001)
	Characterization and Comparison of Three Passive Air Samplers for Persistent Organic Pollutants	SPMD ³⁾ PUF ²⁾	PCBs, PCNs	15 months	MSC ⁴⁾	Shoeb and Hamer (2002)
	Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Semiaquatic Plant and Semipermeable Membrane Devices Exposed to Air in Thailand	SPMD ³⁾	PAHs	3 weeks	Umeå University	Söderström and Bergqvist (2003)
	Passive Air Sampling Using Semipermeable Membrane Devices at Different Wind-Speeds in Situ Calibrated by Performance Reference Compounds	SPMD ³⁾	PCBs, PAHs	3 weeks	Umeå University	Söderström and Bergqvist (2004)
	Field-based Evaluation of Semipermeable Membrane Devices (SPMDs) as Passive Air Samplers of Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs)	SPMD ³⁾	PAHs	32 days	University of Queensland	Bartkow <i>et al.</i> (2004b)
	Using Passive Air Samplers To Assess Urban-Rural Trends for Persistent Organic Pollutants. 1. Polychlorinated Biphenyls and Organochlorine Pesticides	SPMD ³⁾ PUF ²⁾	HCHs, dieldrin, DDT, DDE	4 months	MSC ⁴⁾	Hamer <i>et al.</i> (2004)

Table 3. Continued.

Site	Title	PAS type	Chemical	Sampling period	Institute	Reference
Local	Development and Calibration of a Resin-Based Passive Sampling System for Monitoring Persistent Organic Pollutants in the Atmosphere	Resin	HCHs, HCBs, DDT, DDD, Endosulfan, dieldrin, endrin	1 year	University of Toronto	Wania <i>et al.</i> (2003)
	Passive Sampling Survey of Polybrominated Diphenyl Ether Flame Retardants in Indoor and Outdoor Air in Ottawa, Canada: Implications for Sources and Exposure	PUF ²⁾	PBDEs	3 weeks	MSC ⁴⁾	Wilford <i>et al.</i> (2004)
Outdoor	Spatial and Temporal Trends of POPs in Norwegian and UK Background Air: Implications for Global Cycling	SPMD ³⁾	HCBs, PCBs	2 years	Lancaster University	Meijer <i>et al.</i> (2003)
	Further Studies on the Latitudinal and Temporal Trends of Persistent Organic Pollutants in Norwegian and U.K. Background Air	SPMD ³⁾	PCBs, PBDEs, HCB, DDT, DDE	2 years	Lancaster University	Jaward <i>et al.</i> (2004)
	Passive-Sampler Derived Air Concentrations of Persistent Organic Pollutants on a North-South Transect in Chile	PUF ²⁾	HCHs, dieldrin, DDT, DDE	2 months	University of Siena, Italy	Pozo <i>et al.</i> (2004)
	Hexachlorocyclohexanes in the North American Atmosphere	Resin	HCHs	1 year	University of Toronto	Shen <i>et al.</i> (2004)
Global	Atmospheric Distribution and Long-Range Transport Behavior of Organochlorine Pesticides in North America	Resin	OCPs	1 year	University of Toronto	Shen <i>et al.</i> (2005)
	On going works	PUF ²⁾ Resin		3 months 1 year	MSC ⁴⁾	

¹⁾POG: Polymer-coated glass

²⁾PUF: Polyurethane foam

³⁾SPMDs: Semi-permeable membrane devices

⁴⁾MSC: Meteorological service of Canada

사용하여 북미대륙의 40개 지점에서의 HCHs와 OCPs의 대기 중 분포에 대한 연구를 수행하였다 (Shen *et al.*, 2005, 2004). 이 두 연구는 PAS를 이용한 모니터링 중에서 가장 큰 공간규모(continental level)에서 수행되었으며, 장거리 이동을 설명할 수 있는 중요한 결과들이다. 현재, 동일한 지점에서 채취한 PCBs와 PBDEs 시료에 대한 분석이 완료되었으며 논문 심사 중이다. 또한 로키 산맥과 코스타리카 등 산악지역 특성에 따른 POPs 분포를 파악하기 위해 다수의 PAS를 설치하였으며, 현재는 수확제를 회수하여 기기분석을 완료한 상태이다. 최근에는 북경대와 공동으로 에베레스트 산에 PAS를 설치하였다. 이러한 연구들은 산악지역에서의 POPs 거동과약을 위한 중요한 기초자료를 제공할 것이며, 다매체 환경거동 모델인 Mountain-POP의 보정과 적용에 사용될 예정이다.

3.2.3 전 지구적 모니터링

POPs의 전 지구적 분포 특성으로 인해(Wania and Mackay, 1993), 최근 전 지구적 모니터링의 필요성이 강조되고 있다. 2003년, UNEP는 스톡홀름 협약의 효율적인 평가를 위한 워크숍을 개최하여, 전 지구적 모니터링의 필요성을 재확인했으며, 모니터링 방법

(시료채취, 기기분석)과 분석결과들의 quality assurance/quality control (QA/QC) 전반에 대한 토의가 이루어졌다(UNEP, 2003).

PAS를 이용한 본격적인 전 지구적 모니터링은 캐나다 기상청의 주도로 지난 2004년 11월부터 수행되고 있다(global atmospheric passive sampling study: GAPS). 전 세계 약 50여 지점에 PUF-based PAS와 resin-based PAS가 설치되었으며, PUF-based PAS는 3개월 간격으로 총 3회의 시료채취가 추진되고 있으며 resin-based PAS는 1년 동안 설치될 예정이다(그림 5). 본 연구실(포항공대)에서는 2005년 5월 캐나다 기상청으로부터 PUF-based PAS를 제공 받아 2차 시료채취 기간부터 GAPS에 참여하고 있다. 또한 2004년 5월에는 캐나다 토론토 대학교로부터 resin-based PAS를 도입하였다. 이후 한국 해양연구원의 지원으로 2004년 12월에는 남극 세종기지에(그림 6), 2005년 8월에는 북극 다산기지에 PAS를 설치하여 POPs 모니터링을 실시하고 있다.

3.3 국내적용 연구 분야

3.3.1 소각장 주변 모니터링

PCDD/Fs는 주로 소각과정을 통해 생성되며, 폐기

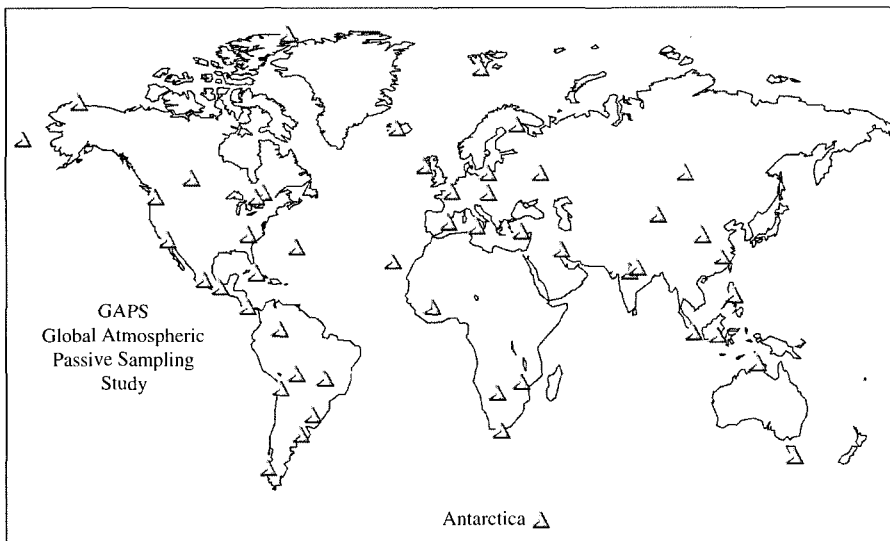


Fig. 5. Global monitoring sites of POPs using the PAS (Personal communication with Dr. Harner at the Meteorological Service of Canada).

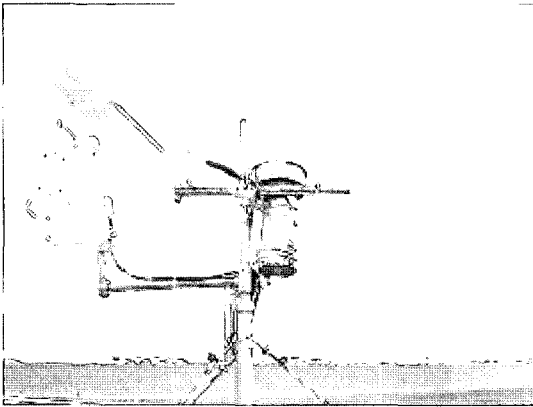


Fig. 6. Resin-based PAS deployed at the King Sejong station in the Antarctic.

플 소각이 주요 배출원으로 알려져 있다. 우리나라는 좁은 국토면적과 쓰레기 매립지 조성의 어려움으로 인해, 다수의 소각장을 운영 중이며, 2003년 현재, 폐기물 처리의 소각 의존도는 14.5%로서 1996년보다 세 배 정도 증가하였다(환경부, 2004a). 더구나 일부 대형 소각로 및 중소형 소각로의 상당수가 주택가 인근에 위치하고 있으므로, 주변 환경매체의 오염과 주민 건강에 대한 불안이 고조되고 있다.

1997년, 전국 11개 생활폐기물소각장(MSWI)에 대한 PCDD/Fs 배출조사가 최초로 실시되었으며(Oh *et al.*, 2002), 현재 환경부 지정 “다이옥신 측정 및 분석 공인기관”은 20개로서 소각로 PCDD/Fs 분석은 점차 일반화되는 추세이다. 그러나 주변 대기로의 확산과 토양으로의 침적 등에 관한 연구는 부족한 편이다. 특히, 소각로 주변 대기 모니터링은 HVS에 의존하고 있으므로, 다수 지점에서 장기간 동시 모니터링이 어렵기 때문에 오염농도 분포를 파악할 수 없었다. 따라서 소각장을 중심으로 거리별 동심원 상에 다수의 PAS를 설치할 경우, 주 풍향에 따른 소각장 영향 범위를 산정할 수 있을 것이다. 소각장 이외에도 다양한 POPs 오염원 근처에 PAS를 설치함으로써 오염물질의 평균적인 확산경향을 파악하기 용이할 것이다.

3.3.2 장거리 이동 파악

국내에서 배출된 POPs 분포현황 및 환경거동 연구와 더불어, 장거리 이동을 통해 국내로 유입되는

POPs의 감시체계를 구축하는 것은 향후 국제협약이나 환경분쟁 등에 신속히 대처하기 위해 반드시 필요하다. 하지만 기존의 국내 오염물질의 장거리 이동 연구는 대부분 황사, 에어로졸, 황 화합물 중심의 연구였다. 그러므로 장거리 이동에 의한 POPs의 동북아 광역오염 특성과 이로 인한 환경영향을 파악하기 위해서는, 보다 종합적이고 장기적인 POPs 환경거동에 관한 연구가 추진되어야 한다.

지금까지 동북아 광역오염과 관련된 연구로 POPs를 연구대상으로 하는 국가과제는 거의 없었다. 최근, 차세대 핵심환경기술개발사업의 일환으로 2001년 하반기부터 2004년 상반기까지 한국과학기술연구원을 중심으로 “미량독성 유해물질의 장거리 이동 특성분석과 영향평가 기술”이라는 과제가 수행되었다(환경부, 2004b). 이 과제에서는 제주도 고산 지역을 중심으로 계절별 대기 중 PCDD/Fs, PCBs, PAHs, OCPs를 분석하고 역궤적 분석 등을 실시하였다. 그러나 제주도의 한 지점에서 단기간에(입자상 PAHs 제외) 시료채취가 이루어졌으므로, 국내 현황을 대표하기에 무리가 있으며 장기간의 오염특성 파악이 어려운 한계가 있다. 따라서 다수의 지점에서 PAS를 사용한 장기적인 POPs 모니터링이 필요하다.

3.4 추가 연구사항

지금까지 PAS를 이용한 POPs 모니터링 항목은 스톡홀름 협약에서 지정된 모든 POPs가 해당된다. 특히, PCBs와 PAHs에 관한 연구가 많이 수행되었으며, 다양한 OCPs도 연구 대상이었다. 최근에는 방염제인 PBDEs에 대한 모니터링도 실시되고 있다. 그러나 PCDD/Fs의 경우에는 SPMD를 이용하여 6주 동안 모니터링 한 경우가 유일하다(Lohmann *et al.*, 2001). 따라서 기존의 자료들과 비교하기 위해서는 PCBs, PAHs, OCPs를 분석항목으로 선정하는 것이 적절할 것이며, PAS를 장기간 설치하여 PCDD/Fs 모니터링을 시도하는 것도 중요한 연구주제가 될 수 있다.

한편, PAS에 의해 채취된 POPs의 농도(pg PAS^{-1})는 반-정량적(semi-quantitative)이므로 대기 중 농도(pg m^{-3})로 표현하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 PAS 종류별로 기상 조건에 따른 흡수율(uptake rate $\text{m}^3 \text{day}^{-1} \text{PAS}^{-1}$)이 데이터베이스화 되어야 한다. 이후에는 PAS로 측정된 대기 중 POPs의 정확한 농

도계산이 가능할 것이다. 이는 PAS를 이용한 모니터링의 보편화와 더불어 POPs 분석 자료의 신뢰도 향상에 기여할 것이다.

4. 결 론

POPs가 중요한 환경오염물질로 부각되면서 이에 대한 다양한 모니터링 기법의 개발이 요구되고 있다. 대부분의 POPs는 대기 중으로 배출되므로 대기환경 모니터링의 역할이 중요하다. 지금까지 대부분의 연구들은 시공간적 제약이 있는 HVS를 사용하여 시료 채취를 했으므로, 다양한 지점이나 대륙 및 전 지구적 규모의 모니터링에 많은 어려움이 있었다. 그러나 최근에 개발된 PAS를 사용할 경우, 저렴한 비용으로 다양한 지점에서 다수의 시료채취가 가능하므로 기존 연구들의 한계를 대폭 보완할 수 있게 되었다.

국내에서는 POPs 모니터링을 위해 PAS를 개발하거나 기존에 개발된 PAS를 이용하여 모니터링을 수행한 예가 없다. 따라서 빠른 시일 내에 PAS를 도입하여 중국으로부터의 장거리 이동 모니터링 등에 사용함으로써, POPs 모니터링 연구의 세계적 흐름에 발맞추어 나가야 할 때이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 극지연구소의 남극 세종기지 주변 인간 활동으로 인한 환경변화 모니터링 사업(PE05005)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김영성(2003) 대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황, 한국대기환경학회지, 19(2), 113-132.
- 김학민, 김선태(2001) Passive Sampling-GC/FID에 의한 VOC 분석시 기기검출한계 평가와 시료채취시간 산정에 관한 연구, 대한환경공학회지, 23(5), 839-848.
- 임봉빈, 정의석, 김선태(2004) 형광물질을 이용한 대기 중 오존 Passive Sampler의 개발, 한국대기환경학회지, 20(4), 483-491.
- 환경부(2000) 99 내분비계장애물질 조사·연구사업 결과보고서.
- 환경부(2004a) 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
- 환경부(2004b) 미량독성 유해물질의 장거리 이동 특성분석과 영향평가 기술.
- Bartkow, M.E., D.W. Hawker, K.E. Kennedy, and J.F. Müller (2004a) Characterizing uptake kinetics of PAHs from the air using polyethylene-based passive air samplers of multiple surface area-to-volume ratios, *Environmental Science and Technology*, 38, 2701-2706.
- Bartkow, M.E., J.N. Huckins, and J.F. Müller (2004b) Field-based evaluation of semipermeable membrane devices (SPMDs) as passive air samplers of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), *Atmospheric Environment*, 38, 5983-5990.
- 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.
- Calamari, D., E. Bacci, S. Focardi, C. Gaggi, M. Morosini, and M. Vighi (1991) Role of plant biomass in the global environmental partitioning of chlorinated hydrocarbons, *Environmental Science and Technology*, 25, 1489-1495.
- Farrar, N.J., T. Harner, M. Shøeib, A. Sweetman, and K.C. Jones (2005a) Field deployment of thin film passive air samplers for persistent organic pollutants: A study in the urban atmospheric boundary layer, *Environmental Science and Technology*, 39, 42-48.
- Farrar, N.J., T. Harner, A.J. Sweetman, and K.C. Jones (2005b) Field calibration of rapidly equilibrating thin-film passive air samplers and their potential application for low-volume air sampling studies, *Environmental Science and Technology*, 39, 261-267.
- Harner, T., N.J. Farrar, M. Shøeib, K.C. Jones, and F.A.P.C. Gobas (2003) Characterization of polymer-coated glass as a passive air sampler for persistent organic pollutants, *Environmental Science and Technology*, 37, 2486-2493.
- Harner, T., M. Shøeib, M. Diamond, G. Stern, and B. Rosenberg (2004) Using passive air samplers to assess urban-rural trends for persistent organic pollutants. 1. polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides, *Environmental Science and Technology*, 38, 4474-4483.

- Hermanson, M.H. and R.A. Hites (1998) Long-term measurements of atmospheric polychlorinated biphenyls in the vicinity of superfund dumps, *Environmental Science and Technology*, 23, 1253-1258.
- Huckins, J.N., M.W. Tubergen, and G.K. Manuweera (1990) Semipermeable membrane devices containing model lipid: A new approach to monitoring the bioavailability of lipophilic contaminants and estimating their bioconcentration potential, *Chemosphere*, 20, 533-552.
- Huckins, J.N., G.K. Manuweera, J.D. Petty, D. Mackay, and J.A. Lebo (1993) Lipid-containing semipermeable membrane devices for monitoring organic contaminants in water, *Environmental Science and Technology*, 27, 2489-2496.
- Jaward, F.M., S.N. Meijer, E. Steinnes, G.O. Thomas, and K.C. Jones (2004) Further studies on the latitudinal and temporal trends of persistent organic pollutants in Norwegian and U.K. background air, *Environmental Science and Technology*, 38, 2523-2530.
- Kalantzi, O.I., R.E. Alcock, P.A. Johnston, D. Santillo, R.L. Stringer, G.O. Thomas, and K.C. Jones (2001) The global distribution of PCBs and organochlorine pesticides in butter, *Environmental Science and Technology*, 35, 1013-1018.
- Kim, S.-T. and H.-S. Kim (2002) The nationwide NO₂ monitoring with passive sampler in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, E2, 69-77.
- Kylin, H., E. Grimvall, and C. Oestman (1994) Environmental monitoring of polychlorinated biphenyls using pine needles as passive samplers, *Environmental Science and Technology*, 28, 1320-1324.
- Lohmann, R., B.P. Corrigan, M. Howsam, K.C. Jones, and W.A. Ockenden (2001) Further developments in the use of semipermeable membrane devices (SPMDs) as passive air samplers for persistent organic pollutants: Field application in a spatial survey of PCDD/Fs and PAHs, *Environmental Science and Technology*, 35, 2576-2582.
- Mackay, D. (2001) *Multimedia Environmental Models: The Fugacity Approach*-Second edition, Lewis Publishers, Boca Raton, 161 pp.
- Meijer, S.N., E. Steinnes, W.A. Ockenden, and K.C. Jones (2002) Influence of environmental variables on the spatial distribution of PCBs in Norwegian and U.K. soils: Implications for global cycling, *Environmental Science and Technology* 2002, 36, 2146-2153.
- Meijer, S.N., W.A. Ockenden, E. Steinnes, B.P. Corrigan, and K.C. Jones (2003) Spatial and temporal trends of POPs in Norwegian and UK background air: Implications for global cycling, *Environmental Science and Technology*, 37, 454-461.
- Muir, D.C.G., M.D. Segstro, P.M. Welbourn, D. Toom, S.J. Eisenreich, C.R. Macdonald, and D.M. Whelpdale (1993) Patterns of accumulation of airborne organochlorine contaminants in lichens from the Upper Great Lakes Region of Ontario, *Environmental Science and Technology*, 27, 1201-1210.
- Müller, J., D.W. Hawker, D.W. Connell, P. Komp, and M.S. McLachlan (2000) Passive sampling of atmospheric SOCs using tristearin-coated fibreglass sheets, *Atmospheric Environment*, 34, 3525-3534.
- Ockenden, W.A., H.F. Prest, G.O. Thomas, A. Sweetman, and K.C. Jones (1998a) Passive air sampling of PCBs: Field calculation of atmospheric sampling rates by triolein-containing semipermeable membrane devices, *Environmental Science and Technology*, 32, 1538-1543.
- Ockenden, W.A., A. Sweetman, H.F. Prest, E. Steinnes, and K.C. Jones (1998b) Toward an understanding of the global atmospheric distribution of persistent organic pollutants: The use of semipermeable membrane devices as time-integrated passive samplers, *Environmental Science and Technology*, 32, 2795-2803.
- Ockenden, W.A., B.P. Corrigan, M. Howsam, and K.C. Jones (2001) Further developments in the use of semipermeable membrane devices as passive air samplers: Application to PCBs, *Environmental Science and Technology*, 35, 4536-4543.
- Oh, J.-E., Y.-S. Chang, and M. Ikononou (2002) Levels and characteristic homologue patterns of polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans in various incinerator emissions and in air collected near an incinerator, *Journal of Air and Waste Management Association*, 52, 69-75.
- Paschke, H. and P. Popp (2005) New passive samplers for chlorinated semivolatile organic pollutants in ambient air, *Chemosphere*, 58, 855-863.
- Petty, J.D., J.L. Zajicek, and J.N. Huckins (1993) Application of semipermeable membrane devices (SPMDs) as passive air samplers, *Chemosphere*, 27, 1609-1624.
- Pozo, K., T. Harner, M. Shoeib, R. Urrutia, R. Barra, O. Parra, and S. Focardi (2004) Passive-sampler

- derived air concentrations of persistent organic pollutants on a North-South transect in Chile, *Environmental Science and Technology*, 38, 6529-6537.
- Prest, H.F., L.A. Jacobson, and J.N. Huckins (1995) Passive sampling of water and coastal air via semipermeable membrane devices, *Chemosphere*, 30, 1351-1361.
- Shen, L., F. Wania, Y.D. Lei, C. Teixeira, D.C.G. Muir, and T.F. Bidleman (2004) Hexachlorocyclohexanes in the North American atmosphere, *Environmental Science and Technology*, 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, *Environmental Science and Technology*, 39, 409-420.
- Shoeib, M. and T. Harner (2002) Characterization and comparison of three passive air samplers for persistent organic pollutants, *Environmental Science and Technology*, 36, 4142-4151.
- Söderström, H.S. and P.-A. Bergqvist (2003) Polycyclic aromatic hydrocarbons in a semiaquatic plant and semipermeable membrane devices exposed to air in Thailand, *Environmental Science and Technology*, 37, 47-52.
- Söderström, H.S. and P.-A. Bergqvist (2004) Passive air sampling using semipermeable membrane devices at different wind-speeds in situ calibrated by performance reference compounds, *Environmental Science and Technology*, 38, 4828-4834.
- Tremolada, P., V. Burnett, D. Calamari, and K.C. Jones (1996) Spatial distribution of PAHs in the U.K. atmosphere using pine needles, *Environmental Science and Technology*, 30, 3570-3577.
- UNEP (2003) Proceedings of workshop to develop a global POPs monitoring programme to support the effectiveness evaluation of the Stockholm Convention.
- UNEP (2004) Stockholm Convention Homepage (<http://www.pops.int/>).
- 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 (1996) Tracking the distribution of persistent organic pollutants, *Environmental Science and Technology*, 30, 390A-396A.
- 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, *Environmental Science and Technology*, 37, 1352-1359.
- Wenzel, K.-D., B. Vrana, A. Hubert, and G. Schüürmann (2004) Dialysis of persistent organic pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons from semipermeable membranes. A procedure using an accelerated solvent extraction device, *Analytical Chemistry*, 76, 5503-5509.
- Wilford, B.H., T. Harner, J. Zhu, M. Shoeib, and K.C. Jones (2004) Passive sampling survey of polybrominated diphenyl ether flame retardants in indoor and outdoor air in Ottawa, Canada: Implications for sources and exposure, *Environmental Science and Technology*, 38, 5312-5318.