

대기 중 잔류성 유기오염물질과 중금속의 특성과 현황

Characteristics and Status of Persistent Organic Pollutants and Heavy Metals in Ambient Air

김 영 성

한국과학기술연구원 지구환경연구센터
(2002년 9월 23일 접수, 2003년 2월 17일 채택)

Young Sung Ghim

Global Environment Research Center, Korea Institute of Science and Technology

(Received 23 September 2002, accepted 17 February 2003)

Abstract

In May 2001, the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) for phasing out and eliminating POPs was signed by 90 countries at the Diplomatic Meeting in Stockholm. In 1998, three years before the Convention, the protocols on POPs and heavy metals were adopted by the United Nations Economic Commission for Europe under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. Growing attention on POPs and heavy metals during the past 10 years is primarily due to their toxicity in minute quantities. POPs and some metal compounds are even more toxic because of their bioaccumulation potentials associated with a high lipid solubility. Furthermore, owing to their persistence and semi-volatility, they are widely distributed in the environment, traveling great distances on wind and water currents. Recent international cooperation to address POPs and heavy metals has focused on these issues. Long-range transport of those pollutants are particularly concerned since Korea is located downwind of prevailing westerlies from China. In this paper, a review is provided to assess the properties, sources, emissions, and atmospheric concentrations on POPs and heavy metals.

Key words : Persistent organic pollutants, Heavy metals, Toxicity, Atmospheric concentration, Emissions, Long range transport

1. 서 론

1980, 90년대 1, 2차 오염물질 순으로 환경기준물질에 대한 대응이 체계를 갖추고 성과가 나타나기 시작하면서 국민과 정책 당국 모두 미량독성 유해

물질에 관심이 높아지고 있다. 미량독성 유해물질은 크게 중금속 성분과 잔류성 유기오염물질 (POPs, persistent organic pollutants)로 나누어 볼 수 있다. 아직은 우리 사회의 관심이 직접 주변에서 확인할 수 있는 국내 배출에 머물고 있으나 미량독성 유해물질로 분류되는 많은 물질들이 분해가 어렵고 대기 중 체류시간이 길어 장거리 이동의 가능성이 매우 크다. 실제 오염물질 배출이 거의 없는 북극의

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-958-5817, E-mail : ysghim@kist.re.kr

Table 1. Twelve chemicals listed in the Stockholm Convention: their use, source, measures specified in the Convention, and the status of regulations in Korea^a.

Chemical	Use and source ^b	Measures in the Convention	Regulations in Korea
DDT	Pesticide	Restriction	
Aldrin	Pesticide	Elimination ^c	Regulation of hazardous chemicals (banned), regulation for management of agricultural chemicals (registration canceled)
Chlordane	Pesticide	Elimination ^{c,d}	
Dieldrin	Pesticide	Elimination ^c	
Endrin	Pesticide	Elimination	
Heptachlor	Pesticide	Elimination ^c	
Toxaphene	Pesticide	Elimination	
Mirex	Pesticide, fire retardant	Elimination ^{c,d}	
HCB (Hexachloro-benzene)	Pesticide. Used to make fireworks, ammunition, and synthetic rubber. A by-product of the manufacture of carbon tetrachloride, perchloroethylene, trichloroethylenen, and pentachlorobenzene. Also an impurity in several pesticide formulations including pentachlorophenol and dicloram.	Elimination ^{c,d} ; emission minimization	Not used
PCBs (Poly-chlorinated biphenyls)	Used as dielectrics in transformers and large capacitors, as heat exchange fluids, as paint additives, in carbonless copy paper, and in plastics. Released from uncontrolled landfills and hazardous waste sites, incineration of PCB-containing wastes, and improper disposal and spills.	Elimination ^c ; emission minimization	Regulation for electrical business (banned the use) regulation of hazardous chemicals (banned), regulation for waste management (specified waste)
Dioxins	Created in emissions from the incineration of hospital waste, municipal waste, hazardous waste, car emissions, and the incineration of coal, peat, and wood.	Emission minimization	Regulation for waste management (emission standard for incinerators with capacities greater than 200 kg/h)
Furans	Dioxins are by-products of the production of pesticides, polyvinyl chloride, and chlorinated solvents. Furans are a major contaminant from PCBs.		

^aUNEP (2001), Ahn (2001)^bRitter *et al.* (1995), WWF (1999)^cCan be used for specific purposes when registered. See UNEP (2001) for details.^dCan be produced for specific purposes when registered. See UNEP (2001) for details.

북극곰, 물개, 물고기에서도 미량독성 유해물질 검출이 보고되고 있는데, 다른 지역에서 배출된 독성물질들이 침적과 휘발을 반복하며 이동하는 가운데 기온이 낮은 극지방에 축적됨으로써 나타난 현상이다 (Jones and de Voogt, 1999). 뿐만 아니라 이들 물질들은 물에 잘 녹지 않고 지방조직에 축적되는 경향이 있어 생태계의 먹이사슬을 따라 위로 올라갈수록 농축되기 때문에 먹이사슬의 상부에 위치한 인간에게 특히 유해하다 (USEPA, 1997).

2001년 5월 스톡홀름에서는 92개국 이 DDT, 다이옥신 등 12개 잔류성 유기오염물질에 대한 유엔협약인 이른바 스톡홀름 협약에 서명하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 이들 물질들은 대부분 국내에서

이미 사용이 금지 혹은 제한되었거나 배출이 규제되고 있는 물질들이다. 그러나 이미 많은 나라에서 이들 물질이 사용되었거나 사용 중에 있고, 미국 미시간 호 주변 South Haven에서와 같이 과거의 사용으로 토양이 오염되어 아직도 대기 중 농도가 높을 수 있다 (USEPA, 2000a). 가장 큰 문제는 대부분 이들의 사용과 처리에 관한 자료가 정확하지 않아 감시 및 규제가 어렵고 영향 평가도 쉽지 않다는 점이다. 이들 물질의 강력한 잔류성으로 인하여, DDT의 경우 전세계적으로 완전히 사용이 금지된 후에도 매 10년마다 대기 중 함량의 10%, 토양 함량의 30%, 해양 함량의 1~2%가 소멸될 뿐이라는 연구 결과도 있다 (AMAP, 2001).

우리나라의 미량독성 유해물질 문제에서는 DDT와 같이 사용이 금지된 물질의 잔류성 확인과 다이옥신과 같이 배출이 규제되고 있는 물질의 거동 조사 외에도 장거리 이동의 영향 파악이 중요하다. 우리나라에서 오염물질의 장거리 이동이 중요한 것은 잘 알려진 바와 같이 주풍인 편서풍의 상류에 위치한 중국 때문이다(예를 들면, 김영성 등, 2001). 중국의 오염물질 배출은 황산화물, 질소산화물의 경우 세계 1, 2위를 다퉈 만큼 막대하며, 이들 오염물질의 70% 이상이 석탄 연소과정에서, 양은 작지만 훨씬 유해한 수은 등 중금속과 PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) 등 유기오염물질과 함께 배출되고 있다(USEPA, 2001; WRI *et al.*, 1998). 수은과 같은 중금속은 연료 중에 포함된 성분이 배출되지만 연소나 배출과정에서 형성되는 PAHs 등 유기오염물질은 연소환경이 열악할수록 배출이 증가된다. 이와 같은 미량독성 유해물질들은 반(semi) 휘발성의 특성으로 인하여 먼지나 에어로솔에 흡착되기 쉬우며, 이에 따라 먼지나 에어로솔은 미량독성 유해물질의 이상적인 운반체로 인식되고 있다.

1970년대 일기기는 하나 중국의 운남성에서는 석탄을 실내에서 사용하는 과정에서 발생하는 방향족 고리 3, 4개의 알칼 PAHs에 의하여 비흡연 여성의 폐암 발생이 2배 이상 높아진 사례가 미국 EPA에 의하여 밝혀지기도 하였다(WRI *et al.*, 1998; Littlefield, 1996). 그러나 중국의 대기 오염은 아직 세계 최고 수준으로 평가되는 가운데 1998년 4월에 이어 2001년 중국에서 발생한 황사가 미국 서해안에 도달하는 모습이 수차례 위성 관측되면서(NASA, 2002) 중국의 오염에 대한 경각심은 동북아시아를 넘어 크게 확산되고 있다(예를 들면, Jaffe *et al.*, 1999). 만일 미세먼지와 함께 혹은 기체 상태로 중국에서 배출된 POPs나 중금속 성분들이 유입된다면, 이들 성분의 강한 잔류성을 감안할 때 이의 영향은 대기 중 다른 어떤 성분보다 위협적임을 쉽게 짐작할 수 있다.

대기 중 미량독성 유해물질에 대한 국내 연구 중 주목할 만한 것으로는 환경부 선도기술개발사업으로 1996년부터 3년간 계속된 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리기술 연구를 들 수 있다(정 용 등, 1999). 이 사업에서는 전국 주요 대도시와 공업지역을 대상으로 미세먼지 중 중금속과 PAHs, 다이옥신

등을 측정하였다. 환경부에서는 1990년대부터 전국 주요 대기오염 측정소에서 납 등 중금속 성분의 미세먼지 중 농도를 측정하고 있다(환경부와 국립환경연구원, 2001). 그러나 다른 나라의 경우도 마찬가지지만 아직 많은 자료가 부족하고 문제가 되는 성분일수록 자료가 취약하며, 국내 배출 대비 중국 등 다른 나라로부터 이동의 영향을 추정할 수 있는 단계는 더욱 아니다. 본 논문에서는 미량독성 유해물질에 대한 국내 연구기반 확충을 위하여, 국내외 문헌을 토대로 POPs와 중금속 등 미량독성 유해물질의 특성을 살펴보고, 대기 중 농도와 배출 등 현황을 알아보았다.

2. 특 성

2.1 잔류성 유기오염물질

POP는 잔류성이 강한 난분해성, 반휘발성의 독성물질로, 생물체의 지방 조직에 축적되는 특징이 있다. UNECE (United Nations Economic Commissions for Europe)가 POPs를 판정하는 구체적 기준은 다음과 같다(Wueter, 2000).

- (1) 증기압이 1,000 Pa (7.5 mmHg) 이하이고 대기 중의 반감기가 2일 이상이어서 장거리 이동이 용이하여 이들 물질이 전혀 사용되지 않는 청정지역에서도 발견된다.
- (2) 인체 건강이나 환경에 독성을 지니고 있다.
- (3) 반감기가 물 속에서 2달 이상, 토양이나 퇴적물 속에서 6달 이상으로 잔류성이 강하다.
- (4) 생체 축적 혹은 농축도가 5,000 이상이거나 n-octanol/water 분배계수 (K_{ow})가 10^5 이상이다.

POP는 화학적 조성을 기준으로 크게 다환방향족 탄화수소(PAHs)와 할로겐화 탄화수소로 구분할 수 있다. 할로겐화 탄화수소 중에서는 특히 염소화합물들이 잔류성이 강할 뿐 아니라 물에 대한 용해도가 낮고 지방에 친화력이 커 생체 농축이 용이하다. 표 1의 스톡홀름 협약 대상 12개 화학물질은 다이옥신/퓨란이 1-8, PCBs가 1-10까지 염소를 포함하며, 나머지 물질도 5개(DDT)부터 12개(mirex)까지 염소를 함유하고 있다. 표 2는 스톡홀름 협약 대상 POPs의 물리·화학적 특성들이다. 분자량이 대략 200~500 사이이며 다환구조이다. 분자량 200이

Table 2. Properties of persistent organic pollutants listed in the Stockholm Convention^a.

Chemical (CAS number)	Appearance	Molecular weight	Vapor pressure (mmHg, 20°C)	Octanol/water partition coefficient (log K_{ow})	Water solubility ($\mu\text{g/L}$, 25°C)	Carcinogenicity class ^b	Remarks ^{a,c}
Aldrin (309-00-2)	White, odorless crystals when pure; technical grades are tan to dark brown with a mild chemical odor	364.92	2.31×10^{-5}	5.17~7.4	17~180	3	Undergoes photolysis and is readily metabolized by both plants and animals to dieldrin
Chlordane (57-74-9)	Colorless to yellowish -brown viscous liquid with an aromatic, pungent odor similar to chlorine	409.78	10^{-6}	6.0	56	2B with heptachlor	Primarily in the gas phase; small amount bound to particles
DDT (50-29-3)	Odorless to slightly fragrant colourless crystals or white powder	354.49	$5.5 \times 10^{-6,d}$	4.89-6.91	1.2~5.5	2B	Normally found associated with DDD and DDE, which are breakdown products of DDT, but are more persistent
Dieldrin (60-57-1)	White crystals or pale tan flakes, odorless to mild chemical odor	380.91	1.78×10^{-7}	3.69-6.2	140 (20°C)	3	A stereo-isomer of endrin
Dioxins/ Furans ^e	Colorless solids or crystals ^f	218.5~460.0 (322.0)	$5.6 \times 10^{-4} \sim 7.1 \times 10^{-9}$ ($2.13 \times 10^{-8} \sim 2.06 \times 10^{-6}$)	4.75~8.20 (6.60~7.10)	$417 \sim 7.4 \times 10^{-5}$ (0.0193~0.55)	1 for 2,3,7,8-TCDD; 3 for others	75 PCDD and 135 PCDF substituted forms (congeners) for a total of 210. The more chlorinated congeners are more lipophilic and less soluble in water. Most of the highly chlorinated (TCDD/Fs and above), less volatile PCDD/Fs are associated with the particulate phase.
Endrin (72-20-8)	White, odorless, crystalline solid when pure; light tan colour with faint chemical odor for technical grade	380.92	7×10^{-7} (25°C)	3.209~5.339	220~260	3	-

Table 2. Continued.

Chemical (CAS number)	Appearance	Molecular weight	Vapor pressure (mmHg, 20°C)	Octanol/water partition coefficient (log K_{ow})	Water solubility ($\mu\text{g/L}$, 25°C)	Carcinogenicity class ^b	Remarks ^{c,d,e}
Hexachlorobenzene (118-74-1)	White monoclinic crystals or crystalline solid	284.78	1.089×10^{-5}	3.03 ~ 6.42	40 (20°C)	2B	Can exist in the vapor phase and in association with particulates. Degradation is very slow (estimated half-life with OH radical is 2.6 years)
Heptachlor (76-44-8)	White to light tan, waxy solid or crystals with a camphor-like odor	373.32	3×10^{-4}	4.40 ~ 5.5	180	3 by itself; 2B with chlordane	-
Mirex (2385-85-5)	White crystalline, odorless solid	545.5	3×10^{-7}	6.89	Insoluble	2B	Mainly in the particulate phase ^d
PCBs ^f (1336-36-3)	Either oily liquids or solids; colorless to light yellow; no known smell or taste. Some are volatile and may exist as a vapor in air. ^f	188.7 ~ 498.7	$1.88 \times 10^{-2} \sim 2.25 \times 10^{-7}$	4.3 ~ 8.26	5,500 ~ 10^{-3}	2A	209 chlorobiphenyl congeners. Less soluble, less volatile, and more strongly sorbed to soils and sediments with an increase in the degree of chlorination.
Toxaphene (8001-35-2)	Yellow, waxy solid with a chlorine/terpene-like odor	413.82	0.2 ~ 0.4 (25°C)	3.23 ~ 5.50	550 (20°C)	2B	A mixture of more than 175 chlorinated components. Greater than 90% in the gas phase.

^aRitter *et al.* (1995). Also refer to National Institute of Environmental Research (2000).

^bIARC (2002), 1 - human carcinogen, 2A - probable human carcinogen, 2B - possible human carcinogen, 3 - not classifiable due to insufficient or conflicting data

^cUSEPA (2000b).

^dUSEPA (1998).

^eProperties show the variation from monoCDD to octaCDD. The figures in the parentheses indicate the properties of tetraCDD. Temperature was not specified for water solubility and vapor pressure.

^fATSDR (2001b).

^gProperties show the variation from monoCB to decaCB. Temperature was not specified for water solubility and vapor pressure.

Table 4. Sources and behaviors of major heavy metals in air.

Substance (CAS number)	Specific gravity ^a	Anthropogenic emissions ^{a,b,c,d}	Forms and behavior in air ^e	Atmospheric transformation ^e
Mercury (7439-97-6)	13.6	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion of fossil fuel, particularly coal, and waste incineration • Chlorine-alkali industry and non-ferrous metal production • Used in batteries, thermometers, fluorescent lamps, and as a catalyst in oxidation of organic compounds 	<ul style="list-style-type: none"> • Over 95% is elemental mercury (Hg⁰) gas • About 5% is associated with particulates, which have a shorter residence time • Major transport mechanisms include outgassing from soils and surface waters, long-range transport, deposition, sorption to soils and sediments 	<ul style="list-style-type: none"> • Leaded gasoline on a global scale • Mining and metallurgical industries and trash incineration • Used in lead-acid batteries, ammunition, metal products (such as sheet lead, solder, some brass and bronze products and pipes), and in ceramic glazes
Cadmium (7440-38-2)	8.64	<ul style="list-style-type: none"> • Byproduct from the treatment of zinc, copper, lead, and iron ores • Fossil fuel combustion and waste incineration • Used in wide applications including alloys, pigments, metal coatings, batteries, and in the electronics industry 	<ul style="list-style-type: none"> • Have negligible vapor pressure and found only as solid particles • Cadmium emitted from combustion processes is usually associated with PM₁₀ and are subject to long-range transport • Larger cadmium containing particles are emitted from smelters and other sources 	<ul style="list-style-type: none"> • Inorganic salts generally relatively immobile in the particulate phase • A few compounds (acetate, nitrate, chloride, others) are fairly soluble in water and will be rapidly precipitated
Lead (7439-92-1)	11.3	<ul style="list-style-type: none"> • Leaded gasoline on a global scale • Mining and metallurgical industries and trash incineration • Used in lead-acid batteries, ammunition, metal products (such as sheet lead, solder, some brass and bronze products and pipes), and in ceramic glazes 	<ul style="list-style-type: none"> • Common cadmium compounds found in air (oxide, sulfate, chloride) are stable and not subject to photochemical reactions 	<ul style="list-style-type: none"> • Environmental transformations between oxidation states are rare and occur slowly

^aKorea Ministry of Environment (2001)
^bEnvironment Australia (2001)
^cAMAP (2001)
^dATSDR (2001b)
^eUSEPA (2000b)

따라 PBT 특성을 중심으로 이 둘을 비교하면 다음과 같다 (USEPA, 1999a).

(1) 잔류성-분자인 POPs는 궁극적으로 분해되지만 분해가 어려운데 반하여 기본이 원소인 금속 물질은 화합물의 형태가 바뀔 수는 있어도 분해될 수는 없다. 다시 말하면, 중금속이 잔류하지 않는 것은 아니나 잔류성 때문에 문제가 되는 것은 아니다.

(2) 생체 농축-이미 언급한 바와 같이 중금속은 유기물질과 달리 지방조직에 축적되지 않으므로 K_{ow}에 의한 생체 농축 판정은 보편적으로 가능하지 않다. 중금속이 생체에 축적되려면 우선 흡수가 쉬운 형태로 유리되어야 하므로 토양이나 수중이라면 pH가 낮고 중금속의 유리를 방해할 수 있는 유기물질의 농도가 낮다는 등의 조건이 필요하다. 즉, 중금속의 생체 농축은 POPs에서와 같이 선택적이기 보다는 주변 환경에 따라 가능할 수도, 아닐 수도 있다. 중금속 중에서는 메틸 수은이 일부 물고기에

선택적으로 흡수되는 등 생체 농축이 문제가 되고 있다 (USEPA, 2000a, b).

(3) 독성-POPs와 같이 중금속을 주목하게 된 것도 독성 때문으로 독성에 관한 한 두 물질은 동일하다.

3. 현 황

3.1 유기염소 살충제

스톡홀름 협약 대상 물질의 상당 부분을 차지하는 유기염소 살충제의 배출과 대기 중 농도는 사용 현황에 따라 물질별, 지역별 편차가 크다. 표 5는 최근 문헌에 보고된 지역별 대기 중 농도 측정 결과를 정리한 것이다. 1998년 덴마크 오후스의 UNECE POPs 의정서에 포함된 HCH 이성체의 하나인 린덴 (lindane, γ -HCH)은 다른 유기염소 살충제와 달리 북미와 유럽에서 현재 사용되는 물질이다. 미국 남

Table 5. Concentrations of organochlorine pesticides and PCBs in air for selected areas (pg/m³)^a.

Region, period, and averaging time ^b	US, the first half of 1990s ^c	US, 1996~1998		US, 1996~1997, monthly average	Central America, 1995~1996, seasonal average		Europe, 1999 (distant from local emission sources)	Arctic, 1993~1994	Southeast Africa, 1997~1998
Site	Shores of the Great Lakes	Shores of the Great Lakes	Chicago	Alabama	Inland city (near farmlands)	Coastal city (large urban center)			
Aldrin	— ^d	—	—	—	129, 1185	3.8, 3.7	—	—	257 ± 338
Chlordane ^e	21, 4.7	7.8~38 (0.81~2.7)	130 ± 13 (21 ± 2)	10~129	41, 66	78, 44	1.2	1.36~1.97	3.6 ± 2.8
DDT ^f	19, 3.6	2.9~31 (0.14~0.81)	71 ± 7 (9.2 ± 0.9)	0.2~91	890, 1194	724, 188	0.16~43	0.77~1.81	26 ± 31
Dieldrin	21, 2.7	8.4~19 (2.1~5.7)	130 ± 17 (29 ± 3)	6~170	341, 1208	30, 44	1.3	0.93~1.42	80 ± 80
Endrin	—	—	—	—	—	—	—	0.18~0.29	1.0 ± 1.1
Hexachloro-benzene	—	54~80	110 ± 6	—	—	—	5.9~88	41.8~56.7	11 ± 7.5
Heptachlor	1.6, 0.7	—	—	4~54	0.8, 3.3	1.2, 2.0	—	0.03~0.07	44 ± 66
Mirex	—	—	—	—	—	—	—	—	0.51 ± 0.44
PCBs	—	63~260	1800 ± 170	—	—	—	4.8~72	—	—
Toxaphene	40, 10	—	—	8~611	24, 45	33, 26	—	—	—
γ-Hexachloro-cyclohexane	23, 6.6	82~99 (0.58~1.2) ^g	130 ± 10 (1.0 ± 0.2) ^g	6~110	44, 63	36	4.0~64	9.76~13.2	35 ± 42
Source	Cortes <i>et al.</i> (1998)	Buehler <i>et al.</i> (2001)	Jantunen <i>et al.</i> (2000)	Alegria <i>et al.</i> (2000)	Berg <i>et al.</i> (2001)	Halsall <i>et al.</i> (1998)	Karlsson <i>et al.</i> (2000)		

^aSummer, winter; minimum-maximum; average ± standard deviation; vapor phase (particulate phase). When concentrations are not given by phases, they are total amounts except in Cortes *et al.* (1998) as mentioned in footnote b.

^bAveraging time is greater than a year when not specified.

^cConcentrations in the vapor phase. Taken from Alegria *et al.* (2000) who calculated concentrations by using relationships in Cortes *et al.* (1998).

^dData not available.

^eTotal of cis- and trans-. In case of Karlsson *et al.* (2000), maximum concentration was obtained by adding that of each isomer.

^fTotal of DDT isomers, DDD, and DDE

^gTotal of α- and γ-.

부는 1980년대 중반까지 사용된 독사펜과 클로텐이 토양으로부터 휘발됨에 따라 북미지역 대기 중 이들 물질의 지속적인 오염원이 되고 있다(Jantunen *et al.*, 2000). DDT, 엘드린/디엘드린은 불법 사용으로 말미암아 중앙아메리카 일부 지역에서 크게 높다. 반면 중앙 아메리카의 독사펜과 헵타클로의 농도는 오대호와 비슷하고, 클로텐은 미국 남부와 오대호의 중간 정도이다(Alegria *et al.*, 2000). 아프리카 남부 말라위에서는 헵타클로, 엘드린/디엘드린, 염화벤젠 등이 주기적으로 높아 이들 물질들이 규칙적으로 사용됨을 나타내고 있다(Karlsson *et al.*, 2000).

미국과 캐나다에서 린텐은 주로 종자 처리에 이

용된다. 미국 남부에서 린텐의 농도는 6월에 가장 높는데, 사용 시기와 기온이 높아 살포된 린텐이 토양으로부터 탈착되는 시기가 겹친 때문이다(Jantunen *et al.*, 2000). 오대호 지역의 살충제 농도는 대부분 과거 사용에 의한 잔류성이 중요하며, 또한 대기와 수중 농도가 평형을 이루고 있는 경우가 많다. 이에 따라 기온이 높을 때 토양이나 수면으로부터 휘발이 주요 배출원으로, 많은 논문이 대기 중 농도와 기온과의 상관성을 다루고 있다(Buehler *et al.*, 2001; Cortes *et al.*, 1998). 대기 중 농도와 기온의 상관성은 그 지역 내에서 휘발이 이루어질 때 큰 반면 휘발 후 장거리를 이동하거나 풍향에 따라 인근 지역에 영향을 미칠 때 약하다. 온대에서 휘발된 물

질의 장거리 이동이 주요 오염원인 북극의 대기 중 살충제 농도는 온대보다 기온과의 상관성이 작다 (Halsall *et al.*, 1998). 그러나 북극의 경우도 캐나다 지역의 HCH와 같이 인근의 사용으로부터 직접 영향을 받을 때에는 기온보다는 사용 시기에 농도가 높기 때문에 양상이 다르다.

유기염소 살충제의 대기 중 농도는 따라서 현재 사용 중이든, 사용이 금지되어 토양 등으로부터 휘발이 중요한 지역이든 겨울보다 따뜻한 계절에 농도가 높을 가능성이 크다. 그러나 표 5의 농지에 인접한 중앙아메리카 내륙 도시에서는 겨울에 농도가 높는데, (1) 연중 온도 차이가 거의 없어 겨울의 의미가 다르며, (2) 겨울이 우기이기 때문에 비로 인한 손실을 보전하기 위하여 사용량이 늘어나면서 나타난 현상이다 (Alegria *et al.*, 2000). 표 5의 Karlsson 등(2000)은 아프리카 남부 말라위 호수가 물의 순환이 느려 오염에 취약하기 때문에 주변 지역과 수중의 살충제 농도를 측정하였다. 일부 물질의 농도가 크게 높았음에도 수중 농도는 매우 낮았는데, 침적량이 많음에도 불구하고 온도가 높아 미생물에 의한 변환과 가스분해 등 수중 변환이 빠르기 때문이었다. 이에 따라 농도가 특별히 높은 헵타클로 정

도가 휘발될 뿐 침적이 활발하였으며, Karlsson 등(2000)은 열대가 유기염소 살충제의 배출원인 동시에 소모처가 될 수 있음을 주장하였다.

3.2 PCBs, 다이옥신/퓨란

대부분의 PCBs 생산은 1970년대 중단되었으나 변압기, 축전지 사용, 오염 토양이나 침전물로부터 휘발, 일부 연소 과정에서의 배출로 배출이 지속되고 있다. 표 5에서도 짐작할 수 있지만 대기 중 PCBs 농도는 도시에서 높고 도시에서 멀어질수록 낮아지는 경향을 보이고 있다. 북미와 유럽의 대기 중 PCBs 농도는 도시지역 500~10,000 pg/m³, 전원 지역 100~1500 pg/m³, 벽지 10~500 pg/m³ 정도이다 (ATSDR, 2001b). 유럽의 PCBs 배출은 지난 30년간 약 15배 감소하였으나 토양의 농도 감소는 1.6배에 불과하여 토양으로부터 휘발이 상당할 것임을 암시하고 있다 (MSC-E, 2002). 이에 따라 배출 형태가 다양한 시카고, 런던 등 도시지역에서도 휘발의 비중이 커서 여름에 농도가 높다 (Simcik *et al.*, 1998; Coleman *et al.*, 1997).

다이옥신/퓨란, 총칭하여 다이옥신과 PCBs는 동종체가 많고 모든 동종체가 동일한 독성을 지닌 것

Table 6. Concentrations of dioxins/furans in air for selected areas.

Country	Site, period ^a	Concentration (pg/m ³)	Concentration ^b (pg I-TEQ/m ³)	Source
Poland	Urban, 1995	60~1100	0.95~12	
Germany	Urban, 1985~1993	6.6~12	0.09~0.24	
	Rural, 1990	3.3	0.05	
Japan	Urban, 1996~1997	4.2~26.7	0.08~0.28	Lohmann and Jones (1998)
US	Urban, 1987~1996	6.2~26.6	0.08~0.25	
	Rural, 1986~1989	1.8~2.9	0.025~0.058	
Ireland	Remote, 1997	0.37~0.53	0.003~0.004	
Antarctica	Remote, 1992	0.005	- ^c	
Korea	Near the incinerator, 1999~2000	1.1~22 (8.2~63)	0.025~0.30 (0.20~1.1)	Oh <i>et al.</i> (2001) ^d
	Industrial area, 1999~2000	0.29~5.0 (1.3~6.8)	0.006~0.051 (0.028~0.15)	
	Seoul, 1998~1999	0.75~1.0	0.03~0.055	Kim <i>et al.</i> (2001)
Inchon, 1998~1999	1.5~3.6	0.14~0.29		

^aOnly starting and ending years are indicated when the measurements were intermittently made.

^bInternational toxic-equivalent concentration.

^cData not available.

^dConcentrations were given by phases; the first two values indicate the concentration range in the gas phase, while those in the parentheses indicate the concentration range in the particulate phase.

은 아니기 때문에 동종체별로 독성등가지수 (TEF, toxic equivalent factor)를 할당하여 이로써 독성등가 (TEQ, toxic equivalent) 농도를 산출하는 경우가 많다. 독성등가지수는 이들 중 가장 독성이 강한 2,3,7,8-TCDD (tetrachlorodibenzo-p-dioxin)를 기준으로 한다. 현재 많이 이용되는 독성등가지수는 보통 I-TEF로 표시되는, 1988년 NATO/CCMS (Committee on the Challenges of Modern Society)가 개발한 국제 시스템이다. I-TEQ로 표시된 독성등가 농도는 I-TEF에 근거하였음을 의미한다. 다이옥신과 구조가 비슷한 동일평면 (coplanar) PCBs 역시 다이옥신과 유사한 독성을 지니며 Safe (1990)는 I-TEF 목록에 이들을 포함하였다. PCBs 중에서는 PCB 126 (IUPAC, International Union of Pure and Applied Chemistry의 PCBs 동종체 고유번호)의 독성이 0.1로 가장 높고, PCB 169, PCB 77 등의 독성이 높다 (Silberhorn, 1995). 1998년 WHO는 2,3,7,8-TCDD와 함께 1,2,3,7,8-PeCDD의 독성등가지수를 1.0로 하는 새로운 등가지수 시스템을 발표하였다 (ATSDR, 2001b; Buckley-Golder *et al.*, 1999).

표 6은 지역별 다이옥신/퓨란의 대기 중 농도이다. 다이옥신의 대기 중 농도는 대략 벽지 (remote site)가 0.5 pg/m^3 미만, 전원지역이 $0.5 \sim 4 \text{ pg/m}^3$, 도시나 공업지역이 $10 \sim 100 \text{ pg/m}^3$ 으로 알려져 있다 (Lohmann and Jones, 1998). TEQ로 표시한 농도는 벽지 10 fg I-TEQ/m^3 미만, 전원지역 $20 \sim 50 \text{ fg I-TEQ/m}^3$, 도시/공업지역 $100 \sim 400 \text{ fg I-TEQ/m}^3$ 정도이다. 벽지에 비하여 도시/공업지역의 TEQ 농도가 무게 농도만큼 비례하여 높지 않은 것은 독성물질의 비중이 같지 않기 때문이다. 또한 2,3,7,8-TCDD는 거의 검출되지 않는 반면 많은 동종체의 독성등가지수는 1보다 월등 낮기 때문에 TEQ 농도는 무게 농도의 수 % 이하이다.

보통 다이옥신의 농도는 난방 등의 영향으로 겨울에 높으나 도시폐기물 소각, 금속 제련, 철강산업 등 계절변화가 크지 않은 오염원의 배출 비중의 큰 경우는 대기 중 농도 역시 계절변화가 두드러지지 않을 수 있다. 따뜻한 계절에는 대부분 저분자 성분이 기체로 존재하나 겨울에는 입자상 성분의 비중이 커진다 (ATSDR, 2001b). 입자상 다이옥신의 90% 이상이 $1 \mu\text{m}$ 이하의 입자에 존재하는데 비하여 저분자 성분은 배출된 부근에서 휘발되어 재배치됨에 따

라 주로 조대입자에 존재한다 (Lohmann and Jones, 1998). 기체상 PCDDs는 오존이나 NO_3 래디컬과는 거의 반응하지 않는 반면 OH 래디컬과 주로 반응하여 이의 영향이 클 때 기체상에는 퓨란의 비중이 커진다. 염소수 1~4개인 다이옥신/퓨란은 침적과 휘발을 반복하며 장거리를 이동하는 반면 고분자 성분은 주로 인근에 침적된다. 이에 따라 북극에서는 저분자 성분의 비중이 크고 특히 저분자 퓨란의 농도가 높다 (Lohmann and Jones, 1998).

3.3 다환방향족 탄화수소

PCBs나 다이옥신과 같이 동종체가 많은 물질은 총량의 개념이 모호한 경우가 많다. 다이옥신은 독성이 있는 TCDD/Fs부터 OCDD/Fs까지를 분석하는 것이 보통이며 (Lohmann and Jones, 1998) 표 6의 총량도 이들의 합이다. 그러나 PCBs만 하여도 나라마다 연구자마다 분석 성분이 다르다. 네덜란드는 독성이 큰 77, 126, 169 등 3종의 PCB만을 분석하며, 스웨덴은 5, 영국은 54종의 PCB를 분석한다 (Buckley-Golder *et al.*, 1999). Simcik *et al.* (1998)은 80종, Buehler *et al.* (2001)은 100종을 분석한 반면 Coleman *et al.* (1997)은 7종을 분석하였다. PAHs의 경우 미국 EPA는 Method 610 (polynuclear aromatic hydrocarbons)에서 Nap부터 DBaH까지 16종을 분석하였으며 이를 개정한 TO-13A에서는 표 3의 19종을 분석하였다 (USEPA, 1999b). 백성욱 (1999)은 18개 성분을 제시하였으나 성분 구성은 표 3과 약간 다르다.

PAHs 농도는 도시지역에서 높으며, 난방의 영향으로 겨울에 높다. 표 7은 지역별 주요 PAH 성분의 대기 중 농도이다. Simoneit *et al.* (1991)은 북경과 귀양, 광주 등 1980년대 말 중국 도시의 PAHs 총량이 $30 \sim 490 \text{ ng/m}^3$ 으로 다른 도시보다 월등하게 높다고 보고하였으나 이 중에는 산화물의 비중이 상당하여 표 7의 성분만으로는 높은 수준이 아니다. 중국, 홍콩, 우리나라의 농도가 입자상만의 농도인데 비하여 미국, 영국 등의 농도는 총량이어서 직접 비교가 쉽지 않다. Baek and Perry (1996)에 의하면 여름에는 고리 수 5인 BbF부터, 겨울에는 고리 수 4인 성분 중 BaA, Chry부터 입자상 농도의 비중이 75% 이상 월등 높다. ATSDR (2001b)은 PAHs 성분을 분자량에 따라 저분자, 중분자, 고분자 성분으로

Table 7. Concentrations of common PAHs in air for selected areas (ng/m³).

Region, period	China, 1986~1988 (particulate) ^a		Hong Kong, winter 1993 (particulate)		US, 1994~1995		UK, 1991~1995		Korea, spring-fall 1996 (particulate) ^{a,c}	
	Beijing (suburban- urban)	Cities using coal	Rural-urban	Chicago	Lake Michigan	London, Manchester	London, Manchester	Arctic, 1992 (summer- winter) ^b	Metropolitan areas	Industrial areas
Acenaphthene (3) ^d	- ^e	-	-	-	-	0.4~4.7	-	-	-	-
Fluorene (3)	-	-	-	7.8~18	2.1~8.2	25~90	0.016~0.59	-	-	-
Anthracene (3)	0.002~0.33	0.063~0.11	0.043~1.8	3.2~11	0.14~0.7	4.5~12	-	-	-	-
Phenanthrene (3)	0.002~1.1	0~0.063	0.02~1.3	21~98	4.0~18	21~74	0.028~0.21	0.08~0.72	0.05~0.67	-
Fluoranthene (4)	0.14~0.23	0.91~0.95	0.17~2.8	13~28	1.1~5.1	-	-	0.26~3.2	0.21~2.5	-
Pyrene (4)	0.002~0.58	0.38~0.54	0.15~2.6	10~16	0.47~3.1	0.4~2.5	0.0067~0.11	0.63~4.1	0.52~3.4	-
Benz(a)anthracene (4)	-	-	0.027~1.1	1.8~5.2	0.05~0.5	0.5~3.5	-	1.1~6.0	0.64~6.7	-
Chrysene (4)	0.18~1.0	2.2~2.6	0.12~3.2	2.0~6.0	0.05~1.4	0.5~3.5	0.0004~0.062	0.95~6.2	0.17~7.9	-
Benzo(b)fluoranthene (5)	-	-	0.2~7.8	2.8~12	0.09~1.2	0.9~2.8	-	0.69~3.4	0.18~4.8	-
Benzo(k)fluoranthene (5)	-	-	-	-	-	-	-	1.2~7.0	0.15~9.9	-
Perylene (5)	-	0.095~0.20	0.064~2.1	-	-	-	0.0002~0.019	1.4~2.8	1.4~2.7	-
Benzo(a)pyrene (5)	0.005~0.083	0.82~1.3	0.033~1.1	0.5~1.5	0.07~0.3	0.3~1.8	0.001~0.020	2.6~12	1.7~15	-
Benzo(e)pyrene (5)	0.016~0.65	1.4~2.4	0.12~2.9	1.2~7.4	0.07~0.5	-	0.0013~0.020	0.66~3.6	0.19~4.9	-
Benzo(ghi)perylene (6)	0.004~0.33	1.3~3.2	0.19~4.7	0.7~2.7	0.24~1.2	0.7~5.4	-	1.0~4.3	0.44~7.6	-
Indeno(1,2,3-cd)pyrene (6)	0.022~0.32	1.3~2.0	0.064~4.0	-	-	-	-	0.88~4.9	0.31~7.5	-
Dibenz(ah)anthracene (5)	-	-	-	-	-	-	-	0.34~1.1	0.26~1.1	-
Coronene (7)	0.002~0.28	0.44~1.4	0.21~1.1	-	-	-	-	0.51~3.3	0.18~4.6	-
Source	Simoneit <i>et al.</i> (1991)		Zheng <i>et al.</i> (1997)	Simcik <i>et al.</i> (1998)	Coleman <i>et al.</i> (1997)	Fellin <i>et al.</i> (1997)	Chung <i>et al.</i> (1997)			

^aOnly concentrations in the particulate phase are given; otherwise, total concentrations of gas and particulate phases are given.

^bSummer means May to September; winter means October to April.

^cMetropolitan areas include Seoul, Incheon, Gwangju, Daejeon, and Busan; industrial areas Hanam complex in Gwangju, Yecheon petrochemical complex, and Gamjeon-dong (Sasang complex) in Busan.

^dNumber of rings

^eData not available.

분류하고 있는데, Baek and Perry (1996)에서 겨울에 입자상 비중이 높은 성분은 분자량 228 이상 고분자 성분이다. 백성욱과 최진수(1998)가 1995년 1월부터 1996년 3월까지 영남대학교에서 측정한 기체상 분율이 큰 acenaphthene부터 pyrene까지 총량(입자상 농도)은 평균 57.6 (0.02), 21.3 (0.06), 33.0 (1.4), 3.2 (0.41), 6.3 (1.5), 4.8 (1.6) ng/m³으로, 국지 배출의 영향이 크지 않은 대학 구내임에도 표 7의 미국, 영국 도시들에 비하여 낮지 않다.

PAHs는 주로 고정 연소시설에서 배출되는 것으로 알려져 있으나 지역마다 다르다. 파리는 차량 배출 비중이 큰 반면 시카고는 차량과 함께 석탄 연소, 코크 오븐의 비중도 크다 (Simcik *et al.*, 1999). Coleman *et al.* (1997)은 차량 이용이 증가함에도 불구하고 런던, 맨체스터의 PAHs 농도가 매년 30%씩 감소하는 것은 난방에서 화석연료 이용이 줄어든 때문으로 해석하였다.

PAHs 성분들이 배출원마다 다른 특성을 이용하여 배출원을 파악하기 위한 시도가 국내외에서 활발하다 (Zheng *et al.*, 2000; Simcik *et al.*, 1999; 조기철 등, 1994, 1996; 구자공과 서영화, 1992). 그러나 ATSDR (2001b)의 조사에서 볼 수 있는 것과 같이 기체상 물질과 입자상 물질에 따라 성분 분포가 다르고, 기

본적으로 모두 연소 과정에서 배출되기 때문에 중복되는 부분이 많아 일률적 구분은 쉽지 않다. 가장 보편적으로 이용되는 사실은 차량 배출의 영향이 클 때 BghiP의 농도가 높다는 것이다. 반면 석탄 연소에서는 BghiP의 농도가 비교적 낮다 (Baek *et al.*, 1991). 이에 따라 입자 중 BaP/BghiP의 비가 0.3~0.8일 때는 차량 배출이, 0.9~6.6일 때는 석탄 연소의 비중이 큰 것으로 해석된다 (Simcik *et al.*, 1999). 입자 중 BaA/Chry의 비가 0.17~0.36일 때는 경유차가, 0.28~1.2일 때는 휘발유차 비중이 크며 (Simcik *et al.*, 1999), Ind/BghiP의 비가 약 0.4면 휘발유차가, 1에 근접하면 경유차 비중이 큰 것으로 보고 있다 (Caricchia *et al.*, 1999). BeP가 광화학적으로 안정된데 비하여 BaP는 분해가 쉽다는 점에서 BeP/BaP 비는 공기피가 얼마나 오래되었는가를 판정하는 수단으로 많이 이용된다 (Zheng *et al.*, 2000; Panther *et al.*, 1999; Simoneit *et al.*, 1991).

3. 4 중금속

표 8은 주요 중금속 성분의 PM₁₀ 입자 중 농도이다. 미국의 경우 시카고의 중금속 농도가 미시간 호 주변 전원지역의 농도보다 높고 유럽의 중금속 농도 역시 대략 이와 비슷하다. 그러나 중국 도시지역

Table 8. Concentrations of heavy metals in air for selected areas (PM₁₀, ng/m³).

Region, period (averaging time)	US, July 1991 (monthly average)		Europe, 1999 (distant from local emission sources) (annual average)	China, October 1990 or 1991 (monthly average) ^a			Korea, spring-fall 1996 (monthly average) ^b	Korea, 2000 (annual average)	Korea, 1993 (annual average)
	Chicago	Rural area in the side of Lake Michigan		Urban areas	Metropolitan areas	Industrial areas			
Mercury (Hg)	0.35	0.04	0.53~2.0	— ^c	—	—	—	—	
Cadmium (Cd)	3.2	3.1	0.02~4.8	—	0.6~28	0.6~17	0~17	0.74	
Lead (Pb)	25	6.4	0.48~23	120~570	3.3~3300	9.4~2300	17~178	49	
Copper (Cu)	20	5.9	0.13~24	100~800	3.3~410	3.3~320	27~830	5.7	
Zinc (Zn)	61	21	0.69~110	250~3900	10~2300	13~1600	—	35	
Arsenic (As)	0.89	0.62	0.08~1.1	13~85	1.1~38	0.6~23	—	—	
Chromium (Cr)	1.8	1.5	0.07~7.2	17~48	8.3~350	8.8~700	0.1~44	—	
Nickel (Ni)	—	—	0.07~13	12~30	18~350	18~380	0.4~31	2.3	
Source	Pirrone and Keeler (1997)		Berg <i>et al.</i> (2001)	Hashimoto <i>et al.</i> (1994)	Chung <i>et al.</i> (1997)		KME and NIER (2001)	Choi <i>et al.</i> (1995)	

^aTSP. Five cities including Beijing. Measurements were made in October 1990 in Beijing and in October 1991 in other cities.

^bMetropolitan areas include Seoul, Incheon, Gwangju, Daejeon, and Busan; industrial areas Hanam complex in Gwangju, Yecheon petrochemical complex, and Gamjeon-dong (Sasang complex) in Busan.

^cData not available.

의 중금속 농도는 이들보다 자리수가 하나 혹은 둘 이상 높고 우리나라의 농도도 크게 다르지 않다. 심지어 소백산에서 측정된 납의 배경농도가 대도시인 시카고보다 높다. 1990년대 초 대구지역을 측정된 백성옥과 황승만(1992)과 1990년대 중반 청주지역을 측정된 강병옥 등(1997)의 측정 결과도 정용 등(1997)의 최고값과 같이 높지는 않으나 환경부와 국립환경연구원(2001)의 중금속 측정망의 결과와 유사하게 미국, 유럽보다 높다.

정용 등(1997)에 의하면 대도시 중에서는 서울 전농동(Cd, Pb, Cu, Zn)과 공업지역 중에서는 여천공단(Pb, Cu, Cr, Ni)에서 주로 중금속 농도가 높은 반면 광주는 도시지역과 하남공단 모두 많은 성분의 농도가 낮았다. Hashimoto *et al.* (1994)은 1980년대 말 무연휘발유의 보급과 석탄 사용의 감소로 1987년부터 1991년까지 서울지역 연평균 납 농도는 440에서 330 ng/m³으로, 비소는 70에서 50 ng/m³으로 감소하였음을 보고하고 있는데, 연평균임에도 비소는 정용 등(1997)의 최고값보다 높고 납은 최고값보다는 낮으나 높은 수준이다. Arimoto *et al.* (1997)은 아시아/태평양 연안의 Zn, Pb, V 등의 침적량이 유럽이나 북미 연안에 비하여 몇 배, 물질에 따라서는 몇 십배까지 많음을 지적하고 있다.

유럽에서는 1990년대 납의 인위적 배출이 60% 감소하였으나 1995년 이후는 감소 추세가 둔화되고 있다. 1990년대 수은 배출은 50%, 카드뮴 배출은 40% 감소하였으며 1999년 현재 자연적 배출 비중은 수은 45%, 카드뮴 58%, 납 36%로 추정하고 있다(MSC-E, 2002). 차량 이용이 주요 원인인 납의 배출 분포가 비교적 균일한데 비하여 카드뮴은 비금속 야금, 연료 사용 지역에서, 수은은 석탄 사용 지역에서 배출이 많다. 그러나 농도 분포는 수은이 납이나 카드뮴보다 변화가 작다. 납, 카드뮴이 주로 1 μm 이하 미세입자와 함께 배출되는데 비하여 수은은 토양이나 지표수로부터 재배출을 포함하여 90% 이상으로 원소 형태로 배출된다(MSC-E, 2002).

미국에서는 1970, 80년대 전지, 페인트 등에 수은 사용이 크게 줄면서 이들 소각의 비중이 큰 소각 관련 배출도 감소하였으나 1990년대 들어서는 이와 같은 추세가 둔화되었다(USEPA, 2000a). 납은 무연휘발유 사용이 줄면서 1970년대 이래 배출과 대기 중 농도가 모두 감소하였다. 이에 따라 1982년에는

납의 약 80%가 무연휘발유 사용으로부터 배출되었으나 1993년 오대호 지역에서는 제철, 폐기물 처리, 비철금속 생산, 석탄 연소 과정의 배출이 96%를 차지하였다(Pirrone and Keeler, 1996). 뉴욕에서는 무연휘발유 이후 도시폐기물 소각이 가장 중요한 배출원으로 부각되었다. 수은, 납과 달리 오대호 지역의 카드뮴 배출은 1980년대 매년 5%씩 증가하였고 1988년 최고를 기록한 후 추세가 분명치 않다(Pirrone and Keeler, 1996).

3.5 수 은

대부분의 배출이 원소 수은 형태로 이루어지는 만큼 대기 중 수은 역시 기체상 수은의 비율이 압도적으로 높다. 이에 따라 표 9에서는 기체상 수은 측정 결과를 중심으로 지역별 농도를 조사하였다. 독일 남부에서는 매년 7%씩 수은 농도가 감소하여 1990년부터 6년 동안 45%가 감소하였는데 자연적 배출이 큰 변화가 없다고 가정할 경우 이만한 큰 폭의 감소를 설명하기는 쉽지 않았다. Stelmr and Scheel (1998)은 동구권에서 후처리 시설이 없었던 화력발전소가 폐쇄되고 석탄으로부터 기름이나 가스로 난방 연료가 교체되었으나 1990년대 석탄 사용이 큰 변화가 없는 상황에서, 무엇보다 수은 사용이나 폐기물 소각으로부터 배출이 현재 추정보다 월등 많아 이 부분의 배출이 줄면서 대기 중 농도가 감소하였을 것으로 추정하였다. 그러나 우리나라에서는 가장 중요한 배출원인 무연탄 사용이 사라지면서 대기 중 수은 농도는 더욱 급격히 감소하였다. Kim and Kim (2002)은 현재 중국의 공업지역의 농도가 1980년대 말 서울과 비슷한 반면 1990년대 말 현재 우리나라의 농도는 5 ng/m³ 부근으로 북미나 유럽보다 여전히 높음을 지적하고 있다.

기체상 수은은 반응성이 크지 않기 때문에 지역 편차가 크지 않다. 그러나 그렇다고 보전되는 성분은 아니며, 표 4에 나타난 바와 같이 오존과 반응하여 이온화함으로써 침적될 수 있다(Ames *et al.*, 1998). 이에 따라 기체상 수은 농도는 오존과 반비례하는 것이 보통이다. 김민영과 김기현(2001)은 지리산의 수은 농도가 서울보다 높고 오존과 양의 상관관계에 있다고 보고하였으나 이례적인 경우이다. 반면 SO₂는 오존과 원소 수은과의 반응을 방해하거나 역전시킬 수 있어 정비례 관계에 있다

Table 9. Concentrations of mercury in air for selected areas (ng/m³).

Country	Site, period ^a	Gas	Particulate	Source
US	Near Lake Champlain in northern Vermont, 1993	1.2~4.2	0.001~0.043	Scherbatskoy <i>et al.</i> (1997)
	Near Lake Ontario in New York, 1991~1994	2.5	0.087	
Nordic countries		2.5~2.8	0.06	Ames <i>et al.</i> (1998)
Open ocean		1.0~1.8	0.003	
Germany	Summit of the Wank mountain in the Bavarian Alps, 1990~1996	For 7 years, annual mean decreases 3.0→1.8, and maximum decreases 8.0→3.8	- ^b	Slemr and Scheel (1998)
Korea	Hannam in Seoul, 1987~2000	For 13 years, annual mean decreases 15→5.3,	-	Kim and Kim (2002)
	Seoul, 1998	5.3~7.6	-	
	Mts. Odae and Jiri, 1997~1998	5.4~8.6	-	Kim and Kim (2001)

^aOnly starting and ending years are indicated when the measurements were intermittently made.

^bData not available.

(Ames *et al.*, 1998). 김민영과 김기현 (2001), Kim and Kim (2002) 역시 SO₂ 농도와 수은 농도가 양의 상관관계에 있음을 관찰하였으나, 미세먼지, CO 등과 함께 오염원을 공유함으로써 나타난 현상으로 해석하고 있다.

입자상 수은이 오염원의 영향이나 저온 응축 등으로 겨울에 농도가 높다. 그러나 기체상 수은은 계절 변화가 상대적으로 작거나 (Scherbatskoy *et al.*, 1997), 겨울에 농도가 높다. 기체상 수은이 겨울에 높은 것은 오존과의 반응과 침적 등의 영향으로 여름에 농도가 낮아진 때문일 수 있다 (Slemr and Scheel, 1998). Kim and Kim (2002)은 무연탄 사용이 주요 배출원이었던 1980년대 말에는 겨울에 높았으나 압도적 배출원이 사라진 1990년대 말에는 계절 변화가 명확하지 않았다. Ames *et al.* (1998)은 인근의 배출원 위치와 풍향 변화에 의해서도 계절별 농도 변화가 나타날 수 있음을 지적하였다.

4. 맺음 말

잔류성 유기오염물질과 중금속 등 미량독성 유해물질에 주목하는 1차적 원인은 위해성 때문이다. m³ 당 pg이나 ng을 넘지 않는 미량의 물질이 오랫동안

동안 잔류하면서 축적됨에 따라 이들의 위해성에 주목하게 된 것이다. 그러나 강한 잔류성으로 인한 장거리 이동과 오염의 광역성은 지구환경과 지역규모 환경 보전의 중요성을 다시 한번 일깨우는 계기가 되고 있다. 우리나라는 특히 산업화와 도시화가 빠르게 진행되며 이들 오염물질 배출의 가능성이 아직 충분한 중국에 인접하여 있다. 유기염소 농약 등 잔류성 유기오염물질은 아직 측정이 충분치 않아 단언할 수 없으나 수은 등 중금속 농도가 북미나 유럽에 비하여 높은 원인으로서는 아직 석탄 사용이 많은 중국의 영향을 포함하여 다각적 검토가 필요하다.

대기환경 연구 관점에서 미량독성 유해물질 연구는 다양한 특성을 지닌 많은 물질을 대상으로 함으로써 환경기준 물질이나 통상적인 미세먼지 조성 분석에서와는 또 다른 많은 유익한 정보가 가능하다. 가스상에서 입자상에 걸친 PAHs 성분들은 1, 2차 오염으로 밀접하게 연관된 휘발성 유기화합물과 미세먼지 변환을 연결짓는 고리가 될 수 있고, 배출원에 따라 특징적인 PAHs 성분 분포는 반응성이 상대적으로 작기 때문에 오염원 추적에 유용할 수 있다. BaP/BeP와 함께, 본문에서 직접 언급하지는 않았지만 α/γ-HCH, trans/cis-클로덴 들은 배출원이 유사함에도 반응성이 달라 공기과의 체류 시간을

판정하는 기준이 될 수 있다(Halsall *et al.*, 1998). 배출원에 따른 다이옥신/퓨란의 동종체들의 분포 역시 오염원 추적에 이용될 수 있으며(Vulykh and Shatalov, 2001), 동종체 간의 반응성 차이로부터 대기 중 전환 과정을 추정할 수 있다.

미량독성 유해물질에 대한 관심은 유럽과 미국에서 최근 십여년간 특히 활발한 다매체, 복합오염 연구의 출발점이 될 수 있다(Thompson, 2001). 이는 미량독성 유해물질이 주로 대기 중에서 이동하기는 하나 대부분의 양이 수중이나 토양에 분포되어 있어 저장이라는 측면에서 대기의 역할은 오히려 매우 제한적이기 때문이다. 이에 따라 미국에서는 본 논문의 미량독성 유해물질에 해당하는 PBT 물질 대책에서 대기, 수질, 토양 등 매체와 지역규모 대응을 위한 국제 협력을 강조하고 있으며(USEPA, 2000c), PBT 물질에 관하여 실질적으로 연구가 가장 많이 이루어진 분야의 하나가 대기에서 수체(water-body)로의 이동을 다룬 침적 분야이다(USEPA, 2000a).

UNECE는 1998년 덴마크 오후스에서의 POPs와 중금속에 관한 의정서에 이어 장거리 이동 대기오염 협약의 일환으로 1999년 스웨덴의 예테보리(Gothenburg)에서 산성화, 부영양화 그리고 지표 오존 저감을 위한 의정서를 체결하였다(UNECE, 1999). 산성비, 광화학 오염 등 익숙한 오염현상에 대하여서도 매체간, 오염물질간 구분에 기초한 대응 대신 통합관리의 움직임이 빠르게 자리잡고 있다.

감사의 글

본 연구는 과제번호 2001-44001-8인 환경부 차세대핵심환경기술개발사업과 한국과학기술연구원 자체 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원하여 주신 관계자 여러분과 자료 수집과 정리를 도와준 김영주, 임은정 연구원께 감사드립니다.

참고 문헌

- 강병욱, 이학성, 김희강(1997) PIXE를 이용한 청주지역 미세입자 중 원소의 계절 변동 특성. 한국대기보전학회지, 13, 307-317.
- 구자공, 서영화(1992) 도시 대기오염물중 다환방향족 탄화수소의 배출원 규명을 위한 화학물질 수치모델의 적용. 한국대기보전학회지, 8, 229-239.
- 국립환경연구원(2000) POPs 물질의 물리화학적 성질 및 독성, URL <http://nier.go.kr/>(2002년 1월 접속).
- 김민영, 김기현(2001) 대기 중 수은의 지역적 분포특성에 대한 비교 연구. 한국대기환경학회지, 17, 39-50.
- 김영성, 김영주, 김진영(2001) 1999년 기류의 이동패턴에 따른 우리 나라 주요 도시의 일산화탄소 농도 변화. 한국대기환경학회지, 17, 451-461.
- 백성욱(1999) 대기 중 다환방향족 탄화수소 - 환경학적 고찰. 한국대기환경학회지, 15, 525-544.
- 백성욱, 황승만(1992) 주성분/중회귀분석을 이용한 대구지역 대기 중 부유분진의 발생원별 특성평가. 한국대기보전학회지, 8, 179-190.
- 백성욱, 최진수(1998) 대기 중 다환방향족 탄화수소의 기체-입자상 농도분포에 미치는 주변 온도의 영향. 한국대기보전학회지, 14, 117-131.
- 안연순(2001) 잔류성 유기오염물질(POP)의 관리를 위한 스톡홀름 협약의 주요 내용, 21C환경정책연구, 제5호.
- 정 용, 김신도, 박종세, 김윤신(연구책임자)(1997) 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리 기술, 9-6-1, 제2단계 1차년도 연차보고서, 연세대학교 환경공해연구소, 환경부.
- 정 용, 김신도, 김명수, 김윤신(연구책임자)(1999) 대기오염물질의 위해성 평가 및 관리 기술, 제2단계 3차년도 연차보고서, 연세대학교 환경공해연구소, 환경부.
- 조기철, 이승일, 김달호, 허귀석, 김희강(1994) 도시 대기 부유분진 중 다환방향족 탄화수소의 농도 및 입경분포 특성. 한국대기보전학회지, 10, 57-63.
- 조기철, 황경철, 임철수, 조강래, 김희강(1996) 서울시 도로 퇴적토사 중 PAHs의 농도 및 분포. 한국대기보전학회지, 12, 517-521.
- 최만식, 이선기, 최재천, 이민영(1995) 소백산 대기 중 입자상 물질의 화학적 특성에 관한 연구(II) 급속원소의 계절적인 변화와 기원을 중심으로. 한국대기보전학회지, 11, 191-198.
- 환경부, 국립환경연구원(2001) 대기환경연보(2000).
- 환경부(2001) DB-환경자료실-환경상식-환경위해성 분야, URL <http://www.me.go.kr/www/index.html>(2001년 12월 접속).
- Alegria, H.A., T.F. Bidleman, and T.J. Shaw(2000) Organochlorine pesticides in ambient air of Belize, Central America, Environ. Sci. Technol., 34, 1953-1958.

- AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) (2001) Persistent organic pollutants URL <http://www.amap.no/assess/soaer6.htm>; Heavy metals URL <http://www.amap.no/assess/soaer7.htm> (accessed in December 2001).
- Ames, M., G. Gullu, and I. Olmez (1998) Atmospheric mercury in the vapor phase, and in fine and coarse particulate matter at Perch river, New York, *Atmospheric Environment*, 32, 865–872.
- Arimoto, R., Y. Gao, M.-Y. Zhou, D.S. Lee, L. Chen, D. Gu, Z. Wang, and X. Zhang (1997) Atmospheric deposition of trace elements to the Western Pacific basin, In *Atmospheric Deposition of Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*, Edited by J.E. Baker, SETAC Technical Publications Series, SETAC, Pensacola, Flor., Chap. 11.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2001a) Top 20 Hazardous Substances from the CERCLA Priority List of Hazardous Substances for 2001, URL <http://www.atsdr.cdc.gov/cxcx3.html> (accessed in February 2002).
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) (2001b) Toxicological Profile Information Sheet, URL <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/> (accessed in May 2002).
- Baek, S.O. and R. Perry (1996) Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere, *Environ. Eng. Res.*, 1, 43–54.
- Baek, S.O., R.A. Field, M.E. Goldstone, P.W. Kirk, J.N. Lester, and R. Perry (1991) A review of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, fate and behavior, *Water, Air, and Soil Pollution*, 60, 279–300.
- Berg, T., A.-G. Hjelbrekke, and R. Larsen (2001) Heavy metals and POPs within the EMEP region, 1999, EMEP/CCC-Report 9/2001, Norwegian Institute for Air Research, URL <http://www.nilu.no/projects/ccc/reports/cccr9-2001.pdf> (accessed in February 2002).
- Buckley-Golder, D., P. Coleman, M. Davies, K. King, A. Petersen, J. Watterson, M. Woodfield, H. Fiedler, and A. Hanberg (1999) Compilation of EU Dioxin Exposure and Health Data, European Commission DG Environment and UK Department of the Environment, Transport and the Regions, URL <http://europa.eu.int/comm/environment/dioxin/download.htm> (accessed in May 2002).
- Buehler, S.S., I. Basu, and R.A. Hites (2001) A comparison of PAH, PCB, and pesticide concentrations in air at two rural sites on Lake Superior, *Environ. Sci. Technol.*, 35, 2417–2422.
- CARB (California Air Resources Board) (1997) Polycyclic organic matter, URL <http://www.arb.ca.gov/toxics/tac/factshts/pom.pdf> (accessed in January, 2002).
- Caricchia, A.M., S. Chiavarini, and M. Pezza (1999) Polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmospheric particulate matter in the city of Naples (Italy), *Atmospheric Environment*, 33, 3731–3758.
- Coleman, P.J., R.G.M. Lee, R.E. Alcock, and K.C. Jones (1997) Observations on PAH, PCB, and PCDD/F trends in U.K. urban air, 1991–1995, *Environ. Sci. Technol.*, 31, 2120–2124.
- Cortes, D.R., I. Basu, C.W. Sweet, K.A. Brice, R.M. Hoff, and R.A. Hites (1998) Temporal trends in gas-phase concentrations of chlorinated pesticides measured at the shores of the Great Lakes, *Environ. Sci. Technol.*, 32, 1920–1927.
- Environment Australia (2001) State of Knowledge Report: Air Toxics and Indoor Air Quality in Australia 2001, URL <http://www.ea.gov.au/atmosphere/-airtoxics/sok/profiles/> (accessed in February 2002).
- Fellin, P., L.A. Barrie, and D. Muir (1997) Monitoring of selected organochlorine and polycyclic hydrocarbon compounds in Arctic air, In *Atmospheric Deposition of Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*, Edited by J.E. Baker, SETAC Technical Publications Series, SETAC, Pensacola, Flor., Chap. 14.
- Halsall, C.J., R. Bailey, G.A. Stern, L.A. Barrie, P. Fellin, D.C.G. Muir, B. Rosenberg, F.Ya. Rovinsky, E.Ya. Kononov, and B. Pastukhov (1998) Multi-year observations of organohalogen pesticides in the Arctic atmosphere, *Environmental Pollution*, 102, 51–62.
- Hashimoto, Y., Y. Sekine, H.K. Kim, Z.L. Chen, and Z.M. Yang (1994) Atmospheric fingerprints of East Asia, 1986–1991. An urgent record of aerosol analysis by the JACK network, *Atmospheric Environment*, 28, 1437–1445.
- IARC (International Agency for Research on Cancer) (2002) Search IARC agents and summary evaluations, URL http://193.51.164.11/cgi/iHound/Chem/iH_Chem_Frames.html (accessed in February 2002).
- IPCS (International Programme on Chemical Safety) (1998)

- Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Environmental Health Criteria 202, URL <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc202.htm> (accessed in February 2002).
- Irwin, R.J., M. van Mouwerik, L. Stevens, M.D. Seese, and W. Basham (1997) PAHs entry, Environmental Contaminants Encyclopedia, National Park Service, Fort Collins, Col.
- Jaffe, D., T. Anderson, D. Covert, R. Kotchenruther, B. Trost, J. Danielson, W. Simpson, T. Berntsen, S. Karlstottir, D. Blake, J. Harris, G. Carmichael, and I. Uno (1999) Transport of Asian air pollution to North America, *Geophys. Res. Letter*, 26, 711-714.
- Jantunen, L.M.M., T.F. Bidleman, T. Harner, and W.J. Parkhurst (2000) Toxaphene, chlordane, and other organochlorine pesticides in Alabama air, *Environ. Sci. Technol.* 34, 5097-5105.
- Jones, K.C. and P. de Voogt (1999) Persistent organic pollutants (POPs): state of the science, *Environmental Pollution*, 100, 209-221.
- Karlsson, H., D.C.G. Muir, C.F. Teixeira, D.A. Burniston, W.M.J. Strachan, R.E. Hecky, J. Mwita, H.A. Bootsma, N.P. Grift, K.A. Kidd, and B. Rosenberg (2000) Persistent chlorinated pesticides in air, water, and precipitation from the Lake Malawi area, southern Africa, *Environ. Sci. Technol.*, 34, 4490-4495.
- Kim, K.-H. and M.-Y. Kim (2002) A decadal shift in total gaseous mercury concentration levels in Seoul, Korea: changes between the late 1980s and the late 1990s, *Atmospheric Environment*, 36, 663-675.
- Kim, Y., S.Y. Lee, M. Kim, and S.D. Kim (2001) The survey of PCDDs and PCDFs in the ambient air of the urban and industrial sites in Korea, 1998-99, *Chemosphere*, 43, 501-506.
- Littlefield, A. (1996) China coal use and environmental impacts, URL <http://www.american.edu/ted/CHINCOAL.HTM> (accessed in January 2002).
- Lohmann, R. and K.C. Jones (1998) Dioxins and furans in air and deposition: A review of levels, behaviour and processes, *Sci. Total Environ.*, 219, 53-81.
- MSC-E (Meteorological Synthesizing Centre-East) (2002) POPs (Persistent Organic Pollutants), URL <http://www.msceast.org/pops>; HMs (Heavy Metals), URL <http://www.msceast.org/hms> (accessed in February 2002).
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) (2002) URL <http://visibleearth.nasa.gov/> (accessed in January 2002).
- Oh, J.-E., J.-S. Choi, and Y.-S. Chang (2001) Gas/particle partitioning of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in atmosphere: evaluation of predicting models, *Atmospheric Environment*, 35, 4125-4134.
- Panther, B.C., M.A. Hooper, and N.J. Tapper (1999) A comparison of air particulate matter and associated polycyclic aromatic hydrocarbons in some tropical and temperate urban environments, *Atmospheric Environment*, 33, 4087-4099.
- Pirrone, N. and G.J. Keeler (1996) A preliminary assessment of the urban pollution in the Great Lakes region, *Sci. Total Environ.*, 189/190, 91-98.
- Pirrone, N. and G.J. Keeler (1997) Modeling atmospheric deposition and gas exchange of hazardous air pollutants over Lake Michigan, In *Atmospheric Deposition of Contaminants to the Great Lakes and Coastal Waters*, Edited by J.E. Baker, SETAC Technical Publications Series, SETAC, Pensacola, Flor., Chap. 7.
- Ritter, L., K.R. Solomon, J. Forget, M. Stemeroff, and C. O'Leary (1995) Persistent Organic Pollutants: An Assessment Report on DDT, Aldrin, Dieldrin, Endrin, Chlordane, Heptachlor, Hexachlorobenzene, Mirex, Toxaphene, Polychlorinated Biphenyls, Dioxins and Furans, International Programme on Chemical Safety (IPCS), URL <http://www.chem.unep.ch/pops/ritter/ritter.htm> (accessed in January 2002).
- RRC (Railroad Commission of Texas) (2001) Guidelines for Spills, Releases, and Risk Based Decision Making for Oil Field Related Sites in Texas, URL <http://www.rrc.state.tx.us/divisions/og/riskguidelines/TOC.html> (accessed in February 2002).
- Safe, S. (1990) Polychlorinated biphenyls (PCBs), dibenzo-p-dioxins (PCDDs), dibenzofurans (PCDFs), and related compounds: environmental and mechanistic considerations which support the development of toxic equivalency factors (TEFs), *CRC Critical Rev. Toxicology*, 21, 51-88.
- Scherbatskoy, T., J.M. Burke, A.W. Rea, and G.J. Keeler (1997) Atmospheric mercury deposition and cycling in the Lake Champlain basin of Vermont, In *Atmospheric Deposition of Contaminants to the*

- Great Lakes and Coastal Waters, Edited by J.E. Baker, SETAC Technical Publications Series, SETAC, Pensacola, Flor., Chap. 13.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, Wiley-Interscience, New York.
- Silberhorn, E.M. (1995) PCBs, In Encyclopedia of Energy Technology and the Environment, Edited by A. Bisio and S. Boots, Wiley-Interscience, New York.
- Simcik, M.F., T.P. Franz, H. Zhang, and S.J. Eisenreich (1998) Gas-particle partitioning of PCBs and PAHS in the Chicago urban and adjacent coastal atmosphere: states of equilibrium, Environ. Sci. Technol., 32, 251-257.
- Simcik, M.F., S.J. Eisenreich, and P.J. Lioy (1999) Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan, Atmospheric Environment, 33, 5071-5079.
- Simoneit, B.R.T., G.Y. Sheng, X.J. Chen, J.M. Fu, J. Zhang, and Y.P. Xu (1991) Molecular marker study of extractable organic matter in aerosols from urban areas of China, Atmospheric Environment, 25A, 2111-2129.
- Slemr, F. and H.E. Scheel (1998) Trends in atmospheric mercury concentrations at the summit of the Wank mountain, southern Germany, Atmospheric Environment, 32, 845-853.
- Thompson, J. (2001) Regional air pollution abatement. The experience of Europe and North America, 12th World Clean Air & Environment Congress and Exhibition, August 26-31, Seoul, Korea.
- UNECE (United Nations Economic Commissions for Europe) (1998) The 1998 Aarhus Protocol on Persistent Organic Pollutants (POPs), URL http://www.unece.org/env/lrtap/pops_h1.htm; The 1998 Aarhus Protocol on Heavy Metals, URL http://www.unece.org/env/lrtap/hm_h1.htm (accessed in January 2002).
- UNECE (United Nations Economic Commissions for Europe) (1999) The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, URL http://http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.htm (accessed in February 2002).
- UNEP (United Nations Environment Programme) (2001) Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs), URL <http://www.chem.unep.ch/sc/> (accessed in January 2002).
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1997) Regional approaches to improving air quality, EPA/451-K-97-001, Research Triangle Park, NC.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1998) Great Lakes Binational Toxics Strategy Pesticide Report, URL <http://www.epa.gov/glnpo/bnsdocs/98summ/pest/index.html> (accessed in January 2002).
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999a) Category for persistent, bioaccumulative, and toxic new chemical substances, Federal Register, 64, 60194-60204.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (1999b) Compendium Method TO-13A. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Ambient Air Using Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS), 2nd Edn, EPA/625/R-96/010b, Research Triangle Park, NC.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000a) Deposition of Air Pollutants to Great Waters, 3rd Report to Congress, EPA-453/R-00-005, Research Triangle Park, NC.
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000b) Lake Michigan Lake Wide Management Plan (LaMP 2000), URL <http://www.epa.gov/grtlakes/lakemich/> (accessed in January 2002).
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2000c) EPA's Agency-wide Multimedia Persistent, Bioaccumulative, and Toxic Pollutants Initiative, 1999 Accomplishments Report, First Annual Edition, EPA 743-R-00-003, URL <http://www.epa.gov/pbt/accomp99.htm> (accessed in May 2001).
- USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2001) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, 5th Edition, URL <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html> (accessed in January 2002).
- Vulykh, N. and V. Shatalov (2001) Investigation of Dioxin/furan Composition in Emissions and in Environmental Media, Technical Note 6/2001, Meteorological Synthesizing Center-E, URL <http://www.msceast.org/reps/TN6-2001.pdf> (accessed in May 2002).
- WRI (World Resources Institute), UNDP, UNEP, and World Bank (1998) China's health and environment: Air pollution and health effects, In World Resources 1998-99, URL <http://www.wri.org/wr-98-99/>

- prc-air.htm (accessed in January 2002).
- WWF (World Wildlife Fund) (1999) Persistent organic pollutants: hand-me-down poisons that threaten wildlife and people, URL http://www.worldwildlife.org/toxics/progareas/pop/pop_rep.htm (accessed in January 2002).
- Wuester, H. (2000) The Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols, URL <http://www.unece.org/env/popsxg/plassche.ppt> (accessed in February 2002).
- Zheng, M., T.S.M. Wan, M. Fang, and F. Wang (1997) Characterization of the non-volatile organic compounds in the aerosols of Hong Kong—identification, abundance and origin, *Atmospheric Environment*, 31, 227–237.
- Zheng, M., M. Fang, F. Wang, and K.L. To (2000) Characterization of the solvent extractable organic compounds in PM_{2.5} aerosols in Hong Kong, *Atmospheric Environment*, 34, 2691–2702.