

## 다환방향족탄화수소(Polyaromatic Hydrocarbons, PAHs)의 국내 배출량 추정 - 잔류성 유기오염물질(Persistent Organic Pollutants)의 국제규제에 대응하여 -

조규탁·이동수·신용승

서울대학교 환경대학원

(2000년 8월 4일 접수, 2000년 9월 1일 채택)

### Estimation of Domestic Emission of Polyaromatic Hydrocarbons for Global Regulation of Persistent Organic Pollutants

Kyu Tak Cho · Dong Soo Lee · Yong Seung Shin

*Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University*

#### 1. 서 론

잔류성유기오염물질(Persistent Organic Pollutants, POPs)은 환경내에서 광화학적·생물학적·화학적 분해가 느리게 진행되고 먹이사슬을 통해 동식물의 체내에 축적되며 독성이 강한 유기화합물을 가리킨다. POPs는 대부분 인간활동의 결과로 인해 생성되는데 의도적으로 생산되는 화학물질과 의도하지 않았지만 부산물로서 생성된 화합물이 있으며 그 화학적 특성에 따라 크게 유기염소계 농약류(DDT, 알드린, 클로르단 등), 유기염소계 화합물(다이옥신, Furan, PCBs 등), 유기브롬계 화합물(HBDs, 디브로모에탄), 다환방향족 탄화수소류 등으로 분류할 수 있다. 이 중 일부 사용이 규제되어온 물질들은 근래 들어 잔류농도가 감소하는 경향을 보이고 있으나 어느 농도 이하로는 잘 감소되지 않고 있으며 몇몇 농약류, 불꽃억제제, 가스제, 안정화제 등을 포함한 POPs는 아직도 세계적으로 사용되고 있다. 이들 물질은 일반적으로 물에 잘 녹지 않고 지방조직(adipose tissues)에 축적되는 성질이 있고

생태계의 먹이사슬을 따라 위로 갈수록 고농도로 축적되어 있는 경향이 있다. 또, 반휘발성(semi-volatile)을 띠고 있어서 장기간에 걸쳐 환경내의 고체상(토양, 퇴적층, 분진 및 입자성 물질)에 축적되는 경향을 가지고 있으나, 대기중에서 멀리 운반되어 전 세계적으로 확산되고 담수나 해수에 의해서도 이동하여 극지방과 같이 이들 물질이 한번도 사용된 적이 없는 곳에서도 발견되고 있다. 이러한 POPs 물질들은 발생지에서뿐만 아니라 국경을 넘어 다른 지역에서 피해를 일으킬 수 있는 가능성이 크기 때문에 각 나라 안에서의 개별적 관리 이외에도 국제적인 공동 관리가 요구된다. 이에 United Nations Economic Commission for Europe(UN/ECE)에서는 POPs를 월경성 대기오염물질로 규정하고, 이에 대한 의정서를 1998년 6월 이미 채택한 상태이며 United Nations Environment Programme(UNEP)에서는 Table 1에 요약된 것처럼 POPs물질의 규제 협약을 체결하기 위한 정부간 협상회의(Intergovernmental Negotiating Committee, INC)를 진행중이며, 머지 않아 협약이 채택될 것으

Table 1. UNEP POPs convention progress and plan<sup>1)</sup>

Date	UNEP POPs meetings
October/1995	Marin pollution prevention convention (Washington D.C.)
February/1997	19th UNEP governing council decision
June/1998	1st INC meeting for POPs convention (Montreal, Canada)
September/1998	1st Criteria expert group meeting (Bangkok, Thailand)
January/1999	2nd INC meeting for POPs convention (Niroby, Kenya)
June/1999	2nd Criteria expert group meeting (Vienna, Austria)
September/1999	3rd INC meeting for POPs convention (Geneva, Switzerland)
March/2000	4th INC meeting for POPs convention (Bonn, Germany)
October/2000	5th INC meeting for POPs convention (Southafrica)
April/2001	COP for adoption of the POPs convention (Sweden, temporary)

로 예상된다.<sup>1)</sup>

UNEP와 UN/ECE에서는 협약의 출발점으로서 현재 각각 12개와 16개 종류의 물질을 규제대상물질로 채택하고 있으며(Table 2), 선정기준을 마련하여 추후 대상물질의 수를 점차 확대하려는 계획을 가지고 있다.

우리 나라에서는 UNEP의 현 규제대상 12개 물질만을 놓고 볼 때는 대부분의 물질들이 유해화학물질관리법, 농약법, 폐기물 관리법, 산업안전보건법 등의 관계법령에 의거하여 규제되고 있으며, 일부 물질은 국내에서 생산, 사용, 수입된 사례가 없는 경우도 있어 규제에 큰 어려움이 없을 것으로 보인다. 그러나 주로 폐기물 소각시 배출되는 다이옥신 및 퓨란의 배출감소를 위해서는 고온 소각기술과 배출저감을 위한 설비의 도입이 필요한 만큼 상당한 경제적 비용이 소요될 것으로 예상된다. 또한 Polychlorinated biphenyls(PCBs)은 오랜 전에 사용이 금지되어 새로운 규제가 필요하지는 않지만 폐기물 소각로에서 부산물로서 지속적으로 배출되

며 아직도 PCBs가 포함되어 있는 변압기가 일부 사용중에 있고 현재 폐기한 변압기 등으로부터 추출한 PCBs를 처리하지 못하고 저장중인 것으로 알려지고 있어 이들에 대한 마무리처리가 필요하다. 한편 UNEP에서 POPs물질의 추가지정을 위한 '선정기준전문가그룹'(Criteria Expert Group, CEG)이 구성되어 선정기준 및 절차를 논의한 바 있으며,<sup>2)</sup> 이에 따라 규제대상물질들이 추가될 것으로 예상된다. POPs 규제대상물질의 선정 기준으로는 일반적으로 POPs의 고유특성인 독성(toxicity), 잔류성(persistence), 생체축적성(bio-accumulation), 장거리 이동성(long-range transport), 휘발성(volatility) 등이 고려되고 있으며,<sup>2,3)</sup> 그 외에도 대상물질이 개발의 정도와 빈부의 수준이 매우 다른 세계 여러 나라에서 공통적으로 규제되는 경우 규제의 실행에 필요한 여러 사회·경제적 요소 등을 들 수 있다. 향후 POPs물질로 추가될 가능성이 높은 물질은 북미자유무역협정-환경협력위(NAFTA-CEC)와 UN/ECE의 기준에 따르면 Chlordecone, Hexabromobiphenyl, Hexachlorocyclohexane 및 다환방향족 탄화수소(Polyaromatic Hydrocarbons, PAHs) 등으로서, PAHs를 제외한 3종은 국내 신규물질 또는 금지물질로서 사용규제시 추가적으로 큰 어려움은 없을 것으로 보인다. 그러나, PAHs는 머지않아 UNEP의 규제대상물질로도 선정될 가능성이 가장 큰 물질로서 코크스 및 전극 생산공정, 알루미늄 제련공정, 목재보존시설 등에서 특히 대량으로 배출되는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup> 또한 석유나 석탄 등의 화석연료 연소과정에서도 배출되므로 앞으로 규제될 경우 배출량 저감을 위한 공정개선, 오염배출저감시설설치, 에너지 사용량의 감축 등의 필요성으로 인해 산업활동에 미치는 영향의 폭이 클 것으로 예상되나 현재 국내에서는 Benzo(a)pyrene만이 주기적으로 측정되고 있을 뿐 별다른 관리가 이루어지고 있지 않아 향후 규제대상에 추가될 경우 적절한 대처방안의 마련이 쉽지 않을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 국제협약에 의한 PAHs의 배출규제에 대비하여 국내의 PAHs의 배출량을 추정하고 이를 통해 주요 배출원을 가려내어 효율적인 대응방안을 준비하기 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

Table 2. List of POPs chemical designated by UN/ECE, UNEP and regulatory status in Korea

POPs	Use	Regulations
Endrin	insecticide	Toxic Substance Management Act (requirements imposed for handling) Pesticide Management Act (ban)
Toxaphene	insecticide	the same as above
Aldrin	soil-insecticide	the same as above
Dieldrin	moth-proofing	the same as above
Heptachlor	soil-insecticide	the same as above
Chlordane	herbicide	the same as above
Mirex	flame-retardant insecticide	never been produced, imported, and used
Hexachlorobenzene	insecticide	never been produced, imported, and used
DDT	insecticide	Toxic Substance Management Act (requirements imposed for handling) Pesticide law (ban)
PCBs (Polychlorinated biphenyles)	- dielectric fluid of electric transformer, plasticizer, lubricants - production mostly banned in 1970s (estimated worldwide total production: 1,100,000 ton) - still in use for old transformers	electrical equipment criteria (banned for use in electrical equipments) Toxic Substances Management Act (banned) Solid Waste Management Act (listed as a specified waste)
Dioxins & Furans	- no intended use - produced from municipal and medical waste combustion & high temperature metal processes	Solid Waste Management Act (stack gas concentration control for waste incinerators of certain sizes)
Chlordecone	insecticide	-
Hexabromobiphenyl	-	-
Hexachlorcyclohexane	-	-
PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)	- natural components of crude oil - produced from fossil fuel combustion & industrial processes	no regulation

## 2. 연구 범위 및 방법

현재 미국 환경보호청(US EPA)에서는 인체 위해도에 따라 특별히 관리하여야 할 16개의 PAHs 물질을 선정하였고(Table 3),<sup>5)</sup> 그 물질들 중 발암성이 있는 것으로 생각되는 7개의 물질을 7-PAHs로 분류하여 관리하고 있다.<sup>6)</sup>

따라서 본 연구에서도 PAHs 배출량을 7가지 PAHs(7-PAHs)의 총합과 16가지 PAHs(16-PAHs)

의 총합으로 나누어 산출하였다. 현재 미국 환경보호청에서 제시하고 있는 주요한 PAHs 배출원을 분류해 보면 크게 연료연소, 소각 및 기타 연소, 이동배출원, 서비스업, 제조업, 기타 배출원 등으로 나누어 볼 수 있는데, 자세하게는 105개 분야(연료연소 20개 분야, 소각 및 기타 8개 분야, 이동배출원 3개 분야, 서비스업 7개, 고무 및 플라스틱 제조 5개, 금속산업 9개, 목재 및 제지 8개, 비금속산업 4개, 석유 및 코크스 산업 7개, 섬유산업 1개, 의약품 산업

Table 3. 16-PAHs and their environmental fate properties<sup>5)</sup>

No.	PAH chemical name	ring no.	molecular weight (g/mol)	solubility ( $\mu\text{g/l}$ ) at 25°C	log $K_{ow}$	log $K_{oc}$	vapor pressure (mmHg) at 25°C
1	Naphthalene	2	128.2	3400	3.37		1.8E-2
2	Acenaphthylene	2.5	152.2	3420	4.07	3.04	1.0E-4~1.0E-3
3	Acenaphthene	2.5	154.2		3.98	3.66	
4	Fluorene	2.5	166.2	800	4.18	3.86	
5	Phenanthrene	3	178.2	435	4.46	4.15	6.8E-4
6	Anthracene	3	178.2	59	4.5	4.15	2.4E-4
7	Fluoranthene	3.5	202.3	260	4.9	4.58	
8	Pyrene	4	202.1	133	4.88	4.58	6.9E-7
9	Benzo(a)anthracene*	4	228.3	11	5.63	5.3	1.1E-7
10	Chrysene*	4	228.3	1.9	5.63	5.3	
11	Benzo(b)fluoranthene*	4.5	252.3	2.4	6.04	5.74	
12	Benzo(k)fluoranthene*	4.5	252.3	2.4	6.21		
13	Benzo(a)pyrene*	5	252.3	2.4	6.06	5.74	5.5E-9
14	Indeno(1,2,3-cd)pyrene*	5.5	276.3		6.58	6.2	
15	Dibenzo(a,h)anthracene*	5	278.3	0.4	6.86	6.52	
16	Benzo(g,h,i)perylene*	6	276.3	0.4	6.78	6.2	1.0E-10

\* animal carcinogen, international agency for research on cancer

$K_{ow}$  : Octanol-Water partition coefficient,  $K_{oc}$  : Organic carbon-Water partition coefficient

1개, 장비제조업 3개, 화학물질 제조 14개, 기타산업 9개, 그리고 기타 미분류 배출원 등)로 나누어져 있다.<sup>4)</sup> 이러한 배출구분은 미국의 사정에 적합하게 분류한 것이기 때문에 우리나라의 실정과 약간 다르지만 국제적으로 표준화된 산업분류체계로서 이 체계를 따르는 것이 크게 무리가 없을 것으로 판단하였다. 따라서 국내 PAHs 배출량 산정은 우선 산업공정 및 기타 배출원에서 배출되는 양과 에너지 소비에 따른 배출량을 구분하여 산정하였다. 에너지 소비에 따른 배출은 1995년 에너지 총조사보고서<sup>7)</sup>를 근거로 산업부문, 상업공공부문, 가정부문, 수송부문(자가용 및 운수업)으로 나누어 배출량을 산정하였고, 산업공정 및 기타 배출원으로부터의 배출량은 기초 활동량 자료가 집계되어 추정이 가능한 일부 배출원에 대해서만 산정하였다. 또한 각 연료나 공정의 배출계수들이 국내에서 연구된 바가 전혀 없기 때문에 본 연구는 국외의 자료 중 가장 포괄적으로 정리되어 있는 미국 환경보호청의 값<sup>4)</sup>을 사용할 수밖에 없는 한계를 가진다.

## 2.1. 연료연소에 의한 배출량 추정

연료연소에 의한 배출량은 크게 두 과정으로 나누어 배출량을 산정할 수 있다. 하나는 보일러와 같은 열공급시설에서의 연소과정이고, 다른 하나는 자동차나 항공기 같은 내연기관에 의한 연소과정이다. 연료연소에 의한 배출량 산정과정의 1단계는 연료사용량 조사이다. 에너지 소비 부문을 크게 산업, 상업공공, 가정, 수송 부문으로 나누어 연료별 사용량을 조사하였다. 조사된 사용량 중에서 원료용으로 투입된 양은 제외하고 에너지원으로 직접 사용된 연료별 사용량과 중간재 생산과정에서 투입된 연료별 사용량을 조사하였다. 제2단계는 연료사용량의 분리로서 위에서 조사된 산업부문별 연료사용량을 보일러에서의 사용량과 수송차량에서의 사용량으로 분리한다. 이렇게 분리하는 이유는 용도에 따라서 배출원단위가 다르기 때문이다. 제3단계는 배출원 단위 조사로서 위에서 조사된 연료별 사용량을 이용하여 배출량을 산정하기 위해서는 적절한 배출원 단위가 준비되어야 한다. 현재 우리나라의 경우 이 분야에 대한 연구가 미흡하기 때문에 외국의 자료를

이용할 수밖에 없는 실정인데, 이처럼 우리 나라에서 직접 조사되지 않은 배출계수의 사용은 배출량 산정결과에 불가피하게 불확실성을 내포하게 된다. 마지막 4단계에서는 배출량 및 에너지 원단위를 산정한다. 이때, 보일러에서의 배출은 연료사용량과 배출원단위를 이용하여 직접 평가할 수 있지만, 수송용 차량에서의 배출량은 다른 방법을 이용해야 한다.

본 연구에서 사용한 각 에너지 소비부문별 열공급시설에서의 배출원단위가 Table 4에 제시되어 있다.<sup>4)</sup>

에너지 소비부문은 크게 산업부문, 상업공공부문, 가정부문으로 구분하였으며 각 부문의 열공급시설별 연료별 배출원단위를 이용하여 배출량을 산정하였다. 한편 자동차와 같은 수송차량에 의한 배출원단위는 열공급시설과는 다른 형태를 가지는데, 먼저 자동차의 차종별 배출원단위가 주행거리에 대해서 조사되어 있으며<sup>8)</sup> 이 자료와 차종별 주행거리, 연료소비량 자료를 이용하여 Table 5에서와 같이 연료소비량별 배출원단위가 도출될 수 있다.

한편 자동차를 제외한 다른 수송수단의 경우 적절

한 배출원단위가 없으며, 항공기의 경우에도 이착륙(LTOs) 횟수에 따른 배출원단위만 제시되어 있다. 따라서 본 연구에서는 경유엔진 배출원단위를 적용하여 철도차량 및 일부 선박에 의한 배출량을 추정하였고, 증유를 사용하는 선박에 대해서는 산업용 보일러의 배출원단위를 이용하여 배출량을 추정하였는데, 이로 인해 배출량 추정에 상당한 오차가 존재할 것으로 판단된다. 항공기 연료인 제트유의 배출량을 파악하기는 불가능하였으며, 이착륙에 따른 7-PAHs의 배출원단위  $1.09 \times 10^{-5}$  g/회, 16-PAHs 배출원단위  $3.06 \times 10^{-4}$  g/회, 1995년도 항공기 이착륙횟수는 288,294회/년을 이용하여 공항내에서의 배출량만 평가하였다. 한편 수송분야의 수송용 연료 소비 이외의 건물유지나 설비용 에너지 공급을 위해서 보일러에서 연소된 연료의 PAHs 배출원단위는 산업부문 보일러의 배출원단위를 적용하였다.

2.2. 산업공정 및 기타 부분에서의 배출량

연료연소 이외에도 다양한 산업 분야에서 PAHs

Table 4. Fuel emission factors in different sectors<sup>4)</sup>

Fuel type	Unit	Industrial		Commercial & Public		Residential	
		7-PAHs	16-PAHs	7-PAHs	16-PAHs	7-PAHs	16-PAHs
Coal	g/ton	0.063956528	0.280320103	0.063956528	0.280320103	0.063956528	0.280320103
Bituminous	g/ton	0.024312553	1.233771328	15.1953454	48.9879792	15.1953454	48.9879792
Anthracite	g/ton	0.063956528	0.280320103	0.063956528	0.280320103	0.063956528	0.280320103
Kerosene	g/kl	9.6552E-11	8.1E-07	9.6552E-11	8.1E-07	0.067462279	0.835190206
Diesel	g/kl	9.6552E-11	8.1E-07	9.6552E-11	8.1E-07	0.067462279	0.835190206
Residual(B-A)	g/kl	2.7072E-09	3.6378E-06	2.7072E-09	3.62088E-06	2.7072E-09	3.62088E-06
Residual(B-B)	g/kl	2.7072E-09	3.6378E-06	2.7072E-09	3.62088E-06	2.7072E-09	3.62088E-06
Residual(B-C)	g/kl	2.7072E-09	3.6378E-06	2.7072E-09	3.62088E-06	2.7072E-09	3.62088E-06
LNG	g/10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	NA	4.05107E-07	NA	4.05107E-07	0.00070497	0.044792996
Woods	g/ton	0.026761952	1.524070464	6.0183E-07	2.1303E-05	19.9580656	325.6793432

Table 5. Estimates of PAHs emission factors of automobiles based on fuel mass

Vehicles	Total emission (g/yr)		Total fuel consumption (kl/yr)	Emission factor		
	7-PAHs	16-PAHs		Unit	7-PAHs	16-PAHs
Gasoline	3,317,488.8	6,002,245.9	8,674,958	g/kl	0.382421	0.691905
LPG	266,639.9	595,929.8	1,351,096	g/ton	0.197351	0.354192
Diesel	666,551.4	2,677,368.0	10,770,494	g/kl	0.061887	0.216481

가 배출되고 있는데, 우리 나라의 경우 이 분야에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 미국 환경보호청에서 발간한 문헌자료를 검토하여 우리 나라에 적용해 보았는데, 기초자료의 미비로 배출량 평가가 불가능한 분야가 많았다. 본 연구에서 배출량 평가가 가능한 15개 분야의 활동량 및 배출원단위가 Table 6에 제시되어 있다.<sup>7,9-16)</sup> 여기에 제시된 활동도 자료는 1995년을 기준으로 하였으나, 일부 자료는 기준년도의 자료가 존재하지 않아서 1996년, 1997년, 1998년 또는 1999년 중에 확보가 가능한 자료를 이용하였다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1. 연료연소에 의한 배출량

Table 7에는 연료연소에 의한 소비부문별 연료별 PAHs 배출량이 제시되어 있다. 소비부문별로 배출량을 비교해 보면 7-PAHs의 경우 산업 1.1 ton/yr, 상업공공 0.002 ton/yr, 가정 2.6 ton/yr, 수송 4.3 ton/yr의 배출량을 보여 주었다. 16-PAHs의 경우 산업 35.3 ton/yr, 상업공공 0.01 ton/yr, 가

Table 6. Estimates of PAHs emission factors for industrial and other processes<sup>7,9-16)</sup>

Emission sources	Base	Throughput	Unit	Emission factor (lb/unit)		
				7-PAHs	16-PAHs	
Incinerators	Municipal solid wastes	incineration quantity	2,380,044 <sup>10,11)</sup>	ton		6.07E-06
	Wastewater treatment plant sludge	"	381,005 <sup>11)</sup>	ton	1.82E-05	3.44E-03
	Medical wastes	"	24,218 <sup>12)</sup>	ton		9.22E-04
	Hazardous wastes	"	251,892 <sup>12)</sup>	ton	2.91E-05	2.44E-04
Metallurgy	Foundry	production	1,447,000 <sup>13)</sup>	M/T	2.07E-05	6.21E-05
	Secondary lead smelting	Pb production	44,943 <sup>14)</sup>	M/T		0.0199
Petroleum refinery	Refinery - catalytic cracking	crude oil consumption	630,651,987 <sup>8)</sup>	Bbl	1.66E-05	3.16E-04
	Asphalt roofing production	production	893,125 <sup>15)</sup>	ton	1.10E-04	2.86E-03
	Asphalt hot-mix production	production	893,125 <sup>15)</sup>	ton	3.90E-07	1.82E-04
Cokes production	Cokes production (charging, Topside, & Door Leaks)	coal consumption	16,305,000 <sup>8)</sup>	M/T	3.72E-03	2.79E-02
	Cokes production (pushing, Quenching, Battery stacks)	coal consumption	16,305,000 <sup>8)</sup>	M/T	3.09E-03	0.053
Pulp & paper	Kraft Recovery Furnaces	pulp production	319,000 <sup>15)</sup>	M/T	1.23E-04	0.0213
Carbon black	Carbon black production	production	466,388 <sup>15)</sup>	M/T	5.25E-04	5.04E-03
Cigarette	Smoking	consumption	106,500,000 <sup>16)</sup>	103ea	2.08E-09	1.38E-08
Cremation	Cremators	capita	56,635 <sup>16)</sup>	capita	7.07E-11	4.16E-08

정 36.6 ton/yr, 수송 9.1 ton/yr의 배출량을 나타냈다. 연료연소에 의한 배출량 합계는 7-PAHs가 약 7.9 ton/yr, 16-PAHs가 80.9 ton/yr 정도 되는 것으로 나타났다. 연료별로 살펴보면, 7-PAHs의 경우에는 휘발유, 경유 및 목재에서 배출량이 많은 것으로 나타났고, 16-PAHs의 경우에는 유연탄과 목재에서 배출량이 높은 것으로 나타났다. 연료 및 소비부문을 동시에 고려하여 살펴보면, 7-PAHs의 경우 산업의 유연탄 및 휘발유 소비, 가정의 목재, 동유 및 경유 소비, 수송의 휘발유와 경유 소비 등에서 높은 배출량을 보여 주었다. 16-PAHs의 경우에는 산업의 유연탄 소비, 가정의 목재 소비, 수송의 휘발유와 경유 소비 등에서 높은 배출량을 보여 주었다.

산업부문의 배출을 연료별로 살펴보면 연탄류에서 주로 배출되고 있는데, 특히 유연탄에서 대부분이 배출되고 있다. 유연탄의 배출기여도는 7-PAHs의 약 63%, 16-PAHs의 96%였으며 무연탄, 휘발유 및 경유에서도 일부가 배출되는 것으로 나타났다. 상업공공부문 PAHs 배출량 산정결과를 보면, 7-PAHs나 16-PAHs의 약 90% 이상이 연탄류에서 배출되는 것으로 나타났으며, 다른 연료의 배출기여도는 작은 것으로 나타났다. 상업공공부문의 총배출량은 7-PAHs가 0.002 ton/yr이고, 16-PAHs는 약 0.011 ton/yr로서 가정부문이나 산업부문과 비교하면 아주 작은 양으로 나타났다. 이것은 우리나라의 경우 상업공공부문에서 사용하는 연료의 대부분이 유류나 가스류로써 PAHs의 배출량이 작은 연

Table 7. Estimates of PAHs emission from fuel combustion (kg/yr)

Fuel	Industrial		Commercial & Public		Residential		Transportation		Total	
	7-PAH	16-PAH	7-PAH	16-PAH	7-PAH	16-PAH	7-PAH	16-PAH	7-PAH	16-PAH
Coal	3.6	15.6	2.2	9.8	201.5	883.0	0.1	0.5	207.4	909.0
Bituminous	673.5	34,176.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	673.5	34,176.3
Anthracite	85.3	374.0	0.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	85.5	374.8
Crude oil	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Gasoline	209.0	378.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3,317.5	6,002.2	3,526.5	6,380.4
Naphtha	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jet (JA1)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jet (JP4)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Kerosene	0.0	0.0	0.0	0.0	469.1	5,807.2	0.9	11.3	470.0	5,818.6
Diesel	93.5	326.9	0.0	0.0	291.2	3,605.3	731.1	2,573.9	1,115.8	6,506.1
Residual (B-A)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Residual (B-B)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Residual (B-C)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
LPG	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	266.6	478.5	266.6	478.5
LNG	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	176.9	0.0	0.5	2.8	177.4
Woods	0.1	5.5	0.0	0.0	1,601.9	26,139.4	0.0	0.0	1,602.0	26,144.8
<b>Total</b>	<b>1,065.0</b>	<b>35,276.5</b>	<b>2.4</b>	<b>10.6</b>	<b>2,566.5</b>	<b>36,611.8</b>	<b>4,316.2</b>	<b>9,066.9</b>	<b>7,950.1</b>	<b>80,966.0</b>

료들이기 때문이다. 현재 지속적으로 유류나 가스로 연료전환이 이루어지고 있기 때문에 장래에 상업공공부문에서 연료연소에 의한 PAHs 배출량이 크게 증가할 가능성은 작다고 판단된다. 가정부문의 PAHs의 배출량 산정결과를 살펴보면 7-PAHs의 경우 신탄에서 62%, 동유 및 경유에서 39%가 배출되는 것으로 나타났으며, 16-PAHs 경우 신탄에서 71% 정도, 동유 및 경유에서 30% 정도 배출되는 것으로 나타났다. 총배출량은 7-PAHs가 2.6 ton/yr이었고, 16-PAHs가 36.6 ton/yr이었다. 가정부문의 경우 특히 신탄, 즉 목재연소에 의한 배출기여도가 높았는데, 최근에 우리 나라의 경우 다른 연료로 급격하게 대체되고 있기 때문에 장래에는 이 부분의 배출량이 상당히 감소할 것으로 판단된다.

수송은 육상수송, 수상수송, 철도수송 및 항공수송으로 나누어 배출량을 산정하였다. 육상수송의 총 배출량은 7-PAHs가 4.3 ton/yr이고, 16-PAHs가 8.8 ton/yr였다. 연료종류별로 살펴보면 휘발유에서 주로 PAHs가 발생하고 있는데, 이 연료를 사용하는 차량은 대부분 자가용 승용차이다. 이외에도 경유와 LPG 차량에서도 일부 PAHs가 발생하는 것으로 나타났다. 휘발유 차량의 배출기여율을 보면 7-PAHs의 약 76%, 16-PAHs의 68%를 배출하는 것으로 나타났다. 수상수송의 경우, 경유엔진에 대해서는 경유자동차 배출원단위를 적용하고, 증유나 병커유를 사용하는 설비의 경우에는 산업용 보일러의 배출원단위를 적용하여 배출량을 추정하였다. 수상수송용 디젤엔진의 경우 자동차와 연소조건이 상당히 다르기 때문에 PAHs 배출원단위도 상이할 것으로 판단되지만 아직까지 선진국에서도 이들 엔진에 대한 적절한 배출계수를 제시하지 못하고 있는 실정이다. 배출량을 살펴보면, 7-PAHs는 0.043 ton/yr, 16-PAHs는 0.158 ton/yr 정도 배출하는 것으로 나타났다. 연료별로 살펴보면 대부분의 배출이 수송용 경유에서 이루어지는 것으로 나타났는데, 7-PAHs와 16-PAHs 모두 배출량의 99% 이상이 경유에 의해서 배출되는 것으로 나타났다. 철도수송의 경우 기관차 및 동차의 경유엔진에 대해서는 자동차의 경유엔진 배출원단위를 이용하여 배출량을 추정하였으며, 이로 인해서 오차가 상당히 클 것으로 판단된다. 산정결과를 살펴보면, 7-PAHs와

16-PAHs 모두 배출량의 99% 이상이 경유에 의해 배출되었다. 배출량은 7-PAHs 0.020 ton/yr, 16-PAHs 0.075 ton/yr으로서, 다른 부문과 비교하면 상당히 작은 것으로 나타났다. 항공수송 분야의 배출량 산정결과 항공수송에서 가장 중요한 연료는 제트유인 것으로 나타났다. 그런데 전술한 것처럼 아직 이 분야에 대한 PAHs 배출원단위가 제시되지 않고 있기 때문에 배출량 평가가 불가능한 실정이다. 단 공항에서 항공기가 이착륙하는 순간에 대해서는 배출원단위가 제시되어 있어서 배출량 평가가 가능하며 추정결과에 따르면 제트유를 제외한 항공수송부문에서의 PAHs 배출량은 아주 미미하며, LTOs에 의한 부분을 추가하더라도 7-PAHs 0.001 ton/yr, 16-PAHs 0.040 ton/yr 정도 배출하는 것으로 나타났다. 전체 제트유 사용량에 대하여 배출량을 평가하더라도 다른 석유류의 배출원단위를 이용하여 추론해 보면 항공수송에 의한 PAHs 배출량이 크게 증가하지는 않을 것으로 판단된다.

전체배출량에 대한 각 소비부문별 기여도를 Fig. 1(a), (b)에 나타냈다. 이들 Fig. 1에서 알 수 있는 것처럼, 7-PAHs의 배출기여도를 살펴보면 산업부문

Fig. 1. (a) Sectoral contribution to 7-PAHs emission from fuel combustion (1995), (b) sectoral contribution to 16-PAHs emission from fuel combustion(1995).



13%, 가정 32%, 수송 54%로서 수송부문에서 가장 높은 기여도를 나타냈다. 한편 16-PAHs의 경우에는 산업부문의 기여도는 43.6%였고, 가정부문의 기여도는 45.2%였으며 수송의 기여도는 11% 정도로 나타났다. 이로부터 가정부문은 두 집단의 PAHs 배출에 모두 큰 기여를 하는 것으로 평가되었다.

연료의 소비에 의한 PAHs 배출기여비율을 Fig. 2(a), (b)에 연료별로 나타냈는데 원유, 나프타, 제트유, 증유의 배출기여비율은 무시할 만큼 작아서 나타나지 않았다. 이 결과에 의하면 7-PAHs 배출량은 휘발유에서 44%, 목재에서 20%, 경유에서 14%, 유연탄에서 8%가 각각 배출되는 것으로 나타났다. 16-PAHs의 경우에는 유연탄 42%, 목재 32%, 휘발유 8%, 경유 8% 및 등유 7%의 배출비율을 나타내 7-PAHs와는 다른 분포를 보여주었다. 이는 7-PAHs와 다른 배출특성으로서 장래 배출규제 정책을 수립하고자 할 경우 PAHs 가운데 규제 대상물질을 어떻게 선정하는가에 따라서 규제의 대상이 되는 연료가 달라져야 함을 알 수 있다. 그러나 목재의 배출기여비율은 공통적으로 매우 커서 PAHs의 종류에 관계없이 매우 중요한 배출원임을 알 수 있다.

### 3.2. 산업공정 및 기타 배출원에 의한 배출량

산업공정 및 기타 배출원은 아주 다양하며 그 배출량을 평가하기 위해 필요한 활동도 자료도 아주 다양하다. 이러한 이유로 일부 선진국을 제외하면 대부분의 국가에서 배출량을 평가하기 위한 연구가 미진한 실정이며, 우리 나라도 이 분야에 대한 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 미국 환경보호청의 자료를 검토하여<sup>4)</sup> 우리 나라에 적용하였으며, 그 결과가 Table 8에 제시되어 있다. 전술한 것처럼 배출원단위에 필요한 활동도 자료가 국내에 존재하지 않은 경우가 많았기 때문에 본 연구에서는 국내에서 평가가 가능한 15개 분야에 대해서만 배출량을 평가하였다. 이 결과에 의하면 산업공정 및 기타 배출원의 총배출량은 7-PAHs 55.5 ton/yr, 16-PAHs 695.8 ton/yr이었다. 배출원별로 기여율을 살펴보면 코크스 제조공정에서 대부분이 배출되는 것으로 나타났고 정유산업에서도 일부

Fig. 2. (a) Fuel contribution to total 7-PAHs emission from fuel combustion(1995), (b) fuel contribution to total 16-PAHs emission from fuel combustion(1995).

가 배출되는 것으로 나타났다. 7-PAHs의 경유 코크스 제조공정에서 약 90%, 정유산업에서 8.5%가 배출되는 것으로 나타났다. 16-PAHs의 경우에는 코크스 제조공정에서 85%, 정유산업에서 13% 정도 배출되는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 많은 수의 배출원이 고려되지 못했기 때문에 현재 제시된 PAHs 배출량은 실제의 배출량보다 작을 것이라는 점을 유의해야 할 것이다.

Fig. 3(a)와 (b)에는 본 연구에서 연료의 연소와 산업공정 등 평가 가능했던 모든 배출원들의 7-PAHs와 16-PAHs에 대한 부분별 배출기여비율이 제시되어 있는데, 7-PAHs의 약 87%, 16-PAHs의 89%가 산업공정 및 기타 배출원에서 배출되는 것으로 추정되어 대부분은 산업공정 및 기타 배출원에서 배출되는 것으로 나타났다. 앞으로 본 연구에서 고려하지 못했던 산업공정 및 기타 배출원들에 대한 배출량 산정이 가능해 진다면 산업공정 및 기타 배출

Table 8. Estimates of PAHs emission from industrial and other processes

Emission sources		Emission rate (kg/yr)		Contribution (%)	
		7-PAHs	16-PAHs	7-PAHs	16-PAHs
Incinerators	Municipal solid wastes		6.6	0.00	0.00
	Wastewater treatment plant sludge	3.1	594.5	0.01	0.09
	Medical wastes		10.1	0.00	0.00
	Hazardous wastes	3.3	27.9	0.01	0.00
Metallurgy	Foundry	13.6	40.8	0.02	0.01
	Secondary lead smelting		405.7	0.00	0.06
Petroleum refinery	Refinery - catalytic cracking	4,748.6	90,394.6	8.57	12.99
	Asphalt roofing production	44.6	1,158.6	0.08	0.17
	Asphalt hot-mix production	0.2	73.7	0.00	0.01
Cokes production	Cokes production (charging, Topside, & Door Leaks)	27,512.5	206,343.5	49.65	29.65
	Cokes production (pushing, Quenching, Battery stacks)	22,853.1	391,978.7	41.24	56.33
Pulp & paper	Kraft Recovery Furnaces	17.8	3,082.0	0.03	0.44
Carbon black	Carbon black production	111.1	1,066.2	0.20	0.15
Cigarette	Smoking	100.5	666.6	0.18	0.10
Cremation	Cremators	0.0	0.0	0.00	0.00
<b>Total</b>		<b>55,408.4</b>	<b>695,849.5</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>

원에 의한 배출기여율은 더욱 커질 것으로 예측된다. 따라서 국가 전체의 PAHs 배출량의 억제나 감소를 위해서는 주된 배출원인 산업공정에서의 배출규제가 우선적으로 검토되어야 할 필요가 있으며 현재까지의 추정에 의하면 그 가운데에서도 코크스제조 분야와 정유산업에서의 배출억제가 중요할 것이다 (Fig. 3(a)와 (b)).

#### 4. 요약 및 결론

본 연구의 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다. PAHs의 국내 배출량을 크게 에너지 소비 즉, 연료연소에 의한 배출량과 산업공정 및 기타 배출원으로부터의 배출량으로 나누어 산정하였다. 에너지 소비 부문은 다시 산업, 상업공공, 가정, 수송의 4개 부문으로 나누어 배출량을 산정하였다. 그러나 산업

Fig. 3. (a) Sectoral contribution to 7-PAHs emission(1995), (b) sectoral contribution to 16-PAHs emission(1995).

공정 및 기타 배출원에 대해서는 PAHs 배출원 및 배출계수 등과 같은 국내자료의 미비로 인하여 15개 배출원에 대해서만 배출량을 산정하였다.

1995년을 기준으로 우리 나라의 PAHs 배출량 산정결과를 살펴보면, 7-PAHs를 기준으로 우리 나라에서 배출된 PAHs는 약 63.5톤이며, 16-PAHs로는 776.8톤에 이르는 것으로 나타났다. 그러나 이는 국내 기초자료의 한계로 인하여 전술한 바와 같이 산업공정 등의 여러 배출원 가운데 일부만을 산출한 것이기 때문에 실제로는 배출량이 더 클 것으로 예상된다. 추정량 가운데 에너지 소비에 의한 배출량은 7-PAHs 약 8톤, 16-PAHs 약 81톤이며, 산업공정 및 기타 배출원의 배출량인 7-PAHs 약 55.5톤, 16-PAHs 약 695.8톤과 비교할 때, 7-PAHs는 약 87.5% 16-PAHs는 약 89.6%의 배출량이 산업공정 및 기타부문에서 배출됨을 알 수 있었다. 산업공정 가운데 코크스 제조부문에서 대부분(7-PAHs 90%, 16-PAHs 85%)이 배출되고 정유산업에서 나머지의 대부분이 배출됨으로써 특정 산업부문에 배출량이 집중되는 양상을 드러냈다.

PAHs를 비롯한 POPs 문제뿐만 아니라 다른 환경문제에 좀더 근원적으로 대처하기 위해서는 장기적으로 우리 나라의 산업구조를 환경친화적 구조로 전환하는 것이 필요하다. 즉, 에너지 다소비 업종 및 오염물질 대량 배출 업종을 최소화하고 에너지 효율적이며 환경친화적인 산업을 중점적으로 육성함으로써 경제성장을 유지하면서도 오염물질의 배출증가를 완화시키는 지속가능한 발전을 도모하는 산업정책의 수립이 요구된다고 할 수 있다. 한편 본 연구의 분석결과와 외국의 규제사례를 검토하면 좀더 단기적인 관점에서는 PAHs 규제에 대비한 정책적, 기술적 대응방안을 다음과 같이 제시할 수 있을 것이다.

첫째, 우리 나라의 PAHs 배출규제는 에너지 소비부문보다는 일차적으로 배출량의 대부분을 차지하고 있는 산업공정에 초점을 맞추는 것이 타당하며, 규제방식에 있어서도 에너지세 등의 간접규제 방식보다는 주요 산업공정 배출원을 중심으로 하는 직접규제가 효과적일 것으로 판단된다. 한편, 산업부문 가운데에서도 특히, 코크스 제조와 정유산업 부문을 중점 관리해야 할 것으로 생각된다.

둘째, 궁극적으로는 PAHs를 직접 규제하는 것이

바람직하나 국내외적 현실을 감안하여 PAHs의 배출저감 목표를 달성할 수 있도록 기존의 대기오염물질에 대한 배출허용기준을 통하여 규제하는 방안을 고려해 볼 수 있을 것이다. 예컨대, PAHs 배출과 상관성을 가진 것으로 알려져 있는 이산화탄소, 총탄화수소, 또는 분진의 배출허용기준을 강화함으로써 PAHs 배출을 제어하는 것이 가능할 것이다.

셋째, 산업공정과 관련하여 이미 외국에서 개발되어 활용되고 있는 '최적가용기술(Best Available Technologies: BAT)' 또는 '최적환경기술(Best Environmental Practices: BEP)'에 대한 기술 조사 및 타당성 검토, 그리고 국내 자체 기술개발을 통해 우리 실정에 적합한 기술을 확보해야 할 것이다. 또한 에너지 소비부문에서도 지속적인 에너지대체 및 에너지 효율증대를 위한 노력을 기울여야 하며, 이를 유도할 수 있는 효과적인 유인정책, 예컨대 산업용 청정 에너지의 가격인하 또는 세금감면, 공정개선 및 오염방지시설 투자비용에 대한 금융 및 세계 지원책 등의 적극적인 정책의 개발과 시행이 필요할 것으로 생각된다.

끝으로 본 연구에서 수행한 산출 및 분석결과들은 불확실성을 내포하고 있으며, 이는 PAHs 배출량 산정의 기초가 되는 배출계수 및 활동도 등에 관한 국내 자료가 전무하므로 외국의 자료를 이용하면서 기인하는 것이다. 특히 산업 배출원에 대해서는 국내 선행연구는 물론 산업부문별 배출량 추정을 위한 배출계수, 생산공정자료, 산출량 등의 기초 통계자료를 확보하기가 불가능한 경우가 많았다. 이들 자료는 PAHs를 포함하여 다른 규제 대상 POPs의 배출량 산정에도 필수적이므로 앞으로 이와 같은 연구결과가 POPs의 관리에 보다 정확하고 효과적으로 활용되기 위해서는 이 분야에 대한 체계적인 연구와 투자가 반드시 필요하다.

## 사 사

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. International Institute for Sustainable Development, *Earth Negotiations Bulletin*, 15(27), 2~12(1999).
2. International Institute for Sustainable Development, *Earth Negotiations Bulletin*, 15(19), 2~10(1999).
3. International Institute for Sustainable Development, *Earth Negotiations Bulletin*, 15(12), 2~7(1998).
4. U. S. EPA, Locating and Estimating Air Emissions and Sources of Polycyclic Organic Matter, EPA-454/R-98-014, Office of Air Quality Planning And Standards, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC(1998).
5. U. S. EPA, Clean Air Act, Section 112(c) (6), Specific Pollutants, Federal Register Online via GPO Access(wais.access.gpo.gov)(1997).
6. U. S. EPA, National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories; National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Primary Aluminum Reduction Plants, Federal Register Online via GPO Access(wais.access.gpo.gov)(1996).
7. 에너지경제연구원, '95 에너지총조사보고서, 산업자원부(1996).
8. U. S. EPA, FIRE Ver. 6.22(2000).
9. 환경부, 환경백서(1997).
10. 환경부, '96 전국 폐기물 통계조사(1997).
11. 환경부, 전국 지정폐기물 발생 및 처리현황('95)(1996).
12. 대한 주물협회 제공 자료, 1999년도에 집계한 생산량 자료임.
13. 비철금속협회 제공 자료, 1997년도 현황임.
14. 내외정보센터, '97 국내화학시장정보총람(1997).
15. 담배인삼공사 제공 자료(1999).
16. 보건복지부 제공 자료(1995).