

## 폐기물소각시설의 유해대기오염물질 배출특성 연구

### Characteristics of Hazardous Air Pollutant Emissions from Waste Incinerators

박정민\* · 이상보 · 강준구 · 김진필  
최은선 · 황원구 · 권오상

국립환경과학원 배출시설연구과  
(2006년 9월 20일 접수, 2007년 4월 4일 채택)

J.M. Park\*, S.B. Lee, J.G. Kang, J.P. Kim,  
E.S. Choi, W.G. Hwang and O.S. Kwon  
*Emission Sources Research Division,  
Environmental Cap. System Research Department, NIER*  
(Received 20 September 2006, accepted 4 April 2007)

#### Abstract

In this study, we have investigated waste incinerators which are one of the major HAPs emission sources. In order to obtain more reliable HAPs emission data from waste incinerators, direct sampling for the possible pollutants from the stack was carried out and the analysis was performed. The purpose of study was to understand the emission status from waste incinerators and recognize the problems and finally to set up a strategy to reduce the HAPs emissions from waste incinerators. The emission concentrations of 8 species of heavy metals and 16 species of PAHs have been analyzed for the first time in Korea. Not only the emission characteristics of HAPs from waste incinerators were identified, but also the analysis of reduction efficiencies for control devices such as BF and wet scrubbing systems was carried out.

**Key words** : HAPs (Hazardous Air Pollutants), Heavy metal, PAHs

#### 1. 서 론

우리나라는 국토면적 대비 화학물질 소비금액이 높은 국가로 매년 3만 7,000여 종, 2억 4,000만 톤의 화학물질이 사용되고 있다. 국내 주요 산업체를 대상

으로 한 화학물질배출량조사(Toxic Release Inventory) 결과에 의하면 총 배출량의 대부분이 대기로 배출되고 있으며, 화학물질 총 배출량의 대기 중 배출비율은 2002년 99.6%, 2003년 99.7%로 나타나있다. 대기 중의 유해물질로 인한 인체 영향은 다른 매체보다 상당히 크며 저농도로 존재하여도 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 유해한 화학물질로부터 국민건강을 보다 효과적으로 보호하기 위해

\*Corresponding author.  
Tel : +82-(0)32-560-7583, E-mail : shallom@me.go.kr

서는 대기 분야에서의 유해화학물질 저감에 초점을 맞출 필요가 있으며 특히 발암물질, 생식계, 신경계, 호흡계 및 발달계 독성물질 등과 같이 인체 및 생태계에 미치는 영향이 큰 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants)의 엄격한 관리가 요구된다(국립환경과학원, 2006). 현재 국내 대기환경보전법에서는 특정대기유해물질로 35종을 지정('05. 10월 지정된 10종은 '08년 11월부터 시행)하여 관리하고 있으나 외국에 비해 그 숫자가 매우 적어(미국 188종, 독일 174종, 일본 234종) 미규제 물질들의 위해도 및 건강피해 정도, 배출량 등의 자료에 근거하여 규제대상물질을 추가, 확대하려는 계획을 추진하고 있다.

화학물질 배출로 인한 대표적인 재해사건은 1984년 인도 보팔의 살충제 공장에서 methyl isocyanate가 누출된 사건으로 약 4,000명이 사망하고 200,000명 이상이 부상당한 바 있다(원경미 등, 2006). HAPs(Hazardous Air Pollutants)는 일반적으로 화학공장, 발전소 등과 같은 고정오염원과 자동차 등의 이동오염원에서 배출되며, 누출사고 및 산불발생도 HAPs의 주요 배출원이 된다. 또한 각 개별 업종의 HAPs 배출기여도는 낮으나 동종 업종 전체 업소의 배출량 차원에서는 HAPs의 주요 오염원으로 구분될 수 있는 고정오염원(세탁소, 자동차 정비업소 등)은 면오염원으로 분류된다. 1996년 미국의 HAPs 배출량 조사결과(NTRI)에 의하면 고정오염원과 이동오염원이 전체 배출량의 50%씩을 차지하고 있으며 고정오염원 중 다량 배출원과 면오염원, 기타(산불 등)가 전체 배출량의 26% 및 24%를 구성하고 있다. HAPs는 고정오염원, 이동오염원 및 면오염원에 따라 배출특성이 다르며 이러한 각 오염원별 특성을 고려하여 HAPs를 종합적으로 관리할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 유해화학물질인 HAPs의 효율적인 관리와 저감대책 수립에 필요한 기초자료 생성을 위해 고정오염원 중 폐기물소각시설을 대상으로 국내 특정대기유해물질 35종에 포함된 다환방향족탄화수소류(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons), 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈과 미국의 HAPs 관리물질인 베릴륨, 코발트, 아연의 배출특성을 소각되는 폐기물의 종류(지정폐기물 소각시설, 감염성폐기물 소각시설, 생활폐기물 소각시설)에 따라 조사하여 각 시설에서 배출되고 있는 HAPs 배출특성을 규명하고자 하였다.

**Table 1. Characteristics of selected waste incinerators for field test.**

	Emissions	Capacity (ton/day)	Control devices
Cement kiln	A1	768	BF
	A2	2.4	BF+SNCR
Hazardous waste	B1	40.8	Cyclone+DR+BF
	B2	150	ESP+VS+WS+SCR
	B3	33.6	SDR+Cyclone+BF
Infective waste	C1	45	SDR+DR+BF
	C2	21.6	Cyclone+VS+Bag filter
Municipal waste	D1	279.6	SNCR+SDR+CR+BF
	D2	16	SDS+BF

\*BF: Bag filter, SNCR: Selective Non Catalytic Reduction, ESP: Electrostatic Precipitation, SCR: Selective Catalytic Reduction, CR: Carbon Rejection, SDS: Semi dry scrubber, VS: Venturi Scrubber

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구대상시설 및 측정항목

본 연구의 대상시설은 폐기물 소각시설 중 지정폐기물 소각업체 3개 시설과 폐기물 소각량이 적지만 일부가 소각시설로 지정되어 있는 시멘트 소성로 2개 시설, 생활폐기물 소각시설 2개 시설, 감염성폐기물 소각시설 2개 시설, 총 9개의 소각시설이다.

대상 소각시설에 설치되어 있는 방지시설은 입자상 물질을 제어하기 위하여 대부분의 소각시설에서 여과 집진기를 설치하여 운영하고 있었으며, 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>) 등의 가스상 물질들을 제어하기 위해 습식세정시설과 반건식·건식 반응탑, 황성탄 분사시설 등을 설치하여 가동하고 있었다. 대상 소각시설의 소각용량, 방지시설, 보조연료의 일반현황 자료를 표 1에 나타내었다. 일반현황에 대한 자료는 현장 측정 사업장을 방문하여 설문한 자료를 이용하였다.

측정항목은 폐기물 소각시설의 유해화학물질 배출 실태를 파악하기 위하여 아연 등 8종의 중금속 물질, Benzo(a)anthracene을 포함한 16종의 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)로 하였다. 다환방향족탄화수소류와 중금속류 8종 중 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈은 우리나라 특정대기유해물질 35종에 포함되어 있으며 베릴륨, 코발트, 아연은 미국의 HAPs 관리물질로 분류되어 있다. 우리나라에서는 베릴륨과 코발트를 특정대기유해물질 선정

을 위한 우선관리대상물질로 지정하여 현재 배출특성을 조사하고 있으며, 아연은 대기오염물질 61종에 포함하여 관리하고 있다.

## 2. 2 시료채취 및 분석

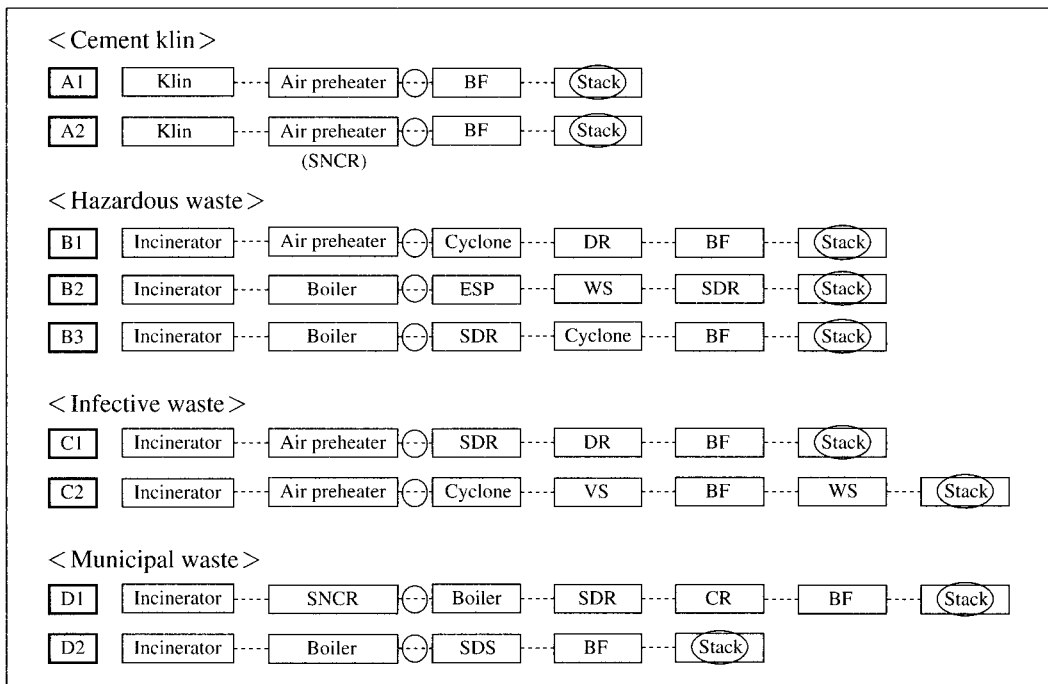
### 2. 2. 1 시료채취

각각의 대상 물질에 대해서 방지시설 전단 및 후

**Table 2. Target substances for field test.**

Metals	Compounds	Numbers
	Cd, Pb, Cr, Ni, Be, Co, Zn, Cu	8
PAHs	Naphthalene, Acenaphthylene, Acenaphthene, Fluorene, Anthracene, Phenanthrene, Fluoranthene, Pyrene (PYR), Benzo(a)anthracene, Chrysene, Benzo(b)fluoranthene, Benzo(k)fluoranthene, Benzo(a)pyrene, Indeno(1, 2, 3-cd)pyrene, Dibenz(a, h)anthracene, Benzo(g, h, i)perylene	16

단에서 시료를 채취하였으며 방지시설 후단의 채취 지점은 모든 소각시설의 최종 배출시설인 굴뚝으로 하였다. 방지시설 전단은 각 소각시설별 공정의 차이로 동일한 지점에서 측정을 하지 못하였으나 대부분 대상 시설의 보일러 후단이나 열교환장치 후단을 측정지점으로 하였다. 각 소각시설의 측정지점을 그림 1에 나타내었다. 배출시설에서 배출되는 중금속 성분은 입자상오염물질과 함께 배출되는 특성이 있기 때문에 대기오염공정시험방법 중 먼지 시험방법에 따라 반자동식 시료채취기(CAE, M-5 METER, USA)로 먼지 시료채취 방법과 동일하게 등속흡인으로 채취하였다. 시료채취에 사용되어진 원통형 여과지(Whatman 2814432)는 110±5°C(배출가스 온도가 110±5°C 이상일 경우 배출가스온도와 동일)에서 비결합 수분을 완전히 제거하고 테시케이터에서 실온으로 방냉한 후 무게를 측정하여 중금속 분석용으로 사용하였다. 반휘발성물질인 PAHs는 흡착제와 흡수액(hexane 포화중류수)을 이용하여 가스상 PAHs를 채취하였고 입자상 PAHs는 먼지시료 채취방법과 동



\* ○ : Sampling site

**Fig. 1. Field test point at the front of control device.**

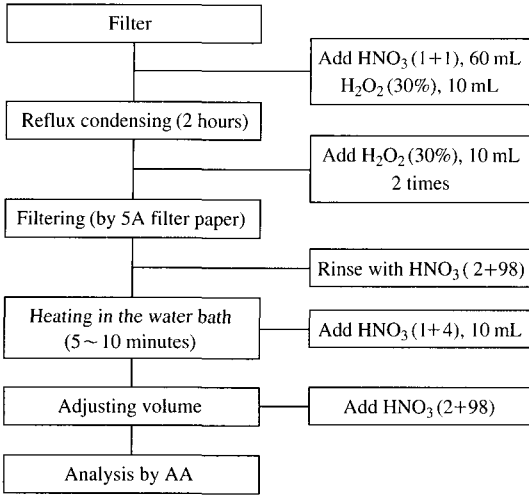


Fig. 2. Heavy metals sample preparation procedure.

일하게 등속흡인으로 채취하였다. 흡착제는 Amberlite XAD-2수지 (Supelco 1-0357)를 사용하였고 사용 전에 아세톤+증류수(1+1), 아세톤, 톨루엔(2회), 아세톤을 이용하여 각각 30분간 초음파 세정 후 30°C 이하의 진공건조기에서 건조한 후 사용하였다. 입자상 PAHs를 포집하기 위한 원통형여지는 유리섬유재질의 Whatman 2814432을 사용하였고 850°C에서 2시간 작열한 후 아세톤 및 톨루엔으로 각각 30분간 초음파 세정한 다음 진공건조 후 사용하였다.

2. 2. 2 중금속의 분석

중금속 분석은 대부분 대기오염공정시험법(환경부, 2002)을 준수하였고 분석시료 전처리에는 이산화납 등의 난용성 물질의 분해를 위해 질산-과산화수소수법에 따랐다(그림 2). 중금속 추출을 위하여 사용한 시약은 유해중금속분석용 등급으로 HNO<sub>3</sub>와 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(30%) 등의 시약을 사용하였으며 전처리된 분석용 시료는 원자흡광광도계(Spectra AA, Varian, USA)를 사용하여 분석하였고, 분석조건은 표 3에 나타내었다.

2. 2. 3 PAHs의 분석

소각시설의 방지시설 전단과 후단에서 포집한 원통형 여지, XAD 수지를 각각 US EPA TO-13A (US EPA, 1999)에 준하여 전처리하였다. 흡수액은 액량의 10배에 해당하는 Hexane으로 두 번 액-액 추출하였으며 XAD 수지와 원통형 여지는 Dichloromethane

Table 3. AA condition for heavy metals.

Condition for AA-GTA	
-Instrument: Spectra AA	-Slit width: 0.1 ~ 1.0 (nm)
-Gas supplies: 3 L/min (acetylene)	-Wavelength: 180 ~ 990 (nm)
-Lamp current: EDL ~ 20 (mA)	-Tube: Coated GTA
	-Temperature: 40 ~ 3,000°C

Table 4. GC/MSD condition for PAHs.

Parameter	Condition
GC model	HP 6890
Column	DB-5MS (60 m × 0.32 mm × 0.25 μm)
Inj. temp.	280°C
Inj. mode	Splitless/split (closed 3 min)
Oven temp.	50°C to 100°C at 20°C/min, then 310°C (4 min) at 3°C/min
MS model	HP 5973
Ionization mode	EI
Ionization energy	70 eV
MS Source temp.	230°C
Ion mode	SIM

과 Hexane의 혼합용매(50 : 50)로 24시간 이상(4 cycles/hr 이상) 속실펀 추출하였다. 추출액은 회전 농축기를 사용하여 2~3 mL로 농축하였으며 Hexane으로 액-액 추출한 것과 XAD 수지의 추출액은 합하여 기체상 시료로 하였다. 시료의 정제는 실리카겔 컬럼 크로마토그래피를 사용하여 정제하였다. 정제컬럼을 통과한 유출액은 최종적으로 질소 농축하여 1 mL로 농축한 후 표 4의 조건으로 GC/MSD를 이용하여 분석하였다. 표준물질은 16가지의 PAHs가 포함된 혼합표준용액(supelco-4S8905, USA)을 사용하였으며 내부표준물질은 naphthalene-d<sub>10</sub>, acenaphthene-d<sub>10</sub>, phenanthrene-d<sub>10</sub>, chrysene-d<sub>10</sub>, perylene-d<sub>10</sub>가 용해된 혼합시약(supelco-48902, USA)을 사용하였다. 검출한계는 최저농도 표준물질을 7회 분석 한 후 얻어진 표준편차의 3배 값으로 하였으며(검출한계 범위: 0.03~0.95 ppb) 시료분석에 있어서는 첨가된 내부표준물질의 회수율이 75% 이상일 때 그 분석 데이터를 인정하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 중금속류의 배출특성

본 연구를 통하여 나타난 시멘트 소성로와 지평폐

**Table 5. Average heavy metal concentration in the inlet and outlet flue gas. (Unit: mg/m<sup>3</sup>)**

Types	Emissions	Sampling site	Zn	Pb	Cu	Cd	Co	Ni	Be	Cr
Cement kiln	A1	Inlet	12.198	6.074	0.984	0.143	0.383	0.673	0.049	1.303
		Outlet	0.005	0.002	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
	A2	Inlet	18.561	30.605	3.447	0.637	0.597	0.991	0.108	1.547
		Outlet	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.004	N.D	0.006
Hazardous waste	B1	Inlet	146.092	239.111	22.580	22.094	3.219	2.815	0.007	2.596
		Outlet	0.112	N.D	0.013	N.D	0.001	0.084	N.D	0.038
	B2	Inlet	110.295	3.056	37.414	0.128	0.241	0.520	N.D	0.706
		Outlet	0.185	0.019	0.034	0.002	0.012	0.020	N.D	0.002
	B3	Inlet	42.190	12.861	34.869	0.348	0.014	0.140	N.D	0.029
		Outlet	0.027	0.012	0.109	0.004	0.002	0.014	N.D	0.007
Infective waste	C1	Inlet	92.139	2.118	6.625	0.174	0.010	0.022	N.D	0.022
		Outlet	0.005	N.D	N.D	N.D	0.002	N.D	N.D	N.D
	C2	Inlet	39.909	9.967	5.539	0.352	0.023	0.091	N.D	1.398
		Outlet	0.246	0.028	N.D	N.D	0.005	0.015	N.D	0.057
Municipal waste	D1	Inlet	9.803	3.483	10.683	0.238	0.021	0.129	N.D	0.065
		Outlet	0.006	N.D	N.D	N.D	0.001	N.D	N.D	N.D
	D2	Inlet	1.994	2.506	0.534	0.158	0.020	0.025	N.D	0.022
		Outlet	0.011	N.D	N.D	N.D	0.004	0.004	N.D	N.D

N.D : Not Detected.

기물 소각시설, 감염성폐기물 소각시설, 생활폐기물 소각시설에서의 카드뮴, 납, 크롬, 니켈, 베릴륨, 코발트, 구리, 아연 등 8종의 중금속류에 대한 방지시설 전·후단에서의 조사결과를 표 5에 나타내었다. 방지시설 전단에서의 농도를 살펴보면, 베릴륨의 경우 시멘트소성로 전단과 지정폐기물 소각시설인 B1에서만 미량 검출되었고 다른 시설에서는 전단에서 모두 불검출로 나타났다. 그리고 전체적으로 볼 때에 모든 소각시설의 전단에서 아연과 납, 구리가 비교적 높은 농도로 검출되었으며 특히, 지정폐기물 소각시설과 감염성폐기물 소각시설에서 높은 농도를 보였다. 방지시설을 거친 후단에서의 조사결과, 모든 소각시설에서 검출되어진 아연은 감염성폐기물소각시설인 C2에서의 농도가 0.246 mg/m<sup>3</sup>로 다른 소각시설에 비해 높은 값을 보였으나 배출허용기준을 만족하였으며, 그 외 배출허용기준이 있는 물질인 카드뮴, 납, 크롬, 니켈, 구리의 경우도 모든 시설에서 배출허용기준을 만족하는 것으로 나타났다. 구리와 카드뮴의 경우 지정폐기물 소각시설에서만 검출되었으며 검출범위는 각각 0.013~0.109, ND~0.004 mg/m<sup>3</sup>이었다. 베릴륨은 모든 시설에서 불검출로 나타났으며 납과 크롬은 생활폐기물 소각시설 2곳에서는 검출되

지 않았으나 다른 소각시설에서는 검출되는 것으로 나타났다. 전단에서 높은 농도로 검출되었던 중금속류가 후단에서 배출허용기준 미만으로 검출된 것은 대부분의 중금속들이 입자상 형태로 배출되는 물질들로서 제거효율은 입자상물질 제어시설과 밀접한 관계가 있기 때문에(김기현 등, 2003) 입자상물질을 제어하기 위하여 전기집진기나 여과집진기를 거치면서 제거되었기 때문이다. 측정결과 이 방지시설들의 집진효율은 95% 이상으로 나타났다. 또한 B1, B2, C1, C2, D1, D2 등 대부분의 소각시설에서 수분량이 14% 이상으로 높게 나타났는데 소각성분에도 수분이 많지만 B1, B2, C2의 경우에는 습식 방지시설을 설치하고 있어 이도 먼지 속에 있는 중금속의 농도를 제거하는데 기여한 것으로 사료된다.

모든 소각시설의 중금속 배출농도가 배출허용기준을 만족하는 것으로 나타났으나 폐기물의 종류에 따라 배출되는 중금속 성분이 다르므로 소형 소각로가 설치된 일부 사업장에서는 폐기물 선별 작업을 거치지 않고 일반폐기물과 지정폐기물을 혼합 소각하기도 하는데(정중현 등, 2003), 이 경우 일반폐기물과 지정폐기물을 혼합소각하지 않고 선별하는 작업이 필요할 것으로 사료된다.

**Table 6. Actual measurement data of PAHs concentrations.**

(Unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

PAHs	A1		A2		B1		B2		B3	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
NAP	341.177	17.547	100.581	16.565	12.881	1.957	1352.410	3.905	390.369	3.772
ACEN	0.089	0.075	0.085	0.099	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.071
ACE	0.089	0.017	0.085	0.038	0.031	0.010	N.D.	0.008	0.138	0.039
FL	0.312	0.070	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.160	0.008	0.276	0.086
PHEN	5.897	1.100	8.535	0.303	0.123	0.040	1.284	0.040	3.455	0.550
ANT	5.107	0.034	17.532	0.592	1.262	0.251	9.495	0.900	63.303	2.664
FLU	1.035	0.294	16.051	0.031	0.031	0.058	N.D.	0.008	0.138	0.063
PYR	0.445	0.358	18.057	0.033	0.031	N.D.	N.D.	0.016	0.829	0.039
BaA	0.045	N.D.	3.120	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.016	0.138	N.D.
CHR	0.134	0.005	3.669	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
BbF	0.100	N.D.	9.197	0.086	0.893	0.017	N.D.	0.064	1.520	0.063
BkF	0.946	N.D.	10.388	0.095	1.293	0.105	0.483	0.008	0.829	0.031
BaP	0.200	N.D.	6.582	0.320	1.108	0.083	N.D.	0.215	4.976	0.204
IcdP	N.D.	N.D.	6.519	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.008	N.D.	N.D.
DahA	N.D.	N.D.	0.128	0.002	0.062	N.D.	N.D.	0.016	N.D.	N.D.
BghiP	N.D.	N.D.	5.581	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.016	N.D.	N.D.
$\Sigma$ PAHs	356.576	19.500	208.110	18.164	18.715	2.521	1,365.832	5.228	468.971	7.582

PAHs	C1		C2		D1		D2	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
NAP	253.442	20.515	617.033	18.552	217.698	3.420	301.972	24.884
ACEN	1.187	0.042	0.137	0.071	N.D.	0.064	N.D.	N.D.
ACE	N.D.	0.013	0.141	0.043	0.077	0.036	N.D.	N.D.
FL	0.069	0.013	0.276	0.115	0.154	0.078	N.D.	0.013
PHEN	0.626	0.079	0.967	0.404	1.929	0.499	0.140	0.039
ANT	14.202	0.785	0.965	0.310	35.355	2.415	12.556	0.905
FLU	0.418	0.024	0.024	0.114	0.077	0.057	0.000	0.026
PYR	0.070	0.013	0.106	0.106	0.463	0.036	0.140	0.052
BaA	N.D.	0.013	0.046	0.011	0.077	N.D.	0.057	0.026
CHR	N.D.	N.D.	0.044	0.004	N.D.	N.D.	N.D.	0.026
BbF	0.836	0.065	0.041	0.008	0.850	0.057	0.367	0.091
BkF	N.D.	N.D.	0.911	0.105	0.463	0.028	N.D.	0.039
BaP	2.438	0.170	N.D.	0.003	2.779	0.185	1.933	0.207
IcdP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.057	0.039
DahA	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
BghiP	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.057	0.052
$\Sigma$ PAHs	274.288	21.732	622.691	19.846	260.922	6.875	319.279	26.399

N.D : Not Detected

\* NAP: Naphthalene, ACE: Acenaphthylene, ACEN: Acenaphthene, FL: Fluorene, ANT: Anthracene, PHEN: Phenanthrene, FLU: Fluoranthene, PYR: Pyrene, BaA: Benzo(a)anthracene, CHR: Chrysene, BbF: Benzo(b)fluoranthene, BkF: Benzo(k)fluoranthene, BaP: Benzo(a)pyrene, IcdP: Indeno(1, 2, 3-cd)pyrene, DahA: Dibenz(a, h)anthracene, BghiP: Benzo(g, h, i)perylene

### 3. 2 PAHs의 배출특성

#### 3. 2. 1 방지시설 전 · 후단에서의 PAHs 배출농도

본 연구를 통하여 나타난 폐기물 소각시설에서 배출되는 EPA 우선 다환방향족탄화수소(PAHs) 16종의 농도조사 결과를 표 6에 제시하였다. PAHs 물질

별로 발생특성을 보면 모든 배출시설에서 naphthalene이 PAHs의 90% 이상을 차지하고 있다. 이는 naphthalene이 여러 개의 벤젠 고리를 가지는 PAHs 중에서 가장 기본적인 화학구조를 가지고 있기 때문이며 조사 대상 물질 중 벤젠 고리가 4개 또는 5개 이고, 그 구조가 구모양에 가까운 PAHs일수록 그 배

**Table 7. Mass distribution of PAH-homologue in the stack flue gas of various industrial process (%).**

PAHs	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	D1	D2
2-ring	90.0	91.2	77.6	74.7	49.4	94.4	93.5	49.7	94.3
3-ring	1.4	1.1	0.4	1.3	6.9	1.0	1.0	6.2	1.0
4-ring	45.6	5.7	15.0	3.1	1.5	5.1	23.3	1.5	12.8
5-ring	-	8.9	1.4	9.4	20.2	4.6	0.5	18.0	2.9
6-ring	-	-	-	0.3	-	-	-	-	1.8
LMW	91.4	92.3	78.0	76.0	56.3	95.4	94.5	56.0	95.3
MMW	45.6	5.7	15.0	3.1	1.5	5.1	23.3	1.5	12.8
HMW	-	8.9	1.4	9.8	20.2	4.6	0.5	18.0	4.7

출 농도가 낮은 것으로 나타났다(백성욱 등, 1999). 이는 분자량이 크고 그 구조가 안정적일수록 대부분 먼지에 흡착되어 배출되는데, 소각시설에 먼지제어를 위해 설치된 방지시설에 의해 상당량이 제거되기 때문인 것으로 사료된다.

방지시설 전단과 후단의 PAHs 배출 농도를 살펴 보면, 전단에서는 지정폐기물 소각시설인 B2가 총 PAHs의 농도 합이 1,365.832 µg/m<sup>3</sup>로 가장 높게 나타났으며 범위는 208.110~1,365.832 µg/m<sup>3</sup>였고 후단은 2.521~26.399 µg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타내어 모든 배출시설에서 대부분 물질이 후단에서의 농도가 훨씬 낮은 것으로 나타났다. 미국의 경우 150 ton/day 용량의 생활폐기물을 소각하는 유동상 소각로의 후단에서 배출되는 PAHs 농도가 3,656~8,354 µg/m<sup>3</sup>로 보고되어져 있는데(Roland *et al.*, 2001) 이번 조사의 생활폐기물 소각시설은 이보다 훨씬 낮은 수준으로 배출되고 있었다. 주목적이 먼지 제거와 산성가스 제어에 있는 소각시설의 방지시설이 먼지에 흡착된 PAHs나 가스상으로 배출되는 PAHs의 제거에도 어느 정도 효과가 있는 것으로 보여 지나, 일부 물질은 후단에서만 나타나는 것으로 보아 소각과정에서 비의도적으로 생성된 것으로 판단된다.

발암 가능성이 높아 International Agency for Research on Cancer (IARC)에서 probable (2A) or possible (2B)로 지정되어 있는 benzo(a)pyrene, benzo(k)flouranthene, benzo(b)flouranthene의 농도가 많은 배출시설에서 검출되었는데 저분자 구조로 기체상으로 존재하는 PAHs의 농도보다는 훨씬 작은 수치이나 그 유해성을 고려한다면 앞으로 체계적이고 집중적인 조사가 필요하다.

PAHs profile은 배출원에 따라 구별되어 PAHs의 배출원을 추적하는데 사용되어지는데 (Hsi-Hsien *et*

*al.*, 1998) 9개 소각 시설의 후단에서 배출되는 PAHs profile의 특성을 조사하기 위해 고리수 별로 농도를 합하여 표 7에 나타내었다. LMW (Low Molecular Weight)은 고리수가 2~3개인 PAHs의 합이며 MMW (Middle Molecular Weight)은 4개, HMW (High Molecular Weight)은 고리수 5~6개의 합이다. 대부분의 소각시설은 고리수가 2개인 PAHs가 주로 높은 비율로 존재하였으나 지정폐기물을 소각하는 B1, B2, B3 소각시설과 생활폐기물 소각시설인 D1은 다른 시설에 비해 고리수가 2개인 PAHs가 차지하는 비율이 다른 시설들에 비해 상대적으로 적게 나타났다. 또한 본 연구에서 조사한 소각시설에서의 PAHs profile은 다른 다양한 산업시설에서의 PAHs profile (Hsi-Hsien *et al.*, 1998)에 비해 저분자의 PAHs가 고분자 PAHs에 비해 높은 비율로 존재함을 알 수 있었다.

### 3.2.2 방지시설 전·후단에서의 PAHs 가스상/입자상 분포

PAHs는 고리수에 따라서 용해성, 입자에 대한 흡착성 등이 달라진다. 고리수가 증가할수록 물에 대한 용해도는 떨어지며 지용성물질에 대한 흡착성은 증가하게 된다. 가스-입자상 분포는 구체적으로 온도 함수인 PAHs의 증기압, 비표면적이 큰 미세입자의 양, 그리고 PAHs 각각의 입자상 유기물에 대한 친화력과 같은 요인에 의해 결정된다(Chun-Teh *et al.*, 2001; 백성욱 등, 1999). 이러한 PAHs 특성을 고려하여 소각시설 전·후단에서 가스상과 입자상으로 나누어 시료를 채취한 후 그 결과를 소각시설별로 그림 3에 나타내었다. 전단에서는 대부분의 PAHs가 소각로의 높은 온도로 인해 가스상으로 배출되고 있었으며(백성욱 등, 1998b) 후단의 경우도 전단에 비해 전반적으로 가스상에 분포하는 비율이 다소 줄었지

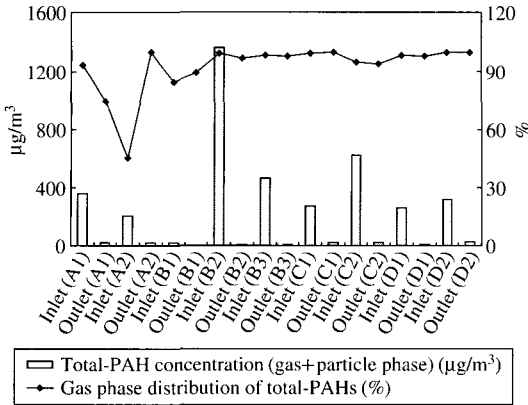


Fig. 3. The concentration, phase distribution and composition of total PAHs.

만 대부분의 PAHs가 가스상에 분포하고 있었다. 이는 입자상 PAHs가 고효율의 집진장치를 통과하면서 먼지에 흡착되어 제거되었기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결 론

국내 폐기물 소각시설을 대상으로 중금속류, 다환방향족탄화수소류 등 유해대기오염물질 배출특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 카드뮴, 납, 크롬, 니켈, 베릴륨, 코발트, 아연, 구리 등 8종의 중금속 물질 조사결과 아연이 가장 높은 값을 보였으며, 배출허용기준이 있는 물질인 카드뮴, 납, 크롬, 구리, 니켈, 아연의 배출 농도는 모든 시설에서 배출허용기준보다 낮은 농도로 배출하고 있는 것으로 조사되었다. 방지시설 전단에서의 중금속 측정농도를 보면, 시멘트 소성로에서 아연과 납이 높은 농도로 조사되었으며 지정폐기물 소각시설에서는 아연과 구리가 각각 높은 농도로 조사되었다. 그리고 베릴륨은 시멘트 소성로를 제외한 모든 시설의 전·후단에서 불검출로 나타났다.

다환방향족탄화수소의 농도 조사결과, 전체 농도가 가스상으로 분포하는 PAHs에 의존적이었으며, 특히, PAHs 중 분자 구조가 가장 간단한 naphthalene의 농도가 585.22~220.88 µg/m³였고, 후단에서는 20.56~3.21 µg/m³로 가장 높게 나타났다. 입자상에 분포하는 PAHs는 배출량이 가스상에 존재하는 PAHs보다 작았다. 또한 PAHs는 방지시설을 거치면서 전단과

다른 배출패턴을 보였다. 이는 연소과정에서 생성된 PAHs가 냉각시설, 방지시설 등을 거치면서 변화되었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 소각과정에서 새로이 생성되는 PAHs와 같은 유기물질에 대해서는 폐기물 소각시설에 대한 정확한 규명을 통하여 일반 대기오염물질의 저감을 위한 방지시설 뿐만 아니라 미규제오염물질에 대한 적절한 대처방안이 마련되어야 한다고 판단된다.

#### 참 고 문 헌

국립환경과학원 (2006) 유해대기오염물질 배출원별 시설 및 관리기준 설정연구 (II).

김기현, 김삼권, 송금주, 서용철 (2003) 도시폐기물 소각시설에서의 금속배출특성 연구, 한국연소학회지, 8(1), 1-8.

백성욱, 황승만, 박상곤, 전선주, 김병주, 허귀석 (1999) 흡착포집 및 열탈착/GC 분석에 의한 공기 중 휘발성 유기화합물의 측정방법론 평가, 한국대기환경학회지, 15(2), 121-138.

백성욱, 최진수 (1998b) 대기 중 다환방향족탄화수소의 기체-입자상 농도분포에 미치는 주변 온도의 영향, 한국대기보전학회지, 14(2), 117-131.

원경미, 이화운, 지효은, 김철희, 송창근 (2006) 유해대기오염물질의 난류확산 수치 모의에서 침적항과 부력항 추가에 따른 효과, 한국대기환경학회지, 22(1), 73-84.

정종현, 손병현, 정덕영, 김현규, 이희희 (2003) 폐기물 소각로의 유해 대기오염 물질 배출 특성, 한국환경위생학회지, 29(5), 17-26.

환경부 (2002) 대기오염공정시험방법.

US EPA (1999) Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in ambient air using GC/MS, EPA TO 13-A, 13A1-13A42.

Chun-Teh, L., Z. Huan-Kai, H. Lien-Te, L. Wen-Jhy, and T. meng-Chun (2001) PAH emission from the incineration of three plastic wastes, Environment International, 27, 61-67.

Hsi-Hsien, Y., L. Wen-Jhy, and C. Shui-Jen (1998) PAH emission from various industrial stacks, Journal of Hazardous Materials, 60, 159-174.

Roland, W., I. Fukuya, I. Takashi, T. Masao, S. Takeshi, and S. Masaki (2001) Formation of PCDF, PCDD, PCB, and PCN in de novo synthesis from PAH: Mechanistic aspects and correlation to fluidizes bed incinerators, Chemosphere, 44, 1429-1438.