

焼却施設の 다이옥신 및 主要 大氣汚染物質 排出特性

Emission characteristic of dioxins/furans and major air pollutants
from incinerators

金 三 權

國立環境研究院 廢棄物研究部 廢棄物工學科

I. 序 論

지난 몇 년간 정부에서는 소각시설에서 배출되는 다이옥신 등 대기오염물질을 저감하기 위하여 많은 노력을 기울여 왔다. 먼저, '97년 7월 17일, 폐기물관리법 시행규칙을 개정하여 생활폐기물 소각시설에 대한 다이옥신 규제기준¹⁾을 '99년 7월 1일부터 기존 소각시설에 대해서는 0.5ng-TEQ/Nm³을 신설 소각시설에 대해서는 0.1ng-TEQ/Nm³으로 제정했으며, 또한 소각시설의 광역화, 신규 소각시설의 설치비용 및 기존 소각설비의 개·보수비용의 일부에 대한 국고지원, 소각처리 기술지원단에 의한 기술평가 및 자문 활동, 다이옥신 공인측정·분석기관의 지정·고시, 생활폐기물 소각시설 설치·운영지침의 제정 등 짧은 기간임에도 불구하고 소각시설에서 배출되는 다이옥신을 저감하기 위하여 각종 정책이나 제도를 시행 또는 개선해 왔다.

그러나, 이와 같은 노력은 주로 대형 생활폐기물 소각시설을 대상으로 이루어져 왔고, 전체 소각시설의 약 70%를 차지하고 있는 사업장 폐기물 소각시설이나 전체 소각시설의 약 99%를 차지하는 중·소형 소각시설에 대해서는 연구개발이나 기술적·정책적 지원 등이 상대적으로 소홀하였으며, 또한 소각시설에 대한 대기오염물질의 배출규제 항목은 많으나 일부 규제기준이 구미 선진국에 비해 완화되어 있는 것이 사실이다. 특히, '95년 1월 1일부터 쓰레기 종량제가 실시됨에 따라 발생원 현지에서 폐기물의 감량을 목적으로 중·소형 소각시설이 급격하게 증가하여, 2000년 6월말 현재 가동중인 소각시설은 총 12,338개 시설에 이르고 있다. 이중 시간당 처리규모가 200kg 미만인 소형 소각시설은 쓰레기종량제 실시이후 매년 약 5,000여 개씩 급격히 증가하여 전체 소각시설수의 96%인 11,814개 시설을 차지하고 있으나, 소각량에 대한 기여율은 전체 소각량에 9.9%²⁾에 불과하고 소각로 및 대기오염 방지시설 자체의 구조 및 성능상의 문제점³⁾과 더불어 '99년 10월 대기환경보전법이 개정되기 전까지는 대기오염물질 배출시설로 규제를 받아오지 않아 오염물질관리 측면에서도 많은 문제점을 드러내 온 결과, 소각시설 자체가 국민적 혐오시

설로 인식되는 등 소각정책에 대한 국민적 인식은 매우 부정적인 것이었다.

이에 따라 정부에서는 2001년 1월 1일부터 폐기물관리법을 개정하여 중·대형규모 이상의 모든 소각시설에 대하여 다이옥신 규제기준을 제정하여 향후 이를 단계적으로 강화해 나갈 방침이며, 소형 소각시설에 대해서는 2005년 1월 1일부터 대기환경보전법으로 먼지 및 일산화탄소 등의 배출기준을 강화하여 다이옥신 등 대기오염물질의 배출량을 간접적으로 줄여나갈 계획을 세우고 있다. 이와 같은 정부의 적극적인 소각시설 관리정책에 따라 향후 기존 소각시설들은 다이옥신 및 대기오염물질의 배출량은 급격히 저감될 것으로 보이며, 또한 규제기준의 달성을 위한 소각시설 및 방지시설의 효율적인 운전 및 개·보수 등 기술적 대책 마련이 필요한 시점이다.

따라서, 본고에서는 우리나라 폐기물의 발생 및 처리현황, 규제기준 등 소각시설의 관리현황을 살펴보고, 최근 2~3년 동안 국립환경연구원에서 발표한 다이옥신 및 대기오염물질의 배출실태를 토대로 소각시설의 주요 쟁점중의 하나인 다이옥신 및 주요 대기오염물질의 배출특성에 대해서 살펴보고자 한다.

II. 廢棄物 燒却施設 管理現況

1. 廢棄物 發生 및 處理現況

우리나라 폐기물의 총 발생량은 '95년 148천톤/일을 기준으로 해마다 8~20%씩 증가하여 '99년에는 219천톤/일로 나타나, 하루에 약 22만톤 정도의 폐기물이 발생되고 있는 것으로 나타났다 (표 1)^{4,5)}. 생활폐기물의 경우는 '96년을 기점으로 감소추세에 들어서 '99년 말 현재 하루에 약 46천톤이 발생되고 있으며, 1인당 폐기물의 발생량은 '95년 1.1 kg/人·日에서 '99년 0.97 kg/人·日로 매년 감소되고 있는 추세를 나타내고 있다. 사업장 폐기물의 경우 '96년 대비 '97년 및 '98년에는 약간 감소하였으나 '99년에는 '96년 대비 약 8.4%가 증가하여 1일 103천톤이 발생되고 있으며, 향후 경제규모의 확대에 따라 사업장폐기물의 발생량은 증가될 것으로 보이며, 지정폐기물 또한 '95년 기준으로 매년 16~42%씩 증가하여 '99년에는 1일 약 7.5천톤이 발생되고 있다.

한편, 폐기물 총발생량 중에서 생활폐기물이 차지하는 비율은 '95년 약 32%에서 '99년에는 약 21%를 차지함으로써, 폐기물 발생량 중에서 생활폐기물이 차지하는 비율은 매년 약 2~4%정도 감소하는 반면, 사업장 폐기물 등 산업활동과 관련하여 배출되는 폐기물의 발생량이 증가하고 있는 것이 주요 특징중의 하나다.

표 1. 연도별 폐기물 발생현황

(단위 : 톤/일)

폐기물 종류	'95	'96	'97	'98	'99
계	148,041	180,572	195,271	190,255	219,216
생활 (kg/人·日)	47,774 (1.1)	49,925 (1.1)	47,895 (1.05)	44,583 (0.96)	45,614 (0.97)
사업장	95,823	96,984	93,528	92,713	103,893
건설 ¹	-	28,425	47,774	47,693	62,221
지정 ²	4,444 (1,622×10 ³)	5,238 (1,912×10 ³)	6,074 (2,217×10 ³)	5,266 (1,922×10 ³)	7,488 (2,733×10 ³)

비고 1: '95년까지는 사업장폐기물에 포함

비고 2: ()안은 연간 발생량(톤/년)

한편, 연도별 폐기물 처리현황을 살펴보면 표 2에서 보는 바와 같이, 생활 폐기물의 경우 매립처분 비율이 '95년 72%에서 '99년 52%로 매년 낮아지고 있는 반면, 소각처리비율은 '95년 4%에서 '99년 10%로 매년 높아지고 있는 추세이며 재활용율은 '95년 24%에서 '99년 38%로 높아지고 있는 추세이다. 사업장폐기물의 경우 매립처분 비율은 '95년 33%에서 '99년 19%로 매년 조금씩 감소하는 경향을 나타내고 있고, 소각처리 비율은 발생량 대비 5.8~6.1%의 일정 범위를 유지하고 있으나 재활용 비율은 '95년 61.2%에서 '99년 73.6%의 높은 비율을 점하며 매년 꾸준히 증가하고 있는 경향을 나타내고 있다. 이와 같이 매립처분 비율이 조금씩 감소하고 소각 및 재활용 비율이 증가하는 이유로는, 환경부의 폐기물 관리정책의 우선순위가 발생의 최소화, 재활용, 적정 처리, 안전 처분의 順으로 이루어지고 있기 때문으로 판단된다.

표 2. 연도별 폐기물 처리현황

(단위 : 톤/일)

년도	구분	계	매립	소각	재활용	해양투기	기타
'95	계	148,041 (100)	65,968 (44.6)	8,303 (5.6)	72,375 (48.8)	699 (0.5)	696 (0.5)
	생활	47,774 (100)	34,546 (72.3)	1,922 (4.0)	11,306 (23.7)		
	사업장	95,823 (100)	31,203 (32.6)	5,691 (5.9)	58,929 (61.5)		
	건설	-	-	-	-		
	지정	4,444 (100)	219 (4.9)	690 (15.5)	2,140 (48.2)	699 (15.7)	696 (15.7)
'96	계	180,573 (100)	70,227 (38.9)	9,933 (5.5)	98,691 (54.7)	565 (0.3)	1,157 (0.6)
	생활	49,925 (100)	34,116 (68.3)	2,725 (5.5)	13,084 (26.2)		
	사업장	96,984 (100)	24,743 (25.5)	5,655 (5.8)	66,586 (68.7)		
	건설	28,425 (100)	10,988 (38.7)	848 (2.9)	16,589 (58.4)		
	지정	5,239 (100)	380 (7.3)	705 (13.5)	2,432 (46.4)	565 (10.8)	1,157 (22.0)
'97	계	195,275 (100)	74,652 (38.2)	11,366 (5.8)	107,957 (55.3)	638 (0.3)	662 (0.4)
	생활	47,895 (100)	30,579 (63.9)	3,409 (7.1)	13,907 (29.0)		
	사업장	93,528 (100)	33,733 (36.1)	5,427 (5.8)	54,368 (58.1)		
	건설	47,777 (100)	9,747 (20.4)	1,457 (3.1)	36,573 (76.5)		
	지정	6,075 (100)	593 (9.7)	1,073 (17.7)	3,109 (51.2)	638 (10.5)	662 (10.9)
'98	계	190,255 (100)	61,826 (32.5)	10,413 (5.5)	111,917 (58.8)	5,267 (2.8)	832 (0.4)
	생활	44,583 (100)	25,074 (56.2)	3,943 (8.8)	15,566 (35.0)		
	사업장	92,713 (100)	29,175 (31.5)	5,367 (5.8)	53,955 (58.2)	4,216 (4.5)	
	건설	47,693 (100)	7,112 (14.9)	1,007 (2.1)	39,574 (83.0)		
	지정	5,266 (100)	465 (8.8)	96 (1.8)	2,822 (53.6)	1,051 (20.0)	832 (15.8)
'99	계	219,217 (100)	54,118 (24.7)	13,569 (6.2)	143,385 (65.4)	6,808 (3.1)	1,337 (0.6)
	생활	45,614 (100)	23,545 (51.6)	4,675 (10.2)	17,394 (38.2)		
	사업장	103,893 (100)	19,256 (18.5)	6,338 (6.1)	71,888 (69.2)	6,411 (6.2)	
	건설	62,221 (100)	10,600 (17.0)	1,278 (2.1)	50,343 (80.9)		
	지정	7,489 (100)	717 (9.6)	1,278 (17.0)	3,760 (50.2)	397 (5.3)	1,337 (17.9)

2. 焼却施設 設置現況

2000년 6월말 현재, 우리나라 소각시설은 표 3에서 보는 바와 같이 전국적으로 약 12,338개의 소각시설⁶⁾이 운영되고 있다. 소각시설의 년도별 설치 현황을 살펴보면, 신규 설치는 '95년~'97년 사이에 매년 2,013~3,362개씩 증가하였으나 '97년 3월 소형 소각시설 억제지침 시행 이후, '98년부터는 감소하기 시작하여 2000년에는 328개 시설만이 신규 설치된 것으로 나타났다. 소각시설을 폐기물의 종류별로 분류하면 사업장폐기물 소각시설은 표 4에서 보는 바와 같이 전체의 68.3%인 8,427개소 및 생활폐기물 소각시설이 전체의 31.7%인 3,911개소를 차지하고 있고, 소각시설의 규모별로는 소형 소각시설(200 kg/hr 미만)이 전체의 95.9%, 중형 소각시설(200 kg/hr~2 톤/hr)이 3.2%, 대형소각시설(2 톤/hr이상)이 0.9%로, 전체의 99.1%가 중·소형 소각시설이다.

표 3. 소각시설 년도별 설치현황

(단위 : 개소)

구 분	계	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	2000.6
계	12,338	14	70	113	351	2,013	3,199	3,362	1,854	1,034	328
생 활	3,911	1	6	12	71	723	1,174	1,137	490	231	66
사업장	8,427	13	64	101	280	1,290	2,025	2,225	1,364	803	262

비고: '98년 12월말 14,791개 시설에서, 2000년 6월말 현재 12,338개 시설로 2,453개 시설이 감소되었으며, '99년 이후 신규설치가 1,362개 시설이었으므로 3,815개 시설은 노후 등으로 폐쇄된 것으로 보임.

표 4. 소각시설 규모별 설치현황(2000년 6월말 현재)

(단위 : 개소)

구 분	계	소형소각시설			중형소각시설	대형소각시설	
		25 kg/hr 미만	25~100 kg/hr	100~200 kg/hr	200 kg/hr~2 ton/hr	2 ton/hr~4 ton/hr	4 ton/hr 이상
계 (비율)	12,338 (100.0)	1,041 (8.4)	10,554 (85.5)	246 (2.0)	394 (3.2)	56 (0.5)	47 (0.4)
		11,841 (95.9)			394 (3.2)	103 (0.9)	
생 활	3,911 (31.7)	203	3,520	106	65	2	15
		3,829			65	17	
사업장	8,427 (68.3)	838	7,034	140	329	54	32
		8,012			329	86	

비고: '99. 8. 9 폐기물관리법 개정으로 시간당 25kg미만의 소각시설은 소각자체를 금하고 있음.

특히, 시간당 처리규모가 200kg 미만인 소형 소각시설은 '95년 1월 1일 쓰레기종량제 실시이후 매년 약 5,000여 개씩 설치되어 전체 소각시설수의 96%인 11,841개소를 차지하고 있으나, 소각 처리량에 대한 기여율은 표 5에서 보는 바와 같이 전체 소각 처리량의 10%에 불과²⁾한 실정이다. 이와 같이 소형 소각시설이 증가하게 된 이유로는 크게 두 가지를 들 수 있는데, 첫째는 쓰레기종량제 실시에 따라 발생원에서 폐기물을 감량화시켜 배출할 목적으로 소형 소각시설을 설치하게 되었고, 둘째는 '99년 10월 대기환경보전법을 개정하기 전까지는 시간당 100kg미만의 소형소각시설은 대기오염물질 배출시설로 규제를 받지 않았던 것이 주요 원인이라 판단된다³⁾.

또한, 소각시설의 지역별 설치 현황을 살펴보면, 서울시에서 180개 시설 및 경기도에서 4,016개 시설, 인천시에서 955개 시설, 경인환경관리청에서 80개 시설을 설치승인(신고)한 것으로 나타나, 전체의 42.4%를 차지하는 5,231개 소각시설이 수도권 일대에 설치되어 있는 것으로 보고되고 있다⁷⁾.

표 5. 소각량에 의한 소각시설의 구분(2000년 6월말 현재)

(단위 : 천톤/년)

구 분	계	소형소각시설			중형소각시설	대형소각시설	
		25 kg/hr 미만	25~100 kg/hr	100~200 kg/hr	200 kg/hr~ 2 ton/hr	2 ton/hr~ 4 ton/hr	4 ton/hr 이상
계 (비율)	3,309 (100.0)	8 (0.2)	283 (8.6)	37 (1.1)	646 (19.5)	513 (15.5)	1,822 (55.1)
		328 (9.9)			646 (19.5)	2,335 (70.6)	
생 활	889 (26.9)	1	89	19	50	3	727
		109			50	730	
사업장	2,420 (73.1)	7	194	18	596	510	1,095
		219			596	1,605	

비고 1: 소각량의 70.6%는 2톤/시간 이상의 大型燒却施設에서 소각되고 있음.

비고 2: '98년 12월말 기준 200kg/hr 미만의 소형소각시설은 16.5%에서 2000년 6월말 현재 9.9%로, 전체 소각량에 대한 기여율이 감소되었음.

3. 燒却施設 大氣汚染物質 規制現況

가. 다이옥신

대형 생활폐기물시설에 대해서는 1999년 7월 19일 폐기물관리법을 개정하여 표 6에서 보는 바와 같이 신설 소각시설은 0.1ng-TEQ/Nm³, 기존 소각시설에 대해서는 2003년 6월 30일까지는 0.5ng-TEQ/Nm³, 2003년 7월 1일 부터는 0.1ng-TEQ/Nm³을 적용하도록 되어 있다. 또한 2001년 1월 1일 폐기물관리법을 개정하여, 대형 생활폐기물 소각시설을 제외한 시간당 처리규모가 0.2톤 이상인 모든 중·대형 소각시설(497개 시설)에 대해서도 다이옥신 규제기준(표 7)이 마련되어 있으며, 시간당 200kg 미만의 소형 소각시설은 대기환경보전법으로 다이옥신의 배출량과 관계가 있는 먼지 및 일산화탄소의 배출기준을 2005년 1월 1일부터 강화하여 다이옥신 배출량을 줄여나갈 계획이다.

표 6. 대형 생활폐기물 소각시설 다이옥신 배출기준 (단위: ng-TEQ/Nm³)

구 분	신설 소각시설 ^{*1}	기존소각시설 ^{*2}	
		2003. 6. 30 까지	2003. 7. 1 이후
2톤/시간 이상	0.1	0.5	0.1

*1 : 환경부령 제27호 폐기물관리법시행규칙중개정령의 시행일(1997년 7월 19일) 당시 공사중이었거나 그 이후에 설치된 소각시설

*2 : 1997년 7월 19일 전에 설치된 시설

표 7. 우리나라 소각시설 다이옥신 배출기준 (단위: ng-TEQ/Nm³)

구 분	신설 소각시설	기존 소각시설	
		2001. 1. 1 - 2005. 12. 31 ^{*2}	2006. 1. 1 이후
4톤/시간 이상	0.1	20	1
2톤-4톤/시간	1	40	5
0.2톤-2톤/시간	5	40	10

*1 : 2001. 1. 1 이후에 법 제 26조제2항의 규정에 의하여 폐기물처리시설계획서의 적합통보를 받거나 제 18조제1항제5호의 규정에 의하여 변경허가를 받은 시설 또는 법 제 30조제2항의 규정에 의하여 설치승인을 얻거나 신고한 시설

*2 : 기존시설에 대한 배출기준은 2002. 12.31까지는 권고기준

나. 대기오염물질

소각시설에 대한 대기오염물질의 규제기준을 부록 1에 나타내었다. 지금까지 소각시설에 대한 대기오염물질의 규제기준은 규제항목의 종류는 많으나 규제기준이 선진국에 비하여 완화되어 있고 소각시설의 규모에 따라 규제기준이 차등화 되어 있지 않았으나, 2005년 1월 1일 부터는 소각시설의 규모에 따라 규제기준을 차등화 하여 규제기준을 대폭 강화시킴으로써 향후 소각시설에서 배출되는 대기오염물질의 배출량은 대폭 삭감될 것으로 전망된다.

그러나, 우리나라 소각시설에 대한 대기오염물질 규제항목은 표 8에서 보는 바와 같이 가스상 오염물질 15항목 및 입자상 오염물질 9항목으로 총 24항목이 규제되고 있어, 미국의 8항목 및 독일 13항목, 일본 5항목과 비교해보면 지나치게 많은 것이 사실이어서 실질적인 규제를 위해서는 우리나라 소각시설의 배출특성을 고려하여 규제항목을 합리적으로 조정할 필요가 있다. 또한, 폐기물 소각시설의 오염물질 배출특성을 고려하여, 배출규제 방식을 현행 순간치 규제방식에서 선진국과 같은 평균치 규제방식으로의 전환이 매우 시급하다.

표 8. 소각시설에 대한 국내·외 배출허용기준 항목

규 제 항 목	한 국	미 국	일 본	독 일
계	24	8	5	13
가스상오염물질	15	5	4	7
입자상오염물질	9	3	1	6

비고: 독일의 경우 합산처리되는 중금속류에 대해서는 국내기준항목중에 포함된 경우만을 단일항목으로 셈하였으며, 추가적으로 총 탄화수소류의 기준이 설정되어 있음.

4. 燒却施設 大氣汚染物質 排出實態

가. 다이옥신

우리나라 대형 생활폐기물 소각시설의 다이옥신 배출실태⁸⁾를 표 9에 나타내었다. 결과를 살펴보면 '97년 다이옥신 평균 배출농도는 5.87ng-TEQ/Nm³에서 '98년 평균 0.923ng-TEQ/Nm³, '99년 평균 0.051ng-TEQ/Nm³으로 매년 줄어들어, 현재 가동중인 대형 생활폐기물 소각시설의 대부분은 선진국 규제기준인 0.1ng-TEQ/Nm³이하로 다이옥신을 배출하고 있는 것으로 나타났다. 이와 같이 대형 생활폐기물 소각시설의 다이옥신 배

출농도가 급격히 줄어든 것은, 국민적 관심과 더불어 정부의 일관된 다이옥신 관리정책 및 노후 소각시설 및 방지시설의 개·보수, 優秀燃焼管理 등 '96년 다이옥신 파동 이후 꾸준한 정책적·기술적 대책마련의 결과라 생각된다.

그러나, 2000년 5월 국립환경연구원이 대형 생활폐기물 소각시설을 제외하고 사업장폐기물 및 중·소형 소각시설의 다이옥신 배출실태를 조사한 결과⁸⁾, 표 10에서 보는 바와 같이 소각시설 종류별로는 생활폐기물 소각시설이 평균 37 ng-TEQ/Nm³, 사업장 일반폐기물이 평균 소각시설 36 ng-TEQ/Nm³, 사업장 지정폐기물 소각시설이 평균 27 ng-TEQ/Nm³을 나타내고 있고, 소각시설 규모별로 소형 소각시설이 평균 66 ng-TEQ/Nm³, 중형 소각시설이 평균 12 ng-TEQ/Nm³, 대형 소각시설이 평균 22 ng-TEQ/Nm³을 나타내고 있어 소각시설의 종류 및 규모별 다이옥신 규제기준 및 관리대책 마련이 시급한 시점이다.

표 9. 대형 생활폐기물 소각시설의 연도별 다이옥신 배출실태

번호	구분	시설용량 (톤/일)	다이옥신 배출농도 (ng-TEQ/Nm ³)		
			'97	98	'99
	계	4,530	5.87	0.923	0.051
1	양천	400(200×2)	0.06	0.026	0.022
2	노원	800(400×2)	0.17	0.089	0.065
3	다대	200	0.32	0.058	0.089
4	해운대	400(200×2)	0.75	0.359	0.131
5	성서	200	13.46	1.942	-
		400(200×2)	-	-	0.040
6	평촌	200	0.99	0.434	0.076
7	일산	300	2.86	0.820	0.045
8	중동	200	23.12	4.548	0.005
9	성남(유동상)	100(50×2)	12.92	-	-
	성남(스토커)	600(300×2)	-	-	0.095
10	창원	200	1.27	0.029	0.024
11	대전	200	-	-	0.028
12	광명	150	-	-	0.025
13	용인	100	-	-	0.050
14	과천	80	-	-	0.024

표 10. 우리나라 소각시설 다이옥신 배출실태

(단위: ng-TEQ/Nm³)

구 분		0.2톤/시간 미만 (소형)	0.2~2톤/시간 (중형)	2톤/시간 이상 (대형)	평 균
생활폐기물		89.37	20.63	0.05	36.684
사업장 폐기물	일반	84.01	7.26	15.84	35.704
	지정	23.39	8.53	48.62	26.846
평 균		65.59	12.14	21.50	33.078

* 다이옥신 배출기준이 적용되는 생활폐기물 소각시설의 '99년 측정결과임.

나. 大氣汚染物質

표 11에 '98년 및 2000년에 국립환경연구원이 생활폐기물 소각시설 40개 시설 (대형 9개시설, 중형 17개시설, 소형 14개시설) 및 사업장폐기물 소각시설 12개 시설 등 총 52개 시설을 대상으로 25개 대기오염물질 규제항목에 대한 분석결과를 소각시설의 종류별 및 규모별로 평균하여 나타내었다.

(1) 가스상 오염물질

염화수소 및 일산화탄소 등 총 16개 항목을 조사한 결과, 대형 사업장 지정폐기물 소각시설에서 염화수소가 1,009ppm 및 브롬이 14ppm으로 현행 기준치 50ppm 및 5ppm을 각각 초과하는 것으로 나타났는데, 이는 사업장 지정폐기물 중 PVC전선 등 폐플라스틱 및 염소가 함유된 유기용매 등을 소각하는 과정에서 폐기물 자체가 함유하고 있는 염소 성분과 플라스틱 難燃劑로 사용되는 브롬계 화학물질에서 기인된 것으로 보인다. 또한 CO, HCl, SOx, NOx, Br을 제외한 Hg 및 As 등 기타물질의 배출농도는 불검출 또는 매우 낮은 농도로 배출되고 있는 것으로 조사되었다.

(2) 입자상 오염물질

먼지 및 납 등 입자상 오염물질 9개 항목을 조사한 결과, 많은 소각시설들에서 먼지가 기준을 초과하고 있고, 일부 시설에서는 중금속성분 중 Pb이 기준을 초과한 것으로 조사되었다. 특히 먼지는 중·대형 생활폐기물 소각시설과 대형 사업장 일반폐기물 소각시설을 제외한 대부분의 소각시설들이 기준치를 크게 상회하고 있어, 소각과정에서의 優秀燃燒管理 및 방지시설의 개·보수 등 기술적 대책 마련이 시급하다고 판단된다.

표 11. 소각시설 대기오염물질 측정결과

구 분	기준	생활폐기물 소각시설			사업장폐기물 소각시설					
					일 반			지 정		
		소형	중형	대형	소형	중형	대형	소형	중형	대형
가스상 오염물질(ppm)										
NH ₃	100	4.2	3.3	0.2	0.1	0.5	0.6	0.8	0.4	9.3
CO	600	516.0	276.0	24.8	363.0	25.7	348.7	241.0	434.1	73.9
HCl	50	23.4	9.1	6.7	6.3	13.3	3.3	0.8	2.6	1,008.9
Cl ₂	60	12.9	2.5	0.1	0.3	1.3	4.4	3.9	0.1	1.6
SO _x	300	47.5	52.8	3.0	12.3	6.7	32.9	1.7	1.4	0.5
NO _x	200	87.6	90.6	97.2	96.7	44.6	115.2	37.1	14.0	49.9
CS ₂	30	0.1	1.9	0.0	1.4	1.4	N.D	0.0	1.5	1.3
HCHO	20	0.1	0.1	0.0	2.6	0.0	0.3	0.1	0.0	0.8
H ₂ S	15	0.8	3.7	0.0	2.2	1.5	2.4	1.4	0.2	1.8
F	3	0.1	0.3	0.4	0.2	0.5	0.2	0.3	0.5	0.4
HCN	10	0.9	0.0	0.2	0.3	0.2	1.1	2.8	0.6	0.5
Br	5	1.5	1.0	0.0	0.4	0.5	0.9	0.8	0.1	13.7
C ₆ H ₆	50	1.1	0.9	0.0	1.1	0.3	0.3	1.0	0.9	0.1
C ₆ H ₅ OH	10	0.3	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.2	0.7
Hg	5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
As	3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	N.D
입자상 오염물질(mg/Sm ³)										
먼지	80/100	159.5	35.1	6.7	216.1	114.5	2.6	150.9	625.2	106.1
Cd	1	0.14	0.03	0.00	0.11	0.06	0.01	0.06	0.10	0.00
Pb	5	2.5	0.3	0.0	2.6	3.9	0.1	3.1	11.1	N.D
Cr	1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	N.D
Cu	10	0.3	0.3	0.0	0.6	1.6	0.0	0.3	1.9	0.0
Ni	20	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Zn	30	10.0	0.6	0.0	9.3	14.6	0.1	14.7	10.5	0.0
매연	2도	1	1	0	2	2	1	1	1	0
비산먼지	1.0	0.21	0.16	0.00	0.17	0.11	0.05	0.24	0.07	0.20

III. 燒却施設 汚染物質 排出特性

1. 다이옥신

가. 廢棄物 燒却施設에서의 다이옥신類 排出 原因

폐기물 소각시설에서 다이옥신류 {PCDDs(polychlorinated dibenzo-*p*-dioxins) 및 PCDFs(polychlorinated dibenzofurans)}가 배출되는 원인은 크게 2가지로 대별하여 폐기물 소각시 불완전 연소로 인하여 발생하는 경우와 냉각시설 및 방지시설 등에서 재합성^{9,10)}되는 경우를 들 수 있다.

(1) 폐기물 소각시 발생

- 1) 쓰레기 중에 불순물로 함유되어 있는 다이옥신류가 소각로에서 열분해, 산화분해 되지 않고 배출되는 경우
- 2) 염소치환형의 벤젠핵을 가지고 있는 다이옥신류의 前驅物質(precursor), 예를 들어 폴리염화비페닐류(PCBs: polychlorinated biphenyls), 염화벤젠류(CBs: chlorobenzenes), 염화페놀(CPs: chlorophenols), 염화나프탈렌(CNs: chloronaphthalenes) 등으로 부터 다이옥신류가 생성되는 경우
- 3) 폴리염화비닐(PVC: polyvinyl chloride), 4염화탄소(CCl₄), 4염화에틸렌(C₂Cl₄), 클로로포름(CHCl₃) 등과 같이 벤젠핵을 가지고 있지는 않지만 고온에서 熱化學反應에 의해 다이옥신류 및 전구물질이 생성되는 경우
- 4) 리그닌(ligine) 및 폴리프로필렌(PP: polypropylene) 등과 같이 염소성분을 함유하고 있지 않은 유기물과 탄소 등이 HCl, Cl₂, NaCl, AlCl₃ 등과 같은 無機物로 부터 다이옥신류가 생성되는 경우 등을 들 수 있다.

(2) 冷却施設 및 大氣汚染防止施設 등에서 再合成

냉각시설이나 방지시설 등에 堆積된 비산재(Fly Ash)가 촉매역할을 하여 염소 공여체(chlorine donor)와 반응하여 디노버합성(de novo synthesis)에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다.

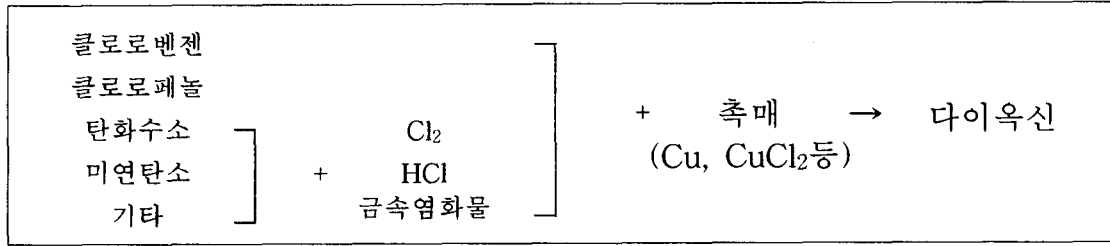


그림 1. de novo 합성의 개요.

나. 廢棄物 燒却施設에서의 다이옥신類 發生 및 排出 特性

폐기물 소각시설에서 다이옥신류의 생성에 영향을 미치는 인자로는 폐기물의 質, 燒却爐 構造 및 形象, 爐內溫度, 滯留時間, 燃燒가스의 混合, 산소 및 일산화탄소 등 연소가스의 조성 등 많은 인자들이 있다.

(1) 都市廢棄物 燒却施設의 소각로에서의 發生 特性

최근 국립환경연구원 연구결과¹¹⁾에 의하면 소각로 내부(2차연소실 출구)에서의 다이옥신 발생농도는 소각로의 구조 및 爐內溫度, 운전조건 등에 따라 다르지만, 毒性等價換算濃度(TEQ: Toxic Equivalents as 2,3,7,8-TCDD)로 대략 0.1~2.6 ng-TEQ /Nm³으로 조사된 바 있으며 입자상 : 가스상 다이옥신의 발생비율은 대략 80~90 : 10~20로 주로 입자상 다이옥신이 많이 발생되고, PCDFs : PCDDs의 발생비율은 70~90 : 10~30 으로 PCDFs가 PCDDs보다 많이 발생하는 것으로 보고되고 있다. 또한, 17종의 2,3,7,8-치환이성체중 2,3,4,7,8-PeCDF (pentachloro dibenzofuran) 및 2,3,4,6,7,8-HxCDF (hexachloro dibenzofuran)가 각각 전체 TEQ값의 40%를 상회하는 것으로 나타났다(그림 2).

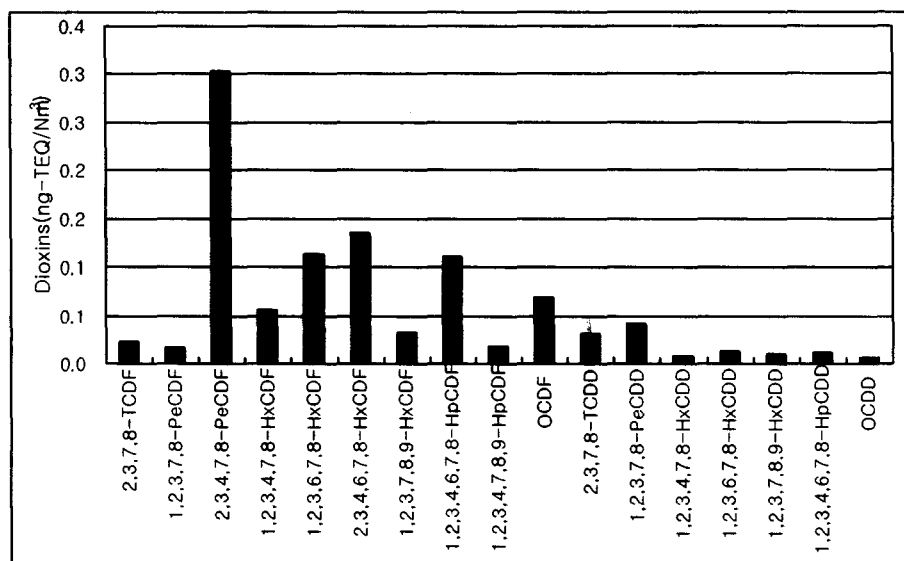


그림 2. 연소실후단에서의 2,3,7,8-치환이성체의 농도분포.

(2) 都市廢棄物 燒却施設의 冷却設備 後端에서의 發生 特性

冷却設備 後端에서 생성되는 다이옥신類의 濃度는 總濃度(Total PCDDs /PCDFs)로는 약 130~1,400ng/Nm³정도¹²⁾이며 PCDDs가 PCDFs보다 약간 많이 배출되는 것이 일반적인 특징이고, 同族體(Homologue)別로는 PCDFs의 경우 4염화물이 가장 많이 배출되고 PCDDs의 경우는 8염화물>7염화물>6염화물>5염화물>4염화물의 順으로 배출되어 高鹽化物쪽이 低鹽化物보다 많이 발생되고 있다. 毒性等價換算濃度로는 평균 5.75ng-TEQ/Nm³정도¹³⁾가 보일러 후단에서 발생되고 있으며, 廢棄物의 質的 特性이나 연소조건, 보일러 운전온도 등에 따라 변화의 폭은 1.18~29.61ng-TEQ/Nm³으로 매우 크게 나타나고 있으며, PCDFs : PCDDs의 發生比는 평균 78 : 22로 PCDFs가 PCDDs보다 약 3~4배 정도 많으며 17종의 2,3,7,8-치환이성체중 2,3,4,7,8-PeCDF 및 2,3,4,6,7,8-HxCDF가 각각 전체 TEQ값의 50%를 상회하는 것이 특징이다(그림 3). 또한, 보일러 후단에서 발생하는 입자상 : 가스상의 다이옥신류의 발생비는 소각로 후단과 마찬가지로 약 90 : 10 으로 발생되고 있는 것으로 보고^{11,14)}된 바 있다.

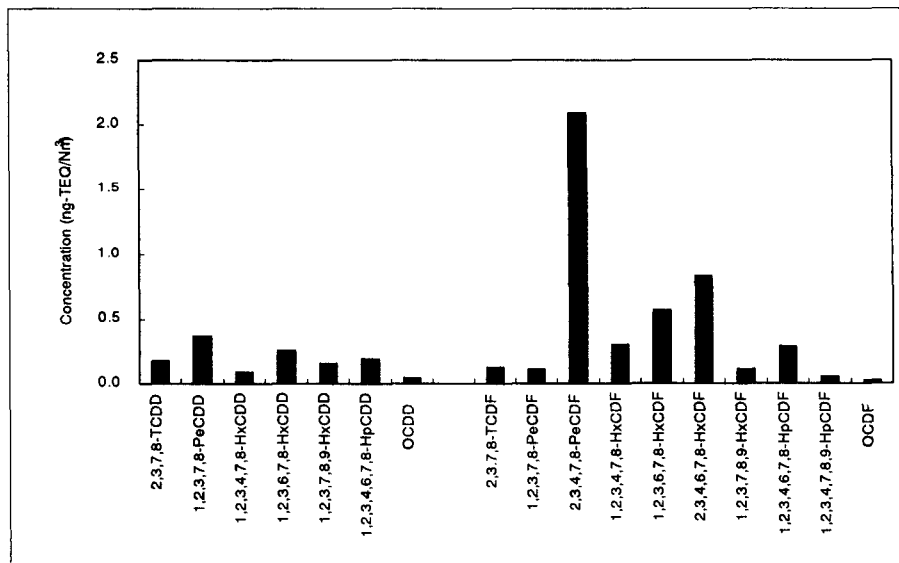


그림 3. 보일러후단에서의 2,3,7,8-치환이성체의 농도 분포.

(3) 都市廢棄物 燒却施設의 最終排出口에서의 排出 特性

'99년 우리나라 14개 대형 생활폐기물 소각시설의 최종배출구에서 배출되는 다이옥신류의 농도⁶⁾는 0.005~0.131ng-TEQ/Nm³ (평균 0.051ng-TEQ /Nm³)으로 대부분의 소각시설이 선진국 규제기준인 0.1ng-TEQ/Nm³이하를 나타내고 있고, 대기오염방지시설의 종류 등에 따라 소각시설별로 다소 차이를 나타내고 있다. 2,3,7,8-치환이성질체별 배

출농도는 PCDFs : PCDDs가 평균 84 : 16으로 PCDFs가 PCDDs보다 약 4~5배 정도 많으며, 17종의 2,3,7,8-치환이성체중 2,3,4,7,8-PeCDF 및 2,3,4,6,7,8-HxCDF가 각각 전체 TEQ 값에 42.95% 및 21.22%로 두 이성체가 차지하는 비율이 전체의 64%를 상회하고 있다¹³⁾ (그림 4).

또한 최종배출구에서 발생하는 입자상 : 가스상의 다이옥신류의 발생비는 약 40 : 60으로 발생되고 있는 것으로 보고^{11,14)}된 바 있다.

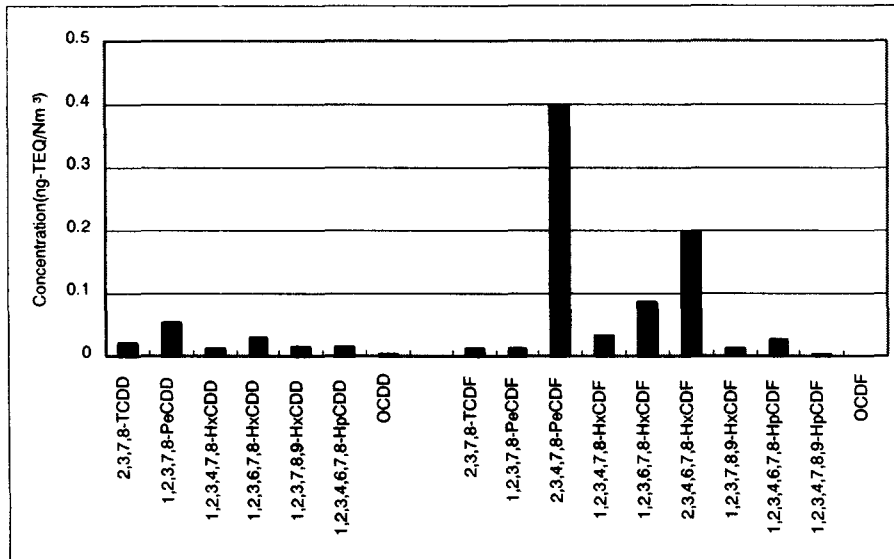


그림 4. 최종배출구에서 2,3,7,8-치환이성체의 농도 분포.

2. 주요 대기오염물질

일반적으로 폐기물 소각과정에서 발생하는 대기오염물질은 성상에 따라 입자상 및 가스상으로 분류할 수 있지만, 이를 발생 원인별로 크게 두 가지로 대별하여 1) 폐기물 자체의 조성에서 유래되는 오염물질과 2) 불완전한 연소반응에 의해 생성되는 오염물질 (PICs: products of incomplete combustion)로 분류할 수 있다. 폐기물 자체의 조성에서 유래되는 오염물질로는 무기성 분진(inorganic particulate), 황산화물(SOx), 염화수소(HCl), 질소산화물(NOx), 중금속류 등을 들 수 있고, 불완전 연소산물(PICs)로는 탄소질 검댕(carbonaceous soot) 및 탄화물(char), 일산화탄소, 탄화수소류(HCs: hydrocarbons), C-H-O-N-X(halogen) 화합물, 벤젠-용해성 유기물질(BSOs: benzene-soluble organics), 다환방향족화합물(PAHs: polycyclic aromatic hydrocarbons), 염화 탄화수소류(PHHs: polyhalogenated organic hydrocarbons), 염소계 및 브롬계 다이옥신류(PCDDs/PCDFs, PBDDs/PBDFs), 폴리염화 및 브롬화 비페닐류(PCBs, PBBs) 등이 거론되고 있다. 본 장

에서는 주요 대기오염물질을 중심으로 이들이 소각시설에서 생성 메커니즘 및 배출특성에 대해서 약술하고자 한다.

가. 무기성 분진

소각시설에서 발생하는 무기성 분진(inorganic particulate)은 대부분 비반응성 분진으로, 폐기물 중의 재(ash) 함량, 연소가스의 흐름, 기타 연소지역으로 부터 분진을 동반시킬 수 있는 물리적 작용 등에 의해 발생된다. 즉 소각로 耐火物의 기계적 파괴 및 火床을 형성하고 있는 금속표면의 벗겨짐(flaking) 또는 산화, 투입된 폐기물이 함유하고 있는 재성분 및 중금속이 연소가스와 함께 이월(carry over) 되어 발생되는데, 폐기물 소각로와 같이 폐기물을 수거된 상태 그대로 태우는(mass burning)하는 경우 다음과 같은 영향인자들이 분진 발생농도에 영향을 미칠 수 있다.

(1) 폐기물중 재함량

폐기물 자체가 함유하고 있는 재 함량(fine ash content)의 약 10~20%가 연소가스와 더불어 이월되며, 대략 폐기물 1톤당 약 54kg의 미세한 입자의 재를 함유하고 있기 때문에 약 5.5~11 kg/ton 정도의 무기성 분진이 발생된다¹⁵⁾. 일반적으로 소각온도가 1,100℃에서 약 70 μ m(낮은 유속)~400 μ m(빠른 유속)이하의 분진이 연소가스와 더불어 이월되며, 소각로에서 발생되는 비산재(fly ash)의 70%(중량비)가 250 μ m보다 적은 입자인 것으로 보고되고 있다¹⁶⁾.

(2) 화격자 하부 주입공기량

우리나라에서는 도시폐기물의 소각에 주로 화격자식 소각로를 사용하고 있는데, 이와같은 화격자식 소각로는 화격자 하부 주입공기량(underfire air rate)에 따라 분진 발생농도가 달라질 수 있다. 일반적으로 수분함량이 25~50%인 도시폐기물의 경우 화격자 단위면적당 주입공기량에 의해 다음과 같이 분진이 발생되는 것으로 추정된다¹⁷⁾.

$$W(\text{kg/ton}) = 4.35 V^{0.543}$$

W = 쓰레기 톤당 분진 발생량(kg)

V = 화격자 단위면적당 주입공기량(Nm³/sec/m²)

(3) 소각로 크기 및 구조

소각로 크기와 분진 배출계수와의 사이에 정량적인 관계식이 설정된 것은 아니지만, 일반적으로 소각로의 크기가 크면 폐기물 소각량(burning rate)이 커서 화격자 하부 주입공기량이 크고 또한 소각로 내부에서의 自然對流흐름(natural convection current)이 커서 분진의 배출량이 많은 것으로 추측되고 있다¹⁵⁾. 또한 화격자의 종류 및 연소실 설계인자(체류시간 등)에 따라서도 분진의 배출량에 차이를 나타내고 있는 것으로 보고되고

있다.

(4) 금속염화물의 휘발

소각온도가 1,000℃를 상회하면 금속염화물(salts)이 휘발(volatilization)하여, 일련의 非同質的 凝縮(heterogeneous condensation: 비표면적이 큰 작은 분진입자 표면에서 응축)에 의해 휘발성금속은 미세 분진입자에 농축(enrichment) 된다^{18,19}.

나. 불완전 연소산물(PICs)

불완전 연소산물은 소각시설의 구조 및 성능, 운전조건과 관련하여 발생하는 오염물질들로, 주로 부적절한 연소과정으로 인하여 발생하는 오염물질들을 말한다. 폐기물을 소각할 때 완전연소(complete combustion)는 추구하는 이상적 목표이지 실제로 1일 24시간 연속가동을 해야하는 소각시설에서 완전연소를 달성하기란 사실상 불가능하다. 따라서, 폐기물을 소각하면 불완전 연소산물이 발생하게 되는데 이들 대부분이 매우 유해한 화합물이기 때문에, 가능하면 발생을 억제하고 또한 적정 방지설비로 제거하는 노력이 매우 중요하다.

(1) 불완전 연소산물 종류¹⁵⁾

(가) 미연탄소

탄소질 검댕(carbonaceous soot)으로 소각로 온도가 고온이며 산소가 부족한 경우에 발생하기 쉬운데, 생성되는 미연탄소는 비결정성(amorphous)이며 일부 흑연(graphitic) 탄소가 발생되기도 한다. 흑연 탄소는 비결정성 탄소보다 산화시키기가 어려운 특성을 가지고 있다.

(나) C-H 화합물

메탄, 에탄, 아세틸렌, 직쇄 및 측쇄 지방족화합물, 포화 및 불포화 環構造의 화합물(PAHs) 등이 이에 속한다.

(다) C-H-O 화합물

CO, HCHO, 유기산, 에스테르, 알콜, 에테르, 알데하이드류, 케톤류 등이 있고, 이들 화합물 중에는 악취를 유발하는 것이 많으며, 특히 불완전 연소산물로 생성된 알데하이드류는 타는냄새(burnt smell)의 주요 원인물질이다.

(라) C-H-N 화합물

아민류, 질소-環構造(nitrogen-ring) 화합물, 단백질 등의 연소로부터 생성되는 불완전 연소산물들이며, 분자구조에 산소를 함유하고 있는 경우 질소산화물(fuel nitrogen NOx) 및 악취 유발물질을 생성하기 쉽다.

(마) C-H-O-X(할로젠) 화합물

염소계 용매, 불소화 및 염소화 폴리머, PIC-유래 화학물질(PIC-derived

chemical compounds), 다이옥신류 및 PCBs 등이 이에 속한다. 특히, 이들 화합물들은 매우 유독하기 때문에 가능한 한 소각로에서 발생을 억제하여야 하며, 이들 염소계 용매, 불소화 및 염소화 폴리머는 완전 연소시 HCl, HF, HI, HBr 등의 산성가스를 생성한다.

(2) 생성 메커니즘.

소각로 내부에서 고체폐기물은 소각과정에서 발생하는 연소열에 의해 가스화(gasification)되어 탄화물(carbon char) 및 탄화수소의 열분해 산물 등이 생성되는데, 이렇게 생성된 열분해 산물들이 1) 공기와 완전 혼합·연소되지 않고 短回路의 흐름을 통하여 배출되는 경우, 2) 소각로 내부에서 예열되지 않은 차거운 공기 또는 표면과 접촉하여 消火現象(quenching effect)이 발생하는 경우, 3) 고온에서 C-H 화합물의 탈수소화 반응(dehydrogenation) 등의 열적파괴(thermal cracking)가 일어나는 경우, 4) 부적절한 온도·체류시간·혼합조건으로 인하여 완전 연소되지 않고 배출되는 경우 등으로 인하여 불완전 연소산물(PICs)이 발생된다. 따라서, 불완전연소산물은 주로 부적절한 연소반응, 즉 "3T"라고 일컬어지는 온도(Temperature), 체류시간(Time), 혼합(Turbulence)의 우수연소조건(GCP: Good Combustion Practice)을 만족하지 못하는 경우 발생하는 것이 일반적인 특성이다.

다. 폐기물 조성과 관련된 오염물질

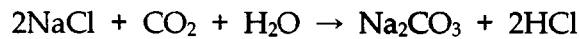
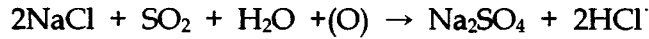
(1) 황산화물

일반적으로 황은 S^{+2} 에서 S^{+6} 로 존재한다. 대기오염 관점에서 관심의 대상이 되는 황은 有機黃 및 無機黃(황석철광: pyrite), 遊離黃(free sulfur), 유기산 및 무기산의 형태로 존재하는 황 등을 들 수 있다. 소각시설에서 배출되는 연소가스중의 황은 대부분 SO_2 또는 SO_3 형태로 존재하는데, SO_2 는 과잉 공급된 O_2 에 의해 SO_3 로 산화되기도 하지만(반응속도가 매우 느림) 연소가스중의 황산화물의 96~98%가 SO_2 로 배출되고 나머지 2~4% 정도가 SO_3 로 배출된다.

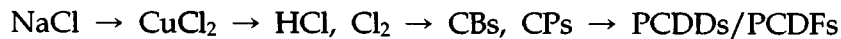
또한, SO_2 는 기체-고체 반응에 의해 비산재에 일부가 흡수(알칼리도 유발물질 등에 의해)되기도 하고, 일부 황성분은 바닥재에 잔존하기도 한다. 또한, 소각대상 폐기물중에 유기 황화합물(organic sulfonates) 및 중금속 황화합물(heavy metal sulfate: SO_3 와 금속산화물로 분해), 유리황산(free sulfuric acid: 자동차 배터리 등) 등이 연소되는 경우 연소가스 중에 SO_3 가 고농도로 배출되는 경우도 있다. 그러나, 우리나라 도시폐기물은 황함량 자체가 매우 낮아 도시폐기물 소각시설에서의 황산화물 배출농도는 매우 낮으나, 하수슬러지를 유동상 소각로로 소각하는 경우에는 소각로에서 발생하는 SO_2 는 7~1,081ppmv(평균 578ppmv)이며 황산화물중 SO_2 98.6% 및 SO_3 1.54% 비율로 배출되는 것으로 보고되고 있다.

(2) 염화수소 및 염소

도시폐기물중의 염소성분(Cl)은 무기염소 및 유기염소의 형태로 존재하며, 소각시 유기염소(PVC 등)는 거의 대부분 HCl로 전환된다. 음식물쓰레기에서 유래되는 무기염소(주로 NaCl, 일부 CaCl₂)는 소각로내부에서 SO₂ 및 CO₂와 반응하여 HCl을 발생하며 일부는 황산염 및 탄산염으로 전환되는 것으로 알려져 있다²⁰⁾.



또한, 유기염소뿐만이 아니라 무기염소도 다음과 같은 반응에 의해 다이옥신 생성에 관여한다고 추측되고 있으나²⁰⁾ 아직까지 생성을 및 기여율 등을 정량적으로 평가하여 보고한 연구는 없고, 연구자에 따라서도 NaCl이 다이옥신 생성에 영향을 미친다고 사람과 영향을 미치지 않는다는 사람으로 나뉘어져 있다.



CBs: chlorobenzenes, CPs: chlorophenols

한편, 폐기물 소각과정에서 발생하는 HCl 농도는 폐기물 자체의 염소함량과 밀접한 관계가 있으며 발생된 HCl의 약 35~40%가 재(ash) 중의 알칼리성분(Na₂O, CaO 등)에 의해 흡수된다¹⁵⁾. 또한, 발생된 HCl은 소각과정에서 Deacon 반응²⁰⁾(2HCl + 1/2O₂ - H₂O + Cl₂)에 의해 염소(Cl₂)가 발생하기도 한다고 알려져 있으나, 소각시설에서 염소성분(Cl)은 대부분 HCl로 배출되며 염소(Cl₂)로 배출되는 경우는 거의 없다. 발생하는 HCl은 보일러 등 소각시설중 철구조물의 부식의 주요 원인이 되나, 우리나라 중·대형 소각시설의 경우 발생하는 HCl의 95-99%이상이 반건식 세정탑 및 습식 세정탑에서 제거되며 일부 방지시설을 갖추지 못한 소형 소각시설에서는 다소 높은 농도로 배출되고 있는 것으로 보고되고 있다.

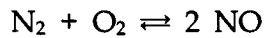
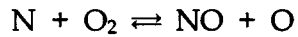
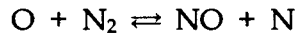
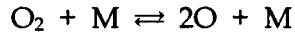
(3) 질소산화물

폐기물 소각과정에서 발생하는 질소산화물은 연소공기로부터 질소고정(fixation of N)을 통해서 생성되는 Thermal NO_x와 폐기물자체가 함유하고 있는 질소로부터 생성되는 Fuel NO_x로 대별할수 있다. 일반적으로 도시폐기물소각시설에서 발생하는 질소산화물의 75-80%는 Fuel NO_x로, 나머지 20~25%가 Thermal NO_x로 발생 및 배출되는 것이 일반적인 특성이다.

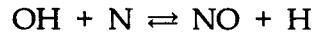
(가) Thermal NOx

폐기물소각시 Thermal NOx는 연소용 공기로 주입된 산소에 의해 질소가 고정(nitrogen fixation)되는, 이른바 Zeldovitch 반응²¹⁾으로 불리워지는 다음과 같은 일련의 반응을 통해 생성된다.

1) 과잉공기 상태에서



2) fuel-rich flame에서



동력학적인 제한조건에 의해, NO의 생성속도는 화염의 온도가 1,000℃를 초과하는 경우에 일어나며, 화염의 온도가 40℃를 초과할 때마다 생성속도는 2배가 된다고 한다. 일반적으로 폐기물 소각로에서는 화염의 온도가 지나치게 높고 과잉공기로 소각로를 운전할 때 생성된다.

(나) Fuel NOx

도시폐기물 소각시설에서 발생하는 NOx농도의 75~80%가 Fuel NOx이다. 이는, 도시 폐기물중에 함유되어 있는 음식물쓰레기(고기류 등의 단백질 및 야채류 등)에서 기인되는 것으로 알려져 있으며, 사업장폐기물 소각시설의 경우에도 피리딘 및 아민 등이 함유된 유기액체폐기물을 소각하는 경우 대량 발생될 수 있다.

한편, 우리나라 도시폐기물 소각로에서는 평균 약 150ppm정도가 발생되며, 대형소각시설의 경우 SNCR에 의해 약 40~65%(875~1,000℃의 소각로 내부에 NH₃ : NOx를 몰비로 2:1 ~ 3:1로 주입하여)가 제거되며 또한 SCR에 의해서는 평균 90%(260~425℃에서, NH₃ slip을 40ppm으로) 이상 제거가 가능하다.

(5) 중금속

소각시설에서 중금속 발생농도에 영향을 미치는 인자로는 폐기물 자체의 중금속 함량 및 연소 함량, 소각로의 온도 및 분진입자의 침강을 유도할 수 있는 연소가스의 흐름패턴, 방지시설의 효율 등을 들수 있다.

먼저, 소각로 내부의 온도가 일정온도 이상의 고온이 되면 중금속 화합물들은 분해 또는

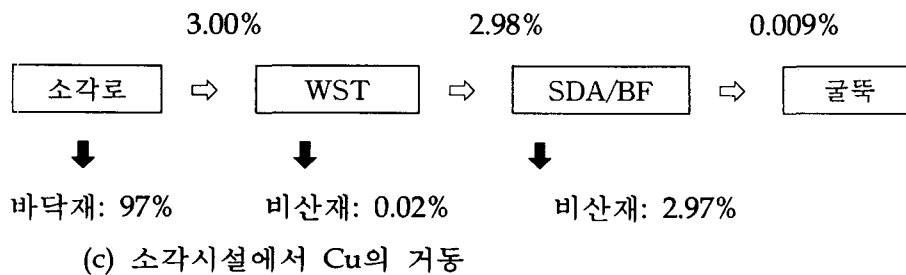
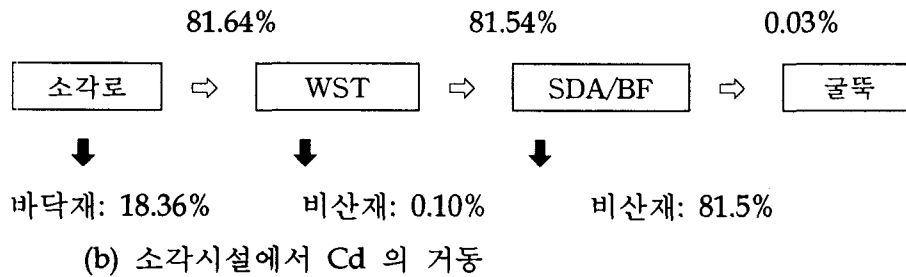
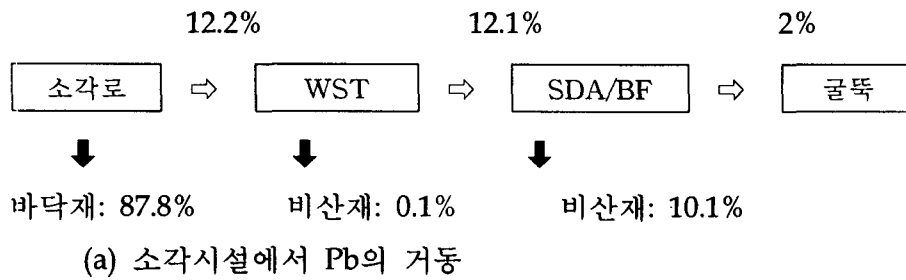
증기화 되어 연소가스와 더불어 배출되기도 하고, 또는 폐기물 중에 염소성분이(Cl) 존재하면 비점이 낮은 금속염화물로 휘발되어 소각로에서 배출된다. 이어서, 냉각설비에서 냉각되는 과정에서 연소가스의 온도가 강하하게 되면 비균질 핵화반응(heterogeneous nucleation)¹⁵⁾에 의해 비표면적이 큰 미세 분진입자의 표면에 중금속의 일부분이 응축·침착 되기도 하는데, 특히 Hg, Cd, As, Pb 등과 같이 비점이 낮은 중금속 및 그 염화물 등은 냉각과정에서도 응축·침착하지 않고 연소가스와 飛沫同伴하기도 한다. 일반적으로 소각로에서 문제가 되는 주요 중금속 화합물은 Pb 및 Cd를 들수 있는데 이들은 소각로 온도가 815~850℃에서 PbCl₂ 및 CdCl₂로 휘발된다.

특히, Hg는 소각시설에서 elemental Hg 및 HgCl₂ 등 수은화합물의 형태로 발생되는데, 이들 elemental Hg 및 HgCl₂ 등 수은화합물은 비점이 매우 낮아(표 12) 냉각설비에서 응축·침착되지 않고 대부분 연소가스와 飛沫同伴한다. 폐기물 소각시설에서는 수은화합물을 제거하기 위하여 활성탄 분말을 분사하여 흡착제거 하거나 습식세정탑에 흡수제거 하는 방법을 사용하는데, HgCl₂ 등 수은염화물은 물에 대한 용해도(6.1 g/100g sat. sol)가 높고 활성탄에 잘 흡착·제거(90%이상 제거) 되지만, elemental Hg은 물에 대한 용해도가 낮고 활성탄에 잘 흡착되지 않아 소각시설에서 최종 배출되는 수은의 대부분은 elemental Hg의 형태로 배출되는 것이 특징이다.

한편, 그림 5는 우리나라 YI소각장(100톤/일)에서 중금속의 배출특성을 요약한 것²²⁾으로, 대부분의 중금속은 산화물 상태로 바닥재중에 잔존하지만 비점이 낮은 Hg 및 Cd 등의 화합물은 바닥재에 잔존하지 않고 각각 99% 및 82%가 연소가스와 더불어 소각로에서 배출되어 냉각설비를 거쳐 방지시설에서 제거되는 특성을 보여주고 있다.

표 12. 중금속 및 그 화합물의 끓는점

화합물	끓는점(°C)	화합물	끓는점(°C)
As ₂ O ₃	193 (승화)	PbCl ₂	950
Cd	767	Hg	357
CdCl ₂	960	HgCl ₂	302
CdO	900-1000 (분해)	HgCl	302
CrO ₂ Cl ₂	117 (승화)	SnCl ₂	117 (승화)
CuCl	1,366	ZnO	>1800
CuCl ₂	993 (CuCl로 분해)	ZnCl ₂	732
FeCl ₂	>670		



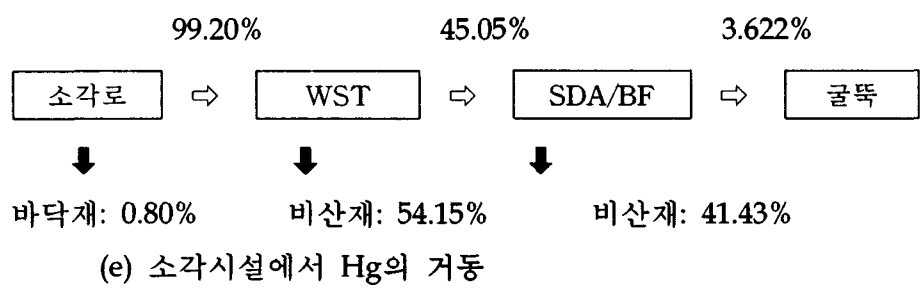
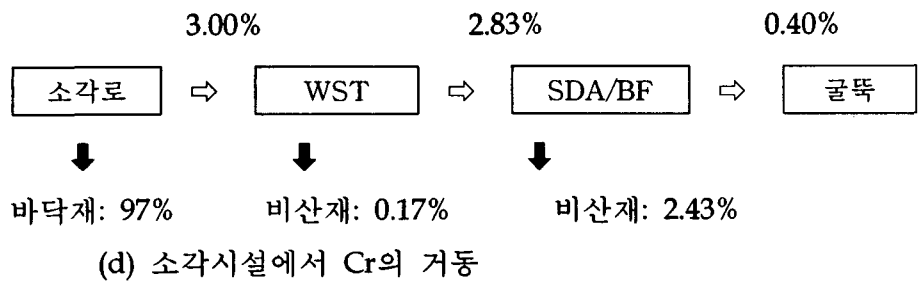


그림 5. 소각시설에서의 중금속 배출특성 일례 (YI 소각장)

IV. 結論

지금까지 소각시설에서 배출되는 다이옥신 및 주요 대기오염물질의 배출실태 및 배출 특성 등을 살펴본 바와 같이, 소각시설에서 다이옥신은 다른 대기오염물질들과는 달리 非意圖的으로 생성 또는 재합성 되기 때문에 이를 저감하는 것은 그리 쉬운 일은 아니다. 그러나, 다이옥신은 독성이 강하고 인체 및 환경에 미치는 危害度가 크기 때문에 반드시 국민들이 안심할 수 있는 최저수준으로 관리되어야 하겠다. 또한, 다이옥신뿐만 아니라 대기오염물질들의 배출농도 및 배출특성은 원천적으로 폐기물 자체가 함유하고 있는 원소의 조성과 소각시설의 구조 및 운전조건에 따른 플랜트 의존성이 매우 강하기 때문에, 폐기물 소각시설에서 발생하는 오염물질의 배출을 저감시키기 위해서는 무엇보다도 먼저 배출원에서 폐기물이 분리 배출되어야 하며, 적정 방지시설을 갖춘 소각시설이 설치 및 운전관리 되어야 할 것으로 본다. 이와 더불어 우리나라 폐기물의 질적 특성에 맞는 소각시설 및 소각기술의 개발과 정부의 적극적인 관리정책도 매우 중요하다 생각된다. 끝으로, 소각시설에서의 오염물질 저감은 근본적으로는 정부가 指向하고 있는 폐기물의 종합관리시스템 (Integrated Management System), 즉 폐기물발생의 최소화, 폐기물 재활용의 최대화, 소각 등 중간처리의 적정화, 매립 등 최종처분의 안전화 등으로 이어지는 폐기물관리정책의 기본 틀 안에서 이루어져야 효율적으로 달성 가능하리라 판단되기 때

문에, 이 정책이 조기에 정착될 수 있도록 범국민적 이해와 협조가 매우 중요하다고 본다.

參考文獻

1. 環境部, 폐기물관리법, 1997.
2. 環境部, 환경백서, 1998.
3. 金三權, 중·소형 도시폐기물 소각시설의 대기오염대책, 한국환경·사회정책연구소, 환경정책자료 제 9901호, pp. 17-42, 1995.
4. 環境부, '99전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2000.
5. 環境부, '99 지정폐기물 발생 및 처리현황, 2000.
6. 環境부, 생활폐기물과 자료, 1999.
7. 신찬기, 김삼권, 이길철 외, 도시폐기물 소각시설의 소각재 적정관리에 관한 연구(1), NIER No. 2000-13-575, 2000.
8. 국립환경연구원, 중·소형 소각시설에 대한 다이옥신 등 배출실태 조사, 2000.
9. 平岡王勝, 廢棄物處理におけるダイオキシン類生成と抑制, 廢棄物學會誌, Vol. 1, No. 1, pp. 20-37, pp. 133-134, 1990.
10. 永田勝也, 廢棄物處理ごみ焼却爐におけるダイオキシン對策の現状と動向, 廢棄物學會誌, Vol. 3, No. 3, pp. 217-237, 1992.
11. 신찬기, 김삼권, 정일록 외, 소각시설 구조 및 성능 평가기준(안) 제정에 관한 연구(II), 1999.
12. 金三權, 都市廢棄物 燒却施設에서의 다이옥신 및 前驅體 舉動, 環境관리공단 '98DIOXIN 세미나집, pp. 11-33, 1998.
13. 金三權, 全盛煥, 洪丁善 外, 都市廢棄物 燒却施設의 防止施設別 다이옥신 處理效率調査 研究, 국립환경연구원, 1988.
14. 李吉哲, 洪丁善, 金三權 外, 소각시설 구조 및 성능 평가기준(안) 제정에 관한 연구(I), 국립환경연구원, 1998.
15. Walter R. Niessen, Combustion and incineration process, Marcel Dekker Inc, p. 475, p. 478, p.481, p. 485, 1995.
16. Walter R. Niessen et al., Systems Study of Air Pollution from Municipal Incineration, NAPAC, U.S. DHEW, Contract CPA-22-69-23, 1970.
17. Stenborg, R. L. et al., Effects of Design and Fuel Moisture on Incinerator Effluents, JAPCA, 10: 114-120, 1966.

18. Smith, R. D. et al., The Trace Element Chemistry of Coal During Combustion and Emission from Coal Fired Plants, Prog. Energy Combust. Sci., 6: 53-119, 1980.
19. Markowski, G. R. et al., Trace Element Concentration as a Function of Particle Size in Fly Ash from a Pulverized Coal Utility Boiler, Env. Sci. and Tech., 19(9): 796-804, 1985.
20. 平岡正勝, 廢棄物處理におけるダイオキシン類削減對策の手引き, 環境新聞社, pp. 122-124, 1998.
21. Zeldovitch, B. et al., Oxidation of Nitrogen in Combustion, Academy of science, Inst. of Chem. Physics, 1947.
22. 김기현, 김삼권, 송금주, 유종익, 서용철, 소각시설의 금속거동에 관한 연구, pp. 144-148, 2001년 춘계 폐기물관련학회 공동학술대회집, 2001.

부록 1. 우리나라 소각시설 대기오염물질 배출허용기준

(1) 가스상 오염물질

번호	오염물질	배출허용기준			
		개정안			
		적 용	2004년 12월 31일 까지	2005년 1월 1일 이후	
1	암모니아(ppm)	기타시설	100	100	
2	일산화탄소(ppm)	소각시설	2톤/시이상	600(12)	50(12)
			200kg-2톤/시		200(12)
			200kg/시미만		300(12)
3	염화수소(ppm)	소각시설	2톤/시이상	50(12)	30(12)
			200kg-2톤/시		40(12)
			200kg/시미만		50(12)
4	염소(ppm)	해당없음			
5	황산화물(ppm)	소각시설	2톤/시이상	300(12)	30(12)
			200kg-2톤/시		70(12)
			200kg/시미만		100(12)
6	질소산화물(ppm)	소각시설	2톤/시이상	200(12)	80(12)
			200kg-2톤/시		150(12)
			200kg/시미만		150(12)
7	이황화탄소(ppm)	모든시설	30	30	
8	포름알데히드(ppm)	모든시설	20	10	
9	황화수소(ppm)	소각시설	2톤/시이상	15(12)	2(12)
			200kg-2톤/시		2(12)
			200kg/시미만		10(12)
10	불소(ppm)	소각시설	2톤/시이상	3(12)	2(12)
			200kg-2톤/시		2(12)
			200kg/시미만		3(12)
11	시아나화수소(ppm)	모든시설	10	10	
12	브롬(ppm)	모든시설	5	5	
13	벤젠(ppm)	모든시설	50	30	
14	페놀(ppm)	모든시설	10	10	
15	수은(mg/Sm ³)	소각시설	2톤/시이상	5(12)	0.1(12)
			200kg-2톤/시		
			200kg/시미만		
16	비소(ppm)	소각시설	2톤/시이상	3(12)	0.5(12)
			200kg-2톤/시		
			200kg/시미만		

(2) 입자상 오염물질

번호	오염물질	배출허용기준			
		개정안			
		적 용	2004년 12월 31일 까지	2005년 1월 1일 이후	
1	먼지(mg/Sm ³)	소각시설	2톤/시이상	80(12)	30(12)
			200kg-2톤/시	100(12)	80(12)
			200kg/시미만	100(12)	100(12)
2	카드뮴(mg/Sm ³)	소각시설	2톤/시이상	1.0(12)	0.029(12)
			200kg-2톤/시		0.1(12)
			200kg/시미만		0.2(12)
3	납(mg/Sm ³)	소각시설	2톤/시이상	5(12)	0.2(12)
			200kg-2톤/시		1.6(12)
			200kg/시미만		5.0(12)
4	크롬(mg/Sm ³)	소각시설	2톤/시이상	1.0(12)	0.5(12)
			200kg-2톤/시		
			200kg/시미만		
5	구리(mg/Sm ³)	모든시설		10	10
6	니켈(mg/Sm ³)	모든시설		20	20
7	아연(mg/Sm ³)	모든시설		10	10
8	비산먼지(mg/Sm ³)	모든시설		0.5	0.5
9	매연(탁도)	모든시설		2도	2도