

소각시설에서의 금속거동에 관한 연구 - 물질수지기법을 중심으로 -

○김기현, 김삼권, 송금주, 유종익*, 서용철*

국립환경연구원, *연세대학교 환경공학과

1. 서론

한국은 현재까지 도시폐기물은 약 60%정도가 매립에 의해 처분되었으나 넓은 부지를 필요로 하기 때문에 국토의 효율적 이용면에서 한계가 있는 것으로 보인다.

소각되는 폐기물의 충분한 연소를 가정하였을 때 소각 배가스 중 유해물질 등은 산성가스, 분진 및 유해중금속으로 대별된다. 특히 소각되는 폐기물내에 존재하는 유해중금속류는 각각의 물리적 특성 및 소각로내의 온도, 압력 및 가스의 조성에 따라 염화물, 산화물 및 금속상태로 변화한 후 대부분 소각재에 남지만 그 일부는 소각로 배가스와 함께 대기중으로 배출되기도 하고 휘발온도가 낮은 중금속은 소각로에서 증가화되어 대기로 배출된다. 입자상물질이나 흡상태로 비산된 중금속류는 일부는 냉각장치에 의해 응축되어 제거된 후 배기가스 처리시설에 유입되어 제거되어 재로 배출된다. 제거되지 않은 일부는 배가스와 함께 대기환경으로 배출되게 된다.

본 연구에서는 도시폐기물을 소각하므로써 배출되는 유해금속의 분배특성(배가스 및 바닥재, 비산재)을 파악하므로써 적정처리방안에 도출에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

(1). 시험대상

소각시설은 대형 소각시설로서 처리공정은 Fig 1. 와 같다.

Incinerator (895℃) → Water Spray Tower (383℃) → Air Pre heater (249℃) → SDA/BF (164℃) → Gas Re-heater for SCR (293℃) → SCR Stack (196℃)

Fig1. Incineration process of MSW incinerator studied.

(2). 시료채취

1) 먼지

연소실 후단에서는 위에 기술한 고온용 수냉자켓방식의 냉각관 전단에 그림 5와 같이 노즐 및 먼지포집부(냉각관과 동일 재질인 STS 310S)를 부착하여 사용하였고, 시료채취는 대기오염공정시험법 제3장 제2절 제1항 먼지의 분석방법에 따라 냉각시설 전·후단 등 2지점에서 동시에 채취하였다.

2) 중금속

대기오염공정시험법 제3장 제2절 제1항 먼지의 분석방법과 동일하게 채취하였다.

3) 소각재

소각시설에서 발생하는 바닥재 및 비산재에 대한 유해물질 특성을 분석하기 위하여 피트 등으로 배출되는 시점에서 다음과 같이 시료를 채취하였다.

(3). 시료 전처리 및 분석

1) 먼지

대기오염공정시험법 제3장 제2절 제1항 먼지의 분석방법에 따라 전처리하여 무게를 측정하였다.

[연락처] (우) 222-701 강원도 원주군 흥업면 매지리, 연세대학교 환경공학과, 서용철

Tel ; 033-760-2438, Fax ; 033-763-5224, E-mail ; seoyc@dragon.yonsei.ac.kr

먼지가 포집된 원통여지를 EPA Method 3050B에 따라 전처리 하여 Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometry(ICP-MS, Model: Elan-6000)로 약 20종의 중금속류를 분석하였다.

2) 소각재 성분분석

(1) 중금속 함량특성 분석용

폐기물공정시험방법 제2장 제1항 시료의 채취방법에 따라 시료를 채취한 후, 시료중의 작은 돌맹이, 유리조각 등을 제거하여 풍건하고 300 μ m 이하로 분쇄하여 함량특성 분석용 시료로 사용하였다. 조제된 시료를 EPA Method 3050B에 따라 전처리 ICP/MS로 분석 하였다. Hg는 함량특성 분석용으로 조제한 시료 일정량을 금아말 감법을 이용한 원자흡광광도법의 자동수은분석기(NIC사, Model SP-3D)로 253.7nm에서 분석하였다.

3. 결과

일반적인 오염물질의 농도변화는 대부분이 일반적인 도시폐기물 소각시설에서의 배출농도로 배출되었다. 그러나 수분함량은 연소실 후단에서 18%로 도시폐기물 소각시설에서의 일반적인 수분배출농도와 유사하나 Table1 와 같이, 수분사장치를 통과한 후에는 37%를 나타내고 있어 약 19%정도 증가되고 있다. 또한, 가스상 수은은 연소실 후단 및 보일러 후단에서 71 ~ 81 μ g/Sm³이 발생하여 SDA/BF-SCR 등의 대기오염방지시설을 거치면서 92.26%가 제거되어 최종배출에서는 5 μ g/Sm³정도로 배출되고 있다.

Table 1. Concentrations of pollutants in MSWI

Points	Temp. (°C)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CO* (ppm)	NOx (ppm)	SOx* (ppm)	Water (%)	Hg (μ g/Sm ³)	HCl (ppm)	Dust (mg/Sm ³)
Outlet of combustor	878.4	11.8	6.6	6.0	131.1	3.9	17.7	81.43	3.2	4,267.6
Outlet of WST	246	11.9	7.6	1.0	130	9.5	37.6	35.07	113.0	1,435.6
Stack	196	11.8	9.1	10.6	28.8	1.7	34.9	5.46	2.7	2.8

소각로에서 발생된 배가스 중의 함량시험결과는 Table 2과 같이 Na, Al, Ca, Fe 등이 500~100mg/m³ 으로 나타났고, Mg, Mn, Cu, Zn, Sn, Pb 등이 1,00mg/kg~10mg/kg의 범위에 해당하였으며, Cd가 10~1mg/kg의 범위에 해당하는 것으로 나타났고, B, V, Cr, Co, Sr, Sb 등이 1mg/m³이하로 나타났다.

배출되는 금속의 량에 채취된 먼지량을 나눠 입자상 중의 금속의 농도를 구하였다. Cr, Cu, Cd, Pb 등은 로에서 배출되는 입자상중의 농도보다 수분사시설에 냉각후 입자상에 높은 농도를 나타냈다. 이는 냉각되는 과정에서 금속의 비등점 차이에 따라 응축되는 차이에 의해 나타난 것으로 판단된다.

생활폐기물을 소각하는 경우 문제가 되는 Pb, Cd, Cu, Cr, Hg의 물질수지를 나타내면 Fig 2-6과 같다. 소각시설에 분배되는 경향을 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 Pb, Cu, Cr 성분은 약88-97%가 바닥재에 잔류하며, 기화되어 비산되는 비율이 3-12%로 나타나 바닥재로 배출되는 비율이 훨씬 높은 결과를 보였다. 또한 수분사장치를 통과하면서 약 0.7-5%가 제거되고, 최종배출구로 총 배출량의 0.009-2% 배출되는 것으로 나타났다.

Cr 성분은 고온의 산소분위기에서 비교적 안정된 금속산화물(CrO₃ 등)로 전이되어 주위의 온도조건에 영향을 적게 받기 때문이라 사료된다¹⁾.

Cu 성분은 Brunner 등²⁾의 연구결과 보다 다소 높게 나타났다. 이는 소각과정에서 투입된 산소와 반응하여

비교적 비등점이 높은 Cu₂O로 전이되어 휘발이 다소 적은 것으로 판단된다.

Cd, Hg성분은 약 0.80-13.86%가 바닥재에 잔류하며, 기화되어 비산되는 비율이 81.64-99.20%로 나타나 비산되어 배출되는 비율이 훨씬 높은 결과를 보였다.

Table 2. Inorganic contents in off-gas stream.

Constituent	outlet of combustor		outlet of WST	
	mg/m ³ *	mg/kg**	mg/m ³	mg/kg
B	0.794	186.093	0.231	160.922
Na	236.125	55329.769	48.981	34118.912
Mg	71.456	16743.934	14.214	9900.968
Al	150.410	35244.659	34.455	24000.117
Ca	354.394	83042.850	65.178	45401.169
V	0.135	31.520	0.011	7.578
Cr	0.343	80.373	0.307	213.555
Mn	15.101	3538.445	0.600	417.786
Fe	168.577	39501.543	40.809	28426.442
Co	0.296	69.316	0.013	8.899
Cu	2.167	507.709	2.043	1423.377
Zn	9.635	2257.656	3.188	2220.672
Sr	0.751	175.960	0.142	99.007
Cd	1.963	459.978	1.859	1294.929
Sn	3.535	828.284	1.044	727.248
Sb	0.854	200.024	0.205	142.920
Pb	3.856	903.553	3.619	2520.897

* Concentration : weight of metal / volume of flue gas

** Concentration : weight of metal / weight of dust

Cd 성분은 많은 비산에 비해 대기로 방출되는 비율이 0.03%로 아주 적게 나타났다. 이 결과는 소각시 증기화된 금속성분이 연소가스 냉각과정에서 미세한 비산재 표면에 응축, 침적되어 제거되는 것으로 판단된다.

Hg성분은 폐기물에 존재하는 대부분이 휘산하는 것으로 나타났으며, 그중 약 55%정도가 수분사장치에서 제거되고 SDA/BF을 거치면서 약 96%가 제거되어, 대기중으로 3.62%가 배출되는 것으로 나타났다.

냉각과정에서 제거율이 높은 것은 폐기물 속에 함유된 수은은 소각로 내에서 금속 수은 증기로 되는데 가스 냉각과정에서 배출가스에 함유된 HCl와 반응하여 80-90%는 HgCl₂로 된다. HgCl₂는 수용성이 크기 때문에 수분사에 의해 제거된 것으로 판단된다.

방지시설에서 처리 후에도 3.62%로 높게 배출되는 것은 흡착, 흡수하기 어려운 금속수은(Hg⁰)형태의 수은으로 배출되는 것으로 판단된다.

Table3 Elemental concentration in bottom ash and Fly ash from MSW

	Bottom Ash(mg/kg)					Fly Ash(mg/kg)		
	> 5mm	5mm-2mm	2-0.85mm	< 0.85mm	Total	WST	SDA	BF
B	11.246	36.660	61.568	66.133	43.405	63.780	41.980	33.983
Na	436.126	5118.000	7414.517	10348.965	5739.613	9028.000	6178.000	37122.575
Mg	552.179	3029.000	5290.942	7662.234	4115.366	11030.000	8851.000	6681.664
Al	1800.175	31696.830	37182.563	45110.000	28055.941	25690.000	10240.000	6430.714
Ca	28628.549	77110.000	91581.684	119188.081	78013.105	57720.000	117100.000	65206.959
V	9.973	10.430	10.499	19.662	12.985	10.160	6.993	4.166
Cr	0.343	80.373	408.078	536.186	355.721	115.100	169.070	183.303
Mn	166.633	875.900	889.000	978.902	703.075	803.100	580.300	315.437
Fe	8906.000	12048.000	25050.000	23860.450	17521.312	3427.000	2006.000	761.848
Co	1.311	2.294	2.354	5.282	2.824	6.975	3.275	1.874
Cu	682.391	1196.320	2367.197	4597.282	2246.780	70.570	406.700	601.880
Zn	578.900	1935.000	4918.016	9879.000	4405.403	4516.000	9036.000	12813.437
Sr	41.303	134.500	153.269	220.278	135.299	121.800	138.300	108.978
Cd	3.875	5.341	19.069	25.346	13.667	14.190	15.690	190.162
Sn	72.901	448.900	922.416	972.003	597.957	447.000	366.700	767.147
Sb	30.508	22.800	54.159	59.194	42.498	46.570	75.420	157.768
Pb	53.808	325.800	1542.691	1596.840	888.567	227.900	254.000	2053.589
Hg	0.001	0.034	0.005	0.047	0.021	0.021	11.443	48.445

WST: Water Spray Tower
 SDA: Spray dryer Absorber
 BF: Baghouse filter

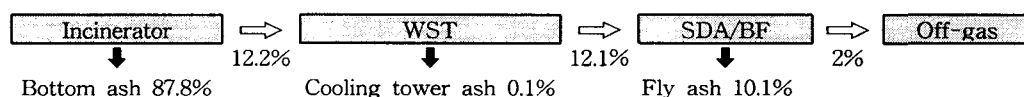


Fig. 2 Behavior of lead in the MSWI

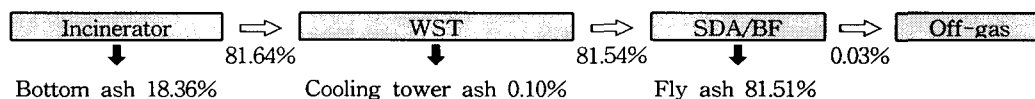


Fig. 3 Behavior of cadmium in the MSWI

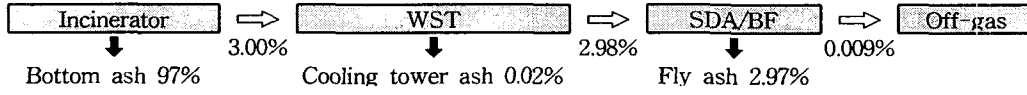


Fig. 4 Behavior of copper in the MSWI

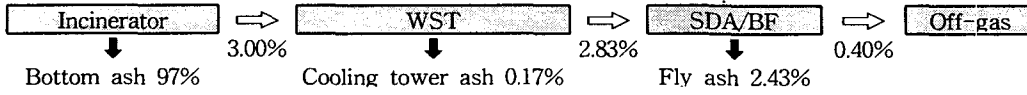


Fig. 5 Behavior of chromium in the MSWI

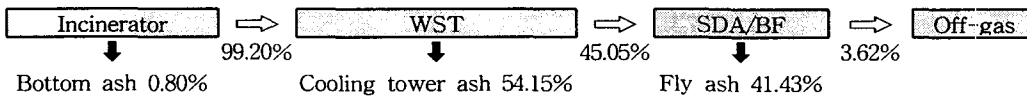


Fig. 6 Behavior of mercury in the MSWI

4. 결 론

도시쓰레기 소각시설에서의 금속의 거동은 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Cr, Cu, Cd, Pb 등은 로에서 배출되는 입자상 중의 농도보다 수분사시설에 냉각후 입자상에 높은 농도를 나타냈다. 이는 냉각되는 과정에서 금속의 비등점 차이에 따라 응축되는 차이에 의해 나타난 것으로 판단된다.
2. Pb, Cu, Cr 성분은 약88-97%가 바닥재에 잔류하며, 기화되어 비산되는 비율이 3-12%로 나타나 바닥재로 배출되는 비율이 훨씬 높은 결과를 보였다.
3. Cd, Hg성분은 약 0.80-13.86%가 바닥재에 잔류하며, 기화되어 비산되는 비율이 81.64-99.20%로 나타나 비산되어 배출되는 비율이 훨씬 높은 결과를 보였다.

참고문헌

1. Chang, Y. W. and P. Biswas, An Equilibrium Analysis to Determine the Speciation of Metals in an Incinerator, Combustion and Flame, 93(1-2), pp. 31-40, (1993).
2. Brunner, P. H. and H. Monch, The Flux of Metals through Municipal solid Waste Incinerators. ISWA Specialized Seminar Incinerator Emissions of Heavy Metal and Particulate, Copenhagen, (18-19), 103-117, (1985).