

폐기물 소각시 중금속 성분의 거동에 관한 연구

박 용 이 · 허 철 구

제주대학교 해양환경공학과

(1996년 10월 3일 접수)

A Study on Behavior of Heavy Metals during Waste Incineration

Yong-Yi Park and Chul-Goo Hu

Dept. of Marine Environ. Eng., Cheju National University, Cheju 690-756, Korea

(Manuscript received 3 October 1996)

The incineration tests of mixed industrial wastes using the stoker type incinerator are carried out to investigate the partitioning characteristics of heavy metals during incineration. The results obtained from this study are as follow.

The partitioning characteristics of heavy metals throughout this incinerator are found that, at given condition of 700°C, the elements with the relatively high boiling point such as Cr, Cu and Pb are partitioned into a bottom ash, a fly ash captured by cyclone, and a flue gas stream, 67~88%, 2~19% and 6~16% of initial amount entering the incinerator, respectively, but the Cd and Hg of 75~81% is vaporized into the flue gas. It appears that the partitioning characteristics according to the particle size of ash is different between the bottom ash and the fly ash. For bottom ash, the fraction of partitioning into 75 μ m oversized particles is relatively high. For fly ash, the characteristics of distributions with the particle size can not be clearly shown.

Key words : Partitioning characteristic, Heavy metal, Mixed industrial waste, Incineration, Fraction of partitioning.

1. 서 론

폐기물의 처분방법으로는 재활용, 매립 및 소각 등이 있으나 재활용하는 데는 한계가 있고 토양매립은 매립지 확보가 쉽지 않을 뿐 아니라 토양오염이나 지하수 오염 등의 2차 오염을 유발하는 등의 문제점이 제기되고 있다(田中, 1992). 따라서 폐기물의 절대적 감량과 안정적 처리 및 폐열의 재이용 등의 측면에서 소각에 의한 처리방법이 가장 현실적인 대안으로 부각되고 있다(Chang & Biswas, 1993 ; Takeuchi, 1986). 폐기물을 소각하게 되면 폐기물 중에 함유된 각종 중금속성분은 잔류회재(bottom ash), 비산회재(fly ash), 연소가스에 포함되어 소각로로부터 배출되는데 각 부분에 대한 중금속 성분의 분배특성은 연소조건, 폐기

물의 특성, 중금속 종류등에 따라 많은 차이를 보인다. 연소가스중에 포함된 중금속 성분은 가스상이거나 집진되지 않은 미세한 입자중에 다량 함유되어 있으므로 이로 인한 대기오염이 우려되고 있다(Stephen & Gordon, 1979 ; Greenberg et al., 1981 ; Esko & Pakkanen, 1990 ; Ho et al., 1991). 또한 소각 후 발생된 회재는 고형화하여 건축자재로 이용하려는 노력이 일부 이루어지고 있으나 아직 연구단계에 있고 현재 거의 대부분의 회재는 토양에 매립하고 있는 실정이다(동력자원부, 1992). 소각후 잔류회재와 비산회재중의 중금속성분은 회재의 토양 매립 처분시 침출수에 의해 용출될 수 있으며 이로 인해 토양이나 지하수 등이 오염되어 환경에 악영향을 끼칠 우려가 있다(佐久, 1992).

이와 같이 폐기물 소각시 유발되는 중금속 오염의 잠재성이 부각됨에 따라 폐기물의 소각에 따른 중금속성분의 거동, 배출특성, 회재에 대한 농축특성 등에 관한 연구가 다양하게 이루어지고 있다(Lee, 1992 ; Lee, 1988 ; Litt & Tewksbury, 1981 ; Fernandez et al., 1992). 그러나 이들 대부분은 하수슬러지, 석탄 및 도시쓰레기의 소각에 따른 연구이며, 산업폐기물의 소각시 중금속성분의 거동에 관한 연구는 아주 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전기로에서의 폐기물 연소실험을 통해 연소온도에 따른 중금속성분의 열적거동을 파악하고 이와 아울러 스토카식 소각로를 이용하여 산업폐기물의 소각실험을 병행함으로써 폐기물 중에 함유되어 있는 중금속성분이 소각과정에서 어떠한 분배비율로 배출되는지를 검토하고 여기서 얻은 결과를 토대로 폐기물 소각시 중금속성분의 거동특성을 평가하고자 했다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용한 소각로는 스토카식 소각로로써 장치의 개략도를 Fig. 1에 나타냈으며 연소로, 연료 투입구, 공기공급기, 연소로내 온도측정기, 회재 배출구 등으로 구성되어 있다.

Fig. 1에 나타낸 스토카식 소각로는 탄화 가스화 순연방식을 채택함으로써 폐기물의 적당량에 대한 일괄 투입이 가능한 구조로 건류실과 연소실이 동일 건류관 내에 설정되어 하부는 폐기물 적재실겸 건류실의 역할을 하고, 상부는 1차 연소실 역할을 하며 1차 연소실을 거친 연소가스는 재연소실 역할을 겸하는 집진실(cyclone)로 유입되도록 구성되어 있다. 연소실 하부 건류실에 적재된 폐기물은 폐기물 투입구 측에서 점화원을 이용하여 점화 시킨후 하부로는 건류 공기를, 상부로는 연소 공기를 동시에 주입하면서 폐기물의 탄화를 촉진시키고, 이때 발생된 건류가스는 상부 연소실로 유입되어 상부로 공급되는 연소용 공기에 의해서 완전 연소가 이루어질 수 있도록 설계되었다. 또한 연소가스는 1차 연소실을 거쳐 재연소실을 겸한 집진실에서 재연소공기와 혼합되면서 미연분들이 재연소될 수 있도록 하였으며, 배가스중의 분진은 하부에 집진되도록 하였다. 소각로 운전시 과열로 인한 부분

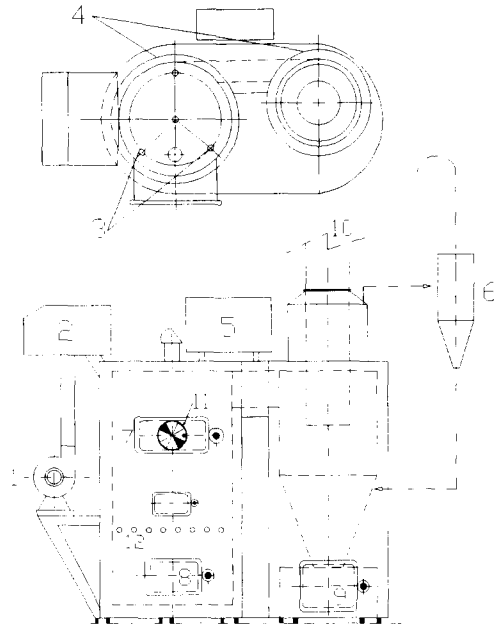


Fig. 1. Schematic flow diagram of stoker type incinerator used for this study.

1. Air pump
2. Air chamber
3. Air nozzle
4. Water chamber(jacket)
5. Water level gauge
6. Cyclone
7. Inlet door
8. Bottom ash discharge door
9. Fly ash discharging door
10. Stack
11. Sight port
12. Grate

적인 불완전 연소나 과부하를 방지하기 위하여 소각로 전체 외벽은 냉각용 수조로 형성되어 있으며, 냉각수의 증발로 인한 부족분은 level gauge를 설치하여 자동으로 보충되도록 하였다.

2.2 소각대상 폐기물의 성상

본 연구에 사용된 소각대상 폐기물은 혼합폐기물로서 혼합비율은 Table 1에 나타낸 바와 같으며 공업분석 및 원소분석 그리고 중금속 성분 함량등의 조성성분 분석결과는 Table 2에 나타났다.

전기로 실험에서 이용된 폐기물은 적재할 도가니의 용량 및 파쇄에 의한 표면적을 증대시키기 위해 크기를 3mm 이하가 되도록 절단한 후 연소용 시료로 이용하였다. 그리고 스토카식 소각로에서 사용된 폐기물은 액상폐기물이 포함되

Table 1. Composition of mixed waste

Component	Fraction (wt. %)
Waste synthetic polymer	61.80
Waste leather	9.60
Waste rubber	5.60
Waste oil	23.0

Table 2. Analytical data of mixed waste

Item	Component	Composition
Proximate Analysis (wt. %)	Moisture	9.43
	Volatile matter	74.40
	Fixed carbon	8.04
	Ash	8.13
Ultimate Analysis (dry basis, wt. %)	C	65.69
	H	8.44
	N	9.32
	S	1.09
	O	4.43
Heavy Metal Content ($\mu\text{g/g}$)	Ash	11.03
	Pb	49.38
	Cu	14.98
	As	-
	Hg	0.67
	Cd	1.65
	Cr	157.13

어 있으므로 혼합폐기물의 소각시 투입 및 소각이 용이하도록 하기 위해 폐기물의 크기는 5cm 정도 되도록 절단하고 비닐봉투에 2.5kg 씩 담아 소각용 시료로 이용하였다. 소각대상 폐기물의 크기가 작을 경우 소각이 완료되기 전에 적재실 하부로 떨어져 불완전 연소가 일어나는 것을 방지하기 위해 grate 위에 스테인레스 망을 얹어 그위에 폐기물을 적재하였다.

2.3 실험 방법

1) 전기로에서의 연소실험

온도조건에 따른 각 중금속 성분의 휘발정도

를 파악하기 위해 우선 전기로를 예열시키고 전기로의 온도가 일정온도로 유지될 때 입경 3mm 이하로 잘게 분쇄한 소각대상 폐기물 90g을 도가니에 30g씩 나눠 담아 동시에 전기로내에 넣었다. 연소초기에는 도가니 덮개를 한 채 연소실험을 행하고 일정시간(30분 정도)이 지나면 덮개를 열어둔채로 약 5시간 정도 연소시켰다.

2) 스토카 소각로에서의 소각실험

소각시 폐기물중에 함유된 중금속 성분의 분배특성을 파악하기 위하여 스토카식 소각로를 이용하여 소각실험을 행하였다. 먼저 폐기물의 무게를 정량한 다음 정량한 1/4 정도의 폐기물을 투입한 후 주전원을 공급하고 냉각수조 내의 냉각수량이 충분한지를 확인하였다. 폐기물 투입구(inter door)를 열고 점화원을 이용하여 폐기물을 착화시켜 폐기물 상단부에 착화가 고루 이루어졌다고 판단될 때 송풍기(blower)의 주 댐퍼(main damper)를 약간(20% 정도) 개방시키고, 건류공기 댐퍼는 완전히 잠근상태에서 연소공기 공급용 송풍기를 가동시켰다. 폐기물은 시간당 30kg씩 투입하였고 소각로내의 온도를 일정하게 유지시키기 위해 건류공기 댐퍼를 조절하며 운전하였으며, 각 조업조건(700℃, 800℃)에서 5시간 동안 소각을 행하여 투입된 폐기물이 완전히 소각되도록 하였다. 소각이 완료되면 적재실 하부로 배출된 회재와 집진장치에서 포집된 회재를 별도로 수거하여 무게를 정량한 후 각 소각회재중의 중금속 성분 농도를 분석하기 위한 시료로 이용하였다.

3) 중금속 분석

원폐기물 중의 중금속 농도 및 소각로 각 부분에서 수거된 회재 중의 중금속성분 농도를 측정하기 위해 ASTM(American Society for Testing Materials) E926-83에 규정된 Method B (Nitric-Sulfuric Acid Digestion) 방법에 따라 시료를 전처리 하였다(ASM, 1987). 위와 같은 과정을 거쳐 전처리된 분석용 시료용액 중의 중금속성분 농도는 원자흡광광도계(PERKIN ELMER 2380-AAS)를 이용하여 분석하였다. 한편 Hg와 As는 MHS-10, ED Lamp가 부착된 원자흡광광도계를 이용하여 분석을 행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 전기로내 연소실험

실제 소각로에서의 중금속 분배특성을 평가하기 위한 기초자료를 얻기 위해 우선 온도조절이 용이한 전기로에서 폐기물 연소실험을 행하였다. 이때 연소온도는 일반적인 소각로 운전온도를 고려하여 700, 900, 1100℃로 유지했으며 각 연소온도에서 폐기물을 연소시킨 후 발생한 연소잔류물 중의 중금속성분 농도를 분석한 결과를 원폐기물 중의 중금속성분 농도와 비교하여 Fig. 2에 나타냈다.

Fig. 2에서 보면 연소온도를 700℃로 유지시킨 상태에서 폐기물을 연소시켰을 때 채취된 연소잔류물 중에 함유된 중금속성분 농도는 원폐기물중의 중금속성분 농도보다 훨씬 높게 나타나는데 이는 연소에 의해 폐기물의 부피가 줄어들면서 폐기물 중에 함유되어 있던 중금속 성분이 잔류회재중에 농축되기 때문으로 생각된다.

그러나 연소온도를 상승시키면 연소잔재물 중의 중금속성분 농도가 급격히 감소함을 볼 수 있는데 이러한 현상은 연소시 폐기물 중의 중금속 성분이 연소온도 상승에 따라 순금속 자체의 증기화 또는 증기압이 높은 가스상의 산화물로 전이되는 등의 과정을 통해 휘발되는 율이 부피 감소율보다 크기 때문인 것으로 판단된다(Chang & Biswas, 1993). 또한 이와 같은 중금속성분의 열적거동은 중금속성분의 종류에 따라 많은 차이를 보였다.

한편 연소실험에서 발생된 잔류회재량과 회재 중의 중금속성분 농도를 바탕으로 각 중금속성분의 회재중 잔류분율과 휘발분율을 계산한 결과를 Fig. 3에 나타냈다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 700℃의 연소조건에서 Hg 성분은 원폐기물 내 함유된 총량의 약 15%가 잔류회재내에 존재하며 나머지는 휘발되는 것으로 나타났다. Hg 성분의 열적거동에 대해서는 연구자들에 따라 큰 차이를 보이는데 Brunner and Monch(1985)와 Fernandez et al.(1992)에 의하면 Hg성분은 700℃ 이하의 연소과정에서도 거의 대부분이 가스상으로 휘발된다고 보고한 반면에 Richard et al.(1980)은 일반 소각로 운전조건에서 투입된 폐기물내에 함유된 Hg 성분 총량의 50% 정도가 잔류회재내에 존재한다고 보고한 바 있다. 그리고 Cd와 Pb 성분은 Hg 성분과 비슷한 휘발분율을 나타냈으며 Cu는 70% 정도가 휘발되고 연소잔재물 중에는 30% 정도가 잔류하는 것으로 나타났으나 연소

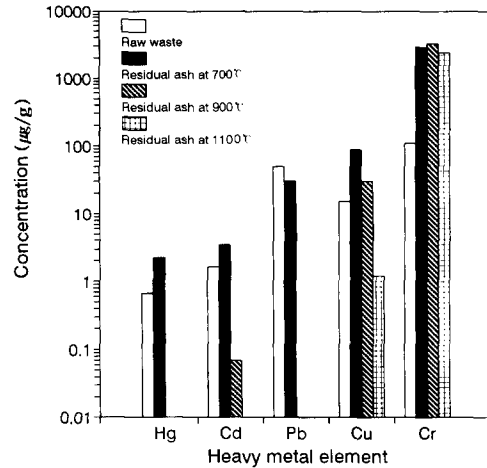


Fig. 2. Concentration of heavy metals in residual ashes from waste combustion in the muffle furnace.

온도가 증가할수록 중금속 성분들의 휘발분율이 높아져 거의 전량이 기화됨을 알 수 있다. 이에 반해 폐기물 중에 함유되어 있는 Cr 성분은 열적 휘발성이 다른 성분에 비해 아주 낮아 연소온도 700℃ 조건에서 90% 정도가 소각회재내에 잔류하고, 900℃ 조건에서는 약 68%, 1100℃에서는 40% 정도가 잔류회재에 존재하는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로 볼 때 폐기물 중에 함유된 중금속 성분은 각 중금속 성분의 종류와 연소온도에 따라 잔류회재에 고농도로 농축되거나 기화하여 휘발하는 열적거동을 보이며 전체적으로 온도가 증가할수록 회재내에 잔류하는 비율은 감소하고 비등점이 낮은 중금속 성분일수록 감소되는 정도가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

3.2 폐기물 소각시 중금속 성분의 분배특성

폐기물 소각시 중금속성분의 분배특성을 평가하기 위해 반건류식 스토카 소각로의 일반적인 운전조건인 700~800℃의 소각온도에서 폐기물의 소각실험을 행하여 잔류회재와 집진기에서 포집된 비산회재를 분리 채취한 후 각각의 중금속 함량을 분석하고 그 결과를 Table 3에 나타냈다. Table 3에서 보면 비산회재중 중금속 농도가 잔류회재 중의 농도보다 훨씬 높음을 볼 수 있다.

폐기물 소각시 중금속 성분의 거동에 관한 연구

이와 같은 결과는 잔류회재중의 중금속성분은 소각시 고온 분위기에서 휘발되지 않은 양만 존재하지만 비산회재에는 집진기 부분에서 연소가스가 냉각됨에 따라 증기상의 중금속성분이 비산회재 표면에 응축되는 과정이 추가되기 때문으로 생각된다(Buchholz, 1993). 그러나 분배 특성은 농도만으로 평가할 수 없으며 양적인 면도 고려해야 하므로 Table 3에 나타낸 각부분의 중금속농도와 Fig. 4에 나타낸 중금속성분의 물질수지식을 바탕으로 각부분의 분배 백분율을

구하여 그 결과를 Fig. 5-1, 5-2에 나타냈다.

Fig. 5-1, 5-2에서 보면 폐기물 소각시 중금속 성분의 분배특성은 중금속 성분의 종류에 따라 뚜렷한 특징을 보이고 있으며 전체적으로 앞절에서 설명된 중금속성분의 열적거동과 유사한 경향을 보였다.

소각온도가 700℃인 조건에서는 폐기물 중에 함유된 Cr, Cu, Pb성분은 약 67~88%가 잔류회재내에 잔류하며 기화되어 대기중으로 배출되는 비율은 6~16% 정도로 잔류회재에 잔류

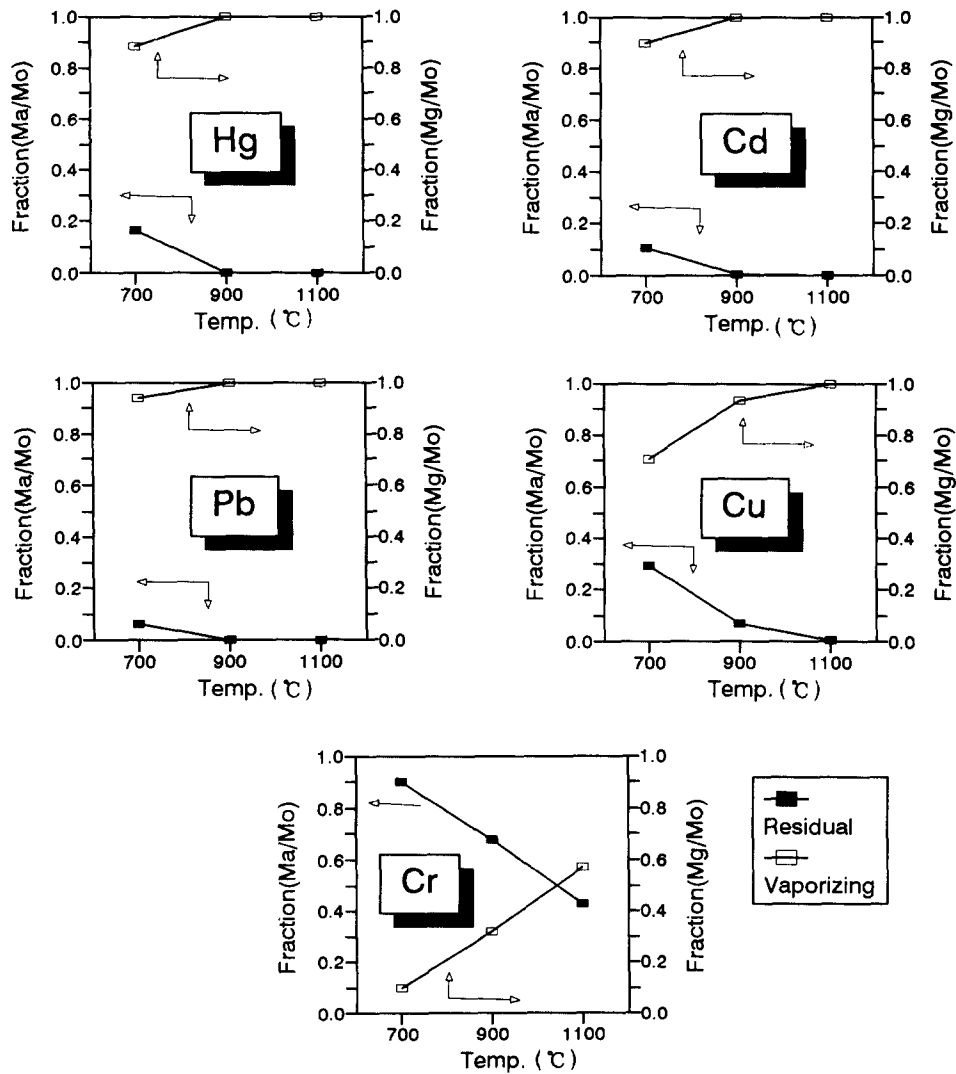


Fig. 3. Residual and vaporizing fraction of heavy metals with combustion temperature during waste combustion in muffle furnace. (Mo : total mass of heavy metal in waste, Ma : residual mass of heavy metal in ash, Mg : vaporizing mass of heavy metal during combustion)

Table 3. Concentration of heavy metals in the ashes from stoker type incinerator

Feeding rate(kg/hr)	Operating temp.(°C)	Ash discharging rate(g/hr)		Metal concentration(μg/g)					
				Cu	Pb	Cd	Cr	Hg	As
30	700	B·A	3,500	85.8	373.0	2.2	1099.7	1.4	N·D
		F·A	105	795.6	881.6	21.1	1052.4	3.2	N·D
25	800	B·A	2,200	71.4	250.0	1.4	1270.9	1.3	N·D
		F·A	106	895.4	308.9	24.6	793.2	2.8	N·D
Raw waste				15.0	49.4	1.7	157.1	0.7	N·D

B·A : Bottom ash
 F·A : Fly ash
 N·D : Concentration below detection limit.

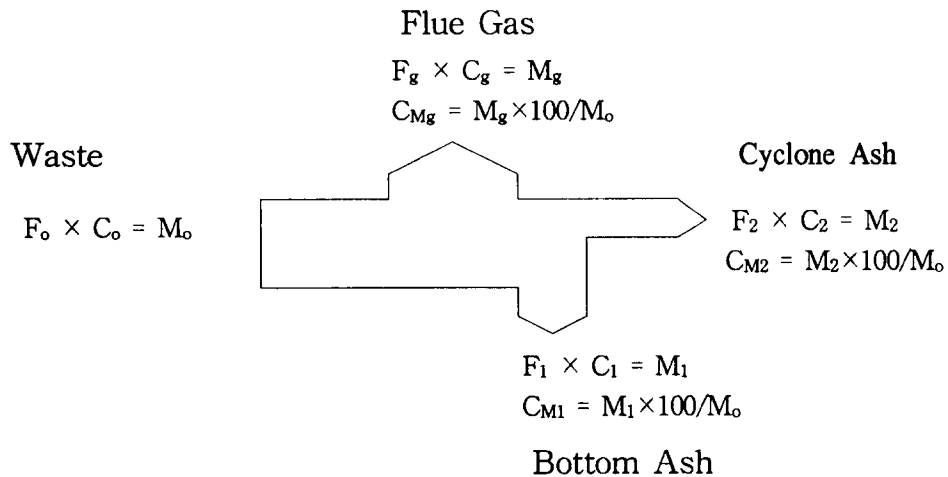


Fig. 4. Mass balance of elements during waste incineration.

C_o, C_1, C_2, C_g : Metal concentration in waste, bottom ash, fly ash and flue gas(μg/g)
 C_{M1}, C_{M2}, C_{Mg} : Percentage of metal in bottom ash, fly ash and flue gas to M_o (%)
 F_1, F_2, F_g : Mass of bottom ash, fly ash and flue gas(g)
 M_o, M_1, M_2, M_g : Total mass of metal in waste, bottom ash, fly ash and flue gas(μg)
 $M_o = M_1 + M_2 + M_g, C_{M1} + C_{M2} + C_{Mg} = 100\%$

하는 비율이 훨씬 높은 결과를 보였다. 이러한 결과를 볼 때 Cr 성분은 고온의 산소분위기에서 비교적 안정된 금속산화물로 전이되어 주위의 온도조건에 영향을 비교적 적게 받기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 판단된다(Chang & Biswas, 1993). 한편 Cu 성분은 일반적인 소각 온도 조건에서 잔류회재중에 잔류하는 비율이 89%라고 보고한 Brunner and Monch(1985)

의 연구결과에 비해 잔류회재중에 잔류하는 비율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 소각대상 폐기물의 투입시 비닐류가 포함됨으로 인해 소각함에 따라 Cu 성분이 비등점이 비교적 낮은 $CuCl_2$ 염화물로 전이되어 휘발이 다소 많이 일어난 것으로 사료된다(Seo et al., 1992). 특히 Cu 성분은 다른성분에 비해 비산회재중의 비율이 높은 분배특성을 보였다.

폐기물 소각시 중금속 성분의 거동에 관한 연구

Cd, Hg성분은 잔류회재 중에 15~23%, 비산 회재 중에는 2~4% 정도 잔류하며 약 80% 정도는 대기중으로 배출되는 것으로 파악되었다. Cd 성분은 기화하여 대기중으로 배출되는 양보다는 비산회재에 잔류하는 비율이 높은 것으로 알려져(Brunner & Monch, 1985) 있는 반면에 본 연구에서는 비산회재에 침적되는 비율은 아주 낮고 대기중으로 배출되는 비율이 아주 높은 분배특성을 보였다. 이러한 결과는 소각시 증기

화된 중금속성분이 연소가스가 냉각됨에 따라 아주 미세한 비산회재 표면에 응축, 침적되어 고 농도로 농축되는 것으로 알려져 있으나 (Davison et al., 1974) 본 연구에서 사용된 cyclone으로는 입경 $10\mu\text{m}$ 또는 그 이상의 입자만 주로 집진되기 때문에(Cooper & Alley, 1986) 중금속 증기의 침적율이 높은 $10\mu\text{m}$ 이하의 미세한 입자가 포집되지 않아 상대적으로 대기중으로 배출되는 비율이 높아진 것으로 판단된다. 또

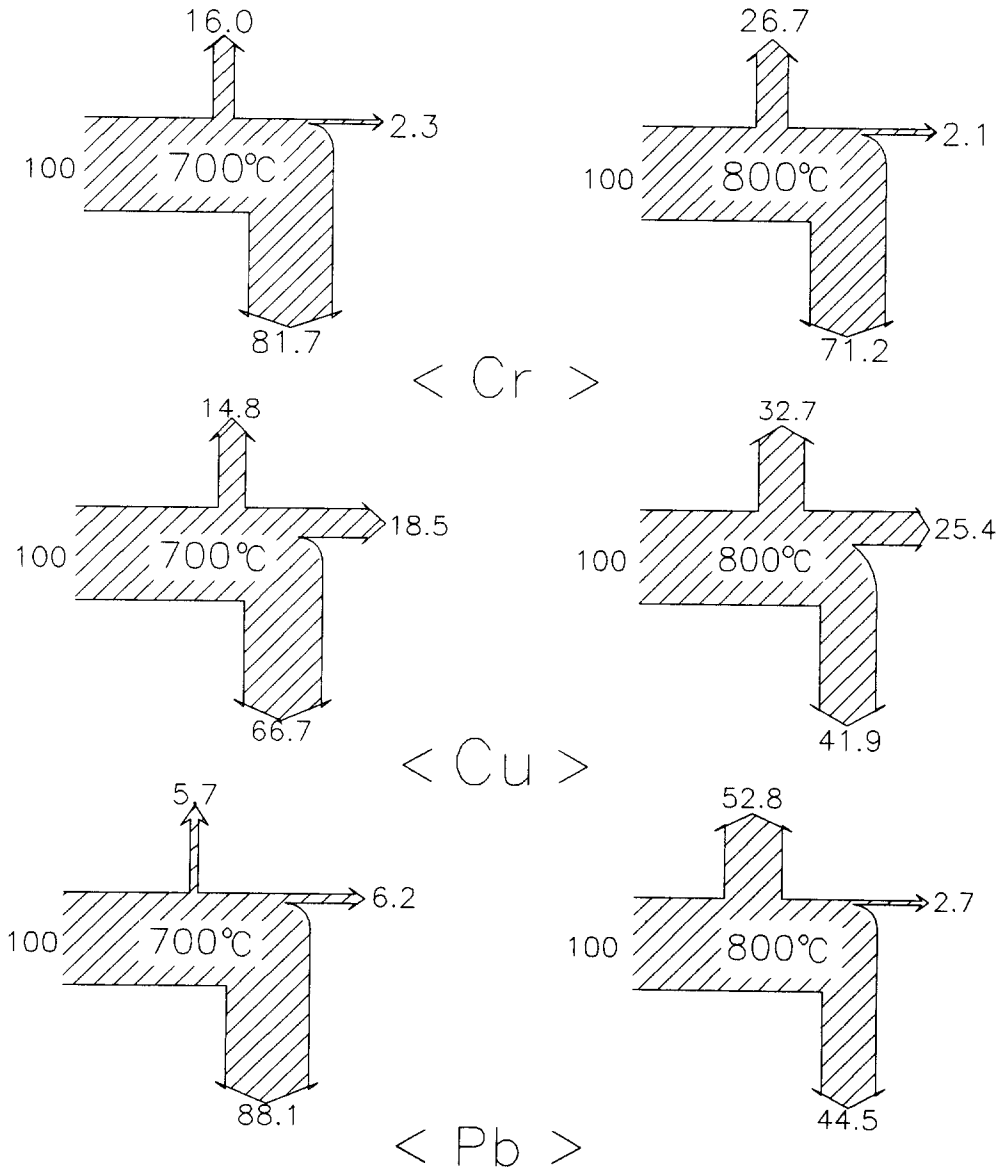


Fig. 5-1. The partitioning of selected metals during waste incineration.
 ↑, Flue gas ; ↓, Bottom ash ; →, Cyclone ash. (Unit : %)

한잔류회재중 Hg성분의 잔류비율에 대해서는 연구자들에 따라 4~50% 정도로 많은 차이가 있는데(Richard et al., 1980) 그 이유는 아직 명확히 밝혀지지 않은 실정이다.

한편 소각온도 변화에 따른 중금속 성분의 분배특성을 보면 소각온도를 700℃에서 800℃로 높여 운전할 경우 대부분의 중금속 성분들이 잔류회재중에 잔류하는 비율이 약간씩 감소하는 것으로 나타났다.

Cr의 경우 온도조건을 800℃로 유지하여 운전하였을 때 700℃ 조건보다 잔류회재중 잔류하는 비율은 약 10% 정도가 감소함을 보였고 기화되어 대기중으로 배출되는 비율은 10% 정

도가 증가하여 배출되는 것으로 나타났다. Cu는 700℃ 조건에서 잔류회재에 잔류하는 비율이 65% 정도 였지만 온도를 증가시켰을 때는 약 20% 정도가 감소하는 것으로 나타났고 휘발되어 대기중으로 배출되는 비율은 15% 정도가 증가되는 것으로 나타났다. Hg, Cd 성분은 소각온도를 증가시킬 경우 잔류회재에 분배되는 비율이 700℃ 조건보다 약 5%가 감소되고 대기중으로 배출되는 비율은 5% 정도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과로 볼 때 폐기물 중에 함유된 중금속 중 Cr, Cu 그리고 Pb 성분은 폐기물을 소각할 때 증기상태로 기화하여 휘발되는 양이

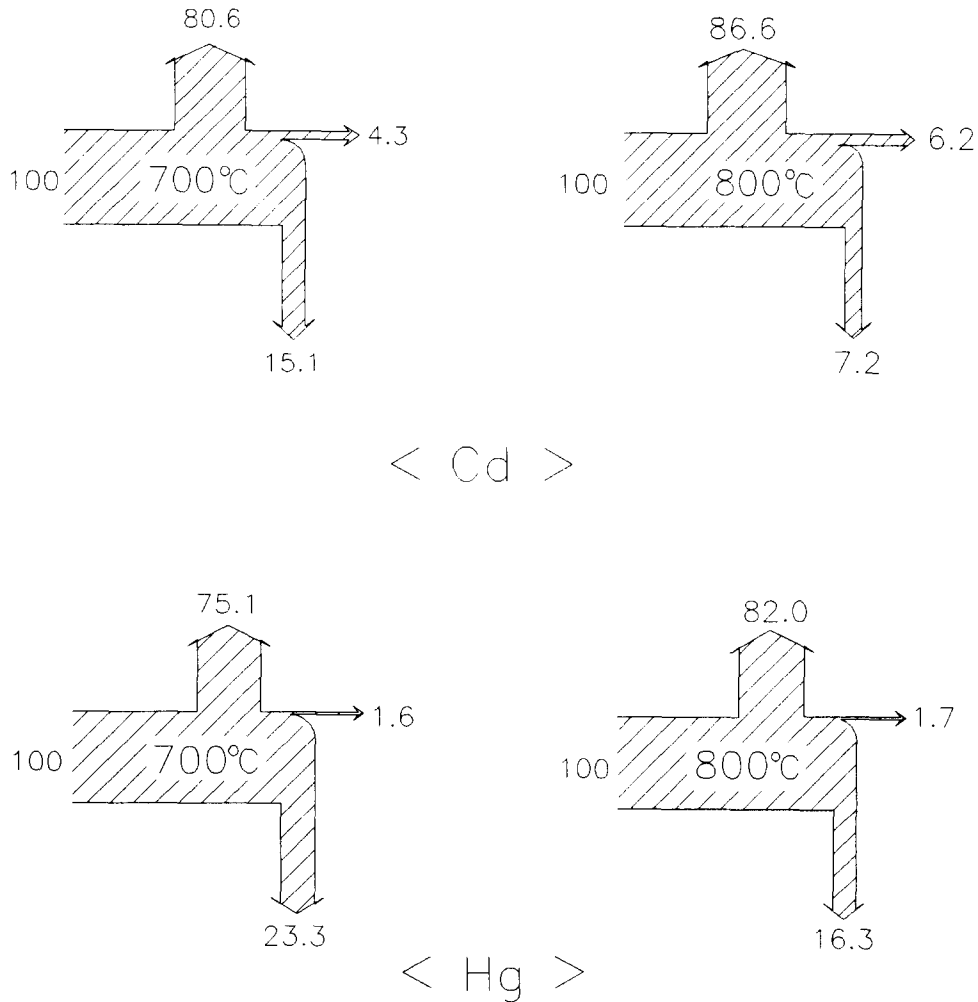


Fig. 5-2. The partitioning of selected metals during waste incineration.
 ↑, Flue gas ; ↓, Bottom ash ; →, Cyclone ash. (Unit : %)

비교적 적어 소각로 잔류회재 중에 잔류되는 경향이 큰 중금속(lithophilic metal)이고, Hg와 Cd 성분은 소각시 많은 양이 휘발되어 연소가스와 함께 배출되는 성질을 지닌 중금속(atmophilic metal)종으로 분류할 수 있다고 판단된다.

3.3 회재 입경별 중금속 분배 특성

각종 중금속성분의 입경별 분배특성을 파악하기 위해 소각로에서 발생된 잔류회재와 비산회재를 38 μm 이하의 입경으로부터 250 μm 이상의 입경으로 분리하여 각 입경범위별로 회재내에 함유된 중금속성분 농도를 분석하였고 이와 아울러 회재의 입경별 분배특성도 평가하였다.

폐기물 소각후 발생된 잔류회재와 비산회재의 총무게를 달고 입경별로 분급하여 각 입경범위별로 질량분율을 파악하고 그 결과를 누적분율

로 하여 Fig. 6에 나타냈다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 잔류회재의 경우 전체의 75% 정도가 75 μm 이상의 입자로 구성되어 있으며 38 μm 이하의 입자는 약 5%, 38~58 μm 사이의 입경에는 7% 정도, 53~75 μm 입경에 4% 정도가 분포하고 있으며 소각온도에 따른 분포특성의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 비산회재의 경우는 75~150 μm 이하의 입자가 20% 정도가 포함되어 있었고 나머지 입경범위에는 약 10%씩 고르게 분포하고 있었다.

입경별로 분리된 잔류회재 및 비산회재 중의 중금속성분 농도는 Table 4, 5에 나타낸 바와 같다.

표에서 보면 잔류회재 중의 입경별 중금속 농도는 입자의 크기가 작을수록 다소 높아지는 경향성을 보이고 있는데 이는 입자가 클수록 고온 연소실내의 체류시간이 길어 중금속의 열적휘발

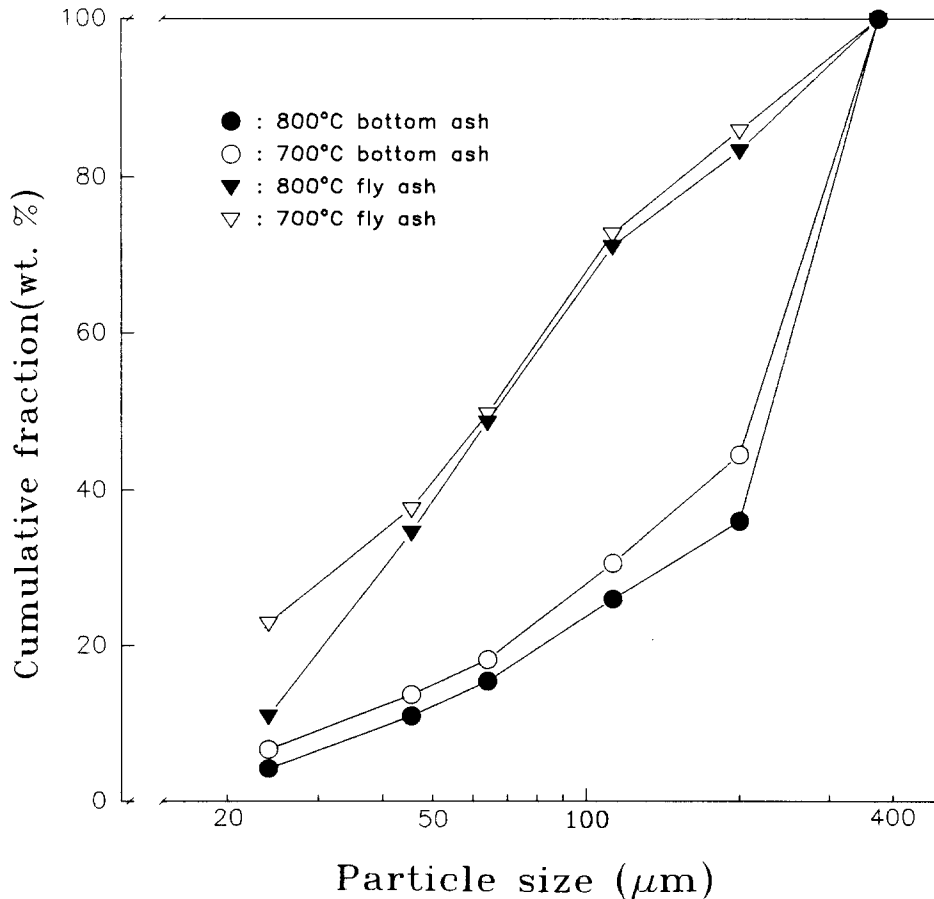


Fig. 6. Particle size distribution of bottom and fly ashes from stoker type incinerator.

Table 4. Metal concentration in bottom ash fractioned-size from waste incinerator

Operating temp.(°C)	Particle size(μm)	Concentration(μg/g)				
		Hg	Cd	Pb	Cu	Cr
700	< 38	0.1	5.4	1015.8	168.7	4678.7
	38~53	1.7	3.7	510.1	107	73.6
	53~75	1.1	3.0	407.7	76.1	423.9
	75~150	1.0	1.8	567.9	63.1	249.3
	150~250	1.0	1.0	131.2	27.1	277.7
	> 250	1.8	1.9	292	93.6	1240.5
800	< 38	1.2	5.5	613.1	216.4	11460.8
	38~53	4.5	4.8	241	190.2	425.3
	53~75	1.4	3.5	371.1	156.7	1634.4
	75~150	4.4	2.7	316	162.7	2216.5
	150~250	1.2	1.7	335.8	85.3	970.4
	> 250	0.5	0.4	194.7	26.2	558.2

Table 5. Metal concentration in fly ash fractioned-size from waste incinerator

Operating temp.(°C)	Particle size(μm)	Concentration(μg/g)				
		Hg	Cd	Pb	Cu	Cr
700	< 38	1.2	24.4	933.1	963.7	1048.6
	38~53	6.9	19.6	50.7	1075.9	1230.7
	53~75	1.1	21.0	422.6	818.6	1637.9
	75~150	0.1	20.0	869.7	482.4	853.8
	150~250	12.2	23.1	2674.2	812.9	1014.4
	> 250	1.1	17.2	398.9	709.7	726.0
800	< 38	2.1	36.6	267.1	1017.8	1003.3
	38~53	4.0	30.6	248.2	984.5	803.9
	53~75	2.1	18.9	275.7	703.7	837.8
	75~150	1.8	20.6	309.7	852.5	769.8
	150~250	1.1	24.2	293.8	938.7	786.0
	> 250	4.8	21.4	461.5	874.3	636.8

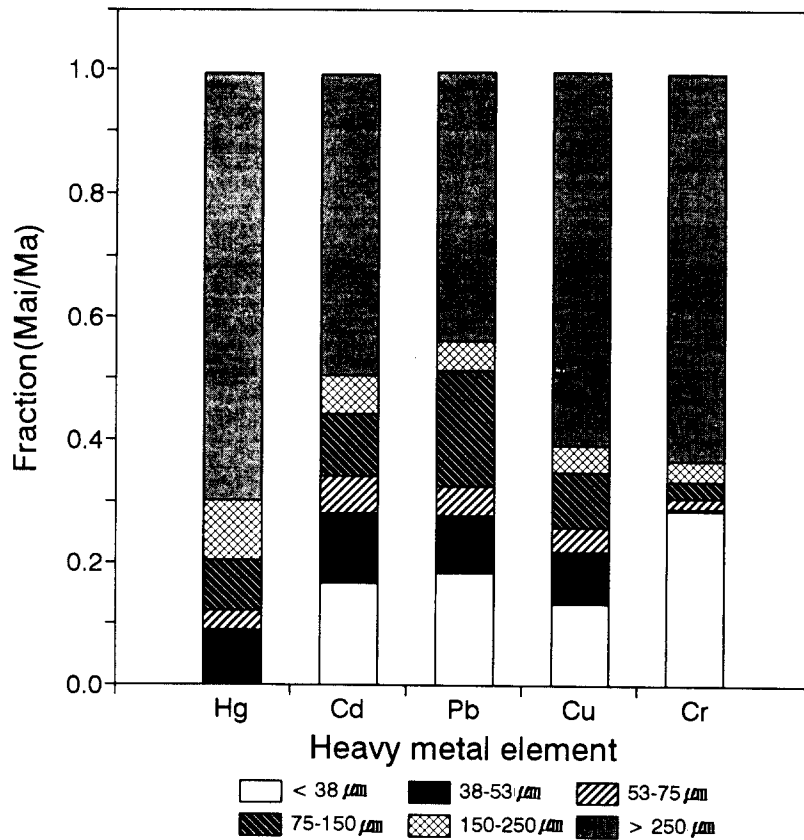


Fig. 7. Fraction of metals in each particle size range of bottom ash from waste incineration at 700°C. (Ma : total mass of heavy metal in ash, Mai : mass of heavy metal in ash fractioned-size)

이 많이 일어나는 반면에 미세한 잔류회재는 쉽게 화격자를 통과하여 연소실로 부터 제거되어 열적회발이 적게 일어나기 때문으로 생각된다. 이에 비해 비산회재 중의 중금속 농도는 잔류회재와는 달리 증기화된 중금속의 응축, 침적량도 고려해야 하므로 이의 평가는 보다 복잡한 설명이 요구된다. 일반적으로 비산회재의 입자 크기가 작을수록 비표면적이 증가하여 많은 양의 증기상 중금속이 입자표면에 응축, 침전되고 특히 10μm 이하의 미세한 비산회재에는 고농도로 중금속이 농축되는 것으로 알려져 있다(Davison et al., 1974). 그러나 본 연구에서는 cyclone 만을 이용하여 비산회재를 포집했기 때문에 10μm 이하의 아주 미세한 입자가 포집되지 않아 입경별 중금속 농도의 뚜렷한 경향성을 볼 수 없었다. 이와 유사한 실험결과는 Buchholz(1993)에 의해서도 보고된 바 있다. 이들의 연구결과에 의

하면 비산회재 중의 중금속성분 농도는 비산회재의 기질(matrix)내에 존재하는 중금속과 입자 표면에 응축, 침적되는 중금속이 동시에 기여하므로 20μm 이상의 비산회재 중의 중금속 농도는 위의 두과정의 기여도에 따라 특이한 경향성을 보인다고 보고하였다. 한편 회재 입경별 중금속 성분의 분배특성을 파악하기 위해 입경별로 분리된 회재중의 중금속성분 농도와 입경별 질량 분율을 고려하여 중금속성분의 입경범위별 분배 분율을 계산하여 그 결과를 Fig. 7, 8, 9, 10에 나타냈다.

그림에서 보는 바와 같이 700°C 조건에서 발생된 잔류회재에 대한 중금속 성분의 입경별 분배특성을 보면 중금속 종류에 관계없이 250μm 이상의 조대입자에 잔류회재중 중금속의 50% 이상이 존재하고 53~75μm 사이의 입경범위에 가장 적게 분포하는 것으로 나타났다. 그러나

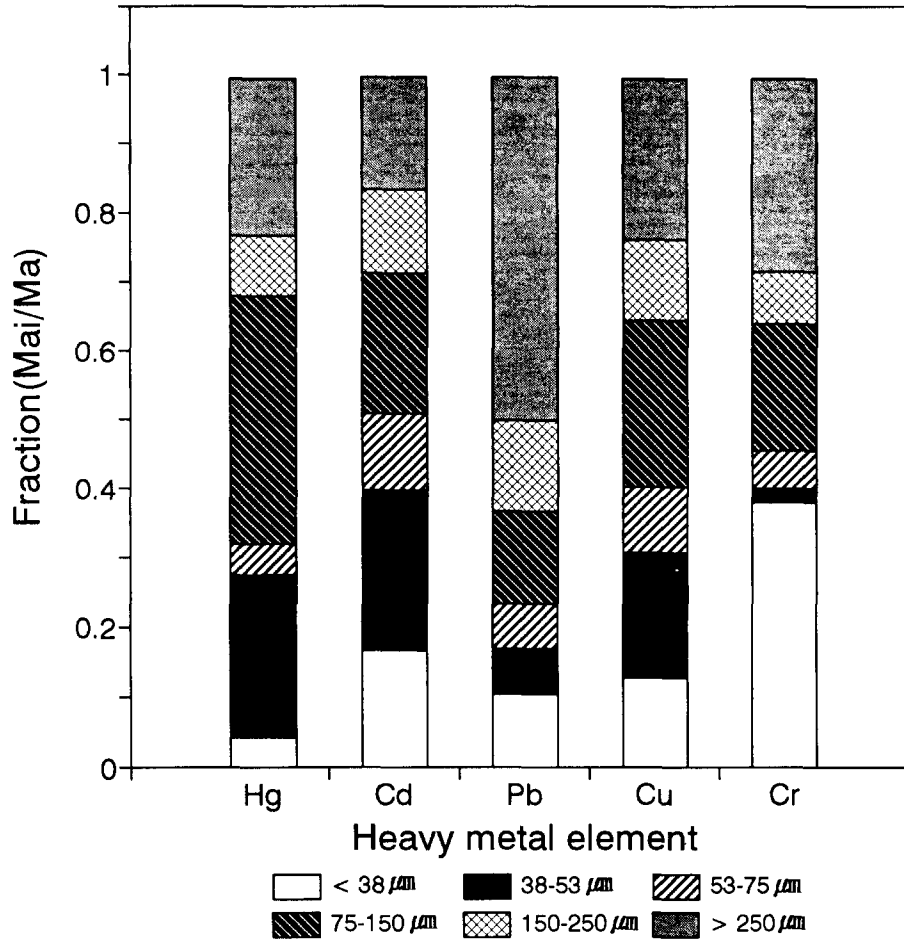


Fig. 8. Fraction of metals in each particle size range of bottom ash from waste incineration at 800°C. (Ma : total mass of heavy metal in ash, Mai : mass of heavy metal in ash fractioned-size)

800°C인 조건에서의 입경범위별 중금속 분배분율은 700°C에서의 결과와는 다른 양상으로 250 μm 이상의 조대입자 중의 분배분율은 현저히 감소하고 각 입경에 고르게 분포하는 것을 알 수 있는데 이러한 이유는 소각온도가 증가함에 따라 회재 내부의 기질(matrix)에 존재하는 중금속들도 일부 휘발됨으로 인해 나타난 결과라고 판단된다. 그리고 비산회재의 입경별 중금속 분배특성은 잔류회재에 비해 미세입자에 대한 분배분율이 현저히 높은 특성을 보이거나 중금속 종류별로는 특이한 경향성을 나타내지는 않았다. 그러나 소각온도에 따른 분배특성을 비교해 보면 소각온도가 700°C인 경우 38 μm 이하의 미세

입자에 대한 중금속의 분배분율이 소각온도가 800°C인 경우보다 현저히 높게 나타나는데 이는 소각온도가 낮을수록 연소가스의 배출온도가 낮아 휘발된 중금속의 응축, 침적효과가 크게 나타나기 때문으로 사료된다.

이상과 같은 결과로 미루어 볼 때 입경에 따른 분배특성은 잔류회재와 비산회재에 따라 서로 다른 양상을 보이며 아울러 소각온도, 중금속성분의 종류에 따라서도 많은 차이를 보였다. 특히 비산회재는 일반적으로 미세할수록 중금속 농도가 높다고 알려져 있으나 cyclone에서 포집 가능한 입경범위에서는 입경에 따른 농도분포의 특성은 뚜렷하지 않은 것으로 생각된다.

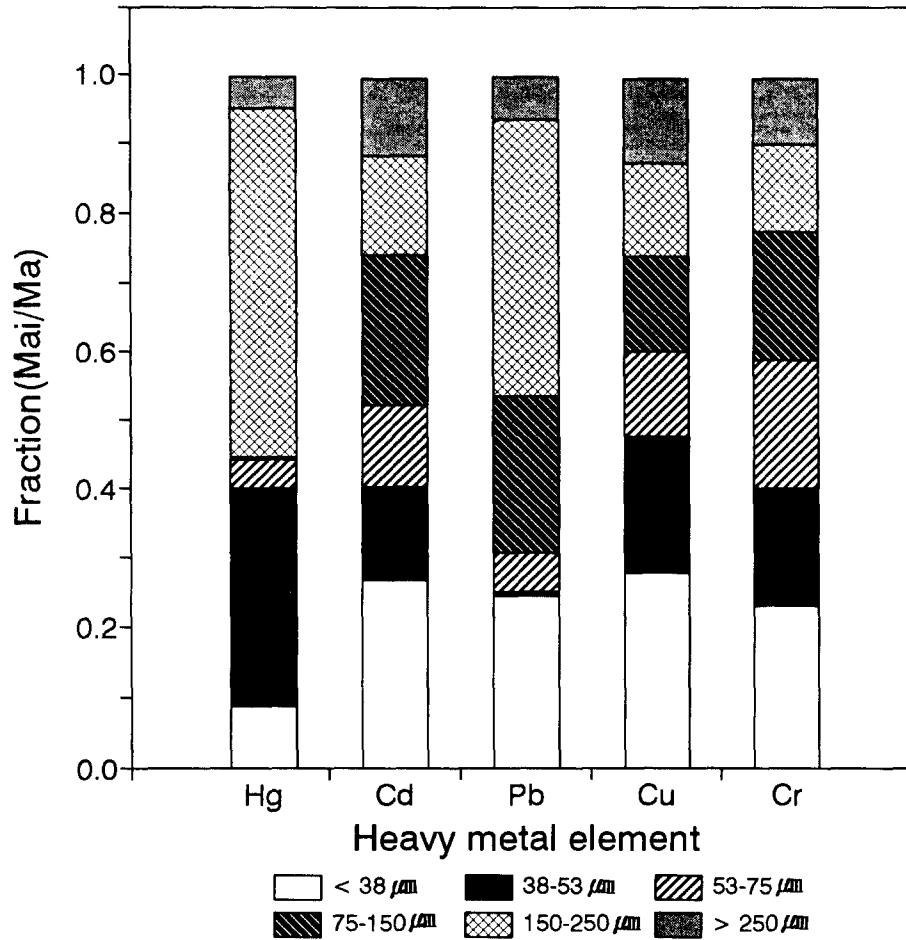


Fig. 9. Fraction of metals in each particle size range of fly ash from waste incineration at 700°C. (Ma : total mass of heavy metal in ash, Mai : mass of heavy metal in ash fractioned-size)

4. 결 론

폐기물을 소각함에 따른 중금속성분의 분배특성을 평가하기 위해 전기로와 스톡카식 소각로에서 혼합 산업폐기물의 소각실험을 행하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 폐기물의 연소시 폐기물에 함유된 중금속 성분중 회재잔류량과 휘발량은 연소온도와 각 중금속의 비등점에 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다. 700°C 연소조건에서 중금속성분의 대부분은 회재중의 잔류농도가 원폐기물 중의 농도보다 높은 농축현상이 나타났으나 1100°C 연소조건에서는 비등점이 높은 Cr과 Cu는 회재에 상당량 잔류하는 반면에 비등점이 낮은 Cd와 Hg는 전량 휘발되는 열적거동을 보였다.

2. 폐기물 소각시 소각온도를 700°C로 유지시킬 경우 비교적 비등점이 높은 Cr, Cu, Pb 등은 폐기물 중의 총함량중 67~88%가 잔류회재로, 2~19%는 cyclone에서 포집된 비산회재에 분배되며 6~16%는 대기중으로 배출되는 분배특성을 보인 반면에 비등점이 낮은 Cd와 Hg는 단지 15~23% 만 잔류회재에 분배되며 75~81%는 휘발되어 대기중으로 배출되는 분배특성을 보였다. 한편 소각온도를 800°C로 상승시키면 700°C 조건에 비해 전체적으로 잔류회재에 대한 분배비율이 7~15% 정도 낮아지고 대기중으로 배출되는 분배비율이 높아지는 특성을 나타냈다.

3. 회재의 입경에 따른 중금속성분의 분배특

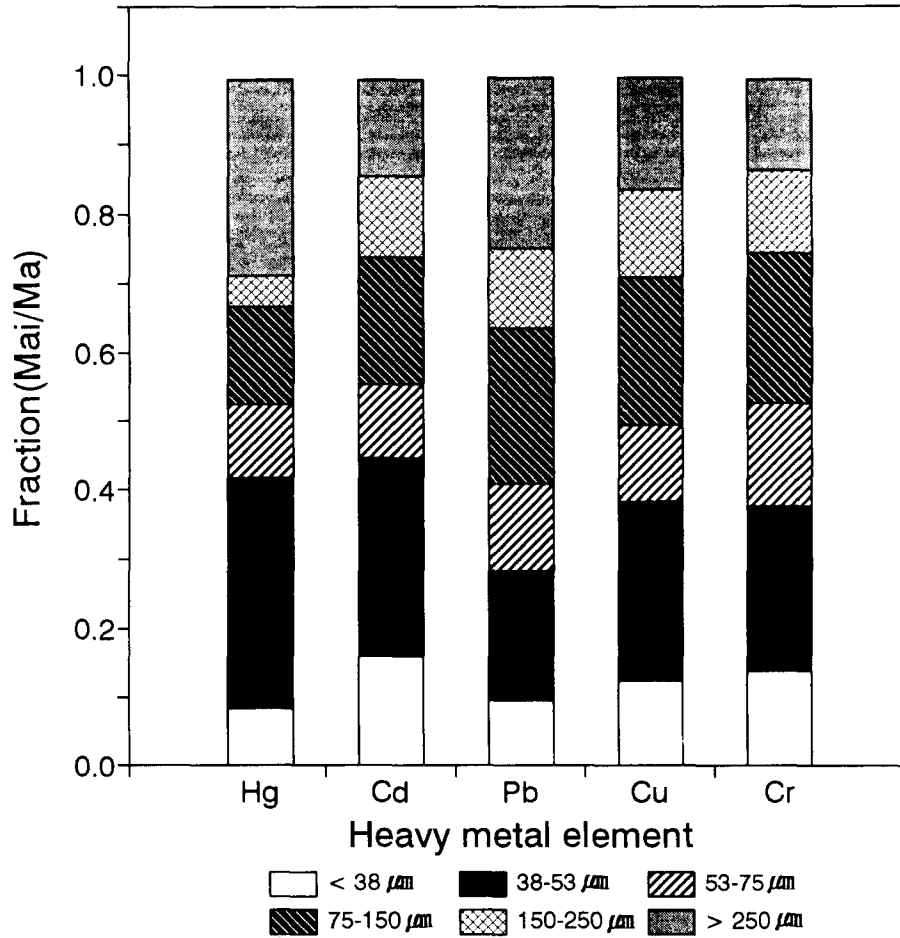


Fig. 10. Fraction of metals in each particle size range of fly ash from waste incineration at 800°C. (Ma : total mass of heavy metal in ash, Mai : mass of heavy metal in ash fractioned-size)

성은 잔류회재와 비산회재가 서로 다른 양상을 보이며, 소각온도에도 영향을 받으나 대체적으로 잔류회재에서는 75μm 이상의 조대입자에 대한 분배비율이 60~80%로 높고, 비산회재에서는 미세입자에 대한 분배비율이 다소 높게 나타났다.

참 고 문 헌

동력자원부, 1992, 하폐수 슬러지의 열분해 공정 연구. 2차년도최종보고서.
 ASTM, 1987, Standard Methods of Preparing Refuse-Derived Fuel(RDF-3)

Samples for Analyses of Metals E926-83, Annual Book of ASTM Standard "Water and Environmental Technology". 11.04, 600~601.
 Brunner, P. H and H. Monch, 1985, The Flux of Metals through Municipal Solid Waste Incinerators, ISWA Specialized Seminar Incinerator Emissions of Heavy Metal and Particulate, Copenhagen, (18~19), 103~117.
 Buchhloz B. A., 1993, Trace Metal Analysis of Size-Fractioned Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash and its

- Leachate, *Journal Environ. Sci. Health*, 28A(2), 423~441.
- Chang, Y. W. and P. Biswas, 1993, An Equilibrium Analysis to Determine the Speciation of Metals in an Incinerator, *Combustion and Flame*, 93(1~2), 31~40.
- Cooper, C. D. and F. G. Alley, 1986, *Air Pollution Control: A Design Approach*, PWS Engineering, Boston, 105~109.
- Davison R. L., D. F. S. Nausch, J. R. Wallace and C. A. Evans, Jr., 1974, Trace Elements in Fly Ash: Dependence of Concentration on Particle Size. *Environ. Sci. Technol.*, 8(13), 1107~1113.
- Esko, I. K. and T. A. Pakkanen, 1990, Mass and Trace Element Size Distributions of Aerosols Emitted By a hospital Refuse Incinerator, *Atmospheric Environ.*, 24A(2), 423~429.
- Fernandez, M. A., L. Martinez, M. Segarra, J. C. Garcla and F. Espleell, 1992, Behavior of Heavy Metals in the Combustion Gases of Urban Waste Incinerators, *Environ. Sci. Technol.*, 26(5), 1040~1047.
- Greenberg, R. R., G. E. Gordon and W. H. Zoller, 1981, Atmospheric Emissions of Elements on Particles from the Parkway Sewage Sludge Incinerator, *Environ. Sci. Technol.*, 15(1), 64~72.
- Ho, T. C., J. M. Chen and J. R. Hopper, 1991, Metal Capture during Fluidized Bed Incineration of Solid Waste, *AIChE Sym. Series*, (276), 51~60.
- Lee, C. C., 1988, A Model Analysis of Metal Partitioning in a Hazardous Waste Incineration System, *JAPCA*, 38(7), 941-945.
- Lee K. H., 1992, Combustion Characteristics of Sewage Sludge and Reduction of Pollutants in Fluidized Bed Incinerators. Dep. of Environmental Eng. Graduate School, National Fisheries University of Pusan.
- Litt, R. D. and T. L. Tewksbury, 1981, Trace Metal Retention in a Fluidized Bed Combustor, *Proc., of the 10th Int. Conf. on FBC*, ASME, (2), 127~130.
- Richard, T. D., R. M. Manganelli, G. T. Baer, Jr., 1980, Fate and Behavior of Selected Heavey Metals in Incinerated Sludge, *JWPCF*, 52(10), 2552~2557.
- Seo Y. C., H. C. Yang, K. H. Kang and H. H. Park, 1992, Thermal Behavior of Hazardous and Radioactive Metals and Their Effects on Air Pollution(I), *Journal of Korea Solid Wastes Eng. Soc.*, 9(2), 233~240.
- Stephen, L. L. and G. E. Gordon, 1979, Sources of Metals in Municipal Incinerator Emissions, *Environ. Sci. Technol.*, 13(4), 434.
- Takeuchi, T., 1986, Saving Energy in Fluidized Bed Incineration for Sludge, *Journal Pollut. Contr.*, 22(3), 231~236.
- 田中勝, 1992, 廢棄物の焼却に伴う有害物質の排出とその對策, *産業公害*, 28(1), 58~65.
- 佐久間 英三, 1992, こみ焼却灰の對策", *月刊廢棄物*, 18(2), 189~194.