

산업폐기물 소각시설에서 폐기물 유형에 따른 입자상물질의 배출특성

박 정 호 · 서 정 민* · 조 정 구** · 류 재 용*** · 한 성 중****

진주산업대학교 환경공학과, *부산대학교 지역환경시스템전공, **부산보건환경연구원 대기관리과,
한국환경기술진흥원, *한국폴리텍VII대학 산업설비학과
(2007년 4월 24일 접수; 2007년 10월 31일 채택)

Emission Characterization of Particulate Matters According to the Types of Wastes from Industrial Waste Incinerator

Jeong-Ho Park, Jeong-Min Suh*, Jeong-Gu Jo**,
Jae-Yong Ryu*** and Seong-Jong Han****

Department of Environmental Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea
*Department of Environmental System Engineering, Busan National University, Miryang 627-706, Korea
**Air Preservation Division, Busan Institute of Health & Environment, Busan 613-806, Korea
***Korea Institute of Environmental Science and Technology, Seoul 122-706, Korea
****Korea Polytechic VII Colleges, Jinju 660-996, Korea
(Manuscript received 24 April, 2007; accepted 31 October, 2007)

The emissions characteristics of particulate matters(PM) according to the types of wastes from industrial waste incinerator of 800 kg/hr treatment capacity were investigated. For this study, the incinerate waste are as follows; waste resin, waste wood, waste urethane, waste gunny, and waste paper. The particulate samples were collected to be emitted in stack and air pollution control(both cyclone and bag filter). In stack, the concentrations of PM were in the range of 2.61 to 26.51 mg/S.m³ and the major chemical species were C, Si, Cl, K, Na, Ca in all the wastes. In cyclone fly ash, the mean content of heavy metal were in the order of Fe > Zn > Pb > Cu > Mn > Cr > Ni > Cd > As > Hg and the heavy metal content of waste resin were Zn 34,197.5 mg/kg, Fe 27,587.6 mg/kg, Pb 6,055.8 mg/kg, respectively. In bag filter fly ash, the mean content of heavy metal were in the order of Zn > Pb > Fe > Cu > Mn > Cd > Cr > Ni > As > Hg and the heavy metal content of waste wood were Pb 36,405.2 mg/kg, Fe 15,762.9 mg/kg, Cu 9,989.5 mg/kg, Cd 2,230.1 mg/kg, respectively. Comparing the heavy metal content of both cyclone and bag filter, in cyclone, the Cr, Fe, Ni content were higher than in bag filter and the Cd, Cu, Hg content were lower than in bag filter.

Key Words : Industrial waste incinerator, Particulate matters, Heavy metal, Cyclone, Bag filter

1. 서 론

산업폐기물은 산업활동에 수반해서 불가피하게 발생되는 부산물로서 모든 산업현장에서 예외없이 배출되며, 각종 산업의 확대 또는 세분화에 따라 폐기물의 유형 또한 매우 복잡한 형태로 변화되고 있다. 이에 폐기물의 처리방법에 관심이 모아지고 있

는데, 특히 소각처리하는 폐기물의 안정화와 대량으로 처리 할 수 있는 가장 신뢰성 있는 방법 중의 하나이며, 에너지 회수 차원에서 그 관심이 증대되고 있다. 환경부 자료에 의하면 산업폐기물의 소각량은 2005년 기준으로 산업폐기물 총 발생량의 6.5%인 7,326 톤/일이었으며, 향후 소각처리 비율을 점차 높여 2011년까지 총 발생량의 7.8%인 25,576 톤/일의 산업폐기물을 소각처리 할 계획을 추진하고 있다¹⁾.

하지만 소각은 처리과정시 대기오염물질의 배출로 인해 소각장은 주요 대기 점오염원 중의 하나로

Corresponding Author : Jeong-Min Suh, Department of Regional environmental system engineering, Pusan National University, Miryang 627-706, Korea
Phone: +82-11-810-4778
E-mail: suhjm@pusan.ac.kr

분류되며, 특히 폐기물 소각시 발생하는 입자상물질은 굴뚝으로 배출되기 전에 각종 방지시설을 거쳐 제거되지만 미세입자의 경우 제거하기 매우 까다롭다. 또한, 소각시 발생하는 바닥재와 비산재의 입자상물질은 화학적으로 비교적 안정된 무기물로 구성되어 있지만 유해 중금속이 다량 함유되어 있어 지정폐기물로 분류되는 경우가 많다^{2~4)}.

소각시 발생하는 입자상물질은 동일 폐기물 소각 시설이라도 운전조건이나 폐기물 유형에 따라서 배출특성이 다양하게 나타날 수 있으므로, 산업폐기물의 효율적이고 안정적 소각처리를 위해서는 소각대상의 유형에 따른 입자상물질 배출농도나 비산재에 함유되어 있는 중금속 성분의 배출특성을 파악할 필요가 있다. 한편, 폐기물 소각에 따른 입자상물질의 배출특성에 따른 국내 연구 동향을 살펴보면, 성 등⁵⁾은 소형 산업폐기물 소각로에 대한 입자상물질의 집진효율에 대해, 유 등⁶⁾은 산업폐기물 소각로에서 방지시설 전단과 후단에서 배출되는 입자상물질의 입경분포 및 중금속 성분의 배출특성에 대해 그리고 이 등⁷⁾은 제지류 소각시 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs) 배출농도에 대해 보고하고 있다. 그러나 각종 산업폐기물의 소각처리량이 점차 증가하고 있고 폐기물 유형에 따른 입자상물질의 배출특성에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 산업폐기물을 수집 소각처리하고 있는 진주시 소재 A업체의 처리용량 800 kg/hr 화격자 소각로를 대상으로 산업폐기물로 주로 발생하는 폐합성수지류, 폐목재류, 폐우레탄류, 폐마대류, 폐지류 등 총 5종류의 산업폐기물을 유형별 소각하고 이때 굴뚝으로 배출되는 입자상물질의 배출특성과 원심력집진기, 여과집진기의 대기오염 방지시설에서 집진된 비산재 중 중금속의 함유농도 특성을 폐기물 유형별로 파악하는 것을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 폐기물 소각로

본 연구를 위해 소각시설은 산업생산 과정에서 발생하는 폐합성화합물 등 고체 산업폐기물을 수집

소각처리하고 소각시 발생하는 여열을 제품 생산 공정에 재이용하고 있는 경남 진주시 소재 A제지제조업체에서 설치 사용 중인 화격자 소각로를 대상으로 하였다.

Fig. 1에는 소각시설의 처리공정과 입자상물질의 시료채취 지점을 나타냈다. 본 소각시설은 처리용량 800 kg/hr의 화격자 소각로이며, 폐합성수지류, 폐고무류, 폐합성섬유류, 폐목재류, 폐합성고분자화합물, 폐합성피혁류 등 고체 산업폐기물을 소각 대상으로 설계되어 있으며, 연간 산업폐기물 5,760 ton/year 소각처리하고 있다. 대기오염 방지시설로는 원심력집진기(160 m³/min × 2기), 반건식세정집진기(300 m³/min) 및 여과집진기(280 m³/min) 등으로 구성되어 있다.

2.2. 시료채취 및 분석방법

각종 산업현장에서 수집된 폐기물은 소각 전 다른 대상물과 혼합 소각되지 않도록 수작업을 통해 5종류의 유형별로 폐기물을 분리하고 따로 따로 소각 실험하였다. 한편, 입자상물질의 배출특성은 소각 대상물의 유형뿐만 아니라 소각 운전조건에 의해서도 크게 변화될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 소각 운전조건에 따른 변화 특성을 최소화하기 위하여 폐기물 유형별 소각시 소각로의 운전조건은 되도록 동일한 조건이 되도록 운전하였는데, 소각실험과정에서는 소각로 1차 연소실 온도는 1,076±48℃ 그리고 굴뚝배출가스의 온도는 123±4℃로 기록되었다. 또한, 소각시 발생하는 입자상물질의 채취는 폐기물 유형별로 약 1시간동안 소각처리 후에 굴뚝 및 원심력집진기, 여과집진기에서 발생하는 입자상시료를 채취하여, 앞서 소각된 물질로 인해 처리과정 중에 남아 있을 수 있는 영향을 최소화하였다.

소각시 굴뚝으로 배출되는 입자상물질의 시료채취는 소각로에서 방지시설을 거친 후 최종 배출구에서 대기오염공정시험방법⁸⁾ 준하여 굴뚝 시료채취장치(KNJ사 M-5 stack sampler)의 흡입관을 굴뚝 내부에 삽입하고 등속 흡인시켜 원통형 유리섬유여과지(Whatman사)에 시료를 채취하였다. 채취된 원통형 여과지는 데시케이터에서 건조후 포집전후 무게차로 입자상물질의 배출농도를 계산하였다.

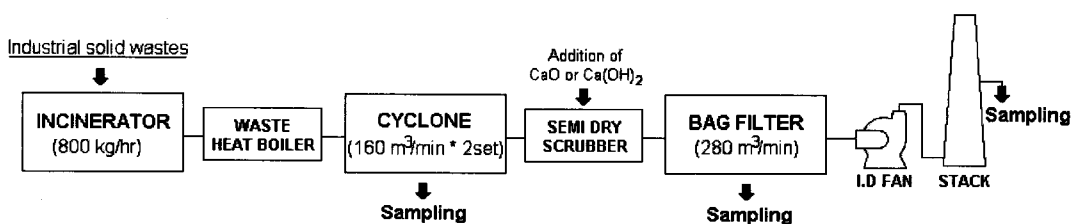


Fig. 1. Schematic diagram of incinerator system and sampling sites.

또한, 굴뚝에서 배출되는 입자상물질의 화학적 조성 분석을 위해 에너지분산형X선분석장치(EDX, Oxford사 INCA Energy)가 부착된 주사전자현미경(SEM, Jeol사 JSM-5600LV)의 SEM/EDX분석법을 이용하여 입자 하나 하나의 개별입자분석을 하였다. SEM/EDX의 분석조건은 가속전압 등에 따른 시료의 interaction volume를 고려하여 가속전압 15kV, 배율 5,000배, working distance(WD) 20mm로 고정하고 개개의 입자에 대해 분석하였으며, 분석된 X-ray 스펙트럼은 INCA Suite Ver. 4.01 analyzer로 각종 구성 원소성분간의 농도를 정량 분석하였다⁹⁾.

한편, 소각시 발생하는 입자상물질은 원심력집진기와 여과집진기에 집진되어 호퍼(hopper)를 통해 비산재(fly ash)로 배출된다. 폐기물 유형별 소각시 각각의 집진장치에서 발생하는 비산재는 105℃에서 24시간 건조시킨 후 질산과 염산 혼합용액에 의한 초음파 추출법으로 전처리하고 원자흡광광도법으로 Cd, Cu, Pb, Cr, Zn, Mn, Fe, Ni, As, Hg 등의 중금속 성분을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 굴뚝에서 배출되는 입자상물질

국내 폐기물 소각시설에서 배출되는 입자상물질의 배출특성 및 배출계수 산정을 위해 다양한 연구가 진행 중에 있으나 아직 초기단계이며, 특히 산업폐기물 유형별 소각시 발생하는 입자상물질의 농도 및 화학적 조성분석에 대한 연구는 미미한 실정이다^{6,10,11)}.

Fig. 2에는 폐합성수지류, 폐목재류, 폐우레탄류, 폐마대류, 폐지류 등 유형별 산업폐기물을 각각 소각처리하고 이 때 굴뚝으로 배출되는 입자상물질(PM)의 농도를 나타냈다

폐기물 유형별 소각시 굴뚝으로 배출되는 입자상물질(PM)의 농도는 폐마대류(26.51 mg/Sm³) > 폐합

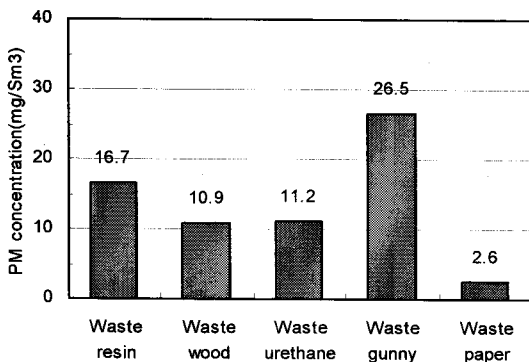
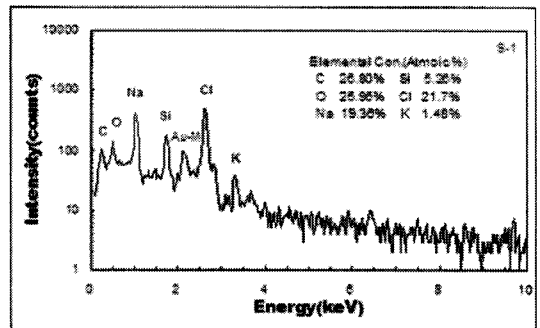


Fig. 2. Concentrations of PM on each waste samples.

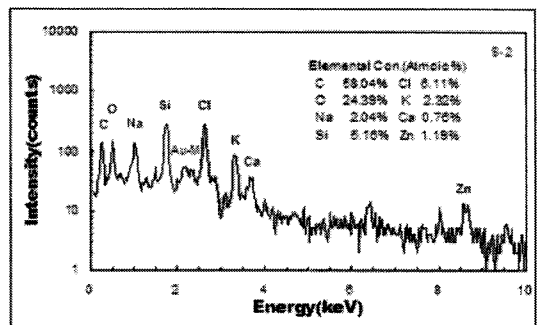
성수지류(16.71 mg/Sm³) > 폐우레탄류(11.17 mg/Sm³) > 폐목재류(10.92 mg/Sm³) > 폐지류(2.61 mg/Sm³)의 순으로 나타났다. 굴뚝 입자상물질의 농도는 폐마대류가 폐지류에 비해 약 10배 정도 높게 나타났으나, 전체적으로 소각시설의 배출허용기준(먼지 80 mg/Sm³)이하로 나타났다.

한편, 도시 폐기물의 소각로에서 발생하는 입자상물질의 화학조성 분석결과에는 국내외적으로 많은 보고가 있는데¹²⁻¹⁶⁾, 이 중 국내 도시 소각장에서 배출되는 입자상물질의 주요 화학종에 대해, 김 등¹⁵⁾은 CaO, Na₂O, SiO₂, K₂O, MgO 등의 산화물과 Pb를 포함한 중금속으로 이루어져 있다고 보고하고 있으며, 황 등¹⁶⁾은 SEM/EDX 단일입자분석 결과 C-rich, SiO₂, NaCl, CaCO₃ 등의 다양한 화학종이 혼재되어 있다고 보고하고 있다.

본 연구에서는 폐기물 유형별 소각시 굴뚝에서 배출되는 입자상물질의 화학적 특성을 구체적으로 검토하기위해, SEM/EDX분석법을 이용하여 개별입자 분석을 실시하였다. Fig. 3에는 폐합성수지(a), 폐목재류(b) 소각시 굴뚝으로 배출되는 개별입자의 전형적인 X-ray 스펙트럼을 표시하였으며, Table 1에는 폐기물 유형별 개별입자의 각 원소성분 분석결과를 정리하였다. 여기서, 원소별 검출값(Num)은 분석된 총 개별입자수(n)에서 해당 원소성분의 검출



(a) Waste resin



(b) Waste wood

Fig. 3. X-ray spectrum of individual particle.

Table 1. Analytical results of individual particle on each waste samples

Sample		C	O	F	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Zn	Pb
Waste resin (n=25)	Num	75.0	92.9	10.7	67.9	-	3.6	92.9	21.4	92.9	78.6	46.4	-	39.3	-	39.3	-
	GM	41.4	34.4	15.1	3.7	-	1.2	7.0	1.7	5.2	1.2	1.5	-	1.4	-	1.9	-
Waste wood (n=29)	Num	83.3	96.7	10.0	50.0	3.3	13.3	96.7	16.7	96.7	90.0	50.0	3.3	20.0	3.3	60.0	6.7
	GM	43.9	31.6	23.9	3.3	2.9	0.6	6.7	1.6	5.5	1.5	1.9	5.7	1.7	0.7	1.4	0.5
Waste urethane (n=25)	Num	82.8	93.1	6.9	24.1	-	3.4	93.1	17.2	89.7	69.0	44.8	-	17.2	-	48.3	24.1
	GM	46.1	36.3	24.0	2.2	-	0.9	7.4	1.3	2.3	0.7	1.1	-	2.0	-	1.0	0.6
Waste gunny (n=25)	Num	89.3	89.3	7.1	35.7	-	-	85.7	21.4	82.1	53.6	17.9	-	7.1	3.6	35.7	3.6
	GM	61.8	23.9	14.6	1.9	-	-	5.5	1.2	1.9	0.7	1.9	-	0.9	5.8	1.0	0.5
Waste paper (n=26)	Num	72.4	89.7	6.9	37.9	3.4	10.3	89.7	13.8	89.7	58.6	79.3	13.8	41.4	3.4	41.4	-
	GM	35.4	36.8	12.0	2.6	1.8	0.8	7.9	1.3	3.7	0.9	1.8	1.5	2.7	1.9	1.3	-

n : analysed particle samples, Num : detected ratio(%), GM : geometry average(%)

횡수에 대한 빈도(%)이며, 기하평균농도(GM)는 검출된 각 원소성분의 평균 몰농도(%)이다. 따라서 각 원소의 검출값 및 기하평균값이 높을수록 해당 시료의 주요 구성 성분임을 의미한다.

폐합성수지류 소각시 굴뚝에서 배출되는 개별입자의 화학적 성분을 살펴보면, 총 25개(n)의 분석된 개별입자 중 산소(O)를 제외한 각 원소성분의 검출값(Num)은 Si, Cl 92.9% > K 78.6% > C 75.0% > Na 67.9% > Ca 46.4% > Zn 39.3% 등의 순으로 나타났으며, 기하평균농도(GM)는 C 41.4% > Si 7.0% > Cl 5.2% > Na 3.7% 등의 순으로 나타났다. 따라서 C, Si, Cl, Na 등이 폐합성수지 소각시 굴뚝으로 배출되는 입자상물질의 주요 화학적 성분임을 알 수 있다.

한편, 굴뚝에서 배출되는 개별입자 분석결과 전반적으로 폐기물 유형별로 큰 차이가 없이 C, Si, Cl, K, Na, Ca 등이 주요 구성성분이며, 기타 Zn, Fe, S, F 등이 미량 함유되어 있는 것으로 나타났다.

3.2. 비산재의 중금속 함유농도

폐기물 소각시 유기물의 성분은 대부분 파괴되고 중금속을 포함한 금속원소 화합물들이 생성되는데,

특히 증기압이 낮은 중금속 성분은 소각로에서 방지시설을 거치면서 배기가스 온도가 낮아짐에 따라 응축, 응집에 의해 미연소분의 입자상물질 표면에 존재하게 되며, 비산재와 함께 집진된다¹⁷⁾. 또한, 비산재에 함유된 중금속은 폐기물의 유형뿐만 아니라 착색제의 무기, 유기 및 형광안료나 첨가제에 의해 기인하는 것으로 보고되고 있다⁵⁾.

Table 2에는 폐기물 유형별 소각시 원심력집진기에서 집진된 비산재(fly ash)의 중금속 함유농도(mg/kg)를 나타냈다. 원심력집진기에서 중금속 성분은 전반적으로 Fe > Zn > Pb > Cu > Mn > Cr > Ni > Cd > As > Hg의 순으로 함유농도가 높게 나타났다. 각 중금속 성분은 Fe 페마대류 44,151.0 mg/kg, Zn 폐합성수지류 34,197.5 mg/kg, Pb 폐합성수지류 6,055.8 mg/kg, Cu 폐합성수지류 2,754.8 mg/kg, Mn 폐합성수지류 1,765.3 mg/kg, Cr 페우레탄 1,611.4 mg/kg, Ni 폐합성수지류 428.3 mg/kg 등 폐기물 유형별로 따른 함유농도 차이를 나타내고 있었다.

Table 3에는 여과집진기에서 집진된 비산재(fly ash)의 중금속 함유농도(mg/kg)를 나타냈다. 전반적으로 중금속 성분의 함유농도는 Zn > Pb > Fe

Table 2. Heavy metal contents of cyclone fly ash

Sample	Heavy metal(mg/kg)									
	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Mn	Fe	Ni	As	Hg
Waste resin	415.6	2,754.8	6,055.8	561.1	34,197.5	1,765.3	27,587.6	428.3	68.7	1.0
Waste wood	199.0	1,894.4	3,520.9	661.3	28,013.8	1,603.5	30,482.2	333.4	32.6	0.3
Waste urethane	193.1	1,504.3	3,016.5	1611.4	21,313.8	1,301.9	24,231.0	400.4	37.0	0.3
Waste gunny	154.0	1,374.6	1,117.3	985.3	17,470.8	1,259.5	44,151.0	343.6	53.0	0.3
Waste paper	111.1	1,059.4	1,718.8	339.7	12,281.3	700.0	18,078.1	152.5	13.5	0.1

Table 3. Heavy metal contents of bag filter fly ash

Sample	Heavy metal(mg/kg)									
	Cd	Cu	Pb	Cr	Zn	Mn	Fe	Ni	As	Hg
Waste resin	1,677.8	8,723.6	5,285.8	202.5	43,888.3	488.5	11,452.6	173.5	52.4	2.9
Waste wood	2,230.1	9,989.5	36,405.2	313.4	74,792.7	529.9	15,762.9	147.9	74.8	0.8
Waste urethane	1,146.1	6,127.7	3,152.4	139.4	67,639.6	4,962.1	7,053.9	92.5	15.5	0.7
Waste gunny	1,472.6	6,874.3	2,826.5	180.2	8,549.2	6,619.6	9,072.7	77.0	24.8	0.5
Waste paper	1,258.0	5,459.3	19,568.7	192.9	118,730.0	7,783.6	13,857.8	112.7	110.6	4.6

> Cu > Mn > Cd > Cr > Ni > As > Hg의 순으로 높게 나타났다. 중금속 성분별로는 Zn 폐지류 118,730.0 mg/kg, Pb 폐목재류 36,405.2 mg/kg, Fe 폐목재류 15,762.9 mg/kg, Cu 폐목재류 9,989.5 mg/kg, Mn 폐지류 7,783.6 mg/kg, Cd 폐목재류 2,230.1 mg/kg 등 폐기물 유형별에 따른 함유농도 차이를 나타내고 있었다.

Fig. 4에는 폐기물 유형별 비산재 중 원심력집진기/여과집진기의 중금속 함유농도비를 나타냈다. 전반적으로 폐기물 유형별에 관계없이 원심력집진기에서는 Cr, Fe, Ni 그리고 여과집진기에서는 Cd, Cu, Hg 등의 함유농도가 높았으며, 이것은 중금속이 함유된 비산재의 입경별에 따른 집진장치별 집진효율이 다르기 때문에 나타난 결과로 생각되며, 통상 대기오염제어공학에서 원심력집진기는 집진가능한 입경이 수 μm 이상의 초대입자인 반면, 여과집진기는 입경 0.1 μm 미세입자까지도 집진가능한 것으로 알려져 있다¹⁸⁾. 실제 도사 폐기물 소각로의 배출가스 중에서 PM_{2.5-10} : PM_{2.5}의 입경별 농도구성이 Cr의 경우 0.11 : 0.04, Fe의 경우 4.70 : 2.61, Ni의 경우 0.17 : 0.09로 Cr, Fe, Ni 등은 원심력집진장치에서 집진 가능한 입경 2.5 μm 이상 거대입자의 비율이 많은 것으로 보고되고 있다¹⁹⁾. 그러나 Pb, Zn, Mn, As 등은 집진장치별 함유농도가 폐기물 유형별에 따라 다소의 차이를 보이는데, 이는 소각 운전조건 등이 입자생성 과정에 큰 영향을 미칠 수 있

으므로 이는 향후 과제로 진행되어야 하겠다.

4. 결 론

실제 운영중인 산업폐기물 소각로에서 폐합성수지류, 폐목재류, 폐우레탄류, 폐마대류, 폐지류 등 총 5종류의 폐기물을 유형별로 동일한 소각 운전조건에서 소각처리하고 굴뚝에서 배출되는 입자상물질 및 원심력집진기, 여과집진기에서 집진된 비산재의 중금속의 함유농도를 분석하였다.

굴뚝으로 배출되는 입자상물질(PM)의 농도는 폐마대류(26.51 mg/Sm³)가 폐지류(2.61 mg/Sm³)에 비해 상대적으로 약 10배 높게 나타났으나, 전체적으로 소각시설의 배출허용기준이하로 나타났다. 또한, 개별입자분석에서는 최소한 정성적으로는 폐기물의 유형에 관계없이 C, Si, Cl, K, Na, Ca 등이 주요 구성 원소성분으로 나타났다.

원심력집진기와 여과집진기에서 집진된 비산재(fly ash)의 중금속 함유농도는 원심력집진기의 경우 Fe의 경우 폐마대류 및 Cr의 경우 폐우레탄을 제외하고는 대부분 폐합성수지류에서 대부분 중금속의 함유농도가 상대적으로 높았다. 또한, 여과집진기에서는 폐목재류의 경우 Pb, Fe, Cu, Cd, Cr이 다른 유형의 폐기물에 비해 상대적으로 높게 나타나는 폐기물 유형별 특성을 보이고 있었다.

그리고 집진장치별 비산재의 중금속 함유농도비는 폐기물 유형에 관계없이 원심력집진기에서는 Cr, Fe, Ni 그리고 여과집진기에서는 Cd, Cu, Hg 등이 상대적으로 높았으나, Pb, Zn, Mn, As 등은 폐기물 유형에 따라 집진장치별 함유농도가 각각 달랐다.

이러한 폐기물 유형별 소각시 입자상물질의 배출 특성은 동일한 소각 운전조건에 가정하여 실시하여 실제 다양한 연소조건에 따른 차이가 발생할 수 있으나, 향후 산업폐기물의 유형별 소각시 사업장 대기오염물질의 배출저감을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 경남지역환경기술개발센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

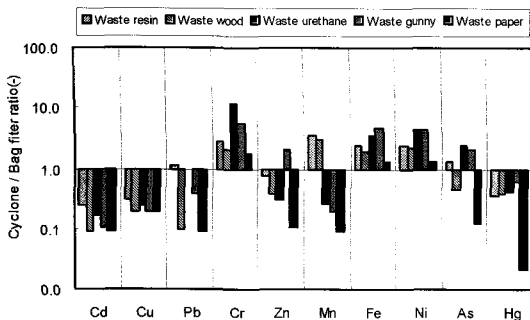


Fig. 4. Content ratio of both cyclone and bag filter.

참 고 문 헌

- 1) 국립환경과학원, 2006, 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 20pp.
- 2) 박용이, 허철구, 1996, 폐기물 소각시 중금속 성분의 거동에 관한 연구, 한국환경과학회지, 5(6), 785-799.
- 3) 이우근, 김준수, 김진범, 1998, 소각장별 비산재 중의 중금속 용출특성 및 존재형태, 대한환경공학회지, 20(3), 421-432.
- 4) 김석완, 유의찬, 2002, 도시폐기물 소각로에서 발생된 바닥재와 비산재의 용출특성, 대한환경공학회지, 24(5), 801-812.
- 5) 성동모, 갈대성, 윤태일, 1997, 소형 화격자식 산업폐기물 소각로의 연소특성에 대한 연구, 한국폐기물학회지, 14(6), 579-587.
- 6) 유종익, 이성준, 김기현, 장하나, 석정희, 석광설, 홍지형, 김병화, 서용철, 2002, 산업 폐기물 소각 시설의 입자상 물질 및 중금속 배출특성, 한국 대기환경학회지, 18(3), 213-221.
- 7) 이병규, 조정범, 2002, 600°C에서의 제지류 소각시 발생하는 VOCs 농도와 소각잔사중의 중금속 함량 분석연구, 한국환경과학회지, 11(1), 114-116.
- 8) 환경부, 1996, 대기오염공정시험방법, 동화기술, 114pp.
- 9) 박정호, 서정민, 2005, 대기 점오염원에서 배출되는 개별입자상물질의 물리화학적 특성, 한국환경과학회지, 14(8), 761-770.
- 10) 국립환경연구원, 2000, 먼 오염배출원의 총먼지 및 PM₁₀ 배출계수개발(소형 보일러와 소각로를 중심으로), 3pp.
- 11) 국립환경연구원, 2002, 유해대기오염물질 배출 시설의 중금속 배출계수 개발, 5pp.
- 12) Kirby C. S., Rimstidt J. D., 1993, Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash, Environ. Sci. Technol., 27, 652-660.
- 13) Speiser C., Baumann T., Niessner R., 2000, Morphological and chemical characterization of calcium hydrate phase formed in alteration processes of deposited municipal solid waste incinerator bottom ash, Environ. Sci. Technol., 34, 5030-5037.
- 14) 정성기, 최덕일, 임창호, 이진숙, 2000, 생활폐기물 처리시설 배출 비산재의 조성분석, 대한분석과학회지, 13(2), 215-221.
- 15) 김영근, 심영숙, 이우근, 2002, 소각비산재를 이용한 Cylinder-Type 흡착제 제조시 첨가제에 의한 영향, 대한환경과학회지, 24(6), 1081-1089.
- 16) 황희진, 김혜경, 노철연, 2005, 단일입자분석을 이용한 도시 소각재 입자의 특성분석, 한국대기환경학회지, 21(3), 367-375.
- 17) 정현대, 김기현, 유종익, 최용철, 윤기섭, 서용철, 2002, 도시 폐기물 소각재의 물리화학적 특성 및 용출 방법에 따른 중금속 용출 특성 평가연구, 한국폐기물학회지, 19(4), 407-417.
- 18) 김신도, 김중호, 봉춘근, 2001, 대기오염방지공학, 1판, 향문사, 94pp.
- 19) 국립환경연구원, 2004, 대도시 대기질 관리방안 조사연구-미세먼지 생성과정 규명과 저감대책 수립, 275pp.