

생활폐기물 성상변화에 따른 소각시설 바닥재의 특성 변화와 시멘트 클링커 원료로 재활용 가능성 평가

이우찬 · 신득철 · 동종인[†]

서울시립대학교 환경공학부
(2014년 1월 19일 접수, 2014년 1월 21일 심사, 2014년 1월 22일 채택)

Investigation of Characteristics of Incinerator Bottom Ash and Assessment for Recycle due to the Change of MSW Composition

Woo Chan Lee, Deuk Chol Shin, and Jong In Dong[†]

Department of Environmental Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea
(Received January 19, 2014; Revised January 21, 2014; Accepted January 22, 2014)

생활폐기물 소각시설에서 발생하는 바닥재는 높은 염소함량과 불순물 때문에 재활용에 한계가 있다. 하지만 종량제봉투의 도입과 음식물폐기물의 직매립 금지, 생산자책임제도의 도입 등 다양한 제도의 개선을 통해 성상이 변화되고 있다. 최근의 생활폐기물은 수분함량과 염소함량이 낮고 발열량이 높은 특성을 보이는데 이는 음식물폐기물의 분리배출, 폐기물의 전처리 등을 통한 불연물의 분리, 염소 등이 함유된 PVC 분리 등에 기인한 것으로 볼 수 있다. 본 연구의 목적은 이러한 제도, 특히 음식물폐기물의 분리배출 등의 정책 도입에 따른 생활폐기물 소각시설의 바닥재 성상변화 특성을 분석하고 이를 토대로 바닥재의 재활용 가능성을 평가하는 것이다. 바닥재에 함유된 다양한 성분 중 시멘트 클링커의 주요 성분인 CaO는 2001년 26.7%에서 2006년 34.0%로 증가하였고, 염소성분은 2001년 1.84%에서 2006년 0.00655%로 큰 폭으로 감소하였는데 이는 석탄 화력발전소에서 발생하는 비산재의 특성에 근접하는 것으로서 시멘트 클링커의 원료물질 등 재활용 가능성을 가지게 된 것으로 판단할 수 있다.

Recycling of bottom ash from municipal solid waste (MSW) incinerator has been strictly limited due to its composition of high level chlorine and other unfavorable substances. The composition of MSW has been, however, changed after the introduction of garbage-bag sales system, extended producer responsibility (EPR) policy and the prohibition of direct landfill of food waste. Recent waste shows reduced moisture and chlorine content, increased calorific value due to the separation of food waste, incombustible materials and PVC. The main purpose of this study is to investigate the trend of composition changes of MSW incinerator bottom ash and to compare the analytical results with those before the separation system was introduced. CaO content of bottom ash, one of the major component of cement clinker, increased from 26.7% in 2001 to 34.0% in 2006. The chlorine content showed a dramatic decrease from 1.84% in 2001 to 0.00655% in 2006, which is closely compatible with that of the fly ash of coal-utilizing thermal power plants, which is mainly due to the changes of MSW composition. It is eventually considered that there is a possibility of utilizing the incinerator bottom ash as a raw material of cement clinker feed substances.

Keywords: MSW, incinerator, bottom ash, chlorine, moisture

1. 서 론

국내에서 발생하는 소각로 바닥재는 생활폐기물 중 금속, 유리, 토사 등 무기질의 불연성분과 미처 연소되지 못한 일부 유기물질의 가연성분이 소각로 화격자 아래 설치된 잔류물 호퍼로 떨어진 물질을

말한다. 소각로 바닥재의 경우 생활폐기물 내 음식물이 다량 포함되어 있거나 PVC 등의 염소계 폐기물로 인하여 바닥재의 성분에 염소 등의 성분과 납, 구리 등의 중금속들이 많이 함유되어 있어 클링커 원료나 벽돌생산 등 재활용의 한계로 인해 거의 전량을 매립에 의존해 왔다. 뿐만 아니라 일부 바닥재 중 중금속 성분 등이 지정폐기물 기준을 초과하는 경우 매립이 금지되는 경우도 있어 왔다.

하지만 1995년 종량제봉투가 도입되고 생산자책임재활용제도(EPR)가 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률에 의해 시행됨에 따라 점차 PVC와 같은 플라스틱류 폐기물의 분리수거율이 증가해 왔고, 2005년부터 시행된 음식물류 폐기물의 매립장 반입 금지 정책 등에 의해 소각시설에 반입되는 폐기물의 성상은 크게 변화되었다. 특히

[†] Corresponding Author: University of Seoul
Department of Environmental Engineering
163 Siripdaero, Dongdaemun-gu, Seoul 130-743, Korea
Tel: 82-2-6490-2862, e-mail: jidong@uos.ac.kr

이러한 제도개선에 의한 폐기물 내 염소함량의 감소는 바닥재의 재활용 가능성을 높여주게 되었다.

소각시설에서 발생하는 바닥재는 매립에 의해 주로 처리되고 비산재의 경우 중금속의 용출 문제로 인해 지정폐기물로 특별 관리되고 있다[1]. 하지만 소각시설과는 달리 화력발전소에서 발생하는 비산재에는 광물질 함량이 높아 시멘트 클링커의 원료물질로 재활용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 생활폐기물 소각시설에서 발생하는 바닥재의 변화된 특성과 화력발전소에서 발생하는 비산재의 특성을 비교 분석하여 바닥재의 재활용 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

생활폐기물의 성상변화에 따른 재활용 가능성을 평가하기 위해 기존에 재활용되고 있는 발전소 비산재와 소각로 바닥재와의 성상차이를 비교분석하기 위해 소각방식이 다른 2개의 생활폐기물 소각시설에서 발생하는 바닥재와 1개의 발전소 비산재를 분석대상 시료로 선정하였다. 발전소는 유연탄을 주 연료로 사용하는 미분탄 연소방식의 화력발전소(이하 H시설)이고, 소각시설은 로터리 킬른과 스토커의 혼합형 소각방식 1개 시설(이하 A시설)과 스토커 방식의 소각시설 1개 시설(이하 B시설)을 선정하였다. 대상 시설로부터 채취한 비산재 및 바닥재에 대한 pH, 삼성분, 원소분석, 중금속, 광물질의 5개 항목에 대한 분석을 실시하였다.

pH는 시료와 증류수를 1:2.5의 비율로 희석하여 교반, 30 min간 정지 후 pH 미터(moder 420A)를 이용하여 측정하였다. 수분, 가연분 및 회분함량은 폐기물공정시험방법 4장의 2항 및 3항에 준하여 분석하였고 원소분석은 원소분석기(Flash EA 1112-series, CE Instrument)를 이용하여 실시하였다. 중금속의 용출량에 대한 분석은 정제수에 염산을 넣어 pH를 5.8~6.3으로 한 용매를 시료:용매 = 1:10의 비율로 혼합하여 분당 200회, 진폭 4~5 cm의 진탕기를 사용하여 6 h간 진탕 후 유리섬유 여지로 여과한 여과액의 일부를 용출시험용 검액으로 사용하였다. 용출시험이 끝난 시료는 ICP-OES (730 Series, Agilent)로 Cr, Cr⁶⁺, As, Cd, Pb, Cu, Zn을 분석하였으며 수은은 수은분석기로 분석하였고, CN은 폐기물공정시험방법 4장의 5항에 준하여 분석하였다. 광물질은 질산-과염소산-불화수소산에 의한 분해 실험법으로 용출액 적당량을 취하여 킬달 플라스크에 넣고 여기에 유리구 4~5개를 넣은 후 서서히 가열하여 액량이 약 15 mL가 될 때까지 증발농축한 후 방냉하였다. 비커에 있는 용액을 테프론 비커에 옮기고 킬달 플라스크의 벽면을 물로 깨끗이 씻어 용액과 합한 후 질산 10 mL를 넣어 용액이 거의 건조될 때까지 가열한 후 방랭 하였다. 여기에 다시 과염소산 5 mL와 불화수소산 1 mL를 넣고 가열을 계속하여 과염소산의 백연이 발생하면 가열을 중지하고 방랭하였다. 이후 물 50 mL를 넣어 서서히 끓인 후 필요하면 여과하고 여지를 물로 2~3회 세척한 후 여액과 씻은 용액을 합하여 정확히 100 mL로 한 후 중금속 실험방법과 동일한 방법으로 분석하였다.

한편, 음식물폐기물 분리배출 전후의 소각재 특성변화와 이를 토대로 한 소각재의 재활용 가능성 평가를 위해 과거(음식물폐기물 분리배출 이전)의 소각재 특성은 문헌연구를 통해 기존 연구결과들을 일부 활용하여 본 연구에서의 분석결과와 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

화력발전소에서 발생하는 비산재와 생활폐기물 소각시설에서 발생

Table 1. Characteristics of Fly Ash from Power Plant and Bottom Ash from MSW Incinerators after Separation of Food Waste

	Fly ash (H power plant)	Bottom ash (A incinerator)	Bottom ash II (B incinerator)	
pH analysis	10.89	11.03	11.37	
Proximate analysis (wt%)	Moisture content	0.17	14.26	15.47
	Organic content	2.96	4.53	4.69
	Ash content	96.86	81.22	79.84
Ultimate analysis (wt%, dry basis)	C	2.35	2.97	2.96
	H	0.10	0.29	1.13
	O	0.12	1.59	1.07
	N	0.36	0.24	0.28
	S	0.03	0.01	0.02
Extracted heavy metal analysis (mg/L, dry basis)	Pb	1.09	2.86	2.01
	Cu	0.35	2.09	2.56
	As	1.02	0.96	1.02
	Hg	N.D	N.D	N.D
	Cd	0.21	0.12	0.15
	Cr ⁶⁺	N.D	N.D	N.D
	CN	N.D	N.D	N.D
Mineral analysis (dry basis)	SiO ₂	22.59	23.03	22.73
	Al ₂ O ₃	8.59	8.49	8.41
	TiO ₂	7.37	6.38	6.86
	Fe ₂ O ₃	12.41	10.22	10.48
	MgO	2.00	2.11	2.06
	CaO	33.83	35.29	34.67
	Na ₂ O	2.39	2.67	2.62
	K ₂ O	1.66	1.85	1.64
	MnO	0.90	0.92	0.92
	P ₂ O ₅	1.44	1.89	1.80
	Zn	4.44	4.36	5.42
	BaO	4.53	1.77	1.57
	SrO	0.85	1.02	0.81
	Cl	0.0004	0.01	0.003

되는 바닥재에 대한 특성분석 결과를 Table 1에 나타내었다. pH의 경우 모든 소각재에서 알칼리성을 띠는 것으로 나타났으며 바닥재의 경우에 더 높게 나타났다. 이는 알칼리성의 CaO 성분 등이 더 많이 포함되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

소각재의 수분 및 회분함량을 분석한 결과 비산재의 경우 수분이 거의 없는 것으로 나타났고, 바닥재의 경우 약 14 wt%의 수분을 함유하고 있는 것으로 나타났다. 이는 소각재 고유의 특성은 아니며 각 시설의 공정 차이로부터 나타난 결과이며 H 석탄화력발전시설은 공냉에 의해 비산재가 배출되며 A 및 B 폐기물 소각시설은 수냉식 재 배출장치를 통과하여 배출되기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 회분함량의 경우 Table 1에 나타난 결과를 건기준으로 다시 계산할 경우 H시설의 비산재가 97.03 wt%, A 및 B시설의 바닥재가 각각 94.72 wt%, 94.45 wt%로 비산재에 비해 유기물이 다소 포함되어 있으나 큰 차이를 나타내지는 않는 것으로 확인되었다.

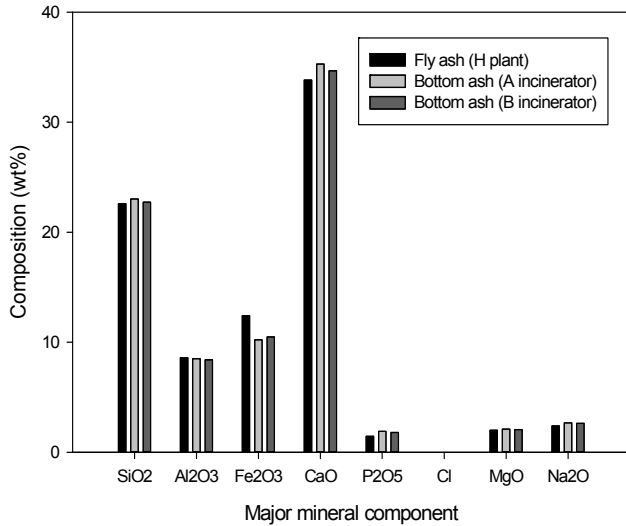


Figure 1. Comparison of mineral contents in fly ash of a coal power plant and bottom ash of MSW incinerators.

원소분석결과에서는 화석연료를 사용하는 H시설의 비산재의 황 함량이 생활폐기물 소각시설의 바닥재보다 다소 높은 것으로 나타났지만 함량은 약 0.03 wt%로 매우 낮은 것으로 나타났으며 A시설과 B시설 바닥재의 경우에는 각각 0.01 wt%와 0.02 wt%로 나타났다.

중금속 용출시험을 통해 비산재 및 바닥재에 대한 용출특성을 분석한 결과 수은과 6가 크롬, 시안화합물은 검출되지 않았으며, 납과 구리는 생활폐기물 소각시설 바닥재에서, 카드뮴은 화력발전소 비산재에서 더 많이 용출되는 것으로 나타났으며 비소의 경우 재의 종류에 상관없이 비슷한 양이 용출되는 것으로 확인되었다.

광물질의 경우 분석을 실시한 14개 물질 가운데 시멘트의 주요 성분인 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO는 화력발전소 비산재의 경우 약 77.41

wt%, 생활폐기물 소각시설 바닥재에는 약 77 wt%가 포함되어 있어 함량에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 한편, 광물질 소성 시 문제의 가능성이 있는 성분은 P₂O₅, Cl, MgO, Na₂O 4개 성분이며 비산재의 경우 약 2.39 wt%, 바닥재의 경우 약 2.6 wt%가 포함된 것으로 확인되어 역시 비산재와 바닥재 사이에 큰 차이점은 없는 것으로 나타났다. Figure 1에 비산재와 바닥재에 대해 시멘트 소성에서 원료가 되는 광물질과 소성 시 문제를 일으키는 광물질에 대한 분석결과를 그림으로 나타내었다.

이와 같이 화력발전소에서 발생하는 비산재와 생활폐기물 소각시설에서 발생하는 바닥재의 특성을 비교분석한 결과 큰 차이를 보이지 않고 유사한 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 따라서 기존에 시멘트 클링커의 원료로 사용되고 있는 발전소 비산재와 마찬가지로 생활폐기물 소각시설의 바닥재 또한 재활용 가능성이 있는 것으로 판단할 수 있다[2].

한편, 재활용 폐기물과 음식물 폐기물의 분리배출이 본격적으로 시행됨에 따른 생활폐기물의 성상변화에 대한 조사를 실시한 결과 비닐류의 비율이 5~13 wt% 증가하였고 종이류는 5~10 wt% 증가한 것으로 나타났다. 음식물폐기물의 경우 1997년에서 1999년까지 평균 46.9 wt%를 차지하고 있으나 2006년에는 A시설의 경우 11.9 wt%, B시설의 경우 6.8 wt%로 크게 감소하였다. 종이류나 비닐류의 경우 실제로 배출량이 증가했다기보다는 음식물폐기물의 비율이 감소함에 따라 상대적으로 비율이 높아졌음을 의미한다고 할 수 있다. Figure 2에 1997년부터 1999년까지의 생활폐기물 조성과 2006년 A, B시설의 생활폐기물 조성을 비교하여 나타내었다.

생활폐기물의 조성 변화에 따라 수분과 회분, 가연분의 함량도 변화가 있었다. Table 2는 이러한 생활폐기물 삼성분의 변화를 나타낸 것이다. 수분함량이 높은 음식물폐기물의 분리배출에 따라 수분함량이 약 22 wt% 정도 감소하였으며 상대적으로 가연분의 함량은 증가하는 경향을 나타내고 있다.

시멘트 클링커 원료로의 재활용 잠재성을 가지고 있는 생활폐기물

Table 2. Physical Characteristic Changes of Municipal Solid Waste after Food Waste Separation Activity[2,3]

	Moisture content	Combustible	Ash
1997	54.0	34.0	12.0
1998	56.0	32.0	12.0
1999	53.0	36.0	11.0
Average	54.3	34.0	11.7
A Incinerator (2006)	32.4	60.2	7.4
B Incinerator (2006)	32.5	62.1	5.4

Remark: 1. MSW characteristics during 1997-1999 were estimated by averaging their values for all MSW incinerators in Korea

Table 3. Comparison of Mineral Contents of MSW Incinerators' Bottom Ash in 2001 and 2006[4]

(unit: wt%)

	Feedstock material of cement clinker				Negative component for cement quality			
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	Na ₂ O	Cl
2001- I	19.50	10.53	7.54	27.15	6.36	1.61	7.83	1.4780
2001- II	28.24	9.32	7.30	24.13	5.65	1.65	9.62	2.2040
A Incinerator	23.03	8.49	10.22	33.83	1.89	2.11	2.67	0.0100
B Incinerator	22.73	8.41	10.48	35.29	1.80	2.06	2.62	0.0031

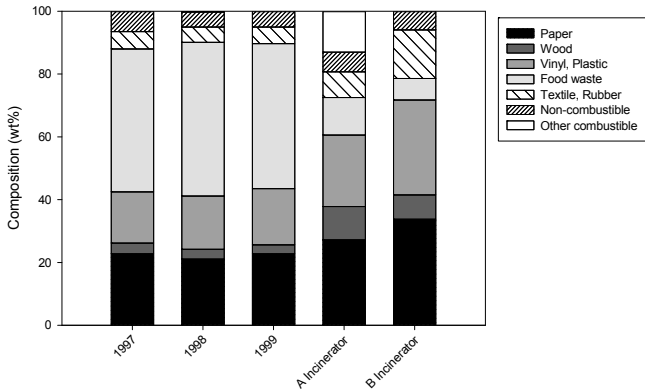


Figure 2. Comparison of physical compositions of municipal solid waste[1,2].

소각시설 바닥재 역시 폐기물의 조성이 변하면서 그 특성이 변하게 되었다. 특히 클링커 원료로의 재활용에 있어서 중요한 인자인 광물질의 경우 그 중요성이 다른 특성들에 비해 더욱 중요하다고 할 수 있다[5]. Table 3은 2001년과 2006년의 생활폐기물 소각시설 바닥재에 대해서 클링커 원료로의 재활용에 긍정적인 영향을 미치는 광물질과 부정적인 영향을 미치는 광물질의 함량변화를 나타낸 것이다. 클링커의 주요 원료 중 하나인 SiO_2 의 경우 큰 변화를 보이지 않았고 Al_2O_3 는 약 2 wt% 정도 함량이 감소한 것으로 나타났지만 CaO 와 Fe_2O_3 는 각각 8 wt%, 3 wt% 정도 함량이 높아진 것으로 나타났다. 특히 CaO 의 경우 함량이 30 wt% 이상으로 나타났는데 이는 소각시설에서의 다이옥신 저감을 위한 소석회 투입 등에 의한 영향인 것으로 판단된다. 이와는 반대로 시멘트 품질의 저해 성분인 P_2O_5 의 경우 약 5% 정도 함량이 낮아졌으며, 그동안 시멘트 원료물질로의 재활용에 문제가 되어왔던 CI 역시 1.5~2.2 wt% 함량수준에서 0.01 wt% 이하 수준으로 크게 개선되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 2001년 바닥재에 비해 2006년 바닥재의 성상이 시멘트로의 재활용 원료로 사용하는데 유리하게 변화하였음을 의미한다.

4. 결 론

우리나라의 생활폐기물의 발생량은 꾸준히 증가해 왔고 소각에 의한 처리량 역시 꾸준히 증가함에 따라 많은 양의 바닥재가 발생하지만 대부분은 재활용되지 못하고 매립하여 처리하고 있다. 과거에는 소각시설에 반입되는 폐기물에는 음식물폐기물과 분리되지 않은 염소계 폐기물(PVC 등)이 포함되어 재활용에 제약이 존재하였으나 다양한 폐기물 관리정책을 통해 폐기물의 질은 계속해서 개선되고 있다. 특히 음식물폐기물 분리배출이 의무화된 후에는 생활폐기물 내에 염

소함량이 크게 줄어들어 바닥재의 재활용 가능성이 크게 증가하였다. 본 연구에서는 이러한 정책 시행 전후의 폐기물 특성 변화와 이에 따른 바닥재의 변화를 분석하고 비교적 재활용이 잘 이루어지고 있는 발전소 비산재의 특성과 비교하여 생활폐기물의 성상 변화에 따른 재활용 가능성을 평가하였다.

바닥재에 대한 다양한 특성분석 결과 기존에 시멘트 클링커로의 재활용이 원활하게 이루어지던 발전소 비산재와 큰 차이를 보이지 않았으며 CaO 와 같은 시멘트 클링커의 주요 성분은 함량이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 폐기물 소각시설로 반입되는 폐기물의 질이 개선됨에 따라 소각 후 발생하는 바닥재의 재활용 가능성이 더욱 높아지고 있는 것으로 판단할 수 있다. 생활폐기물의 질적 개선 여부에 대한 확인을 위해 2001년과 2006년 생활폐기물 분석값을 비교해 본 결과 수분함량의 감소와 가연성 물질의 함량 증가 등 질적 향상이 있음을 확인하였으며 바닥재에 대한 특성분석 결과 시멘트 클링커의 원료물질인 광물질의 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 시멘트의 품질에 악영향을 주는 것으로 알려진 CI 함량은 1.5~2.2 wt% 수준에서 무시할 수 있는 수준으로 저하되어 시멘트 소성공정 등의 원료물질로의 재활용 가능성을 크게 높이고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

감 사

본 연구는 2012년 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. R. Park, B. Y. Kim, J. H. Kim, J. T. Jung, and S. Y. Park, A study on the heavy metals content and leachate in incinerator ash of municipal solid wastes, *J. Korea Soc. Env. Admin.* **8**, 427-433 (2002).
2. S. J. Lee, S. H. Kim, M. H. Jang, and B. S. Kim, *Report of Validity of Bottom Ash Recycling*, 105, Sudokwon Landfill Site Management Corporation, Incheon, Korea (2003).
3. D. I. Kim, S. R. Kim, M. H. Yoon, S. S. Choi, and J. S. Huh, *A Study on the Characteristics of Harmful Substances in Bottem Ash and Fly Ash from MWI*, 31, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea (1999).
4. H. G. Myung, *A Study on the Ash Stabilization and Recycle Technology*, 9, Environmental Management Corporation, Incheon, Korea (2000).
5. D. C. Shin, *Physical Property Changes of Incinerators Bottom Ash due to the Changes of Municipal Solid Waste Composition*, Master Dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea (2006).