J. of Korean Inst. of Resources Recycling
Vol. 17, No. 4, 2008, 3-9

≫ 研究論文 ≪

생활쓰레기 流動床 燒却爐 不燃物의 재활용에 관한 硏究†

✞崔佑鎭* · 朴銀奎* · 姜承均**

*水原大學校 環境工學科, **(株)瑞熙建設

Study on Recycling of Incombustion Materials from MSWI Fluidized Bed Incinerator Ash†

✞Woo Zin Choi*, Eun Kyu Park* and Seung Kyun Kang**

*Department of Environmental Engineering, The University of Suwon**
*Seohee Construction Ltd.***

요 약

국내의 경우 2006년 유동상 소각로에서 발생한 소각재는 약 13,952톤에 달하고 있으며, 대부분 자력선별 후 매립처리 되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 유동상 소각로에서 발생한 불연물로부터 분리 회수한 무기물 시료와 점토를 일정비율로 배합하여 소결체를 제작하였으며, 물성평가를 통하여 세라믹스(요업)원료로서의 재활용 가능성을 검토하였다. 체가름 및 자력선별 후 회수된 불연물 시료에 대한 중금속 함량 분석결과 Pb 등 일부 중금속의 농도는 여전히 높게 나타났으나 Cr^{6+}의 경우는 0.4ppm이하로 낮게 나타났으며, 용출실험결과는 모두 KSLP 기준치 이하로 조사되었다. 최종 회수한 불연물 시료의 XRF 분석결과 금속산화물이 선별공정에서 효율적으로 제거된 것으로 조사되었다. 회수된 불연물 시료를 점토와 일정비율로 배합하여 제조된 소결체의 물성조사 결과 1,000°C 및 1,050°C에서 소성한 제품의 경우 불연물을 첨가하면 융제로서의 역할이 가능하여 소성온도를 약 50°C정도 낮출 수 있다. 또한, 불연물의 첨가량이 증가할수록 소성수축률 및 흡수율이 낮아져서 소결체의 압축강도가 개선되었다.

주제어 : 생활쓰레기, 유동상 소각로, 불연물, 재활용, 요업원료

Abstract

The total amount of fluidized bed incinerator ash, i.e. incombustion materials generated from the municipal solid waste incineration(MSWI) in Korea was approximately 14,000 tons in 2006. Most of the ash after ferrous metal separation is finally discard to the landfill sites. In the present work, possibility for recycling of the ash is studied to utilize the ash as raw materials for ceramic products. Incombustion materials obtained from the two different incinerators were used to recover the raw materials by applying the magnetic separation and screening process to remove metallic particles. The raw materials show relatively low heavy metals content obtained from the KSLP leaching tests. The ceramic products were prepared by mixing the clay with the various amounts of the raw material. The physical properties, i.e. shrinkage rate, absorbancy and compressive strength of the ceramic products sintered at 1,000°C and 1,050°C, respectively were improved by increasing the addition amounts of the incinerator ash. Based on the leaching tests the ceramic products also be satisfied with the standard limits on the leachability of heavy metals because most of the metallic materials are effectively removed from the incombustion materials by appling the separation processes.

Key words : MSWI, Fluidized bed incinerator, Incombustion materials, Ceramic products

1. 서 론

최근에 발생되는 생활쓰레기는 복잡하고 다양한 성상을 가지며 대량으로 발생되고 있어서 적정처리 방법에 많은 관심이 집중되고 있다. 발생되는 생활쓰레기의 부피와 양을 90%이상 감소가 가능한 소각처리는 매우 효과적인 처리방식으로 국내외에서 널리 사용 중이다. 그러나, 소각처리는 매립지의 사용기간 연장과 발생되는

† 2007년 9월 14일 접수, 2008년 6월 3일 수리
✞E-mail: wzchoi@suwon.ac.kr

열의 재사용은 가능하지만 유해한 금속성분을 함유한 소각재가 발생하여 처리 문제가 대두되고 있다. 2006년의 경우 발생된 생활쓰레기 중 약 2,386,433톤을 소각처리 하였으며, 그 중 유동상 소각로에서의 소각량은 약 108,402톤 이었다. 유동상 소각처리로 바닥재 6,386톤, 비산재 7,566톤 등 모두 약 13,952톤의 소각재가 발생되었으며, 소각재의 발생률은 약 12.87% 수준으로 대부분 자력선별 후 매립처리 되고 있는 실정이다[1].

본 연구에서는 유동상 소각로에서 발생하는 불연물의 환경성을 검토하였으며, 특히 자력선별 및 체가름 공정을 적용하여 불연물로부터 금속물질을 제거한 후 무기물 성분을 분리회수 하였다. 분리 회수된 무기물 시료를 점토와 일정비율로 혼합하여 소결체를 제작하였으며, 물성평가를 통하여 세라믹스(요업) 원료로서 재활용 가능성을 검토하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 시료는 현재 가동 중에 있는 J시 생활쓰레기 유동상 소각로 2곳에서 채취하였다. 채취한 시료는 9 mesh로 체가름 후 금속류가 함유된 시료와 자력선별을 통하여 금속류를 제거한 시료로 나누어 중금속 함량실험을 수행하였다. 중금속 함량실험은 Microwave를 이용하여 전처리 후 ICP-MS를 이용하여 분석하였으며, 용출실험은 폐기물공정시험방법에 따라 ICP-MS로 실시하였다. 또한, 불연물 시료에 함유되어있는 금속성분을 제거하기 위하여 Fig. 1과 같이 분리선별 공정을 수행하였다. 분리선별공정에서는 자력선별 및 와류정전선별 기능이 있는 선별기를 이용하여 강자성(철류), 약자성(산화금속), 비철금속(알루미늄, 구리 등) 및 무기질류(유리, 세라믹, 토사 등) 등 4가지 산물을 회수한 후, 무기물을 Roll Crusher와 Screen 공정을 이용하여 최종 시료를 제작하였다. 자력 및 와류정전 선별기에서 제거가 안 된 금속류를 제거하기 위하여 분쇄공정을 이용하였으며, 미립자가 많을 경우 자력선별공정에서 자성산물의 회수효율이 떨어지는 것을 방지하기 위하여 2차 체가름 공정을 통하여 미립자(-48 mesh) 시료를 분리하였다. 체가름 공정에서 회수된 +48 mesh 시료에 대해 자력선별 공정을 적용하여 금속류를 제거한 후 최종 회수된 무기물에 대한 X-ray Fluorescence Spectrometer 분석을 통하여 분리선별 효율을 확인하였다.

본 연구에서는 최종 회수된 무기물 시료를 점토와 일정비율(10~100%)로 배합한 후 수분 10%이하에서 100kg$_f$/cm^{2}의 압력으로 가압 성형하였으며, 70°C에서 2시간 건조 후 1시간 소결하여 소결체를 제조하였다. Fig. 2에는 소결체 제조공정을 제시하였으며, 제조된 소결체에 대한 소성 수축율, 강열감량, 흡수율, 압축강도 등의 물성평가를 실시하였다. 또한, 소결체의 환경성을

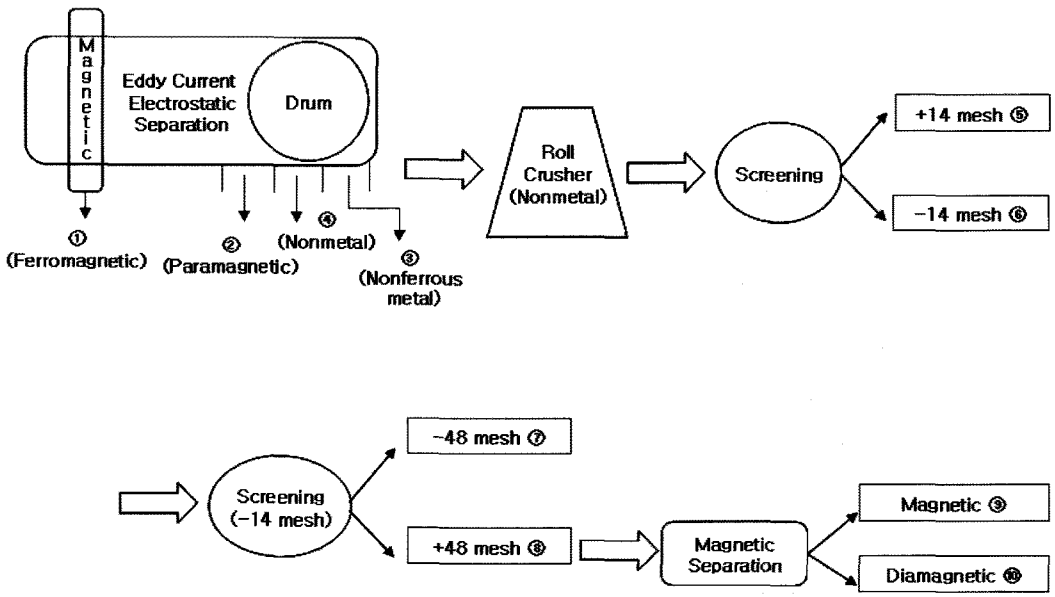

Fig. 1. Flow diagram for metal separation from incombustion materials.

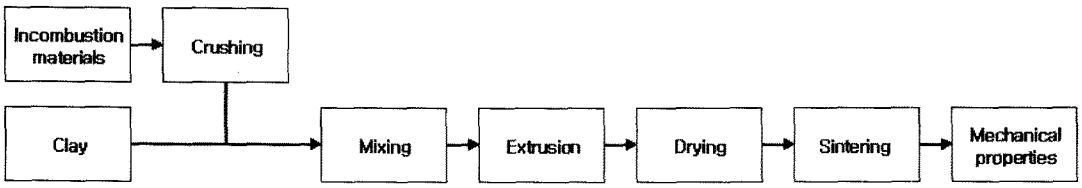

Fig. 2. Manufacturing process for ceramic products.

Table 1. Heavy metal contents in incombustion materials. (Unit : ppm)

	Cu	As	Cd	Hg	Pb	Cr^{6+}
Sample I ① *	4,344	0.120	2.113	0.0012	1,568	2.4
Sample I ② **	5,032	9.704	1.598	0.0021	1,501	0.4
Sample II ③ *	4,384	5.104	5.896	0.0257	2,407	1.2
Sample II ② **	8,080	7.172	5.996	0.0347	1,451	0.4

주) *① : 9 mesh이하로 체가름 후 금속류가 함유된 시료
**② : 9 mesh이하로 체가름 후 자력선별로 금속류를 제거한 시료

Table 2. Leaching test results for incombustion materials. (Unit : ppm)

Korea Standard Leaching Procedure (KSLP)	Cu	As	Cd	Hg	Pb	Cr^{6+}
	<3	<1.5	<0.3	<0.05	<3	<1.5
Sample I	0.014	N · D	N · D	N · D	0.602	0.045
Sample II	0.013	N · D	N · D	N · D	N · D	0.041

검토하기 위하여 ICP-MS를 이용하여 중금속의 용출 특성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

두 곳의 소각장에서 회수한 각각의 불연물 시료에 대한 중금속 함량시험 결과를 Table 1에 제시하였다. Sample I과 Sample II의 경우 자력선별로 금속류를 제거한 시료 중 Pb의 경우 중금속 전함량이 각각 1,501 ppm, 1,451ppm으로 다소 높게 나타났으나, Cr^{6+}의 경우에는 0.4 ppm 수준으로 낮게 나타났다. Table 1에서 알 수 있듯이 자력선별 공정 적용 후 회수된 불연물 시료 중의 Cu, As 함량은 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 시료 중 자성물질의 제거로 Cu, As 등 비철금속 성분이 불연물 중에 농축된 것으로 사료된다.

또한, 9 mesh이하로 체가름 후 금속류가 함유된 시료를 대상으로 용출실험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 용출실험 결과 중금속 용출농도 모두 KSLP 기준치 이하로 나타났으며 따라서, 본 시료를 재활용하는데 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

불연물 시료로부터 금속성분 제거를 위한 분리선별 실험을 통하여 얻은 결과는 Table 3과 같다. Table 3에서 보는 바와 같이 자력 및 와류정전선별 결과 회수된 비금속류(무기질)의 양은 Sample I과 Sample II가 각각 86.9% 및 86.13%로 거의 비슷한 수준을 보여주고 있다. 그러나, 최종적으로 회수한 비금속류(무기질)의 양은 Sample I과 Sample II 각각 74.18% 및 74.77%g이었으며, 2차 Screen 공정에서 회수된 -48 mesh 산물을 합칠 경우 회수된 무기질 시료의 양은 전체 투입양의 약 68~70%에 이르는 것으로 조사되었다. 유동상 소각로에서 배출되는 불연물의 경우 전체 배출량의 약 30%는 금속류로, 약 70%는 무기물로 회수가 가능하여 대부분의 불연물은 재활용이 가능할 것으로 기대된다.

Table 4는 분리선별 공정에서 일부 회수한 Sample I 및 Sample II에 대한 X-ray Fluorescence Spectrometer 분석 결과를 요약한 표이다. Table 4에서 알 수 있듯이 ①번 시료의 경우 전반적으로 Fe_2O_3, TiO_2, MnO, CuO, ZnO 등의 금속산화물 함량이 매우 높게 나타났으며, Fe_2O_3의 경우 Sample I은 9.36%, Sample II는 5.63%로 조사되었다. ②번 시료에서는 SiO_2 성분이 매

Table 3. Separation results for metal removal from incombustion materials.

Process	Sample		Sample I		Sample II	
			Weight(g)	Content(%)	Weight(g)	Content(%)
Eddy Current Electrostatic Separation	Ferromagnetic	①	139.84	6.01	90.83	5.29
	Paramagnetic	②	137.84	5.92	122.85	7.15
	Nonferrous metal	③	27.22	1.17	24.58	1.43
	Nonmetal	④	2,022.84	86.90	1,479.55	86.13
	Subtotal		2,327.74	100	1,717.81	100
Roll Crushing (Nonmetal)	+14 mesh	⑤	26.64	1.22	26.28	1.78
	-14 mesh	⑥	1,998.20	98.78	1,453.27	98.22
	Subtotal		2,022.84	100	1,479.55	100
Screening (-14 mesh)	+48 mesh	⑦	1,516.64	75.90	1,123.42	77.30
	-48 mesh	⑧	481.56	24.10	329.85	22.70
	Subtotal		1,998.20	100	1,453.27	100
Magnetic Separation (+48 mesh)	Magnetic	⑨	391.64	25.82	283.42	25.23
	Diamagnetic	⑩	1,125.0	74.18	840.0	74.77
	Subtotal		1,516.64	100	1,123.42	100

Table 4. Chemical composition of samples obtained after separation processes.

Elements	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3	NiO	CuO	ZnO	L.O.I
Sample I ① *	2.15	1.21	3.18	14.5	3.05	0.82	40.50	0.58	0.56	9.36	0.10	0.40	0.61	23.00
Sample I ② **	10.20	1.90	6.20	57.9	2.06	1.26	14.50	0.41	N.D	1.87	0.08	0.23	0.24	3.20
Sample I ③ ***	10.70	1.10	4.42	68.4	N.D	1.23	11.60	0.19	N.D	N.D	0.07	0.16	0.09	2.00
Sample II ① *	1.56	1.22	3.67	11.3	2.55	0.69	45.10	0.49	0.25	5.63	0.06	0.25	0.47	26.70
Sample II ② **	10.30	1.94	5.53	54.2	1.28	0.97	16.80	0.37	0.07	1.04	N.D	0.12	0.09	7.30
Sample II ③ ***	5.40	1.13	2.68	33.0	2.70	0.65	35.60	N.D	N.D	N.D	N.D	0.12	0.14	18.60

주) *① 시료 : 자력선별을 적용하지 않은 9 mesh 이하의 미립자
**② 시료 : 수선별에서 회수된 유리 및 세라믹이 주성분
***③ 시료 : 분리선별공정에서 최종 회수된 비자성 산물

우 높았으며, ③번 시료의 금속산화물(Fe_2O_3, TiO_2, MnO, CuO, ZnO 등) 함량이 ①시료에 비해 매우 낮게 나타나서 분리선별공정을 통하여 금속산화물이 효율적으로 제거된 것으로 사료된다.

특히, ③번 시료의 경우 알카리 성분(Na_2O, K_2O, MgO 등)이 비교적 높게 나타났으며 SiO_2 성분도 ①번 시료에 비해 상대적으로 높게 나타났다.

본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 회수된 무기물 시료를 이용하여 점토와 일정비율로 배합한 후 1,000°C, 1,050°C 및 1,100°C에서 소결체를 제조하였다. Fig. 3 사진은 본 연구에서 제조한 소결체의 형상을 보여주고 있으며, 점토만을 이용하여 제조된 소결체의 경우 표면이 매끄럽고 색상이 곱게 나타났다. 또한, 소각재에서 회수된 무기물 시료를 첨가한 경우 표면이 다소 거칠게 나타났으나, 전반적으로 소성벽돌 등 건축용 벽돌로 사용하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 기대된다. 특히, 소성온도가 1,100°C인 경우는 시편이 팽창하여 소성체 제조가 어려운 것으로 나타났다. 특히, Fig. 4에는 불연물 시료를 100 mesh 이하로 분쇄하여 제조된 시료만을 사용하여 950°C에서 1시간 소결하여 소결체를 제조한 결과 외관이 미려하며, 색상이 백색에 가까운 물성을 확인하여 새로운 제품 개발의 가능성을 보여주었다.

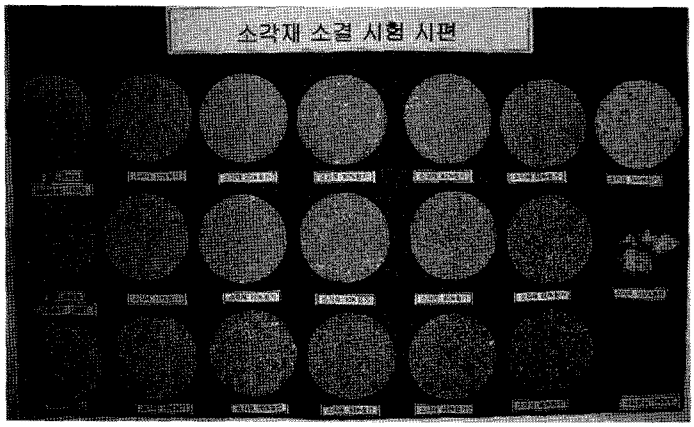

Fig. 3. Ceramic products obtained from the mixture of various amount of incombustion material and clay.

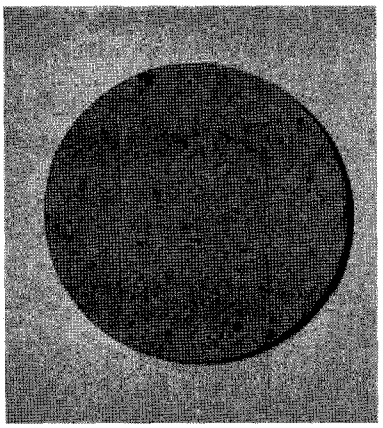

Fig. 4. Ceramic product obtained from incombustion material without clay addition.

Table 5. Mechanical properties of ceramic products obtained from clay mixed with various amount of incombustion materials.

Sintering Temperature	Ash addition ratio(wt.%)	Mechanical properties			
		Shrinkage Rate (%)	Ignition Loss (%)	Absorbancy (%)	Compressive strength (N/mm^2)
1,000°C	Clay only	1.98	7.61	15.31	13.92
	10	2.24	7.34	13.84	19.50
	20	2.35	7.21	13.23	24.32
	30	1.34	7.04	11.26	27.28
	40	1.91	8.53	10.76	27.32
	50	1.50	6.73	9.60	27.62
	100	0.48	5.89	2.48	41.70
1,050°C	Clay only	4.65	7.74	14.99	20.01
	10	0.87	7.43	12.70	19.56
	20	0.48	7.13	10.56	26.67
	30	0.90	6.74	9.33	31.26
	40	1.61	6.57	7.57	36.97
	50	2.08	6.38	5.16	42.64
	100	-	-	-	-
1,100°C	Clay only	6.84	7.72	12.94	20.48
	10	2.34	7.53	10.27	30.12
	20	0.55	7.33	8.74	35.52
	30	+2.03	7.06	6.29	38.07
	40	+4.40	6.83	3.94	50.13
	50	+7.09	6.72	2.19	42.53
	100	-	-	-	-

불연물 시료를 이용하여 제조된 소결체의 물성 실험 결과를 Table 5에 요약하였다. Table 5에서 알 수 있듯이 1,000°C 및 1,050°C에서 소성한 제품의 경우 불연물 시료의 첨가량을 50%까지 증가시키면 소성수축률

Table 6. Leaching test results for ceramic products obtained from incombustion materials.

Korea Standard Leaching Procedure(KSLP)		Cu	As	Cd	Hg	Pb	Cr^{6+}
Sintering Temperature	Ash addition ratio(wt.%)	<3	<1.5	<0.3	<0.05	<3	<1.5
950°C	Ash only	0.003	0.001	N · D	N · D	0.002	0.0008
1,000°C	Clay only	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	10	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	20	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	30	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	40	0.001	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	50	0.001	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	100	0.002	N · D	N · D	N · D	0.001	0.0005
1,050°C	Clay only	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	10	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	20	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	30	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	40	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	50	0.0007	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
1,100°C	Clay only	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	10	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	20	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	30	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	40	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D
	50	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D	N · D

이 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 소성수축률(변형률)이 낮을수록 제품화에 유리하다. 그러나, 1,100°C 소결온도에서는 점토에 불연물 시료를 30% 이상 첨가하면 소결시편이 팽창하는 현상을 보여 주었다. 강열감량(Ignition Loss)의 경우는 제품의 경량화와 관련이 있으나 본 조사에서는 불연물 첨가량에 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 흡수율과 압축강도의 경우는 소각재 첨가량이 증가할수록 흡수율이 낮아지는 것으로 나타났으며, 반면에 압축강도는 상대적으로 높아지는 것으로 조사되었다. 따라서, 흡수율과 압축강도는 밀접한 연관이 있는 것으로 판단된다. 본 실험결과에 의하면 불연물 시료를 첨가하므로서 융제로서의 역할이 가능하여, 세라믹스 제품 소결시 50°C 정도의 소결온도를 저하 시킬 수 있을 것으로 기대된다. 소성실험의 결과에 의하면 최적 소성온도가 1,050°C인 것으로 조사되어 세라믹스 제품의 일반적인 소성온도 1,100°C보다 낮게 나타났다. 또한, 불연물에 안료 및 배합토를 적절히 선정하여 사용할 경우 다양한 색상을 갖는 소성체의 개발이 가능할 것으로 기대된다. 다만, 불연물 첨가량이 클 경우 소결시편의 외관이 다소 거칠게 형성되는 것으로 조사되었다.

불연물을 첨가하여 제조된 소결시편의 용출실험 결과를 Table 6에 나타내었으며, 무기물 시료만으로 950°C에서 1시간 소결하여 제조한 소결시편에서 일부 미량의 중금속이 검출되었다. 또한, 1,000°C에서 점토와 혼합하여 제조한 소결시편의 경우에는 불연물의 양이 증가하면 일부 Cu와 Pb이 미량 검출되었으며, 1,050°C와 1,100°C에서는 거의 검출되지 않는 것으로 나타났다. 불연물을 이용하여 고온에서 소결하여 소결시편을 제조할 경우 중금속 용출로 인한 환경적인 문제는 없을 것으로 예상되나, 불연물을 효율적으로 세라믹스(요원) 원료로 재활용하기 위해서는 추가적인 연구가 요망된다.

4. 결 론

본 연구에서는 생활쓰레기 유동상 소각로에서 배출되고 있는 불연물 시료에 대한 환경성 검토 및 세라믹스

(요업)원료로서 재활용 가능성을 검토하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 불연물 시료를 체가름 및 자력선별 후 회수된 시료에 대한 중금속 전함량 분석결과 Pb의 경우 1,450~1,500 ppm 수준으로 다소 높게 나타났으나, Cr^{6+}의 경우 0.4 ppm으로 매우 낮게 나타났다. 그러나, 용출실험 결과는 모두 KSLP 기준치 이하로 조사되었다.

2. 불연물 시료에 대한 분리선별 실험 결과 1차 및 2차 자력선별 후 회수한 무기물 시료와 2차 Screen 공정에서 회수된 산물(-48 mesh)을 합칠 경우 전체 투입량의 약 70%를 무기물로 회수가 가능하며, 나머지 약 30%는 금속류로 회수되었다. 따라서, 불연물에 선별공정을 적용할 경우 대부분의 불연물은 재활용이 가능할 것으로 조사되었다.

3. 불연물 시료의 X-ray Fluorescence Spectrometer 분석 결과 분리선별 전 시료의 경우 전반적으로 금속산화물(Fe_2O_3, TiO_2, MnO, CuO, ZnO 등)의 함량이 매우 높게 나타났으며, 수선별에서 회수된 비자성 산물은 SiO_2 성분이 매우 높게 조사되었다. 또한, 최종 회수된 무기질 시료의 경우 금속산화물이 분리선별 공정에서 효율적으로 제거된 것으로 조사되었다.

4. 본 연구에서는 회수된 무기물 시료와 점토를 일정 비율로 배합하여 소결체를 제조하였다. 제조된 소결체의 물성조사 결과 1,000°C 및 1,050°C에서 소성한 제품의 경우 불연물의 첨가량을 증가시키면 소성수축률(변형률)이 감소하여 최종 제품화에 유리할 것으로 나타났다. 또한, 불연물을 첨가함으로써 소성온도를 낮출 수 있는 융제로서의 역할이 가능하여 소성온도를 약 50°C 정도 낮출 수 있을 것으로 사료된다.

5. 소성원료에 불연물 시료의 양을 증가시킬수록 흡수율이 낮아져서 소결체의 압축강도가 개선되는 것으로 조사되었다. 또한, 불연물 첨가시 최종 제작된 소결체의 외관은 다소 거칠게 나타났으나, 소성벽돌 및 바닥재(타일류) 등의 요업원료로 재활용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 현재 유동상 소각로의 불연물은 자력선별 후 매립처리에 의존하고 있으나, 본 연구에서 적용한 분리선별/체가름 공정을 통하여 세라믹스(요업)원료 등으로 이용할 경우 매립에 의한 2차 환경오염문제의 최소화는 물론 매립비용의 절감이 가능하여 현장적용성이 매우 높을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 (주)서희건설의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 2006 : 2005 전국 폐기물 발생 및 처리현황.
2. Grasso, D., 1993 : Hazardous Waste Site Remediation : Source Control, Lewis Publishers, p. 6-22.
3. 김규종, 김정래, 1996 : 유동층 도시쓰레기 소각로에서 불연물 배출기술, 한국폐기물학지, **13**(6), p. 115-117.
4. 김경남 외 2인, 2001 : 석탄회(FA)-점토계의 세라믹스 벽돌제조, 한국폐기물학지, **18**(5), p459-467.
5. 이무성 외 2인, 1998 : 점토벽돌의 첨가제로서 석탄회의 재활용성에 관한 연구, 한국폐기물학지, **15**(7), p342-351.
6. 염환석, 2002 : 건축구조재료 실험, 기문당.
7. 한국표준협회, 2003 : 점토벽돌(KS L 4201).
8. 한국표준협회, 2002 : 도자기용 점토의 건조수축과 소성수축률의 측정방법(KS L 4004).

崔 佑 鎭

• 현재 수원대학교 환경공학과 교수
• 당 학회지 제9권 1호 참조

朴 銀 奎

• 현재 수원대학교 환경공학과 박사과정

姜 承 均

• 현재 (주)서희건설 상무