

生活廢棄物 燒却재를 利用하여 合成한 클링커의 重金屬 및 水和反應 舉動에 관한 研究

*安芝煥 · 韓基天 · 韓基錫

韓國地質資源研究院 資源活用素材研究部

A Study on the Behavior of Heavy Metal Ions and Hydration of Clinker Utilizing Municipal Solid Waste Incineration Ash

*Ji Whan Ahn, Gi Chun Han and Ki Suk Han

Minerals & Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350 Korea

요 약

생활폐기물 소각재(바닥재+비산재)를 이용하여 보통 포틀랜드 시멘트를 제조하고자 하였다. 주원료로는 석회석, 폐주물사, shale, 전로슬래그 및 fly ash를 이용하였으며, modulus를 LSF 91.0, SM 2.40, IM 1.80의 수준으로 배합하였다. 바닥재의 경우는 배합물에 1, 2, 3 wt.%까지 첨가하였으며, 바닥재와 비산재의 혼합시료는 각각의 함량을 0.9 및 0.1 wt.%로 하여 첨가하였다. 클링커 분석 결과 소성성 지수(B.I.)는 소각재가 많이 첨가 될수록 낮아지는 것으로 나타났으며, calcium silicate 광물의 발달이 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 압축강도 측정결과, 소각재 사용량이 증가함에 따라 강도가 저하되는 것으로 확인 되었다.

주제어: 생활폐기물 소각재, 비산재, 바닥재, 중금속, 수화반응

Abstract

The intension of this study is to produce ordinary portland cement using ash, both bottom ash and fly ash, obtained from municipal solid waste incineration ash (MSWI). We used limestone, waste molding sand, shale, slag from converting furnaces and fly ash as main raw materials and mixed them, setting the lime saturation factor (LSF) within 91.0, the silica modulus (SM) within 2.40, and iron modulus (IM) within 1.80. We conducted tests adding bottom ash alone 1, 2 and 3% by weight, respectively, and a mixture of bottom ash 0.9% and fly ash 0.1% by weight. The result of analysis on clinker shows that the more ash is added, the lower the burnability index (B.I.) falls, lowering the mineral evolution of calcium silicate accordingly. From the measurement of compressive strength we have learned that the more ash is used, the lower the strength becomes.

Key words: municipal solid waste incineration ash, fly ash, bottom ash, heavy metal, hydration

1. 서 론

우리나라의 폐기물 발생량은 생활수준 향상에 따라 점차 증가하고 있으며, 이 중 생활 폐기물이 차지하는 비중은 2001년 현재 전체의 24.5%인 1,770톤에 이르고 있다. 생활 폐기물의 처리는 대부분 매립에 의존하고 있으나, 최근 들어 지속적인 폐기물 소각시설 확충

으로 인해 소각처리 비율이 11.7%까지 증가하고 있으며 향후 2011년에는 소각율을 30%¹⁾까지 끌어올릴 계획이어서 소각재의 양은 계속 늘어날 것으로 예상되어 이에 따라 유해 물질을 다량 함유하는 소각재의 안정적인 처리 방안의 강구가 요구되고 있다.

한편 소각재(바닥재 및 비산재)는 대부분 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO 등의 산화물로 이루어져 있고 알칼리, 염소성분 이외에 각종 중금속 등 여러 가지 유해원소들이 포함되어 있다.^{2,5)} 각종 산업 중에서는 이러한

* 2004년 1월 29일 접수, 2004년 7월 26일 수리

* E-mail: ahnjw@kigam.re.kr

산화물 원료를 사용하고 있는 분야가 많으며, 시멘트 산업은 다량의 산화물 원료를 사용하는 대표적인 산업으로 분류할 수 있다. 또한 시멘트 산업에서는 철강산업에서 발생하는 각종 슬래그를 시멘트의 혼합재나 시멘트 클링커 제조용 원료로 사용해 오고 있으며, 화력발전소나 산업용 보일러 등에서 발생하는 ash류도 원료나 혼합재로 사용해 오고 있다. 즉 시멘트 산업에서는 각종 산업 폐기물을 다시 유용한 원료로 재활용하는 기술의 개발이 어느 정도 이루어져 있다고 볼 수 있다. 한편 시멘트 산업은 원료자원들이 다량으로 장기간 쓰여지기 때문에 대규모로 발생하는 폐기물을 사용하는데 매우 유리하며 무엇보다도 폐기물 속에 함유되어 있는 유해 중금속 등이 시멘트의 제조 및 사용과정에서 고온화 혹은 고정화^{6,8)}되어 다시 외부환경에 영향을 주지 않는다는 것이 장점이다.

본 연구에서는 생활폐기물 소각재를 대상으로 이들을 시멘트 산업에서 원료자원으로 재활용 할 수 있는 가능성을 확인해 보기 위해 실험실적인 제조실험을 통해 그 사용 가능성을 검증하고 제조한 시멘트의 품질을 포함하는 제반 특성을 평가하고자 한다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시 료

실험에 사용한 생활폐기물 소각장에서 배출된 소각재는 소각로 배가스 처리 시스템²⁾이 다른 I(경기지역) 바닥재 및 비산재와 II(부산지역) 비산재를 대상으로 선정

하여 실험을 하였다. 바닥재는 자력선별, 체질 등을 통해 금속성분을 제거한 후 100°C에서 24시간 건조시킨 것을 사용하였으며, 비산재는 소각로 집진기에서 채취된 시료를 건조한 후 실험에 사용하였다. Table 1 및 2는 각각 실험에 사용한 소각재의 화학성분 분석 결과와 염소(Cl) 및 기타 미량성분 분석 결과를 나타낸 것이다. 시멘트 광물을 형성하는 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO 등의 산화물 이외에도 시멘트의 제조 공정 및 품질에 영향을 미칠 수 있는 염소, 알칼리(Na₂O, K₂O)가 다량 함유되어 있고 각종 중금속 또한 상당량 포함되어 있으며, 소각재 종류별 화학조성 및 광물조성의 차이가 있다는 것을 알 수 있다.^{2,3)}

클링커를 합성하기 위한 조합원료는 S업체에서 실제로 사용되는 원료물질을 사용하였다. 원료물질의 화학분석결과를 Table 3에 나타내었다.

2.2. 원료배합

원료물질은 88 μm 체를 통과 후, 남은 잔사의 수준을 12±1%로 하여 분쇄를 하여, modulus 조건을 각각 LSF(Lime saturation factor) 91.0, SM(Silica modulus) 2.40, IM(iron modulus) 1.80으로 조합원료를 제조하였다. 소각재를 원료로 사용한 시멘트를 제조하기 위한 실험수준으로서 소각재 첨가량 및 종류에 따라 변화시키며, 염소성분은 시멘트사에서 시멘트 킬른 공정을 감안하여 설정한^{6,7)} 500 ppm 이하가 되도록 6수준으로 조제하였다. 6수준의 조합원료 제조조건 및 중금속 분석결과를 Table 4 및 5에 나타내었다.

Table 1. Chemical composition of municipal solid waste incinerator ash.

Sample	Chemical composition (wt.%)												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Mn ₂ O ₃	ZnO	LOI
I Bottom ash	29.21	7.76	10.50	23.16	2.23	1.36	4.46	1.18	1.02	5.38	0.35	1.00	12.39
I Fly ash	8.32	4.60	1.38	47.02	3.67	3.74	4.89	4.97	1.34	2.65	0.22	1.17	16.04
II Fly ash	10.64	6.58	2.19	20.08	4.76	11.46	11.29	12.52	1.99	6.12	0.36	2.86	9.13

Table 2. Chlorine and heavy metal content of municipal solid waste incinerator ash.

Sample	Cl ⁻ (wt.%)	Heavy metal content (ppm)				
		Cr	Cu	As	Cd	Pb
I Bottom ash	1.67	550	2,940	135	tr	1,041
I Fly ash	20.16	451	563	96	6	20
II Fly ash	22.99	854	714	125	16	131

Table 3. Chemical composition of main raw materials.

Raw materials	Chemical composition (wt.%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI
Limestone	11.10	2.10	1.00	46.10	1.62	0.05	0.88	37.10
Waste sand	85.50	5.40	1.10	0.50	0.10	0.95	1.27	5.10
Shale	63.10	20.30	7.80	0.60	0.70	0.18	1.84	5.20
Converter slag	12.40	8.70	31.50	39.30	7.50	0.30	0.23	0.10
Fly ash	44.90	30.60	4.60	9.10	1.50	0.88	0.22	0.10

Table 4. Addition contents of MSWI in raw mixtures.

	Addition contents of MSWI (wt.%)		
	I Bottom ash	I Fly ash	II Fly ash
Case 0	-	-	-
Case 1	1.0	-	-
Case 2	2.0	-	-
Case 3	3.0	-	-
Case 4	0.9	0.1	-
Case 5	0.9	-	0.1

Table 5. Heavy metal and chlorine contents in raw mixtures.

	Heavy metal content (ppm)					Cl(ppm)
	Cr	Cu	As	Cd	Pb	
Case 0	52	11	59	tr	10	87
Case 1	54	54	61	tr	21	253
Case 2	57	75	58	tr	28	419
Case 3	56	97	50	tr	34	585
Case 4	57	31	53	tr	21	438
Case 5	51	29	54	tr	22	466

2.3. 실험방법

각 실험수준별 조합원료를 만든 후 각각을 전기로를 이용하여 소성하여 클링커를 제조하였다. 이때 성구기를 사용하여 조합원료를 적당량의 물과 혼합하여 반죽한 후 지름 10 mm 정도의 구형으로 성구하였고, 이를 100°C에서 건조하여 수분을 제거하였다. 그리고 900°C에서 1시간 열처리하여 탈탄산시킨 후 1,450°C에서 40분 동안 소성한 후 급냉(Air cooling)시켜 시멘트 클링커를 제조하였다. 이때 각각의 수준별 클링커 제조조건은 모두 동일하게 하였다.

실험실에서 제조한 각각의 수준별 클링커에 SO₃함량이 2.1%가 되도록 N사 인산부산석고를 첨가하고, 실험

실 볼밀로 Blaine 비표면적 3,200±50 cm²/g이 되도록 분쇄하여 시멘트를 제조하였다.

원료 및 소성한 클링커의 주요성분 및 미량성분은 각각 XRF(XRF-1700, Shimadzu) 및 ICP(ICP-AES 7500, Shimadzu)로, 염소의 농도는 질산은에 의한 적정법(mol 법)으로 분석하였다. 또한 XRD(X'pert, Philips), 반사현미경 관찰 등을 통하여 시멘트 광물발달 상태를 관찰하였으며, SEM/EDAX(Topcon, ABT 32, Japan) 분석을 통해 각각의 시멘트 광물 내 미량성분 함량을 분석하였다.

각 조합원료의 소성성은 Polysius 방법을 이용하여 계산하였다. 소성성 측정 방법은 1,350, 1,400, 1,450, 1,500°C에서 각각 15분 동안 소성한 시료를 에틸렌글리

콜분석법으로 Free CaO를 측정한 후 다음 식에 의하여 소성성 지수(Burnability Index, B.I)를 구하였다.

$$B.I = \frac{F-CaO\%[(1,350^{\circ}C)+(1,400^{\circ}C+2\times(1,450^{\circ}C)+3(1500^{\circ}C)\times 3.73]}{[(1,350^{\circ}C \text{ 소성클링링 } F-CaO\%)-(1,500^{\circ}C \text{ 소성클링링 } F-CaO\%)^{1/4}}$$

합성된 클링커의 수화특성을 알아보기 위해 제조한 각각의 수준별 시멘트의 conduction calorimeter를 이용해 수화반응열을 분석하였다. 이때 물비(W/C)는 0.5로 하였다. 또한 제조한 시멘트의 압축강도, 응결, 안정도는 각각 KS L 5105, 5103 및 5107 규격에 따라 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 클링커 합성

각 수준별 조합원료를 소성성 시험 방법에 의거하여 클링커를 제조한 후 소성된 시료의 Free CaO를 에틸렌 글리콜 분석법으로 분석하여 소성성 지수(B.I)를 계산한 결과를 Table 6에 나타내었다.

각 수준별 조합원료의 소성성 지수는 조합원료 중 소각재 함량이 증가할수록 높아져 소성성이 나빠지는 것으로 나타났다. 그러나 조합원료 중 소각재 사용량이 1% 수준인 실험 수준 1, 4, 5의 경우 소각재가 포함되지 않은 수준 0과 비교할 때 큰 차이를 보이지 않으며 오히려 바닥재와 함께 비산재가 포함된 수준 4, 5의 경우에는 근소하게 작은 값을 보이고 있어, 소각재 함량이 증가함에 따라 조합원료의 소성성은 저하되나 그 양이 조합원료 중 1% 정도로 적은 경우에는 소성성에 미치는 영향은 미미하게 나타났다.

실험실적으로 제조한 클링커의 소각재 사용 실험 수준별 특성을 X선 회절분석, 반사현미경 관찰 등을 통

해 클링커 발달 상태를 알아보았다. 또한 SEM/EDAX 분석을 통해 클링커 광물 내 미량성분 분포 상태를 살펴보고았다.

Fig. 1은 실험실적으로 제조한 클링커의 X선 회절분석 결과이다. 소각재가 포함되지 않은 수준 0의 경우 잘 발달된 Alite(C₃S), Belite(C₂S), Aluminate(C₃A), Ferite상(C₄AF) 등의 피크가 나타나고 있으며 이는 전형적인 보통 포틀랜드시멘트 클링커의 형태를 보이고 있다. 그러나 소각재 첨가에 따라 Alite, Belite 등의 calcium silicate 광물의 회절 피크가 감소하고 있는데,

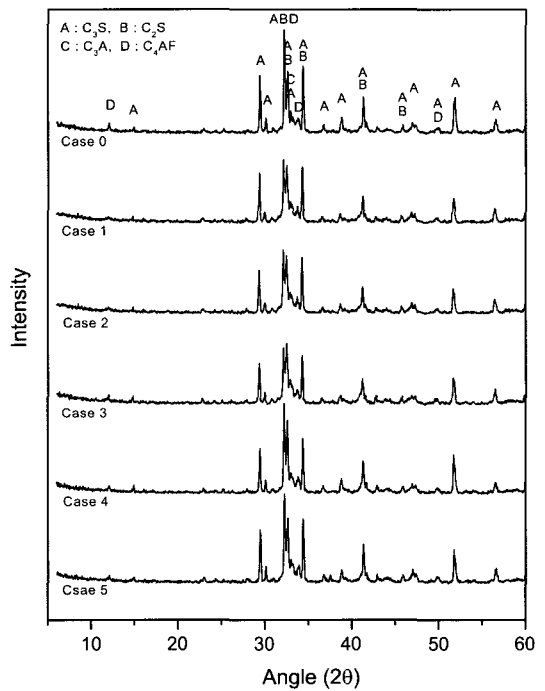


Fig. 1. XRD patterns of clinker synthesized at 1,450°C.

Table 6. Results of burnability test.

	Free CaO contents (wt.%)				B.I.
	1350°C	1400°C	1450°C	1500°C	
Case 0	6.04	4.41	3.13	2.34	63.8
Case 1	5.73	4.29	3.05	2.42	64.7
Case 2	5.58	4.44	3.34	2.81	72.7
Case 3	5.46	4.39	3.43	2.99	76.4
Case 4	5.28	4.20	2.91	2.27	62.6
Case 5	5.48	4.22	2.94	2.24	62.0

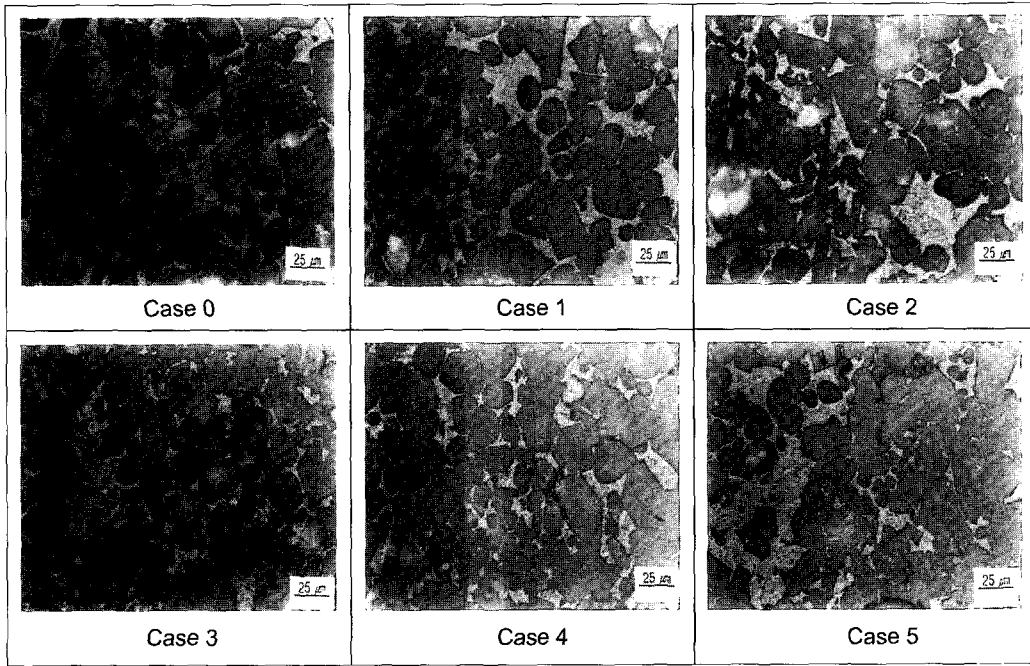


Fig. 2. SEM photographs of clinker synthesized at 1,450°C.

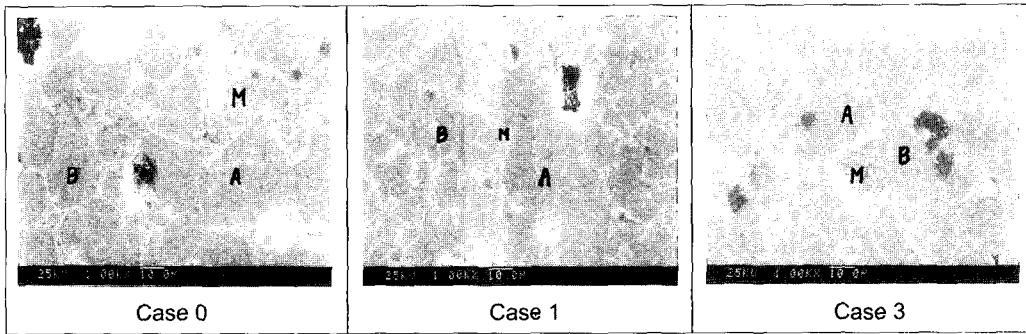


Fig. 3. SEM photographs of the parts on which EDAX measurement was performed.

A : Alite, B : Belite, M : Matrix

이는 소각재 첨가량이 증가함에 따라 이들 광물의 발달이 저하되었기 때문이다. 또한 바닥재와 비산재가 함께 사용된 수준 4, 수준 5의 경우에는 수준 0에 비해 회질 피크가 조금 낮은 정도로 나타나고 있다.

제조한 클링커의 소각재 첨가 수준별 반사현미경 사진을 Fig. 2에 나타내었다. (a)의 소각재가 포함되지 않은 수준 0의 경우 광물의 경계 부분이 명확하고 Alite, Belite 등의 광물이 잘 발달한 것을 볼 수 있다. 그러나 소각재의 사용량이 증가됨에 따라 클링커 광물의 경계 부분이 불명확한 것으로 나타나 광물의 발달 상태가

불량한 것으로 보여진다. 이는 X-선 회절분석 결과와 마찬가지로의 결과를 나타내었다.

Fig. 3은 EDAX 측정 부위의 SEM 사진을 나타낸 것이다. 여기서 A는 Alite, B는 Belite, M은 Matrix이고, Matrix는 간극질로서 C_3A , C_4AF 광물을 포함하고 있다.

Table 7은 SEM/EDAX 분석에 의한 클링커 광물별 미량성분 함량을 분석한 결과이다. 소각재가 포함되지 않은 수준 0과 각각 소각재가 원료 중 1, 3 wt.% 포함된 수준 1, 수준 3의 클링커를 대상으로 하여 EDAX 분석을 하였다. 이와 같은 미량성분들은 시멘트 클링커

광물 중에 결정내부로의 치환, 고용 등으로 인해 안정적으로 고정화된다. 여기서 각각의 미량성분이 Alite, Belite, Matrix 등 어느 광물에 주로 존재하는가를 알아 보기 위해 광물별 EDAX 분석을 통해 그 함량을 정량하였다. 각각의 광물은 각 3회 다른 부위를 측정하였다.

EDAX 분석결과 이들 미량성분 중 P₂O₅는 Alite, Belite 등의 calcium silicate 광물에서 값이 크고, TiO₂, Mn₂O₃은 Matrix에서 값이 크고 그 이외의 성분은 Alite, Belite, Matrix에 전체적으로 비슷한 값을 보이고 있다. 그러나 3회 측정간의 편차가 크고 또한 실험 수준간 경향이 클링커 내 전체 함량 경향과 일치하지 않고 있다. 그리고 이들 미량성분의 함량이 매우 작기 때문에 측정 부위에 따른 편차는 매우 클 것으로 생각된다. 따라서 이를 종합할 때 미량성분들은 클링커 광물에 전체적으로 분포하고 있다고 보는 것이 타당하다고 여겨진다.

3.2. 시멘트의 수화 및 물리적 특성

소각재를 원료로 사용하여 실험실적으로 제조한 시멘트의 누적수화 반응열 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다.

수화반응열 측정 결과 수화시간이 증가함에 따라 소각재를 원료로 사용한 경우가 그렇지 않은 경우보다 수화반응열이 적었다. 이것은 소각재를 사용함으로써 미량성분의 증가 등이 클링커 광물 발달을 저하시켰고 또한 시멘트의 수화반응을 지연시켰기 때문으로 생각된다.

Table 8은 소각재를 원료로 사용하여 실험실적으로

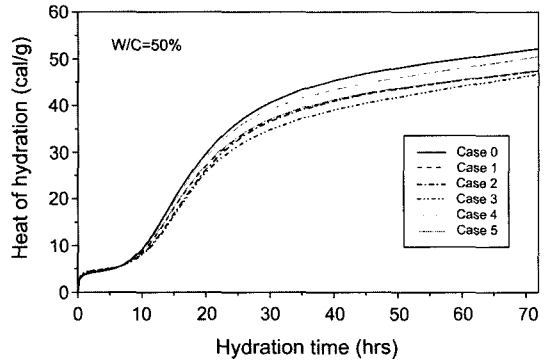


Fig. 4. Cumulative heat of hydration on produced cement.

Table 7. Result of trace mineral components contained in clinker through SEM/EDAX (unit : wt.%)

Minor components	Alite(C ₃ S)			Belite(C ₂ S)			Matrix(C ₃ A, C ₄ AF)		
	Case0	Case1	Case3	Case0	Case1	Case3	Case0	Case1	Case3
P ₂ O ₅	0.77	0.76	0.93	0.71	1.53	1.46	0.08	0.40	0.03
TiO ₂	0.27	0.10	0.22	0.32	0.31	0.36	0.69	0.80	0.72
Cr ₂ O ₃	0.11	0.10	0.07	0.12	0.13	0.15	0.11	0.02	0.10
Mn ₂ O ₃	0.17	0.14	0.11	0.13	0.13	0.15	0.64	1.11	0.66
CuO	0.06	0.07	0.02	0.00	0.10	0.00	0.03	0.00	0.12
As ₂ O ₃	0.00	0.17	0.09	0.08	0.00	0.00	0.09	0.13	0.17
PbO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.83	0.00	0.14	0.00	0.00

Table 8. Physical properties of cement mortar.

	Flow (%)	Compressive strength(kg/cm ²)				Setting time			Soundness (%)
		1d	3ds	7ds	28ds	W/C (%)	Initial (min)	Final (hr.min)	
Case 0	104.9	90	213	302	432	23.0	240	6:30	0.10
Case 1	108.0	78	191	290	426	23.0	260	6:50	0.12
Case 2	105.3	73	166	259	419	23.0	280	7:20	0.12
Case 3	97.2	61	162	255	390	23.4	290	7:40	0.11
Case 4	106.5	79	201	293	424	22.9	250	6:40	0.10
Case 5	106.0	79	210	298	420	22.9	250	6:50	0.11
KS L 5201		-	130	200	290		60	10:00	0.8

Table 9. Heavy metal content of hardened cement mortar (unit : mg/L)

	Pb	Cu	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	CN
Case 0	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
Case 1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Case 2	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
Case 3	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
Case 4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Case 5	ND	ND	ND	-	ND	ND	-
Leaching criteria	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	1

제조한 시멘트의 강도, 응결, 안정도 등 물리적 특성을 평가한 것이다. 그 결과 소각재 사용량이 증가함에 따라 시멘트 경화체의 강도가 저하되고, 시멘트의 응결시간이 지연되었다. 그러나 안정도는 전 실험수준에서 0.12 이하로 모두 비교적 양호하였다. 이와 같이 강도가 저하되는 것은 소각재 내 함유된 미량성분이 클링커링 반응을 저해하여 광물발달이 저하되었고 또한 이들 미량성분들이 시멘트의 수화를 지연시키는 작용을 했기 때문이다. 따라서 소각재를 원료로 사용할 경우에는 클링커 광물의 발달 및 시멘트의 물리특성의 저하가 없는 1 wt.% 이내로 사용 가능한 것으로 나타났다.

3.3. 중금속 용출특성 및 다이옥신 함량 측정

Table 9는 소각재를 원료로 사용하여 실험실적으로 제조한 시멘트의 28일 압축강도를 측정된 공시체로 폐기물공정시험법에 따라 중금속 용출시험을 한 결과, 어느 경우나 모두 중금속 용출이 되지 않았다. 이것은 소각재 등에 함유되어 있는 중금속이 시멘트 제조 과정에서 클링커 광물^{6,8)} 및 수화물⁹⁾에 치환 또는 고용되어 안정화되었기 때문이다.

Table 10에 소각재를 시멘트 원료에 대해서 1% 첨가한 경우에 제조된 시멘트와 시멘트 공시체에 포함되어 있는 다이옥신 함량을 측정된 결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있는 바와 같이 미국, 일본 등 선진국에서 설정한 다이옥신류의 토양오염 기준치¹⁰⁾ 10 pg-TEQ/g 이하인 것을 확인할 수 있었다. 시멘트 제조공정은 1,450°C에서 원료가 소성되어 시멘트 광물이 합성되고 이 온도 이상에서 5초 이상 체류하므로 다이옥신이 모두 분해되고 재생정 되지 않지만, 각 수준별 다이옥신 분석결과는 어떤 상관성도 보이지 않았다. 이는 다이옥신 함량이 미량이므로 시료 샘플링에 의한 시료간 오차에 의한 것으로 여겨진다.

Table 10. Dioxin contents of synthesized clinker and hardened cement mortar.

	Dioxin contents (pg-TEQ/g)
Bottom ash 1%	6.30
Bottom ash 0.9%+Fly ash 0.1%	0.37
Mortar specimen adding bottom ash 1%	4.30

4. 결 론

생활폐기물 소각재를 보통 포틀랜드시멘트 원료로서의 적용 실험 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 생활폐기물 소각재인 바닥재 및 비산재를 소각재를 원료로 사용하여 첨가량 및 종류에 따라 6수준의 조합원료를 제조한 결과, 소각재를 사용한 조합원료에는 알칼리(Na₂O), 염소(Cl) 및 기타 미량성분(중금속 등)의 함량이 소각재를 사용하지 않은 경우에 비해 높았다.
2. 원료에 대한 소각재의 사용량이 증가됨에 따라 소성성 지수(B.I)는 63.8~76.4로 증가하여 소성성이 저하되는 것으로 나타났다. 그러나 소각재 첨가량이 조합원료의 1% 정도로 소량인 경우에는 64.7을 나타내어 소성성에 미치는 영향은 미미하였다.
3. 클링커의 X-선회절 분석 결과, 소각재를 원료로 사용함으로써 calcium silicate 광물의 발달이 저하되었고, 반사현미경 관찰 결과 소각재가 사용된 경우 광물 발달이 불량하였다.
4. SEM/EDAX에 의한 클링커의 미량성분 분석결과, 각종 미량성분은 C₃S, C₂S, Matrix 등 클링커 광물 전반에 걸쳐 치환 또는 고용되어 안정적으로 고정화되었다.
5. 각각의 실험수준별로 제조된 클링커에 석고를 첨가하고 분쇄하여 시멘트를 제조하여 수화반응열을 분석한 결과, 1 바닥재를 1, 2, 3 wt.% 원료로 사용한 경우

72시간 수화반응열은 각각 4.64, 4.70, 5.43 cal/g로 작게 나타났다.

6. 소각재 사용량이 증가함에 따라 시멘트의 초기 및 장기 강도는 저하되었으며, 응결시간도 지연되었다. 그러나, 소각재를 1% 이내로 사용하였을 때에는 원료로서 사용 가능한 것으로 나타났다.

7. 중금속 용출 및 다이옥신 함량 측정결과 모든 수준에서 중금속 용출이 일어나지 않았으며, 다이옥신의 경우 선진국에서 규정하고 있는 함량과 비교하였을 때, 토양오염 기준치 이하인 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. 환경부, 2002: "2001년 전국 폐기물 발생 및 처리현황".
2. 安芝煥, 韓基天, 金亨錫, 2001: "生活廢棄物 燒却재중 바닥재의 特性", **10**(4), pp. 48-57.
3. 安芝煥, 韓基天, 金亨錫, 2001: "水洗에 의한 生活廢棄物 燒却재중 飛散재로부터 鹽素成分의 除去", **10**(5), pp. 36-43.
4. Kikuchi, R., 2001: "Recycling of municipal solid waste for cement production pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker", *Resource, Conservation and Recycling*, **31**(2), pp. 137-147.
5. Shih, P.H. Chang, J.E., Chiang, L.C., 2003: "Replacement of raw mix in cement production by municipal solid waste incineration ash", *Cement and Concrete Research*, **33**(11), pp. 1831-1836.
6. Javed I. Bhatti, 1995: "Role of Elements in Cement Manufacture and Use", *PCA Research and Development Bulletin RD109T*, pp. 1-39.
7. Hiroshi Uchikawa, 1997: "Cement and Concrete Industry Orienting Toward Environmental Load Reduction and Waste Recycling", *秩父小野田研究報告*, **48**(2), pp. 117-149.
8. Bucchi, R., 1980: "Influence of the Nature and Preparation of Raw Materials on the Reactivity of Raw Mix", 7th ICCCI(International Congress on the Chemistry of Cement), **1**, pp. 1-43.
9. Toshio Sakurai, Takeshi Sato and Atushi Yoshinaga, 1968: "The effect of Minor Components on the Early Hydraulic Activity of the Major Phases of Portland Cement Clinker", 5th ICCCI(International Congress on the Chemistry of Cement), **1**, pp. 300-321.
10. 이문순, 2000: "선진각국의 토양 중 다이옥신 기준", 국립환경연구원.

安 芝 煥

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
 - 본 학회지 제10권 4호 참조
-

韓 基 天

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
 - 본 학회지 제10권 4호 참조
-

韓 基 錫

- 현재 한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
 - 본 학회지 제11권 4호 참조
-