한국지반환경공학회 논문집 제4권 제4호 2003년 12월 pp. 35~43

제지 및 하수슬러지 소각재의 재활용을 위한 물리화학적 특성 및 포졸란 반응특성

The Physical-Chemical and Pozzolanic Characteristics for the Recycling of Incinerated Pulp and Sewage Sludge Ashes

주소영* · 연익준** · 김광렬***
Ju, So-Young · Yeon, Ik-Jun · Kim, Kwang-Yul

Abstract

In this study, the physical and chemical characteristics of incinerated pulp and sewage sludge ashes for recycling and reuse were examined. Then we studied the application to the cement admixture by pozzolanic reaction.

The particle size of incinerated pulp and sewage sludge ashes was distributed around 10~100μ, and the contents of SiO_2 and Al_2O_3 were 45.8~51.0%, respectively. Compressive strengths of the solidified ashes were relatively higher, when the content of substituted incineration ashes was 10% and the porosity was also lower except for the case of sewage sludge ash. As results, it is shown that it may be possible to recycle incinerated pulp sludge ashes as cement admixtures.

Keywords : Incineration ash, Pulp sludge, Sewage sludge, Recycling, cement

요 지

폐기물로 발생하는 제지슬러지 소각재와 하수슬러지 소각재의 재활용을 위하여 각 소각재의 물리·화학적인 특성을 조사하였으며 소각재가 가지는 포졸란 반응특성을 이용하여 시멘트 혼화재로서 활용가능성에 대하여 검토하였다.

제지 및 하수슬러지 소각재의 입도는 10~100μ에 대부분 분포하고 있으며, 포졸란 반응물질인 SiO_2와 Al_2O_3의 함량이 45.8~51.0%이였다. 압축강도시험결과 소각재 함량이 10%일 때 비교적 높은 압축강도를 나타났으며 기공율 또한 하수슬러지 소각재를 제외하고 10%일 때 낮은 것으로 나타났다. 이 결과 제지슬러지 소각재의 경우 시멘트 혼화재로써의 재활용 가능성이 충분한 것으로 판단된다.

주요어 : 소각재, 제지슬러지, 하수슬러지, 재활용, 시멘트

* 정회원·수원시 상수도사업소 연구사
** 정회원·충주대학교 환경공학과 전임강사
*** 정회원·충북대학교 환경공학과 교수

1. 서 론

고도 경제성장에 따른 대량 소비화와 인구의 도시집중에 의한 주거의 과밀도는 자원과 에너지 소비를 급격히 증가시켜 왔으며 그에 따른 폐기물의 배출량도 지속적으로 증가되었으며, 최종처리시설인 매립지는 기존시설의 이용한계와 추가 확보가 사회적, 국가적으로 어려움에 처해 있으며 폐기물의 부피감소가 무엇보다도 요구된다. 소각처리는 20% 이상의 중량 감소와 80% 이상의 부피감량이 가능하여 매립의 양과 부피를 크게 줄일 수 있지만 소각과정에서 발생하는 유해가스와 포집된 바닥회(bottom ash) 및 비산회(fly ash)내에는 미연소된 상태로 배출된 유해성 물질과 무기성 물질인 중금속 등이 함유되어 있어 안정화나 무해화처리 없이 단순 매립시 유해성분의 침출로 토양 및 지하수 등 2차 오염을 발생시킨다. 따라서 폐기물의 소각과정에서 발생되는 소각재의 안정적 처분에 관한 연구가 선행되어져야 한다(정재춘 등, 1998).

제지공장에서 배출되는 제지슬러지의 경우 직접 매립시 유기물의 부패로 인하여 토양의 오염을 크게 유발함으로 근래에는 이것을 소각하여 재활용하는 연구가 증가하는 추세이다. 슬러지 소각재의 재활용 분야는 다양하나 아직까지 그 규모나 생산성이나 경제성등이 만족스럽지 못하며 사용실적도 부진한 실정이다. 그러나 소각처리되는 제지슬러지가 매년 증가하고 있으며 2000년동안 소각재는 약 394,000톤이 발생하였으며, 이중 일부는 시멘트 첨가제와 도자기 원료로서 재활용되고 대부분은 매립처리되고 있다. 하수슬러지 소각재의 경우 상대적으로 낮은 pH와 소각되는 하수슬러지의 조성이 균일하지 않기 때문에 재활용이 용이하지 않으며 오히려 중금속이나 유해물질로 인해 2차오염을 유발할 수 있기 때문에 전량 매립처분되고 있는 실정이다(한국제지공업협회, 2001).

소각재의 안정화 방법에는 일반적으로 고형화법 및 약품처리에 의한 안정화법으로 크게 구분할 수 있으나 이중 고형화법이 유해성분의 안정화 측면에서 유리하다고 보고되고 있다. 고형화법은 고형화 온도에 따라 저온고형화법과 고온고형화법으로 구분되는데 이중 저온고형화법에는 시멘트고형화법, 아스팔트고형화법, 석회포졸란고형화법, 압축법 등이 있으며 이들 기술들은 각기 장단점들을 지니고 있어 폐기물의 유해성 정도나 반감기 및 양에 따라 선택되어진다(Freeman, 1989 ; 한국기계연구원, 1997).

저온 고형화법으로 소각재를 처리할 경우 저온으로 조업함에 따라 에너지 비용이 적게 들어 경제적이긴 하지만 점토 등과 같은 고형화 물질을 다량 첨가함에 따라 최종산물의 부피가 증가되고 소각잔류물 내의 중금속 및 유해성 유기물질이 완전히 분해되지 않는 문제점을 지니고 있다(이정전 등, 1997).

저온고형화방법 중 시멘트고형화법은 고화재로 사용되는 시멘트가 가격이 저렴하고 취급과 관리가 용이하며 공정이 단순하다는 장점이 있어 선호되고 있는 방법이다. 시멘트고형화법에서는 주로 포틀랜드 시멘트를 사용하며, 첨가제로는 석회가 사용된다. 그러나 시멘트고형화법은 고화체의 부피가 폐기물 양의 최대 두 배 이상까지 증가하는 단점 때문에 우리나라와 같이 국토가 협소한 실정에서는 고형화 과정에서 발생되는 부피의 증가를 최소화할 수 있는 고형화 방법의 개발이 시급하다고 하겠다. 따라서 매립량을 줄여야 하는 우리나라의 실정에는 적합지 않으며 다만 유해폐기물의 안정화 방법으로만 사용이 고려될 수 있다(한국폐기물학회, 1995;주소영, 1995;이종길 등, 1997;이승헌, 1999).

고화체의 부피를 최소화하면서 유해폐기물을 안정하게 고형화하기 위해서는 적은 양의 고화재로 많은 양의 유해폐기물을 고정시킬 수 있어야 하며 폐기물 고화체의 용출특성이나 기계적 강도 등이 관련 법규의 기준을 충족시킬 수 있어야 한다(환경부, 1996).

특히 고화체의 기계적 강도가 높고 용출율이 독성 및 유해성 기준치 이하일 경우 고화체는 토목·건축용 자재로서의 이용이 가능할 수 있음으로 매립에 다른 문제점을 해결할 수도 있다(LaGrega et al, 1994).

현행 우리나라의 폐기물 관리법에서 지정폐기물의 고형화 처리기준은 시멘트로 고형화하는 경우 고화체 1㎥당 150kg 이상의 시멘트를 혼합하도록 규정하고 있으며 외국의 경우, 미국은 매립현장의 건설장비나 복토 등에 의한 하중을 고려하여 시멘트 고화체의 일축압축강도를 3.5kgf/㎠ 이상으로 규정하고 있으며 일본 또한 육상매립과 해면매립의 일축압축강도 기준을 10kgf/㎠로 규정하고 있다(U.S. EPA, 1993 ; 日本 厚生省生活衛生局, 1995 ; 임창덕, 1991).

본 연구에서는 소각재의 재활용을 통한 자원화와 매립에 따른 문제점들을 해소하기 위한 방안으로 제지공장에서 발생하는 제지슬러지 소각재 2종류와 하수처리장에서 발생

하는 하수슬러지 소각재를 대상으로 시멘트 혼화재로서 포졸란 반응 특성들을 검토하고자 하였다. 우선 제지슬러지 소각재 및 하수슬러지 소각재의 물리·화학적 특성을 조사하기 위하여 시료의 pH, 화학적 조성, 입도분석, 열중량분석, X-선 회절분석, 전자현미경분석을 하였다. 또한 소각재가 갖는 포졸란특성을 활용하기 위하여 시멘트 모르타르 형성시 소각재의 치환량을 변화시키면서 시멘트 고화체를 제작하였으며, 그 특성을 알아보기 위하여 압축강도 및 기공률을 측정하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험재료

본 연구에서 사용된 소각재는 제지슬러지 소각재로 D사 제지슬러지 소각재(DF), H사 제지슬러지 소각재(HF)와 하수슬러지 소각재(SF) 그리고 기존 시멘트 고형화시 첨가하여 사용되어지는 보령화력발전소의 정제된 시판용 역청탄 비산회(FA : Bituminous coal fly ash)를 사용하였다.

각각의 소각재들은 모두 110℃에서 24hr 동안 충분히 건조시킨 후 +180 mesh로 체가름한 후 데시케이터에 보관하면서 실험에 사용하였다.

고형화재로는 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트(Portland cement type I)를 사용하였고 모르타르용 모래는 압축강도시험용 주문진 표준사를 사용하였으며 슬러지 소각재는 시멘트의 단위무게당 0, 10, 20, 30%를 치환하여 실험하였다(KS L 5100, 1996).

2.2 시료분석

제지슬러지 소각재의 특성을 살펴보기 위하여 폐기물 공정시험법에 의한 고상폐기물의 pH 측정방법에 따라 시료 10 g에 증류수 25mL를 가하여 교반시킨 후 상등액을 분리하여 pH를 측정하였다(동화기술편집부 편, 2002).

또한 소각재의 조성분석은 ICP(Lab 8440, Labtam, Co.)를 사용하여 측정하였으며, 소각재내의 미연분 및 열에 대한 안정성을 분석하기 위하여 열중량분석기(TGA : Dupon 2000)를 사용하여 분석하였다. 소각재의 결정구조는 X-선 회절분석기(XRD : RTP 300RC, Rigaku Co.)를 사용하여 분석하였으며, 소각재의 입경분포를 조사하기 위하여 입도분석기(Mastersizer, Model E. Malven Instrument Co.)를 사용하였고, 소각재의 모양과 상태는 전자주사현미경(SEM : Model LEO 1530, LEO. Co. LTD)를 사용하여 관찰하였다.

2.3 고형화실험

2.3.1 압축강도 측정

본 연구에 사용된 시멘트 고화체의 제작을 위한 시편용 몰드로는 PVC관(Φ50㎜× H 100㎜ × t 5㎜)을 사용하였다. 고화체의 제작은 시멘트/물(cement/water)비를 0.55, 시멘트/모래(cement/sand)비를 2.45로 고정시킨 후 시멘트에 대한 소각재의 치환량을 달리하여 모르타르를 제작하였으며 실험과정은 Fig. 1에 나타내었다(한국콘크리트학회, 1999 ; 연익준 등, 1999 ; 위미경, 2001).

이와 같이 배합된 모르타르를 KS F 2403에 따라 PVC제 몰드의 1/3을 되게 채운 후 다짐막대로 30회 다지고 다시 1/3을 넣고 같은 방법으로 다진 다음 나머지를 채우고 나서 30회씩 다졌다. 제작된 공시체는 1~2day 경과 후 탈형하여 습식양생 방법으로 3, 7, 14, 28day 동안 양생시킨 다음 압축강도를 측정하였다(KS F 2403, 1990 ; KS F 2405, 2001).

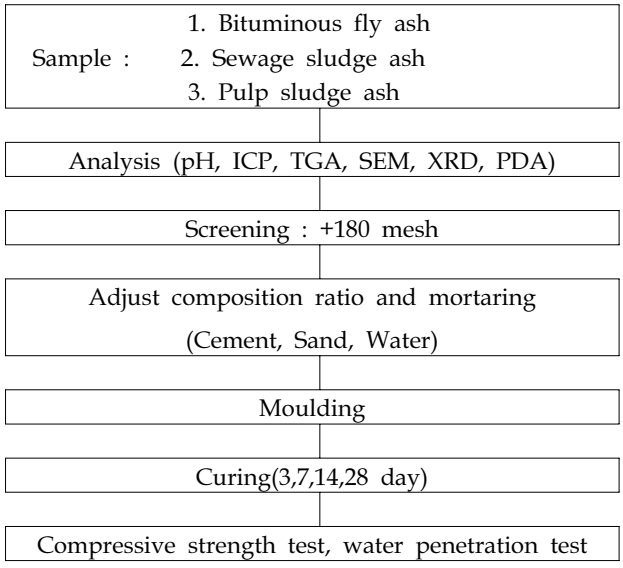


Fig. 1. Flowchart for experimental procedure.

2.3.2 기공률 측정

시멘트 고화체 시편의 기공률을 측정함으로써 시편내의 유해물질의 유출 정도와 외부로부터의 수분 침투정도를 알아보기 위하여 KS L 3114 규정에 따라 기공률을 측정하였다. 먼저 28d 동안 양생시킨 고화체를 85℃에서 24hr 동안 건조시켜 무게(W_1)를 측정한 후 끓는 물에 넣어 2hr 동안 끓인 다음, 상온이 될 때까지 방냉하고 고화체를 꺼내어 표면의 물기를 제거한 후 무게(W_2)를 측정하여 아래와 같은 식으로 겉보기 기공률(P_0)을 계산하였다(KS F 3114, 2000).

$$P_0\ (\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_2} \times 100$$

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지 소각재의 특성

3.1.1 pH 특성

폐기물 공정시험법상 고상폐기물 pH 시험방법에 따라 각 슬러지 소각재들의 pH를 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. 각각의 평균 pH는 DF의 경우 12.52, HF는 11.57, FA는 13.50, SF는 7.58로 나타났다. 일반적으로 소각재가 염기성을 나타내듯이 SF의 경우를 제외하고는 모두 강염기성임을 알 수 있었다. 그러나 SF의 경우 중성을 띰으로써 일반 소각재와는 다른 특성을 나타냈다.

Table 1. pH of incineration ashes

Sample / pH	DF	HF	SF	FA
No. 1	12.48	11.57	7.57	13.43
No. 2	12.56	11.53	7.48	13.56
No. 3	12.59	11.60	7.66	13.63
No. 4	12.35	11.62	7.68	13.50
No. 5	12.62	11.53	7.52	13.38
Average	12.52	11.57	7.58	13.50

3.1.2 화학분석

실험에 사용된 각 소각재들의 화학적 성분은 아래의 Table 2와 같다. FA를 제외한 소각재 모두 실리카(SiO_2) 성분이 33.59%로 KS에 규정된 포졸란 물질의 기준 45% 이상 보다 낮게 나타났고 포졸란 활성도를 나타내는 SiO_2와 Al_2O_3의 합 역시 FA를 제외하고는 모두 ASTM의 기준인 70%이상보다 13~25% 정도 낮음을 알 수 있다.

그러나 CaO가 포졸란 활성을 갖는 시멘트의 주요 성분임을 고려하여 포졸란 반응에 기여하는 성분을 SiO_2와 Al_2O_3 외에 CaO까지 포함 할 경우포졸란 활성도를 나타내는 SiO_2 + Al_2O_3 + CaO의 합은 SF를 제외하고 모두 69.83~79.2%로 ASTM기준치에 도달함을 알 수 있다. 또한 SF의 경우 DF 및 HF와는 다르게 Cr, Pb, As, Cu와 같은 중금속등이 함유되어 있음을 알 수 있었다.

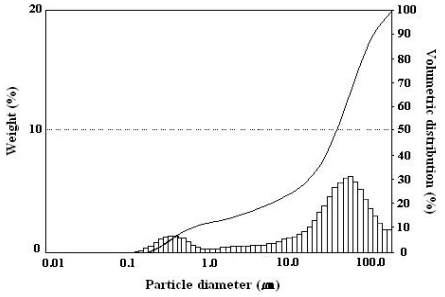
Table 2. Chemical compositions of incineration ashes

sample / component(wt%)	DF	HF	SF	FA
SiO_2	33.59	26.3	37.6	52.00
Fe_2O_3	1.34	1.43	7.58	4.29
MgO	12.77	8.29	2.49	0.90
Al_2O_3	17.38	19.46	20.03	23.81
TiO_2	1.15	0.78	0.82	-
CaO	27.00	24.07	5.46	3.22
K_2O	0.36	0.84	3.01	0.88
Na_2O	0.40	0.54	0.40	0.70
SO_3	-	-	-	0.16
Cr_2O_3	-	-	0.03	-
CuO	-	-	0.18	-
Pb	-	-	178	-
As	-	-	16	-

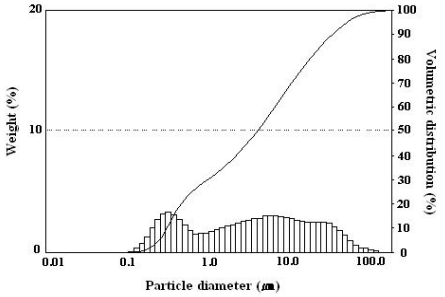
3.1.3 입도 분석

소각재 입자의 분포를 알아보기 위한 입도분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 제지슬러지 소각재인 DF와 HF의 경우 각각 입경분포는 0.20~40.30μ와 0.30~317.80μ였으며, 각각의 평균 입경은 5.03μ와 39.11μ였다. DF의 경우 대부분의 입자는 1~10μ 사이에 분포하고 있으며, HF의 경우 대체적으로 입자가 DF에 비해 큰 입경

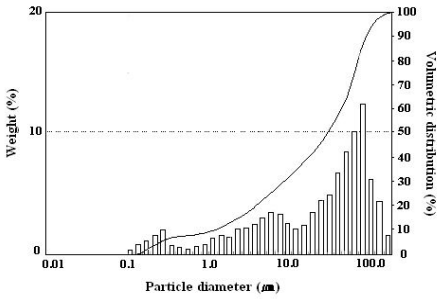
분포를 나타내고 있다. 하수슬러지 소각재인 SF의 경우 0.05~125.20μ로 평균입경은 28.11μ로 나타났다.



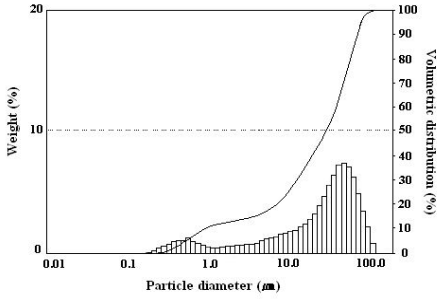
a)



b)



c)

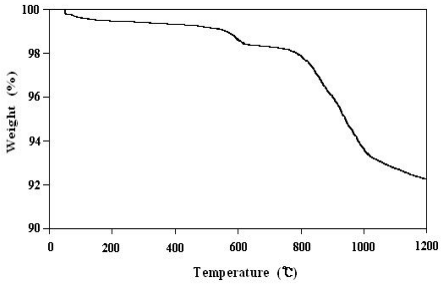


d)

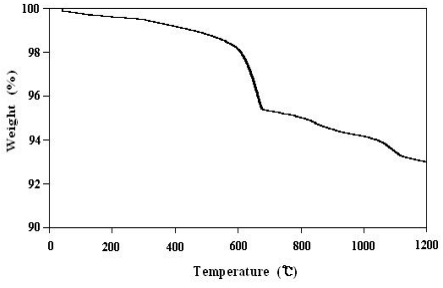
Fig. 2. Particle size distributions of incineration ashes a) DF b) HF c) SF d) FA.

3.1.4 TGA 분석

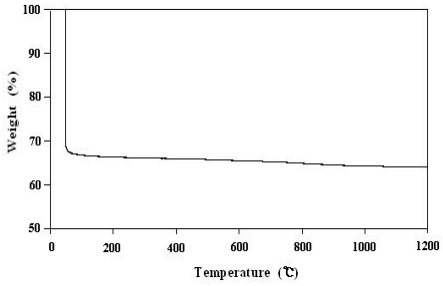
비산회의 열분해 특성을 조사하기 위하여 승온율을 6℃/min로 하여 상온에서 1200℃까지 TGA로 분석한 결과는 Fig 3에 나타내었다. 그 결과 슬러지 소각재의 열분해 반응은 DF의 경우, 600℃에서 약 4%정도의 무게 감량이 일어나는데, 슬러지 내의 결합수와 유기물이 빠져나오는 것이며, 800℃와 1100℃에서 작은 무게 감량이 일어나는데, 이것은 소각재 내에 잔류하는 수산화알루미늄과 같은 금속들이 고온에서 가스 상태로 휘발되고, 연소시 생성된 황화물의 분해로 인한 황성분의 방출과 미연탄소성분의 연소에 따른 강열감량의 결과임을 알 수 있다. HF는 550℃ 부근에서 2%와 800℃부근에서 6%정도의 무게 감량을 볼 수 있는데 550℃부근까지는 소각재내에 포함되어 있던 결합수와 유기물이, 800℃부근에서는 소각재내 잔류하는 분해온도가 낮은 수산화알루미늄과 같은 금속들이 고온에서 가스 상태로 휘발되기 때문이다. SF는 50℃부근에서 67%정도까지 무게감량이 일어나는 것을 볼 수 있다. 이것은 슬러지 내의 수분이 증발되는 것이며, 그 이후 무게 변화가 거의 일어나지 않음으로써 유기물의 소각 중 모두 연소되었음을 알 수 있다.



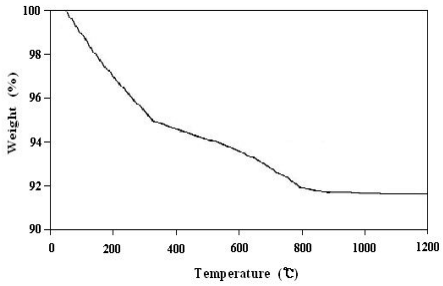
a)



b)



c)



d)

Fig. 3. TGA curves of incineration ashes
a) DF b) HF c) SF d) FA.

3.1.5 XRD 분석

각 소각재의 결정구조를 X선 회절분석기로 분석한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이때 회절각 2Θ는 fly ash의 10°~60°로 하였다.

소각재는 주로 Mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)와 Quartz (SiO_2)구조임을 알 수 있으며, 특히 다른 소각재의 경우와 비교하였을 때 정제된 FA의 경우, XRD회절 피크의 형태가 대단히 날카롭고 회절강도(Intensity)값이 대체로 큰 것으로 보아 결정 각이 잘 발달된 구조를 이루고 있음을 알 수 있다.

3.1.6 전자주사현미경 분석

각 소각재의 입자형태를 확인하기 위하여 전자주사현미경(SEM) 사진을 통하여 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 FA는 석탄의 연소에 의해 나타나는 전형적인 구형의 유리질 입자형태와 미세한 크기의 미연탄소분을 볼 수 있으나, 제지 및 하수 슬러지 소각재의 경우 FA의 경우와는 다르게 구형의 입자보다는 벌크형태가 불규칙한 모양으로 표면이 매우 거칠고 DF의 경우에는 FA와 같은 매끈한 구형 입자가 일부 나타남을 확인 할 수 있었다.

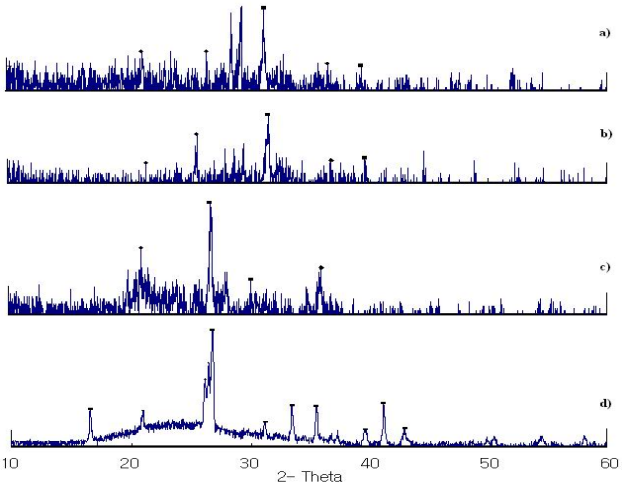
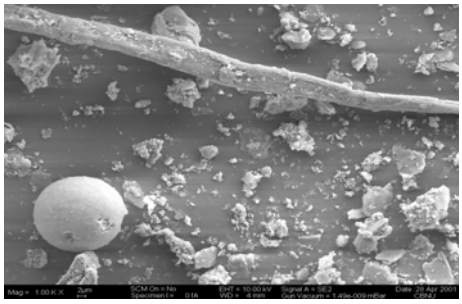
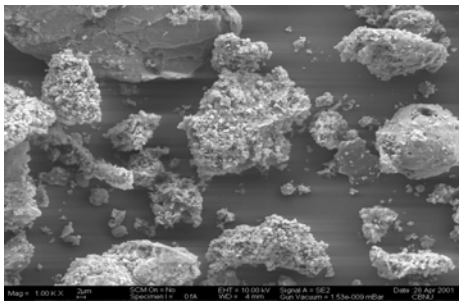


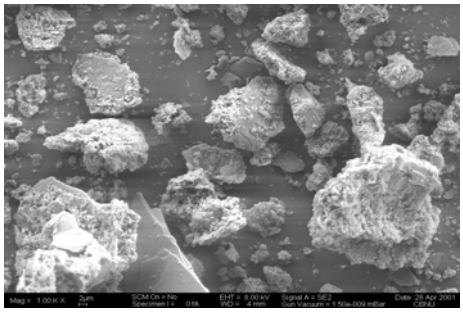
Fig. 4. X-ray diffraction patterns of incineration ashes
(■:Mullite, ●:Quartz, ◆:CaO)
a) DF b) HF c) SF d) FA.



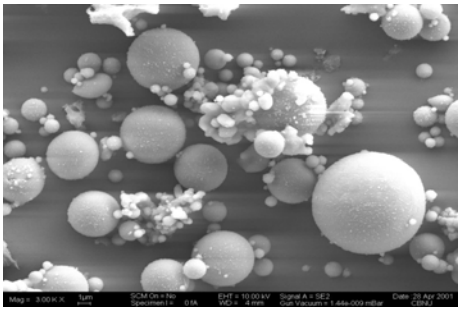
a)



b)



c)



d)

Fig. 5 SEM photographs of sludge incineration ash (105 X)

a) DF b) HF c) SF d) FA.

3.2 소각재의 포졸란 특성

폐기물로 발생하는 제지 및 하수슬러지 소각재의 포졸란 특성을 이용한 시멘트 혼화재로써의 활용성을 살펴보기 위하여 S/C(모래/시멘트)비를 2.45로, W/C(물/시멘트)비를 0.55로 고정시킨 후 소각재의 시멘트 치환량을 0~30%(wt)로 변화시키면서 실험하였다.

3.2.1 소각재의 함량에 따른 압축강도 특성

Fig. 6은 슬러지 소각재를 시멘트와 각각 0, 10, 20, 30%(wt)로 다르게 치환하여 시멘트 고화체를 제작 탈형 후 3, 7, 14, 28d 동안 각각 양생하여 압축강도를 측정한 결과이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 고화체 모두 양생일수가 길어짐에 따라 모두 강도가 증가함으로써 시멘트의 일반적인 특성을 나타내고 있으나 시멘트 치환량이 증가할수록 압축강도 값이 낮아지는 것을 알 수 있다.

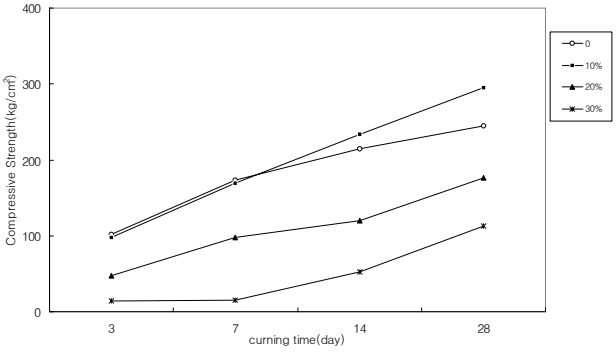
제지 슬러지 소각재인 DF와 HF, FA의 경우 모두 소각재 치환량이 10%이었을 때 시멘트 고화체의 강도가 최대가 됨을 알 수 있었고, 소각재를 넣지 않았을 경우에 비하여 각각 50, 7, 82kgf/㎠의 강도증진 효과가 나타남으로써 각각의 소각재가 포졸란 물질로서 시멘트 고화체의 압축강도를 높이는 효과적인 강도증진제용 혼화재로 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

이는 시멘트 일부를 소각재로 대체함으로서 소각재 중의 SiO_2와 Al_2O_3성분이 시멘트의 수화반응으로 생성된 $Ca(OH)_2$와 포졸란 반응에 의해 강도를 높이기 때문이며 비산회의 대체량이 20%보다 커지게 되면 시멘트의 양이 상대적으로 감소하여 수화반응에 의한 $Ca(OH)_2$의 생성이 적어짐에 따라 오히려 강도가 감소하기 때문으로 해석된다.

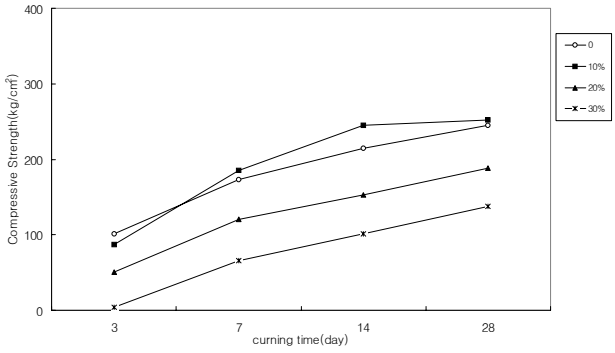
또한 소각재를 포함한 시멘트 고화체는 초기 양생에서 압축강도가 낮게 나타나는데 이는 시멘트의 수화반응에 의해 생성되는 $Ca(OH)_2$의 Ca_2^+와 소각재에서 용출된 SiO_2와 Al_2O_3가 반응하여 CSH(calcium silicate hydrate), $Ca(OH)_2$의 핵생성을 지연시키기 때문이며 양생기간이 경과함에 따라 강도가 증가하는 것은 CSH나 CAH(calcium aluminate hydrate)가 생성되기 때문이다.

그러나 하수 슬러지 소각재인 SF의 경우 소각재를 주입하지 않은 경우보다 소각재가 첨가됨에 따라 강도 값이 현저하게 떨어지는 것을 알 수 있으며 이는 제지 슬러지 소각재와 비산회의 SiO_2와 Al_2O_3 함량이 부족하기 때문에 포졸란 반응이 충분히 일어나지 못함에 따라 강도가 저하되는 것으로 판단된다.

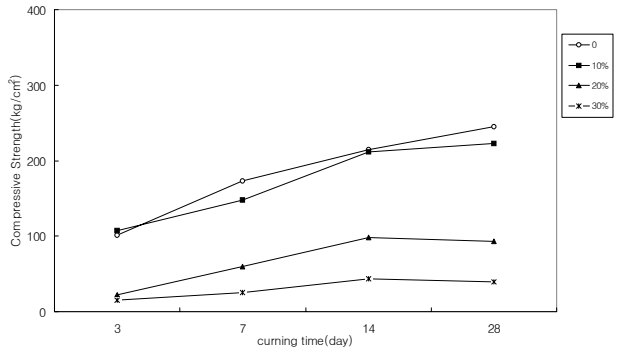
이상의 실험결과 SF를 제외하고 소각재 치환량이 10%일 경우에 압축강도 값이 높았으며 DF와 HF, FA 각각 28d 강도치가 295, 252, 327kgf/㎠이였고, SF의 경우 10%일 때 223kgf/㎠이였다. 소각재의 첨가로 모두 220 kgf/㎠ 이상의 강도를 나타냄으로써 우리나라 블록기준 210kgf/㎠을 상회함을 알 수 있다.



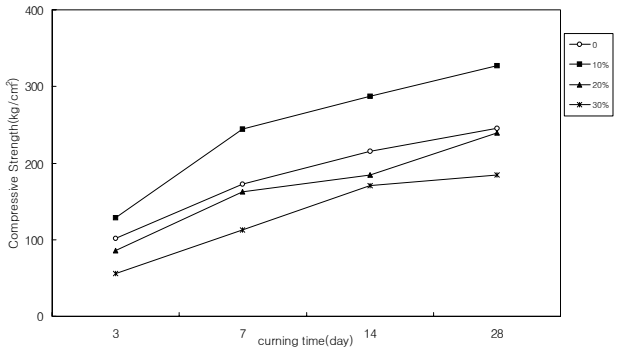
(1) DF



(2) HF



(3) SF



(4) FA

Fig. 6. The compressive strengths of cement mortar in terms of % substituted incineration ashes and curing time.

3.2.2 기공률

제지 및 하수슬러지 소각재를 사용하여 제작된 고화체의 안정성을 평가하기 위하여 기공률을 측정하였으며, 이는 고화체의 활용시 수분의 침투나 우수 등에 대한 고화체의 균열 및 용출정도를 평가하기 위하여 실험한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

KS L 3114에 의하여 측정한 기공률은 Fig.7에서 보듯이 대체적으로 소각재의 함량이 커질수록 기공률이 커지는 것을 볼 수 있다. DF와 FA의 경우, 0%일 때의 기공률이 소각재가 첨가되었을 때의 기공률과 비슷하거나 낮은 수치를 나타내고 있다. 특히, FA는 현저히 낮은 수치를 나타내고 있음을 알 수 있다. HF의 경우는 소각재의 함량이 10%일 때까지는 소각재를 주입하지 않았을 경우와 비슷한 수치를 나타내고 있지만 소각재의 함량이 클수록 상승하고 있으며 SF는 전 구간에 걸쳐 소각재를 주입하지 않았을 경우 보다 큰 폭으로 상승하고 있음을 볼 수 있다.

고화체의 기공률이 높을수록 고화체의 강도는 감소하며 안정성도 감소하므로, 기공률을 낮게 유지하는 것이 강도 증진에 효과적인 것으로 나타났다.

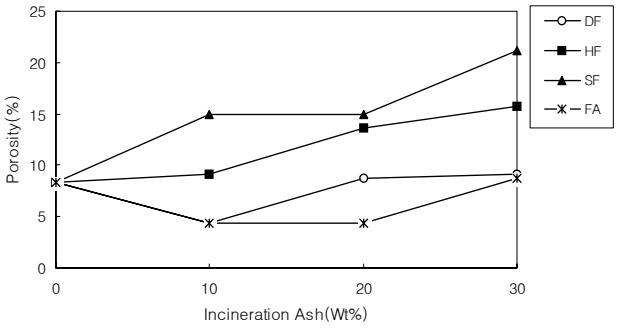


Fig. 7. The Water penetration of hardened cement mortar in terms of incineration ash content.

4. 결론

제지공장에서 발생하는 2종의 제지슬러지 소각재와 하수슬러지 소각재의 물리적인 특성과 자원화를 위한 시멘트 대체시 포졸란 반응 특성에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 제지 및 하수슬러지 소각재의 pH, 화학적 조성, 입도분석, 열중량분석, X-선 회절분석, 전자현미경분석 결과 하수슬러지 소각재를 제외하고는 모두 염기성이었고, 포졸란 반응물질인 SiO_2와 Al_2O_3의 함량은 45.8~51.0%이었으며, 소각재의 입도는 10~100μ으로 나타났다.
2. 소각재의 포졸란 반응 특성을 보기 위하여 시멘트 혼화재를 사용하여 압축강도 변화를 고찰한 결과 전체적으로 소각재 함량이 10%일 때 높은 강도 증진효과를 나타내었다. 이는 소각재의 Si와 Al 성분의 포졸란 반응에 의해 CSH와 CAH를 생성하는데 기여함으로서 강도가 증진되었기 때문이다.
3. 소각재의 압축강도 측정결과 28d 강도치가 DF, HF, SF의 경우 각각 295, 252, 223kgf/㎠으로 KS에 규정되어 있는 1종 벽돌 28d 강도기준인 210kgf/㎠ 이상으로 나타났으며 또한 14d 강도기준인 150kgf/㎠을 상회함으로써 시멘트의 혼화재로 사용가능성을 확인할 수 있었다.

4. 소각재를 이용하여 형성된 고화체의 수분 및 우수에 대한 안정성을 살펴보기 위하여 기공률을 측정한 결과 하수슬러지 소각재인 SF의 경우를 제외하고는 소각재 대체량이 10%일 때 기공률이 낮게 나타남으로써 제작한 시멘트 고화체의 안정성이 증가하였음을 알 수 있었다.

위의 결과 제지슬러지 소각재의 경우 포졸란 물질로서 시멘트 대체재로써 재활용 가능성이 충분하며 전량 매립에 의존하고 있는 하수슬러지 소각재의 경우 제지슬러지 소각재보다 전반적으로 낮은 강도와 기공률을 갖지만 앞으로 더 연구가 된다면 충분히 재활용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2003년 8월 29일)

참 고 문 헌

1. 정재춘 외 9인(1998) , 폐기물처리, 동화기술, pp. 583-591.
2. 한국제지공업협회(2001), 제지산업 폐기물 발생 및 처리현황 조사보고서. pp. 3-9.
3. H. M. Freeman(1989), Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, McGraw-Hill book Company, pp. 7.85~7.101.
4. 한국기계연구원(1997), 유해폐기물처리, 제1단계 1차년도 연차보고서, 환경부.
5. 이정전 외 3인(1997), 유해폐기물처리기술, 신광문화사, pp. 163-180.
6. 한국폐기물학회(1995), 폐기물처리기술과 재활용, 동화기술, p. 251.
7. 주소영(2001), 역청탄비산회를 이용한 유해슬러지 폐기물의 시멘트 고형화, 충북대학교. p. 251.
8. 이종길 외 3인(1997), 도시고형폐기물소각시설 비산재의 화학성분 및 열적감량 특성분석, 서울시립대.
9. 이승헌(1999), 보일러의 부하, 석탄의 종류 및 호파의 위치별로 채취한 플라이 애쉬의 특성 및 시멘트 혼합시의 수화열, 한국폐기물학회지 Vol 16, No2, pp. 124-132.
10. 환경부(1996), 폐기물 관리법.
11. M. D. LaGrega, P. L. Buckingham, and J. C. Evans(1994), Hazardous Waste Management, McGraw-Hill Book, pp. 258-704.
12. U.S. EPA(1993), Technical Resource Document, Solidification/Stabilization and its Application to Waste Materals, EPA/530/r-93/012, June.
13. 日本 厚生省生活衛生局(1995), 産業廢棄物 Handbook.
14. 임창덕(1991), 시멘트의 제조특성, 이용과 전망-시멘트 화학과 특성, 콘크리트학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 5-12.
15. KS L 5100(1996), 시멘트 강도 시험용 표준사.
16. 동화기술편집부 편(2002), 공정시험방법, 동화기술.
17. 연익준, 주소영, 김광렬 외(1999), 납슬러지 고형화 및 용출특성, 대한위생학회지, Vol. 14, No. 3, pp. 22-30.
18. 위미경 (2001), 시멘트 고화법을 이용한 피혁슬러지의 고형화시 무기 첨가제의 영향, 충북대학교.
19. 한국콘크리트학회(1999), 최신콘크리트공학, 한국콘크리트학회.
20. KS F 2403(1990), 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법.
21. KS F 2405(2001), 콘크리트의 압축 강도 시험방법.
22. KS L 3114(2000), 내화벽돌의 겉보기 기공률, 흡수율 및 비중 측정방법.