

시멘트 혼화재로서 제지슬러지 소각재의 재활용 특성

주소영 · 연익준* · 이민희* · 박준규* · 김광렬*
수원시상수도사업소 · 충주대학교 환경공학과

A Study on the Reusability of Incinerated Paper Mill Sludge Ash as Cement Additive

So-Young Ju · Ik-Jun Yeon* · Min-Hee Lee* · Jun-Kyu Park* · Kwang-Yul Kim*
Suwon City Waterworks
*Department of Environmental Engineering, Chungju National University**

Abstract

The purpose of this study is to examine the effect of stabilization disposal and recycling on incinerated paper mill sludge ash as cement additives.

It was investigated chemical(pH, ICP, TGA XRD) and physical(PDA, SEM) characteristics of the incineration ash. And the pozzolanic characteristics of incineration ash was applied to cement as additive to increase the compressive strength.

The results were that the pH characteristic of incineration ash was strong alkalinity, the content of silica and alumina as a pozzolanic material was 50.97%, and the average particle size was 5.03 μ m, respectively. When the ash contents as cement additive were varied in 0~15%(wt) of cement weight to explore the effect of the compressive strength on the solidified cement mortar, the proper amount of the incineration ash substituted was about 5~10%(wt).

Therefore we found that using the incineration ash as cement additive obtains the recycling of waste material, the stabilization disposal, the reduction of waste disposal expense, and the protection of environmental problem, too.

I. 서 론

제지공장에서 배출되고 있는 폐기물로는 제지공정후에 20~30%정도의 고형물을 함유하고 있는 탈수슬러지가 75%, 슬러지를 소각한 제지슬러지 소각재가 15%정도이며, 그 외 폐합성수지류와 폐유, 분진, 금속류 등이 배출되고 있다. 이중 탈수슬러지의 경우 직접 매립시 유기물의 부패로 인하여 토양의 오염을 크게 유발하므로 근래에는 이들을 소각한

후 소각재를 매립하는 추세로 나아가고 있다.

그러나 우리나라에는 소각로를 갖춘 제지공장이 아직 많지 않아 제지 슬러지의 폐기에 어려움을 겪고 있어 제지 슬러지를 재활용할 수 있다면 슬러지를 소각하는데 필요한 에너지를 절감할 수 있으며 재활용에 따르는 새로운 가치를 얻는 효과를 거둘 수 있게 된다. 그러나 현재까지 슬러지의 재활용 용도는 다양하나 그 규모나 생산성, 경제성 면에서 만족스럽지 못하며 사용실적도 부진한 실

정이다. 폐기물의 처리방법에 있어서는 자체소각이 2000년 60%정도였으며 이밖에 재활용 및 자체매립으로 처리하는 것으로 나타났다. 따라서 대부분의 제지슬러지는 소각처리되고 있으며 제지슬러지 소각재는 2000년 한해동안 약 394,000톤이 발생하였으며 매년 증가하는 추세이다¹⁾.

소각을 통하여 매립되는 폐기물의 양과 부피를 줄일 수 있으나 소각시 발생하는 재는 미연소물질과 금속등 불연성물질들의 함량이 높아 안정적 처리가 요구된다. 소각재는 크게 비산재와 바닥재로 구분되는데 재의 구성성분 여하에 따라서는 물리적 처리, 화학적 처리 또는 기타 처리방법에 의해 자원화될 수 있는 양면적인 특성을 지니고 있다. 따라서 폐기물의 소각공정에서 발생하는 소각재에 의한 환경 및 인체상의 **악영향**을 최소화하고 앞으로 보다 엄격해지는 **환경규제**에 적절하게 대처하기 위해서는 소각재의 안정적인 처분과 재활용에 관한 연구가 반드시 선행되어야 하며, 일부 시멘트의 첨가제로서 사용되거나 골재나 벽돌의 원료로써 재활용이 되기도 하지만 대부분은 매립되고 있는 실정이다^{2,3)}. 따라서 소각 후 발생한 소각재의 재활용 부분에 대한 연구를 지속적으로 추진함으로써 경제성 및 **환경문제를** 저감시켜야 될 것이다.

시멘트 모르타르나 **콘크리트**를 제조시 혼합도와 콘크리트의 물리, **화학적** 성질을 향상시키기 위하여 각종 첨가제들이 **사용되는데** 이들은 사용량을 기준으로 혼화제와 **혼화제로** 대별되고 있다. 혼화제는 그 자체의 용적이 **콘크리트**나 모르타르의 배합설계시 총량에 포함되지 **않는** 것으로 그 양이 시멘트의 1~3%(wt.) 정도로 **보통 AE**제, 유동화제, 감수제, 지연제 등이 있으며, **혼화제**의 경우 배합설계 총량에 포함되는 것으로 그 양이 5%(wt.) 이상이며 비산회, 규조토, **고로슬러지** 등이 사용된다^{4,5)}.

제지슬러지 소각재는 일반적으로 화력발전소에서 유연탄의 연소시 **발생되는** 비산회와 유사한 화학적인 조성을 갖고 있으며 시멘트 또는 알칼리와 반응하여 자경성 **수화물**을 형성하는 성질이 있다. 이러한 포졸란(pozzolan) 특성은 소각재의 성분으로 보통 SiO₂가 **함유되어** 있으며, 시멘트 성분중 Ca²⁺와 알칼리 성분 및 물과 반응하여 C-S-H (calcium silicate hydrate) 수화물

을 생성함으로써 수경성을 나타내게 된다⁶⁾.

이와 같은 특성을 이용하여 폐기물로 발생되는 제지슬러지 소각재의 효과적인 재활용을 도모함으로써 소각재의 안정적 처리와 자원화 효과를 동시에 얻을 수 있으며, 또한 소각재의 매립에 따른 처리비용의 절감과 환경오염을 방지하기 위한 목적으로 제지슬러지 소각재의 특성 분석과 시멘트모르타르 압축강도, 기공율, 흡수율, 응결특성 등의 실험을 통하여 제지슬러지 소각재를 시멘트 혼화재로서 재활용 여부를 검토하고자 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

실험에 사용된 제지슬러지 소각재는 D회사에서 제지공정중 발생한 슬러지의 소각로에서 연소과정 후에 배출되는 비산회와 바닥회가 혼합된 소각재 (DA : D사 incineration ash)를 사용하였으며⁷⁾, 소각재를 재활용하기 위한 물리적 특성 및 화학적 특성을 조사, 연구하였다.

소각재의 재활용 특성을 알아보기 위해 실시한 압축강도 실험에 사용한 시멘트는 국내 포틀랜드 시멘트(portland cement type I)⁸⁾를 사용하였으며 시멘트의 화학적 조성 성분은 ICP(Lab 8440, Labtam, Co.)로 분석하여 Table 1에 나타내었다. 시멘트 모르타르용 모래는 압축강도용 주문진 표준사 (KS L 5100)를 사용하였으며, 굵은 골재는 충북 청원소재 쇄석으로 지름 13mm 이하를 사용하였다. 체가름 시험은 KS F 2502⁹⁾, 비중 및 흡수 시험은 KS F 2503¹⁰⁾, 마모시험은 KS F 2508¹¹⁾ 규정에 의하여 실시하였으며, 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1. Chemical compositions of cement

Chemical composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	others
wt(%)	63.28	24.75	5.80	2.53	2.04	1.49	0.11

Table 2. The physical properties of gravel

Physical property	Gravity	Water absorption	Fineness modulus	Unit weight
Gravel	2.68	0.94 %	6.5 %	1,560 kg/m ³

2. 실험재료분석

제지 슬러지 소각재의 화학적 및 물리적 특성을 살펴보기 위하여 우선 소각재의 pH를 알아보기 위하여 폐기물공정시험방법에 따라 소각재 시료 10 g에 증류수 25mL를 가한 후 교반시켜 상등액을 분리한 후 pH를 수회 측정하였다^{1,2)}.

또한, 소각재의 화학적인 조성성분은 유도결합플라즈마(ICP : Lab 8440, Labtam, Co.)를 사용하여 분석하였으며, 소각재내의 미연분 및 열에 대한 안정성을 분석하기 위하여 열중량분석기(TGA : Dupon 2000)를 사용하여 분석하였다. 소각재의 결정구조는 X-선회절분석기(XRD : RTP 300RC, Rigaku Co.)를 사용하여 분석하였으며, 소각재의 물리적인 특성을 조사하기 위해 소각재의 입경분포는 입도분석기(Mastersizer, Model E, Malven Instrument Co.)를 사용하였고, 소각재의 형태와 상태는 전자주사현미경(SEM : Model LEO 1530, LEO. Co. LTD)를 사용하여 관찰하였다.

3. 시멘트시편의 제작 및 실험

시멘트시편의 제작을 위한 시편용 몰드는 비축수성이며, 시멘트의 화학적 반응에 안정한 PVC관(Φ50 mm × H 100 mm × t 5 mm)을 이용하여 제작하였으며 실험과정은 Fig. 1에 나타내었다.

우선, 시편 제작에 쓰인 제지슬러지 소각재는 110℃에서 24hr동안 건조시킨 후 180 mesh이상으로 크기를 체가름하였다. 시편의 제작은 시멘트를 기준으로 중량비로 시멘트/물/모래/자갈의 비율 1 : 0.59 : 2.15 : 3.41 로 배합하여 모르타르를 형성하였으며, 이때 소각재의 시멘트 치환량은 무게비로 0~15%로 하였다^{4,13)}. 이와 같이 배합된 모르타르는 KS F 2403¹⁴⁾에 따라 제작된 시편은 1~2d 경과후 탈형하여 습식 양생으로 3, 7, 28d 동안 양생시켜 각각 압축강도를 측정하였다.

시멘트시편의 압축강도는 양생기간별 만능재료 시험기(JI-101A, JEIL Precision, Ltd)를 사용하여

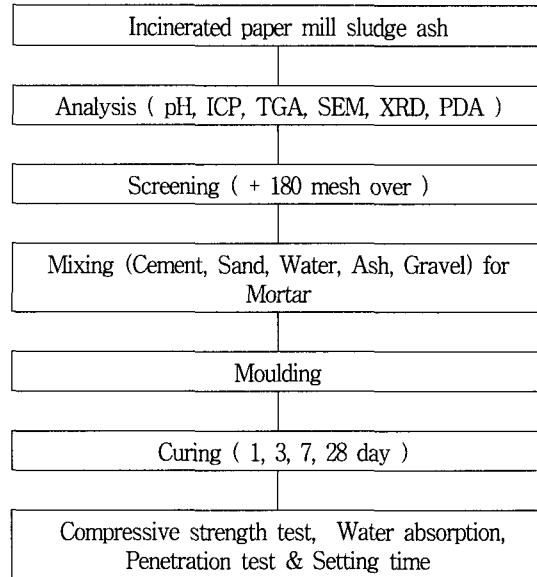


Fig. 1 Flowchart for experimental procedure.

KS F 2405¹⁵⁾에 따라 측정하였다.

시멘트시편의 안정성을 평가하기 위해 시멘트를 치환한 소각재중에 함유된 유해물질의 유출정도과 외부로부터 수분의 침투정도를 평가하기 위하여 KS L 3114¹⁶⁾ 규정에 따라 기공률과 KS L 5116¹⁷⁾에 따른 흡수율, KS L 5108¹⁸⁾에 의한 응결특성을 실험하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 물리, 화학적 특성

폐기물공정시험방법에 따라 측정된 소각재의 pH는 12.3~12.6 범위로 강알칼리성으로 나타났으나, 이는 일반적으로 건축 및 토목 분야에 일부 활용되고 있는 화력발전소 비산회의 pH가 약 13.5로 이보다는 낮게 나타났다. 소각재를 ICP로 화학분석 결과는 Table. 3과 같다.

화력발전소 비산회의 실리카(SiO₂) 성분이 약 5

Table. 3 Chemical compositions of Incinerated pulp sludge ash

Chemical composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	other	Ignition loss
wt(%)	27.00	33.59	17.38	1.34	12.77	0.40	0.36	1.15	0.88	5.13

0~60%, 알루미늄(Al_2O_3) 성분이 20~30%로 포졸란 활성 물질이 70%이상인 경우에 비하여 소각재의 화학적인 조성은 실리카 성분이 33.59%, 알루미늄이 17.38%로 포졸란 활성도를 나타내는 물질이 50.97%로 KS규정의 기준치 45% 이상을 상회하나 ASTM규정의 기준치 70% 이상에는 미달하였으나, 시멘트의 포졸란 반응에 기여하는 CaO 27%를 고려할 경우 총합은 77.97%로 ASTM 기준치를 충족시키는 것으로 생각할 수 있었다.

소각재의 열분해 특성을 조사하기 위하여 승온율 6°C/min으로 상온에서 1200°C까지 TGA(Thermal Gravimetric Analyzer)로 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 슬러지 소각재의 열분해 반응은 600°C 부근에서 약 4% 정도의 무게 감량이 일어나는데, 이는 슬러지 소각시 소각재입자의 내부공극과 증공내의 수분 등이 팽창하여 입자가 파열되면서 증발하거나 소각재 구성성분들 중 수화물의 결합수 등이 증발하기 때문이며 또한 미연소탄소분이 연소하기 때문인 것으로 해석되고 800°C와 1100°C에서는 비교적 무게 감량이 적게 일어나는데, 이것은 소각재의 구성성분들 중 화합물 등이 대부분 산화물로 전이되면서 황성분등과 같은 물질들이 분해되어 방출되는 강열감량의 결과이다.

Fig. 3은 슬러지 소각재의 결정구조를 X선 회절 분석기로 분석한 결과이며, 소각재의 결정구조는 Quartz(SiO_2)와 Mullite($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), CaO의 구조로 되어 있음을 알 수 있었다.

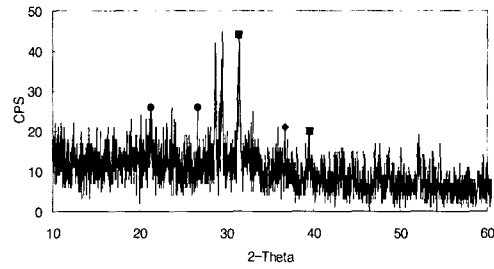


Fig. 3. XRD pattern of incinerated paper mill sludge ash.

(■ : Mullite ● : Quartz ◆ : CaO)

소각재의 물리적 특성으로 먼저 소각재 입자의 입경분포를 입도분석기로 분석한 결과는 Fig. 4에 나타내었다. 소각재의 입경은 0.20~240.30 μm 로 넓게 분포하고 있음을 알 수 있으나 5 μm 이하의 입자가 차지하는 무게비가 50%이고 대부분 입자들이 1~10 μm 사이에 분포하고 있음을 알 수 있다.

또한 슬러지 소각재의 입자형태와 상태를 확인하기 위하여 SEM(전자주사현미경)을 통하여 관찰한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 표면이 매끄러운 구형입자와 판상의 미세한 입자 등이 관찰되었으며, 구형입자의 형태는 일반적으로 유연탄 비산화와 동일한 모양으로 주로 silicate나 aluminate 등 무기물등이 소각시 고온에서 생성된 형태인 것으로 판단된다. 또한 미세한 판상의 형태는 제지슬러지 성분중 주로 폐합성수지류 조각의 소각으로 생성된 소각재들로 사료된다.

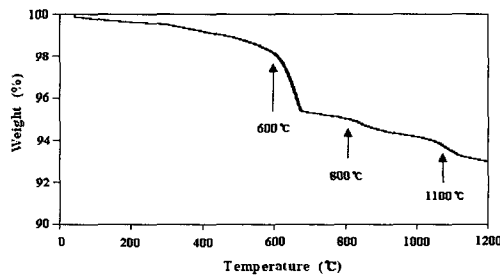


Fig. 2. TG curve of incinerated paper mill sludge ash.

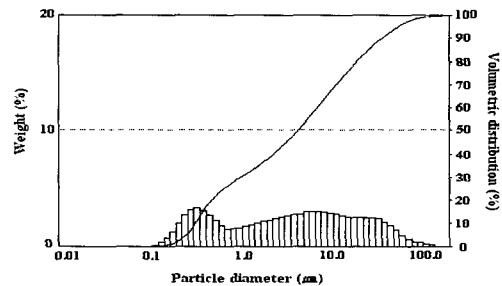


Fig. 4. Particle size distribution of incinerated paper mill sludge ash.



Fig. 5. SEM photograph of paper mill sludge ash (10⁵ X)

2. 시멘트 모르타르 강도에 대한 소각재의 영향

Fig. 6은 W/C(물/시멘트) 비를 0.48로 고정시킨 후 시멘트에 대한 소각재의 치환량을 0~15(wt.%)로 변화시켜 시멘트 모르타르 성형한 후 양생하여 각각의 압축강도를 3회 반복 실험하여 나타난 결과이다. 고화체 모두 양생일수가 길어짐에 따라 모두 압축강도가 증가함으로써 시멘트의 일반적인 특성을 나타내고 있으며, 소각재의 시멘트 대체량이 5%일때 시멘트 모르타르의 강도증진 효과가

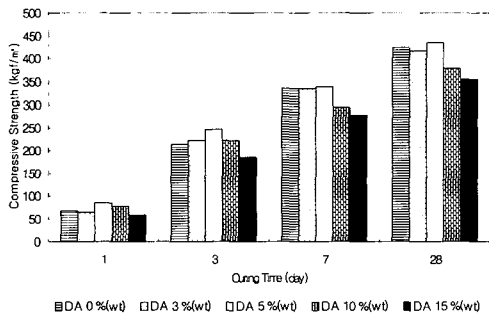


Fig. 6. The compressive strength of cement mortar according to the curing time and contents of incinerated paper mill sludge ash. (DA : sample ash - incineration ash of D company)

최대임을 알 수 있고, 소각재를 넣지 않았을 경우에 비하여 각각의 양생일수에 따라 18, 31, 3, 10 kg/cm²의 강도증진 효과를 나타냄으로써 제지슬러지 소각재가 시멘트 모르타르의 압축강도를 높이는 강도증진제용 혼화재로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과는 시멘트 일부를 소각재로 대체함으로써 소각재중의 SiO₂와 Al₂O₃ 성분이 시멘트의 수화반응으로 생성된 Ca(OH)₂와 포졸란 반응에 의해 강도를 높이기 때문이며 소각재의 대체량이 5% 보다 커지게 되면 시멘트의 양이 상대적으로 감소하며 수화반응에 의한 Ca(OH)₂의 생성이 적어짐에 따라 오히려 강도가 감소하기 때문으로 해석된다.

또한 소각재를 포함한 시멘트 모르타르는 양생 초기에 압축강도가 낮게 나타나는데 이는 시멘트의 수화반응에 의해 생성되는 Ca(OH)₂의 Ca²⁺와 소각재에서 용출된 SiO₂와 Al₂O₃가 반응하여 C-S-H(Calcium Silicate Hydrate), Ca(OH)₂의 핵생성을 지연시키기 때문이며 양생기간이 경과함에 따라 강도가 증가하는 것은 C-S-H나 C-A-H (calcium aluminate hydrate)의 생성량이 증가하기 때문이다^{19,20}.

시멘트 모르타르의 28d 압축강도가 416kg/cm²으로 KS에 규정되어 있는 1종 벽돌 28일 강도기준인 210kg/cm²의 약 2배가 됨으로서 시멘트의 강도증진용 혼화재로서의 재활용이 가능할 것으로 사료된다.

3. 시멘트 콘크리트 강도에 대한 소각재의 영향

시멘트/물/모래/굵은골재 비를 시멘트 중량 기준으로 1 : 0.59 : 2.15 : 3.41 로 하여 배합비를 고정시키고 제지슬러지 소각재를 0~15(wt.%)로 각각 시멘트와 치환하여 시멘트 콘크리트 시편을 제조한 후 3, 7, 28d 동안 각각 양생하여 압축강도를 측정하였다.

Fig. 7에 나타난 결과와 같이 콘크리트 모두 양생기간이 길어질수록 압축강도도 증가함을 알 수 있으나 시멘트에 대한 소각재의 치환량이 증가할수록

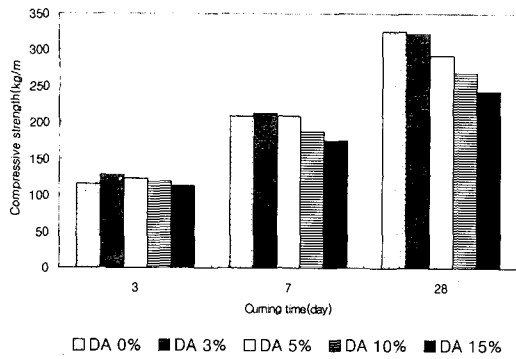


Fig. 7. The compressive strength of cement concrete according to the curing time and contents of incinerated paper mill sludge ash.

압축강도 값이 낮아지고 또한 양생기간이 길어짐에 따라 강도감소 효과가 나타남을 보이고 있다.

4. 기공률

시멘트 혼화제로 소각재를 사용할 경우 소각재 중에 포함된 중금속 성분들의 안정성과 시멘트 모르타르의 균열등을 평가하기 위한 것으로 제지슬러지 소각재로 시멘트의 양을 0~15(wt%)로 치환하여 제조한 시멘트 모르타르 시편의 기공률을 측정하였으며 실험 결과는 Fig. 8과 같다.

시멘트의 5~10%를 소각재로 치환한 경우에 기공률이 가장 낮은 수치를 나타내고 있다. 고화체의 기공률이 높을수록 고화체의 강도는 감소하며, 안

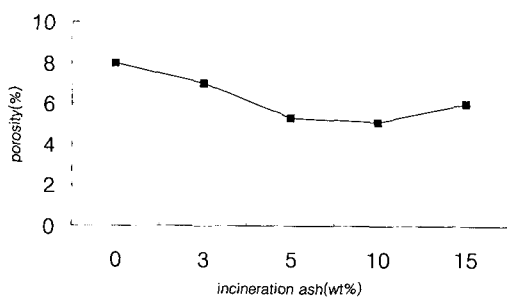


Fig. 8. The penetration of hardened specimens according to contents of incinerated paper mill sludge ash.

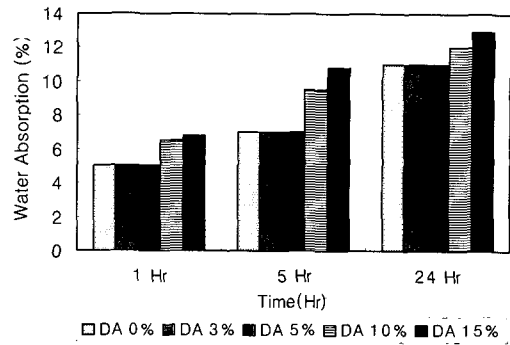


Fig. 9. The amount of absorbed water according to the paper mill sludge ash contents.

정도도 감소하므로 기공률을 낮게 유지하는 것이 효과적이다.

5. 흡수율

시멘트 모르타르의 흡수율 측정 결과는 Fig. 9와 같으며 물에 담근 시간이 길수록 흡수율이 증가함을 알 수 있고 소각재의 시멘트 치환량이 5%까지는 흡수율에 영향을 미치지 않으나 10%이상에서는 수분흡수율이 증가함을 알 수 있다, 이는 슬러지내의 미세 섬유 및 입자들이 흡수의 통로를 제공하여 물이 쉽게 흡수되기 때문인 것으로 판단된다.

6. 응결특성

콘크리트의 응결은 표면마감 및 탬핑(Tamping) 시기의 결정과 밀접한 관계가 있으며 통상 프록터(procter) 관입 시험에 따라 판정한다. 한편 콘크리트의 응결은 시멘트 품질뿐만 아니라 콘크리트의 배합, 골재 및 비빔수에 포함된 성분, 기상조건, 시공조건에 따라서도 영향을 받는다. 시멘트의 종류별로는 조강성 시멘트일수록 응결이 빠르고, 또한 동일 시멘트를 사용하여도 슬럼프가 작을수록, 물/시멘트비가 작을수록 빨라지는 경향이 있다.

골재 및 비빔수에 포함된 성분중 응결을 빠르게 하는 것은 바닷물과 염분 등이며, 응결을 느리게 만드는 것은 당류와 부식토 등에 포함된 유기물이 있다. 기상조건은 고온, 저습, 일사, 바람 등이 응

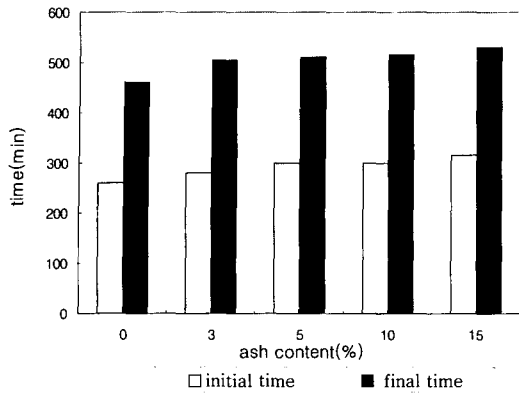


Fig. 10. The variation of setting time according to contents of incinerated paper mill sludge ash.

결을 빠르게 하고, 특히 온도의 고저에는 크게 영향을 받는다. 장시간 비빈 콘크리트는 비빔을 정지한 후에 급격하게 굳어져 이상응결에 가까운 현상을 나타내기도 한다.

제지슬러지 소각재의 시멘트 치환에 따른 응결 특성을 보면 Fig. 10의 결과와 같이 제지슬러지 소각재의 치환이 증가함에 따라 콘크리트의 초결, 종결시간이 다소 지연되는 경향을 보이며 소각재 치환량에 따라 초결시간은 20~55min, 종결시간은 45~70 min 정도까지 지연됨을 알 수 있다.

IV. 결 론

제지공장에서 발생하는 제지슬러지 소각재의 물리 화학적인 특성과 재활용을 위하여 실험한 결과는 다음과 같다.

1. 제지슬러지 소각재의 물리·화학적 분석결과 소각재의 pH는 12.3~12.6의 강알칼리성이었으며, 소각재내 포졸란 반응물질인 SiO₂와 Al₂O₃의 함량은 50.97%, 수화반응 물질인 CaO는 27%이었고, 소각재의 입도분석 결과 평균 입경이 5.03μm로 대부분의 입자는 1~10μm 사이에 고르게 분포하고 있었다.
2. 시멘트 혼화재로서 소각재의 활용가능성을 보기

위하여 시멘트의 일부를 소각재로 치환하여 시멘트 시편을 제조하고 압축강도를 실험한 결과 소각재 치환량이 5%일 때 강도증진 효과가 높게 나타났다. 이는 소각재의 Si와 Al성분의 포졸란 반응에 의해 C-S-H와 C-A-H의 생성으로 장기강도가 증진되었기 때문으로 해석된다.

3. 시멘트 모르타르의 28d 압축강도가 416 kg/cm²으로 KS에 규정되어 있는 1종 벽돌 28일 강도기준인 210 kg/cm²의 약 2배가 됨으로서 시멘트의 강도증진용 혼화재로 상업적인 재활용이 충분할 것으로 판단되나 콘크리트의 경우 강도저하로 인해 혼화재로서 사용이 적합치 않은 것으로 나타났다.
4. 혼화재로 소각재를 사용한 시멘트 모르타르의 기공률은 소각재 대체량이 5~10%(wt)일 때 기공률이 낮게 나타남으로써 시멘트 모르타르의 안정성이 증가하였으며, 또한 응결특성 실험결과 시멘트 치환량이 증가함에 따라 초결, 종결시간이 지연되는 경향을 나타내었다.

위의 실험 결과 제지슬러지 소각재 5~10%(wt.) 대체시 시멘트 첨가제로 활용이 가능하며 수화열 특성이나 수화물의 변화에 의해 내구성에 관한 연구가 좀 더 진행된다면 충분히 재활용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 한국제지공업연합회 : 제지산업 폐기물 발생 및 처리현황 조사보고서, pp.3-9, 2001.
2. 김환기, 박상숙 : 제지폐수 슬러지 소각회를 함유한 점토벽돌의 물리적 특성과 용출에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 12(2), pp.189-198, 1995.
3. 이상혁, 김수생 : 고품화를 이용한 소각재 재활용, 한국폐기물학회지, 18(6), pp.13-21, 2001
4. 한국콘크리트학회 : 콘크리트 혼화재료, 기문당, 1997.
5. 한국콘크리트학회 : 최신 콘크리트 공학, 기문당, 1999.

6. R. H. Bogue, The Chemistry of Portland Cement, pp. 708-711, Reinhold Publishing Co., New York., 1995.
7. 국립환경연구원 : 폐기물소각시설 소각재 시료 채취요령, 1999.
8. 임창덕 : 시멘트의 화학과 특성, 콘크리트학회 지, 3(1), pp.5-12, 1991.
9. KS F 2502 골재의 체가름 시험방법, 2002.
10. KS F 2503 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험방법, 2002.
11. KS F 2508 로스앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모시험방법, 2002.
12. 동화기술편집부 편 : 공정시험방법, 2002.
13. 주소영 : 역청탄 비산회를 이용한 유해슬러지 폐기물의 시멘트 고형화, 박사학위논문, 충북대학교, 2001.
14. KS F 2403 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작방법, 1990.
15. KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법, 2001.
16. KS F 3114 내화벽돌의 겉보기 기공률, 흡수율 및 비중 측정방법, 2000.
17. KS L 5116 석면 시멘트관, 2002.
18. KS L 5108 비카드침에 의한 수경성 시멘트의 응결시간 시험 방법, 2002.
19. Luvam, M. P., Sanchez, M. I. de Rojas, M.Frias : Investigation on the Fly-Calcium Hydroxide Reaction, Cem, & Concr, Res., 19, pp.69-80, 1989.
20. Weng. C. H. Huang, C. P., : Treatment of Metal Industrial Wastewater by Fly Ash and Cement Fixation, J, of Envir. Eng., 120(6), 1994.