

플라이 애시 및 제지슬러지 애시를 혼입한 도시 쓰레기 소각재 경화체의 강도적 특성

Strength Property of Municipal Waste Ash Hardening using Fly-Ash and Paper Sludge Ash

김 재신*
Kim, Jae-Shin

고 대형*
Ko, Dae-Houng

문 경주**
Mun, Gyoung-Ju

소 양섭***
Soh, Yang-Seob

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the compressive strength properties of municipal waste ash hardening using the unrefined fly-ash and paper sludge ash and to offer basic data to someone for recycling municipal waste ash. Unrefined fly-ash and paper sludge ash are used with admixture. MWA are tested that grading, specific gravity and pH value and observed microstructure of particle with SEM. The compressive strengths of MWA hardening which is mixed with regular ratio according to each admixture are measured. In the results of test, fly-ash is very effective for reducing content of cement by 50% in the recycling of MWA. But proper content mixed paper sludge ash is recommend by about 20% in binder.

1. 서론

1997년도에 발생한 폐기물을 처리 방법별로 보면, 생활폐기물은 소각 7.1%, 매립 63.9%, 재활용 29.0%로 아직까지도 많은 양을 매립처분에 의존하고 있으며, 이것은 각국의 선진국에 비해 매립처분 의존도가 지나치게 높음을 알 수 있다.¹⁾ 따라서 정부는 1996년 7월 수정 발표한 국가 폐기물관리 종합계획에서 2001년도 소각처리 목표율을 생활폐기물은 20%, 사업장 폐기물은 12%로 설정하고 있다.²⁾ 이렇듯 소각처리 비율을 크게 높이는 것은 신규 매립장 건립이 곤란한 반면 기존의 매립장내에 처리량이 한정되어 있기 때문이다. 따라서, 우리 나라의 폐기물 관리 정책을 고려하면, 일반폐기물에 대한 소각처리율은 점차 증가할 것이며, 그에 따라 소각재 또한 그 발생량이 증가하는 것은 당연한 일이다. 발생한 소각재중 바닥재는 일반폐기물로 고시되어 매립처리 되어 왔고, 비산재는 지정폐기물로 분류되어 처리되어 왔다. 하지만 국토가 협소한 우리나라의 사정상 매립지의 부족현상과 매립지의 설정시 인근 지역주민들에 의한 NIMBY현상으로 인하여 신규 폐기물 처리장의 건립이 어려운 실정에 있고, 또한 매립에 따른 경제적 손실, 정부의 정책적 방향에 의해서 다른 안전한 처리방법이 요구되고 있는 실정이다. 더구나 바닥재중에서 일부 중금속의 함유량이 기준치를 초과하여 매립처리 되지 못하고 야적

* 정회원, 전북대학교 건축공학과 석사과정

** 정회원, 전북대학교 건축공학과 박사과정

*** 전북대학교 건축·도시공학부 교수, 공박, 공업기술연구소

장에 방치되어 사회적인 문제를 발생시키는 등, 위와 같은 문제점을 지니고 있는 도시 쓰레기 소각재에 대한 일반적 특성을 분석하고 이를 플라이애시와 제지 슬러지 소각재를 이용하여 시멘트 경화체를 제조한 후 이에 대한 기초적 특성을 파악하여 소각재를 인공골재로서 재활용하기 위한 기초자료로 제공하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 사용재료

본 시험에서는 결합재로 KS L 5201에 규정된 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고, 결합재의 양을 저감시키기 위한 방안으로 보령산 비정제된 플라이 애시, 전주 P사의 제지 슬러지 소각재를 혼화 재료로 사용하였다. 이는 산업부산물 및 폐기물을 이용함으로써 경제성을 확보하고 원료의 전처리가 필요 없이 소각로에서 배출되는 것을 그대로 사용할 수 있기 때문이다. 소각재는 서울시 목동소각장에서 바닥재로 배출되는 것을 105℃에서 24시간 건조 후 5mm이하의 것을 사용하였다.

2.2. 시험방법

2.2.1 소각재의 분석

소각재의 일반적인 특성을 조사하기 위해 비중 및 입도, 함수율등은 KS규준에 의거하여 실시하였고, 소각재에 존재하는 각각의 원소에 대한 정성적인 분석은 에너지분산 분광법(EDS)으로, 소각재 성분 분석은 주사형 전자 현미경(SEM)을 이용하여 분석하였다.

2.2.2 MWA 경화체 제조

(1) 배합

배합은 아래의 Table1과 같이 소각재 100(중량배합)을 기준으로 바인더로써 시멘트만의 양을 일정 비율로 변화시킨 경우와 각 혼화재료 및 치환량에 따른 고회체의 압축강도 영향을 파악하고 혼화재료의 작용이 포졸란 반응과 같은 화학적 작용을 하는지 단순한 충전재로써 작용하는지를 검토하기 위하여 비정제 플라이애시 및 제지 슬러지 소각재를 내할법, 외할법을 적용하여 일정비율로 변화시키면서 치환하였다.

(2) 공시체의 제작

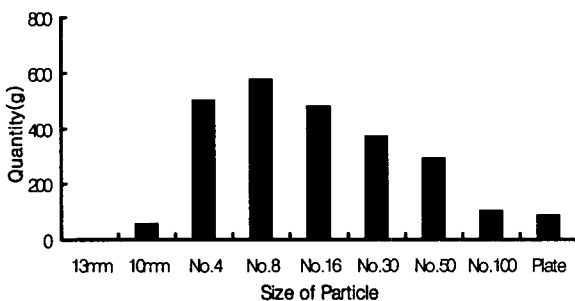


Figure 1. Analysis of grading on MWA

본 연구에서는 MWA 경화체의 강도 특성을 평가하기 위하여 소정의 비례로 원재료들이 충분히 혼합되도록 건비빔한 후, 물을 가하여 모르타르 믹서로 1분 30초 동안 습식혼합하여 압축강도 측정용 5cm×5cm×5cm인 몰드에 타설하였으며 이때 물고형분비는 목표플로우 160±10을 기준으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 소각재의 물리적 특성 및 화학 조성

소각재는 다양한 입자크기로 구성되어 있는데 Fig.1과 같이 No.4~No.30 사이의 시료가 79.59%로 대부분을 차지하므로, 이 입자크기를 가진 시료를 이용하여 잔골재의 비중시험 방법(KS F 2504)에 의거하여 비중을 체크한 결과 표건비중이 2.37로 나타났다. 또한 소각재 내에 잔존하는 중금속의 용출과 밀접한 관계를 가진 pH를 측정하였는데 10.76으로써 약 알칼리성을 띄고 있었다. 또한 본 실험에서는 건조된 소각재를 사용하였지만, 배출 상태의 소각재 내에는 15.44%의 수분을 함유하고 있으므로, 만약 배출상태의 소각재를 직접 사용한다면 이를 고려하여야 할 것이다.

Table 1. Mixing of cement hardening

Type	Bottom Ash(%)	Binder			Water (g)	W/B (%)	Flow (mm)	Compressive Strength (kgf/cm ²)			
		FA (%)	PSA (%)	Cement (%)				3days	7days	28days	
I	a	10	N/A	90	620	44.2	157	177	221	257	
	b	20		80	630	45	163	151	197	252	
	c	30		70	625	44.6	159	107	180	252	
	d	40		60	625	44.6	167	108	155	221	
	e	50		50	624	44.5	163	80	119	212	
	f	60		40	623	44.5	156	50	89	172	
	g	70		30	630	45.0	162	30	60	126	
II	a	20	100	630	37.5	171	167	212	270		
	b	40		740	37.8	164	153	208	273		
	c	60		735	42.5	166	152	197	290		
	d	80		690	38.5	169	106	148	242		
	e	100		700	37.3	161	103	157	255		
III	a	100	N/A	10	90	654.3	46.7	156	171	200	259
	b			20	80	715	51.0	159	144	193	245
	c			30	70	743	53.0	156	116	174	187
	d			40	60	829.3	59.2	166	81	134	187
	e			50	50	902	64.4	164	60	104	142
	f			60	40	952	68.0	161	53	102	128
	g			70	30	987	70.5	168	32	61	86
IV	a	100	100	20	795	47.3	154	162	195	240	
	b			40	914	46.6	153	157	203	241	
	c			60	899	52.0	158	121	167	232	
	d			80	930	52.8	166	100	158	216	
	e			100	1010	53.8	167	91	147	204	
V	a	N/A	N/A	100	860	43.0	156	184	235	285	
	b			75	775	51.7	158	154	195	246	
	c			66	735	55.6	155	142	188	234	
	d			50	670	62.0	154	98	142	174	

Table 2. Chemical components of MSW

Chemical Components	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	Ig. Loss
Municipal Waste Ash	11.50	9.34	7.70	36.69	2.10	1.27	7.47	23.93

표2는 목동 소각장에서 발생하는 도시 쓰레기 소각재의 구성성분으로, 주요성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃

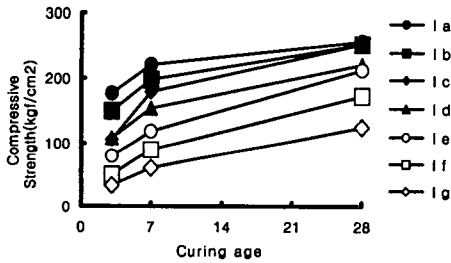


Photo1. SEM of municipal waste ash

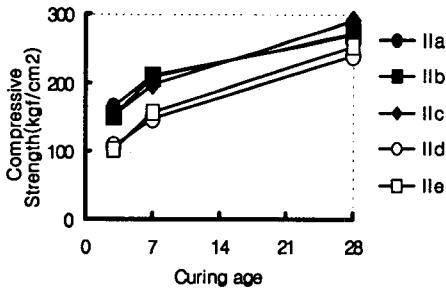
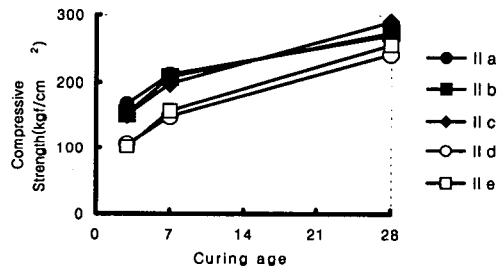
극형태 구조는 소각처리시 낮은 온도에서 발생하고, 미세 크리스탈의 형태는 바닥재의 가장 빈번한 형태로서 밝고 회색과 갈색으로 이루어진 매우 단단한 구조를 갖고 있다.³⁾ 하지만 이들은 반입되는 쓰레기 성상과 소각장의 소각온도에 따라서 다른 형태로 배출되고 있었다. 따라서 발생하는 도시 쓰레기 소각재의 특성은 소각온도와 반입되는 쓰레기의 성상에 의해 좌우됨을 알 수 있었다.

등으로 나타났는데 이는 소각온도와 시간, 반입되는 쓰레기 성상에 따라서 달라질 수 있다. 사진 1은 바닥재의 미세구조 특성을 분석하기 위한 SEM사진으로써 보는 바와 같이 일정한 형태를 지니지 않는 무정형으로 존재함을 알 수 있었지만, 좀더 미세한 분석에 의하면 바닥재는 유리상 형태, 공극형태, 미세 결정상 등 크게 3가지 형태로 발생이 되었다. 유리상 형태는 화산유리의 종류인 단단한 구조로 된 검은 암석과 같은 형태이다. 공

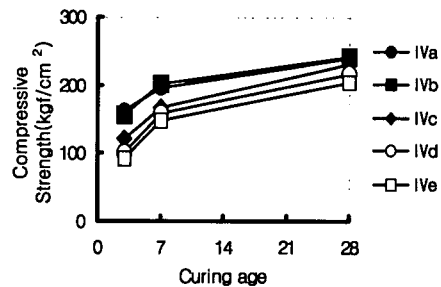
3. 2 MWA 고화체의 압축강도 특성



a) Compressive strength of MSW hardening appending unrefining fly-ash



b) Compressive strength of MSW hardening appending paper sludge ash



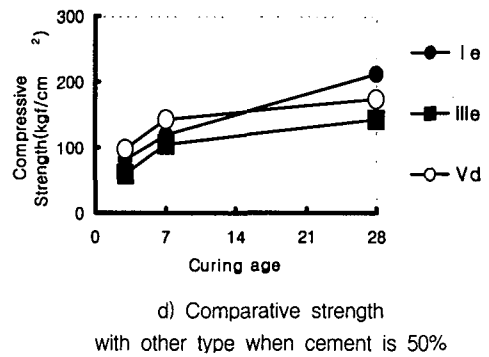
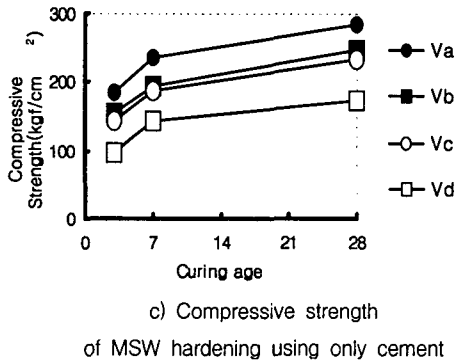


Fig 2. Compressive Strength of MSWA Hardening

소각재를 혼입한 고화체의 압축강도 특성을 각 Type별로 그림 2에 나타내었다. 혼화제로 제지슬러지 애시를 사용한 경우에는 재령 28일 강도가 86~259kgf/cm²을 나타내었고, 플라이 애시를 사용한 고화체는 126~290kgf/cm²으로 제지슬러지 애시 보다는 플라이 애시가 혼화제로써 더욱 효과적임을 알 수가 있었다. 하지만 그림 2의 a), b)에서 보는바와 같이 제지 슬러지 애시의 경우도 10, 20%혼입율에서는 플라이 애시와 동등한 강도를 발현하고 있고 30%이상의 혼입율에서는 플라이애시에 비하여 현격한 강도 저하가 나타난 것으로 보아 제지슬러지 애시의 혼입율은 10~20%가 적당할 것으로 사료되었다. 그림2의 a)에서 플라이 애시 10%와 70%혼입율을 비교하여 보면 재령3일에서의 강도는 70%에 비해 10%는 약 5.5배 높은 특성을 보이고 있으나, 재령 28일 강도에서는 약 2배 정도 높은 강도를 보이고 있다. 10%일때는 3일강도에 비해 28일강도가 약 45%정도의 압축강도가 증진되었으나, 70%일때는 281%의 압축강도가 증진됨을 확인할 수 있었다. 이는 시멘트의 수화반응에 의해 발생하는 수산화칼슘의 Ca²⁺ 이온과 플라이애시에서 용출되는 SiO₂나 Al₂O₃가 서서히 반응하여 양생시간이 지남에 따라 CSH나 CAH(calcium aluminate hydrate)의 생성양이 증가하여 점차 강도가 증진되는 것으로 해석되었다. 따라서 플라이애시의 다량 혼입은 장기강도면에서 매우 유리할 것으로 판단되었다.

그림2의 b)에서 강도증진이 가장 양호한 치환율은 시멘트량을 고려할때 제지 슬러지 애시 혼입율 40%일 때로 나타났지만, 전반적으로 플라이 애시를 혼입한 경우보다 강도 증진현상이 적은 이유는 I g의 45%의 몰비인더비 보다 상대적으로 높은 IIIg의 70.5%에서 보는바와 같이 제지 슬러지 애시의 성분중 Al₂O₃에 의한 물량의 증가로, 자유수의 증발에 따른 공극이 너무나 많기 때문인 것으로 사료되었다.⁴⁾ Fig. 2의 그림 c)에서는 시멘트만을 소각재의 결합재로 사용한 경우의 압축강도를 나타내었는데, 100%인 경우의 28일 압축강도는 285kgf/cm²을 나타내었고, 50%일때에는 174kgf/cm²으로써 비정제된 플라이애시를 혼입한 경우보다 낮아짐을 알 수가 있었다. 이는 소각재 내에 잔존하고 있을 수 있는 중금속의 수산화 침전물과 그 밖의 무기성 침전물 등이 시멘트 입자 표면에 부착되어 시멘트의 수화반응을 저해하기 때문인 것으로 사료되어 진다. 그림 d)는 시멘트 50%일 때 혼화재를 혼입한 경우와 비교하여 나타낸 그래프로써, 재령 3일 강도에서는 시멘트만을 사용했을 때 보다 강도가 낮은 경향을 보이고 있지만 재령 28일의 경우에는 플라이애시를 혼입한 경우가 단순히 시멘트만을 사용했을 때 보다 압축강도가 최소 21.8% 증진되었고, 제지 슬러지 소각재 경우는 18.6%낮음을 알 수가 있었다. 이와 같은 사실로부터 시멘트만을 50%사용했을 때에 폐기물 관리법의 기준에 미달되는 것을 보완하기

압축강도가 저하되는 것을 알 수 있었으나, 추후 도시 쓰레기 소각재를 이용하여 인공골재를 제조할 시에 20%내의 범위에서 사용한다면 인공골재의 품질에는 그렇게 커다란 영향을 미치지 않고 시멘트의 양을 줄이면서 골재의 성형을 도모할 수 있으리라 판단되었다.

4. 결 론

혼화제로써 비정제된 플라이 애시와 제지 슬러지 소각재를 사용한 소각재 고화체에 대한 압축강도 특성에 관한 연구 결론은 다음과 같다.

- 1) 소각재 입도분석 결과 No.4~No.30크기의 입자가 79.59%로써 대부분을 차지하고, 이들의 표준비중은 2.37이며 중금속의 용출과 밀접한 관련이 있는 pH는 10.76이고 함수율은 15.44%였다.
- 2) 소각재의 화학성분은 Al_2O_3 , CaO, SiO_2 가 주요성분이었으며, 미세구조는 대부분 유리상 형태, 공극 형태, 미세 결정상 형태를 취하였지만, 이는 소각장의 소각온도와 반입되는 쓰레기 성상에 의해 좌우됨을 예측할 수가 있었다.
- 3) 혼화제로써 비정제된 플라이 애시를 사용한 경우에 초기강도는 시멘트만을 혼입한 기준 경화체보다 낮았지만, 28일 재령에서는 시멘트만을 50%로 혼입한 경우 보다 최고 21.8%의 강도증진이 된 것으로 보아 혼화제로써 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- 4) 혼화제로써 제지 슬러지 애시를 사용한 경우에는 시멘트만을 혼입한 기준 고화체보다 강도가 낮았지만, 10~20%를 혼입할 시에는 플라이 애시를 혼입한 경우와 거의 동등한 강도가 발현된 것으로 보아 시멘트를 최대한으로 줄이기 위해서는 20%정도가 적정 혼입양임을 알 수 있었다.
- 5) 소각재를 인공골재로 재활용함에 있어, 시멘트의 양을 줄이기 위해서 적절한 혼화제의 첨가는 매우 효과일 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 서울특별시청소사업본부, 자원회수시설 취재수행 출장보고서, 1992.9
- 2) <http://www.or.kr/data/data5.html>
- 3) 이수구, 도시폐기물 소각재 처리 현황 및 관리방안, 소각재 적정처리 대책마련을 위한 공청회 자료집, 1999.9. 서울특별시의회 환경수자원위원회
- 4) 소양섭외 4인, “제지 슬러지 소각회의 시멘트 혼화재료로서의 이용 가능성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 발표논문집, 제11권 2호. 1999