

## 무기성 폐기물 첨가제 혼합에 따른 하수슬러지의 용융특성

배정석 · 이상원\* · 차재환 · 김효수 · 김창원†

부산대학교 환경공학과 · \*(주)엔바이론 소프트

(2008년 8월 8일 접수, 2008년 11월 3일 채택)

## Characteristics of Melting Slag Using Sewage Sludge by Inorganic Additives

Jungsuk Bae · Sangwon Lee\* · Jaehwan Cha · Hyosu Kim · Changwon Kim†

Department of Environmental Engineering, Pusan National University · \*Environsoft Co. Ltd.

**ABSTRACT** : The existing technology which is for recycling aggregate using dried swage sludge have been limited for practical application, because the properties of aggregate are not regular and don't meet the recycling aggregate standard. In this research, an innovative slag-producing technology is developed by addition of oyster shell, waste cast-sand and iron-rust as inorganic waste additives. The mixed slag with the additives was evaluated at the various ratio of CaO/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>. When the waste sludge was melted at 1,400°C during 20 minutes, the optimal ratio of CaO/SiO<sub>2</sub> for the slag added the oyster shell, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for added the waste cast-sand and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> for added the iron-rust were 1.00, 3.00 and 0.60, respectively. At the optimal condition, the bulk density of the slag was 2.24 g/cm<sup>3</sup>, 2.45 g/cm<sup>3</sup> and 2.73 g/cm<sup>3</sup>, And the 24 h water adsorption was 4.72%, 1.44% and 0.37%, respectively. Therefore it is proved that adding the waste additives to the process of the slag production contributed for elevation of recycling aggregate properties. And also it is expected that production cost can be reduced by decreased melting temperature.

**Key Words** : Sewage Sludge, Incineration, Melting, Additive, CaO/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>

**요약** : 기존의 하수슬러지 소각재를 용융하여 경량 골재로 재활용하는 기술은 물성이 일정하지 않으며, 또한 하수슬러지만 소각 용융한 경우에는 물성이 경량골재 기준을 만족하지 못해 사용이 제한적인 실정이다. 따라서 본 연구에서는 30%의 함수율을 가진 건조 하수슬러지를 대상으로 굴 폐각, 폐 주물사, 쇠의 녹과 같은 무기성 폐기물 첨가제를 이용해 CaO/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비를 조절하여 낮은 용융온도에서도 균일한 품질의 골재용 슬래그를 생산하고자 하였다. 1,400°C에서 20분간 용융하였을 때, 굴 폐각 첨가실험에서는 CaO/SiO<sub>2</sub> 비 1.00, 폐 주물사 첨가 실험에서는 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비 3.0 그리고 쇠의 녹 첨가 실험에서는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비 0.6에서 밀도가 각각 2.24 g/cm<sup>3</sup>, 2.45 g/cm<sup>3</sup>, 2.73 g/cm<sup>3</sup>였으며, 24시간 수 흡수성은 각각 4.72%, 1.44%, 0.37%로 가장 우수한 슬래그 생산이 가능한 것으로 판단되었다. 폐기물 첨가제를 첨가한 용융슬래그를 생산함으로써 자원순환 및 환경오염 방지 효과가 기대된다.

**주제어** : 하수슬러지, 소각, 용융, CaO/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, 첨가제

### 1. 서론

하수슬러지의 양은 지속적으로 증가하여 2006년 말 기준 전국에서 가동 중인 328개소의 하수처리장에서 1일 평균 7,446톤의 하수슬러지가 발생하고 있고, 하수종말처리시설 신·증설 등으로 2008년에는 1일 약 8,415톤이 발생할 것으로 예측되며, 2011년에는 473개소의 하수처리장에서 1일 약 9,554톤에 하수슬러지를 발생할 것으로 전망된다.<sup>1)</sup> 실제로 97년 7월 19일 폐기물관리법시행규칙(6조 1항)이 개정됨에 따라 2001년부터 하수종말처리시설과 1종 폐수배출업소의 유기성 슬러지의 직접 매립이 금지되고, 소각·퇴비화 후 잔재물만 매립이 가능하며 2005년부터는 분뇨처리시설, 축산폐수처리시설, 2종 폐수 배출업소의 유기성 슬

러지의 직매립이 전면 금지됨에 따라 유기성 슬러지의 적정처리방안 마련이 시급한 실정이다. 현재(2006년 기준) 국내에서 하수슬러지 처리는 주로 해양투기(71.3%)에 의존하고 있으며, 소각은 12.58% 정도를 차지하고 있다. 런던협약 '96의정서 발효와 함께 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출기준을 대폭 강화(해양오염방지법 시행규칙 개정(06.2.21)함으로써 2011년 2월부터 해양배출이 전면 금지된다.<sup>1,2)</sup> 국내의 하수 및 폐수처리장에서 발생하는 많은 양의 슬러지는 대부분이 재활용되지 못하고 매립지나 해양으로 버려지고 있는 실정이다. 최근에 소각과 용융에 대한 관심이 높아지면서 일부 지자체에서 소각 및 소각 후 그 발생하는 재를 다시 용융하여 경량골재 및 복토제로 사용하고 있거나 계획 중에 있다. 하지만, 하수슬러지 처리의 대안인 소각 및 용융에 의한 처리방법은 소각시 발열량의 확보가 어렵고 높은 용융온도를 요구하기 때문에 보조연료의 소모가 큰 문제점으로 남아있고 대기오염 및 막대한

† Corresponding author

E-mail: cwkim@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2416

Fax: 051-515-5347

시설투자에 따른 재원확보의 문제가 있다. 또한 소각장 설치는 인근 주민들의 심한 반대로 곧바로 시행하기 어려운 실정이다. 특히 재자원화가 가능한 유기성 슬러지를 경유 같은 보조연료까지 사용해 가면서 소각시켜 처리하는 것은 비경제적이며 환경 친화적이지 못한 방법이다. 현재 생산되고 있는 슬러지를 이용한 경량골재는 그 물성이 일정하지 못하고 골재 기준을 만족하지 못하여 복토재 및 저급 골재로 이용되고 있는 실정이다. 더구나 지구온난화 및 온실가스 감축이 전 지구적인 관심으로 대두된 지금 대규모 소각장 건설에 따른 연소가스 발생은 또 다른 문제를 야기할 수 있다.<sup>3)</sup> 따라서 본 연구에서는 약 30%의 함수율을 가지는 건조슬러지에 굴 폐각, 폐 주물사, 쇠늑과 같은 무기성 폐기물을 혼합함으로써 슬래그 용융온도를 낮추고 밀도, 수 흡수성의 향상을 위한 최적의 혼합비를 도출함으로써 기존 슬러지 재를 이용한 용융슬래그 생산의 애로사항을 해결하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

#### 2.1.1. 정수 슬러지 및 하수 슬러지 선정과 용융슬래그의 제조

부산의 J하수 처리장, S하수 처리장과 울산 H정수 처리장 건조 슬러지에 대한 분석을 수행하였다. 또한 본 연구에서 분석된 자료를 기존문헌자료와 비교하였다.

건조슬러지의 용융특성을 평가하기 위한 슬러지 용융과정을 Fig. 1에 예시하였다. 탈수공정을 거친 함수율 80% 정도의 슬러지를 공기건조 시스템을 거쳐 최종적으로 약 30~40%의 함수율을 가진 슬러지를 사용하였으며, 건조된 슬러지는 실험실용 분쇄기를 이용하여 분쇄한 후 다시 100 mesh 이하의 입자를 선별하였다. 이 건조 슬러지에 첨가제를 첨

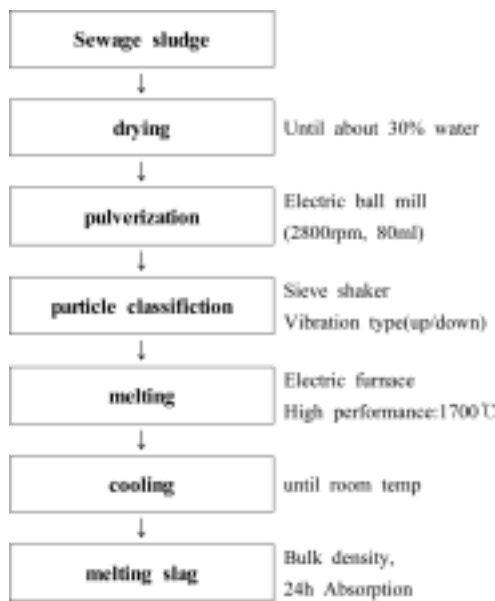


Fig 1. Flow chart of melting-slag experimentation.

가하여 1,400℃에서 20분간 용융하여 용융특성을 평가하였다.

#### 2.1.2. 무기성 폐기물 첨가제 선정

용융온도 및 용융 슬래그 특성에 영향을 크게 미치는 인자는 CaO/SiO<sub>2</sub>와 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비인 것으로 보고되고 있으며,<sup>5-7)</sup> 또한 슬러지 내에 가장 많이 함유된 성분 중의 하나인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 합금과정에서 용융 온도를 낮추는데 사용되기 때문에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비에 대하여 본 연구를 통해 살펴해보았다. 또한 이러한 첨가제를 폐자원을 활용함으로써 폐자원과 폐자원의 적절한 조화를 통해 새로운 자원의 생산이 가능한지 파악해보았다.

첨가제를 선정하기 위해 기존 문헌을 통해 슬러지 용융 특성에 영향을 미치는 인자와 용융 슬래그 강도 및 특성에 영향을 미치는 인자들을 검토하였다.<sup>6,7)</sup> 용융에 가장 영향을 미치는 성분들에 대한 검토를 통해 성분비 조절에 따라서 용융온도 및 용융 슬래그 특성에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었고 가장 영향을 미치는 성분들이 많이 함유된 폐기물들로 굴 폐각, 폐 주물사, 쇠의 늑을 선정하여 첨가제로 사용하였다.

### 2.2. 실험방법

#### 2.2.1. 슬러지 및 첨가제 성분분석

시험재료의 성분분석은 bead 정량분석법으로 XRF (X-Ray Fluorescence)분석을 시행하였다. 건조 슬러지 시료는 28시간 건조 후, 950℃에서 1시간 동안 열처리한 후 bead를 제작하여 분석을 수행하였다.

#### 2.2.2. 슬러지 용융조건 도출

무기성 폐기물 첨가제의 첨가 용융특성을 평가하기에 앞서 용융조건을 도출하기 위한 시험을 수행하였다. 부산 S하수처리장의 건조 하수슬러지를 이용하여 1,000℃부터 1,500℃까지 용융온도를 변화시키면서 용융시간을 5분에서 30분간 변화시켜 슬래그를 용융 후 방냉 생성하였다. 이때 최초로 슬래그의 용융이 진행되는 시점은 1,400℃에서 20분간 용융하였을 때였다. 따라서 이를 바탕으로 굴 폐각, 폐 주물사, 쇠의 늑의 첨가 실험이 진행되었다.

#### 2.2.3. 무기성 폐기물 첨가제 혼합

본 연구에서는 굴 폐각, 폐 주물사, 쇠의 늑을 첨가제로 사용하였으며, CaO 성분이 50% 이상 함유되어 있는 굴 폐각을 사용하여 CaO/SiO<sub>2</sub>비를 0.16에서부터 1.25까지 첨가 조절하였다. 굴 폐각에 붙어있는 유기물과 토사에 의한 영향을 줄이기 위하여 세척 후 건조하였으며, 또한 물리적 영향을 줄이기 위하여 파·분쇄한 후 100 mesh 이하의 입자를 사용하였다.

SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비를 2.5에서부터 5.0까지 조절하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 성분이 70% 이상인 폐 주물사를 사용하였다. 주조과정에 발생한 덩어리를 물리적 영향을 최소화하기 위하여 분쇄과

정을 거친 후 100 mesh 이하의 입자를 선별 사용하였다.  $Fe_2O_3/SiO_2$  혼합비를 조절하기 위하여  $Fe_2O_3$  함량이 67% 이상인 D제강의 쇠의 녹을 사용하였으며, 첨가 비율은 0.2에서부터 1.5까지 조절하였다. 생성된 슬래그는 KSF2503 시험방법에 따라 시험을 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 대상슬러지의 특성

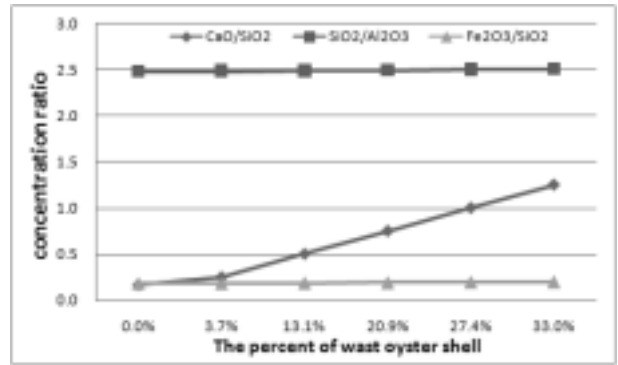
기존 자료와 금회분석을 통한 건조 슬러지의 성분은 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 건조 슬러지 성분 중 가장 많이 함유된 성분은  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ , CaO였으며, 그 중에서 가장 많은 분율을 차지하는 성분은  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 였다. 하수 슬러지와 정수 슬러지의 경우에는  $SiO_2$  및  $Al_2O_3$  분율이 정수 슬러지가 높은 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 반면 하수 슬러지의 경우 CaO 분율이 정수 슬러지에 비해 높게 나타남을 확인할 수 있다. 정수 슬러지의 경우에는  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$  함량비가 많이 변화하는 것을 확인할 수 있고 이는 계절적인 영향인 것으로 판단된다. 정수장의 경우 봄철에 토사유입에 의해 슬러지 내에 모래의 주성분인  $SiO_2$  함량이 높아지는 현상을 나타내기 때문에 기존자료와 측정 자료간의 편차가 크게 발생하는 것으로 사료된다. 또한  $Al_2O_3$ 의 경우 알루미늄이 응집제로 사용되기 때문에 응집제 종류에 따라 그 성분 함량이 크게 달라질 수 있다.

기존 자료와 분석을 통해 건조 하수 슬러지의 성분변화에 비해 정수 슬러지의 성분변화가 큰 것을 확인할 수 있고 이는 하수 처리장에 유입되는 하수의 변화보다는 정수 처리장에 유입되는 유입수의 변화가 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발하고자 하는 최종 산물인 용융 슬래그의 품질 관리를 위해서는 유입되는 건조 슬러지의 성분의 변화가 적은 것이 더 유리하기 때문에 정수 슬러지의 경우에는 그 적용성이 떨어지는 것으로 판단된다. 따라서 정수슬러지를 배제한 하수슬러지를 대상으로 하여 용융실험을 진행하였다.

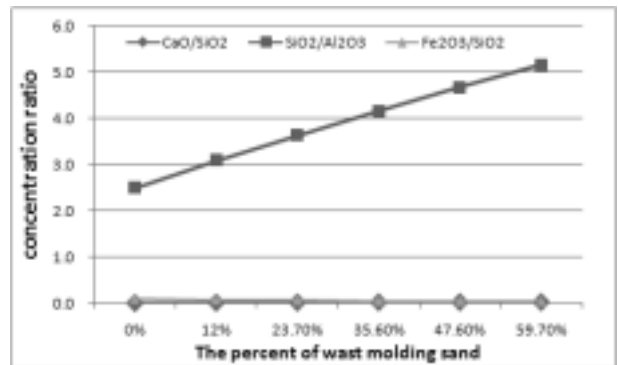
#### 3.2. 첨가제에 따른 $CaO/SiO_2$ , $SiO_2/Al_2O_3$ , $Fe_2O_3/SiO_2$ 비의 변화

**Table 1.** XRF result of dried sludge (unit: %)

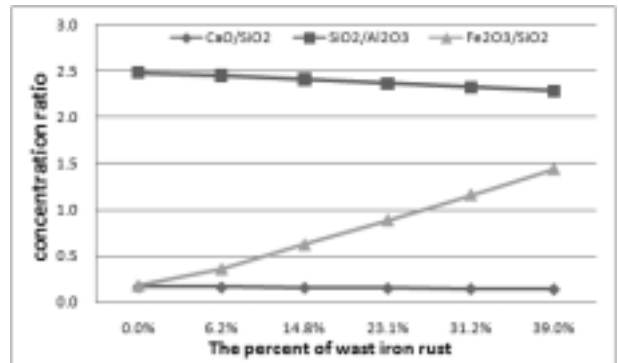
		$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	Others
Water Treatment Plant	A	42.25	25.97	4.76	0.76	26.26
	B	40.04	25.47	4.33	0.63	29.53
	C	39.88	25.84	4.44	0.62	29.22
	D	31.2	27.36	3.09	0.36	37.99
	E	22.851	9.198	4.193	3.749	60.01
Sewage Treatment Plant	F	22.42	10.16	4.64	4.01	58.77
	G	19.892	7.957	2.832	4.717	64.60
	H	26.159	6.082	3.169	5.022	59.57



**Fig. 2.** The character of changing ratio as  $CaO/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3/SiO_2$  by oyster shell addition.



**Fig. 3.** The character of changing ratio as  $CaO/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3/SiO_2$  by waste casting sand addition.



**Fig. 4.** The character of changing ratio as  $CaO/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3/SiO_2$  by iron rust addition.

무기성 폐기물 첨가제 첨가에 따른  $CaO/SiO_2$ ,  $SiO_2/Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3/SiO_2$  비 변화는 Fig. 2~4와 같이 나타났다. 굴 폐각의 첨가에 의하여  $CaO/SiO_2$  비만이 0.2에서 2.25로 크게 증가하였으며, 폐주물사의 첨가로  $CaO/SiO_2$  및  $Fe_2O_3/SiO_2$  비는 거의 변화가 없는 반면  $SiO_2/Al_2O_3$  비가 첨가제 주입이 없을 때의 2.25에서 5.0으로 크게 증가하였다. 또한 쇠의 녹 첨가에서도  $SiO_2/Al_2O_3$  비가 2.5에서 2.25로 약간 감소하였으나  $Fe_2O_3/SiO_2$  비는 0.15에서 1.45로 크게 증가하였다.

폐기물 첨가제는 순수물질의 첨가처럼 단순히 한 가지 성분만 함유된 것이 아니라 여러 성분들의 복합체이기 때

**Table 2.** XRF result of waste additives (unit: %)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MnO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	LOI
Oyster shell	0.80	0.16	0.97	52.03	0.12	0.58	0.14	0.49	0.26	0.10	43.8
Waste casting_sand	64.49	9.74	2.70	1.99	0.04	1.49	1.09	1.30	0.09	0.33	16.5
Iron rust	15.88	8.18	67.66	1.27	0.70	2.56	0.16	2.63	0.30	0.29	0.37

문에 원하지 않는 성분비에도 영향을 미치기는 하나 Table 2에서 보는 것처럼 폐기물 첨가제의 주성분 이외의 대부분의 성분비율이 매우 낮게 존재하여 폐기물 첨가에 의하여 목적 성분비 변화 이외에는 성분비가 크게 변하지 않음을 알 수 있다.

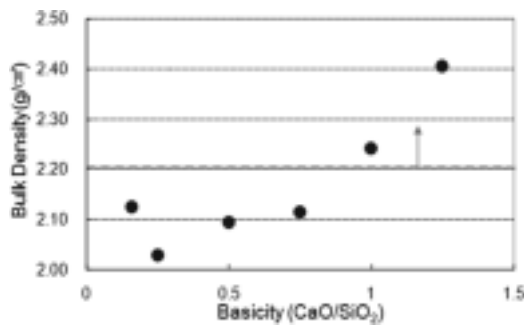
3.3. 첨가제 첨가에 따른 하수 슬러지 용융특성

3.3.1. 굴 폐각 첨가에 따른 하수 슬러지 용융특성

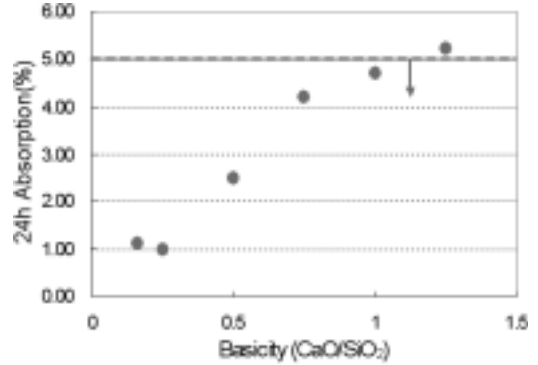
CaO/SiO<sub>2</sub>비 조절을 위하여 굴 폐각을 첨가하였으며 혼합이 없을 때의 0.16부터 1.25로 조절하여 용융온도 1,400℃에서 20분간 용융하였다. 용융된 슬래그는 실온까지 방냉하였다. 굴 폐각의 첨가량은 Table 3에서 나타낸 것과 같다. 굴 폐각 첨가가 용융슬래그에 미치는 영향을 알아본 실험결과는 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 나타났으며, 염기도가 증가함에 따라 용융슬래그 색깔이 검은색에서 노란색으로 변화하였다. 또한 염기도가 증가할수록 용융슬래그 표면의 기포 자국이 세밀해지는 현상도 나타났다. 밀도의 경우 굴 폐각의 혼합이 증가할수록 증가하였으나 1.00 이상에서는 증가폭이 현저하게 줄어들었다. 24시간 수 흡수성의 경우는 표면의 기포가 조밀하게 생김으로서 수 흡수성은 증가하였다. 굴 폐각 혼합에 따른 염기도 증가는 용융슬래그

**Table 3.** Mixing ratio of sewage sludge with oyster shell

CaO/SiO <sub>2</sub>	Unit (g)			Oyster shell (%)
	Oyster shell	Sludge	Sum	
0.16	-	15.000	15.0	-
0.25	0.554	14.446		3.7
0.50	1.962	13.038		13.1
0.75	3.128	11.872		20.9
1.00	4.110	10.890		27.4
1.25	4.947	10.053		33.0



**Fig. 5.** The character of bulk density by ratio of oyster shell addition.



**Fig. 6.** The character of 24 h absorption by ratio of oyster shell addition.

의 특성에 영향을 미치며, 밀도와 수 흡수성을 만족하는 CaO/SiO<sub>2</sub> 비는 1.00인 것으로 판단되었다. 이때의 밀도는 2.24 g/cm<sup>3</sup>이었으며, 24시간 수 흡수성은 4.72%였다. 이는 기존의 순수 물질 첨가를 통한 염기도 변화 실험과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.<sup>5,6)</sup>

3.3.2. 폐 주물사 첨가에 따른 하수 슬러지 용융특성

SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비를 조절하기 위하여 SiO<sub>2</sub> 성분비가 63% 이상인 폐 주물사를 사용하였다. 무기성 폐기물 첨가물인 폐 주물사가 첨가되지 않은 건조슬러지의 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비는 2.48이었으며, 폐 주물사를 첨가하여 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비를 5.0까지 점차적으로 조절하였다. 용융온도 1,400℃에서 20분간 용융하고 그 용융물을 실온까지 방냉하였다. 실험에 사용된 폐 주물사와 건조 하수슬러지의 혼합비는 Table 4와 같다. S하수처리장 건조 하수슬러지와 폐 주물사의 혼합에 따른 변화된 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비에서의 밀도와 24시간 수 흡수성은 각각 Fig. 7과 Fig. 8과 같이 나타났다. SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비 3.0까지는 밀도 증가 현상을 보였으나 3.0 이상에서는 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비 증가에 따라 밀도가 감소하였다. 24시간 수 흡수성은 비율 증가에 따라 3.5까지는 낮은 증가 폭을 보였으나, 그

**Table 4.** Mixing ratio of sewage sludge with waste casting-sand

SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Unit (g)			Casting sand (%)
	Casting sand	Sludge	Sum	
2.5	-	15.000	15.0	-
3.0	1.798	13.202		12.0
3.5	3.561	11.439		23.7
4.0	5.342	9.858		35.6
4.5	7.141	7.859		47.6
5.0	8.961	6.039		59.7

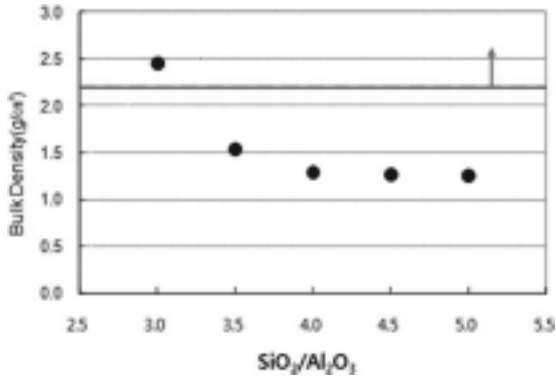


Fig. 7. The character of bulk density by ratio of waste casting-sand addition.

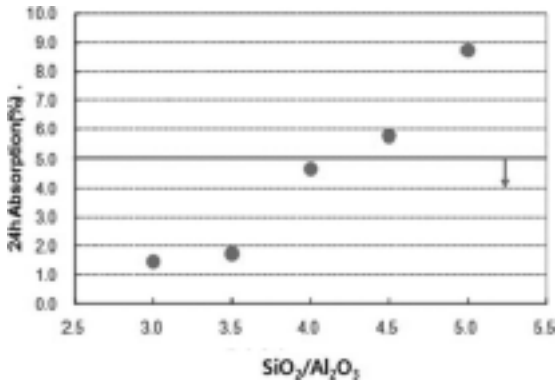


Fig. 8. The character of 24 h absorption by ratio of waste casting-sand addition.

이상에서는 증가폭이 증가하였다. 폐 주물사의 첨가에 의하여 밀도는 감소하고 수 흡수성은 증가하는 경향을 나타내었다. 따라서 최적의 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비는 3.0인 것으로 판단되었으며, 이때의 밀도는 2.45 g/cm<sup>3</sup>이였으며, 24시간 수 흡수성은 1.44%였다. 이는 폐 주물사에 주로 포함된 SiO<sub>2</sub>와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 때문인 것으로 사료된다.<sup>7,8)</sup>

3.3.3. 쇠의 녹 첨가에 따른 하수 슬러지 용융특성

슬러지 내에 가장 많이 함유된 성분중의 하나인 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 합금과정에서 용융 온도를 낮추는데 사용되기 때문에 본 연구를 통해서 살펴보고자 하였다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비를 조절하기 위하여 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 함유량이 67.66%인 D제강의 쇠 녹을 사용하였으며, 용융조건은 1,400℃에서 20분간 용융하였다. 용융된 슬래그는 실온까지 방냉하였다. 실험에 사용된 쇠의 녹과 건조 하수슬러지의 혼합비는 Table 5와 같다. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비 변화에 따른 밀도와 24시간 수 흡수성 변화는 각각 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 나타났다. 쇠의 녹 첨가에 따라 수 흡수성은 감소하였다. 하지만 밀도는 0.6까지는 증가하였으나 0.9 이상의 비에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 24시간 수 흡수성은 전체적으로 양호한 것으로 나타났다. 따라서 최적의 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비는 밀도 2.73 g/cm<sup>3</sup>, 24시간 수 흡수성 0.37%인 0.6이 가장 최적의 혼합비인 것으로 판단된다.

Table 5. Mixing ratio of sewage sludge with iron rust

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub>	Unit (g)			Iron rust (%)
	Iron rust	Sludge	Sum	
0.2	-	15.000	15.0	-
0.3	0.609	14.391		4.1
0.6	2.110	12.890		14.1
0.9	3.522	11.478		23.5
1.2	4.850	10.150		32.3
1.5	6.104	8.896		40.7

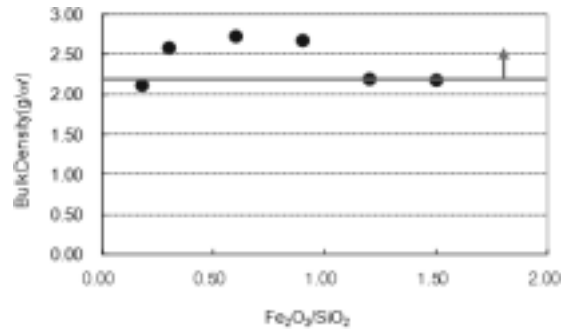


Fig. 9. The character of bulk density by ratio of iron rust addition.

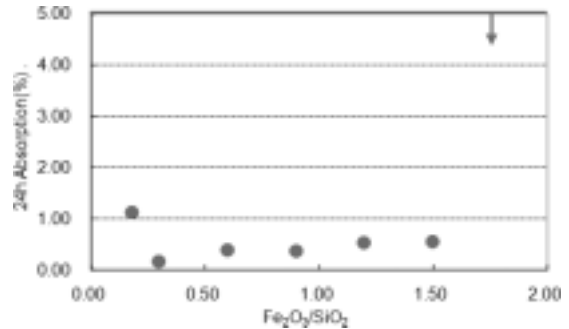


Fig. 10. The character of 24 h absorption by ratio of iron rust addition.

3.4. 용융온도 변화에 따른 하수슬러지 용융특성

폐기물의 재활용을 극대화하기 위하여 S하수처리장의 건조하수슬러지에 무기성 폐기물 첨가제인 굴 패각, 폐 주물사, 쇠의 녹을 단독으로 첨가한 실험에서 도출된 최적의 혼합비율은 CaO/SiO<sub>2</sub>가 1.0, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 3.0, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비가 0.6인 것으로 판단이 되었다. 앞에서 도출된 최적의 첨가비의 온도에 따른 용융특성을 평가하기 위하여 도출된 최적의 비에서 용융온도를 1,000℃부터 1,400℃까지 변화 시켜주면서 20분간 용융하였다. 용융된 슬래그는 실온까지 방냉 후 그 특성을 평가하였다. 하수 슬러지 단독 실험을 포함하여 전체적으로 용융온도가 증가할수록 밀도는 증가하였으며 24시간 수 흡수성은 감소하였다(Fig. 11~16). 이는 용융온도가 높아짐에 따라 용융된 슬래그의 점도가 낮아져서 매우 양호한 유동이 생김에 기인한 것으로 판단된다.<sup>8)</sup> 하지만 Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 것처럼 굴 패각의 밀도와 24시간 수 흡수성은 온도가 증가함에 따라 표

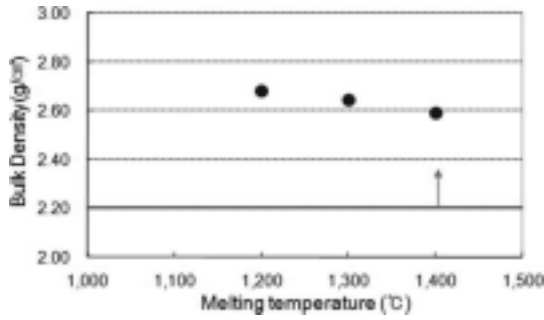


Fig. 11. The character of bulk density of mixed oyster shell on the sludge by different operation melting temperature.

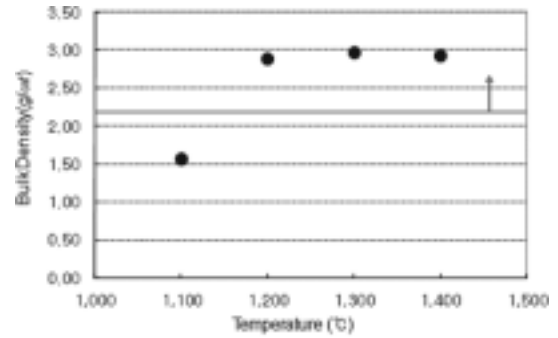


Fig. 15. The character of bulk density of mixed iron rust on the sludge by different operation melting temperature.

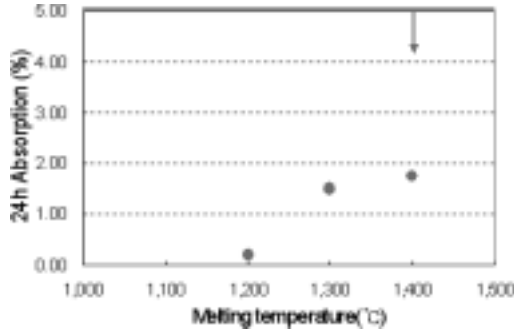


Fig. 12. The character of 24 h absorption of mixed oyster shell on the sludge by different operation melting temperature.

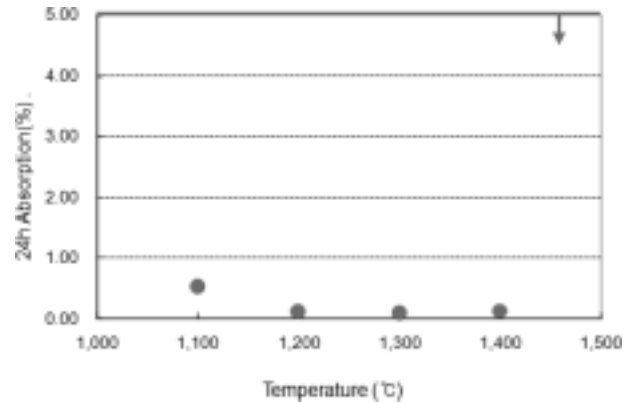


Fig. 16. The character of 24 h absorption of mixed iron rust on the sludge by different operation melting temperature.

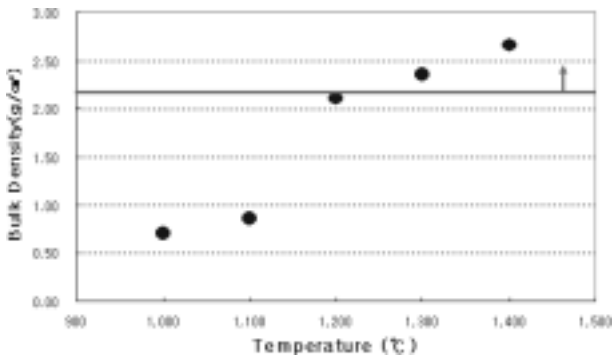


Fig. 13. The character of bulk density of mixed waste casting-sand on the sludge by different operation melting temperature.

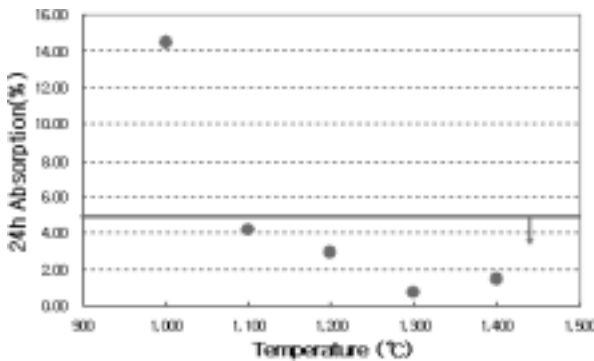


Fig. 14. The character of 24 h absorption of mixed waste casting-sand on the sludge by different operation melting temperature.

면 기공이 조밀하게 생김으로 인하여 밀도는 감소하고 24 시간 수 흡수성은 증가하는 것을 알 수 있다.

슬러지에 첨가제를 첨가하지 않고 진행된 용융 실험에서는 1,400°C에서 용융이 시작되었지만, 그 슬래그의 물성은 밀도와 24시간 수 흡수성을 만족하지 못하였다. 하지만 슬러지에 무기성 폐기물 첨가제를 일정 비율 첨가 하였을 때는 용융온도 1,200°C에서도 밀도와 수 흡수성을 만족하는 슬래그가 생산되었다. 무기성 폐기물 첨가를 통하여 높은 품질의 슬래그 생산이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

무기성 폐기물 첨가제를 건조 하수슬러지에 첨가함으로써 굴 폐각 첨가시 CaO/SiO<sub>2</sub> 비를, 폐 주물사 첨가로 SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비를 그리고 쇠의 녹을 첨가함으로써 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 비를 효율적으로 조절 할 수 있었다. 또한 CaO/SiO<sub>2</sub> 비 1.00, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 비 3.0, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 0.6에서는 용융온도 1,200°C에서도 밀도와 24시간 수 흡수성을 만족하는 골재생산이 가능한 것으로 판단되었다. 폐 주물사를 첨가제로 사용하는 경우에는 첨가량이 증가할수록 그 밀도는 감소하고 24 시간 수 흡수성은 증가하는 경향을 보였다. 쇠 녹의 첨가에서는 그 특성이 명확하게 나타나지는 않았지만 쇠의 녹 첨가에도 밀도 및 수 흡수성은 모두 양호하였다.

본 연구에서 제시한 무기성 폐기물 첨가제의 혼합을 통해서 용융온도를 낮춤으로써 생산비용 저감 효과와 용융 슬래그의 물성을 향상시켜 재활용 골재의 품질향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 폐기물의 재활용률을 극대화 하는 무기성 폐기물 첨가제 첨가 용융은 슬러지 처리 및 폐기물 최종처리의 대안 기술이 될 것으로 판단된다.

하지만 본 연구에서 제시한 밀도와 수 흡수성만으로는 골재사용 유무를 판단하기 어려운 부분이 존재하므로 용융로의 scale-up을 통해서 대량의 슬래그를 생산하여 이를 대상으로 추가적인 실험이 필요하며, 본 연구에서는 슬러지와 각각의 단독 폐기물만을 첨가하는 실험이 진행되었지만 향후 연구에서는 CaO/SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub> 세 항목의 전체 혼합 비율을 조절하는 슬래그 실험이 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 과제는 교육과학기술부 · 지식경제부의 출연금으로 수행한 산학협력 중심 대학육성사업의 연구결과입니다.

## 참 고 문 헌

1. 해양환경기획관, “육상폐기물 해양투기 저감대책,” 해양수산부(2007).
2. 김갑수, “국내의 하수슬러지 처리·처분 현황 및 개선방안,” 대한환경공학회지, **29**(1), 8~16(2007).
3. 김정권, “하수슬러지의 효율적인 처리방안을 위한 슬러지 물리화학적 특성에 대한연구,” 한국폐기물학회지, **24**(7), 645~651(2007).
4. 이제근, “소각비산재의 용융특성 연구,” 부산광역시환경시설공단 최종보고서(2005).
5. Ignacio Merino, Luis F. Are'valo, Fernando Romero, “Preparation and characterization of ceramic products by thermal treatment of sewage sludge ashes mixed with different additives,” *Waste Management*, **27**, 1829~1844(2007).
6. Jeng-Shiow Hsiung, Yi-Chin Huang, Kung-Cheh Li, Shin-hao Yang, “Study on the influence of additives in an industrial calcium fluoride and waterworks sludge co-melting system,” *J. Environmental Management*, **84**, 284~389(2007).
7. Chen-Chiu Tsai, Kuen-Sheng Wang, Ing-Jia Chiou, “Effect of SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge,” *J. Hazard. Mater.*, **B134**, 87~93(2006).
8. 포항제철 기술연구소, “CaO-MgO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 계 용융가스화로 슬래그의 점성,” 대한금속학회지, **289**, 1047~1051(1997).