

下水슬러지 소각재의 特性 評價 및 再活用을 위한 基礎研究[†]

*李 華 永

韓國科學技術研究院 二次電池研究센터

A Study on the Characteristics and Utilization of Ash from Sewage Sludge Incinerator[†]

*Hwa-Young Lee

Battery Research Center, Korea Institute of Science & Technology, P. O. Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, Korea

요 약

하수슬러지 소각재를 대상으로 화학 조성과 물리화학적 물성을 측정하고 재활용을 위한 경량재료 제조실험을 수행하였다. 경량재료는 하수슬러지 소각재를 원료로 하여 경량충진제와 무기바인더를 첨가하여 성형 및 소성하는 방법으로 제조하였으며, 제조 조건에 따른 비중과 압축강도 변화를 측정하였다. 비산재의 pH 경우 배기가스 중화를 위한 알칼리 첨가로 인하여 알칼리성인 pH 8.69로 나타났으나 바닥재는 중성인 pH 6.48이었다. 공정시험법에 근거하여 하수슬러지 소각재에 대한 중금속 용출실험 결과, Cd, Cu, Pb, As, Cr의 5개 원소 모두에 대하여 용출량이 검출한계치 이하로 나타났다. 동일한 혼합비율의 경우 비산재를 사용한 경량재료 시편의 압축강도가 바닥재에 비해 높게 나타나 비산재를 원료로 사용하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있었다.

주제어 : 하수슬러지 소각재, 재활용, 경량재료, 압축강도

Abstract

The measurement of physicochemical properties and chemical composition of SSA(sewage sludge ash) has been carried out and the preparation of lightweight material has also been performed using SSA for reuse as building or construction materials. For this aim, lightweight material has been prepared by forming the mixture of SSA, lightweight filler and inorganic binder followed by calcination at elevated temperature and characterized in terms of density and compressive strength. The pH of fly ash was found to be slightly alkaline, pH 8.69, due to the addition of caustic soda in order to neutralize the acidic gas while the pH of bottom ash was 6.48. Heavy metal leachability based on the standard leach test was also found to be below the detection limit for Cd, Cu, Pb, As and Cr of SSA. As far as the compressive strength of lightweight material was concerned, the compressive strength of lightweight material using fly ash was higher than that of lightweight material using bottom ash.

Key words : SSA, recycling, lightweight material, compressive strength

1. 서 론

우리나라 하수슬러지 발생량은 해마다 꾸준히 증가하여 2006년도 기준으로 연간 약 2백만톤 이상의 하수슬러지가 발생한 것으로 보고되고 있으며, 향후에도 인구 증가와 하수종말처리장의 증설로 인하여 이러한 증가세

는 계속될 것으로 예상된다.

서울시의 경우 서남, 난지, 중랑, 탄천의 4개 하수처리장에서 시설용량 581만톤/일의 하수처리시설을 가동하여 약 1,800톤/일의 하수슬러지를 배출하고 있다. 그럼에도 불구하고 국내 하수슬러지의 처리방법은 대부분 종래의 처리방법에 의존하고 있는 것으로 나타나 매립처분 30%, 해양투기 45%, 재활용 5%, 소각처리 20%의 비율로 처리하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 주지하는 바와 같이 하수슬러지의 매립처분은 매립지의 고갈과

[†] 2007년 11월 23일 접수, 2008년 3월 12일 수리

*E-mail: hylee@kist.re.kr

함께 주변 환경에 대한 각종 오염문제를 야기시키게 되고, 해양투기는 2012년부터 발효되는 런던협약(London Convention)에 의거하여 전면 금지하도록 되어 있다.

따라서, 향후 우리나라 하수슬러지의 처리 방식은 불가피하게 소각 혹은 재활용¹⁻⁵⁾하는 방향으로 나아가야 하나 국내 실정상 하수슬러지를 직접 재활용하는 것은 한계가 있기 때문에 궁극적으로는 소각처리를 확대하여야 할 것으로 판단된다. 현재, 국내에서 하수슬러지 소각에 사용하는 보편적인 방식은 스토커 방식과 유동층 소각방식 등이 있으며 소각후에는 일반 생활폐기물과 마찬가지로 소각재가 발생하게 된다. 하수슬러지의 경우 소각재 발생량은 건조 슬러지를 기준으로 볼 때 적게는 대략 40%에서부터 많게는 50% 이상의 소각재가 발생하는 것으로 알려져 있다.

국내 하수슬러지 소각재는 특히 SiO_2 성분과 Fe_2O_3 성분이 높은 것으로 보고되어 있는데 이와 같이 SiO_2 함량이 높은 이유는 하수처리장에 유입되는 빗물에 토사 등이 혼입되었기 때문으로 추정되며, Fe_2O_3 함량이 높은 이유는 응집제 및 탈수보조제로써 사용하는 염화철 혹은 황산철 등에 기인하는 것으로 판단되고 있다. 하수슬러지 소각재는 일반 생활폐기물 소각재⁶⁻¹¹⁾와는 달리 중금속 함량이나 용출량이 그다지 높지 않고 특히 입도분포 및 화학적 조성 등에 있어서 비교적 균일한 특징을 가지고 있기 때문에 도로공사용 기반재나 인공 골재로의 재활용 가능성이 매우 높다 하겠다.

본 실험에서는 이와 같은 국내 하수슬러지 소각재의 화학조성 및 입도, 중금속 용출량 등의 기본 물성을 측정하고 이를 원료로 사용하여 다공성 경량재료로의 재활용을 목적으로 한 기초실험을 실시함으로써 향후 발생량이 급증할 것으로 예상되는 하수슬러지 소각재의 환경친화적인 재활용 방안을 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 하수슬러지 소각재 시료

본 실험에서는 대상 시료로써 국내 A 하수슬러지 소각장에서 발생하는 하수슬러지 소각재 바닥재와 비산재

를 채취하여 사용하였다. A 소각장의 소각방식은 유동상 방식(fluidized bed type)의 소각로이었으며, 소각용량은 90톤/일 규모로써 소각로 내부의 열량조절을 위하여 건조슬러지와 생슬러지를 대략 반반씩 혼합하여 소각로로 투입하였다. A 소각장에서 하수슬러지 소각재로 발생하는 바닥재와 비산재의 발생비율은 5:95로 일반 생활폐기물의 경우와는 다른 것이 특징이었으며, 특히 산성 배기가스 중화를 위해 일반적으로 사용하는 slack lime 대신 가성소다와 활성탄을 사용하고 있었다.

Table 1은 본 실험에서 사용한 하수슬러지 소각재의 종류별 주요성분 분석결과를 보여주고 있다.

Table 1에서 보는 것처럼 하수슬러지 소각재의 주요 성분은 바닥재와 비산재 모두 Al 및 Na, Si, Ca, Fe 등인 것으로 나타났으며, 이들 원소는 대부분 응집제 혹은 토사에서 기인된 것으로 사료된다. Al 과 Si는 바닥재와 비산재가 유사하게 나타났으나, Fe의 경우 바닥재에서 비산재에 비해 2배 이상의 함량을 보여 주었다. 또한, 미연소 유기물 함량을 의미하는 C 함량에 있어서 바닥재는 0.014 wt.%, 비산재는 0.291 wt.%로 매우 낮게 측정되었다.

2.2. 실험 방법

하수슬러지 소각재 시료의 입도분석은 비산재는 입도분석기(Beckman Coulter LS-100)를 사용하여 입도범위 0.04~2,000 μm 에서 입도분포를 측정하였으며, 바닥재는 표준 망체(sieve)를 사용하여 입도분석을 실시하였다. 각 시료의 pH는 10% 고체농도로 증류수에 분산시킨 다음 pH meter(Fisher Scientific Accumet[®] Model 20)를 사용하여 측정하였다. 소각재 시료의 중금속 용출시험은 공정시험법¹²⁾에 의거하여 As, Cd, Cr, Pb, Cu의 다섯 종류 원소에 대하여 AAS(Varian, SpectrAA 800) 및 ICP(Thermojarrell Ash, Polyscan 61E)를 이용하여 각각의 원소 용출량을 분석하였다.

하수슬러지 소각재를 원료로 사용한 경량재료 제조실험은 주원료에 경량충진제(lightweight filler)와 무기바인더인 bentonite를 혼합하고 3% CMC(carboxymethyl-cellulose) 용액으로 반죽 및 성형하였다. 본 실험에서

Table 1. Chemical composition of sewage sludge ash used in this work

(unit: wt.%)

Element	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe	C
Fly Ash	10.8	3.02	9.78	17.0	8.06	3.20	0.291
Bottom Ash	6.93	3.45	8.30	19.3	7.09	6.92	0.014

사용한 경량충진제는 국내 S사에서 공급받은 Perlite계(상품명: GP-1)와 Silica Sphere계(상품명: SMF-100)의 두 가지 원료를 사용하였으며, bentonite는 미국 Wyoming산 Na-bentonite를 사용하였다. 직경 30 mm, 길이 20~25 mm의 pellet으로 성형한 경량재료는 105°C에서 건조한 다음 1,000°C까지의 온도범위에서 고온 소성처리하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지 소각재의 물리화학적 물성

Table 2는 하수슬러지 소각재의 기본물성을 조사한 결과를 나타낸 것이다. 수분함량은 바닥재에서 6.11 wt%로 다소 높게 나타났으며 비산재의 경우 0.17 wt%의 수분함량을 보였다. 바닥재의 수분함량이 높은 이유는 소각로에서 배출시 수조를 거쳐 바닥재를 포집하였기 때문으로 사료된다. pH는 비산재의 경우 알칼리(가성소다) 첨가로 인하여 다소 높은 pH 8.69로 측정되었으며, 바닥재는 중성인 pH 6.48로 나타났다. 한편, 10% 고체농도로 하여 증류수로 3회 세척한 다음 무게감량을 측정된 결과 바닥재는 0.3%, 비산재는 2.7%의 무게감소를 보여 하수슬러지 소각재에 함유된 수용성 물질함량은 매우 낮음을 알 수 있었다. 소각로 배가스의 중화를 위해 slack lime을 사용하는 경우 비산재에

는 calcium chloride 등의 수용성 염을 함유하는 것이 일반적이거나, 본 실험에서 사용한 하수슬러지 소각재는 가성소다에 의한 배가스 처리방식을 이용하였기 때문에 수용성 물질함량이 낮은 것으로 풀이된다.

Table 3은 폐기물 공정시험법에 근거하여 하수슬러지 바닥재와 비산재에 대한 중금속 용출실험을 하였을 때의 Cd, Cu, Pb, As, Cr의 용출량을 각각 분석한 결과를 나타낸 것이다. Table 3에서 보는 것처럼 5개 중금속 원소 모두에 대하여 용출량이 검출 한계치 이내로 나타났으며, 환경 기준치 수치보다도 훨씬 낮음을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 실험에서 사용한 하수슬러지 소각재의 경우 별도의 중금속 제거과정을 거치지 않고 도 도로 노반재 혹은 골재로의 재활용이 가능한 것으로 판단되었다.

Table 4와 Fig. 1은 바닥재와 비산재에 대한 입도분포를 표준 망체와 입도분석기로 각각 분석한 결과, 하수슬러지 소각 바닥재의 경우 -12+50 mesh 사이에 93% 이상의 입자가 몰려있어 상당히 균일한 입도특성을 보여주었다. 바닥재의 이와 같은 균일한 입도분포와 성상은 재활용하기에 상당히 유리한 조건을 제공하는 것으로서, 생활폐기물 바닥재의 경우 성상이 불규칙하고 입도분포가 크기 때문에 파쇄, 입도분급 및 선별 등의 과정을 거쳐 재활용되고 있음에 비해 하수슬러지 바닥재는 상대적으로 매우 유리한 재활용 조건을 가지고 있는 것으로 생각된다. 한편, 비산재에 있어서는 미립질 입자가 차지하는 비중이 매우 높아 입도분석기(particle size analyzer)를 사용하여 시료에 대한 입도를 측정하였으며, 측정결과 하수슬러지 소각 비산재의 입도범위는 Fig. 1에 나타난 것처럼 1.6 μm~0.8 mm이었으며, 평균입도는 51.3 μm로 나타나 비교적 미립질 입자로 구성된 것을 알 수 있었다.

Table 2. Physicochemical properties of sewage sludge ash used in this work

Properties	Bottom Ash	Fly Ash
Water Content(wt%)	6.11	0.17
pH(10% solid density)	6.48	8.69
Water-soluble Compounds(wt%)	0.3	2.7

Table 3. Results of heavy metal leachability for sewage sludge ash

(unit: mg/l)

Element	Cd	Cu	Pb	As	Cr
Regulatory limit	0.3	3	3	1.5	1.5(Cr ⁶⁺)
Bottom Ash	<0.05	<0.05	<0.2	<0.1	<0.1
Fly Ash	<0.05	<0.05	<0.2	<0.1	<0.1

Table 4. Particle size distribution of bottom ash

Sieve No. (Size)	+10mesh (+2mm)	-10+12mesh (2/1.68mm)	-12+20mesh (1.68/0.84mm)	-20+50mesh (0.84/0.3mm)	-50mesh (-0.3mm)	Total
Fraction(%)	3.1	1.7	29.4	63.8	2.0	100

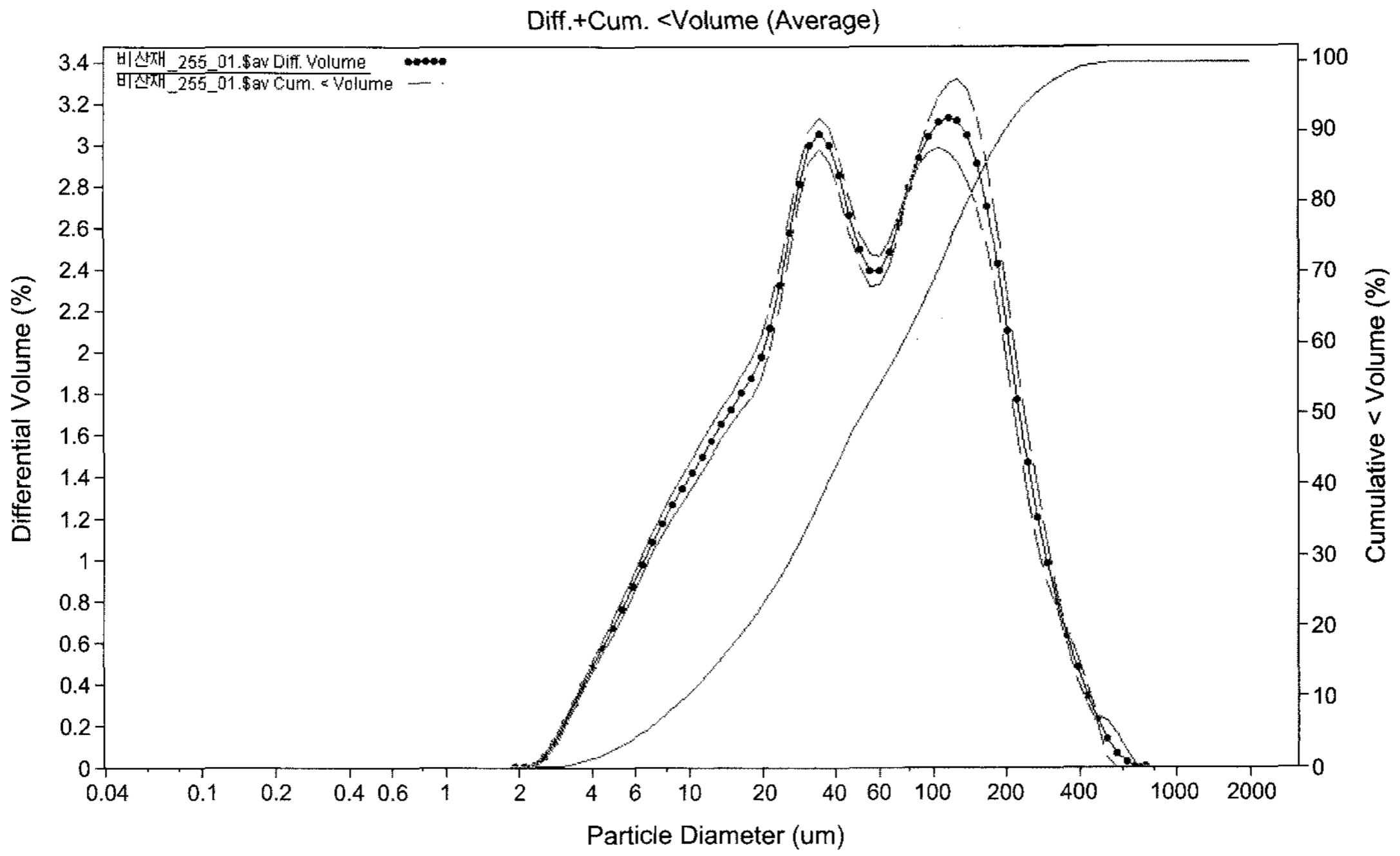
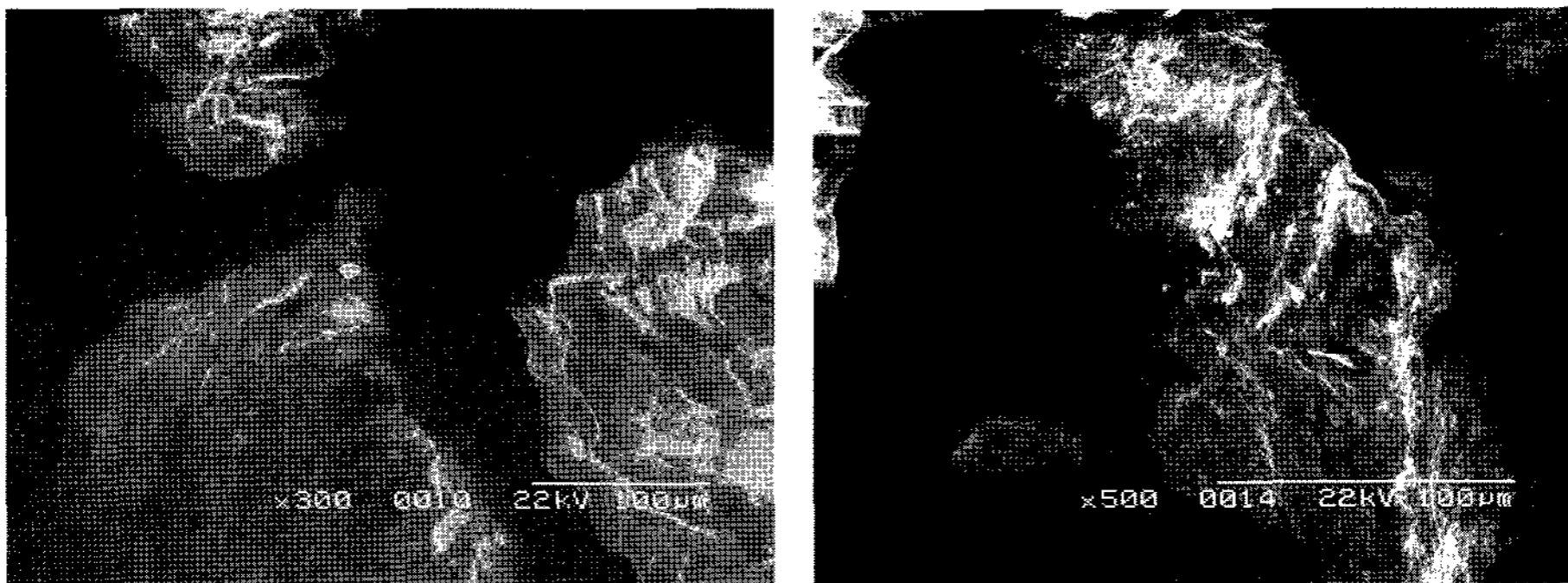
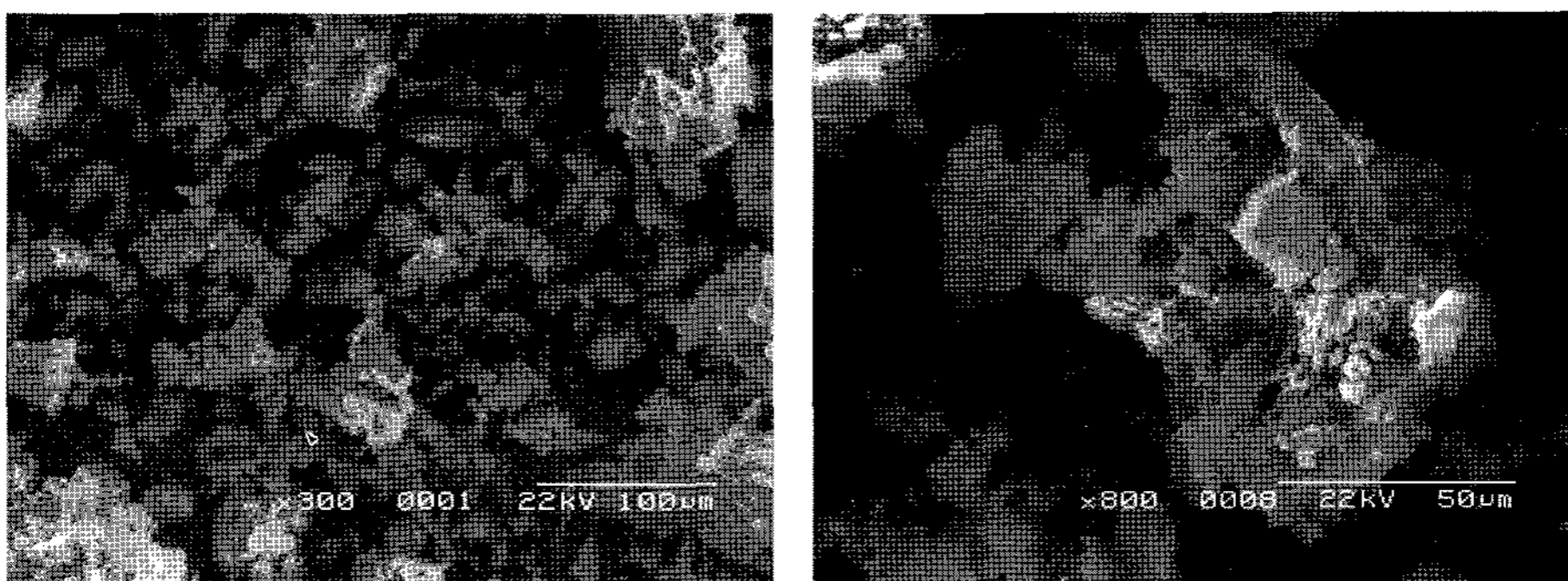


Fig. 1. Particle size distribution of fly ash used in this work.



(A) Bottom Ash



(B) Fly Ash

Fig. 2. SEM photos of sewage sludge ash.

Fig. 2는 바닥재와 비산재의 SEM 사진을 보여주는 것으로서, 바닥재의 경우 입자가 층상으로 발달한 모습을 확인할 수 있었으며 비산재는 불규칙한 입자들이 서로 응집된 모습으로 나타났다.

3.2. 하수슬러지 소각재를 사용한 경량재료 제조

본 실험에서는 하수슬러지 소각재를 원료로 사용하여 다공성 경량재료를 제조하였을 때의 비중과 압축강도를 측정함으로써 이의 재활용을 위한 기초 자료를 제시하고자 하였다. Table 5 및 Table 6은 각각 경량충진제 GP-1과 SMF-100에 대하여 비산재, 경량충진제 및 bentonite를 각각 50%, 40%, 10%의 비율로 혼합하여 제조한 경량재료의 소성온도에 따른 비중 및 압축강도 변화를 나타낸 것이다.

Table 5에서 보는 것처럼 경량충진제로써 Perlite계인 GP-1을 사용하여 하수슬러지 비산재 50%, 경량충진제 40% 및 bentonite 10%의 비율로 혼합하여 제조한 경량재료의 소성온도별 비중과 압축강도 변화를 살펴보면 소성온도 800°C 이하에서는 소성후의 시편비중이 소성전에 비해 약간 낮은 것으로 측정되었다. 그러나, 소성온도 900°C 이상에서는 소성후의 비중이 급격히 증가하여 1,000°C 소성시에는 소성전 0.53 gr/cm³에서 소성후 1.31 gr/cm³로 2배 이상 높아진 것을 알 수 있었다.

이것은 900°C 이상의 고온 소성시 시편의 부피가 크게 감소하기 때문으로써, 이와 같은 부피감소는 비중을 증가시키는 반면 압축강도는 크게 향상되는 효과를 가져오는 것으로 나타났다. 실제로 소성온도에 따른 압축강도를 살펴보면 900°C 이하에서는 45.4 kg/cm² 이하인 것으로 나타나고 있으나 900°C 이상에서는 급격히 증가하여 1,000°C 소성후에는 370.5 kg/cm²에 달하고 있다.

한편, 경량충진제로써 Silica Sphere계인 SMF-100을 사용하는 경우에 있어서는 Table 6에서 보는 것처럼 소성 전후의 비중차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 즉, 1,000°C 소성후에도 소성전의 비중 0.74 gr/cm³에 비해 거의 비슷한 0.77 gr/cm³의 값을 보이고 있는데, 실제로 소성후 시편 치수를 측정해 보면 소성전에 비해 거의 차이가 나지 않는 것으로 관찰되었다. 압축강도에 있어서는 GP-1의 경우와 마찬가지로 소성온도가 증가할수록 무기바인더인 bentonite의 소성효과로 인하여 압축강도가 향상되었으나 1,000°C 소성시 87.0 kg/cm² 정도로써 GP-1에 비해서는 매우 낮은 수치를 보였다. 따라서, 하수슬러지 소각재를 원료로 하여 경량재료를 제조하는 경우 경량충진제의 종류에 따라 제품물성이 좌우됨을 알 수 있으며, 이와 같은 현상은 첨가되는 경량충진제의 특성에 기인하는 것으로 사료된다. 즉, Perlite계인 GP-1의 경우 하수슬러지 소각재 및 bentonite와 혼

Table 5. Effect of calcination temperature on density and compressive strength (fly ash:GP-1:bentonite = 50%:40%:10%)

Calcination Temperature(°C)	Density(gr/cm ³)		Compressive strength (kg/cm ²)
	Before Calcination	After Calcination	
600	0.50	0.47	28.5
800	0.49	0.47	27.8
900	0.54	0.60	45.4
950	0.54	0.83	91.5
1,000	0.53	1.31	370.5

Table 6. Effect of calcination temperature on density and compressive strength (fly ash:SMF-100:bentonite=50%:40%:10%)

Calcination Temperature(°C)	Density(gr/cm ³)		Compressive Strength (kg/cm ²)
	Before Calcination	After Calcination	
600	0.73	0.72	20.5
800	0.74	0.74	23.3
900	0.74	0.74	40.6
950	0.74	0.75	62.7
1,000	0.74	0.77	87.0

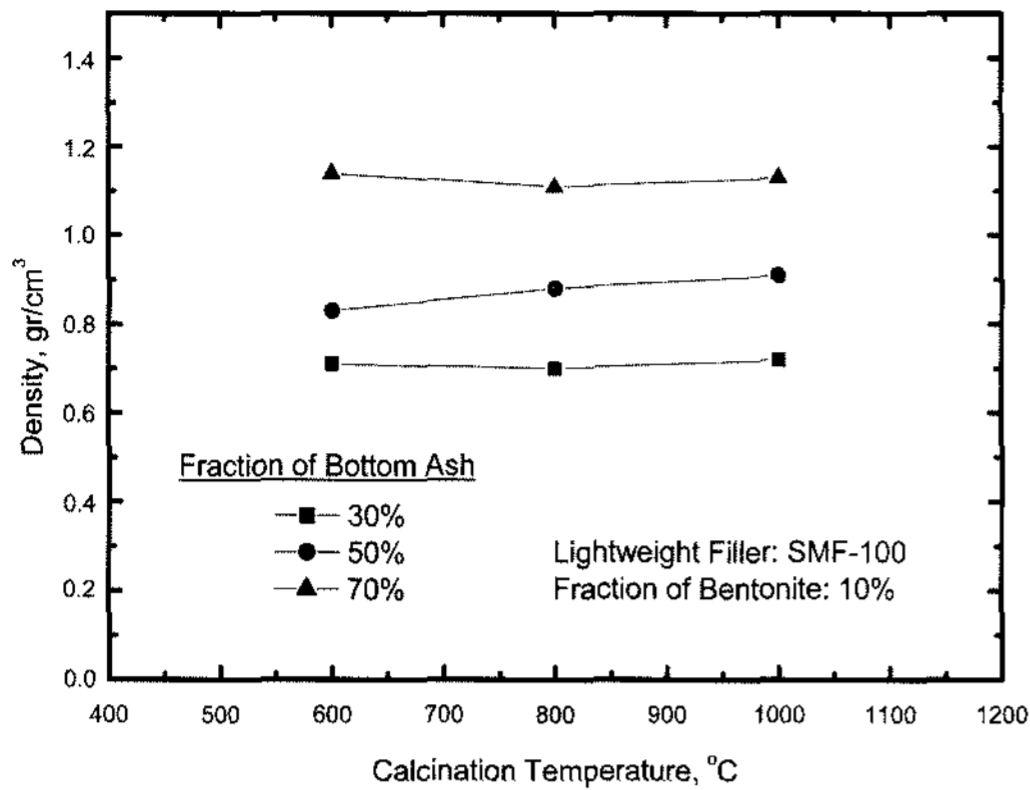


Fig. 3. Variation of density with calcination temperature.

합하여 고온 소성할 경우 입자가 수축하면서 공극율이 감소하게 되고 이로 인하여 비중은 증가하나 입자끼리 단단히 결합되는 효과가 나타나면서 압축강도는 향상되게 된다. 반면, Silica Sphere계인 SMF-100은 내부공간이 비어있는 구형의 입자로서 다른 원료와 혼합하여 고온 소성하여도 입자수축 현상이 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 bentonite 첨가량을 10%로 고정된 상태에서 하수슬러지 바닥재와 경량충진제 SMF-100의 혼합비율을 변화시키면서 제조한 경량재료의 소성온도에 따른 비중 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 SMF-100을 경량충진제로 사용한 경우 비산재와 마찬가지로 소성온도에 따른 시편의 비중 변화는 크게 나타나지 않았으며, 다만 바닥재 혼합비율이 증가할수록 SMF-100 비율은 감소하기 때문에 시편 비중이 상대적으로 높아지는 경향을 보였다. 또한, 50%의 동일한 혼합비율일 때 바닥재와 비산재를 비교하여 보면 1,000°C 소성시 바닥재는 0.91 gr/cm³로 나타나고 있어 비산재의 0.77 gr/cm³(Table 6참조)에 비해 다소 높은 것을 알 수 있는데, 이것은 바닥재의 입도가 비산재에 비해 크고 비교적 무거운 입자이기 때문인 것으로 풀이된다.

Fig. 4는 바닥재 첨가비율을 변화시키면서 소성온도에 따른 압축강도 변화를 측정된 결과로서, 비산재의 경우와 마찬가지로 소성온도가 증가할수록 압축강도가 향상되는 것으로 나타났다. 주목할 점은 바닥재 첨가비율이 증가할수록 전반적으로 압축강도가 저하되는 것을 알 수 있는데, 이것은 바닥재 평균 입도가 Table 4에서 보는 것처럼 크고 입자간의 응집력이 약하기 때문인 것으로 풀이되고 있다. 실제로 50% 혼합비율의 동일한

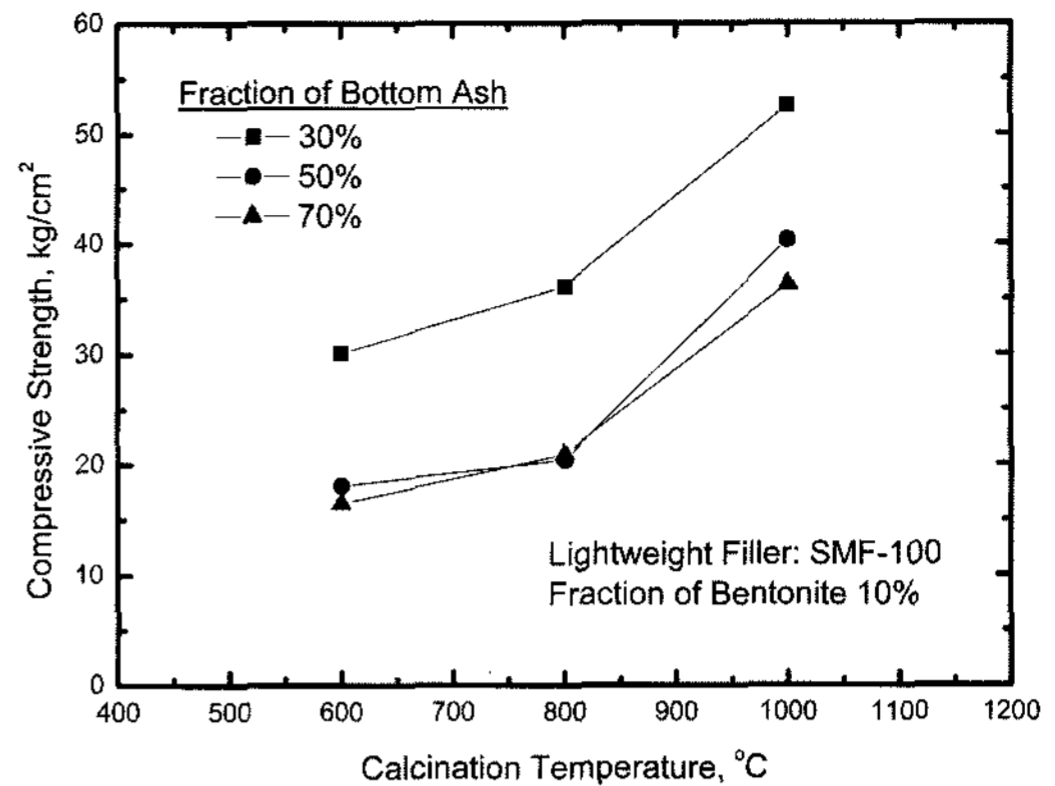


Fig. 4. Variation of compressive strength with calcination temperature.

조건에서 바닥재와 비산재(Table 6참조)를 사용하여 제조한 경량재료 시편의 압축강도를 비교하여 보면 비산재의 경우가 바닥재에 비해 압축강도가 높게 나타나고 있어 비산재를 원료로 사용하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

하수슬러지 소각재를 대상으로 특성 분석과 이의 재활용을 위한 경량재료 제조실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 비산재 pH의 경우 배기가스 중화를 위한 알칼리 첨가로 인하여 알칼리성인 pH 8.69로 나타났으나 바닥재는 중성인 pH 6.48이었으며, 재활용을 위한 중요한 자중의 하나인 수용성 물질의 경우 바닥재는 0.3%를 비산재는 2.7%를 각각 함유한 것으로 나타났다. 입도분포의 경우 바닥재와 비산재 모두 매우 균일한 입도를 보였으며, 바닥재의 평균입도는 20/50 mesh 범위로 또한 비산재의 평균입도는 51.3 μm로 나타났다.

(2) 폐기물 공정시험법에 근거하여 하수슬러지 바닥재와 비산재에 대한 중금속 용출실험 결과, Cd, Cu, Pb, As, Cr의 5개 원소 모두에 대하여 용출량이 검출한계치 이하로 나타나 별도의 중금속 제거과정이나 선별공정을 거치지 않고도 골재로의 재활용이 가능한 것으로 판단되었다.

(3) 경량충진제로써 Perlite계인 GP-1을 사용하여 제조한 경량재료의 경우 900°C 이상의 고온 소성시 시편의 부피가 크게 수축하면서 비중은 증가하게 되나 압축강도는 급격히 증가하여 1,000°C 소성후에는 370.5 kg/

cm²에 달하는 것으로 나타났다. 반면, Silica Sphere계인 SMF-100을 경량충진제로 사용하는 경우에는 소성 전후의 비중차이가 크지 않았으며, 1,000 소성시 70.0 kg/cm² 정도의 압축강도를 보여 GP-1에 비해서 낮은 값을 나타냈다.

(4) 동일한 혼합비율의 경우 비산재를 사용한 경량재료 시편의 압축강도가 바닥재에 비해 높게 나타나 비산재를 원료로 사용하는 것이 보다 효과적임을 알 수 있었다. 이것은 바닥재의 입도가 비산재에 비해 크고 입자간의 응집력이 약하기 때문인 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 이화영, 2007: ASR 소각재의 이화학적 물성 및 재활용을 위한 기초연구, *자원리사이클링*, **16**(2), pp. 32-39.
2. Babu, D. S., Babu, K. G, Wee, T. H., 2005: Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **35**, pp. 1218-1223.
3. Tay, J. H., Show, K. Y., 1997: Resources recovery of sludge as a building and construction material, *Water Science & Technology*, **36**(11), pp. 259-266.
4. Cheeseman, C. R., Viridi, G. S., 2005: Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, *Resources, Conservation & Recycling*, **45**, pp. 18-30.
5. Cheeseman, C. R., Makinde, A., Bethanis, S., 2005: Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, *Resources, Conservation & Technology*, **43**, pp. 147-162.
6. Hammy, F., Mercier, G, Blais, J., 2005: Removal of lead in APCR leachates from municipal solid waste incinerator using peat moss in a batch counter-current sorption process, *Hydrometallurgy*, **80**, pp. 232-240.
7. Matsuzawa, Y. *et al.*, 2006: Leaching behavior of heat-treated waste ash, *Fuel*, **85**, pp. 401-409.
8. Fuoco, R. *et al.*, 2005: Innovative stabilization/solidification processes of fly ash from an incinerator plant of urban solid waste, *Microchemical Journal*, **79**, pp. 29-35.
9. Reich, J. *et al.*, 2002: Effects of limestone addition and sintering on heavy metal leaching from hazardous waste incineration slag, *Waste Management*, **22**, pp. 315-326.
10. Oygard, J. K., Gjengedal, E., Mage, A., 2005: Mass-balance estimation of heavy metals and selected anions at a landfill receiving MSWI bottom ash and mixed construction wastes, *Journal of Hazardous Materials*, **A123**, pp. 70-75.
11. Gerven, T. V. *et al.*, 2004: Effect of CO₂ on leaching from a cement-stabilized MSWI fly ash, *Cement and Concrete Research*, **34**, pp. 1103-1109.
12. 환경부 고시 제 96-32호, 1996: 공정시험방법, 동화기술, pp. 417-418.

李 華 永

- 현재 한국과학기술연구원 이차전지연구센터 책임연구원
 - 당 학회지 제10권 4호 참조
-