

ASR 소각재의 이화학적 물성 및 再活用을 위한 基礎研究[†]

*李 華 永

韓國科學技術研究院 이차전지연구센터

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

*Hwa-Young Lee

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

요 약

폐자동차 ASR의 소각재를 대상으로 물리화학적 물성측정 및 리사이클링을 위한 경량재료 제조실험을 수행하였다. 대상시료는 국내 ASR 소각장에서 채취한 바닥재 2종류와 비산재 4종류이었으며, 이들의 주요 성분 및 입도분석을 실시하고 공정시험법에 의한 중금속 용출량을 조사하였다. 또한, 비산재인 boiler ash를 원료로 하여 경량물질과 무기바인더를 첨가하여 성형 및 소성하는 방법으로 경량재료를 제조하였다. 바닥재에는 Cu 함량이 3wt% 내외로 상당히 높은 것으로 나타나 Cu의 사전 분리가 필수적인 것으로 나타났다. 수용성물질을 많이 함유한 SDR(semi-dry reactor) ash와 Bag filter ash의 주성분은 각각 $\text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 및 $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 인 것으로 나타났다. boiler ash를 원료로 사용하여 제조한 경량재료 시편의 경우 중금속 용출이 크게 감소하였으며, 그 이유는 중금속 성분이 불용성 화합물로 안정화 또는 encapsulation 되었기 때문으로 판단되었다.

주제어 : 폐자동차, ASR, 소각, 소각재, 재활용, 경량재료

Abstract

The measurement of physicochemical properties of ASR incineration ash has been carried out and the preparation of lightweight material has also been performed using ASR ash for recycling point of view as building or construction materials. For this aim, chemical composition, particle size distribution, and heavy metal leachability were examined for 2 bottom ashes and 4 fly ashes obtained from the domestic ASR incinerator. In the present work, attempt has been made to prepare the lightweight material using boiler ash as a raw material, which is prepared by forming the mixture of boiler ash, lightweight filler and inorganic binder and followed by calcination at elevated temperature. As a result, the content of Cu in bottom ash was as high as about 3wt% so that the recovery of Cu from ash was required. The major compound of SDR #5 and Bag filter #6 was found to be $\text{CaCl}_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and $\text{CaCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, respectively. It is thought that heavy metal leachability of lightweight material prepared with boiler ash was significantly decreased due to the encapsulation or stabilization of heavy metal compounds.

Key words : end-of-life vehicles, ASR, incineration, ash, recycling, lightweight material

1. 서 론

2005년도 통계에 의하면 우리나라는 자동차 생산량에 있어서 세계 5위, 또한 자동차 수요면에서는 세계 10위를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 자동차 시장의 외형적 성장과 함께 국내 폐자동차 발생량은

연간 약 50만대 수준으로 해마다 급증하고 있어 이의 재활용 및 환경친화적 처리문제가 최근 심각하게 대두되고 있다. 특히, EU 규정에 따르면 2015년 까지 폐자동차 재활용율은 95% 이상을 달성하여야 하고, 이 가운데 재료로써의 재활용율 85% 이상, 또한 에너지원로서의 재활용율 10% 미만을 유지하도록 하고 있다.¹⁻³⁾

폐자동차의 재질별 구성은 차종이나 제조업체에 따라 서로 다소 차이가 있으나 일반적으로 철을 포함한 금속부

[†] 2006년 11월 3일 접수, 2007년 2월 28일 수리

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

분이 70~75%이고 나머지는 플라스틱, 고무, 섬유 등의 재질로 구성되어 있다.^{4,5)} 특히, 폐자동차 슈레더산물 가운데 철스크랩과 비철금속은 현재 거의 재질별 분리가 이루어져 재활용이 되고 있으나 소위 ASR (automobile shredder residue)이라 부르는 잔재물 처리가 심각한 문제가 되고 있다. 선진국의 경우 ASR을 열분해 가스화하여 발전설비를 가동시키는 등의 에너지 재활용에 중점을 두고 있으나, 국내에서는 아직 이에 대한 기술부족과 상업성 미비로 인하여 발생되는 ASR 일부만이 시멘트 업체에서 보조연료로 활용하고 나머지는 소각 및 매립처분하고 있는 실정이다.

그러나, 향후 ASR 매립이 금지되거나 매립비용이 급격히 증가할 가능성이 매우 높기 때문에 ASR의 물질 재활용 혹은 열적재활용에 대한 기술개발이 시급하게 요구되고 있다. 특히, 소각처리하는 경우 잔류물인 소각재의 발생비율이 전체 ASR 무게의 30~35%를 차지하기 때문에 이의 재활용 방안에 대해서도 큰 관심을 기울여야 할 것으로 판단되고 있다.⁶⁻¹⁰⁾ ASR 소각재가 재활용되는 경우 이는 EU 규정에 의한 물질재활용을 제고에 기여함은 물론 소각재를 매립처분하는 비용을 크게 절감할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

본 실험에서는 국내 ASR 소각로에서 발생하는 소각재를 종류별로 채취하여 이의 물리화학적 물성 및 중금속 용출량을 측정하고, 비산재인 boiler ash를 원료로 경량재료 제조실험을 실시함으로써 ASR 소각재의 재활용 가능성을 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. ASR 소각재 시료

본 실험에서는 대상 시료로써 국내 A 소각장에서 발생하는 ASR 소각재 여섯 종류를 채취하여 사용하였다. A 소각장의 소각방식은 stoker type의 소각로이었으며,

소각재 발생부위에 따라 바닥재 두 종류와 비산재 네 종류를 각각 시료로 채취하였다. Table 1은 본 실험에서 사용한 소각재의 종류 및 채취위치를 보여주고 있다.

소각재 시료의 성상을 살펴보면 바닥재인 Bottom #1 및 Bottom #2의 경우 표면산화된 금속조각과 유리질 세라믹 등이 서로 엉겨붙은 모습의 불규칙한 조성으로 구성되어 있었으며, 입도에 있어서도 50 mm 이상의 덩어리도 상당량 혼합되어 있어 사실상 입도분포를 측정하는 것이 큰 의미가 없었다. 반면 #3 이상의 비산재는 비교적 미세한 입자들로 구성되어 있었으며, 따라서 화학적 조성에 있어서도 균일한 것으로 사료되었다. 한편, 소각로에서 배출될 때 바닥재는 대부분 수조에서 냉각한 다음 배출되기 때문에 수분함량이 높으나 SDR #5를 제외한 비산재는 건조상태에서 배출되기 때문에 수분함량이 매우 낮은 것이 특징이다. 본 실험에서는 채취한 소각재 시료를 상온에서 충분히 건조하여 사용하였다.

2.2. 실험 방법

바닥재를 제외한 소각재 시료는 입도분석기(Beckman Coulter LS-100)를 사용하여 입도범위 0.04~2,000 μm에서 입도분포를 측정하였으며, 수용성 물질을 많이 함유한 SDR #5 및 Bag Filter #6의 시료에 대해서는 X-선 회절분석을 통하여 주성분을 조사하였다.

각 시료의 pH는 10% 고체농도로 증류수에 분산시킨 다음 pH meter(Fisher Scientific accumet® model 20)를 사용하여 측정하였다. 소각재 시료의 중금속 용출시험은 공정시험법¹¹⁾에 의거하여 As, Cd, Cr, Pb, Cu의 다섯 종류 원소에 대하여 AA spectroscopy(Varian, SpectrAA 800) 및 ICP(Thermojarrell Ash, Polyscan 61E)를 이용하여 각각의 원소 용출량을 분석하였다.

소각재를 원료로 사용한 경량재료 제조실험은 비교적 입도가 균일하고 수용성 물질을 함유하지 않은 Boiler #4 시료를 주원료로 선택하여, 여기에 경량물질(lightweight filler)과 무기바인더인 bentonite를 혼합하고 3% CMC(carboxymethylcellulose) 용액으로 반죽 및 성형하였다. 경량물질은 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 소성 처리하였다.

Table 1. Type of ashes from ASR incinerator used in the work

Sample Code	Classification	Generation Position
Bottom #1	bottom ash	Stoker Grate Siftings
Bottom #2	bottom ash	Stoker Grate Bottom
Cyclone #3	fly ash	Cyclone
Boiler #4	fly ash	Boiler
SDR #5	fly ash	Semi-Dry Reactor
Bag Filter #6	fly ash	Bag Filter

Table 2. Heavy metals and chloride contents in ASR ashes (unit: mg/kg)

Sample code	As	Cd	Cr	Pb	Cu	Cl-
Bottom #1	12.3	<1	12.1	540	34,000	6,700
Bottom #2	10.7	<1	11.4	600	27,000	6,100
Cyclone #3	12	7	9.7	1,400	2,800	580
Boiler #4	38.4	110	10.2	12,000	3,400	8,500
SDR #5	10.7	16	6.5	4,700	1,200	156,000
Bag filter #6	20.4	105	5.4	9,600	4,600	243,000

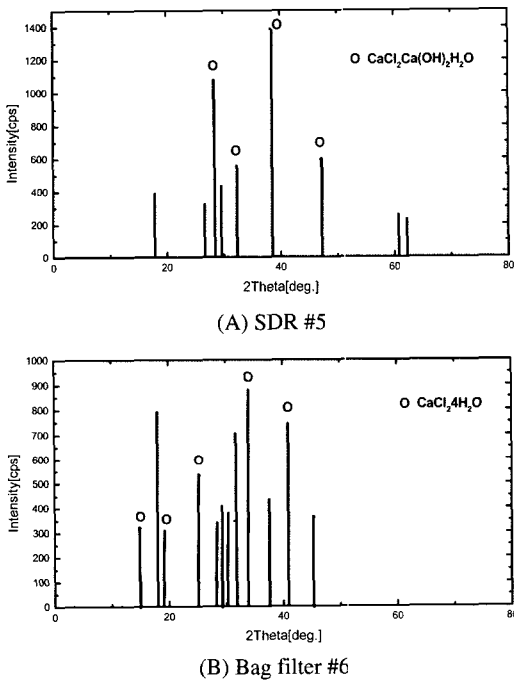


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of SDR #5 and Bag filter #6.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. ASR 소각재의 물리화학적 특성

Table 2는 ASR 소각재중의 중금속(As, Cd, Cr, Pb 및 Cu)과 염소이온(Cl⁻) 함량을 분석한 결과로써, 특이한 사항은 바닥재중의 Cu 함량이 각각 3.4 wt% 및 2.7 wt%로 통상적인 도시폐기물 소각재에 비해 상당히 높은 것으로 나타났다. 이것은 폐자동차의 구리전선이 일부 ASR로 혼입이 되기 때문이며, 따라서 바닥재로부터 구리를 사전에 분리하거나 회수하는 리사이클링 방법도 충분히 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

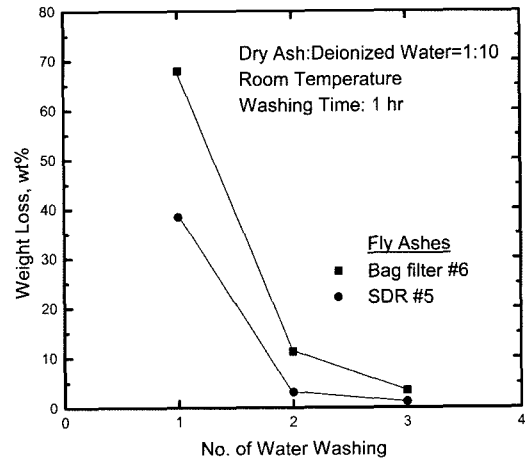


Fig. 2. The test of water washing for SDR #5 and Bag filter #6.

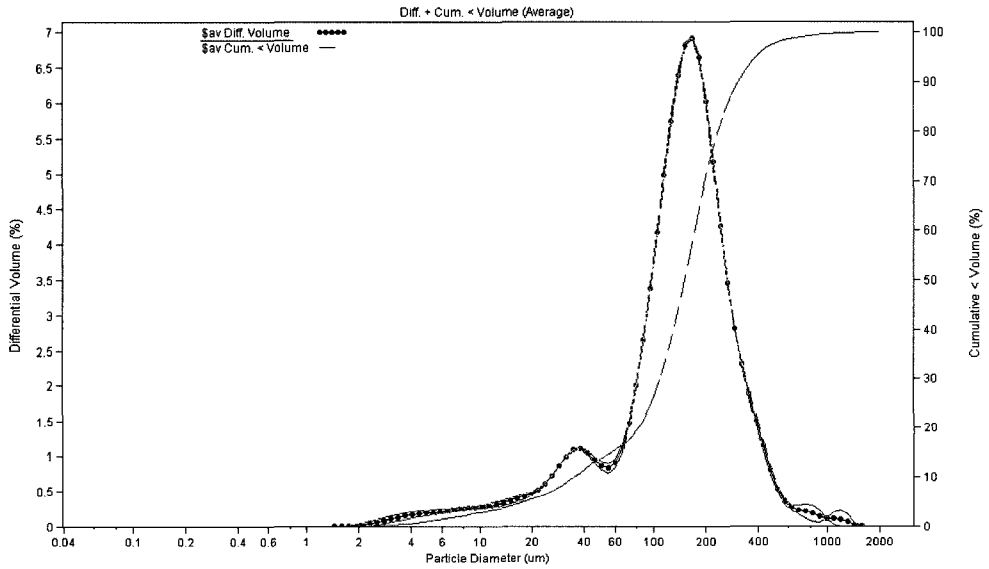
한편, 비산재중의 Pb 함량이 바닥재보다 상당히 높은 이유는 소각과정에서 ASR에 함유된 Pb 성분이 대부분 증발하여 비산재로 혼입되었기 때문으로 생각된다. 또한, SDR #5 및 Bag filter #6의 경우 Cl⁻ 함량이 매우 높은 것으로 나타났는데, 이것은 HCl 가스와 중화제로 투입된 slack lime과의 반응으로 CaCl₂가 생성되었기 때문이다. 실제로 이들 시료의 X-선 회절분석에 따르면, Fig. 1에 보여주는 것처럼 SDR #5는 CaCl₂·Ca(OH)₂·H₂O가 주성분이었으며 Bag filter #6는 CaCl₂·4H₂O가 주성분으로 나타났다.

본 실험에서는 비산재 가운데 SDR #5와 Bag filter #6에 대해서 수용성물질 함량을 측정하였으며, 결과를 Fig. 2에 도시하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 두 시료 모두 수용성물질을 다량 함유하여 세 차례 물로 세척하는 경우 각각 40% 및 70% 이상이 용해되는 것으로 나타났다.

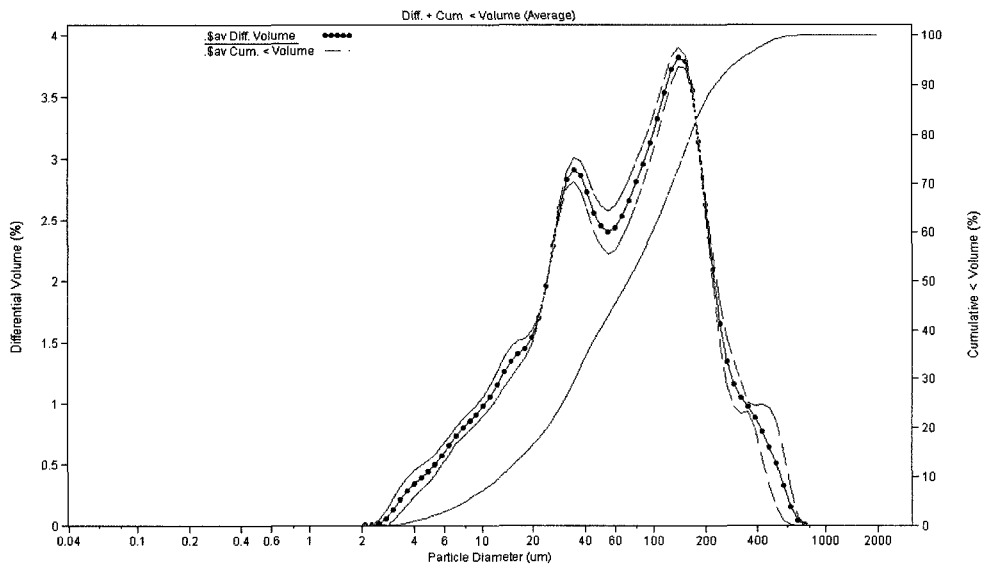
바닥재를 제외한 비산재 4종류의 입도분포를 측정하

결과를 살펴보면 Fig. 3에 도시한 것처럼 대부분의 입자가 2~1,000 μm 의 범위에 분포하고 있었으며, 평균입자 크기는 Cyclone #3>Boiler #4>SDR #5>Bag filter #6의 순서로 나타났다. 특히, Bag filter #6의 경우 0.4 μm 미만의 매우 작은 입자들이 분포하고 있는 특징을 보여 주었다.

한편, Table 3은 ASR 소각재 시료의 pH를 측정된 결과로써 Table 3에서 보는 것처럼 대체로 알칼리성의 pH를 보여 주었으며, 특히 SDR #5와 Bag filter #6은 각각 12.06 및 11.80으로 상당히 강알칼리성인 것으로 나타났다. 이것은 산성가스를 중화하기 위해 투입한 slack lime 때문으로 풀이된다.

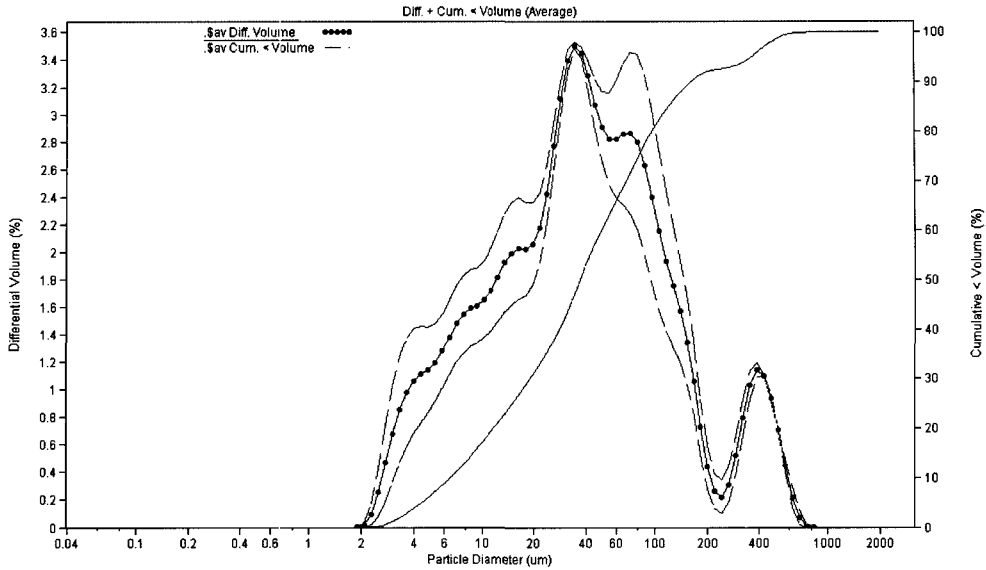


(A) Cyclone #3

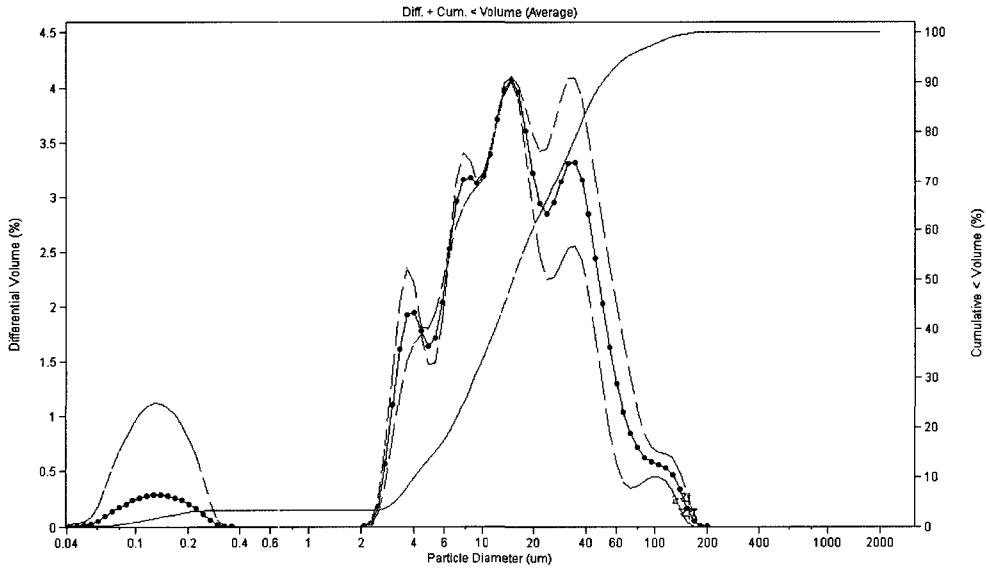


(B) Boiler #4

Fig. 3. Particle size distribution of fly ashes used in the work.



(C) SDR #5



(D) Bag filter #6

Fig. 3. Continued.

Table 3. pH value of ASR incineration ash used in the present study

Sample code	Bottom #1	Bottom #2	Cyclone #3	Boiler #4	SDR #5	Bag filter #6
pH	9.09	9.14	11.01	6.55	12.06	11.80

Table 4는 폐기물 공정시험법에 의한 각 시료의 중금속 용출시험결과를 보여주고 있다. Table 4에서 보는 것처럼 바닥재 두 종류와 비산재인 Cyclone #3에서는

중금속 용출량이 모두 기준치 이내로 검출이 되는 것으로 나타났으나, Boiler #4, SDR #5 및 Bag filter #6에서는 Cd, Pb, Cu 용출량이 기준치를 상회하는 경우

Table 4. Results of heavy metal leachability for ASR ash (unit: mg/l)

Sample code	As	Cd	Cr	Pb	Cu
Regulatory limit	1.5	0.3	1.5(Cr ⁶⁺)	3	3
Bottom #1	<0.05	<0.1	<0.05	<0.05	<0.02
Bottom #2	<0.05	<0.1	<0.05	0.1	0.40
Cyclone #3	<0.05	<0.1	0.14	<0.05	<0.02
Boiler #4	<0.05	6.26	<0.05	7.4	0.34
SDR #5	<0.05	0.16	<0.05	17.2	0.07
Bag filter #6	<0.05	0.44	<0.05	685	84.7

Table 5. Variation of pellet density with calcination temperature (unit: gr/ml)

Calcination Temperature	SMF-100		GP-1	
	Before calcination	After calcination	Before calcination	After calcination
1,000°C	0.926	0.969	0.829	1.336
950°C	0.921	0.931	0.816	0.995
900°C	0.914	0.888	0.809	0.826
800°C	0.910	0.841	0.846	0.761
600°C	0.933	0.868	0.845	0.744

가 관찰되었다. 특히, 생활폐기물 소각재의 경우 바닥재에서 Pb 용출이 문제가 되는 경우도 있으나, 본 실험의 ASR 바닥재에서는 이러한 현상은 관찰되지 않아 바닥재의 경우 별도의 세척공정이나 aging을 거치지 않고도 리사이클링이 가능함을 알 수 있었다.

3.2. ASR 소각재를 사용한 경량재료 제조

본 실험에서 대상 시료로 사용한 여섯 종류의 ASR 소각재 가운데 바닥재 두 종류는 우선 물질 구성이 불균일하고 또한 입도분포가 매우 넓기 때문에 이들 소각재를 재활용하기 위해서는 분쇄 및 입도분급 공정을 거쳐야만 한다. 실제로 외국이나 국내의 일부 생활폐기물 소각장에서는 바닥재 재활용이 상용화되어 있기도 하다. 비산재의 경우 SDR #5와 Bag filter #6 시료는 앞에서 언급한 것처럼 수용성물질을 다량 함유하고 있어 물질재활용을 하기에는 현실적으로 다소 어렵다고 생각된다. 따라서, 본 실험에서는 재질 구성이 비교적 균일하고 입도분포가 넓지 않은 Boiler #4 시료를 주원료로 하여 경량재료를 제조하고자 시도하였다.

Table 5는 ASR 소각재(Boiler #4) : 경량물질 : 벤토나이트의 혼합비율을 5:2:3으로 하여 경량재료를 제조하였을 때 소성온도에 따른 밀도변화를 보여주고 있다.

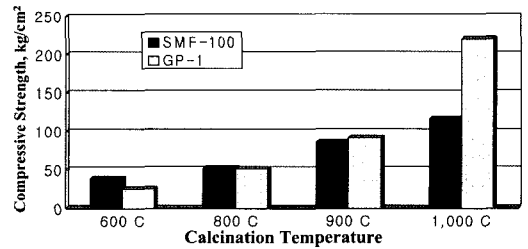


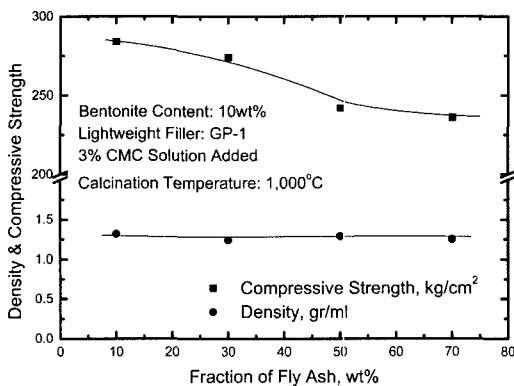
Fig. 4. Effect of calcination temperature on compressive strength of pellet.

Table 5에서 보면 소성온도가 증가할수록 filler 물질로 SMF-100을 사용한 경우 밀도 증가율이 그리 크지 않으나 GP-1을 경량물질로 사용하는 경우에는 고온으로 갈수록 시편 밀도가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이것은 SMF-100을 사용할 때 고온 소성시 시편의 찌수변형이 크지 않으나, GP-1은 고온으로 갈수록 수축율이 크기 때문인데, 실제로 1,000°C에서 소성하게 되면 SMF-100은 시편 높이 및 직경 감소율이 4.5~4.9% 정도인 반면 GP-1은 17~19%의 감소율을 보였다. 따라서, 고온 소성시 경량물질로는 GP-1 보다는 SMF-100이 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 4는 SMF-100과 GP-1을 경량물질로 첨가하여

Table 6. Heavy metal leachability for lightweight pellet prepared in the work (unit: mg/l)

Calcination Temperature	Mixing Ratio(wt%) (Ash : GP-1 : Bentonite)	Cd	Pb	Cu	Pellet density, gr/ml
600°C	50 : 40 : 10	0.05	<0.2	<0.02	0.46
800°C	50 : 40 : 10	<0.02	<0.2	<0.02	0.47
1,000°C	30 : 60 : 10	<0.02	<0.2	<0.02	1.20
	50 : 40 : 10	<0.02	<0.2	<0.02	1.22
	70 : 20 : 10	0.07	0.46	<0.02	1.25
	90 : 0 : 10	0.20	2.01	0.05	1.34

**Fig. 5.** Effect of fraction of fly ash on compressive strength and density.

고온에서 소성한 시편의 압축강도 변화를 보여주고 있다. 소성온도가 증가할수록 압축강도는 상승하는 것으로 나타나 800°C에서의 압축강도는 약 50 kg/cm² 정도 이나 900°C 이상에서는 크게 증가하여 1,000°C에서 소성한 시편은 100 kg/cm²을 상회하는 것으로 나타났다. 특히, GP-1의 경우에는 1,000°C 소성시 200 kg/cm² 이상의 압축강도를 보였는데, 이것은 시편이 크게 수축하면서 강도를 증진시킨 것으로 판단되고 있다. 그러나, 900°C 이하의 소성온도에서는 SMF-100과 GP-1의 압축강도가 크게 차이가 나지 않았다.

Fig. 5는 무기바인더인 bentonite 함량을 10 wt.%로 고정하고, 소각재 함량을 10~70 wt.%까지 변화시키면서 성형한 시편을 1,000°C에서 소성하였을 때의 압축강도와 밀도변화를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 소각재 첨가량이 증가하게 되면 압축강도는 감소하는 것으로 나타났으나 밀도에 있어서는 큰 차이가 관찰되지 않았다. 따라서, 경량재료의 강도가 중요하게 적용되는 경우에는 소각재 함량을 조절하여야 함을 알 수

있었다.

한편, Table 6은 Boiler #4 소각재를 원료로 사용하여 제조한 시편을 대상으로 공정시험법에 의한 중금속 용출량을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 표에서 보는 것처럼 소각재 함량 30~90 wt%의 첨가범위에서 Cd, Pb, Cu의 용출량이 원래의 Boiler #4 시료에 비해 급격히 감소하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 소각재 함량이 70 wt% 이상에서 Cd와 Pb 용출이 관찰되기는 하였으나 이는 모두 환경 기준치 이하로써 문제가 되는 수준은 아닌 것으로 나타났다. 이것은 소각재에 함유된 중금속 성분이 시편으로 성형되고 고온소성되는 과정에서 불용성 화합물로 안정화되었거나 혹은 무기바인더 등에 의해 encapsulation되면서 용출이 억제되기 때문¹²⁾으로 풀이되고 있으며, 이와 같이 소각재를 원료로 사용하여 경량재료를 제조하는 경우 부분적으로 중금속 용출억제 효과를 기대할 수 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

폐자동차 ASR의 소각재를 대상으로 물리화학적 물성측정과 리사이클링을 위한 경량재료 제조실험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 바닥재중의 Cu 함량이 폐전선으로 인하여 각각 2.7 wt% 및 3.4 wt%로 상당히 높은 것으로 나타나 바닥재로부터 Cu의 사전 분리회수가 필요한 것으로 판단되었다. 수용성물질을 많이 함유한 SDR #5와 Bag filter #6의 주성분은 각각 CaCl₂ · Ca(OH)₂ · H₂O 및 CaCl₂ · 4H₂O 인 것으로 나타났다.

(2) 비산재의 평균입자 크기는 Cyclone #3>Boiler #4>SDR #5>Bag filter #6의 순서로 나타났으며, 특히 Bag filter #6의 경우 0.4 μm 미만의 매우 작은 입자들이 분포하고 있는 특징을 보였다. 소각재 시료의 pH는

대체로 알칼리성의 pH를 보였으며, SDR #5와 Bag filter #6은 12.06 및 11.80으로 강알칼리성으로 나타났다.

(3) 공정시험법에 의한 중금속 용출시험 결과, 바닥재 두 종류와 비산재인 Cyclone #3에서는 중금속 용출량이 모두 기준치 이내로 검출이 되는 것으로 나타났으나, Boiler #4, SDR #5 및 Bag filter #6에서는 Cd, Pb, Cu 용출량이 기준치를 상회하는 경우가 관찰되었다. 그러나, Boiler #4를 원료로 사용하여 제조한 경량재료 시편의 경우 중금속 용출이 크게 감소하였으며, 이것은 중금속 성분이 불용성 화합물로 안정화되었거나 encapsulation 되기 때문으로 판단되었다.

(4) SMF-100과 GP-1을 경량물질로 첨가하여 경량재료를 제조하였을 때 소성온도가 증가할수록 압축강도는 상승하여 1,000°C에서 소성한 시편은 100 kg/cm²을 상회하였으며, 특히 GP-1의 경우에는 200 kg/cm² 이상의 압축강도를 보였다. 그러나, 900°C이하의 소성온도에서는 SMF-100과 GP-1의 압축강도가 크게 차이가 나지 않았다.

감사의 글

본 연구는 서울시 혁신 클러스터 지원사업으로 수행되었으며, 서울시의 연구비 지원에 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 이화영, 오종기, 김성규, 2002: 폐자동차 파쇄를 통한 주요구성물질의 분리 및 분석평가, 자원리사이클링, **11**(4), pp. 11-16.
- 이화영, 오종기, 김성규, 2003: 폐자동차 파쇄 잔류물을 이용한 고체연료의 제조연구, 자원리사이클링, **12**(4), pp. 58-64.
- 이화영, 오종기, 2005: 폐자동차 ASR의 풍력 및 비중선별에 의한 처리연구, 자원리사이클링, **14**(2), pp. 3-9.
- Jody, B. J. *et al.*, 1990: Recycling of plastics in automobile shredder residue, U.S. DOE Report, DE90-011110, pp. 1-5.
- Numajiri, I., 2000: Current situation and tasks of disposal of end-of-life vehicles, 資源と素材, **116**, pp. 879-888.
- Babu, D. S., Babu, K. G., and Wee, T. H., 2005: Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, **35**, pp. 1218-1223.
- Tay, J. H. and Show, K. Y., 1997: Resources recovery of sludge as a building and construction material, *Water Science and Technology*, **36**(11), pp. 259-266.
- Cheeseman, C. R. and Virdi, G. S., 2005: Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, *Resources, Conservation & Recycling*, **45**, pp. 18-30.
- Cheeseman, C. R., Makinde, A. and Bethanis, S., 2005: Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, *Resources, Conservation & Recycling*, **43**, pp. 147-162.
- Pecqueur, G., Crignon, C. and Quenee, B., 2001: Behavior of cement-treated bottom ash, *Waste Management*, **21**, pp. 229-233.
- 환경부 고시 제 96-32호, 1996: 공정시험방법, 동화기술, pp. 417-418.
- 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.

李 華 永

- 현재 한국과학기술연구원 2차전지연구센터 책임연구원
 - 당 학회지 제10권 4호 참조
-