

도시고형 폐기물 소각재의 무해화 처리와 응용

A Treatment and Construction Use of Municipal Solid Waste Ash

이 재 장*
Lee, Jae-Jang

신 희 덕**
Shin, Hee-Duck

박 종 력***
Park, Chong-Lyuck

Abstract

Many cities and provinces are rapidly depleting landfill spaces. As the result, some municipalities have adopted to incinerate their municipal solid waste(MSW).

The motive behind the choice is that incineration significantly reduces the volume of solid waste in need of disposal, destroys the harmful organic compounds that are present in MSW, and provides an attractive source of alternative energy. Conclusively, the generation of MSW ash is expected to increase in the future. However, disposing the MSW ash in landfills may not always be an environmentally or an economically feasible solution. This paper addresses the various issues associated with MSW ash and its possible use in construction applications.

키워드 : 도시고형폐기물, 소각재, 유기물, 매립

Keywords : *municipal solid waste, incineration ash, organic compound, landfills.*

1. 서론

오늘날 도시고형폐기물의 발생량이 인구 증가와 소비생활의 향상으로 급격히 증가하고 있다. 그러나 국내의 도시폐기물은 대부분 매립에 의존하고 있는바 국토면적이 좁고 공해문제로 인한 지역주민의 반대로 매립지 확보가 극히 어려운 지경에 있다.

이에 대한 대책으로 소각방법을 적용함으로써 폐기물 매립지의 사용연한을 연장시키고 폐기물 중에 함유된 유기물질을 대부분 분해하여 매립지의 안전화를 꾀할 수 있다. 뿐만아니라 소각에서 얻어지는 폐열을 회수이용하는 시설이 증가되고 있는 추세를 보이고 있어서 도시 고형폐기물 소각재의 처리는 자원화와 환경보전 측면에서 적극 개발 필요가 있다.

소각재의 재활용을 위해서는 소각재 중에 함유된 중금속류와 염소성분을 어떻게 제거할 것인가가 핵심기술이라 할 수 있는데, 저비점(低沸點)의 중금속류는 배가스 중에 휘산된 후 배출가스장치에 포집되는 등 응용고화처리 방법으로 외부용출을 억제할 수 있게 된다.

따라서 본 논문에서는 도시고형 폐기물 소각시에 발생하는 소각재의 무해화 처리와 그 잔사의 건설재료로의 활용기술동향을 소개하고자 한다.

2. 국내 소각재 발생상황과 성상

국내 도시폐기물 소각로에서 발생하는 소각재는 처리량의 10~20% 정도이며 그 대부분을 매립처분에 의존하고 있어서 매립지의 수명단축은 물론 유해물질 용출로 인한 지하수 및 토양오염에 무방비 상태이다.[1]

* 강원대학교 지구시스템공학과 교수
** (주) 자원테크
*** 강원대학교 지구시스템공학과 대학원

Table 1. Generation of incineration ash in korea.[2]

unit : 1,000ton/year

Total	Residential waste	Commercial waste	Remark
3,793 (100%)	122 (3%)	3,671 (97%)	Incineration ash is about 15% of waste occurred in 1997

Table 2. Distribution of Pb, Cd, Cr⁶⁺ in incineration ash.[3]

Incineration ash (mg/ℓ)	Content	Pb	Cu	Cd	Cr ⁶⁺	Moisture(%)	Density(g/cm ³)
	Bottom ash		1.4	0.2	ND	0.07	22.9
Fly ash		1.7	0.2	ND	0.09	0.5	0.45

Table 1에 의하면 전국의 소각재 발생량은 122천톤/년(1997년 기준) 정도 발생 되었는데 그중 바닥재(bottom ash)는 일반폐기물 매립장에서 그리고 비산재(fly ash)는 지정폐기물 매립장에서 각각 최종 처분된다. 그리고 소각재 처리비용은 바닥재의 경우 30,200~33,200원/톤, 비산재는 15,400~125,400원/톤으로 현재 약 1천억원/년으로 추정되고 있다.

3. 중간고화기술

3.1 용융고화법

용융고화기술은 연료의 연소열 및 전기에서 얻어진 열에너지 등으로 소각잔사 등의 일반폐기물을 1200℃ 이상의 고온하에서 가열하여 피고용물 중의 유기물을 열분해·가스화, 연소시킴과 동시에 무기물을 용융한후, 용액을 냉각고화하여 유리질 또는 결정질의 고화물(용융슬래그)로 하는 기술이다.

Table 2는 바닥재와 비산재 중에 존재하는 Pb, Cu, Cd, Cr⁶⁺의 화학분석치를 나타낸 것이다.

소각과정에서 다이옥신류는 소각로본체 및 연소가스의 냉각·집진과정에서 생성되는데, 소각잔사 중에 함유되는 다이옥신류는 용융할 때 고온조건에 열분해, 연소하고 슬래그 중에 잔존하는 일은 거의 없다.

또한 소각잔사 중에 함유된 중금속류 저비점의 중금속류(Hg, Pb, Cd, Zn 등)는 가열·용융시에 휘산하고, 배가스 중에 옮겨가기 쉬운 용융슬래그 중의 함유량은 저감한다.[4]

3.1.1 용융특성

용융조작에는 경제성, 처리성의 관점에서 폐기물 중의 무기성분의 용융점이 낮고, 유액의 배제가 용

이해지는 용류성이 높은 것을 필요로 하는데, 이 용류성은 소각잔사 중의 무기성분에 좌우된다.

Fig.1에 각종 용융로에서 용융된 슬래그, 고로슬래그, 쇄석의 성분을 나타내었다. 즉 소각잔사의 주성분은 SiO₂, Al₂O₃, CaO 이고 무기성분 중의 약 70%를 점하며, 기타 Fe₂O₃, Na₂O, MgO, P₂O₅, 등이 함유되어 있다. 일반적으로 순수물질의 용점은 높아서 SiO₂에서 1710℃, Al₂O₃는 2050℃, CaO는 2570℃인데 이는 무기성분 조성의 변동에 따라 변화한다. Fig.2에 인공회의 조성을 변동시켜 microheating 법에 의해서 용융점을 측정된 결과인데, 염기도(CaO/SiO₂)가 1.0 부근에서 저용융온도역이 존재한다.

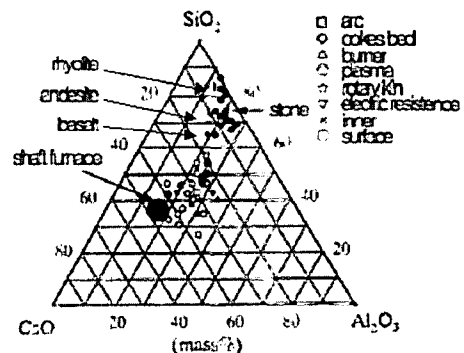


Fig. 1. The relationship between content of municipal solid waste molton slag, shaft furnace slag and stone.[4]

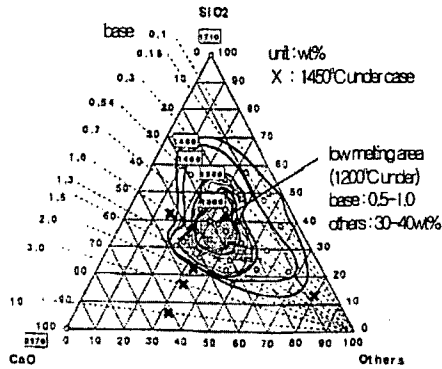


Fig. 2. The isomelting line of artificial ash.[5]

3.1.2 용액의 냉각방법과 슬래그 물성

용융로에서 배출되는 용액의 냉각속도에 따라 냉각고화된 슬래그의 물성은 변화한다. Fig.3은 용액을 냉각 했을때 물질의 물체적(1 몰당 체적)과 온도관계의 관계를 나타낸 것이다. 용액을 고온에서 냉각하면 유리처럼 점성이 높은 물질은 용융점 T_m 에서 결정화 되지 않고 과냉각 액체 상태가 된다. 과냉각액체 중의 각 원자는 온도변화에 대응하여 안정한 상태로 배치를 이동하므로 A, B, C 경로 체적은 감소한다. 원자배치의 이동이 온도변화를 따라가지 못하면 유리전위점(T_g)에서 과냉각 액체로부터 유리로 변화한다. B-C 사이의 냉각속도를 원자가 안정한 결정구조의 배치로 이동하는 속도로 제어하여 냉각하면 결정화가 진행된다.⁵⁾

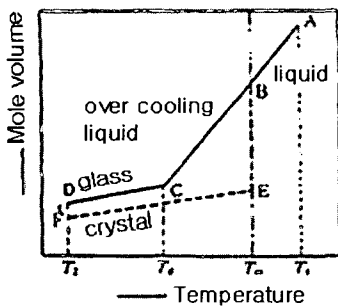


Fig. 3. Change of temperature for crystallization and glaze by cooling of solution.[4]

3.2 시멘트 고화법

3.2.1 시멘트에 의한 안정화

시멘트계 재료는 생석회(CaO), 실리카(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3)을 주성분으로 하여 제조하고 있고,

그 중에서도 고알카리성 생석회분이 최다성분이다. 이러한 성분은 배가스처리에서 중화제에 소석회를 사용한 경우의 비산재와 다른 성분으로 되어 있다. 이러한 성분은 배가스 처리에서 중화제로 소석회를 사용한 경우의 비산재와 조성이 다르다. 소각재를 고화할 때의 시멘트첨가량은 안정화할 회중량의 15~25%가 되는 많은 량이고, 비산재에 수경성을 부여한 정도가 되어 통상의 시멘트 고형화와는 근본적으로 큰 차이는 없게 된다.

따라서 시멘트고화에 의한 중금속의 고정형식은 다음과 같이 요약된다.

- 소석회성으로 불용성 수산화물 생성
- 시멘트광물 생성시 Ca 혹은 Al과의 치환, 고용체 생성
- 생성수화물의 층사이에 흡착
- 물리적 코팅

가장 효과가 큰 수산화물의 생성에는 Pb와 같은 양성금속은 효과가 작고 개량책으로 미리 황화물을 작용시키는 방법, 시멘트를 개량한 시멘트계 고화제에 의한 방법, pH조절제 첨가 등이 제안되고 있다.⁷⁾

3.2.2 시멘트계 고화법의 특징

시멘트 고화법은 이전에 개발되어 보급된 기술로 널리 행하여져 왔으나, 장기적인 시야에서 시멘트의 중성화, 중금속, 염성분, 나아가서는 다이옥신류의 용출등의 검토해야 할 과제가 많다.

3.3 시약 혼련법

3.3.1 시약 혼련법의 종류와 기구

시약에는 무기계와 유기 킬레이트계가 있는데 모두 시멘트 고화와 같은 실비로 안정화가 가능하다. 무기계는 pH조절제와 병용하는 경우가 많고, 킬레이트계에서는 단독 시약 첨가가 주류를 이룬다. 무기계 시약의 Pb를 비롯한 중금속 안정화 기구는 다음과 같다.

- 난용성 인산염을 생성
- pH 완충작용을 갖는 인산성분이 소각재의 pH 변동 등에 어느 정도까지 대응가능

킬레이트는 디티오칼바민산기를 대표하는 관능기의 질소성분과 유황성분이 Pb등에 작용하고, 킬레이트결합을 일으켜 안정화하는 것이다.

3.3.2 소각재의 변동과 시약 혼련

시약 혼련에는 무기계, 킬레이트계를 가리지 않고 비산재 혹은 바닥재의 재료를 물을 매개로 하여 혼합하는 방법이다. 이것은 고화성의 소각재에 시약을 혼합하는 화학반응이므로 주의를 요한다. 예를들면, 금속 알루미늄을 함유한 알카리성의 소각재에 물을 첨가함으로써 수소가스가 발생하여

폭발 사고가 발생한 예도 있다. 또한 소각재에는 조성 성분의 변화가 심하여 중금속 함유량 변동에 주의를 요한다.

3.3.3 시약 혼련물의 장기안정성

시멘트 고화에는 장기적인 안정성은 중성화에 의한 붕괴, 중금속성분의 용해가 염려되나, 시약에 의한 안정화에는 시멘트 고화만큼 장기적인 추적 조사는 행하여지지 않아 금후 다이옥신류의 용출을 포함한 장기적인 시약에서 검토가 필요하다.

3.4 산추출법

본 기술은 주로 비산재나 바닥재에 산을 작용하여 유해물을 용출시켜 소각재에서 제거하는 방법이다. 용해한 유해물을 수산화물, 황화물 혹은 킬레이트약제로 폐액처리를 행하는 설비도 필요하게 된다. 이 방법은 중금속 용출에 문제가 없다.

산추출법에 의한 염화나트륨 회수의 실증플랜트 운전결과와 문제점을 다음과 같이 요약된다.

- 가) 비산재와 폐수의 두가지를 일괄처리가 가능하여야 한다.
- 나) 염화나트륨의 자원회수성이 확인되어야 하고, 중금속의 자원회수 가능성이 있어야 한다.
- 다) 기기의 유지관리가 비교적 복잡하다.
- 라) 현재의 주류를 이루고 있는 건식배기가스 처리에서는 자원회수를 위한 운전관리는 역시 복잡화 되고 있다.

금후에는 공정의 간소화 및 다이옥신류의 취급도 목표에 넣어 더욱 연구하여 자원회수성의 장점을 살리는 것이 필요하고, 특히 소각재 용융시에 포집되는 용융 비산재는 중금속이 농축되기 때문에 회수된 유기금속의 품위, 분리성에 대하여 연구가 추진되고 있다.

4. 용융슬래그의 이용

4.1 용융슬래그의 특성

용융슬래그는 소각잔사의 조성, 용융로형식, 용액의 냉각방법 등의 요인에 따라 성질이 다르므로 이용시에도 재료·제품으로서의 신뢰성이 변화되게 되므로 유의할 필요가 있다.

Table 3에서 보인 바와같이 수냉슬래그의 겉보기비중은 2.7정도로 천연사의 일반치인 2.6~2.7에 비하여 약간 무겁고, 흡수율은 천연사의 1.5~2.5%보다 치밀도가 낮다. 마모감람치는 아스팔트 포장요건의 하층로반재 규격치인 50%를 만족하고 있다.

4.2 자원리사이클성 평가

전술한 4가지의 중간처리법에서 자원리사이클성을 비교하면 시멘트 고화법과 시약 혼련법은 자원리사이클성이 전혀 없는 것으로 평가되고 있다.

용융고화법은 슬래그, 철입자, 용융 비산재가 모두 리사이클성이 있다. 용융 비산재는 용융처리에서 발생한 중금속을 물리화학적 농축으로 형성되는데 이와 상대되는 것이 산추출의 화학농축이다. 이들 두가지 방법을 조합하면 자원리사이클링 면에서 보다 효과적이라 할 수 있다.

비산재 중에 많이 함유된 금속은 Zn, Ti, Pb, Mn, Cu, Cd, Cr 등이고 그 중에서 Zn, Ti, Pb, Cu는 고갈될 염려가 있어서 특히 자원회수의 의의가 깊다.[6]

Table 3. Properties of slag

Content	Water cooling	Air cooling
Apparent density (g/cm ³)	2.74	2.8
Density (kg/l)	1.51	1.7
Absorption ratio (%)	60.5	54.8
Packing rate (%)	5.08	0.6
Stability (%)	1.3	0.2
Abrasion loss (%)	37.3	25.7
Max. dry density (t/m)	1.71	2.4
Optimum moisture content(%)	9.2	2.5

4.3 슬래그의 재활용

슬래그의 용도로는 다음과 같이 열거할 수 있다.

- ① 도로용 : 노상재, 노반재, 아스팔트혼합재
- ② 콘크리트용 : 모래, 자갈
- ③ 콘크리트 2차제품 : 인터로킹 블록, 투수성 블록, 평판 등
- ④ 성토재, 퇴매움재, 복토재
- ⑤ 요업원료 : 벽돌, 타일, 도판 등

용융슬래그는 수냉슬래그와 공냉슬래그로 분류되는데, 수냉슬래그는 소각회 용융로에서 나온 용융슬래그를 물로 급냉 함으로써 0.2~5mm의 입상으로 되어 있고, 공냉슬래그는 용융로에서 나온 용융슬래그를 받음접시에 받아 서서히 냉각함으로써 20~100mm의 부정형 덩어리로 형성된다.[7]

이들 슬래그의 이용방법으로 수냉슬래그는 되배 용재로 이용하는 경우와 같이 전혀 가공을 하지 않는 것과, 공냉슬래그의 노상재 및 불력용 골재로 이용하는 것처럼 간단한 입도조정을 행하는 것이 있다. 또한 상층노반재 및 표면의장용으로 이용하는 것처럼 보다 정교한 입도조정과 철분제거가 필요한 경우 등이 있다.

이상 다방면에 걸쳐 이용가능하다고 생각되나, 금후 과제로 유통루트의 확립과 저코스트화 그리고 광범위한 홍보가 필요하다고 보여진다.

5. 결론

본 논문에서 고형도시폐기물 소각재의 무해화처리와 그 처리에서 발생된 슬래그의 재활용에 대한 최근 기술동향을 고찰하였다. 도시폐기물 처리는 소각시설 건설과정에서 공해문제로 소각장 후부지 인근주민의 반발이 심하여 업무처리에 난관을 겪어야 했다. 그것은 무엇보다도 소각시에 발생하는 다이옥신과 같은 유독성 배기가스와 분진 그리고 소각잔재물의 유해성을 제거하여 주민에게 신뢰감을 주지 못한 것에 기인한다고 보여진다.

이러한 문제점을 보완하는데는 소각플랜트에서 배출되는 개스와 분진 및 잔재들의 처리문제가 개선 혹은 무해화하는 것이 필요하다고 보아, 이를 중점적으로 검토하여 나가는데 목표를 두었다.

본문 중에서 기술한 바와 같이 도시고형폐기물은 고화방법과 용융기술 등으로 처리하여 중금속의 용출을 방지할 뿐만 아니라 용융고화재를 건설용 자재로 활용할 수 있게된다. 이 방법은 환경문제와 자원재활용 면에서 밝은 전망을 보여주나 아직도 계속 연구개발의 여지가 많이 남아 있다. 즉 용융처리는 타방식에 비해서 공해방지와 슬래그 재활용면에서 우수하나 처리비용이 높고 용융온도가 1,300~1,500℃로 에너지 소비가 높다.

따라서 코크스로의 높은 배가스열량을 활용하거나 폐기물 소각발전에 의한 전력을 이용하는 방안도 검토하고 나아가서는 태양열, 풍력에너지를 도입하는 연구도 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 윤석표, 유희찬, 고석오, "도시쓰레기 소각료에서 발생한 비산재의 시멘트 고형화에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 제18권, 제6호, pp. 510-517, 2001
- [2] 환경관리공단, "국내소각재발생량 1997", 1998
- [3] 환경부, "환경연감", 1999
- [4] Momonoi, K., "Ash/Residue Melting Process",

- kakagu kokaku, vol.64, no.3, pp. 138-140, 2000
- [5] Ali, M. T., and Chang, W. F. "Strength properties of cement-stabilized municipal solid waste incinerator ash masonry blocks", ACI Mater. J., vol.91, no.3, pp. 256-263.
- [6] K.S. Rebeiz and K. L., Mielich "Construction Use of Municipal-Solid-Waste Ash", J.of Energy Engineering, Vol.121 NO.1 pp.2-13, 1995
- [7] (사)한국토목학회, "전기로슬래그를 사용한 도로포장 설계·시공지침" pp. 57-102, 1997