

생활폐기물 소각재의 처리

1. 서론

생활폐기물의 처리 현황은 1995년에는 매립이 72.3%, 소각이 4.0%, 재활용이 23.7%였으나, 매립비율은 꾸준히 감소하였고 소각 및 재활용의 비율은 지속적으로 증가하여 2001년에는 매립이 43.3%, 소각이 13.6%, 재활용이 43.1%로 처리구조가 개선되었다. 그러나 생활폐기물의 가연성 물질이 50% 이상임을 감안하면 소각에 의한 처리를 더욱 증가시키는 것이 바람직하다고 판단된다.

소각비율이 점차 높아짐에 따라 소각한 후 잔재물의 발생량도 더욱 증가될 전망이다. 생활폐기물 소각재의 발생량은 대체로 소각시설로 반입된 생활폐기물의 약 20wt.% 정도 발생하며 발생한 소각재의 약90wt.%는 바닥재(bottom ash)로, 10wt.%를 비산재(fly ash)로 추정하고 있다. 이러한 계산을 기초로 하면 생활폐기물의 소각비율이 약 13.6wt.%였던 2001년에 소각재는 약 40만 톤이 발생했으며, 이 중 바닥재는 약 35만 톤, 비산재는 약 5만 톤이 발생한 것으로 추정된다. 정부는 2011년까지 생활폐기물 소각비율을 30wt.%까지 증가시킬 예정이다. 따라서 2001년 이후 생활폐기물 발생량이 큰 변화가 없고 소각비율이 2%씩 증가할 것이라고 예상할 경우 소각재의 발생량은 매년 약 10%씩 증가하여 2008년에는 약 100만 톤으로 증가할 것으로 추정된다.

비산재는 중금속 용출량이 허용기준치를 초과하여 고형화/안정화 등의 중간처리를 거쳐 매립하고 있다. 바닥재는 주로 철, 유리, 도자기 등으로 구성되어 있기 때문에 적절한 전 처리를 함으로써 재활용이 가능하지만 국내에서는 이들을 주로 매립처리하고 있다. 그러나 2차 오염물질의 방출, 지역이기주의 등에 따라 매립지의 확보가 어려워지고 있으며 자원의 재이용이라는 측면에서 바닥재의 재활용을 위한 기술 및 정책의 개발이 절실히 필요하다. 반면에 독일, 덴마크, 네덜란드 등 유럽에서는 바닥재를 도로건설의 경량 골재로 이용하거나 아스팔트 또는 콘크리트의 골재로 바닥재의 60~90%를 재이용하고 있다.

본 보고서에서는 생활폐기물 소각장에서 발생한 소각재 중 바닥재를 대상으로 하여 물리적,기계적 성질 및 조성 등의 제반특성과 국내의 소각재 발생 현황, 국내외 바닥재 재활용 기술 및 재활용 현황 등을 검토하여 국내의 현실에 적합한 바닥재의 처리 방안을 제시하고자 하였다.

소각재라는 용어와 잔류물이라는 용어는 종종 교체되어 쓰이고 있다. 그러나 소각재는 완전히 연소된 후 남아 있는 물질을 말하며 잔류물은 소각재이외의 소각되지 않은 물질, 스크러버(scrubber) 슬러지, 공기오염 제어시스템에서 반응하여 생성된 물질 등을 포함한다. 따라서 기술적 관점에서 보면, 소각재는 잔류물에 포함된다. 잔류물은 바닥재, 공기오염 제어 잔류물, 혼합재(바닥재, 공기오염 제어 잔류물, 및 열회수 소각재의 결합물질)의 세 가지 분류가 사용된다. 대부분의 유럽 국가들과 캐나다 및 국내에서는 바닥재와 공기오염 제어 잔류물을 구분하여 배출한다.

잔류물 중 바닥재는 연소 설비, 작동 조건 및 연소되고 있는 폐기물의 특성에 따라 차이가 있지만 생성된 잔류물의 약 80~90%이다. 바닥재는 슬래그, 철 및 비철금속, 세라믹, 유리, 기타 불연성 물질 및 다른 타지 않은 유기물의 혼합물로 구성되어 있다. 큰 덩어리들을

제거하면 다공성이면서 회색을 띤 실트 같은 모래 및 자갈의 외형을 갖는 물질만이 남게 된다. 비산재는 공기오염 제어장치에 의해 수집된 아주 미세한 입자와 배기가스를 처리하기 위해 사용되는 화학물질로부터 나온 잔류물로 구성된 것으로 전체 소각재의 약 10~20%를 차지한다. 혼합재는 바닥재가 주요 구성 물질이므로 바닥재의 성상과 매우 유사하다.

소각장의 배기가스 처리시설은 소각로 형식 및 설비에 따라 조금씩 차이는 있으나 크게 반건식과 습식으로 구별한다. 현재 가동 중이거나 설치공사 중 또는 향후 예정 소각장에서는 모두 다이옥신을 제거하는 설비를 갖추고 있으며 계속해서 추가설치 또는 보완을 하고 있다. 소각장에서 배출되는 소각재는 크게 바닥재와 비산재로 나눌 수 있고 이 중 바닥재는 거의 전량 매립되고 있다. 비산재는 대부분 킬레이트 화합물로 안정화처리한 후 일반폐기물 매립장에 매립하고 2001년말 기준 전국 26개 소각장에서 바닥재는 약 25만 톤, 비산재는 약 4만 9천 톤 발생한 것으로 나타났다.

2. 생활폐기물 소각재의 특성

이 장에서는 생활폐기물 소각재의 물리적, 화학적, 공학적 특성에 대해 기술하고자 한다. 바닥재 및 혼합재는 몇몇 재활용에 필요한 물리적, 기계적 특성을 갖고 있기 때문에 콘크리트 건축 블록, 고속도로 건설, 해변 침식 보호장치, 아스팔트 포장, 충전제 및 매립지의 복토재 등으로 사용되고 있다. 소각재 특히 바닥재의 경우 다이옥신, 푸란(furan), 기타 유기물이 포함되어 있지만 이들의 재활용하는 데 문제가 되지 않는 것으로 예측되고 있다. 한편, 생활폐기물 소각설비의 구조, 작동조건, 처리되는 폐기물의 특성 및 기타 요인 등에 의해서 소각재의 특성이 다르기 때문에 이들 소각재를 재활용하기 위해서는 소각재의 특성을 완전하게 파악해야만 한다. 소각재는 생활폐기물의 계절별, 지리적 발생여건, 소각장치의 특성, 소각로 내의 발생지점에 따라 소각재의 물리적, 화학적 성질에서 상이함을 보여주기 때문에 이장에서는 생활폐기물 소각재 중 비교적 재활용이 용이한 바닥재 및 혼합재의 제반특성을 서술하였다.

가. 소각재의 물리적 특성

소각재 중 바닥재의 물리적 특성을 조사한 결과에 따르면 천연 골재 및 자갈의 특성과 매우 유사하므로 골재로의 재활용 가능성이 높다. 바닥재는 grate ash와 grate shifting으로 구분되며, 이 중 바닥재의 약 90%가 grate ash로 연소 과정 동안 스토커에 남아 있는 것들이고, 나머지 약 10%가 grate shifting이다. 소각 시설에서 발생된 철 및 비철금속은 대부분 회수되어 재활용되며 몇몇 시설에서는 비철 금속을 재활용률을 높이기 위해 소각재를 가공하기도 한다. 소각재의 물리적, 기계적 특성을 보게 되면 천연골재 및 자갈의 특성과 비교적 유사함을 알 수 있다. 바닥재, 비산재 및 혼합재의 성분의 분석결과를 보면 많은 양의 양이온이 존재한다. 그러나 소각 대상 물질인 생활폐기물의 변동이 큼에도 불구하고 각 이온의 함유량에 있어서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 바닥재에는 유리, 금속, 흙, 도자기 등이 존재하며, 암석학적으로 볼 때, 등방성(isotropic) 및 비결정질(amorphous) 혼합물과 결정질 광물을 포함하고 있다. 결정질 광물은 칼슘, 알루미늄, 마그네슘 그리고 철의 복합 실리케이트 화합물로 구성되어 있다. 생석회(CaO)와 자철석(magnetite, Fe₃O₄)과 같은 일반적인 산화물도 존재한다. 소각재는 자연 암석과 많이 유사하지만, 자연 암석과는 달리 약 6%의 수

용성 염을 포함하고 있다. 수용성 염의 함유량은 바닥재의 경우 3~14%이며, 비산재의 경우는 20~25%정도로 바닥재에 비해 많은 수용성 물질이 함유된 것으로 나타난다. 소각재 매립지로부터 나온 침출수는 음용수 기준에 가깝거나 그 이하의 중금속 농도를 보여주지만, 전체 용해된 염은 음용수 기준 이상의 높은 수준으로 검사되었다. 염은 주로 나트륨, 인, 칼슘의 염화물 및 황산염으로 구성되었으며, 소각공정의 마지막 단계인 바닥재를 물로 냉각시키는 공정에서 수용성 염이 많이 제거되며, 또한 소각재의 숙성이나 저장을 통한 화학반응과 자연 침출에 의해서도 수용성 염이 더 제거될 수 있는 것으로 알려져 있다.

나. 소각재의 유기 화학적 성질

소각재의 유기물에 대한 정보는 물리적 특성 및 무기물 성분에 비해 제한적이다. 또한, 연소 조건, 표본 기술, 분석 절차 등에 대한 정보가 부족하다. International Ash Working Group(IAWG)에 따르면 잘 소각된 바닥재의 유기물 함량은 2~4%의 범위에 이른다고 보고하고 있다. 소각재의 PCDD/PCDF의 농도는 입도 분포(큰 입자보다는 작은 입자에서 PCDD/PCDF의 농도가 높다), 연소 조건, 연료 가스에서의 미립자 탄소의 중량 비율, 보일러의 전면 끝부분과 비교한 후면 끝에서 소각재의 처리 비율 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. PCDD 및 PCDF의 농도는 바닥재보다 비산재가 더 높으며, 대부분의 현대 소각설비에서는 0.5 $\mu\text{g/g}$ 미만의 PCDD 및 PCDF가 바닥재에 함유되어 있으며 이는 약 10 $\mu\text{g/g}$ 의 전체 유독 등가물(1/TEQ)과 같다. 바닥재에 함유된 염화벤젠(CB) 및 염화페놀(CP)의 양을 보면 염화벤젠은 4~24 $\mu\text{g/g}$, 염화페놀은 9~164 $\mu\text{g/g}$ 로 total polyaromatic hydrocarbon (PAH) 농도는 100 $\mu\text{g/g}$ 미만이고 폴리염화비페닐(PCB)은 기술 유형에 상관없이 검출한계 이하인 10 $\mu\text{g/g}$ 미만이다. PCDD 및 PCDF의 유독성 및 발암성에 대해 보고한 New York State Energy Research and Development Authority(NYSERDA)의 연구에 따르면 기타 미량 유기 오염물질이 높은 농도로 검출되었음에도 불구하고, 그것들 중 어떤 것도 소각재의 잠재적인 건강에 위협을 가할 가능성은 거의 없다는 것으로 결론지었다. 그러나 소각재에 CB 및 CP가 존재할 경우 다이옥신(dioxin) 및 푸란의 생성을 초래할 수 있기 때문에 CB 및 CP에 대한 특별한 주의가 필요하다고 보고하였다. 또한, 보고서에서는 소각재 활용을 위한 환경적 또는 건강적인 결과를 평가할 때 바닥재에 함유된 다이옥신 및 푸란은 문제가 없다는 것으로 결론지었다. 하지만 매우 미세한 입자에 PCDD 및 PCDF가 농축되어 있기 때문에 미세한 입자를 함유한 바닥재의 경우에는 이들에 대한 주의가 필요하다고 보고하고 있다.

3. 처리기술

가. 소각재 처리

소각재의 처리 프로세스는 소각잔여물을 재처리하여 잔여물에 포함된 금속성 물질을 회수하고, 광물질을 원자재로 이용하는 데 그 의미가 크다. 소각재의 재활용 가치를 높이기 위해서는 무엇보다 먼저 체질(screening)을 통해 크기가 큰 물질들을 제거해야 한다. 큰 바닥재에는 주로 탄소함유량이 높은 불완전 연소물질로 구성되어 있기 때문에, 이들이 알루미늄, 납, 구리 등을 운반하는 기능을 하게 된다.

(1) 수세에 의한 바닥재 전처리

바닥재는 주로 건축재료나 금속재료의 회수를 통해 재활용된다. 생활폐기물을 소각한 후 발생한 바닥재는 먼저 수세하는 것이 일반적이며 이 간단한 공정을 통해 바닥재에 함유된 수용성 물질이 분리된다. 바닥재에 따라 차이가 있지만, 수냉조에서 대개 60℃의 물로 약 15분간 수세한다. 수세 과정에서 함수율은 20~30wt.%가 되고, 바닥재 벙커에서 자연탈수를 거치면서 함수율은 15~25wt.%로 낮아진다. 2~3개월의 중간저장고에서 보관하기 전에 수산화알루미늄과 같은 금속의 수산화물의 생성을 막기 위하여 약 3~4주의 기간 동안 계속해서 탈수해야 한다. 이 때 발생한 침출수는 배출가스의 습식처리수와 함께 폐수처리장으로 운반된다. 바닥재 전처리시설은 주 소각시설을 규모와 특성을 잘 고려해야 하는데, 바닥재 전처리시설의 중단으로 인한 소각로의 조업중단을 막기 위해 소각로부터 바닥재를 직접 운반할 수 있는 위치에 충분한 용량의 비상용 벙커가 필요하다. 소각재의 pH는 물과 접촉 시 9.5~12 정도이며, 이러한 환경에서는 대부분의 중금속 및 미량금속은 불용성이 되어 용출되지 않으나, 수용성 염은 상당히 용해되어 제거할 수 있다. 따라서 최근에는 중금속과 수용성염을 동시에 수세하여 제거하기 위한 연구들이 많이 수행되고 있다. 소각재의 수세공정은 물리적 공정 혹은 소각 바닥재의 숙성 공정을 조합하여 적용되는데, 다음과 같은 두 가지 기술로 구분된다.

(가) Integrated slag washing process

대부분 소각시설에서 바닥재의 수세공정은 온도가 높은 바닥재를 물이 채워진 수조에 침지시키는 것이다. 이 때 물은 증발되거나 탱크 아래로 배출된다. 수냉과정에서 수용성 염은 용해되고, 주입된 물과 수세 중인 바닥재가 상평형에 도달하게 되면 물을 교환하게 된다. 독일의 한 소각장의 경우, 소각재 1톤당 약 350ℓ의 물이 소요되고(L/S ratio, 1:1), 이 때 바닥재로부터 염소가 50% 제거된다고 한다. Integrated slag washing process의 장점은 설치비와 운전비가 저렴하고, 바닥재를 수냉할 때 발생한 세정수를 다시 배출가스 습식처리 장치의 세정수로 사용할 수 있다는 것이다.

(나) 2차 수세공정

2차 수세공정은 일반적인 생활폐기물의 소각공정 뒤에 오는 부가적 시설로 추가로 설치해야 하기 때문에 비용이 많이 소요된다. 소각 후 발생한 바닥재를 직접 혹은 일정기간 동안 숙성한 후에 2차 수세공정에서 처리한다. 일정한 기간 동안 바닥재를 저장한 후 2차 수세공정에서 탄산화와 황화반응이 이루어진다. 이것은 먼저 염소성분이 세척되고, 칼슘과 같은 중요한 성분들이 CaCO₃와 같은 상태의 불용성 염으로 안정화시킴을 의미한다.

나. 바닥재 처리

바닥재 처리의 경우 다음과 같은 세 가지로 분류할 수 있다.

(1) 기계적 처리

바닥재에 포함되어 있는 약 80~90%의 재활용 가치가 있는 성분을 기계적인 방법으로 분리한다. 통계에 의하면 1989년에서 1992년 사이 독일에서는 전체 바닥재의 약 50~60%가 재처리되어 도로건설 및 댐건설에 원자재 대용으로 사용되었다. 바닥재 구성성분의 약 7~9%에 해당하는 철(약 95% 이상)은 고철 처리설비로 운반되어 재활용을 하게 된다. 일반적으로 널리 사용되는 기계적 처리의 공정 순서는 스크린에 의한 큰입자의 선별과정을 거친

후 수작업에 의해 연소가 되지 않은 폐기물, 철 및 비철금속을 선별하고, 분쇄한 후 용도에 따라 사용 가능하도록 다시 스크린을 통하여 입자크기별로 분리된다. 현대식 설비에서는 비철금속(Al, Cu 및 합금들)을 전자장에 의하여 분리하는 시설이 설치되어져 있다. 근래에 건설했거나 새로 건설되어지는 소각장에는 바닥재의 처리설비가 함께 되어 있어 바닥재의 처리를 위한 운반과정은 생략되므로 처리비용을 절감하고 있다. 바닥재의 전 처리 설비를 통하여 분리된 비철금속과 철은 재사용하기에 전혀 품질의 문제가 없으며, 재처리된 광물질은 도로용 자재로 재활용된다.

(2) 세정 및 안정화에 의한 처리

바닥재에 함유되어 있는 수분을 제거하여 바닥재의 부피를 줄이고, 물에 잘 녹지 않는 중금속들의 안정화시키기 위해 대략 3~4개월 동안 바닥재를 저장한다. 이 때 발생하는 폐수(침출수)는 지하로 흐르지 않도록 차단하여 처리한다. 이 방법으로 바닥재에 함유된 유해성분이 현저하게 제거됨이 이미 증명되었다. 바닥재에 10% 정도 함유된 CaO는 속성에 의해 Ca(OH)₂를 형성되고 철과 비철금속이 이들에 의해 산화되기 때문에 이들은 철과 비철금속의 재활용에 방해가 된다. 이러한 산화반응을 방지하기 위해서는 바닥재를 안정화하기 전에 먼저 철, 비철금속 등을 선별하는 것이 바람직하다.

(3) 열처리

기계적 처리방법과 세정방식을 연계하는 것이 효과적이라는 연구결과가 있다. 따라서 소각장에서 발생하는 바닥재의 전 처리공정은 분쇄 공정, 입자크기별 분리공정, 철 및 비철금속 분리공정 그리고 비중차에 따라 여러 성분으로 분리시키는 습식공정으로 조합으로 설계되어진다. 마지막 단계인 습식 처리공정에서 많은 양의 수용성 물질이 물에 녹게 된다. 그러나 이러한 3가지 방법을 통하여 바닥재를 전 처리할 경우, 처리과정에서 수질오염을 유발할 수도 있고, 건설자재로 사용 시 환경에 영향을 끼치는 유해성분(염, 중금속, 독성 유기물질) 등이 함유되어 있을 수 있다. 이 방법은 소각재에 포함되어 있는 유해성분을 완전히 제거하거나 100% 안정화시키는 것이다. 1,200~1,400℃ 이상에서 소각재를 열처리하여 쉽게 휘발하는 중금속과 염 등을 모아 안정화시키고, 동시에 유해 유기물질은 고온에서 완전히 산화되어 제거되며 이와 같은 방법으로 처리된 소각재는 유리의 원료로 사용된다.

다. 처리공법

소각재의 처리공법은 소각재(슬래그, 비산재, 반응 부산물)의 물리적 선별, 세정, 용융방법을 기준으로 구분한다. 이 때 비산재와 반응 부산물은 슬래그와 반드시 분리해서 처리할 것을 권장하는데, 세정, 용융에 의한 일부공법은 모든 소각재에 동일하게 적용 가능하며 주요 처리 방법은 아래와 같다.

. 선별공법은 슬래그로부터 금속성분을 회수하고, 불완전하게 소각된 성분을 분리한 다음, 나머지 슬래그를 도로건설에 재활용하기 위한 분류방법이다.

. 고정화공법은 비산재와 반응부산물에 적용할 수 있는 것으로, 잔류물의 저장 시 응집제를 첨가하여 유해물질을 고정화시키기 위한 공법이다.

. 세정공법은 환경친화적 저장, 매립 및 재활용을 개선하기 위하여 수용성염과 중금속을 씻어 내는 방법으로 비산재와 반응부산물에 함유된 수용성 염을 제거하기 위한 방법이다.

. 건축재료생산은 비산재와 반응부산물로부터 직접 재활용 가능한 원료를 생산하는 방법으

로 공법에 따라 건축재료를 직접 생산하거나, 예를 들어 용융공법과 같은 다른 처리방법과의 조합으로 건축재료를 생산하게 되는데, 이 방법은 재활용 재료가 최종적으로 사용되는 경우에 제한적으로 적용 가능하다.

- . 저온공법은 비산재에 함유된 유해성 유기물질을 제거하기 위하여 사용되는 방법이다.
- . 용융공법은 슬래그와 잔류물을 용융을 통하여 재활용 가능한 재료를 생산하기 위한 방법으로 특히 슬래그와 비산재의 부피를 줄이는 장점이 있다.