바텀애시의 재활용을 높이기 위하여

For Enhancing the Recycling Rate of Bottom Ash

김진만* Jim-Man Kim

곽은구** Eun-Gu Kwak

선정수*** Joung-Soo Sun

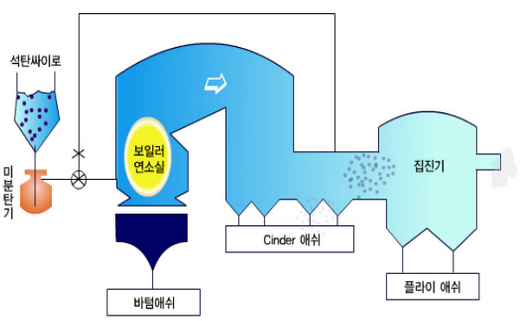
1. 서언

국내 화력 발전소의 전력 생산량은 27만 8400GWh(2010년도 기준)로 전체 발전 전력량의 65%를 차지하고 있는 매우 중요한 전력원이다. 화력발전의 열원은 석탄이며, 분탄 형태로 사용된다. 보일러에서 연소 후 석탄은 연소되지 않은 일부 탄분(미연탄)과 석탄에 혼합되었던 불순이 혼합된 석탄회를 부산물로 배출하게 된다. 석탄회는 비산재인 신터 애시(Cinder Ash)와 플라이애시(Fly ash)와 바닥재인 바텀애시(Bottom ash)로 구분된다.(그림 1 참조) 석탄재는 2010년 기준으로 730만 ton 정도가 발생되는 것으로 보고되고 있다.

이 석탄재 중 바텀애시는 화력발전소 유연탄 연소 과정에서 발생되는데 보일러 노벽, 과열기, 재열기 등에 부착해 있다가 자중에 의해 보일러 바닥에 떨어지는 Ash로서 플라이 애시에 비해 크기가 큰 덩어리상으로 배출되며, 총 석탄회 발생량의 10~15%를 차지하고 있다.

* 공주대학교 건축학부, 공학박사
Kongju National University, Architecture
E-mail :jmkim@kongju.ac.kr
** 공주대학교 친환경콘크리트연구소, 연구원
Research Center for Environment-Friendly Concrete, Kongju National University
*** 공주대학교 건축학부, 대학원
KongJu National University, Architecture

플라이 애시는 정제 설비를 갖출 경우 콘크리트용 혼화재료로 포졸란 반응 특성을 활용하여 재활용되고 있으나, 바텀애시는 일부 도로 기층포장재, 운동장 바닥 채움재 및 내화벽돌 제조에 일부 사용되고 있을 뿐 플라이 애시에 비해 상대적으로 재활용율이 매우 낮기 때문에 바톰 애시의 특성에 맞는 재활용 용도의 개발이 필요한 실정이다.(http://www.coalash.or.kr)



[그림 1] 석탄재의 종류 및 발생 공정

그림 2는 바텀애시의 매립지인 해사장의 전경을 보여주는 것이다. 사진 속에서 검은색의 긴 띠는 애시의 비산을 방지하기 위해 살수하기 위해 설치한 관로이다. 담수는 많은 비용이 소요되므로 입수하기가 용이한 해수를 용수로 사용하고 있다. 이와 같이 해수를 지속적으로 살수하므로 해사장에 매립된 석탄회는 비록 간헐적으로 비를 접하고 있음에도 불구하고 일정량의 염분을 가지고 있다.

벌전소가 위치한 곳은 건설당시 매우 고립된 지역이었으나, 현재는 각광받는 관광지 인근인 경우가 많다. 이러한 배경에서 자연환경을 훼손하는 해사장은 더 이상 증설하기 어려운 실정이다. 이러한 점은 재활용율이 낮은 바텀애시의 재활용율을 높이기 위한 필연적인 이유가 되고 있다. 그러나 바텀애시는 그 물성이 골재로서 또는 콘크리트용 혼화재료로서 적합하지 않은 점이 많기 때문에 재활용은 수월하지 않다.

본 고에서는 바텀애시의 재활용을 어렵게 하는 원인과 이를 극복하기 위한 방법에 대하여 고찰해 보기로 한다.

[그림 2] 바텀애시 매립지(해사장) 전경

2. 바텀애시 재활용의 한계

2.1 바텀애시 관련 실증 연구 부족

석탄회의 재활용 촉진을 위한 관련 법령이 정비되어 있고 및 재활용 기준도 포괄적으로 정의되어 있다. 그러나 가장 중요한 용도인 콘크리트 및 토질/포장재 관련한 실증적 연구가 부족하다. 물론 재료의 한계 때문에 우수한 결과를 낼 수 없을지는 몰라도 지속적인 연구를 통하여 콘크리트 및 토질/도로포장 분야에 잘 활용하기 위한 연구데이터의 축적이 필요한 실정이다.

2.2 관리범위를 벗어나는 품질 변동

건설 분야에 사용되는 건설 자재들은 KS 기준이나 관련 시방서 등에서 제시하고 있는 기준에 적합해야 할 뿐만 아니라 품질 변동이 적어야 한다. 품질 변동이 작아야만 최종 구조물의 품질 변동도 관리할 수 있게 되는 것이다. 이런 이유에서 다양한 건설 자재들의 품질관리에 관련된 규정이 있는 것이다. 대부분의 건설재료가 관리범위 내의 품질 변동율을 갖지만, 바텀애시의 품질 변동은 매우 크다. 바텀애시의 품질변동에 영향을 주는 요인은 사용된 탄종, 탄의 출처, 계절, 공정 등 다양하다. 다양한 품질 변동요인이 존재하지만, 이를 적절히 관리하여 일정한 품질의 바텀애시가 배출되도록 하는 시스템의 확보가 필요하다.

<표 1> 석탄회 재활용 기술 현황

적용 분야	기존 기술의 현황
콘크리트	-적용 대상이 한정됨(콘크리트 제품) -연구데이터의 부족 및 실적용 사례 미비 -적용 가능성 판단 부족 -대량 활용을 위한 내구 성능 분석의 실증적 자료 확보 미비 -활용 촉진을 위한 관련 규격 미비
토질/도로포장	-성토재료 활용을 위한 단순 대체에 의한 연구 진행 -토질/도로포장용 적용을 위한 연구 사례 부재 -장기공용성 평가 부재 -토질용 적용을 위한 기초연구 부족 -토질 관련 규격 부재

바텀애시는 일반 골재에 비하여 상대적으로 높은 공극율과 매우 낮은 밀도를 가지는 것으로 보고되고 있다. 이런 특성을 활용하기 위하여 국내에서는 경량골재로 활용하는 기준이 제시되고 있다. 국내 바텀애시에 관한 품질기준은 KS F 2534「구조용 경량 골재」에 있으며, 그 내용을 정리하면 표 2와 같다.

기준 안을 살펴보면, 인공천연 경량골재에서 제시되어 있지 않은 삼산화황(SO_3)과 염화물량(NaCl 환산량)을 제시하고 있음을 알 수 있다. 이 화학 성분 중 염화물량의 함유량을 제한하고 있는 이유는 매립된 바텀애시와 바텀애시를 냉각 할 때 사용되는 물이 대부분 해수에 의존하고 있기 때문이며, 삼산화황을 제한하는 이유는 탄종에 따라

<표 2> KS F 2534 「구조용 경량골재」

항목			바텀애시 경량골재	인공천연 경량골재
화학 성분	강열 감량	%	5이하	5이하
	삼산화황(SO_3)	%	0.8이하	-
	염화물량 (NaCl 환산량)	g/㎤	0.025 이하	-
단위용적질량		kg/㎥	1,200 이하	1,120 이하
점토 덩어리		%	2.0 이하	2.0 이하
0.08mm 체 통과량		%	5.0 이하	-
안정성		%	10 이하	-

※ 인공천연경량골재에 대한 항목은 잔골재로 한정하여 제시한 것임.

함유 가능성이 매우 높기 때문이다. (출처: KS F 2534 구조용 경량 골재)

2.3 가공 기술 부족

바텀애시는 화력 발전소에서 덩어리 상으로 발생되기 때문에 이를 해안에 매립하기 위하여 파분쇄하게 된다. 파분쇄 된 바텀애시는 고압수에 의해 매립지까지 이송된다. 바텀애시의 파분쇄 조건은 압송의 효율성에 초점을 두고 있으므로 재활용에 적합하지 않다.

따라서 바텀애시의를 재활용하기 위해서는 세척 등을 이용한 분말과 입자의 분리, 모래 크기 이상 입자를 대상으로 한 입자 크기 및 형상 가공이 필요하다. 플라이 애시를 활용할 때 정제하는 것과 같이 바텀애시로부터 미연탄분이 많은 것과 적은 것을 분리하는 기술도 개발할 필요가 있다. 미연탄소분이 적은 바텀애시는 플라이 애시와 동일한 화학성분을 가지고 있어 콘크리트용 혼화재료로 활용이 가능할 것이며, 반대로 미연탄 분이 높은 입자 또는 분말은 에너지원으로서 활용하는 것이 용이하다.

하지만 이런 정제와 분쇄 등의 가공에 투입되는 비용이 높은 것이 현실적인 제약점이다. 좀 더 경제적이며 효율있는 기술의 개발이 필요하다.

<표 3> 플라이애시와 바텀애시의 화학조성(wt.%)

화학조성	플라이애시	바텀애시	
	비정제	세립분	조립분
SiO_2	54.26	48.05	43.49
Al_2O_3	22.52	23.01	23.27
TiO_2	1.19	0.94	0.94
P_2O_5	-	0.77	0.65
Fe_2O_3	7.02	14.69	15.42
CaO	4.55	7.65	7.62
MgO	1.26	1.64	1.25
X-K_2O	1.44	0.67	0.61
SO_3	3.07	0.32	0.96
Ig-loss	3.58	2.28	5.80

2.4 높은 미연탄소분

그림 3에 나타난 바와 같이 바텀애시는 색상으로 분류하면 검은색과 갈색으로 분류할 수 있다. 갈색은 탄이 연소되어 나타나는 색이며, 검은색은 탄이 미연소되어 나타난 것으로 볼 수 있다. 바텀애시의 미연탄 함유량은 5%에서 25%의 수준을 보이고 있다. 이점이 바텀애시를 활용하는데에 큰 제약 조건이 되고 있다.

[그림 3] 바텀애시 형상

콘크리트에 석탄회를 사용할 때 석탄회의 강열감량이 시멘트 특성에 영향을 미치지 않는 범위인 6%로 제한되고 있다. 이와 같은 이유는 미연탄이 AE제의 사용에 의해 형성된 공기포를 흡착 제거하기 때문에 연행 공기량을 저하시켜 결과적으로 내구성에 영향을 미칠 뿐만 아니라 단위수량의 증가시키는 원인으로 작용하기 때문이다.

이러한 이유로 바텀애시를 콘크리트용으로 활용하기 위해서는 미연탄의 제거가 필요하다. Haldun Kurama 등은 미연소 탄소분을 낮추기 위해 중수에 의한 분리나 정전기에 의한 분리와 같은 전처리 방법에 비하여 분쇄 및 체질 방법이 석탄회의 탄소함유량을 낮추는데 유용하다는 것을 제안하였다*. 그러나 이러한 방법은 복잡한 전처리 공정을 포함하고 있어 실용화되지는 못하고 있는 실정이다.

여하튼 미연탄은 바텀애시의 활용에 큰 제약 조건이며, 이를 제거하는 것이 반듯이 필요하다. 그렇다고 가열 등의 방법으로 미연탄을 제거하는 것은 귀중한 에너지원을 버리는 결과를 초래하므로 미연탄을 적절히 활용하면서 그 함량을 낮추는 기술의 개발이 필요할 것이다.

2.5 염화물을 함유한 바텀애시

* Haldun Kurama, Mine Kaya, “Usage of combustion bottom ash in concrete mixture”, *Construction and Building Materials, 22, 2008, pp.1922~1928*

일반적으로 콘크리트의 염화물 함유량은 콘크리트 내부에 존재하는 철근의 부식과 연계하여 제한되고 있다. 콘크리트 구조물에서 염화물의 침투는 크게 내부 침투와 외부 침투로 나눌 수 있으며, 내부 침투는 콘크리트에 사용되는 재료에 염화물 함유량이 높은 경우를 의미한다. 외부 침투는 해안 구조물에서 많이 나타나고 특히 제설 작업에 사용되는 염화칼슘에 의한 것이다. 내부 침투에서는 일반적으로 골재에 기인되는 것으로 분류되며, 이런 문제를 최소화하기 위하여 사용되는 골재를 충분히 세척 후 염화물 함유량을 줄이고 사용하도록 제안하고 있다. 매립된 바텀애시는 지속적으로 해수 공급을 진행하고 있기 때문에 해사와 동등한 염화물 함유량을 가지고 있다.

그러므로 바텀애시를 활용하기 위해서는 염화물의 제거가 필요하며, 이를 위해 추가적인 비용이 필요하게 되고 이것이 바텀애시의 재활용에 제약을 주는 요인이 된다. 염화물의 제거는 그리 어려운 것이 아니다. 해사의 예에서 보듯이 적절한 세척 설비와 담수가 제공될 수 있다면 큰 비용이 수반하지는 않는다. 하지만 바텀애시를 배출하는 화력발전소가 전국에 산재해 있어 거리의 제한이 있다는 점은 불리하지만, 대부분 해안가에 위치하고 있다는 점은 물류비의 관점에서는 유리한 점이다. 그러므로 대량으로 수송할 수 있는 환경을 만든다면, 큰 비용을 들이지 않고 염화물을 제거할 수 있을 것이다.

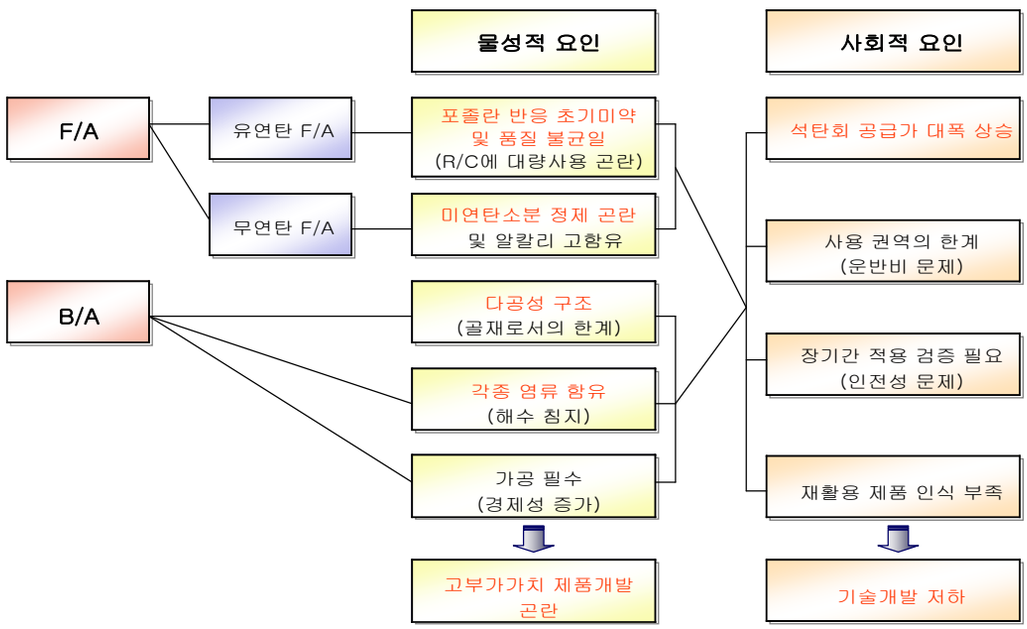
2.6 비소를 함유하고 있는 석탄

비소는 석탄 친화적인 원소이며, 탄종에 따라 차이가 있지만 석탄재에는 석탄 자체보다 비소의 함량이 더 높은 것으로 보고되고 있다. 비소는 화력발전소에서 석탄을 태우는 중에 기화되며, 보일러의 상부층에 부유하고 있으므로 부유하는 미세한 석탄 분진에 흡착하게 된다. 석탄 분진에 흡착된 것은 대부분 플라이애쉬와 함께 배출되며, 일부 바텀애시에 흡착되게 된다. 그러므로 비소의 흡착량은 플라이애시에서 바텀애시보다 높게 된다.

바텀애시가 상대적으로 낮은 비소 함유량을 가질 것이라고 추정되지만, 비소의 함유량은 지속적으로 관리가 필요하다. 비소는 극미량으로도 인간과 동물을 치사시킬 수 있는 독극물이다. 비소는 인체에 아주 위험한 발암물질이며 돌연변이를 일으킬 수 있으며, 피부, 호흡기 질환 및 소화기 질환을 유발하기 때문이다.(http://www. reseat.re.kr, 석탄에 있는 비소종합검토, 전문연구위원 전풍일)

2.7 사회적 요인에 의한 낮은 재활용율

국내 화력발전소는 대부분이 해안지역에 위치하고 있기 때문에 발생되는 바텀애시도 해안지역에 매립되고 있다. 반면에 바톰애시의 주요 수요처인 건자재 생산 업체들은 내륙 지역에 입지하고 있기 때문에 바텀애시를 활용하기



[그림 5] 바텀애시의 재활용 한계에 관한 종합고찰

위해서는 매우 높은 물류비에 대한 고려가 필요하다.

또한 바텀애시를 활용하기 위한 사회적 분위기를 조성하기 위해서는 폐기물로 만든 제품에 대한 인식을 바꿀 필요가 있다. 다소 예외는 있겠지만, 재활용 제품의 성능을 신재를 사용하여 제조한 제품 보다 우수하기를 기대하는 것은 너무 과도한 욕심일 것이다. 재활용 원료는 신재 원료에 비하여 품질이 매우 낮기 때문에 이를 활용하여 제조한 제품도 그 품질이 낮을 수 밖에 없는 것이다. 낮은 품질의 제품을 수용할 수 있는 사회적 분위기를 조성하는 것이 필요하다. 이러한 분위기는 국민에 대한 적극적인 교육에 의해 조성할 필요가 있다.

또한 재활용품은 성능이 다소 낮더라도 판매 될 수 있는 제도적인 장치를 구축하는 것도 또한 필요하다. 이는 정책적으로 감세, 인센티브제, 또는 의무화 등을 보다 강력하게 추진함으로서 재활용 제품이 시장에서 자리 잡을 수 있는 환경을 정부주도하게 조성할 필요가 있다.

석탄회의 물리적 특성과 사회적 인식에 기반하여 현 상태에서의 문제점을 정리하면 그림 5와 같다. 아직 다양한 요인의 개선이 필요하지만, 바텀애시의 부가가치를 향상시킬 수 있는 기술적 환경의 조성과 바텀애시의 유통을 저해하는 사회적 요인을 개선한다면 앞으로 바텀애시는 건설분야에서 매우 많은 양이 활용 될 수 있을 것이다.

3. 기대효과

보다 더 많은 원인이 존재하겠지만, 이상으로 바텀애시의 재활용율이 낮은 이유를 정리하여 보았다. 앞으로 경제규모의 확대와 함께 전력 사용량은 지속적으로 증가할 것이고, 원자력의 안전성에 대한 사회적 인식과 대체 에너지원의 기술 개발 수준을 고려하면, 적어도 몇십년 동안은 화력발전량은 지속적으로 증가할 것이며, 이와 함께 애시의 발생량도 증가할 것이다. 플라이애시가 건설분야에서 성공적으로 자리매김한 것과 같이 적극적인 연구개발을 통하여 바텀애시도 건설재료로서 안정적으로 사용될 수 있기를 희망한다.