

# 산업부산물(바텀애시)의 콘크리트 재료로써 활용 방안 및 연구동향

## Research Trends and Applications of Industrial By-Product (Bottom Ash) for Concrete Materials



이현기 Hyeon-Gi Lee  
(주)브리콘랩 대표이사  
E-mail : hyeongj84@gmail.com

### 1. 서언

화력발전은 발전 과정 중 화석연료의 연소과정에 기인하여 기후변화의 주요 원인물질인 이산화탄소를 다량 배출하며, (초)미세먼지를 생성하는 질소산화물과 황산화물 등 다양한 오염물질의 배출원이기도 하다. 그러므로 화력발전의 유지 및 확대는 기후변화에 악영향을 미치고 국민 건강을 위협하는 요인이 된다. 기후변화 인자에 대한 관리 및 완화가 중요하고 미세먼지로 인한 사회/환경적 문제가 대두되고 있는 요즘의 현실에서 이산화탄소의 주요 배출원인 화력발전의 비중을 줄여나가며 지속적으로 관리할 필요가 있지만, 우리나라 발전현황 추이는 화력발전의 비중이 여전히 높은 것을 확인할 수 있다.

특히, 한국의 석탄화력발전 비중은 다른 나라들에 비해 높은 편이다. 주요 석탄 수출국인 호주와 제조업 강국인 독일을 제외하면 한국의 석탄화력발전 비중은 다른 선진국들에 비해 압도적으로 높은 것으로 나타났다. 참고로 2016년

[표 1] 발전설비 추이 (발전형식 및 연료원별) (단위: MW)<sup>2)</sup>

기간	원자력	기력				복합화력		내연력		양수	신재생	기타	합계
		유연탄	무연탄	유류	가스	유류	가스	유류	가스				
2012	20,716	24,003	1,125	4,355	1,024	571	20,861	367	0	4,700	4,084	0	81,806
2013	20,716	24,111	1,125	4,355	1,024	571	24,766	330	0	4,700	5,273	0	86,969
2014	20,716	25,911	1,125	3,355	524	571	29,745	330	0	4,700	6,241	0	93,216
2015	21,716	26,202	1,125	3,342	548	571	31,696	330	0	4,700	7,420	0	97,649
2016	23,116	30,898	1,125	3,240	470	571	32,132	329	0	4,700	9,284	0	105,866
2017	22,529	36,098	600	3,240	196	571	37,636	339	0	4,700	10,976	22	116,908
2018	21,850	36,299	600	3,221	196	758	37,638	339	0	4,700	13,413	77	119,092

세계적으로 석탄화력발전량이 가장 많은 국가는 중국 (4,242 TWh)이며 뒤를 미국 (1,354 TWh), 인도 (1,105 TWh), 일본 (349 TWh), 독일 (273 TWh), 한국 (235 TWh), 남아프리카 공화국 (226 TWh), 러시아 (171 TWh)와 호주 (163 TWh), 인도네시아 (135 TWh)가 따르고 있다. 한국의 석탄화력 발전량은 전 세계 석탄화력 발전량(9,594 TWh)의 2.5%를 차지하면서 세계에서 여섯 번째로 높다.<sup>1)</sup>

석탄회(Coal ash)는 화력발전소에서 사용하는 미분탄이 연소된 후 발생하는 산업부산물로, 석탄회가 포집되는 장소에 따라 크게 플라이애시(Fly ash), 바텀애시(Bottom ash)로 구분할 수 있다. 플라이애시는 석탄화력발전소에서 석탄 연소 후 발생하는 발전소 부산물로 집진기에서 포집되는 미분말 형태로서 그 화학적/물리적 특성상 알루미늄 실리카 계열의 구형 입자 형태로 포졸란성(Pozzolan)을 지니고 있을 뿐만 아니라 여러 측면에서 시멘트 대체재로 우수한 특성을 지니고 있다. 전체 석탄회 발생량 중 약 75~80%를 차지한다. 바텀애시는 석탄이 화력발전소 보일러 내에서 연소될 때 노벽, 과열기, 재열기 등에 부착되어 있다가 보일러 하부의 호퍼(hopper)에 떨어져 수집된 것이고, 전체 석탄회 발생량 중 약 10% 정도를 차지한다.<sup>6)</sup>

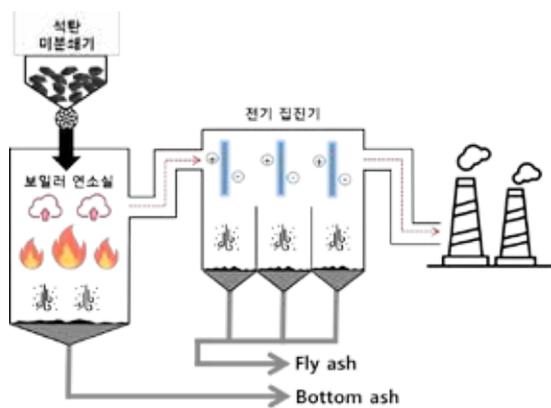


그림 1. 석탄회의 발생 공정 및 종류

현재 플라이애시는 시멘트 대체제 및 콘크리트 혼화재 등 건설재료로써 재활용이 활발히 이루어지고 있지만, 바텀애시는 그에 비해 발생량은 적으나 건설재료로의 재활용에 어려움이 있어 재활용의 범위가 제한적이고 재활용률 또한 낮은 편

이다. 따라서, 본 고에서는 화력발전소에서 발생하는 바텀애시의 콘크리트 재료로써 활용방안 및 연구동향을 살펴보고자 한다.

## 2. 바텀애시의 현황

### 2.1 바텀애시 발생량 및 재활용 추이

<그림 2>는 국내 화력발전소 중 일부의 플라이애시 및 바텀애시 발생량 및 재활용량을 나타낸 그림으로 국내 석탄회 발생 및 재활용량의 추이를 알 수 있다. 화력발전의 비중이 증가하는 국내의 실정에 따라서 산업부산물인 석탄회의 발생량 또한 증가하는 추세를 나타내고 있다.

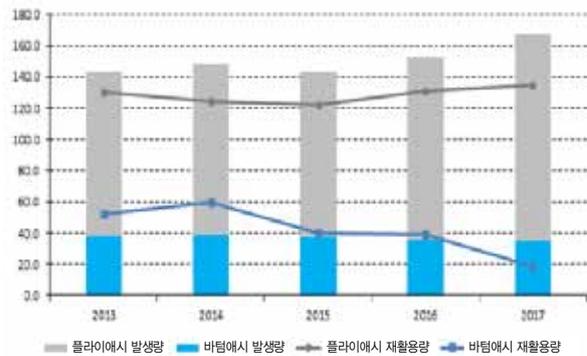


그림 2. 석탄회 발생량 및 재활용량<sup>3)</sup>

### 2.2 바텀애시 배출 공정

바텀애시 배출방식은 습식 및 건식의 두 가지 방식의 처리 시스템이 있다. 습식공정 바텀애시 배출방식은 가장 일반적으로 설치되는 바텀애시 배출 시스템이며, 배출공정에서 보일러 하부에 수조를 설치하고 보일러에서 바텀애시가 떨어지면 수조에서 냉각 후 분쇄하여 배출하는 방법이다. 건식공정 바텀애시 배출방식은 보일러 하부에 컨베이어 벨트를 설치하고 하부에서 냉각 공기를 상부의 보일러 방향으로 공급함으로써 벨트위로 배출된 바텀애시를 지속적으로 연소시키면서 냉각하여 굵은골재 형식의 바텀애시를 배출하는 방식이다.<sup>4) 6)</sup>

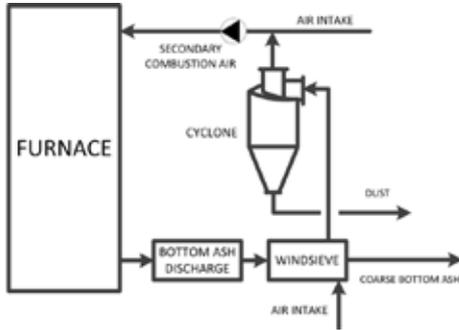


그림 3. 건식공정 바텀애시 배출방식 개념도<sup>4)</sup>

### 2.3 바텀애시의 문제점

#### (1) 폐기물 처리의 문제점

석탄회 중 플라이애시는 대부분 건설 분야에서 시멘트 대체재나 콘크리트 혼화제 등으로 재활용 되고 있으나, 그 외 바텀애시의 대부분은 화력 발전소 인근에 위치한 회처리장(Ash pond)에 저장 및 매립하고 있다. 회처리장에 매립하는 경우, 매립가능부지의 확장이 더 이상 어려워지며, 더욱이 매립지 인근 지역에서의 비산 먼지로 인한 주변 환경오염, 토양 및 수질의 2차 오염 가능성이 제기되고 있어 경제적 및 환경적 부하가 가중되고 있는 실정이다. 또한 정부는 2018년에 「자원순환기본법」을 시행함으로써 자원순환형 사회로 정책을 추진하고 있다. 폐기물 매립을 억제하고 발생된 폐기물을 적정하게 재활용 또는 처리하는 등, 자원의 순환적으로 이용하는 것으로 하나의 자원을 고부가가치로 사용할 수 있도록 하는 정책이다. 폐기물 매립으로 환경오염 문제가 대두되면서 자원 재활용의 중요도가 높아지고 있음을 알 수 있다.

#### (2) 건설재료로 활용의 한계



그림 4. 석탄회 매립지 (ash pond)

[상: Duke Energy plant ash pond (미국), 하: 삼천포화력발전소 제1석탄회 매립지]<sup>5)</sup>

바텀애시의 활용상의 문제점은 미연탄 함량, 냉각공정에 해수를 사용하는 것에 기인한 높은 염화물 농도, 다공질 골재의 형태로 인한 높은 흡수율을 꼽을 수 있다. 미연탄 함량은 콘크리트 재료로 활용 시 강도성능 및 내구성의 저하를 불러올 수 있으며, 바텀애시에 포함된 염화물 농도는 철근부식, 매립토양 오염을 유발하므로 콘크리트 바인더나 골재로의 활용이 제한적일 수밖에 없고, 높은 흡수율은 배합 및 성능에 문제점을 발생시킬 수 있기 때문에 바텀애시 활용의 적용성 및 부가가치를 떨어뜨리는 요소가 된다.

건식공정 바텀애시는 해수 사용이 없으므로 염화물 농도가 낮아 활용성의 기대가 높으나, 여전히 다공질 골재로서 갖는 높은 흡수율, 미분탄 함량 등에 대한 문제가 남아 있어, 콘크리트 재료로 사용 시 공학적 성능 저하의 우려가 있다. 더욱이 산업부산물인 바텀애시의 환경적 문제 등에 대한 사회적 인식이 낮아 사용/적용 범위 확장에 큰 장애물이 되고 있는 실정이다.<sup>6)</sup>

## 3. 바텀애시의 콘크리트 재료로써 활용 방안 및 연구 동향

### 3.1 경량골재로써의 바텀애시

박승호는 바텀애시의 세립 분말 및 미연탄소 함량을 줄임으로써 재료 특성을 개선하였고 이를 잔골재로 사용하여 활용성을 평가하였다. 바텀애시를 잔골재로 사용할 경우 특별한 조치를 하지 않은 상태에서는 잔골재의 30% 미만까지 대체하는 것이 가능하였고 바텀애시 30% 이상 사용하기 위해서는 배합수나 화학혼화제를 추가 혼입하여 유동성을 확보함으로써 사용이 가능하였다. 이 때 물-시멘트 비 45% 이하인 고내구성의 콘크리트 제조를 위해서는 바텀애시 혼입량이 30%로 한정되었다. 세립 바텀애시를 제거하고 미연탄 함량을 감소시켜 성능을 개선한 바텀애시 잔골재를 사용한 경우 굳지 않은 콘크리트의 물성이 크게 개선되었고 물-결합재 비는 40% 이하로 낮아져 고내구성 콘크리트 제조가 가능하였다. 또한 레미콘으로 모의 부재를 제작 한 후 시험체를 채취하여 실내에

서 제작된 경우와 비교·검토한 결과 현장에서 다소 성능이 저하하는 것을 확인하였으나 적절한 배합설계 및 현장 품질관리를 통해 고내구성 콘크리트의 제조 및 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.<sup>7)</sup>

최홍범 등은 염화물 함량이 낮은 건식공정 배출방식을 통한 바텀애시를 이용해 경량골재 연구를 수행하여 콘크리트 품질 특성을 평가하였다. 연구는 경량골재 콘크리트의 굳지않은 상태 및 경화상태에서의 다양한 특성을 실험적으로 검토함으로써 바텀애시 경량골재가 경량골재 콘크리트용 잔골재로서의 사용 가능성이 있는지의 여부를 평가하였다. 연구결과 건식 바텀애시 대체율 75%까지 슬럼프 저하가 크지 않게 나타났고, 공기량은 건식 바텀애시의 대체율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 콘크리트의 블리딩량은 건식 바텀애시 대체율 75%이하에서는  $0.025 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 미만으로 나타났으며, 콘크리트 경화 후 압축강도에서는 대체율 75%까지 강도 저하율이 10% 미만으로 나타났다. 잔골재를 건식 바텀애시로 100% 대체시 절건 단위질량은 8.9%의 감소를 보였고, 건식 바텀애시 잔골재 대체율이 증가할수록 건조수축이 감소하는 경향을 보였다. 콘크리트 탄성계수는 건식 바텀애시 잔골재 대체율 50%까지는 저하를 보이지 않았지만, 대체율이 그 이상으로 증가시 탄성계수가 저하하였다. 이상의 결과로부터 건식 바텀애시는 잔골재로 사용 시 다른 잔골재와 혼합 사용할 경우 품질의 저하 없이 사용하는 것이 가능함을 알 수 있다.<sup>8)</sup>

정장희는 바텀애시를 골재로 이용하여 KS F 4419에 만족하는 보차도용 인터로킹 블록을 제조하여 천연골재의 부족을 대체하고자 하였다. 이를 위하여 5mm이하의 바텀애시, 시멘트, 탈황석고를 사용하였고 유동화제를 첨가하여 가압성형 후 인장강도 및 흡수율을 측정하였다. 물-시멘트비가 일반 모래를 사용한 경우보다 바텀애시를 사용하였을 경우 약 2배 이상 높았으며 연구결과 KS F 4419에서 요구하는 규정을 만족하지 못하였으며, 바텀애시를 인터로킹 블록용 골재로 사용하기 위해서는 흡수율을 낮추기 위한 방안이 필요하다고 보고되고 있다.<sup>9)</sup>

조병완 외 2인은 석탄회(플라이애시와 바텀애시)를 안정적으로 재활용하기 위하여 알칼리 활성화된 석탄회 경화체 및 인공경량골재를 제조하였으며 알칼리 활성화 석탄회 인공경

량골재의 콘크리트 적용을 위한 실험적 연구를 수행하였다. 따라서 알칼리 활성화된 석탄회 경화체의 최적 배합비, 알칼리 활성화 석탄회 경화체와 인공경량골재의 기본적 특성, 역학적 특성과 환경안정성, 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성과 동결융해저항성을 파악하였다. 실험결과 알칼리 활성화 석탄회 인공경량골재를 제조하기 위한 경화체의 최적 배합비는 시멘트 10%, Water glass 15%, NaOH 10%,  $\text{MnO}_2$  였으며, 혼합물을 50℃ 항온습윤양생 24 hr 후 상온 공기중 양생하여 7일 압축강도 36.4 MPa를 얻을 수 있었다. 제조된 골재의 폴리머 함침 결과 10% 파쇄강도를 150% 향상시킬 수 있었으며, 콘크리트용 굵은 골재로의 활용가능성을 파악할 수 있다.<sup>10)</sup>

### 3.2 시멘트 대체재로서의 바텀애시

강수태 외 3인은 화력발전소에서 나오는 석탄재(바텀애시)를 다량으로 활용하여 사용되는 시멘트(생산 시 다량의 이산화탄소 배출)의 양을 줄이고 20도 정도의 상온양생을 통해 20~30 MPa 정도의 강도를 가진 콘크리트(아파트 구조물에 사용 될 수 있는 콘크리트의 강도)를 생산하는 기술을 확보하였다. 연구진은 이번에 개발된 친환경 콘크리트가 조만간에 아파트와 같은 건물공사에도 활용 될 수 있게 할 예정이다. 향후에는 탄소배출이 많은 시멘트를 아예 사용하지 않는 “시멘트 제로 콘크리트”를 개발할 예정이다.<sup>11)</sup>

박승호는 또한 바텀애시를 분쇄하여 재료 특성을 개선함으로써 시멘트 대체 재료로 사용하였으며 성능개선 전후 바텀애시와 플라이애시를 혼입한 시험체에 대하여 물리·내구성능을 비교·검토하여 활용성을 평가하였다. 바텀애시를 분쇄하여 성능을 개선한 바텀애시에 대한 포졸란 반응 및 물리·내구 특성을 검토한 결과 바텀애시의 비표면적이 약  $3,000 \text{ cm}^2/\text{g}$  이상으로 분쇄된 경우 플라이애시 사용한 경우와 유사한 성능을 발현하는 것을 확인함으로써 분쇄하여 성능 개선한 바텀애시가 시멘트 대체 재료로 사용하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.<sup>7)</sup>

Jaturapitakkul 외 1인은 바텀애시는 모르타르 및 콘크리트 혼합물에서 보통 포트랜드 시멘트(OPC)를 대체하기 위한

연구를 수행하였다. 바텀애시는 비활성 포졸란 반응으로 인해 콘크리트에서 거의 사용되지 않았으나, 바텀애시를 Sieve 325(0.044 mm 체)에 잔류하는 입자가 중량의 5% 미만일 때까지 분쇄하여 포졸란 반응성을 개선하였다. 분쇄 전후의 바텀애시를 모르타르와 콘크리트로 배합하여 물리적 및 화학적 특성을 비교하였다. 시멘트 대체재로서 미분쇄 바텀애시 20~30%를 혼입한 모르타르의 압축 강도는 초기발현강도는 시멘트 모르타르보다 훨씬 낮았지만, 재령 60일 이후에는 시멘트 모르타르보다 압축강도가 더 높게 나타났다. 콘크리트 배합의 경우 각각 440 및 260kg/m<sup>3</sup>의 바텀애시 시멘트 치환한 경우, 재령 14일 및 60일 이후에 보통 콘크리트보다 압축강도가 더 높게 나타났다. 압축 강도 시험을 통해 확인한 결과, 미분쇄된 바텀애시는 우수한 포졸란 반응성을 가진 시멘트 대체재로 사용될 수 있다고 결론내었다.<sup>12)</sup>

#### 4. 맺음말

연구 사례를 통해 산업부산물인 바텀애시를 콘크리트 재료로 재활용함에 따른 기대효과는 다음과 같다.

1) 바텀애시의 재활용으로 매립의존율 감소, 2) 매립비용 절감 및 매립에 의한 환경부하 감소, 3) 폐자원재활용으로 경제적 이익 4) 천연자원 고갈 및 환경규제에 대체재로 활용하여 폐자원의 고부가가치 창출 등을 기대할 수 있다.

다만 아직까지 국내에서는 폐자원에 대한 신뢰성 및 인식이 낮아 바텀애시를 재활용하기 위해서는 활용타당성 검증 및 안전성 검증으로 폐자원에 대한 사회적 인식 개선이 선행되어야 할 것이다. 이러한 점을 감안하여 자원순환을 위하여 문제점을 보완한 적극적인 연구 및 제도적 뒷받침이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. The World Bank (2018). Electricity production from coal sources (% of total). Retrieved from <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.COAL.ZS>
2. 전력통계정보시스템, 발전설비 추이 (발전형식별). <http://epsis.kpx.or.kr> 에서 검색
3. 한국동서발전 발전소별 석탄 재활용 정보 (2019). 공공데이터포털. [www.data.go.kr](http://www.data.go.kr) 에서 검색
4. International Solid Waste Association (ISWA) (2015). Bottom Ash from WtE Plants Metal Recovery and Utilization
5. 경남도민일보 (2013). "석탄회 재활용 방안 찾아야"
6. 한국환경산업기술원 (2016). 건식공정 바텀애시를 이용한 친환경 저밀도 건설용 소재 개발. <http://www.ndsl.kr/ndsl/search/detail/report/reportSearchResultDetail.do?cn=TRKO201700005468> 에서 검색
7. 박승호 (2018). 콘크리트용 잔골재 및 결합재로 활용하기 위한 바텀애시의 성능개선, 석사학위논문, 대전대학교 대학원
8. 최홍범, 김진만 (2018). 건식 바텀애시 경량 잔골재와 소성 인공경량 굵은골재를 사용한 콘크리트의 기초 특성, 한국건설순환자원학회논문집, 6(4), 267-274
9. 정장희 (2001). Bottom Ash를 골재로 이용한 보차도용 인터로킹 블록의 물성에 관한 연구, 석사학위논문, 중앙대학교 건설대학원
10. 조병완, 방승국, 권병윤 (2004). 알칼리 활성화 석탄회(Fly ash, Bottom Ash) 인공경량골재 및 콘크리트 적용, 콘크리트학회 논문집, 16(6), 751-757
11. 강수태, 류금성, 고경택, 이장화 (2011). 바텀애시를 결합재로 사용한 알칼리 활성화 시멘트 모르타르의 최적배합에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집, 23(4), 487-494
12. Jaturapitakkul, C. and Cheerarot, R. (2003). Development of Bottom Ash as Pozzolanic Material, Journal of Materials in Civil Engineering, 15(1), 48-53. doi: 10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:1(48)

담당 편집위원: 김용재(강원대학교)