

총설: 콘크리트 및 모르타르를 위한 석탄 바텀애시의 활용

Review: Utilization of Coal Bottom Ash for Concrete and Mortar

김형기*

Hyeong-Ki Kim^{1*}

(Received August 13, 2020 / Revised September 22, 2020 / Accepted September 23, 2020)

The present review dealt with the state-of-art on utilization of coal bottom ash in cement-based concrete and mortar. Two types of bottom ashes generated from pulverized coal combustion and circulating fluidized-bed combustion systems have been considered. The production process, chemical and physical characteristics of both ashes, and the methodology of utilization in various cement composites are summarized. The effect of bottom ash on various properties of concrete, such as workability, strength, and durability, were reviewed from the literature. In addition, the environmental and economic aspects of utilizing bottom ash in concrete are analyzed to explore the perspectives of bottom ash utilization, and through this, the future of the utilization was considered. The effect of bottom ash on the performance of concrete and mortar was greatly depended on the condition, pretreatment, and processing of the ash. Additional processing such as crushing might contribute to stimulating the utilization in this field. In particular, if economic support is possible in terms of policy, utilization rate is expected to be improved.

키워드 : 석탄 바텀애시, 콘크리트, 모르타르, 재활용, 미분탄 연소, 순환유동층 연소

Keywords : Coal bottom ash, Concrete, Mortar, Utilization, Pulverized coal combustion, Circulating fluidized-bed combustion

1. 서론

화력발전소 부산물(coal combustion product, 이후 CCP)은 현대 문명에서 발생하는 고형 무기계 폐기물 중 가장 대표적인 것 중 하나이다. 본 총설에서는 다양한 CCP 중 하나인 석탄 바텀애시(coal bottom ash)의 콘크리트 활용에 대한 전반적인 내용을 다룬다. 본 저자의 기존 총설 논문(Kim and Lee 2015)에서도 유사한 분야에 대한 분석이 일부 이루어졌으나, 1) 보일러 시스템의 종류가 달라지고 있다는 점, 2) 애시의 활용 및 환경/경제성 평가와 관련된 기술이 점차 발전되고 있다는 점 등을 고려해 주로 2010년 이후의 자료를 중심으로 깊게 분석해 보았다. 먼저 최근 사용되는 두 종류의 화력발전 시스템, 즉 미분탄연소와 순환유동층연소 보일러 각각으로부터 배출되는 바텀애시의 생산 과정과 물리적, 화학적 특성에 대해 분석하고, 활용 방법 및 활용을 위한 전처리 혹은 활용 대상 콘크리트의 종류에 대해 정리 하였다. 또한 바텀애시가 콘크리트의 여러 특성, 즉 유동성, 강도, 내구성에 미치는 영향에

대해 알아보았다. 그리고 바텀애시를 혼입한 콘크리트의 환경성 및 경제성에 대해 분석하였으며, 이를 통해 바텀애시의 콘크리트 내 활용의 미래를 고찰해 보았다.

2. 바텀애시의 배출과 특성

가장 최근의 자료에 따르면, 상대적으로 통계의 신뢰도가 높은 EU 15개국 및 미국의 경우 플라이 애시와 바텀애시, 탈황석고를 포함하는 CCP의 발생량이 각각 약 40Mt(메가톤)(2016년) 및 102Mt(2018년)인 것으로 보고되고 있다(ECOBA 2019; ACAA 2019). 일부 기사에 따르면 중국의 경우 현재 약 1,400개의 석탄화력발전소가 가동되고 있으며 연간 약 300~400Mt의 CCP가 발생하고 있다(Greenpeace 2020). 인도의 경우 신뢰할만한 통계는 보고되지 않았지만, 플라이 애시 자체의 배출량은 2000년대 약 80Mt에서 2015년 약 190Mt으로 약 2.4배 증가한 것으로 알려져 있다(CAI 2018). 우리나라의 경우 2010~2020년 사이 연간 약

* Corresponding author E-mail: hyeongki@chosun.ac.kr

¹조선대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea)

8~9Mt 정도의 CCP가 발생하는 것으로 알려져 있으나 자료의 정확한 출처 및 종합적 통계자료는 확인할 수 없었다(Cho et al. 2019).

최근 기술의 발전으로 전력생산을 위한 보일러 시스템이 변화함에 따라 발생하는 CCP의 종류 역시 달라지고 있다. 기존의 보일러는 대부분 미분탄 연소(Pulverized coal combustion, 이후 PCC)였는데, 이는 석탄을 분쇄해 보일러에 공급해 약 1,300~1,500°C에서 연소 한 뒤 발생한 연소가스를 집진 후 탈황 하는 방식이었다(Liao et al. 2019). 최근에 국내외에서 사용되고 있는 순환유동층 연소(Circulating fluidized-bed combustion, CFBC)는 분쇄된 석탄과 함께 탈황을 위한 석회석미분말을 같이 보일러에 공급해 1,000°C 이내에서 연소하며 직접 탈황을 진행하는 방식을 사용한다(Xiao et al. 2005; Liu et al. 2019). 미국의 보고에 따르면, PCC 보일러로부터의 CCP 발생량은 2008년부터 86메가톤에서부터 감소하여 2018년에 약 45메가톤으로 약 50% 수준이 된 반면, CFBC 보일러 애시를 포함한 합성 석고계 부산물은 2007년부터 2018년 까지 약 12Mt에서 35Mt으로 급격하게 증가하였다(ACAA, 2019).

PCC 애시는 기본적으로 잔골재 크기의 (칼슘-)실리카-알루미늄계 비정질(amorphous)의 다공성 물질이다(Yan et al. 2002). 콘크리트용 혼화제로 사용되는 PCC 플라이애시와 PCC 바텀애시와의 화학적 결정성의 명확한 차이는 일반적으로 없는 것으로 알려져 있는데, 이는 대부분의 보고서에서 PCC 바텀애시나 플라이애시 모두 quartz나 mullite계 결정이 발견되지 않기 때문이다(Cheriat et al. 1999). 유리질 부분을 선택적으로 용해 한 뒤 잔여물의 결정성, 혹은 두 애시들 자체의 반응성 간에 차이가 있다는 자료는 사례가 적다. 플라이애시의 경우 quartz에 대응하는 X선 회절패턴의 피크가 명확하게 나타남에 비해 바텀애시에서는 이 피크가 명확하지 않다는 보고가 있다(Ul-Haq et al. 2014).

PCC 바텀애시의 입형은 기본적으로 각이 지고, 표면에 시멘트 입자에 비해 크기가 월등히 큰 공극이 크다. 단지, 석탄 용융슬래그는 표면이 매우 부드럽고 광채가 나기도 한다. PCC 바텀애시는 공극의 크기가 크기 때문에 이와 관계된 흡수율의 평가를 위해 기존의 표준시험법을 사용할 수 있는지에 대해서는 고민이 필요하다(Kim 2015b). 콘크리트의 배합에서 정의하는 골재의 표면건조포화(표건)상태란, 이론적으로 시멘트 입자 및 시멘트 페이스트가 침투할 수 있는 곳 까지 모두 건조되고 단지 물만 침투 할 수 있는 부분은 포화된 것을 의미한다. 이런 상태에서는 배합 도중 공극으로부터 물이 추가로 새어나오거나 혹은 공극 내로 물이 추가로 흡수되지 않는다. 그러나 공극이 큰 재료는 이를 측정하기가 매우 어렵다. 겉보기에는 골재 표면수를 모두 제거해도 배합 중 시멘트

가 공극내에 들어가 그 내부의 물이 새어나와 실제 페이스트의 물결합재비(water-to-binder ratio, w/b 비)가 변화한다. 골재표면수의 표면장력과 내부마찰각을 동시에 이용해 표건상태를 정의하는 KS F 2504 기준이나 ASTM C 128 기준, 혹은 골재표면의 물을 타올로 제거하는 NYDOT Test method No. 703-19E의 방법으로는 다공성 바텀애시의 이론적인 흡수율을 정확히 평가할 수 없다.

PCC 바텀애시 입자의 비중은 1.6~2.4 범위이며, 진비중(true specific gravity)은 1.9~2.5 사이이다(Kim and Lee 2015). 실리카-알루미나 결합구조로 이루어진 물질의 진밀도가 2.6 이상인 것과 비교할 때 상대적으로 낮은 값인데, 이는 유리화로 인한 원자-분자밀도 혹은 조직 내 불투수성 초미세기공과 관계가 있다고 판단된다. 고품질의 역청탄(bituminous coal) 혹은 무연탄(anthracite)으로부터 발생한 PCC 바텀애시는, 상대적으로 발열량이 낮은 갈탄(lignite)과 중유를 복합연소해 얻은 바텀애시에 비해 밀도가 높다는 시험결과가 있으나 반드시 그런 것은 아니다(Jayaranjan et al. 2014; Tafesse and Kim 2016).

한편 CFBC 바텀애시는 PCC 애시와 물리, 화학적으로 많은 부분 차이가 있다. CFBC 보일러에는 미분쇄된 석탄과 함께 탈황을 위한 탄산칼슘(석회석) 미분말이 한번에 공급될 뿐 아니라 연소온도 역시 1,000°C 이내이기 때문에, 1) 600~800°C 범위에서 탄산칼슘이 탈탄산되며 발생한 생석회(free lime, 이후 f-CaO), 2) 동일 입자의 표면에는 탈황에 의해 얻어진 무수석고와, 동시에 입자 내부에는 탈황이 덜되어 잔류한 탄산칼슘, 3) 유리화 온도를 채 경험하지 못한 결정성 실리카, 4) 경우에 따라 운반이나 보관 중 공기내 수분과 일부 반응해 생성된 미량의 portlandite 등이 동시에 존재한다(Anthony et al. 2005). 즉, 결정의 조성이 매우 복잡하다.

화학조성의 정량평가를 위해 주로 사용되는 x선 형광분석(x-ray fluorescence spectrometry) 결과에 있어서, PCC 애시와 달리 CFBC 바텀애시는 CFBC 플라이애시와 차이가 큰 경우가 많다(Jang et al. 2018). 무엇보다, PCC 애시에 비해 CFBC 애시는 화학조성의 변동폭이 크다는 점을 주의해야 한다. 특히 연소온도가 낮아 애시의 강열감량(loss on ignition)이 10%를 넘는 경우가 보고되고 있으며 이들 중 일부는 탄산칼슘으로 인한 것이 아닌 미연탄소분으로 인한 경우가 있다(Kim et al. 2019a), 일부 시멘트 공정상 석고 대체제나 혹은 칼슘원으로 적용하고 있으나 아직 화학적 구성 기준을 마련해 이를 규격화 시키는 연구의 사례를 확인하지 못하였다.

CFBC 바텀애시는 일반적으로 분쇄 없이도 잔골재의 잔분, 즉 2mm 이하의 입자로 구성되어 있는데, 대부분 진비중은 2.7 이상이 다(Anthony et al, 2003). 이는 상대적으로 비중이 무거운 f-CaO (비중 3.37)이나 무수석고(비중 2.97), 그리고 결정성 실리카 때문이다. 크기는 잔골재와 유사하나 이를 잔골재로 사용하기는 어렵다. 무수석고와 f-CaO의 높은 반응성으로 인해 골재로서의 역할을 하지 못하기 때문이다.

3. 활용 방법: 일반 및 진보적 활용

CCP들은 다양한 환경문제를 일으킬 수 있을 뿐 아니라 누적된 매립에 의한 매립장 포화, 신규매립장 시공 등 경제적 문제가 있기 때문에 여러 국가에서는 이 CCP를 활용하기 위한 정책적 노력을 기울이고 있다. 대부분의 정책적 지원은 1) 폐기물로 구분되는 CCP의 반출, 2) 생산 후 처리 비용 지원 등에 연관되어 있다(Reijnders 2007). 한편 활용 소비처에서는 기존에 사용하던 재료에 대해 동등, 유사한 수준의 성능이 없이는 CCP를 선택해 사용하지 않는다. 따라서 CCP가 효과적으로 사용될 수 있는 분야를 찾아 이에 대한 규정 및 기준을 제시해 주는 것이 무엇보다 중요하며, 이후 관련 정책을 형성해 나가야 한다.

잘 알려진 바와 같이 콘크리트 및 모르타르 등 시멘트 기반 복합 재료는 CCP를 효과적으로 적용할 수 있는 대상 중 하나이다(Kim and Lee 2015). 다양한 종류의 CCP들을 효과적으로 사용하기만 하면 기존의 시멘트 등 결합재나 천연 골재보다 더 나은 콘크리트의 성능을 유도할 가능성이 있기 때문이다. 석탄 연소 후 연도가스(flue gas)와 함께 보일러 상부로 배출되는 입자가 작은 분말인 플라이애시는 형상이 균일한 구형일 뿐 아니라 화학적 반응성이 어느 정도 일정하기 때문에 별도의 처리 없이 콘크리트용 광물계 혼화재로서 적용이 가능하며, 콘크리트의 유동성 개선 및 수화발열 저감, 장기내구성 증진한다(Ahmaruzzaman 2010). 한편 입자가 커 보일러 바닥에 잔류하는 바텀애시(보일러 용융슬래그-molten slag-포함)는 표면이 거칠고 그 자체의 강도가 일반골재에 비해 매우 낮을 뿐 아니라 경우에 따라 다공질이기 때문에, 콘크리트용 골재나 골재보다 입도가 작은 필러로 사용하기 위해서는 생산 후 분급 혹은 일부의 분쇄 등의 처리가 필요하다(Singh et al, 2018). 특히 플라이애시는 집진설비를 통해 건식으로 처리되므로 운반 역시 용이한 반면, 바텀애시는 습식의 슬러리 상태로 처리되는 경우도 있는데 이는 이후 운반비용 증가 및 건조를 위한 후처리 문제와 연동되기도 한다. 저품질 플라이애시와 바텀애시, 탈황 석고 미활용분 및 아스팔트계 잔여물 등이 함께 석탄회 처리장

(ash pond)에 처분되어 있는 경우, 불순물이 많아 이 처리장 애시(펀드애시)의 활용이 매우 곤란하다.

그럼에도 불구하고 세계 각국에서는 바텀애시를 콘크리트용 골재나 시멘트 제조용 원자재 및 혼화재로 사용하기 위한 현실적인 노력이 계속되고 있다. 미국 통계에 따르면, 2009년 바텀애시 생산량 8.8Mt 중 34%인 3Mt이 일반 성토용으로 활용된 것에 반해 오직 콘크리트 분야에는 1.1Mt, 즉 13% 정도만 적용되었다(ACAA 2010). 그러나 2018년에는 바텀애시 발생량 5.4Mt 중 콘크리트 분야에 사용된 양이 1.8Mt으로 약 33% 까지 증가하였다(ACAA 2019). EU 15개국의 경우 2000년대 초반부터 지금까지 바텀애시 연간 발생량 2.5~4.1Mt 중 약 22~37%이 콘크리트 분야에 적용되고 있다(ECOBA 2009; ECOBA 2019).

국내에서는 이에 대한 대략적인 수치가 있을 뿐 관련된 명확한 통계는 확인이 어렵다. 우리나라의 경우 플라이 애시의 사용은 매우 빈번한 반면 바텀애시의 활용은 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 참고로, 우리나라의 2015~2020년 사이 콘크리트 및 골재의 사용량은 대략 150Mm³, 240Mt 수준이다(Kang et al, 2018). 한편 석탄 바텀애시의 발생량은 매년 약 0.8Mt 이하(매년 8Mt의 CCP의 약 10% 수준으로 산정)로 추정되는데, 이는 콘크리트 1m³ 당 8.7kg 수준이다. 이 결과만 보면, 만약 일반 레디 믹스드 콘크리트 1m³에 약 10kg, 즉 잔골재에 약 1.2~1.4% 정도만 바텀애시를 쓰면 바텀애시의 전량이 활용된다는 단순한 계산이 가능하다. 이는 이상적인 수치에 불과할 수 있지만, 그럼에도 불구하고 바텀애시를 콘크리트나 모르타르에 적용하는 것은 활용량을 늘리는데 큰 기여를 한다는 것을 의미한다. 향후 우리나라 잔골재 수급의 한계와 혼합골재의 성능적 특성을 고려할 때 바텀애시 잔골재 및 필러 등도 충분한 가격 경쟁력을 확보할 수 있을 것이라 판단되며, 전처리 기술 등을 활용하면 바텀애시 사용에 의한 콘크리트 성능감소 문제 역시 어느정도 해결이 가능할 것이라 기대된다. 최근 추진되고 있는 혼합골재 관련 규격이 명확히 설정되면 이후 바텀애시 사용이 좀 더 용이할 것이다.

바텀애시가 콘크리트 및 모르타르에 사용되는 방법을 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 일반적인 활용과 진보적 활용(advanced utilization)이다(Kim and Lee 2015). 일반적 활용은 단순히 기존 천연 재료의 사용량을 줄이고 부산물을 소비 하기 위한 것을 의미한다. 즉, 바텀애시 소비 및 일반잔골재 보존을 위해 바텀애시로 인한 콘크리트의 성능감소를 감내하면서도 사용하는 것이다. 잔골재로 사용하거나 클링커 제조를 위한 점토질 실리카 원료로 사용하는 할 수 있다(AACA 2019). 국내에서는 천연점토나 혈암 대신 경량골재용 소재로 사용하기도 한다(Kim and Kang 2007). 이후에

자세히 설명하겠지만, 대부분 기존 천연소재를 사용할 경우에 비해 성능이 떨어지거나 품질관리를 위한 추가적인 비용이 발생한다.

한편, 진보적 활용이란 바텀애시의 독특한 특성을 활용해 기존 재료가 달성할 수 없었던 성능을 달성하는 것이다. Table 1에는 기존 논문들에서 소개된 진보적 활용의 사례를 정리한 것이다. PCC 바텀애시의 경우 포졸란 반응성과 독특한 형상을 활용하는 한편, CFBC 바텀애시의 경우 독특한 화학적 반응성을 활용할 수 있다. PCC 바텀애시를 일부 파쇄해 filler나 잔골재 내 미분으로 사용하면 시멘트와 반응을 통해 치밀한 미세조직이 생성된다(Tafesse and Kim 2016). 따라서 일반잔골재를 사용했을 때에 비해 탄산화 침투 및 염소침투 저항성이 오히려 증가한다(Kim et al. 2014). 한편 내부의 다공성을 활용하면, 콘크리트의 자기 수축을 감소할 수 있는 내부양생용 소재(internal curing agent) 혹은 단열 성능을 개선할 수 있는 준경량골재(semi-lightweight aggregate)로 사용이 가능하다(Kim and Lee 2011). 또한 매우 거친 형상으로 인해 부피밀도(bulk density)가 낮은 특징이 있는데, 이는 바텀애시 주변의 기포가 상승하는 것을 막기 위한 일종의 방해벽의 역할을 하기도 한다(Kurama et al. 2009). 따라서 단열용 기포콘크리트 타설 중력방향으로 공극이 고르게 분포하게 하는데 도움을 준다.

한편 CFBC 바텀애시의 강한 자체수경성을 활용해 그 자체로 결합재로 사용하거나, 아니면 다른 부산물, 즉 플라이애시나 고로 슬래그를 위한 활성화제로 사용할 수 있다. 비록 일부 f-CaO가 있지만, 이 재료가 기본적으로 황산염(sulfate)기반이기 때문에, 위

에서 언급한 바와 같이 기본적으로 석고를 대체할 수 있다(Sheng et al. 2007). CFBC 애시는 화학적 품질편차가 크기는 하지만, 단지 내부의 황산염량만을 기준으로 OPC에 배합하면 석고와 유사한 성능을 나타낸다는 보고가 있다(Shen et al. 2013). CFBC 바텀애시 자체의 안정적인 강도 발현등은 어렵지만, 급결을 유도하거나 수축을 감소하는 등 우수한 성능을 나타낸다는 보고도 있다(Kim et al. 2019a). 독특한 점은, 이 재료가 석고나 인산석고(CaPO₄)와 같이 중성 경화체(pH-neutral mixture)가 될 수 있다는 것이다(Jang et al. 2018). 즉 지중의 알칼리 침출수 문제를 해결할 수 있는 가능성 결합재로 사용이 가능하다.

4. 바텀애시 콘크리트/모르타르의 성능

바텀애시는 재료 자체 특성의 편차가 크기 때문에 이를 혼입한 콘크리트 및 모르타르의 성능 역시 편차가 크게 발생할 가능성이 있다. 기존의 다양한 연구에서 확인된, 콘크리트의 유동성, 강도, 내구성에 대한 바텀애시 혼입의 영향에 대해 Table 2에 정리하였다. 참고로, PCC 및 CFBC 바텀애시 자체를 주결합재로 하여 알칼리활성물질(alkali-activated materials) 혹은 지오폴리머(geopolymer)로 제조한 결과는 이 Table 2에 포함하지 않았는데, 이는 주재로 보다 활성화제 종류와 양에 의해 성능이 결정되기 때문이다. 이 Table 2을 참고 할 때 알아두어야 할 것은, 기본적으로 바텀애시 사용에 의한 콘크리트 및 모르타르의 성능변화는 별도의 특이점이 없이 사용량에 선형적으로 비례한다는 것이다. 따

Table 1. Cases of advanced utilization of coal bottom ash in cement composites

Case	Treatment for ash	Effect
PCC bottom ash		
As active filler/aggregate (Pyo and Kim 2017)	Raw or ground/crushed	Densify interface, Improve the resistances against carbonation/chloride penetration
As internal curing agent(Kim et al., 2014; Wyrzykowski et al. 2016)	Raw or surface-wearing	Mitigate the autogenous shrinkage, Enhancing hydration degree
As semi-lightweight aggregate (Torkittikul et al. 2017)	Raw or surface-wearing	Improve thermal insulating properties
As foam stabilizer in aerated concrete (Kim et al. 2012a)	Raw and size-controlled	Prevent floating of air bubble in fresh mixtures: led uniform distribution of air voids
CFBC bottom ash		
As hydraulic binder itself (Hlaváček et al. 2018)	Raw or ground/crushed	Accelerate setting and hardening duration
As sulfate source for OPC (Shen et al. 2013)	Ground/crushed	Retarding hydration of C ₃ A, Lead expansion or shrinkage reduction
As activator for alkali-activated materials (Xu et al. 2010)	Ground/crushed	pH-neutral matrix, Lead expansion or shrinkage reduction

Table 2. Summary of effect of incorporation of coal bottom ash on performance of concrete and mortar

Ref.	Content and condition of ash			Composite type	Performance of concrete and cement composites ^a		
	Contents	Characteristics	Treatment ^b		Fresh properties	Mechanical properties	Durability
PCC bottom ash							
Kurama and Kaya (2008)	B~25 wt.%/OPC	SG: 2.39	Ground	Normal mortar	-	CS ↓ ~30%	-
Gonzalez-Fonteboa et al. (2018)	B~40 wt.%/OPC	-	Ground	Normal concrete	Flow ↓ ~25%	CS ↓ ~30%	Cap. WA ↑ ~20%
Tafesse and Kim (2016)	Filler~30 Vol.%/OPC	SG: 1.8, 2.2 WA: 5.1%, 5.1%	Crushed	Normal mortar	Flow ↑ ~200%	CS ↓ ~40%	-
Bai et al. (2005)	FA~100 Vol.%	SG: 1.5~1.6 WA: 30~32%	Raw	Normal mortar	Slump ↑ ~200mm	CS ↓ ~40%	Shrnk ↓ ~40%
Topçu and Bilir (2010)	FA~100 Vol.%	SG: 1.3 WA: 12.1%	Raw	Normal mortar	Slump ↓ ~10%	CS ↓ ~50% E ↓ ~10%	Shrnk ↓ ~60% Tc ↓ ~200%
Kim (2015a)	FA~30 Vol.%	SG: 2.47	Crushed	Normal mortar	No change	CS ↑ ~20% E ↓ ~0%	Cap. WA ↓ ~30% Shrnk ↓ ~0%
Jang et al. (2016)	FA~50 Vol.%	SG: 1.9 WA: 8%	Raw	Normal mortar	-	CS ↓ ~20%	R _{Cl} ↑ ~10%
Yüksel and Genç (2007)	FA~50 Vol.%	SG: 1.4 WA: 6.1%	Raw	Normal concrete	Slump ↓ ~30%	CS ↓ ~30% FS ↓ ~30%	Cap. WA ↑ ~30%
Kou and Poon (2009)	FA~100 Vol.%	SG: 2.2 WA: 29%	Raw	Normal concrete	Slump ↑ 120mm	CS ↓ ~40%	Shrnk ↓ ~5%
Yüksel et al. (2011)	FA~50 Vol.%	SG: 1.4 WA: 6.1%	Raw	Normal concrete	-	CS ↓ ~20% E ↓ ~30%	R _{Fire} ↓ 0%
Singh and Siddique (2014)	FA~100 Vol.%	SG: 1.4 WA: 31.6%	Raw	Normal concrete	Bleeding ↓ ~40% Slump ↓ ~50%	CS ↓ 0%	Cap. WA ↑ ~100%
Singh and Siddique (2015)	FA~100 Vol.%	SG: 1.4 WA: 31.6%	Raw	Normal concrete	-	CS ↓ 0%	-
Rafieizonooz et al. (2016)	FA~100 Vol.%	SG: 1.9 WA: 11.6%	Raw	Normal concrete	Slump ↓ ~70%	CS ↓ ~30%	Shrnk ↓ ~50%
Siddique (2013)	FA~30 Vol.%	SG: 1.9	Raw	Self-compacting concrete	Slump ↓ ~10%	CS ↓ ~30%	R _{Cl} ↓ ~10% Cap. WA ↑ ~300%
Kim and Lee (2011)	FA~100 Vol.% CA~100 Vol.%	SG: 1.8~1.9 WA: 5~8%	Raw	High-strength concrete	Flow ↓ ~30%	CS ↓ 0% E ↓ ~50%	R _{Cl} ↓ ~10%
Lee et al. (2010)	FA~100 Vol.%	SG: 1.9~2.0 WA: 0.6~3.6%	Raw	Foamed mortar	Flow ↓ ~50%	CS ↓ ~50%	-
Kim and Lee (2016)	FA~50 Vol.%	SG: 1.8~1.9 WA: 5~8%	Size controlled	High-strength concrete	Flow ↓ ~10%	CS ↓ ~20%	Shrnk ↓ ~50%
Onprom et al. (2015)	FA~100 Vol.%	SG: 2.1 WA: 6.2%	Raw	Foamed mortar	-	CS ↓ ~30%	-
Won et al. (2004)	FA~50 Vol.%	SG: 2.0	Raw	CLSM	Flow ↓ ~30%	CS ↓ ~10%	-
CFBC bottom ash							
Wang and Song (2016)	B~30 wt.%/OPC	-	Raw	Paste	Flow ↓ ~30%	CS ↑ ~10%	-
Lee et al. (2020a) and Lee et al. (2020b)	B~20 wt.%/OPC and slag	SG: 2.7	Raw	Normal mortar	No change	CS ↑ -10~+10%	Shrnk ↓ 30~50% Tc ↓ ~500%

Ref.	Content and condition of ash			Composite type	Performance of concrete and cement composites ^a		
	Contents	Characteristics	Treatment ^b		Fresh properties	Mechanical properties	Durability
Jang et al. (2018)	FA~100wt.%	SG: 2.7	Raw	CLSM	Flow ↓ ~25% Rapid setting	-	Self degradation by expansion
Kim et al. (2019a)	B~20 wt.%/slag	SG: 2.7	Raw	Alkali-activated slag mortar	Setting time ↑ ~30%	CS ↑ -20~+30% (affected by curing temperature)	Shrnk ↓ ~50%

Note) FA: replaced to natural fine aggregate; CA: replaced to natural coarse aggregate; B: use as cementitious binder; SG: specific gravity at saturated surface-dry condition; WA: water absorption; CS/FS: : compressive/flexural strengthes at 28 d; E: elastic modulus at 28 d; Shrnk: shrinkage; Cap. WA: capillary water absorption; Tc: crack initiation time by shrinkage; R_{Fire}: resistance against fire, i.e., strength reduction after fire; R_{Cl}: chloride penetration resistance; CLSM: controlled-low strength materials (=flowable cement fill)

a Decrease/increase in performances at maximum contents of bottom ash compared to the control mixture with same w/b and without bottom ash
 b Ground: finely ground to the size similar to OPC; Crushed: coarsely crushed to the size in the range from 0.1 to 1.0mm

라서 Table 2에는 단순히 바텀애시 혼입량의 최대치에 대응하는 콘크리트 및 모르타르 성능변화량의 최대치를 제시하였다.

4.1 굳기 전 특성

바텀애시들을 혼입한 콘크리트 및 기타 시멘트계 복합재료의 굳기전 특성 중 검토해야 할 것에는 대표적으로 워커빌리티(workability), 공기량, 블리딩과 레이턴스, 응결시간, 그리고 표면색(surface color) 등이 있다.

별도의 가공을 하지 않은 PCC 바텀애시를 일반 잔골재와 치환할 때, 치환률이 높아질수록 대부분 배합의 슬럼프나 플로우 값이 증가한다. 바텀애시가 시멘트 복합재료의 유동성에 미치는 영향을 요약하면 다음과 같다.

- i. PCC 바텀애시의 거친 표면으로 인한 물리적 맞물림(interlocking)
- ii. PCC 바텀애시 표면의 큰 공극으로의 시멘트 페이스트 침투, 이로 인해 유동에 기여하는 유효 페이스트량 감소
- iii. PCC 바텀애시 흡수율의 과대평가(over-estimate)로 인한 시멘트 배합의 실제 w/b량 증가
- iv. PCC 바텀애시의 미연탄소분의 고성능감수제 혹은 공기연행제 흡착

일반 골재와 동일한 부피가 치환된다 하더라도, PCC 바텀애시의 표면 공극으로 페이스트가 들어가는 현상 그리고 동시에 매우 거친 바텀애시의 표면으로 인한 맞물림으로 인해 유동성이 감소할 수 있다(Kim et al. 2012b). 만약 감수제를 사용하지 않는 고전적인

배합설계법을 따르게 된다면, 바텀애시 사용 시 유동성 확보를 위한 단위수량이 증가하게 되며, w/b 유지 혹은 저감을 위해 결합재량이 증가하게 되어 결과적으로 콘크리트의 가격이 증가한다(Tafesse and Kim 2016). 따라서 PCC 바텀애시의 적용 할 경우 감수제량이 증가해야 한다.

한편, 슬럼프 값이 같더라도 유동적 특성(rheological property)이 달라질 수 있기 때문에 실제 타설 시 세심한 주의가 필요하다(Kwon et al. 2016). 콘크리트의 압송시, 일반 슬럼프 측정시와 달리 고압조건의 유동전단력이 발생하므로, PCC 바텀애시 입자간 맞물림으로 인해 압송이 어려워질 가능성이 크다. 심할 경우 압송 중 폐색이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다. 따라서 실제 PCC 바텀애시 콘크리트를 사용할 경우 압송을 위한 사전실험이 진행되어야 한다. 이러한 관점에서 PCC 바텀애시는 분체량이 오히려 많은 고성능 콘크리트에서 오히려 압송 문제가 해결될 가능성 역시 존재하며 이에 대한 체계적인 검토가 필요하다.

동시에, 시간에 따른 유동성 손실 검토가 필요하다. 미가공된 PCC 바텀애시 콘크리트 유동성의 경시변화는 위에서 언급한 흡수율의 정의에 따라, 유동성 감소가 발생할 가능성이 있다(Singh and Siddique 2016). 뿐만 아니라 LOI가 높은, 즉 미연탄소분이 많은 바텀애시를 사용한 경우, 이 탄소분이 계면활성제(surfactant)인 감수제나 공기연행제를 흡착하여, 유동성과 공기량을 시간에 따라 크게 감소시킨다는 실험결과가 있으므로 주의가 필요하다(Tafesse and Kim 2016).

PCC 바텀애시의 불량한 표면형상과 높은 공극률을 해결하기 위해 일부 파쇄하는 것은 좋은 방법이라 할 수 있다. 이 때 입자의 형상이 구형에 가깝게 되므로, 형상으로 인한 유동성 문제는 발생하지 않는다(Kim 2015a).

일부 PCC 바텀애시 사용에 의해 유동성이 증가한다는 보고가 있는데(Kou and Poon 2009), 이에 대해서는 자세한 검토가 필요하다. 실제 PCC 바텀애시의 흡수율이 얼마나 정확하게 측정되었으며, 표건상태가 어떻게 정의되었는지에 따라 이와 같은 결과가 도출되었을 가능성이 있다. 위에서 언급한 것과 같이 기존의 흡수율 측정시험기준을 따를 때, PCC 바텀애시는 이론적인 값 보다 흡수율이 높게 측정되기 때문에 이 높은 흡수율이 배합의 w/b를 원치않게 높이는 위험이 있다. 이는 이후 블리딩양의 증가와 강도의 저하, 수축량의 증가로 이어질 수 있으므로 주의가 필요하다.

한편 CFBC 바텀애시는 일반적으로 골재가 아닌 결합재, 즉 시멘트 나 슬래그, PCC 플라이 애시와 소량 치환되어 사용되므로 유동성에 대한 연구결과는 거의 없다. 급격한 초기반응을 일으키기 때문에 유동성이 감소할 수도 있는 반면, 동시에 위에서 언급한 일반적 결합재 분말에 비해 대부분 입자 크기가 크기 때문에, 만약 별도의 분쇄 가공 없이 동일 부피로 치환하면 유동성이 증가할 수도 있다. 아직 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

PCC 바텀애시를 사용한 콘크리트의 공기량, bleeding과 레이턴스에 대해서는 주목할만한 실험결과가 보고된 사례가 없다. 블리딩이 일부 감소한다는 결과가 일부 있는데, 이는 거친 표면의 바텀애시가 굳기전 콘크리트 내에서 시멘트와 골재들의 침하(settlement)를 방해하기 때문으로 예상되지만, 결과적으로 그렇게 주목할 만큼의 감소폭은 아니다(Choi et al. 2003).

여기서 실무적인 측면에서 주의 해야 할 것이 있는데, 바로 굳지 않은 콘크리트 및 모르타르 표면의 색과 얼룩이다. 바텀애시를 그대로 사용하거나 일부 파쇄할 할 경우, 내부에서 검은 부유물이 발생하는 경우가 있다. 이는 바텀애시 공극 혹은 조직 내의 미연탄소분(혹은 잔류 유분)으로 추측되나 아직 명확하게 어떤 물질인지 검증된 보고는 없다. 이것 자체로 인해 콘크리트의 성능이 저하되는 지에 대해서는 보고가 없으나, 건설현장에서 시공이나 감리 과정 중 지적받을 수 있으니 주의가 필요하다.

4.2 물리적 특성

바텀애시와 같은 부산물을 콘크리트에 혼합했을 때 검토해야 하는 물리적 특성은 기본적으로 강도와 탄성계수이다. 우선 PCC 바텀애시 콘크리트나 모르타르의 압축강도는 다음과 같은 요인에 의해 영향을 받을 수 있다.

- i. PCC 바텀애시 자체의 미세구조와 입자강도
- ii. PCC 바텀애시 표면에서의 포졸란 반응

- iii. PCC 바텀애시 내부의 수분에 의한 내부양생 효과(internal curing): 주변 시멘트의 수화 촉진
- iv. PCC 바텀애시 흡수율의 과대평가로 인한 시멘트 배합의 실제 w/b량 증가

Table 2에서와 같이, 많은 연구결과에서 PCC 바텀애시의 사용에 의해 콘크리트의 압축강도와 탄성계수가 감소 한다고 보고되었다. 하지만 예외도 존재하며 이는 바텀애시의 전처리 방법에 의해 주로 영향을 받는다. 압축강도가 감소하는 경우의 대부분은 PCC 바텀애시를 아무런 전처리 없이 그대로 잔골재와 치환 하는 경우이다. 한편 바텀애시를 일부 파쇄(crush) 하거나 분쇄(ground)한 후 잔골재와 치환하거나 필러로 사용했을 경우 동일한 w/c 혹은 w/b조건에서 오히려 압축강도를 증가시키기도 한다.

이러한 현상을 고려할 때, 미가공 PCC 바텀애시의 경우 바텀애시 자체의 미세구조나 입자 강도에 콘크리트 강도가 결정된다고 할 수 있다. 즉, 아무리 PCC 바텀애시 계면에서 포졸란 반응을 하더라도, 바텀애시 자체의 밀도가 낮고 공극률이 크다면 콘크리트의 강도가 크게 감소할 수 있다. 그러나 바텀애시 중 미분을 별도로 선별하거나, 목적에 맞게 파쇄/분쇄 하는 경우 강도에 대한 포졸란 반응성의 기여가 높아진다(Tafesse and Kim 2016). 이론적으로 내부양생효과 역시 기대할 수 있으나, 강도에 명확히 기여한다는 정량적인 보고가 없으며, 결국 물이 포함되어 있었던 공극에 의해 강도가 감소한다고 보는 것이 합당하다(Kim and Lee 2018). 마지막으로 PCC 바텀애시 흡수율 과대평가로 인한 w/b 증가는 강도에 무조건의 악영향을 미친다. 따라서 콘크리트 강도의 손실 없이 PCC 바텀애시를 활용하기 위해서는 일반 잔골재 보다 작은 크기로 가공, 선별해 사용해야 할 필요가 있다. 그러나 중요한 것은 바텀애시 사용에 의한 강도감소를 보상하기 위해 일부 단위 시멘트량을 증가시켰을 때, 즉 등가강도를 얻기 위해 w/b 값을 증가 시켰을 때의 배합설계이다(Ji et al. 2019). 이 점에 대해서는 단순히 강도의 검토가 아닌 경제성 및 환경영향 등을 고려해야 하므로 이후 별도의 장에서 언급하기로 한다.

PCC 바텀애시 콘크리트의 압축강도-(휨)인장강도 간의 관계가 일반 콘크리트의 그것과 차이가 있는지에 대한 조사 결과는 거의 없다. 단지, 일반적으로 유사한 압축강도 조건에서 (휨)인장강도가 상대적으로 높기 위해서는, 섬유를 통해 인장성능을 개선시켜 주던가, 아니면 파괴역학 측면에서 균열이 전파되는 유효거리를 늘리기 위해 내부에 포함된 입자를 매우 강도가 강한 것으로 사용해야 하는데, 바텀애시는 두 가지 모두 아니다. 휨균열 발생 시 일반골재 콘크리트는 골재의 계면을 통해 파괴가 진행되는 반

면, 바텀애시 콘크리트는 바텀애시 입자를 관통하여 파괴가 진행되기 때문에, 압축강도 저하에 따라 (휨)인장강도 역시 감소한다고 보는 것이 맞다(Kim and Lee 2011). 결국, 콘크리트 구조물 설계기준 상 콘크리트의 인장강도 모델식을 사용해도 되는지에 대해서는 추가 실험 결과가 제시되어야 한다.

일반잔골재에 비해 무른 PCC 바텀애시로 인해 콘크리트 및 모르타르의 탄성계수 역시 감소한다. 바텀애시 자체의 탄성계수를 확인한 연구결과는 거의 없으나, 공학상식적 측면에서 일반 잔골재에 비해 상당히 무른 것으로 예측된다. 세계 다양한 국가에서 압축강도와 탄성계수 간의 관계식에 콘크리트의 밀도를 고려하는 경우와 그렇지 않은 경우가 존재하는데, 비중 2.0 이상의 PCC 바텀애시 콘크리트는 비록 바텀애시의 혼입량이 높아도 경량골재 같이 콘크리트 밀도가 크게 감소하지는 않기 때문에 굳이 밀도를 고려한 식을 사용할 필요는 없다고 판단된다. 압축강도-탄성계수 관계는 일반골재 콘크리트와 바텀애시 콘크리트 사이에 차이가 거의 없다.

압축에 대한 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)을 제시한 연구결과는 매우 적다. 이 그래프는 단순히 압축에 대한 탄성거동 혹은 인성(toughness)을 보여주는 것 뿐 아니라, 이후 피로저항성(fatigue resistance)과 상관관계가 있다. 일반골재 콘크리트는 기본적으로 골재와 페이스트 간의 탄성계수 값이 크게 다르기 때문에 준선형(quasi-linear)탄성거동을 한다(Andrade et al. 2007), 즉, 초기접선탄성계수가 활성탄성계수에 비해 약 10~25% 정도 높게 측정된다. 그리고 일반강도 콘크리트는 최대응력 이후 일부 변형연화(softening)구간이 있으며, 이 부분 역시 콘크리트 구조설계 시 등가응력블록의 형태로 고려된다. PCC 바텀애시는 일반적으로 콘크리트의 잔골재와 일정량 치환하며 굵은 골재는 일반자갈을 사용하기 때문에, 응력-변형률 곡선의 형태는 일반골재 콘크리트와 큰 차이가 없다. 즉, 초기접선탄성계수와 활성탄성계수간의 차이, 혹은 변형연화 구간의 형태 역시 동일하다. 따라서 PCC 바텀애시 콘크리트는 일반 콘크리트용 구조설계식을 그대로 사용해도 무방하다.

PCC 바텀애시의 포졸란 반응성과, 이 반응의 강도에 대한 기여도를 정량적으로 평가한 사례는 드물다. 단지, PCC 바텀애시를 파쇄 후 플라이애시와 유사한 입도로 유사한 부피 만큼을 사용했을 때, 플라이애시에 비해 portlandite 소모량 즉 포졸란 반응성이 높다는 것, 그러나 수화도 대비 강도는 플라이애시 보다 낮았다는 것을 확인 하였다(Kim 2015a). 즉, 바텀애시는 플라이애시 보다 반응을 더 높게 할 수는 있지만, 강도에 기여하는 정도는 낮을 수 있다는 것을 간접적으로 의미하는 결과이다. 위에서 언급한 바와 같이 상대적으로 quartz의 결정성이 큰 플라이애시의 입자가, 유

리질이 강한 PCC 바텀애시 입자에 비해 포졸란 반응의 정도는 강할 가능성이 있다.

중요한 것은, PCC 플라이애시는 결합재로서 반응성을 고려해 배합설계에 사용되는 반면, PCC 바텀애시는 그 반응성이 강도에 기여하는 바를 배합설계에 반영하지 못하고 있다는 것이다(Tafesse and Kim 2016). 골재로 사용할 경우 강도가 감소되므로 기존 배합설계식을 사용할 수 없으며, 동시에 필러로 사용할 경우 역시 강도가 증가할 수 있지만, 기존 설계식에는 적용이 어렵다. 미분쇄 후 플라이애시의 대체제로 사용하기에는 경제성이 부족하다. 그래서 현실적 측면에서는 모래와 적절히 치환했을 때 강도의 감소가 없는 PCC 바텀애시의 적정 입도영역을 제시하여, 이에 만족하는 부분을 사용하는 것이 현실적이라고 판단된다.

한편 CFBC 바텀애시는 결합재이므로 어떻게 사용하는지에 따라 매우 다른 물리적 특성을 나타낸다. 만약 CFBC 바텀애시가 일반 시멘트와 치환되어 활용되는 경우, 강도는 일부 유지되거나 혹은 감소할 수 있다(Lee et al. 2020b). 혼합 시멘트에서 슬래그 혹은 플라이애시와 치환되는 경우, 바텀애시 자체의 수경성으로 인해 강도를 높일 수 있다. 슬래그 시멘트에서 슬래그와 CFBC 바텀애시를 20% 까지 치환 했을 때, 바텀애시를 미분화 하지 않고 입경 1mm 전후의 분포입자를 사용했음에도 불구하고 강도의 손실이 전혀 없었다(Lee et al. 2020b). 그러나 현재 유의한 결론을 도출 할 만큼의 결과가 충분히 보고되지 않았다. 대부분 CFBC 애시에 대한 연구논문은 대부분 애시 기반 알칼리 활성 물질의 화학적 반응 자체에 집중되어 있으므로, 강도에 대한 자료는 적다. 무엇보다, 아직 콘크리트에 적용할 만큼 안정적인 성능을 발현한다는 보고가 적다. 이후 지속적인 연구가 필요하다.

4.3 내구성 및 장기거동

바텀애시를 콘크리트 및 모르타르에 적용할 때 검토해야 할 내구성 및 장기거동 종류에는 탄산화, 염소침투, 동결융해, 마모, 산과 황산염 등에 대한 저항성, 수축 및 이로 인한 균열발생 가능성, 크리프 등이 있다. 다양한 내구성 지표는 손쉽게 간접적으로 평가할 수 있는 방법 중 하나는 모세관 흡수율을 확인 하는 것이다. 모세관 흡수율은 미세조직 내 공극의 양과 연결도, 즉 이온과 물이 이동할 수 있는 통로에 의해 결정되기 때문이다. 대부분의 보고에서는 위에서 언급한 모든 내구성 지표들을 검토하기 보다 주로 모세관 흡수율만 평가하였다. 이는 아마도 단순히 강도 및 유동성 검토 연구에서 바텀애시에 의해 성능의 감소가 확인된 경우가 많았기 때문에 이 부산물의 활용가능성을 낮게 평가했기 때문으로 보인다. 하지만, 실제로 세부적으로 검토하면 바텀애시 사용에 의

해 오히려 내구성이 높아질 수 있는 가능성이 있다.

PCC 바텀애시를 잔골재로 사용할 때 콘크리트 및 모르타르의 내구성에 영향을 미치는 주요 요인은 다음과 같다.

- i. PCC 바텀애시의 공극을 통한 물, 이온, 가스의 이동
- ii. PCC 바텀애시의 포졸란 반응으로 인한 계면 치밀화

Table 2의 결과를 요약하면, 미가공된 PCC 바텀애시의 공극으로 인해 콘크리트의 모세관 흡수량이 증가한다. 이는, 이후 탄산화, 염소침투 속도가 증가와 일정 연관이 있다. 한편, 실제 그 증가량은 매우 미약한데, 예를 들어 PCC 바텀애시를 잔골재와 50% 치환하면, 강도는 약 20% 까지 감소할 수 있는 것에 반해 탄산화나 염소침투 저항성은 약 10% 이내에서만 감소한다(Jang et al. 2016). 이는 포졸란 반응으로 인해 계면치밀화와 연관이 있는 것으로 보인다. 무엇보다, 흡수성 공극량과 모세관 흡수속도 간의 관계식을 보면, 일반골재 콘크리트에 비해 PCC 바텀애시 콘크리트가 상대적으로 동일 공극량 대비 모세관 흡수속도가 낮은 것을 알 수 있다(Kim et al. 2012b). 이는 공극 부피는 동일하더라도 이 공극을 통해 수분이 침투하기 어렵다는 점을 의미한다. 주사현미경을 통한 후방산란전자 이미지를 확인해 보면, 일반골재는 계면천이영역(interfacial transition zone, ITZ)이 명확하게 확인되며 그 부분에서의 벽면효과(wall effect, ITZ에서의 상대적으로 높은 w/b와 덜 치밀한 구조)가 확인되는 것에 반해, PCC 바텀애시의 ITZ에서는 포졸란 반응으로 인해 벽면효과가 확인되지 않는다(Kim and Lee 2018). 특히 콘크리트 내 바텀애시 주변에서의 염소이온 확산을 정량확인 하기 위한 Electron Probe X-ray Micro Analyzer(EPMA) 촬영결과를 보면, 바텀애시 주변에서는 실리카와 알루미늄 농도가 높기 때문에 ITZ 주변에 염소량이 낮은 것, 즉 바텀애시 계면을 통해서는 염소 침투속도가 느려진다는 사실을 가시적이고 정량적으로 확인 할 수 있었다(Kim et al. 2014).

특히 실제 환경에서 중요한 것은 복합열화(coupled deterioration), 즉 염소침투와 탄산화, 혹은 동결융해가 동시에 발생하는 경우인데, 이는 동결융해에 의해 표면 모세관이 붕괴됨과 동시에, 프리델염(Friedel's salt)이나 C-S-H 등의 수화물에 고정 혹은 흡착되었던 염소 들이 탄산화에 의해 자유염소가 되면서 내부로 재확산되는 상황이다. PCC 바텀애시 콘크리트는 일반골재 콘크리트에 비해 비록 공극량이 많지만 염소침투-탄산화 복합열화 환경에 대해 오히려 일반 잔골재 보다 더 우수하다는 결과를 확인하였다. 일반강도 모르타르에 대해 염소-탄산화 반복 시, 가공하지 않은 PCC 바텀애시를 일반잔골재와 부피비로 50% 치환하

였을 때, 그렇지 않은 것과 비교해 염소 침투 깊이가 약 절반으로 감소하였다(Jang et al. 2016). 즉 PCC 바텀애시는 경우에 따라 오히려 잔골재 보다 더 좋은 내구성을 갖을 수 있다는 것이다.

한편, 콘크리트에 PCC 바텀애시를 혼입 했을 때, 바텀애시 자체의 다공성 및 이 공극 내에 존재하는 물로 인해, 콘크리트의 단위면적으로부터 증발하는 물의 양이 증가함에도 불구하고 콘크리트의 건조수축량은 오히려 감소한다는 결과들이 있다(Rafieizonooz et al. 2016). 이는 바텀애시 내부의 수분이 건조수축의 원인인 시멘트 매트릭스의 내부상대습도 감소를 보상해 주어(내부양생효과), 모세관압의 증가를 제어하기 때문으로 판단된다. ASTM C1621의 'Ring test'를 활용해 콘크리트의 건조수축균열 발생시기를 평가했을 때, PCC 바텀애시 미사용 콘크리트와 사용 콘크리트의 균열발생이 각각 약 20일, 40일이라는 보고가 있다(Topçu and Bilir 2010). 이는 수축감소효과 뿐 아니라, 바텀애시의 무른 조직구조에 의해 릴렉сей션(relaxation)이 증가하여 발생하는 현상이다. 이와 유사한 현상은 인공경량골재 등에서도 자주 발견된다(Shen et al. 2020).

PCC 바텀애시를 잔골재 대비 30% 사용했을 때 강도가 30% 감소함과 동시에 마모저항성, 즉 마모시험에 의한 마모깊이가 약 20% 증가할 수 있다고 보고되었다(Siddique 2013). 즉, 바텀애시를 혼입 한다 하더라도 강도 대비 마모성능에도 큰 차이는 없을 것으로 판단된다. 그 외에 골재를 약 30% 수준까지 치환했을 때 동결융해 측면 에서도 전혀 문제가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다(Park et al. 2016). 단지 바텀애시 중 해수처리된 것이나, 혹은 펀드애시를 활용하는 경우 총염소량이 증가할 가능성이 있으므로 주의해야 한다(Choi et al. 2003). 한편 PCC 바텀애시가 콘크리트나 모르타르의 황산염 혹은 산 저항성에 미치는 영향에 관한 보고는 결과를 도출할 만큼 충분하지 않다.

한편 CFBC 바텀애시 콘크리트/모르타르의 내구성에 관한 연구 결과는 매우 드물다. 기존 우리 연구에서는 일반 시멘트 및 슬래그 혼합 시멘트에 CFBC 바텀애시를 일종의 팽창제로 사용하였으며 이 팽창반응으로 인한 균열발생 시기를 유추하였다(Lee et al. 2020a). 일반적 팽창제로서 역할을 하기 때문에 수축균열발생시기를 늦추는 것이 가능했다. 그러나 자기수축을 줄여주는 효과는 크지만, 건조수축을 줄여주는 효과는 약하기 때문에 건조시에는 크게 효과가 없다고 판명되었다. 한편 CFBC 바텀애시를 알칼리활성 슬래그를 위한 활성화제로 사용하기도 하였는데, 무엇보다 수축을 감소시킬 수 있었다(Kim et al. 2019a). 다른 화학 활성화제를 어떻게 사용하는지에 따라 다를 수 있으나, CFBC 바텀애시는 나트륨계 활성화제와 사용했을 때, 상대적으로 밀도가 매우 낮은

물질인 Mirabilite(황산나트륨수화물, 비중 1.49)을 생성할 수 있는데, 이 물질이 공극 내 채워지면서 화학수축과 상대습도 감소율을 줄여 결과적으로 슬래그 매트릭스의 자기수축이 감소하는 메커니즘이다. 한편 일반 칼슘계 활성화제와 CFBC 바텀애시를 함께 사용하면, Ettringite을 발생시켜 수축을 줄일 수도 있다(Jang et al. 2018). 그러나 CFBC 바텀애시는 알칼리 활성 슬래그의 탄산화 저항성 등에는 전혀 효과가 없는 것으로 확인되었다(Kim et al. 2019b).

5. 환경에 대한 영향과 경제성

현장에서 바텀애시의 사용을 촉진하기 위해서는 환경적 측면 및 경제적 측면에서의 검토가 필요하다.

먼저, 바텀애시를 콘크리트에 적용할 때는 환경적으로 두 가지를 검토해야 한다. 먼저 바텀애시 내 중금속의 유출과 관련된 것이다. 도시고형쓰레기 소각재(municipal solid waste incinerator ash)나 광산의 광미(mine tailings), 하수슬러지(sewage sludge)와 같은 다양한 무기계 폐기물 및 부산물 중, 바텀애시는 상대적으로 환경적 문제가 발생할 가능성이 낮은 재료로 분류된다. 바텀애시란 석탄이 일종의 농축과정을 거친 것이므로 자연히 일반 암석에 비해 높은 농도의 중금속이 포함되어 있을 가능성이 있다(Jones et al. 2012). 바텀애시가 포함하고 있는 중금속의 농도는 자료를 마다 모두 다르지만, 대부분의 보고서에 따르면 바텀애시를 콘크리트나 모르타르 용으로 사용했을 때는 중금속 침출의 문제가 거의 없다는 것이다(Menéendez et al. 2014). 콘크리트나 모르타르 등 시멘트 기반 재료 내에 적당량 골재나 filler로 사용하는 경우에는 중금속 용출량이 별도의 평가할 필요하지 않을 정도로 줄어든다. PCC 바텀애시 무게 대비 10% 이상의 시멘트를 사용하면 바텀애시로 부터의 중금속 용출은 거의 불가능에 가까워 진다고 알려져 있다(Hashemi et al. 2019). 시멘트 수화물에 의한 흡착 혹은 시멘트와 별도의 수화물을 생성하기 때문이다(Kim et al. 2015). 이는 PCC ash 및 CFBC ash 모두 마찬가지 이다(Jang et al. 2018). 일부 방사선물질이 발견된다는 사례가 있으나, 이 역시 일반적인 보고는 아니다(Sanjuán et al. 2019).

한편, 시멘트를 안정화제로 사용하더라도 PCC 바텀애시를 지반재료로 사용하는 경우, 즉 시멘트 혼입 뒷채움재나 고유동 충전재(controlled-low strength materials, CLSM)를 대량으로 사용하는 경우 원칙적으로 단순히 시간에 따른 중금속의 용출량(tank leaching)이 아닌 배합재로 전체의 중금속 총량에 대한 평가가 필요하다(Kim et al. 2018). 지반의 경우 '토양환경보전법 시행령(대

통령령 제 29972호, 시행 2019.7.8.)'에 준하여 오염물질에 대한 전체 농도를 평가해야 하기 때문이다. 풍화(weathering)과 부식(erosion)에 의해 조직 내부에 갇혀 있던 중금속이 시간에 따라 침출 할 수 있기 때문이다. 따라서 바텀애시와 함께 중금속 농도가 낮은 천연 건설재료인 일반 토사 등을 배합하여 환경문제를 해결해야 한다.

우리나라의 경우 2017년 KS F 4569와 KS F 4570를 통해지반 및 PC 콘크리트를 위한 PCC 바텀애시 골재에 관한 성능을 규정하였는데, 여기에는 일반 물리 화학적 성능 외에 별도의 중금속 및 환경 기준이 없다. 미국의 ACI 229R-13의 CLSM에 대한 성능 규정에서도 PCC 바텀애시의 대량 활용(전체 골재 및 filler 중 50%~100%)을 적극 권장하고 있으나, 우리나라와 마찬가지로 환경기준에 대한 언급은 없다. 일반적인 부산물 활용 시 복잡한 자원 활용 관련 법률체계 하에서 행정적으로 활용이 매우 어려운 경우가 많으나, 바텀애시의 경우 다른 부산물에 비해 환경적 문제가 없기 때문에 상대적으로 행정적인 장벽이 낮을 수 있다.

뿐만 아니라, 바텀애시를 콘크리트에 활용함으로써 얻어지는 환경적 이득, 즉 기존의 야적 폐기 혹은 지반노출재로서 활용되었을 때 발생하는 환경문제의 제어, 그리고 동시에 일반골재와 같은 천연자원의 보존이 발생한다. PCC 바텀애시 콘크리트의 등가강도설계(equivalent strength-based design)를 기반으로 한 환경영향성 평가사례는 존재하지만(Ji et al. 2019), 실제 바텀애시 사용으로 인한 천연 자원보호 및 바텀애시 폐기 시 발생할 환경적 비용을 통합적으로 고려한 환경영향성 평가사례는 확인할 수 없었다. 물론, 일반적으로 시멘트나 천연 모래와 자갈 모두 지역 및 국가에 따라 생산 시 발생하는 환경비용이 다르기는 하지만, 대략적으로 PCC 바텀애시를 잔골재로 사용하는 것은 플라이애시를 시멘트와 치환 하는 것에 비해 이산화탄소 배출량 등의 환경영향성 측면에서 이득이 적다고 예상된다. 일반적으로 바텀애시는 플라이애시와 달리 콘크리트에의 사용을 위해 체가름 하거나 세척, 혹은 파쇄해야 하는 점, 그리고 일반골재에 비해 바텀애시가 재료 생산처에서 골재처까지의 운반 거리가 길 경우가 많다는 점 때문이다(Singh and Bhardwaj 2020).

단지 CFBC 바텀애시를 시멘트 클링커 제조 혹은 시멘트용 석고 대체재로 소량 활용하는 경우라면, 환경적 측면에서 이득이 있을 수 있다. CFBC 바텀애시는 시멘트의 성능 측면에서 시멘트 대비 5% 이내 치환이 가능할 것으로 판단된다(Lee et al. 2020a). 실제 시멘트 자체 보다 시멘트 내 함유되는 5% 이내의 기존 석고와 일부 치환되는 형태가 현실적이지만, 한국의 경우 우선 석고의 대표적인 생산원이 바로 PCC 보일러로 부터의 탈황석고이므로

부산물 활용 측면에서는 CFBC 바텀애시를 사용해도 아무런 차이가 없다. 플라이 애시 사용량이 결합재 대비 약 5~20% 인 점을 감안하면 CFBC 바텀애시를 시멘트에 사용할 수 있는 양은 적으며, 이 역시 미분쇄가 필요하므로 여기에 사용되는 에너지를 고려해야 한다는 점에서 환경적 이득이 있다고 말하기 어렵다.

바텀애시의 콘크리트 사용에 대한 환경적인 측면을 요약하자면 다음과 같다. 바텀애시를 단순폐기 하는 것 보다 활용 하는 것이 바람직 하며, 콘크리트나 모르타르에 활용 시 환경적인 문제가 발생할 가능성이 낮다. 하지만, 도시쓰레기 소각재나 광산 광미 등 다른 폐기물에 비해 활용을 위한 정책적, 경제적 지원의 시급성이 상대적으로 부족한 것은 사실이다.

한편, 바텀애시의 활용 측면에서 반드시 고려되어야 할 것은 경제성이다. 바텀애시를 포함한 부산물을 콘크리트 등의 건설재료로 활용할 때 고려해야 하는 금액에는 다음과 같은 것들이 있다 (Korcak 1995).

- i. 생산 비용(cost): 재료의 수집, 전처리, 보관, 그리고 품질관리 등을 고려한 소모 비용(1차적 단순생산비용 및 2차적 사회순실비용)
- ii. 보전 비용(benefits): 중앙 혹은 지방 정부에서 부산물을 소모하는 대가로 받을 수 있는 보상(보상금 등의 유형의 이익 이외에 입찰시 가점 혹은 행정상 이득과 같은 무형의 이익)

먼저 생산 비용 측면에서 현재의 상황에서 PCC 바텀애시 골재는 거의 모든 경우 잔골재에 비해 가격이 고가일 가능성이 높다. 일반 잔골재는 강이나 석산, 혹은 바다에서 채취한 후 간단한 체가름, 혹은 일부의 경우 세척만 하면 납품이 가능하다. 그러나 PCC 바텀애시의 경우 위에서 언급한 바와 같이 공극률 감소와 입형의 개선을 위해 약간이라도 파쇄 혹은 분쇄 과정을 거치는 것이 필요하며, 그렇지 않을 경우 콘크리트 품질관리를 위한 별도의 비용이 발생할 가능성이 높다. 그리고 특히 펀드 애시의 경우 세밀한 세척을 통해 유기계 불순물을 반드시 제거해야 한다.

CFBC 바텀애시를 결합재료 사용할 경우 위에서 언급한 바와 같이 석고나 시멘트, 혹은 슬래그를 소량 치환하는 수준이다. 가격적 이득 측면에서 천연석고를 치환해 사용하는 경우, 혹은 기능성 필러로 사용해 콘크리트의 초기강도를 개선시키는 경우라면 모르지만, 대부분 PCC 보일러 탈황석고와의 치환이므로 경제적인 이득은 적다고 할 수 있다.

따라서 일반적으로 활용을 촉진하기 위해서는 보전비용의 제시가 중요할 것으로 판단된다. 위에서 일부 진보적 활용 사례를 언급

했으나, 실제 특수 콘크리트의 사용량의 한계를 고려할 때 바텀애시 소비를 확대하는 측면에서 파급력이 있는 방법이라 말하기 어렵다. 바텀애시의 발생량을 고려했을 때, 바텀애시를 일반콘크리트에 공학적 성능에 문제가 생기지 않을 만큼 골재로 소량 사용하는 것이 가장 효과적 및 현실적이라 할 수 있다. 실제 콘크리트의 사용자인 콘크리트/모르타르/그라우트 제조사, 콘크리트 구조 설계회사 및 시공회사 등에서는 경제적 이득이 없는 바텀애시를 사용하기 어렵다.

Park(2014)은 바텀애시와 플라이애시의 활용률과 다양한 경제적, 현실적 요인에 대한 정량적 회귀분석을 수행했다. 그 결과, 애시의 활용률 모두 단순 원자재가격(시멘트나 골재, 바텀애시의 가격: 생산비용) 보다 대부분 규제변수(regulatory variables, 정책적 지원금 등) 및 행동과학적 변수(behavioral variables, 주변 발전처에서의 활용률)에 의해 크게 결정된다는 것을 확인하였다. 즉, 바텀애시의 활용률을 높이기 위해서는 바텀애시가 치환할 수 있는 기존 소재인 시멘트나 골재, 혹은 바텀애시 자체의 생산처리비를 세세하게 검토하여 이득을 따지기 보다, 주로 정책적 보전비용 제시와 법률적 지원, 그리고 무엇보다 이러한 지원에 의해 형성된 바텀애시를 활용하는 사회적 분위기를 조성해야 한다는 것을 의미한다.

보전비용을 지불하는 방법은 다양할 수 있다. 현재 우리나라는 ‘자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률(약칭: 자원재활용법, 법률 제 16611호, 2019.11.26. 일부개정)’과 ‘철강슬래그 및 석탄재 배출사업자의 재활용 지침(환경부고시 제2016-217호, 2016.11.28. 일부개정)’에 의해 이에 대한 대략적 지원방법이 제시되어 있다. 우리나라에서는 일부 지방 혹은 중앙정부가 발전사와 성토용으로 일정량의 PCC 바텀애시나 펀드애시를 준설 공급계약을 한 사례는 존재한다. 혹은 국내 발전사에서 직접 PCC 바텀애시를 활용한 인공경량골재를 생산하는 경우도 있다. 하지만 실제 바텀애시 활용에 대한 구체적인 법률적, 혹은 경제적 지원의 형태에 대한 자료는 확인하지 못하였다.

보전 방법 중 하나로서, 정부에서 바텀애시를 골재나 결합재화하여 판매할 때 생산 비용 중 일부를 바텀애시 생산자인 발전사 측에 지불하거나, 혹은 정부 자체에서 바텀애시처리시설을 운영할 수 있다. 이 경우, 바텀애시 골재나 결합재의 사용자는 기존 모래나 다른 SCM에 비해 낮은 가격으로 바텀애시를 구매할 수 있다. 바텀애시 생산자인 발전소로부터 건설회사나 콘크리트 업체로의 바텀애시의 수분함량과 납품량을 기록해 이에 대해 정부가 보전하는 방식이다. 이 경우 발전사의 애시 판매비용이 애시 매립 비용보다 낮아지도록 보상비 산정이 필요하다. 한편 바텀애시를 사용

하는 자에게 사용한 만큼의 비용을 보전하는 방법도 있다. 설계 후 시공 시 사용하게 되는 바텀애시의 활용량을 정부 등에 보고하면 정부가 그에 대한 보상을 하는 방법이다. 이 경우 실제 금액적인 보상과 보전 이외에도 별도의 행정적 보전, 즉 입찰 시 가점 혹은 세금 감면 등의 혜택이 가능하다. 아직 이러한 금액의 산정, 혹은 혜택의 수준을 결정하기 위해 생산비용을 정량적으로 평가한 사례는 거의 없으므로 이후 연구가 필요하다.

6. 결론 및 제언

본 총설에서는 PCC 및 CFBC 보일러에서 생산된 바텀애시의 특성 및 콘크리트의 여러 특성에 미치는 영향, 그리고 활용에 대한 환경적, 경제적 측면에 조사하고 고찰해 보았다. 먼저 기존 문헌을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이상적인 관점에서, 바텀애시의 생산량을 고려할 때 국가에 따라 골재 전체에 약 10% 내외로 활용 할 경우 발생하는 바텀 애시 전량을 소모할 수 있다. 이는 바텀애시의 소모 측면에서 콘크리트에의 활용이 매우 중요함을 의미한다.
- 2) 바텀애시에는 생산되는 보일러의 종류에 따라 비정질 실리카-알루미늄인 PCC 바텀애시, 그리고 이 비정질 이외에 황산칼슘 및 탄산칼슘을 포함한 CFBC 바텀애시가 있다. PCC 바텀애시는 일반 콘크리트용 잔골재나 필러로 활용할 수 있는 반면 CFBC 바텀애시는 독특한 화학적 특성으로 인해 결합재로 사용해야 한다. PCC 바텀애시는 형상이 독특하기 때문에 표건상태를 상태를 정의하기가 어려우며 따라서 이 값은 이후 콘크리트와 모르타르의 품질관리를 어렵게 만드는 요인이기도 하다.
- 3) 미가공된 PCC 바텀애시는 그 거친 형상과 공극으로 인해 일반적으로 콘크리트나 모르타르의 유동성을 감소시킨다. 이 유동성 감소를 보상하기 위해 단위수량 혹은 감수재량을 늘린다 해도 입자간의 맞물림으로 인해 펌프 압송에 문제가 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다. 또한 공극 구조로 인해 대량으로 사용하면 콘크리트나 모르타르의 강도가 감소할 수 있는 위험이 있다. 포졸란 반응성으로 인한 강도의 개선은 PCC 바텀애시가 어느정도 파쇄 혹은 분쇄된 경우에서만 기대할 수 있다. 이렇게 입도가 조절된 바텀애시는 염소나 탄산화 측면에서 내구성을 증가시킬 수 있다. 한편 CFBC 바텀애시는 강도에 대한 문제 보다 높은 sulfate로 인해 장기적으로 시멘트 매트릭스의 팽창을 유도할 수 있으므로 단순

사용에 주의가 필요하며, 일반적으로 시멘트용 천연석고 대체재 혹은 소량 보조결합재로 적용할 수 있다.

- 4) 바텀애시 콘크리트나 모르타르로부터 중금속 용출 문제가 발생하지 않는다. 이는 시멘트 매트릭스에 의한 물리, 화학적 보호에 의한 것이다. 한편, PCC 바텀애시나 CFBC 바텀 애시 모두 활용에 의해 환경성 측면에서 사회적인 이익이 크다고 하기는 어렵다. 이는 현재 경제성 측면에서도 마찬가지이다.

이러한 내용을 바탕으로 얻어진 고찰과 제언은 다음과 같다.

- 1) 미국과 유럽의 통계를 고려할 때, 우리나라에서 바텀애시의 콘크리트 사용은 더 활발해 질 가능성이 크다. 이는 천연자원 자체의 감소 및 환경보호에 대한 정책수요, 그리고 관련 활용 기술 및 현업에의 기술 보급 등에 기인한다. 특히 잔골재 수급에 어려움을 겪고 있는 우리나라의 경우, 어느 정도 반응성이 있어 강도에 기여가 가능한 골재원인 바텀애시는 일부 전처리를 거쳐서라도 콘크리트나 모르타르에 사용할 가치가 있다. 이는 콘크리트 강도관리 문제와도 연관된 사항이라 하겠다.
- 2) 기존의 플라이애시와 달리, 바텀애시의 효과적인 활용을 위해서는 기본적으로 전처리가 필요하다. 따라서 이에 대한 국가 수준의 보상 혹은 지원정책이 필요하다. 바텀애시나 펀드 애시의 가공판매가 작으나마 단순폐기비용 보다 더 수익이 있을 수 있도록 정부로부터의 지원이 요구된다. 한편, 현재 환경부신기술 등을 통해 애시를 사용한 콘크리트나 모르타르 제품을 생산하는 측에 대해 영업상의 이득을 주고 있으나, 이는 현재 이상의 대량소비를 유도할 만한 수준은 아니다. 바텀애시의 대량소비가 가능하도록 바텀애시 콘크리트 및 모르타르에 관련된 기술을 개발, 공개, 교육하는 동시에 관련 지원방법에 대한 구체적인 설정이 요구된다.
- 3) 이미 지난 30년 이상 바텀애시 콘크리트에 대한 연구가 진행되어 왔음에도 불구하고, 이후 꾸준한 연구개발이 필요하다. 플라이애시 콘크리트는 이미 관련 배합설계 기법 및 이와 연계된 구조설계기준등이 마련된 것에 반해, 발생량이 적고 기술 난이도가 높은 바텀애시 콘크리트의 경우에는 아직 이와 같은 사례가 부족하다. 혼합골재로서의 활용을 위한 관련 기준 개정이 필요하다. 골재 혹은 filler의 반응성을 고려한 배합설계는 전세계적으로 시도된 바가 없으나, 장기적인 관점에서 이러한 시도는 발전가능성과 의미가 크다.

Conflict of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2019년 한국연구재단 기초연구실사업(2019R1A4A1028116) 및 해양수산부 해양수산과학기술진흥원(20180323)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash, *Progress in Energy and Combustion Science*, **36**(3), 327–363.
- American Coal Ash Association (ACAA) (2019). 2018 Coal Combustion Products Production & Use Statistics: <https://www.aaa-usa.org/publications/productionusereports.aspx> (cited at 2020.07.27.)
- Andrade, L., Rocha, J.C., Cheriaf, M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement, *Waste Management*, **27**(9), 1190–1199.
- Anthony, E.J., Berry, E.E., Blondin, J., Bulewicz, E.M., Burwell, S. (2003). Advanced ash management technologies for CFBC ash, *Waste Management*, **23**(6), 503–516.
- Anthony, E.J., Jia, L., Wu, Y. (2005). CFBC ash hydration studies, *Fuel*, **84**(11), 1393–1397.
- Bai, Y., Darcy, F., Basheer, P.A.M. (2005). Strength and drying shrinkage properties of concrete containing furnace bottom ash as fine aggregate, *Construction and Building Materials*, **19**(9), 691–697.
- Cheriaf, M., Rocha, J.C., Pera, J. (1999). Pozzolanic properties of pulverized coal combustion bottom ash, *Cement and Concrete Research*, **29**(9), 1387–1391.
- Cho, H., Ji, S.W., Shin, H.Y., Jo, H. (2019). A case study of environmental policies and guidelines for the use of coal ash as mine reclamation filler: relevance for needed South Korean policy updates, *Sustainability*, **11**(13), 3629.
- Choi, S.J., Jeong, Y., Oh, B.J., Kim, M.H. (2003). An experimental study on the engineering properties of concrete according to w/c and replacement ratio of bottom ash, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **15**(6), 840–847 [In Korean].
- Coal Ash Institute of India (2018). <http://www.coalashinstituteofindia.org/generation.php> (cited at 2020.07.27.)
- European Coal Combustion Products Association (ECOPA) (2019). Production and Utilisation of CCPs in 2016 in Europe (EU 15). <http://www.ecoba.com/ecobaccpprod.html> (cited at 2020.07.27.)
- González-Fontebao, B., Carro-López, D., de Brito, J., Martínez-Abella, F., Seara-Paz, S., Gutiérrez-Mainar, S. (2017). Comparison of ground bottom ash and limestone as additions in blended cements, *Materials and Structures*, **50**(1), 84.
- Greenpeace (2020). Coal Ash Pond in China, <https://www.greenpeace.org/usa/why-were-thinking-about-coal-on-world-water-day/coal-ash-pond-in-china/> (cited at 2020.07.27.)
- Hashemi, S.S.G., Mahmud, H.B., Ghuan, T.C., Chin, A.B., Kuenzel, C., Ranjbar, N. (2019). Safe disposal of coal bottom ash by solidification and stabilization techniques, *Construction and Building Materials*, **197**, 705–715.
- Hlaváček, P., Šulc, R., Šmilauer, V., Rößler, C., Šnop, R. (2018). Ternary binder made of CFBC fly ash, conventional fly ash, and calcium hydroxide: Phase and strength evolution, *Cement and Concrete Composites*, **90**, 100–107.
- Jang, J.G., Kim, H.J., Kim, H.K., Lee, H.K. (2016). Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration, *Materials & Design*, **93**, 160–167.
- Jang, J.G., Park, S.M., Chung, S., Ahn, J.W., Kim, H.K. (2018). Utilization of circulating fluidized bed combustion ash in producing controlled low-strength materials with cement or sodium carbonate as activator, *Construction and Building Materials*, **159**, 642–651.
- Jayaranjan, M.L.D., Van Hullebusch, E.D., Annachhatre, A.P. (2014). Reuse options for coal fired power plant bottom ash and fly ash, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, **13**(4), 467–486.
- Ji, G.B., Kim, H.J., Yang, K.H. (2019). CO₂ emissions and environmental impact assessment of bottom ash aggregate concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **21**(5), 485–492 [In Korean].
- Jones, K.B., Ruppert, L.F., Swanson, S.M. (2012). Leaching of elements from bottom ash, economizer fly ash, and fly ash from two coal-fired power plants, *International Journal of Coal Geology*, **94**, 337–348.
- Kang, K., Choi, S., Kim, J. (2018). Supply–demand forecast and development direction for aggregate, *Conference Proceeding of the Korea Institute of Building Construction*, **18**(3), 332–333 [In Korean].

- Kim, G.M., Jang, J.G., Naeem, F., Lee, H.K. (2015). Heavy metal leaching, CO₂ uptake and mechanical characteristics of carbonated porous concrete with alkali-activated slag and bottom ash, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **9(3)**, 283–294.
- Kim, H.J., Tafesse, M., Lee, H.K., Kim, H.K. (2019a). Incorporation of CFBC ash in sodium silicate-activated slag system: modification of microstructures and its effect on shrinkage, *Cement and Concrete Research*, **123**, 105771.
- Kim, H.K. (2015a). Utilization of sieved and ground coal bottom ash powders as a coarse binder in high-strength mortar to improve workability, *Construction and Building Materials*, **91**, 57–64.
- Kim, H.K. (2015b). Feasibility study on measurement of water absorption in fine aggregate with macroporous surface via centrifugal compaction, *Construction and Building Materials*, **95**, 421–430.
- Kim, H.K., Jang, J.G., Choi, Y.C., Lee, H.K. (2014). Improved chloride resistance of high-strength concrete amended with coal bottom ash for internal curing, *Construction and Building Materials*, **71**, 334–343.
- Kim, H.K., Jeon, J.H., Lee, H.K. (2012a). Workability, and mechanical, acoustic and thermal properties of lightweight aggregate concrete with a high volume of entrained air, *Construction and Building Materials*, **29**, 193–200.
- Kim, H.K., Jeon, J.H., Lee, H.K. (2012b). Flow, water absorption, and mechanical characteristics of normal-and high-strength mortar incorporating fine bottom ash aggregates, *Construction and Building Materials*, **26(1)**, 249–256.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, **25(2)**, 1115–1122.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2015). Coal bottom ash in field of civil engineering: a review of advanced applications and environmental considerations, *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19(6)**, 1802–1818.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2016). Autogenous shrinkage reduction with untreated coal bottom ash for high-strength concrete, *ACI Materials Journal*, **113(3)**, 277.
- Kim, H.K., Lee, H.K. (2018). Hydration kinetics of high-strength concrete with untreated coal bottom ash for internal curing, *Cement and Concrete Composites*, **91**, 67–75.
- Kim, H.K., Song, K.I., Song, J.K., Jang, J.G. (2019b). Effect of carbonation on abrasion resistance of alkali-activated slag with various activators, *Materials*, **12(17)**, 2812.
- Kim, K.D., Kang, S.G. (2007). Manufacturing artificial lightweight aggregates using coal bottom ash and clay, *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, **17(6)**, 277–282 [In Korean].
- Kim, Y.S., Do, T.M., Kim, M.J., Kim, B.J., Kim, H.K. (2018). Utilization of by-product in controlled low-strength material for geothermal systems: Engineering performances, environmental impact, and cost analysis, *Journal of Cleaner Production*, **172**, 909–920.
- Korcak, R.F. (1995). Utilization of coal combustion byproducts in agriculture and horticulture, *Agricultural Utilization of Urban and Industrial By-Products*, **58**, 107–130.
- Kou, S.C., Poon, C.S. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates, *Construction and Building Materials*, **23(8)**, 2877–2886.
- Kurama, H., Kaya, M. (2008). Usage of coal combustion bottom ash in concrete mixture, *Construction and Building Materials*, **22(9)**, 1922–1928.
- Kurama, H., Topcu, I.B., Karakurt, C. (2009). Properties of the autoclaved aerated concrete produced from coal bottom ash, *Journal of Materials Processing Technology*, **209(2)**, 767–773.
- Kwon, S.H., Jang, K.P., Kim, J.H., Shah, S.P. (2016). State of the art on prediction of concrete pumping, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **10(3)**, 75–85.
- Lee, B.Y., Jeon, S.M., Cho, C.G., Kim, H.K. (2020a). Evaluation of time to shrinkage-induced crack initiation in OPC and slag cement matrices incorporating circulating fluidized bed combustion bottom ash, *Construction and Building Materials*, **257**, 119507.
- Lee, H.K., Jeon, S.M., Lee, B.Y., Kim, H.K. (2020b). Use of circulating fluidized bed combustion bottom ash as a secondary activator in high-volume slag cement, *Construction and Building Materials*, **234**, 117240.
- Lee, H.K., Kim, H.K., Hwang, E.A. (2010). Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber-reinforced cellular concrete, *Waste Management*, **30(2)**, 274–284.
- Liao, X., Zhang, Q., Yang, W., Qiu, Z., Guo, R., Liu, J., Liu, F., Li, Y. (2019). The role of pulverized coal drying temperature in fly ash carbon content and slagging of a tangentially coal-fired boiler, *Fuel*, **257**, 115951.
- Liu, Y., Cheng, L., Ji, J., Zhang, W. (2019). Ash deposition behavior in co-combusting high-alkali coal and bituminous coal in a circulating fluidized bed, *Applied Thermal Engineering*, **149**, 520–527.

- Menéndez, E., Álvaro, A.M., Hernández, M.T., Parra, J.L. (2014). New methodology for assessing the environmental burden of cement mortars with partial replacement of coal bottom ash and fly ash, *Journal of Environmental Management*, **133**, 275–283.
- Onprom, P., Chaimoon, K., Cheerarot, R. (2015). Influence of bottom ash replacements as fine aggregate on the property of cellular concrete with various foam contents, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
- Park, J.Y. (2014). Assessing determinants of industrial waste reuse: The case of coal ash in the United States, *Resources, Conservation and Recycling*, **92**, 116–127.
- Park, S.H., Lee, J.B., Kim, S.S. (2016). The durability of the concrete using bottom ash as fine aggregate, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **4(4)**, 349–355 [In Korean].
- Pyo, S., Kim, H.K. (2017). Fresh and hardened properties of ultra-high performance concrete incorporating coal bottom ash and slag powder, *Construction and Building Materials*, **131**, 459–466.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M.R., Hussin, M.W., Khankhaje, E. (2016). Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement, *Construction and Building Materials*, **116**, 15–24.
- Reijnders, L. (2007). Cleaner phosphogypsum, coal combustion ashes and waste incineration ashes for application in building materials: A review, *Building and Environment*, **42(2)**, 1036–1042.
- Sanjuán, M.Á., Quintana, B., Argiz, C. (2019). Coal bottom ash natural radioactivity in building materials, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, **319(1)**, 91–99.
- Shen, D., Feng, Z., Zhu, P., Tang, X., Jiang, G. (2020). Effect of pre-wetted lightweight aggregates on residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens, *Construction and Building Materials*, **258**, 119151.
- Shen, Y., Qian, J., Zhang, Z. (2013). Investigations of anhydrite in CFBC fly ash as cement retarders, *Construction and Building Materials*, **40**, 672–678.
- Sheng, G., Zhai, J., Li, Q., Li, F. (2007). Utilization of fly ash coming from a CFBC boiler co-firing coal and petroleum coke in Portland cement, *Fuel*, **86(16)**, 2625–2631.
- Siddique, R. (2013). Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash, *Construction and Building Materials*, **47**, 1444–1450.
- Siddique, S., Jang, J.G. (2020). Effect of CFBC ash as partial replacement of PCC ash in alkali-activated material, *Construction and Building Materials*, **244**, 118383.
- Singh, M., Siddique, R. (2014). Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate, *Construction and Building Materials*, **50**, 246–256.
- Singh, M., Siddique, R. (2015). Properties of concrete containing high volumes of coal bottom ash as fine aggregate, *Journal of Cleaner Production*, **91**, 269–278.
- Singh, M., Siddique, R. (2016). Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on workability and strength properties of concrete, *Journal of Cleaner Production*, **112**, 620–630.
- Singh, N., Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement, *Construction and Building Materials*, **233**, 117276.
- Singh, N., Mithulraj, M., Arya, S. (2018). Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review, *Resources, Conservation and Recycling*, **138**, 257–271.
- Tafesse, M., Kim, H.K. (2016). Effects of crushed coal bottom ash on the properties of mortar with various water-to-binder ratios, *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, **25(6)**, 29–40.
- Topçu, İ.B., Bilir, T. (2010). Effect of bottom ash as fine aggregate on shrinkage cracking of mortars, *ACI Materials Journal*, **107(1)**, 48.
- Torkittikul, P., Nochaiya, T., Wongkeo, W., Chaipanich, A. (2017). Utilization of coal bottom ash to improve thermal insulation of construction material, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **19(1)**, 305–317.
- ul Haq, E., Padmanabhan, S.K., Licciulli, A. (2014). Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers: A comparative study, *Ceramics International*, **40(2)**, 2965–2971.
- Wang, Z., Song, Y. (2016). Adsorption properties of CFBC ash-cement pastes as compared with PCC fly ash-cement pastes, *International Journal of Coal Science & Technology*, **3(1)**, 62–67.
- Won, J.P., Lee, Y.S., Park, C.G., Park, H.G. (2004). Durability characteristics of controlled low-strength materials containing recycled bottom ash, *Magazine of Concrete Research*, **56(7)**, 429–436.
- Wyrzykowski, M., Ghourchian, S., Sinthupinyo, S., Chitvoranund, N., Chintana, T., Lura, P. (2016). Internal curing of high performance mortars with bottom ash, *Cement and Concrete Composites*, **71**, 1–9.

- Xiao, X., Yang, H., Zhang, H., Lu, J., Yue, G. (2005), Research on carbon content in fly ash from circulating fluidized bed boilers, *Energy & Fuels*, **19(4)**, 1520–1525.
- Xu, H., Li, Q., Shen, L., Wang, W., Zhai, J. (2010), Synthesis of thermostable geopolymer from circulating fluidized bed combustion(CFBC) bottom ashes, *Journal of Hazardous Materials*, **175(1–3)**, 198–204.
- Yan, L., Gupta, R.P., Wall, T.F. (2002). A mathematical model of ash formation during pulverized coal combustion, *Fuel*, **81(3)**, 337–344.
- Yuksel, I., Genc, A. (2007). Properties of concrete containing nonground ash and slag as fine aggregate, *ACI Materials Journal*, **104(4)**, 397.
- Yüksel, İ., Siddique, R., Özkan, Ö. (2011). Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement, *Construction and Building Materials*, **25(2)**, 967–972.

총설: 콘크리트 및 모르타르를 위한 석탄 바텀애시의 활용

본 총설에서는 석탄 바텀애시의 콘크리트 활용에 대한 최신의 전반적 내용을 다룬다. 최근 사용되는 두 종류의 화력발전 시스템, 즉 미분탄연소와 순환유동층연소 보일러 각각으로부터 배출되는 바텀애시의 생산 과정과 물리적, 화학적 특성에 대해 분석하고, 활용 방법 및 활용을 위한 전처리 혹은 활용 대상 콘크리트의 종류에 대해 정리 하였다. 또한 바텀애시가 콘크리트의 여러 특성, 즉 유동성, 강도, 내구성에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 그리고 바텀애시를 혼입한 콘크리트의 환경성 및 경제성에 대해 분석하였으며, 이를 통해 바텀애시의 콘크리트 내 활용의 미래를 고찰해 보았다. 바텀애시가 콘크리트 및 모르타르의 성능에 미치는 영향은 그 자체의 성능 외에도 전처리 및 가공 여부에 의해 크게 영향을 받는다. 따라서, 이 분야의 활용을 늘리기 위해서는 기술적 측면에서 분쇄 등의 약간의 물리적 가공이 필요하며, 이와 관련된 시방 및 기준의 정비가 요구된다는 것을 확인하였다. 특히 정책적 측면에서의 경제적 지원이 가능하다면 바텀애시 활용을 크게 확대할 수 있을 것으로 예상된다.