

플라이애시 활용에 의한 콘크리트의 CO₂ 저감기술

CO₂ reduction technology of concrete by utilizing fly ash



김정진*
Jeong-Jin Kim

1. 서 언

석탄 화력발전소의 부산물로서 발생하는 석탄회(coal ash)는 연소 후 포집되는 장소에 따라 플라이애시(fly ash), 바텀애시(bottom ash), 신더애시(cinder ash)로 구분되는데, 이들은 전체 석탄회 발생량 중 각각 75~80%, 10~15% 및 5% 정도를 차지한다.¹⁾ 석탄회는 석탄의 연소 후 남는 물질로 석탄회의 발생과 함께 CO₂가 다량 발생하는 것은 틀림이 없으나, 화력발전소의 주 생산물인 전기에 CO₂의 발생량이 계상되기 때문에 부산물인 석탄회의 제조에 있어서 발생하는 CO₂는 0으로 생각할 수 있다.

한편, 석탄회의 성상은 사용하는 연료의 종류에 따라 영향을 받는데, 국가별, 탄종별(무연탄과 유연탄), 연소조건에 따라 다소 차이가 발생한다. 석탄회 중 전기집진기에 의해 집진되는 플라이애시는 입경이 보통 10~30 μm 정도이고, 보일러 하부에 모이는 바텀애시는 입경이 1~2.5 mm 정도로 분쇄기로 분쇄 후 재활용되거나 회처리장에 보내 매립된다. 절탄기(economizer)와 공기예열기 하부의 호퍼(hopper)에 모이는 신더애시는 입경이 0.3~1.0 mm 정도이다. 이러한 석탄회의 품질규격은 KS L 5405(플라이애시), KS L 5405(바텀애시) 등에서 규정하고 있다.

전력산업 부산물인 석탄회의 재활용은 친환경, 에너지

절감 등 많은 이점이 있지만, 무엇보다도 온실가스 방출 저감효과를 기대할 수 있어 지속가능한 건설기술의 핵심 요소 중의 하나로 부각되고 있다. 유럽 및 일본 등 선진국에서는 40~50년 전부터 토목 및 건축분야에서 석탄회가 적극 재활용되도록 다양한 정책적 지원이 이루어지고 있으며, 석탄회 재활용률은 유럽이 86%, 일본이 81%정도이다. 우리나라도 국가자원의 유효이용을 위해 ‘자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법’을 개정하는 등 적극적으로 산업 부산물의 재활용을 독려하고 있다.

석탄회 재활용을 통한 온실가스 방출 저감효과 파악을 위한 플라이 애시 및 바텀애시의 생산, 운반, 사용 후 폐기까지 CO₂ 전과정에 대한 평가는 아직 이루어지지 않았지만, 이들 재료의 생산을 위해 소비되는 전력 사용량 및 연구자들의 제안 값을 참고로 CO₂를 평가할 수 있다.

이에 본고에서는 석탄회의 재활용에 의한 CO₂ 저감기술에 대한 주요 내용과 CO₂ 저감기술이 건설산업에 미치는 영향 등에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 석탄회의 발생과 재활용 기술

2.1. 석탄회의 발생

우리나라는 1970년대 오일파동을 겪고 난 후, 에너지수급 다변화 정책이 수립되었는데, 에너지원의 국외 수입에 의존하지 않으면서도 국내에 매장량이 풍부한 유연탄을

* 롯데건설(주) 기술연구원 건축연구팀 책임연구원

Dasan Global Consulting

E-mail : duson12@lottenc.com

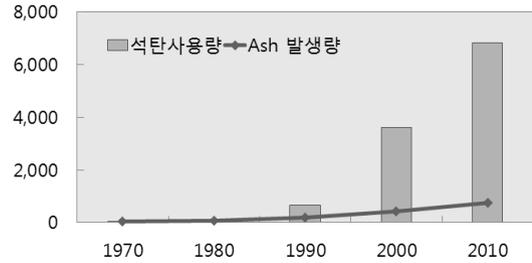
발전연료로 사용하는 유연탄 발전소를 삼천포, 보령에 건설하였고 이후 하동, 당진, 태안, 영흥 등지에 대용량 유연탄 화력발전소가 건립되었다. 국내의 무연탄 화력발전소를 포함한 석탄 화력발전소에서 연간 생산하는 전력량은 2009년도 기준으로 우리나라 총 전력발전량의 약 47.5%를 차지하였다.



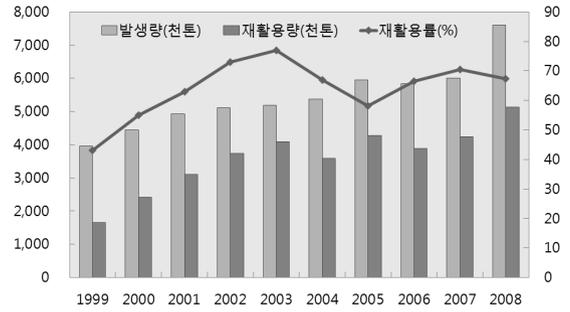
[그림 1] 국내 석탄 화력발전소의 위치

한편, 전 세계적인 석탄 소비량은 2005년 60억톤에서 2025년 80억톤으로 증가할 것으로 예상되며, 미국에서는 2004년 생산된 전력의 50%가 화석연료에서 생산되었고, 그림 2, 3과 같이 2030년까지는 56%까지 늘어날 것으로 예상된다. 가까운 일본의 경우도 석유중심의 에너지정책에서 석탄화력 쪽으로 전환되고 있는데, 2007년 기준으로 전력발전량의 구성비율을 보면, 석탄화력이 28%로 석유 14%, 천연가스 26%, 원자력 23%, 수력의 기타 9%에 비해 가장 많은 부분을 차지하였다. 2008년 기준으로 일본에서는 약 1억 8500만 톤의 석탄이 수입되었는데, 그 중 약 45%인 8300만 톤이 석탄화력 발전용으로 사용되었으며, 이로 인해 발생한 석탄회는 약 1000만 톤 정도 되었다.

국내의 경우는 석탄회 발생량이 2009년도 기준으로 유연탄이 700만 톤, 무연탄이 135만 톤으로 일본에 비해 다소 작지만 이는 2005년도에 비해 약 150%정도가 증가한 것으로, 향후 신규로 석탄화력발전소가 건설될 경우 석탄회의 발생량은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.



[그림 2] 국내의 석탄 사용량 및 석탄회 발생량



[그림 3] 국내의 석탄회 발생 및 재활용 추이

2.2. 석탄회(플라이애시)의 재활용

2006년을 기준으로 했을 경우 연간 석탄회 중, 특히 플라이애시의 생산량은 중국, 인도, 미국을 중심으로 약 900만톤에 달했으며, 이후에도 수년간 수백만톤의 플라이애시가 쌓여져 가고 있다. 석탄회는 다음의 과정을 통해 분류되는데, 먼저, 미분탄의 연소에 의해 발생하는 석탄회는 연소배기 가스 중에서 보일러의 바닥에 낙하하여, 물에 의해 냉각된 덩어리 모양의 재(클링커 애쉬, clinker ash)가 발생하고, 이후, 절탄기(economizer)와 공기예열기(air heater)의 열회수 부분에 낙하해 신더애쉬가 발생한다. 한편, 플라이애시는 전기 집진기를 이용하여 채취, 생산하는 것으로 산업부산물을 이용한 혼화재에 해당된다.

화력발전소는 다량의 이산화탄소를 방출하기 때문에 환경적이지 못하다는 인식이 팽배하지만 미국, 인도, 중국 등 세계의 전력 수요는 저렴하고 매장량이 풍부한 화력 발전을 통하여 그 수요를 충족할 것으로 예상된다. 따라서, 중국, 인도, 미국에서 계획된 377,000MW의 추가적인 전력 수요를 충족하기 위해서는 2025년까지 수백개의 새로운 화력발전소를 세워야만 하므로 최소한 2050년까지 상당한 양의 플라이애시가 발생될 것이며, 이에 따른 석탄회의 재활용이 활발히 이루어 질것으로 예상된다.

<표 1> 석탄회(플라이애시)의 유효이용 분야³⁾

분 야	용 도	활용기술 개요
시멘트 분 야	시멘트 제조용 원료	· 점토 대응으로 원료량의 4~5% 대체 가능
	시멘트 혼화재	· 플라이 애시 시멘트에 5~30% 이하 사용 · 보통 포틀랜드 시멘트에 5% 이하로 혼화 가능
	콘크리트용 혼화재	· 일반 레미콘 혼화재로 약 10~15% 혼화 가능 · 매스 콘크리트, 수리 구조물에 시멘트의 2~30% 혼합. · 주로 토목공사에 사용
	그라우트	· 플라이 애시를 혼합재로 이용(작업성 개선)
	신혼화재	· 플라이 애시가 용융되는 고온에서 재처리하여 미분말상 제조
	신경화재	· 석탄회에 황산, 석회 등을 첨가하여 새로운 시멘트 제조, 주로 비구조용으로 이용
골 재 분 야	골 재	· 경량콘크리트 골재, 콘크리트의 잔골재 대응 · 입도 조정용으로 대체
	인공 경량골재	· 팽창성 혈암 대체로 이용
	인공골재	· 용융 냉각하여 결정질 골재 또는 유리질 골재 제조
건 축 분 야	벽돌, 기와, 세라믹 제조	· 점토 대체
	단열재	· 중공화 특성 이용 건축재, 부력재, 경량콘크리트 등 구조재료로 이용
	애쉬 울	· 플라이 애시, 석회석, 돌로마이트 첨가 제조(내화도 우수)
	콘크리트 제품	· 시멘트, 골재, 석회, 플라이 애시로 벽돌, 기포콘크리트 제조
	불연 외벽재	· 경석, 석탄회, 유리섬유를 전암하여 제조
토 목 분 야	아스팔트 필러	· 아스팔트 안정화와 골재 틈새 채움재
	포장재	· 시멘트, 콘크리트 포장의 시멘트 혼화재로 사용
	노반재(路盤材)	· 모래의 대체재로 이용, 석회 보완재로 사용
	노상재(路床材)	· 한냉지에서 동상 억제계층 및 연약노반의 도로 건설 시 모래 대체 사용
	충진재	· 폐석 대응으로 갭내에 충진재로 사용
	지반 안정재	· 다른 재료와 배합, 흡입자 계면 물성 변화 또는 입자간 견고한 결합
	매립조성	· 연약지반 개량공사 및 해안 매립
농 업 수 산 분 야	비 료	· 규산비료 원료로 사용
	토양 개량재	· 하수오니, 축분 등을 첨가하여 제조
	인공 어초	· 플라이 애시를 수지, 모래와 함께 성형 또는 탈황석고, 시멘트 등으로 경화
기 타 분 야	수처리제	· 흡착, 응집작용에 의해 유기물 제거
	배연탈황제	· 배연 탈황장치 흡수액으로 이용
	소화제	· 슬러리화하여 소화재로 이용
	고화제	· 석회, 석고 등과 혼합하여 폐기물 고형화
	고무용 충전제	· 석탄회를 가공하여 고무의 강화, 증점제로 이용

3. 환경부하 저감을 위한 CO₂ 저감기술

3.1. 발전효율 향상을 통한 CO₂ 저감

석탄을 연료로 사용하는 화력발전소에서는 당연히 많은 양의 CO₂가 발생하게 되는데, 이를 위해 환경문제 측면에서 CO₂의 배출 삭감을 피함과 동시에 발전효율을 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다. 화력발전 효율성은 우리나라가 40.5%인데 반해, 일본은 43.4% 정도로 세계 최고수준으로, 화력발전 효율이 떨어지게 되면 같은 양의 전력을 생산할 때 내뿜는 온실가스가 더 많을 수밖에 없다. 따라서 화력발전 설비에 대한 투자를 통해 화력발전 효율성을 높일 필요가 있다.

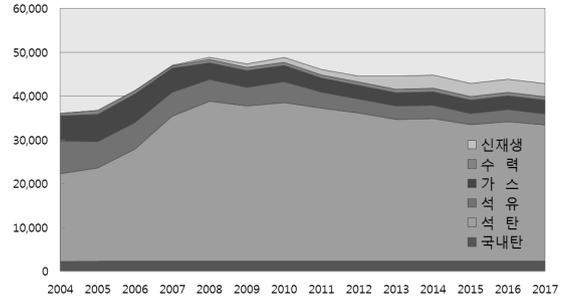
이에 따라 석탄가스 복합발전(IGCC)의 개발이 진행되고 있는데, 이것이 실용화 된다면 우리나라도 48~50%의 발전효율이 달성될 수 있을 것으로 예상된다. 일본 도쿄 전력의 경우 1%포인트의 화력발전 효율성이 증가할 때마다 10억700만kg의 탄소배출이 절감되는 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고된 바 있다. 이렇듯 발전효율을 개선하게 되면 연료인 석탄사용량의 저감이 가능하게 되는데, 발전효율을 5% 증가시키면 CO₂ 배출량을 10%정도 감소시키는 것이 가능하다.

3.2. 에너지원의 최적 배분을 통한 CO₂ 저감

지구환경 문제에 대응하기 위해 저탄소사회의 실현을 향한 기술적, 사회·경제적, 정책제도 수립 등의 움직임이 있는데, 무엇보다도 중요한 점은 장기적으로 안정된 에너지공급이 보증되어야만 하는데 있다. 에너지 자급율이 낮은 우리나라의 경우 에너지 정책의 관점에서 전력발전량의 구성을 새로이 검토할 필요가 있는데, 가능한 한 CO₂를 배출하지 않는 발전방식을 채택해야 하지만 에너지 공급의 안전성, 비용, 환경영향 등을 고려하여 적절한 에너지원의 채택이 필요하다.

현재 세계적으로 전원별 구성은 석탄(42%), 석유(5%), 천연가스(20%), 원자력(15%), 수력(16%), 기타(2%)로 구성이 되어 있으며, 원료별 온실가스 발생량은 석탄, 석유가 가장 많다. 2006년을 기준으로 국내의 전력사가 1 kWh 전력을 만드는 데 발생시키는 이산화탄소는 0.7235 kg 인데 반해, 일본의 경

우는 0.6316 kg 정도로 13%정도 낮기 때문에, 국내에서도 기존 전력 생산체제 및 에너지원의 배분에 변화를 주지 않는다면 전력산업에 있어 온실가스 저감과 경제적 성과를 가져오기는 힘들 것으로 판단된다.



[그림 4] 국내의전원별 전력 발전량 전망

3.3. 석탄회(플라이애시) 활용에 따른 CO₂ 저감

석탄회(이하, 플라이애시)는 콘크리트의 성능을 향상시키는 혼화제로서 많은 사용실적을 갖고 있으며, 시멘트 사용량의 일정부분을 치환 사용함으로써 플라이애시의 활용을 통해 CO₂의 저감이 가능하다.

실제로 플라이애시의 제조에 있어서는 CO₂의 발생은 거의 없다고 보지만, 생산제품의 운반, 사용 후 폐기까지의 과정을 통해 발생하는 CO₂ 양을 플라이애시 생산을 위해 소비되는 전력 사용량을 참고로 평가할 수 있다.

<표 2> 콘크리트 구성요소의 CO₂ 배출계수^{4,5)}

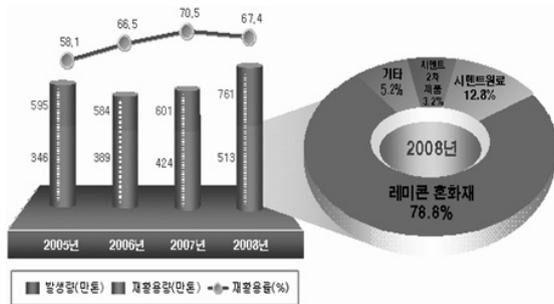
종류	CO ₂ 배출계수
보통 포틀랜드 시멘트(kg-CO ₂ /ton)	810
잔골재 (kg-CO ₂ /m ³)	3.576 (2.04 kg-CO ₂ /ton) ²⁾
굵은 골재 (kg-CO ₂ /m ³)	11.146 (7.19 kg-CO ₂ /ton) ²⁾
플라이 애시 ¹⁾ (kg-CO ₂ /ton)	13.7 (90 kg-CO ₂ /ton) ³⁾

주1) 플라이애시의 집진을 위해 소비된 전력량으로부터 환산한 값임.
 주2) 잔골재와 굵은 골재(쇄석)의 일반적인 단위용적질량을 고려하여 환산한 값임.
 주3) Davidovits가 제시한 플라이애시의 탄소 배출계수.

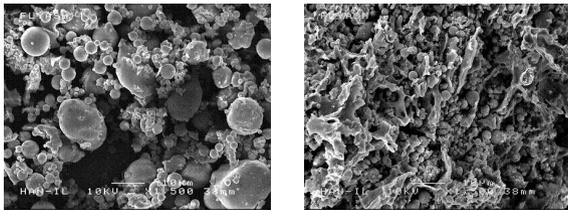
플라이애시 생산시 소요되는 전력 사용량에 의한 CO₂ 배출계수는 일본의 경우, 토목학회의 “콘크리트 구조물의

환경성능 조사 지침”에서 플라이 애시 1 ton을 생산할 때 CO₂ 배출량은 19.6 kg으로 보고되고 있다.⁴⁾ 하지만 이는 운반과정만을 고려한 값으로서 전과정 평가에 의한 값이라 할 수 없다. 국내의 경우를 살펴보면, 2009년 남동발전소에서 플라이 애시 생산을 위해 전기집진기 및 정제설비에서 소요된 전체 전력사용량이 43,371 MWh이었으므로, 전력 사용량에 대한 CO₂ 배출계수인 0.5554 ton-CO₂/MWh를 적용하면 남동발전소의 플라이애시 1 ton을 생산할 때 CO₂ 배출량은 약 13.7 kg이다.

한편, davidovits는 플라이 애시의 생산과 운반, 그리고 화학 반응을 고려하여 플라이 애시의 CO₂ 배출계수를 90 kg-CO₂로 제시하고 있으므로⁵⁾, 이를 적용하여 콘크리트 구성요소의 CO₂ 배출계수를 환산한 값이 표 2에 해당한다.



[그림 5] 석탄회의 용도별 재활용 현황



[그림 6] 콘크리트용 혼화재료 플라이애시

2008년 국내의 시멘트 총 소비량은 약 5,100만 톤이며 국민 1인당 소비량은 1,140kg이었다. 한편 석탄회(플라이 애시)의 용도별 재활용 현황을 보면, 레미콘 생산 시 시멘트 혼화재로서 소요된 플라이애시는 약 404만 톤으로서 이는 전체 시멘트 생산량의 약 8% 정도이며, 레미콘 산업에서 시멘트의 일부를 플라이애시로 약 20% 정도 대체할 경우 CO₂ 배출량의 감소효과는 시멘트만을 사용한 경우에 비해 CO₂ 배출량을 15% 이상 줄일 수 있다.

4. 맺음말

석탄은 전력발전 분야에서 앞으로 계속적으로 활용해야 할 필요가 있는 1차 에너지 자원이다. 따라서, 전력발전 분야에서 석탄연료를 사용함에 따라 발생하는 부산물인 석탄회(플라이애시)의 재활용은 경제적 효과뿐만 아니라 환경부하 저감효과를 가져오므로, 플라이애시 적용 활성화를 위한 지속적인 연구가 필요하다.

우리나라 석탄회의 재활용률은 67.4%(2008년 기준) 정도로, 80% 이상의 재활용률을 기록하는 선진국에 비해 상당히 낮은 편이다. 따라서 석탄회의 재활용을 통한 환경부하 저감효과를 극대화 하기 위해서는 콘크리트 분야에서의 재활용뿐만 아니라 시멘트 2차제품이나 인공 경량골재 등 그 활용처를 확대하도록 석탄회 신규 수요시장 개발을 위한 관련기관의 적극적인 노력과 연구 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 황광률, “플라이 애시를 사용한 콘크리트의 기술 현황”, 한국콘크리트학회지, Vol. 14, No. 5, 2002, pp. 96-103.
2. 日本建築學會, フライアッシュ使用をするコンクリートの配合設計・施工指針・同解説, 2007.
3. 한국남부발전, 석탄회 재활용 선진화 전력, 2009.
4. 日本土木學會, 콘크리트 구조물의 환경性能照査指針 (試案), 2005.
5. Davidovits, J., Geopolymer: Chemistry & Applications, 2008.
6. 金津 努, 中井 雅司, 齊藤 直, 플라이애시의 활용による環境負荷低減への取組み, 콘크리트 工学 Vol.47, No.9