

생활폐기물 소각 바닥재의 accelerated carbonation 처리에 의한 CO₂ 저감 연구

안지환, 한기천, 유광석, 조희찬*

한국지질자원연구원, *서울대학교

CO₂ sequestration by accelerated carbonation of municipal solid waste incineration bottom ash

Ahn Ji-Whan, Han Gi-Chun, You Kwang-Suk, Cho Hee-Chan*

*Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, *Seoul National University*

1. 서론

국제환경협약에 따라 경제성을 갖는 친환경적이고 지속가능한 방법으로 폐기물을 관리하고자 각국이 노력하고 있다. 더욱이 한국은 CO₂ 2차 감축대상국가에 포함될 것이 확실시됨으로써 CO₂ 저감 및 활용 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 국제 환경 변화에 맞게 매립보다는 폐기물의 감용화에 효과적인 소각처리에 의한 폐기물 처리가 활성화되고 있다. 폐기물의 소각처리는 감용화뿐만 아니라 열회수, 살균 등의 장점을 가지고 있다. 그러나, 일반적으로 소각처리는 원폐기물의 약 20%를 바닥재와 비산재로 발생하게 되며, 대기중으로 10%농도의 CO₂를 방출하게 된다.

일반적으로 바닥재는 물리적으로 골재와 비슷한 특성을 나타내기 때문에 도로재료로서 사용가능한 것으로 알려져 있으며, 실제로 바닥재는 프랑스, 네덜란드, 독일 등 유럽 여러 나라에서는 노반재, 제방 등 골재대체재로서 50%이상 사용되고 있다. 대부분 바닥재는 고온에서 수냉되는데, 이러한 급냉처리에 의해 바닥재는 불안정상으로 존재하기 때문에, 유럽국가들이 바닥재를 골재대체재 등으로 활용하기 위해서는 수개월이상의 숙성(weathering)과정을 거치게 된다. 바닥재 숙성의 주된 작용은 공기중의 CO₂와의 반응을 통한 중성화 과정이며, 중금속의 안정화, 불안정한 상을 안정한 상으로 변화하게 한다. 이러한 숙성과정은 대개 3~6개월간의 기간이 소요된다.

숙성과정에서 주요 반응물질은 대기중의 CO₂로 느린 반응 속도를 촉진하기 위해 순수한 CO₂나 산업에서 발생하는 CO₂를 사용하여 탄산화를 촉진하는 방법들이 소개되고 있으며, 실험실 규모 또는 실증 규모로 수행되어 왔다. 이것은 바닥재가 안정화됨으로써 골재대체재로의 활용이 가능함과 동시에 CO₂ 고용을 위한 재료로서 사용될 수 있는 가능성을 보여준다고 할 수 있다. CO₂ 고용을 위한 폐기물이나 부산물을 고려할 경우, 보관, 운반 등을 고려하여 액상폐기물보다는 고형 무기폐기물이나 부산물을 대상폐기물로 선정하는 것이 일반적이다. 또한, CO₂와의 반응을 유도하기 위해 알칼리성을 가지며 안정한 화합물인 탄산염을 형성할 수 있는 Ca, Mg 광물을 가진 물질이어야 한다. 경제성을 확보하기 위해 대량처리가 가능하도록 발생량이 많은 폐기물로 물류비, 처리비를 줄이기 위해 CO₂ 발생원으로부터 발생하는 물질이 적합하다. 생활폐기물 바닥재는 알칼리성 물질로 CO₂가 발생하는 소각로부터 발생하는 폐기물이며 탄산화에 의해 중금속이 안정화될 경우, 대체골재로서 재활용이 가능한 물질로 CO₂ 고용을 위한 적합한 재료로서 고려될 수 있다.

본 연구에서는 생활폐기물 소각 바닥재의 연구 결과 자료를 바탕으로 CO₂를 고용을 위한 재료로서 바닥재의 활용가능성을 알아보기 위해 D시의 바닥재를 기초로 하여 CO₂ 고용가능량을 산정하였고, 현재 바닥재 처리 비용대비 accelerated carbonation에 의한 바닥재 처리 비용과 CO₂ 절감 효과를 통해 CDM 사업화 가능성을 평가하였다.

2. 연구 방법

생활폐기물 소각 바닥재는 생활폐기물을 소각하고 남은 잔재물 중 스토커 하부로 배출되는 물질로서, 입도범위가 매우 높고 불균질한 성상을 하고 있다. D시의 생활폐기물 소각 시설을 기초로 하여 바닥재의 단기적 CO₂ 저감 가능량은 포화용액의 pH와 산중화용적률 토대로 산정하였으며, 최대 CO₂ 저감 가능량은 바닥재의 화학조성에 기초하여 산정하였다. 바닥재의 accelerated carbonation에 의한 처리비용분석은 현 바닥재의 매립비용과 accelerated carbonation에 의해 바닥재 처리시 CO₂ 저감 비용과 골재대체재로의 활용시 부가가치액을 기초로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 생활폐기물 소각 바닥재의 CO₂ 고용량 산정

바닥재의 주요구성물질은 유리류, 자기류, 철판류, 슬래그류 등으로 주요 광물상은 portlandite(Ca(OH)₂), quartz(SiO₂) 등이며, 그밖에 ettringite, gypsum 등이 존재한다. 탄산화반응에 참여하는 주된 물질은 Ca(OH)₂, ettringite 등으로 바닥재 전체의 10% 내외로 추정되고 있다. 현재까지 수행된 accelerated carbonation 반응 연구는 크게 두가지로 구분될 수 있다. 첫 번째는 낮은 압력하에 반응이 이루어지는 탄산화로서, 일반적으로 대상 물질을 슬러리 상태로 만들어 CO₂와 반응시키는 방법이다. 또 하나는 오토클레이브를 이용하여 고압하에서 CO₂와 반응시키는 방법이다. 전자의 방법은 주로 Ca나 Mg가 용해하기 쉬운 물질에 대해 적용하며, 후자는 칼슘실리케이트 또는 마그네슘실리케이트와 같이 상온 상압에서 분해하기 어려운 물질에 대해 적용하거나 CO₂ 고용량을 증대시키기 위해 적용되는 공정이다.

표 1은 바닥재의 ANC 결과로서 바닥재 1kg에 소요되는 질산의 소요량과 이를 CO₂로 환산했을 때의 바닥재 1kg가 고용할 수 있는 CO₂의 고용량을 나타낸 것이다. ANC 결과에 의한 바닥재의 CO₂ 고용 잠재성은 일반적으로 가압을 사용하지 않는 accelerated carbonation 공정을 통하여 얻을 수 있는 양이다. ANC test는 정해진 pH에 도달하기 위해 소요된 산의 양을 기초로 하며, 시험동안 탄산화물이 생성되지 않기 때문에 계산된 CO₂ 고용 잠재량은 실제 CO₂ 고용량보다 더 낮게 나타난다고 할 수 있다.

표 2는 바닥재의 화학조성을 기초로 하여 계산된 최대 CO₂ 저감 가능량을 나타낸 것이다. 이러한 방법은 바닥재에 함유되어 있는 Ca와 Mg가 모두 탄산화반응에 참가하여 탄산화물을 형성하는 것을 가정하여 CO₂ 고용 잠재량을 계산한 것이다. 바닥재의 경우 Ca 함유량이 117.4g/kg, Mg 함유량이 17.7g/kg으로 이를 탄산화물로 환산했을 때, CO₂ 고용량은 바닥재 1kg 당 161.0g이 가능한 것으로 예상할 수 있다. ANC test 결과와 비교했을 때, 약 8배정도 더 많은 CO₂ 고용 잠재성이 있으나, 반응성을 높이기 위한 추가적인 공정이 필요하므로 경제성에 대해서는 향후 더 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

표 1. ANC에 기초한 바닥재의 CO₂ 고용 능력

Residue	ANC(mol eqH ⁺ /kg)	CO ₂ (g/kg)
MSWI bottom ash	1.0	22.0

표 2. 화학조성에 기초한 바닥재의 잠재적 CO₂ 고용량

Residue	Ca(g/kg)	Mg(g/kg)	CO ₂ (g/kg)
MSWI bottom ash	117.4	17.7	161.0

2005년 기준 국내 바닥재의 발생량은 약 35만톤으로 생활폐기물의 소각 비율은 점차 증가 추세에 있다. 표 3은 2005년을 기준으로 지난 5년간 바닥재의 발생 증가율을 적용하여 2012년에 발생량을 추정했을 때, ANC test 및 화학조성을 기초로 하여 산정된 바닥재의 CO₂ 고용 잠재량을 발생량을 고려하여 CO₂ 고용량을 계산한 결과이다. 2012년 기준 742만톤의 바닥재가 발생했을 때, ANC test 결과를 기초로 할 경우, 연간 약 16,300톤, 화학조성을 기초로 했을 때, 119,500톤의 CO₂를 고용할 수 있는 것으로 나타났다.

표. 바닥재 발생량을 고려한 잠재적 CO₂ 고용량

Residue	Generation	ANC		total composition	
	kton/y	CO ₂ (g/kg)	CO ₂ (kt/y)	CO ₂ (g/kg)	CO ₂ (kt/y)
MSWI bottom ash	742*	22.0	16.3	161.0	119.5

*2005년 기준 지난 5년간 발생량 증가분 평균 적용시 2012년 발생량

3.2 accelerated carbonation에 의한 생활폐기물 소각 바닥재 처리시 비용 분석

D시 생활폐기물 소각 시설은 스토커방식을 사용하고 있으며, 2007년 기준으로 약 34만톤의 바닥재가 발생하였다. 발생된 바닥재는 인근 매립지로 이송하여 매립 처분하는 데 처분 비용은 운반비와 매립비로 구분할 수 있으며, 운반비는 톤당 6,700원, 매립비는 20,000원으로 바닥재 처리비는 톤당 26,700원이 소요되었다.

바닥재를 accelerated carbonation에 의해 처리할 경우, CO₂ 고용에 따른 가치향상과 골재 대체재로의 활용에 따른 가치향상을 기대할 수 있다. 소각장 배가스를 활용하여 바닥재 1톤을 accelerated carbonation에 의해 안정화 처리시 배가스 내 CO₂ 저감량은 약 160kg로 연간 D시의 바닥재 발생량인 34,000톤을 고려하면 약 5,440톤의 CO₂ 고용 효과를 가지게 되며, 현 CO₂ 거래가격(CER)이 15유로/톤으로 계산하면 연간 약 1억 2천만원 정도의 부가가치가 발생할 수 있다. 또한, 골재대체재로서의 활용시 30천톤/년의 골재대체재 생산을 기대할 수 있으며, 이를 통하여 약 9천만원의 부가가치향상을 기대할 수 있다.(대체골재가격 3,000원/톤 기준)

4. 결론

accelerated carbonation에 의한 생활폐기물 소각 바닥재의 CO₂ 저감 효과에 대한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 바닥재의 ANC 결과와 화학조성을 기초로 하여 바닥재의 CO₂ 고용 잠재성을 산출한 결과 각각 바닥재 1kg 당 22g, 161.0g의 CO₂ 고용이 가능한 것으로 나타났다. 국내 바닥재 발생량과 바닥재 발생 증가율을 고려할 경우, 2012년에는 ANC test 결과를 기초로 할 경우, 연간 약 16,300톤, 화학조성을 기초로 했을 때, 119,500톤의 CO₂를 고용할 수 있는 것으로 나타났다. D시 생활폐기물 소각 시설을 대상으로 accelerated carbonation에 의한 바닥재 처리시 2007년 기준 바닥재 1톤당 처리비 26,700원을 절감할 수 있으며, 연간 5,440톤의 CO₂ 고용 효과를 가지게 되며, 연간 약 1억 2천만원 정도의 부가가치가 발생할 수 있으며, 골재대체재로서의 활용시 30천톤/년의 골재대체재 생산에 따라 약 9천만원의 부가가치향상을 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 참고문헌

1. 환경부, 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 2006.
2. 안지환 외, Characteristic of Cu and Pb leaching behavior of municipal solid waste incineration bottom ash, *Geosystem Engineering*, 9(1), 2006.
3. 안지환 외, 생활폐기물 소각재 중 바닥재의 특성, *한국자원리사이클링학회*, Vol. 10, No. 2001.
4. Mineral CO₂ sequestration by carbonation of industrial residues, ECN report, 2005.
5. Ji-Whan, Ahn et al., Encapsulation of municipal solid waste incineration bottom ash to immobilize Cu and Pb via carbonation reaction, *Solid State Phenomena*, Vols. 124-126, pp. 1709-1712, 2007.
6. Eva Rendek, Gaëlle Ducom, Patrick Germain, Carbon dioxide sequestration in municipal solid waste incinerator(MSWI) bottom ash, *Journal of Hazardous Materials*, B128, 2006.
7. You GS, Ahn JW, Han GC, et al., Neutralizing capacity of bottom ash from municipal solid waste incineration of different particle size, *Korean Journal of Chemical Engineering*, 23(2), 2006.
8. Wouter J.J. Huijgen, Rob N.J. Comans, Geert-Jan Witkamp, Cost evaluation of CO₂ sequestration by aqueous mineral carbonation, *Energy Conversion and Management* 48, 2007.