

# 기후변화와 광물탄산화

## Climate Change & Mineral Carbonation



이승우 Seung-Woo Lee  
한국지질자원연구원 전략기술연구본부  
탄소광물화사업단 책임연구원  
E-mail : swlee21th@kigam.re.kr



방준환 Jun-Hwan Bang  
한국지질자원연구원 전략기술연구본부  
탄소광물화사업단 선임연구원  
E-mail : jhbang@kigam.re.kr



채수천 Soo-Chun Chae\*  
한국지질자원연구원 전략기술연구본부  
탄소광물화사업단 책임연구원  
E-mail : chae@kigam.re.kr

### 1. 기후변화에 따른 온실가스 감축 노력

1990년 교토의정서를 시작으로 2016년 파리 협정 (기후변화협약 당사국총회)에 이르기까지 지구라는 공동운명체는 지구생태계 보존을 위해 2100년까지 기온 상승을 2℃ 이상으로 할 것인지 또는 미만으로 유지할 것인지를 두고 오랜 격론을 벌여왔다 (그림 1).

2℃ 목표는 지구의 평균 온도가 산업화 이전과 비교하여 2℃ 이상 상승되지 않도록 온실가스 배출량을 줄이자는 것이다. 유럽연합은 1990년대 중반부터 목표 온도를 2℃로 주장하여, 2009년 코펜하겐 합의에 포함하였고, 2010년 칸쿤 합의에서 공식적으로 채택되었다.<sup>1)</sup> 그러나 2015년 파리협정에서는 지구의 평균 온도 상승을 2℃ 미만으로 유지하여야 한다는 보다 강화된 내용이 포함되어 있다. 이는 기존의 합의와 비교하여 기후변화 대비 측면에서는 진일보하였다고 볼 수 있다. 아울러 파리 협정이 갖는 또 다른 의미는 전 세계 195개 당사국 모두에게 감축 의무가 주어지는 유엔 파리협정 최종 합의문을 채택하였다는 점이다. 이는 2005년 발효된 교토의정서가 선진 38개국에만 감축 의무를 부담한 것과는 대조적으로 지구공동체의 환경적 역할 분담이 증대되었다는 것을 의미한다.

온실가스란 대기권에서 지표로부터 방사되는 적외선의 일부가 흡수됨으로써 온실 효과를 일으키는 원인이 되는 기체를 총칭하는 술어이다.<sup>2)</sup> 온실가스로는 수증기를 포함하여 메탄, 아산화질소, 오존, CFCs, HFCs, PFCs 및 SF<sub>6</sub> 등이 있는데 이 중 전체 온실가스 중 80% 이상을 차지하고 있는 이산화탄소가 저감 대상 물질로 선정되었다.

파리협정을 계기로 2015년 6월, 정부는 2030년의 온실가스배출전망치(BAU)인 8억 5,060만 톤 CO<sub>2</sub>-e의 37% (3억 1,472만 톤 CO<sub>2</sub>-e)를 감축코자하였다.<sup>3)</sup> 감축 목표량 37% 중 25.7% (2억 1,860만 톤 CO<sub>2</sub>-e)는 온실가스 감축 기술을 기반으로 국내에서 발생하는 온실가스를 저감하고, 11.3% (9,611만 톤 CO<sub>2</sub>-e)는 국제시장을 활용하겠다고 발표하였다.<sup>3)</sup> 산업부문의 감축률은 BAU 대비 최대 12%로 책정될 것으로 예상되며 파리 총회 이후 산업 부문별 · 업종별 · 연도별 감축목표 설정 및 법 · 제도 개선 방

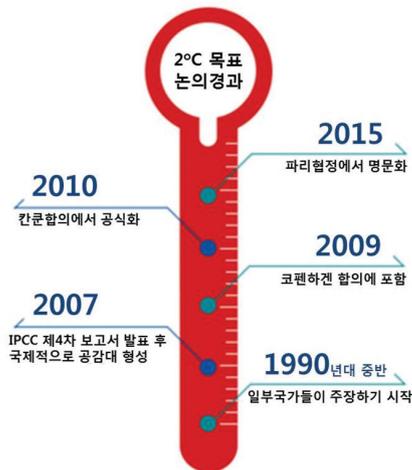


그림 1. 국제사회에서 진행된 온실가스 저감 노력<sup>1)</sup>

안과 산업계 지원대책 등 세부 이행계획을 수립하고 있는 상황이다.

국내 산업 업종별 온실가스 배출량은 발전, 철강, 석유화학, 시멘트 및 정유 등의 순이며 정부는 2014년 국가온실가스 감축 로드맵을 발표한 바 있다.<sup>4)</sup> 철강분야의 경우, 2020년 온실가스배출전망치 (BAU)는 1억 1,690만 톤 CO<sub>2</sub>-e로 예상하였으며, 이중 7.6%인 760만 톤을 감축하고, 시멘트 분야는 4,080만 톤 CO<sub>2</sub>-e의 8.5%인 350만 톤을 감축하는 것으로 확정한 바 있다.

따라서 산업계 전반에서는 산업계 피해는 최소화하고 외부 감축량을 활용하는 등 여러 방법을 통한 이행방안을 마련해야 하는 상황에 직면하였다.

## 2. 온실가스 감축을 위한 기술적 방안

현재까지 온실가스 중 가장 많은 양을 차지하는 이산화탄소의 처분 방법은 크게 이산화탄소 포집 및 저장(CCS, carbon capture & storage)과 이산화탄소 전환(CCU, carbon capture & utilization)으로 구분할 수 있다. CCS 기술은 발전소 등에서 배출되는 이산화탄소를 포집하여 공극률을 갖는 지층에 저장하는 방법으로, 대용량의 이산화탄소 처리가 가능하며 석유 및 가스 매장량이 큰

미국, 호주, 및 유럽연합을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 반면에 CCU 기술은 이산화탄소를 유용한 자원으로 활용하여 부가가치가 높은 다른 탄소화합물로 전환하는 연구로서 CCS와 비교하여 상대적으로 공정비용이 높고 전체 공정의 이산화탄소 저감 효과를 표준화해야 하는 해결과제를 갖고 있다.

많은 환경론자들의 문제 제기에도 불구하고 CCS가 가장 현실적인 이산화탄소 대용량 처리 기술로 인정되고 있으나 저장 장소 제한 및 선정에 많은 어려움을 겪고 있고 우리나라의 경우 이산화탄소 배출량 대비 대용량 저장소의 확보를 위한 연구가 필요한 상황인 점을 고려할 때 CCS와 CCU 기술의 상호 연대를 통한 기술 개발이 요구되는 상황이다.

이산화탄소 전환 기술은 크게 화학적 전환과 생물학적 전환으로 구분할 수 있으며 메탄올, 메탄 및 바이오 오일 생산 그리고 플라스틱 합성 등 다양한 물질로의 전환이 가능하지만 전체 공정비용이 기존 제품 생산 비용과 비교하여 상대적으로 높다는 것이 상용화 과정의 가장 큰 걸림돌로 남아있다.

현재까지 광물탄산화 기술은 국내외에서 진행 중인 다양한 이산화탄소 활용 기술 중 잠재 CO<sub>2</sub> 저감량 및 경제성 측면에서 타 기술과 비교 시, 비교적 우수한 것으로 평가 받고 있는 기술이다.<sup>5)</sup>

## 3. 광물탄산화 장점 & 대상 물질

광물탄산화는 'CO<sub>2</sub> binding' 개념으로 1990년 Seifritz에 의해 처음 언급되었으며 수년 후 갈슘 및 마그네슘 기반 광물 (현무암, 사문석, 감람석, 규회석 등)을 이용하여 이산화탄소를 저감시키는 연구가 발표되었다.<sup>6)</sup> 현무암과 마찬가지로 감람석, 사문석 및 규회석 등과 같은 천연 규산염 광물들이 자연계에 풍부하며 또한 저렴하다는 점 때문에 가장 적절한 출발물질로 인정되었다. 현재는 천연 규산염 광물들이 풍부하게 매장된 국가, 예를 들어, 핀란드 및 노르웨이 등을 중심으로 규산염 광물을 이용한 이

산화탄소 전환 연구가 활발히 수행 중이다.

이산화탄소 저장 방법으로서 광물탄산화의 장점을 정리하면 아래와 같다.

- CCS와 비교하여 특정 저장소가 필요하지 않으며, 특히 탄산염 광물은 열역학적으로 안정하므로 지속적으로 안전하게 이산화탄소를 고정한다는 점에서 별도의 모니터링이 필요하지 않다.
- 이산화탄소와 반응하는 탄산화 공정은 발열반응으로 반응온도를 조절할 경우 고순도 탄산염 물질을 합성할 수 있음
- 합성된 탄산염 물질은 제지, 페인트, 플라스틱 및 건설자재 등과 같은 산업적 활용처가 확보되어 있으며 부가가치 창출이 일정 부분 가능함

하지만 천연 규산염 광물을 이산화탄소 반응 물질로 활용할 경우, 채광 및 운송비용 등이 공정비용 상승 요인으로 작용할 수 있으며 아울러 환경적 부담을 증가시킬 수 있다. 최근에는 천연 규산염 광물 이외에 산업체에서 발생하는 산업부산물을 활용한 연구가 활발히 진행 중이다. 일례로 광물탄산화 물질로 활용될 수 있는 물질로는 제철소에서 발생하는 슬래그를 고려할 수 있다. 슬래그는 대표적인 알칼리계 산업부산물이다. 2014년을 기준으로 국내 철강생산량은 7,100만 톤으로 세계 5위의 철강생산국으로, 이에 따라 발생되고 있는 슬래그의 양은 약 2천만 톤에 이르고 있다.<sup>7)</sup> 슬래그에는 칼슘 및 마그네슘과 같은 알칼리 금속이 약 20~40 wt.% 함유되어 있으며 추출방법의 최적화 및 저비용의 공정기술이 확립된다면 이산화탄소 저감 물질로서 활용될 수 있다. 경제성을 평가하면 슬래그로부터 400만 톤/년 CO<sub>2</sub>를 저감 할 수 있으며, 이와 동시에 약 800만 톤의 부가적인 탄산화물질을 얻을 수 있다. 이러한 물질은 건축자재 및 자연산 석회석 시장의 대체는 물론 환경보호와 새로운 산업 창출에 활용될 수 있을 것으로 평가된다.

#### 4. 광물탄산화 기술 및 선결요건

광물탄산화 방법은 크게 직접법 (direct method)과 간

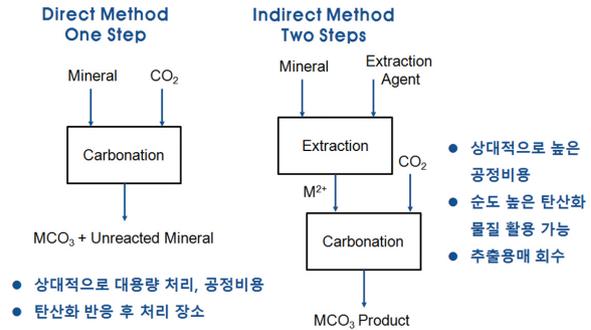


그림 2. 광물탄산화 방법 중 직접법 (direct method)과 간접법 (indirect method) 공정 순서도 및 장·단점 비교<sup>8)</sup>

접법 (indirect method)로 구분할 수 있다 <그림 2>.

직접법은 탄산염 광물의 주성분인 알칼리 토금속, 예를 들어 Ca 및 Mg을 함유하고 있는 대상물질 (천연 규산염 광물 혹은 산업부산물) 자체에 이산화탄소를 직접 주입하여 CO<sub>2</sub>를 고정화 하는 기술이다. 이에 반해 간접법은 추출 용매 등을 이용하여 대상물질 내에 함유된 알칼리 토 금속 (칼슘 혹은 마그네슘)을 추출하고 칼슘 혹은 마그네슘이 포함된 추출액에 이산화탄소를 주입 반응시킴으로써 CO<sub>2</sub>를 고정화 하는 기술이다. 이 같은 광물탄산화법은 CaO:CO<sub>2</sub>=56:44의 비를 갖는 CaCO<sub>3</sub>를 가정 시, 이론상 1톤의 이산화탄소가 탄산칼슘으로 전환되면 약 2.3톤의 탄산칼슘이 발생한다.

간접법과 비교하여 직접법은 대용량 처리에 용이하고 공정비용이 상대적으로 낮게 책정될 수 있다는 장점이 있으나 시료에 따라서는 광물탄산화 반응전에 전처리기술이 요구될 수 있다는 점, 그리고 반응후 미반응 물질과의 혼합에 따른 경제성 있는 물질로서 사용이 불가능하기 때문에 추가적 선별공정의 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 간접법은 추출용매를 사용하는 관계로 공정비용이 상대적으로 높다는 점 그리고 추출, 침전 및 탄산화 등 제반 공정이 복잡하다는 단점을 가지고 있으나, 궁극적으로는 고순도 탄산화 물질을 합성할 수 있는 장점을 갖는다.

국내 지질은 매우 다양한 암석으로 구성되고 있기는 하지만, 특정 성분이 농집된 광물의 규모가 일부 품목을 제

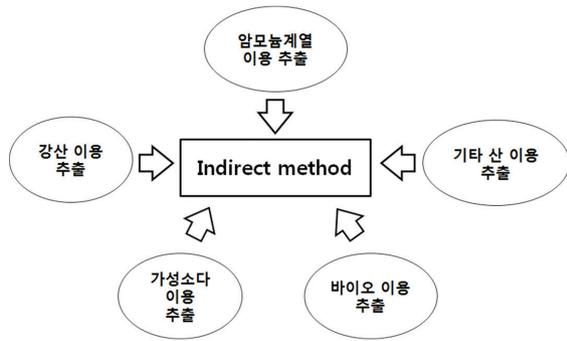


그림 3. 간접법 (Indirect method)을 이용한 알칼리 토금속 추출 방법

외하고는 그리 크지 않다는 점, 그리고 비교적 환경적 문제의 소지를 가지고 있기 때문에 자연산 암석 또는 광물을 이용한 광물탄산화에는 한계가 있다. 따라서 그 대안 물질로 산업부산물에 대상물질로 거론될 수 있는데, 이들 또한 저가이기는 하지만 이미 그 자체로 토목 또는 건축재료 등 사용처가 존재하기 때문에, 단순히 광물탄산화법의 적용이 불가하다. 따라서 향후 광물탄산화의 대상은 이들 산업부산물을 재료로 간접법에 의한 광물탄산화를 통해 고가 또는 고순도 물질 제조 또는 추출 후 잔류물질의 재사용 등 경제성 제고 노력이 강구되어야 한다.

간접법의 경우, 알칼리 토금속의 추출에 사용되는 용매로 염산, 질산 및 황산 등 강산 뿐 아니라 아세트산과 같은 약산 그리고 가성소다 및 암모늄 계열의 용제를 사용하고 있다 <그림 3>.

이와 같이 다양한 종류의 화학물질의 사용은 광물탄산화 공정비용을 높이는 결과를 야기한다. 따라서 최근에는 전 세계적으로 공정비용의 절감, 즉 경제성 제고에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있는 바, 주로 간접법에 사용되고 있는 추출제 등 화학물질의 회수 또는 재사용 그리고 생성된 탄산염 광물의 형상 제어 및 탄산화 공정 후 잔류물질에 대한 활용 등 고부가가치화에 초점을 맞추고 있다. 특히 잔류물질에 대한 활용은 전체 탄산화 공정 중 무게비로 가장 큰 물질로, 이에 대한 처리방안이 고려되지 않는다면, 또 다른 환경적 부담 및 처리비용으로 인한 공정비용의 상승이 발생할 가능성이 크다.

광물탄산화 방법은 산업부산물 (슬래그 및 폐콘크리트 등)을 이용할 경우 이산화탄소 저감에 기여할 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나다. 하지만 광물탄산화 방법이 이산화탄소 저감 기술로 국제 공인을 받기 위해서는 공정에 소요되는 에너지 및 비용에 대한 표준화 작업과 CO<sub>2</sub> 전환 탄산화 물질의 제품 주기를 모니터링 하여야 한다. 탄산칼슘이 열역학적으로 안정한 형태인 점을 고려할 때 다른 CCU 방법과 비교하여 광물탄산화 방법이 안정적으로 이산화탄소를 저감할 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 광물탄산화법의 산업현장 적용 및 상용화를 위하여는 첫째, 공정 중 현장에서 발생하는 총 CO<sub>2</sub> 가스의 발생량을 현격하게 감소시키는 물론, 둘째, 본 공정에서 파생되는 물질에 대한 재활용 또는 신상품 개발 예를 들어, 탄산화 물질의 소재화 및 건축자재 활용 등 새로운 산업 창출에 기인한 경제성 제고가 우선되어야 한다.

이러한 이유로 물질수지와 에너지 수치 그리고 경제성 평가를 바탕으로 광물탄산화 각 공정에 대한 심도 깊은 논의가 필요하다.

담당 편집위원 : 이견철(한국교통대학교)

#### 참고문헌

1. 온실가스종합정보센터, <https://www.gir.go.kr>
2. 위키백과, <https://ko.wikipedia.org/wiki/온실기체>
3. 환경부 보도자료 (2015년 6월 30일) 2030년 우리나라 온실가스 감축목표 BAU(851백만 톤) 대비 37% 감축으로 확정
4. 국가온실가스감축로드맵, 2014
5. 이지현, 이동욱, 심재구, 이산화탄소 활용: 광물화 기술개요 및 동향, 제18권, 제3호, p.28-40, 2015
6. Lackner, K.S., Wendt, C.H., Butt, D.P., Joyce, E.L., Sharp, D.H., 1995, Carbon dioxide disposal in carbonate minerals, Energy, 20, 1153-1170.
7. 2/4분기 철강산업 동향, 한국수출입은행, (2015)
8. Bobicki, E.R., Liu, Q., Xu, Z., Zeng, H., 2012, Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. Progress in Energy and Combustion Science, 38, 302-320