

국내 산업 여건을 고려한 CO₂ 저장 방안으로서 광물 탄산화 기술의 타당성

한건우 · 이창훈 · 전희동[†]

포항산업과학연구원 CO₂ 연구단
790-600 경북 포항시 남구 효자동 산 32번지 포항산업과학연구원
(2010년 9월 6일 접수, 2010년 11월 9일 채택)

Feasibility of Mineral Carbonation Technology as a CO₂ Storage Measure Considering Domestic Industrial Environment

Kunwoo Han, Chang Houn Rhee and Hee Dong Chun[†]

CO₂ Project, Research Institute of industrial Science & Technology, San 32, Nam-gu, Hyoja-dong, Pohang-si, Gyeongbuk 790-600, Korea
(Received 6 September 2010; accepted 9 November 2010)

요 약

CO₂를 탄산염의 형태로 고정화하는 광물 탄산화 기술은 CO₂ 지중 저장의 대안 기술의 하나로 중소규모로 CO₂ 저장을 실현할 수 있는 기술로 여겨지고 있다. 이 연구에서는 광물 탄산화 기술의 전세계적인 연구 개발 동향을 파악하고, 특히 우리 나라의 지질 및 산업 여건을 고려할 때 CO₂ 광물 탄산화가 CO₂ 저감 대책이 될 수 있는지에 대한 기술적 및 경제적 타당성을 검토하였다. 그 결과 국내에서는 연간 1,200만톤 이상의 CO₂를 고정화할 수 있는 산업 부산물이 발생하고 있으며, 이를 광물탄산화에 이용한다면 CO₂ 광물탄산화는 유망한 CO₂ 저감 방안이 될 수 있을 것으로 기대된다. 이 기술의 경제성 증대를 위해서는 산업 부산물의 전처리, 금속 용출액 및 용출 방법, 고속 탄산화 기술 개발, 공정열의 이용 극대화, 생성된 탄산화물의 부가가치 향상 등의 분야에서 향후 추가적인 연구 개발이 필요할 것으로 판단된다.

Abstract – CO₂ mineral carbonation technology, fixation technology of CO₂ as carbonates, is considered to be an alternative to the CO₂ geological storage technology, which can perform small- or medium-scale CO₂ storage. We provide the current R&D status of the mineral carbonation with special emphasis on the technical and economical feasibility of CO₂ mineral carbonation taken into consideration of the domestic geological and industrial environment. Given that the domestic industry produces relatively large amount of the industrial by-products, it is expected that the technology play a pivotal role on the CO₂ reduction countermeasure, reaching the potential storage capacity to 12Mt-CO₂/yr. The economics of the overall process should be improved via the development of advanced technologies on the pre-treatment of raw materials, method/solvents for metal extraction, enhanced kinetics of carbonation reactions, heat integration, and the production of highly value-added carbonates.

Key words: Carbon Dioxide Reduction, Mineral Carbonation, Industrial by-Products

1. 서 론

오늘날 화석 연료의 연소에 의해 배출되는 대표적인 온실가스로 알려져 있는 이산화탄소(carbon dioxide, CO₂)를 대폭적으로 저감하고자 하는 노력이 전지구적으로 전개되고 있다. CO₂ 배출량을 저감하기 위한 방안은 크게 에너지 관련 설비 등의 효율을 극대화시키는 에너지 절감 기술, 발생한 CO₂를 포집하여 직접적으로 배출량을 저감하는 CO₂ 저감 기술, 그리고 원천적으로 CO₂를 배출하지 않는 공정을 적용하는 수소 에너지 기술을 들 수 있다. 에너지 절감 기술은 다른 기술들에 비해 상대적으로 쉽게 적용이 가능하나, CO₂ 배출량

을 획기적으로 줄이기에는 많은 한계가 있다. 전세계적으로 많은 연구개발이 이루어지고 있는 수소 에너지 기술은 인류가 활용할 궁극적인 에너지원임에는 이견이 없지만, 향후 수십년간은 수소 기반 사회가 도래하기는 어려울 것으로 많은 전문가들이 예측하고 있다. 따라서, 현 시점에서 CO₂ 배출량을 감소하기 위해서는 CO₂ 배출원 등에서 직접 포집하는 등의 CO₂ 저감 기술의 적용이 가장 현실적인 것으로 판단된다.

발전소, 제철소 등에서 배출되는 CO₂를 대기 중이 아닌 저장소(reservoirs)에 저장하는 직접적인 CO₂ 저감 기술은 포집 및 저장 기술(CCS, carbon dioxide capture and storage)로 볼 수 있으며, 포집된 CO₂의 처리는 크게 직접적인 저장, 자원화 및 산업적 이용(utilization or industrial uses), 광물 탄산화(mineral carbonation) 등

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hdchun@rist.re.kr

으로 구분할 수 있고, 그 중 지중 저장(geological storage) 및 해양 저장(ocean storage) 기술은 대규모로 가장 확실하게 CO₂를 처리할 수 있는 기술로 알려져 있다. 그러나, 국내의 경우 CO₂ 배출량에 비해 지중 저장이 가능한 양이 적으며, 아직까지 저장지에 대한 조사가 충분하지 않은 실정이다. 자원화 기술은 CO₂와 환원물질(수소, 메탄, 탄소 등)의 반응을 이용하여 메탄올(CH₃OH), 고분자 등의 유용한 화합물 형태로 CO₂를 저장하는 개념으로 실험실적으로는 많은 연구가 이루어졌으나, 궁극적으로 CO₂의 화학적 전환에 필요한 저가의 환원물질을 획득해야 하는 문제가 있다.

한편, CO₂ 광물 탄산화 기술은 CO₂를 안정적이고, 영구적으로 저장할 수 있는 장점을 지니고있지만, 아직 기술 개발의 초기 단계로 볼 수 있고, 상대적으로 중소 규모의 CO₂ 처리에 적합하며, 처리 비용이 높은 것으로 알려져 있다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서[1]의 여러 가지 CCS 기술 분야의 성숙도 및 비용을 분석한 자료를 살펴보면, 광물 탄산화는 다른 CCS 기술에 비해서 상대적으로 기술의 성숙도가 낮아 아직 연구 단계(research phase)에 머무르고 있음을 알 수 있다. 또한, 1톤의 CO₂를 광물화하는데 필요한 비용은 50~100불 정도로 지중 저장에 비해서 많게는 10배 이상, 해양 저장에 비해서도 3배 정도로 파악된다[1].

이 논문에서는 CCS 기술 분야 중 하나인 CO₂ 광물 탄산화 기술의 요소 기술, 경제성 증대를 위한 세부 기술 분야 및 최신 연구개발 동향을 파악하였다. 아울러 각 국가별로 진행되고 있는 CO₂ 광물 탄산화 관련 연구 내용도 소개하고자 하였다. 이를 통하여 CO₂ 광물 탄산화 기술 개발의 타당성을 검토하였다. 특히, 우리나라의 지질학적, 산업적 여건을 고려할 때 CO₂ 광물 탄산화 기술이 CO₂ 저감 대책으로 타당한 것인지에 대한 개략적인 기술적 실현 가능성 및 비용을 분석하였다.

2. 광물 탄산화 관련 요소 기술

2-1. 광물 탄산화

CO₂의 광물 탄산화 혹은 탄산염 광물화(carbonate mineralization)는 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 철(Fe)과 같은 금속을 포함하는 화합물과 이산화탄소의 반응에 의해 불용성 탄산염이 형성되는 과정으로 아래와 같은 일반적인 화학 반응으로 표현할 수 있다(M: 금속).

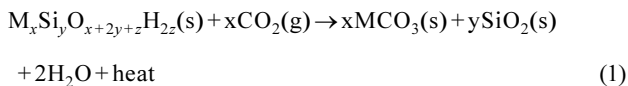


Fig. 1은 광물 탄산화 기술을 개략적으로 나타낸 그림으로 발전소, 제철소 등의 산업체에서 대량 발생하는 CO₂를 포집, 수송하고, 광물 탄산화에 필요한 원료 물질과 반응시켜 탄산화 반응을 진행시킨다. 이 과정에서 생성된 탄산화된 광물(탄산화물, 탄산염, carbonates, carbonate products)은 폐광의 친환경적인 복원, 산업재 등으로 활용 가능하다.

광물 탄산화 과정은 원료 물질의 습득(천연광물의 경우 채광 및 전처리, 산업부산물의 경우 수집 및 전처리), 광물화에 필요한 CO₂의 전처리, 탄산화(광물화) 반응, 생성물의 취급 및 처리(탄산화물의 활용) 등으로 구분할 수 있으며, 이때 원료 물질의 전처리 공정을 탄산화 공정에 포함시키기도 한다.

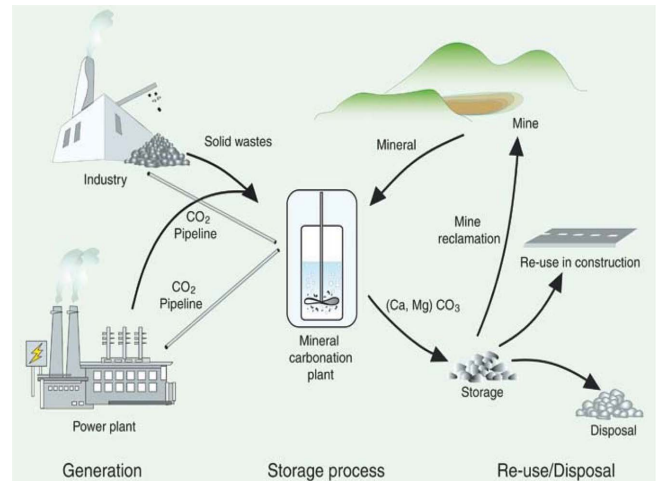


Fig. 1. Schematic of mineral carbonation [1].

2-2. 원료 물질의 선정

광물 탄산화의 원료 물질은 이상적으로는 알칼리 토금속(alkaline earth metal, Ca, Mg 등) 산화물이 필요하지만, 일부 천연 광물인 규산염 암석이나 알칼리성 산업 부산물(혹은 폐기물)에서 얻을 수 있다. 천연 광물로는 지표상에 널리 분포하는 감람석(olivine, Mg₂SiO₄), 사문석(serpentine, Mg₃Si₂O₅(OH)₄), 규회석(wollastonite, CaSiO₃) 등이 있으며, 산업 부산물로는 페콘크리트/시멘트, 제철공정에서 발생하는 철강 슬래그, 연소 부산물인 회(재, ash) 그리고 폐석면 등을 들 수 있다.

광물 탄산화와 관련된 기술 중 탄산화 공정과 생성된 탄산화물의 활용 등은 원료 물질의 종류에 관계없이 공통적인 요소이다. 그렇지만, 광물 탄산화 후보 물질의 경우는 원료 물질에 따라 하위 기술이 결정되기 때문에 신중하게 결정되어야 한다. 광물 탄산화 원료 물질의 선정시 고려해야 할 요소는 다음과 같다; 1) 탄산화 반응의 용이성/반응성(알칼리 함유량 등), 2) 원료 물질의 배출량/부존량, 3) 탄산화를 위한 원료 물질의 확보(분리 등) 용이성(특히, 산업 부산물의 경우), 4) 탄산화물 및 부산물의 활용 및 이의 처리에 따른 환경영향. 이와 더불어 원료 물질을 안정적으로 확보할 필요가 있으며, 특히, 천연 광물의 경우 광산에서 채광시 환경 문제를 야기하지 않으면서, 저가로 확보하는 기술의 개발이 필요하다. 광물 탄산화 기술이 중소 규모의 CO₂ 고정화 기술임을 상기한다면, 비교적 적은 양이지만 다양하게 존재하는 원료 물질의 개발도 필요할 것이다.

2-3. 탄산화 공정

광물 탄산화 공정 중 원료 물질의 전처리는 화학적 전처리를 제외하고도 파쇄(crushing), 분쇄(grinding), 자철석(magnetite, Fe₃O₄)의 자장추출 과정 등 고체 분리 공정을 거치게 된다. 탄산화 반응에서 CO₂ 순도는 크게 문제되지 않는 것으로 알려져 있지만, 배관 등을 통한 수송 문제도 중요하게 고려되어야 한다. 탄산화 반응은 크게 CO₂가 원료 물질과 직접적으로 반응하여 탄산화되는 단일 공정의 직접 탄산화(direct carbonation)와 원료 물질에서 반응성이 우수한 Ca/Mg 화합물(금속)을 추출(용출, extraction, leaching), 그리고 중간 단계의 물질을 탄산화하는 간접 탄산화(indirect carbonation)로 구분된다(Fig. 2).

2-3-1. 직접 탄산화

직접 탄산화 방법은 기체-고체 탄산화(direct gas-solid carbonation)

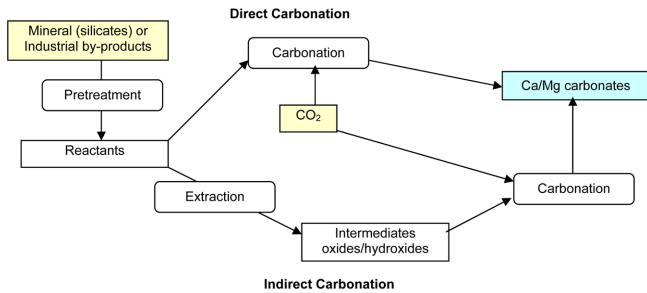
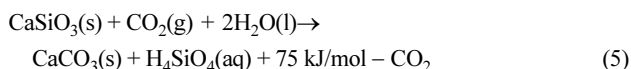
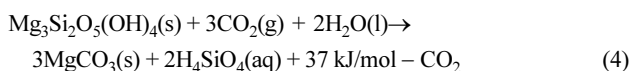
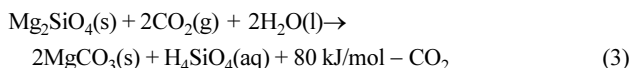
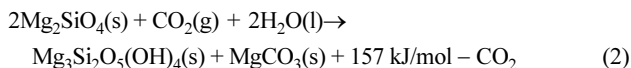


Fig. 2. Conceptual figure of mineral carbonation; direct vs. indirect carbonation.

와 수성 탄산화(direct aqueous carbonation)로 세분할 수 있으며, 가장 간단한 형태의 탄산화 방법인 기체-고체 탄산화 반응은 고상의 알칼리 토금속 산화물 분말과 CO₂ 기체를 직접 반응시켜 탄산화시키는 방법이다. Lackner 등[2]에 의해서 제안된 이 방법은 가스 혹은 초임계 CO₂를 이용하여 금속산화물을 탄산염 형태로 만드는 방법으로 공정이 간단하고, 고온의 열을 회수할 수 있는 장점이 있으나, 상온이나 상압에서의 반응이 매우 느리다는 단점을 가지고 있다. 일례로 100 μm 이하의 사문암 분말을 이용한 직접 탄산화(340 bar)의 반응 수율은 양론대비 30% 정도로 보고되었다[3].

수용액에서 단일 공정으로 이루어지는 직접 수성 탄산화 공정은 현재까지 개발된 광물 탄산화 공정 중 가장 유망한 기술의 하나로 평가받고 있다. 이 공정과 관련하여 마그네슘 혹은 칼슘 실리케이트(silicates)의 탄산화 반응이 많이 연구되고 있는데, 물과 전처리된 감람석(식 2, 3) 혹은 사문석 슬러리(식 4)와 가압된 형태의 CO₂와의 반응으로 아래의 반응식과 같이 탄산 마그네슘(고토석, magnesite)이 생성된다[4].



이러한 반응을 이용한 탄산화 연구도 다양하게 진행되었는데, Huijgen[5]의 연구에서는 Ca를 포함하는 규회석의 탄산화도 산업 폐기물이나 Mg-silicates와 같은 기작을 가지며, 200 °C, 20 bar의 CO₂ 분압에서 15분간 반응시킴으로써 Mg-silicates보다 빠른 반응속도를 얻을 수 있었고, 이때의 수율은 70%였다. 직접 수성 탄산화의 경우에는 감람석, 규회석, 가열된 사문석(heated serpentine)을 이용한 적절한 탄산화 조건은 40 기압 이상의 CO₂ 분압과 100 °C 이상의 온도였으며, 가장 반응성이 좋은 규회석의 경우 1시간 반응시 최대 전환율은 81.8%에 이르렀다[6].

Maroto-Valer 등[7]의 연구에서는 사문석의 반응 속도를 높이기 위해 공기와 증기를 이용한 물리적 활성화 방안, 그리고 적절한 산, 염기를 이용한 화학적 활성화 방안에 대한 실험을 진행하였으며, 그 결과 황산을 이용할 경우 사문석의 비표면적이 초기 8 m²/g에서 330

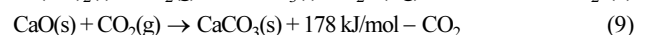
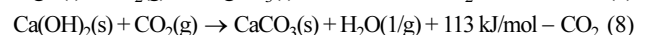
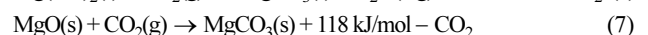
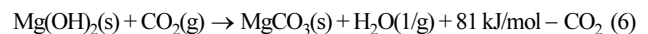
m²/g 정도까지 증가함을 관찰하였다. 그러나, 산용액의 처리 등으로 인한 금속 용출로 탄산화 잠재성은 감소하였다고 보고하고 있다. 앞서 언급한 방법 이외에도 표면 활성화를 위해서 초음파, 파동, 내부 분쇄(internal grinding) 등의 기계적 전처리 방법들을 이용하여 사문석 내부 MgO 층 용출을 증진시키고자 하는 시도도 있었으나[8], 이러한 전처리 방법들이 간접적으로 CO₂ 발생량을 증가시킬 수 있으므로 에너지 사용량을 최소화하면서, 경제적으로 탄산화 반응을 가속화시킬 수 있는 원료 물질의 전처리 기술을 찾기 위한 노력이 더욱 요구된다. 그리고 반응 상내에 반응물, 탄산염 및 부산물이 혼재함으로 탄산염의 재활용을 위해서는 이의 효과적인 분리 기술 개발이 필요하다.

2-3-2. 간접 탄산화

Lackner 등[3]에 의하면, Ca/Mg 산화물(oxides) 혹은 수산화물(hydroxides)의 탄산화 반응은 고온, 고압의 조건이긴 하지만 매우 빠른 것으로 보고되었다(Mg(OH)₂의 경우 340 bar, 500 °C의 조건에서 2시간 이내 반응 완료). 그러나, Ca/Mg는 자연계에서 산화물/수산화물의 형태로는 거의 존재하지 않고 대신 실리케이트와 화합물을 이룬 형태로 존재하기 때문에, 대상 물질의 구조 내에 CO₂가 침투하여 이들의 결합을 분리시키고 탄산화 반응을 유도하기에는 반응 속도가 느리다는 문제가 있다. 따라서, 해당 광물에서 단일 알칼리 산화물이나 수산화물의 형태로 용출시킨 뒤, 탄산화하는 방안이 보다 반응 속도 및 생성물의 분리에서 유리할 수 있다.

간접 탄산화 방법은 원료 물질에서 CO₂와 반응할 수 있는 성분 Mg 혹은 Ca 화합물을 추출한 후(중간 단계 물질을 생산), CO₂와의 반응을 통하여 탄산화시키는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 직접 탄산화보다 더 빠른 탄산화 방법이라고 알려져 있지만, Mg 혹은 Ca 화합물을 추출하기 위한 추가적인 에너지 혹은 화학물질이 투입되어야 하고 다단계의 반응 공정이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 간접 탄산화 기술은 여러 가지 기술로 세분화할 수 있으나, 전체 공정은 크게 Ca/Mg 화합물 추출 공정과 탄산화 공정으로 나눌 수 있다. 산, 염기 수용액 등 다양한 방법을 이용한 금속 (이온/산화물/수산화물) 추출 방법을 Table 1에 요약하였다. 금속 성분의 용출 후 탄산화 반응은 크게 기체-고체 반응 혹은 수용액 내에서의 탄산화 반응으로 구분할 수 있다.

간접 기체-고체 탄산화(indirect gas-solid carbonation) 방법은 CO₂의 전환 속도를 높이기 위해 산화물 혹은 수산화물의 형태로 전환시킨 후 탄산화시키는 방법으로 이와 관련된 탄산화 반응식은 아래와 같다[4].



Zevenhoven과 Teir[16]는 Mg(OH)₂의 소성(calcination) 공정을 거쳐 MgO를 생성한 후, 이를 탄산화하는 연구 결과에 대해 보고하였는데, 35 bar 정도까지 CO₂의 압력을 상승시킨 조건에서도 반응 속도가 증가하지 않았고, 따라서 Mg(OH)₂의 경우가 MgO보다 탄산화에 더 유리할 것으로 보았다. 위 연구와 관련하여 Zevenhoven 등[9]은 사문석으로부터 Mg(OH)₂를 직접 얻는 방법은 많은 에너지(보통 1,000 °C 이상의 고온)를 요구하기 때문에, 먼저 대기압 하에서 복합 산화물 내의 Mg를 MgO의 형태로 추출한 뒤, 이를 수산화하여, 최종

Table 1. Extraction agents and exemplary chemical reactions for carbonation technology

Extraction agent	Feedstock	Exemplary chemical reactions	Process description/Remark	References
N/A	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) \rightarrow 3\text{MgO}(\text{s}) + 2\text{SiO}_2(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}$		[9]
Steam	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{SiO}_2(\text{s})$		[9]
Water	Waste cement	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{H}^+ \rightarrow 3\text{Ca}^{2+} + 2\text{SiO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$		[10]
	Steel slag ^a	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$ $\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) \rightarrow \text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$	Direct carbonation	[11]
Chloric acid	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 6\text{HCl}(\text{al}) \rightarrow$ $3\text{MgCl}_2(\text{aq}) + 2\text{SiO}_2(\text{s}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 236 \text{ kJ/mol}$ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{s}) \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}(\text{s}) + \text{HCl}(\text{g}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{g}) - 398 \text{ kJ/mol}$ $2\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}(\text{s}) \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}} \text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{MgCl}_2(\text{aq}) + 127 \text{ kJ/mol}$	HCl route. Gas-solid carbonation follows.	[2] ^b
Acetic acid	Wollastonite	$\text{CaSiO}_3(\text{s}) + 2\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) \rightarrow$ $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{SiO}_2(\text{s}) + 105 \text{ kJ/mol}$	Acetic acid route or artificial weathering. Crystallization and precipitation step follows.	[12] ^b
	Steel slag	$\text{MgSiO}_3(\text{s}) + 2\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq}) \rightarrow$ $\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{CH}_3\text{COO}^-(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{SiO}_2(\text{s})$	Both Ca/Mg-silicates can be used as raw materials.	[4]
Other acids	Serpentine	$\text{MgSi}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 3\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) \rightarrow$ $3\text{MgSO}_4(\text{aq}) + 2\text{SiO}_2(\text{s}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 590 \text{ kJ/mol}$ $\text{MgSO}_4(\text{aq}) + \text{H}_2\text{CO}_3(\text{aq}) \rightarrow \text{MgCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) - 154 \text{ kJ/mol}$	$\text{Mg}(\text{OH})_2$ can be produced by the reaction of MgSO_4 with NaOH.	[13] ^b
Caustic soda	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{s}) + 2\text{OH}^- + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Mg}(\text{OH})_2 \downarrow + 2\text{SiO}(\text{OH})_3^-$ $2\text{SiO}(\text{OH})_3^- + 2\text{CO}_2(\text{aq}) \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ $2\text{Mg}(\text{OH})_2 + 2\text{HCO}_3^- \rightarrow 2\text{MgCO}_3 \downarrow + \text{H}_2\text{O}$	Multi-step carbonation	[14]
Molten salt	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 3\text{MgCl}_2 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow$ $6\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}(\text{s}) + 2\text{SiO}_2(\text{s}) + 2.5\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ $2\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}(\text{s}) \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{s}) + \text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$	Indirect molten salt process	[15, 5]
Mixture solvents	Serpentine	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4(\text{s}) + 6\text{H}^+(\text{aq}) \rightarrow$ $3\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{SiO}_2(\text{s}) + 5\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 286 \text{ kJ/mol}$	pH swing	[8] ^b

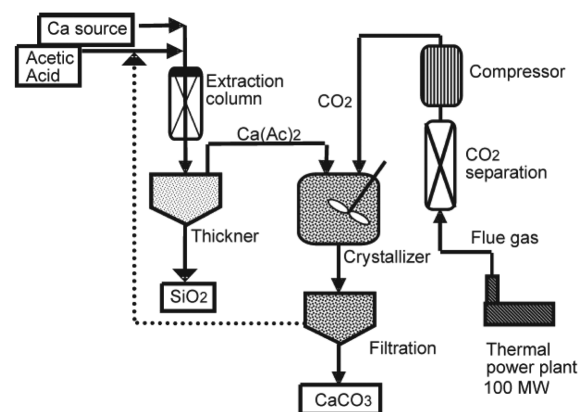
^aCarbonation reactions of mineral-phases(portlandite, erringite, Ca-silicate) are explained in Ref. [5]

^bReaction heat values are adopted from Ref.[4].

적으로 상승된 온도와 압력 조건(500 °C, 20 기압)에서 탄산화(식 6)하는 방법을 제안하기도 하였다(사문석의 단계적 탄산화 공정, Table 1).

금속 성분의 추출과 관련하여 염산을 이용하여 사문석으로부터 마그네슘 수화물을 얻어내는 공정에 대한 결과가 보고되었으며[2], 이 때 칼슘 실리케이트(중간단계로 CaCl_2 생성)의 탄산화 과정도 동일한 경로를 거친다고 알려져 있다. $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 을 이용하여, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 생성하고 이를 탄산화하는 연구도 소개되었는데[2,17], 이 방법은 수용액의 증발과 중간 생성물의 형성으로 인한 많은 에너지가 요구되며, 산의 보충(make-up) 및 부식 등이 경제성을 저해시킬 수 있다. 염산 대신 황산을 이용하거나[13], 또는 용융염(molten salt, $\text{MgCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)을 이용한 추출 방법 등도 고려될 수 있지만[15], 산을 이용한 추출 및 탄산화 기술과 유사한 이유(melt와 탄산염의 분리 공정에서 생기는 MgCl_2 손실에 대한 보충, 반응기의 부식 등)로 경제성이 낮은 것으로 평가되었다[17].

또한, Kakizawa 등[12]은 초산을 이용한 칼슘 실리케이트(규회석)의 탄산화 방법(acetic acid route)을 제안하였다(Fig. 3). 이 공정의 첫 번째 단계에서는 칼슘 실리케이트에서 칼슘을 추출하고, 이 과정에서 생성된 고체 SiO_2 는 농축기(thickener)를 이용하여 침전 제거하고 상등액에 CO_2 를 주입하면 CO_2 를 탄산 칼슘 형태로 분리할 수 있다(Table 1). 이 반응은 자발적 반응으로 결정화 단계에서의 Ca 전환율은 CO_2 압력이 대기압에서는 40%, 30기압에서는 75%까지도 도달할 수 있다고 보고되었다. 초산을 비롯한 다양한 산 용액을 이용한 Park 등[18]의 연구에 따르면, 오르토 인산(orthophosphoric acid), 옥살산(oxalic acid), EDTA(ethylenediaminetetraacetic acid)의 혼합 추출액이 Mg의 추출에 효과적이었으며, 전체 탄산화 반응 속도는 광

**Fig. 3. Schematic drawing for the CO₂ disposal process [12].**

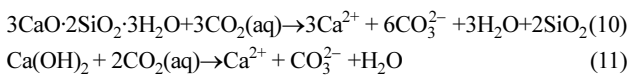
물의 용해 속도보다는 CO_2 의 용해 및 탄산(carbonic acid)의 분해에 의해 지배된다. 이러한 방법도 산의 소실과 침전을 위한 NaOH의 소비량이 많다고 알려져 있다. 또한, Park과 Fan[8]은 오르토 인산, 옥살산, EDTA 혹은 ammonium bisulphate 용액을 사용하는 사문석의 탄산화에 대한 2-단계 공정을 제안하였는데(pH-swing 방법), 1시간 후 마그네슘 용출은 최대 65% 수준으로 보고하였다.

2-3-3. 산업 부산물을 이용한 탄산화

앞서 언급한 탄산화 반응은 대부분 원료 물질로 천연 광물을 사용하고 있으나, 많은 경우 이러한 반응들은 알칼리 토금속을 함유한 산업 부산물에도 적용될 수 있다. 이 절에서는 국내 발생량과 CO_2 저감 잠재량이 가장 큰 페콘크리트/시멘트와 제강 슬래그를 이용한 탄

산화와 관련된 기술을 고찰하고자 한다. Kakizawa 등[12]이 제안한 규회석으로부터 초산을 이용하여 칼슘을 추출하고 최종적으로 탄산 칼슘을 얻는 방법을 페콘크리트에 적용한 사례도 보고되고 있다[19]. 그 결과, 규회석보다 페콘크리트를 이용하였을 경우 훨씬 빠른 추출 속도를 얻어 규회석의 탄산화보다 에너지 사용량이 1/3 가량 감소한 결과를 얻었다. 그러나, Kakizawa 등[12]의 연구에서는 폐시멘트 분말을 미분화(pulverization)하는 에너지를 고려하지 않은 결과임을 유의할 필요가 있다. 또한, 폐시멘트는 반응성이 우수하기 때문에 고압의 CO₂를 이용한 직접 탄산화 반응도 제안되기도 하였다[19-21]. 이 공정은 고압에서 폐시멘트에서 수용액상으로 용출되고, 압력이 저하되면 용해도가 감소되면서 탄산 칼슘이 침전되는 원리(pressure swing)를 이용한다.

고압: 금속 이온의 추출



저압: 탄산 칼슘의 침전



Katsuyama 등[21]은 이 공정에 의한 CaCO₃의 생산 단가를 \$136/m³(탈황 공정용)일 것으로 추정하여 천연 석회석 등으로부터 생산되는 중질 탄산 칼슘의 상용 단가(\$200~350/m³)에 비해 저비용화가 가능할 것으로 보았다. 이 공정을 이용한 100 MW 발전소 기준 CO₂ 광물 탄산화 공정의 운전 비용은 약 \$80/t-CO₂로 추산되었다[20].

제철 공정에서는 고로 조업에서 고로 슬래그, 제강 공정에서 제강 슬래그 등이 다량으로 발생하며, 제철(철강) 슬래그는 우리나라의 경우 연간 약 2천만톤 정도 발생하는 대표적인 산업 부산물 중 하나이다[22]. 국내에서 고로 슬래그는 시멘트 원료, 도로용 골재 등으로, 제강 슬래그는 성토용 골재, 도로용 골재, 공정 재사용의 용도로 거의 전량이 재활용되고 있지만, 세계 각국에서는 제철 공정의 슬래그를 보다 부가가치 있는 산업 부산물로 활용하기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 일본의 경우 JFE에서는 2002년부터 해조장 조성용으로 제강슬래그에 CO₂를 이용해 탄산화 처리한 “Marine Block[®]”을 제품화한 바 있고[23], NSC(Nippon Steel Corporation)에서는 슬래그의 탄산화 반응에 관한 연구를 통해서 슬래그를 이용한 현장 실험(full-scale test)으로 해수의 백화(seawater whitening) 현상 해결에 도움줄 수 있을 것으로 보았다[24]. 미국의 경우 2005년 카네기 멜론 대학교에서 슬래그를 이용해 대기 중의 CO₂를 고정하는 방안에 대한 기초 연구 결과를 제시한 바 있고[25], 제철 공정에서 발생한 슬래그 탄산화를 이용한 지중 저장 기술개발이 진행되기도 하였다[26]. 또한 네덜란드, 핀란드 등 EU의 여러 국가들에서도 제철 슬래그의 탄산화를 통한 CO₂ 고정화에 대한 연구들을 수행하였다[4,5].

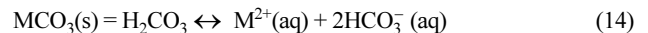
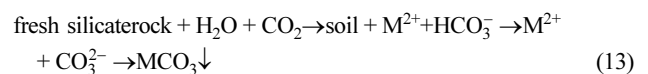
제철 슬래그를 이용한 탄산화 비용은 \$8/t-CO₂(운전비용)에서부터 [25], \$92/t-CO₂(net avoided, €1.0=\$1.2 가정, CO₂ 비용 제외)까지 예측되고 있다[27]. 한편, 개별 항목에 대한 비용 분석에서는 분쇄 비용이 \$18/t-CO₂로 가장 높을 것으로 예측되기도 하였다[27].

2-3-4. 기타 탄산화 기술

직접 혹은 간접 탄산화 기술 외에 다양한 탄산화 경로가 제안되기도 하였다. Druckenmiller와 Maroto-Valer[28]는 염수(brine)를 이용한 CO₂ 탄산화 연구에서 온도, 압력, pH가 탄산화 반응에 미치는 영향을 연구하였는데, 초기 pH가 카보네이트 형성을 지배하는 주요 인

자이며, 온도가 pH에 미치는 영향이 압력보다 큼을 발견하였다. 그러나, 염수 시료에 대한 ICP-AES(inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy) 분석 결과를 통해 정상상태 도달, 용해 기작(mechanism)과 카보네이트 형성 간의 관계를 좀 더 정확히 이해하기 위해서는 긴 반응시간이 필요하다고 주장하였다.

지금까지 천연 실리케이트 암석의 풍화 작용(weathering of rocks)은 대기 중 CO₂ 농도를 유지하는 가장 중요한 방법임에도 그다지 관심을 끌지 못했지만, 이러한 작용으로 연간 약 1억톤 이상의 탄소가 포획된다(bound by silicate-weathering, [29])는 점은 주목할 필요가 있다. 이때 일어나는 화학반응은 CO₂가 빗물에 용해되면서 약산성의 용액을 만들고 이 용액은 암석 중의 칼슘 혹은 마그네슘을 추출하게 된다. 이후 최종적으로 바다로 흘러들어가서 탄산 이온과 반응하여 고상의 칼슘이나 마그네슘 탄산염 형태로 침전된다(식 13).



CO₂의 용해 및 탄산화물의 석출과 관련된 해수내에서의 평형 반응은 다음과 같이 해석할 수 있다(식 14); 해수에 CO₂가 풍부해지면 더 많은 탄산이 생기고 따라서 용해 탄산 광물이 많아지며, 반대로 CO₂의 용존량이 감소하게 되면 고체 탄산염 침전이 일어나는 반응이 우세하게 된다.

Kojima 등[30]은 다양한 실리케이트 암석의 풍화 작용에 대해 고찰하였으며, 0.1 wt%의 규회석과 CO₂의 탄산화 반응을 수행한 결과, 약 400시간 정도가 지나야만, 칼슘 농도가 평형에 도달한다는 연구 결과를 발표하였다. 미분화시 투입되는 에너지에 의한 CO₂ 발생량은 암석 풍화 작용에 의한 CO₂ 고정화량의 2.5% 미만으로 매우 적은 것으로 평가되었으나, 새로운 고속화 경로가 개발되지 않는 한 실리케이트 암석의 풍화 기작을 이용한 탄산화 공정의 상용화는 어려울 것으로 보인다.

풍화 작용의 증진(enhanced weathering) 개념을 확장해서, Schuiling과 Krijgsman[31]은 최근 토질 개선의 한 방법으로 산성비 지역이나 산성 토양에 듀나이트(dunite, 갈람석이 대부분인 암석) 미분을 직접 살포하여 pH를 증가시켜 토양을 중화시키며 동시에 CO₂를 포집하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 방법은 듀나이트의 적용이 제한적이고, 산성비 지역이나 산성 토양이 아니면 적용이 어려우며, 근본적으로 포획될 수 있는 CO₂량이 토양의 비표면적에 의해 결정되므로 그 효과 및 적용성 여부는 아직 미지수이다.

이외의 생체 모방형 탄산화 기술도 많이 연구되었는데, 한 예로 인체 혹은 자연계에서 CO₂를 포집하는 작용(bicarbonate 형성)을 하는 무수탄산화효소(carbonic anhydrase, CA)를 이용하는 기술이 있다[32-35]. Jeong 등[36]의 최근 자료에 따르면, 미국의 Carbozyme, Inc.에서는 CA를 고정화시킨 분리막을 이용하여 기존 MEA 공정보다 100배 빠른 반응속도를 나타내면서도 1/4 수준의 에너지가 소요되는 공정을 개발하였고, 캐나다의 CO₂ Solution Inc., 미국의 New Mexico Tech(New Mexico Institute of Mining and Technology), 호주의 CSIRO(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), 캐나다의 리자이나 대학교(University of Regina) 등에서도 이와 유사한 연구를 수행하고 있다. 아직까지 국내에서는 CA를 이용한 CO₂ 전환반응 연구가 미흡한 실정이지만, 한국에너지기술연구원에서 자체연구사업을 통하여 CA의 단점을 극복한 효소 2종을 개발하여 이

에 대한 신규 원천특허를 국내 외에 출원 중에 있다. 최근 포스텍에서는 CA 효소의 발현 위치(세포질, 세포간극 및 세포표면)가 조절된 대장균을 전세포 촉매로 이용하여 CO₂를 탄산 칼슘의 형태로 효율적으로 전환하는 기술 개발을 착수하기도 하였다[32].

2-4. 탄산화물의 활용

CO₂ 광물 탄산화 공정의 최종 산물로는 분말 형태의 탄산 칼슘 혹은 탄산 마그네슘 등 탄산화물이 얻어진다. 따라서, 이 기술에 의해 제조되는 탄산화물의 활용 혹은 고부가가치 탄산화물의 제조(순도, 입도 등) 기술은 공정 전체의 경제성을 좌우하는 중요한 요소 중 하나이다. 천연 광물로부터 탄산 칼슘 분말을 얻는 일반적인 방법과 달리 산업 부산물을 원료로 광물 탄산화 기술을 이용한 탄산 칼슘 제조는 새로운 저가의 분말 탄산 칼슘 제조 기술이 될 수 있을 것이다.

이 절에서는 탄산 칼슘의 용도 및 시장에 대해 간략히 살펴보고자 한다. 대표적인 탄산화물인 석회석(limestone)을 포함한 탄산 칼슘은 도로 건설용 응집제, 시멘트 클링커, 제지 산업에서는 코팅 및 충전재(filler)에서부터 식품 첨가물까지 산업적 용도가 수 백 가지가 넘는 것으로 알려져 있다. 특히 고품위 탄산 칼슘 분말인 경질 탄산 칼슘(precipitated calcium carbonate, 침강성 탄산 칼슘, 석회석 등을 화학적으로 가공해서 생산)은 고순도로 의약품이나 식품 산업 등에 사용될 수 있고, 우유와 같은 식품에 첨가하는 고순도 탄산 칼슘의 경우에는 톤당 가격이 수십만원을 상회하기도 한다. 그리고, 불순물 함량이 다소 높거나 순도가 낮은 탄산 칼슘 분말의 경우는 제지, 플라스틱 산업 등에서 충전용으로 사용될 수 있다. 탄산 칼슘 시장은 전 세계적으로 연간 수십억톤 이상을 차지하고 있으며[37], 우리 나라의 경우 약 1억톤 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다. 특히, 전세계 분말 탄산 칼슘 생산량은 약 1억톤 내외(2007년 중질 탄산 칼슘 7,200만톤[38], 경질 탄산 칼슘 약 1,000만톤)로 추산되며, 매년 수 %씩 성장하고 있다. 국내의 경우에는 전세계 시장의 약 1%를 차지하고 있으며 이외에도 저품위 탄산 칼슘 분말도 연간 수백만톤에 이르고 있어, 국내 분말 탄산 칼슘 수요는 수백만톤을 상회한다고 볼 수 있고, 이를 경제적 가치로 따지면 수천억 원의 시장을 형성한다고 할 수 있다(탄산 칼슘 1톤당 10만원 가정). 따라서, 탄산화물의 활용에 의한 새로운 산업의 창출이 가능하다고 볼 수 있다(4-4절 참조).

3. 광물 탄산화 기술 개발 동향

3-1. 광물 탄산화 기술의 특징

광물 탄산화를 환경적인 측면에서 본다면 매우 친환경적인 고급 환경 기술임을 알 수 있다. 즉, 기체 불용물(포집된 CO₂)을 이용하여 고체 불용물(산업 폐기물이나 매장량이 풍부한 규산염 광물)을 처리하는 공정으로 CO₂ 고정화와 폐기물 처리의 일석이조 효과를 누릴 수 있는 특징을 지니고 있다. 광물 탄산화 기술은 탄산화 반응을 기반으로 하는 CO₂ 저장 기술의 하나인 지중저장 기술과 비교할 수 있으나, 지중 저장 기술과의 차이점은 다음과 같이 요약할 수 있다; 1) 광물 탄산화 과정에서 탄산화 반응을 가속화하기 위한 물질의 추가 유입 및 탄산화물 또는 부산물의 후처리 공정 필요, 2) 탄산화 반응 가속화를 위한 전처리 공정 필요. CO₂ 지중 저장 기술도 탄산화 과정이기는 하나, 상대적으로 매우 긴 시간(수백~수천년)을 요한다는 점에 유의할 필요가 있으며, 따라서 일반적으로 광물 탄산화라고 하면 반응기 등을 이용, 비교적 짧은 시간(몇 시간 이내)에 이루어지는

화학공정으로 이해할 수 있다.

기술적, 경제적인 측면에서 광물 탄산화는 다음과 같은 단점을 가지고 있는 것으로 알려져 있다; 1) 원료 물질 파쇄 등에 따른 다량의 에너지 소비(CO₂ 발생, 실리케이트를 채굴하여 탄산화하는 *ex-situ* carbonation 등에서 주로 발생), 2) 반응물 표면에 탄산염 광물이나 규산염 광물층이 형성되면서 반응물 내부로의 반응이 제한됨, 3) 수용액에서 반응시 CO₂의 용해로 인하여 CO₂ 농도는 상대적으로 증가하나 주위의 물에 의해 반응에 참여하는 CO₂의 양이 제한됨.

이러한 여러 가지 단점에도 불구하고, 연구자들이 광물 탄산화 기술을 CO₂의 저장 기술로써 주목하고 있는 이유는 다음과 같다. 첫째, 천연 규산염 광물(마그네슘이 포함된 감람암(peridotite)과 사문암(serpentinite) 등에 포함된 마그네슘의 양)은 전세계적으로 매우 풍부하여 광물화에 필요한 천연 광물 자체의 양이 전세계 석탄자원(10,000 Gt 추정)을 훨씬 상회하는 것으로 기대된다[2]. 둘째, 탄산염은 CO₂보다도 화학적으로 안정한 물질로, 안정적인 고체상으로 CO₂를 영구적으로 저장할 수 있으며 동시에 유용한 물질로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 셋째, 광물 탄산화 반응은 발열 반응으로 이때의 반응열을 이용할 경우 추가적인 에너지 소모를 최소화할 수 있다. 넷째, 지중 저장 방법은 CO₂의 지중 내 거동, 환경영향, 누출에 따른 위험성 등에 대해서 명확하게 이해되지 못한 면이 많으나, 반응기 내부에서 일어나는 광물 탄산화는 잘 알려진 공정 반응이며, 제어가 가능한 시스템이므로 기술의 실현에 있어 위험성이 상대적으로 적다.

3-2. 세계적 연구개발 동향

1990년 Seifritz[29]가 광물을 이용한 CO₂ 처리 개념을 최초로 언급한 후, 미국, 핀란드, 일본 등을 중심으로 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 미국의 경우 LANL(Los Alamos National Laboratory), 오레곤 주에 소재한 NETL(National Energy Technology Laboratory)-Albany(과거 Albany Research Center), 콜럼비아 대학교(Columbia University) 등에서 활발하게 연구를 진행하고 있다. 핀란드의 광물 탄산화 연구는 아보 아카데미 대학교(Åbo Akademi University)와 헬싱키 공과 대학교(Helsinki University of Technology) 등에서 반응에 필요한 에너지를 탄산화 반응열로부터 공급하는 기술을 개발하고 있다. 일본의 경우는 페콘크리트와 같은 산업 폐기물을 이용한 광물 탄산화 연구가 도쿄대학교를 중심으로 이루어지고 있다.

CO₂ 광물 탄산화와 관련한 최신 연구개발 동향은 지난 2006년 신설된 학회인 ACEME(Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering)의 발표 내용을 중심으로 파악할 수 있다. ACEME는 광물 탄산화를 주된 논의 대상으로 삼는 거의 유일한 국제 학회로 2008년 10월 이탈리아 로마에서 개최되었고(2회, ACEME2008), 2010년말 핀란드에서 개최되었다. 지난 ACEME2008에서는 20여개국 이상의 과학자들이 50여편 이상의 논문을 발표하였으며, 감람석, 사문석 등의 천연 광물뿐 아니라, 연소재, 제철 슬래그 등 다양한 산업 부산물을 대상으로 한 최신 탄산화 기술, 그리고 파일럿 규모의 연구에 대한 결과도 소개되었다(Proceedings of 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering, Rome, Italy(2008)).

3-2-1. 미국

미국의 경우 CO₂ 대규모 저장은 석유 증진 회수(Enhanced Oil Recovery, EOR)를 바탕으로 한 지중 저장이 CCS의 주력 분야라 할 수 있다. 그러나, 지난 1990년대 말부터 Mineral Carbonation Study

Program으로 ARC, LANL, ASU(Arizona State University), SAIC (Science Applications International Corporation), NETL 등에서 광물 탄산화 연구를 시작하였다. 지리적 여건상 사문석, 감람석 등의 천연 광물을 대상으로 한 광물 탄산화 연구를 주로 진행하고 있고[2,8,14, 39-41] 탄산을 이용한 직접 광물 탄산화, 수용액을 이용한 탄산화, 초임계 CO₂를 이용한 광물 탄산화 등을 연구하였다. 그러나 Mg의 반응성 증대 등과 같은 기술적 어려움으로 인해서 경제성 있는 공정 개발에 어려움(heat treatment 등)을 겪고 있다. 또한 천연 광물 이외에도 소규모이지만, 산업 부산물을 이용한 CO₂ 광물 탄산화 연구도 진행하고 있는 것으로 파악된다[25,42,43]. 대표적으로 미국 철강 협회(American Iron & Steel Institute, AISI)에서는 CO₂ 저감을 위한 프로그램(CO₂ Breakthrough Program)을 진행 중에 있으며, Phase I (2005년~2008년)에서는 “Concept Discovery and Assessment” 단계로 총 4개 과제 중 2개가 CO₂ 광물 탄산화와 관련된 것이었다[26,44]. 그러나, 현재 연구 진행 현황은 정부의 기술개발 로드맵에 광물 탄산화 기술은 없고 연구비가 지원되지 않아 중단된 상태이나, 아직까지 관심있는 분야로 근시일내 재평가를 통한 연구 재개도 가능할 수 있을 것으로 보인다.

3-2-2. 유럽

유럽에서는 핀란드, 네덜란드 등을 중심으로 2000년대 들어서서 본격적으로 광물 탄산화 관련 연구를 진행 중에 있으며[4,5,39], 천연 광물이나 제철슬래그 등을 이용한 광물 탄산화 기술을 개발하고 있는 핀란드의 경우 정부의 연구비로 일부 연구를 진행 중에 있다. 핀란드에서의 CO₂ 광물 탄산화 기술은 헬싱키 공과 대학교, 아보 아카데미 대학교, VTT(Technical Research Centre of Finland) 등에서 주로 수행되고 있으며, 원료 물질로는 제철 슬래그 및 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 광에서 채광되는 부산 사문암을 대상으로 하고 있다. 핀란드에서는 사문암의 탄산화를 통해 2~3Gt의 CO₂를 처리할 수 있을 것으로 파악된다[4]. 슬래그 탄산화의 경우 합성 탄산 칼슘 생산의 경우에는 경쟁력을 갖추고 있다고 판단되며, 연간 100만톤 이상 발생하는 제철 슬래그의 처리에도 유리하다고 생각된다. 초기의 연구는 초산으로 Ca를 용출시킨 후 탄산화하는 방향으로 연구가 진행되었지만, 경제성 문제로 최근 황산, 질산 등의 여러 종류의 산과 암모늄 염(황산 암모늄(ammonium carbonate, (NH₄)₂SO₄), 질산 암모늄(ammonium nitrate, NH₄NO₃) 등)을 이용한 금속 용출 연구를 진행하고 있으며, 이를 통해 CaCO₃ 순도 99.8%, 전환율 50~70% 정도의 결과를 얻은 바 있다[45].

네덜란드는 2000년 경 자국의 석탄층 메탄증진(ECBM, Enhanced Coal-Bed Methane) 방법에 관한 연구를 수행하였다. 이때 대상지역은 Peel, Zuid Limburg, Achterhoek, Zeeland 등이었으며 이들 지역에 대한 잠재적 CO₂ 저장용량과 기술적, 경제적 실현 가능성을 위한 구체적인 연구가 수행되었다[46]. 또한, 2004년 K12B 프로젝트를 통해 EOR을 목적으로 일일 100톤 규모로 CO₂를 주입하기 시작하였다(2006년 이후 일일 1,000톤의 CO₂ 주입 계획, 총 주입량: 800만톤, [1]). 이와 함께 2000년대 ECN(Energy Research Centre of the Netherlands)에서는 산업 폐기물을 이용한 광물 탄산화 연구를 수행하였고[5], 지금은 제철슬래그의 환경 물성 개선(contaminant leaching 등) 쪽으로 연구가 진행되고 있다. 현재, CO₂ 광물 탄산화와 관련하여 네덜란드 정부나 EU(7th framework program)에서 계획하고 있는 뚜렷한 정책은 없는 것으로 파악되고 있으며, ECN에서는 CORUS steel(IJmuiden 소재)과 연구를 진행한 바 있으나, 아직까지 스케일-업은 실시하지

않은 상태이다[47].

3-2-3. 일본

일본에서의 CO₂ 고정화 및 이를 이용하고자 하는 분야의 기술 맵에서는 CCS를 중요한 기술의 하나로 간주하고 있으며, 대규모 배출원에서의 CO₂ 배출은 분리/회수, 지중저장, 해양격리의 3개 분야가 주요 기술로 언급되고 있다[48]. 이들 기술의 도입 시나리오를 살펴보면, 2020년까지 CO₂ 분리/회수 분야에서는 저비용기술의 개발을, CO₂ 저장 분야에서는 지중저장의 기술실증 및 2020년 이후 본격 도입을 목표로 하고 있다. CO₂ 광물 탄산화 기술의 경우 CO₂ 변환 및 유효이용 분야로 화학적 변환 기술로 분류하고 있다. 특히, 광물 탄산화 기술은 CO₂ 저감기술로서의 유효성이 높기 때문에 발열반응으로 인한 에너지 투입이 필요치 않고 알칼리 토금속을 이용한 CO₂ 고정화와 풍화 프로세스의 인위적 촉진을 통한 규산염 등의 탄산염화가 언급되고 있다.

2000년대 중반 RITE(Research Institute of Innovative Technology for the Earth)에서는 염화 암모늄(ammonium chloride, NH₄Cl) 등을 이용하여 페콘크리트나 제철 슬래그의 광물 탄산화 연구를 진행한 바 있으며[49], 도쿄대학교에서는 페콘크리트 등 산업계에서 활용할 수 있는 광물 탄산화 기술을 개발하기 위한 노력을 기울이고 있다[10,12,20,50]. 점차 증가할 것으로 예상되는 페콘크리트 발생량(2010년 약 4000만톤 이상, [50])을 효과적으로 처리하기 위해 페콘크리트를 이용한 탄산화 기술로 ‘pressure-swing’의 개념을 이용한 새로운 재활용 기술이 제안되었다[50]. 또한, 최근에 콘크리트 슬러지(concrete sludge)를 대상으로 탄산화 기술의 파일럿 연구(Nippon Concrete Industries Co. Ltd.의 카와시마 제2공장)도 진행되고 있다[51].

3-2-4. 호주

호주에서는 CSIRO, CCSD(The Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development), cLET(Centre for Low Emission Technology), CO₂CRC(Cooperative Research Centre for Greenhouse Gas Technologies), GCCSI(Global CCS Institute) 등을 중심으로 CCS 기술을 개발하고 있으며, 현재 파일럿, 실증, 상업화 계획의 초기 단계에 있다. 또한 석탄 및 천연가스 관련 CCS 기술에 대한 10개 이상의 대규모 프로젝트를 수행하고 있으며, 광물 탄산화보다는 CO₂의 지중 저장 분야에 많은 관심을 기울이고 있다. 특히, 토양 저장과 관련하여 Fairview 프로젝트를 통해 CO₂를 석탄층에 주입하여 CSM(coal seam methane gas)을 추출, 발전에 사용하였다[52]. 호주의 경우 지질학적인 여건을 고려할 때, 여러 CCS 기술 중 광물 탄산화보다는 지중 저장에 많은 역량을 집중하고 있는 것으로 파악된다. GCCSI에서 최근 발간된 보고서에서도 CO₂ 저장에 대한 6개의 CCS 프로젝트를 제시하고 있지만, 저장 기술로서 광물 탄산화는 선택되지 않았다[53].

3-3. 국내의 연구개발 현황 및 수준

세계적으로 공통된 인식이지만, 상대적으로 많은 저장 용량과 실증 설비의 존재 등으로 인하여 정부관계자 및 연구자들 대부분이 ‘CCS 기술’을 논할 때에는 거의 지중 저장을 염두에 두고 있다. 국내 CCS 관련 연구개발은 2000년을 전후로 시작되었다고 볼 수 있으나, CCS에서도 ‘포집’ 분야에 연구개발이 집중되어 있어 ‘저장’과 관련된 연구는 상대적으로 중요하게 취급되어지지 않은 것이 현실이다. 그 중에서도 특히, 광물 탄산화 기술을 이용한 CO₂ 저장과 관련된 연구는 미국과 일본 등 선진국에 비해 국내 연구개발 수준은

매우 미약한 실정이다.

지금까지 국내 광물 탄산화 연구는 지극히 제한적으로 실험실적 연구가 이루어져왔으며, 한국지질자원연구원 등에서 2000년대 중후반 들어서 광물 탄산화 관련 연구가 본격화되었으나, 최근까지도 예비연구, 혹은 기관 자체연구 수준으로 진행되고 있는 실정이다. 광물 탄산화와 관련된 국내 연구는 Byeon 등[11]에서 수행된 제강 슬래그 등을 이용한 탄산화 반응에 대한 연구를 그 효시로 볼 수 있지만, 이 연구는 광물 탄산화에 초점을 맞춘 연구라기보다는 토목용 골재로 활용하는 제강슬래그의 Ca 성분 용출에 의한 pH 상승(고알칼리성 용출수의 생성), 그리고 이로 인한 백탁수 생성의 문제를 CO₂와의 반응을 통해 사전 처리하여 환경 안정성을 확보하는 것을 주된 목적으로 하였다. 한국지질자원연구원의 기획보고서에 따르면[54], 천연 광물을 이용한 광물 탄산화 기술의 국내 기술수준은 선진국 대비 약 30% 수준이며, 산업 부산물을 이용한 광물 탄산화 연구는 거의 평가를 내릴 수 없을 만큼 연구개발 이력이 적은 것으로 보였다. 한편 지난 2009년 포항산업과학연구원에서는 환경부의 의뢰로 CO₂ 광물 탄산화 기술의 국내 기술개발 타당성에 대한 연구용역을 수행한 바 있으며[22], 최근에는 제강 슬래그를 이용한 바다 목장 사업을 통해서 산업 부산물의 재활용뿐 아니라, 이를 이용한 생태계 복원 및 CO₂ 고정화 등을 도모하는 등[55] 산업 부산물을 이용한 CO₂ 저감 연구를 지속적으로 수행하고 있다.

3-4. 요약 및 시사점

이 절에서는 광물 탄산화 기술의 실현을 위한 기술 타당성, 경제성, 환경 및 정책 등에 관한 전반적인 내용을 정리하고자 한다. 먼저, 광물 탄산화 기술의 기술 진입 장벽 및 개발 가능성에 대해 살펴보면, 광물 탄산화 기술은 아직까지 경제성을 충분히 확보한 기술은 아니나, 중소 규모의 CO₂ 광물 탄산화 관련 처리 기술로 연구 개발의 가치가 있다고 판단된다. 특히 광물 탄산화 반응 자체는 이미 잘 알려진 기술로 기술적 타당성은 갖추고 있으나, 경제성있는 핵심 기술의 확보를 위해 많은 연구 개발이 필요한 실정이다. 광물 탄산화 기술은 기술 개발 단계로 보았을 때 아직까지 초기 단계로 전 세계적으로 특별한 기술적 우위자가 없기 때문에 선진국과의 기술 격차도 적어 기술 개발의 타당성은 충분하다고 볼 수 있다.

두 번째로 광물 탄산화 기술의 경제성(산업화 가능성) 측면에서 이 기술은 CO₂ 지중 저장 기술에 비해 훨씬 적은 연구개발 및 산업화 인프라가 필요하므로 여타 CCS 기술에 비해 비교적 단기간에 산업화가 가능할 것으로 예상된다. 이 기술의 산업화를 위해서는 원료 물질인 산업 부산물의 경제적 처리가 중요하며, 특히 산업 부산물은 여러 화합물이 혼재되어 있어 탄산화 제품으로 활용되기 위해서는 순도 향상 연구가 중요하다. 따라서, 탄산화가 용이한 부산물의 처리 기술을 먼저 개발한 후, 순차적으로 연구 개발을 추진하여야 할 것으로 생각된다. 또한, 경제성 증대를 위해서 고부가가치의 탄산화 제품

용도를 개발해야 하며, 다양한 탄산화 제품의 용도에 맞는 산업화 전략의 구성 및 추진이 필요할 것으로 생각된다.

세 번째로 광물 탄산화 기술의 환경 영향 평가 측면에서 CO₂-탄산화 광물의 활용(보강, 복원, 비료 등), 처분(매립)에 의한 지하수-토양 오염 평가 및 환경오염 방지를 위한 현장 실증 연구 등이 산업화에 앞서 수행되어야 할 것이다. 이를 위해서는 반응 특성 규명, 수치 모델링, 모니터링, 환경 영향 평가 등을 포함한 종합적 기술 개발 추진 전략이 필요하다.

마지막으로 산업화를 위해서 반드시 필요한 법규 및 규제에 관한 부분으로 산업 부산물/폐기물이 광물 탄산화의 원천 재료임을 인식하여 친환경적인 기술개발이 될 수 있도록 관련 법규와 규제 등에 반영할 필요가 있다. 또한 폐광산 복원 등에 탄산화 광물 활용을 위해 주민 협조 및 정부 부처의 적극적 관심이 요구된다.

4. 광물 탄산화 공정 기술개발의 필요성

4-1. 국내 자원 분석

앞서 살펴본 바와 같이 광물 탄산화의 원료 물질로 사용할 수 있는 물질은 알칼리 토금속이 함유된 천연 광물과 산업 부산물(폐기물)로 크게 나눌 수 있다. 천연 규산염 암석의 경우 국내 매장량 및 CO₂ 고정화율을 토대로 CO₂ 총 고정가능량을 산출하면 Table 2와 같다[54]. 국내 천연 광물에 의한 총 고정가능 CO₂량은 약 1,300만톤 이상으로 추산할 수 있으며, 이는 국내 연간 총 CO₂ 배출량의 약 2.5%(연간 6억톤 기준)에 해당하는 양이다. 천연 규산염 암석 중 가장 효율적으로 사용될 수 있는 암석은 감람석(알칼리 함유량 약 57%)이지만, 국내에는 특별한 광산이 없어 탄산화 원료로 적절하지 않다. 국내 매장량이 가장 많은 사문석이 탄산화의 원료로 사용될 가능성이 높을 것으로 판단되나, 이 또한 천연 광물 매장량 및 잠재 CO₂ 고정화량, 천연 광물을 활용한 광물 탄산화의 경우 일회성 저장이라는 것을 고려한다면, 우리 나라의 경우 천연 광물을 이용한 CO₂ 고정화는 그다지 큰 실익이 없다고 판단할 수 있다. 따라서, 알칼리 토금속을 함유하고 있는 산업 부산물을 광물 탄산화에 사용한다면 보다 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

광물 탄산화에 이용 가능한 국내 알칼리 토금속을 함유한 주요 산업 부산물의 연간 발생량 및 탄산화에 유효한 알칼리 금속 함유 특성 및 CO₂ 고정화 가능량 산출 내용을 Table 3에 정리하였다. 광물 탄산화가 가능한 국내의 천연 광물은 약 1,300만톤인 반면(Table 2), 국내 산업 부산물은 매년 5,000만톤 이상 발생하고, 이를 활용한 CO₂ 고정 가능량은 약 1,200만톤을 상회한다(폐석고 등 기타 산업 부산물, 일관제철소 추가 가동 등에 의한 제철 슬래그 발생 등을 고려하면 향후 약 1,500만톤 이상으로 추산). 또한, 산업 부산물을 광물 탄산화에 사용할 경우 천연 광물의 경우와 달리 채광, 분쇄, 선별, 높은 결정화도에 따른 에너지 소요가 상대적으로 낮으며, 매년 지속적으로

Table 2. Production capacity and CO₂ fixation potential utilizing domestic natural minerals [54]

Nature minerals	Alkali content [%]	Estimated Reserve [Mt]	CO ₂ fixation potential	
			Rate [%]	Amount [Mt]
Wollastonite, CaSiO ₃	43.3	5.4	34.0	1.8
Serpentine, Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	43.7	18.0	48.1	8.66
Talc, Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	31.9	7.7	35.1	2.70
Olivine, Mg ₂ SiO ₄	57.3	-	63.0	-
Total		31.1		13.2

Table 3. Production capacity and CO₂ fixation potential utilizing domestic industrial by-products [22, 54]

Industrial by-products		Production [Mt/yr]	Content of alkali metal [%]		Metal oxide amount ^(a) [Mt/yr]			Potential amount of carbonates [Mt/yr]		
			CaO	MgO	CaO	MgO	Sum	CaCO ₃	MgCO ₃	Residue
Slag	BF slag	10.2	40.0	8.6	3.2	0.97	4.2	7.3	1.8	5.3
	Converter slag	9.0	41.5	6.5	2.9	0.64	3.6	6.7	1.2	4.7
	Fe-Ni slag	1.0	0.3	31.3	0.002	0.34	0.35	0.005	0.66	0.68
	Waste concrete	30.0	15.0	1.4	3.5	0.46	4.0	8.0	0.88	25.0
Ash	Coal ash	5.8	7.5	1.7	0.34	0.11	0.45	0.78	0.21	5.3
	MSWI ^(b) ash	0.4	5.4	2.6	0.017	0.011	0.028	0.039	0.022	0.37
	Asbestos(chrysotile)	0.09	0	43.3	0	0.042	0.042	0	0.08	0.05
	Total	56.5			10.0	2.6	12.6	22.8	4.9	41.4

^{a)}Potential amount of metal oxide which can react with CO₂ and consequently produce carbonates.

^{b)}MSWI - municipal solid waste incinerator

로 발생하기 때문에 안정적으로 제공될 수 있고, 친환경적으로 산업 폐기물/부산물을 처리할 수 있다는 관점에서도 상당한 장점을 가진다.

4-2. 기술의 실현 가능성 및 기술 개발 필요 분야

광물탄산화 개념이 소개된 이후로 광물 탄산화의 기술 수준은 아직 연구 단계로 볼 수 있지만 탄산화 반응 자체로는 금속 산화물과 이산화탄소의 반응으로 이미 잘 알려진 반응이다. 또한 광물 탄산화의 원료를 얻기 위한 과정 또한 고난이도 기술로 보기는 어려우며 (전처리 공정 포함), 탄산염을 획득하는 과정도 잘 알려진 화학 반응 공정에 기반하고 있다. 그럼에도 불구하고 아직까지 실험실 수준의 연구가 주를 이루고 있는 이유는 기술의 경제성 때문이라고 볼 수 있다. 이에 따라 국내외 연구자들은 저가의 산업 부산물 활용[4,5,50,56, 57], 원료 물질의 전처리 기술 개발, 효율적인 금속 용출제 선정 및 개발, 탄산화 속도 증대, 반응열의 친환경적인 재활용[9] 등의 경제성 향상을 위한 다양한 접근을 시도하고 있다.

원료 물질 전처리에서는 탄산화 반응의 가속화를 위한 경제적인 전처리 기술 개발이 필요하다. 이를 위해서는 광물 탄산화에 필요한

국내 원료 광물 및 산업 부산물 현황 파악(광산/발생지, 발생량, CaO 함량 등)과 원료 물질의 CaO 함량, 입도 등에 대한 기준을 확립하고, 분리 및 정제 기술의 개발이 선행되어야 한다. 또한, 후위 공정인 탄산화 반응을 촉진시키기 위한 경제적인 분쇄 기술, 추출 효율이 높고 탄산화가 가능한 금속의 선택적인 추출을 위한 금속 용출제의 개발 혹은 새로운 금속 추출 방법도 매우 중요한 기술 분야이다. 그리고, 원료 물질과 반응할 CO₂ 가스의 적절한 순도(정제 공정) 유지 및 특정 불순물을 제거하는 전처리 공정 기술 개발도 필요하다. 이때 공정의 경제성 증대를 위해 무수탄산화효소를 이용한 탄산화 공정 연구와 같이 배가스에서 CO₂의 포집 공정을 생략할 수 있다면 보다 효율적일 것이다. 고속 탄산화를 위해서는 최근 제안되고 있는 pressure-swing [15]처럼 새로운 개념의 탄산화 공정 개발도 필요하다. CO₂ 광물 탄산화 기술 개발과 관련된 이슈 및 고려 사항을 Table 4에 정리하였다.

4-3. 광물 탄산화와 CO₂ 지중 저장의 기술 및 비용 비교

전술한 바와 같이 CO₂ 광물 탄산화 기술은 고비용의 처리 기술로 지중 저장 기술에 비해 경제성이 떨어지는 것으로 알려져 있다. CO₂

Table 4. Selected R&D and process development issues associated with the CO₂ mineral carbonation technology [58, 59]

Technology Category	Issue Details
Pre-processing	<ul style="list-style-type: none"> · Mining, milling, and related environmental issues · Selection and transportation of raw materials · Pretreatment of raw materials(ore/industrial by-products): impurities removal(separation), activation or treatment(thermal, chemical, mechanical, etc.)
Carbonation Reaction	<ul style="list-style-type: none"> · Fundamental understanding on carbonation; reaction mechanism and thermodynamics, reaction condition(temperature, pressure, etc.) and solution chemistry · Selection/Development of accelerated carbonation route cf) Carbonation reaction in nature is a slow process. · Maximizing heat recovery cf) Carbonation reaction is exothermic. · Reaction condition(temperature, pressure, etc.) & solution chemistry · Selection/Development of extraction(leaching) agent/method for carbonation · Construction & operation of reactors for continuous carbonation
Post-processing	<ul style="list-style-type: none"> · Product specification/characterization: purity, yield, color, etc. · Application/Usage of carbonate products · Recovery and usage of by-products · Separation/Purification process · Disposal of process effluents
Engineering Design, Assessment and Integration ^{a)}	<ul style="list-style-type: none"> · Carbonation reactor design, heat exchanger concepts and BOP (Balance of Plant) requirements Process optimization & heat integration · Cost estimates, sensitivity studies and LCA (Life Cycle Analysis) · Design and cost estimation of pilot plant, demonstration plant and commercial facilities for CO₂ sequestration via mineral carbonation · Construction & operation of integrated carbonation unit

^{a)}Engineering issues for commercialization are quite common for almost all the process/technology development.

Table 5. Comparison of CO₂ storage technology between geological storage and mineral carbonation

Category	CO ₂ Geologic Storage	CO ₂ Mineral Carbonation
CO ₂ Specification	<ul style="list-style-type: none"> Guideline: purity > 95% [1] Impurity control: H₂O removal for inhibition of hydrates Removal of impurities such as H₂S, SO_x, NO_x, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> High purity preferred, but no specific purity requirement. Possible to use flue gas without CO₂ capture.
CO ₂ Transport	<ul style="list-style-type: none"> Major factor for cost evaluation is the distance between CO₂ emitting source and the storage site. 	<ul style="list-style-type: none"> Cost reduction is plausible, since carbonation can be conducted near the CO₂-emitting sources; relatively low transportation cost
CO ₂ Storage	<ul style="list-style-type: none"> Large initial investment cost: storage site exploration, drilling of injection well, etc. Geology- or country-specific option; limits the technology application 	<ul style="list-style-type: none"> Small initial investment cost Pre-treatment of raw materials: grinding/separation, etc. Various raw materials including industrial by-products and waste materials
Technology/ Reaction	<ul style="list-style-type: none"> Long-term & slow carbonation reaction under the ground due to the high temperature/pressure conditions Large initial investment for high pressure injection High pressure (~100bar) operation due to the storage depth (> 1,000 m) 	<ul style="list-style-type: none"> Acceleration of the carbonation at high temperature/pressure → additional energy required Initial investment for high temperature/pressure carbonation reactions
Capacity of CO ₂ Storage	Large scale	Medium or small scale
Monitoring, Measuring & Verification (MMV)	<ul style="list-style-type: none"> Long-term investigation on the CO₂ leakage (Monitoring cost: 0.1~0.3\$/t-CO₂ [1]) Safety verification needed 	<ul style="list-style-type: none"> No need for CO₂ leakage surveillance Environmentally benign: CO₂ is safely stored as thermodynamically stable carbonates
Carbonates & by-products	Impossible to reuse	Possible to reuse as valuable products
Legal/Public Issues	Need public acceptance	Need new regulations for waste disposal

광물 탄산화 기술은 지중 저장 기술에 의하면 수천년간 이루어지는 탄산화 반응을 단시간에 가속화하기 위해 많은 에너지를 추가로 소요하며, 규모 및 설비면에서 고온/고압의 설비가 필요하기 때문에 중소규모의 CO₂ 저장에 적합할 것으로 판단된다. 반면, CO₂ 지중 저장은 CO₂ 사양 및 이송, 저장지에 대한 탐사, 모니터링 등과 같은 대규모의 초기 투자가 필요하다. CO₂ 지중 저장 및 광물 탄산화 기술의 장단점을 Table 5에 요약하였다.

국내에서는 현재까지 CO₂의 지중 저장을 위한 저장 후보지에 대한 본격적인 지질학적 기초 탐사 및 검증이 이루어지지 않은 단계이므로, Fig. 4와 같이 포집된 CO₂의 해외 이송 후 처리에 대한 방안도 검토될 수 있다. 예를 들어, 지금 한창 국가의 차세대 사업 모델로 CCS를 추진하고 있는 호주를 저장 후보지로 정할 경우 배관에 의한 이송은 불가능할 것으로 판단되며, 따라서 선박에 의한 CO₂ 이송이 가능할 것으로 예측된다(일반적으로 1,000 km를 기준으로 배관과 선박 이송 결정: 우리나라와 호주의 거리는 5,000 km 이상으로 선박 이송이 배관 이송에 비해 상대적으로 저비용임). 이때 이송 거리에 따른 이송 비용은 우리나라와 호주의 거리를 대략 5,000 ~ 8,000 km로 추산할 경우 선박에 의한 CO₂ 이송 비용은 대략 CO₂ 톤당 30~60불 수준이 될 것으로 판단된다 (Fig. 5)[1,60]. 이러한 여건들을 고려하여 국내에서의 CO₂ 포집 및 해외 지중 저장과 광물 탄산화에 따른 개략적인 비용 분석 결과를 정리하면 Table 6과 같다. CO₂ 저장

에 따른 비용은 광물 탄산화 기술이 높게 산정되지만, 나머지 비교 항목들에 대해서는 지중 저장에 비해 장점을 가지고 있음을 알 수 있다. 특히, 지중 저장의 경우 CO₂를 폐기물로 취급하나, 광물 탄산화의 경우 공정의 원료 물질로 취급하므로 탄산화에 의한 추가 이익 발생이 비용 저감에 중요하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 고부가가치 탄산화물 활용에 따른 이익 발생 및 산업 폐기물 처리 등에 따른 비용 저감을 추가로 고려한다면, 광물 탄산화는 지중 저장에 비해 광물 탄산화 기술이 경제성 있는 CO₂ 저감 기술로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 탄산화 비용의 개별 항목 분석에서는 미분화 에너지(조산을 이용한 규회석의 탄산화 공정[19]), 반응 에너지(페시멘트의 탄산화 공정[20]) 등이 가장 높을 것으로 예측되었다. 이와 같이 CO₂ 광물 탄산화 비용 자체의 계산은 원료 물질, 시스템 규모, 항목 분석 기준, 경제성 분석 방법 등에 따라 연구자마다 매우 편차가 큰 것으로 보고되고 있어, 탄산화 공정의 상용화를 위해서는 표준화된 경제성 평가 방안의 수립과 함께 시설비 규모(테코 플랜트)의 투자, 운전 비용 자료 확보가 선행되어야 한다.

4-4. 광물 탄산화 기술의 경제성 증대 방안

공정의 경제성을 언급할 때, 전처리 및 탄산화 등 기술적인 부분의 혁신 이외에 ‘원료물질의 선정’과 ‘탄산화물의 활용’을 반드시 고려하여야 한다. 기존의 부가가치가 낮은 활용처에 사용되거나, 폐기물로 취급되어 처리 비용이 수반되는 산업 부산물을 원료로 사용할 경우, 전체 공정의 경제성이 증대될 것이며, 공정의 최종 산물인 탄산화물의 고부가가치화 혹은 신시장 창출을 통해서도 경제성 증대를 기대할 수 있다. 원료 물질의 관점에서는 산업 부산물을 효과적으로 확보할 수 있는 방안(혹은 전략), 이 외에도 탄산화 공장을 광산이나 공장(산업 부산물 발생 지역) 근처(혹은 내)에 설치하여 고체 수송에 따른 비용을 절감할 수 있다.

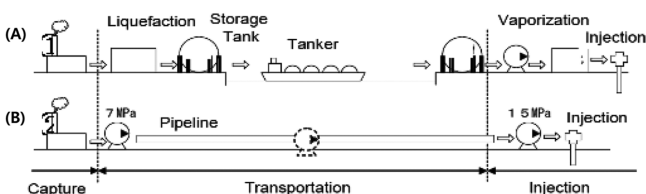


Fig. 4. Transportation method of captured CO₂ [60]; (A) by ship, (B) by pipeline.

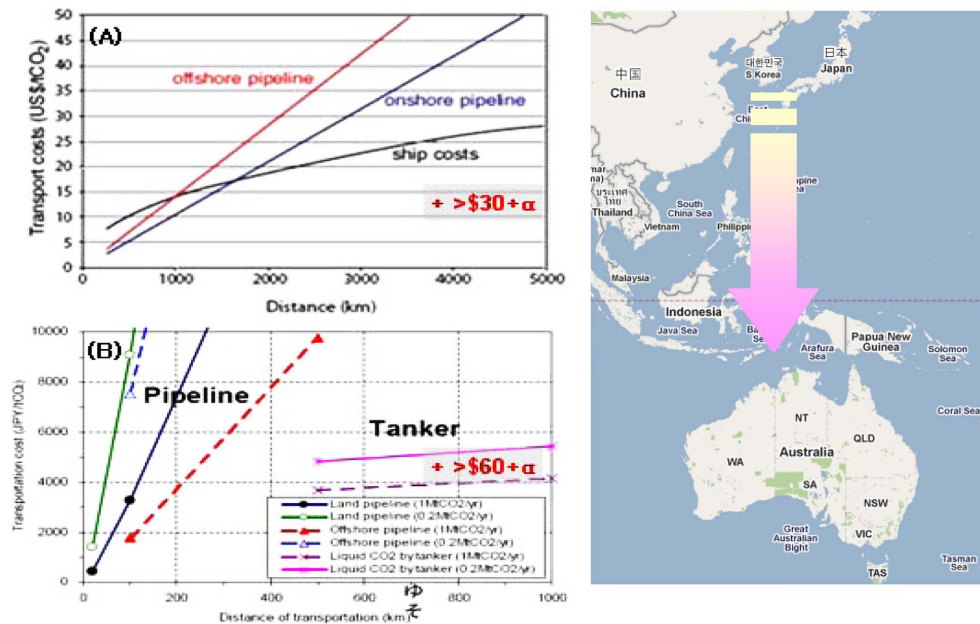


Fig. 5. CO₂ transportation cost estimation by the method and distance; (A)IPCC Report [1], (B)RITE Presentation [60], figure captured from <http://maps.google.com/>.

Table 6. Cost estimation of CO₂ storage options; CO₂ geological storage(domestic capture and export) and mineral carbonation

Cost/Benefits	Geological storage [\$/t-CO ₂]	Mineral carbonation [\$/t-CO ₂]
CO ₂ capture	30~50	30~50 ^{a)}
CO ₂ transport (transportation distance)	30~60 (5,000~8,000 km)	<5 (~ <100 km)
CO ₂ storage (reaction)	0.5~8 ^{b)}	50~100 ^{c)}
Monitoring, Measuring & Verification	0.1~0.3	×
Utilization of carbonates	×	- α ^{d)}
Recycling of by-products	×	- β ^{e)}
Total	60~120	55~155 (- α - β)

^{a)}Capture cost can be estimated to be zero if the flue gas is directly used for mineral carbonation.

^{b)}Cost of geological CO₂ storage largely depends on the characteristics of storage site such as injection speed, number of injection wells, CO₂ permeability, etc. [1].

^{c)}Mining cost included. Cost of CO₂ storage via mineral carbonation largely depends on the pretreatment and carbonation reaction conditions [1].

^{d)} α : price of high value-added CaCO₃; (100k-300k) KRW/t-CaCO₃→(44k-132k) KRW/t-CO₂→(36-110) USD/t-CO₂ (Assumption: 1 USD is equivalent to the converted amount of 1,200 KRW).

^{e)} β : treatment cost of industrial wastes, for example, 300-600k KRW/ton for waste asbestos.

광물 탄산화 기술은 탄산화물의 경제적 가치가 탄산화 처리 비용보다 크다면 보다 유용한 기술이 될 수 있을 것이다. 앞의 2·4절에서 언급한 바와 같이 고부가가치의 탄산화물 제조의 한 예로 분말 탄산 칼슘 제조 기술을 들 수 있다. 분말 탄산 칼슘 수요를 광물 탄산화를 통해 얻을 수 있는 탄산화물로 충당하는 방안은 광물 탄산화 공정의 경제성 증대 방안중 하나로 고려할 수 있다. 국내 발생 산업 부산물에 의한 총 CO₂ 고정화 가능량은 약 1,200만톤 정도이며, 이 중 대부분이 탄산 칼슘의 형태로 고정화된다(Table 3). 이를 기준으로 CO₂ 고정화 가능량을 계산하면, 탄산 칼슘의 최대 생산 가능량은 약 2,200만톤/년을 상회한다. 물론 광물 탄산화 공정을 거쳐서 생산되는 탄산 칼슘이 고품위로만 생산되기는 어렵고, 잠재 가능량보다 훨씬 낮은 수준에서 탄산화가 가능할 것이다. 이를 고려하여 최대 생산 가능량의 약 25% 정도를 생산한다고 가정할 때 약 500만톤의 탄산 칼슘 생산이 가능할 것이며, 이는 저품위 및 고품위를 포함한 국내 분말 탄산 칼슘 시장 규모에 상응하는 산업의 창출이 가능하는 결론을 얻을 수 있다. 특히, 분말 탄산 칼슘은 고부가가치 화합물로 지속적으로 그 수요가 증가하고 있어 산업 부산물을 이용하여 고순도의 합

성 탄산 칼슘을 생산하는 기술 개발이 성공적으로 이루어진다면, 연간 1천만톤 내외로 추산되는 전세계 경질 탄산 칼슘 시장을 선도할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 위해서는 보다 효과적인 기술 개발과 더불어 사업화 단계에서는 면밀한 시장 현황 분석을 통하여 순도 및 용도별로 포괄적인 산업화 전략을 구비해야 할 것이다.

요약하면, 광물 탄산화 공정은 산업 폐기물의 친환경적 처리라는 무형의 잇점 외에도, 저가 원료 물질의 획득, 고부가가치 탄산화물 제조, 산업 폐기물 처리에 따른 비용 저감, 그외 다른 부산물 생성에 따른 이익 등 추가적으로 경제성을 증대시킬 수 있는 다양한 가능성이 있다고 할 수 있다.

4-5. 기술 개발의 타당성 및 당위성

CO₂ 광물 탄산화의 기술개발 단계가 아직 연구 단계로 경제성이 낮다는 의견[1]에도 저자들은 국내에서 CO₂ 광물 탄산화의 기술 개발이 필요하다고 보며, 그 이유는 다음과 같다.

첫 번째로, CO₂ 지중 저장 이외의 대안의 필요성을 들 수 있다. 현재까지 파악된 국내 CO₂ 저장 잠재량은 약 2.5억톤 정도로 알려져

있으며[61], 이 잠재량은 연간 약 6억톤에 달하는 것으로 추산되는 국내 CO₂ 배출량에 비하면 부족한 실정이다. 대량의 CO₂ 저감을 실현하기 위한 최적의 방안이 지중 저장임은 부인할 수 없지만, 저장 잠재량 만을 고려하면 국가적인 CO₂ 감축 전략을 실현하기 위해서는 지중 저장 이외의 기술적 대안이 필요한 것이 현실이다.

두 번째로, 광물 탄산화와 관련된 국내의 산업 여건을 들 수 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 우리 나라는 광물 탄산화에 필요한 원료 물질 중 천연 광물의 부존량은 매우 적으나, 산업 부산물은 연간 5,000만톤 이상 발생하기 때문에 이를 CO₂ 고정화에 활용할 경우 연간 1,200만톤 이상의 CO₂를 고정할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 저장 잠재량 면에서도 지중 저장에 크게 뒤지지 않는다고 평가할 수 있다. 다만, 광물 탄산화 기술의 실제 적용을 위해서는 보다 엄밀한 고정 가능량 산정이 필요하다. CO₂ 광물 탄산화 기술은 대용량의 처리가 필요하고, 저가의 지중 격리가 가능한 여건에서는 최선의 방안일 수는 없으나, 지중 저장을 통한 CO₂ 격리 가능량이 많지 않고, 광물 탄산화를 위한 산업 부산물/폐기물의 발생량이 많은 지역(혹은 국가)에서는 '폐기물 처리 및 중소 규모 CO₂ 저장'의 관점에서는 충분히 타당성이 있을 것으로 판단된다. 이 기술 개발을 통하여 지질학적/산업적 여건이 유사한 국가에 기술 수출도 가능할 것이다.

세 번째로, CCS 기술의 한 축이 되는 기술 분야에 있어서 기술 선점이 가능하며, 동시에 우리 나라가 광물 탄산화 기술과 관련된 중심 국가로 도약이 가능하다는 점이다. 해외 연구개발 기술 동향을 종합해 보면, 아직 정부 주도의 대규모 연구가 수행되는 예는 많지 않고, 기술 개발의 초기 단계이다. 비록 국내에서의 연구개발 이력이 미미하나 선진국과의 절대적인 기술 격차는 크지 않기 때문에 이는 오히려 기술 선점의 기회가 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 정부·민간의 집중적인 연구개발 투자로 단시일 내에(10년 이내) 기술격차를 극복할 수 있을 것으로 사료되며, 체계적인 기술 개발을 통하여 이 기술과 관련된 세계적인 연구 중심 국가로 도약이 가능할 것이다.

네 번째로, 광물 탄산화 기술을 이용한 새로운 환경산업의 창출이 가능할 것으로 예상할 수 있다. 국가적으로 볼 때, 광물 탄산화 기술은 CO₂의 격리 저장뿐 아니라, 탄산화물의 활용을 통한 새로운 환경산업 창출의 기회가 될 수 있다. 그 이유는 CO₂ 광물 탄산화 기술이 단순히 탄산화 반응에 국한되는 것이 아니라 원료 물질의 수급, 전처리를 포함한 탄산화 반응, 그리고 탄산화물 및 부산물의 처리까지 하나의 일관된 흐름을 갖는 종합적인 기술이기 때문이다. CO₂ 광물 탄산화 공정을 통하여 획득되는 대량의 물질(탄산화물 및 부산물) 처리를 위한 새로운 시장은 CCS 기술을 이용한 환경산업이며, 동시에 환경문제(산업 부산물의 친환경적, 경제적 처리) 해결의 방안이 될 수 있다.

마지막으로, CO₂ 포집 및 저장에 있어서 포괄적인 포트폴리오를 구성하여 불확실한 미래에 대한 최소한의 대비책이 필요하다는 점이다. 이는 CO₂ 저감 문제의 경우 정치 경제 사회적 관점에 대한 이해관계가 종합적으로 고려되기 때문이다. 한 가지 강조되어야 할 점은 기술은 수입할 수 있지만, 토양 등의 지질학적 여건은 수입할 수 없다는 것이다. 다시 말하면, 각 지역 혹은 나라에 맞는 특화된 CCS 기술개발 전략이 필요하며, 향후 외국의 기술패권주의에 대비한 포괄적인 CCS 포트폴리오를 구비하고 있어야 함을 인지하고 있어야 한다. 만약 포집된 CO₂를 외국으로 수송하여 저장한다고 가정할 경우, 경제적인 문제는 차치하더라도 그 나라의 국민들도 과연 CO₂를 자신들의 영토에 저장하는 것을 허용할 것인지에 대해 깊이 고민할 필

요가 있다. 그리고 CO₂ 저감 문제를 해외 수송후 저장에 절대적으로 의존하게 될 경우, CO₂ 저감 문제의 해결 주도권이 저장지를 보유한 나라에 종속되어 독자적인 해결이 불가능할 수도 있다. 이러한 종속적 관계를 방지하기 위해서는 국가 CO₂ 저감량 목표의 일부분이라도 분담할 수 있는 중소규모의 독자적인 저장 기술 확보가 중요하며, 이를 위해 우리 나라의 실정에 맞는 광물 탄산화 기술 개발이 필요하다고 판단된다.

CO₂ 광물 탄산화의 구현을 위한 경제성과 관련하여 일반적으로 광물 이용시 공정의 경제성은 높지 않은 것으로 알려져 있지만, 산업 부산물을 이용할 경우 경제성이 미흡하다고 예단할 수 없으며, 경제성을 높이기 위한 다양한 기술들이 현재 연구 개발 중에 있다. 또한 공정의 경제성을 향상시키기 위해서는 고부가가치 탄산화물의 생성 및 활용 방안 창출에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 CO₂ 광물 탄산화 관련된 핵심 요소기술을 고찰하였고, 국내외 연구개발 동향을 조사하였으며, 국내 산업 여건을 고려한 광물 탄산화 기술의 타당성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) CO₂ 광물 탄산화의 핵심 요소 기술로는 산업 부산물 등 원료 물질의 전처리 기술, 용매 선정 등 금속(산화물/수산화물) 용출 기술, 고속 탄산화 기술, 탄산화 반응의 공정열 활용 기술 등으로 요약할 수 있다.

(2) CO₂ 광물 탄산화 기술은 기술개발의 단계로 볼 때, 아직까지 기초 연구 단계에 머무르고 있다. 초기에는 천연 광물을 대상으로한 탄산화 연구가 주로 이루어졌으나, 최근 일본, 유럽을 중심으로 산업 부산물을 이용한 탄산화 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

(3) 우리 나라에서는 CO₂ 광물 탄산화 기술개발이 타당하다고 판단되며, 그 이유는 다음과 같다; CO₂ 지중 저장 이외의 대안 필요성, 산업 여건상 산업 부산물이 다량 발생하여 CO₂ 광물 탄산화에 유리한 여건, 기술 선점의 기회 가능, 새로운 환경 산업의 창출 가능, CCS 전략 수립에 있어서 위험성 분산.

(4) CO₂ 광물 탄산화의 구현을 위한 경제성 증대가 필수적이며 이를 위해서는 고속 탄산화 기술등 기술개발의 가속화와 더불어 고부가가치 탄산화물의 생성 및 활용 방안 창출이 필요하다.

감 사

이 연구는 환경부 연구 용역 과제(토양 내 CO₂ 저장기술 개발사업 타당성 연구, 계약번호: 200902100700)의 일부로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다. 이 논문의 많은 내용은 상기 과제의 연구보고서[22]와 한국지질자원연구원 연구보고서(광물탄산화 기술 기반구축 기획연구(2008))를 참조하였음을 미리 밝혀 둡니다.

참고문헌

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Carbon Dioxide Capture and Storage, IPCC Special Report(2005).
2. Lackner, K. S., Wendt, C. H., Butt, D. P., Joyce, E. L. and Sharp, D. H., "Carbon Dioxide Disposal in Carbonate Miner-

- als," *Energy*, **20**(11), 1153-1170(1995).
3. Lackner, K. S., Butt, D. P. and Wendt, C. H., "Progress on Binding CO₂ in Mineral Substrates," *Energy Convers. Mgmt.*, **38**(Supplement 1), S259-S264(1997).
 4. Teir, S., "Fixation of Carbon Dioxide by Producing Carbonates from Minerals and Steelmaking Slags," Department of Energy Technology, Ph.D. Dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo(2008).
 5. Huijgen, W. J. J., "Carbon Dioxide Sequestration by Mineral Carbonation," Ph.D. Dissertation, Energy Research Centre of The Netherlands, Petten(2006).
 6. Gerdemann, S. J., O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Penner, L. R., Rush, H., "Ex Situ Aqueous Mineral Carbonation," *Env. Sci. Technol.*, **41**, 2587-2593(2007).
 7. Maroto-Valer, M. M., Fauth, D. J., Kuchta, M. E., Zhang, Y. and Andrésen, J. M., "Activation of Magnesium Rich Minerals as Carbonation Feedstock Materials for CO₂ Sequestration," *Fuel Proc. Tech.*, **86**(14-15), 1627-1645(2005).
 8. Park, A.-H. A. and Fan, L.-S., "CO₂ Mineral Sequestration: Physically Activated Dissolution of Serpentine and pH Swing Process," *Chem. Eng. Sci.*, **59**(22-23), 5241-5247(2004).
 9. Zevenhoven, R., Teir, S. and Eloneva, S., "Heat Optimisation of a Staged Gas-Solid Mineral Carbonation Process for Long-Term CO₂ Storage," *Energy*, **33**(2), 362-370(2008).
 10. Iizuka, A., Fujii, M., Yamasaki, A. and Yanagisawa, Y., "Development of a New CO₂ Sequestration Process Utilizing the Carbonation of Waste Cement," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 7880-7887(2004).
 11. Byeon, T. B., Lee, J. Y., Kim, D. Y., Lee, H. H. and Kim, H. S., "Carbonation Treatment Technology of Steel Making Slag," *RIST Journal of R&D*, **19**(1), 3239(2005), in Korean.
 12. Kakizawa, M., Yamasaki, A. and Yanagisawa, Y., "A New CO₂ Disposal Process via Artificial Weathering of Calcium Silicate Accelerated by Acetic Acid," *Energy*, **26**(4), 341-354(2001).
 13. Maroto-Valer, M. M., Zhang, Y., Kuchta, M. E., Andresen, J. M. and Fauth, D. J., Process for Sequestering Carbon Dioxide and Sulphur Dioxide: U.S.A., US Patent No.0002847(2005).
 14. Blencoe, J. G., Anovitz, L. M., Beard, J. S. and Palmer, D. A., Carbonation of Serpentine for Long-Term CO₂ Sequestration, Final Report, Oak Ridge National Laboratory, Project Number: 3210-2024(2003).
 15. Wendt, C. H., Butt, D. P., Lackner, K. S. and Ziock, H.-J., "Thermodynamic Considerations of Using Chlorides to Accelerate the Carbonate Formation from Magnesium Silicates," *Greenhouse Gas Control Technologies* **4**, 349-354(1999).
 16. Zevenhoven, R. and Teir, S., "Long Term Storage of CO₂ as Magnesium Carbonate in Finland," Thrid Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, Alexandria, VA, USA(2004).
 17. Newall, P. S., Clarke, S. J., Haywood, H. M., Scholes, H., Clarke, N. R., King, P. A. and Barley, R. W., CO₂ Storage as Carbonate Minerals, International Energy Agency(2000).
 18. Park, A.-H.A., Jadhav, R. and Fan, L.-S., "CO₂ Mineral Sequestration: Chemically Enhanced Aqueous Carbonation of Serpentine," *Can. J. Chem. Eng.*, **81**, 885-890(2003).
 19. Yamasaki, A., Iizuka, A., Kakizawa, M., Katsuyama, Y., Nakagawa, M., Fujii, M., Kumagi, K. and Yanagisawa, Y., "Development of a Carbon Sequestration Process by the Carbonation Reaction of Waste Streams Containing Calcium or Magnesium," Fifth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration., Alexandria, Virginia, USA(2006).
 20. Katsuyama, Y., Iizuka, A., Yamasaki, A., Fujii, M., Kumagai, K. and Yanagisawa, Y., "Development of a New Process of Waste Concrete for CO₂ Reduction in Cement Industry," *Greenhouse Gas Control Technologies* **7**, 1433-1439(2005).
 21. Katsuyama, Y., Yamasaki, A., Iizuka, A., Fujii, M., Kumagai, K. and Yanagisawa, Y., "Development of a Process for Producing High-Purity Calcium Carbonate (CaCO₃) from Waste Cement Using Pressurized CO₂," *Env. Progr.*, **24**(2), 162-170(2005).
 22. Research Institute of Industrial Science & Technology, "Feasibility Study on the Project of Technology Development for CO₂ Storage under the Ground," Research Report, Ministry of Environment (2009), in Korean.
 23. Oyamada, K., Watanabe, K., Okamoto, M. and Iwata, I., "Reproduction Technology of Coral Reefs Using "Marine Block," *JFE Technical Report*(2009).
 24. Tsutsumi, N., Tanaka, M., Tasaki, T., Amada, K., Hisasue, O., Yamamoto, T., Yamada, H. and Endoh, K., "Development of Rapid Stabilization Process for Steelmaking Slag," *Nippon Steel Technical Report*(2008).
 25. Stolaroff, J. K., Lowry, G. V. and Keith, D. W., "Using CaO and MgO-Rich Industrial Waste Streams for Carbon Sequestration," *Energy Convers. Mgmt.*, **46**, 687-699(2005).
 26. Richards, V., Peaslee, K. and Smith, J., Geological Sequestration of CO₂ by Hydrogen Carbonate Formation with Reclaimed Slag, AISI/DOE Technology Roadmap Program for the Steel Industry, Final Report, Missouri University of Science and Technology(2008).
 27. Huijgen, W. J. J., Comans, R. N. J. and Witkamp, G.-J., "Cost Evaluation of CO₂ Sequestration by Aqueous Mineral Carbonation," *Energy Convers. Mgmt.*, **48**(7), 1923-1935(2007).
 28. Druckenmiller, M. L. and Maroto-Valer, M. M., "Carbon Sequestration Using Brine of Adjusted pH to Form Mineral Carbonates," *Fuel Proc. Technol.*, **86**(14-15), 1599-1614(2005).
 29. Seifritz, W., "CO₂ Disposal by Means of Silicates," *Nature*, **345**, 486(1990).
 30. Kojima, T., Nagamine, A., Ueno, N. and Uemiyu, S., "Absorption and Fixation of Carbon Dioxide by Rock Weathering," *Energy Convers. Mgmt.*, **38**(Supplement 1), S461-S466(1997).
 31. Schuiling, R. D. and Krijgsman, P., "Enhanced Weathering: An Effective and Cheap Tool to Sequester CO₂," *Climate Change*, **74**, 349-354(2006).
 32. Pohang University of Science & Technology, Study on the Conversion of CO₂ into Calcium Carbonate Using E. Coli, Research Institute of Industrial Science & Technology, Research Report (2010), in Korean.
 33. Bond, G. M., Stringer, J., Brandvold, D. K., Simsek, F. A., Medina, M.-G. and Egeland, G., "Development of Integrated System for Biomimetic CO₂ Sequestration Using the Enzyme Carbonic Anhydrase," *Energy & Fuels*, **15**, 309-316(2001).
 34. Favre, N., Christ, M. L. and Pierre, A. C., "Biocatalytic Capture of CO₂ with Carbonic Anhydrase and Its Transformation to Solid Carbonate," *J. Mol. Cat. B: Enzymatic*, **60**(3-4), 163-170(2009).
 35. Trachtenberg, M. C., Cowan, R. M., Smith, D. A., Horazak, D. A., Jensen, M. D., Laumb, J. D., Vucelic, A. P., Chen, H., Wang, L.

- and Wu, X., "Membrane-Based, Enzyme-Facilitated, Efficient Carbon Dioxide Capture," *Energy Procedia*, **1**(1), 353-360(2009).
36. Jeong, S. K., Lim, K. S., Kim, D. H., Lee, S. W. and Lee, S. H., "Biomimetic CO₂ Capture and Sequestration", *KIC News*, **12**(6), 29-36(2009).
 37. Zevenhoven, R., Eloneva, S. and Teir, S., "Chemical Fixation of CO₂ in Carbonates: Routes to Valuable Products and Long-Term Storage," *Cat. Today*, **115**(1-4), 73-79(2006).
 38. Roskill Information Services, Inc., *The Economics of Ground Calcium Carbonate*, 3rd Ed., Report [cited 2010 Jun. 28]; Available from: <http://www.roskill.com/>.
 39. Goff, F., Guthrie, G., Lipin, B., Fite, M., Chipera, S., Counce, D., Kluk, E. and Ziock, H., Evaluation of Ultramafic Deposits in the Eastern United States and Puerto Rico as Sources of Magnesium for Carbon Dioxide Sequestration, Los Alamos National Laboratory(2000).
 40. O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Nilsen, D. N., Walters, R. P. and Turner, P. C., "Carbon Dioxide Sequestration by Direct Mineral Carbonation with Carbonic Acid," 25th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Clear Water, FL, USA(2000).
 41. O'Connor, W. K., Dahlin, D. C., Nilsen, D. N., Rush, G. E., Walters, R. P. and Turner, P. C., "CO₂ Storage in Solid Form: A Study of Direct Mineral Carbonation," Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Technologies, Cairns, Australia(2000).
 42. Fauth, D. J. and Soong, Y., "Mineral Sequestration Utilizing Industrial by-Products, Residues, and Minerals," Mineral Sequestration Workshop, National Energy Technology Laboratory(2001).
 43. Reddy, K. J., Argyle, M. D., Viswatej, A. and Taylor, D. T., "A Novel Method to Capture and Store Flue Gas Carbon Dioxide (CO₂): Accelerated Mineral Carbonation," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., **6**(2009).
 44. Lackner, K. S., Duby, P., Yegulalp, T., Krevor, S. and Graves, C., Integrating Steel Production with Mineral Carbon Sequestration, AISI/DOE Technology Roadmap Program for the Steel Industry, Final Report, Columbia University(2008).
 45. Eloneva, S., Teir, S., Salminen, J., Revitzer, K., Kontu, K., Forsman, A.-M., Zevenhoven, R. and Fogelholm, C.-J., "Pure Calcium Carbonate Product from the Carbonation of a Steelmaking Slag," 2nd International Conference on Accelerated Carbonation for Environmental and Materials Engineering, Rome, Italy(2008).
 46. Hamelinck, C. N., Faaij, A. P. C., Turkenburg, W. C., van Bergen, F., Pagnier, H. J. M., Barzandji, O. H. M., Wolf, K.-H. A. A. and Ruijg, G. J., "CO₂ Enhanced Coalbed Methane Production in the Netherlands," *Energy*, **27**(7), 647-674(2002).
 47. Comans, R. N. J., Personal Communication(e-mail), (2009).
 48. Research Institute of Innovative Technology for the Earth, Programmatic Approach to the Technology Development of Carbon Dioxide Fixation and Utilization, Research Report (2009), in Japanese.
 49. Yogo, K., Teng, Y., Yashima, T., Yamada, K., Rubin, E.S., Keith, D.W., Gilboy, C.F., Wilson, M., Morris, T., Gale, J. and Thambimuthu, K., "Development of a New CO₂ Fixation/Utilization Process (1): Recovery of Calcium from Steelmaking Slag and Chemical Fixation of Carbon Dioxide by Carbonation Reaction," Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 2427-2430(2005).
 50. Iizuka, A., "Development of a New Total Recycling Process of Waste Concrete with a Carbonic Acid Treatment," Ph.D. Dissertation, University of Tokyo, Tokyo(2006).
 51. Iizuka, A., Yanagisawa, Y. and Yamasaki, A., "Development of a New Recycling Process for Concrete Sludge Generated from Concrete Pole Plant," AIChE, Nashville, TN, USA(2009).
 52. Wright, J., Australian CCS Commercial and R&D Projects, CCS Workshop Tokyo 2007, Tokyo, Japan(2007).
 53. L.E.K. Consulting, An Ideal Portfolio of CCS Projects and Rationale for Supporting Projects, Global CCS Institute(2009).
 54. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Planning Study on the Base Building for the Mineral Carbonation Technology, Research Report JP2008-026 (2008), in Korean.
 55. "Building An Ocean Forest Using Steel Slag," DK Ilbo(<http://www.dkilbo.com>), 2010. 2.10 (2010), in Korean.
 56. Teir, S., Eloneva, S., Fogelholm, C.-J. and Zevenhoven, R., "Dissolution of Steelmaking Slags in Acetic Acid for Precipitated Calcium Carbonate Production," *Energy*, **32**(4), 528-539(2007).
 57. Teir, S., Eloneva, S. and Zevenhoven, R., "Production of Precipitated Calcium Carbonate from Calcium Silicates and Carbon Dioxide," *Energy Convers. Mgmt.*, **46**(18-19), 2954-2979(2005).
 58. Goldberg, P., Romanosky, R., Chen, Z.-Y., "CO₂ Mineral Sequestration Studies in US," 5th International Conference on Greenhouse Gas Technologies, Cairns Convention Center, Australia(2000).
 59. Goldberg, P., "CO₂ Mineral Sequestration Studies - Introduction, Issues and Plans," Workshop on CO₂ Sequestration with Minerals(2001).
 60. Takagi, M., "Cost Evaluation of CCS Technology and Deployment Scenarios in Japan," CCS Workshop 2007, Kyoto, Japan(2007).
 61. Kang, S.-G., Development of Technology for CO₂ Marine Geological Storage (V), Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs, Annual Evaluation Meeting(2009), in Korean.