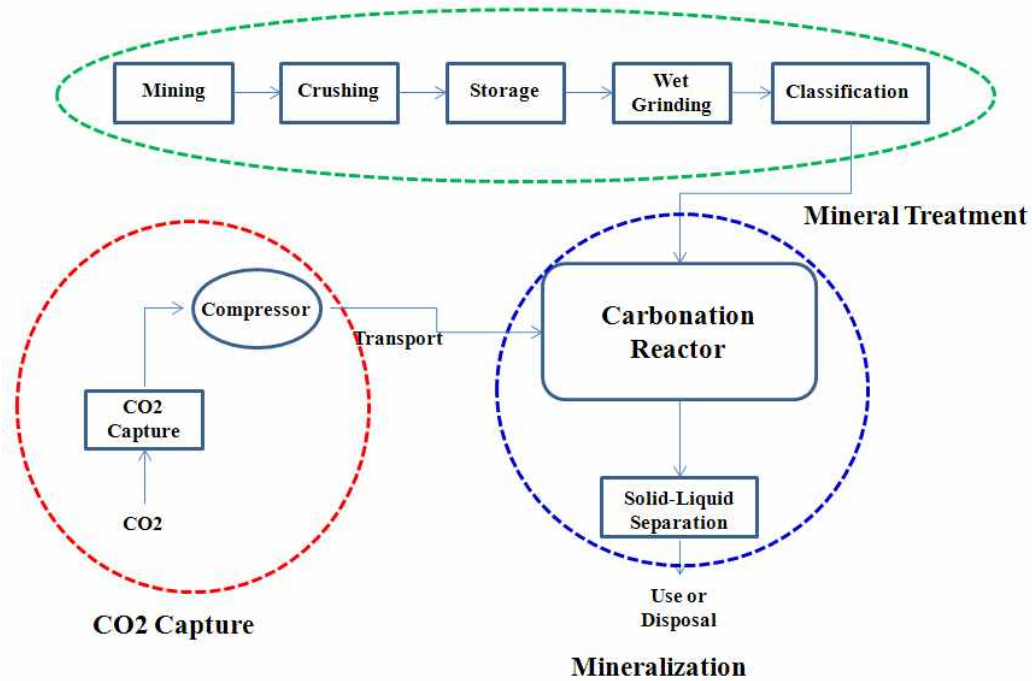


4. 이산화탄소 광물화(II)

3) 광물화 공정

화석연료의 연소에 의해서 발생하는 연소배가스에 포함되어 있는 이산화탄소를 광물화하는 공정은 크게 1) 이산화탄소 포집공정 2) 광물처리 공정 3)광물화 공정으로 구분할 수 있다[그림 4-1]. 그림에서는 천연광물을 이용한 광물화 공정을 나타내었으나 산업폐기물을 이용할 경우에도 유사한 형태의 공정이 적용된다. 현재까지 연구 개발되고 있는 대부분의 광물화공정은 별도의 포집공정을 통해 포집된 이산화탄소를 이용하기 때문에 주로 광물 전처리 공정과 이를 이용한 광물화 공정에 대한 연구가 진행 중이다.



[그림 4-1] 이산화탄소 광물화 공정 구성도.

사문석이나 감람석등 광물화에 필요한 광물의 채광은 구리, 철 등 일반 광물의 채광과 같다. 이산화탄소 광물화에 필요한 광물 채취는 다른 광물 광산과 마찬가지로 잔재물의 처리와 빈 공간에 대한 매립이 중요한 환경적 문제로 지적되고 있다. 이산화탄소 광물화 공정이 경제성을 갖기 위해서는 광물화 공정이 광산 근처에 있어 고체 입자의 수송비용을 절감할 수 있어야 한다. 현재까지 개발된 기술을 근거로 할 때 경제성있는 채광량은 50,000~100,000톤/일 규모의 생산규모가 되어야 하며, 이를 30년

기준으로 보면 약 0.3km³의 부피에 해당한다. 이렇게 채굴된 천연광물은 광물화 반응을 최적화시키기 위하여 파쇄, 분쇄, 기계적 분리 및 화학적 처리가 필요하다. 광물화반응에 사용되는 이산화탄소는 기존 이산화탄소 포집 장치를 통해 포집된 이산화탄소를 이용한다. 포집된 이산화탄소는 수송 및 저장을 위하여 초임계 상태 이상으로 압축되며 이 압축된 고압의 이산화탄소를 그대로 사용하는 것을 의미한다. 또한 반응활성증진을 위하여 기-고 반응은 300~500°C, 수용액상 반응은 100~150°C의 온도 상승을 필요로 한다.

광물화반응 중 기-고 반응은 반응속도가 너무 느리기 때문에 실제 공정에 적용하기는 많은 문제점이 있다. 그러나 IGCC와 같이 높은 농도이며 고압인 이산화탄소를 배출하는 공정에는 적합한 것으로 보고되고 있다. 기-고 반응보다 광물화 속도가 빨라 현재 주로 연구되고 있는 습식공정은 다음과 같은 세 가지의 큰 문제점을 극복하여야 한다. 첫 번째 총괄반응속도를 촉진시켜야 한다. 현재까지 광물화 반응의 율속단계로 작용하는 것은 광석속에 포함되어 있는 유용 광물의 느린 용출인 것으로 알려져 있다. 두 번째는 광석에는 다양한 금속성분이 포함되어 있으며 이러한 금속성분이 용출되어 광물화반응을 저해할 수 있다는 것이다. 마지막으로 반응에 사용된 모든 화학성분을 적절히 회수하여야만 한다. 습식광물화 공정에 대한 경제성 분석 예는 O'connor 등에 의한 연구결과에 잘 나타나있다 (O'connor 등 Proceeding of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Tehcnologies(2000), Minerals & metallurgical processing, 19(2), 95-101(2002)). O'connor 등은 미국 내 존재하는 7개의 광물군을 대상으로 600여회 이상의 실험을 거쳐 습식공정에 대한 최적 조건 및 경제성 분석을 수행하였다. 경제성을 가늠할 수 있는 매개변수는 반응성 정도와 광물 전처리 비용의 상관관계이다. 감람석이나 규회석은 ball milling과 같은 기계적 활성화가 반응성을 크게 증진시킨다고 보고하였다. 전처리를 하지 않은 경우 전환율이 60%이하이나 미세입자로 제조한 경우 전환율이 80%를 상회하는 것으로 나타났다. 그러나 전처리를 하지 않은 경우 소요되는 에너지는 100kWh/t mineral 인데 비하여 전처리를 한 경우는 두배인 200kWh/t mineral이 소요되는 것으로 나타났다. 사문석의 경우는 광물의 기본 전처리 후에 630°C에서 열적인 활성화과정이 효율을 증진시키는 것으로 나타났으며 이 경우 전환율이 92%를 나타내었다. 그러나 사용된 에너지는 350kWh/t mineral로 가장 많은 전처리 에너지가 소요되었다. 이산화탄소 광물화는 사용되는 광물에 따라 반응성이 달라지며 최적조업조건 역시 변화한다. 주요한 세 가지 광물의 최적 습식광물화 조건은 다음 [표 4-1]과 같다.

[표 4-1] 습식 광물화 공정에 필요한 각 광물의 최적 조업 조건

광물	온도(°C)	압력(Mpa)	첨가제	기타
감람석	185	15	0.64 mol/L NaHCO ₃	
사문석	155	11.5	0.64 mol/L NaHCO ₃	630°C 열처리
규회석	100	4	1 mol/L NaCl	

상기와 같이 광물에 따라 조업 조건 및 전환율이 다르게 나타난다. 전체적으로 1톤의 이산화탄소를 처리하는데 \$50~100/t stored의 비용이 소요되는 것으로 나타났다. 여기서 저장비용은 이산화탄소 포집과 수송에 소요되는 비용을 포함하지 않음을 의미한다. 각 광물에 따른 전환율, 소요에너지 및 비용은 다음 [표 4-2]와 같다.

[표 4-2] 광물에 따른 습식 광물화 공정의 경제성 분석

광물	전환율(%) 1시간 반응	비용 (\$/t ore)	에너지 (kWh/tCO ₂ stored)	비용 (\$/tCO ₂ stored)
Olivine(standard)	61	19	310	55
Olivine(activated)	81	27	640	59
Lizardite(standard)	9	15	180	430
Lizardite(activated)	40	44	2,300	210
Antigorite(standard)	62	15	180	250
Antigorite(activated)	92	48	1,010	78
Wollastonite(standard)	43	15	190	91
Wollastonite(activated)	82	19	430	64

기계적인 전처리를 통한 광물을 이산화탄소 광물화반응에 이용하여도 반응온도를 증가시키는 것과 같이 일정한 에너지를 필요로 한다. 보다 낮은 온도 및 압력하에서 광물화 반응을 빠르게 진행시키기 광석로부터 이산화탄소 광물화에 작용하는 금속이온을 추출하여 사용하는 것이다. 일반적으로 전체 반응의 율속단계로 작용하는 유용 금속이온의 용출을 빠르게 하기 위하여 적절한 첨가제를 사용한다. 사용되는 첨가제로는 HCl과 같은 강산, NaOH와 같은 강염기 및 acetic acid, oxalic acid, orthophosphoric acid, ammonium bisulfate등과 같은 약산이 주로 사용된다. 이

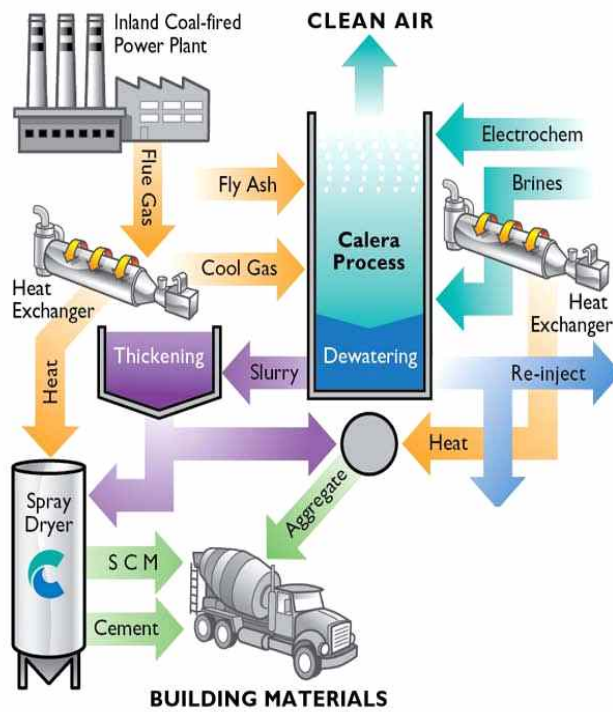
러한 첨가제를 이용할 경우 광물로부터 유용 금속이온의 용출을 빠르게 하여 전체 반응속도를 증진시키는 효과가 있으나 첨가제의 가격 및 첨가제 회수에 필요한 공정이 추가적으로 요구되므로 경제적 공정 구현을 위해서는 첨가제 사용과 공정효율간의 trade-off를 고려하여야 한다. 또한 용출된 유용금속과 이산화탄소가 반응하여 형성된 탄산광물이 광석표면에 쌓일 경우 광석 내부에 존재하는 유용금속을 용출시키지 못하는 문제점이 있다.

마그네슘 함량이 가장 많은 감람석을 이용하여 이산화탄소 광물화를 진행 시킬 경우 이론적으로 1톤의 이산화탄소에 1.6톤의 감람석이 필요하다. 즉 반응 후 약 2.6톤의 고체입자가 생성되며 이에 대한 처리 역시 고려해야할 문제이다. 광물화 반응이 100% 이론적으로 이루어지지 않기 때문에 전환율과 손실량을 고려하면 사용되는 광물에 따라 다르기는 하지만 일반적으로 1톤의 이산화탄소를 처리하는데 1.6~3.7톤의 광물이 필요한 것으로 나타났다. 또한 광물화에 추가적인 에너지를 사용하는 것은 이로 인한 이산화탄소 배출을 증가시키게 된다. 감람석을 사용할 경우 이산화탄소 광물화 공정에 약 1.1GJ/tCO₂의 에너지가 소요된다. 동일한 에너지를 만들기 위해 석탄이 사용됐을 경우 0.3톤의 이산화탄소가 생성된다. 즉 광물화를 통하여 1톤의 이산화탄소를 처리하였다고 하더라도 실제 처리되는 이산화탄소 양은 불가피하게 생성된 0.3톤의 이산화탄소를 제외한 0.7톤으로 볼 수 있다. 이산화탄소 광물화에 소요되는 비용은 전술한 것과 같이 약 \$50~100/tCO₂로 나타나며 이러한 반응을 위해서 생성된 에너지의 약 30~50%를 필요로 한다. 이는 석탄화력발전소 효율을 35%로 가정하면 이산화탄소 광물화 공정을 채택한 경우 효율이 25~18%로 감소하는 것을 의미한다. 여기에 이산화탄소 포집장치를 설치할 경우 10~40%의 에너지손실이 있기 때문에 이산화탄소 포집 및 광물화 공정을 석탄화력발전소에 적용할 경우 현재와 같이 아무런 이산화탄소 제거 장치가 설치되지 않은 경우 보다 약 60~180%의 에너지를 더 필요로 하게 된다. 따라서 현재까지는 경제성을 획기적으로 증가시켜야 하는 공정으로 평가되고 있다. 그러나 기술개발이 진전되고 광물이 아닌 버려지는 산업폐기물을 이용하며 광물화 반응과정은 배가스 중의 중금속과 산성가스를 포집할 수 있는 장점과 생성된 광물을 건자재로 사용할 수 있는 장점등을 고려하면 여전히 매력적인 공정이 될 수 있다. 또한 향후 배출되는 이산화탄소에 대한 탄소세를 고려하면 현재의 비 경제적인 공정으로의 분류는 재평가되어야 할 것으로 판단된다.

4) 혁신 광물화 공정

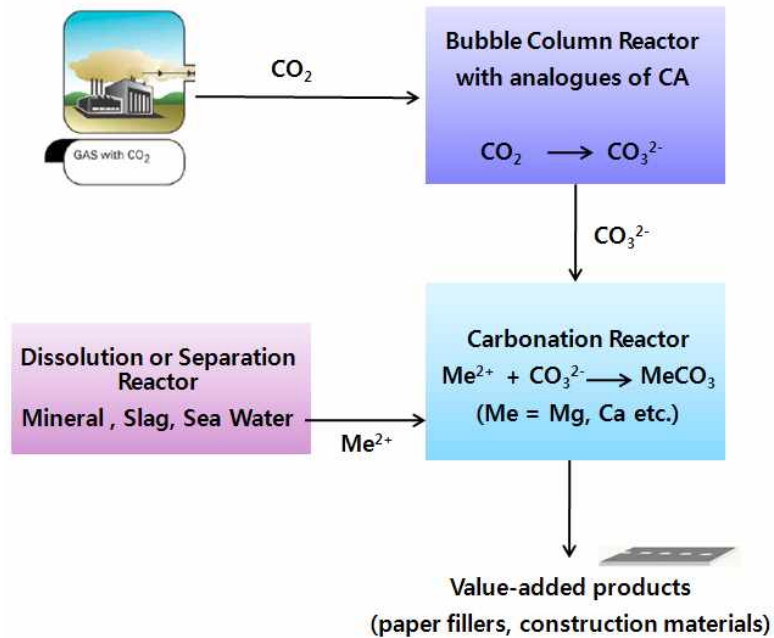
현재까지 연구된 이산화탄소 광물화 공정은 많은 운전비용으로 인한 비 경제적인 공정으로 인식되고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 다양한 혁신 공정들이 제시되

고 있으며 현재 이산화탄소 포집과 동시에 광물화를 진행하는 일체형 공정에 대한 연구가 진행 중이다. 이는 이산화탄소 포집, 광물화 공정의 개별공정 조업에 의해 발생하는 장치비 및 운전비용을 혁신적으로 낮출 수 있는 기술로 평가되고 있다. 미국 Calera사에서는 alkalinity Based on Low Energy (ABLE)라고 명명한 전기화학적 공정을 통해 생성된 Na^+ , OH^- 이온과 waste water 혹은 brine으로부터 얻은 Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 같은 양이온과 배가스내에 포함된 이산화탄소, 이산화황을 반응시켜 유용한 탄산칼슘이나 탄산마그네슘을 얻는 Mineralization via Aqueous Precipitation (MAP™)공정을 개발하였다(<http://www.calera.com>). Calera사는 MAP공정을 이용하여 1톤의 시멘트를 제조할 경우 약 1.2톤의 이산화탄소 포집 효과가 있다고 발표하였으며(석탄화력발전소에서 배출되는 이산화탄소 0.5톤을 이용 + 기존 시멘트제조공정에서 배출되는 이산화탄소 0.7톤 저감) 이는 skyonic사의 Skymine 공정 (<http://www.skyonic.com/>)과 유사한 것으로 분석된다.



[그림 4-2] Calera사의 MAP™ 공정 개략도.

한국에너지기술연구원에서는 생체내에 존재하는 Carbonic Anhydrase 효소를 이용하여 빠르게 이산화탄소를 포집하며, 적절한 양이온을 도입하여 유용한 탄산칼슘을 제조하는 연구에 대하여 수행중이다.



[그림 4-3] 생체촉매이용 CO₂포집 및 광물화 공정 개략도.

현재까지 연구된 이산화탄소 광물화 공정은 기술적, 경제적으로 많은 난관을 극복하여야 하는 연구개발 초기단계에 있다. 여러 문제점이 있으나 포집된 이산화탄소를 저장할 수 있는 마땅한 저장소가 없는 우리나라의 현실과 생성된 광물을 제지용 소재, 전자재료의 활용을 통하여 이산화탄소 포집 및 저장에 소요되는 비용을 절감할 수 있는 측면에서 향후 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.