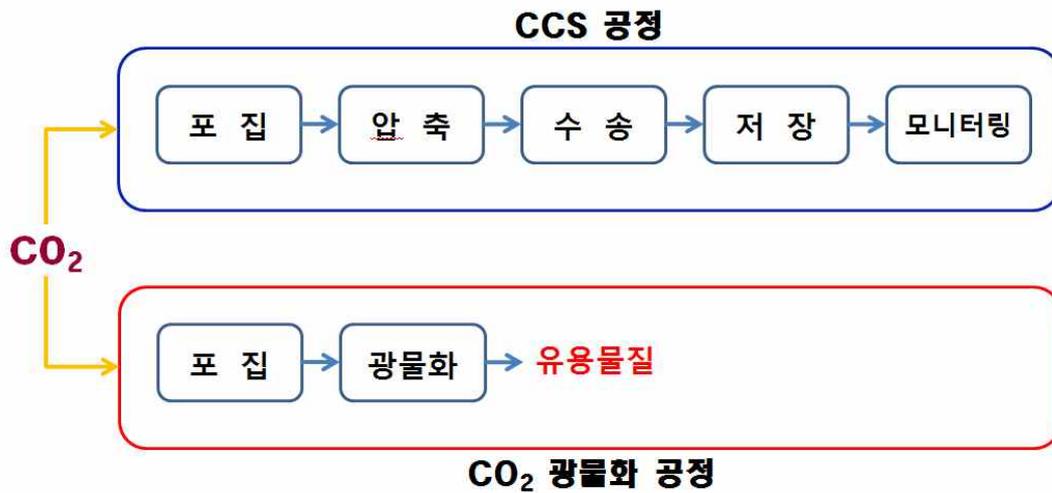


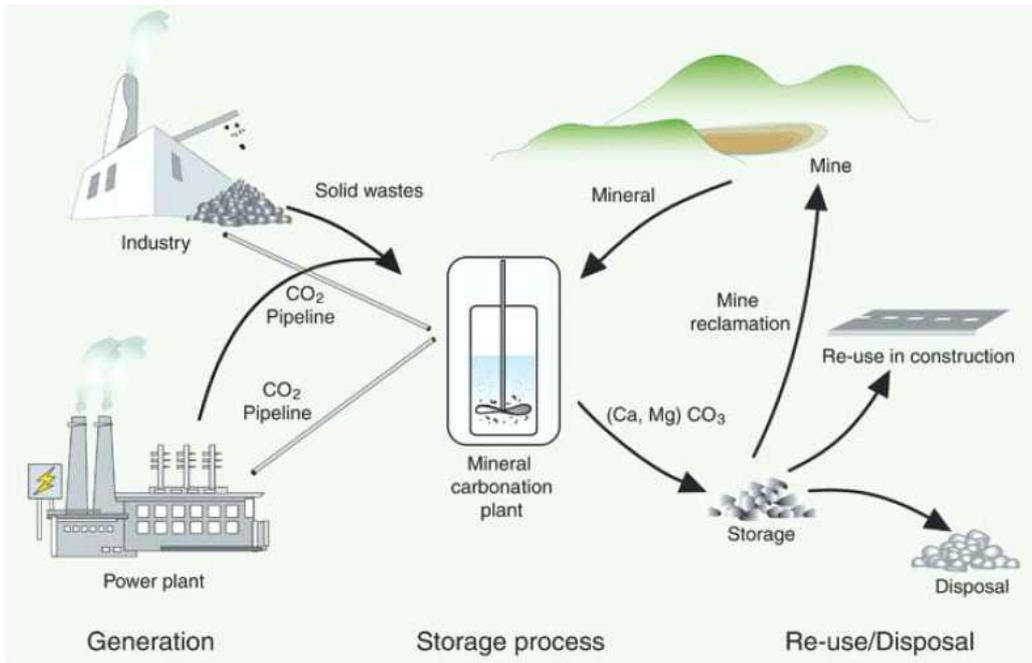
3. 이산화탄소 광물화(I)

배가스에 포함된 이산화탄소를 포집한 후 저장하는 CCS 기술은 신재생에너지 사용이 보편화되기 까지 온실가스를 줄일 수 있는 중요한 수단으로 인식되고 있으나 과도한 장치비와 유지비용으로 인하여 전기값 상승과 같은 원가 상승이 불가피하다. 또한 우리나라와 같이 포집된 이산화탄소의 저장공간이 불충분한 지역에서는 포집된 이산화탄소를 유용한 자원으로 전환하거나, 지중저장외에 별도의 저장방법에 대한 선택이 불가피 하다. 포집된 이산화탄소를 유용한 물질로 전환시키는 여러 가지 방법이 있으나 본 고에서는 이산화탄소를 광물화시켜 유용한 자원으로 전환하거나 저장하는 방법에 대해 기술하겠다. 이산화탄소 광물화 반응은 현재 연구단계에 있는 기술로 광물화에 필요한 비용이 소요되나 다음 [그림 3-1]과 같이 CCS 과정 중 압축-수송-저장에 필요한 비용이 절감되기 때문에 향후 기술적 진전을 통하여 비용효과적인 공정으로 자리매김 할 것으로 예측된다.



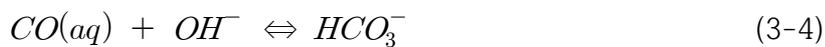
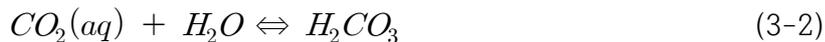
[그림 3-1] CCS 공정과 CO₂ 광물화 공정 비교.

이산화탄소 광물화는 무기물에 이산화탄소를 고정화(carbon dioxide fixation) 시키는 것으로 고정화, 광물탄산화(mineral carbonation) 혹은 광물화 처리(mineral sequestration)로 불리우며, 지구의 화학적 풍화작용(weathering)을 모사한 것과 같다. 기본개념은 이산화탄소와 반응할 수 있는 금속산화물을 많이 함유하고 있는 광물과 이산화탄소를 반응시켜 안정된 탄산광물 형태로 전환되는 것을 의미한다[그림 3-2]. 이러한 방법은 경제적 고정 구현이 가능하며 많은 양의 이산화탄소를 처리할 수 있어 1990년 Seifritz¹⁾에 의해 주장된 이후 많은 연구가 수행되어 왔다.



[그림 3-2] 천연광물을 이용한 이산화탄소 광물화 공정 개략도.²⁾

이산화탄소와 광물의 반응은 기-고 반응보다는 기-액-고 반응으로 볼 수 있다. 이산화탄소는 물에 녹아 다음과 같이 전환된다.



가스상의 이산화탄소는 물에 용해되어 최종적으로 탄산이온(CO_3^{2-})으로 전환된다 (CO_2 종 (CO_2 species)의 변화는 pH에 의존함). 위의 반응 중 반응식 (3-2)의 정반응 속도는 약 $6.2 \times 10^{-2} s^{-1}$ (25°C)에 불과하여 전체반응의 율속단계(rate determining step)로 작용한다. 최종 변환된 이산화탄소 종이 -2가를 띠고 있으므로 반응에 참여하는 광물은 +2가 이온이 적용될 수 있음을 알 수 있다. 지구상에 존재하는 광물 중

1) Seifritz W., "CO₂ disposal by means of silicates", *Nature* 345, 486(1990).

2) IPCC, "Special Report on CCS" (2005).

+2가 이온이며 많은 양이 저장되어 있는 것은 마그네슘(Mg^{2+})과 칼슘(Ca^{2+})을 들 수 있다. 이러한 2가 양이온 금속이온과 이산화탄소가 반응할 경우 다음과 같은 반응식을 통하여 안정된 형태로 침전된다.



여기서 Me는 Mg, Ca등임.

이러한 이산화탄소를 저장한 광물형태는 dolomite, calcite, argonite, limestone 등이 있으며, 지구상 대부분의 이산화탄소를 가장 안정된 형태로 저장하고 있는 물질이다.

1) 금속산화물 source

이산화탄소 광물화에 가장 유용한 금속 이온은 칼슘과 마그네슘이다. 그러나 이러한 양이온은 반응성이 크기 때문에 이온상태로 존재하지 않고 금속산화물 형태로 존재한다. 그러므로 이러한 양이온을 많이 함유하고 있는 자연광물이나 산업폐기물이 광물화 반응에 유용하게 사용될 수 있는 물질임을 알 수 있다.

규산염(silicate) 광물 중 매픽(mafic)광물은 많은 양의 마그네슘, 칼슘, 철을 포함하고 있으며 작은 양의 나트륨과 칼륨을 포함하고 있다. 이를 세분화하여 분류하면 감람석(olivines), 사문석(serpentine), 엔스테타이트(enstatite : $MgSiO_3$) 활석(talc : $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$)와 규회석(wollastonite) 등 이다. 각각에는 거의 비슷한 몰비로 마그네슘과 칼슘이 포함되어 있으나, 마그네슘을 포함하고 있는 광물이 더 많은 것으로 알려져 있다. 예로 마그네슘 silicate는 약 50wt.% 이상의 MgO를 포함하고 있으며, 이의 이산화탄소 고정화량은 이론적으로 0.55kg CO_2/kg rock에 달한다. CaO를 많이 포함하고 있는 칼슘 silicate (예로 현무암(basalts))의 경우 약 10 wt.%의 CaO를 포함하고 있으며 이는 이론적으로 0.08kg CO_2/kg rock의 이산화탄소를 고정화 할 수 있다.

사문석과 감람석은 지구 대륙판의 충돌에 의해 지표면으로 부상한 층에서 가장 많이 발견되는 광물이다. 이러한 광물에 포함되어 있는 마그네슘의 양은 전 세계 석탄을 모두 사용한 경우 예상되는 이산화탄소 배출량 10,000Gt을 고정화 시킬 수 있는 양보다 많은 것으로 예측되고 있다. 미국과 푸에르토리코에 매장되어 있는 사문석과 감람석을 이용할 경우 약 300Gt의 이산화탄소를 고정화시킬 수 있는 것으로 평가되고 있다.

산업폐기물을 이용한 이산화탄소 고정화는 자연광물에 비하여 산업폐기물의 양이 절대적으로 작기는 하나 이산화탄소 발생 지역 근처에서 수집할 수 있다는 장점이 있

다. 산업폐기물 중에 포함되어 있는 CaO 양은 무게비로 발전소에서 배출되는 비산회(65%), 바닥재(20%), 쓰레기소각로의 비산회(35%), 제지의 de-inking ash (35%), 제철슬래그(65% CaO and MgO)를 들 수 있다.

한국지질자원연구원 보고서에 따르면 우리나라에 부존되어 있는 이산화탄소 고정화 가능 천연광물은 약 31Mt이며 이를 이용한 이산화탄소 고정화량은 약 13.2Mt으로 분석하였다. 또한 매년 발생하는 산업폐기물의 양은 약 56.1Mt인 것으로 나타났으며 약 28Mt의 탄산칼슘과 탄산마그네슘을 만들 수 있는 것으로 예측하고 있다³⁾. 이를 표로 나타내면 다음 [3-1], [3-2]와 같다. 현재까지 조사 결과를 토대로 하면 이산화탄소 고정화에 필요한 광물은 한정되어 있으며 매년 발생하는 산업폐기물을 이용하는 것이 유리함을 알 수 있다.

[표 3-1] 국내 천연광물의 CO₂ 고정화 가능 용량

광 물	알카리함량 (%)	부존량 (Mt)	CO ₂ 고정화 잠재능	
			전환율(%)	양(Mt)
규회석	43.3	5.4	34.0	1.8
사문석	43.7	18.0	48.1	8.66
탈크	31.9	7.7	35.1	2.70
감람석	57.3	-	63.0	-
총 계		31.1		13.2

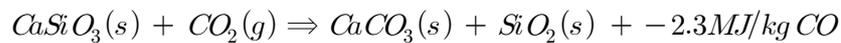
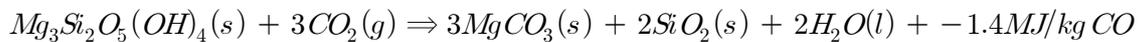
[표 3-2] 폐자원을 이용한 CO₂ 고정화 가능 용량

산업폐기물		Production (Mt/yr)	Content of alkali (%)		Metal Oxide Amount (Mt/yr)			Potential Amount of Carbonate (Mt/yr)		
			CaO	MgO	CaO	MgO	Sum	CaCO ₃	MgCO ₃	Residue
Slag	BF	10.2	40.0	8.6	3.2	0.97	4.2	7.3	1.8	5.3
	Converter	9.0	41.5	6.5	2.9	0.64	3.6	6.7	1.2	4.7
	Fe-Ni	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
Coal Ash		5.8	7.5	1.7	0.34	0.11	0.45	0.78	0.21	5.3
Asbestos		0.09	0	43.3	0	0.042	0.042	0	0.08	0.05
Total		56.1			9.9	2.6	12.6	22.8	4.9	41.0

3) 4차 부생 이산화탄소 전문가 클러스터 세미나, “한국지질자원연구원 보고서 (2008).”재인용 (2011).

2) 천연광물의 이산화탄소 고정화 반응

이산화탄소와 금속 이온과의 반응은 상기 (3-6)과 같으며 이산화탄소보다 생성된 광물이 열역학적으로 안정한 물질이기 때문에 반응시 열을 발생한다(발열반응). 이때 생성되는 열은 사용한 광물에 따라 다르나 대부분 상당한 양인 것으로 알려져 있다. 예로 순수한 칼슘이온을 사용한 경우 탄소가 산화되어 이산화탄소를 생성할 때 발생하는 열(393.8 kJ/mol CO₂)의 약 46%가 발생한다. 그러므로 열역학적 관점에서는 이산화탄소의 광물화 반응은 적절한 시스템 최적화를 통할 경우 사용되는 에너지가 제로이거나 혹은 이를 통하여 에너지를 얻을 수 도 있음을 의미한다. 그러나 이는 지구의 탄생부터 현재까지와 같은 아주 오랜 시간을 고려한 지질학적 관점에서 바라본 것이며, 원하는 짧은 시간에 광물화 반응을 진행시키기 위해서는 에너지 사용이 불가피하다. 주요 천연광물과 이산화탄소의 반응은 다음 식과 같다.



이러한 광물들은 [표 3-1]에서와 같이 MgO와 CaO를 약 30 ~ 50wt.% 포함하고 있다. 칼슘을 포함되어 있는 광물은 마그네슘을 포함하고 있는 광물보다 작기 때문에 다량의 이산화탄소를 처리하는데 있어서는 마그네슘을 포함한 사문석이 유리한 것으로 인식되고 있다. 또한 현무암(basalt)은 약 10~20wt.% Mg/Ca를 함유하고 있어 또 다른 잠재적 대안으로 부각되고 있다.

※ 다음 장에서는 기존 광물화 공정과 혁신공정에 대하여 기술하겠음.