

CO₂ 해중지중저장 기술에 대한 검토 및 환경영향기법 연구



황진환
동국대학교 사회환경시스템
공학과 조교수
jinhwang@dongguk.edu



지현욱
동국대학교 사회환경시스템
공학과 대학원생
mousehw@naver.com



Nguyen Hoang Thao
동국대학교 사회환경시스템
공학과 대학원생
tequeiro_ht2n@yahoo.com

1. 서론

산업혁명 이후 배출된 온실가스는 대기중 농도를 가파르게 상승시켜, 온실효과를 가중시켰다. IPCC 4차 보고서(2007)에 따르면 지구의 온도는 21세기 말까지 20세기 대비 약 6.4도까지도 상승할 수 있음을 경고하였다. 이러한 대기온도의 상승은 해수면 상승을 유발하여 2100년까지 작게는 13cm 많게는 59cm까지 전 지구 해수면을 상승시킬 것으로 예상되며, 우리나라의 경우 69cm정도까지도 상승할 것으로 예측된다. 최근 KEI (2009)의 연구에 따르면 해수면 상승으로 인한 연안지대의 피해비용은 누적합계가 30~40조원 이상

으로 예상되고 있다. 해양에서의 해수면 상승 뿐 아니라 육상에서의 생태계변화, 고온 및 재난으로 인한 인명 손실 등은 전 세계 GDP의 0.5~1.0% 정도의 비용을 발생시킬 것으로 예상하고 있다 (Stern, 2007).

이러한 기후변화의 영향을 저감시키기 위해 온실가스 배출을 억제하는 다양한 정책과 기술들이 소개되고 있다. 신재생에너지로의 전환, 에너지 이용 효율화를 포함하여 온실가스를 조금이라도 적게 배출시키는 기술들이 소개되고 있다. 그러나, 이러한 노력에도 불구하고 화석연료의 사용은 현재 인류의 경제가 성장하고 발전하는 원천이라고 할 수 있으며, 그 사용 자체는 상당기간 지속될 것으로 예상된다. 그러므로, 완전

한 신에너지로의 전환이 이루어지기 전 까지 기후 변화를 약화시키는 방안으로 원자력 발전과 함께 가장 우선적으로 제시되고 있는 기술은 바로 이산화탄소를 발전 및 석유정제 등에서 발생할 때 포집하고 격리하는 CCS (Carbon Capture & Storage)라고 할 수 있다.

EU는 2008년부터 2020년을 목표로 10-12개의 보급형 CCS 사업에 약 70-120억 유로를 투입하고, 2030년부터 연간 4억톤 규모의 CO₂를 감축할 계획을 가지고 있다. 일본의 경우 해양 특히 연근해의 지질학적 구조를 이용한 저장 후보지 조사를 끝마쳤고, 약 1460억톤의 CO₂ 저장 잠재량을 평가하였다. 이에 우리나라도 국토해양부를 중심으로 하여 해양 지중저장 사업을 추진 중에 있다. 그래서, 본 글에서는 이러한 CCS기술의 전체를 개략적으로 설명하고 CCS기술이 해양에 적용될 때 고려해야 할 해양환경에서 발생할 수 있는 문제점들에 관련한 내용을 소개하고자 한다.

2. CCS의 전체 공정에 대한 소개

CCS는 먼저 발전소, 제철소 등 주요 고정 온실가스 배출원으로부터 공정과정에서 이산화탄소를 포집하게 된다. 포집은 일반적으로 연소 전, 연소 후 및 순산소연소로 분리하여 주로 이산화탄소를 포집하게 된다.

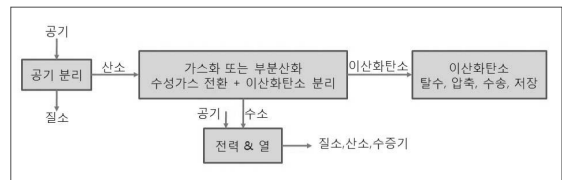
2.1 연소 전 포집

연소 전 처리 시스템의 첫 단계는 연료를 산소(혹은 공기)나 수증기와 반응시켜 일산화탄소와 수소의 혼합가스로 전환하는 것인데, 수증기를 산화제로 사용하면 수증기 개질반응(Steam reforming, SMR), 산소를 사용하면 부분산화반응(Partial

Oxidation, POX)이라 한다(김재창 외, 2008). 생성된 일산화탄소는 수성가스전환반응(Water Gas Shift reaction, WGS)에 의해 수증기와 반응하여 이산화탄소와 더 많은 수소를 생성한다. 여기서 이산화탄소는 분리되어 저장되고, 수소는 여러 가지 용도로 사용된다.

탄화수소의 부분산화반응(Partial Oxidation, POX)은 강한 발열반응에 의해 촉매 없이 산화시키는 방법으로 1200-1500℃의 온도에서 수행된다. 높은 온도를 견디는 장비가 필요하기 때문에 대규모 공정에 적합한 방법이다. 이외에도 접촉부분산화(catalytic partial oxidation)반응 등을 이용하여 저온에서 반응시키기도 한다.

이러한 과정을 통해 생성된 일산화탄소는 수증기와 반응시켜 이산화탄소와 수소를 생산하게 되며, 이 과정을 거치고 나서 이산화탄소를 고체 흡수제나 용매, 멤브레인 등을 이용하여 회수하게 된다.



〈그림 1〉 연소 전 포집 기술(IPCC, 2005)

2.2 연소 후 포집

연소 전 포집보다는 조기에 상용화될 것으로 예상되는 기술이 연소 후 포집이다. 화석연료의 연소로부터 발생하는 연소 배기가스 또는 공정 가스 중에 포함된 이산화탄소를 선택적으로 포집, 회수하는 기술이다(민병무, 2009). 다양한 분리공정이 이용되는데 습식흡수기술과 같이 액체 흡수제를 이용하는 대량 처리공정이 있으며, 이산화탄소의 분압이 낮은 경우에 효과적인 화학흡수법 등이 있다(김재창

외, 2008). 가스화 복합발전 (IGCC) 등에서처럼 고압의 연료 가스에서 포집하는 경우는 물리 흡수법이 이용된다(민병무, 2009). 습식흡수기술의 액상흡수제를 이용하는 대신에 금속 산화물, 알칼리 금속 산화물 등의 고체흡수제 등을 이용하여 흡수할 수도 있다.

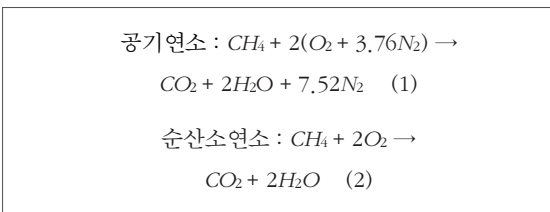
이렇게 흡수된 이산화탄소는 다시 흡착을 시켜야 한다. 이러한 흡착과정은 이산화탄소의 고체 소재 흡착제 표면에서 분자사이의 친화력에 의하여 선택적으로 이산화탄소가 분리·포집되는 공정을 말한다.

흡착기술외에 분리막을 사용하여 이산화탄소를 포집하기도 하지만, 대형화의 한계가 있어서 선택적으로 이용된다.

2.3 순산소연소

마지막으로 발전 부분에서 주로 사용가능한 방법으로 순산소 연소를 활용하는 방법이 있다. 석탄발전의 경우 연소로에 고농도의 산소를 주입하여 최종 배기가스가 순도가 매우 높은 이산화탄소를 배출하도록 하는 방법으로 현재 우리나라 전력연구원 에서 연구를 진행하고 있다. 무엇보다 고농도의 이산화탄소를 적은 비용으로 쉽게 포집할 수 있기 때문에 미래 기술로 각광받고 있다(Buhre, 2005).

다음은 메탄을 예로 들은 공기 연소와 순산소 연소의 화학 반응식이다.

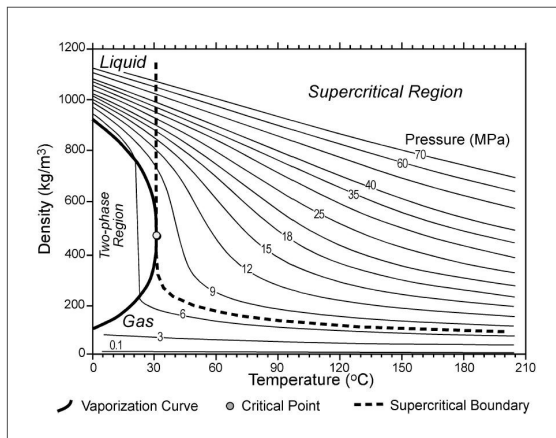


반응식에서 보여지는 것처럼, 순산소 연소에는 공기 연소와는 달리 질소가 없어 연소후 이산화탄소와 물만 생성된다. 공기 연소에서는 질소가 같이 연

소되기 때문에 연소열이 메탄과 산소, 질소 세 부분에 나누어진다. 반면 순산소 연소는 메탄과 산소에 만 연소열을 전달하면 되기 때문에 공기 연소에 비하여 연소의 효율이 좋아질 수 있다. 반면 연소도중에 매우 높은 온도를 유지하기 때문에 연소기의 손상이 문제가 될 수 있으며, 산소의 제조 단가가 상대적으로 높아서 향후 좀 더 기술 개발이 이루어져야 하는 부분일 것이다.

3. 수송기술

수송은 이산화탄소 포집 시설과 저장 장소를 연결하게 되는데, 때에 따라서 육상의 배출원으로부터 바다 밑 지층까지 장거리로 많은 양의 유체가 이송되기 때문에 누출에 대한 안전이 무엇보다 중요시된다. 액화 이산화탄소의 특성은 기본적으로는 액화천연가스와 유사하여 수송기술에는 큰 장벽이 없을 것으로 판단되나, 천연가스에 비해 거래가격이 낮아 가격경쟁력확보를 위한 기술개발이 필요하다(IPCC, 2005).



<그림 2> 온도 압력 및 밀도에 따른 이산화탄소의 상분포도 (Tsang, 2002)

이산화탄소는 온도 및 압력에 따라서 3가지의 대표적 상인 기체, 액체, 고체의 상태로 수송될 수 있다. 대기압 상태에서는 부피가 매우 크고 압력이 높아지는 경우 상이 가스나 액체로 변화하여 조정에 문제가 발생하므로 일반적으로 액체상태로 이송하게 된다.

이산화탄소를 이송하는 방법으로는 배를 이용하거나 혹은 파이프를 연결하여 저장지까지 이송하게 된다. 장거리의 경우 배가 (약 400km이상) 좀 더 저렴하지만, 포집지역과 저장소의 거리가 멀지 않은 경우 파이프가 더 효율적이다. 즉, 포집지역과 저장소의 거리가 전체 프로젝트의 가격을 결정할 수 있다.

4. 저장기술

4.1 지중저장

지중에는 포집된 이산화탄소를 저장할 수 있는 많은 수의 잠재적인 지질학적 저장소가 있다. 여기에는 고갈되거나 사용하지 않는 석유층이나 가스층, 심염대수층과 쓰이지 않는 석탄층까지 포함된다. 지질학적 저장소의 세계적 수용 능력은 <표 1>에 IPCC에 의해 2000~2050년 사이에 예측된 이산화탄소 총 방출량과 비교되어 나타나 있다.

이 저장능력에 대한 추정치는 이산화탄소의 지중

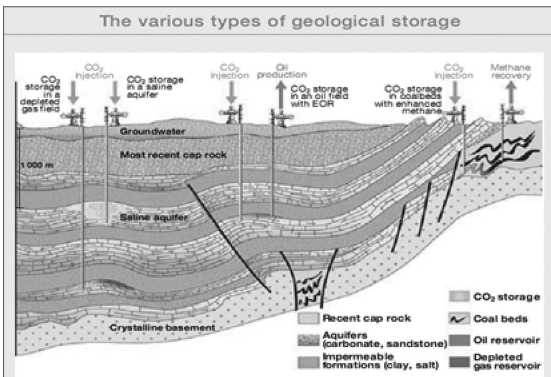
저장이 이산화탄소 저감에 상당한 영향을 줄 수 있다는 것을 보여준다. 그 중 심염대수층은 많은 잠재성을 가지고 있다. 그러나 <표 1>에서 보면 대수층의 이산화탄소저장 능력에 불확실성이 고려되고 있다. 고갈된 석유와 가스층도 저장해야할 이산화탄소의 많은 양을 수용할 수 있으므로 많은 잠재성을 가지고 있다. 반면, 난채굴성석탄층(Unminable coal seams)은 이산화탄소저장에 많은 잠재성을 가지고 있지 않다는 것을 알 수 있다. 그러나 석탄층의 어떤 부분은 이산화탄소를 지리적으로 안전하게 저장할 수 있는 기회를 제공할 수 있기 때문에 함부로 판단해서는 안된다.

주입된 이산화탄소는 사암이나 탄산염 광물들과도 반응하지 않는 것으로 생각되어 저장소내에 물리적으로 가두어질 것이다. 물리적으로 가두는 것은 주입된 이산화탄소가 저장소 내에 영구적으로 유지될 것이 확실하다면 기대할만 하다. 이산화탄소를 가두고 있는 몇몇 광물들(2~8%)은 이산화탄소를 물리적으로 보호할 수 있는 기간이 일찍 끝날 수 있다(5~25년). 그 후 반응은 더 느려지고, 추가적인 반응은 수 천년이 지나야 할 것이다. 그러나 저장소 안에 주입된 이산화탄소에는 용해가 일어날 것이다. 주입된 이산화탄소는 부력으로 위쪽에 있는 암석아래 집중된다. 그리고 점차적으로 암석 아래에서 퍼지며 얇은 층을 만들 것이다. 시간이 지나면 이산화탄소는 대수층을 만나게 되고 용해될 것이다. 25년동안 이산화탄소의 10~25%가 용해될 것이다.

<표 1> CO₂ 저장방식에 따른 저장 가능량 및 저장가능기간 추정치(강성길 외, 2008; IPCC, 2005)

저장방식	용량(Gt CO ₂)	저장가능기간(year)
유전 및 가스전	675-900	>100,000
심염대수층	1,000-10,000	>100,000
난채굴성석탄층	3-200	>100,000
해양(분사, 저류식)	2,300-10,700	up to 1,000

이산화탄소의 완전한 용해는 수 천년 뒤에 일어날 것이다. Sleipner에서 Utsira층의 시물레이션 연구는 3000년 후에 이산화탄소가 최고치에 이를 것이고, 그 후 이산화탄소의 용해로 인해 줄어든다고 나타났다. 이 연구의 중요성은 주입된 이산화탄소의 대부분이 수천년동안 저장소 안에 가스로 남아있을 것이라는 점이다. 그러나 이산화탄소의 2-3%는 공극을 통하여 남아있을 것이다. 이것은 잔존기체포화라고 부른다.



〈그림 3〉 The various types of geological storage (http://www.total.com/static/en/medias/topic1612/Total_2007_CO2_capture_storage.pdf)

이산화탄소는 이미 석유를 뽑아내기 위해서 석유층에 주입되었다. 이산화탄소의 일부는 남아있는 석유에 녹아들어가 석유를 회수하는 일을 더 쉽게 해준다. 일반적으로 주입된 이산화탄소의 전부가 석유층에 남아 있지 않고, 일부는 석유를 추출할 때 빠져 나오게 된다. 미국의 CO₂-EOR의 결과는 주입된 이산화탄소부피의 30%에 해당하는 석유가 뽑아졌다고 나타났다. 미국에서 대부분의 CO₂-EOR 계획은 이산화탄소가 주입되기 전에 물을 사용한 첫 번째 회수계획을 시행했을 것이다. 그러므로 마치 대수층에서 일어나는 현상과 같이 저장지역의 간극을 채우

고 있는 물에 의한 이산화탄소의 추가적인 저장 가능성이 있다. 현재까지 CO₂-EOR 계획에서 이산화탄소 저장능력을 최대로 구현하는 것에 중점을 두었다. Weyburn Monitoring Project는 석유 저장소에 이산화탄소를 저장하기 위한 가능성을 증가시켜주고, 좀 더 상세하게 살펴볼 것이다. 만약 사용하지 않는 석유층에 포화된 물이 있다면, 주입된 이산화탄소는 대수층에서와 같은 거동을 보일 것이다.

가스층은 높은 회수율(80~90%)을 갖는다는 점에서 석유층과는 다르다. 닫힌 저장소에서 물의 유입과 함께 저장소 안의 가스는 없어지고 간극수압은 낮아질 것이다. 이 경우 주입된 이산화탄소는 천연 가스에 의해 채워져 있던 간극을 채울 것이고, 수천년동안 초임계상태로 남아있게 될 것이다. 압력이 물의 유입으로 유지되는 열린 저장소는 부분적으로 물이 포화되어 있을 것이고 주입된 이산화탄소가 대수층에 저장된 것처럼 거동할 수 있다. 석탄층에서는 주입된 이산화탄소가 두 가지 방법에 의해 가두어질 수 있다. 석탄의 표면에 흡착되어 CH₄로 바뀌는 것과 석탄안에 물리적으로 고정되는 것이다. 석탄을 채굴하지 않는다면 이산화탄소는 영원히 석탄층에 남아 있을 것이다.

정리하자면, 많은 저장소(대수층이나 버려진 석유, 가스층)에 주입된 이산화탄소는 완전히 용해되기 전에는 몇천년동안 초임계상태로 존재할 것이다. CO₂-EOR 사업은 많은 이산화탄소를 석유안에 용해시켜 잡아두려고 한다. 그래서 자유로운 상태의 이산화탄소 양을 적게 하려고 한다. 석탄층은 이산화탄소를 물리적으로 잡아두기도 하고, 석탄 표면에 화학적 흡착에 의해 잡아두기도 해서 아주 훌륭한 저장소처럼 보인다. 만약 이산화탄소가 수천년동안 초임계상태로 저장소안에 존재한다면, 저장소 밖으로 이동할 가능성이 있다. 그러나, 만약 많은 저장소들이 수천년동안 탄화수소나 액체를 저장하

고 있다는 것을 생각한다면 주입된 이산화탄소도 유사한 시간동안 남아있을 가능성이 있다. 많은 양의 가스 저장소가 많은 양의 가스를 저장했고, 이산화탄소가 안전하게 저장될 수 있다는 신뢰를 주고 있다.

석유와 가스 저장소는 상의 변화가 잘 나타나는 반면, 대수층에서는 잘 나타나지 않는다. 가스 저장을 위한 대수층의 건설비용은 대개 석유나 가스층을 사용하는 것보다 훨씬 높다. 왜냐하면 대수층이 저장소로서 적합한지에 대한 지질학적 조사가 필요하기 때문이다. 대수층의 저장소로서의 가능성을 특성화하는 일에 대하여 기존의 지식을 모두 사용하여 보호층의 강도와 캡락의 특성을 확인하고, 저장소들을 지도에 효과적으로 표시하는 등의 광대한 작업이 필요하다.

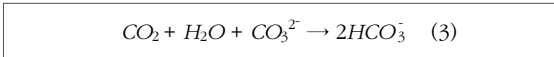
4.2 해양저장

이산화탄소의 30%는 공기중으로 방출되고, 마지막에는 바다속으로 가게 된다. 그로인해 바다의 pH는 줄어들고 바다속 유기체들에게 영향을 끼친다. 이에 대한 해결책은 매우 깊은 바다에 이산화탄소를 넣는 것이다. 2,750m보다 낮은 깊이에 주사된 이산화탄소 액체는 바닷물보다 가벼워 표면으로 올라가

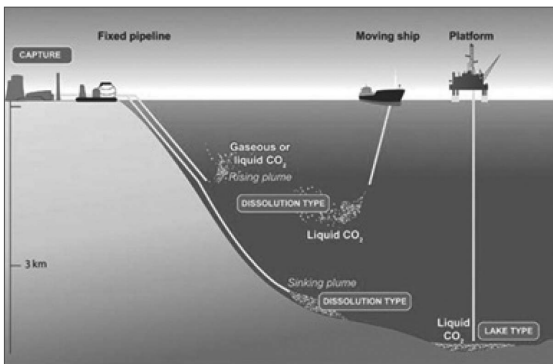
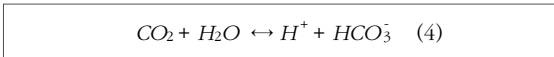
대기중으로 방출되려는 성질이 있다. 하지만 이산화탄소는 바닷물보다 압축성이 커서 2,750m보다 깊은 곳에 방출한다면 오히려 바닥을 향해 가라앉을 것이다. 이렇게 형성된 이산화탄소 호수는 하이드레이트층으로 덮이게 될 것이다. 이것은 이산화탄소가 대기로 나가는 것을 늦추는 경향이 있지만, 이산화탄소는 점점 확산될 것이고, 결국 대기를 향하여 나가게 될 것이다. 몇몇 연구자들은 이산화탄소가 밀도가 높은 액체가 되거나 하이드레이트가 되어 움직이지 않도록 3,000m보다 깊은 심해저의 퇴적층에 이산화탄소를 주입하는 것을 고려하고 있다. 3,000m 아래의 해저 퇴적층에 저장하는 것은 이산화탄소를 수천년간 격리시킬 수 있을지도 모른다.

해양저장과 생태학적 영향의 관계는 아직까지는 정확하게 밝혀지지 않았다. 비록 해양저장이 이산화탄소 저장에 큰 잠재력을 가지고 있을지라도 환경적 영향과 해양 생태계에 일어날지도 모르는 어떤 문제들이 얼마만큼의 이산화탄소를 저장할지를 결정하게 된다. 또한 심해 저장은 연구단계에 있고, 100리터도 안되는 적은 규모의 실험을 크게 확대한 것과 이산화탄소를 Gt단위로 주입하는 것의 차이는 아무도 모른다. 깊은 바다에 이산화탄소를 주입하는 것은 해양의 화학조성을 국지적으로 바꿀 수 있고, 수백 Gt의 이산화탄소가 주입된다면 해양 전체가 바뀔 수도 있다.

예를 들면, 해수에 이산화탄소를 주입하게 되면 중탄산염 이온으로 바뀌게 된다.



또, 이산화탄소는 다음과 같은 환원을 거치게 된다.



<그림 4> 해양저장의 모식도(IPCC, 2005)

가장 중요하고, 빠른 효과는 물의 산성도가 증가하여 pH가 낮아지는 것이다. 유기체의 종류는 pH에 의존하여 바뀌기 때문에 낮은 pH는 해양의 유기체를 해칠 수도 있다. 넓은 범위에서 보면 희석율은 해양의 흐름에 의해 결정되기 때문에 화학적이고 물리적인 영향은 해순환 모델과 함께 평가되어야 한다. 예를 들면, 이산화탄소가 연간 0.1Gt이 주입되고, 해양의 부피가 0.1% 상승할 때 pH는 100년보다 0.3씩 내려갈 수 있다(Caldeira et al., 2005). 심해의 이산화탄소 저장은 심해의 생태계에 심각한 영향을 줄 수 있다. 심해의 유기체들은 매우 천천히 성장하고, 그들의 신진대사율은 느리고 수명은 해양의 다른 곳의 유기체들보다 길다(IPCC, 2005). 진화하는 동안 심해 생태계의 생물들은 일반적으로 변함없는 온도와 압력, 상대적으로 일정한 이산화탄소 농도라는 특별한 상황에 적응해왔다. 그런 일정한 환경의 변수는 빠른 적응 능력을 필요로 하지 않는다. 그러므로 심해에 이산화탄소를 저장함으로써 우려되는 것은 이산화탄소가 저장소로부터 누출되고, 생태계에 치명적 영향을 주며, 환경은 그 변화로부터 회복되는 데 오랜 시간이 걸린다는 것이다(IPCC, 2005). 심해 생물의 형태나 상호작용에 대해

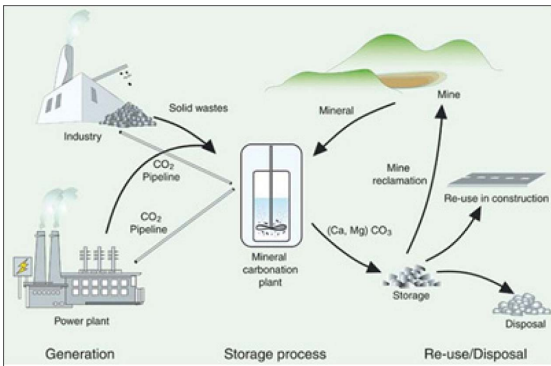
일반적으로 알려지지 않았다. 지금까지 해양의 생태계에 이산화탄소가 주는 직접적인 영향은 주로 실험실에서 조사되었다. 소규모의 이산화탄소 실험들을 제외한 현장 관측을 포함한 연구들이 매우 부족하다(Pörtner, 2005).

4.3 탄산염 광물화

탄산염 광물화는 산화 마그네슘이나 산화 칼슘과 같은 알칼리성과 알칼리토산화물을 사용하여 이산화탄소를 고정시키는 것을 의미한다. 이로 인해 사문석이나 감람석과 같은 규산염 광물들이 자연스럽게 생긴다. 이런 물질들과 이산화탄소 사이의 화학적 반응은 탄산칼슘(CaCO₃, 석회석)과 탄산마그네슘(MgCO₃)과 같은 합성물질을 만들어낸다. 지구의 지각에서 발견할 수 있는 모든 규산염 암반안에 있는 금속 산화물의 양은 이용가능한 모든 화석 연료를 연소시켜 생산되는 이산화탄소를 고정시키는 데 필요한 양을 능가한다. 이러한 산화물은 또한 스테인리스 스틸의 광재(鑛滓)나 재 같은 산업 폐기물로 나타난다. 탄산염 광물화는 이산화규소와 탄산염을 생산한다. 이들은 오랜시간 동안 안정해서 규산염 광산처럼 퇴적될 수 있고, 건설현장에 다시 쓰일 수 있다. 탄산염이 된 후에 이산화탄소는 대기로 방출되지 않을 것이다.

결과적으로 처분 지역을 감시할 필요가 거의 없어지고, 여러 가지 위험이 낮아진다. 저장의 잠재력은 선불리 판단할 수 없다. 그것은 기술적으로 극복할 수 있는 규산염 보존의 일부에 의해, 처분되는 물품의 환경적 문제에 의해, 저장 지역의 법적, 사회적 제약들에 의해 제한될 것이다.

‘풍화’라고 알려진 탄산염 광물화의 과정은 자연적으로 매우 느리게 일어난다. 그러므로 이것을 이산화탄소 포집과 저장의 방법으로 쓰기 위해서는 상당히 빠르게 해야만 한다. 그러므로 탄산염 광물



〈그림 5〉 탄산염 광물화와 관련된 원료의 이동 과정 (IPCC, 2005)

화에 대한 연구는 좀더 효율적인 반응을 만드는 것과 산업적 목적에 맞게 반응을 빠르게 할 수 있는 과정을 찾는 것에 초점을 맞추고 있다. 자연의 규산염을 이용한 탄산염 광물화 기술은 연구단계에 있지만, 산업 폐기물을 이용한 몇몇 과정은 실증 단계에 있다.

상용과정은 채굴하고, 분쇄하는 과정을 필요로 할 것이다. 그리고 그들은 포집 플랜트로부터 농축된 이산화탄소를 받아서 처리 플랜트로 이동하게 된다. 탄산염 처리에 필요한 에너지는 포집 플랜트에서 나오는 양의 30-50%가 될 것이다. 이산화탄소 포집을 위한 추가 에너지 요구량을 고려하면, 탄산염 광물화의 CCS 시스템은 포집과 탄산염 광물화가 없는 전기 발전소에서 생산하는 것보다 60-180% 많은 에너지를 요구할 것이다. 이 에너지 요구 조건은 이산화탄소의 ton당 가격을 올린다. 지금까지 연구된 최고의 경우는 천연 규산염 광물인 감람석의 습식 탄산염 광물화 반응이다. 이 처리에 소요된 비용은 이산화탄소 1ton당 약 50-100 USD로 평가되었다. 탄산염 광물화 과정은 이산화탄소 1ton 당 규산염 광물 1.6-3.7ton 이 요구되고, 탄산염 2.6~4.7ton 이 생산된다. 그러므로 이것은 현재 대규모의 광산업들과 환경에 주는 영향이 유사하다고 볼 수 있다. 또한 사문석은 운석면(chrysotile, 석면의 천연 형태)을 포함한다. 이 때문에 감시와 이것을 이용할 수 있도록 하는 광산업의 완화 대책이 필요하다. 반면 탄산염 광물화로 생성된 사문석은 운석면을 포함하지 않는다.

5. CCS의 제한 요소 및 해양환경 영향평가

CCS는 화석연료를 지속적으로 사용하여 경제성을 유지하고 기후변화의 악영향을 최소화하기 위

해 가장 촉망받는 기술인 것은 사실이다. 그러나, 이러한 대형 기술이 성공하기 위해 검토해야 할 제한 요소를 살펴보고자 한다. 또, 우리나라의 여건 상 육상 CCS가 거의 불가능하기 때문에 해양에 이산화탄소를 저장하는 연구가 진행 중인데, 해양 CCS에서 발생할 수 있는 법적, 사회적 제한 요소를 살펴보고, 사업 수행에 필요한 환경영향평가기법을 소개하고자 한다.

5.1 경제적 제한 요소

대규모 CCS 프로젝트 설립은 대규모의 기반 시설과 금융 체계를 필요로 할 것이다. 전력 발전소나 산업 지역과 같이 대량으로 이산화탄소를 배출하는 오염 시설들은 CCS 기술들을 적용시킬 필요가 있다. 이를 위해서는 먼저 기존의 시설에 이산화탄소 포집 시설을 추가하여야 한다. 포집된 이산화탄소를 적합한 저장장소로 수송할 수 있는 새로운 파이프라인의 건설도 필요할 것이다. 이렇게 기존 시설에 새로운 시설을 추가하는 것만으로도 오염 에너지원이 친환경 에너지원으로 변할 수 있다. “CCS기술의 가장 경쟁력 있는 점은 현재 존재하는 에너지 기반 사업들과 상호 호환가능하다는 점이다”라고 IPCC 보고서는 말하고 있다(IPCC, 2005).

이산화탄소를 포집하고, 압축하고, 수송하는 모든 과정을 처리하기 위해서는 추가의 에너지가 필요하다. 이중 가장 비싼 과정이 포집하는 과정인데, 앞으로 연구와 기술 발전으로 줄일 수 있다(Parliamentary Office of Science and Technology, 2005). IPCC는 CCS기술이 점목된 플랜트가 그렇지 않은 플랜트보다 10~40% 더 많은 에너지를 사용할 것이라고 추측한다(IPCC, 2005). 이런 에너지 추가 비용은 이산화탄소 포획 및 압축과 관련이 있다. 그러나, CCS기술이 점목된 플랜트는 그렇지 않은 플랜트에 비해 이산화탄소 방출량이 대략 80~90% 정도 감소한다(IPCC, 2005).

예상 밖으로, 몇몇 온실가스 방출 산업체들은 CCS와 같은 이산화탄소 경감 기술에 투자하고 있다. 현재 Canada의 CCS의 가격은 연방 정부가 책정한 15\$의 탄소 가격을 초과한다. 하지만 CCS기술이 발전해서 대기로 방출하는 가격과 CCS의 설치 및 운용 가격이 비슷해지기 전까지 대기로 방출하는 산업체들의 수가 우세할 것이다. CCS기술이 발전하여 탄소 방출 가격과 비슷해질 때까지 산업체는 CCS 기술에 투자를 아낄 것이다.

5.2 법적 제한 요소

CCS의 가장 주요한 법적 제한 요소는 저장된 이산화탄소가 누출될 경우 장기적인 책임이 있을 것이라는 것이다. 이산화탄소의 저장은 장기 프로젝트이다. CCS 시설의 책임자는 먼 미래에 이산화탄소가 누출될 때 존재하지 않을 지도 모른다. 이산화탄소 누출의 장기적인 책임에 대한 문제는 아직 규정되어지지 않았다(IPCC, 2005). 법률은 감시와 보고에 대한 책임을 추가할 필요가 있을 것이다. 하지만 몇몇 지역에서는 이런 유사한 행동들을 규정하는 법적 체제가 있다.

예를 들면 미국의 주 사이를 관통하는 파이프라인의 위험 물질이나 지하 주입에 관한 제어 권한은 주에 있는 것이 아니고 국가가 가지고 있다. 이것은 이산화탄소 저장 사업의 활성화를 위해서이다(IEA/OECD, 2004).

지하나 해양의 저장 시설은 국가 간의 경계를 넘어설 것이다. 감시와 환경적 책임을 둘러싼 국제법적 문제는 CCS 어플리케이션이 출현할 때마다 나타날 것이다. 예를 들어 우리나라에서 추진중인 동해 지역의 CCS사업에서 이산화탄소가 대량 유출되거나, 혹은 연장된 대수층이 일본 영해상에서 누출될 경우 국제법적 문제가 발생할 수 있다.

5.3 CO₂ 수송 및 저장에서의 누출

모든 인간이 쓰레기를 만들어내고, 쓰레기는 환경 파괴의 주범이 되었다. 인간은 이산화탄소를 다른 생명체들보다 방대한 양으로 만들어내고 많은 부분에서 환경적으로 위험한 것으로 나타나고 있다. 만약 짧은 시간동안 많은 양이 방출된다면, 이산화탄소는 인간을 포함한 다른 동, 식물들에게 치명적일 수 있다(Griffiths et al., 2005). 만약 공기중의 산소가 모두 이산화탄소로 대체된다면 치명적일 것이다. 따라서 큰 규모의 이산화탄소 저장은 넓게 보면 국소적이지만 잠재적으로 중요한 환경 변화들을 수반할 수 있다. 지하저장 기술은 현재 에너지 산업의 기술적 경험을 넘어서고 있다. 이산화탄소를 장기적으로 저장해 본 경험이 없고, 이것이 안전할 것이라고 보장할 수 있는 근거도 없다(IEA/OECD, 2004).

가장 첫 번째로 언급될 사항은 지중저장 후 누출 가능성이다. WCSB(Western Canadian Sedimentary Basin)와 같은 활동성 천공 지역에서 다중 드릴 구멍은 시간이 지날수록 캡락의 약화를 초래하여 이산화탄소가 누출될 수 있다. 우물이나 버려진 우물의 기계적 결함은 지하 가스 저장 시설로부터 누출의 보편적인 원인이 되어왔다(Griffiths et al., 2005). 이산화탄소는 부식성이 있기 때문에 저장소를 덮고 있는 콘크리트 덮개를 부식시키고 누출될 가능성이 있다. 이산화탄소의 대규모 주입이 증명되지는 않았지만, 이러한 과정에 의해 생긴 압력이 지진을 일으키는 원인이 되기도 한다(IPCC, 2005).

지역적 규모에서 저장 지역으로부터 이산화탄소의 누출은 건강에 위협을 준다. 이산화탄소는 공기보다 밀도가 높아서 밑으로 가라앉는 경향이 있다. 만약 환기가 잘 되지 않는 어떤 지역의 이산화탄소 농도가 3%이상 이 된다면 그 지역은 위험 지역이 된다. 이것은 이산화탄소의 파이프라인에도 적용된

다. 밀집지역을 통과할 때 경로의 선택이나 과압력에 대한 보강, 누출 탐지 등은 중대한 문제가 된다.

예로서, 1986년에 Cameroon의 Nyoos 호수 활화산 지역에서 발생한 이산화탄소 누출사건이다. 호수 바닥에 쌓인 이산화탄소의 막대한 양이 갑자기 방출되었고, 25km 범위내에 있는 1,700명의 사람과 수천마리의 가축들의 목숨을 빼앗았다. 지표까지 올라온 이산화탄소는 지하수를 오염시키고, 지표상의 동식물에게 치명적인 영향을 줄 수 있다. 토양의 산성화와 뿌리영역 호흡의 억제도 화산에 의한 지진지역에서 보고된 바 있다. California의 Mt. Mammoth에서는 몇몇 작은 지진에 의한 이산화탄소 방출로 100에이커의 나무가 죽은 바 있다. 이산

화탄소의 이동은 물을 산성화하고 유동성의 증속을 동기화할 수 있다. 가스주입은 압력을 변화시키고, 염수를 이동시키고, 지진활동을 야기할 수 있다.

이산화탄소의 농도 수준에 따른 효과는 대부분 해양 표면 근처의 유기체들에 한해 수개월의 시간 단위로 연구되었다. 석회화, 생식, 성장, 산소의 순환과 이동과 같은 것들의 비율이 줄어드는 현상이 발견되었고 이것은 사망률을 증가시켰다. 몇몇 유기체들에서는 이산화탄소가 조금만 추가되어도 이런 효과가 나타났다. 이산화탄소 누출 지점에서는 즉각적인 현상이 나타날 것이다. 주입지역으로부터 멀리 떨어진 지역에서는 긴 시간동안 이산화탄소가 쌓이면서 낮은 확률로 만성적 효과가 나타날 것이

〈표 2〉 천연가스 저장소 및 자연 이산화탄소 매장지에서의 누출사고

부지	CO ₂ / CH ₄ source	저장을 위한 지질학적 모델	누출 사건	누출 경로	표면 누출 형태	CO ₂ / CH ₄ 누출량	방출 영향	모니터링 및 개선방법
Paradox Basin, UT, USA	탄산염의 열분해	이판암/시트암에 의해 덮혀있는 사암층으로 이루어져 있는 저장고	정 폭발	정	저온성 간헐천	수정 간헐천: 33ton/day	NA	대기 CO ₂ 농도 측정
Florina Basin, Greece	탄산염의 열분해	실트/점토에 의해 덮혀있는 석회암/사암층으로 이루어져 있는 저장고	정 폭발	정	정 주변 우물, 토양으로부터 CO ₂ 누출	알려지지 않음	1명 사망	사람들 접근금지
Torre Alfina geothermal field, Italy	지열	이판암, 이회토, 석회암 순으로 덮혀있는 660m 깊이의 지열 저장고	정 폭발	정	정로부터 CO ₂ 자유유동	25,000 ton	NA	탐사정의 시멘트 접합
Travale geothermal field, Italy	지열	낮은 투수성의 퇴적암에 의해 덮혀있는얕(1000m) 퇴적층 저장고	정 폭발	정	정로부터 증기와 가스의 자유유동	알려지지 않음	NA	정로부터 배출된 유체의 온도, 압력 등을 모니터링
Yaggy gas storage facility, KA, USA	주입된 천연가스	150~200m 깊이 염 동굴에 주입된 천연 가스	정 외 피의 균열	정과 갈라진 틈	자유 유동 /폐정에서 가스와 물의 분출	알려지지 않음	사상자 2명, 건물 손상	지구물리학적 모니터링, 우물의 밀봉
Leroy gas storage facility, WY, USA	주입된 천연가스	1000m 깊이의 사암과 백운암 대수층에 주입된 가스	정 부식	정	정 주변 물 표면으로 가스형태로 방출	1.8×10 ⁷ /m ³	NA	추적자 테스트, 감소된 주입 압력

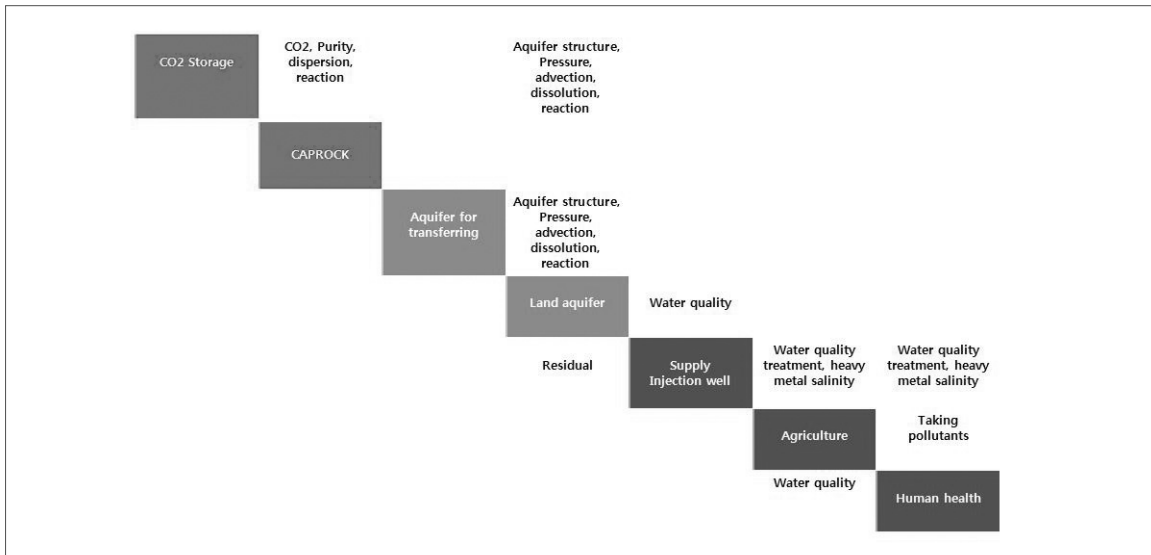
다. 하지만 깊은 바다의 유기체들에 대해서는 연구 되지 않았다. 과거 천연가스를 위한 지중저장시스템과 천연적으로 이산화탄소가 매장되어 있는 곳에서 발생한 사고를 <표 2>에 정리하였다.

CCS에서 가장 바람직한 형태는 누출이 없는 것이다. 그러나 CCS와 유사한 기술을 사용하는 지하천연가스의 역사적 기록을 토대로 하면 이런 저장 시스템은 예상치 못한 이유들로 실패했다. 이러한 역사적 자료들은 왜 영향평가와 환경감시가 필요한지를 강조해준다. 예를들면, California에서 호수에 1ton/day의 양이 방출된 결과 퇴적층에 화학적 온도변화를 가져왔고 그 결과 4명이 사망했다. 1950년에 프랑스에서는 천연가스 저장소에서 7번의 누출 사고를 경험했다(Jennifer et al., 2006). 최근 CCS의 사고는 Norway에서 보고되었다. 이산화탄소를 주입하는 동안 CCS의 방법으로서 Enhanced Oil Recovery System이 사용되었고, 압력이 과하게 가해져서 석유와 가스 175 ton이 방출되고, 지질 시스템은 무너졌다(Reuters, 2009).

CCS의 심각한 피해를 예방하기 위해서 IMO(International Maritime Organization)는 London protocol 96 가입국 회원의 동의를 토대로 risk assessment protocol을 채용했고, 이것은 표준(IMO 2006)으로 승인되었다.

이산화탄소 누출의 경로는 <그림 6>과 같이 matrix를 이용하여 각기 요소를 파악하게 된다. 일반적인 지중저장소에서의 누출을 정리하면 다음과 같다.

- 저장소 누출 : 지질학적인 단층(Geological faults)의 영향으로 인해 긴 시간동안 느리게 이산화탄소 저장 지역으로부터 누출이 된다.
- 갑작스런 누출 : 이산화탄소 주입에 실패함으로써 저장 지역으로부터 대량의 이산화탄소가 솟아오른다.
- 이산화탄소가 새어나와 얇은 지하수(shallow groundwater)로 녹아 들어간다.
- 해수의 전이, 금속과 유기물의 동원, 해수 혹은



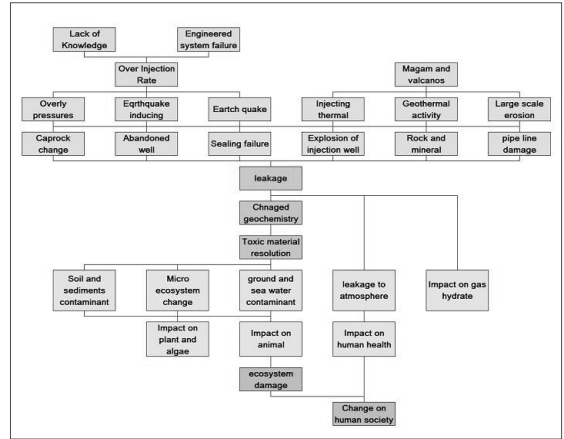
<그림 6> FEP 분석을 위한 Matrix 요소 분석

퇴적층 위를 덮는 음용수를 오염시킨다.

- 함께 포집된 위해 배기가스의 누출

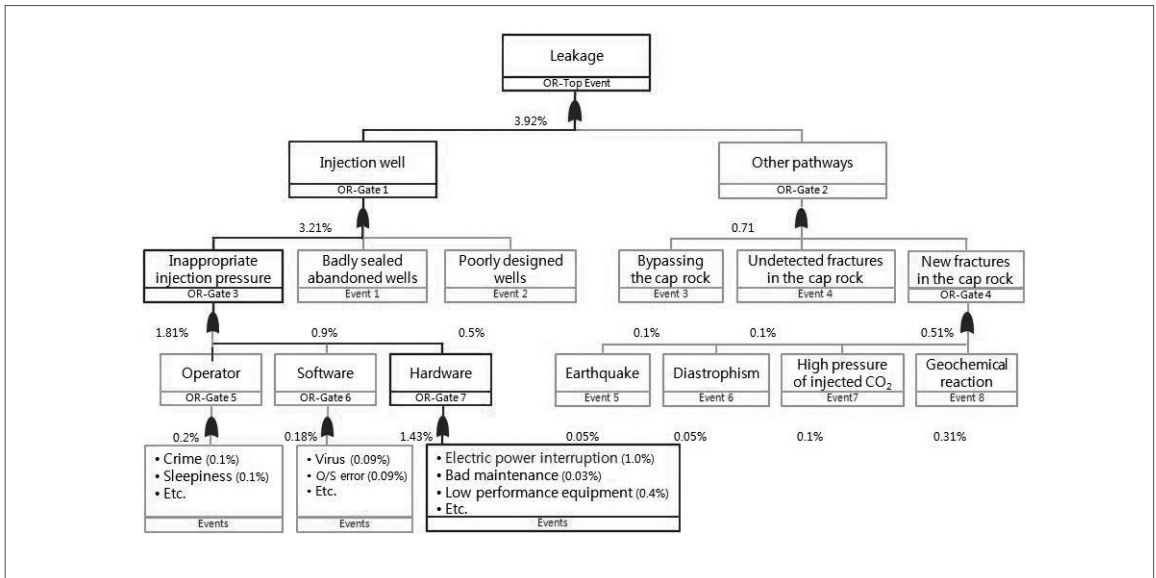
이렇게 요소 분석의 작업과 시나리오가 각 공정단계에서 이루어지면 Featured Events and Process (FEP) 분석을 통해 전체 주요 인자를 도출하게 되고 상호 연관성을 <그림 7>과 같이 도식화한다. FEP 분석은 시나리오에 근거하여 전체 위험 인자를 인지하는 과정이며, 이렇게 인지된 요소들을 다시 fault tree 분석을 통해 확률에 기반하여 정량적 시나리오별 누출 시나리오를 구성하게 된다<그림 8> 참조. 여기서 각 경로별 최대발생가능성을 도출하게 된다.

이산화탄소 누출과 관련된 특별한 환경적 위험은 세계적, 지역적이라는 2개의 그룹으로 나눌 수 있다. 세계적 규모에서 이산화탄소의 지속적인 누출은 기후변화 경감을 위한 노력을 해칠 수 있는 가능성이 있다. 약간의 누출은 수용가능할지 모르지만,



<그림 7> Features Events and Process tree for designing the offshore geological carbon storage (황진환 외, 2010)

어디까지나 한계 안에서만 가능한 일이다. 1% 이하의 누출률도 높게 평가될 수 있다. 이 정도의 누출률이 100년동안 지속된다면 100년 후에는 이산화탄소 저장량의 37%가 줄어들게 된다.



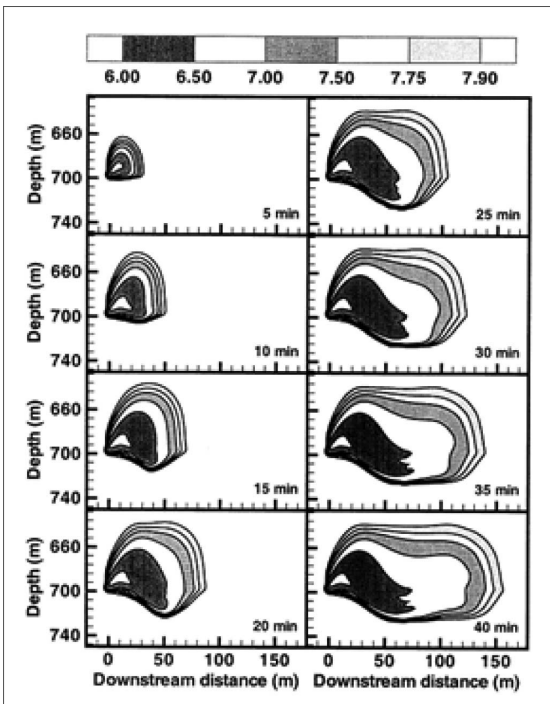
<그림 8> 이상일 외(2009)에서 수행한 Fault tree 분석. 분석요소의 확률은 일반 플랜트에 적용된 확률에 기반하여 도출하였다

5.4 해수내 다상유체 (Multiphase fluid)의 거동

순도 90%이상의 이산화탄소유체의 해양으로의 유출은 해양환경영향 평가, 환경위해성 평가 등의 기반자료가 될 뿐 만 아니라, 이를 위한 모니터링 지역과 누출에 대한 설계 기준, 저장소 부지 선정 등에 중요한 기초를 제공한다. 해수내 다상유체 모의의 어려움은 해양에서 깊이에 따라 온도 및 압력이 변하고 이에 따라 이산화탄소의 상이 지속적으로 변화하는 데 있다. 수심 450m 보다 얕은 곳에서는 이산화탄소가 기체상태로 존재하고 이보다 깊은 곳에서는 액체상태로 존재하게 된다. 물론 약 3000m 정도에서는 하이드레이트 상태로 존재하게 되는데, CCS 플랜트에서 주입정까지의 깊이는 프로젝트별로 다양하며, 어디에서 누출이 발생하느냐에 따라

확산범위 및 확산농도 등이 변하게 된다.

또한, 이산화탄소는 해수내에서 빠르게 용해되어 주변 pH를 바꾸는데, 깊이에 따라서 해수의 조성이 바뀔으로써 pH 변화도 예측하기 매우 어렵다. Alendal and Drange (2001)는 해양지중저장의 누출을 모의하지는 않았지만, 심층방류 분사방식에서의 이상 이산화탄소의 거동을 모의하였다. 누출되었을 때는 기체, 유체, 하이드레이트 형태로 변화하고 특히 기체와 유체가 혼합된 형태 혹은 공기방울 크기의 하이드레이트 형태로 변화하게 되는데, 이러한 부분에서 다상유체의 해석을 시도하였다. 이렇게 유출된 이산화탄소는 근 거리내에서 해수로 용해되고 주변의 pH를 낮추게 된다(그림 9)참조. 낮아진 pH는 해수의 산성도를 높임으로써, 주변 생태계에서 패각류의 성장, 무척추동물군의 발생 등 다양한 형태의 영향을 주고, 고농도의 이산화탄소 자체가 각종 동식물의 치사율을 높이게 된다.



〈그림 9〉 누출된 CO₂에 의한 거리 및 시간별 pH 변화 모의 (Alendal and Drange, 2001)

6. 결론 및 정리

CCS는 증가하는 이산화탄소의 대기중 배출을 억제함으로써 기후변화의 영향을 저감하는 대표적 수단이다. 앞으로 50년 동안 이산화탄소 누출 레벨을 유지하는 다섯 개의 전략들이 계획되어 있다. 에너지 보존, 재생가능한 에너지, 자연 정화능력의 강화, 핵에너지와 화석연료의 탄소 관리가 그것이다 (Socolow & Greenblatt, 2004). 이중 CCS는 연료에서의 탄소를 관리해주는 수단으로서 향후 몇 십년 동안 전 세계 화석 연료 소비량이 증가할 것이며 여기에 대한 가장 현실성 있는 수단이라고 볼 수 있다.

포집 단계에서의 비용절감은 전체 CCS의 경쟁력을 제공한다는 측면에서 매우 중요한 연구개발 대상이다. 해안 및 해양에서의 CCS 접근은 전체 공정

을 관리할 수는 없지만, 수송과정과 주입과정에서 발생할 수 있는 이산화탄소의 누출에 대한 관리체계를 구축할 수 있다는 점에서 중요하다. 현재 지식경제부, 과기부, 환경부와 국토해양부등 각 부처는 향후 CCS와 관련된 거대 시장에 대한 준비로서 많은 연구개발을 추진중에 있다.

해양부분에서는 공정관리보다는 설계 및 시공에 있어서의 기반 기술 확보와 환경영향평가 기법에 대한 좀 더 세밀한 연구개발이 필요할 것으로 예상된다. 특히, 해양환경영향평가 기법은 대규모 고농도의 이산화탄소를 주입하는 사업시작 이전에 먼저 이루어져야 하고, 이러한 부분에서 이산화탄소의 특성을 분석하고, 이것에 대한 영향을 규명하여 전체 사업이 안전하고 건강하고 효율적으로 진행될 수 있는 기반을 제공해야 할 것이다.

해양환경영향평가의 기반이 되는 이산화탄소의 깊이별 확산 모형 개발은 무엇보다 시급하다. 기존의 해양공학은 단상의 유체에 대한 연구를 주로 진행해왔기 때문에 다상의 성질을 갖는 이산화탄소의 해수내 거동에 대한 많은 정보가 매우 부족한 형편이다. 특히, 수치모형 등에서 사용될 수 있는 여러 가지 모수들과 현장정보의 부족은 정확한 환경영향평가를 수행하는 데 한계점으로 작용하고 있다. 전체 플랜트가 단순하게 원거리 해양에서 수행되는 것이 아니라, 육상에서부터 연결된 하나의 커다란 시스템이며 이에 대한 구체적 수송과정별 환경영향을 검토하고 비용 효율적 검출방법에 대한 연구가 현재 진행되고 있다. 특히, 우리나라는 육상영토가 협소하고 인구밀도 및 개발밀도가 높아서 육상 CCS가 불가능하다는 점에서 해상에서 이루어지는 CCS에 대한 연구개발은 지속될 것으로 판단되고, 이에 맞는 과정별 영향평가 기법의 수립이 큰 시일 내에 제공되어야 할 것이다.

참고문헌

- 김재창, 김준모, 박진원, 왕수균, 이관영, 이영무, 이창하, 정석호, 홍원희 (2008). 이산화탄소 포집 및 저장기술. 청문각.
- 민병무 (2009). 연소 후 이산화탄소 포집기술 현황. 기후변화기술연구본부. KIC News, 12(1).
- Alendal, G. and Drange, H. (2001). Two-phase, near-field modeling of purposefully released CO₂ in the ocean. *Journal of Geophysical Research*, 106(c1), 1085-1096.
- Buhre, B.J.P., Elliott, L.K., Sheng, C.D., Gupta, R.P. and Wall, T.F. (2005). Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation. *Energy and Combustion Science*, p. 285.
- Griffiths, M., Cobb, P. and Marr-Laing, J. (2005). Carbon Capture and Storage: An arrow in the quiver or a silver bullet to combat climate change?. A Canadian Primer. The Pembina Institute.
- Holliday, C., Schmidheiny, S. and Watts, P. (2002). *Walking the Talk : The Business Case for Sustainable Development*. Aizlewood's Mill, NJ : Greenleaf Publishing Limited.
- IEA (2006). *Energy Technology Perspectives 2006-Scenarios & Strategies to 2050*. OECD.
- IPCC (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press (<http://www.ipcc.ch>).
- Pörtner, H.O. (2005). Auswirkungen von CO₂-Eintrag und Temperaturerhöhung auf die marine Biosphäre. Expertise for WBGU Special Report, *The Future Oceans-Warming Up*, Rising

High, Turning Sour.

Socolow, R. and Greenblatt, J. (2004). Solving the Climate Problem: Technologies Available to Curb CO₂ Emissions. *Environment*, 46(10), 8-19.

Tsang, C.-F., et al. (2002) Scientific Considerations Related to Regulation Development for CO₂ Sequestration in Brine Formations. *Environmental Geology*, 42, 275-281.

저자 약력 황진환

- 1991~1997, 서울대 해양학 (학사)
- 1998~2001, 일리노이대학교 토목공학과 (석사)
- 2001~2004, 일리노이대학교 토목공학과 (박사)
- 2004~2005, 뉴잉글랜드 대학교 해양연구소 연구원
- 2005~2005, kimlaboratories, INC 책임연구원
- 2005~2007, 한국환경정책평가연구원 책임연구원
- 2007~현재, 동국대학교 사회환경시스템공학과 조교수

저자 약력 지현욱

- 2004~2010, 동국대학교 사회환경시스템공학과 (학사)
- 2010~현재, 동국대학교 사회환경시스템공학과 (석사과정)

저자 약력 Nguyen hoang Thao

- 2004-2008, Viet Nam National University, Colledge of Science Ha Noi, 환경과학과 (학사)
- 2009-현재, 동국대학교 사회환경시스템공학과 (석사과정)