

이산화탄소 제어기술 (Technologies of Carbon Dioxide Control)

박 상 도 · 백 일 현

한국에너지기술연구소
에너지환경연구부

ABSTRACT

Recently, many environmental problems have been reported, which are caused by the utilization of fossil fuel. Especially, carbon dioxide from fossil fuel combustion is thought to be a main source of the global warming which affects the global environment.

But fossil energy is expected to be used as fuel for some time because there is no alternative energy source available at present. So, it is inevitable to emit carbon dioxide. In this paper, the status of various technologies for the prevention of global warming related on fossil energy were investigated and analysed. To prevent global warming and its related problems, CO₂ concentration in atmosphere has to be reduced by various technologies of energy conservation and efficiency improvement, alternative energy and greenhouse gas recovery.

The regulation of CO₂ emission is the critical issue over the world. In view of the increase of the energy demand in our country, the reduction of carbon dioxide emission is very difficult but it is to be performed. The plan for the prevention of global warming must be discussed at this time.

1. 머리말

21세기 중요과제로 대두되고 있는 지구 온난화 현상은 태양열이 지구에 투과되고 반사되는 과정에서 온실가스가 반사열의 일부를 흡수하여 대기의 기온이 상승하는 것으로, 주요 온실가스로는 이산화탄소, 메탄, 아산화

질소 등을 들 수 있다. 전체 온실가스 중 과반수 이상 차지하고 있는 이산화탄소는 석탄, 석유 및 가스와 같은 화석연료를 사용함에 따라 발생되나, 메탄과 아산화질소는 유기물의 분해 및 농업생산과 같이 자연 중에 발생하므로 제어가 곤란한 상태이므로 일반적으로 온실가스라 함은 주로 이산화탄소를

말하고 있다.¹⁾²⁾

지구온난화에 지대한 영향을 미치는 이산화탄소 문제는 1988년 세계기상기구(WMO)와 국제연합 환경계획(UNEP)이 공동으로 기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC ; Inter-governmental Panel on Climate Change)을 설립하므로 본격적으로 토의되기 시작하였으며, 1992년 브라질 리우데 자네이로에서 개최된 UN환경개발회의에서 기후변화협약(UNFCCC ; United Nations Framework Convention on Climate Change)을 채택하였다. 채택된 기후변화협약은 각국의 비준동의의 과정을 거쳐 1994년 3월 21일 발효되었으며 한국은 1993년 12월 47번째 국가로 비준동의하였다. 1995년부터 해마다 기후변화협약 당사국총회(COP ; Conference Of Parties)가 개최되었으며, 1차와 2차를 거쳐 3차 당사국 총회는 1997년 11월초 10일에 걸쳐 일본의 교토에서 개최되었다.³⁾⁴⁾

3차 당사국 총회에서 채택된 교토 의정서(Kyoto Protocol)는 전문 27개의 조항 및 부속서 A, B로 이루어졌다. 주요내용으로는 선진 38개국은 2008년부터 2013년까지 5년 동안 평균 5.2%의 이산화탄소 감축의 의무화, 감축대상 가스로 6종을 선정하고 이중 이산화탄소, 메탄, 아산화질소는 1990년 기준으로 감축하고 대체 후레온가스 3종(HFCs, PFCs, SF6)은 1995년 기준으로 감축하고자 하였으며, 이산화탄소 배출량에서 산림 등에 의한 흡수량을 뺀 수치인 순배출량(Net) 방식의 채택, 국가간 공동 프로젝트 수행을 통한 온실가스 감축 공동이행(JI ; Joint Implementation) 및 국가별 배출량을 할당한 후 국가간 할당량 거래를 허용하는 배출권 거래제도

도입, EU역내 국가의 배출량에 대한 단일 감축목표를 설정하는 유럽연합 공동삭감(EU Bubble) 방식 인정, 공동이행 프로젝트에서 일정액의 수수료를 부과한 재원으로 청정개발기금(Clean Development Mechanism) 조성 등을 들 수 있다.³⁾⁶⁾

국가별 협상전략으로 소 도서 국가연합(AOSIS)와 북구 유럽국가와 같이 온실가스 배출량이 적은 나라는 온실가스 삭감에 가장 적극적이며, 미국, 네덜란드는 배출량을 줄이는 값싼 수단으로 공동이행과 배출권 거래제를 선호하였고, 원자력발전에 크게 의존하는 프랑스, 일본은 1인당 배출량 기준을 주장하였다. 이와 같이 3차 당사국 총회에서는 온실가스 감축에 따른 각국의 심각한 경제적 파급효과를 고려하여 논의 핵심인 지구환경보호 그 자체에서 벗어나 자국의 경쟁력과 경제활동을 보호하기 위한 법적 근거를 마련하고 있다는 점이 두드러졌다고 할 수 있다.

한국은 1970년대부터 본격적인 경제개발을 추진한 이래 매년 높은 경제성장률을 달성하고, 특히 1986년부터 1995년까지 연평균 8.8%의 높은 성장률을 나타내었다. 이에 따른 에너지소비량도 10.3% 증가 및 이산화탄소 배출도 연평균 8.6%씩 증가하였으며 이는 최근 10년 동안 이산화탄소 배출 증가율이 연간 10%로 세계 1위를 달리고 있다. 이와 같은 추세로 증가할 경우에는 총량 배출량으로 1990년 세계 16위에서 2000년 세계 9위, 2010년 세계 6위, 2030년에는 미국 다음으로 2위가 될 전망이다. 또한 주요국의 이산화탄소 배출전망으로 1990년 대비 2000년에는 덴마크, 네덜란드, 스위스 등 유럽의 소국가는 감소하며, 미국 3.0%, 일본 2.3%, 스

웨덴 4.1%로 한자리 수 증가 및 스페인 24.1%, 호주 16.3%, 캐나다 10.6%로 두 자리 수 증가를 보이고 있는 반면에 한국은 128%의 증가를 보이고 있다. 다행히 제 3차 당사국 총회에서 한국은 개도국의 강한 반발로 이산화탄소 배출 감축국에서 제외되었지만 경제 기반이 미약한 동유럽 체제변환국도 이산화탄소 감축국으로 참여하고 있는 마당에 경제력이나 국제사회에서의 위치로 보아 국제사회의 압력에 얼마만큼 버틸 수 있는지는 미지수이다. 또한 1996년 경제협력개발기구(OECD)에 가입협상의 일환으로 “기후변화방지를 위한 OECD의 노력에 동참할 것”을 약속한 바 있어 더욱 더 온실가스 감축의무를 회피하기는 어려운 것으로 전망된다.⁴⁶⁾

따라서 기후변화협약에 대비한 이산화탄소 저감 대응방안 마련은 현실적으로 시급히 해결하여야할 문제이며, 이를 위해 기술개발을 통한 적극적인 대안 마련은 매우 중요하다.

본 고에서는 이산화탄소에 의한 지구 온난화 현상과 표 1에서와 같이 석탄, 석유 및 가스와 같은 화석연료 사용 후 발생하는 이산화탄소를 저감하기 위한 발생 전 억제기술(청정에너지 기술, 에너지절약 기술 및 대체에너지 기술), 발생 후 처리기술로 구분하여 기술하고, 특히, 억제기술은 그 분야가 다양하고 기술의 범위가 넓기 때문에 중심기술을 요약정리하고 화석연료 연소 후 발생하는 가스상의 이산화탄소를 제어할 수 있는 기술을 중심으로 기술하고자 한다.

표 1. 이산화탄소 저감기술 분류

이산화탄소 발생 전·후 기술	관 련 기 술	세 부 기 술
발생 전 억제기술	청정에너지 기술	청정 석탄 이용기술 청정 석유 이용기술
	에너지 절약 기술	산업 에너지기술 건물 에너지기술 수송 에너지기술 전기 에너지기술
	대체에너지 기술	자연에너지 이용기술 신에너지 이용기술 폐기물에너지 이용기술
발생 후 처리기술	이산화탄소 처리기술	분리/회수 기술 폐기 기술 고정화 기술

2. 이산화탄소와 지구 온난화 현상

태양으로부터 발산되어 온 태양 에너지파는 지구에 의하여 일부는 흡수되고 일부는 재 반사되는데, 이들 반사파 중에서 단파장의 반사파는 문제없이 외계로 방사되나 장파장의 반사파와 지구에서 발산되는 원적외선(파장 ; 4~100 μ m)의 에너지파는 지구 온난화 가스(GHG ; greenhouse gas)에 의하여 흡수되어 지구의 대기온도를 상승시키게 하는 현상을 지구 온난화 현상이라고 한다.³⁾

2.1 대기의 온실효과

지구는 태양으로부터 복사되는 가시광선과 근적외선의 형태로 대량의 에너지를 받고 있으며, 이를 평균하여 계산하면 1 평방미터당 340W에 이르고 있다. 이 중에서 30%에 해당하는 100W/m²는 공기분자나 구름 및 에어졸 또는 지표면에 의해 우주공간으로 반사되며, 나머지 240W/m²는 주로 지표면에 흡수되어 열에너지로 변환된다. 한편 지구는 이렇게 흡수한 태양 복사에너지와 같은 양의 에너지인 240W/m²를 적외선의 형태로 우주공간에 방출하므로써 에너지 수지의 균형을 유지하게 된다. 그림 1은 지구의 이와 같은 에너지 수지를 보여주고 있다.¹²⁾

지구의 온도는 기본적으로 지구의 복사에너지 수지와 균형을 맞추어 결정된다. 온도 TK인 물체의 단위표면에서 방출되는 열에너지는 σT^4 (여기서 는 Stefan-Boltzman 정수로 $\sigma=5.67032 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)로 주어지므로 240W/m²의 적외선을 방출하는 지구의 온

도는 $T = \sqrt[4]{\frac{240 \times 10^8}{5.67032}} = 255\text{K} (-18^\circ\text{C})$ 로

계산된다. 이 온도는 고도 약 5,000m인 대류권 중층의 온도에 해당하며, 평균 지표온도는 288K (15 $^\circ\text{C}$)이므로 33 $^\circ\text{C}$ 의 온도차가 생긴다.

지구 대기 중에는 수증기, 이산화탄소, 오존, 메탄, 아산화질소 및 프레온가스 등 적외선을 흡수하고 방출하지 않는 성질이 있는 기체성분이 포함되어 있으며, 이를 온실가스라고 한다. 특히 온실가스의 농도는 인간의 활동에 의해 매년 늘어나고 있다. 위에서 계산한 33 $^\circ\text{C}$ 온도차는 대기 중에 포함된 온실가스의 영향으로 지표에서 방출되는 적외선을 흡수함에 따른 것이다. 결국 대기 중 온실가스의 증가는 지구온난화를 가중시키는 중요한 역할을 하고 있다.

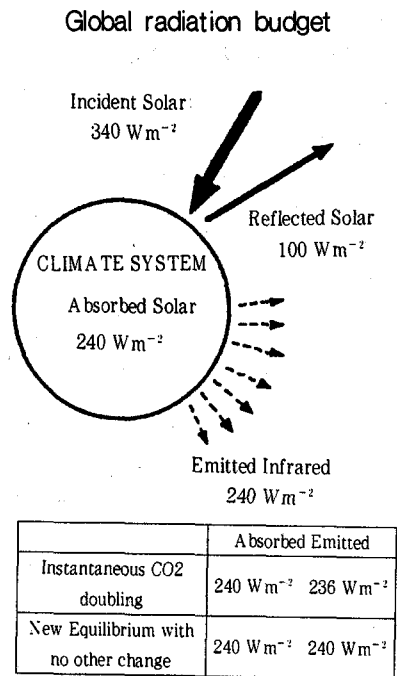


그림 1 Global radiation budget

2.2 지구온난화와 이산화탄소의 관계

자연적으로 존재하는 온실가스로는 수증기(H₂O), 이산화탄소(CO₂), 오존(O₃), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O) 등이 있으며, 인간에 의해 만들어진 온실가스로는 CFCs, HFCs, PFCs(perfluoro carbons), SF₆(sulphur hexafluoride) 등이 있다. 전체 온실가스들의 1980년부터 1990년 사이에 지구온난화 기여도는 그림 2와 같으며, 지구 온난화에 가장 큰 영향을 미치는 이산화탄소는 전체 기여도의 55%를 차지하고 있다.

현재 대기중의 이산화탄소 농도는 360ppm 정도로 이는 산업화 이전시대(1750~1800)의 280ppm에 비해 25%나 증가된 값이며, 최근 16만년 중 어느 때 보다도 높은 농도이다. 그림 3은 최근 대기 중 이산화탄소의 변화를 나타낸 것으로, 1800년대부터 대기중 이산화탄소의 농도가 증가하기 시작하였으며, 이는 아마도 산림을 경작지로 바꾸는데 기인하는 것으로 생각되고 있다. 1950년대 이후 이산화탄소의 농도는 더욱 급격히 증가하고 있는데, 이는 화석연료의 사용량 증가에 따른 것으로 판단하고 있다. 대기중 이산화탄소의 농도는 현재 연평균 1.8ppm(0.5%)씩 늘고 있으며, 1987년 화석연료의 연소에 의해 방출된 양은 5.7±0.5 GtC이고, 산림벌채로 0.6-2.5 GtC(1980년)만큼 추가되는 것으로 추정되고 있다. 전체 온난화가스중 이산화탄소의 기여도는 1980년에서 1990년 중 55%로 가장 크며, 현재의 상태로 배출이 지속될 경우 2050년에는 415~480ppm으로 2010년까지는 460~560ppm의 농도로 증가될 전망이다.

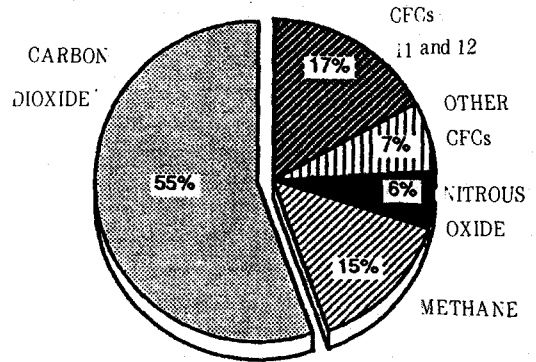


그림 2 온실가스들의 지구온난화 기여도 (1990년 IPCC 보고서)

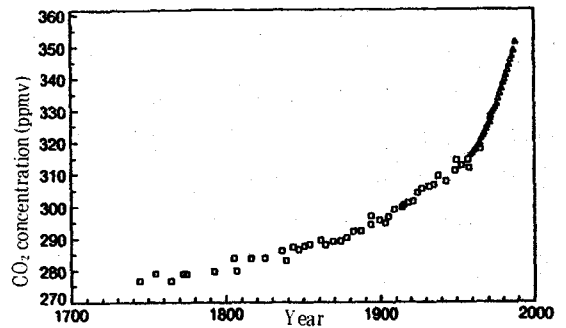


그림 3 최근의 대기중 이산화탄소의 농도변화

3. 이산화탄소 억제기술

기술적 대응방안으로 일부에서는 현재 유력한 기술로 원자력 발전을 들 수 있지만 한국의 원자력 발전은 1995년 현재 총 전기에너지 공급의 36.3%로 전세계적으로 3위에 해당되는 비율이며 미국, 일본 및 영국의 20~27%보다 훨씬 높은 수준에 도달하고 있어 앞으로 확장하는 데에는 기술개발 개념보다 환경문제 등의 정책적 배려가 우선 고려되어야 하는 등 조심스러운 검토가 요망되고 있

다. 따라서 우리나라는 화석연료 이용 및 대체할 수 있는 관련기술에 대하여 혁신적인 기술개발을 통하여만 현재의 이산화탄소 증가율을 낮출 수 있을 것이라 예상된다. 따라서 본고에서는 원자력을 제외한 표 1에서와 같이 이산화탄소 억제기술을 기술하고자 한다.

청정에너지 기술은 석탄과 같은 탄소의 함량이 높은 연료를 천연가스와 같은 탄소의 함량이 낮은 연료로 전환함으로써 이산화탄소의 배출을 저감시키는 방법으로 중점기술은 ①석탄 청정기술로 석탄 물리적·화학적 “전처리 기술”, 유동층 연소기술, 고온·고압 탈황 기술, 미분탄 연소기술과 같은 “석탄 청정 연소기술”, 가스화 기술, 액화기술, 슬러리 연료화 기술과 같은 “석탄 전환기술”과 ②석유 청정기술로 전처리 기술, 중질유 경질화 촉매기술, 폐촉매 재생기술 및 촉매수명 연장 기술과 같은 “신촉매 기술”, 중질유 경질화 및 석유잔사유 고급화 기술과 같은 “신공정 기술”로 분류할 수 있다. 본 기술은 선진국의 기술개발 현황을 토대로 실현 가능성이 높은 유동층 연소기술, 연소처리기술, 신촉매기술에 대하여 산자부를 중심으로 2006년까지 실용화 기술개발을 추진하고 있다.⁷⁸⁾

에너지절약 기술은 화석연료의 사용 및 관련기술의 에너지 사용을 저감시키므로 직접적인 이산화탄소 저감효과를 나타내는 기술로 산업, 건물, 수송 그리고 전기부문으로 분류할 수 있다. ①산업부문에서는 산업공정에 투입하는 에너지를 줄이는데 기존공정을 탈피한 새로운 공정 기술개발, 버려지는 폐열로부터 열을 회수, 이용하여 열효율을 제고

하는 시스템개발, 화석에너지를 연소시켜 열이나 동력을 얻는 열이나 동력발생장치의 효율향상기술 그리고 생산된 열에너지를 보다 시간적이나 공간적으로 효율적으로 이용할 수 있는 시스템의 기술개발 등을 들 수가 있다. ②건물부문에서는 가정용이나 상업용 건물에 적용되는 각종 공조설비의 효율을 높임으로써 전기나 화석에너지의 소비를 줄이는데 초점을 맞추었으며 또한 환경친화적 건물의 조건을 만족시킬 수 있는 자연에너지의 이용기술, 미이용 에너지의 유효활용, 주변 환경과의 조화 등을 중심으로 기술개발을 하고 있다. ③수송부문에서는 온실가스를 저감하기 위하여 각국에서는 기존차량의 연비개선에 의한 CO₂의 배출저감, 온실가스의 배출이 적은 대체연료 자동차의 보급, 차세대 초저소비연료 자동차의 개발 및 보급 등을 활발히 추진하고 있다. ④전기부문에서는 상업경제의 발전과 국민 생활수준의 향상에 따라 전력수요가 급격히 증가하여 전력설비 투자가 상당히 늘어날 전망이다. 그러나 최근의 전력사정은 수급상황이 불확실하고 전력공급 예비율이 저하되는 등 불안한 상태를 보이고 있다. 이에 전력에 있어 부하관리 방안을 통하여 전기에너지의 수요공급을 안정화시키며 다기능 전력저장방법을 갖추어 전기에너지의 소비를 줄이는데 주안점을 두고 있다.

본 기술은 2006년 최종에너지 수요의 10% 절감을 목표로 절약 잠재량 규모가 크고 현 기술 수준에서 개발가능성이 높은 분리공정, 고효율 변환/축적 시스템, 고효율 건조기, 고효율 공업로, 공조시스템, 보급형에너지 절약 건물, 집단에너지설비최소화 및 수요관리, 미활용 에너지, 조명시스템, 유도전동기, 전동

력응용, 소형 열병합발전과 같은 12개 중점 기술을 선정하여 기술개발을 추진하고 있다.

대체에너지 기술은 화석연료를 대체할 수 있는 에너지원으로 태양, 풍력, 소수력, 해양, 지열, 바이오와 같은 자연에너지 이용기술, 연료전지, 수소에너지 등과 같은 신에너지 이용기술 및 폐기물에너지 이용기술로 분류할 수 있다. 중점기술로 ①태양열에너지 기술은 에너지자립형 태양에너지 건물, 산업용 태양열 시스템, ②태양광발전 기술은 독립형 태양광발전시스템 이용, 계통연계형 태양광발전, 규소계 태양전지, 화합물 반도체 태양전지 및 신형 태양전지, ③풍력 발전 기술은 중형급 풍력발전시스템 국산화 및 중규모단지 조성, ④소수력 발전 기술, ⑤해양에너지 발전 기술, ⑥지열에너지 이용기술, ⑦바이오 에너지 기술은 연료용 에탄올 생산기술, 메탄가스 전환 이용기술, 미래 바이오 에너지 기술, ⑧연료전지 기술은 용융탄산염, 인산형, 고체전해질형, 고분자전해질형, ⑨수소에너지 응용기술, ⑩폐기물 에너지화 요소 및 보급 기술이 개발되어야 한다.

국내 대체에너지(1993년 기준, 태양, 풍력, 소수력, 바이오매스, 도시폐기물, 조력만 계상)의 부존량은 연간 11,694백만TOE에 이르며, 현재 국내외 기술수준을 감안하였을 때 이 중 회수, 이용할 수 있는 양은 1/4인 연간 2,812백만TOE로 연간 국내 총 에너지 소비량 165백만TOE(1996년 기준)의 17배에 해당하는 것으로 1995년 총 에너지의 0.6%만 차지하는 것과 비교할 때 엄청난 개발 잠재력을 가지고 있다. 따라서 2006년 총 에너지의 2% 공급을 목표로 하여 산자부를 중심으로 기술개발을 추진하고 있다.⁷⁾⁹⁾

4. 이산화탄소 처리기술

4.1 이산화탄소 분리/회수 기술

지구환경에 악영향을 주는 이산화탄소는 주로 연소배가스 중에서 생성되며, 이를 분리하기 위한 기술로 흡수법, 흡착법, 막분리법 및 심냉법(증류법)으로 구분할 수 있다. 이 중에서 심냉법은 혼합가스를 고압으로 압축시켜 액화시킨 후 분별 증류하는 방법인데, 타 분리법에 비하여 가장 에너지 소모가 큰 이유와 대용량 연소가스를 처리하여야 할 공정설비의 대형화에 따른 문제에 의하여 이와 같은 분야의 이산화탄소 분리법으로는 검토 대상에서 제외되고 있는 실정이다. 각 기술에 대한 일반적인 기술개요 및 장단점을 요약하면 표 2와 표 3과 같다.¹³⁾¹⁴⁾

현재, 연소 배가스로 부터의 실용화된 이산화탄소 분리법은 대부분이 흡수법에 의한 분리법이며, 일반적으로 혼합가스로부터 일정성분을 제거 또는 회수하기 위한 흡착법은 실용화된 예가 많으나, 이산화탄소의 경우는 상용화 직전의 단계로 실증실험이 진행되고 있는 단계이며 막분리법 및 산소 부화연소법 등은 아직은 연구개발단계인 것으로 알려지고 있다. 근래에는 흡수법과 막분리 기술의 혼합형 또는 흡수법과 흡착법을 혼합한 복합 분리기술의 개발도 관심이 높아지고 있으나, 현재의 분리기술의 완속도와 국내의 기술수준을 보았을 때 연소 배가스 중에 포함된 이산화탄소를 분리하기 위하여 단시일내에 적용될 수 있는 기술로는 흡수법 공정을 들 수 있으며, 흡착공정은 실증공정을 거친 다음 상용화 공정으로 적용할 수 있는 기술로 평가되며, 미래 분리공정으로는 막분리법을 들

수 있다.

4.1.1 흡수법

흡수법은 이산화탄소를 흡수할 수 있는 각

종 용액과 이산화탄소를 포함하고 있는 공정 폐가스를 접촉시켜 이산화탄소를 선택적으로 분리하는 방법으로서, 흡수제와 이산화탄소와의 물리 화학적 결합 특성에 따라 물리 흡

표 2. 분리/회수 기술에 대한 개요

기술항목	기 술 개 요
흡 수 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 물리흡수법 : 물리흡수액에의 이산화탄소 용해량이 압력에 비례하여 많아진다고 하는 물리흡수특성을 이용하여 이산화탄소를 분리 ● 화학흡수법 : 이산화탄소와 흡수액(아민계용액, 탄산칼륨용액 등)의 화학반응을 이용해서 분리흡수
흡 착 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 이산화탄소를 흡착하기 쉬운 고체흡착제(활성탄, 제올라이트 등)를 사용, 흡착량이 압력에 따라 차이가 있는 것을 이용하여 분리
막분리법	<ul style="list-style-type: none"> ● 막에 대한 가스의 투과속도가 다른 것을 이용하여 분리
심 냉 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 기체간의 증기압 차이를 이용하여 이산화탄소를 선택적으로 분리

표 3. 분리/회수 기술에 대한 장.단점

항 목	장 점	단 점
흡 수 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 대용량 가스를 처리하기 용이 ● 저농도 및 고농도 가스분리에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> ● 이산화탄소 분리에 다량의 에너지가 소모됨 ● 흡수액의 사용량이 많음 ● 흡수액에 의한 분리설비의 부식문제가 있음
흡 착 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 장치가 비교적 간단 ● 건식이므로 주변환경에 미치는 영향이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> ● 분리회수에 있어 흡수법에 비해 에너지 소모가 더 큼 ● 대용량 이산화탄소 처리하는데 어려움이 많음
막분리법	<ul style="list-style-type: none"> ● 장치가 간단함 ● 건식이므로 흡수법에 비해 주변환경에 영향이 적음 ● 소비에너지가 적음 	<ul style="list-style-type: none"> ● 분리막이 대단히 고가이므로 장치비가 매우 비쌘 ● 막대한 면적의 막이 필요하므로 대용량화가 대단히 어려움 ● 배가스의 청정화를 위해 고성능 전처리가 필요함
심 냉 법	<ul style="list-style-type: none"> ● 대용량, 고농도 이산화탄소 분리에 적합 	<ul style="list-style-type: none"> ● 저농도 이산화탄소 분리에 적합하지 않음

수법과 화학 흡수법으로 분류할 수 있다. 이와 같은 물리 또는 화학 흡수법의 흡수 공정상의 차이는 기본적으로 없으나 두 공정의 대표적인 차이점은 흡수한 이산화탄소의 탈착 시 필요한 열량이 다르며 이에 따라 공정의 형태가 약간 상이한데, 알려진 바와 같이 화학 결합력 보다 낮은 물리 결합력에 의하여 흡수된 이산화탄소 탈착 에너지는 물리 흡수인 경우가 화학 흡수보다 개략적으로 약 4배 정도 낮은 것으로 알려지고 있다.¹³⁾

4.1.1.1 물리 흡수공정

물리 흡수공정인 경우, 흡수제의 흡수량이 CO₂의 분압에 비례하는 Henry의 법칙에 따라서 이산화탄소가 흡수되는 특성이 있으므로 처리하는 가스원이 고압이고 이산화탄소 농도가 비교적 높은 경우에 유리한 방법이다. 따라서 공정 폐가스로 부터 이산화탄소를 분리하기 위하여 최적의 흡수 조건을 유지할 수 있는 별도의 처리공정이 필요하다.

이와 같은 물리 흡수법에 이용되는 흡수제는 앞에서 언급한 바와 같이 다양하나 대부분이 TBP (tri-n-butyl phosphate), propylene carbonate, methanol, polyethylene glycol의 alkyl ether 및 물과 같이 주로 약 염기성 유기계 흡수제이다. 특히 이들 흡수제는 약 알칼리성이므로 이산화탄소를 제외한 산성 가스인 황산화물, 질소산화물 및 황화합물(H₂S, COS) 등이 존재하면 이산화탄소에 대한 흡수제의 흡수 능력이 감소하게 된다.

흡수제의 물리적 특성에 의하여 이산화탄소를 분리하는 물리 흡수 공정은 매우 다양하게 상용화되었는데 이들은 주로 사용되는 흡수제의 특성에 따라 구분되어진다. 대표적

으로 상용화된 이산화탄소 분리공정으로 methanol을 흡수제로 사용하는 Rectisol 공정이다.

흡수공정이 기상의 원료가스와 액상의 흡수제가 접촉하여 목적성분을 회수하는 특성이 있는 공정이므로 이들의 접촉효율을 향상 시키므로 흡수효율을 증대시킬 수 있다. 이러한 개념에 의하여 이용되는 흡수탑 및 재생탑(탈거탑, stripper)의 형태는 Packed/Tray/Spray/Venturi/Ejector/Turbulent contactor/Thin film contactor 등이 있는데 이들 중에서 가장 일반적으로 이용되는 형태는 Packed 또는 Tray 및 Spray형 흡수탑이다.

4.1.1.2 화학 흡수공정

화학 흡수공정의 기본 개념은 물리 흡수와 같이 흡수제와 원료 가스와의 접촉을 위한 흡수탑과 흡수된 이산화탄소의 탈착을 위한 재생탑 및 원료 가스의 전처리 설비로 구성되어 있는데 이들 공정은 사용 흡수제의 종류에 의하여 구분된다. 화학 흡수 공정에서 이용하는 대부분의 흡수제는 알카놀 아민류인데 가동 중인 설비만도 1,000기 이상인 것으로 알려지고 있다.

알카놀아민법에 의한 공정 폐가스 중 CO₂를 회수하는 공정의 대표적인 경우를 그림 4에 나타냈는데 공정 폐가스의 CO₂농도가 일반적으로 약 30%이하로 낮고, 저압이어서 앞에서 제시한 바와 같이 종래의 물리 흡수공정을 이용하는 것은 비효율적이며 화학 흡수법의 문제점인 흡수제의 재생에 따른 에너지 소비를 막기 위하여 흡수제의 농도를 상승시키는 경우가 있는데 이 경우는 재료의 부식문제가 따르게 된다.

Dow chemical 사는 이와 같은 문제들을 해결할 수 있고 CO₂ 흡수량이 많은 흡수제 (FS-1)를 개발하였는데 이 공정은 후에 미국의 Fluor Daniel사에서 Eonamine FG공정으로 개발되어 상용화 되었다. 이 공정은 공정 폐가스가 흡수탑으로 들어오기 전 보일러에서 천연가스를 이용, 연소시켜 산소를 제거한 후, CO₂의 농도를 증가시키는 특징이 있다.

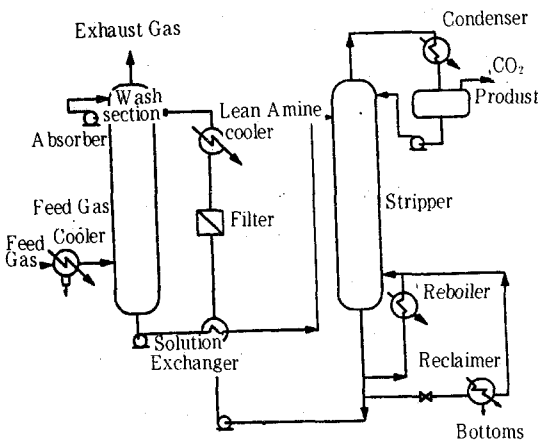
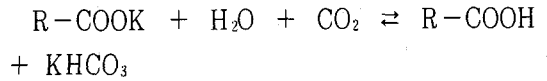


그림 4 대표적인 경우의 화학 흡수 공정 개략도

Activated MDEA 법의 흡수 온도는 40~90℃이며 원료 가스 중의 CO₂ 분압은 2~15kg/cm²이다. 또한 열탄산 칼리법인 경우, 원료 가스를 가압하에서 온도 약 120℃의 탄산칼리 수용액과 접촉시킴으로서 CO₂를 제거하는 것인데, CO₂를 흡수한 흡수제는 상압에서 재생탑으로 보내, Reboiler로부터의 수증기로 가열시켜 CO₂를 방출하며 COS 및 H₂S도 동시에 제거 가능하다.

Alkacid법은 H₂S와 CO₂를 제거하는 공정으

로서, n-methyl alanine산 칼리의 수용액을 흡수제로 이용하는 공정으로 CO₂의 흡수 반응은 다음식과 같으며 H₂S, CO₂는 10~20 ppm정도까지 제거될 수 있다.



상용화된 이산화탄소 분리공정에서 사용되는 흡수제의 특성상 흡수제의 열화, 재료의 부식 등 문제점을 향상시키기 위하여 화학 흡수제인 경우는 첨가제를 많이 이용하고 있음을 알 수 있는데 사용된 첨가제의 대부분은 부식방지 및 열화 방지제이다.

4.1.2 흡착법

흡착법은 고체상의 흡착제 표면과 흡착되는 흡착질 간의 상호 인력에 의하여 목적 성분을 분리하는 법으로 흡착제와 흡착질의 인력 특성에 따라 물리 흡착과 화학 흡착으로 구분되나 대부분의 흡착 공정에서 적용되는 흡착의 형태는 물리 흡착이다. 이와 같은 물리 흡착은 흡착제와 흡착질의 결합력이 화학 흡착에 비하여 약하므로 흡착제의 재생성이 양호하므로 분리 공정에서 흡착은 대부분 물리 흡착의 특성을 이용하고 있다.

이러한 물리 흡착의 흡착 평형은 온도가 낮을 수록, 압력이 높을 수록 흡착질의 흡착이 증가하는 특성을 나타내고 있는데 대개의 흡착 분리공정은 이와 같은 원리를 이용한다. 즉, 저온과 고압에서 흡착질을 흡착제에 흡착시키는 반면 고온과 저압에서 흡착된 흡착질을 흡착제로부터 탈착시키는 방법을 이용하는데 이 공정의 주요변수는 온도와 압력(농도)이다. 이로부터 흡착공정은 압력 변화 또는 온도 변화에 의한 흡착 분리 공정으로

구분하여 압력을 운전변수로 한 PSA (Pressure Swing Adsorption) 공정과 온도를 운전변수로 한 TSA (Temperature Swing Adsorption) 공정으로 크게 나누어지고 있다.

4.1.2.1 흡착공정의 특성

연속적인 흡착 공정의 특성은 흡착층의 특성에 따라 분류되는데 흡착층의 형태는 고정상, 이동상 또는 유동상 등이 있으나 대부분의 흡착제가 기계적 특성이 취약하므로 실제 이용되는 흡착 공정의 대부분은 고정 흡착층이다. 이러한 고정 흡착층의 연속적 운전을 위하여 수개의 고정 흡착층을 설치하여 주기적으로 각 고정 흡착층의 운전 모드를 변화시켜야 한다.

위에서 언급한 바와 같이 흡착제의 재생 방법 또는 탈착방법이 온도 또는 압력에 의하여 구분되는 PSA 공정과 TSA 공정의 특징은 일반적으로 TSA 공정에서의 cycle 시간은 약 수 시간에서 수십 시간이 소요되는 반면 고정 흡착층의 전체 압력을 변화시키는 PSA 공정인 경우는 수초에서 수분이 소요되는 특성이 있다. 이러한 특성에 의하여 TSA 공정인 경우는 비교적 흡착질의 농도가 낮은 정제 공정에 이용되는 반면, PSA 공정은 흡착질의 농도가 10% 이상인 벌크분리에 적용된다. 이와 같은 개념으로 보았을 때 공정 폐가스로 부터 이산화탄소를 분리하는 경우는 대부분 PSA 공정을 이용하는 것이 타당하나 근래에는 PSA 공정에서 흡착제의 탈착성능을 향상시키기 위하여 위의 두 경우를 합한 PTSA 공정이 검토되고 있다.¹⁵⁾

이러한 PSA 공정은 1) 건식법으로 운전되므로 부식 문제가 없으며, 2) 설비의 기동 시간

이 짧고, 3) 조작이 간단하고 공정의 자동화가 가능하며, 4) 장치가 흡수법에 비하여 작고, 흡착제의 수명이 길며 손실이 없다는 장점이 있으며 대개의 경우 4개의 고정 흡착층을 이용하여 PSA 공정이 진행되는데 이 경우 각 고정 흡착층별 흡/탈착 진행 과정은 가압-흡착-감압-탈착-가압의 순으로 운전된다.

이와 같은 PSA 공정은 1960년대부터 공기 또는 가스상에서의 수분을 제거하기 위한 공정으로 상용화되었으며 이들의 공정은 공기로부터 산소, 질소의 분리, 수소 제조 등에 적용되었으나 본 과제의 관심사인 공정 폐가스로 부터 이산화탄소를 분리하기 위한 PSA 공정은 현재 pilot 규모 또는 상용화 직전 단계로 일본을 중심으로 연구 개발되고 있는 상황이다.¹⁶⁾¹⁷⁾

4.1.2.2 이산화탄소 분리를 위한 흡착제

이산화탄소를 공정 폐가스로 부터 분리하기 위하여 이용되는 흡착제는 이산화탄소의 흡착 선택성이 양호한 활성탄이나 다공질체인 지올라이트와 같은 흡착제를 이용하여 분리하는 것으로 이들에 대한 흡착 평형 등은 다음의 그림 5와 같다.

그림 5에서와 같이 지올라이트의 이산화탄소 흡착량은 활성탄에 비하여 흡착량은 양호하지만 일반적으로 지올라이트인 경우 수분의 영향을 많이 받아 수분이 존재하는 경우 수분의 흡착에 따라 이산화탄소의 흡착량이 감소하고 흡착제의 재생성도 저하시키게 되므로 원료가스의 전처리가 필요하게 된다.

한편, 활성탄은 소수성의 특성이 있어 지올라이트와 같이 수분의 영향에 민감하지 않으므로 전처리가 문제시되지 않는다. 이러

한 흡착제 특성에 따라서 활성탄은 이산화탄소의 농도가 높고 탄화수소와 같이 쉽게 활성탄에 흡착하는 성분이 없는 경우에 유리한 것으로 알려지고 있다. 흡착이 흡착제의 표면 특성과 흡착질의 특성에 의하여 목적 성

분을 선택적으로 분리하는 것이므로 흡착제의 구조적 특성 중 기공의 크기를 조절하여 흡착질의 선택성과 흡착 속도를 향상시켜야 할 필요가 있다.

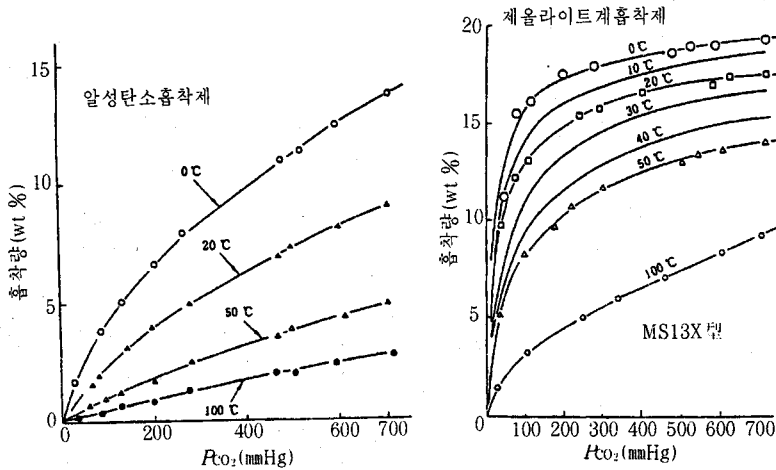


그림 5 활성탄 및 지오라이트 흡착제의 CO₂흡착 등온선

4.1.3 막분리법

막분리법은 혼합 가스가 고분자 다공질막을 투과하는 경우 분자량이 작고 가벼운 가스 쪽이 보다 빨리 투과한다고 하는, 가스의 막투과 특성의 차이를 이용한 방법이다. 막기술의 진보에 따라 우수한 막재료와 모듈이 개발되고 있으며, 비교적 극성이 강한 이산화탄소에 대해 높은 투과 성능을 보이는 고분자로는 초산 셀룰로스(cellulose acetate), polyimide, polysulfone 등이 있는데, 이들은 Permea, Grace Membrane Systems, Cynara 등의 회사에서 생산하고 있으며 앞에서 언급한 다른 분리법에 비하여 소용량 공정에 적용되고 있다.

일반적으로 초산 셀룰로스막에서의 가스투

과 계수는 He, H₂, H₂S 등은 투과 속도가 빠르고, CO, N₂, CH₄ 등은 투과 속도가 느리다. CO₂와 산소는 이들 중간에 위치하지만 산소보다는 CO₂쪽이 투과 속도가 크다.

Polysulfone막에 실리콘을 입힌 중공사복합막(中空絲複合膜)이 Permea Inc.에서 개발된 바 있고, 초산 셀룰로스막을 써서 보다 큰 막면적을 갖게 하기 위해 스파이럴 형태(spiralwound element)로 만든 막이 Air Products & Chemicals사에서 개발되었다. 셀룰로스 폐기물의 혐기성 소화에 따라 발생된 메탄과 이산화탄소의 분리 혹은 천연가스로부터의 CO₂분리 예가 있다. 환경 보전용의 이산화탄소 분리막으로서는 선택성이 우수하고, 내구성이 있으며 투과 속도가 빨라야 할

필요가 있어 고성능막 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이에 관하여는 특허가 많이 출원되고 있다. 그러나 근래에는 내열성, 화학적 안정성, 기계적 강도가 우수하며 분리도가 양호한 무기질 막의 개발이 진행되고 있으며 막의 재료 개발과 함께 막 분리법에서 개발되어야 할 기술은 모듈화 기술과 시스템화 기술 개발을 필요로 하고 있으며 막분리법과 흡착법 또는 흡수법을 동시에 이용하는 방법도 연구가 되고 있다.

기존의 유기 막재료로 부터 이산화탄소를 분리하는 경우 질소에 대한 이산화탄소의 분리도를 보면 약 11~38정도인데 이들 중에서 ethylcellulose막이 가장 양호한 분리도를 나타내고 있다.

4.1.4 기타

공정 폐가스 중에서 이산화탄소를 회수하기 위한 기술로 최종적으로 발생된 가스에서 이산화탄소를 회수하기 때문에 이산화탄소의 농도가 낮은 경우 또는 불필요한 성분의 혼합에 따라 처리 가스를 전 처리하여야 할 필요가 있다.

이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위하여 제시되는 방법 중의 하나인 산소 부화 연소법은 연소용 가스 중의 산소 농도를 증가시켜 공정 폐가스 중의 질소 농도를 낮추고 이산화탄소 농도를 증대시켜 이산화탄소의 분리를 용이하게 하는 공정인데 이러한 연소법을 적용하기 위하여서는 기존의 연소 설비에 산소부화 설비의 설치가 필요하다.

현재 이와 같은 연소 방법은 산소 부화에 따른 경제적 부담이 추가되나 공정 폐가스의 감소 및 열손실 감소 등의 이점이 있어 계속

적으로 일본과 미국 등에서 연구 중인데 각각의 경우에 따라서 경제성이 상이하겠지만 이 방법을 발전 설비에 적용시켰을 때 대개의 경우 기존의 발전 단가 보다 약 15%정도 증가하는 것으로 보고하고 있다.

한편, 이산화탄소 회수형 발전 시스템은 연료 중 탄소 성분을 감소시킴과 동시에 산소 부화로 연소용 공기 중 질소 농도를 저하시켜 공정 폐가스 중 이산화탄소의 농도를 높게 하므로 이산화탄소 회수를 유리하게 하려는 이론적인 발전 시스템인데, 현재로서는 이론적으로 발전 시스템에 적용할 경우에 대한 경제성 등이 검토되고 있는 실정이다¹⁷⁾.

또한 근래에는 각 분리 공정의 장점을 이용한 복합 분리 기술인 Hybrid법이 있는데 이 공정은 흡수법과 흡착법을 혼합한 형태 또는 막분리법과 흡수법 또는 흡착법을 혼합한 형태가 검토되고 있다.

4.1.5 분리/회수 공정의 경제성 검토

배가스로 부터 이산화탄소를 회수하는 공정 중에서 흡수법을 제외한 공정은 극소수만이 상용화되었다. 이와 같은 상황에 의하여 흡수 공정을 제외한 이산화탄소의 분리 공정에 대한 경제성은 각 공정별 시스템화에 의한 이론적 검토 단계이다. 이러한 각 공정의 경제성 검토는 단위 공정별 엔지니어링 자료와 공정의 특성이 정의되어야 하며, 방대한 자료의 축적을 요하는 것이므로 각 공정별 경제성 분석을 국내에서 독자적으로 적용하는 것은 용이하지 않다.

그러나, 국내의 상황과 다른 외국의 경우에 대하여 각 공정별 경제성 검토의 결과는 상대적인 의미에서 비교 자료로서의 가치는

충분하다. 따라서 본 연구에서도 외국의 경우를 기준으로 이산화탄소를 회수하는 공정별 경제적 특성을 다음과 같이 비교 분석하였다. 위에서 언급한 이산화탄소의 분리 회수를 위한 각 공정을 화력 발전소에 적용시켰을 경우에 이를 위한 에너지 소모량은 다음의 표 4와 같다.

표 4에서 보는 바와 같이 막분리법과 심냉법은 화학흡수법에 비하여 에너지 소모량이 비교적 높은 것으로 평가되고 있으며, 특히 심냉법인 경우는 흡수법에 비하여 에너지 소모량이 약 1.1~4.2배 정도 큰 것으로 나타나고 있다. 특히 단위 발전량에 대한 이산화탄

소의 배출량을 보면 흡수법이 0.17~0.42 kg/kWh로 가장 적은 배출량을 나타내고 있는 반면, 심냉법과 막분리법은 각각 0.20~1.76 및 0.35~0.70 kg/kWh인 것으로 제시되고 있으며 심냉법인 경우는 오히려 이산화탄소를 제거하지 않았을 경우보다 배출량이 증가하는 것으로 나타나고 있다.

이와 같은 원인에 의하여 일본의 경우도 흡수법에 의한 이산화탄소 회수법이 가장 현실적인 것으로 판단하고 있으며, PSA 공정과 막분리 공정은 차세대용 이산화탄소 회수법으로 연구를 계속적으로 수행하고 있으나, 대개의 경우 PSA 공정은 흡수법과 함께 경

표 4. 화력발전소에서 이산화탄소 회수시 에너지 소모량 비교

Process		Base Case— No CO ₂ Removal	Air Separation/FG Recycling	Amine Scrubbing	Cryogenic Fractiona- tion	Membrane Separation
Energy Requirement	% Combustion Energy of Coal	0	26-31	47-79	55-95	50-75
	Thermal Eff(%)	35	24-26	7-19	2-16	9-18
Coal Requirement	kg Coal per kWh	0.035	0.48-0.51	0.66-1.68	0.78-7.04	0.72-1.41
	Relative to Base Case	1	1.35-1.45	1.89-4.76	2.22-20.0	2.00-4.00
Net CO ₂ Emission	kg CO ₂ per kWh	0.88	0	0.17-0.42	0.20-1.76	0.35-0.70
	% of Base Case	100	0	19-48	22-200	40-80
Recovered CO ₂	% CO ₂ Recovery	0	100	90	90	80
	% CO ₂ Purity	-	90	99+	97	90

제성 검토의 대상이 되고 있다.

또한 표 4에서 Air separation/FG (flue gas) recycling인 경우는 산소를 공기로부터 부화하고 연소 배가스를 재순환하여 연소함으로써, 배가스 중의 이산화탄소 분리공정을 생략하는 공정이다. 이 공정은 산소부화 공정을 심냉법으로 설치하더라도 열효율이 이산화탄소를 심냉법으로 분리하는 것보다 향상되는 것으로 보고 있는데, 이는 배가스의 열 손실이 산소부화법에 의하여 감소됨에 따

른 것이다. 이들의 에너지 소모량 검토는 석탄 1kg당 이산화탄소의 배출량을 2.5kg (86kg CO₂/GJ, 0.88kg CO₂/kWh)으로 기준하여 산출한 경우이다.

{경제성 검토를 위한 전제조건}

- 화력발전소의 출력 : 1,000 MW

- 연료 사용량 및 발열량 :

석탄;343,000kg/h (6,603kcal/kg, 고위)

천연가스;167,600kg/h (13,020kcal/kg, 고

위)

표 5. 화력발전소의 이산화탄소 회수 공정별 경제성 비교

연료/발전 시스템	비 교 항 목		Amine법	PSA 법	비 고
석탄화력	CO ₂ 회수 장치비	억엔	449	419	-
	CO ₂ 액화 장치비	"	591	591	-
	발전 비용	억엔/년	725.8	715.0	564.1
	CO ₂ 회수 비용*	"	162.3	151.5	-
	년 총 발전 량	10 ⁶ kWh/년	38.36	43.25	56.41
	발전 단 가	엔/kWh	18.9	16.5	10
LNG	CO ₂ 회수 장치비	억엔	300	297	
	CO ₂ 액화 장치비	"	350	350	
	발전 비용	억엔/년	694.7	691.6	
	CO ₂ 회수 비용*	"	100.2	97.1	
	년 총 발전 량	10 ⁶ kWh/년	49.26	51.20	
	발전 단 가	엔/kWh	14.1	13.5	
LNG combined cycle	CO ₂ 회수 장치비	억엔	342	898	
	CO ₂ 액화 장치비	"	324	324	
	발전 비용	억엔/년	696.7	778.1	
	CO ₂ 회수 비용*	"	101.9	183.3	
	년 총 발전 량	10 ⁶ kWh/년	49.47	47.10	
	발전 단 가	엔/kWh	14.1	16.5	

*) 이산화탄소 액화비용 포함

- 발전 단가 기준 : 10 엔/kWh(송전단가, 1988년 기준)

- 이산화탄소 회수시설의 용량 :
(액화 공정 및 FGD설비 포함)

가스 처리량 ; $3.3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$

이산화탄소 순도 ; 99% 처리 온도 ; 40℃

이산화탄소 회수율 ; 90%

현재의 이산화탄소 분리기술로 적용이 가능한 흡수법과 PSA공정에 대하여 화력발전소에서의 경제성 검토를 Yokoyama등(18)에 의하여 수행되었던 결과를 표 5에 제시하였다.

표 5에서 보는 바와 같이 이산화탄소 분리장치를 화력 발전소에 설치하였을 경우, 발전 단가는 약 35~89%정도 상승하게 되는데, 경제적인 면에서는 PSA 공정이 흡수법보다 양호함을 나타내고 있으며, 동일한 연료를 이용하는 경우도 이산화탄소 회수 시스템의 구성에 따라 발전 단가의 차이를 나타내고 있다. 대표적인 예로서 LNG 복합 발전의 경우 동일한 PSA 공정이라도 발전 단가가 LNG 연소 발전 단가보다 약 22%정도 상승된 것으로 계산되었는데, 이는 냉각장치(열 교환기)의 설치에 따른 것으로 알려지고 있다.

한편, 이들은 각 경우에 대하여 산소부화공정을 도입하여 이산화탄소를 분리할 경우에 대하여서도 경제성을 검토하였는데, 이 결과 석탄화력인 경우 최소한 5%정도의 발전 단가 상승 요인이 발생하는 것으로 보고하고 있다.

이산화탄소의 분리 회수를 위하여 기존의

에너지 발생설비에 부가적으로 이산화탄소 분리회수 공정을 설치하면 모든 환경설비 설치의 경우와 같이 기존 공정의 경제적 부담이 가중되고 있다. 따라서 취약한 경제성을 회복하기 위하여서는 기존의 공정개선 등이 지속적으로 이루어져야 할 것으로 평가되는데 기존의 기술 보유사들도 이와 같은 관점에서 기술개발이 추진되고 있다.

4.2 이산화탄소 폐기기술

이산화탄소 분리/회수는 현재의 기술로도 가능하지만, 회수된 대량의 이산화탄소를 처리하는 방법에 있어서는 아직 구체적인 대안이 없다. 그러나 궁극적으로 대량의 이산화탄소를 폐기할 수 있는 방법을 마련하여야 한다. 이산화탄소 폐기방법으로 심해저 저장, 해중처리와 같은 해양처리, 폐유전, 폐가스전, 원유증진 회수법, 대수층과 같은 지중처리 및 육상처리로 구분할 수 있다. 각 이산화탄소 폐기에 있어 현재 추산하고 있는 저장시스템으로는 표 6과 같이 해양처리가 처리능력이나 처리비용 면에서 가장 유력시되고 있다.

4.2.1 해양처리법

대표적인 해양 폐기방법으로는 (1)3,000m 이상의 심해에 액화시킨 이산화탄소를 저장하는 방법, (2)이산화탄소를 Hydrate형태로 만들어 심해저에 저장하는 방법, (3)해중으로 액화 이산화탄소를 방출시켜 완전 용해시키는 방법, (4)고체 이산화탄소로 해저로 침강시키는 방법 등이 있다.

표 6. 이산화탄소 저장능력 및 처리비용¹⁹⁾

Disposal Method	Potential CO ₂ Storage Capacity (GT C)	CO ₂ Disposal Cost (\$/TC)
Ocean Disposal	20,000,000 ¹⁾	30
Terrestrial Disposal	High - no estimate	75
Aquifers	87 ²⁾	79
Exhausted gas wells	83 ³⁾	32
Exhausted oil wells	42 ³⁾	32
Enhanced oil recovery	4 ⁴⁾	0
Global forest management	50 - 100 ⁵⁾	3.5

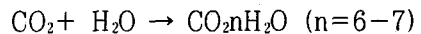
- 1) Based on current estimate of dissolved inorganic carbon(DIC) extrapolated to maximum solubility of CO₂ in sea water
- 2) Based on dissolving CO₂ in water(Ref. 20)
- 3) Based on 1991 proven oil and gas reserves assuming all oil and gas reservoirs can be re-filled with CO₂(Ref. 21)
- 4) Based on 1991 proven reserves with assumptions on the extent to which EOR techniques could be applied(Ref. 22)
- 5) Additional sink over 50 years period(Ref. 23)

4.2.1.1 해중처리

해수에 포화되는 이산화탄소의 양은 해수의 염도에 따라서 다르지만 일반적으로 섭씨 0℃와 24℃에서 각각 65, 32 mol/m³인 것으로 알려지고 있으므로 수압이 높은 심층 해수에 기술적으로 주입 폐기할 수 있다면 이산화탄소의 해양처리법은 매우 효과적인 방법이 될 수 있으며 일반적으로 두가지 방법이 제시되고 있다. 첫째로 해수에 이산화탄소를 농축 용해시킨 용액은 바닷물보다 무겁기 때문에 어느 정도 깊이에서 방출시키게 되면 가라앉을 것이라는 개념하에 바닷물을 흡수탑까지 끌어들이 이산화탄소를 흡수시킨 후 해 중 처리하는 것이다²⁴⁾. 둘째로 이산화탄소를 바다까지 수송해서 해상에서 200-400m의 해 중으로 주입하여 처리하는 시스템이다²⁵⁾

4.2.1.2 심해처리

만약 이산화탄소를 해저 500m이하에서 방출시키면 다음 식과 같이 물보다 무거운 solid hydrate particle (clathrate)이 생겨 해저로 가라앉거나 sea floor위에 있게 하여 이산화탄소의 해수 중 체류시간을 늘릴 수 있을 것이다. 이와 같은 해양처리법의 개념도를 그림 6에 나타내었다.



4.2.1.2 심해처리

온도가 영하 40도일 때 액화 이산화탄소의 밀도가 1.07g/cm³이므로 해수 중에서 액화 이산화탄소가 침강하기 위하여서는 해수의 밀도가 이보다 낮아야 한다. 액체 이산화탄

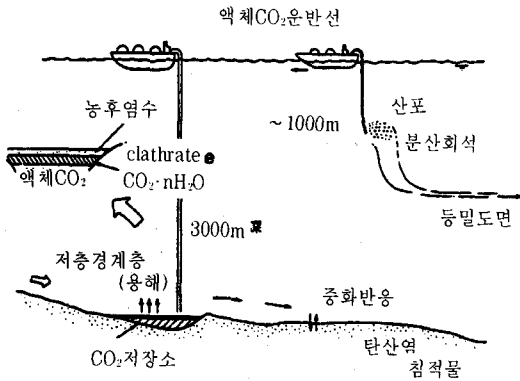


그림 6 각종 해양처리법의 개념도

소의 압축률은 해수의 압축률에 비교하여 보다 커서, 압력증가와 아울러 체적감소가 현저하며, 약 300기압, 즉 해저 3,000m이하에서는 액체 이산화탄소의 밀도는 주위 해수밀도 ($1.05g/cm^3$)보다 커서 침강할 수 있을 것으로 알려져 있다.

이밖에도 이산화탄소를 $CaCO_3$ 로 고정시킨 후 해양에 폐기하여 해저에 침강시키는 방법도 검토 중에 있는데, 이 방법은 이산화탄소를 고정시킬 칼슘 등의 재료가 필요하여 경제적이지 못할 것으로 판단되나 방대한 양의 이산화탄소의 수송문제점을 해결한다는 장점을 가지고 있다.

4.2.2 지중처리법

지하에 이산화탄소를 저장하는 것으로, 폐광 및 폐유전에 투기방법으로 이산화탄소를 기체상태로 압력을 가하여 폐유전이나 가스전에 투입시키면 이들 유전의 물속에 용해되며, 장기적으로는 암석과 반응하여 암석층을 형성하여 안정화되므로 다량의 이산화탄소를 저장할 수 있다.²⁶⁾

원유증진 회수법으로 원유는 5-20%만이 자체압력으로 생산되고 대부분은 기름층에 물을 넣어 원유를 회수한다. 이렇게 해서 기름층에는 50%의 원유가 남아 있게 되므로 이산화탄소를 주입하여 원유를 회수하는 EOR법에 의해 전세계적으로 71개소 이상에서 하루 약 17만 배럴이 생산하며, 생산비는 배럴당 \$5-\$8정도이다. 그러나 이 방법은 모든 기름층에 적용할 수 있는 것은 아니라, API값이 25이상, 점도가 20mPa.S이하인 light oil reservoir에 적용하는 것이 유리하다.

대수층(aquifer)에 저장하는 방법으로 퇴적층에 존재하는 천연가스가 함유된 염전수층(saline aquifer)에 이산화탄소를 저장하는 것으로, 염분이 함유된 대수층은 식수, 농업용수로도 부적합하며 주위의 순환하는 지하수맥과는 대부분 격리되어 있어 오염될 우려가 적다.

4.2.3 육상 처리법

회수한 이산화탄소를 드라이 아이스 형태로 하여 대형의 단열된 저장고에 저장하여 둠으로써 해서 대기 중으로의 이산화탄소 방출을 늦추어 보자는 것이다. 반경 200m, 단열 두께 2m의 저장고에 드라이 아이스를 두면 절반의 양이 승화하는데 800년이 걸린다고 하는데²⁷⁾, 이 기간은 자연적인 방법으로 이산화탄소가 제거되는데 걸리는 기간보다 길기 때문에 지구온난화를 늦추는데 효과적일 것이다. 또한 이 방법은 해양 폐기법에 의한 방법보다는 이산화탄소가 생태계와 섞이지 않기 때문에 환경에 미치는 해는 적을 것으로 보고 있다.

4.3 고정화 기술

화석연료를 연소함에 따라 생성된 이산화탄소를 분리/회수한 후 자연계로 재 방출시키지 않고 장시간 동안 고정화된 상태로 전환시켜야만 지구온난화 방지를 위한 효과적인 기술이 될 수 있다.

일반적으로 이산화탄소 고정화 방법에는 표 7과 같이 화학적인 방법과 생물학적인 방법으로 구분할 수 있다.

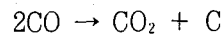
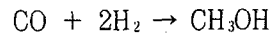
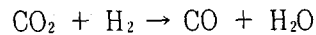
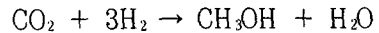
4.3.1 화학적 고정화 기술

4.3.1.1 접촉환원법

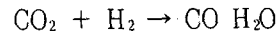
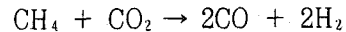
대표적인 접촉환원법에는 수소와 메탄을 이용한 환원법과 기타방법으로는 촉매와 이산화탄소를 고온에서 직접 반응시키는 직접 환원법 등이 있다. 이산화탄소는 열역학적으로 안정된 화합물이기 때문에 수소 및 메탄을 이용한 유용한 물질로 환원시키기 위하여는 표 8과 같이 촉매반응이 수반되어야 하며, 촉매의 특성에 따라 다양한 물질이 생성

됨을 알 수 있다. 일반적으로 접촉환원법에 사용되는 촉매는 단일촉매 또는 각각의 단일촉매를 혼합하여 만든 혼합촉매들이 사용되고 있는데, 접촉수소화 반응에서는 산화물계, 금속계 및 합금계 촉매들이 주로 이용되고 있다.

일 예로 이산화탄소로부터 수소에 의한 메탄을 합성반응이 Cu/ZnO계 촉매에서 진행될 때 반응식은 다음과 같다.



또한 메탄을 이용한 이산화탄소 개질반응은 다음과 같다.



그러나 접촉 수소환원법의 시스템의 구성 시에는 수소제조 비용이 메탄을 제조를 위한

표 7. 이산화탄소 고정화 방법의 분류

고정화	구분	방법	구체적 방법
화 학 적	접촉수소화 전기화학적 고정 광화학적 고정		
생물학적	육상생물 이용	조림법 미생물 배양법 바이오매스 이용법	산림의 보호, 조림, 사막의 녹화 고생산성 박테리아 혹은 미세조류 광합성이용 상기 생산물의 대체연료, 화학원료 이용
	해양생물 이용	해조류 배양법 갈습화법 해양철분 살포법	연안의 해조류 증식 조개류의 증식 해양에 철분 살포로 인한 해양생산성 향상

표 8. 접촉환원법에 의한 이산화탄소 전환특성

반 응 물		촉 매	생 성 물
CO ₂	H ₂	Cu/Zn/MxOy	Methanol
"	"	Promoted Cu/ZnO	Higher Alchols
"	"	Ni, Ru	CH ₄
"	"	Fe, Co	C ₂₊ , Hydrocarbon
"	"	Pd	CO
"	"	Rh	Oxygenates
"	"	Cu/Zn/MxOy/HZSM-5	Gasoline
"	CH ₄	Pt/Al ₂ O ₃ , Pd/Al ₂ O ₃ Ph/Al ₂ O ₃ , Pu/Al ₂ O ₃	CO/H ₂

총비용의 70%내지 80%를 차지한다는 문제점을 안고 있다. 즉, 수소와 메탄올의 국제가격을 비교하면 각각 kg당 \$1.8와 \$0.2로 가격상 수소이용의 경제성이 전혀 없으므로 다량의 수소를 적은 비용으로 확보할 수 있는 수소공급원의 개발이 시급하다. 따라서 저렴한 수소를 확보할 수 있는 기본원료로는 지구상에 무한한 물을 이용하는 방법을 들 수 있다. 그러므로 비록 효율은 낮더라도 물의 전기분해나 광분해 등으로부터 수소를 얻을 수 있는 공정 등을 고려할 수 있다. 그러나 이들 역시 전력을 필요로 한다는 점이나 효율적인 광 에너지의 활용을 확보하여야 한다는 과제와 함께 수율, 즉 효율이 높지 않다는 단점을 지니고 있으며, 수소의 대량생산 시스템은 아직도 연구중이라는 문제점을 지니고 있다. 이와 같은 문제점을 보완하고자 수소대신에 천연가스의 주성분인 메탄올 이용한 고정화법이 연구되고 있으나 아직 경제성은 확보되지 않은 상태이다.

4.3.1.2 전기화학법

이산화탄소의 전기 화학적인 환원은 많은 연구가들로부터 효율적인 이산화탄소의 고정화 방법으로 알려져 오고 있다. 그러나 일반적인 전기화학반응에서 이미 알려져 있는바와 같이 궁극적으로 환원반응이 일어나는 금속전극, 전해액의 조성, 온도 pH 등 많은 변수들이 있는 까닭에 아직도 연구가 진행되고 있다. 특히 전해질의 종류 즉, 수용액상이나 비수용액상이나 와의 전극의 종류에 따라서 이산화탄소 환원반응 후의 생성물이 달라진다. 따라서 이산화탄소의 전기 화학법을 실시할 경우 가장 중요한 것의 하나는 반응조의 구성이다. 반응조내에 환원반응을 유발시키는 금속전극으로는 종류가 다양하여 수용액 전해질의 경우 Hg, Pb, Zn 등의 금속전극에서 환원반응이 효율적으로 일어날 수 있다. 금속전극으로 Ag와 Au는 CO, Cu와 Ru는 메탄과 에틸렌²⁶⁾, Pb와 Hg전극을 ammonium salt가 용해된 수용액 전해질과 반응조를 구성할 경우에는 소량의 glycolic acid와

maleic acid가 검출되는 것으로 보고되고 있다. 특히 전해질이 비수용성일 경우에는 Pb, Hg 전극을 제외한 대부분의 금속전극에서 환원반응의 주 생성물이 CO이고 Pb, Hg 전극의 경우에는 주 생성물이 oxalic acid이다.

4.3.1.3 광화학법

광화학 반응은 이산화탄소를 환원처리 하는데 반응추진제로서 적절한 파장의 인조 광에너지 또는 태양광을 사용하는 것으로 반도체나 광증감제와 금속이온을 적절히 변형시켜서 전해질내에서 전하이동을 유발시키는 방법과 녹조류 효소반응법을 들 수 있다. 첫째로 반도체성 광촉매나 금속첨착 촉매 등을 이용한 광화학 반응의 기본적인 원리는 기상-고상 또는 액상-고상의 두 상간의 경계면을 통하여 광에너지에 의해 형성된 전자가 이동하여 산화-쌍을 생성함으로써 화학반응이 진행되는 것이다. 둘째로 효소를 사용한 광환원 방법도 연구되고 있는 분야로 다양한 구조의 생성물을 얻을 수 있으나, 효소의 활성도가 쉽게 저하한다는 문제점을 안고 있다.

광화학 반응에 의한 이산화탄소의 환원기술도 전기화학 환원법과 마찬가지로 전해질 및 반도체나 금속첨착 촉매, 금속 콜로이드의 성질과 선정이 중요한 역할을 한다. Polyaniline이 코팅된 Si전극의 경우 수용액 전해질에서 환원 생성물로 formic acid를 생성하는데 전류효율이 3-5%에 이르는 것으로 보고되고 있다.²⁹⁾

4.3.2 생물학적 고정화 기술

생물학적 이산화탄소 고정화는 크게 육상

생물과 해양생물에 의한 것으로 대별될 수 있다. 고정화의 첫 단계는 대부분 광합성에 의한 탄소동화작용에서 출발하나, 예외로는 칼슘화 반응이 있는데 이는 일부 패류나 플랑크톤 중에서 해수중의 칼슘이온과 탄산의 형태로 존재하는 이산화탄소로부터 탄산칼슘(calcium carbonate)을 생성하는 것을 말한다.

4.3.2.1 인공 조림법

숲은 나무의 잎, 가지 및 줄기에 유기성 탄소의 형태로 이산화탄소를 고정화하고 있다. 지구상의 모든 숲이 포함하고 있는 이산화탄소의 양은 약 5,000내지 8,000 억톤이며, 생물체 및 토양(Humus 혹은 탄소 알갱이로 존재)에 존재하는 이산화탄소의 양은 약 2조 톤이다. 현재 지구상의 삼림면적은 36억 헥타 정도로 전체 육지면적의 약 28%를 구성하고 있는데 이와 비슷한 면적(34억 헥터)이 준산림지 지역으로 분류되고 있다²⁶⁾. 따라서, 숲이 고정화하고 있는 이산화탄소의 양은 연간 화석연료 사용으로 발생하는 약 62 억톤의 이산화탄소(1994년 기준)의 약 100배이므로, 숲의 개발을 억제하고 조림사업을 촉진하여 대규모 이산화탄소 흡수원을 조성하여야 한다. 또한 대규모 인공조림 등으로 축적된 바이오매스는 연료로 사용하여 화석연료의 사용을 대체하여야 한다.

4.3.2.2 미생물 배양법

조류는 가장 높은 이산화탄소 고정화 능력을 갖고 있는 생물로서 고등식물 중 고정화 능력이 가장 큰 옥수수나 사탕수수의 탄소동화작용 효율의 2%내외인데 비하여 남조류는

최대조건에서 3-4%의 효율을 가지고 있으며, 조류의 단위 면적당 이산화탄소 고정능력은 고등식물의 약 2배 이상이다. 이산화탄소 고정화 시 고등식물의 경우 농도가 높은 이산화탄소 배출원에 연결코자 할 경우에는 덮개가 달린 밀폐공간이 필요하지만, 남조류를 배양할 경우에는 덮개가 없는 저수조 혹은 연못에 이산화탄소를 다량 포함한 공기를 폭기하기만 하면 일시적으로 물에 흡수되고 곧 남조류에 의해 고정화될 수 있으므로 경제적이다. 또한 미세조류의 배양에는 농업용수로 쓸수 없는 해수 혹은 폐수도 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 특히, 클로렐라의 경우처럼 이산화탄소의 고정화에 쓰이는 미세조류는 대부분 영양염류가 풍부한 바이오매스로 사료로 쓰일 수 있으며, 추출에 의하여 탄화수소, 지방산, 글리세롤, 단백질, 안료 및 다당류를 얻을 수 있고 생물학적 전환에 의하여 알콜류, 유기산 및 메탄 그리고 촉매반응에 의하여 파라핀, 올레핀 및 방향족 탄화수소를 생산할 수 있다.³⁰⁾

4.3.2.3 해조류 배양법

해조류 특히 갈조류 중에는 매우 다른 속도로 거대하게 성장하는 것이 있다. 대형 갈조류는 주로 북회귀선 이북 혹은 남회귀선 이남의 냉수 심해지역에 분포하는데 예를 들면, 북미, 남미 및 호주의 연안에 분포하는 자이안트 켈프(giant kelp)는 성장속도가 커서 수개월에 전체 길이 20-60m로 성장한다. 이와 같은 해조류를 이용한 이산화탄소 고정화는 해양에서의 조림과 같은 개념으로 육지의 나무심기와 같은 효과가 있다. 이와 같은 해조류의 재배밀도는 4-9 kg(건조중량)/m² 정도인데, 이 수치는 육상식물이 1.5

-4.5 kg(건조중량)/m²에 불과한 것에 비하면 매우 큰 값이다. 건조된 해조류 무게의 약 50%가 탄소라 하면, 평방미터당 약 2-4.5 kg의 탄소가 고정 가능하다.³¹⁾

그러나, 해조류는 1년 이하의 수명을 갖고 있기 때문에 성숙된 해조류는 곧 죽어서 다시 이산화탄소로 분해되게 된다. 그러므로, 어느 정도 서식밀도가 증가하여 정상상태에 이르러 고정화와 분해가 균형을 이루게 되면 고정화의 효과는 없어진다. 따라서, 다 자란 해조류는 곧 수확되어 에너지나 자원의 형태로 대체자원으로 사용하여야만 고정화 효과가 있다.

4.3.2.4 칼슘화법

해양에 서식하는 산호 및 패류 등은 해수 중의 칼슘 이온과 탄산이온(특 해수중의 이산화탄소)을 탄산칼슘으로 고정화하는 효과가 있다. 예를 들어 산호에 의한 이산화탄소의 고정화 양은 현재 0.3-20kg/m².년 범위로 추산되는데 고정화 양이 10 kg/m².년이라 가정하면 인류가 배출하는 전체 이산화탄소를 고정화하기 위하여는 2.3 x 10¹²m²의 바다 면적에 산호를 육성할 필요가 있다. 그러나, 이러한 탄산석회의 고정은 지구전체적인 물질 사이클로는 탄산가스의 일시적인 고정에 불과하다. 즉, 바닷물에 용존하는 석회[중탄산칼슘, Ca(HCO₃)₂]를 석출, 침전시키는 반응은 이산화탄소의 방출반응이다. 한편, 해수 중 용존석회의 구성요소인 Ca²⁺이온의 공급은 주로 지구상 어딘가에서는 석회석의 분해에 의한 것이다. 따라서, 시간적 차이는 있지만 칼슘화에 의한 고정화는 결국 다른 장소의 석회석을 순환 이동시키는데 불과하므로

지구상의 이산화탄소 증감에는 크게 영향을 미칠 수 없는 것이다.

4.3.2.5 해양 철분 살포법

지구상 70 %의 면적은 바다가 차지하고 있음에도 불구하고 모든 해양의 바이오매스 생산량은 육지의 그것에 비하여 약 1/3에 불과하다. 이와 같은 낮은 생산성의 원인은 해양이 질소, 인과 같은 영양물질을 충분히 갖고 있지 못하기 때문이다. 그런데, 만약 해양의 식물성 플랑크톤의 광합성 활동이 증진되어 해양 생산성이 향상된다면 해양에 의한 이산화탄소 고정화가 촉진될 것이다.³²⁾

만약 충분한 영양물질이 공급되어도 생산성이 여전히 낮은 이유는 식물성 플랑크톤의 성장에 필수적인 미량의 무기염류인 3가 철이온 [Iron(III)]이 부족하기 때문이라고 밝혀졌다. 철 이온은 물에 거의 녹지 않으므로 해저로 침강하여 철분이 계속적으로 공급되지 않으면 해수 중에는 철분이 부족하게 된다. 따라서, 철분은 육지에서 불어오는 바람에 먼지 상태로 실려서 공급되고, 먼바다에는 공급이 부족하게 된다. 결과적으로 먼바다는 상하류 등으로 다른 무기염류가 충분히 공급되는데도 불구하고 식물성 플랑크톤이 잘 형성되지 않게 된다.

따라서 해양에 철분을 살포하면 식물성 플랑크톤의 생산이 촉진되고 따라서 바다 속으로의 이산화탄소의 용존을 촉진하게 된다. 생산된 식물성 플랑크톤은 죽으면 곧 이산화탄소로 분해되지만 일부(2-5% 내외)는 1,000미터 이상의 해저로 가라 앉게되며, 이것이 분해되어 해표면상에 나타나는데 천연 이상이 걸리는 것으로 알려져 있다. 그러므

로, 철분살포로 고정화된 이산화탄소는 주로 심해저에 고정화시킬 수 있다.

4.4 이산화탄소 고정화 기술의 특징

4.4.1 화학적 고정화

접촉환원법의 경우 수소와 메탄을 환원제로 가장 활발하게 연구되고 있는 분야로 생성물에 따른 다양한 촉매가 개발되고 있다. 그러나 수소환원공정의 최대 문제점은 저렴한 가격에 다량의 수소를 공급할 수 있어야 한다는 것이다. 저가 및 다량의 수소공급원이 확보될 수 있다면 접촉 환원법의 상용화는 기대해 볼 만하다. 또한 저렴한 수소의 확보와 함께 촉매수명의 연장, 즉 장기간 활용하여도 활성도가 퇴화되지 않아야 하며, 반응효율의 향상방안도 지속적인 연구가 필요한 분야이다. 따라서 메탄을 환원제로 하는 공정이 근래에 연구되기 시작하였는데, 이는 수소 대신에 가격이 저렴한 천연가스를 이용할 수 있다는 장점에서 부각되고 있다. 그러나 아직도 실험단계이고 촉매와 수율 향상 방안에 대한 연구가 이루어져야 한다.

전기 화학법은 1960년대 중반부터 연구가 시작되어 기본적인 이론 및 시스템 구성기술은 확보되어 있는 형편이며, 주요연구 대상으로는 환원반응이 일어나는 환원전극과 전해질 선정에 있었다. 앞으로는 환원반응에 공급하는 전기를 얻기 위하여 심야전력의 저장이나 직접이용, 태양전지 또는 연료전지 등의 시스템과 연계시키는 연구가 진행되어야 한다.

광화학법은 환원반응의 성질에 따라 반도체 전극이나 광촉매의 구성이 다양하고, 무한한 태양에너지까지 활용 가능하다는 장점

이 있으나 효율이 극도로 낮다는 것이 단점이다. 전기화학법과 같이 전해질부분의 연구가 필수적이며, 광촉매의 효율향상 및 수명연장이 주요 연구대상이며, 아직 실험실적 연구수준에 머무르고 있다.

4.4.2 생물학적 고정화

생물학적 고정화를 위해서는 인공조림을 하여야 하고, 동시에 기존의 숲도 보호하여야 한다. 따라서 인공조림법은 장시간을 요하는 방법으로 주로 열대 우림의 보호가 이루어져야 하고, 사막의 녹화, 어떤 지역에 어떠한 종류로 조림을 하여야 할 것인가를 고려하여야 한다. 이와 함께 점차 그 면적이 줄어들어가고 있는 기존의 열대 우림을 보호하는 작업도 동시에 강력하게 병행되어야 한다. 사막의 녹화 역시 용이한 일이 아니다. 특히 지구상의 식물은 사멸되거나 연료로 사용되면 다시 이산화탄소를 발생시킨다는 이차적인 문제가 있다. 그러므로 식물에 의한 이산화탄소의 고정화는 태양에너지를 직접 사용할 수 있다는 장점은 있지만 전체적인 효율은 높지 않다는 단점이 있다.

미생물 배양법은 가장 높은 이산화탄소의 고정화 능력을 갖는 미세 남조류를 배양하여야 하는데 최적의 배양 및 대량생산의 조건을 찾는 것이 중요한 활용조건이다. 특히 미세 남조류는 수명이 짧기 때문에 적어도 년 1회 수확을 하여야 한다. 그렇지 않으면 배양지내에서 사멸하고, 자연 분해되어 다시 메탄이나 이산화탄소를 발생하게 되어 장기적인 이산화탄소의 고정화 방안이 될 수 없다.

해양 조류 배양법은 여러 해조류 가운데

주로 갈조류를 활용하는 고정화 방법이나, 해조류는 일년이하의 수명을 지니고 있기 때문에 성숙된 해조류는 수명을 다한 후 다시 이산화탄소로 분해된다. 따라서 성숙된 해조류는 바로 수확되어 다른 형태의 에너지 자원으로 활용하여야 한다.

칼슘화법은 산호와 패류 등을 활용하여 이산화탄소를 탄산석회 형태로 고정화시키는 방법으로, 해수 중의 칼슘이온과 탄산이온으로 반응이 진행된다. 그러나 지구상의 물질보존 사이클 개념으로 보면 Ca^{2+} 이온의 공급이 요구되므로 역반응이 진행되기 때문에 이산화탄소로 방출된다. 따라서 시간과 공간적인 차이는 있지만 석회석 순환이동과 유사하여 일시적인 고정화에 불과하다.

해양 철분 살포법은 해양에 대량의 바이오매스를 생산하여 일부는 심해로 고정화할 수 있다는 점에서 고무적이다. 그러나 해양 중 대량의 바이오매스 배양 시 기존 해양 생태계를 파괴한다는 문제점을 안고 있기 때문에 이와 같은 기술을 이용가능하기 위하여는 충분한 해양 환경영향 평가 후 이루어져야 한다.

5. 맺음말

앞으로 기후변화협약 당사국 총회에서 한국이 이산화탄소 감축 대상국으로 포함될 경우에 GNP의 5~7% 정도 하강 및 국내 주력 산업인 철강, 석유화학, 조선, 시멘트와 같이 에너지 다 소비업체에 심각한 타격을 줄 것으로 예상된다⁽³³⁾. 따라서 대책마련은 현재 시급한 문제이며 그 대안으로 정책적 및 기술적 대응방안이 있으나 정책적 대응방안에는 근본적으로 이산화탄소의 발생을 저감시

키는데 한계가 있으므로 연료의 고급화를 위한 청정에너지 기술, 효율적인 에너지 사용을 위한 에너지 절약 기술, 화석연료를 대체할 수 있는 대체에너지 기술 및 최종적으로 발생한 이산화탄소를 처리하는 기술 개발을 통한 적극적인 대응방안만이 기후변화협약에 능동적으로 대처할 수 있는 방법이 될 것이다.

국제적인 여건과 국내 현실을 감안한 이산화탄소 저감을 위한 기술개발은 기술의 특성에 따라 단기 및 중·장기적인 계획하에 수행되어야 한다. 즉, 화석연료의 사용을 단시간 줄일 수 있는 에너지절약 및 이용효율 향상 기술개발은 단기적인 관점에서 기술 개발되어야 하지만 궁극적으로는 화석연료를 사용하지 않는 자연에너지 및 신에너지와 같은 이산화탄소 무 배출 대체에너지 기술개발이 장기적으로 이루어져야 한다.

또한 기후변화협약 강화로 인한 이산화탄소 저감에 대한 국제적인 압력이 가중될 경우, 화석연료의 사용제한으로 인한 경제적 타격을 방지하기 위하여 화석연료 연소 후 배출되는 이산화탄소를 효율적으로 분리/회수 및 고정화 기술 개발도 중·장기적인 관점에서 추진되어야 할 것이다.

- 참고 문헌 -

1. 대한민국정부, 1998, "UN 기후변화협약에 의거한 대한민국 국가보고서", pp.32-35
2. 과학기술정책관리, 1998, "기후변화협약 대비 연구개발종합계획 수립을 위한 공청회", pp. 5-6
3. 민병무 외, 1995, "연소배가스 중 이산화탄소 신흡수제 개발", 산업자원부 연구보고서, pp.18-20
4. 민병무,김성현,손재익, "에너지 이용과 지구온난화 대책", 화학공업과 기술, Vol. 10, No.2, pp.4-11
5. 한국화학공업학회, 1998, "21세기를 대비한 에너지 환경기술 Workshop", 에너지/환경부문위원회, pp.3-33
6. 손재익 외, 1998, "기후변화협약과 연계된 에너지 원천기술 기획", 과학기술부 연구보고서, pp.17-58
7. 산업자원부, 1996, "중장기 에너지기술개발 추진전략 최종보고서"
8. 과학기술부, 1996, "에너지기술개발에 대한 기획연구"
9. 산업자원부, 1996, "대체에너지 기술개발 기본계획 개선연구"
10. 과학기술부, 1992, "G7 과제도출 및 연구개발 계획 수립에 관한 연구"
11. 국립환경연구원, 1992, "환경공학기술개발을 위한 연구기획"
12. Houghton, J.T., Jenkins, G.J. and Ephraums, J.J., 1990, "Climate Change", The IPCC Scientific Assessment", Cambridge Univesity Press.
13. 이산화탄소 저감연구회, 1997, "지구온난화에 대한 정책적 대응방안"
14. 이산화탄소저감 연구회, 1998, "지구온난화에 대한 기술적 대응방안"
15. 최덕일 외, 1983, "중유 탈황과 배연탈황의 경제성 비교에 관한 연구", 국립환경연구원보, 제5권, pp.31-33
15. DOE, 1992, "Clean coal technology dem-

- onstration program", DOE/FE-0247P
16. Rubin, E.C., Cushy, R.J. and Skea, J.F., "Controlling Acid Deposition", *Env. Sci. Tech.*, Vol.20, Vo.1, pp960-975
 17. Chlmka, P.A., Fink, B.J. and Statnik, R. M., 1990, "Second-Generation Wet FGD Technology", EPA/EPRI 1990 SO₂ Control Symposium, New Orleans, La.
 18. Sadayuki, S., 1995, "The Necessity of Clean Coal Technologies", APEC CCT Training Program, FuKoka, Japan
 19. Ormerod, O.G., Webster, I.C., Audus H. and Riemer, P.W.F., 1993, "An Overview of Large Scale CO₂ Disposal Options", *Energy Convers. Mgmt.*, 34, pp.833-840
 20. Koide, H., Tasaki, Y., Nochuchi, Y., Nakayama, S., Iijima M. and Shindo Y., 1992, "Subterranean Containment and Long Term Storage of Carbon Dioxide in Unused Aquifers and in Depleted Natural Gas Reservoirs", *Energy Converts. Mgmt.*, 33, pp.619-626
 21. Holt, T. and Lindeberg, E., 1992, "Thermal Power-without Greenhouse Gases and with Improved Oil Recovery", *Energy Convers. Mgmt.*, 33, pp.596-602
 22. Tanaka, S., Hakuta, T. and Haino, H., 1992, "Possible Contribution of Carbon Dioxide Flooding to Global Environmental Issues", *Energy Conners. Mgrnt.*, 33, pp. 587-593
 23. Winjum, J.K., and Dixon, R.K., 1992, "Estimating the Global Potential of Forest and Agroforest Management Practices to Sequester Carbon", *Water, Air and Soil pollution*, 64, pp.13-227
 24. Summerfield, I.R., Goldthorpe, S.H., Williams, N. and Sheith, A., 1993, "Costs of CO₂ Disposal Options," *Energy Convers. Mgmt.*, 34 pp.1105-1112
 25. Drange, and Haugan, P.M., 1992, "Carbon Dioxide Sequestration in the Ocean: the Possibility of Injection in Shallow Water," *Energy Conners. Mgmt.*, 33 pp.697-704
 26. Islam, M.R., Chakma, A., 1993, "Storage and Utilization of CO₂ in Petroleum Reservoirs-- a Simulation Study", *Energy Convers. Mgmt.*, 34, pp.1205-1212
 27. Seifritz, W., 1993, "The Terrestrial Storage of CO₂-Dry Ice", *Energy Convers. Mgmt.*, 34, pp.1121-1141
 28. Cook, R.L., MacDuff, R.C. and Sammells, A.F., 1987, *Soc.* 134, 2375
 29. Aurian-Blajeni, B., Taniguchi, I. and Bockris, J.O'M., 1983, *Acta* 29, 923
 30. Neenan, B., 1990, *Fuels from Microalgae*, SERI Report, SERI/SP-231-2550
 31. 이규완 외, 1998, "이산화탄소의 화학적 및 생물학적 고정화 기술", 환경부. 과학 기술부 연구보고서
 32. Saiki, H., "Bioengineering for CO₂ Fixation", in *Introduction to Earth Engineering*, Edited by H. Komiyama, Ohm Co., Tokyo, Japan
 33. 산업연구원, 1998, "기후변화협약과 산업 구조전환", 정책세미나 자료