

특별투고

지구온난화대책기술

-CO₂를 중심으로-



지구온난화 문제를 야기하는 CO₂ 문제의 해결을 위해서는 과학기술의 역할, 사회시스템의 문제점, 개발도상국을 포함한 국제정세 및 인간의 삶의 본질 등 모든 요소를 총망라하여 임해야 될 것이다.



1. 머리말

다가오는 21세기는 꿈과 희망으로 가득찬 시대일 것인가? 가속화되는 지구환경의 파괴와 오염은, 21세기를 불안과 절망의 세계로 전락시키려 하고 있다. 그 원인으로 과학기술의 전문화가 고도로 진행되는 현시점에서 인류 사회속에 과학기술이 차지하는 위치나 그를 둘러싸고 있는 전체의 상을 잊어버려가고 있지 않나 하는 점에서 찾을 수 있을 것 같다. 지난 중세기를 우리는 과학의 암흑시대라 말하고 있으나, 만약 지구환경문제를 해결 못한다면 현대를 파괴의 시대라 우리 후손들은 일컬을 것이다.

현재, 우리들은 수많은 지구적인 규모의 환경문제에 직면하고 있다. 이 문제들은 우리들에게는 미증유의 위기이며, 인류의 존망에 관련되는 커다란 문제들이다. 지구적인 규모의 환경문제로는 지구온난화, 오존층의 파괴, 산성비, 사막화 등을 들 수 있다.

지구온난화문제를 예로, 예측가능한 영향을 살펴보면, 1990년에 발표된 IPCC(기후변동에 관한 국가간 Panel)의 보고서에는 지구온난화가 지금상태로 진행할 경우 21세기 후반에는 지구의 온도는 약 3°C 상승할 것이라고 예측하고 있다. 지구온도의 상승은 해수면 상승, 이상기

후, 대 가뭄, 거대 태풍의 발생뿐 아니라 광화학 smog, 전염병의 유행 등 그 영향은 실로 예측하기가 어려울 정도이다.

해수면 상승으로 인한 육지면적의 감소, 농업피해로 인한 식량의 위기, 초스피드로 진행되는 기후변동에 순응할 수 없는 생태계의 파괴 등 우리인류의 생존을 위협하는 지구온난화 문제는, 우리들 자신이 어떠한 방법으로라도 해결하지 않으면 안 될 문제이다. 지구온난화로 야기되는 위기가 과학적으로 명백히 증명되지 않는 현시점에서 대책을 강구하는 것은 시기상조라는 견해도 있으나, 위기의 가능성이 존재하는 이상, 그것에 대비하는 것이야말로 인간의 지혜이자 최대의 행동규범이라 할 수 있으며, 미래의 후손에 대한 현대인의 책임일 것이다.

이러한 지구환경문제의 근본적인 원인은, 우리의 일상생활에서부터 산업에 이르기까지 인간활동에 있음을 부정할 수 없다. 따라서 그의 해결을 위해서는 과학기술의 역할, 사회시스템의 문제점, 개발도상국을 포함한 국제정세 및 인간의 삶의 본질 등 모든 요소를 총망라하여 임해야 될 것이나, 여기서는 지구온난화 문제를 야기하는 온실효과 가스 중 가장 큰 기여를 하고 있는 CO₂를 중심으로 현재 선진국에서 연구·검토되고 있는 대책기



유영식 / 서울보건전문대학
환경관리과 교수

술을 개관하고자 한다.

2 CO₂의 발생과 소멸

현재 인류는 석유화산으로 약 78억톤의 energy를 매년 소비하고 있다. 그 중에 석유가 37%, 석탄 30.7%, 천연gas 20%, 원자력 6.4%, 수력 및 기타가 5.9%로, 화석연료가 전체의 약 88%를 점하고 있다. 또 세계의 국가별 energy 사용현황을 보면, 미국이 전체의 약 24%, 러시아를 비롯한 구소련연방이 18%, 중국이 8.6%, 독일 5.2%, 일본 4.7%로 5개국이 전체의 60%이상을 점유하고 있으며 한국은 약 1%를 차지하고 있다.

산업별 CO₂ 배출상황을 보면 국가별로 약간의 차이는 있지만 화력발전소가 전체의 30%, 철강, 시멘트, 석유화학 등 일반산업이 35%, 운수가 20%, 나머지는 일반 민생이다.

인간은 화석연료의 소비로 인하여 CO₂를 매년 약 55억톤(탄소화산) 방출하고 있다. 이밖에 식물과 고사체 및 토양의 유기물 분해로 자연적인 CO₂ 방출량은 약 16억톤 정도로 추정되어 대기중으로 방출되

는 CO₂는 탄소환산으로 약 70억톤으로 추정되고 있다.

현재 대기중의 CO₂농도는 약 350ppm정도이며 매년 1.5ppm 정도의 증가추세에 있다. 이는 현재 대기중에 CO₂가 탄소환산으로 약 7,000억톤 존재하며 매년 27억톤씩 증가한다는 사실이다. 또 해양에는 약 35조톤의 탄소가 용존해 있으며, 이 양은 대기중의 탄소량의 50배에 해당한다. 매년 인위적 및 자연적으로 방출되는 약 70억톤(탄소환산)의 CO₂중 27억톤이 대기에 축적되며 나머지는 어떤 경로로 소멸되는가 불명확하지만 현재로서는 나머지의 대부분이 해양에 흡수되는 것으로 예측되고 있다.

3. CO₂ 문제 대책기술

CO₂ 대책기술로서는 여러 방법이 제안되고 있으나, 화석연료를 계속 사용할 것인가의 여부, 화석연료를 사용할 경우 발생하는 CO₂를 어떻게 처리할 것인가를 단계적으로 고려하면 첫째로 CO₂ 발생억제기술, 다음으로 CO₂의 고정기술, 마지막으로 인공적인 지구온도 제어기술 등의 3가지 대책기술로서 대분할 수 있다.

3-1. CO₂ 발생억제기술

CO₂ 발생억제기술은, 연소시 CO₂를 배출하는 석유 등의 화석연료의 사용량을 저감시키는 방법이다. 즉 발전사이클의 고효율과, energy 절약을 촉진시키는 동시에 천연gas 등 저탄소연료의 사용, 수력 및 태양 등의 재생가능한 clean energy의 이용, 나아가 원자력 energy 등의 대체

energy로의 전환 등이다.

현재 인류가 소비하고 있는 energy는, 지구에 쏟아져 내리는 태양 energy의 1만분의 1정도이어서 양적인 면에서 대체에너지로 충분하나, 시간변동에 대응가능한 채취효율이나 수송 및 저장효율을 높일 수 있는 새로운 energy system의 개발이 완성되어야 태양energy의 이용이 가능하다.

3-1-1. 발전사이클의 개선

화력발전소에서의 화석연료 연소시 연소용공기 대신 순산소만으로 연소하여 연소배출gas의 조성을 CO₂와 수증기만으로 한 후 용이하게 CO₂를 분리회수하는 방법이 연구되고 있다. 배출되는 CO₂의 일부는 산소회석용으로 recycle시켜 연소온도를 억제하는데 이용한다. 이 CO₂회석 순산소연소법에는 79%의 질소와 21%의 산소로 구성된 일반 공기로부터 산소를 분리시켜야 하는 공정이 필요하나, 3-2-1에서 설명하는, 배출gas로부터 CO₂를 amine등으로 분리회수하는 방법과 비교하여, 발전효율이나 설비투자, 운전cost 및 필요설비면적등 어느점에서나 뛰어나다는 검토결과가 보고되고 있다.

또, 석탄-gas화 combined cycle 발전 plant에서, gas화에 의하여 생성되는 H₂/CO를 분리하여 그중에서 CO-riched gas는 CO₂로 회석한 산소로 연소하고 H₂-riched gas는 일반공기로 연소시키는 process가 제안되고 있다. 이 경우 CO₂제거 cost는 1톤당 \$16정도로 발전전력의 약 25%가 소요되는 것으로 추산되고 있다.

3-1-2. 연료의 개질

천연gas중 수소(H₂) 또는 수소가 풍부한 gas를 석탄이나 석유 개질용으로 이용하는 방법이 검토되고 있다. 일반적으로 탄소(C), 수소(H), 산소(O) 등으로 조성되어 있는 일반화석연료에 수소(H₂)를 반응시켜 메탄과 물을 얻은 후, 메탄을 분해시켜 탄소와 수소를 생성하면, 탄소는 연료로 이용하지 않고 저장하고, 수소의 일부는 화석연료와의 반응에 재이용하는 방법이다. 이렇게 하여 최종적으로 얻어진 수소와 메탄을 연료로 이용함으로써 대기중으로 방출되는 CO₂양을 억제하는 것이다.

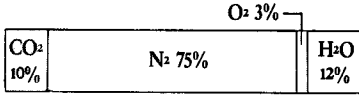
또 이와 유사한 방법으로, 석탄, 메탄, 일산화탄소등에 물을 반응시켜 수소와 CO₂를 얻은 후 수소는 연료로 이용하고 CO₂는 회수하는 방법이 있다.

위의 방법들은 연료의 energy 효율면에서는 바람직하지 못하지만 연소후 발생하는 CO₂를 분리·제거하는 사후처리에 비하여, 연소전에 연료를 개질하여 CO₂발생을 억제 또는 회수처리하는 사전예방이 결과적으로 효율적이라는 판단에서 제안·검토되고 있다.

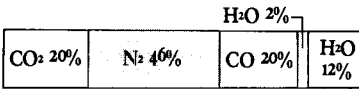
3-2. CO₂의 고정기술

화력발전소 및 제철소에서 배출되는 gas의 평균적인 조성을 그림 1에 표시하였다. 100만kW의 화력발전소에서 배출되는 CO₂량은 석탄화력의 경우 약 21만ton/day, 중유화력은 1.6만ton/day, 천연가스화력은 1.1만ton/day 이다. 또 천연가스를 연료로 하는 경우 연소배출가스는 비교적 깨끗한 편이지만, 중유나 석

탄연료의 배출가스에는 황화물 및 입자상물질이 함유되어 있어 CO₂ 회수시 조건에 따라서는 이들 불순물을 소정의 농도이하로 분리제거할 필요가 있다.



화력발전소의 배출gas 조성



제철소高爐 배출gas 조성

그림1 화력발전소 및 제철소의 배출gas 평균 조성

대량 고정발생원으로부터 CO₂를 회수처리할 경우 기술적으로 중요한 사항은 다음의 2가지이다. 우선 대량의 CO₂를 어떻게 고효율로 분리회수할 것인가이고 다음으로 회수한 CO₂를 어떤 방법으로 고정할 것인가 하는 것이다.

3-2-1. CO₂의 분리회수기술

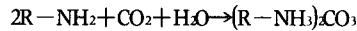
CO₂의 대량발생원으로부터 CO₂를 회수하는 과정에서 가장 energy를 필요로 하는 점은 배출된 혼합gas로부터 CO₂를 분리하는 과정이며, 현재 검토중인 방법으로는 흡수법과 흡착법, 냉각분리법 및 막분리법 등이 있다.

1) 흡수법

흡수법은 CO₂를 선택적으로 흡수할 수 있는 흡수액을 이용하여 분리하는 방법이다. 즉, 저온에서 CO₂를 함유한 혼합gas를 흡수액에 접촉시켜 CO₂를 선택적으로 흡수시킨 후, 가열 또는 감압하여 CO₂를 기화시켜 분리회수하는 방법이다. 흡수

법에는 탄산칼륨이나 아민 등의 흡수액을 사용하는 화학흡수법과 polyethylene glycol의 dimethylether 용액 등을 사용하는 물리흡수법이 있다.

화학흡수법은 CO₂와 흡수제의 화학반응으로 높은 흡수효과를 얻을 수 있으나 CO₂의 脫着에 다량의 열공급이 필요하다. 화학흡수법에 이용되는 용액으로는 monoethanolamine 등의 alkanolamine계의 용액이나 탄산칼륨계 용액 등이다. 이 방법의 장점으로는 선택성이 높음 및 CO₂ 分壓이 낮은 조건하에서도 흡수능력이 좋다는 점을 들 수 있다. 흡수제로 이용되는 alkanolamine용매 1분자에는 水酸基와 amino기가 있어 수산기는 용매의 수용성을 높이고 amino기는 다음식에 의한 반응으로 CO₂등의 산성gas와 반응하여 높은 흡수력을 나타낸다.



화학흡수법에서는 흡수제에 의한 장치의 부식방지, 흡수제의 산화에 의한 노화방지, 새로운 흡수제의 개발 등이 금후의 기술개발 과제이다.

물리흡수법은 용액에 CO₂를 물리적으로 흡수시키는 방법이다. 따라서 Henry법칙에 의거 조작압이 높을수록 흡수량도 증가하며, 또 흡수 조작 후 CO₂를 脫離시킬 때도 화학흡수와 같은 강한 흡수가 아니며 가열등의 조작은 불필요하고 약간의 감압조건하에서 용이하게 탈리할 수 있다. 그러나 화학흡수에 비교하여 선택성이 떨어지는 단점이 있다. 흡수액으로서의 methanol, polyethylene glycol 등이 검토되고

있다.

2) 흡착법

흡착법은 극히 작은 細孔이 다수 뚫려 있는 흡착제(Zeolite, 활성탄, 이온교환수지 등)에 CO₂를 선택적으로 흡착시켜 분리하는 방법이다. 흡착법의 구체적인 process로는 가압 상태에서 혼합gas를 흡착제에 접촉시켜 CO₂를 선택적으로 흡착시킨 후, 감압상태에서 CO₂를 탈착시켜 분리하는 방법 및 저온에서 혼합gas를 흡착제에 접촉시켜 흡착시킨 후, 가열하여 CO₂를 탈착분리하는 방법이 있다. 압력 swing에 의하여 재생탈착하는 전자의 방법을 PSA법, 가열에 의하여 재생탈착하는 후자의 방법을 TSA법이라 일컫는다. 현단계에서는 PSA법이 압도적으로 많이 연구되고 있으며, 그 이유로는 혼합gas가 흡착장치 입구에서 어느정도 고압상태에 있는 점과 탈착 재생시 TSA법에 비하여 경제성이 높고 조작이 간편하다는데 있다.

3) 기타

냉각분리법은 혼합gas를 냉각하여 저온에서 분리증류하는 방법으로 그 원리는 비교적 단순하나 일반적으로 소비 energy가 많다는 결점이 있다. 혼합gas중의 CO₂농도가 높을 경우에 이용가능한 방법이다.

마지막으로 膜분리법에 의한 CO₂분리는, 膜을 투과하는 기체의 성질이 서로 다른 원리를 이용하여 분리하는 방법이다. 이용되는 膜으로는 polyimid, polyamide, 초산 cellulose 및 polysulphone 등의 고분사막과 투과gas에 대하여 높은 용해성을 소유하고 있는 액이나 액중에

함유시킨 擔體와 혼합가스의 반응성을 이용한 액막이 있다.

3-2-2. CO₂의 고정기술

1) 海中貯留

해양에는 대기중에 비하여 약 50배의 CO₂량이 화학적으로 용해되어 있다. 산업혁명 이래 대기중의 농도는 약 70ppm(280ppm에서 350ppm으로) 증가한 상태이지만, 만약 해양의 CO₂흡수량을 약 0.4% 증가시킬 수 있다면 산업혁명이후 증가한 대기중의 CO₂를 제거할 수 있는 계산이 된다. 해양은 지속적으로 증가하고 있는 대기중의 CO₂를 충분히 흡수할 수 있는 최대의 수용원이라고 판단된다.

해양저류의 구체적인 방법은 다음과 같다. 우선 화력발전소나 제철소 등에서 배출되는 대량의 CO₂를 amine용제로 흡수분리시킨 다음, 냉각 또는 가압하여 액화한다. 액화한 CO₂를 500m 이상의 深海에 주입시키면, 수압에 의하여 CO₂를 액체상태로 가뒀을 수 있다. 500m 海深에서는 액화 CO₂의 비중은 해수비중보다 작아 부상하게 되나, 부상중에 해수에 용해한다. 또 3000m 이상의 해심에서는 액체 CO₂의 비중은 해수의 그것보다 커, CO₂를 액체상태로 심해저에 저류 가능하다. 그러나 3,000m 정도의 해심인 해역까지 액체 CO₂를 선박으로 해상수송해야만 된다. 이 방법을 이용한 분리회수처분에 필요한 energy손실 및 설비투자자를 고려하면, 전력가격은 60-100% 인상되는 계산이나, 대량의 처분법으로 가장 실현가능한 방법일 것이다. 그림 2에 CO₂의 해양저류법의 모식을 나타내었다.

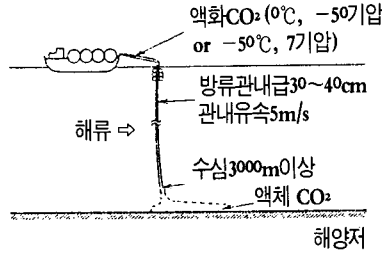


그림2 CO₂ 해양저류법의 모형도

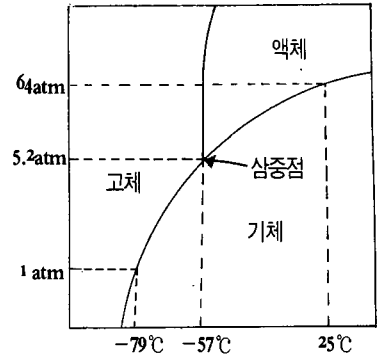
해양에의 CO₂저류법으로는 상기의 액체상 CO₂ 저류법 이외에, 밀도가 1.56g/cm³의 dry ice상으로 심해에 침전시키는 방법, CO₂와 물과 반응시켜 이산화탄소수화물인 clathrate를 생성시켜 해저에 저류하는 방법이 있다. clathrate는 sherbet상태로 10.2°C이하 또는 44.5기압 이상의 상태에서 안정을 유지한다. 해심 1000m 이상의 평균해수온은 4°C이하이므로, 생성된 clathrate(밀도 1.04~1.07g/cm³)는 심해저에서 안정된 상태로 유지된다.

상온(25°C)하에서 64기압이상 또는 -57°C에서 5.27기압(삼중점)이상으로 가압하면 CO₂는 액화한다. 상압하에서 CO₂를 -79°C이하로 냉각하면 고화(dry ice)한다. CO₂의 물성을 표 1에, 상태도를 그림 3에 나타내었다.

Table 1. CO₂의 생리적성질

물 성	수 직	비 고
삼 중 점	216.6K, 518kPa	
비 점	194.7K	100kPa에서의 승화온도
증 기 압	6.41MPa	25°C에서의 값
용 해 열	20.3KJ/mol	25°C, 100kPa에서의 값
용 해 열	8.33KJ/mol	삼중점에서의 값
승 화 열	25.2KJ/mol	194.7k, 100kPa에서의 값
액체밀도	1.88g/cm ³	삼중점에서의 값

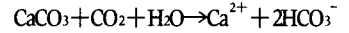
* 1atm=101.3kPa, 0°C=273.2K



(1 atm=101 kPa)

그림3 CO₂의 상태도

CO₂의 해양저류의 포인트는 평균 수심 3,000m의 해양을 유효하게 이용하여 CO₂를 흡수시키는 것이다. CO₂는 수중에서는 대부분 중탄산이온(HCO₃⁻)의 형태로 용해되어 있다. 따라서 해중에 주입시킨 CO₂는 심해저에 퇴적되어 있는 탄산칼슘(CaCO₃)과 반응하여 중탄산이온의 형태로 용해된다.



통상 CaCO₃는 3,000m 이상의 심해에서는 Ca²⁺과 CO₃²⁻으로 해리되어 녹아있지만 그보다 얇은 해저에서는 용해되지 않고 퇴적해 있다. 심해역까지 CO₂를 운반하지 않고 수심 500m 정도에서 반경 1cm 크기의 파이프를 bubbling 또는 液滴을 방

출한다면 100m정도도 상승하기전에 CO₂는 전량용해된다는 검토결과가 보고되고 있다. 또 얕은 해역에서 CO₂를 용해시킬 경우 해수의 비중이 커져 하강해류가 발생, 경사면을 따라 심해로 이동할 것이라는 예측도 하고 있다.

심해저에 저류시킨 액체 CO₂층의 상부에는 clathrate층, 또 그위에는 염분농도가 극히 높은 해수층이 생성될 것이라고 예측하고 있다. 탄산염퇴적물(탄산칼슘)이 존재하는 해저에 액체 CO₂를 저류시킬 경우, 확산된 CO₂가 CaCO₃와 중화반응하여 중탄산이온의 형태로 해수중에 녹을 것으로 예측하고 있다.

화력발전소등의 대량발생원으로부터 회수한 CO₂는 일시적인 저장 및 해상수송을 위하여 일반적으로 액화하는 것이 가장 바람직하나 근해유역에 발생원이 위치한 경우에는 고압파이프 수송도 가능할 것이다.

한국의 동해나 멕시코만, 지중해 등은 여러나라가 위치하고 있어 이러한 해역에 CO₂를 저류하는 일은 각국의 이해관계가 대립하고 있어 정치적인 문제를 야기시킬 것이다. 따라서 저류가능한 해역은 태평양이나 대서양과 같은 외양으로 제한될 것이다. 나라에 따라서는 CO₂저류를 위하여 1000km이상의 해상수송이 불가피할 것이며 따라서 대량의 CO₂저류장소로서 해중 이외의 장소에 대하여서도 검토할 필요가 있다.

2) 地中隔離

또 하나의 CO₂대량고정법으로 지중의 격리방법을 들수 있다. 검토되고 있는 격리장소로 1) 地下帶水層, 2) 廢gas田, 3) 油田을 이용하는

방법이 있다. 지하대수층에 격리가능한 CO₂량은 3200억톤으로 추산되고 있다. 지구전체에는 대수층을 이루고 있는 퇴적분지가 6500만km² 존재하는 것으로 파악되고 있다. 그 유효층 두께를 300m, 유효공극율을 20%, 유효치환효율을 20%, 포화용해도를 0.042ton-CO₂/m³, 격리가능한 지역을 퇴적분지 전면적의 1%로 가정하여 산출된 값이다. 또 폐gas 전을 이용하면 총 1800억톤 정도의 CO₂를 격리할 수 있을 것으로 추산되고 있다.

유전이용의 경우는, 격리대상 유전의 조건으로 유분의 비중이 비교적 낮고 유전의 깊이가 깊어야 된다. 세계에서 개발된 원시매장량 45조바렐중에서 상기 조건에 부합되는 양은 약 2조 바렐로 추정되고 있다. 유전에서의 원유채취율 증가를 10%로 보고, 원유채취에 필요한 CO₂량을 6000m³/바렐로 계산하면 격리가능한 양은 630억톤 정도로 추산된다. 그밖에 해저지하 대수층이나 trap지질구조등의 존재가 예측되고 있어 이곳에 격리 가능한 CO₂량은 금후의 연구에 따라 증가할 것으로 사료된다.

지중격리는 해중저류에 비하여, 회수한 CO₂를 일시적 저장이나 해상수송을 위하여 액화할 필요가 없이 직접 지중에 주입하는 것으로 가능하다. 또 가장 좋은 장점으로는 생물이 서식하지 않는 지중에 격리하는 것이므로, 해중저류에 비하여 생태계에 미치는 영향을 고려하지 않아도 무방하다는 점이다.

이상의 자연제어의 고정방법 이외에도 인공적인 대량고정방법도 검토되고 있다. 예를 들면 두께 2m 정도의 단열재로 둘러싸인 직경

400m의 지형구조물을 dome의 형태로 지중에 반쯤 묻어 놓고 CO₂를 dry ice상태로 저장하는 방법이 제안되고 있다. 이 방법으로 격리한 CO₂는 수천년간 보존가능할 것이라는 검토결과도 보고되고 있다.

최종적으로 CO₂고정에 대한 비용문제가 가장 관심의 대상이나, 현재로서는 해중저류이든 지중격리이든 process의 경제성목표로서 탄소 1톤당 \$100 이하로 처리코스트를 억제해야 될 것으로 검토되고 있다.

3) 육상식물에 의한 고정

육상식물에 의하여 유기물로 고정되어 있는 CO₂양은 탄소화산으로 약 1조 8천억톤에 이른다. 이 양은 대기중에 존재하는 CO₂양의 2배이상에 해당한다. 육상식물에 의한 CO₂고정을 한층 더 촉진시키려면 수목의 식생이나 삼림을 보호하여야만 할 것이다.

인류가 금후 사용할 것으로 추정하는 화석연료로부터 발생하는 CO₂를 식물에 의하여 고정하고자 할 경우, 예를 들어 유럽대륙면적에 해당하는 식생면적(약670만km²)에 아메리카 느릅나무를 심는다면, 인류가 방출하는 매년 50억톤의 탄소를 향후 50년간 고정할 수 있다는 검토결과가 보고되고 있다. 그러나 실제로 식물에 의하여 CO₂를 고정한다는 것은, 인구의 급증에 따르는 식량문제와 개발에 의한 녹지환경의 감소와 같은 요인에 의하여 불가능할 것으로 예측되고 있다.

또 육지표면의 1/3은 건조지대이며 이 지역들은 사막 또는 사막화가 현저히 진행되고 있는 지역이어서 수목의 식생을 곤란하게 한다. 이의 원인으로서는 자연적인 기후요인보

다 인위적인 요인이 크다고 알려져 있다. 인위적인 요인으로는 삼림벌채에 의한 토양의 보수력의 감소와 지하수의 고갈, 過경작이나 過방목에 의한 지방의 저하 및 過灌漑에 의한 토양염분의 증가등을 들 수 있다.

4) 해양생물에 의한 고정

산호에 의한 탄소고정량은 현재 $0.3 \sim 20 \text{kg/m}^2 \cdot \text{year}$ 정도로 추산되고 있다. 가령 그 고정량을 $10 \text{kg/m}^2 \cdot \text{year}$ 로 할 경우, Great Barrier Reef (Australia 북동부해안)의 면적 $23 \times 10^{12} \text{m}^2$ 에 산호를 육성하면, 인류가 배출하는 CO_2 의 약 10%를 고정가능한 계산이 된다.

해중에서의 탄소의 대부분은 HCO_3^- 로 용해되어 있다. HCO_3^- 가 Ca^{2+} 와 반응하여 탄산칼슘을 생성하는 동시에 CO_2 를 방출한다. 해양이 순수계에서 평형을 유지한다는 가정하에서 검토한 계산에 의하면, 산호에 의하여 탄산칼슘으로 고정되는 탄소량의 62%에 상당하는 양의 CO_2 가 동시에 대기로 방출된다.

그러나 산호에는 공생식물이 존재하여, 동물인 산호가 방출하는 CO_2 를 공생식물이 광합성에 의하여 생체조직에 축적한다. 따라서 산호의 육성은, 공생식물의 작용까지 고려하면 CO_2 를 고정한다고 단정할 수 있다.

한편, 해조류중에는 갈조라하여 저대성장하는 조류가 있다. 대형갈조는 주로 북회귀선 이북 및 남회귀선 이남의 냉수권해역에 분포시각하고 있다. 북남미 및 Australia 연안에 분포하고 있는 Giant Kelp는 성장속도가 대단히 빨라, 수개월내에 전장 20~60m로 성장한다.

해조의 재배밀도는 $4 \sim 9 \text{kg}$ (건조중량)/ m^2 정도로, 육상식물중 최고치인 사탕수수의 $1.5 \sim 4.5 \text{kg/m}^2$ 의 2배에 해당된다. 건조해조의 50%를 탄소로 고정할 경우, 해조에 의하여 $2 \sim 4.5 \text{kg/m}^2$ 의 탄소를 고정할 수 있다. 또 이와 같이 성장속도가 빠른 해조류는 CO_2 고정뿐 아니라, bio-mass energy로 사용함으로써 화석연료의 사용을 절감할 수 있을 것이다.

5) 화학적 고정법

이 방법은 CO_2 를 처분하지 않고 재자원화하여 이용하는 차원이다. 예를 들면 CO_2 와 수소를 촉매존재하에 반응시켜 생성된 탄화수소류를 유용한 화합품으로 전환하는 것으로, 접촉수소화반응이라 일컫고 있다. 현재로서는 CO_2 로부터 methane, ethane, ethylene 등의 저급탄화수소 및 oil, wax류, formic ester 등의 carbon산 유도체, methanol, ethanol 등의 alcohol합성에 관하여 연구되고 있다. 사용하는 촉매로는 VIII족 금속擔持體 촉매에 관한 연구 사례가 보고되고 있다. methanol은 연료로 직접 사용하는 것 이외에 gasoline으로의 전환도 가능하다. 또 methanol로부터는 ethanol, 초산, olefin방향족, formaldehyde 등의 합성도 가능하다. 그밖에 CO_2 의 화학적 전환법으로 전기화학적방법, 광화학적방법, 고분자생성반응법, 인공 광합성법 등이 있다.

CO_2 를 유용한 화합품으로 전환하여 이용하는 방법의 문제점은 재이용에 필요한 energy를 어떻게 획득할 것인가, 재이용화합품의 수요의 여부등이다. 즉 회수한 CO_2 를 화합품으로 전환하여 재이용하기 위하

여는, 화석연료를 연소하여 발생한 energy와 동등한 energy를 필요로 하기 때문이다. 예를 들어 접촉수소화방법에 이용할 대량의 수소를 제조하기 위하여 방대한 energy를 필요로 하고, 이 energy를 얻기 위하여 또 다른 화석연료를 소비해야 한다면 전혀 무의미한 결과가 될 것이다. 또 생산된 화합품의 적당한 용도를 찾아야 할 것이다. 따라서, 회수한 CO_2 를 재자원화하여 이용하는 CO_2 고정법의 효과에는 한계가 있을 것으로 사료된다.

3-3. 인공적인 지구온도제어기술

3-3-1. 태양광 차단법

지구 대기의 온도 T는, 태양으로부터의 유입energy와 지구로부터의 열放射energy와의 熱收支에 의거, 다음식으로 나타낸다.

$$(1-a)\pi r^2 s = 4\pi r^2 \epsilon \sigma T^4 (1-\beta)$$

여기서 a는 지구표면에 의한 태양광반사율(albedo), r은 지구의 반경, s는 태양정수, ε은 방사계수, 는 Stefan-Boltzmann정수, β는 대기중의 CO_2 방출을 저감시킴으로서 β의 증대를 완화, 대기온도 T의 상승을 억제하고자 하는 것이 CO_2 문제 대책기술의 기본원리이나, 상대적으로 a인 albedo값을 증가시켜 대기온도의 상승을 억제하는 원리도 성립됨을 알 수 있다.

구체적인 방법의 하나로 제트비행기로 성층권에 CO_2 gas를 살포하여 생성되는 aerosol에 의하여 지구로 유입되는 태양광의 일부를 반사 또는 산란시킴으로서 지구온도를 제어하는 방법이 제안되고 있다. 이

원리는 아황산 aerosol이, 태양광은 반사시키나, 지구표면으로부터 반사되는 적외선에 대해서는 반사시키지 않고 그대로 투과시키는 성질을 이용한 것이다. 이 방법은 구소련의 기상학자 부티코에 의하여 처음으로 제안되었다. CO₂ gas에 의한 지구 냉각현상은, 대규모의 화산폭발로 인한 지구의 평균온도의 하강을 초래한 과거의 경험으로 설명될 수 있을 것이다.

미국의 과학자들이 이 방법을 구체화시키기 위한 cost계산을 실시한 결과, 미국의 연간 국방비의 10%이하의 비용으로 CO₂농도가 2배로 증가했을 경우의 지구온도 상승을 억제할 수 있다고 말하고 있다. 이 방법은 경제적으로나 기술적인면에서 실현 가능한 방법으로 부각되고 있다.

3-3-2. 심해냉수에 의한 대기냉각법

그 밖의 방법으로 심해냉수를 끌어올려 지구대기를 냉각시키는 방법이 제안되고 있다. 해수면의 평균온도는 약 18°C이나, 수심 1000m에서는 4°C이하이다. 해양의 열용량은 대기의 약 1000배에 해당하여,

해수면의 온도가 1°C하강하면, 대기의 평균기온은 3°C정도 하강할 것으로 추산되고 있다. 해수인양에 필요한 동력은 해양의 풍부한 파력 또는 태양 energy등으로 가능하리라는 예측을 하고 있다.

4. 맺음말

지구온난화에 가장 큰 기여를 하고 있는 CO₂문제대책기술 중 CO₂ 삭감효과가 가장 큰 기술은, 환경이나 생태계에 2차적인 영향을 미칠 가능성이 높다. 예를 들면 성층권에 막대한 양의 CO₂ gas를 살포하여 태양광을 차단하는 방법은 부수적으로 대기오염 및 인체에의 영향이 우려된다. 또 해중저류법은 해중생물에의 영향 및 수산자원에 대한 우려도 금할 수 없으며, CO₂의 저장이나 수송에 따른 CO₂취급문제도 무시할 수 없을 것이다.

수백 ppm정도의 CO₂농도에서 인체에는 무관하지만, 수% 농도 이상의 CO₂는 유해하다. 예를 들면 농도 2-3%에서 두통이나 현기증이 유발되며, 6-7%에서는 호흡곤란, 8-10%에서 의식불명이 되며, 肺性cyanosis(靑色症)을 일으켜 사망

하게 된다. CO₂는 일반공기보다 무거워 누출시 상부확산하지 않고 하부에서 체류하기 때문에 위험성은 더욱 증대된다.

현재 진행되고 있는 CO₂대책기술의 연구개발에는 고농도 CO₂의 위험성을 고려한 연구에는 극히 적다. 액화 CO₂탱크나 수송탱커의 사고 및 수송파이프가 파손된 경우, 누출된 대량의 CO₂가 주변의 대기중으로 어떻게 확산되는가, 그리고 인간에게 어떤 영향을 미칠 것인가 불확실하다. 이러한 영향을 사전에 충분히 검토하여 안전성의 확보를 철저히 할 수 있는 기술 개발도 급후 중요한 과제의 하나일 것이다.

이상 CO₂를 중심으로 지구온난화 대책기술을 언급하였다. UR에 이어 세계경제, 정치의 침예한 대립양상을 나타내고 있는 Green Round가 곧 눈앞에 닥친 현실에서 국가 경쟁에서 이기기 위한 대응책의 수립은 물론이거니와 지구의 운명을 좌우할 지구온난화와 같은 Global 환경문제에 한국도 하루 빨리 대처하여야 할 시점에 와 있다고 사료되는 바 産·學·官의 관련단체에 적극 대처할 것을 마지막으로 촉구하고자 한다.

참고 문헌

- | | | |
|--|---|--|
| 1. 小宮山宏編著: 地球環境のための地球工學入門, オーム社(1992) | 5. IPCC(1990c): Climate Change, The Response Strategies, Island Press (1990) | search Council, National Press, Washington D.C.(1983) |
| 2. 茅陽一編: 地球環境工學 Hand book, オーム社(1991) | 6. Nordhaus, W.D.: Future carbon dioxide emissions from fossil fuels, Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee, National Re- | 7. Nakashiki, N.et al.: Sequestering of CO ₂ in a Deep-Ocean-Fall Velocity and Dissolution Rate of Solid CO ₂ in the Ocean, CRIEPI Report EU91003 (1991) |
| 3. IPCC(1990a): Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press(1990) | 8. Trexler, M.C.et al.: Forestry as a Response to Global Warming, Report of World Research Institute(1989) | |
| 4. IPCC(1990b): Climate Change, The | | |