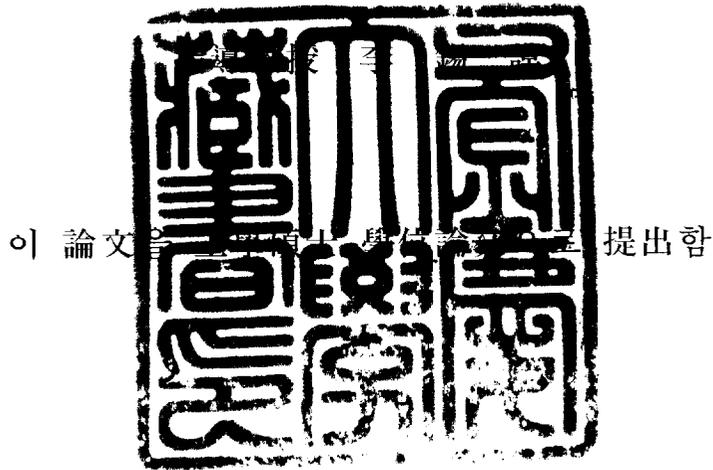


工學碩士 學位論文

에너지 모델링을 이용한 대기 중 이산화탄소의  
저감방안에 관한 연구



2005年 2月

釜慶大學校 大學院

環境工學科

宋 恩 知

# 宋恩知的 工學碩士 學位論文을 認准함

2004年 12月 21日

主 審 理學博士 朴 清 吉  
副 審 工學博士 鄭 用 賢  
委 員 工學博士 李 錫 謨



# 목 차

표 목차 .....	iv
그림 목차 .....	v
Abstract .....	vii
I. 서 론 .....	1
II. 이론적 배경 .....	3
1. CO <sub>2</sub> 와 기후변화에 관한 연구 .....	3
1.1 WCP(World Climate Programme, 1981) .....	3
1.2 CDAC(Carbon Dioxide Assessment Committee, 1983) .....	4
1.3 EPA(U.S Environmental Protection Agency, 1983) .....	4
1.4 Jülich(1983) .....	5
1.5 Clark et al.(1982) .....	5
1.6 Bolin et al.(1989) .....	6
2. 기후변화협약 .....	8
2.1 기후변화협약 .....	8
2.2 교토의정서 .....	11
2.3 세계의 대응 .....	13
3. 대기 중 이산화탄소의 예측 .....	17
3.1 Airborne fraction 개념 사용 .....	17
3.2 탄소순환 모델 이용 .....	18
3.3 지구탄소순환 에너지 시스템 모델을 이용한 예측 .....	19

<b>III. 연구방법</b>	<b>21</b>
1. 대상시스템 선정	21
2. 에너지 시스템 모델링	23
2.1 에너지 시스템 다이어그램 작성	23
2.2 모델의 정량화	24
2.3 수식화	25
2.4 모델의 보정	25
3. 시뮬레이션	27
3.1 시뮬레이션 프로그램	27
3.2 지구적 탄소순환 시스템의 시뮬레이션	29
<b>IV. 연구 결과</b>	<b>30</b>
1. 탄소순환 시스템의 모델링	30
1.1 지구적 탄소순환 시스템의 다이어그램	30
1.2 모델의 정량화	32
1.3 모델의 수식화	33
1.4 모델의 보정	35
1.5 Basic 프로그램 작성	36
1.6 모델의 검증	38
2. 대기 중 이산화탄소 변화 예측	40
2.1 대기 중 이산화탄소 변화 예측	40
2.2 타 연구와의 비교	43
3. 대기 중 이산화탄소 저감방안에 대한 시뮬레이션	45
3.1 화석연료 사용량의 감소	45
3.2 녹화사업에 의한 생산량 증가	46
3.3 산림훼손의 감소	48
3.4 해양목장화에 의한 생산량 증가	50
3.5 이산화탄소의 해양주입	51

4. 대기 중 이산화탄소 저감 방안 제시 .....	53
V. 결 론 .....	54
감사의 글 .....	56
참고문헌 .....	58

## <표 목 차>

Table 3.1. Calibration of constants using numbers on the diagram in Fig. 3.3 .....	26
Table 3.2. Steps in Running a Simulation Program .....	28
Table 4.1. Expression of equations and coefficients .....	34
Table 4.2. Calculation of coefficients for the Model global carbon cycle .....	35
Table 4.3. Basic programme of model of global carbon cycle .....	37
Table 4.4. Relative error and R(correlation coefficient) and $R^2$ (coefficient of determination) for simulated result .....	39

## <그림목차>

Fig. 2.1. Scenarios for future atmosphere CO <sub>2</sub> concentrations. UB is based on emissions from fossil fuel combustion according to upper bound from terrestrial source and LB is based on the lower bound fossil fuel emissions, terrestrial emissions .....	7
Fig. 2.2. Progress of COP(Conference of the parties), UNFCCC .....	9
Fig. 3.1. The global carbon cycle, showing the reservoirs (in GtC) and fluxes (GtC/yr) relevant to the anthropogenic perturbation as annual averages over the period 1980 to 1989 .....	22
Fig. 3.2. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right .....	24
Fig. 3.3. A part of model of global carbon cycle to show how to calibrate equations .....	26
Fig. 4.1. Diagram for the global carbon cycle system .....	31
Fig. 4.2. Energy system diagram with several kinds of numbers .....	32
Fig. 4.3. Energy system diagram with several kinds of equations .....	33
Fig. 4.4. Carbon dioxide concentration (in parts per million, ppm) of the air at the summit of Mouna Loa, Hawaii, from 1958 .....	38
Fig. 4.5. The comparison of the computed with observed CO <sub>2</sub> in the atmosphere	39
Fig. 4.6. Simulation of future carbon dioxide concentration in the atmosphere .....	41
Fig. 4.7. A part of the simulated result for model of global carbon cycle .....	41
Fig. 4.8. Changes of organic matter, dissolved inorganic carbon and calcium carbonate with change of atmospheric carbon dioxide. ....	42
Fig. 4.9. Simulation for 2%/year increase of CO <sub>2</sub> emission of model of global carbon cycle .....	43
Fig. 4.10. Simulation for fossil fuel use reduced 20%, 50%, 80%, and 100% .....	46
Fig. 4.11. Simulation for the primary production of the afforestation project	

increased 5%, 10%, 25%, and 50% .....	47
Fig. 4.12. Simulation for the deforestation reduced 20%, 50, 80%, and 100% .....	49
Fig. 4.13. Simulation for the primary production for sea weed farms increase 5%, 10%, 25%, and 50% .....	50
Fig. 4.14 Diagram of the global carbon cycle system adding the pathway of Fc1 into the sea .....	51
Fig. 4.15. Simulation for the injection of carbon dioxide into the sea increased 5%, 10%, 25%, and 50% .....	52

# **Control of atmospheric carbon dioxide using energy modeling**

**Eun Ji Song**

*Department of Environmental Engineering, Graduate School,  
Pukyong National University*

## **Abstract**

During the last century, the net increase in the global temperature is about 0.6°C. Global warming, the phenomenon of global surface temperature increasing, is one of the major concerns in environmental management and protection. It is proved that climate changes happen after an increase in CO<sub>2</sub> emission, which confirms that climate that the increase in CO<sub>2</sub> emission does cause global warming.

Since a continuous increase of the atmospheric CO<sub>2</sub> might lead to changes of the global climate, it is essential to be able to project the likely future concentrations that may occur due to various possible rates of CO<sub>2</sub> emission. The numerous assessments have been made of the CO<sub>2</sub> problem but because most assessments have not included all courses of global carbon cycle. They have not represented it systematically and quantitatively.

Energy modeling and simulation, based on systems ecology, are intellectually creative and quantitatively rigorous, mainstream way of connecting ideas with reality. Models help us understand how things are organized and function. In

order to understand the global carbon cycle system, we have to simplify it by creating model. To do that, we draw symbols representing the system. Then we add numerical values to make the model quantitative. Finally, we use Visual Basic program for simulating the model with a computer.

Using energy modeling and simulation, we predict the future change of the global carbon cycle system and carry out simulation for five plans to reduce atmospheric carbon dioxide and then suggest control of atmospheric carbon dioxide doing the simulation with alternative plans.

From the result of simulation including all courses of global carbon cycle for future concentration in 300 years, the atmospheric carbon dioxide concentration will increase from 357 ppm in 1985 to 385 ppm in 2285. The model of global carbon cycle was calibrated with the data observed in Mauna Loa, Hawaii from 1958. The simulated results of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration were fairly good coincided with observed values within relative errors(R.E.) of 0.42%, correlation coefficient(R) of 0.9962 and coefficient determination(R<sup>2</sup>) of 0.9925.

Among the five plans of carbon dioxide concentration in the atmosphere, only two cases - the reduction of fossil fuel use and the injection of carbon dioxide into the sea - are possible to decrease carbon dioxide concentration. Accordingly, the decrease of atmospheric carbon dioxide concentration requires the alternative energy source development and the industrial structure reorganization decreasing fossil fuel use, and also requires the approach of ecological engineering to vivify the sea productivity by the carbon dioxide injection into the sea.

# I. 서론

지난 세기 동안, 지구의 평균기온은 지구온난화로 인해 대략 0.6℃ 정도 상승하였다 (Hasen and Lebedeff, 1987). 지구의 기온변화는 이상기후 출현, 해수면 상승은 물론 자연생태계와 인간의 사회·경제의 전반적인 활동에 까지 광범위한 영향을 미치게 되었다.

지구온난화를 유발하는 온실가스는 산업혁명 이후 급격한 화석연료의 사용으로 대기 중에 축적되어 왔고, 대기 중에 오랜 기간 체류하는 특성으로 인간 활동에 의한 온실가스 배출을 지금 당장 중지하여도 과거 방출로 인한 축적의 영향은 몇 세기 동안 지속될 것으로 예상되어 전지구적인 대책의 수립과 시행이 시급히 요구되고 있다.

Arrhenius(1896)가 화석연료의 사용이 대기 중 이산화탄소 증가의 원인이고 지구의 복사선 균형이 변화할 것이라 연구한 이후, Callendar(1938), Revelle and Suess(1957), Bolin and Eriksson(1959) 등은 대기 중 이산화탄소가 지구온난화에 가장 영향을 주는 가스로서 계속 증가하고 있음을 연구하였다.

대기 중의 이산화탄소 증가가 지구적인 기후변화를 초래할 수 있으므로 앞으로 일어날지 모를 미래 농도를 예상하는 것은 필수적이라 할 수 있으며, 미래의 이산화탄소 농도와 기후변화 예측에 관한 수많은 연구가 국가와 국제적인 기구에 의해 수행되어 왔다. WMO/UNEP/ICSU에 의해 조직된 WCP(World Climate Programme, 1981)를 시작으로 CDAC(Carbon Dioxide Assessment Committee, 1983), EPA(US Environmental Protection Agency, 1983), IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001)에 이르기까지 미래의 이산화탄소 배출과 그에 따른 대기 중 이산화탄소 농도와 기후변화를 예측하여 관리방안이나 정책결정에 대한 의견을 제시하고 있다.

지구온난화가 단순히 한 국가만의 환경문제가 아니라 국제사회의 협력이 필요함을 인식하여, 1992년 유엔환경개발회의(UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 150여 개국의 서명으로 기후변화협약을 채택하였으며, 세계 각국은 온실가스 저감의 의무사항을 이행하기 위해 대응방안을 마련

하고 온실가스 저감을 위한 기술적인 측면에서의 연구를 수행하고 지원하고 있다.

현재 이산화탄소의 배출을 저감하기 위해 에너지 절약 및 화석연료 이외의 대체 에너지 활용에 의한 배출량 감소의 연구, 다량 배출되는 고정원에서 이산화탄소 분리 및 회수, 화학적 고정화에 의한 유용한 화학물질로의 전환, 미생물에 의한 생물학적 고정화 연구, 심해에 이산화탄소를 주입시키는 해양투기, 그리고 녹지조림의 증대와 해양복장화로 흡수기능의 강화 등의 다양한 연구가 진행되고 있다.

이산화탄소 배출과 대기 농도 사이의 관계를 시험하고 미래농도를 계산하기 위해서는 모든 탄소순환 과정을 포함하는 탄소순환 모델이 필요하나, 초기의 탄소순환 모델은 대부분이 탄소의 다양한 저장의 크기와 특성에 대한 자료가 충분하지 않아 탄소순환을 나타내는 모델로는 부적당하며, 그 이후의 탄소순환 모델들도 대부분이 육상 생물권의 과정을 단순화시킨 표현만을 포함하고 탄소순환의 다른 메커니즘을 포함시키지 않고 있다(IPCC, 1994).

대기 중 이산화탄소에 대한 많은 예측은 과거 변화의 간단한 추정을 기초로 대기로 배출되는 이산화탄소량에 대해 대기에 남아있는 이산화탄소량의 비인 airborne fraction을 가정하여 이루어졌으며, 이는 탄소순환을 구성하는 대기, 해양, 육지 등과 그 속에서 사는 생물 등이 유기적으로 상호작용하고 있기 때문에 airborne fraction을 가정하여 예측하는 것은 이러한 부분을 체계적으로 파악할 수 없다고 판단된다.

시스템 생태학(systems ecology)은 시스템 내에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변환과정을 시스템 언어로 분석하여 구성부분들과의 유기적 관계를 정량적으로 규명할 수 있는 방법을 제시한다. 따라서, 본 연구에서는 시스템 생태학적 접근법을 이용한 지구 탄소순환의 에너지 시스템 모델을 도입하여 지구 탄소순환 시스템의 향후 변화를 예측하고, 현재 연구 중인 이산화탄소 저감방안들 중 기술적인 방법을 제외한 다섯 가지 방안에 대해 시뮬레이션하여, 그 결과를 바탕으로 대기 중 이산화탄소를 감소시킬 수 있는 가능한 방안을 제시하고자 하였다. 이로써 기후변화협약과 같은 국제사회의 동향에 대항하기 위함이든 자발적인 저감노력이든 간에 대기 중 이산화탄소 저감을 위한 연구에 있어 연구방향에 대한 길잡이의 역할을 할 수 있을 뿐만 아니라 나아가 에너지 정책이나 이산화탄소에 관한 정책 결정에 있어서도 기여할 수 있을 것이다.

## II. 이론적 배경

### 1. CO<sub>2</sub>와 기후변화에 관한 연구

스웨덴의 화학자 Svante Arrhenius(1896)는 화석연료 사용에 의한 CO<sub>2</sub>의 증가가 지구의 온난화를 유발시킬 것이라고 주장하고 최초로 온도상승을 정량적으로 표현하였다. 그의 연구는 산업혁명과 환경의 관련성이 처음으로 인식되기 시작된 시점에서의 연구였지만 지구의 방사 기후에 대한 증가된 CO<sub>2</sub> 농도의 잠재력이 커다란 주목을 끌지는 못하였다. 그 이후 이 문제에 관한 몇 가지 논문들이 간혹 나타나기도 했지만, 인간의 환경파괴로 나타나는 무서운 결과에 대한 인식이 높아지기 시작하던 1970년대 초반부터 지대한 관심을 끌기 시작했다.

기후를 변화시킬 수 있는 주요한 2가지 요소는 CO<sub>2</sub> 생산의 증가와 대기 탁도의 증가로 인식되었다. 전자는 기후를 더욱더 온난하게 만드는 잠재성을 가지고 있으며, 후자는 냉각을 더욱더 쉽게 유발할 수 있는 것으로 여겨졌다. 한때는 냉각이 지배적인 것처럼 여겨졌지만 1980년대 초반부터 온실의 온난화에 대한 연구를 계속 진행한 결과 이와는 반대의 사실을 밝혀내게 되었다.

#### 1.1 WCP(World Climate Programme, 1981)

WCP는 1980년 11월 오스트리아에서 열린 전문가 회의의 결과로 WMO, UNEP와 ICSU에 의해 조직된 CO<sub>2</sub>에 관한 최초의 국제적 연구이다. 이 연구에서는 미래의 화석연료에 의한 CO<sub>2</sub> 배출은 2025년 13.6 GtC/yr로 예측하였고 생물권에서의 순배출은 0~4 GtC/yr로 예측하였다. 2025년 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도예상은 대기 중으로 배출되는 CO<sub>2</sub>가 배출총량의 40~55%가 대기에 남을 것이라고 가정하여 410~490 ppm으로 예측하였으며, 현재 대기 중의 CO<sub>2</sub>량이 두 배가 될 때 기온 변화는 1.5~3.5℃ 가량 오를 것으로 전망하였다.

WCP 보고서는 CO<sub>2</sub>에 의해 야기되는 기후변화가 주요한 환경적 이슈이지만 불확실

성이 존재하기 때문에 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도 제어와 해로운 영향을 막기 위한 관리방안의 개발은 시기상조라고 결론지었고 CO<sub>2</sub> 문제는 선진국과 개발도상국 모두에 영향을 주기 때문에 둘 사이의 협력을 요구함을 강조하였다.

## 1.2 CDAC(Carbon Dioxide Assessment Committee, 1983)

U.S national Research Council의 CDAC 보고서는 CO<sub>2</sub> 문제의 다양한 부분에서의 연구를 수행하였다. 2025년 미래의 화석연료 사용으로 인한 CO<sub>2</sub> 배출은 10 GtC/yr, 생물권에서의 순배출은 1.8~4.7 GtC/yr로 예측하였고 미래의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 화석연료 사용 때문에 예상되는 배출의 미래의 airborne fraction(대기 중으로 배출되는 총량에 대한 대기 중에 남아 있는 량)을  $0.60 \pm 0.10$ 으로 추정하여 428 ppm으로 예측하였다. 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 두 배가 될 때 지구의 기온은 1.5~4.5℃ 가량 오를 것으로 예측하였다.

이 보고서에서는 현재의 연료 사용의 패턴을 변화시키는 것이 언젠가는 필수적이거나 요구될지라도 CO<sub>2</sub>로 야기되는 기후변화가 현재의 화석연료 사용패턴을 변화시키지는 못 할 것이라는 WCP와 유사한 결론을 내렸다. 또한 기후변화를 제어하는 단계가 다른 온실가스를 제어하는 것이 보다 쉽게 이루어지기 때문에 온실가스의 배출감소를 시작하는 것임을 지적하였다.

## 1.3 EPA(U.S Environmental Protection Agency, 1983)

EPA의 연구는 화석연료 사용을 제한하는 특별한 정책이 다음 120년 후의 기온 증가를 지연시키는 효과가 있는지 증명하는 시험을 통해 문제를 접근하였다. 그 결과를 보면, 2025년에 화석연료 사용에 의한 배출은 10 GtC/yr, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 440 ppm으로, CO<sub>2</sub> 농도가 두 배가 되었을 때의 기온변화는 1.5~4.5℃ 증가할 것으로 예측하였다.

EPA의 연구는 2000년 이전에 제정되는 석탄사용 금지만이 효과적으로 지구온도 변화율을 낮추고 2055년까지 2℃ 증가를 지연시키는 결론을 내렸다. 석탄과 석유 사용

을 금지하는 것이 2100년에 증가하는 온도를 감소시키는 가장 효과적이라고 제안되어  
질지라도 EPA는 석탄사용을 금지하는 것은 아마도 경제적으로, 정책적으로 실행 불  
가능한 것이라고 결론지었다.

#### 1.4 Jülich(1983)

이 연구는 IIASA(1981) 등의 연구들에 의해 만들어진 개요를 기본으로 하여 이루어  
졌다. 그 결과, 2030년 화석연료의 사용에 의한 CO<sub>2</sub> 배출은 1~16 GtC/yr일 것이라  
예측하였고, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 370~500 ppm으로, CO<sub>2</sub> 농도가 현재의 두 배가 되  
었을 때의 기온변화는 1~3 °C가 될 것이라 예측하였다.

Jülich의 연구는 우리의 지식이 현재 개개의 세계 지역에서 CO<sub>2</sub> 배출과 특별한 기  
후변화 사이의 관계를 정량적으로나 명백하게 설명하기 충분하지 않을지라도, 전세계  
나 넓은 범위의 위협은 빠르고 특별한 조치를 요구한다고 하였다. 사실, Jülich 연구는  
'위험적인 기후 대참사'를 확실하게 피할 수 있다면 필수적인 단계(조치)들은 즉시 받  
아들여져야만 한다고 결론을 내리고 있다.

#### 1.5 Clark et al.(1982)

Clark 등의 연구에서는 화석연료 사용으로 인한 대기 중으로의 CO<sub>2</sub> 배출은 2030년  
까지 매년 2% 정도의 성장률을 가질 것으로 예측하였다. 미래의 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는  
2030년에 371~657 ppm이 될 것으로 예측하였고 CO<sub>2</sub> 농도가 2배가 될 때의 온도 증  
가는 2~3 °C일 것으로 예측하였다.

이 연구를 통해서 Clark 등은 높은 경제 성장률과 결부시켜 증가되는 지식은 1990  
년대 초반에 시작되는 화석연료 사용의 미래성장을 억압하는 노력을 정당화할 수 있  
다 할지라도 화석연료 사용의 미래 성장을 억압하는 노력을 즉각 옹호하는 것은 정당  
성이 없다고 결론을 내렸다. CO<sub>2</sub>를 배출하는 화석연료에 덜 의지하는 안전한 에너지  
선택을 개발, 유지, 평가하고 모니터링을 활성화하며, 증가되는 대기 중의 CO<sub>2</sub>의 영향  
을 조사하는 두 가지 방침을 제안하였다.

## 1.6 Bolin et al.(1989)

Bolin 등은 다음 세기의 초기 몇 십 년이 지난 에너지 사용의 예상은 매우 불확실하여 30~40년을 넘어선 정확한 예측을 시도하는 것이 의미 있는 것이 아니기 때문에 미래 에너지 수요의 최고·최저 경계를 대신 추정함으로써 미래의 CO<sub>2</sub> 농도의 최고·최저 범위를 예측하였다.

최고의 범위는 2050년에 CO<sub>2</sub> 배출이 20 GtC/yr로, 이는 다음 65년 동안 현재 배출의 4배 증가를 포함하는 것이다. 그러나 미래의 매우 빠른 증가가 예상되에도 수많은 환경적, 사회적 그리고 논리적 제약 때문에 이것은 불가능한 것이다. 최저의 범위는 2050년에 약 2 GtC/yr 이하의 값으로, 이 값은 미래 에너지 수요와 특히 화석연료 사용을 제한하는 지속적이고 지구적인 노력에 의해서만 이루어질 수 있다.

예측된 CO<sub>2</sub> 배출의 시나리오를 이용하여 airborne fraction이 45±10%(대략 50%)일 것이라는 가정 하에 미래의 CO<sub>2</sub> 농도를 예측하였다.

CO<sub>2</sub> 배출이 가장 낮은 경우, 즉 다음 40년 동안 일정하거나 단지 매우 느리게 증가하는 배출과 그 후에 느리게 감소하는 배출은 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 대략 440 ppm으로 산업화 이전 농도의 60% 이하로 증가한 것이고 2100년 이후에나 CO<sub>2</sub>가 2배로 되는 것이 가능하다. 다음 40년 동안 CO<sub>2</sub> 배출의 적당한 증가(1~2 %/year)는 다음 세기의 후반에 CO<sub>2</sub> 농도의 2배(즉, 550 ppm)가 된다. 최고 범위의 시나리오는 2050년 즈음에 CO<sub>2</sub> 농도가 2배가 되는 것을 포함한다(Fig. 2.1).

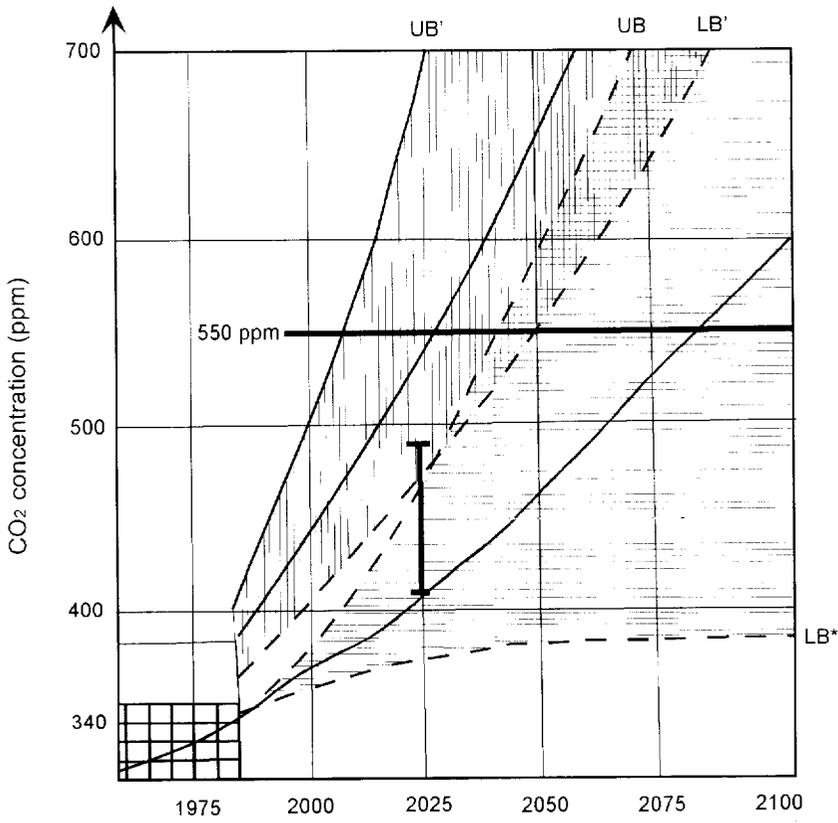


Fig. 2.1. Scenarios for future atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations. UB is based on emissions from fossil fuel combustion according to upper bound from terrestrial source and LB is based on the lower bound fossil fuel emissions, terrestrial emissions(Bolin et al., 1989).

Bolin 등은 이 연구를 통해서 미래의 CO<sub>2</sub> 배출은 이러한 지구적 에너지 공급 시스템이 어떻게 변할 것인가와 화석연료가 미래의 지구적 에너지 공급 시스템에 어떤 역할을 할 것인가에 의존하고 CO<sub>2</sub> 배출에 관한 정책은 CO<sub>2</sub> 배출과 기후변화에 관해서 뿐만 아니라 대기오염, 산성비 등과 같이 다른 환경적 영향에 관해서 에너지 공급에 대한 화석연료의 계속되고 증가되는 사용의 부정적인 영향을 어떻게 잘 이해하느냐에 의해 결정된다 하였다.

## 2. 기후변화협약

### 2.1 기후변화협약

기후변화에 관한 최초의 국제회의는 1979년에 열린 “인간 활동에 의한 잠재적 기후변화를 예측, 방지하기 위한” 세계기후회의이다. 이후 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)에 의해 1988년 ‘기후변화에 의한 정부간 패널(IPCC)’이 조직되고 1992년 리우 지구환경선언에서는 154개국에 의해 유엔기후변화협약(UNFCCC : UN Framework Convention on Climate Change)이 채택되었다. 기후변화협약은 50개국 이상이 가입하여 발효조건이 충족됨에 따라 1994년 3월 1일 공식 발효되었으며, 2001년 11월 제7차 당사국총회에 까지 진행되었다.

'92. 6 : 기후변화협약채택(리우환경회의)	
'94. 3 : 기후변화협약발효(50개국 비준)	우리나라 비준('93. 12)
'95. 3 : 제1차 당사국총회(COP 1)	2000년 이후 감축논의 시작
'96. 7 : 제2차 당사국총회(COP 2)	제1차 총회 결과 재확인
'97. 12 : 제3차 당사국총회(COP 3)	선진국 감축의무 합의
'98. 11 : 제4차 당사국총회(COP 4)	작업계획 확정
'99. 10 : 제5차 당사국총회(COP 5)	제6차 당사국총회 준비 회의
'00. 11 : 제6차 당사국총회(COP 6)	교토의정서 이행방안 합의 실패
'01. 6 : 제6차 당사국총회 속개회의(COP 6bis)	교토의정서 이행방안 기본합의 도출
'01. 11 : 제7차 당사국총회(COP 7)	교토의정서 이행방안 최종합의 도출 (Marrakesh Accords)

Fig. 2.2. Progress of COP(Conference of the parties), UNFCCC.

기후변화협약은 모두 26개 조항으로 구성되어 있으며 대기 중의 온실효과기체를 기후 후에 위험한 영향을 미치지 않는 수준으로 안정화하는데 그 목적이 있다. 이러한 수준은 생태계가 기후변화에 자연스럽게 적응되고, 식량생산이 위협받지 않으며, 지속가능한 개발이 가능하도록 충분한 시간적 범위 내에서 달성되도록 하고 있다.

이 협약의 기본원칙으로서 차별적 책임론, 국가별 특수성 고려, 예방조치 원칙, 개

발전, 자유무역원칙의 5가지가 있다. 차별적 책임론이란 선진국과 개도국이 기후변화에 대해 공동의 책임을 지는 동시에 차별적인 책임을 진다는 것으로, 각국이 개별적인 능력에 따라 기후보존의무를 부담하지만 선진국이 보다 선도적인 역할을 하도록 하는 것이다. 국가별 특수성 고려의 원칙은 특히 개도국의 특수한 여건과 필요를 고려해야 한다는 것으로서, 이 경우도 차별적 책임론과 같은 맥락으로 이해할 수 있다. 예방조치의 원칙이란 기후변화로 인한 피해가 발생하기 전이라도 예방적 차원에서 이를 방지할 필요가 있다는 원칙으로서, 과학적 불확실성이 기후변화방지에 필요한 조치를 지연시킬 수 없다는 이유에 근거한다. 개발권은 각국의 기후변화방지 정책이 국내의 구체적 여건에 따라 이루어져야 하며, 국가개발정책과 통합되어 추진되는 한편, 경제성장도 중요한 요소로 고려한다는 것이다. 마지막으로 이 협약은 자유무역의 원칙을 들고 있으며, 이는 기후변화방지를 구실로 자의적인 차별조치 또는 위장된 무역규제조치를 하지 못하도록 금지하는 것이다.

기후변화협약의 회원국들은 협약의 원칙에 따라 일정한 의무를 부담해야 하는 데 공통의무사항과 특정의무사항으로 구분된다. 공통의무사항은 모든 당사국들이 온실가스 배출량 감축을 위한 국가전략을 자체적으로 수립하여 시행하고 이를 공개해야 하며 온실가스 배출량 및 흡수량에 대한 국가 통계와 정책 이행에 관한 국가보고서를 작성, 당사국총회에 제출하도록 규정하고 있다. 반면 특정의무사항은 공동의 차별화된 책임의 원칙에 따라 기후변화에 대해 역사적으로 책임이 있는 산업화된 국가들로 구성된 Annex I, Annex II, Non-Annex I 국가로 구분, 각기 다른 의무를 부담하도록 하는 것이다. Annex I 국가는 2000년까지 온실가스 배출량을 1990년 수준으로 동결하도록 규정하였으나 이에 대한 강제력은 없다. Annex II 국가는 개발도상국에 대한 재정 및 기술이전의 의무를 가진다.

우리나라는 1993년 12월 기후변화협약의 중요성을 감안하여 47번째로 가입하였고, Non-Annex I 국가로 분류되어 있어 국가보고서 제출 등 공통의무사항만 수행하면 된다. 그러나 우리나라는 현재 온실가스 배출량이 세계 9위이고, 지난 3년간 한국은 전세계에서 가장 온실가스 배출량 증가량이 높은 나라 중 하나로 누적된 온실가스 배출량으로도 더 이상 기후변화의 책임을 회피하기 어려운 실정어므로 적절한 대응이 필요하다.

## 2.2 교토의정서

기후변화협약은 1992년 리우에서 채택되어 1994년 발효되면서 1995년부터 매년 기후변화협약 당사국 회의가 열려왔다. 1995년 베를린에서 열린 제1차 당사국회의에서 '베를린 위임사항(Berlin Mandate)'를 채택하였고 좀 더 구속력 있는 의무를 부여하기 위해서 1997년 제3차 당사국회의에서 교토의정서(KP; Kyoto Protocol)를 채택하였으며, 2005년 2월 16일 공식 발효될 예정이다. 교토의정서는 2008년에서 2012년 사이 Annex I 국가 전체의 온실가스 배출총량을 각국의 경제적 여건에 따라 -8%에서 10% 까지 차별화하여 1990년 수준보다 최소 5% 감축하는 것을 목표로 한다.

온실가스 감축목표 달성을 위해서 선진국들이 부담해야 할 비용을 낮추기 위하여 온실가스 감축을 위한 국가간 공동사업과 온실가스 감축실적의 거래를 인정하는 '교토 메커니즘'이라는 제도가 도입되었다. 대부분의 선진국들은 온실가스 배출량이 계속 증가되고 있는바 국내적 수단에만 의존하여 감축목표를 달성하는 경우 경제적 비용이 막대할 것으로 분석된다. 경제성장률이 낮고 신기술이 많이 보급되어 있어서 온실가스 감축의 한계 비용이 상대적으로 큰 선진국들이 적은 비용으로 더 많은 온실가스 감축이 가능한 동구권 국가나 개발도상국에서 달성한 감축실적으로 의무이행에 활용할 수 있도록 허용하고, 감축실적을 상품처럼 거래할 수 있도록 온실가스를 상품으로써 사고 팔 수 있게 함으로써, 온실가스 저감 관련 기술시장을 확대시키고, 감축비용의 최소화, 기술시장 확대를 위한 전제조건인 개도국의 참여를 유도하도록 하고 있다. 교토 메커니즘에는 공동이행제도(Joint Implementation), 청정개발체제(Clean Development Mechanism), 배출권거래제(Emission Trading)가 있다. 공동이행제도는 교토의정서 제6조에 규정된 것으로 선진국인 A국이 선진국인 B국에 투자하여 발생된 온실가스 감축분의 일정분을 A국의 배출 저감실적으로 인정하는 제도이고, 청정개발체제는 교토의정서 제12조에 규정된 것으로 선진국인 A국이 개발도상국인 B국에 투자하여 발생된 온실가스 배출 감축분을 자국의 감축 실적에 반영할 수 있도록 하는 제도이다. 배출권거래제는 교토의정서 제17조에 규정된 것으로 온실가스 감축의무가 있는 국가에 배출쿼터를 부여한 후, 동 국가간 배출쿼터의 거래를 허용하는 제도이다. 교토의정서의 채택은 무엇보다도 선진국들에 대해 강제성 있는 감축목표를 설정하

였다는 점과 온실가스를 상품으로서 거래를 할 수 있게 하였다는 점에서 의의를 가진다. 이에 따라 향후 에너지 절약 및 이용효율 향상, 신재생에너지 개발 등 온실가스 배출량을 줄일 수 있는 새로운 기술분야에 대한 투자 및 무역이 확대되고 현재의 금융시장 규모 못지않은 온실가스 거래시장이 새롭게 탄생할 전망이다.

## 2.3 세계의 대응

### 2.3.1 미국의 대응

미국은 백악관에 Climate Change Task Force가 구성되어 있으며 국무성, 에너지부, 환경청, 재무부 등이 관여하고 있다. 2002년 2월, 기후변화문제에 대한 온실가스 감축 기술 및 시장 메커니즘 활용과 온실가스 감축을 위한 개도국과의 파트너십 형성이라는 새로운 접근 방안을 발표하였고 온실가스 감축 레지스트리 강화, 양도 가능한 크레딧 창출, 온실가스 저배출 에너지 설비 투자에 대한 세제혜택, 에너지 효율 및 분리저장 기술에 대한 연구지원, 특정 산업부문과의 배출량 감축협약체결 추진, 국제적 활동, 그리고 농장 및 산림에서의 탄소 분리저장과 같은 기후변화 대응방안을 마련하고 있다.

온실가스 배출량 감축을 위한 부문별 전략으로, 전력부문에는 발전 및 전환부문에 대한 청정기술개발을 통하여 온실가스 감축을 추진하고 정부는 대체에너지개발을 지원하고, 수송부문에는 연료-효율적 모터 자동차 및 트럭의 개발, 청정연료에 대한 연구 및 개발 옵션을 강화 추진하고, 산업부문에서는 이산화탄소 및 다른 온실가스 배출량 감축을 위하여 산업부문과 파트너십을 구축하도록 한다. 건물부문에서는 상업용, 주거용 및 공공건물에서 기술적 지원을 통해 에너지효율을 향상시키는 자발적 파트너십 구축을 추진하고 농업부문은 배출량 감축의 이익을 가진 conservation program을 실시하도록 한다. 또한 연방정부 건물 및 연방수송선의 에너지 사용에 의한 배출량 감축을 추진하고 있다.

### 2.3.2 일본의 대응

일본에서는 총리대신실이 업무를 총괄하고 통산성, 환경청, 외무부 등이 관여하고 있고 통산성에서는 환경보호 및 산업입지국(Environment Protection and Industrial Location Bureau)내의 지구환경 문제 담당과(Global Environment Affairs Office)에서 기후변화협약 문제를 전담하고 있다. 1997년 Global Warming Headquarters를 설립하여 1998년 "Guideline for Measures to Prevent Global Warming"을 제정하였고, 2002년 3월에 "New Guideline for Measures to Prevent Global Warming"을 제정하였다.

일본은 환경적 측면과 경제적 측면에 모두 기여하는 메커니즘 구축, 온실가스 배출상태 및 국내 정책과 조치에 대해 추가적 조치, 정책의 필요성을 고려하기 위해 주기적으로 검토하고, 정부, 국민, 산업계 등 모든 이해관계자의 협조를 통한 감축목표 달성뿐 아니라 미국 및 개도국을 포함한 모든 국가에서 공통으로 적용될 수 있는 규칙설립을 위해 노력하는 것을 기본정책으로 하고 있다.

1차 의무기간 동안 1990년 수준으로 에너지원으로부터 CO<sub>2</sub>를 감축하고 혁신적 기술 개발 및 지구온난화 방지활동을 통하여 1990년도 기준의 전체 온실가스 배출량의 2% 감축을 목표로 하고 있으며, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>는 1995년 기준으로 전체 배출량의 2% 내에서 영향을 억제하고 COP7에서 동의된 바와 같이 13백만 톤의 탄소 감축을 추진하려 하고 있다.

### 2.3.3 EU의 대응

EU의 15개 회원 국가들은 유럽 국가들이 기후변화협약에 대하여 공동 대응하는 것이 보다 유리할 것이라는 인식을 공유하고 있으며, 유럽 의회 차원에서 공동적인 정책을 구상하고 있다. EU 의회에서 기후변화 문제는 1980년대부터 “주요 지구환경문제(Major global environmental problem)”로 분류되어 있고, “예방성 원칙(Precautionary Principle)”에 의하여 조기 실천을 지지하고 있으며, 다른 선진국의 동참을 적극적으로 유도하고 있다. 기후변화 전략의 개발에 있어서 유럽이 주도권을 행사해야 한다는 입장을 표명하고 대기 중 온실가스를 안정화시키기 위해서는 50~70% 수준의 삭감이 필요하다는 IPCC의 입장을 잠정적으로 지지하고 있다.

유럽집행위원회(European Commission)는 2001년 10월 교통혼잡 및 병목현상을 감소시켜 수송에 의한 CO<sub>2</sub> 감축을 이룰 수 있도록 하기 위하여 인프라 구축 프로젝트에 대한 집중적 투자를 제안하였다. 또한 건물부분의 규제사항으로 2001년 4월 EU에서의 신축 및 현존 건물의 에너지효율을 향상시키기 위한 신규사항을 제안하였다. 그 내용으로, 건물관련 EU구성원에 의해 채택된 에너지 사용에 관한 통합된 최소 효율기준을 개발하기 위한 공통방법론(Common methodology)을 만들고, 기존 건물의 수리시 1,500m<sup>2</sup>이상의 건물 및 신규 건물에 대하여 이 방법론에 근거한 최소 기준의 적용 및 주기적 갱신을 하도록 하고 신규 및 기존 건물에 대한 인증체계를 만들고, 적절한 자격을 가진 인원에 의한 냉·난방 시스템 설치에 대한 특별 검사 및 평가하도록 하였다. 2001년 9월에는 EU 장관회의에서 내부전력시장에 대체에너지원으로부터의 발전을 촉진하는 사항을 채택하였다. 산업부문에서는 통합 오염방지 및 통제와 관련하여 NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, PFCs 및 HFCs의 상당량의 배출에 대한 예방적 조치와 에너지의 효율적 사용을 포함하여 설비 작동자의 의무를 규정하였다.

### 2.3.4 우리나라의 대응

우리나라는 1993년 12월 기후변화협약에 가입하였으며, 2002년 11월 교토의정서를 비준함으로써 동 협약과 관련된 국제사회의 움직임에 효과적으로 대처하고 우리나라의 역할을 수행하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다.

1998년 4월 국무총리를 위원장으로 하고 산업자원부, 환경부, 외교통상부 등 관계부처 장관을 위원으로 하며 에너지, 경제, 환경 전문가들이 참여하는 「기후변화협약 범정부 대책기구」를 구성했고 12월에는 온실가스를 저감하는 각종 정부시책을 종합하여 「기후변화협약 대응 종합대책(1차)」을 확정하여 시행하였으며, 2002년 3월 「기후변화협약 대응 종합대책(2차)」을 확정하였다. 2차 종합대책은 2002년~2004년 동안 추진될 것으로, 정보통신·미래첨단기술 등 에너지 저소비형 산업으로의 이행을 가속화시켜 나가고 각 부문에서의 에너지 절약 노력을 강화하여 「에너지 절약형 경제구조」를 조기에 구축하고, 지구온난화 방지를 위한 국제적 노력에 기여해 나가는 한편, 우리의 에너지 소비 현실을 온실가스 감축부담협상에 적극 반영하는 것을 기본방향으로 하고 있다.

1979년 석유과동 이후 에너지이용합리화법을 제정하고, 1980년 에너지관리공단을 설립하여 산업체 등이 에너지 절약 및 이산화탄소 저감을 위한 사업에 쉽게 동참할 수 있도록 각종 제도적, 기술적 지원을 하고 있다.

자발적 협약사업은 에너지 다소비 기업과 정부가 맺는 자발적 협약으로 기업은 온실가스 저감목표량, 시행방법과 추진일정 등을 제시하고 정부는 이에 각종 지원을 해주는 제도이며, 녹색에너지가죽 운동은 에너지 절약형 고효율기기 보급, 확산을 위해 1995년 시작되었고 지금까지 녹색조명운동, 녹색모터운동, 녹색에너지설계운동 프로그램이 추진되고 있다. 에너지절약전문기업 활성화를 통해, 에너지 사용자가 에너지 절약을 위하여 기존의 에너지 사용시설을 개체 또는 보완하고자 하나 기술적, 경제적 부담으로 개체를 시행치 못할 때 절약전문기업으로 하여금 대신 투자하도록 하여 효율적인 에너지 절약을 할 수 있도록 1992년부터 시행하여 오고 있다. 또한 연간 연료사용이 많은 업체와 공공건물 등을 대상으로 업종별 에너지 절약 전문가와 최신 진단장비를 활용한 에너지 관리진단을 실시하고 있고, 진단 후 그 결과를 분석하여 에너지 절약과 개선방법 등에 대한 상담과 시설자금을 지원하고 있다.

### 3. 대기 중 이산화탄소의 예측

#### 3.1 Airborne fraction 개념 사용

미래의 대기 중 이산화탄소 농도를 평가하기 위해 탄소순환 모델들을 어떻게 사용할 것인가에 대한 논의가 이루어지기 전에 소위 airborne fraction이라는 형태로 과거의 변화를 표현하는 것이 가능하다.

Airborne fraction을 total airborne fraction과 marginal airborne fraction으로 구분하는 것은 중요하다. Total airborne fraction( $\alpha$ )은 대기로 배출되는 총 이산화탄소량( $(CO_2)_{tot}$ )에 대한 대기 중에 증가되는 이산화탄소량( $(CO_2)_a$ )의 비이며,  $\alpha = \Delta((CO_2)_a) / \Delta((CO_2)_{tot})$ 로 표현되고, marginal airborne fraction( $\alpha_m$ )은 화석연료에 의해 대기로 배출되는 이산화탄소량( $(CO_2)_{fl}$ )에 대한 대기 중에 증가되는 이산화탄소량( $(CO_2)_a$ )의 비이며,  $\alpha_m = \Delta((CO_2)_a) / \Delta((CO_2)_{fl})$ 로 표현된다. Total airborne fraction은 대기의 이산화탄소 증가율에 의존하고, 대기 중 미래의  $CO_2$  농도를 예측하는데 유용하고 marginal airborne fraction은 육상 생물권의 변화의 복잡한 영향 없이 배출에 대응하는 해양의 모델 계산을 비교할 때 유용하다.

과거에는 대기 중 이산화탄소 농도를 대기 중 배출되는 이산화탄소량의 airborne fraction이 일정하다는 가정에 의해 추정하는 것이 일반적이었고 보통 50%를 가정하였다. WMO/UNEP/ICSU에 의한 이산화탄소 평가가 이러한 방법으로 평가되었으며 airborne fraction을 40~55%일 것이라 가정하였고, CDAC의 연구에서는 화석연료의 사용 때문에 예상되는 배출의 미래의 airborne fraction을  $0.60 \pm 0.10$ 의 추정값으로 사용하여 평가하였다. Bolin 등은 이들 연구와는 다소 느린  $45 \pm 10\%$ (대략 50%)일 것이라고 가정하여 대기 중 이산화탄소 농도를 예측하였다.

Airborne fraction의 개념을 이용한 평가는 과거의 배출과 대기에 남아있는 이산화탄소의 비를 이용하여 추정하는 것이나, 이러한 예측방법은 대기 중 이산화탄소 증가에 따른 다른 흡수 메커니즘이 장기적으로 어떻게 이루어지는지에 대한 고려 없이, 단순히 배출되는 양의 50%가 대기 중에 남는다는 것으로 예측한 것은 탄소순환의 과정을 체계적으로 파악할 수 없을 것으로 판단된다.

### 3.2 탄소순환 모델 이용

탄소순환의 주요 과정에는 대기과 해양 사이의 이산화탄소 교환, 표층수와 심해 저장고 사이의 이산화탄소 교환, 토지이용의 변화로부터 이산화탄소의 순배출 또는 순흡수, 육상식물의 광합성에 의한 이산화탄소 흡수, 식물과 토양의 호흡을 통한 대기중으로 다시 돌아가는 이산화탄소의 이동이 있다.

이산화탄소 배출과 대기농도 사이의 관계를 시험하고 미래 농도를 계산하기 위해서 위의 요소들을 모두 포함하는 탄소순환 모델이 필요하다. 그러나 대부분의 탄소순환 모델들은 육상에서의 이산화탄소 흡수는 불과 영양염의 유용성과 미래의 생물권에 의존하는 복잡성이 있지만 육상 생물권의 과정을 너무 단순화시킨 간단한 표현만을 포함하고 있다. 또한 다른 흡수 메커니즘이 존재하고 실제로 이러한 부분들이 탄소순환에 있어서 한 부분으로서의 역할을 함에도 모델화하는데 포함시키지 않고 있다(IPCC, 1994). 이러한 방법 역시 탄소순환의 주요 과정을 포함하지 않기 때문에 체계적이고 정량적으로 예측하였다 하기에는 미흡하다고 판단된다.

### 3.3 지구탄소순환 에너지 시스템 모델을 이용한 예측

#### 3.3.1 시스템 생태학적 접근

시스템 생태학(systems ecology)은 지구의 환경문제를 국가적인 차원의 지역적 문제나 개별적인 산업 또는 기술의 문제로만 인식하지 않고 하나의 통합된 시스템으로 파악하고, 또한 인간을 포함한 모든 생물권과 그 주변의 환경을 하나의 통합된 시스템으로 인식하여 시스템 내의 유기적인 관계와 상호작용을 체계적이고 정량적으로 파악하는 학문이다. 포괄적인 접근방식을 이용하는 시스템 생태학은 에너지 척도를 기초로 시스템의 구조를 다이어그램으로 표현하고, 이를 기초로 생태계의 부분적 기능을 통합하여 하나의 시스템으로 연구하는 시스템 분석과 컴퓨터를 이용하여 생태계를 분석하고 재구성하는 에너지 시스템 모델을 종합적으로 평가하고 있다.

시스템 생태학은 자연생태계에서 일어나는 에너지 및 물질의 흐름과 변화과정을 시스템 언어로 분석하여 인간과 자연의 유기적 관계를 정량적으로 규명할 수 있는 방법을 제시해 주기 때문에 우리에게 자연을 보는 새로운 안목을 가질 수 있게 해주며, 오늘날 우리가 겪고 있는 환경문제를 해결하고 자연을 합리적으로 관리하는데 활용될 수 있다.

#### 3.3.2 모델링 및 시뮬레이션

환경이라는 세계는 인간의 내면세계보다 더 복잡하다. 그 곳에는 다양한 자연구성요소들과 더불어 수많은 사람들이 살아가고 있다. 인간은 환경시스템 속에서 너무나 많은 것을 세밀히 보기 때문에 시스템 전체를 파악할 수 없을지라도 그것을 단순화한 모델은 이해할 수 있다. 하나의 시스템을 간단하게 표현한 것을 모델(model)이라 한다. 전체 시스템의 기능을 제대로 파악하려면 모델의 필요성은 커진다.

개념과 이론들은 모델의 형태로 표현하고 이러한 모델이 갖는 의미를 연구하는 것은 이론과 실체를 체계화하는 방법 중의 하나이며, 이것은 모든 학문연구에서 표준이 되고 있으며 인간과 자연에서 나타나는 현상들을 성공적으로 연구하기 위해서는 모델링과 시뮬레이션이 반드시 같이 이루어져야 한다.

세계의 모든 현상이 에너지 변환과정을 동반하기 때문에 에너지 시스템 언어는 시스템을 표현하는 하나의 방법이며, 에너지 시스템 모델링은 에너지 언어를 이용하여 시스템을 모델로 만들고, 시뮬레이션하는 과정을 말한다. 시뮬레이션을 통해 시간에 따른 그 시스템의 변화를 파악할 수 있다.

시스템 생태학적 접근을 통해 탄소순환 시스템을 에너지 모델링하게 되면 대기 중 이산화탄소 농도 예측뿐만 아니라 각 요소들 간의 유기적 관계와 상호작용을 장기적이고 체계적으로 파악할 수 있을 것이다.

### Ⅲ. 연구방법

#### 1. 대상 시스템 선정

산업혁명 이후 전세계적으로 산업화, 공업화가 이루어지게 되면서 대기 중 이산화탄소의 농도가 급격히 증가하게 되었다. 이 같은 증가의 원인은 화석연료의 사용증가, 산림의 파괴, 토지 이용의 변화 등에 의하여 이산화탄소가 대기로 배출되기 때문이다.

대기 중의 이산화탄소는 육상과 해양의 생물들에 의한 호흡과 화석연료의 연소에 의해 증가되고 육상과 해양의 광합성과 해수의 탄산염 완충작용에 의해 감소된다. 현재 지구에 존재하는 탄소의 양은 대기 중에 750GtC(1GtC=10<sup>15</sup>Pg), 지구 전체의 유기물에 3913GtC만큼 함유되어 있고 해양에서의 용존무기물질과 탄산칼슘에 각각 38100GtC와 5000GtC만큼 함유되어 있다. 지구에 매장되어 있는 화석연료의 양은 5000GtC이다.

본 연구에서는 지구의 탄소순환을 대상 시스템으로 설정하여 각 구성요소들 간의 유기적인 관계와 상호작용을 나타낸 에너지 시스템 모델을 도입, 모델링과 시뮬레이션을 실시하여 미래의 대기 중 이산화탄소 농도를 예측하였고 현재 제기되고 있는 대기 중의 이산화탄소 저감방안에 대해 시뮬레이션한 결과를 바탕으로 대기 중 이산화탄소를 저감할 수 있는 방안을 제시해 보았다.

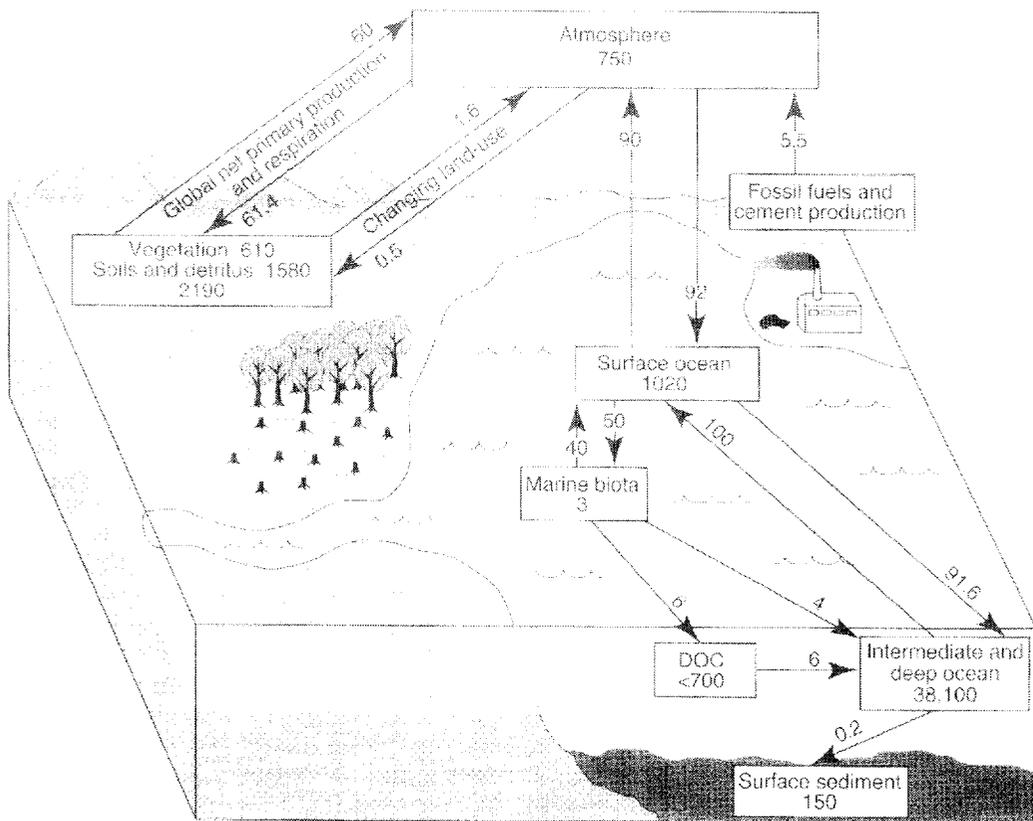


Fig. 3.1. The global carbon cycle, showing the reservoirs (in GtC) and fluxes (GtC/yr) relevant to the anthropogenic perturbation as annual averages over the period 1980 to 1989 (IPCC, 1994).

## 2. 에너지 시스템 모델링

### 2.1 에너지 시스템 다이어그램 작성

시스템을 구성부분들의 집합체로서 이해할 수 있도록 해주는 기호나 말을 시스템 언어(systems language)라 하고, 그 중에서도 에너지 언어는 모든 현상이 에너지 변환 과정을 동반하기 때문에 시스템을 일반적으로 표현하는 방법이며, 에너지 시스템 언어를 이용하여 다이어그램으로 표현함으로써 시스템의 구성부분들과 이들 사이의 연결 관계들을 파악하고 체계화할 수 있다.

시스템을 에너지 시스템 다이어그램으로 나타내는 것은 모델링의 첫 번째 단계이다. 모델은 물질과 에너지를 고려한 에너지 시스템 다이어그램을 통해서 더욱 명확하게 이해할 수 있게 된다.

Odum(1996)이 제안한 에너지 시스템 언어를 이용하여 시스템의 생산, 소비, 재순환 등의 변화를 전체적으로 파악하기 위해 에너지 시스템 다이어그램을 작성한다.

우선 대상 시스템의 경계를 설정한다. 여기에서는 대기를 포함하는 지구를 공간적인 경계로 설정하되, 지각은 포함시키지 않는다. 그 다음, 시스템 외부로부터 유입되는 에너지원과 대상 시스템 내의 생산, 소비, 재순환 과정을 파악한다. 마지막으로 외부에너지원을 transformity순으로 왼편에서 오른편으로 시스템의 경계의 외부에 배열하고, 시스템 경계 밖의 에너지원으로부터 시작하여 내부의 생산자, 소비자에 대한 에너지와 물질의 흐름에 따라 선을 연결하여 다이어그램을 연결한다.

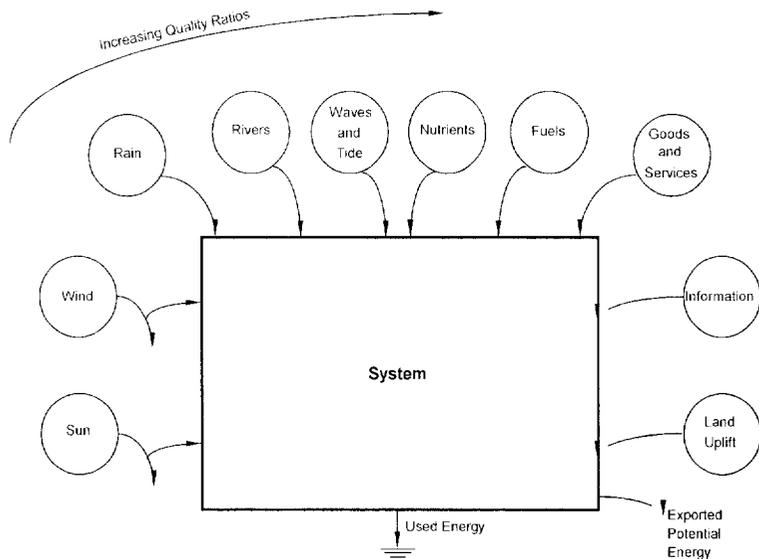


Fig. 3.2. Typical energy sources driving an environmental system arranged in order from low quality on left to high quality on right(Odum, 1983).

## 2.2 모델의 정량화

모델의 저장고와 경로에 대한 실제 시스템에서의 자료는 모델을 정량화하는데 이용된다. 시스템의 물질, 에너지, 돈, 인구 또는 다른 어떤 것의 저장고와 경로를 보여주는 에너지 다이어그램에 실제 조사하거나 관측한 자료를 기입하게 되면 시스템의 스케일을 알 수 있으며, 하나의 과정이 빠르게 또는 느리게 전환되는지를 알 수 있다. 시스템의 모든 경로들은 한 종류의 물질이 가지는 값이어야 한다. 다이어그램 상에서 바닥으로 나가는 열손실은 이용할 수 없는 형태의 에너지이기 때문에 수를 가지지 않는다. 에너지 시스템 다이어그램에 수를 나타내는 것은 시스템을 정량적으로 요약하는데 좋은 방법이 된다.

본 연구에서는 지구적 탄소순환 시스템을 정량화하기 위해서 Fig. 3.1을 이용하였으며, 화석연료에 의해 대기로 배출되는 이산화탄소량은 현재의 양을 유지하는 것으로, 해양에서의 탄소순환은 steady state로 가정하였다.

## 2.3 수식화

모델을 시뮬레이션하기 위해서는 시뮬레이션 프로그램에 입력시키기 위한 수식이 필요하다. 수식은 시간에 따른 저장고의 변화량과 경로들에 대한 것이다.

다이어그램의 경로에는 흐름의 양을 결정하는 계수  $k$ 가 존재하고, 경로상의 흐름이 일어나도록 하는 에너지원이나 물질이 어떠한 반응을 하느냐에 따라 수학적 표현이 다르게 나타난다. 경로에 대한 수식 작성의 예를 들면, 저장고에서의 유출은 저장된 양에 비례하여 유출되며, 저장된 양이 많으면 많을수록 유출은 증가하게 된다. 저장고의 양을  $Q$ , 유출계수를  $K1$ 이라 하면 유출되는 경로의 수식은  $K1*Q$ 라 표현되고, 여기서 ‘\*’는 곱하기를 의미한다. 유입과 유출이 일어나는 물질의 시간에 따른 변화에 대한 수식은 유입과 유출의 차이로 작성된다. 물질의 원래의 양을  $Q$ 라 하고, 다음 시간에서의 유·출입의 차이를  $DQ$ 라 하면 새로운  $Q = \text{지난 시간의 } Q + DQ*DT$ 가 된다. 이와 같은 방법으로 작성된 수식을 탄소순환 시스템의 다이어그램에 나타낸다.

## 2.4 모델의 보정

모델의 보정은 실제 자료를 이용하여 모델을 적합하게 만드는 과정이다. 이 값은 시뮬레이션에서 사용되는 수식의 일정한 계수  $K$ 를 계산하는데 사용된다.

보정은 정량화한 값과 수식을 이용하여 Table 3.1과 같이 Excel의 spreadsheet에서 계수값을 산정한다. Fig. 3.3은 정량화와 수식화한 다이어그램으로 보정하는 방법을 보여주기 위한 지구적 탄소순환의 에너지 다이어그램의 일부분이다.

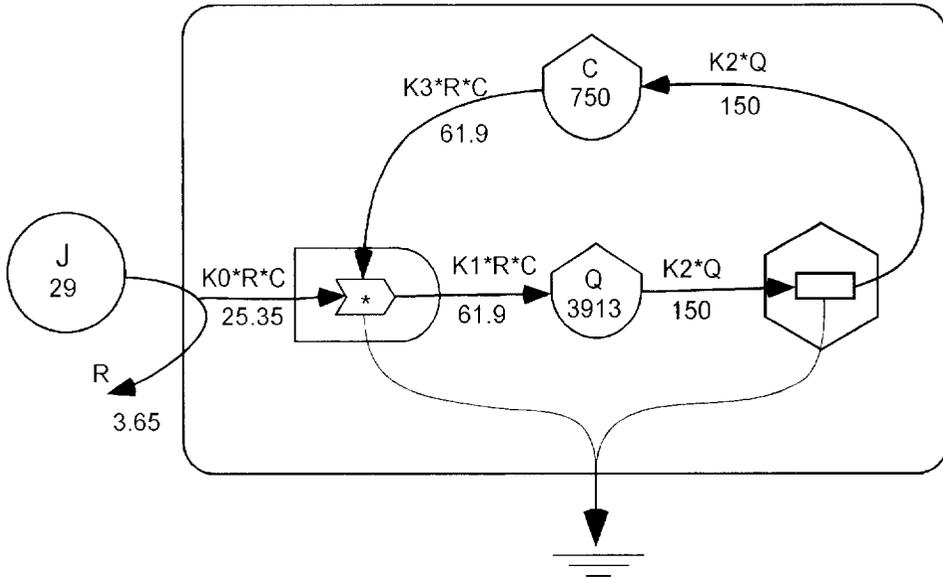


Fig. 3.3. A part of model of global carbon cycle to show how to calibrate equations.

Table 3.1 Calibration of constants using numbers on the diagram in Fig. 3.3

Source and Storage used for Calibration:					
source:	J =	29 J/yr			
	R =	3.65 J/yr			
Storage:	C =	750 GtC			
	Q =	3913 GtC			
Calculation of Coefficients:					
$K0 \cdot R \cdot C = 25.35 \text{ J/yr}$		$K0 = 25.35 / (R \cdot C)$	Therefore,	$K0 =$	0.00926
$K1 \cdot R \cdot C = 61.9 \text{ GtC/yr}$		$K1 = 61.9 / (R \cdot C)$	Therefore,	$K1 =$	0.0226
$K2 \cdot Q = 150 \text{ GtC/yr}$		$K2 = 150 / Q$	Therefore,	$K2 =$	0.0383
$K3 \cdot R \cdot C = 61.9 \text{ GtC/yr}$		$K3 = 61.9 / (R \cdot C)$	Therefore,	$K3 =$	0.0226

### 3. 시뮬레이션

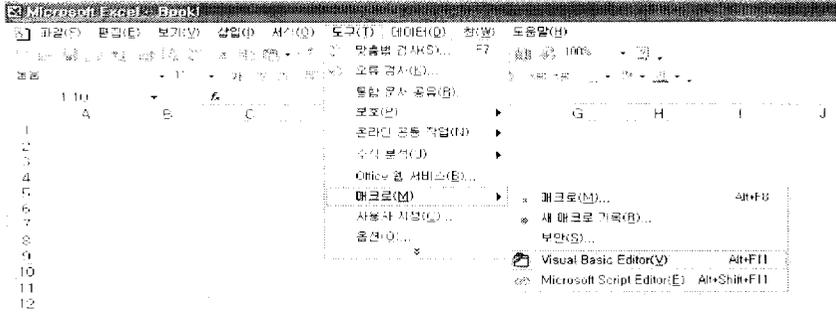
#### 3.1 시뮬레이션 프로그램

모델을 시뮬레이션 할 수 있는 컴퓨터 프로그램에는 EXTEND, STELLA와 Basic 프로그램 등이 있다. 본 연구에서는 Excel에서 Visual Basic 6.0 프로그램을 이용하는 방법으로 시뮬레이션을 실시한다.

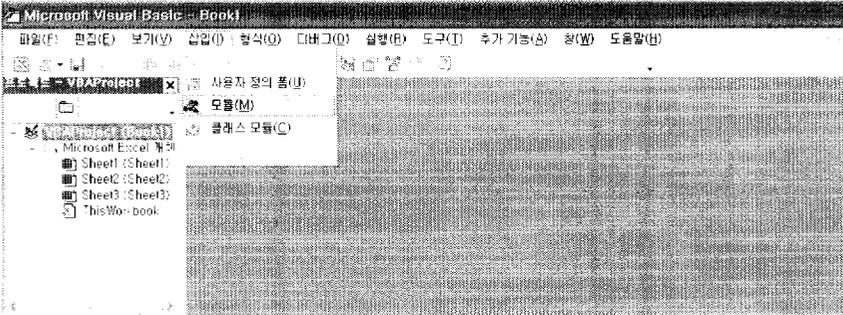
Basic 프로그램을 작성하고 나면, Excel 프로그램에서 매크로 기능으로 이용하여 시뮬레이션을 실시한다. Table 3.2는 Excel에서 Visual Basic 프로그램을 이용하는 방법을 보여준다.

Table 3.2 Steps in Running a Simulation Program

1. Excel 프로그램을 실행하고, [도구]-[매크로]-[Visual Basic Editor]를 선택한다.

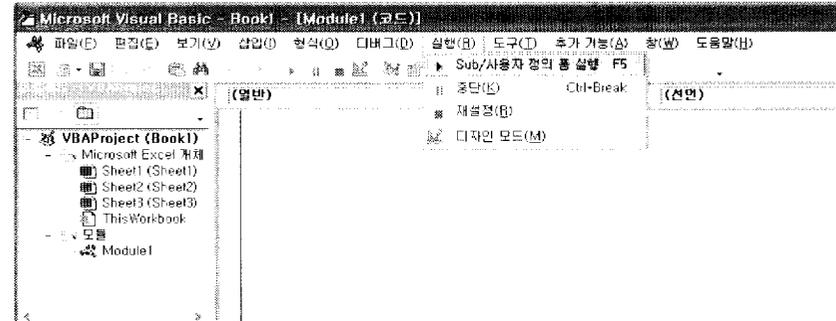


2. Visual Basic Editor로 들어간 후, [삽입]-[모듈]을 선택하면 새 모듈이 추가된다.



3. 이 모듈 창안에서 Basic 프로그램을 입력한다.

4. 모듈 안에 프로그램을 작성한 후 실행시키기 위해 [실행] - [Sub/사용자 정의 폼 실행]을 선택한다.



5. 프로그램이 실행되면서 Excel 창에 그 값들이 입력되고, 결과를 그래프로 나타내기 위해 데이터를 지정하고 Excel의 차트마법사 기능을 이용하여 그래프를 그린다.

### 3.2 지구적 탄소순환 시스템의 시뮬레이션

Excel의 매크로 기능을 이용한 Visual Basic 프로그램의 실행으로 지구적 탄소순환 시스템에 대한 시뮬레이션을 실시한다. 시간은 1985년부터 향후 300년간의 대기 중 이산화탄소의 농도를 예측한다.

현재, 대기 중 이산화탄소의 저감을 위해 고려되고 연구되는 다섯 가지 방안에 대해서도 같은 방법으로 시뮬레이션을 실시하여 각각의 방안들이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는지에 대해 예측해본다. 다섯 가지 방안은 기술적인 저감방안을 제외한 이산화탄소 증가의 주된 원인인 화석연료 사용의 감소, 녹화사업에 의한 육상의 생산량 증가, 산림훼손 등의 감소, 해양목장화에 의한 해양 생산량의 증가, 대기 중으로 배출되는 이산화탄소를 강제로 해양에 주입하는 방법이며, 각 방안에 대응하는 계수를 변화시켜 시뮬레이션을 실시하여 그 결과를 이용하여 대기 중의 이산화탄소의 저감방안을 제시할 것이다.

## IV. 연구결과

### 1. 탄소순환 시스템의 모델링

#### 1.1 지구적 탄소순환 시스템의 다이어그램

지구적 탄소순환 시스템을 포괄적으로 나타낸 에너지 다이어그램은 Fig. 4.1과 같다. 시스템의 구조를 살펴보면, 우선, 시스템 외부로부터 들어오는 에너지원에는 태양에너지가 있고 외부물질에는 화석연료 사용으로 인해 시스템 내로 들어오는 탄소가 있다. 시스템의 경계를 지각을 포함하지 않는 지구로 설정하였기 때문에 화석연료에 의한 유입이 외부에서 이루어지는 것이다.

시스템 내부를 육상과 해양 두 부분으로 나누어 탄소순환을 살펴보면, 육상은 육상 식물이 외부의 태양에너지와 대기 중 이산화탄소를 이용하여 광합성을 통해 유기물을 생성한다. 생성된 유기물은 생물들의 호흡과 분해에 의해, 그리고 벌목과 산불 등에 의해 이산화탄소로 다시 대기 중으로 방출되고, 또한 화석연료의 사용으로 인해 이산화탄소가 대기 중으로 방출된다. 해양은 대기에서 들어온 이산화탄소가 해양의 탄산염 완충작용에 의해 용존무기탄소로 되고 용존무기탄소와 외부의 태양에너지를 이용하여 해양의 식물이 광합성을 통해 유기물과 탄산칼슘을 생성하게 된다. 생성된 유기물은 생물들의 호흡과 분해에 의해 이산화탄소로 대기 중으로 방출되고 생성된 탄산칼슘은 저층 또는 생물에 축적되거나 탄산염 완충작용에 이용된다.

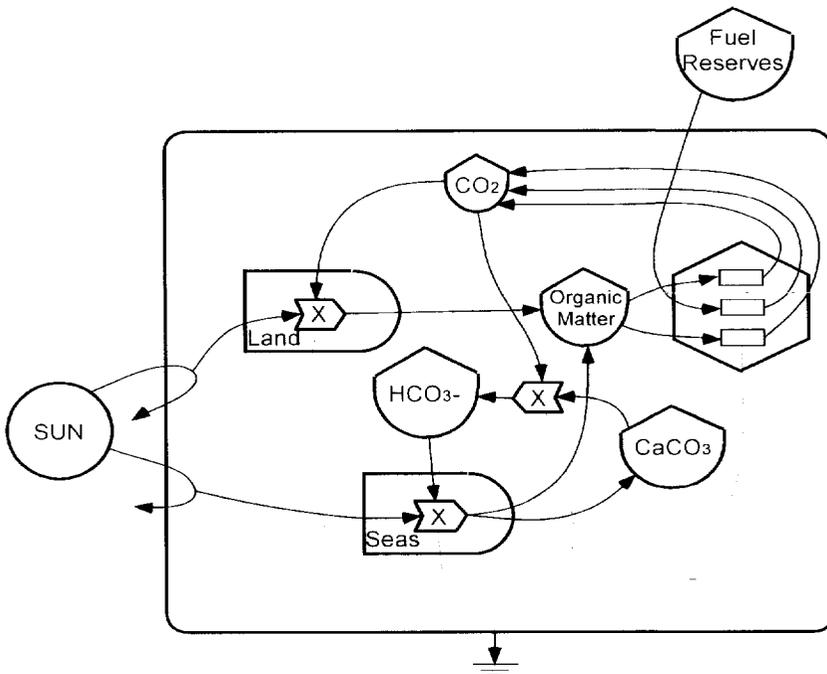


Fig. 4.1. Diagram for the global carbon cycle system(Odum, 2000).

## 1.2 모델의 정량화

지구적 탄소순환 시스템의 정량화는 Fig. 3.1에서의 자료를 이용하여 이루어졌다. 지구의 탄소는 대기 중에 750GtC, 지구전체의 유기물에 3913GtC, 해양에서 용존무기탄소에 38100GtC, 탄산칼슘에 5000GtC 만큼 함유되어 있고, 육상의 광합성에 61.9GtC/yr가 이용되고, 해양으로 들어가는 탄소량이 92GtC/yr이다. 생물의 호흡이나 분해에 의해 대기로 나가는 탄소량과 산림훼손 등에 의해 대기로 나가는 탄소량은 각각 150GtC/yr(육상, 해양 포함), 1.6GtC/yr이며 화석연료 사용에 의해 배출되는 양이 5.5GtC/yr이다. 해양에서는 steady state를 가정하여 해양으로 들어오는 92GtC/yr의 이산화탄소와 반응하는 탄산칼슘의 양은 5GtC/yr이며, 97GtC/yr의 용존무기탄소가 생성되고 생성된 용존무기탄소를 광합성에 이용하여 해양의 생산이 92GtC/yr, 탄산칼슘의 생산이 5GtC/yr만큼 이루어지고 있다(Fig. 4.2).

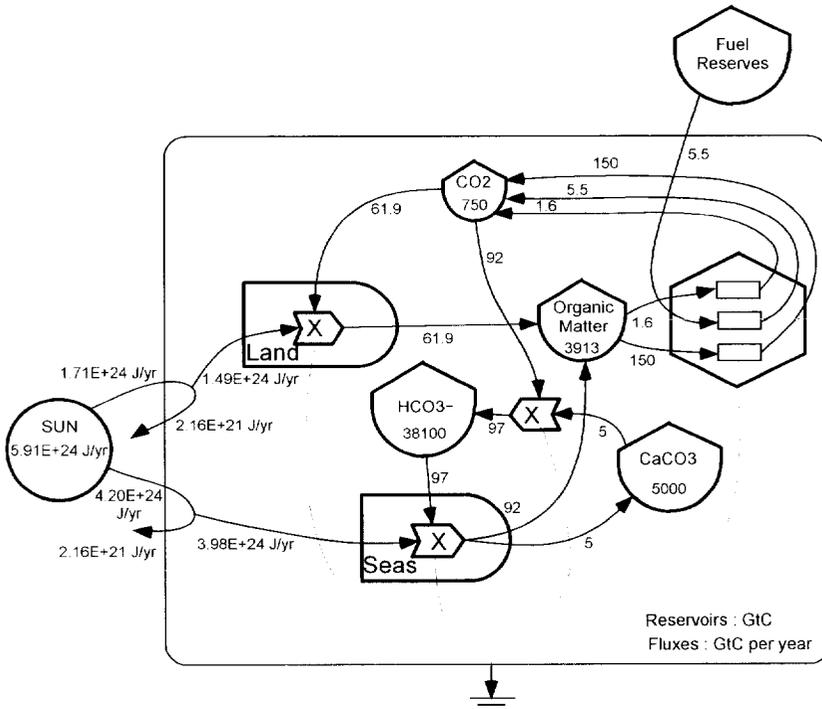
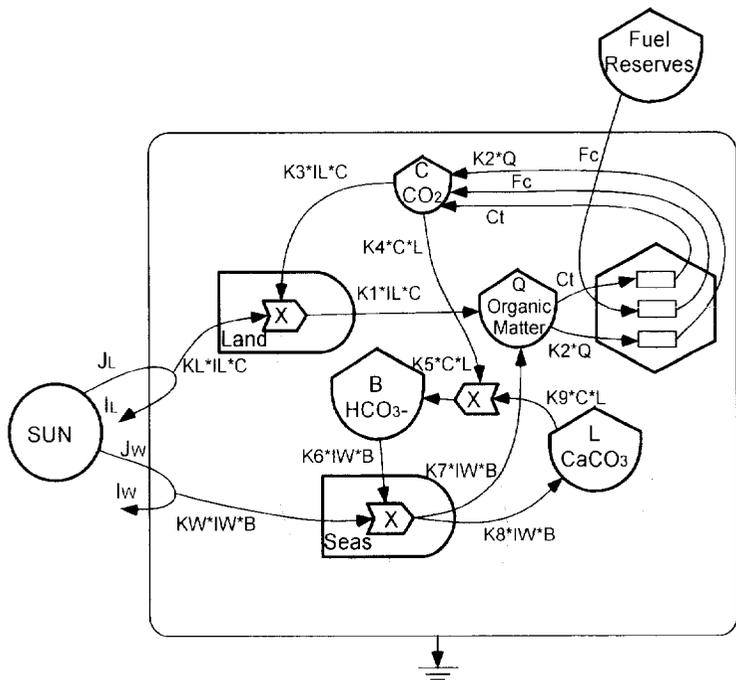


Fig. 4.2. Energy system diagram with several kinds of numbers.

### 1.3 모델의 수식화

모델을 수식화하기 위해 다이어그램 상의 경로에 계수 K를 설정하고 각각의 경로와 저장고에 대한 수학적 표현을 나타내었다(Fig. 4.3). Table 4.1은 계수와 수식을 설명하고 있다.



$$\begin{aligned}
 I_L &= J_L - K_L \cdot I_L \cdot C & I_W &= J_W - K_W \cdot I_W \cdot B \\
 DQ &= K_1 \cdot I_L \cdot C + K_8 \cdot I_W \cdot B - K_2 \cdot Q - C_t & DC &= R - K_5 \cdot C \cdot L - K_4 \cdot I_L \cdot C \\
 R &= K_2 \cdot Q + F_c + C_t & DB &= K_6 \cdot C \cdot L - K_7 \cdot I_W \cdot B \\
 DB &= K_6 \cdot C \cdot L - K_7 \cdot I_W \cdot B & DL &= K_9 \cdot I_W \cdot B - K_{10} \cdot C \cdot L \\
 TC &= Q + B + C + L
 \end{aligned}$$

Fig. 4.3. Energy system diagram with several kinds of equations.

Table 4.1 Expression of equations and coefficients

---

<b>Source and storage</b>	
J	the total solar energy entering the Earth's atmosphere
JL	incoming solar energy on land
JW	incoming solar energy into the sea
IL	the unused remainder after solar energy use by the production process on land
IW	the unused remainder after solar energy use by the production process in the sea
C	atmospheric carbon dioxide
Q	the storage of organic matter
B	bicarbonate in oceans
L	the reacting limestone
<b>Flux Equation(coefficient)</b>	
$KL*IL*C(KL)$	the production process on land(coefficient indicating the amount of this flow)
$KW*IW*B(KW)$	the production process in the sea(coefficient indicating the amount of this flow)
$K1*IL*C(K1)$	the photosynthetic production on land(coefficient indicating the amount of this flow)
$K2*Q(K2)$	the emission into the atmosphere by respiration of organisms(coefficient indicating the amount of this flow)
$K3*IL*C(K3)$	on land photosynthesis(coefficient indicating the amount of this flow)
	oceanic photosynthesis(coefficient indicating the amount of this flow)
$K4*C*L(K4)$	the produced bicarbonate when carbon dioxide is bufferd with limestone (coefficient indicating the amount of this flow)
$K5*C*L(K5)$	the consumed directly and indirectly by marine photosynthesis(coefficient indicating the amount of this flow)
$K6*IW*B(K6)$	the photosynthetic production in the sea(coefficient indicating the amount of this flow)
$K7*IW*B(K7)$	the produced limestone by marine photosynthesis(coefficient indicating the amount of this flow)
$K8*IW*B(K8)$	the acidification of carbon dioxide diffusing into the sea(coefficient indicating the amount of this flow)
$K9*C*L(K9)$	the amount of this flow)
Fc	the rate of carbon dioxide contributed by fuel combustion
Ct	the cutting and burning of forest
<b>Storage Equation</b>	
R	positive inputs in atmospheric carbon dioxide( $K2*Q + Fc + Ct$ )
DC	change in atmospheric carbon dioxide( $R - K3*IL*C - K4*C*L$ )
DQ	change in organic matter( $K1*IL*C + K7*IW*B - K2*Q - Ct$ )
DB	Change in bicarbonate( $K5*C*L - K6*IW*B$ )
DL	Change in limestone( $K8*IW*B - K9*C*L$ )

---

#### 1.4 모델의 보정

Fig. 4.2와 Fig. 4.3을 이용하여 모델의 보정을 실시하여 K값을 산출하였으며, Table 4.2는 그 결과이다. 지구로 들어오는 에너지의 양은 매일 다르기 때문에 이를 고려하기 위해 연간 이산화탄소의 흐름을 365day로 나누어 매일의 이산화탄소의 흐름으로 나타내었고 이를 이용하여 보정을 실시하였다.

Table 4.2 Calculation of coefficients for model of global carbon cycle

Source and Storage used for Calibration:					
source:					
J =	5.91E+24 J/yr =	1.62E+22 J/day			
JL =	1.71E+24 J/yr =	4.71E+21 J.day			
JW =	4.20E+24 J/yr =	1.15E+22 J/day			
IL =	2.16E+23 J/yr =	5.91E+20 J/day			
IW =	2.16E+23 J/yr =	5.91E+20 J/day			
Storage:					
C =	750 GtC				
Q =	3913 GtC				
B =	38100 GtC				
L =	5000 GtC				
Calculation of Coefficients:					
KL*IL*C =	1.49E+24 J/yr =	4.08E+21 J/day	Therefore,	KL =	0.00926
KW*IW*B =	3.98E+24 J/yr =	1.09E+22 J/day	Therefore,	KW =	0.000484
K1*IL*C =	61.9 GtC/yr =	0.17 GtC/day	Therefore,	K1 =	3.82E-25
K2*Q =	150 GtC/yr =	0.411 GtC/day	Therefore,	K2 =	0.000105
K3*IL*C =	61.9 GtC/yr =	0.17 GtC/day	Therefore,	K3 =	3.82E-25
K4*C*L =	92 GtC/yr =	0.252 GtC/day	Therefore,	K4 =	6.72E-08
K5*C*L =	97 GtC/yr =	0.276 GtC/day	Therefore,	K5 =	7.09E-08
K6*IW*B =	97 GtC/yr =	0.266 GtC/day	Therefore,	K6 =	1.18E-26
K7*IW*B =	92 GtC/yr =	0.252 GtC/day	Therefore,	K7 =	1.12E-26
K8*IW*B =	5 GtC/yr =	0.0137 GtC/day	Therefore,	K8 =	6.08E-28
K9*C*L =	5 GtC/yr =	0.0137 GtC/day	Therefore,	K9 =	3.65E-09
Fc =	5.5 GtC/yr =	0.015 GtC/day			
Ct =	1.6 GtC/yr =	0.004 GtC/day			

\* See Table 4.1 to know what equations and coefficients mean

## 1.5 Basic 프로그램 작성

지구적 탄소순환 시스템을 시뮬레이션하기 위해 Basic 프로그램을 작성하였다.

시뮬레이션 기간은 1985년부터 300년 이후인 2285년까지 이고, 수식과 보정을 통해 계산된 k값들을 이용하여 프로그램을 작성하였으며, 이산화탄소의 변화뿐만 아니라 다른 저장고의 변화도 알아보기 위해 모든 저장고의 변화값을 Excel 창에 입력하도록 하였다. 대기 중의 이산화탄소량은 GtC가 아닌 ppm(1 GtC = 2.1 ppm)으로 나타내도록 하였다(Table 4.3)

지구로 들어오는 에너지의 양을 계절별로 달리하기 위해 SIN 함수( $J = \text{SIN}(T)$ )를 이용하였으며, 1년 동안 한번의 순환을 하도록 하기 위해 지표로 들어오는 평균 태양 에너지가  $1.62\text{E}+22\text{J/day}$ 이고 태양에너지의 범위를 주어  $J = (1.62\text{E}+22) + (8.1\text{E}+21)*\text{SIN}(T*0.017)$ 로 나타내었다(Odum, 1994). 여기서, SIN 함수의 T는 day로 나타나기 때문에 1985년을 724525 day로, 2285년을 834025 day로 하여 프로그램을 작성하였다.

Table 4.3 Basic Programme of model of global carbon cycle

Sub global carbon cycle()	FC = 0.015
Dim Q, L, B, C, TC, FCS, FC, CT As Single	R = K2*Q+FC+CT
Dim T As Single	DC = R-K5*C*L-K4*IL*C
DT = 10	DQ = K1*IL*C + K7*IW*B - K2*Q - Ct
C = 750	DB = K6*L*C-K7*IW*B
Q = 3913	DL = K9*IW*B-K10*C*L
L = 5000	C = C+DC*DT
B = 38100	Q = Q + DQ*DT
J = 1.62E+22	B = B+DB*DT
CT = 0.004	L = L+DL*DT
KL = 0.00926	Cells(X+1,1) = T/365
KW = 0.000484	Cells(X+1,2) = C/2.1
K1 = 3.82E-25	Cells(X+1,3) = Q
K2 = 0.000105	Cells(X+1,4) = B
K3 = 3.82E-25	Cells(X+1,5) = L
K4 = 6.72E-08	X = X+1
K5 = 7.09E-08	Next T
K6 = 1.18E-26	END Sub
K7 = 1.12E-26	
K8 = 6.08E-28	
K9 = 3.65E-09	
T = 724525	
Cells(1,1) = T/365	
Cells(1,2) = C/2.1	
Cells(1,3) = Q	
Cells(1,4) = B	
Cells(1,5) = L	
X = 1	
For T=794535 To 834025 Step 10	
J = 1.62E+22 + (8.1E+21)*SIN(T*0.017)	
IL = J*0.29/(1+KL*C)	
IW= J*0.71/(KW*B)	

## 1.6 모델의 검증

하와이 마우나 로아(Mouna Loa)의 '대기권 감시소'에서는 대기 중의 이산화탄소 농도를 1958년부터 측정하기 시작하였으며, 대기 중의 이산화탄소의 양은 봄, 여름철에는 감소하고 가을, 겨울철에는 증가함을 보여주었다(Fig. 4.4).

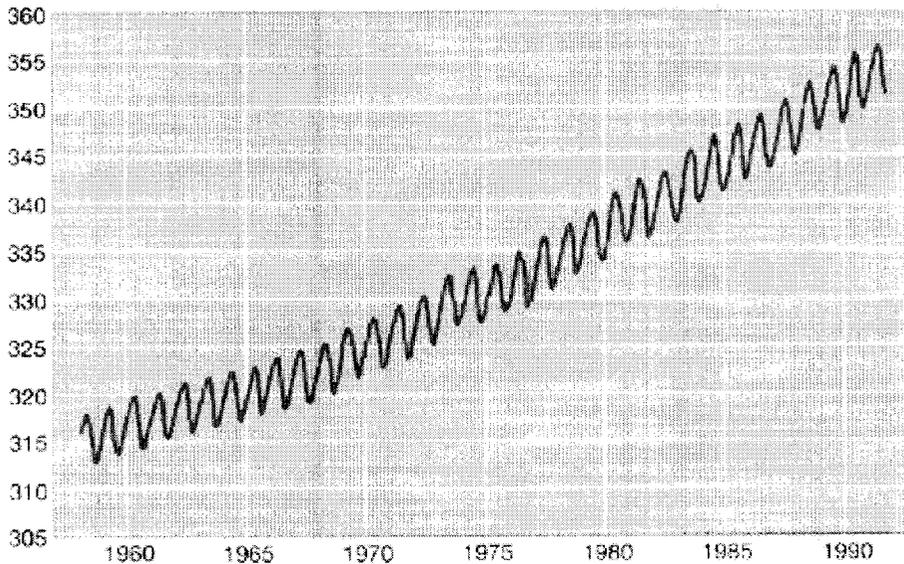


Fig. 4.4. Carbon dioxide concentration (in parts per million, ppm) of the air at the summit of Mauna Loa, Hawaii, from 1958.

지구탄소순환 에너지 시스템 모델이 현실과 적합한가를 검증하기 위해 1960~1990년까지 30년 동안의 변화를 시뮬레이션 하여 Fig. 4.4와 비교하였다. 검증을 위해 대기 중의 이산화탄소 초기값을 1960년의 320ppm(672GtC)으로 하고 1960~1990년까지 화석연료에 의한 배출 변화를 고려하였다.

Fig. 4.5는 검증 결과이며, 실제 자료와 비교하여 계절별 변동을 나타내고 있고 유사한 경향으로 증가함을 알 수 있었다. 실측치에 대한 계산치의 상대오차는 0.42%로 지구탄소순환 에너지 모델이 간단하기는 하지만 현실에 잘 맞는 모델임을 알 수 있다.

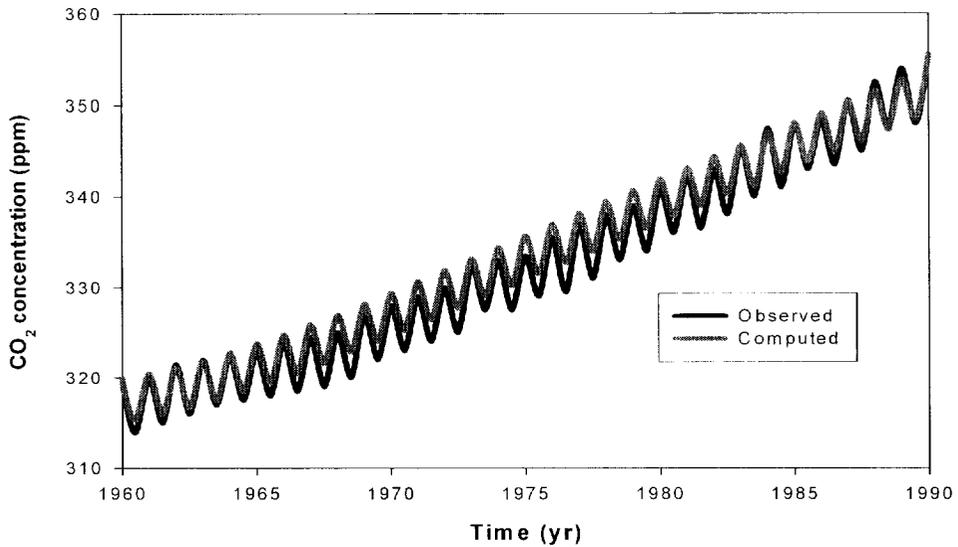


Fig. 4.5. The comparison of the computed with observed CO<sub>2</sub> in the atmosphere.

실측치와 계산치가 적합한지를 판단하기 위하여 단순회귀분석(simple linear regression analysis)을 실시하여 적합성을 검토하였으며, 그 결과 실측치와 계산치의 관계정도를 나타내는 상관계수 R(correlation coefficient)은 0.9962로 나타나 상관성이 높은 것으로 나타났고, 실측치와 계산치의 적합성을 나타내는 결정계수 R<sup>2</sup>(coefficient of determination)은 0.9925로 표본회귀선에 적합한 것으로 나타났다(Table 4.4). 이상의 결과로 볼 때 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 적합하게 재현된 것으로 나타났다.

Table 4.4 Relative error and R(correlation coefficient) and R<sup>2</sup>(coefficient of determination) for simulated result

	Mean	Relative error	R	R <sup>2</sup>
the observed data	332.3 ppm	0.42 %	0.9962	0.9925
the simulated result	333.6 ppm			

## 2. 대기 중 이산화탄소 변화 예측

### 2.1 대기 중 이산화탄소 변화 예측

본 연구에서는 미래의 화석연료에 의한 이산화탄소 배출이 자발적인 노력에 의함어든 화석연료의 고갈에 의함어든 앞으로 더 이상 증가하지 않을 것이라 가정하고 현재의 수준으로 유지하도록 하여 향후 300년간 이산화탄소 변화를 시뮬레이션 하였다.

향후 300년까지 대기 중 이산화탄소의 변화를 보면, 1985년 현재의 대기 중 이산화탄소 농도 357ppm에서 300년 후인 2285년에 약 385ppm까지 증가할 것으로 나타났다. 1985년부터 약 2025년까지는 375ppm까지 급격하게 증가하고 그 이후 2285년까지는 보다 완만하게 증가할 것으로 나타났다(Fig. 4.6). 대략 2025년부터 완만하게 증가하는 것은 대기 중 이산화탄소의 증가로 육상과 해양으로의 흡수도 점점 증가하게 되는데 이산화탄소가 대기 중에서 육상과 해양으로의 이동이 이루어지는데 걸리는 시간 때문이다.

Fig. 4.7은 Fig. 4.6의 일부분을 확대한 그림으로, Fig. 4.4와 같이 계절적 변동이 일어나고 있으며 계절에 따라 5~6ppm 정도의 차이를 보이고 있다.

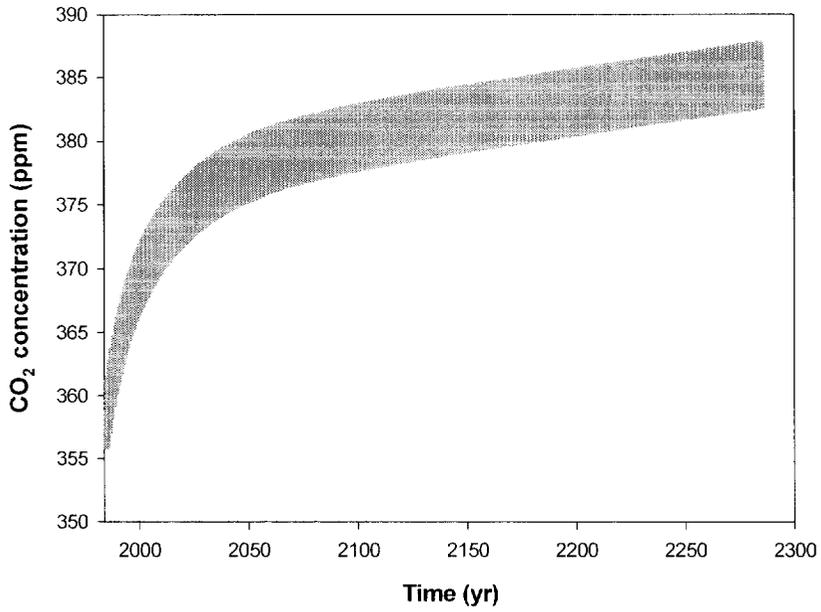


Fig. 4.6. Simulation of future carbon dioxide concentration in the atmosphere.

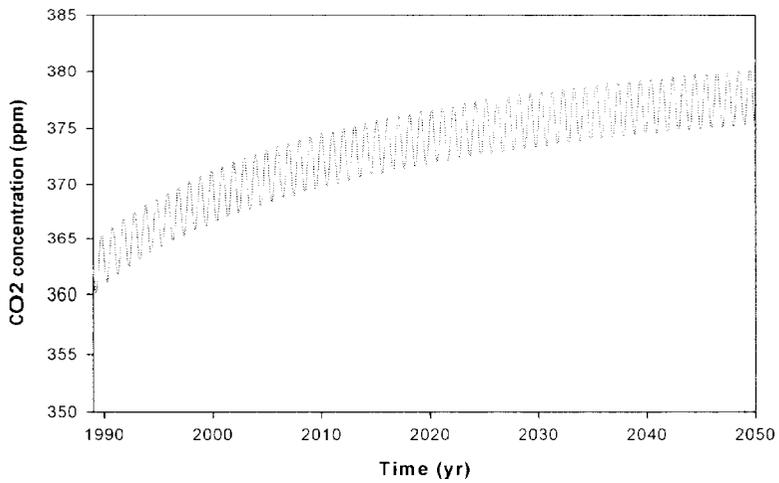


Fig. 4.7. A part of the simulated result for model of global carbon cycle.

대기 중 이산화탄소의 변화에 따른 지구전체 유기물, 해양의 용존무기탄소, 그리고 해양의 탄산칼슘의 변화를 보면, 지구전체의 유기물은 대기 중 이산화탄소가 증가함에 따라 광합성에 이용할 수 있는 이산화탄소가 늘어나 더 많은 생산이 이루어지기 때문에 증가함을 보인다. 해양의 용존무기탄소는 대기 중 이산화탄소가 증가함에 따라 증가하게 되는데 이는 해양이 이산화탄소의 주요 흡수원임을 보여주고 있다. 탄산칼슘의 경우는 대기 중의 이산화탄소가 해양으로 더 많이 들어오면서 해수의 탄산평형에 많이 이용되기 때문에 감소하게 된다(Fig. 4.8)

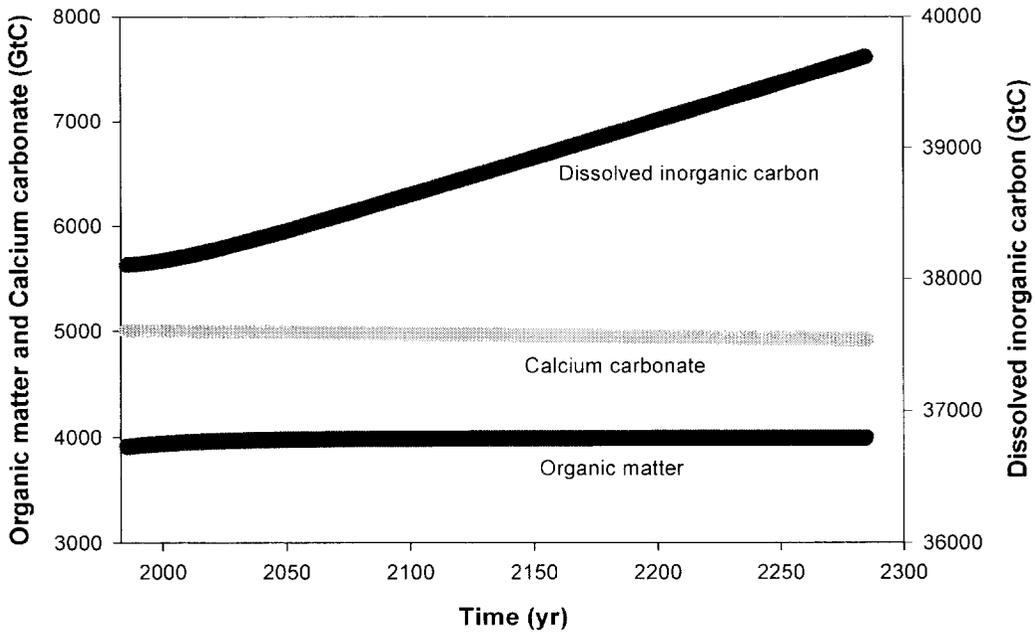


Fig. 4.8. Changes of organic matter, dissolved inorganic carbon and calcium carbonate with change of atmospheric carbon dioxide.

## 2.2. 타 연구와의 비교

Bolin et al.(1989)과 Odum(2000)의 연구와 본 연구의 결과를 비교하였다. Bolin의 연구에서는 airborne fraction을 대략 50%로 가정하고 화석연료에 의한 이산화탄소 배출이 연간 1~2% 증가가 이루어질 경우에 대해 예측하였고, Bolin의 연구와의 비교를 위해, 화석연료 사용에 의한 배출을 현재 5.5GtC/yr에서 매년 2%씩 증가시켜 시뮬레이션 하였다. Bolin의 연구에서는 2025년에 약 410ppm으로, 2100년이 되기 전에 산업화 이전의 농도의 대략 2배(550ppm)에 이를 것이라 예측한 반면, 본 연구의 결과는 2025년에 대략 383ppm까지 상승할 것으로 예측되었으며 2100년이 되어도 산업화 이전 농도의 2배에 도달하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 2.1, Fig. 4.9).

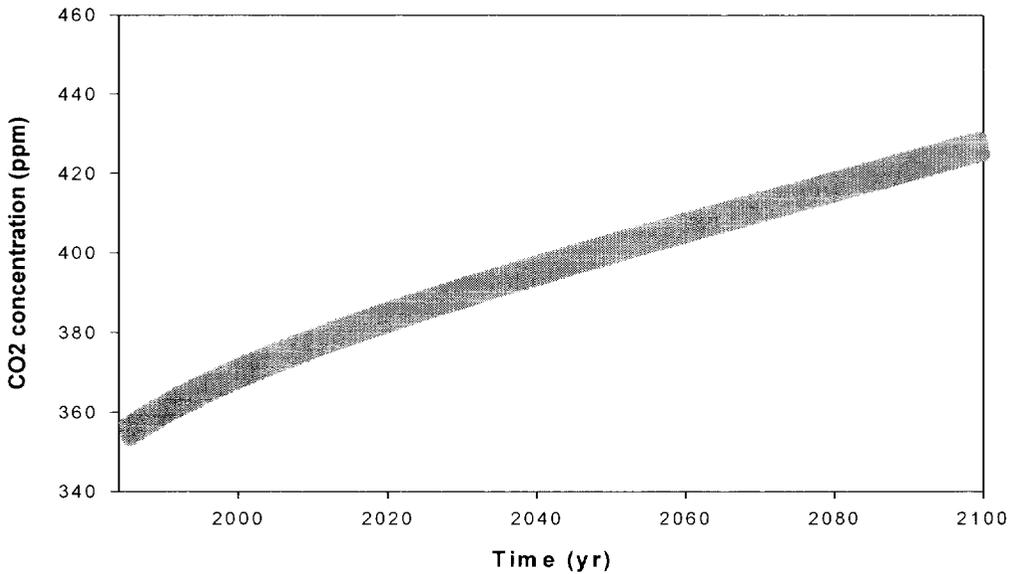


Fig. 4.9. Simulation for 2%/year increase of CO<sub>2</sub> emission of model of global carbon cycle.

이렇게 다른 예측 결과는 Bolin의 연구에서는 대기로 배출되는 총 이산화탄소량에 대한 대기 중에 남아있는 이산화탄소량의 비를 가정하여 대기 중의 이산화탄소 농도를 계산하였지만, 본 연구에서는 airborne fraction 개념을 이용한 것이 아니라 각각의 구성요소와 경로의 변화에 대해 체계적으로 이산화탄소 농도를 계산하였기 때문에 판단된다.

Odum(2000)의 연구에서는 화석연료가 고갈되고 가격의 상승으로 인해 그 사용이 매년 1%씩 감소할 것이라 가정하고 시뮬레이션 하였으며, 그 결과 대략 480ppm까지 증가하다가 화석연료의 사용이 감소됨에 따라 다시 감소하는 것으로 예측하였다.

### 3. 대기 중 이산화탄소 저감방안에 대한 시뮬레이션

대기 중 이산화탄소를 저감하기 위한 여러 연구방법들이 제시되고 있으나 본 연구에서는 기술적인 방법을 제외한 대체 에너지 개발 등으로 화석연료의 사용을 감소하는 방안, 녹화사업에 의해 생산량을 증가시켜 흡수기능을 확대하는 방안, 산림훼손에 의한 배출량을 감소하는 방안, 해양복장화에 의해 생산량을 증가시켜 흡수기능을 확대하는 방안, 그리고 배출가스를 해양으로 주입시켜 대기 중으로 나가는 배출가스량을 직접적으로 줄이는 방안에 대해 시뮬레이션을 실시하여 각각의 방안들이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는지, 또한 얼마까지 줄이거나 증가시켜야 대기 중의 이산화탄소가 현재의 상태로 유지 또는 감소하는지를 평가하였다.

각각의 저감방안에 대한 평가를 하기 위해 시뮬레이션에 사용된 감소율 또는 증가율은 현실성을 고려하기보다는 각 대안에 대해 대기 중의 이산화탄소가 어떻게 변화하는지의 경향을 가시적으로 나타내기 위하여 설정한 것이다.

#### 3.1 화석연료 사용량의 감소

대기 중 이산화탄소의 급격한 증가를 가져온 화석연료의 사용에 의한 이산화탄소 배출을 에너지 정책의 변화나 대체 에너지 개발 등으로 감소시키려는 연구가 이루어지고 있다. 화석연료 사용을 줄이는 방안이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는가와 얼마까지 줄여야 대기 중의 이산화탄소가 현재의 상태로 유지 또는 감소하는가에 대해 현재 화석연료 사용에 의해 대기 중으로 배출되는  $F_c(5.5\text{GtC/yr})$ 를 기준으로 20%, 50%, 80%, 100 줄인 값을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션 결과, 화석연료 사용의 감소는 대기 중의 이산화탄소를 저감시킬 수 있는 확실한 방법임을 알 수 있고 화석연료 사용량을 줄이면 줄일수록 대기 중의 이산화탄소량이 줄어드는 것으로 나타났으며, 화석연료의 사용이 없어야만(100% 감소) 대기 중의 이산화탄소 농도가 현재의 수준으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 4.10).

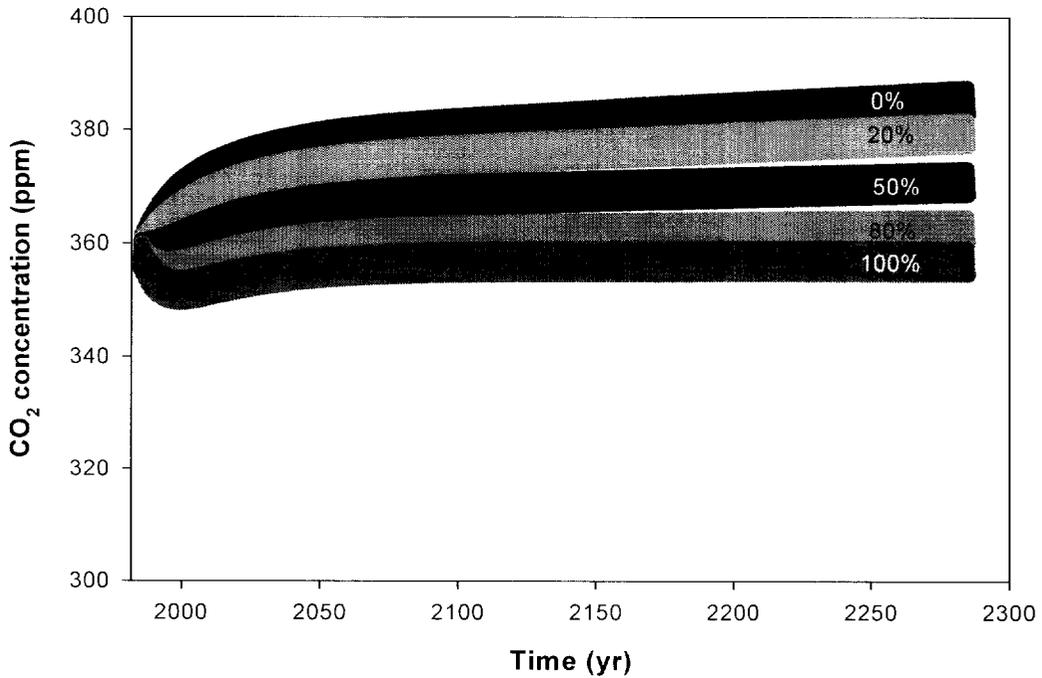


Fig. 4.10. Simulation for fossil fuel use reduced 20%, 50%, 80%, and 100%.

### 3.2 녹화사업에 의한 생산량 증가

녹화사업에 의한 생산량 증가는 녹지조림의 증대로 대기 중 이산화탄소의 흡수 기능을 강화하는 방안으로 이러한 방법이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는지, 있다면 얼마까지 증가시켜야 대기 중의 이산화탄소가 줄어드는가에 대해 시뮬레이션 하였다. 육상의 광합성을 통한 유기물 생산량을 결정하는 현재의 K1을 기준으로 5%, 10%, 25%, 50% 증가시켜 각각의 경우에 대해 시뮬레이션 하였고, 그 결과는 Fig. 4.11 과 같다.

이 대안에 대한 결과는 대기 중의 이산화탄소가 줄어들 것으로 예상되었으나 일시적으로 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 육상식물의 생산량이 많아지면

서 대기 중의 이산화탄소를 흡수해 농도가 일시적으로 감소하지만, 생산된 식물의 호흡과 분해(다른 생물의 호흡과 분해 포함)가 많아져 이산화탄소가 다시 배출되기 때문으로 해석할 수 있다. 결국 녹화사업에 의한 생산량 증가는 일시적인 감소방안은 될지 몰라도 장기적인 측면에서는 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는 방안이 되지 못함을 보여주고 있다.

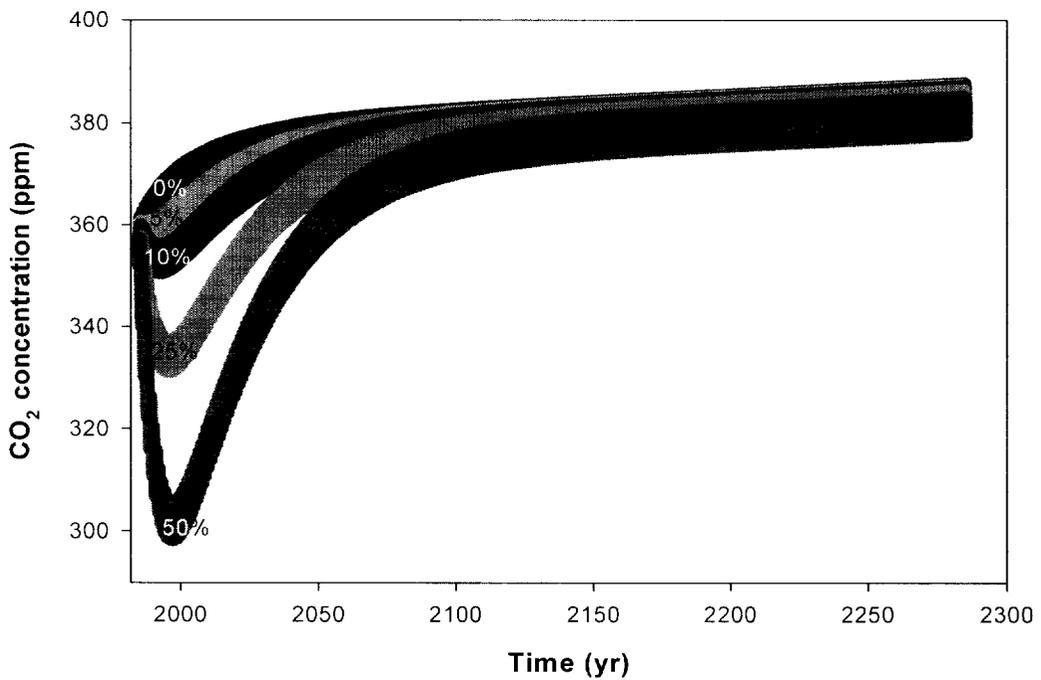


Fig. 4.11. Simulation for the primary production of the afforestation project increased 5%, 10%, 25%, and 50%.

### 3.3 산림훼손의 감소

산림훼손의 감소는 녹화사업에 의한 생산량 증가와 같은 맥락에서 이해할 수도 있지만 현재 상황에서 형성되어 있는 산림의 훼손을 줄이는 방안은 녹지를 형성하는 것과는 다르다고 판단하여 시뮬레이션을 실시하였다.

이 방법이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는가와 어느 정도까지 줄여야 이산화탄소가 줄어드는가를 알아보기 위해 현재 산림훼손에 의해 배출되는  $C_t(1.6GtC/yr)$ 를 기준으로 20%, 50%, 80, 100% 줄인 값을 사용하였다.

산림훼손에 의한 대기 중으로의 이산화탄소 배출은 다른 배출 경로에 비하여 상대적으로 적기 때문에 감소율을 증가시킴에 따라 많은 차이를 보이지 않았으며 산림훼손의 감소가 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는 방안이 되지 못함을 보여준다 (Fig. 4.12).

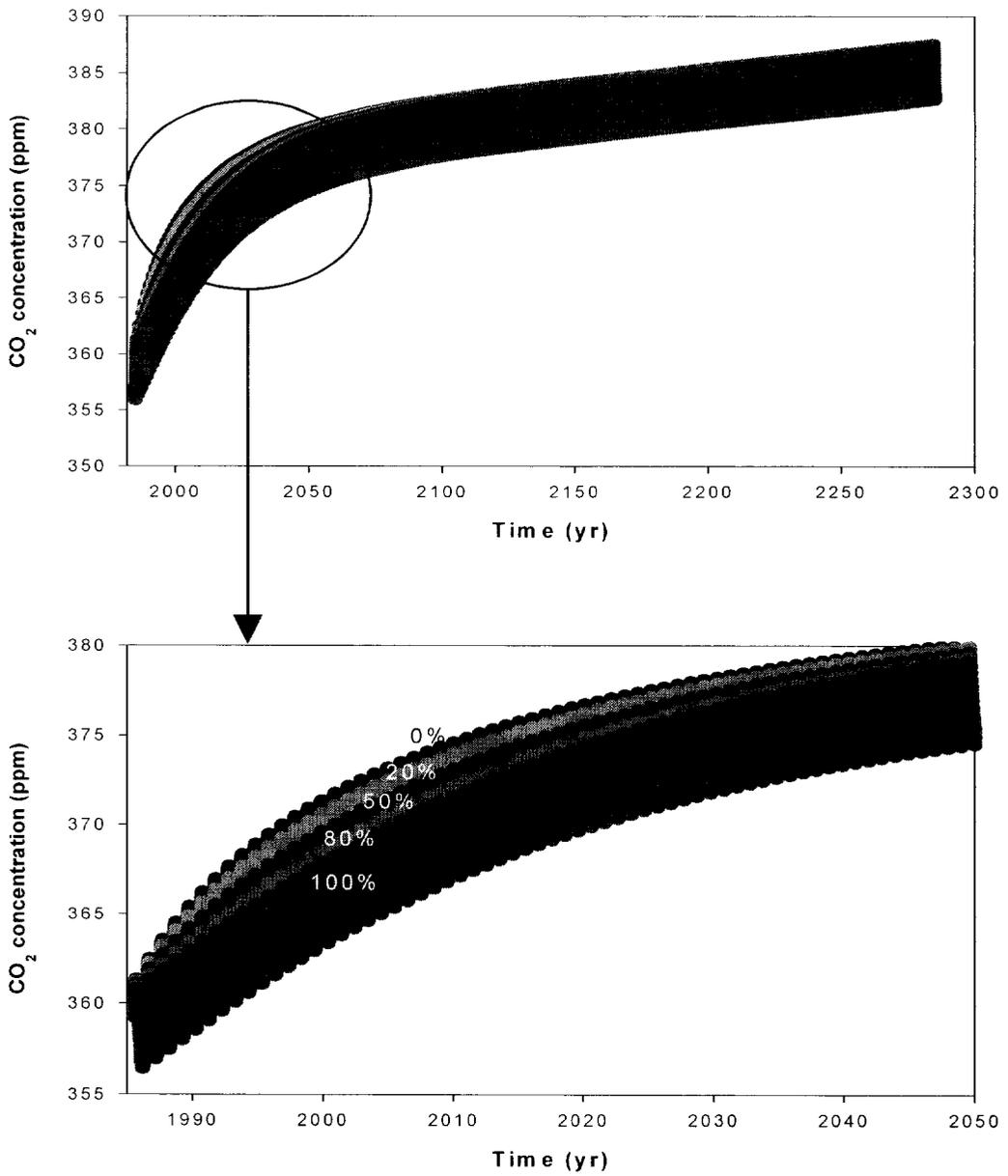


Fig. 4.12. Simulation for the deforestation reduced 20%, 50, 80%, and 100%.

### 3.4 해양목장화에 의한 생산량 증가

해양목장화의 경우는 해양식물의 생산량을 증가시켜 대기 중의 이산화탄소의 흡수를 강화하고자하는 방안으로 이 방법으로 이산화탄소의 저감이 이루어질 수 있는지, 얼마를 증가시켜야 대기 중의 이산화탄소가 줄어드는가에 대해 시뮬레이션 하였다. 현재 해양의 생산량을 결정하는 K7을 기준으로 5%, 10%, 25%, 50% 증가시켜 시뮬레이션 한 결과, 녹화사업에 의한 생산량을 증가시키는 경우와 마찬가지로 일시적으로 이산화탄소 농도가 감소하지만 결국 다시 증가하는 것으로 나타나 이 방안 역시 장기적인 측면에서는 대기 중 이산화탄소 저감의 방안이 될 수 없음을 보여준다(Fig. 4.13). 그러나 육상의 생산량을 증가시키는 경우와 비교할 때, 해양이 더 많이 이산화탄소를 흡수하는 것으로 나타나 해양이 육상보다 흡수능력이 큼을 알 수 있다(Fig. 4.11, Fig. 4.13).

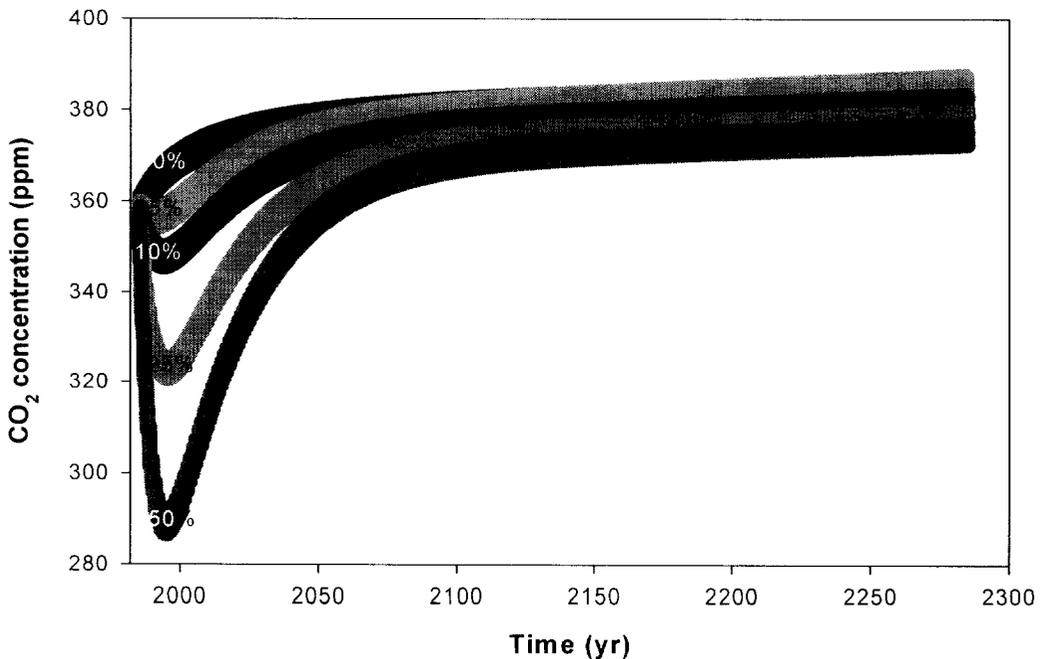


Fig. 4.13. Simulation for the primary production for sea weed farms increase 5%, 10%, 25%, and 50%.

### 3.5 이산화탄소의 해양주입

현재 화석연료의 사용으로 인해 내기로 배출되는 이산화탄소 중 일부를 해양으로 주입시키려는 연구가 이루어지고 있으며, 이러한 방법이 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는가에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

이 경우에 있어서는 Fig. 4.1의 다이어그램에서 화석연료 사용에 의해 내기로 배출되는 경로 외에 해양으로 들어가는 경로가 추가된다. 대기 중의 이산화탄소가 해양으로 주입되면 해양의 탄산칼슘과 반응하여 용존무기탄소를 생성하기 때문에 이산화탄소와 탄산칼슘의 상호작용하는 곳으로 들어가게 되는 것이다(Fig. 4.14). 해양으로 들어가는 경로를 Fc1이라 하면 내기로 나가는 배출(Fc2)은  $Fc - Fc1$ 이 된다.

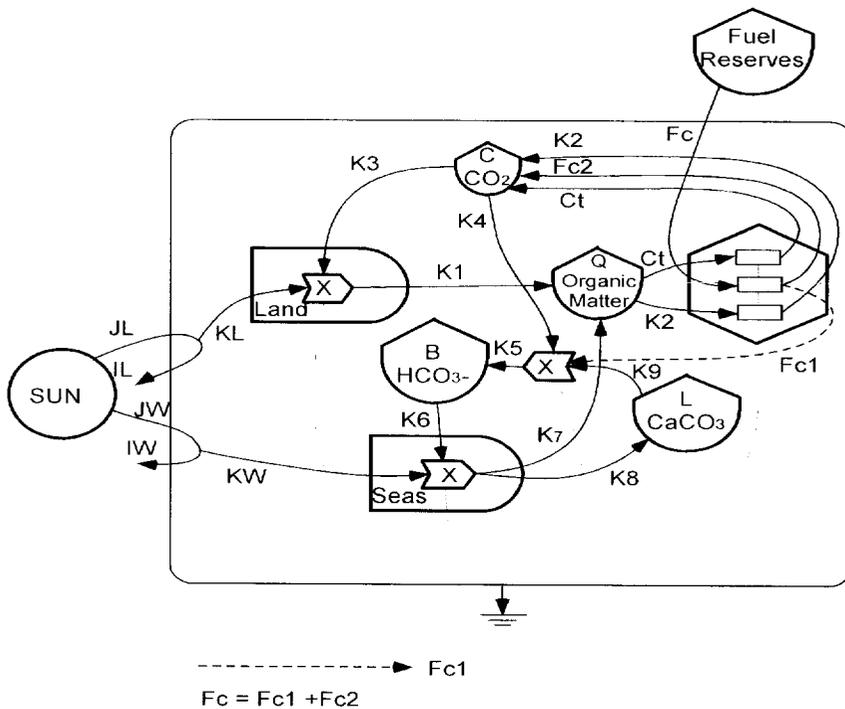


Fig. 4.14. Diagram of the global carbon cycle system adding the pathway of Fc1 into the sea.

현재 배출되는  $F_c(5.5\text{GtC/yr})$ 를 기준으로  $F_c$ 의 5%, 10%, 25%, 50%만큼 해양으로 주입시키는 경우에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과, 배출가스의 해양주입은 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는 방법임을 알 수 있고, 주입량이 많을수록 대기 중의 이산화탄소가 줄어드는 것으로 나타났다(Fig. 4.15).

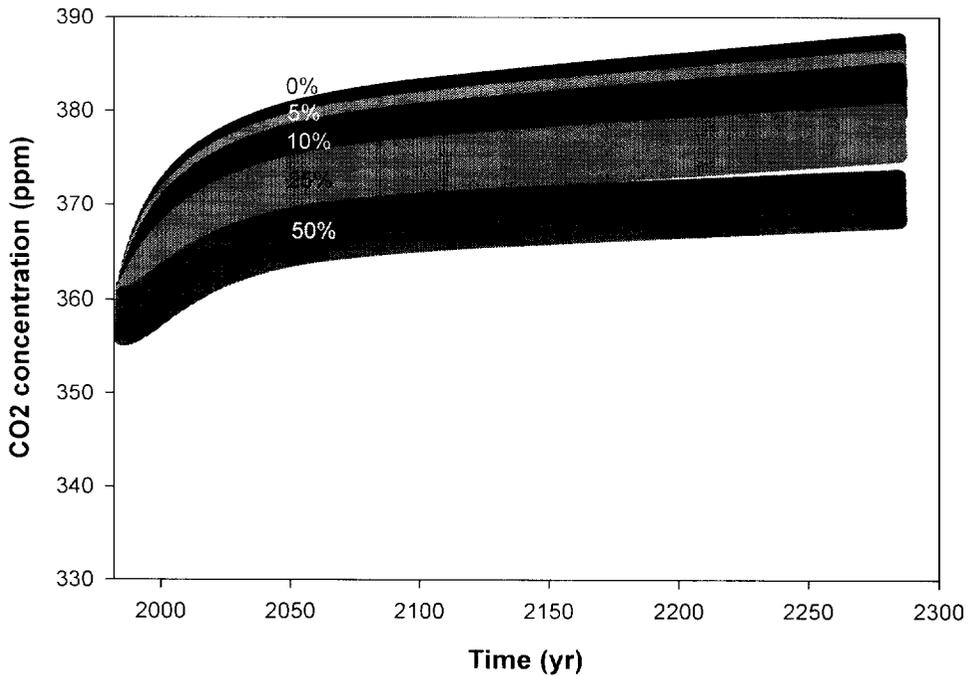


Fig. 4.15. Simulation for the injection of carbon dioxide into the sea increased 5%, 10%, 25%, and 50%.

#### 4. 대기 중 이산화탄소 감소 방안 제시

지구적 탄소순환의 에너지 시스템 모델을 도입하여 시뮬레이션 한 결과, 현재 상태로 탄소순환이 이루어진다는 가정 하에 향후 300년간 대기 중 이산화탄소는 대략 385ppm까지 계속 증가할 것으로 예측되었으며, 대기 중의 이산화탄소를 저감할 수 있는 방법으로 제기되는 다섯 가지 방안에 대한 시뮬레이션 결과, 화석연료 사용량의 감소와 배출가스의 해양주입만이 대기 중 이산화탄소를 저감시킬 수 있는 것으로 나타났다.

대기 중의 이산화탄소 증가의 주된 원인인 화석연료의 사용을 줄이면 이산화탄소가 줄어드는 것은 당연한 결과이며, 화석연료 사용을 줄이거나 이산화탄소를 배출하지 않는 대체 에너지의 개발이 요구된다. 그러나 현재의 대체 에너지 개발에는 더 많은 에너지를 이용하고 있기 때문에 오히려 효율성이 떨어지고 더 많은 이산화탄소를 배출하고 있다. 따라서 대체 에너지의 개발보다는 산업구조개편과 에너지 자원정책의 개발이 요구된다.

이산화탄소의 해양주입에 의해 이산화탄소가 줄어드는 것은 해양이 이산화탄소의 주요 흡수원임을 알 수 있다. 이산화탄소의 해양주입은 Marchetti(1977)가 대기의 이산화탄소 증가를 줄이기 위해 제안한 방법으로 이산화탄소의 주입방법 등에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 해양 생물권에서 이산화탄소 농도의 증가로 인한 결과는 잘 알려져 있지 않지만 해양의 pH를 변화시켜 해양 생물권의 교란을 가져올 수 있다는 문제로 논란이 되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 탄산염 광물의 용해를 이용하여 pH 변화를 최소화하는 방법이 제안되었고, 또한 해양에 단순히 격리하는 것이 아니라 해양 생산력으로 환원하기 위한 생태공학적인 연구도 이루어지고 있다. 해양은 이산화탄소를 저장할 수 있는 능력이 가장 크기 때문에 해양주입은 그 중요성이 점차 증대되고 있으며, 보다 안정적인 해양주입을 위해서 해양에 주입된 이산화탄소의 거동과 이산화탄소 주입을 위한 공정 조건 확립, 주입된 이산화탄소가 해양 환경에 미치는 영향을 최소화 하기 위한 최적의 조건에 대한 연구도 필요하다.

## V. 결 론

대기 중 이산화탄소 농도의 급격한 증가는 오늘날의 화석연료의 사용과 토지이용의 변화 등의 인간 활동에 기인하였고, 이러한 증가는 기후변화를 초래할 수 있으므로 앞으로 일어날지 모를 미래 농도를 예상하는 것은 필수적이라 할 수 있다.

지구적 탄소순환을 시스템 생태학적 접근을 통해 시스템 내의 유기적인 관계와 상호작용을 장기적이고 체계적으로 파악하기 위해 에너지 모델링을 하고 시뮬레이션하여 대기 중 이산화탄소의 미래농도를 예측하였다. 또한 대기 중 이산화탄소를 저감할 수 있는 다섯 가지 대안에 대해서도 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 1985년부터 향후 300년간 대기 중 이산화탄소의 변화를 시뮬레이션한 결과, 2025년까지 대기 중 이산화탄소 농도는 357ppm에서 375ppm까지 급격하게 증가하다가 그 이후 2285년까지 385ppm으로 완만하게 증가할 것으로 예측되었다.
2. 1960~1990년까지의 실측치를 이용하여 모델을 검정한 결과, 계절적 변동을 보이며 실제 자료와 유사한 경향으로 증가함을 보였고, 실측치와 계산치의 상대오차는 0.42%이며, 실측치와 계산치의 관계정도와 적합성을 나타내는 상관계수 R과 결정계수  $R^2$ 은 각각 0.9962와 0.9925로 나타나 계산치는 실측치와 높은 상관성을 가지며 적합하게 재현된 것으로 나타났다.
3. 이산화탄소를 저감할 수 있는 다섯 가지의 방안에 대해 대기 중 이산화탄소를 저감할 수 있는가에 대한 시뮬레이션을 실시한 결과, 화석연료 사용의 감소의 경우에는 화석연료 사용을 줄이면 줄일수록 감소하는 것으로 나타났고, 녹화사업에 의한 생산량 증가와 해양복장화에 의한 생산량 증가의 경우, 초기에는 광합성의 증가로 대기 중 이산화탄소가 감소하지만 결국 호흡량과 분해가 많아져 대기 중으로 배출되어 이산화탄소는 다시 증가하여 장기적인 측면에서 대기 중 이산화탄소의 감소

방안이 될 수 없으나 생산량을 증가시킨다는 긍정적인 측면도 있다. 산림훼손의 감소의 경우는 산림훼손에 따른 이산화탄소의 배출이 다른 경우의 배출량에 비해 상대적으로 적기 때문에 그다지 많은 차이를 보이지 않았으며, 배출되는 이산화탄소 중 일부를 해양으로 주입할 경우 주입량이 많을수록 대기 중 이산화탄소 농도는 감소하는 것으로 나타났다.

4. 이상의 다섯 가지 대안의 시뮬레이션 결과에서, 화석연료 사용의 감소와 내기로 배출되는 이산화탄소의 해양주입의 방안만이 대기 중 이산화탄소를 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.
5. 따라서 대기 중 이산화탄소를 저감하기 위해서는, 화석연료 사용을 감소시키기 위해서 이산화탄소를 배출하지 않는 대체 에너지의 개발이 요구된다. 그러나 현재의 대체 에너지 개발은 대체에너지를 생산하는데 더 많은 에너지를 이용하여 효율성이 떨어지고 오히려 더 많은 이산화탄소를 배출하기 때문에 대체 에너지의 개발보다는 산업구조개편과 에너지 자원정책의 개발을 통해 화석연료 사용을 감소시킬 수 있는 방안이 요구된다.
6. 또한, 해양이 이산화탄소의 주요 흡수원이므로 이산화탄소를 해양에 주입하여 생물생산력으로 환원시키는 생태공학적 접근법과 해양환경에 대한 영향을 최소화하는 해양을 이용하는 저감방안이 요구된다.

## 감사의 글

작은 성과를 내놓기까지의 과정은 힘들었지만 그만큼 기쁨은 더욱 큰 것 같습니다. 제가 여기까지 올 수 있도록 도와주신 모든 분들께 감사의 말을 전하고 싶습니다. 앞으로도 무엇이든 최선을 다하고 노력하는 사람이 되겠습니다.

많이 부족한 저를 학문에서 뿐만 아니라 모든 면에서 가르쳐 주시고, 일깨워주시며, 이끌어 주신 이석모 교수님 진심으로 감사드립니다. 교수님께 누가 되지 않는 제자가 되겠습니다. 올바른 논문을 위하여 지도와 격려를 해주신 박청길 교수님, 많은 조언과 질타를 해주신 정용현 교수님, 학문과 내학원 생활에 있어서의 깊이 있는 가르침을 주신 이재근 교수님, 이병현 교수님, 여석준 교수님, 김일규 교수님, 늘 지켜봐주시고 관심가져 주신 강입석 교수님, 강대석 교수님, 성기준 교수님, 모두 진심으로 감사드립니다. 자주 뵙지는 못하지만 논문에 관심 가져주신 송교욱 박사님, 김영진 박사님께도 감사드립니다.

함께 했던 시간은 짧았지만 늘 관심 가져주신 손지호 선배님, 김진이 선배님, 언제나 관심과 조언으로 무장한 최영근 선배님, 김우석 선배님, 멀리 있어 만나기는 힘들지만 마음 속에 있는 김남국 선배님, 질문을 하면 정의껏 답해주던 정혁 선배, 윤미 선배, 선배들이 있어 다행스럽고 든든하였습니다. 감사드립니다. 실험실의 대빵 진만성, 논문 쓴다고 자신의 자리까지 양보해주던 모습에 감동했어요. 논문 좋은 성과 있길 바라고, 가끔 선배의 잔소리가 그리울 것 같아요. 많이 다투기도 했지만, 늘 나의 편이 되어 주던 용수 선배, 엉뚱한 말이나 행동으로 한순간에 실험실을 얼려버리는 영륜 선배 모두 남은 1년 열심히 해서 좋은 결과있기를 바라게요. 베트남에서 온 Hung, 의사소통은 힘들었지만 논문에 관심 가져준 것 고마워요. Thank you! 실험실의 분위기 메이커 혜옥이, 정숙이, 정말 좋아하는 동생들 광섭이, 종명이, 아무것도 모른 채 들어와 선배들 틈새에서 강하게 크는 막내 착한 하나, 늘 잘 챙겨주시던 로라, 나 때문에 힘들었지만 내색 안하고 때만 되면 연락하는 화숙이, 모두 모두 감사드립니다. 그리 많은 시간은 아니지만 짧지도 않은 시간을 보낸 김정숙 박사님, 바쁘신 와

중에도 관심가져 주시고 신경 써 주셔서 감사드립니다. 나의 일을 떠넘긴 것 같아 마음 한구석에 미안한 마음이 남아 있는 이경미 조교 언니도 감사드려요. 날 기사로 고용하여 먹여 살리느라 고생한 김사장 칠만 선배, 평생 잊지 못할 사건의 주인공 철우 선배, 치고 빠지기의 선수 칠승 선배, 쓰리 칠이라 불리우며 나를 힘들게 했던 시간도 있었지만 지나고 보니 재미있는 추억이었습니다. 3층 귀신 정국 선배, 거의 볼 때마다 티격태격 하던 성호 선배, 현승 선배, 명환 선배, 병구 선배, 종돌 선배, 그리고 3층의 모든 선·후배님들께 감사드립니다.

또한, 여기까지 올 수 있도록 많은 힘이 되어준 친구들에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 지도 교수님의 친분으로 친해져서 남자친구 아니냐는 소리까지 들은 수현이, 총무를 맡으면서 친해진 정선이, 서로 힘든 시간이 있었지만 잘 이겨내고 다같이 여기까지 올 수 있어 기쁘고, 나의 대학원 생활에 있어서 정말 많은 힘이 되어 준 것 너무 고마워. 석사 친구 생긴다고 정말 좋아해주고 힘들 때나 즐거운 때 항상 같이 해준 영주, 진화, 이제는 자주 만나지 못하지만 늘 힘이 되어주고 훌륭한 상담가가 되어준 경미, 대학생활에서 빼놓을 수 없는 미란, 경란, 미옥이 모두 감사드립니다. 친구들아~ 사랑한다!!!

언제나 든든한 나의 후원자이신 아버지, 어머니, 바쁘다는 핑계로 잘 챙겨주지 못한 윤영이, 가족의 사랑과 믿음으로 여기까지 올 수 있었습니다. 자랑스런 딸이 되겠습니다. 너무 감사드리고 사랑합니다.

제가 이 자리에 있을 수 있도록 도움 주신 모든 분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Adhiya J. and S. W. Chisholm, 2001, Is ocean fertilization a good carbon sequestration option?, Massachusetts Institute of Technology, 58pp.
- Archer D., 1996, A data-driven model of the global calcite lysocline, *Global biogeochemical cycles*, 10, pp.511-526.
- Archer D., 1996, An atlas of the distribution of calcium carbonate in sediments of the deep sea, *Global biogeochemical cycles*, 10(1), pp.159-174.
- Arrhenius S., 1896, On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground, *Phil. Mag.*, 47, 237pp.
- Beran M. A., 1995, Carbon sequestration in the biosphere, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, pp.3-18.
- Bolin B. and E. Eriksson, 1959, Change in the carbon content of the atmosphere and the sea due to fossil fuel combustion, in Bolin, B.(ed.), *The atmosphere and the sea in motion, Rossby Memorial Volume*, New York, The Rockefeller Institute Press, pp.130-142.
- Bolin B., E. T. Degens, P. Duvigneaud and S. Kempe, 1979, *Global carbon cycle : Scope 13*, John Wiley & Sons., New York, 491pp.
- Bolin B., J. Jager and B. R. Döös, 1989, *The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems*. John Wiley & Sons. Inc., 541pp.
- Butcher S. S., R. J. Charlson, G. H. Orians and G. V. Wolfe, 1992, *Global biochemical cycles*, Academic press, New York, pp.239-259.
- Caldeira k. and G. H. Rau, 2000, Accelerating carbonate dissolution to sequester carbon dioxide in the ocean: Geochemical implications, *Geophysical research letters*, Vol.27, No. 2, pp.225-228.
- Caldeira K., H. J. Herzog and M. E. Wickett, 2001, Predicting and evaluating the effectiveness of ocean carbon sequestration by direct injection, *First National*

- Conference on Carbon Sequestration, Washington D.C, 16pp.
- Callendar G. S., 1938, The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, Q.J.R. Meteorol. Soc., Vol. 64, 223pp.
- CDAC, 1983, Changing climate, Report of the Carbon Dioxide Assessment Committee, Washington D.C., National Academy Press, 496pp.
- Eswaran H., E. Van den Berg and P. Reich, 1993, Organic carbon in soils of the world, Soil science society of America Journal, vol. 57, pp.192-194.
- Goreau T. J., 1992, Control of atmospheric carbon dioxide, Global environmental change, pp.5-11.
- Hansen J. and S. Lebedeff, 1987, Global trends of measured surface air temperature, Journal of Geophysical Research, vol. 92, pp.13345-13372.
- Herzog H., K. Caldeira and E. Adams, 2001, Carbon sequestration via direct injection, in Encyclopedia of ocean sciences, Academic Press, London, UK, Vol.1, pp.408-414.
- ICLEI, 1993, How to develop a long term CO<sub>2</sub> reduction plan : A project report, USDOE, Washington D.C., 60pp.
- IPCC, 1994, Climate change : Radiative forcing of climate change and evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios, Cambridge University Press, 304pp.
- IPCC, 2001, Climate change 2001 : Impacts, adaptation and vulnerability, 967pp.
- Johnston et al., 1999, Ocean disposal/sequestration of carbon dioxide from fossil fuel production and use: An overview of rationale, techniques and implications, Greenpeace International, Amsterdam, 51pp.
- Keeling C. D., 2000, Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. Trends : A compendium of data on global change, Carbon dioxide information analysis center, Oak Ridge national laboratory, Oak Ridge, Tenn, USA.
- Linyan S. and W. Muhong, 1996, Global warming and global dioxide emission : An empirical study, J. Environmental Management, vol. 46, pp.327-343.

- Lozan J. L., H. GraBl and P. Hupfer, 2001, *Climate of the 21st century : changes and risks*, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 448pp.
- Magnesen T. and T. Wohl, 1993, *Biological impact of deep sea disposal of carbon dioxide*, Technical report 77A, Bergen, Norway, 25pp.
- Marchetti C., 1977, *On geoengineering and the CO<sub>2</sub> problem*, *Climate change*, 1, pp.59-68.
- McPherson E. G. and J. R. Simpson, 1999, *Carbon dioxide reduction through urban forestry*, United State Department of Agriculture, Albany, California, 245pp.
- Milliman J. D., 1993, *Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean : Budget of a nonsteady state*, *Global biogeochemical cycles*, Vol. 7, No. 4, pp.927-957.
- Odum H. T., 1994, *Ecological and General system*, University press of Colorado, Niwot, 944pp.
- Odum H. T., 1996, *Environmental Accounting*, John Wiley & Sons, New York, 370pp.
- Odum H. T., 2000, *Modeling for all scales*, Academic Press, New York, 458pp.
- Ormerd W. G., P. Freund and A. Smith, 2002, *Ocean storage of CO<sub>2</sub>*, IEA Greenhouse Gas R&D programme, 29pp.
- Potter C. S., J. T. Fanderson, C. B. Field, P. A. Matson, P. M. Witousek, H. A. Mooney and S. A. Klooster, 1993, *Terrestrial ecosystem production : a process model based on global satellite and surface data*, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 7, pp.811-841.
- Rau G. H. and K. Caldeira, 1999, *Enhanced carbonate dissolution: A means of sequestering waste CO<sub>2</sub> as ocean bicarbonate*, *Energy conversion and management*, 40, pp.1803-1813.
- Revelle R. and H. E. Suess, 1957, *Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades*, *Tellus*, vol. 9, 18pp.

- Seidel S. and D. Keyes, 1983, Can we delay a greenhouse warming?, Washington D.C., Environmental Protection Agency, 205pp..
- Siegenthaler V. and J. L. Sarmiento, 1993, Atmospheric carbon dioxide and the ocean, Nature, vol. 365, pp.119-125.
- Watson R. T., I. Noble, B. Bolin and N. H. Ravindranath, 2000, Land use, land use change, and forestry, Summary for policymakers, A special report of the Intergovernmental Panel of Climate change, IPCC, pp.1-20.
- World Climate Programme, 1981, On the assessment of the role of CO<sub>2</sub> on climate variations and their impact, Report of a WMO/UNEP/ICSU meeting of experts in Villach Austria, November 1980, Geneva, WMO.
- 오재호, 2003, 지구환경과학, 신광문화사, pp.287-318.
- 이산화탄소 저감 및 처리기술개발사업단, 2003, 기후변화협약, 더워지는 지구 그 원인과 대책, 89pp.
- 임경택, 배도용, 신남철, 1996, 지구환경과학, 동화기술, pp. 475-521.