

## 우리나라 이산화탄소의 배출량 및 전지구적 대기중 농도에 대한 기여도 분석

### The Analysis of Carbon Dioxide Emission in Korea and Its Contribution to Global-Scale Average Carbon Dioxide Concentration

박 일 수 · 최 덕 일 · 최 기 덕 · 홍 율 기 · 김 정 수 · 정 은 영 · 마 창 민

국립환경연구원 대기연구부  
( 원고접수: 1994. 5. 13 )

Il-Soo Park, Doug-Il Choi, Ki-Deok Choi, Yul-Ki Hong, Jeong-Soo Kim,  
Eun-Young Jung, Chang-Min Mah

Atmospheric Research Department, National Institute of Environmental Research  
(Received 13 May 1994)

#### Abstract

Carbon dioxide emission has been increased by 7% in an annual average toward 212.5 million tons in 1990 from 108.7 million tons in 1980. Among emissions in 1990, industry, residential / commercial, transportation, other and non-energy have occupied 91.12, 68.04, 42.13, 7.13 and 4.09 million tons respectively. The Korea-scenarios corresponding to those of IPCC that is Intergovernmental Panel on Climate Change (A : modest control of CO<sub>2</sub>; B : stringent control of CO<sub>2</sub>; C : shifting fuel to renewable and nuclear energy in the second half of the next century ; and D: shifting fuel to renewable and nuclear energy in the first half of the next century) show that the global-scale contributions of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration are 0.77, 0.64 and 0.78% in 2050 for cases A, B, and C respectively. In all cases, the contributions were smaller than 0.09% in 1985.

#### 1. 서 론

산업혁명 이후 화석 연료 사용의 급격한 증가로 온실기체 특히 이산화탄소의 배출량과 대기중 농도는 증가 일로에 있으며 이로 인한 지구온난화 현상은 금세기 중요한 지구환경문제로 부각되고 있다.

이산화탄소 배출은 산림이나 그외 다른 자연 생태계를 농경지로 전환함으로써 발생하는 자연적 요인과 화석 연료 사용에 의해 발생하는 인위적 요인으로 크게 나눌 수 있다. 이 중 화석 연료 사용에 의해 대기중으로 배출되는 이산화탄소량은 온실효과의 정도를 평가하는데 중요한 요소이다(Marland et al., 1989). 또 다른 이산화탄소의 중요한 배출원

은 시멘트 생산중 시멘트 건조(kiln) 과정으로, 이 과정에서 배출되는 이산화탄소량은 화석 연료 사용에 의한 배출량의 약 2% 정도에 불과하나, 이 양 역시 CO<sub>2</sub> 배출량의 중요한 배출원으로 구성되기에 충분하다(Marland et al. 1989).

대기중으로 배출된 이산화탄소는 물리, 화학 그리고 생물학적 조건에 따라 대기, 지표면 그리고 해양 등의 여러 매개체와 상호 교환하여 흡수되고 나머지는 대기중에 남게 된다. 1958년 부터 1980년 까지 23년 동안 전세계에서 배출한 이산화탄소량의 약 54%에 해당하는 480억톤이 대기중에 잔류되었고, 이로 인해 동일 기간 동안 대기중 평균 농도는 315ppm에서 338ppm으로 23ppm 증가하여 약 0.3

℃의 기온 상승을 초래하였다고 과학자들은 밝히고 있다(Emanuel et al., 1984). 현 증가 추세로 전지구적 이산화탄소 배출량이 계속 증가하면 2100년에 배출량은 220억톤에 달할 것이며 이로 인해 이산화탄소 대기중 농도는 800ppm에 육박하고 전 지구 기온은 약 3℃ 증가할 것으로 전망되고 있다(Houghton et al., 1990; Bacastow and Keeling, 1979).

지구온난화 방지를 위해서는 합리적인 이산화탄소 배출 규제 방안을 국가별로 마련하여야 하며, 이를 위해 국가별로 이산화탄소 배출량을 산정하여 전지구적 규모로 이산화탄소 배출량 및 농도에 대한 국가별 기여도를 산정하여야 한다. 이에 일환으로 경제개발협력기구(OECD/OCDE; Organization for Economic Co-operation and Development, 1991)는 정부간 기후변화협정(IPCC; Intergovernmental Panel on Climate Change)의 실무그룹 1 지원하에 이산화탄소 배출량과 흡수량의 산정 방법을 개발하였다. 또한 배출되는 이산화탄소의 대기, 해양 그리고 지표 생태계에서 순환 과정을 묘사하여 대기중 농도를 예측하기 위한 모형의 개발을 위한 연구가 70년대 중반 이후 부터 과학자들에 의해 활발히 수행되어져 활용 단계에 이르고 있다(Niehaus F., and Williams, 1979; Bacastow R., and E. Maier-Reiner, 1990; Emanuel et al., 1984).

본 연구에서는 OECD/OCDE(1991)에 의해 개발된 방법론에 의해 우리나라의 화석 연료 사용과 시멘트 생산 과정에서 배출되는 이산화탄소 배출량을 산정하였으며, Emanuel 등(1984)에 의해 개발된 이산화탄소 대기중 순환 모형을 이용하여 우리나라에서 배출되는 이산화탄소 배출량이 전지구적 규모의 대기중 농도에 기여하는 정도를 밝혀 보았다.

2. 연구방법

2.1 자료

동력자원부(1991)와 ADB(Asian Development Bank, 1992)에서 발간된 에너지 통계연보, 한국양회공업협회(1992)에 발간된 시멘트 연보를 통해 1980년 부터 1990년 까지 11년 동안 화석 연료 소비량 및 시멘트 생산량 자료를 발췌하여 이산화탄

소 배출량을 산정하였다.

대기중 이산화탄소 농도 기여도를 산정하기 위해 사용되는 이산화탄소 대기 순환 모형의 초기 입력 자료인 지표면 및 해양의 탄소 흡수율, 산림 개간에 의한 탄소 순환을 등 다양한 초기 상수치는 Emanuel 등(1984)에 의해 조사된 자료를 활용하였다.

2.2 분석방법

OECD/OCDE(1991)에 의해 개발된 방법을 이용하여 상별(고체, 액체, 기체), 액체 연료별 그리고 부문별로 이산화탄소 배출량을 산정하여 배출량의 구조를 분석하였다. Emanuel 등(1984)에 의해 개발된 상자형 이산화탄소 대기 순환 모형에 이산화탄소 배출량 시나리오를 적용시켜 시나리오별로 이산화탄소의 대기중 농도를 예측하여 전지구적 규모의 농도에 대한 기여도를 산정하였다.

3. 이산화탄소 배출량 산정

3.1 배출량 산정 방법

화석 연료 연소 과정에 의해 배출되는 이산화탄소 배출량 산정은 표 1에 제시된 연료별 탄소 배출 계수를 이용하여 다음 식으로 이루어 졌다(OECD/OCDE, 1992).

$$CO_2 = (FC)(C)(FO)(M) \dots\dots\dots(1)$$

여기서 FC, C, FO 그리고 M은 각각 최종 소비량, 탄소 배출 계수, 산화되는 탄소율(0.99) 그리고 탄소에 대한 이산화탄소 분자량비(44/12)을 나타낸다. 여기서 최종 소비량은 생산량과 수입량에서 수출량과 재고량을 제외 시킨 양을 의미한다. 한편 비에너지 목적으로 사용되는 나프타(Naphtha)의 경우에는 다음 식으로 이산화탄소 배출량을 산정하였다(OECD/OCDE, 1992).

$$CO_2 = [(FC) - (NE)(SP)](C)(FO)(M) \dots\dots\dots(2)$$

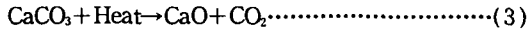
여기서 NE와 SP는 각각 비에너지로 사용된 연료 양과 비에너지 목적으로 사용된 연료에 잠재된(sequester) 탄소율(0.80)을 나타낸다.

Table 1. Carbon Dioxide Emission Factors by Fuel Types(OECD/OCDE, 1992)

(Unit: kg C/GJ)

Coal	Gasoline	Jet fuel	Kerosene	Gas/Diesel Oil	Residual Fuel Oil	LPG	Naphtha	Gas
25.8	18.9	20.0	19.5	20.2	21.1	17.2	20.0	15.3

시멘트 생산에 필요한 재료인 calcium carbonate (CaCO<sub>3</sub>)가 가열(calcination)되는 동안 아래와 같이 CaO와 CO<sub>2</sub>로 분해된다.



이러한 과정에서 생성된 CaO는 규산 재료와 결합하여 규산 삼석회(3CaO · SiO<sub>2</sub>)와 규산 이석회(2CaO · SiO<sub>2</sub>)로 구성되는 클링커(clinker)를 만들고 이에 응결 조절제로서 약간의 석고를 가하여 미분쇄하여 시멘트를 생산한다(Marland et al., 1989). 따라서 시멘트 생산량(ton)당 이산화탄소 배출량(ton) 즉 배출계수(EF)는 아래 식에 의해 산출된다(OECD/OCDE,1991).

$$\text{EF} = (F)(44\text{g/mole CO}_2/56.08\text{g/mole CaO}) \dots\dots(4)$$

여기서 F는 클링커 생산 과정에 CaO의 비율(0.635)을 나타낸다. (4)식에 의해 계산된 배출계수(EF=0.4985)를 사용하여 시멘트 생산 과정에서 배출되는 이산화탄소 배출량을 산정하였다.

3.2 이산화탄소 배출량

3.2.1 상별 연료와 시멘트에서 배출량

표 2에 보여진 고체, 액체, 기체 연료와 그리고 시멘트에서 이산화탄소 배출량을 살펴 보면 1980년 각각 45.90, 54.22, 0.04 그리고 8.53 백만톤에서 1990년 각각 74.60, 121.33, 1.99 그리고 14.60 백만톤으로 액체 연료에서 배출량이 크게 증가함을 알 수 있다. 1980년 이산화탄소 배출량 구조를 살펴 보면 액체, 고체 그리고 시멘트에서 각각 50%, 42% 그리고 8%를 점유하고 있으며 액체 연료중에서 중유와 경유의 점유율이 각각 50%와 31%로 총 81%를 나타냈다. 1990년 이산화탄소 배출량 구조를 살펴 보면 액체, 고체, 시멘트 그리고 기체가 각각 57%, 35%, 7% 그리고 1%를 점유하고 있으며 액체 연료중에서 중유와 경유의 점유율이 각각 34%와 35%로 총 69%를 나타내어 두 오일에서 이산화탄소 배출량이 감소하는 대신 휘발유와 LPG 등에서 이산화탄소 배출량이 서서히 증가함을 알 수 있다.

3.2.2 부문별 배출량

그림 1에 보여진 부문별 이산화탄소 배출량을 살펴 보면 1980년 산업, 주택/상업, 교통, 기타 그리고 비에너지별로 각각 44.83, 41.26, 14.85, 5.94 그리고 1.82 백만톤이며 1990년에는 각각 91.12, 68.04, 42.13, 7.13 그리고 4.09 백만톤으로 산업과 교

통 부문에서 크게 증가함을 알 수 있다. 이산화탄소 배출량의 부문별 점유율을 살펴 보면 주택/상업 부문은 1980년 38.0%에서 1990년 32.0%로 6%의 감소를 보인 반면 교통 부문에서는 1980년 13.7%에서 1990년 19.8%로 약 6% 증가를 보였다. 한편 산업 부문에서는 점유율이 크게 변화되지 않으나 최근에 점유율이 상승세를 보이고 있으며 최고의 기여율을 나타냈다.

Table 2. Carbon Dioxide Emission from Fossil Fuel and Cement

(Unit: million tons)				
Year	Solid	Liquid	Gas	Cement
1980	45.9	54.2	0.04	8.5
1981	54.1	51.4	0.04	8.4
1982	54.1	50.0	0.05	9.5
1983	57.3	53.2	0.07	10.4
1984	63.0	57.4	0.10	10.2
1985	68.2	60.0	0.16	10.3
1986	71.0	66.8	0.24	11.2
1987	73.3	76.0	0.37	12.5
1988	76.6	87.6	0.64	13.7
1989	74.8	100.2	1.22	14.0
1990	74.6	121.3	1.99	14.6

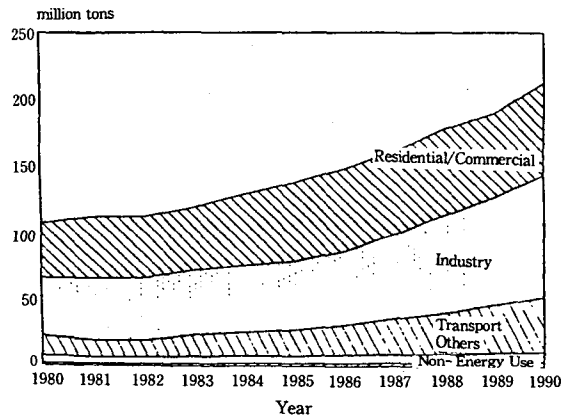


Fig. 1. Changes in Annual Carbon Dioxide Emissions by Sectors

3.2.3 액체 연료별 배출량

그림 2에 보여진 액체 연료별 이산화탄소 배출량을 살펴 보면 1980년 휘발유, 제트유, 등유, 경유, 중유, LPG 그리고 나프타에서 2.66, 1.59, 3.42, 16.62, 26.92, 1.19 그리고 1.82 백만톤으로 총 54.22 백만톤에서, 1990년 각각 8.98, 5.36, 10.22, 42.97, 40.74, 8.97 그리고 4.09 백만톤인 총 121.33

백만톤으로 67.1 백만톤 증가하였다. 연료별 이산화탄소 배출량 점유율을 살펴 보면 증유는 1980년 49.6%에서 1990년 33.6%로 16% 감소하고 경유는 1988년 부터 최고 점유율을 차지하였다.

3.2.4 배출량 구조 분석

에너지 사용에 의한 이산화탄소 배출량 구조의 경향을 분석하기 위해 다음 식이 자주 이용된다 (NIES, 1992).

여기서 우변의 첫째 항은 에너지원별 구조인 에너지에 대한 CO<sub>2</sub> 비(carbon intensity)로 연료대체 요인, 둘째 항은 에너지원단위인 GDP에 대한 에너지 비(energy intensity)로 에너지 절약 요인, 셋째 항은 인구에 대한 GDP 비인 경제성장 요인, 마지막 항은 인구 증가 요인을 각각 나타낸다.

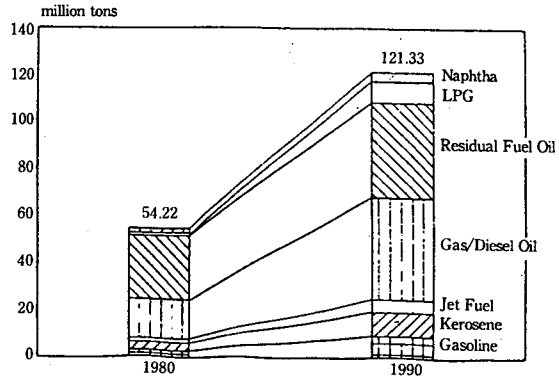


Fig. 2. Structural Comparison of Carbon Dioxide Emissions for 1980 and 1990

$$\left[ \begin{array}{c} \text{CO}_2 \text{ emissions} \\ \text{of energy source} \end{array} \right] = \left[ \frac{\text{CO}_2 \text{ emissions of energy source}}{\text{Primary domestic energy supply}} \right] \times \left[ \frac{\text{Primary domestic energy supply}}{\text{Gross domestic product}} \right] \times \left[ \frac{\text{Gross domestic product}}{\text{Population}} \right] \times \text{Population} \dots\dots(5)$$

일반적으로 인구 증가는 환경 정책외적 요인에 의해 결정되며, 국민의 후생 복지 증진을 위해 경제성장은 불가피하다. 따라서 이산화탄소 배출 저감을 위한 환경 정책은 에너지원별 구조를 전환하여 대체연료를 개발하던지 원단위를 줄여 에너지 이용 효율을 증진시키는 것이 될 것이다. 그림 3에 보여진 1980년을 기준으로한 각 항들의 변화 경향을 살펴 보면 이산화탄소 배출량은 1990년 까지 97% 증가하였고 이에 반해 연료 대체와 에너지 절약 효과는 각각 7.8%, 12%의 증진에 불과하였다.

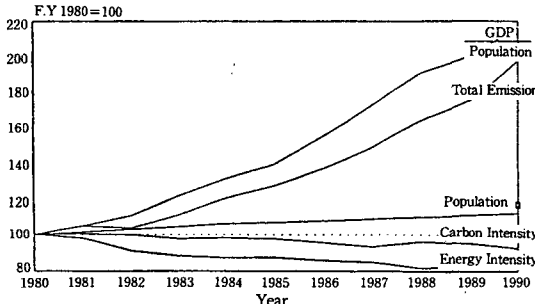


Fig. 3. Changes in Carbon Dioxide Emission Factors

4. 이산화탄소 농도 예측

4.1 이산화탄소 대기 순환 모형

향후 화석 연료 사용에 대한 적절한 대응책을 마련하기 위해서는 이산화탄소의 대기중 순환 과정을

묘사하는 모형을 통해 이산화탄소 농도를 예측하여 화석 연료의 배출량 시나리오를 작성해야 한다 (Niehaus F., and J. Williams, 1979; Anthony W. K., 1992).

대기중 탄소의 순환 과정을 묘사한 모형 중에는 지표 생태계 변화에 중점을 두고 개발된 모형 (Niehaus F., and J. Williams, 1979), 해양 순환 과정에 중점을 두고 개발된 모형(Bacastow R., and E. Maier-Reiner, 1990) 그리고 대기, 해양 및 지표 생태계를 동시에 고려하여 개발된 모형(Emanuel et al., 1984) 등이 있다. Emanuel 등(1984)에 의해 개발된 모형의 구조는 지표면에서는 나무 (nonwoody trees, woody trees), 식물(ground vegetation) 퇴적물/곰팡이(detritus/decomposers) 그리고 active soil carbon 등에서 탄소의 순환 과정, 해양에서는 대기/해수면 상호간 CO<sub>2</sub> 조절 능력, 해수면에서 CO<sub>2</sub> 흡수율 그리고 난류와 순환에 의한 탄소 전도율 등을 고려하여 구성된다.

지표면과 대기/해양에서 탄소 순환 과정 그리고 해양에서 탄소 전도 과정을 나타내는 이산화탄소 대기 순환 모형(Emanuel et al., 1984)의 기본 방정식은 부록에 제시하였다.

4.2 이산화탄소 농도 기여도 분석

정부간 기후변화협정의 실무 그룹 3(IPCC WG III, 1990)에 의해 제시된 이산화탄소 배출량 시나리오는 A, B, C 그리고 D이다. 시나리오 A는 온실 기체 배출량에 대한 감축 대책 없이 지속적으로 배

출량이 증가되는 경우이고, B는 에너지 효율의 증진과 천연 가스와 같은 대체 연료를 주 에너지원으로 하여 2100년 까지 이산화탄소의 배증 효과를 나타내지 않는 경우이고, C는 모든 산업 부문에 재생 에너지 활용과 농업 부문에서 강력한 온실기체 배출 규제 대책을 이루고 동시에 몬트리올 의정서를 실천에 옮겨 2075년에 이르러 이산화탄소의 배출량 감소 효과를 나타내는 경우이고, D는 시나리오 C를 더욱 강화시키며 탄소세의 전지구적 적용을 통해 모든 분야에서 주에너지원을 재생에너지로 하여 2025년 까지 Biomass 에너지를 10% 내지 25% 까지 확장시키는 경우이다(표 3참조).

한편 우리나라의 이산화탄소 배출량 시나리오에서는 1990년 수준 배출량이 2030년 까지 A, B 그리고 C의 경우 각각 3.7, 2.8 그리고 2.5배 정도 증가할 것으로 전망되고 있다(에너지경제연구원, 1992).

Table 3. Carbon Dioxide Emissions World- Scenarios (Unit: 1015g)

	1985	2000	2025	2050	2075	2100
A	6.0	7.7	11.5	15.2	18.7	22.4
B	5.9	5.5	6.4	7.5	8.8	10.3
C	5.9	5.6	6.3	7.1	5.1	3.5
D	6.0	5.6	5.1	2.9	3.0	2.7

부록에 제시된 이산화탄소 순환 모형에 이산화탄소의 초기 농도를 245ppm 으로 하여 1880년 부터 2075년 까지 대기중 이산화탄소 농도를 시나리오별로 예측하였으며, 이때 사용된 여러 초기 조건 및 인자들은 Emanuel(1984) 등에 의해 제시된 값을 사용하였고, 1985년 이후 이산화탄소 배출량 자료는 표 3의 IPCC WGIII(1990)에 의해 제시된 값을 사용하였다.

그림 4에 보여진 바와 같이 Mauna Loa 에서 Keeling 교수에 의해 관측된 값(CDIAC; Carbon Dioxide Information Analysis Center, 1991)과 배출량 시나리오 A의 경우 모형에 의해 산정된 값과는 1% 내외의 오차(예를 들면: 1990년 Mauna Loa 측정치 355ppm, 모형 산정치 349ppm)를 나타내 모형의 활용 가능성을 확보할 수 있었다. 모형은 전 지구적 년 평균 CO<sub>2</sub> 농도를 계산하며 Mauna Loa에서 CO<sub>2</sub>는 한 지점에서 다수의 관측된 년 평균 CO<sub>2</sub> 농도이므로 두 농도 변화가 일정한 차이를 보였다고 고려 된다. 또한 모형에 의해 계산된 CO<sub>2</sub> 농도는 초기치로 입력되는 농도(1800: 290ppm)에 따라 의존

하기 때문에 Mauna Loa 농도보다 낮게 나타난 것으로 풀이된다. 또한 기상청(KMA)과 국립환경연구원(NIER)에서 1991년 부터 1993년 까지 6월에 제주도 고산에서 관측된 값과 10ppm 내외의 오차를 보였다. 예측된 2075년도 이산화탄소 농도는 시나리오 A, B, C 그리고 D 경우에 각각 676ppm, 500ppm, 486ppm 그리고 426ppm 으로 나타나 IPCC WGIII(1990)에서 예측된 값과 좋은 일치를 보였다.

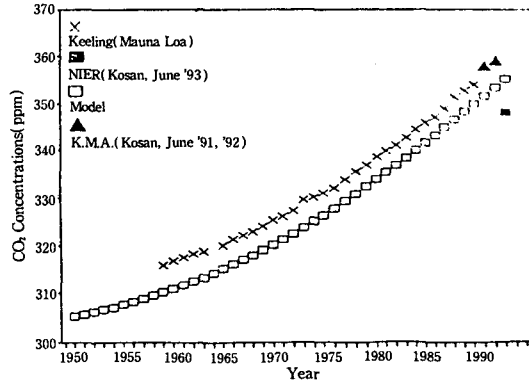


Fig. 4. Comparison of Carbon Dioxide Concentrations Predicted by Carbon Cycle model in Scenario A with Observations

CO<sub>2</sub> 증가로 인한 기온 상승은 해수면 기온 상승을 야기 시키고 이로 인해 해수면 CO<sub>2</sub> 분기압(partial pressure)이 상승하여 대기로 CO<sub>2</sub> 방출의 증가를 초래한다는 이론에 따라 상수 2.5를 도입하여 Bacastow등(1979)에 의해 제시된 통계 모형을 통해 대기중 이산화탄소 농도 증가로 인해 상승되는 기온을 계산하였다.

$$\Delta T = \frac{2.5}{\ln 2} \ln \frac{C}{C_0} \dots\dots\dots(6)$$

여기서 C와 C<sub>0</sub>는 각각 계산될 년도와 기준년도(1985)에서 이산화탄소 대기중 농도를 나타낸다. 그림 5에 보여진 바와 같이 1985년 기온에 대해 2075년도의 기온 상승은 시나리오 A, B, C 그리고 D 경우에 각각 2.4℃, 1.4℃, 1.3℃ 그리고 0.7℃로 나타났다.

전지구적 이산화탄소 배출량 시나리오와 우리나라 배출량 시나리오 자료(에너지경제연구원, 1992)를 이산화탄소 순환 모형에 적용시켜 우리나라 시나리오별로 전지구 대기중 이산화탄소 농도에 대한 기여율을 산정한 바, 표 4에 보여진 바와 같이 모든 시나리오 경우 2000년 까지는 0.08% - 0.09% 범위 이나, 그 이후 급격히 증가하기 시작하여 2050년에

는 0.64% - 0.78%로 나타났다.

5. 결 론

우리나라의 화석연료 사용 및 시멘트 생산 과정에서 이산화탄소 배출량은 1980년 108.7 백만톤에서 년 평균 약 7%의 증가를 보여 1990년에 212.5 백만톤에 이르고 있으며, 부문별로는 산업, 주택/상업, 교통, 기타 그리고 비에너지 순으로 각각 91.12, 68.04, 42.13, 7.13 그리고 4.09 백만톤으로 나타났다.

Table 4. Percentile Contributions of Carbon Dioxide Concentrations in terms of the Ratio of Korea Scenarios(KA, KB, KC)to World Scenarios(WA, WB, WC)

	1985	2000	2025	2050
KA WA	< 0.09	0.09	0.42	0.77
KB WB	< 0.08	0.08	0.42	0.64
KC WC	< 0.09	0.09	0.35	0.78

(Unit: %)

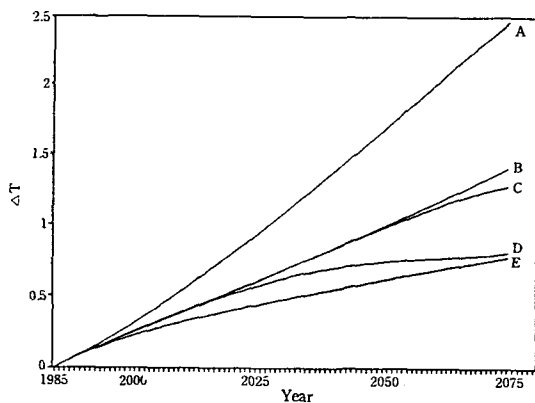


Fig. 5. Change in Temperature Deviation Since 1985 Derived from Scenarios

우리나라에서 화석연료 사용에 의해 배출된 이산화탄소 배출량에 의한 전 지구적 규모의 대기중 이산화탄소 농도에 미치는 기여도를 분석한 결과, 2000년 이후 부터 급격히 증가하여 2050년에 시나리오 A, B, C의 경우 각각 0.77, 0.64, 0.78%로 나타나 우리나라의 경제 성장을 고려하여 도출된 이산화탄소 배출량에 대한 시나리오의 재 창출이 요철된다.

부 록 : 이산화탄소 대기 순환 모형

대기중 이산화탄소 부분 기압에 비례하여 대기로부터 해양으로 이산화탄소 플럭스(Flux) 등을 묘사한 대기/해양에서 탄소 순환 과정 그리고 해수면으로부터 4.5km까지 18개 해수층으로 분리된 해수 경계층 간에 탄소의 혼합과 순환 과정을 나타내는 식은 아래와 같다:

$$c_1 = -k_{ASc1} + k_{SA} \bar{c}_2 (P_S / P_S(\bar{c}_2)) - (F_{1,21}^c(C_{21}) + F_{1,22}^c(C_{21}) + F_{1,23}^c(C_{23})) + \alpha_{24,1} C_{24} + \alpha_{25,1} C_{25} + F_F(t) + \phi_A F_B(t) \dots (1)$$

$$c_2 = k_{ASc1} - k_{SA} \bar{c}_2 (P_S(\bar{c}_2) / P_S(\bar{c}_2)) - k_{23} C_2 + k_{32} C_3 \quad (2)$$

$$c_i = k_{i-1,i} C_{i-1} - (k_{i,i-1} + k_{i,i+1}) C_i + k_{i+1,i} C_{i+1} \dots (3)$$

i = 3, 4, ..., 19

$$c_{20} = k_{19,20} C_{19} - k_{20,19} C_{20} \dots (4)$$

여기서 k는 대기과 해양 상호간 그리고 해수층간 플럭스를 상수, c는 층별 탄소 질량, P는 해양 부분 기압, F는 식물, 나무 그리고 지표면 미생물간의 탄소 플럭스, α는 F에 상응하는 지표면 요소 상호간 상수, 그리고 φ는 나무로부터 방출되는 탄소를 나타낸다.

지표면에 존재하는 꽃, 과일 나무 그리고 큰 줄기를 가진 나무 등과 대기중 탄소와 순환 과정을 나타내는 식은 아래와 같다:

$$\alpha = F_{1,21}^c(C_{21}) - \alpha_{21,24} C_{21} - F_B^c(t) C_{21} / (C_{21} + C_{22}) \dots (5)$$

where  $F_{1,21}^c(C_{21}) = v_T C_{21} - \rho^2 C_{21}$

$$\rho = -\sigma_T \rho_T + w_T (v_T - \alpha_{21,24}) + [\rho^2 / (v_T - \alpha_{21,24})] \xi_T F_B^c(t) [C_{21} / (C_{21} + C_{22})]$$

$$c_{22} = F_{1,22}^c(C_{21}) - (\alpha_{22,23} + \alpha_{22,25}) C_{22} - F_B^c(t) C_{22} / (C_{21} + C_{21}) \dots (6)$$

where  $F_{1,22}^c(C_{21}) = (v_T C_{21} + \rho^2 C_{21}) (F_{1,22}^c / F_{1,21}^c)$

여기서 v는 나무에서 탄소 저장을 위한 내성 성장율, ρ는 지표면 식물과 나무에서 탄소 성장의 평형 수준을 조절하는 상수, w는 지표면 식물과 나무에서 탄소 저장의 최고 평형 수준을 조절하는 상수, ξ는 지표면 식물과 나무로부터 탄소 저장의 평형 수준을 감소시키는 탄소 방출율, σ는 지표면 식물과 나무로부터 탄소 저장의 평형 수준을 증가시키는 율을 나타낸다.

지표면에 존재하는 식물들에 의한 대기중 탄소와 순환 과정 그리고 지표면에 존재하는 퇴적물, 곰팡이, 토양 등이 나무, 식물 대기과 탄소순환에 대한 상호 작용을 나타내는 식은 아래와 같다:

$$c_{23} = F_{1,23}^c (\alpha C_{23,24} + \alpha_{23,25} C_{23}) \dots (7)$$

where  $F_{1,23}^C = vvc_{23} \rho v c_{23}^2$

$$\rho v = \{ \epsilon \sigma_T - \epsilon \omega_T (v_T - a_{21,24}) / \rho_T - \rho_T [ (1 + \xi_T (\epsilon - 1))$$

$$F_B^C(t)_{C21} / (C21 + C22) + s\eta \} / (v_T - a_{21,24}) \rho v$$

$$\eta = -\kappa_s \eta + (1 - \xi_T) F_B^C(t)_{C21} / (C21 + C22)$$

$$C_{24} = \alpha_{21,24} C_{21} + \alpha_{22,24} C_{22} + \alpha_{23,24} C_{23} - (\alpha_{24,25}$$

$$+ \alpha_{24,1}) C_{24} + \phi_D F_B^C(t) + \phi_S F_S^C(t) \dots \dots \dots (8)$$

$$C_{25} = \alpha_{22,25} C_{22} + \alpha_{23,25} C_{23} + \alpha_{24,25} C_{24} - \alpha_{25,1} C_{25}$$

$$- \phi_S F_B^C(t) \dots \dots \dots (9)$$

여기서  $\epsilon$ 는 지표면 나무의 탄소 저장 능력 변화율,  $\eta$ 는 지표면 나무의 성장 둔화율을 나타낸다.

참고문헌

동력자원부, 1992: 에너지 통계 연보, 352 pp.  
 에너지경제연구원, 1992: 지구환경 보호와 장기 에너지 정책 방향, 72 pp.  
 한국양회공업협회, 1992: 시멘트 연보, 399 pp.  
 ADB(Asian Development Bank), 1992: Energy Indicators of Developing Member Countries of ADB. Asian Development Bank, Manila, 504 pp.  
 Anthony, W. K. et al., 1992: Projecting Future Concentrations of Atmospheric CO<sub>2</sub> with Global Carbon Cycle Models: The Importance of Simulating Historical Changes, Environmental Management 16, pp.91-108.  
 Bacastow, R. B., and C. D. Keeling, 1979: Model to Predict Future Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations: The Global Effects of Carbon Dioxide from Fossil Fuels, ed. W. P. Elliott. CONF-770385, National Technical Information Services, USDOE, Virginia, pp. 72-90.  
 Bacastow, R. B. and E. M. Reimer, 1990: cean-Circulation Model of the Carbon Cycle, Climate Dynamics 4, pp.95-125.  
 CDIAC(Carbon Dioxide Information Analysis Center), 1991: Trends '91, A Compendium of Data on Global Change, 665 pp.  
 Emanuel, W. R. et al., 1984: Computer Implementation of a Globally Averaged Model of the

World Carbon Cycle, US DOE, 79 pp.  
 Houghton, J. T., G. J. Jenkins, and J. J. Ephraums, 1990: Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. ISBN 0-521-40360, Cambridge University Press, Great Britain, 364 pp.  
 IPCC WGIII (Intergovernmental Panel on Climate Change Working Group III), 1990: Formulation of Response Strategies, 201 pp.  
 Marland, G., T. A. Boden, R. C. Griffin, S. F. Huang, P. Kanciruk, and T. R. Nelson, 1989: Estimates of CO<sub>2</sub> emissions from fossil fuel burning and cement manufacturing, based on the United Nations energy statistics and U.S. Bureau of Mines cement manufacturing data. ORNL/CDIAC-25, NDP-30, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 712pp.  
 NIES (National Institute for Environmental Studies), 1992: The Estimation of CO<sub>2</sub> Emission in Japan. Tsukuba, 107 pp.  
 Niehaus, F. and J. Williams, 1979: Studies of Different Energy Strategies in terms of Their Effects on the Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration, Journal of Geophysical Research 84, pp. 3123-3129.  
 OECD/OCDE(Organization for Economic Cooperation and Development/ Organisation De Cooperation Et De Developpement Economiques), 1991: Estimation of Greenhouse Gas Emissions and Sinks: Final Report from OECD Experts Meeting, 18-21 February 1991 Prepared for Intergovernmental Panel on Climate Change. OECD/OCDE, Paris, pp. 1.10-6.48.  
 OECD/OCDE(Organization for Economic Cooperation and Development/ Organisation De Cooperation Et De Developpement Economiques), 1992: National Inventories of Net Greenhouse Gas Emissions: IPCC Guidelines for Preparation and Reporting. OECD/OCDE, Paris, pp.1.4-5.3.