

# 탄소동위원소를 이용한 탄소순환모델의 개발

권오열

계명대학교 환경과학과

## 1. 서론

지구상에 존재하는 7개의 탄소동위원소중 안정된 동위원소인  $^{12}\text{C}$  와  $^{13}\text{C}$ 는 총탄소의 98.89%와 1.11%를 각각 차지하고 있고 방사성 동위원소인  $^{14}\text{C}$ 는 무시할 수 있는 정도의 양으로 존재하면서 대기, 육상생태계 및 해수사이를 순환하고 있다. 순환과정(광합성, 대기-해수간  $\text{CO}_2$  교환 등)에서 탄소동위원소간의 무게차이로 인한 동위원소간의 분율분리(isotopic fractionation)로 인하여 대기, 육상생태계 및 해수 중의 탄소동위원소의 비( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  및  $^{14}\text{C}/\text{C}$ )가 다르게 나타난다. 근세의 핵폭탄 실험으로 인한 대기중으로의  $^{14}\text{C}$ 의 대량방출과 삼림의 파괴 및  $^{14}\text{C}$ 가 존재하지 않는 화석 연료의 사용증가는 정체상태의 탄소동위원소의 농도 및 동위원소간의 비를 변화시키고 있다.

본 연구에서는 탄소동위원소들을 이용하여 인위적인  $\text{CO}_2$ 의 대기중 방출로 인한 지구규모의 탄소 물질수지 및 대기중 이산화탄소 농도의 시나리오 분석을 위한 모델(Global Carbon Cycle Model; 이하 GCCM)을 개발하였다.

## 2. 모델의 개요

GCCM 모델의 구조는 대기권은 성층권과 대류권으로 나누어지고, 육상생태계는 2개의 식물성분과 3개의 토양상자로 이루어졌으며, 해양은 2개의 표면수와 10개의 중간 및 심해수에 존재하는 무기 및 유기탄소의 총 18개의 상자로 구성된 25-상자 모델이다.

일반적인 상자모델의 물질수지식은 “물질축적률 = 물질유입률 - 물질유출률 ± 상자내의 반응률”로 표시된다. 본 연구의 대상인 탄소 자체는 비반응성이므로 상자 내에서의 Source 및 Sink 항인 반응률을 무시하면, Advection 및 Diffusion/Dispersion에 의한 Transport항인 물질유출입에 대하여 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = \sum_j F_{ji} - \sum_j F_{ij} + \sum_e F_{ei}(Input) - \sum_e F_{ie}(Output) \quad (1)$$

여기서,  $V_i$  =  $i$ 번째 상자의 체적( $\text{L}^3$ ),  $C_i$  =  $i$ 번째 상자의 탄소 농도( $\text{ML}^{-3}$ ),  $F_{ij}$  =  $i$ 번째 상자에서  $j$ 번째 상자로의 물질전달률,  $F_{ei}(Input)$  = 모델 외계(e)로부터  $i$ 번째 상자로의 물질유입(본 모델에서는 화석연료 사용으로 인한 C,  $^{13}\text{C}$  및  $^{14}\text{C}$  ( $\text{CO}_2$ 의 형태로서)의 대류권 유입과 자연발생적 및 핵폭발에 의한  $^{14}\text{C}$ 의 성층권 유입 등),  $F_{ie}(Output)$  =  $i$ 번째 상자로부터 모델 외계(e)로의 물질유출률이다.

C물질전달률을  $f_{ij}$ 라 하면  $^{13}\text{C}$  물질전달률은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha_{ij} \cdot R_i \cdot f_{ij} \quad (2)$$

여기서 아래첨자  $i$  및  $j$ 는 상자번호를 나타내고  $\alpha_{ij}$ 는 동위원소가  $i$ 번째 상자로부터  $j$ 번째 상자로 이동할때의  $^{13}\text{C}$ 의 분율분리 [ $\alpha_{ij} = (^{13}\text{C}_j / ^{12}\text{C}_j) / (^{13}\text{C}_i / ^{12}\text{C}_i)$ ]이며,  $R_i$  =  $i$ 번째 상자의  $^{13}\text{C}/\text{C}$ 이다. 마찬가지로  $^{14}\text{C}$  물질전달률은 다음과 같다.

$$\beta_{ij} \cdot U_i \cdot f_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\beta_{ij}$ 는 동위원소가  $i$ 번째 상자로부터  $j$ 번째 상자로 이동할때의  $^{14}\text{C}$ 의 분율분리 [ $\beta_{ij} = (\alpha_{ij})^2$ :  $^{14}\text{C}$ 와  $^{12}\text{C}$ 의 무게차는  $^{13}\text{C}$ 와  $^{12}\text{C}$ 의 무게차의 2배이므로  $^{14}\text{C}$ 의 분율분리율  $\beta_{ij}$ 는  $^{13}\text{C}$ 의 분율분리율의 제곱으로 가정된다(Keeling, 1981; Holmen, 1992)]이며,  $U_i$  =  $i$ 번째 상자의  $^{14}\text{C}/\text{C}$ 이다.

본 모델은 종속변수  $C(=^{12}C+^{13}C+^{14}C)$ ,  $^{13}C$  및  $^{14}C$ 에 대하여 각 25개씩, 총 75개의 미분방정식으로 구성되었으며, 4차 Runge-Kutta 수치해석법을 이용하여 시간간격 1일로 계산되었다.

모델의 입력자료로서, 화석연료의 연소로 인한 연간  $C$ ,  $^{13}C$  및  $^{14}C$ ( $CO_2$ 의 형태로서)의 대류권으로의 유입은 연료의 성상별(고체, 액체, 기체) 발생량 자료와 연료 성상별 동위원소의 비(Tans, 1981)로부터 계산하였으며, 성층권으로의  $^{14}C$ 의 유입은 Hesshaimer et al.(1994)에 인용된 자료를 이용하였다.

모델의 보정을 위해서, 미국 하와이의 Mauna Loa섬에서 1958년부터 측정된 대기  $CO_2$  농도, 해수중의 핵폭탄 사용으로 인한  $\Delta^{14}C$ 의 수직분포, 대기중의  $\delta^{13}C$  와  $\Delta^{14}C$  자료 및 토양중의  $\Delta^{14}C$  자료를 사용하였다. 삼림파괴로 인한 연간 0.4~2.6 Gt-C의  $CO_2$ 의 대기 방출량과 1980년대의 대기로부터 연간 0.6~2.6Gt-C의  $CO_2$ 의 해수로의 유입량등의 문헌값도 모델보정시 구속조건으로 이용하였다.

### 3. 결과

$C$ ,  $^{13}C$  및  $^{14}C$  물질수지식을 이용하여 대기, 육상생태계 및 해양의 탄소 순환 및 상호 작용을 나타낼 수 있는 Global Carbon Cycle Model(GCCM)을 개발하였다. 1980년대에 있어서 탄소의 연평균 물질수지는 화석연료의 사용으로 인한 5.43 Gt-C 및 삼림파괴로 인한 0.91 Gt-C이 발생하였고 이것은 대기중으로 3.29 Gt-C, 육상생태계로 0.90 Gt-C 및 해양으로 2.15 Gt-C씩 재분배된 것으로 나타났다.

본 모델은 대기 이산화탄소 농도의 시나리오 분석, 이산화탄소 배출의 정책관리 등에 활용될 수 있고, 기후예측모델, 농작물 모델 등의 submodel로서 활용될 수 있다.

### 참고문

- Hesshaimer, V., M. Heimann and I. Levin, 1994, Radiocarbon evidence for a smaller oceanic carbon dioxide sink than previously believed, *Nature*, 370, 201~203.
- Holmen, K., 1992, The global carbon cycle. In Butcher, S. S., R. J. Charson, G. H. Orians and G. V. Wolfe[Eds.] *Global biogeochemical cycles*, Academic Press, San Diego, CA, 239~262.
- Keeling, C. D., 1981, Standardization of notations and procedures. In Bolin, B.[Ed.] *Carbon Cycle Modelling, SCOPE 16*, John Wiley, New York, 81~101.
- Tans, P., 1981,  $^{13}C/^{12}C$  of industrial  $CO_2$ . In Bolin, B.[Ed.] *Carbon Cycle Modelling, SCOPE 16*, John Wiley, New York, 159~199.