



대기/해양 접합 GCM을 이용한 지구 온난화의 추정 Estimation of Global Warming by Coupled Atmosphere-Ocean GCM

김 정 우¹⁾, 박 지 업²⁾

Jeong-Woo Kim, and Ji-Up Park

A coupled general circulation model (GCM) of the global atmosphere, oceans and lands is used for finding the future climate at times of doubled carbon dioxide concentration (DCDC) of the atmosphere.

Two runs of the model were made in order to find the future change. Global changes at times of DCDC may be characterized by a global warming of 1.4°C, a 3% global precipitation increase, and an increase in the surface available water (SAW) over the global land among others. The estimated increase in SAW over the land implies that river discharge is likely to increase with increased chance of severe weather as a result of the future global warming.

1. 서론

우리나라에도 기후 변화의 사회적, 경제적 충격이 느껴지는 시대가 도래했다. 여기서 기후 변화란 이산화탄소의 배출을 마음대로 자행할 수 없게 강요하는 원천적 현상으로서 흔히 지구 온난화라 불리우는 것을 말한다. 지구 온난화는 기후 시스템의 변화로 인식되어 많은 연구자들의 과학적 탐구 대상이 되어 왔다.

지구 온난화의 과학적 이해를 넘어서 이를 현실적으로 추정하려는 노력은 하나의 공학적 문제를 구성한다. GCM은 이 노력을 통해서 발전해 왔으며, 모사는 GCM의 활용과 검증에서 뺄 수 없는 기술로 정착되었다. 최근에 GCM의 주요 검증 방법으로 4차원 자료 동화 기술이 심각히 고려되고 있다. 그러나 동화의 최종 산물인 재분석 자료가 관측에 합치되기를 추구하므로 동화 과정에 입력될 관측 자료의 정확성이 결국 GCM의 검증을 위해서 필요하다. 이제 정확한 관측 자료의 전구 바탕이 구축되어 이를 토대로 현재 및 과거의 기후 변화를 완벽하게 재분석한 슈퍼 GCM이 나왔다 하자. 이 슈퍼 모형이 미래의 기후 변화도 정확하게 산출할 것인가? 이 질문에 대한 합리적인 해답은 아직 없다. 그러나 우리는 그런 해답을 기다리기도 전에 이미 미래의 변화를 계산하기 시작했다. 더구나 슈퍼 모형의 존재도 확인되지 않은 상황에서 미래의 지구 온난화를 추정하는 것은 확실히 하나의 모험이다.

2. YONU CGCM Tr7W12

대순환 모형 (general circulation model 곧 GCM)은 1960년대에 출현해서 40년이 지나는데 이제 기후의 계산에 있어 무소불위의 도구이다 (IPCC 1995, IPCC, 2000). 이는 기후가 대기과 해양의 대순환으로 결정될 것이라고 보는 기상학에 기초하고 있지만 무엇보다도 지난 40여년에 걸쳐 발전해 온 전산 기술과 위성 관측 기술의 덕택이다.

1) 연세대학교 대기과학과 120-749 서울 서대문구 신촌동 134번지.

2) 공군 73 기상전대. 현재 연세대학교 박사과정에 위탁 교육중.



GCM은 기후 시스템의 한 유체열역학적 모형이다. 여기서 기후 시스템이란 기후를 한 상태로 갖는 물리 체계를 말하며, 이 때문에 GCM을 때때로 기후 시스템 모형이라 부르기도 한다. 일반적으로 기후 시스템은 대기, 해양, 지면, 빙권 그리고 생권의 다섯 권역으로 구성된다고 본다. 그러나 기후 시스템 모형의 정의는 이들 권역 간의 상호작용에 대한 우리들의 인식 수준에 따라 구체화된다. 여기에 소개될 기후 시스템 모형은 대기, 해양 및 지면 간 상호작용의 인식 위에서 설계된 것이며, 빙권과 생권은 나머지 다른 권역에 대한 이들의 무시 못할 영향 때문에 시공적으로 처방되어 있으나 바로 이 처방으로 말미암아 다른 권역의 변화에 따를 되먹임으로부터 벗어나 있다. YONU CGCM Tr7W12라 속칭되는 이 GCM은 지표로부터 100mb까지의 전구 대기를 7개의 기층으로, 해면으로부터 해저 지형까지의 세계 해양을 가장 깊은 경우에 12개의 수층으로, 그리고 지면을 한 개의 기층으로 취급한다. 기층 위에 육빙, 그리고 수면 층 안에 해빙이 시공 함수로 각각 처방되고, 지면은 그 알베도에 따라 6가지로 세분되어 생태계의 다양성을 나타내고, 수면 층은 태양 복사에 대한 알베도와 흡수능의 처방을 통해서 플랑톤 질량을 나타낸다.

대기와 지면은 위도 4도, 경도 5도 간격, 그리고 해양은 위도 2도, 경도 2.5도 간격의 수평 격자로 각각 분해된다. 이에 따라 육빙, 해빙 및 생권 변수들도 마찬가지로 분해능으로 표현된다. 그러나 남위 12도와 북위 12도 사이에서 해양 GCM의 위도 간격은 2도에서 점차적으로 줄어 적도에서 1/3도가 되며 남북 구조가 매우 세밀한 적도 켈빈파와 로쓰비파가 표현되기를 바란다.

대기 권역의 예단 변수는 지표 기압 p_s , 수평 속도 \vec{V} , 온위 Θ , 수증기 혼합비 q 및 구름 물 혼합비 m 이고, 진단 변수는 침강 속도 $\dot{\sigma} \equiv d\sigma/dt$, 지위 Φ , 기온 T 및 강수 속 R_p 이다. 이제 모형 상단에서의 기압 $p_T \equiv 100mb$, 기둥 질량 $\pi \equiv p_s - p_T$ 그리고 임의 고도 z 에서의 기압 p 에 대해서 연직 좌표를 $\sigma \equiv (p - p_T)/\pi$ 과 같이 정의한다. 대기 변수들의 지배 방정식은

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\nabla \cdot \pi \vec{V} - \frac{\partial}{\partial \sigma}(\pi \dot{\sigma}) \quad (1)$$

$$\pi \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\pi \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} - (\pi \dot{\sigma} + gM_c) \frac{\partial \vec{V}}{\partial \sigma} + f \vec{k} \times \pi \vec{V} - \pi \nabla \Phi - \pi \sigma \alpha \nabla \pi + \pi \vec{F} + D_c(\vec{V}_c - \vec{V}) \quad (2)$$

$$\pi \frac{\partial \Theta}{\partial t} = -\pi \vec{V} \cdot \nabla \Theta - (\pi \dot{\sigma} + gM_c) \frac{\partial \Theta}{\partial \sigma} + \pi \frac{Q_R + CL/c_p - Q_F}{T} + D_\Theta + D_c(\Theta_c - \Theta) \quad (3)$$

$$\pi \frac{\partial q}{\partial t} = -\pi \vec{V} \cdot \nabla q - (\pi \dot{\sigma} + gM_c) \frac{\partial q}{\partial \sigma} + \pi(E_p - C) + D_q + D_c(q_c - q) \quad (4)$$

$$\pi \frac{\partial m}{\partial t} = -\pi \vec{V} \cdot \nabla m - (\pi \dot{\sigma} + gM_c) \frac{\partial m}{\partial \sigma} - \pi E_m + \pi(S_m - P_m) + D_m \quad (5)$$

$$T = \Theta(p/p_0)^{R/c_p} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\pi \alpha \equiv -\frac{\pi RT}{p_T + \pi \sigma} \quad (7)$$

$$\frac{\partial R_p}{\partial \sigma} = P_m + C - E_p \quad (8)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서 α 는 비부피, \vec{F} , D_Θ , D_q 및 D_m 은 각각 \vec{V} , Θ , q 및 m 의 확산 효과를 나타내고, Q_R 은 순복사 가열율, $Q_F \geq 0$ 는 마찰 가열, C 는 대규모 과포화에 기인하는 응결, $f \equiv 2\Omega \sin \phi$ 는 코리올리 모수, Ω 와 ϕ 는 자전 각속도와 위도, 그리고 $p_0 \equiv 1000mb$, 기

체 상수 R , 정압 비열 c_p , 잠열 L 및 중력 가속도 g 는 상수이다. E_m 과 P_m 은 구름 물의 증발과 자가 전환, S_m 은 대규모 응결이 아닌 아격자 과정에 의한 구름 물의 생성을, 그리고 E_p 는 낙하 강수의 증발을 각각 나타낸다. 적은 대류의 효과는 구름 질량 속 M_c 으로 나타낸 적은 침강과 구름 배기율 D_c 로 나타낸 적은 배기로써 표현된다. 대규모 과포화로 응결된 구름 물은 즉시 강수로 전환되어 낙하하는 것으로 보며 따라서 대규모 응결은 m 의 변화에 상관없게 된다. 경계 조건

$$\sigma = 0 \text{ 과 } \sigma = 1 \text{ 에서 } \pi \sigma = 0 \quad (9)$$

을 이용하여 연속 방정식 (2)로부터 “경향 방정식”과 “침강 방정식”을

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = -\nabla \cdot \int_0^1 \pi \vec{V} d\sigma \quad \text{및} \quad \pi \sigma = \sigma \nabla \cdot \int_0^1 \pi \vec{V} d\sigma - (1-\sigma) \nabla \cdot \int_0^\sigma \pi \vec{V} d\sigma \quad (10)$$

과 같이 얻을 수 있다. 식(12)에 따라 지표 기압은 예단되고 대규모 침강은 진단된다.

지면 권역의 예단 변수는 지층 위에 쌓인 눈 S_n , 지층에 포함된 간극수 질량 w_l 과 간극빙 질량 w_i , 그리고 지면 온도 T_g 이다. 간극수와 간극빙 질량의 합 $w \equiv w_l + w_i$ 를 지면 수분, 그리고 이를 지면 수분의 최대 값 $W_g (\equiv 150 \text{ kg/m}^2)$ 으로 나눈 비율 $w' \equiv w/W_g$ 을 지면 습기라 각각 부른다. 지면 수분은 지면 온도가 빙점일 때 간극수와 간극빙의 혼합으로, 빙점보다 높으면 간극수로, 그리고 빙점보다 낮으면 간극빙으로 각각 존재한다. 지면 변수들의 지배 방정식은

$$\Gamma \frac{\partial T_g}{\partial t} = (1 - \alpha_s) S_R + R_A - R_E - H_L - H_S + L_f C_i \quad (11)$$

$$\frac{\partial S_n}{\partial t} = (1 - S(T_S - T_i)) P_S - (1 - \delta(S_n)) E_S - M_S \quad (12)$$

$$\frac{\partial w_l}{\partial t} = S(T_S - T_i)(1 - r) P_S - \delta(S_n) E_S + M_S - C_i \quad (13)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} = C_i \quad (14)$$

과 같이 쓸 수 있다. 여기서 Γ 는 지면의 단위 수평 면적당 열용량으로 지면의 구분과 습기, 그리고 쌓인 눈의 깊이에 따라 처방되고, S_R 는 일사, α_s 는 지표 알베도, C_i 는 위상 변화를 일으킨 지면 수분의 질량, L_f 는 융해열, T_S 는 지표 기온, T_i 는 물의 빙점 온도, M_S 는 눈 녹음, r 은 유수 계수, P_S 는 강수, R_A 는 하향 장파 속,

$$R_E \equiv \sigma_0 T_g^4, \quad H_L \equiv L E_S \equiv \beta c_D V_S \rho_0 (q_g - q_s) \quad \text{및} \quad H_S \equiv c_D V_S \rho_0 c_p (T_g - T_s)$$

는 상향 장파 복사 속, 잠열 속 및 현열 속, 그리고 σ_0 는 Stefan-Boltzmann 상수이다. 두 함수

$$S(x) \equiv \begin{cases} 1: & x \geq 0 \\ 0: & x < 0 \end{cases} \quad \text{및} \quad \delta(x) \equiv \begin{cases} 1: & x = 0 \\ 0: & x > 0 \end{cases}$$

가 정의되었다. 식(11)-(14)는 각각 지면의 내부 에너지, 쌓인 눈 질량, 간극수 질량 및 간극빙 질량의 수지를 나타낸다.



해양 권역의 예단 변수는 수평 속도 \vec{V} , 수온 T 및 염분도 S_a , 그리고 진단 변수는 연직 속도 w 와 압력 p 이다. 이 해양 변수들의 지배 방정식은

$$0 = \nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (16)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho(T, S_a) \quad (17)$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \vec{V} - w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z} + f \vec{k} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho_0} \nabla p + \vec{F} \quad (18)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla T - w \frac{\partial T}{\partial z} + Q + D_T \quad (19)$$

$$\frac{\partial S_a}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla S_a - w \frac{\partial S_a}{\partial z} + D_S \quad (20)$$

과 같다. 여기서 밀도 ρ 는 수온과 염분도의 함수로 주어지고, \vec{F} 는 마찰력, Q 는 복사 흡수를 포함한 비단열 가열을, 그리고 D_T 와 D_S 는 온도와 염분도의 확산 과정을 각각 나타낸다. 식(16)을 임의의 z 로부터 연직 방향으로 해면 $z=0$ 까지 적분하면

$$w = \nabla \cdot \int_z^0 \vec{V} dz \quad (21)$$

을 얻고 연직 속도가 진단된다. 처방된 해저 지형 $z=-H$ 으로부터 연직 방향으로 해면까지 (16)를 적분하고, 해저에서의 경계 조건 $w = \vec{V} \cdot \nabla H$ 과 해면에서의 경계 조건 $w=0$ 을 이용하면

$$0 = \nabla \cdot \int_{-H}^0 \vec{V} dz \quad (22)$$

를 얻는다. 이제 연직 평균 수평 속도를 $\bar{\vec{V}} \equiv \int_{-H}^0 \vec{V} dz / H$ 라 두면 $H\bar{\vec{V}}$ 은 (22) 때문에 무발산 벡터임을 알 수 있고 따라서 순압 유선 함수 Ψ 를 $H\bar{\vec{V}} \equiv \vec{k} \times \nabla \Psi$ 과 같이 정의한다, 한편 (17)을 임의의 z 에서 해면까지 연직 방향으로 적분하고 해면에서의 압력을 p_0 이라 두면

$$p = p_0 + g \int_z^0 \rho(T, S_a) dz \quad (23)$$

을 얻는다. 미지수에 관한 한, 압력 p 는 해면 압력 p_0 으로 대체될 수 있다. 식(20)의 오른쪽을 $\vec{M} - \nabla p_0 / \rho_0$ 이라 두면, Ψ 와 수평 속도의 경압 성분 $\vec{V}' \equiv \vec{V} - \bar{\vec{V}}$ 는

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \left(\frac{1}{H} \nabla \Psi \right) = -\nabla \cdot \left(\vec{k} \times \int_{-H}^0 \vec{M} dz / H \right) \quad \text{및} \quad \frac{\partial}{\partial t} \vec{V}' = \vec{M} - \int_{-H}^0 \vec{M} dz / H \quad (24)$$

로부터 각각 얻어진다. Ψ 와 \vec{V}' 를 알면 속도 \vec{V} 는 $\vec{V} = \vec{V}' + (1/H)\vec{k} \times \nabla \Psi$ 로부터 얻는다.

대기와 지표의 경계 면에서 운동량, 에너지 및 수분의 보존적 교환이 있다. 에너지의 교환은 단파와 장파 복사의 교환 및 현열과 잠열의 요란 교환으로 이루어지고, 수분의 교환은 지표로부터의 기화, 지표로의 결로 및 지표 강수로 이루어진다. 이때 해면에서의 수분 교환은 해면 층의 염분도를 변화시키는 것으로, 그리고 지면에서의 운동량 교환은 지면을 움직이지 못하는 것으로 각각 규정된다.

3. 수치 적분과 결과

앞에 기술된 접합 GCM을 이용해서 두 개의 장기 적분을 실행했다. 하나는 대기중 CO₂ 농도를 현재 값 (345ppm)에 고정하고 85년의 모사 기간에 걸쳐 적분한 것(CONT)이고, 다른 하나는 CO₂ 농도를 1%의 한해 누적 증가율로 점진적으로 증가시키면서 같은 모사 기간에 걸쳐 적분한 것(TRAN)이다.

이 두 적분의 초기 조건은 동일하며, 다만 대기 GCM과 해양 GCM을 각각 적분하여 이들이 서로에 동화되도록 구성되었다. 이를 위해서 먼저 1979-1988 10년 기간 동안에 관측된 월별 해면 온도를 처방해서 대기 GCM을 이 10년에 대해 적분했고 이로부터 얻은 모사 대기의 월별 정규 상태를 처방해서 해양 GCM을 임의 20년에 대해 적분했으며, 이에 이어 모사 대기의 월별 상태를 처방해서 해양 GCM을 1979-1988 10년에 대해 적분했다. 이 1979-1988 10년에 대한 모사 대기와 모사 해양의 마지막 상태를 접합 GCM의 초기 상태로 잡았다. 이러한 초기화에도 불구하고 모형은 두 적분에서 모두 상당한 그러나 동종의 기후 표류를 드러냈다(그림 1). 이 표류의 특징은 해양 혼합층과 대기 하층, 특히 저위도 지대에서의 전반적 냉각, 그리고 열대 태평양 ITCZ의 이종 구조(그림 2)이다. 기후 표류는 두 적분에서 모두 실행 후반에 들어 격감했다.

그림 3은 지표 기온과 강수량의 전구 평균 값의 차이(TRAN-CONT)가 CO₂의 점증에 따라 변하는 온난화의 모습을 보인다. 여기에 기후 표류의 표징은 나타나지 않는다. DCDC는 적분 후 70년에 나타나는데 이때 기온과 강수량의 변화는 각각 1.4°C와 0.07mm/day이다. 후자는 3% 증가에 해당한다. 강수의 변화는 해면에서 더 큰 증가로 나타나지만 증발도 그렇게 증가하기 때문에, 강수와 증발의 차이 곧 지표 가용 수는 해면에서 감소하고 지면에서 증가한 것으로 나타났다.

4. 결론

우리 나라에서 접합 GCM으로 지구 온난화의 미래를 추정하는 것은 저자들의 아는 바로 이 발표에 제시된 것이 세 번째(안중배, 김정우 1998; 김동훈 1999)이다. 특히, 지표 기온과 강수량의 전구 평균 증가에 있어서 이번 결과는 세계 수준의 결과들(IPCC 2000)과 동등하다.

CO₂의 배증 시기에 지면 가용 수가 현재에 비해 증가한다는 이 연구의 결과는 그 사회, 경제적 함의의 중요성에 비추어 앞으로 계속 검토되어야 할 것이다. 특히 이 결과는, 지구 온난화에 따른 사막화에 관한 연구 결과(조민수 등 1998)에 비추어 볼 때, 전구 하천 방출의 증가와 더불어 악기상의 강도 및 빈도의 증가를 암시한다.

사사

이 논문은 환경기술연구개발사업(G7 프로젝트)의 세부과제 “대기대순환 모델에 의한 기후변화 예측기술 개발”의 연구 결과를 활용한 것이다. 김정우는 G7 프로젝트를 지원한 환경부에, 그리고 박지업은 그의 위탁 교육을 지원한 공군과 연세대학교에 각각 감사드린다. 저자들은 이 실험을 위해서 여러 모로 애쓴 이우성 박사, 정일웅 박사, 조민수 박사 및 김동훈 박사에게 심심하게 감사드린다.

참고 문헌



김동훈, 1999: 북서태평양 해역에서의 지구 온난화에 의한 해수면 변동. 성균관대학교 박사학위 논문, 175pp.

안중배, 김정우, 1998: 이산화탄소 점증에 따른 CGCM Tr7W6의 장기 반응 실험: I 기후 변수들의 연평균 변화. 한국기상학회지, 34권 2호, 263-271.

조민수, 김정우, 정일웅, 1998: 지구 온난화에 따른 사막화의 수치 실험. 한국기상학회지, 34권 1호, 65-74.

IPCC, 1995: Climate Change. J. T. Houghton et al., Eds. Cambridge University Press, 577pp.

IPCC, 2000: Climate Change. J. T. Houghton et al., Eds. Cambridge University Press, 준비중.

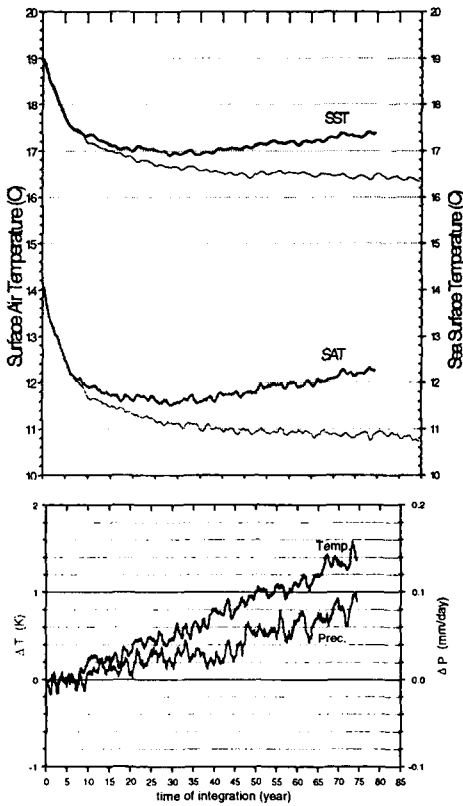


그림 3. 대기중 CO2 농도의 점진적 증가에 따른 지표 기온 및 강수량의 전구 변화

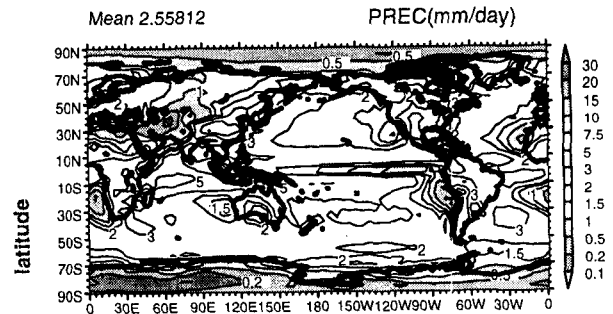
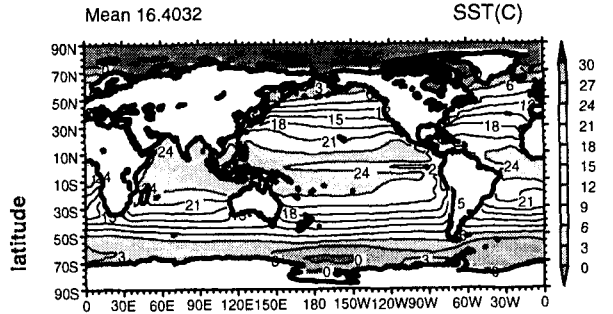


그림 2. 제어 적분에서 적분 후 70년에 나타난 해면 온도 및 강수량의 전구 분포

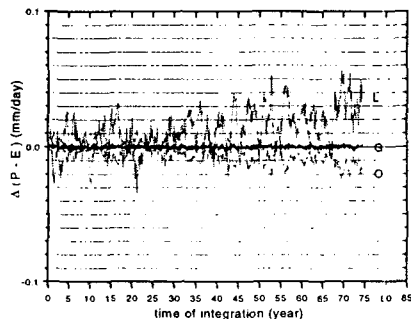


그림 4. 대기중 CO2 농도의 점진적 증가에 따른 지면 가용 수 및 해면 가용 수의 전구 변화