

< 종설 >

Simple Biosphere Model 2 (SiB2)의 생태학적 응용

김 원 식* · 조 재 일¹

서울대학교 기초과학연구원, ¹토쿄대학 토목공학과

적 요: Simple Biosphere model 2(SiB2)는 전지구후모형(global climate model)의 지표면모형으로서 토양-식생-대기 사이의 에너지, 물 및 이산화탄소 교환을 모의한다. 특히 광합성-기공전도 하부모형을 포함하고 있어, 식물군락의 광합성과 기공개폐기작을 근거로 하여 이산화탄소 동화량 및 물의 증산량을 계산한다. 따라서 SiB2 수치실험 결과를 통해, 육상생태계에 있어서의 이산화탄소 순환, 물수지, 그리고 환경과 식물군락간의 상호관계를 분석할 수 있다. 본 종설은 일례로서 개량된 SiB2-Paddy를 이용하여, 다양한 식생 및 토지 이용을 보이는 태국 차오프라야강 유역의 하천유출량 변화에 관한 연구를 소개한다. 이는 SiB2 수치실험결과가 지표면 식생의 차이에 따른 유출량의 변화를 예측 가능하며, 이를 통하여 육상생태계에 있어서 식생이 갖는 기능적인 측면을 연구하는데 적합한 모형임을 알 수 있었다. 그러나 SiB2모형을 이용하여 더욱 정확도 높은 육상생태계 모의를 위해서는 토양호흡, 엽면적지수, 식물군락간 경쟁 그리고 뿌리의 분포를 고려한 토양수분 등을 모의할 수 있는 하부모형의 도입이 필요하다.

검색어: 물수지, 차오프라야강, 토양-식생-대기의 상호작용, SiB2-Paddy, Simple Biosphere model (SiB2)

서 론

지표면 모형(land surface model, LSM)의 하나인 simple biosphere model 2 (SiB2, Sellers et al. 1996a)는 전구 기후모형(global climate model or general circulation model, GCM) 혹은 중규모 기후모형(regional climate model)의 내부에서 지표면의 복사, 운동량, 열 및 물의 움직임을 모의(simulation)한다(Randall et al. 1996). 지표면 모형은 이들 대기모형으로부터 구동입력자료(forcing data)인 하향장파 및 하향단파(downward short- and long- wave radiation), 온도(temperature), 수증기압(vapor pressure), 강수량(precipitation) 및 풍속(wind velocity) 등의 6가지 자료를 일정 시간 간격으로 출력 받아, 지표면에서 일어나는 생리생태학적, 미기상학적 그리고 수문학적 현상을 모의하여 상향장파 및 상향단파(upward short- and long-wave radiation), 현열(sensible heat flux) 및 잠열(latent heat flux) 등의 지표면 에너지 분배 요소로 대기모형의 최하단부인 대기경계층(atmospheric boundary layer)에 모의결과를 전달하는 역할을 담당한다(Garratt 1993, Betts et al. 1996, Pitman et al. 1999). 특히 SiB2 모형은 다른 지표면모형과 구분 지을 수 있는 다음과 같은 특징을 갖고 있다:

- 1) 식생의 동화량(assimilation)량과 증산(transpiration)량을 동시에 모의하는 광합성-기공전도(photosynthesis-conductance) 모형을 사용하고 있다(Sellers et al. 1992 and 1996a).
- 2) 식생의 계절적 추이(phenology)를 나타내는 엽면적지수(leaf area index, LAI)는 인공위성자료가 이용되어진다(Sellers et

al. 1996b).

이러한 특징을 갖고 있는 SiB2는 생물권(biosphere)과 대기권(atmosphere)의 상호작용을 보다 현실적으로 모의하여, 대기경계층내의 미기상학(micrometeorology)적 제반 현상은 물론 식물군락의 생리생태학(physiological ecology)적 현상과 더불어 토양에서의 수문학(hydrology)적 현상까지도 모의 가능하게 되어 지표면에서 일어나는 자연 현상을 포괄적으로 설명 가능하도록 한다. 따라서 SiB2를 사용한 모의결과로부터 식물이 흡수한 이산화탄소(CO₂)의 양과 배출한 물의 양인 증산(transpiration)량을 계산하여 정량화 할 수 있으며(Colello et al. 1998), 토양 표면으로부터의 CO₂ 방출량과 물의 증발(evaporation)량으로부터 생태학적으로 중요한 의미를 가지고 있는 생태계 단위의 순생태계생산량(net ecosystem productivity)과 증발산량(evapotranspiration)을 추정할 수 있게 한다. 나아가서는 이들 값의 정량화 및 분석은 급격한 지구 환경 변화에 따른 식물군락 반응을 예측하고 그 원인을 규명하는데 사용되어진다(Randell et al. 1996, Sellers et al. 1996c, Zhang et al. 1998, Sellers et al. 1997).

한편 SiB2는 전지구후모형의 하위모형이기 때문에 미기상학적 요소는 충실히 모의하나, 생태학적 모의에 관해서는 아직 개선의 여지가 남아 있다. 예를 들면 광합성 모형을 갖고 있음에도 불구하고 엽면적지수를 예측할 수 없다는 것, 토양호흡 및 탄소 순환 모델을 포함하고 있지 않다는 것 그리고 군락간의 경쟁 등의 생태학적으로 중요한 의미를 갖고 있는 현상들을 모의하지 않고 있다는 점들을 들 수가 있다. 따라서 본 종설의 목적은 (1) 지표면 모형 중의 하나인 SiB2 모형을 소개하고, (2) SiB2 모형

* Corresponding author; Phone: 82-2-880-1428, e-mail: wonsik@snu.ac.kr

의 개량 및 모의결과에 대하여 고찰하며, (3) SiB2 모형의 생태학적인 응용을 위한 앞으로의 개선 방향에 관하여 설명하고자 하는 것이다.

본 문

Simple Biosphere model 2의 내부 구조 및 주요 하부모형

Simple Biosphere model 2 (SiB2)는 지표면 모형(land surface model)의 하나로써, 구동을 위한 입력자료(forcing data)로는 대기 경계면에서의 기상자료, 식생의 종류 및 변화추이 그리고 토양의 종류 및 상태에 관한 정보(Sellers *et al.* 1996a)를 필요로 한다. 이러한 입력자료는 다양한 계산과정을 가지고 있는 SiB2 내부의 몇몇 하위모형(submodel)에 전해져, 여러 가지 예단변수(prognostic variables)(Sellers *et al.* 1996a)(Table 1) 및 진단변수(diagnostic variable)가 계산되어지며, 이를 바탕으로 대기-식생-토양의 에너지, H₂O 그리고 CO₂의 순환에 관한 결과(output data)들이 계산되어진다. 구체적으로 중요한 하위모형을 살펴보면, 크게 4가지로 요약할 수 있다.

첫 번째로 광 에너지 전달 하위모형(radiative transfer submodel)이 있다 (식 1). 주어진 식생/토양 자료를 바탕으로 입력 기상자료인 하향 장·단파를 이용하여 식생과 토양의 광 반사율, 흡수율, 투과율로부터 각 알베도 값을 알아내고, 최종적으로 상향 장·단파 및 단파 값을 계산해 낸다. 여기서의 알베도 값은 계절적으로 변하는 식생과 눈이 쌓인 지면환경까지도 고려된 계산과정을 통해서 나온 것으로 더욱 현실성을 갖는다. 이를 바탕으로 모의된 상향 장·단파 플럭스를 통해서 식생/지면 온도와 같은 예단변수를 도출한다. 이는 최종적으로 지표면의 에너지 수지 및 물 순환 예측에 영향을 주게 된다(Sellers 1985, Sellers *et al.* 1996a).

$$R_n = \int_0^{4.0\mu m} \int_0^{\pi/2} F_{(\lambda, \mu)}(1 - \alpha_{\lambda, \mu})d\mu d\lambda - F_{t, d \uparrow} + \epsilon F_{t, d \downarrow} \quad (1)$$

R_n = net radiation, (W m⁻²)

λ = wavelength, (μm)

μ = cosine of angle of incident radiation

$F_{\lambda, \mu}$ = incoming radiation flux, (W m⁻²)

$\alpha_{\lambda, \mu}$ = surface reflectance

$F_{t, d \uparrow}$ = outgoing longwave radiation, (W m⁻²)

$F_{t, d \downarrow}$ = incoming longwave radiation, (W m⁻²)

ϵ = surface absorptivity/emissivity; assumed to be unity

둘째로 물리적 전달저항 하위모형(physical transfer resistance submodel)이 있다. 이것은 대기-식생-토양간의 열에너지 및 물질 이동에 대한 저항값을 계산해 주는 부분으로 플럭스 산출과 수문순환 예측을 위해 중요하다. 크게 난류해석을 통한 대기 저항값, 그리고 식생면과 토양면 요소를 고려한 저항값으로 세분화

될 수 있다. 크기가 다양한 공기 덩이인 에디(eddy)가 상하 방향으로 운동하면서 흐르는 공기의 흐름을 난류(turbulent flow)라고 하는데 이를 통해 연직방향의 운동량, 열 그리고 물질 수송이 이루어진다. SiB2에서는 이를 바탕으로 풍속, 온도 그리고 시간에 독립적인 식생자료(예: 식생높이 및 잎의 빛 투과성)와 시간의존적인 식생자료(예: 엽면적지수 및 광합성 가능 잎의 비율) 등의 정보를 이용하여 식물표면, 지면-식생내부 그리고 식생표면-대기경계층에서의 풍속을 공기 역학적으로 해석하여 각 높이에 따른 열과 물질 흐름의 저항값이 도출된다. 자연 상태에서 대기 경계면(atmospheric boundary-layer) 아래의 일반적 대기의 저항은 다음의 식 (2)(Dorman *et al.* 1989)와 같이 로그 선형 형태를 띠지만, SiB2는 식생형태에 따른 난류 해석을 위해서 대기경계면(z_m)

$$r_{a_n} \approx \frac{1}{u_r} \left[\frac{1}{k} \ln \left(\frac{z_r - d}{z_0} \right) \right]^2 \quad (2)$$

r_{a_n} = aerodynamic resistance under neutral conditions (s m⁻¹)

u_r = wind speed at reference height (m s⁻¹)

k = von Kármán's constant (0.41)

d = zero plane displacement height (m)

아래에 차례로 특별경계층(z_l), 식생수관상부높이(z_2), 군락 내 옆면적의 밀도가 가장 큰 높이(z_c), 식생수관하부높이(z_1)로 경계 지위높음으로서 z_m 과 z_l 사이에서는 식 (2)에서와 같이 일반적인 난류의 흐름에 따르고, z_l 와 z_2 사이의 공기는 식생 거칠기의 영향을 받아 로그 선형에서 von Kármán's 상수인 0.41보다 큰 값을 각각의 높이에서 취하게 된다. z_2 에서 공기 저항(aerodynamic resistance)은 옆면적밀도가 고려된 수관과의 마찰을 반영하여 전단력(shear stress)을 통해 계산되어진다. z_l 과 지면 사이에서의 공기의 흐름은 일반적 난류흐름 식 (2)를 토양종류에 따른 거칠기를 삽입해 변형한 식으로 저항이 구해진다. 이렇게 각 층에서 계산된 난류분석에 따라 대기와 식생 상호간의 에너지, 물, CO₂ 플럭스 모의에 쓰이게 된다(Sellers *et al.* 1986, 1989, 1996a). 이와 같은 난류분석을 통한 대기 저항값 외에도 토양의 거칠기에 따른 토양 저항값(soil resistance)은 토양수분의 지표면 증발에 영향을 주고 결과적으로 증발량을 결정하는 중요한 요인이 된다(Sellers *et al.* 1996a).

셋째로 광합성-기공전도 하위모형(photosynthesis-conductance submodel)이 있다. SiB2가 식물 생리생태학적 모형임을 나타내는 부분으로서 다른 지표면 모형과 구별되는 부분이다. 그 세부모형을 살펴보면 우선, 식물의 광합성 기작으로 인한 잎의 동화량(assimilation; A ; mol m⁻² s⁻¹)을 구하기 위해 루비스코(rubisco)의 생화학적 효소반응(w_c ; mol m⁻² s⁻¹), 광포화점(w_e ; mol m⁻² s⁻¹) 그리고 동화산물의 저장/배출 비율(w_s ; mol m⁻² s⁻¹)등의 세가지 광합성 제한 요소(limiting factor)를 C3/C4로 구분하여 도입하였다 (식 3~6)(Collaz *et al.* 1991, 1992).

Table 1. Governing equation for SiB2 prognostic variables

a. 식생, 토양표면 및 깊은 토양층의 온도 (T_c , T_g , and T_d)

식생층 : $C_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = Rn_c - H_c - \lambda E_c - \xi_{cs}$

토양표면층 : $C_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = Rn_g - H_g - \lambda E_g - \frac{2\pi C_d}{\tau_d} (T_g - T_d) - \xi_{cs}$

깊은 토양층 : $C_d \frac{\partial T_d}{\partial t} = \frac{1}{2(365\pi)^{1/2}} (Rn_g - H_g - \lambda E_g)$

T = 온도 (K) Rn = 흡수된 순 복사 (Wm^{-2})
 H = 현열 플럭스 (Wm^{-2}) E = 증발산량 ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)
 C = 열용량 ($J\ m^{-2}\ K^{-1}$) λ = 증발 잠열 ($J\ kg^{-1}$)
 τ_d = 하루길이 (s) ξ = 물의 상태변화에 따른 에너지 요구량 ($W\ m^{-2}$)

아래첨자 "c"는 식생(canopy), "g"는 토양표면(soil surface), "d"는 깊은 토양층(deep soil)을 나타낸다.

b. 강우 차단 저장량

식생 : $\frac{\partial M_{cws}}{\partial t} = P - D_d - D_c - E_{ci} / \rho_w$

토양표면: $\frac{\partial M_{gws}}{\partial t} = D_d + D_c - E_{gi} / \rho_w$

M_{cws} , M_{gws} = 근략내부 혹은 토양표면에 존재하는 물 또는 눈(얼음)의 양 (m)
 P = 강우량 ($m\ s^{-1}$); $P_c + P_i$
 D_d = 식생을 통과하는 강우 ($m\ s^{-1}$) D_c = 식생의 수분 유출량 ($m\ s^{-1}$)
 E_i = 차단 저장량의 증발 ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$) ρ_w = 물의 밀도 ($kg\ m^{-3}$)

c. 토양수분 저장량

토양표면층 : $\frac{\partial W_1}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_1} [P_{W_1} - Q_{1,2} - \frac{1}{\rho_w} E_{gs}]$

근권층 : $\frac{\partial W_2}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_2} [Q_{1,2} - Q_{2,3} - \frac{1}{\rho_w} E_{ct}]$

깊은 토양층 : $\frac{\partial W_3}{\partial t} = \frac{1}{\theta_s D_3} [Q_{2,3} - Q_3]$

W_1 , W_2 , W_3 = 각 층 토양 수분(1:surface layer, 2:root zone, 3: deep soil layer); θ_i / θ_s
 θ_i = 각 토양 층의 토양수분 체적 ($m^3\ m^{-3}$) θ_s = 포화 토양수분에서의 체적 ($m^3\ m^{-3}$)
 D_i = 각 토양 층의 두께 (m) $Q_{i,i+1}$ = i 층과 $i+1$ 층 사이의 물 흐름 ($m\ s^{-1}$)
 Q_3 = 중력에 의해 유출되는 물의 양 ($m\ s^{-1}$)
 P_{W_1} = 상층의 토양수분으로 침투되는 강우량 ($m\ s^{-1}$); $D_c + D_d - R_{O_1}$
 R_{O_1} = 초과 유출량 ($m\ s^{-1}$)

d. 식생의 기공 수분 전도성

식생 : $\frac{\partial g_c}{\partial t} = -k_g (g_c - g_{c_{inf}})$

g_c = 식생 기공 전도도 ($m\ s^{-1}$) k_g = 시간 상수 (s^{-1})
 $g_{c_{inf}}$ = $t \rightarrow \infty$ 때, g_c 의 값 ($m\ s^{-1}$)

$$A \leq \text{Min}(w_c, w_e, w_s) \quad (3)$$

$$w_c = V_m \left[\frac{c_i - \Gamma^*}{c_i + K_c(1 + O_2/K_o)} \right], \text{ for C3} \\ = V_m, \text{ for C4} \quad (4)$$

V_m = maximum catalytic capacity of Rubisco ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

c_i = partial pressure of CO_2 in leaf interior (Pa)

O_2 = partial pressure of O_2 in leaf interior (Pa)

Γ^* = CO_2 compensation point (Pa) = $0.5 O_2/S$

S = Rubisco specificity for CO_2 relative to O_2

K_c = Michaelis-Menten constant for CO_2 (Pa)

K_o = inhibition constant for O_2 (Pa)

$$w_e = (F_\pi \cdot n) \varepsilon_3 (1 - w_\pi) \left[\frac{c_i - \Gamma^*}{c_i + 2\Gamma^*} \right], \text{ for C3}$$

$$= (F_\pi \cdot n) \varepsilon_4 (1 - w_\pi), \text{ for C4} \quad (5)$$

F_π = (vector) flux of PAR incident on the leaf (W m^{-2})

n = vector of leaf normal

$\varepsilon_{3,4}$ = intrinsic quantum efficiency for CO_2 uptake for C3, C4 photosynthesis (mol mol^{-1} or mol)

w_π = leaf-scattering coefficient for PAR ($w_\pi \approx w_V$)

$$w_s = V_m/2, \text{ for C3}$$

$$= 2 \times 10^4 V_m c_i / p, \text{ for C4} \quad (6)$$

p = atmospheric pressure (Pa)

하나의 수관에 속한 잎일지라도 높이에 따른 빛의 수광량이 다르기 때문에 식생의 높이에 따른 잎의 광합성 능력의 차이가 나게 된다. 그러나 SiB2에서는 잎의 위치에 따른 루비스코 효소의 최대 활성은 식 (7)과 같이 일률적으로 사용되어지고, 입사된 광합성유효복사량 (photosynthetically active radiation, PAR)에 대해서 식생 내 잎들이 균등하게 흡수한다고 가정하여 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$V_{\max L} = V_{\max 0} e^{-\bar{k}L} \quad (7)$$

$V_{\max 0}, V_{\max L}$ = values of leaf V_{\max} at the top of the canopy, (0), and under a LAI L , respectively ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

\bar{k} = time-mean(radiation-weighted) extinction coefficient for PAR

$$F_\pi \cdot n \approx F_{\pi 0} \left[\frac{G(\mu)}{\mu} \right] e^{-\bar{k}L} \quad (8)$$

$F_{\pi 0}$ = incident PAR flux (W m^{-2})

$G(\mu)$ = projection of leaves in direction of incoming radiation flux (♣)

식 (7)을 w_c 의 식 (4)와 w_s 의 식 (6)에, 식 (8)을 w_e 의 식 (5)에 대입하게 되면 $e^{-\bar{k}L}$ 을 통해서 w_c, w_e 그리고 w_s 가 동시에 계산됨으로 식생 전체를 하나의 큰 잎의 개념(Big leaf model)으로 설정된 광합성 기작을 SiB2에서는 사용하고 있음을 알 수가 있다. 이를 통하여 식생의 동화량(A_c ; GPP)이 구해지며 (식 9) (Sellers 1985, 1987), 또한 식 (10)을 통해 식생 기공저항 (canopy stomatal resistance(r_c); conductance(g_c)= $1/r_c$)을 구하게 된다(Ball 1988).

$$A_c = A_{n_0} \int_0^{\tau/V} VN e^{-\bar{k}L} dL = A_{n_0} \Pi \quad (9)$$

$A_{n_0} = f_c(V_{\max 0}, \dots), f_e(F_{\pi 0}, \dots), f_s(V_{\max 0}, \dots)$
= Net assimilation rate (A_n) for leaves at the top of the canopy ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

V = canopy cover fraction ($V < 1$)

N = canopy greenness fraction ($N < 1$)

$$\Pi = \frac{VN(1 - e^{-\bar{k}L\tau/V})}{k}$$

$$\Pi \approx FPAR / \bar{k}$$

$$g_c = m \frac{A_c}{c_s} h_s p + bL_T \quad (10)$$

g_c = leaf stomatal conductance ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

m = empirical coefficient from observations,

= 9 for C3 vegetation

= 4 for C4 vegetation

b = empirical coefficient from observations ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

= 0.01 for C3 vegetation

= 0.04 for C4 vegetation

h_s = relative humidity at leaf surface

c_s = CO_2 partial pressure at leaf surface (Pa)

p = atmospheric pressure (Pa)

이러한 과정은 최종적으로 식생과 대기간의 물질순환인 수증기(식 11)와 이산화탄소 플럭스(식 12)를 알 수 있게 한다. 즉 광합성과정을 위해 흡수하는 이산화탄소와 호흡으로 인해 배출되는 이산화탄소의 양을 계산(식 12) 함으로 식생의 순동화량(net assimilation rate; A_n)을 도출하며, 식생 기공저항 값을 바탕으로 식물 증산(transpiration)을 보다 정확하게 모의하게 된다(식 11) (Sellers *et al.* 1996a).

$$\lambda E_{ct} = \left[\frac{e^*(T_c) - e_a}{1/g_c + 2r_b} \right] \frac{\rho c_p}{\gamma} (1 - W_c) \quad (11)$$

$e^*(T_c)$ = saturated vapor pressure at temperature T_c (Pa)
 e_a = canopy air space vapor pressure (Pa)
 ρ, c_p = density specific heat of air, respectively (kg m^{-3} , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

$$A_n = A - R_d \tag{12}$$

R_d = leaf respiration rate ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

$$R_d = f_d V_m \tag{13}$$

$f_d = 0.015$ for C3
 $= 0.025$ for C4

넷째로 각 플럭스 산출 하위모형이 있다. 온도, 수증기압 그리고 CO_2 분압의 차이(potential difference)를 앞에서 언급된 물리

적 전달저항 하위모형과 광합성-기공전도 하위모형에서 계산된 각각의 저항값으로 나눔으로써 열, H_2O 그리고 CO_2 의 플럭스 값을 얻게 된다(식 14, Table 2).

$$\text{Flux} = \frac{\text{Potential difference}}{\text{Resistance}} \tag{14}$$

이러한 플럭스 산출 하위모형은 토양-식생-대기에서의 에너지 균형(energy balance)에 근거하여 열의 이동을 계산하게 된다 (table 1). 즉, 입력된 태양에너지가 대기와 식생을 데우는 현열(sensible heat), 물의 증발산에 관계되는 잠열(latent heat) 그리고 지면의 에너지량에 관계하는 지중열(ground heat)로 나뉜다. 여기서 잠열이 나타내는 증발산량(evapotranspiration)은 유출량(runoff)과 더불어 지표면 수문수지(water balance) 해석에 중요한 자료를 제공하게 되며, CO_2 플럭스는 생태계의 이산화탄소 순환을 이해하는데 도움을 준다.

Table 2. Fluxes, potential differences, and resistances associated with SiB2

Flux	Potential difference	Resistance
H_c	$(T_c - T_a)\rho c_p$	r_b
H_g	$(T_g - T_a)\rho c_p$	r_d
$H_c + H_g$	$(T_a - T_m)\rho c_p$	r_a
λE_{ct}	$(e^*(T_c) - e_a)\rho c_p / \gamma$	$(r_a + 2r_b) / (1 - W_c)$
λE_{ci}	$(e^*(T_c) - e_a)\rho c_p / \gamma$	$2r_b / W_c$
λE_{gs}	$(h_{soil} e^*(T_g) - e_a)\rho c_p / \gamma$	$(r_{soil} + r_d) / (1 - W_g)$
λE_{gi}	$(e^*(T_g) - e_a)\rho c_p / \gamma$	r_d / W_g
$\lambda E_{ct} + \lambda E_{ci} + \lambda E_{gs} + \lambda E_{gi}$	$(e_a - e_m)\rho c_p / \gamma$	r_a
$A_c - R_D$	$(c_a - c_l) / p$	$1 \cdot 6r_c + 2 \cdot 8r_b$
R_{soil}	$(c_{soil} - c_a) / p$	$1 \cdot 4r_d$
$A_c - R_D - R_{soil}$	$(c_m - c_a) / p$	$1 \cdot 4r_a$

T_a, e_a = CAS(canopy air space)에서의 대기 온도 및 수증기압 (K, Pa)

ρ, c_p = 공기의 밀도 및 비열 (kg m^{-3} , $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)

γ = 습공기선 상수(psychrometric constant) (Pa K^{-1})

r_b = 식물 표면의 저항 공기층 (s m^{-1})

r_d = 지면과 CAS 사이의 공기역학적 저항 (s m^{-1})

r_a = CAS와 균락 상부 사이의 공기역학적 저항 (s m^{-1})

r_c = 수관 외부 위의 기공 저항 (s m^{-1})

r_{soil} = 아무것도 덮혀 있지 않은 토양표면의 저항 (s m^{-1})

h_{soil} = 토양표면의 공극 내 상대습도

$e^*(T)$ = 온도 T에서의 포화수증기압 (Pa)

W_c = 물-눈으로 덮혀 있는 수관 부분

W_g = 물-눈으로 덮혀 있는 토양 부분

R_{soil} = 토양 호흡 ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

c_m = 수관 상층에서의 CO_2 분압 (Pa)

c_a = CAS에서의 CO_2 분압 (Pa)

c_l = c_i (옆육 내의 CO_2 분압)에 대한 식물 표면에서의 분압 (Pa)

c_{soil} = 토양표면에서의 CO_2 분압(Pa)

p = 대기압 (Pa)

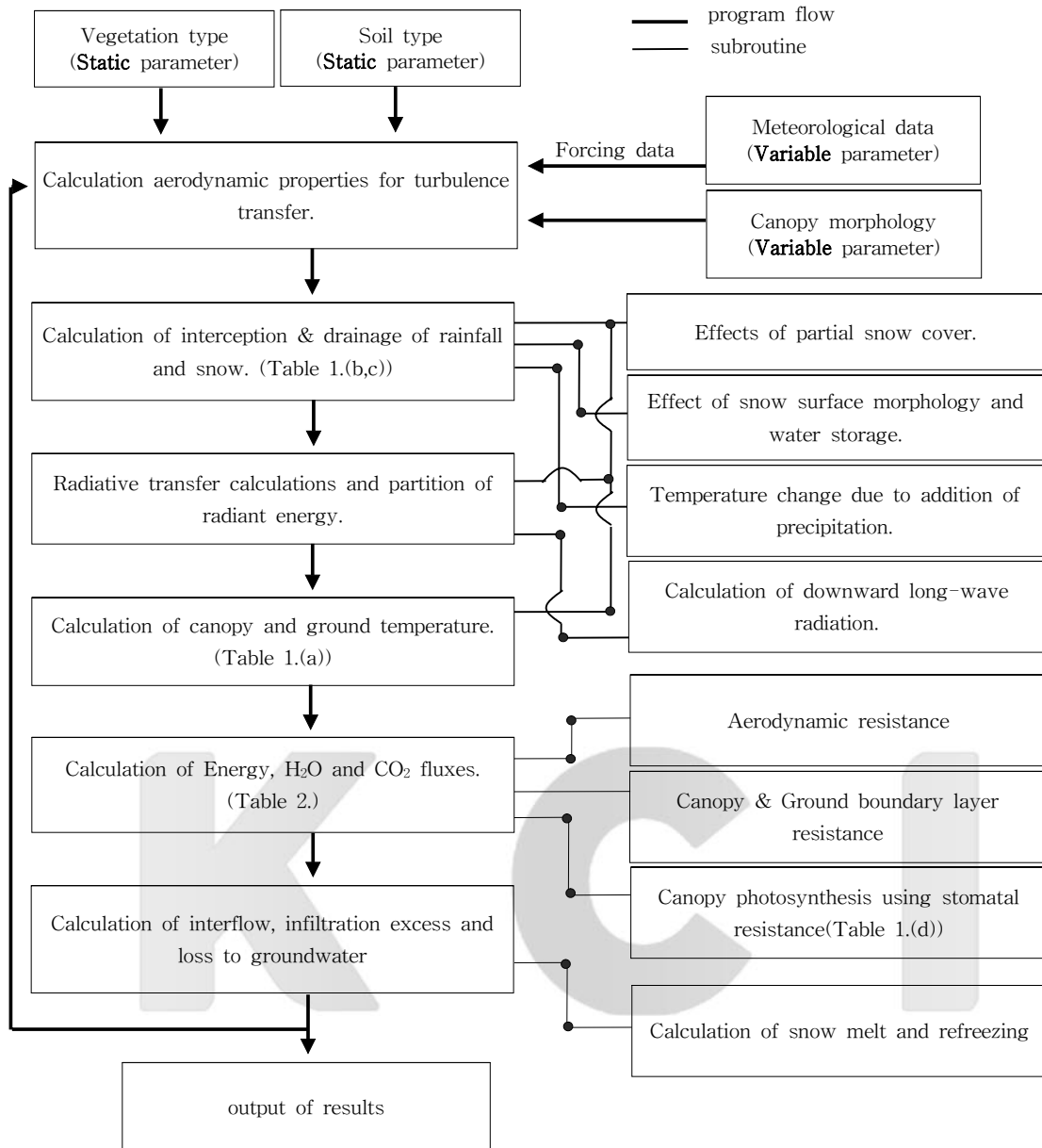


Fig. 1. The brief chart about SiB2(simple biosphere model2) running flow.

지금까지 설명된 각각의 하부모형은 Fig. 1과 같은 순서로 SiB2 내부에서 계산되어지게 된다.

SiB2에의 논 모형 적용

아시아지역에서 일반적으로 볼 수 있는 경작지 유형인 논을 SiB2에서 모의할 경우, 경작지/C3식물초원(agriculture and C3 grassland)의 식물기능유형(plant functional type)으로 분류하여 모의하게 된다. 그러나 미기상학적 관측을 통하여 논의 지표면 에너지수지(energy balance)를 살펴보면, 벼의 재배양식의 특성이라고 할 수 있는 논물이 존재하게 되며, 이에 따라 다른 식피유형(land cover type)과 확연한 차이가 있음을 예상할 수 있다 (Tsuka-

moto 1993, Aoki *et al.* 1998, Luo and Goudriaan 1999). 한 예로서 태국의 자연관계방식 논에서 얻은 결과를 중심으로 하여 논의 지표면 에너지수지 특성, 논의 모수화 그리고 논모형의 모의결과 및 응용에 관하여 설명하기로 한다.

Fig. 2는 논에서의 관측된 에너지 수지 및 SiB2를 이용한 모의결과와의 차이점을 나타내고 있다. 관측은 미기상학적 플럭스 관측방법의 하나인 폐쇄형(close path) 와공분산방법(eddy covariance technique)을 이용하였으며, 모의에 사용된 지표면모형은 SiB2이며, 구동입력자료는 관측값과 동일시기와 장소에서 얻어진 자료를 사용하였다. 모형 구동을 위한 예단변수의 초기치 자료는 관측을 통하여 얻어진 자료를 사용하였으며, 모의에 필요

한 각각의 모수들은 SiB2 기존의 경작지/C3식물초원유형 자료를 입력하였다. 또한 엽면적지수는 관측된 값인 2.0을 모의기간 동안 고정하여 사용하였다.

모의된 잠열플럭스는 관측에 비해 그 증가속도 빠르고 일중 최대치 또한 100 Wm^{-2} 정도 크며, 이에 도달하는 시간 또한 빠르게 나타남을 알 수가 있었다. 현열과 지중열류량 또한 관측값에 비하여 2배 정도 과대평가되었으며, 눈물은 모수화 되어 있지 않았기 때문에 그의 열저류량은 모의되지 않았다. 이와 같은 차이는 Fig. 2에서 보는 바와 같이, 눈물의 열저류량의 변화가 오전에는 열의 흡원으로서, 오후에는 열의 발원으로서 작용하며 그 변화 정도는 500 Wm^{-2} 까지 이르는 것이 원인이라고 할 수 있다. 즉 대상지역의 눈물의 깊이는 30 cm로 그 열 용량이 큰 것에 따라 에너지 수지의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 차이는 지표면 모형의 정확도에 문제가 있으며, 기후모델의 예측결과에 대한 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 Fig. 3과 같이 눈물을 모수화하여 SiB2-Paddy를 개발하였다(Kim *et al.* 2001). 지면 위에 물층을 두었으며, 모든 에너지의 교환은 이 표면에서 이루어지도록 하였다. 개발된 모형의 모사 결과는 Fig. 2와 같이 관측된 에너지수지와 잘 일치하는

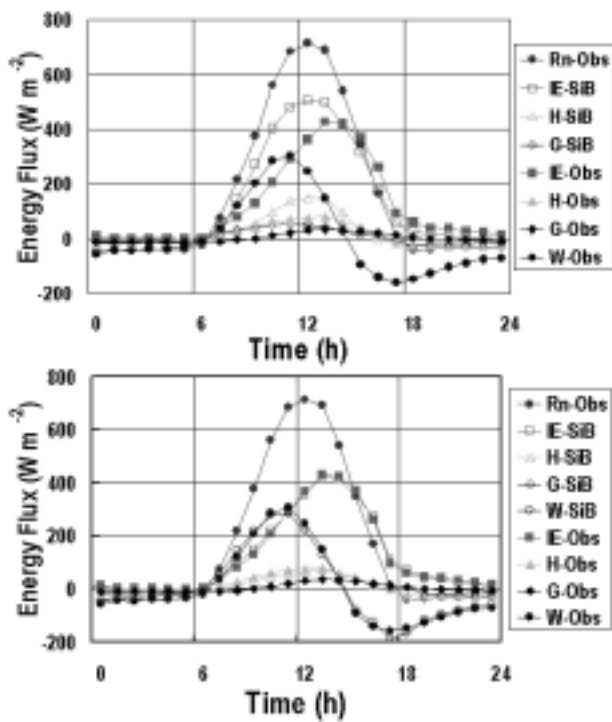


Fig. 2. Comparison of simulated and measured energy fluxes for July 15-17, 1999 in Sukhothai paddy field, Thailand. The upper and the lower plates result in the original SiB2 and the SiB2-Paddy simulations, respectively. (Rn: net radiation, IE: latent heat flux, H: sensible heat flux, G: soil heat flux, W: paddy water heat storage, Obs: observation, SiB: simple biosphere simulation result)

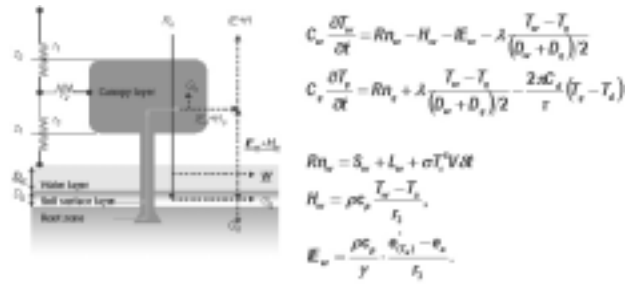


Fig. 3. Transfer pathways as conceptualized and parameterization in SiB2-Paddy.

결과를 얻을 수가 있었다. 개발된 SiB2-paddy를 적용한 예로서 차오프라야(Chaophraya)강 유역의 하천 유량의 변화를 해석한 결과를 소개한다.

차오프라야강 유역은 태국의 중서부의 대부분을 차지하고 있으며, 건기와 우기의 차이가 확실하다는 것이 이 지역 기후의 특징이라고 할 수 있다. 우기와 건기의 구분은 아시아 몬순의 활동이 활발한 시기를 우기라 하여 5월부터 11월까지의 기간을 말하며, 연강수량의 90% 정도가 이 시기에 집중적으로 내린다. 또한 건기는 해마다 약간의 차이는 있으나 아시아 몬순활동이 정지한 상태로 12월부터 이듬해 4월까지를 말하며, 저온 혹은 고온 건조한 시기를 말한다. 이 지역의 연강수량은 연간 약 1,200 mm로 이 양의 80% 정도는 증발산에 의하여 대기로 돌아가며, 나머지 20% 정도는 하천을 통하여 바다로 유출되게 된다. 따라서 하천 유량의 변화는 강수량과 증발산량의 변화에 크게 영향을 받을 수 있다. 그러나 본 연구지역에 있어서의 강수량의 변화는 크게 없음에도 불구하고 1970년대 후반부터 이 유역의 하천유출량은 지속적으로 감소되고 있는 것을 알 수가 있다(Fig. 4). 그 원인은 증발산의 증가일 가능성이 높으나 어떠한 메커니즘에 의하여 증발산이 증가되었는가 하는 것에 관해서는 아직 알려진 바 없다. 이 논문에서는 이 유역의 지표면 변화가 그 원인을 제공했다는 가정 하에 SiB2를 이용하여 다음과 같은 수치실험을 실시하였다. 수치 실험에 사용한 모형구동입력자료 및 모수

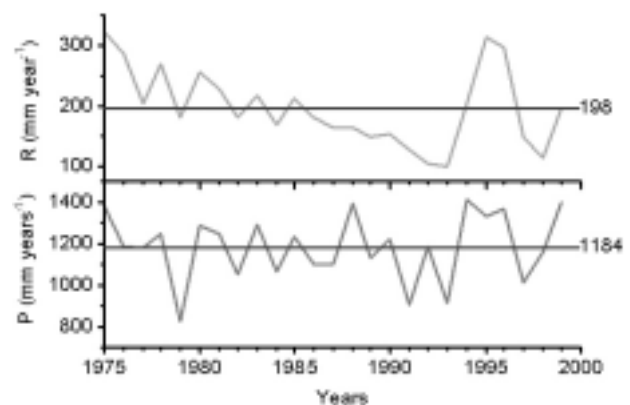


Fig. 4. Annual mean trend of Runoff(R) and Precipitation(P) in Chao Phraya river basin in Thailand during 1975 to 1999.

자료는 ISLSCP I(The International Satellite Land Surface Climatology Project I)자료를 이용하였다. 모의는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 지표면의 식생종류를 변화시켜 총 4종류의 모의를 실시하였다. 1987년 1월 1일부터 1988년 12월 31일까지 2년간에 걸쳐 모의 결과는 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 또한 하천 유량의 검증 위하여 사용한 차오플라야강의 자료는 나콘사완(Nakhonsawa) 측정지의 자료를 이용하였다.

관측된 하천 유출량(1987년과 1988년의 평균치)과 모의 결과를 비교하여 보면 오차범위를 고려할 경우 기준(control)모의와 차이가 없음을 알 수가 있다(Fig. 6). 또한, 이 지역에서 배출된 물의 총량은 1,224 mm로, 입력된 물의 총량인 연강수량은 1,225 mm와 차이가 없었다. 따라서 SiB2를 이용한 수치실험은 이 지역의 하천유출량의 판단에 유효하다고 할 수 있다. 강우로 입력된 물은 증산(36%), 차단증발(22%) 및 증발(29%)에 의하여 대기로 돌아가며 나머지 13%만이 하천으로 유출되는 결과였다. 이 기간동안 우기와 건기로 나누어 볼 때, 증산을 제외한 각 요소의 90% 정도가 우기에 집중되어 물이 소비되는 것을 알 수가 있다(Fig. 6). 증산의 경우는 건기와 우기의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 원인으로서는 건기 초기에는 우기에 내린 비로 인하여 식물이 생육하기에 충분한 토양수분을 유지하고 있으며, 더불어 일사조건 또한 양호하여 우기보다는 짧은 기간이기는 하나 집

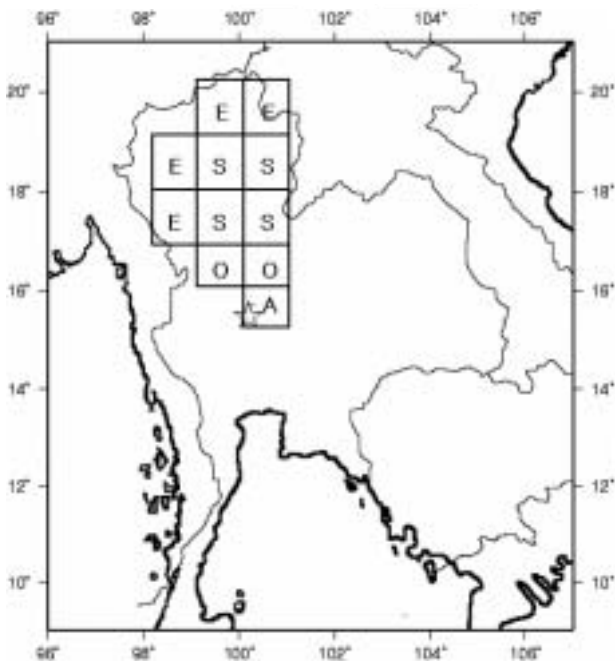


Fig. 5. The classification of actual vegetation types and the location of experimental grids for the simulation studies published by ISLSCP I data set. Star indicate the location of Nakhonsawan catchments (15.8N 100.2E) in Chaophraya river basin. (E: broadleaf evergreen trees, S: short vegetation and C4 grassland, A: agriculture and C3 grassland, O: land use/cover changing area)

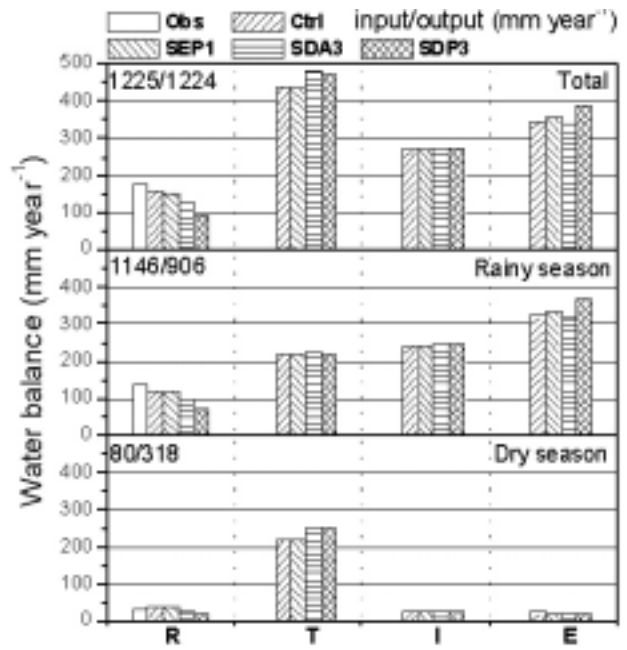


Fig. 6. Comparison of water flux between dry and rainy seasons in Chaophraya river basin. (R: runoff, T: transpiration, I: interception loss, E: evaporation), (Ctrl: control simulation, SEP1: four S, E and one P vegetation type, SDA3: four S, D and tree A vegetation type, SDP3: four S, D and tree P vegetation type)(abbreviations refer to Fig. 5)

중적으로 식물의 생육활동이 이루어진 결과라 할 수 있다. 한편 우기에 있어서는 강우로 인하여 토양 수분이 충분하기는 하나 일사조건이 갖은 강우로 인하여 충분하지 않아 건기 초기의 기간과 비교하여 생육 가능기간이 두 배 이상이기는 하나 증산이 차이가 없는 원인의 하나로 꼽을 수가 있다고 사료된다. 건기 후기에 접어들면 토양수분의 감소로 인하여 더 이상 식물이 이용할 수 있는 물이 토양에 존재하고 있지 않게 되고, 이로 인하여 생육활동을 더 이상 지속할 수 없게 되어 낙엽기에 접어들게 된다고 할 수 있다. 차단 증발에 있어서 차이가 없는 것은 엽면적 지수에 있어서 차이가 없음을 나타내는 것이다.

하천 유량은 지표면의 자연식생 면적이 농경지로 전환되었을 경우 즉 농경지 면적이 증가되었을 경우 및 농경지의 재배 형태가 밭작물이 아닌 논으로 변화되었을 경우 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 증산의 증가는 경작지의 증가에 그 원인이 있는 것이고, 증발의 증가는 그 원인이 논 면적의 증가에 기인한 결과이다. 계절별로 보았을 경우는 우기에는 경작형태의 차이가 증발량을 증가시켰으며, 건기에는 경작지의 증가가 증산에 영향을 미치게 된다. 지표면 변화 즉 경작형태의 변화와 면적의 증가는 증산과 증발을 증가시켰으므로 결과적으로 하천 유량의 감소를 유도하게 된다는 결론에 이른다. 여기서 주의하여 할 사실은 지표면의 형태가 상록활엽수림에서 낙엽활엽수림으로 변화된 것에 따른 차이가 아니라 경작형태가 밭작물에서 논작물의 전

환이 하천유량 감소의 원인이며, 또한, 식생 면적 즉, 관목/C4 초원의 식생지가 농경지화 되어, C4 식물에 비하여 물이용 효율이 낮은 작물을 재배함에 따른 증산량의 증가가 하천 유량의 변화에 영향을 미치게 된 것이라고 추론할 수 있다.

식물군락별 연간 물수지의 차이를 살펴보면(Fig. 7) 상록활엽수림과 낙엽활엽수림 경우, 입력된 강수에 따른 출력된 물의 성분별 차이는 나타나지 않았다. 그러나 하천유출량의 경우 낙엽활엽수가 우기후기에 집중적으로 나타나는 것을 알 수가 있었으며, 그 원인으로서 토양심도가 낮아진 결과가 그 원인으로 나타났다. 일반경작지와 논 의 경우 현저한 물 배분의 차이를 나타냈다. 특히 논 의 경우 증발량의 증가가 현저하게 나타났으며, 이로 인하여 하천 유출량의 감소 원인으로서 작용하게 되었다. 결과적으로 이 지역에 있어서의 하천 유량의 감소는 이 지역의 토지이용 변화에 따른 증발산량의 증가가 그 원인임을 알 수가 있었다.

식물생태학적 모의를 위한 SiB2의 개선 방향

SiB2는 여러 종류의 지구 기후모형이나 중규모 기후모형들의 지표면 하위모형으로서 사용되고 있으며, 지표면에서 일어나는 여러 가지 미기상학적 현상을 모의하는 역할을 담당하고 있다. 이 지표면 모형은 많은 관련 연구자에 의하여 그 성능이 검증되었으며, 또한 부분적으로 나타난 문제점들이 보완되어 왔고, 보완되고 있는 중에 있다. 따라서 현재 많은 지구 기후모형 또는 중규모 기후모형 안에 도입되어 사용되고 있는 지표면 모형들 가운데에서 그 성능과 신빙성이 높다고 할 수 있다. 물론, 일반적인 지표면 모형과 비교하여 많은 모수가 필요하며, 전문적인 상위모형과 접합하여 수치실험을 수행할 경우, 계산기에 많은 부

하가 걸린다는 단점 또한 갖고 있어 사용에 있어 연구목적을 충분히 고려하여 사용되어야 할 것으로 생각된다. 필자로서는 식물생태학적 견지에서 식물군락의 기능과 그 역할에 관하여 초점을 맞추어 연구를 수행할 경우에는 다른 모형보다 탁월한 성능을 갖고 있다고 판단된다. 특히, 이전 지표면 모형에서 고려되지 않았던 생물학적 요소의 하나인 식물의 기공전도도의 중요성을 인식하고 이를 모형화 하여 모의에 적용함에 따라 지구 기후모형과 중규모 기후모형의 예보 정확도 향상에 기여했다는 것이 최근에 얻어낸 괄목할 만한 성과 중에 하나이다. 현재 식물생리생태학적 모의를 위하여 SiB2 모형이 보완 및 수정되어야 할 부분이 있다고 생각되며, 이러한 부분 가운데 필자가 중요하다고 생각하는 부분을 이하에 정리하고자 한다.

SiB2는 군락의 CO₂ 순동화량 (net assimilation rate, *A_n*)을 모의하고 있으며 순생태계생산량(net ecosystem productivity, NEP)을 평가하기 위해서는 식물호흡(plant respiration, *R_p*)량과 토양호흡(soil respiration, *R_s*)량을 평가하는 모형의 도입이 필수적이다. *R_s* 모형의 도입에 있어 주의를 기울여야 할 점은 군락의 *R_p*을 모의할 경우, *R_s*를 어떻게 처리할 것인가를 충분히 고려하여야 한다. 즉 대부분의 *R_s* 모형은 뿌리호흡(root respiration, *R_r*)과 미생물호흡(microbial respiration, *R_m*)을 포함한 값이 평가됨으로, 군락의 NEP를 평가하기 위해서는 GPP에서 상기한 *R_s*값과 *R_p*-*R_r*값을 제외시켜야 한다. 또한, 군락의 순일차생산량(net primary productivity, NPP)을 사용함에 있어서도 주의를 기울여야 한다. 즉, 군락의 NPP를 평가하기 위하여 GPP에서 *R_p*를 제외시켜 얻을 수 있으나, NEP를 평가하기 위해서는 토양호흡의 모의에서 *R_r*을 제외시킬 필요가 있다는 점에 주의를 기울여야 할 것이다. 상술한 내용은 식 15~17을 근거로 한다.

$$NEP = GPP - (R_l + R_t + R_r + R_m) = NPP - R_m \quad (15)$$

$$R_p = R_l + R_t + R_r \quad (16)$$

$$R_s = R_r + R_m \quad (17)$$

층별 토양수분은 토양의 공극율에 영향을 받으며, 토양수분의 토중이동은 침투계수에 의하여 좌우되며, 이를 모수화하여 토양수분량을 모의하게 된다. 이때, 식물은 토양에 존재하는 물을 뿌리를 통하여 흡수하여 증산작용을 통하여 대기 중에 방출하게 되는데, 이러한 기작은 지표면의 에너지 분배과정에서 잠열에 배분되는 양을 증가시키게 된다. 따라서 식물의 존재에 따른 잠열의 증가는 지표면의 에너지 분배에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 이에 따른 토양수분의 변화는 지표면의 에너지수지에 큰 영향을 미치게 된다. 이 현상은 식물뿌리의 분포에 의하여 지배된다고 할 수 있으며, 토심에 따른 뿌리분포를 고려하여 토양수분의 층별 모의가 가능하게 된다면 보다 정도 높은 증산과 토양수분의 모의가 가능하게 됨에 따라 지표면모형의 정도 향상에 크게 기여할 것으로 생각된다. 또한 식물생태학적으로는 식물의 물이용에 관한 정량적 및 정성적 평가가 가능하게 될 것

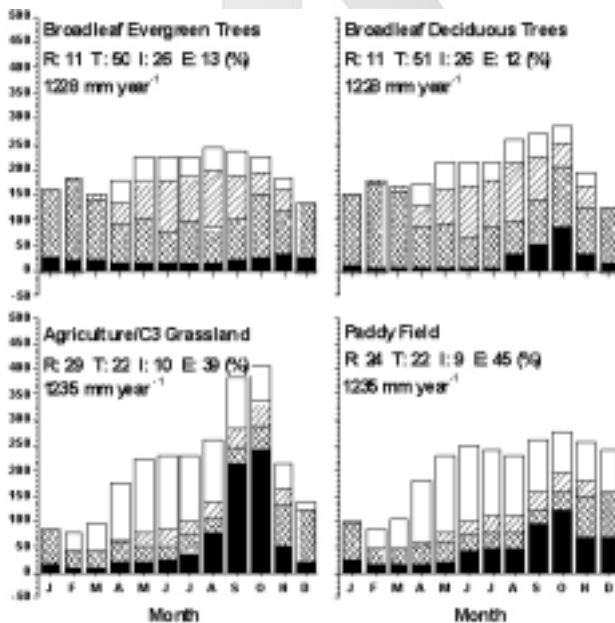


Fig. 7. Simulation result of monthly variation of surface water flux components due to vegetation types. (abbreviations refer to Fig. 6)

으로 기대된다.

SiB2의 모의결과에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중에 하나로 서 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 들 수가 있으며, 이 LAI는 인공위성의 NDVI(The Normalized Difference Vegetation Index)로부터 계산되어 얻게 된다. 관측에 사용되는 빛의 파장영역의 특성상, 구름의 영향으로 우기의 NDVI는 정확히 값을 얻기가 힘이 들며, 이에 따라 LAI의 평가에 가장 중요한 시기인 잎의 전개 시기 및 낙엽시기의 자료를 구할 수 없게 되는 경우가 많다. 따라서 이 LAI를 이용하여 지표면 에너지를 평가할 경우 이들 중요한 시기들의 모의 정확도가 떨어지게 된다. 따라서 이 LAI를 광합성 모의를 통하여 진단변수로서 예보할 수 있도록 하여 보다 높은 정도 및 시간분해능을 가질 수 있게 할 필요가 있으며, 이러한 LAI의 계절적 변화는 식물생태학적으로 큰 의미를 갖고 있으며, 식물군락의 형성 및 안정에 큰 영향을 미치는 중요한 요인으로서 작용하게 된다. 현재 LAI를 모의하기 위하여 문제가 되는 것은 출엽기와 과 낙엽기를 모의하기가 쉽지 않다는 사실이다. 현재 여러 가지 방법이 알려져 있기는 하나 개선의 여지가 많이 남아 있으며, 이를 결정하는 요인 또한 정확히 알려져 있지 않다고 할 수 있다.

최근 지구 온난화에 따른 많은 문제점들이 제시되고 있으며 그 심각성 또한 강조되고 있다. 그 원인 중에 하나로서 이산화탄소의 대기농도 증가가 중요한 요인으로서 꼽히고 있다. 이와 같은 문제점 제거에 따라, 지구생태계의 탄소순환에 관한 관심도가 높아지고 있으며, 이를 모의하고 평가하기 위한 연구가 다방면에서 이루어지고 있다. SiB2에 있어서도 탄소순환모형을 포함 시킴으로써 생태계모형으로서의 위치를 확보함과 동시에, 상위모형과의 접합을 통하여 미래 보다 정확한 미래 예측이 가능하게 된다고 할 수 있다. 이는 단순한 탄소 순환모형의 단계를 넘어서 기후 변화에 따른 탄소순환의 변화를 예측함과 동시에 대기와의 상호작용을 통한 결과라는 면에서 그 중요성이 강조되고 있다.

마지막으로 군락간의 경쟁모형의 도입에 관한 것으로, 이 모형의 도입은 환경변화에 따른 지표면 식생의 변화를 예측할 수 있게 된다. 이는 두 가지 측면에서 그 중요성을 식물생태학적으로 인정할 수 있는데, 그 첫째가 지표면 식생 변화에 따른 자연환경의 변화를 예측할 수 있어 식물군락의 기능적 중요성에 관하여 평가할 수 있다는 측면이며, 두 번째로서는 지표면 식물군락의 상호관계를 기후변화와 연관하여 보다 구체적으로 이해할 수 있는 자료를 제공할 것으로 사료된다. 이러한 모형의 도입은 생태학적 측면에서 보다 과학적인 자료를 제공함으로써 예측에 대한 보편 타당성을 보다 확실히 이해하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

참고적으로 이러한 모형 연구는 기초자료의 관측이 필수라고 생각되고 특히 미기상학적 연구자료 즉 와공분산방법을 통한 각종 에너지 및 이산화탄소의 플럭스자료의 축적을 통한 지표면모형의 검증 및 개발을 통하여 보다 효과적이고도 진보적인 연구가 진행될 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-1-1, 2-2-1) 및 환경부 차세대 핵심환경기술 개발사업에 의해 수행되었습니다.

인용문헌

- Aoki, M., T. Chimura, K. Ishii, I. Kaihatsu, T. Kurauchi, K. Musiaka, T. Nakaegawa, N. Ohte, P. Polsan, S. Semmer, M. Sugita, K. Tanaka, O. Tsukamoto and T. Yasunari. 1998. Evaluation of surface fluxes over a paddy field in tropical environment: some findings from a preliminary observation of GAME. *J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.* 11:39-60.
- Ball, J.T. 1988. An analysis of stomatal conductance. Ph.D. thesis, Stanford University 89 pp.
- Betts, A.K., J.H. Ball, A.C.M. Beljaars, M.J. Miller and P.A. Viterbo. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *J. Geophys. Res.* 101:7209-7225.
- Collaz, G.J., J.T. Ball, C. Grivet and J.A. Berry. 1991. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model that includes a laminar boundary layer. *Agric. For. Meteorol.* 54:107-136.
- Collaz, G.J., M. Ribas-Carbo and J.A. Berry. 1992. Coupled photosynthesis stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Aust. J. Plant Physiol.* 19:519-538.
- Colello, G.D., C. Grivet, P.J. Sellers and J.A. Berry. 1998. Modeling of energy, water, and CO₂ flux in a temperate grassland ecosystem with SiB2: May-October 1987. *J. Atmos. Sci.* 55: 1141-1169.
- Dorman, J.L. and P.J. Sellers. 1989. A global climatology of albedo, roughness length and stomatal resistance for atmospheric general circulation models as represented by the simple biosphere model (SiB). *J. Appl. Meteorol.* 28:833-855.
- Garratt, J.R. 1993. Sensitivity of climate simulations to land surface and atmospheric boundary-layer treatments: Review. *J. Climate* 6:419-449.
- Kim, W., T. Arai, S. Kanae, T. Oki and K. Musiaka. 2001. Application of the simple biosphere model (SiB2) to paddy field for a period of growing season in GAME-Tropics. *J. Met. Soc. Japan* 79:387-400.
- Luo W. and J. Goudriaan. 1999. Effects of altering water temperature on leaf wetness in paddy rice crop. *Agric. For. Meteorol.* 97:33-42.
- Pitman, A., R.A. Pielke, R. Avissar, M. Claussen, J. Gash and H. Dolman. 1999. The role of the land surface in weather and cli-

- mate: does the land surface matter? IGBP Newsletter 39:4-11.
- Randall, D.A., D.A. Dazlich, C. Zhang, A.S. Denning, P.J. Sellers, C.J. Tucker, L. Bounoua, J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Field, S.O. Los, C.O. Justice and I. Fung. 1996. A revised land surface parameterization (SiB2) for GCMs. Part III: The Greening of the Colorado State University General Circulation Model. *J. Climate* 9:738-763.
- Sellers, P.J. 1985. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sens.* 8:1335-1372.
- Sellers, P.J. 1987. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. Part II: The role of biophysics in the linearity of their interdependence. *Remote Sens. Environ.* 21:143-183.
- Sellers, P.J., J.A. Berry, G.J. Collatz, C.B. Field and F.G. Hall. 1992. Canpy reflectance, photosynthesis and transpiration. Part III: A reanalysis using enzyme kinetics-electron transport models of leaf physiology. *Remote Sens. Environ.* 42:187-216.
- Sellers, P.J., L. Bounoua, G.J. Collatz, D.A. Randall, S.O. Los, J.A. Berry, I. Fung, C.J. Tucker, C.B. Field and T.G. Jensen. 1996c. Comparison of radioactive and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science* 271: 1402-1406.
- Sellers, P.J., R.E. Dickinson, D.A. Randall, A.K. Betts, F.G. Hall, J.A. Berry, G.J. Collatz, A.S. Denning, H.A. Mooney, C.A. Nobre, N. Sato, C.B. Field and A. Henderson-Sellers. 1997. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science* 275:502-509.
- Sellers, P.J., S.O. Los, C.J. Tucker, C.O. Justice, D.A. Dazlich, G.J. Collatz and D.A. Randall. 1996b. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate* 9:706-737.
- Sellers, P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud and A. Dalcher. 1986. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.* 43:305-331.
- Sellers, P.J., D.A. Randall, G.J. Collatz, J.A. Berry, C.B. Field, D.A. Dazlich, C. Zhang, G.D. Collelo and L. Bounoua 1996a. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *J. Climate* 9:676-705.
- Sellers, P.J., J.W. Shuttleworth, J.L. Dorman, A. Dalcher and J.M. Roberts. 1989. Calibrating the simple biosphere model (SiB) for Amazonian tropical forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. *J. Appl. Meteor.* 28:727-759.
- Tsukamoto, O. 1993. Turbulent fluxes over paddy field under various ponding depth. *J. Agr. Meteor.* 49:19-25.
- Zhang, C., D.A. Dazlich, D.A. Randall, P.J. Sellers and A.S. Denning. 1998. Calculation of the global land surface energy, water and CO₂ fluxes with an off-line version of SiB2. *J. Geophys. Res.* 101:19061-1907.

(2004년 3월 3일 접수; 2004년 8월 15일 채택)

Application of Simple Biosphere Model (SiB2) to Ecological Research

Wonsik Kim and Jaeil Cho¹

Research Institute of Basic Sciences, Seoul National University

¹*Department of Civil Engineering, University of Tokyo*

ABSTRACT : The Simple biosphere model 2 (SiB2), which is one of the land surface models, simulates the exchange of momentum, energy and mass such as water vapor and carbon dioxide between atmosphere and biosphere, and includes the biochemical sub-model for representation of stomatal conductance and photosynthetic activities. Throughout the SiB2 simulation, the significant information not only to understand of water and carbon budget but also to make an analysis of interaction such as feed-back and -forward between environment and vegetation is given. Using revised SiB2-Paddy, one sample study which is the evaluation of the runoff in Chaophraya river basin according to land use/cover change is presented in this review. Hence, SiB2 is available in order to ecological studied, if revised SiB2 for realistic simulation about soil respiration, computing leaf area index, vegetation competition and soil moisture is improved.

Key words : Chaophraya river basin, SiB2-Paddy, Simple biosphere model 2 (SiB2), Soil-Vegetation-Atmosphere interaction, Water budget

K C I