

## 식물계를 고려한 지표-대기 상호작용의 수치모의

이 화 운 · 이 순 환

부산대학교 자연과학대학 대기과학과  
(1993년 12월 28일 접수)

### Numerical modeling of Atmosphere - Surface interaction considering Vegetation Canopy

Hwa-Woon Lee and Soon-Hwan Lee

*Department of Atmospheric Science, Pusan National University, Pusan, Korea*  
(Manuscript received 28 December 1993)

#### Abstract

An one dimensional atmosphere-vegetation interaction model is developed to discuss of the effect of vegetation on heat flux in mesoscale planetary boundary layer. The canopy model was a coupled system of three balance equations of energy, moisture at ground surface and energy state of canopy with three independent variables of  $T_f$ (foliage temperature),  $T_g$ (ground temperature) and  $q_g$ (ground specific humidity). The model was verified by comparative study with OSUID(Oregon State University One Dimensional Model) proved in HYPEx-MOBHLY experiment.

As the result, both vegetation and soil characteristics can be emphasized as an important factor in the analysis of heat flux in the boundary layer. From the numerical experiments, following heat flux characteristics are clearly founded simulation.

The larger shielding factor(vegetation) increase of  $T_f$  while decrease  $T_g$ , because vegetation cut solar radiation to ground. Vegetation, the increase of roughness and resistance, increase of sensible heat flux in foliage while decrease the latent heat flux in the foliage.

Key Word : numerical simulation, vegetation, canopy model, planetary boundary layer

#### 1. 서 론

최근 10년내에 대기경계층과 관련된 연구는 환경오염에 대한 관심과 심각성 때문에 집중적으로 수행되어 오고 있다. 대기경계층의 상태가 인간에게 직접 영향을 미치지만, 관측상에 많은 난점이 존재한다.

대기경계층의 연구는 많은 인적, 물적 자원이

필요하며, 미국과 유럽을 중심으로 WAGARRAD, HIBE-88, HYPEx-MOBHLY등과 같은 프로젝트가 수행되어 왔다. 대기경계층에 관한 정밀한 관측으로 경계층내의 물리적 현상을 해석하고, 여기서 생산된 자료는 수치실험의 초기 자료로 사용되어진다.

지구규모 모델은 전지구적 기상현상의 예보와 중위도 기상학의 측면에서 많은 접근이 시도되었고, 현재는 지구규모의 열대기상현상연구에 접근

하고 있다. 이들 연구에는 정확한 식물체 모형이 필수적으로 요구되며, Sellers *et al.*(1986), Koster (1992), Randal *et al.*(1992)등 연구가 활발히 진행되고 있다.

미기상학 분야에서도 식물체에 대한 여러가지 물리적인 접근이 이루어지고 있으며, 특히, 전이계수에 관한 생물학적, 기후학적 방법으로 연구가 진행되고 있다. 이들은 Kondo와 Kawanaka(1986), Massman *et al.*(1989), platon(1988), Kalassen (1992), Kondo와 Watanabe(1992), Argentini(1992) 등이다.

중규모모형을 통한 수치적인 연구로는 Sasamori (1970), Deardorff(1978), McCumber와 Pielke(1984) 등에 의하여 나지를 이용하여 모형을 수행한 것과 Garratt과 Pielke(1989), Kondo *et al.*(1990)등이 지표면의 물리값을 변화시킴으로 나타나는 현상을 연구한 것이 있다. 중규모의 각종 순환에서 하층경계가 변화함에 따라 바람장과 온도장이 변화한다는 것에 관한 연구로는 McCumber(1980), Ookouchi *et al.*(1984), Benjamin과 Chalson(1986) 등이 있어, 중규모 모델에서 하층경계의 중요성을 시사하고 있으나, 우리나라의 경우, 지표면으로 나지를 고려한 박순용 등(1989), 신동빈 등(1989), 문승의 등(1990)의 연구는 있으나 식물체를 고려한 수치적 모델에 관한 연구는 보고되지 않았다.

본 연구에서는 중간 규모의 수치모형에 있어서 식물체를 고려하였을 때 지표-대기의 상호관계에 대한 수치결과의 변화를 종합적으로 비교하여, 식물체가 중규모 기상현상에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

## 2. 모형의 구조

Fig.1.은 1차원 모델에서 식물층을 구성하는 각종 요소를 나타내는 모식도이다. 첨자 a는 대기 (air), f는 식물체 (foliage), af는 식물층내에서 흐르는 공기(air in foliage part), g는 지표(ground), r은 식물체가 대기에 미치는 저항을 나타낸다. 각 층의 기본구조는 Fig.2.는 여기서 대기는 접지층 (surface layer), 에크만층(Ekman layer) 그리고

자유대기로 나누어지고, 하층경계는 나지(bare soil)와 식물층의 결합으로 되어있다.

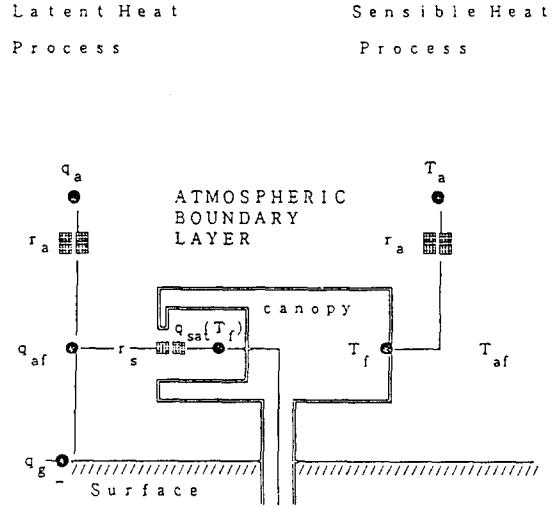


Fig. 1. Framework of biosphere(vegetation canopy)

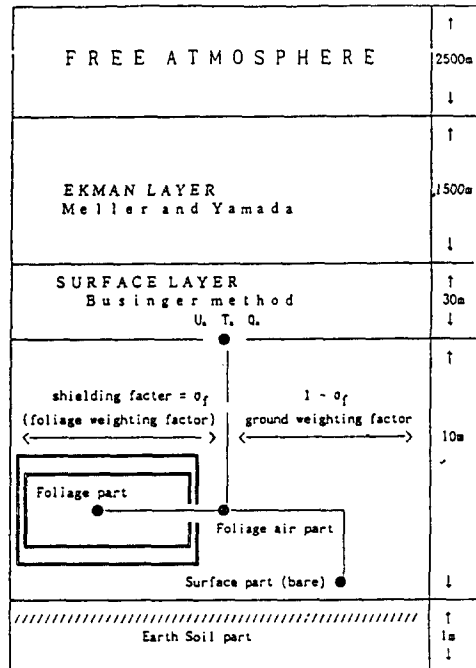


Fig. 2. Basic framework of one dimensional model

### 3. 대기모형

기초방정식은 운동방정식, 온위방정식, 비습방정식, 정역학방정식으로 구성되며, 그것은 아래와 같다.

운동방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) + f(v - v_g) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_m \frac{\partial v}{\partial z} \right) - f(u - u_g) \quad (2)$$

비습방정식

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial q}{\partial z} \right) \quad (3)$$

온위방정식

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \left( \frac{P_o}{P} \right)^{R/C_p} \frac{1}{C_p} \frac{\partial F}{\partial z} \quad (4)$$

정역학방정식

$$\frac{\partial \Pi}{\partial t} = - \frac{g}{C_p \theta} \quad (5)$$

$$\Pi = \left( \frac{P}{P_o} \right)^{R/C_p} \quad (6)$$

여기서  $u, v$ 는  $x, y$  방향의 풍속,  $K_m, K_h$ 는 각각 연직방향의 운동량, 열 확산계수( $m^2/s$ ),  $f$ 는 Coriolis parameter( $s^{-1}$ ),  $u_g, v_g$ 는  $x, y$  방향의 지균풍 속도,  $\theta$ 는 온위(K),  $q$ 는 비습(kg/kg),  $F$ 는 대기중에서의 순복사플럭스,  $R$ 은 건조공기의 기체상수( $=0.0686(\text{cal/gK})$ ),  $C_p$ 는 정압비열( $=239.05(\text{cal/kgK})$ ),  $P$ 는 기압(kPa),  $P_o$ 는 기준 level의 기압( $=1003.7(\text{hPa})$ ),  $g$ 는 중력가속도( $=9.8(\text{m/s}^2)$ )를 나타낸다.

대기모형에서 연직방향 확산계수를 구하는 이론은 여러가지가 있으나, 본 연구에서는 접지층과 에크만층으로 구분하여, 접지층에서는 Monin-Obukhov상사이론에 근거한 Businger 방법(Businger *et al.*, 1971)에 의해 연직 확산계수를 구하고, 에크만층에서는 운동량 플럭스가 급격히 변하므로 이들의 변동량을 잘 묘사한다고 보아지는

Yamada-Mellor(1975)의 2차 난류 종결모델에 의한 연직방향의 확산계수를 구하였다. 운동량 및 열 확산계수에 대한 최소치는 동일하다고 가정하였다.

### 4. canopy 모형

지표상에서 식물계의 분포는 매우 복잡한 양상을 띠고 있으나, 지표와 대기 사이에 있는 식물계를 하나의 층으로 고려한다. canopy층이 식물체와 층내에서 흐르는 공기로 구성되므로, canopy층을 해결함에 있어서 중요한 것은 층의 온도, 습도의 경향을 정확히 표현하는 것이다. 식물계의 층을 대변하는 물리적 요소로  $T_i$ (식물체의 온도),  $T_g$ (지표면의 온도),  $q_g$ (지표면 비습)의 3가지의 독립요소로 2개의 열수지방정식을 구성하여,  $T_i, T_g$ 를 구하고, 1개의 수분수지방정식에 의하여  $q_g$ 를 구한다. 나머지 층의 물리적 요소의 변화는 이들 독립요소와 식물계의 아래에 있는 토양의 물리적 요소, 식물계 위에 존재하는 대기의 물리적 요소의 상호 관련성에 의하여 구한다. 여기서 식물체의 열용량은 무시할 수 있을 정도로 작다라고 가정한다(Monteith(1976), McCumber(1981)).

canopy모델에서 식물계의 분포는 차단계수(shielding factor,  $\sigma_i$ )와 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)로써 표시한다. 차단계수( $\sigma_i$ )는 단위면적에 대한 식물이 덮혀진 정도를 의미한다. 즉 차단계수가 1이면 전 지표를 식물계가 덮고 있다는 것을 의미하고, 0이면 식물이 전혀 없다는 것을 의미한다. 엽면적지수는 차단계수와 달리 식물계의 전층을 통해서 잎이 수직 방향으로 작용하고 있는 면적을 표시하는 계수이다. 엽면적지수는 식물에 따라 다르며, 일반적으로 차단계수가 높으면 보편적으로 엽면적지수가 높다(Deardorff, 1978).

먼저 열수지방정식을 해결하기 위하여 canopy의 열적 요인을 복사과정(Radiation Process)과 플럭스과정(Flux Process)으로 나눈다.

복사과정에는 단파복사(태양복사), 장파복사(지구복사)를, 플럭스과정에는 현열플럭스, 잠열플럭스, 지중열플럭스를 각각의 물리적 현상을 고려하여 모수화한다.

#### 4.1 복사과정

각층에서의 단파복사 S는

$$S_h \uparrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h \downarrow + \alpha_f \sigma_f S_h \downarrow, \quad (7)$$

$$S_g \downarrow = (1 - \sigma_f) S_h \downarrow, \quad (8)$$

$$S_g \uparrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h \downarrow \quad (9)$$

이다. 여기서 첨자 h는 canopy의 정상, g는 지표,  $\alpha_f$ ,  $\alpha_g$ 는 각각 canopy와 지표면에서의 반사율을 의미한다. Idso *et al.*(1975), McComber(1980)에 의한 지표면의 반사율은 지표면의 수분함량의 함수로 표현된다.

$$\alpha_g = 0.31 - 0.17 \omega_g / \omega_k, \quad \omega_g \leq \omega_k \quad (10)$$

$$\alpha_g = 0.14, \quad \omega_g > \omega_k. \quad (11)$$

여기서  $\omega_g$ ,  $\omega_k$ 는 각각 토양 수분량과,  $\omega_g$ 의 임계치이다.

장파복사 L은 Stefan-Bolzman의 법칙에 따라서 복사량은 식물, 지표면 온도의 함수이다.

$$L_h \uparrow = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) L_h \downarrow] + \sigma_f [\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) L_h \downarrow] \quad (12)$$

$$L_g \downarrow = (1 - \sigma_f) L_h \downarrow + \sigma_f \frac{[\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \sigma T_g^4]}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \quad (13)$$

$$L_g \uparrow = (1 - \sigma_f) [\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) L_h \downarrow] + \sigma_f \frac{[\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_f \sigma T_f^4]}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \quad (14)$$

여기서  $\varepsilon_f$ ,  $\varepsilon_g$ 는 각각 식물, 지표에서의 투과도,  $\sigma$ 는 Stefan-Bolzman 상수를 의미한다.

$L_h \downarrow$ 는 야간에 지구의 복사평형을 유지하는 중요한 요인이지만, 측정하기가 매우 어렵다. 그래서 본 연구에서는 Staley와 Juliac(1972)가 제시하고, Deardorff(1972)가 개선시킨 아래의 모수식을 사용하였다.

$$L_h \downarrow = [\sigma_c + (1 - \sigma_c) 0.67(1670)^{0.08}] \sigma T_a^4 \quad (15)$$

여기서  $\sigma_c$ 는 구름으로 덮혀있는 비율이다.

각층에서 작용하는 순복사 R는

$$R_{net.canopy} = S_h \downarrow + L_h \downarrow - S_h \uparrow - L_h \uparrow - (S_g \downarrow + L_g \downarrow - S_g \uparrow - L_g \uparrow) \quad (16)$$

$$R_{net.surf} = - (1 - \alpha_g) S_g \downarrow - L_g \downarrow + L_g \uparrow \quad (17)$$

이며, 첨자의 net는 순복사를 의미한다.

#### 4.2 플럭스과정

식물층내의 개개의 잎자체에서 작용하는 현열플럭스는

$$H_{veg} = \rho_a C_p C_f U_{af} (T_f - T_{af}) \quad (18)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 기준 대기의 밀도(10m 높이의 밀도),  $C_f$ 는 무차원 열전이계수(heat transfer coefficient),  $U_{af}$ 는 식물층내의 풍속,  $T_{af}$ 는 식물층내의 공기의 온도를 나타낸다. 무차원 열전이 계수는 canopy층내의 풍속에 의존하며, 대기안정도에 따른 거칠기 길이와 관련(Kondo *et al.*, 1992)되므로, 풍속항에 안정도항을 포함시키고, 전이계수를 풍속의 항으로 표현하면

$$C_f = 0.01 \left( 1 + \frac{0.3(m/sec)}{u_{af}} \right) \quad (19)$$

$$U_{af} = 0.83 C_d^{1/2} U_a \quad (20)$$

이다.

여기서  $U_a$ 는 기준고도(본 모형에서는 10m)에서의 풍속,  $C_d$ 는 마찰계수를 나타낸다.

$$C_d = \frac{k}{\ln \left[ \frac{(z-D)}{z_o} \right] - \phi_m \left[ \frac{(z-d)}{L} \right]} \quad (21)$$

으로 표현되고, 여기서  $D$ 는 zero plane displacement,  $z_o$ 는 거칠기길이,  $L$ 은 Monin-Obukhov 길이의 함수이다.

canopy층에 존재하는 공기의 온도는

$$T_{af} = (1 - \sigma_f) T_a + \sigma_f (0.3 T_a + 0.6 T_f + 0.1 T_g) \quad (22)$$

으로 나타난다. 여기서 0.3, 0.6, 0.1은 canopy내의 공기의 온도에 대기온도, 식물자체, 지표면이 미치는 영향을 비율로 나타낸 것이다.

따라서, canopy 층에 작용하는 총 현열플럭스는

$$\begin{aligned} H_f &= 1.1 LAI H_{veg} \\ &= 1.1 LAI \rho_a C_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \end{aligned} \quad (23)$$

이며, 여기서  $LAI = \int_0^h a(z) dz$ 이며, canopy 층에서의 현열은 식물의 잎 뿐만 아니라 줄기에서도 작용하므로 계수 1.1로 하였다.

지표면에서의 현열플럭스는 아래식과 같이 지표면온도와 Canopy층의 공기의 온도차이로 표현된다.

$$H_g = \rho_a C_p C_f u_{af} (T_g - T_{af}) \quad (24)$$

canopy상부에서 대기로 나가는 현열플럭스는 지표의 현열플럭스와 canopy층의 현열플럭스의 합과 같다.

$$\begin{aligned} H_s &= H_g + H_f \\ &= \rho_a C_p C_f u_{af} (T_g - T_{af}) \\ &\quad + 1.1 LAI \rho_a C_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \end{aligned} \quad (25)$$

식물은 물리적인 증발과 생물학적인 증발(증산)을 동시에 고려하여야 하며, 식물의 잎으로부터 단위 면적 최대 증발은 아래와 같이 표현된다.

$$E_{veg} = \rho_a C_f u_{af} (q_{sat}(T_f) - q_{af}) \quad (26)$$

대기, 식물의 상태에 따라 실제 증발은 달라지며,

$$E_{veg} = \rho_a C_f u_{af} RST (q_{sat}(T_f) - q_{af}) \quad (27)$$

로 표현된다. 여기서 RST은 최대증발에 대한 실제 증발량의 비로

$$\begin{aligned} RST &= 1 - \delta \left( \frac{r_s}{r_s + r_a} \right) \\ &\quad (1 - (dew - dmax)^{0.67}) \end{aligned} \quad (28)$$

와 같이 표현되며, 여기서  $r_s$ ,  $r_a$ 는 각각 식물체의 기공저항과 대기저항이고,  $dew$ 는 식물체위의 수분량,  $dmax$ 은  $dew$ 의 최대치를 의미한다.

전체 식물층내의 잠열플럭스는

$$\begin{aligned} L \cdot E_f &= L \cdot LAI E_{veg} \\ &= L \cdot LAI \rho_a C_f u_{af} RST (q_{sat}(T_f) - q_{af}) \end{aligned} \quad (29)$$

이다. 식물의 증산은 Monteith(1975)이 제시한

$$\begin{aligned} E_{tr} &= E_{t,pot} \delta \left( \frac{r_s}{r_s + r_a} \right) \\ &\quad (1 - (dew - dmax)^{0.67}) \end{aligned} \quad (30)$$

을 사용하였다.

다음으로 지표면에서의 잠열플럭스는 아래와 같이 표현된다.

$$L \cdot E_g = L \cdot \rho_a C_f u_{af} \alpha' (q_g - q_{af}) \quad (31)$$

대기로 나가는 잠열플럭스는 지표, 식물체에서의 잠열플럭스의 합과 같다.

$$\begin{aligned} L \cdot E_s &= L \cdot LAI \rho_a C_f u_{af} RST (q_{sat}(T_f) - q_{af}) \\ &\quad + L \cdot \rho_a C_f u_{af} \alpha' (q_g - q_{af}) \end{aligned} \quad (32)$$

지중열플럭스는 지표에서의 복사와 플럭스항의 수지식으로 다음과 같이 결정된다.

$$-G = H_g + L E_g - (1 - \alpha_g) S_g \downarrow + L_g \uparrow - L_g \downarrow \quad (33)$$

### 4.3 저항계수 결정

RST를 구함에 있어 식물체의 저항값이 이용되고 있는데 이들 저항값은 대기의 상태에 따라서 크게 변화하기 때문에 산정이 어렵으나, 정확히 계산하여야 한다.

기공저항은 식물의 증산작용에 의하여 발생하는 저항으로 Seller *et al.*(1986)등은 다음과 같이 제시하였다.

$$r_s = \frac{r_{s,min} F_1}{LAI F_2 F_3 F_4} \quad (34)$$

여기서  $F_1$ 은 식물의 광합성과 관련된 항으로 Seller *et al.*(1986)은  $0.55 S_h \downarrow$ 로 하였으며, Dickinson(1984)과 Noilhan등(1988)은 아래식을 이용하였으며, 본 연구에서도 아래식을 이용하였다.

$$F_1 = \frac{1 + f}{f + r_{s.min} / r_{s.min}} \quad (35)$$

$$f = 0.55 \frac{S_h \downarrow}{L_h \downarrow} \frac{2}{LAI} \quad (36)$$

$F_2$ 는 수분stress를 설명하는 항으로 Thomson(1984)에 의하면

$$F_2 \begin{cases} 1 & \omega_2 > \omega_{wilt} \\ \omega_2 - \omega_{wilt} / \omega_{cri} - \omega_{wilt} & \omega_{wilt} < \omega_2 < \omega_{cri} \\ 0 & \omega_2 < \omega_{wilt} \end{cases} \quad (37)$$

이다. 여기서  $\omega_{wilt}$ 는 wilting point에서의 수분량,  $\omega_2$ 는 지중온도가 변하지 않는 지점에서의 수분량,  $\omega_{cri}$ 는  $\omega$ 의 임계치이다.

$F_3$ 는 대기의 증기압 효과로써 Seller *et al.*(1986)는

$$F_3 = 1 - g ( e_{sat}(T_g) - e_a ) \quad (38)$$

이며,  $g$ 는 경험값으로 식물마다 다르다.

$F_4$ 는 대기기온의 영향으로 Dickinson(1984)에 의한

$$F_4 = 1.0 - 0.0016 (298.0 - T_a^4) \quad (39)$$

를 이용하였다.

대기저항은 대기에서의 흐름과 지표층에서의 흐름의 상관관계로 구할 수 있다.

본 연구에서는 Deardorff(1978), Pielke(1984)가 제시한

$$r_a = \frac{U_{af}}{C_p} \quad (40)$$

을 이용하였다.

강수시 식물의 잎에 있는 수분의 변화는

$$\frac{\partial dew}{\partial t} = \sigma_f P - (E_f - E_{tr}) \quad (41)$$

으로 표현하였으며, 여기서  $P$ 는 강수량을 의미한다.

#### 4.4 canopy의 열수지모델

canopy의 열수지방정식의 사용은 식물계를 고려한 모델에서 중요한 독립변수로 작용하는 식물의 온도를 구하는데 목적이 있다. 실제 canopy층이 대변하는 온도가 실제 수치모형실험의 하층온도가 되는데, 그것은 아래와 같다.

$$R_{net.canopy} = H_f + L E_f, \quad (42)$$

$$\begin{aligned} S_h \downarrow + L_h \downarrow - S_h \uparrow - L_h \uparrow - (S_g \downarrow + L_g \downarrow - S_g \uparrow - L_g \uparrow) \\ = H_s - H_g + L(E_s - E_g) \end{aligned} \quad (43)$$

여기서 포화비습에 관한 것을 Clausius-clapeyron식, Tetens식을 이용하여 수치적으로 재 정리하여 반복법으로 풀었다.

#### 5. 토양모델

토양모델로는 Deardorff(1979)가 5가지의 방법을 비교 계산이 간단하고 시간이 적게 드는 Bhumralkar(1975), Blackadar(1976)의 Force restore equation을 사용하였으나, 본 연구에서는 다층모델을 사용하였다. 지중온도 예보방정식은

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{vp}{C(\omega)} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (44)$$

로 주어지고,

$$\frac{vp}{C(\omega)} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = G \quad (45)$$

에 의해서 앞에서 구하여진 지중열플럭스를 이용하여 지중의 온도를 구한다.

토양수분은 Deardorff(1978), Bhumralkar(1975)에 의한 예보방정식을 사용하였다.

#### 6. 모형의 초기, 경계조건 및 검증

식물계의 영향을 자세히 고려하기 위해 지표쪽

에 가까울수록 격자 간격을 좁게 하고, 고도가 증가함에 따라 격자간격을 증가시키서 총 40개의 격자를 구성하였다. 모델의 시작 시각은 8시로 하고, 48시간 수행중에 24시간후의 자료를 결과분석에 이용하였다. 초기조건으로 연직방향의 풍속은 없고, 지표 온위는 식물계, 지표면 모두 284K, 온위의 수직분포는 격자점의 높이가 증가함에 따른 건조감율로 주어진다. 기압은 1013hPa, 비습은 지표면, 식물계 모두 6.0g/Kg로 두었다.

모델의 완성후 검증은 매우 중요하다. 검증의 방법은 특별관측에 의한 초기조건을 산출한 후 수치결과와 관측결과를 상호 비교 한 후 모형을 검증하는 방법과 이미 검증된 모형과 동일한 조건에서의 결과를 상호 비교하는 방법이 있다. 관측치에 의한 검증은 매우 정밀한 대규모 특별관측을 통해야 하기 때문에 본 연구에서의 검증방법으로 이미 검증된 모형을 이용하였다. 이미 검증된 모델로서는 Oregon state university에서 제작된 1차원 대기경계층모형 1.04판(이하 OSUID)을 이용하였다. OSUID는 식물계를 층으로 고려한 것이 아니며, 단지 지표증발을 방해하는 역할을 하고 있으며, 운물리, 중력파동에 관한 것들이 집중적으로 고려되어 있고, 이것은 HAPEX-MOBILHY 특별관측에서 검증되었다. 본 연구의 검증은 제작된 모형과 OSUID에서 차단계수가 0.85, 0.3의 두 경우에 대한 결과를 비교하였다. Fig. 3은 OSUID의 경우 차단계수가 0.85일 때 순복사, 잠열, 현열, 지중열플럭스의 일변화를 나타낸 것이고, Fig.5.은 Fig.4.과 동일한 조건하에서 본 연구에서 제작된 모형에서 얻은 결과이다. 두 경우 잘 일치하고 있으나, 잠열의 경우, 오후에 본 연구에서 제작된 모형이 약간 작게 평가되고 있다.

Fig. 6.은 Fig. 4.와 동일하고, 차단계수만 0.3으로 하였으며, Fig. 7.은 Fig.5.와 동일하며, 역시 차단계수가 0.3이다. 결과를 보면 제작된 모형의 오후에 잠열플럭스가 작게 평가되고 있으나, 두 모형의 결과치가 전체적으로 잘 일치하고 있다.

7. 결 과

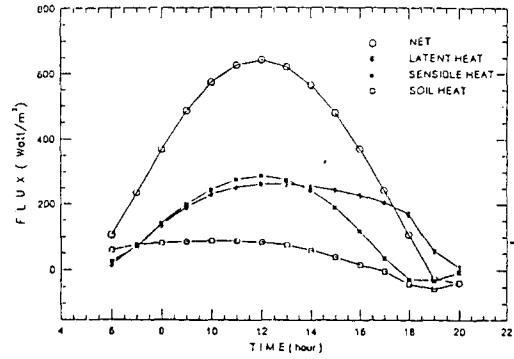


Fig. 3. Diurnal flux variation(shielding factor=0.85) simulated by OSUID

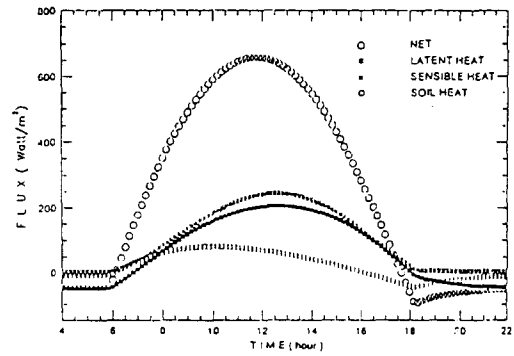


Fig. 4. Diurnal flux variation(shielding factor=0.85) simulated by the present model

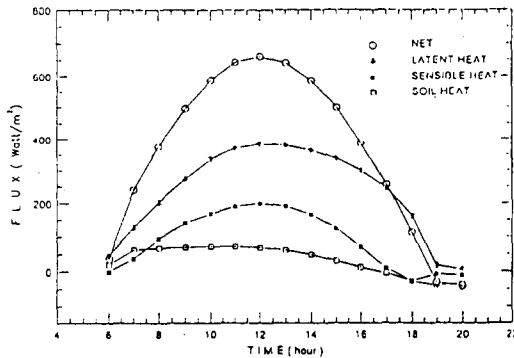


Fig. 5. Diurnal flux variation(shielding factor=0.3) simulated by OSUID

## 7.1 토양의 종류를 바꾼 경우

지표-대기의 연관성의 연구에서 가장 큰 요소는 토양의 종류와 식생의 종류이다.

먼저 지표의 종류를 바꾸어 봄으로써 대기에 미치는 영향을 보고자 한다.

미농무성은 11종의 토양을 나누어 놓았다. 본 연구에서는 가장 대표적인 2가지(SAND, PEAT)에 대하여 보았다. 본 연구에 사용된 물리적 특성은 Table.1.과 같다.

Table. 1. Physical parameter for SAND and for PEAT

Physical parameter	Value
Conductivity(w/m K)	2.20
Speccific heat capacity(J/Ks K)	1480
Density(Km.m <sup>3</sup> )	$2 \times 10^2$
thermal diffusivity(m <sup>2</sup> )	$0.1142 \times 10^2$
Wiltind Moisture content (non dimensionless)	0.3974

2종류의 토양에 대한 순복사플럭스, 현열플럭스, 잠열플럭스, 지중열플럭스의 일변화를 표시한 것이 Fig.7, Fig.8.이다. Fig.7.(sand)의 경우 현열플럭스(245watt/m)가 잠열플럭스 비하여, (120watt/m)크게 산정되고 있다. 그에 따라 지표면의 온도가 높게 올라간다. 반면 Fig. 8.(peat)의 경우 잠열이 크게 기여를 하고, 이에 따라 토양의 온도가 sand에 비하여 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. Fig.9., Fig.10.는 차단계수 0.5 일때 각각 sand, peat의 온위의 수직분포를 나타낸 것이다. Fig.9.는 아침 해 뜬 직후인 8시의 온위의 수직분포이다. sand, peat에 대한 온위분포를 비교해보면, 지표 최하층부를 제외하고, 거의 같은 분포를 한다.

12시경의 온위분포를 나타낸, Fig.10.을 보면 지표면에서 온위는 peat보다 sand의 경우가 5K정도 높고 온위의 분포도 다르게 8시와는 다른 양상을 나타낸다. 이때 혼합고를 보면 sand가 1800m까지 성장한데 반해 peat는 1000m정도밖에 성장하지 못했다. Fig.11.와 Fig.12.의 경우 토양을 달리 할 경우 비습의 고도별 분포를 나타낸 것이다. 8시

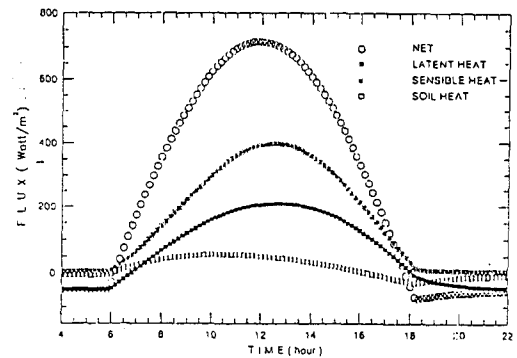


Fig. 6. Diurnal flux variation(shielding factor=0.3) simulated by present model

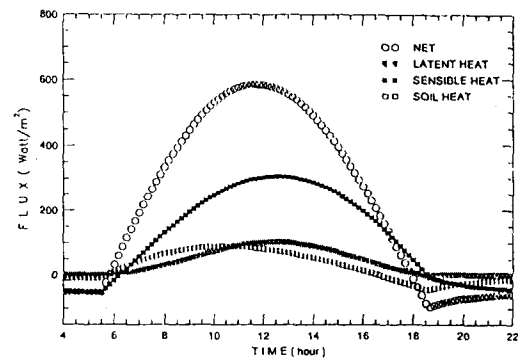


Fig. 7. Diurnal course of surface energy flux in SAND.

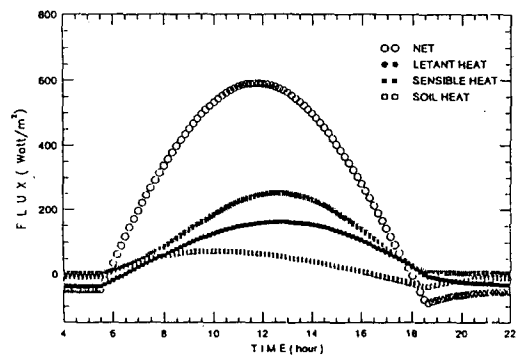


Fig. 8. Same as Fig. 7, except for PEAT.



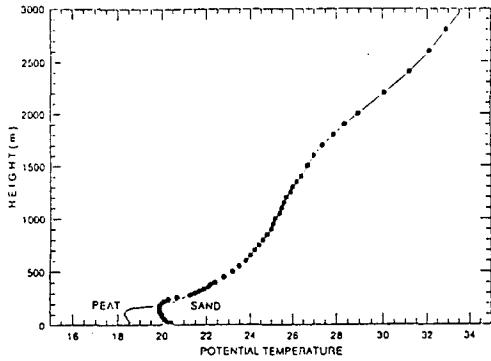


Fig. 9. The potential temperature profiles at 0800LST for SAND and PEAT

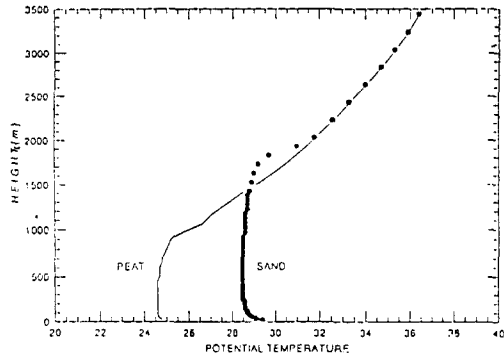


Fig. 10. Same as Fig. 9. except for 1200LST

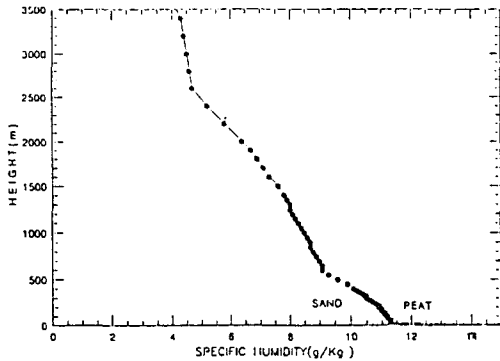


Fig. 11. The specific humidity profiles at 0800LST for SAND and PEAT.

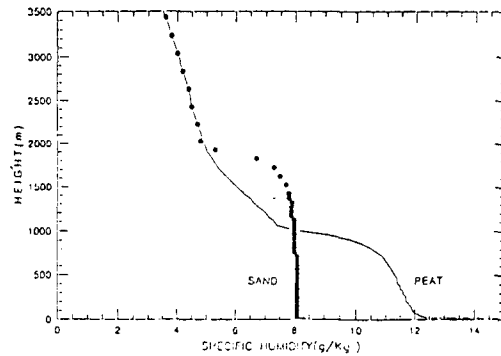


Fig. 12. Same a Fig. 11. except for 1200LST.

의 경우는 서로 비슷하며, 12시의 경우 현열이 높은 sand의 경우는 오히려 떨어지고, peat 부분은 수분 함량의 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

### 7.2 식생의 분포를 달리할 경우(차단계수의 변화)

식생의 차단계수를 0.1, 0.3, 0.6, 0.9로 달리 할 경우의 온도와 비습의 분포를 보면, Fig.13.과 Fig.14.는 차단계수를 달리 할 경우에 나타나는 하루 중 지표면의 온도와 식물체의 온도이다. 차단계수가 높을수록 지표면의 온도는 떨어지며, 반면 식물체의 온도는 상승을 하게 된다. 이것은 차단계수가 높을수록 지표는 식물체에 의하여 가리워

짐에 따라 에너지량이 큰 태양복사에너지의 입사가 작아짐에 따라 온도 변화가 작아지게되고, 식물체의 경우 받는 면적이 증가하여 온도가 상대적으로 커지게 된다. 전체적으로 보면 하층경계의 온도는 식물체가 존재함에 따라 거칠기 길이가 커지게 되고, 각종 저항값이 커지게 되어 온도가 상승하는 효과를 가지게 된다.

Fig.15.과 Fig.16.은 하루중의 비습의 변화를 나타낸 것이다. 지표면의 비습은 증가하고 반면 식물체의 비습은 감소한다. 이것은 지표면에서는 차단계수가 증가함에 따라 태양복사를 피할 수 있어서 직접적인 증발은 줄어들게 되어 비습이 커지고, 그리고 지표면과 식물층사이의 비습의 차이가

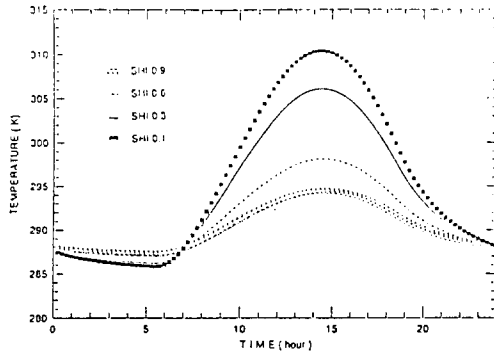


Fig. 13. Diurnal variations of surface temperature(K) for shielding factor 0.1, 0.3, 0.6, 0.9.

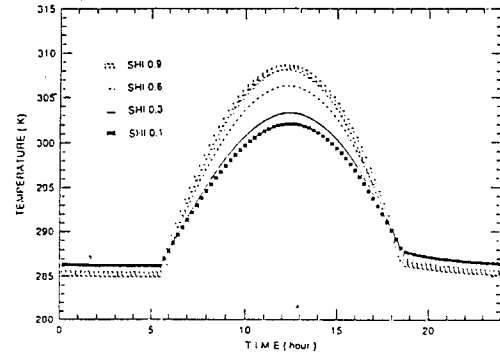


Fig. 14. Same as Fig. 13. except for foliage temperature(K)

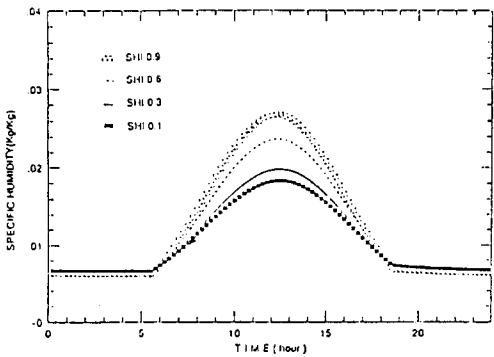


Fig. 15. Diurnal variations of surface specific humidity for shielding factor 0.1, 0.3, 0.6, 0.9.

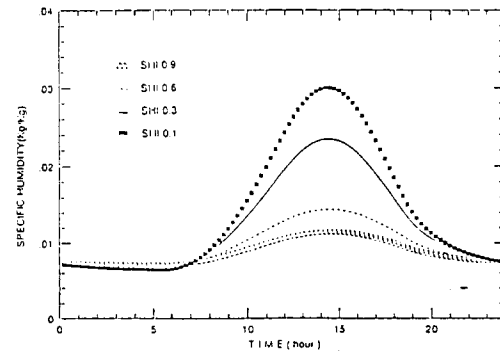


Fig. 16. Same as Fig. 15. except for foliage specific humidity.

크지 않기 때문에 잠열플럭스는 감소한다. 반면, 식물층에서 대기로는 식물계의 낮은 반사율과 기공저항등 생물학적 요인에 의하여 비습이 감소하게 되고, 이에 따라 식물층에서 대기로의 현열플럭스가 증가한다.(Fig. 17.)

### 7.3 식물의 종류에 따른 변화

canopy를 구성하는 식물의 종류가 변화됨에 따라 대기의 영향을 보았다. 식물을 목본식물과 초본식물의 경우를 비교 이들의 차이는 Table.2에 나타나 있다.

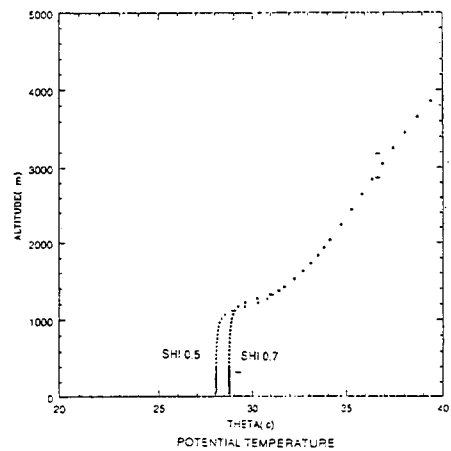


Fig. 17. Potential temperature profile for shielding factor 0.5, 0.7.

Table. 2. Biological and physical parameter for PINE, COTTON, and SUNFLOWER

	LAI	$\tau$	h	a	albedo	emissivity	$R_{s,min}$
PINE	2	0.45	5	0.36	0.2	0.95	120
COTTON	2	0.25	0.5	0.57	0.2	0.95	330
SUNFLOWER	3.6				0.2	0.95	100

Fig.18.은 소나무에 대한 플럭스값이며, Fig.19.는 목화, Fig.20.은 해바라기에 대한 하루중의 플럭스의 변화량을 나타낸 것이다. 각각의 경우를 비교하면 해바라기와 소나무의 형태가 유사하게 나타나고 목화의 경우는 다르게 나타난다. 즉 목화는 잠열플럭스와 현열플럭스가 유사하게 나타나지만, 해바라기와 소나무는 잠열이 현열보다 2.5배 크게 나타난다.

여기에서 목화, 해바라기 소나무를 상호 비교해보면, 엽면적지수가 비슷한 경우보다 최소기공저항이 비슷한 경우에 각종 플럭스의 양태가 비슷하게 나타남을 볼 수 있다. 여기에서 최소기공저항은 지표에서의 각종 플럭스의 변화에 기여하는 주요 요소라고 할 수 있다. 그리고 식물계를 고려함에 있어서 최소기공저항의 산정은 정밀하게 이루어져야 한다.

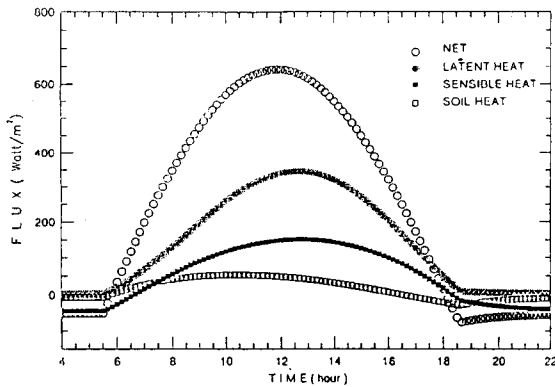


Fig. 18. Diurnal course of surface energy flux in PINE.

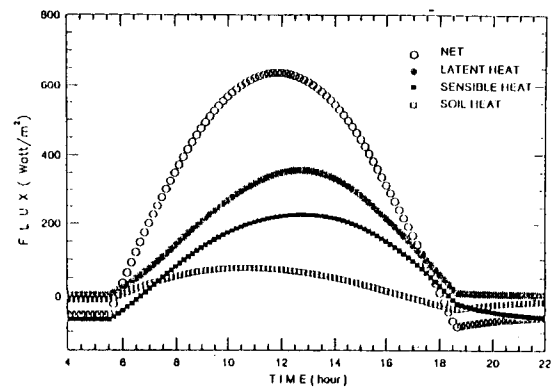


Fig. 20. Diurnal course of surface energy flux in SUNFLOWER.

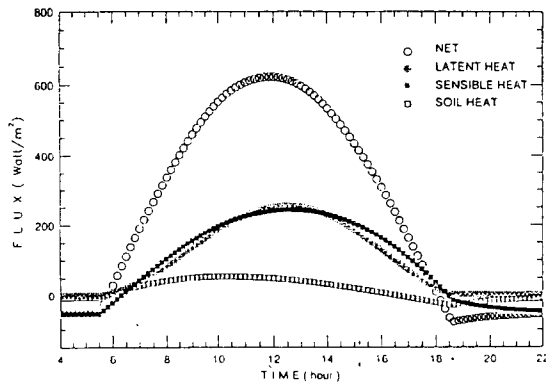


Fig. 19. Diurnal course of surface energy flux in COTTON.

## 8. 결론

대기모형, canopy모형 지중모형을 수치화하고, 이들을 결합시켜 식물계의 물리적 현상이 고려된 지표 대기 상호 연관관계를 알아보았다. 본 연구에서 구성한 모형의 검증은 이미 검증된 OSUI (Oregon State University 1 dimensional model)과 계산 결과를 비교해 봄으로써 본 연구에서 제작한 모델이 타당함을 보았다. 그리고 이 모델을 이용하여 식물계가 존재할 경우 대기경계층에 어떤 영향을 미치는 지를 보았다. 그 결과 다음과 같은

결론을 얻었다.

1. 지표면의 토양의 종류를 변화시켜준 경우를 볼 때, sand는 높은 현열플럭스에 의하여 지표면의 온도가 높고, peat의 경우 상대적으로 잠열플럭스가 높아 하층경계의 온도가 낮다.
2. 토양의 종류에 따른 혼합고를 비교해 보면, 아침의 경우 별 차이가 없으나 정오(12시)가 되면 sand의 경우 1800m까지 성장한 반면, peat는 900m까지 밖에 성장하지 않았다.
3. 식물층의 온도는 차단계수가 높을수록, 즉 canopy층이 받는 면적이 넓어지고, 거칠기가 증가함에 따라 계속 증가하고, 지표면의 온도는 canopy층에 의하여 가리워짐으로 온도는 하강한다.
4. 차단계수가 높을수록 지표면의 비습은 강한 태양복사를 피할 수 있어서 상대적으로 증가하고, 반면 식물층의 경우 직달일사와 이에 따른 저항의 증가로 비습은 감소하게 된다. 지표면에서는 잠열플럭스가 식물체의 경우에는 현열플럭스가 증가한다.
5. 식물의 종류를 달리할 경우 대기에 미치는 영향은 식물체의 저항에 민감하게 반응한다. 이러한 연구결과 수치실험에 있어서 하층경계에는 식물체를 반드시 고려되어야 하며, 나아가 단층이 아닌 다층의 canopy 모형을 제작하는데 많은 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- 문승의, 장광미, 이화운, 1990, 해륙풍의 수치모델에 관한 연구, 한국기상학회지, 26(2), 67-77.
- 박순웅, 윤일희, 1989, 종관 바람장을 고려한 이차원 해륙풍의 수치모델링, 한국기상학회지, 25(2), 80-93.
- 신동빈, 이태영, 1989, 한반도 중부지방에서의 해륙풍순환에 미치는 지형의 영향, 한국기상학회지, 25(2), 56-69.
- Argentini, S., Wetzal, P.J. and Karyampudi, V.M., 1992, Testing a Detailed Biophysical Parameterization for Land-Air Exchange in a High-Resolution Boundary-Layer Model, J.Appl. Meteor., 31, 142-156.
- Benjamin, S.G and Calson, T.N., 1986, some effects of surface heating and topography on the regional severe storm environment. Part1, 3-D simulations, Mon. Wea. Rev., 114, 309-329.
- Bhumralkar, C. M., 1975, Numerical Experiment on the Computation of Ground Surface Temperature in an Atmospheric General Circulation Model, J. Appl. Meteor., 14, 1246-1258.
- Businger, J.A., 1977, Flux-profile Relationship in the atmospheric surface layer. Phys. Atmos., 50, 98-113.
- Deardorff, J.W., 1977, A Parameterization of Ground-Surface Moisture Content for Use in Atmospheric Prediction Models, J. Appl. Meteor., 16, 1182-1185.
- \_\_\_\_\_, 1978, Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture, With Inclusion of a Layer of Vegetation, J. Geophy. Res., 83, 1889-1902.
- Garratt, J.R. and Pielke, R.A., 1989, On the Sensitivity of Mesoscale Models to Surface-Layer Parameterization Constants, Boundary Layer Meteor., 48, 377-387.
- Klaassen, I.M., 1992, Average Fluxes from Heterogeneous Vegetated Regions, Boundary Layer Meteor., 58, 329-354.
- Kondo, J. and Watanabe, T., 1992, Studies on the Bulk Transfer Coefficients over a Vegetated Surface with a Multilayer Energy Budget Model, J. Atmos. sci., 49, 2183-2199.
- \_\_\_\_\_, and Kawanaka, A., 1986, Numerial Study on the Bulk Heat Tranfer Coefficient for a Variety of Vegetation Types and Densities, Boundary Layer Meteor., 37, 285-296.

- Koster, R.D. and Suarez, M.J., 1992, Modeling the Land Surface Boundary in climate Models as a Composite of Independent Vegetation Stands, *J. Geophys. Res.*, 97, 2697-2715.
- Massman, W.J. and Van Dijken, A., 1989, Water Vapor Transfer from a Vegetated Surface: A Numerical Study of Bulk Transfer Coefficient and Canopy Resistances, *Boundary Layer Meteorol.*, 49, 295-307.
- McCumber, M.C. and Pielke, R.A., 1981, Simulation of the Effects of surface Fluxes of Heat and Moisture in a Mesoscale Numerical Model, *J. Geophys. Res.*, 86, 9929-9938.
- \_\_\_\_\_, 1980, A numerical simulation of influence of heat and moisture fluxes upon mesoscale circulations. Rep. UVA-ENVSCI-MESO.
- Minz, Y., 1981, The sensitivity of numerically simulated climates to land surface boundary conditions. Proc. JSC study conf.
- Monteith, J.L., 1975, *Vegetation and the Atmosphere*. Vol 1: principles, Academic Press., 125pp.
- Nickerson, E.C., 1986, The Numerical Simulation of Clouds, Rain, and Airflow over the Vosges and Black Forest Mountains: A Meso- $\beta$  Model with Parameterized Microphysics, *Mon. Wea. Rev.*, 114, 398-414.
- Noilhan, J. and Planton, S., 1989, A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models, *Amer. Meteor. Soc.*, 117, 536-549.
- Ookouchi, Y., M., 1984, Evaluation of soil moisture effects of generation and modification of mesoscale circulation. *Mon. Wea. Rev.* 112, 2281-2292.
- Pinty, J. P., Mascart, P., Evelyne R and Robert R., 1989, An Investigation of Mesoscale Flows Induced by Vegetation Inhomogeneities Using an Evapotranspiration Model Calibrated Against HAPEX-MOBILHY Data, *Amer. Meteor. Soc.*, 28, 976-992.
- Sasamori, T., 1970, A Numerical Study of Atmospheric and Soil Boundary Layers, *J. Atmos. Sci.*, 27, 1122-1137.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C. and Dalcher, A., 1986, A Simple Model(SiB) for Use within General Circulation Models, *J. Atmos. Sci.*, 43, 505-531.
- Taconet, O., Bernard, R. and Vidal-Madjar, D., 1986, Evapotranspiration over an Agricultural Region Using a Surface Flux/Temperature Model Based on NOAA-AVHRR Data, *J. Cli. Appl. Meteor.*, 25, 284-307.
- Van de Griend, A.A. and van Boxel, J.H., 1989, Water and Surface Energy Balance Model With a Multilayer Canopy Representation for Remote Sensing Purposes, *Water Resources Research*, 25, 949-971.
- Yamada, T., 1982, A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forest Canopy, *J. Meteor. Soc. Japan*, 60, 439-453.
- \_\_\_\_\_, and Mellor, G.I., 1975, A simulation of the Wangara Atmospheric boundary layer data, *J. Atmos. Sci.*, 32, 2309-2329.