

## 미기상 수치모의를 위한 다층식생모델의 식생 파라메타가 바람에 미치는 영향

오 은 주·이 화 운·정 용 현  
부산대학교 대기과학과·부경대학교 환경공학과  
(2003년 2월 26일 접수; 2003년 6월 23일 채택)

### The effect of vegetation parameter characteristics of the multi-layer vegetation model on wind for numerical simulation of micro-meteorology

Eun-Joo OH, Hwa Woon Lee and Yong-Hyun Chung

Dept. of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

'Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

(Manuscript received 26 February, 2003; accepted 23 June, 2003)

In order to make use of the protection effect against wind by the vegetation, it examined whether it should make what vegetation form and arrangement using the 2-dimensional non-hydrostatic model. When the foliage shielding factor increases, it becomes hard to take in protection effect against wind in a residential section. When it makes height of vegetation high, it becomes hard to take in protection effect against wind with height. In the comparison in the case where vegetation high is gradually made low toward wind-stream from a vegetation, and the case of making it low gradually, although former tends to receive the protection effect against wind by the vegetation, attenuation of wind velocity becomes large. In the comparison in the case where foliage shielding factor and distribution of density of leaf are gathered gradually toward wind-stream from a vegetation. It has been understood to evaluate to height the influence that the vegetation multi-layer model by which the heat revenue and expenditure in the direction of the vegetation height is considered is used, and to characterize the vegetation group by the parameter setting.

**Key Words :** Multi-layer vegetation model, Protection effect against wind, Foliage shielding factor, Non-hydrostatic model

#### 1. 서 론

인간을 포함해서 일반적으로 생물은 기상환경 속에서 생존하고 있다. 이 기상환경은, 대기순환, 계절풍, 지리적 위치 등으로 지배되는 대기의 상태를 비롯해서, 지형, 식생, 건축물 등의 영향을 받는다. 생물은 각각의 특성에 따라서 기상환경에 적응하고, 호흡하며 또한 생물의 호흡에 따라 기상환경은 영향을 받는다. 그래서 생물의 다양성과 기상의 다양성에는 대응관계

가 존재한다고 생각할 수 있다. 여러 가지 생물 중에서도, 식물은 인간이 생활하고 있는 거의 모든 환경에 존재하고, 생활환경을 직접적, 또는 간접적으로 만들고 있다. 그래서 인간의 생활환경에 직접 관계하는 미기상이 주는 식물의 영향과 특성을 명확하게 할 필요가 있다.

식물이 존재하는 것은 나지와 비교하면 수분을 보유하기 쉬운 특성이 있으며, 또한 식물은 호흡, 광합성을 하면서 수분을 수증기로 방출하여 열을 대기 중에 내보냄으로서 일사, 방열, 기류 등에 독특한 영향을 끼치는 특징을 보인다. 즉, 식물 자체는 수분의 증발산 및 일사에 의해 일중에는 주위의 온도의 상승을 방지하고, 야간은 방풍효과와 열용량

Corresponding Author : Eun-Joo OH, Dept. of Atmospheric Science, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Phone : +82-51-583-2651

E-mail : binbin5@freechal.com

이 큰 수분에 의해 주위의 온도의 저하를 막는 효과가 있다. 반면, 인공환경을 구성하는 건축물 및 도로는 대부분이 콘크리트, 아스팔트, 철, 돌 등으로 물과 비교해서 열용량이 작은 물질로, 같은 일사량을 받아도 식물보다는 큰 온도차를 나타낸다. 식생환경 중의 온도관계는 복잡하다. 식생의 잎은 여러 가지 방향을 향하고, 식생내부의 공기가 흘러 온도구배가 복잡하게 일어난다.

또한, 식생의 증발산 작용에 의해 수분도 복잡하게 변화를 한다. 이러한 식생환경을 Raschke<sup>1)</sup>은 하나의 잎의 통풍량과 기공에서의 증발산량을 파라메타화하여 에너지 열수지를 구해서, 잎의 증발산량과 온도를 정식화하였다. 또한, 식생전체의 에너지 열수지식에 관해서는 많은 연구가 행해져, Penman and Long<sup>2)</sup>에 의해 식생내부의 열교환이 실측되어, 그때까지의 연구의 정밀도를 고찰하였다. 잎의 증발산에 관한 연구는 Monteith and Szeicz<sup>3)</sup>에 의해 정식화 되었다. Deardorff<sup>4)</sup>은 식생을 단층으로 하여 식생과 그 밑의 지면의 양방향에 관해 열수지와 수분량을 정식화하고, Garret<sup>5)</sup>는 Deardorff의 방법을 미국 동남부의 대류 시뮬레이션 모델의 지표면 경계조건으로 이용하였다. McCumber<sup>6)</sup>은 또한 Dear-dorff의 방법을 중규모 모델의 지표면 경계조건으로 이용하였다. 또한, 산림내의 평균풍속이 Oliver<sup>7)</sup> 및 Hosker et al.<sup>8)</sup>에 의해 실측과 해석이 이루어졌고, Yamada<sup>9)</sup>는 산림의 내부와 그 상공의 난류를 모델화하였다.

이상과 같이 식생에 의한 온도와 수분의 전송 및 난류의 발생 등을 각각 연구가 이루어지고 있지만, 실제의 식생지는 단순하지 않고 다양한 식생상황에 적용 가능한 종합적인 모델화가 필요하다. 그래서 본논문에서는 더 정확한 미기상 예측을 행하기 위해서, 식생이 의한 미기상에의 영향을 정식화하기 위한 다층식생모델을 구축하여 모델의 정밀도를 분석하였다.

## 2. 수치모델

### 2.1. 식생의 열수지

식생총을 고려한 열수지 및 지표면비습을 구하기 위해서 Deardorff의 모델을 도입하였다. 그 모델은 식생의 열 축척을 무시한다고 가정하고, 식생이 지표면을 덮고 있는 비율을 나타내는 피복도를 파라메터로 사용하여 모델화를 행하였다. 이러한 파라메타의 설정에 의해서, 식생부분 뿐만 아니라 도시부 및 해안부의 지표면 열수지도 또한 계산할 수 있다. 모델은, 우선 식생 꼭대기위에서 열수지식을 계산하여 식생의 잎의 대표온도를 결정하며, 지표

면에서의 열수지식으로부터 지표면의 온도와 비습을 결정하였다. 식생을 고려한 열수지 모델의 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

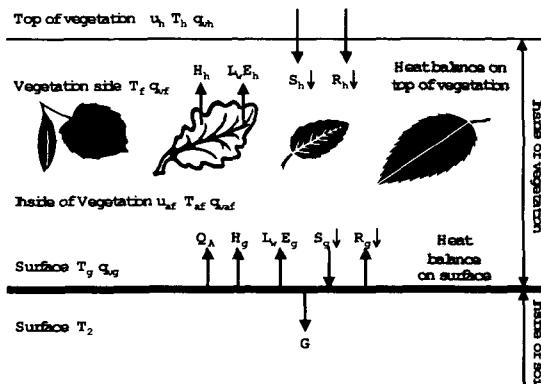


Fig. 1. Conceptual configuration of surface energy budget.

식생 꼭대기에서의 열수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_h \downarrow + R_h \downarrow - S_h \uparrow - R_h \uparrow \\ - (S_g \uparrow + R_g \downarrow - S_g \uparrow - R_g \uparrow) \\ = H_h - H_g + L_w(E_h - E_g) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 태양의 단파복사 플럭스,  $R$ 은 장파복사 플럭스,  $H$ 는 혼열플럭스,  $L_w E$ 는 잠열플럭스이다. 화살표는 플럭스의 방향을 표시하고, 첨자  $h$ 는 식생꼭대기,  $g$ 는 지표면을 의미한다. 그리고, 식생꼭대기의 태양의 단파복사플럭스는 다음과 같이 나타낸다.

$$S_h \downarrow = T_r R_0 \cos i \quad (2)$$

여기서,  $T_r$ 은 태양투과율,  $R_0$ 은 태양상수,  $i$ 는 경사면에 대한 태양의 입사각으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\cos i = -\cos \alpha \cos Z + \sin \alpha \sin Z \cos(\beta - \eta) \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 경사면의 경사각,  $Z$ 는 천정각,  $\beta$ 는 태양의 방위각,  $\eta$ 는 경사면의 방위각을 나타내고, 장파복사플럭스는 다음과 같다.

$$R_h \downarrow = \{ C_{cloud} + (1 - C_{cloud})0.67(1670 q_{vh})^{0.08} \times \sigma T_h^4 \cos \alpha_{slope} \} \quad (4)$$

여기서,  $C_{cloud}$ 는 운량,  $q_{vh}$ 는 식생꼭대기에서의 수증기,  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수,  $T_h$ 는 식생꼭대기에서의 기온이다.

## 미기상 수치모의를 위한 다층식생모델의 식생 파라메타가 바람에 미치는 영향

식(2)와 (4)로 정의된 단파복사와 장파복사를 이용하고, 식(1)의 나머지 항들은 다음을 이용한다.

$$S_g \downarrow = (1 - \sigma_f) S_h \downarrow \quad (5)$$

$$S_g \uparrow = \alpha_g (1 - \sigma_f) S_h \downarrow \quad (6)$$

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

$$R_g \downarrow = (1 - \sigma_f) R_h \downarrow \\ + \sigma_f \frac{\varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_g \sigma T_g^4}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \quad (8)$$

$$R_g \uparrow = (1 - \sigma_f) \{ \varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) R_h \downarrow \} \\ + \sigma_f \frac{\varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) \varepsilon_f \sigma T_f^4}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \quad (9)$$

$$R_h \uparrow = (1 - \sigma_h) \{ \varepsilon_g \sigma T_g^4 + (1 - \varepsilon_g) R_h \downarrow \} \\ + \alpha_f \{ \varepsilon_f \sigma T_f^4 + (1 - \varepsilon_g) R_h \downarrow \} \quad (10)$$

여기서,  $\sigma_f$ 는 단위면적당 잎의 피복율,  $\alpha_g$ 는 지표면의 알베도,  $\sigma_f$ 는 잎의 알베도,  $\varepsilon_g$ 는 지표면의 복사 방출율,  $\varepsilon_f$ 는 잎의 복사방출율,  $T_g$ 는 지표면의 온도,  $T_f$ 는 잎의 대표온도이다.

단위면적당 잎에서 주위의 공기로의 정방향의 현열플럭스  $H_f$ 와, 단위면적당 잎에서 주위 공기로의 정방향의 증발량  $E_f$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$H_f = H_h - H_g \quad (11)$$

$$E_f = E_h - E_g \quad (12)$$

그리고, 잎을 대표적인 플럭스는 다음과 같다.

$$H_{leaf} = \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \quad (13)$$

여기서,  $C_f$ 는 잎 양면에 대한 전송계수 [ $= 0.01(1 + 0.3/u_{af})$ ],  $u_{af}$ 는 식생총내의 풍속,  $T_{af}$ 는 식생총내의 온도,  $c_p$ 는 공기의 정압비열,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도이다. 식생내의 풍속은

$$u_{af} = 0.83 \sigma_f C_{Hh}^{1/2} u_h + (1 - \sigma_f) u_h \quad (14)$$

이고, 식생총내의 온도는 잎면온도와 지표면온도의 평균치로 다음과 같이 구할수 있다.

$$T_{af} = (1 - \sigma_f) T_h \\ + \sigma_f (0.3 T_h + 0.6 T_f + 0.1 T_g) \quad (15)$$

단위면적의 정방향의 잎의 총면적을  $LAI$ 라고 하고, 단위면적당의 잎에서 주위의 공기로의 정방향의 현열플럭스는

$$H_f = 1.1 LAI \cdot H_{leaf} \\ = 1.1 LAI \cdot \rho_a c_p C_f u_{af} (T_f - T_{af}) \quad (16)$$

이고, 여기서 계수 1.1은 열을 교환하지만 수분은 증발시키지 않는 잎과 줄기의 영향을 고려하여 결정하였다.

단위면적당 정방향의 잎의 총면적은

$$LAI = F_{num} \sigma_f \quad (17)$$

이고,  $F_{num}$ 는 단위면적당 잎숫자이며, 같은 방법으로 잎의 대표적인 증발율은

$$E_{leaf} = \rho_a C_f u_{af} (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf}) r'' \quad (18)$$

이고, 여기서  $q_{vsat}(T_f)$ 는 잎면의 표화수증기 비습,  $q_{vaf}$ 는 식생총내의 비습으로 잎면비습과 지표면비습의 평균으로 나타낸다.

$$q_{vaf} = (1 - \sigma_f) q_{vf} \\ + \sigma_f (0.3 q_{vh} + 0.6 q_{vf} + 0.1 q_{vg}) \quad (19)$$

또한,  $r''$ 는 잎에서의 잠재적인 증발량의 비율을 표시하며.

$$r'' = 1 - \delta_c \frac{r_{stma}}{r_{stma} + r_{af}} \left\{ 1 - \left( \frac{W_{dew}}{W_{dmax}} \right)^{2/3} \right\} \quad (20)$$

이고, 여기서  $r_{stma}$ 는 기공저항,  $r_{af}$ 는 식생총내의 공기저항,  $W_{dew}$ 는 단위면적당 잎위에서의 수분량,  $W_{dmax}$ 는 단위면적당 잎위의 최대수분량 ( $W_{dmax} = \sigma_f$ 로 가정),  $\delta_c$ 는 스텝관수로 잎위에서 응결이 일어나면 0, 아니면 1로 둔다.

이상으로 단위면적당 잎에서 주위의 공기로의 정방향의 증발량은

$$E_f = LAI E_{leaf} \\ = LAI \rho_a C_f u_{af} (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf}) r'' \\ = r'' (E_f)_{pot} \quad (21)$$

이고,  $(E_f)_{pot}$ 는 식생에서의 잠열적인 증발량을 나타낸다. 만약  $\delta_c = 0$  이면, 정방향의 증발량  $E_f$ 는, 잎위에서의 응결량을 나타낸다.  $\delta_c = 1$ ,  $W_{dew} = 0$ 는 잎에서의 증발량을 나타내고,  $\delta_c = 1$ ,  $W_{dew} > 0$ 이면 응결수분의 증발과 증산의 양쪽에서 일어나고 있는 것을 알수 있다. 또한, 단위면적당의 증발량은

$$E_{tr} = \delta_c (E_f)_{pot} \frac{r_{af}}{r_{stma} + r_{af}} \left\{ 1 - \left( \frac{W_{dew}}{W_{dmax}} \right)^{2/3} \right\} \quad (22)$$

이고, 윗식에서 오른쪽의 마지막 항은 이슬로 덮혀있지 않은 잎의 비율을 나타내고 있다. 잎의 수증

## 오 은 주 · 이 화 운 · 정 용 현

기애 대한 기공저항은

$$r_{stma} = r_c \left\{ \frac{S_{max} \downarrow}{S_h \downarrow + 0.03 S_{max} \downarrow} - \left( \frac{\theta_{wilt}}{\theta_{root}} \right)^2 \right\} \quad (23)$$

이고, 여기서  $r_c$ 는 식물에 의해 변하는 기공계수,  $S_{max} \downarrow$ 는 태양복사의 최대치,  $\theta_{wilt}$ 는 식물이 빨아들이는 토양수분량,  $\theta_{root}$ 는 식물의 뿌리 근처의 수분량이다. 기공저항은 증산이 왕성한 단파복사가 강한 일중에 작아지고, 토양수분량이 많으면 작아지는 것을 식 (23)에서 보여준다.

식생총내의 공기저항은

$$r_{af} = \frac{1}{C_f u_{af}} \quad (24)$$

이고, 이상의 결과를 이용하여 식(2)를 다음과 같이 다시 구성된다.

$$\begin{aligned} & \sigma_f \left\{ (1 - \alpha_f) S_h \downarrow + \varepsilon_f S_{h \downarrow} + \frac{\varepsilon_f \varepsilon_g}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f} \varepsilon_g \sigma T_g^4 \right. \\ & \left. - \frac{\varepsilon_f + 2\varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right\} = LAI \rho_a C_f u_{af} \\ & \times \{1.1 c_p (T_f - T_a) + L_w r' (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf})\} \end{aligned} \quad (25)$$

식(25)에서 잎의 대표온도  $T_f$ 를 구한다. 그러나, 이식은  $T_f$ 의 4차식이며 비선형으로 직접 계산할 수는 없다. 그래서 다음과 같은 식으로 되풀이 계산을 한다.

$$\begin{aligned} f(T_f) = & \sigma_f \{ (1 - \alpha_f) S_h \downarrow + \varepsilon_f S_{h \downarrow} \downarrow \\ & + \frac{\varepsilon_f \varepsilon_g}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \sigma T_g^4 \\ & - \frac{\varepsilon_f + 2\varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \varepsilon_f \sigma T_f^4 \} \\ & - LAI \rho_a C_f u_{af} * \{1.1 c_p (T_f - T_a) \\ & + L_w r' (q_{vsat}(T_f) - q_{vaf})\} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} f(T_f) = & \sigma_f \left\{ -4 \frac{\varepsilon_f + 2\varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f \varepsilon_g} \varepsilon_f \sigma T_f^3 \right\} \\ & - LAI \rho_a C_f u_{af} \left\{ 1.1 c_p + L_w r' \frac{dq_{vsat}(T_f)}{dT_f} \right\} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서, Clausius-Clapeyron의 식, 및 Tetens의 식(포화수증기 비습을 온도의 관수로 구하는 식)을 사용하면, 포화수증기 비습을 온도로 편미분했던 식은

$$\frac{dq_{vsat}}{dT} = \frac{4098 q_{vsat} (0.622 + q_{vsat})}{0.622(T - 35.86)} \quad (28)$$

으로, 이식을 이용하면  $T_f$ 는 계산가능해진다.

잎의 대표온도  $T_f$ 를 이용하여, 잎의 표면근처의 대표적인 비습은

$$q_{vf} = r' q_{vsat}(T_f) + (1 - r') q_{vaf} \quad (29)$$

으로, 단위면적당 잎위의 수분량은

$$\begin{aligned} \frac{\partial W_{dew}}{\partial t} &= \sigma_f P_g - (E_f - E_{tr}) \\ 0 \leq W_{dew} &\leq W_{dmax} \end{aligned} \quad (30)$$

이고, 여기서  $P_g$ 는 강수량,  $(E_f - E_{tr})$ 는 잎에서 증산 또는 잎위에서의 응결량을 나타낸다.

### 2.2. 지표면에서의 열수지

지표면에서의 에너지열수지식은

$$\begin{aligned} -G &= H_g + L_u E_g - (1 - \alpha_g) S_g \downarrow \\ &+ R_g \uparrow - R_g \downarrow + Q_A \end{aligned} \quad (31)$$

으로, 여기서  $G$ 는 지표면으로의 열플럭스,  $Q_A$ 는 인공열플럭스이다.

지표면의 알베도는 지표면의 수분함유량의 관수로

$$\alpha_g = \begin{cases} 0.31 - 0.17 \frac{\theta_{w1}}{\theta_{s1}} & \theta_{w1} \leq \theta_{s1} \\ 0.14 & \theta_{w1} > \theta_{s1} \end{cases} \quad (32)$$

이고, 여기서  $\theta_{w1}$ 는 제1층의 포화토양수분량이다.

지표면의 현열플럭스와 증발량은 다음과 같이 구할수 있다.

$$H_g = \rho_a c_p C_{Hg} u_{af} (T_g - T_{af}) \quad (33)$$

$$E_g = \rho_a C_{Hg} u_{af} (q_{vg} - q_{vaf}) \quad (34)$$

식생총 밑의 열 및 수분의 수송계수는, 접지경계층의 무차원속도 프로파일, 온도 프로파일 및 칼만상수를 이용하고, 다음과으로 나타낸다.

$$C_{Hg} = \frac{x^2}{\{ \Psi_m(\xi) - \Psi_m(\xi_0) \} \{ \Psi_h(\xi) - \Psi_h(\xi_0) \}} \quad (35)$$

토양의 열특성은, 토양의 종류보다는 토양의 수분량에 의해 그게 변한다. 그래서, 토양중의 열용량과 열전도를 다음과 같이 수분의 관수로 준다. 여기서, 첨자  $g$ 는 지표면근처의 토양을, 첨자  $2$ 는 지표면의 영향을 받지 않는 깊이의 토양을 나타낸다.

토양의 열용량은

$$(\rho_{soil} c_{soil})_g = 0.27 + \theta_{w1} \quad (36)$$

## 미기상 수치모의를 위한 다층식 생모델의 식생 파라메타가 바람에 미치는 영향

$$(\rho_{soil} c_{soil})_2 = 0.27 + \theta_{u3} \quad (37)$$

이고, 여기서,  $(\rho_{soil} c_{soil})_g$ 는 지표면근처의 토양의 열용량,  $(\rho_{soil} c_{soil})_2$ 는 지표면의 영향을 받지 않는 열용량이다.

토양의 열전도율은

$$\lambda_g = 0.001 + 0.004 (\theta_{u1})^{1/2} \quad (38)$$

$$\lambda_2 = 0.001 + 0.004 (\theta_{u3})^{1/2} \quad (39)$$

이고,  $\lambda_g$ 는 지표면근처의 토양의 열전도율,  $\lambda_2$ 는 지표면의 영향을 받지 않는 토양의 열전도이다.

하루주기의 토양깊이는

$$(d_1)_g = \left\{ \frac{\tau_1 \lambda_g}{(\rho_{soil} c_{soil})_g} \right\}^{1/2} \quad (40)$$

$$(d_1)_2 = \left\{ \frac{\tau_1 \lambda_2}{(\rho_{soil} c_{soil})_2} \right\}^{1/2} \quad (41)$$

이고,  $(d_1)_g$ 는 하루의 주기변화의 영향을 받는 지표면근처의 토양깊이,  $(d_1)_2$ 는 하루의 주기변화의 영향을 받는 지표면의 영향을 받지 않는 토양의 깊이,  $\tau_1$ 는 하루( $=86400[s]$ )이다.

지표면근처의 토양과 지표면의 영향을 받지 않는 토양의 물성치가 크게 변하지 않는 경우, 토양의 물성치는

$$\begin{aligned} \rho_{soil} c_{soil} d_1 &= r' (\rho_{soil} c_{soil})_g (d_1)_g \\ &\quad + (1-r') (\rho_{soil} c_{soil})_2 (d_1)_2 \end{aligned} \quad (42)$$

이고, 여기서

$$r' = 0.3 + 0.05 \frac{\theta_{u1}}{\theta_{u3}} \quad (43)$$

이며, 이러한 토양의 물성치를 이용하여 지표면온도는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = c_{\pi} \frac{G}{\rho_{soil} c_{soil} d_1} - c_{\tau_2} \frac{T_g - T_2}{\tau_1} \quad (44)$$

여기서,  $c_{\pi} = 2\sqrt{\pi}$ ,  $c_{\tau_2} = 2\pi$ ,  $T_2$ 는 하루주기의 영향을 받지 않는 토양의 온도이고, 정수  $c_{\pi} = 2\sqrt{\pi}$ ,  $c_{\tau_2} = 2\pi$ 는 토양안으로의 열플럭스  $G$ 를 사인함수로 결정하는 수치이다.

하루의 주기변화를 받지 않는 토양중의 깊이에 대한 온도는

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{G}{\rho_{soil} c_{soil} d_2} \quad (45)$$

이고,  $d_2 = (365 \times_{soil} \tau_1)^{1/2}$ 는 하루의 주기변화를 하지않는 토양중의 깊이,  $x_{soil}$ 는 토양의 열확산계수이다.

지표면에서의 수증기 비습의 결정방법은  $\alpha$ 법과  $\beta$ 법이 있다.  $\alpha$ 법은 지표면의 포화수증기비습에 계수를 곱해서 지표면의 수증기비습을 구하는 방법이고,  $\beta^{(10)}$ 법은 지표면의 포화수증기비습과 지표면 상공의 비습의 평균값으로 구하는 방법이다. 본연구에는 Acs et al<sup>(11)</sup>의  $\alpha$ 법을 이용한다.

$$q_{vg} = \alpha' q_{vsat}(T_g) \quad (46)$$

여기서, 비열계수인  $\alpha'$ 는

$$\alpha' = 1 - \left( \frac{\theta_{sl} - \theta_{u1}}{\theta_{sl}} \right)^3 \quad (47)$$

이다.

### 2.3. 다층식 생모델

수목의 높이별로 열수지를 고려한 식생다층모델은, 우선 수목의 높이, 잎밀도분포 파라메터에서, 수목의 잎밀도분포를 설정한다. 그래서, 연직방향에 잎밀도면적이 변화하는 수목에 관한 모델을 고려하며, 수목에 의한 열호흡은 무시하고 각 높이별로 정방향복사플럭스, 현열플럭스와 잠열플럭스가 균형을 이룬다고 가정한다. 태양복사량은 감소계수에 의해 수목정상에서 감소하고, 그 감소량과 보엔비에서 수목의 현열량, 잠열량을 추정한다, Fig. 2에 수목 높이를 고려한 식생다층모델의 개념도를 나타낸다.

어떤 고도에서 잎면적밀도( $L_v$ )는 다음과 같이 정의된다

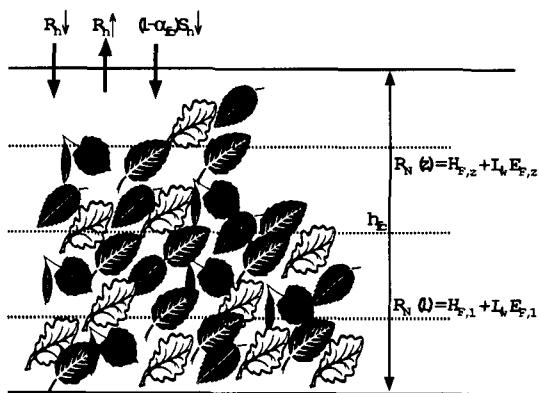


Fig. 2. Conceptual configuration of multi-vegetation model.

$$a(z) = A_t \hat{a}(z'), z' = \frac{z}{h_{fc}} \quad (48)$$

여기서  $A(z)$ 는 총 잎면적밀도이며,  $h_{fc}$ 는 식생의 높이,  $\hat{a}(z')$ 은 잎면적밀도함수<sup>13)</sup>로 다음과 같이 정의된다.

$$\hat{a}(z') = a_m (1 - z') \exp \left[ \frac{1}{2} \lambda^2 - \frac{1}{2} (z' - \lambda)^2 \right] \quad (49)$$

여기서  $a_m$ 은 방정식(26)을 만족하기 위해 사용된 상수이다.

$$\int_0^1 \hat{a}(z') dz' = 1 \quad (50)$$

$\lambda$ 는 잎면적밀도의 연직 프로파일을 규정하기 위한 파라미터이다. 각 고도의 총 복사플럭스<sup>14)</sup>는 다음과 같다.

$$R_N(z) = \eta_{fc} R_{Nh} [\exp(-kL(z)) - \eta_{fc} (1 - \frac{z}{h_{fc}}) \exp(x - kL(0))] \quad (51)$$

여기서  $\eta_{fc}$ 는 식생에 의해 덮여진 면적의 fraction,  $R_{Nh}$ 는 식생 위 총 복사플럭스,  $k$ 는 extinction 계수,  $L(z)$ 는 잎면적 지수로 다음과 같이 정의된다.

$$L(z) = \int_z^{h_k} a(z') dz' \quad (52)$$

식생으로부터 현열플럭스와 잠열플럭스는 다음과 같다.

$$H_F = \frac{B}{B+1} \frac{\partial R_N(z)}{\partial z} \quad (53)$$

$$L_u E_F = \frac{1}{B+1} \frac{\partial R_N(z)}{\partial z} \quad (54)$$

### 3. 계산조건

계산영역의 좌측에서 일정량의 바람이 유입되고, 그 공기의 흐름이 식생내를 통과함으로써 어떤 변화가 일어나는 가를, 바람장이 정상적으로 형성될 때까지 일정조건을 가지고 계산을 행하였다.

본 연구에서 사용된 계산영역을 Fig.3에 나타내었다. 수평방향으로 2km, 연직방향을 80m로 하여, 그 계산영역의 중앙부에 수평거리 1km의 식생군을 고려한다. 계산 격자 간격은 수평방향 20m, 연직방향 1m의 100×80의 등간격 격자군을 고려하였다. 계산영역 좌측에서 상단의 풍속이 3m/s의 지수분포로 풍속을 주고, 온도분포는 중립으로 하여 수속 계산을 행하였다.

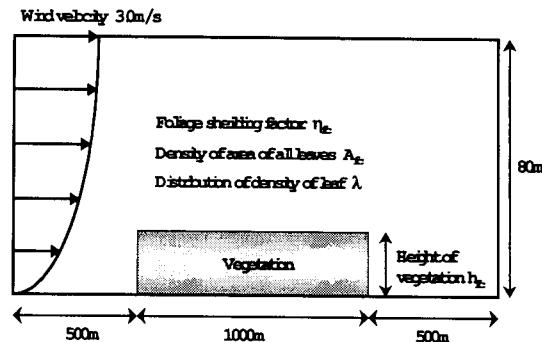


Fig. 3. Schematic diagram of calculated domain.

Table 1. Calculation conditions for vegetation parameter in each case

	Foliage shielding factor	Density of area of all leaves	Distribution of density of leaf	Height of vegetation
Case 1	1.0	0.8	change	20
Case 2	1.0	0.8	4.0	change
Case 3	change	0.8	4.0	20
Case 4	1.0	change	4.0	20

다중식생모델의 입력 파라메타로는 잎밀도분포, 식생높이, 식생피복도, 전체잎면적밀도를 변경시켜, 풍속변화를 구하였다. Table 1에는 각계산 CASE에 설정된 파라메타를 나타내었다.

### 4. 계산결과

Table 1에 나타난 4가지 CASE인 잎밀도분포, 식생높이, 식생피복도, 전체잎면적밀도를 각각 변화를 주어 계산한 결과를 비교, 분석하였다.

CASE1의 잎밀도분포를 변화시킨 경우는, 식(48)에서 잎밀도공간분포, 즉 식생군의 구조를 변경시킨 것과 같은 역할을 하게 된다. 잎밀도분포를 1.0, 3.0, 5.0으로 변화시킨 경우의 잎밀도 공간분포를 Fig.4에 나타냈다. 잎밀도분포의 수치를 크게 할수록, 식생꼭대기의 잎밀도가 증가하고, 역으로 수치를 작게 할수록 식생 하부의 잎밀도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5에 식생중앙부에 의한 풍속  $U$ 의 연직분포를 나타내었다. RAMDA(잎밀도분포)=1.0의 경우에는, 계산영역 좌측에서 유입되는 풍속이 식생군내에서 감속하고 있고(높이 20m이하의 부분), 특히 지표면근처에서 최대로 약해지고 있다. 이것은 잎밀도 공간분포와 비교하면 RAMDA=1.0의 경우에는 식생하부에 있는 잎밀도가 높고, 잎밀도가 낮은 식생 상부와 비교해서 풍속감소가 작게 나타나는

### 미기상 수치모의를 위한 다층식생모델의 식생 파라메타가 바람에 미치는 영향

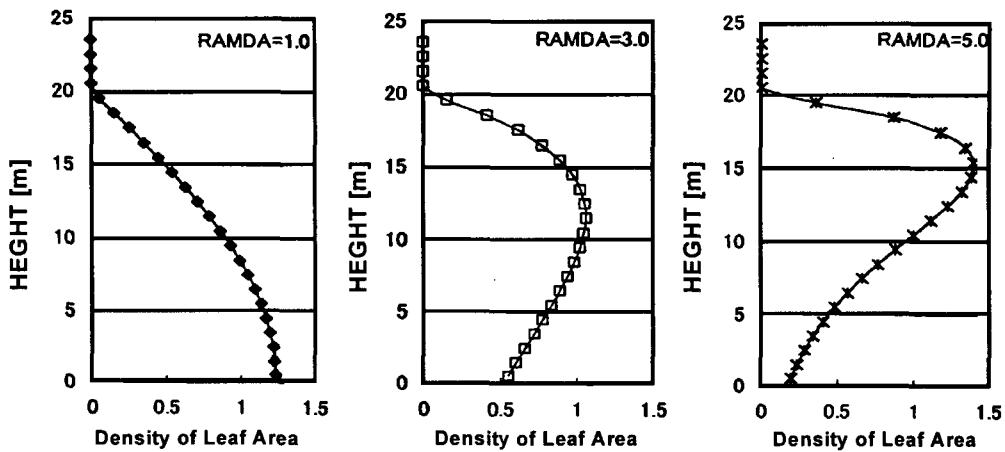


Fig. 4. Vertical profiles of density of leaf area for Case1.

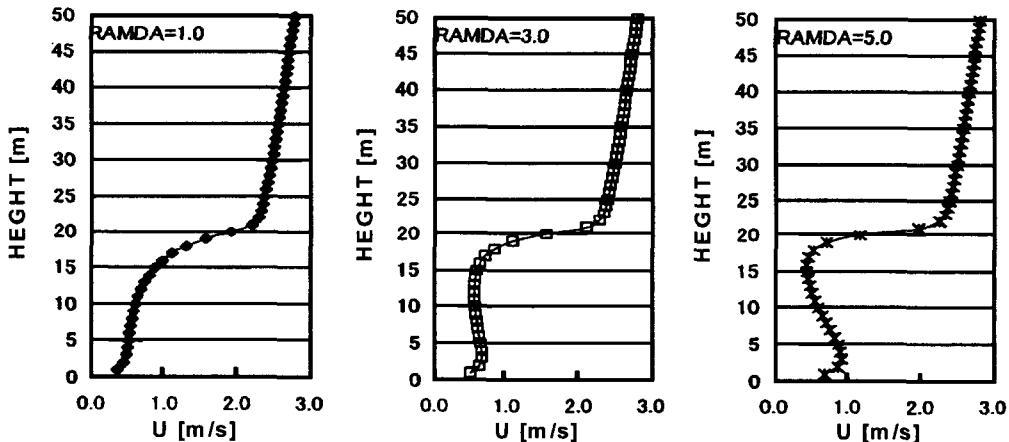


Fig. 5. Vertical profiles of wind speed  $U[\text{m/s}]$  for Case1.

요인이 된다. 또한 역으로  $\text{RAMDA}=5.0$ 의 경우는 식생 상부에서 잎밀도가 높게 되고, 풍속  $U$ 의 감속도 지표면보다 식생상부 부근에서 많은 변화가 생긴다.

식생의 높이 변화를 보기 위한 CASE2의 계산은 식생높이는 0, 10, 20, 30으로 변화하면서 계산한 식생군 중앙부의 풍속  $U$ 의 연직분포를 Fig. 6에 나타내었다.  $VHC=0$ 의 경우는 식생군이 존재하지 않는 것을 의미하고,  $VHC=0$ 의 풍속분포와 비교해서  $VHC=10, 20, 30$  모두 풍속의 감소가 나타남을 알 수 있다. 식생군 상부에는, 유입된 풍속보다 조금 가속하는 경향이 있다. 식생높이가 높을수록 그 가속은 크지만, 식생군 내에서 감속되는 영향이 식생군 상부에 나타남을 알 수 있다.

식생피복율을 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0으로 변화시킨 경우(CASE3)의 식생중앙부의 연직방향  $U$ 분

포를 Fig. 7에 나타내었다. 식생군내에서는 식생피복율이 클수록 풍속의 감소가 작게 나타나고, 또한 피복율이 작을수록 그 풍속감소의 영향이 크게, 식생 저항의 효과가 크게 나타났다.

같은 방법으로 CASE 4인 전체잎면적밀도를 0.0, 0.3, 0.5, 0.8, 1.0로 변화시킨 경우를 Fig. 8에 나타낸다.

전체잎면적밀도는 전체의 잎이 지표면에 떨어지는 경우에 어느정도의 면적이 되는 가를 표시한 것으로, 그 수치가 클수록, 잎이 무성하다는 것을 의미한다. Fig. 8에 보여주듯이 수치가 클수록 감소가 약하다. 또한 식생피복율의 경우와 마찬가지로 0.8과 1.0에는 거의 차이가 나타나지 않고, 저밀도 일수록 풍속은 잎이 무성한 것에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

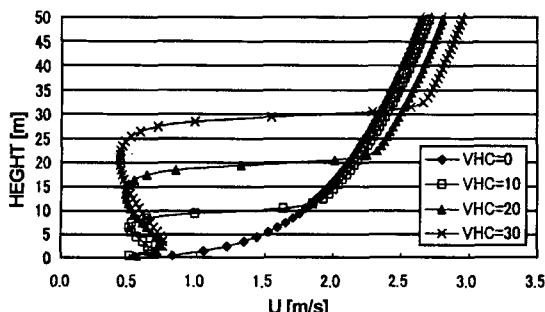


Fig. 6. Vertical profiles of wind speed  $U$  [m/s] for Case2.

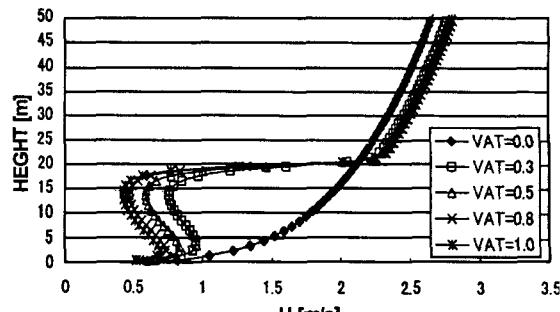


Fig. 8. Vertical profiles of wind speed  $U$  [m/s] for Case4.

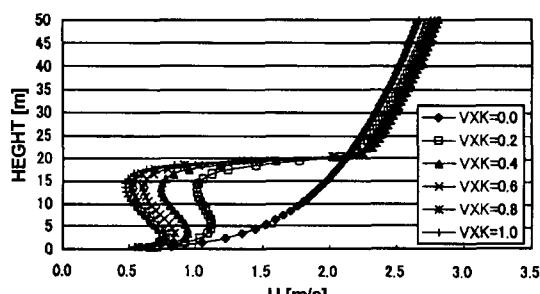


Fig. 7. Vertical profiles of wind speed  $U$  [m/s] for Case3.

## 5. 고찰

식생군이 미기상에 미치는 영향의 파악이 아주 중요하지만, 그 식생군에는 논, 밭 등의 인간이 밟고 있는 것에서부터 산림 등의 인간의 키를 활선 넘는 것, 또는 완전히 지표면을 덮어버리는 것 등 다양한 것이 있다. 여기서는 이러한 다양한 식생군을 수치계산에 반영시킬 수 있는 연직방향의 열수지를 고려한 식생다층모델을 개발하고 그 민감도를 분석하였다. 그 결과, 개발된 식생다층모델을 이용하면 높이별로의 식생의 영향을 평가할 수 있고, 파라미터 설정에 의해 그 식생군의 모델화가 가능하다는 것을 알게 되었다. 또한 이러한 민감도 분석에 의해 모델의 타당성을 인식할 수 있었다. 향후 이러한 결과를 토대로 하여 미기상의 관측을 다양한 식생기상조건에 관해서 수행하고, 많은 관측데이터를 수집하여 본 모델과 비교 분석할 필요가 있다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 2002년도 한국과학재단의 지원에 의하여 수행된 연구의 일부이며 이에 감사 드립니다.  
(R05-2002-000-00668-0)

## 참고문헌

- Raschke, K., 1956, Mikrometeorologisch Gemessene Energiedensitäten eines Alocasiablates, Arch. Meteor. Geophys. Bioklim., B7, 240-268.
- Penman, H. L. and I. F. Long, 1960, Weather in heat; An Essay in Micro-meteorology, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 86, 16-50.
- Monteith, J. L., et al., 1965, Measurement and Control of Stomatal Resistance in the Field, J. Appl. Ecol, 2, 345-355.
- Deardorff, J. W., 1978, Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer of Vegetation, J. Geophys. Res., 83(c4), 1889-1903.
- Garret, A. J., 1982, A Parameter Study of Interaction between Convective Clouds, the Convective Boundary Layer and a Forested Surface, Mon. Weather Rev., 110, 1041-1059.
- McCumber, M. C., 1971, A Numerical Simulation of the Influence if Heat and Moisture Fluxes upon Mesoscale Circulations, Ph D. Dissertation, Univ. of Virginia, Charlottesville.
- Oliver, H. R., Wind, 1971, Profiles in and above a Forest Canopy, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 97, 548-553.
- Hosker, R. P. Jr., et al., 1974, Diurnal Variation of Vertical Thermal Structure in a Pine Plantation, Agricul. Meteor., 13, 259-265.
- Yamada, T., 1982, A Numerical Model Study of Turbulent Airflow in and Above a Forecast Canopy, J. Meteor. Soc. Japan, 60(1), 429-454.
- Kondo, J., et al., 1990, A Parameterization of Evaporation gram Bare Soil Surfaces, J. Appl. Meteor., 29, 385-389.
- Acs, F., et al., 1991, A coupled soil moisture

미기상 수치모의를 위한 다층식 생모델의 식생 파라메타가 바람에 미치는 영향

- and a surface temperature prediction model, J. Appl. Meteor., 30, 812-828.
- 12) Uno, I., et al., 1989, Numerical modeling of the nocturnal urban boundary layer, Bound. Layer Meteor., 49, 77-98.
- 13) Kondo, J. and S. Akashi, 1976, Numerical Study on the two-dimensional flow in horizontal homogeneous canopy layers, Bound. Layer Meteor., 10, 255-272.
- 14) Yamada, T. and G. L. Mellor, 1982, Development of a Turbulence Closure Model for geophysical fluid problems., Review Geophys. and Space Phys., 20, 851-875.