지표면상에서의 열 및 수분수지 특성에 관한 연구

*김 인호[1]　이 성대[2]　이 은태[3]

1. 서론

일반적으로 도시지역을 제외한 육지는 식물에 의해 덮혀 있다고 생각되나 종래의 열수지 문제에 있어서는 식생에 의한 영향을 무시하거나 수분 등을 간단한 상수로서 취급하여 왔다. 식생은 지표면 부근의 기상을 결정하는 중요한 요소로서 그 특성을 명확히 하여 다른 환경에의 영향을 고찰하는 것이 요구된다. 하지만 식물의 잎은 여러 방향으로 향해 있고 식생내부에 공기가 흐름으로 인해 식생환경 중의 온도 변화는 매우 복잡하며 식물의 증산작용에 의해 수분도 복잡하게 변화한다. 본 연구는 지표면을 덮고 있는 식생의 정도를 파라메타화하여 식물의 잎, 지면 그리고 식생내부의 평균습도와 비습, 수분량을 구하기 위한 정식화를 통해 식생환경 내의 열 및 수분수지를 명확히 하고자 한다.

2. 기본 방정식

식생부분을 열의 저장이 무시되는 단층이라고 가정하고 식생에 의한 지면의 피복도를 σ_f라 정의한다. σ_f는 태양광이 지면에 이르는 것을 잎에 의해 차단되는 비율로 나타낸 것이며 $0 < \sigma_f < 1$이다. 여기서 $\sigma_f = 0$은 식생에 의해 태양방사가 완전히 차단되는 상태를 나타낸다.

식생부분을 단층화하고 잎을 그 층의 표면으로 나타내면 f는 식생층의 표면적과 지표면적과의 비로 된다. T는 온도, q는 비습, u는 풍속을, 그리고 첨자 a, f, g, af, 2는 각각 식생상공의 대기에서의 값, 잎에서의 대표값, 지면에서의 값, 식생내부에서의 값 그리고 일일주기의 지표면에서의 변화를 받지 않는 흙내부의 값을 나타낸다.

2.1 잎에서의 대표값 T_f, q_f, W_{dew}

식생상에서의 열 flux의 수지식은 다음과 같다.

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

여기서 S는 태양의 단파방사, R은 장파반사, 화살표는 Flux의 방향, H는 현열(전도)Flux, L_wE는 잠열(증발)Flux이고 첨자 h는 식생상에서의 값을 의미한다. 태양의 단파방사(일사) $S_h\downarrow$는 다음과 같이 쓸 수 있다.[2]

1) 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정
2) 한라공업전문대학 토목과 부교수
3) 경희대학교 토목공학과 교수

$$S_h\downarrow = T_r R_o \cos Z \tag{2}$$

여기서 T_r은 대기의 투과율, R_o는 태양정수 ($= 323.3\ cal/m^2s$), Z는 천정각을 의미한다. 또한 장파반사 $R_h\downarrow$는 다음과 같다.

$$R_h\downarrow = \{C_{cloud} + (1-C_{cloud})0.67(1670\,q_a)^{0.08}\}\,\sigma T_a^{\ 4} \tag{3}$$

여기서 C_{cloud}는 운량, q_a는 식생상에서의 비습, σ는 Stefan-Boltzmann상수, T_a는 식생상에서의 온도를 나타내고 있다. (2), (3)식을 기지로 (1)식의 나머지 항을 $S_h\downarrow$와 $R_h\downarrow$로 나타내면 다음과 같다.

$$S_g\downarrow = (1-\sigma_f)S_h\downarrow \tag{4}$$

$$S_g\uparrow = \alpha_g(1-\sigma_f)S_h\downarrow \tag{5}$$

$$R_g\uparrow = (1-\sigma_f)\{\varepsilon_g\sigma T_g^{\ 4} + (1-\varepsilon_g)R_h\downarrow\} + \sigma_f\frac{\varepsilon_g\sigma T_g^{\ 4} + (1-\varepsilon_g)\varepsilon_f\sigma T_f^{\ 4}}{\varepsilon_f + \varepsilon_g - \varepsilon_f\varepsilon_g} \tag{6}$$

$$S_h\uparrow = (1-\sigma_f)\alpha_g S_h\downarrow + \sigma_f\alpha_f S_h\downarrow \tag{7}$$

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

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

여기서 α_g, ε_g, T_g는 각각 지면에서의 Albedo, 사출률, 온도, 그리고 α_f, ε_f, T_f는 각각 식물의 잎에서의 Albedo, 사출률, 온도를 나타낸다.

(1)식의 우변항을 나타내기 위하여 단위 지면의 면적당 식물의 잎에서 주위의 공기로 향하는 총현열 Flux H_f와 총증발량 E_f를 다음과 같이 정의하면

$$H_f = H_h - H_g, \qquad E_f = E_h - E_g \tag{10}$$

H_f와 E_f는 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.[1]

$$H_f = 1.1\ LA\ \rho_a C_p C_f u_{af}(T_f - T_{af}) \tag{11}$$

$$E_f = LA\ \rho_a C_f u_{af}\{q_{sat}(T_f) - q_{af}\}r'' \tag{12}$$

여기에서 ρ_a는 공기의 밀도 ($= 1.226\ kg/m^3$), C_p는 공기의 정압비열 ($= 239.05\ cal/kg\cdot C^0$), C_f는 잎의 양면에 대한 열수송계수를 나타내며 다음과 같이 주어진다.

$$C_f = 0.01(1 + \frac{0.3}{u_{af}}) \tag{13}$$

그리고 u_{af}는 식생내부의 평균유속, T_{af}는 식생내부의 평균온도이다. LA는 Leaf Area Index를 의미하며 Allen Lemmon[2]은 $LA = 7\,\sigma_f$으로 나타낸다. 그리고 $q_{sat}(T)$는 온도 T에서의 포화비습, r''는 식물의 잎에서의 잠재적인 증산량을 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다.[4]

$$r'' = 1 - \delta_c\frac{r_{stamta}}{r_{stmata} + r_a'}\{1 - (\frac{W_{dew}}{W_{dmax}})^{2/3}\} \tag{14}$$

여기서 r_{stmata}는 기공저항, r_a'은 식생내의 공기저항, W_{dew}는 단위지면에서의 면적당 엽상에 보존되는 액체상태의 수분량, W_{dmax}는 W_{dew}의 최대치이며 이것을 초과하면 잎에서 물아 떨어진다. 그리고 δ_c는 잎에서 응결이 될때 ($q_{af} > q_{sat}(T_f)$)는 0, 그렇지 않을 경우에는 1이 되는 step함수이

다. (2)-(14)식을 이용하여 (1)식을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\sigma_f\{(1-\alpha_f)S_h\downarrow + \varepsilon_f R_h\downarrow + \sigma T_g{}^4\frac{\varepsilon_f\varepsilon_g}{\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g} - \varepsilon_f\sigma T_f{}^4\frac{\varepsilon_f+2\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g}{\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g}\} \\ = LA\rho_a u_{af} C_f[1.1C_p(T_f-T_{af}) + L_w r''\{q_{sat}(T_f)-q_{af}\}] \tag{15}$$

여기서 L_w는 물의 잠열 ($588700 Cal/Kg$, $15°C$)이다.

(15)식은 잎에서의 대표온도 T_f를 구하기 위한 식이지만 이는 T_f의 4차식으로 비선형이다. 따라서 다음과 같은 근사를 통해 선형화한다.

$$(T_f{}^{n+1})^4 = (T_f{}^n)^4 + 4(T_f{}^n)^3(T_f{}^{n+1} - T_f{}^n) \tag{16}$$

$$q_{sat}(T_f{}^{n+1}) = q_{sat}(T_f{}^n) + \frac{\partial q_{sat}(T_f{}^n)}{\partial T_f}(T_f{}^{n+1} - T_f{}^n) \tag{17}$$

(17)식에서 $\frac{\partial q_{sat}}{\partial T_f}$는 Clausius-Clapeyron의 식에서, $q_{sat}(T_f)$는 Tetens의 식[5]으로부터 각각 구할 수 있다. 이 때 (15)식은 다음과 같이 된다.

$$T_f{}^{n+1} = \Big((1-\alpha_f)S_h\downarrow + \varepsilon_f R_h\downarrow + \sigma T_g{}^4\frac{\varepsilon_f\varepsilon_g}{\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g} + 3\varepsilon_f\sigma(T_f{}^n)^4\frac{\varepsilon_f+2\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g}{\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g} \\ + 7.7\rho_a C_p C_f u_{af} T_{af} - 7L_w\rho_a C_f u_{af} r''\{q_{sat}(T_f{}^n) - \frac{\partial q_{sat}(T_f{}^n)}{\partial T_f}T_f{}^n - q_{af}\}\Big) \\ \div \Big(7L_w\rho_a C_f u_{af} r''\frac{\partial q_{sat}(T_f{}^n)}{\partial T_f} + 7.7\rho_a C_p C_f u_{af} + 4\varepsilon_f\sigma(T_f{}^n)^3\frac{\varepsilon_f+2\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g}{\varepsilon_f+\varepsilon_g-\varepsilon_f\varepsilon_g}\Big) \tag{18}$$

이 때 (18)식으로 부터 잎에서의 대표온도 T_f를 구할 수 있다.

잎 표면근처의 대표비습 q_{af}는

$$q_f = r''q_{sat}(T_f) + (1-r'')q_{af}, \qquad q_f \ll q_{sat}(T_f) \tag{19}$$

q_f로 되며 또한 단위지면 면적당 잎 표면에서의 수분량 W_{dew}는

$$\frac{\partial W_{dew}}{\partial t} = \sigma_f P - (E_f - E_{tr}), \qquad 0 \le W_{dew} \le W_{dmax} \tag{20}$$

이고 여기서 P는 강우량이다. 상기식에서 $E_f - E_{tr}$은 잎에서의 증발 또는 응결량을 의미하고 있다. (20)식을 시간 t에 대해 선형화하면 W_{dew}에 대해 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$W_{dew}{}^{n+1} = W_{dew}{}^n + \{\sigma_f P - (E_f - E_{tr})\}\Delta t \tag{21}$$

여기에서 Δt는 시간 step이다.

2.2 지면에서의 값 T_g, q_g, W_g

지면의 온도 T_g를 구하기 위해서는 (1) 다층화 모델에 의한 방법, (2) T_f와 같이 Energy수지식에 의한 방법 등이 있으나 여기서는 계산이 간단하면서도 다층화 모델과 정도가 거의 비슷한 Bhumralkar[6]에 의한 방법을 사용한다. 이 방법은 지표면에서의 Flux G를 지중에서의 온도 T_2를

포함한 복원항에 의해 수정하기 때문에 Force Restore법이라고 한다.

지면에서의 에너지수지식은 지면에서의 열 Flux를 G라 두면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G = H_g + L_w E_g - (1-\alpha_g) S_g\downarrow + R_g\uparrow - R_g\downarrow \tag{22}$$

여기서 $S_g\downarrow$, $R_g\uparrow$, $R_g\downarrow$는 각각 (4), (6), (9)식에서 구할 수 있으며 지면의 Albedo α_g는 지면의 수분함량의 함수로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.[7]

$$\alpha_g = \begin{cases} 0.31 \sim 0.17\,(W_g / W_k) & W_g \le W_k \\ 0.14 & W_g > W_k \end{cases} \tag{23}$$

지면에서의 현열 Flux H_g와 증발량 E_g는 다음 식으로 부터 구할 수 있다.

$$H_g = \rho_g C_p C_{Hg} u_{af} (T_g - T_{af}) \tag{24}$$

$$E_g = \rho_a C_{Hg} u_{af} (q_g - q_{af}) \tag{25}$$

식물에 의해 덮혀있는 부분을 지면상의 층이라 생각하면 열 및 수분의 수송계수는 식생하의 지면에서의 값 C_{Hg} 와 식생하에서의 값 C_{Hh}및 나지에서의 값 C_{Ho}와 구별해야만 한다. 여기서는 식으로 부터 C_{Hg}를 구한다.

$$C_{Hg} = (1-\sigma_f) C_{Ho} + \sigma_f C_{Hh} \tag{26}$$

흙의 특성은 흙의 종류보다는 흙의 수분량에 의해 더 크게 지배된다는 개념으로 부터 흙의 수분함수량 W_g와 W_2에 의해 좌우되는 열전도율 λ와 $\rho_g C_g$를 다음과 같이 정식화한다.[4]

$$(\rho C)_g = 0.27 + W_g, \qquad (\rho C)_2 = 0.27 + W_2 \tag{27}$$

$$\lambda_g = 0.001 + 0.004\,(W_g)^{1/3}, \qquad \lambda_2 = 0.001 + 0.004\,(W_2)^{1/3} \tag{28a}$$

$$d_{1g} = \left\{\frac{\tau_1 \lambda_g}{(\rho C)_g}\right\}^{1/2}, \qquad d_{12} = \left\{\frac{\tau_1 \lambda_2}{(\rho C)_2}\right\}^{1/2} \tag{28b}$$

여기서 d_1은 1일 주기로 온도변화를 받는 깊이 (cm), τ_1은 1주기 (=86400 sec)이다.

지표면의 값과 지표면의 영향을 받지않는 토중에서의 값이 현저히 다른 경우는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned} r' &= 0.3 + 0.05\,(W_g / W_2) \qquad 0.3 < r' \le 1 \\ \rho_s C_s d_1 &= r'(\rho C)_g d_{1g} + (1-r')(\rho C)_2 d_{12} \end{aligned} \tag{29}$$

(29)식에서 얻어진 $\rho_s C_s d_1$을 이용하여 force restore법에 의해 T_g를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = C_1 \frac{G}{\rho_s C_s d_1} - C_2 \frac{T_g - T_2}{\tau_1} \tag{30a}$$

이 식을 선형화하면

$$T_g^{\,n+1} = \{T_g^{\,n} + \Delta t(\frac{C_1 G}{\rho_s C_s d_1} + \frac{C_2 T_2}{\tau_1})\} / (\Delta t \frac{C_1}{\tau_1} + 1) \tag{30b}$$

이 되고 지표면에서의 열 Flux G가 없으면 T_g는 지수적으로 흙속의 평균온도로 복원하게 된다.

1일 주기의 변화를 하지 않는 깊이의 흙속에서의 온도 T_2는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{G}{\rho_s C_s d_2} \tag{31a}$$

여기서 d_2는 1년 주기의 온도변화를 받는 깊이 $(=365 K_s \tau_1)^{1/2}$, K_s는 흙의 열확산 계수를 나타내며 (31a)식을 선형화하면 다음과 같이 된다.

$$T_2^{n+1} = T_2^{n} + \frac{G}{\rho_s C_s d_2} \Delta t \tag{31b}$$

(30b), (31b)식에 의해 지면온도 T_g와 1주일 주기의 지면의 영향을 받지 않는 깊이에서의 온도 T_2를 구할 수 있다. 지면에서의 비습 q_g는 다음에 의해 구한다.

$$q_g = \alpha' q_{sat}(T_g) + (1-\alpha') q_{af} \qquad q_g \leq q_{sat}(T_g) \tag{32}$$

여기서 α'은 흙표면에서의 포화도이다.

흙의 수분함수율을 W라 하면 지면에서의 W는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial W_g}{\partial t} = -C_1 \frac{E_g + 0.1E_{tr} - P_g}{\rho_w d_1'} - C_2 \frac{W_g - W_2}{\tau_1} \qquad 0 \leq W_g \leq W_{\max} \tag{33a}$$

여기서 E_{tr}은 잎에서의 증산량, ρ_w는 물의 밀도, d_1'은 1일 주기의 수분 함수량의 변화를 나타내는 깊이, W_2는 수분 Flux를 무시할 수 있는 깊이에서의 수분량 평균치, $W_{\max}$는 w의 최대치이며 W_g가 $W_{\max}$를 초과하는 경우는 지표면에서 물이 흘러 넘친다. 상기식을 선형화하면

$$W_g^{n+1} = \{\Delta t (C_1 \frac{E_g + 0.1E_{tr} - P_g}{\rho_w d_1'} + C_2 \frac{W_2}{\tau_1} + W_g^{n})\}/(1 + C_2 \frac{\Delta t}{\tau_1}) \tag{33b}$$

이 되고 여기서 계수 C_1, C_2및 d_1', d_2'은 흙의 특성에 따른 상수이다. 또 w_2는

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = -\frac{E_g + E_{tr} - P_g}{\rho_w d_2'} \qquad 0 \leq W_2 \leq W_{\max} \tag{34a}$$

$$W_2^{n+1} = W_2^{n} - \frac{E_g + E_{tr} - P_g}{\rho_w d_2'} \Delta t \tag{34b}$$

로 부터 구한다. 여기서 P_g는 지면에 도달하는 강우량으로서 다음과 같다.

$$P_g = \begin{cases} P(1-\sigma_f) & W_{\max} < W_{dmax} \\ P & W_{dew} \geq W_{dmax} \end{cases} \tag{35}$$

(35)식에서 강우에 의한 물방울이 W_{dmax}를 초과할 때까지는 잎에 보존되고 W_{dmax}를 초과하면 지면을 흐른다는 것을 의미하고 있다.

2.3 식생내부에서의 값 T_{af}, q_{af}, u_{af}

식생내부에서의 바람은 지면에서의 열과 수분 Flux를 잎에 운반하고 환기를 한다. 이때 식생내부의 바람을 u_{af}라 정의하면 다음 식과 같이 된다.

$$u_{af} = 0.83 \sigma_f C_{Hh}^{1/2} u_a + (1-\sigma_f) u_a \tag{36}$$

여기서 u_a는 식생상공에서의 풍속이다. 만일 식생이 없는 경우라면 $u_{af} = u_a$ 가 되고 $\sigma_f = 1$이면 $u_{af} = 0.83 C_{Hh}^{1/2} u_a$가 된다. 식생에 근접한 곳에서의 공기는 식생상공과 식생의 표면 및 지표근방에서의 공기와의 사이에 있다고 생각되므로 이곳에서의 온도 및 비습은 다음과 같이 된다.

$$T_{af} = (1-\sigma_f)T_a + \sigma_f(0.3T_a + 0.6T_f + 0.1T_g) \quad (37)$$

$$q_{af} = (1-\sigma_f)q_a + \sigma_f(0.3q_a + 0.6q_f + 0.1q_g) \quad (38)$$

여기서 T_{af}와 q_{af}는 각각 식생내부에서의 평균온도와 평균비습을 나타내며 T_{af}와 q_{af}는 $\sigma_f = 0$이면 T_a와 q_a가 된다.

2.4 초기조건 및 정수의 영향

초기조건은 계산이 정상주기라고 가정하여 먼저 경험적으로 적당하다고 생각되는 수를 초기치로 주어 2일간 계산하여 2일째의 같은 시각(08:00)의 값을 1일째의 계산 개시시각(08:00)의 값으로 주어 계산을 다시 하였다. 이렇게 하여 초기조건을 설정하고 3-4일째까지 행한 결과 수분함유량 W이외는 거의 주기적으로 정상이 됨을 확인하였다.

사출률, Albedo에 대해 $\varepsilon_f = \varepsilon_g = 0.95$, $\alpha_f = 0.20$으로 하여 α_g는 (24)으로 부터 계산하였다. 열 및 수분의 수송계수 C_{Ho}와 C_{Hh}는 각각 다음과 같이 하였다.[8)]

$$C_{Ho} = 0.0057, \qquad C_{Hh} = 0.0096$$

그리고 수분량에 관계되는 정수는 다음과 같이 하였다.[1)]

$$W_k = 0.3, \quad W_{\max} = 1.33\,W_k, \quad W_{dmax} = \sigma_f(kg/m^2)$$

3. 결 론

지표면을 덮고 있는 식생환경을 단층으로 가정하고 파라메타화하여 식물의 잎과 지면, 그리고 식생내부의 평균온도와 비습, 수분량을 구하기 위한 정식화를 행하였으며 여러가지 정수를 변화시켜 수치계산한 결과 본 식생모델은 실제의 식생환경을 대체로 타당성있게 예측하고 있음을 알 수 있었다. 또한 정수의 변화에 의해 열 및 수분량은 크게 영향을 받고 있으며 특히 σ_f의 변화에 의한 계산결과는 예상했던 바와 같았으며 이로 부터 본 모델이 정성적으로 정당성이 있음을 확인하였다. 바람은 일반적으로 온도차에 의한 압력차에 의해 발생하므로 해륙풍이나 중규모(Mesoscale) 국지풍의 예측에 이 논문에서 제안한 식생모델을 고려한다면 보다 실제에 가까운 예측이 가능하리라 판단된다.

4. 참고문헌

1. Deardorff, J.W. : Efficient Prediction of Ground Surface Temperature and Moisture with Inclusion of a Layer of Vegetation, J. Goephy. Res., Vol 83, 1978, pp 1889-1903.

2. Myrup, L.O. : A Numerical Model of Urban Heat Island, J. Appl. Meteor., Vol 60, 1982, pp 429-454.

3. Allen, L.H. and Lemon, E.R. : Net Radiation Frequency Distribution in a Corn Corp., Boundary Layer Meteor., Vol. 3, 1972, pp246-254.

4. 今成岳人 : 植生環境におけるしなは熱水分収支および大氣汚染物質の沈着に關する研究, 大阪大學工學碩士論文, 1989, 150pp.

5. 新田尙 : 大氣大循環論, 東京堂出版, 1980, 438pp.

6. Bhumralkar, C.M. : Numerical Experiments on the Computation of Ground Surface Temperature in an Amospheric General Circulation Model, J. Appl. Meteor.,Vol 14, 1975, pp 1246-1258.