

경사진 산림지형에서의 자연유동에 대한 수치해석

윤현기[†] · David E. Stock^{*} · 유기수^{**} · 정명균^{**}
 (2007년 7월 10일 접수, 2007년 12월 6일 심사완료)

Numerical Simulation of the Flow Patterns with Sloping Forest Canopies

Hyungi Yoon, David E. Stock, Kisoo Yoo and Myungkyoon Chung

Key Words : Forest Canopy(임관), Leaf Area Density(잎 면적밀도), Katabatic Flow(하강기류), Anabatic Flow(상승기류), Radiation(복사), Atmospheric Boundary Layer(대기경계층)

Abstract

Diurnal variation of the flow over a forest canopy on a mountain slope is simulated numerically. In the daytime, the earth surface is heated by the solar radiation and the flow goes up the mountain due to the buoyancy force, and during the night, the air is drained downward along the slope owing to the cooling of the surface by radiation. In this flow process the forest canopy that consists of leaf region and the trunk region plays a dominant role as a momentum sink to the flow, thus the modeling of the leaf area region and trunk region is critical to the successful flow simulation. In the present study, a field measurement in an experimental forest in the State of Oregon in the United States is numerically analyzed. The resistance to the flow in the leaf region is directly related to the leaf area density (LAD), and the trunk is modeled as a cylinder.

기호설명

β	: 열 팽창 계수[K ⁻¹]
$a(z)$: 잎 면적밀도[m ⁻¹]
$b(z)$: 줄기 둘레밀도[m ⁻¹]
$s(z)$: 잡목 면적밀도[m ⁻¹]
$C_{d, leaf}$: 잎의 유효 항력계수[-]
$C_{d, trunk}$: 줄기의 유효 항력계수[-]
$C_{d, scrub}$: 잡목의 유효 항력계수[-]
D	: 나무단면의 지름[m]
$S_{i, Leaf}$: 잎 부분 항력항[m/s ²]
$S_{i, Trunk}$: 줄기 부분 항력항[m/s ²]
$S_{i, Scrub}$: 잡목 부분 항력항[m/s ²]
Θ	: 온도[K]

α	: 손실계수[-]
I	: 복사열유속[W/m ²]
Q_r	: 복사에너지[W/m ³]

1. 서론

우리나라 대부분의 도시지역은 산으로 둘러싸여 있으며 도시지역의 자동차, 공장, 주거단지 등에서 NO_x, SO_x와 같은 대기오염물질이 지속적으로 배출된다. 도시를 둘러싼 산을 도식화한 Fig. 1의 산등성이에서는, 낮 시간에는 태양 복사로 인해 상승기류(anabatic flow)가 발생하고 밤 시간에는 지면과 대기에서의 복사 냉각으로 인해 하강기류(katabatic flow)가 발생한다. 도시지역에서 발생된 오염물질은 산등성이에서 발생하는 상승기류와 하강기류의 반복적인 유동으로 인해 시간이 지남에 따라 산의 특정 높이에 쌓이게 되어 그 지역에 심각한 대기오염을 야기하게 된다. 미국 서부 Seattle

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
 E-mail : hyungi@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3054 FAX : (042)869-3054

^{*} Washington State University, Mechanical Engineering

^{**} 회원, 한국과학기술원 기계공학과

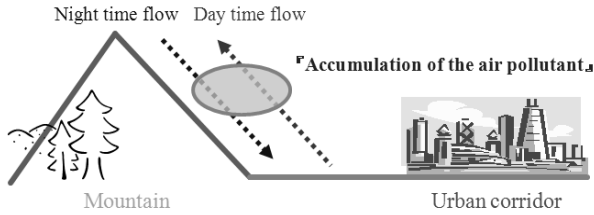


Fig. 1 Air pollutant belt in mountain slope

의 Mt. Rainier 에서는 위와 같은 환경오염이 발생하여 사회적인 문제가 되고 있다. 이와 같은 대기 오염의 원인을 규명하기 위해서는 산림지역에서 발생하는 유동을 이해해야 한다.

일반적으로 산에서의 유동형태는 시간의 흐름에 따라 주간 유동(daytime flow)과 저녁 천이(evening transition), 야간 유동(nighttime flow), 아침 천이(morning transition) 4 가지로 나뉘어진다.⁽¹⁾ 이중 야간 유동은 배수 유동(drainage flow) 혹은 중력 유동(gravity flow)이라 불리기도 한다. 주간 유동 시에는 태양 복사로 인해 산등성이를 따라 상승기류가 발생하지만, 이른 아침과 늦은 오후 시간에는 지면의 복사 냉각으로 인해 숲의 줄기 부분에서 하강기류가 발생하기도 한다. 저녁 천이 시간에는 지면과 대기에서의 복사냉각으로 인해 배수 유동이 발달하기 시작하며, 대기중의 공기가 수직방향으로 잘 섞이게 된다. 야간 유동 시엔 배수 유동이 지배적으로 나타난다. 아침 천이 시에는 태양 복사가 강해지면서 상승기류가 발생하게 된다.

산림지형에서의 유동과 온도변화는 복사에너지의 영향이 지배적이다. 이를 바탕으로 이론적·실험적 연구들이 이루어져왔다. Mahrt 등⁽²⁻⁵⁾은 경사면에서의 유동을 보시네스크 가정(Bosinesque approximation)과 코리올리 힘(Coriolis' force)이 포함된 2 차원 운동량 방정식을 이용하여 표현하였으며 방정식에 포함된 각 항들을 비교하여 중력과 경사도에 따른 영향을 고찰하였다. 또한 계곡과 산림지형에서의 실험을 통해 시간에 따른 공기의 유속, 온도 변화, 열 유속 등을 측정하여 산림지형에서의 유동을 체계적으로 설명하였다. Yi 등⁽⁶⁾은 나뭇잎을 항력항으로 모델링 하여 나뭇잎이 유동에 미치는 영향을 운동방정식과 수치해석을 이용해 해석하였고 실험자료와의 비교를 통해 모델의 타당성을 확인하였다. Poulos 등⁽⁷⁾은 산림지형에서의 유동을 지형적 영향에 의한 유동과 복사에너지에 의한 유동으로 분리하여 수치해석을 수행하였고 Froude 수의 변화에 따른 유동 형태를 정리하였다. Smith 등⁽⁸⁾은 지면의 복사냉각을 고려하여 숲이 없는 경사면에서의 하강기류를 LES(Large Eddy Simulation)을 이용하여 해석 하였다. 이때 지

면의 복사냉각은 지면에서의 (-)열유속을 이용해 표현하였으며 대기에서의 복사 냉각은 고려하지 않았다. Komatsu 등⁽⁹⁾은 태국 치앙마이의 산림지역에서 1 년간의 실험을 통해 계절의 변화에 따른 유동 형태를 정리 하였다. 실험자료를 통해 경사면에서의 상승기류와 하강기류 발생이 낮과 밤의 온도차이가 뚜렷한 여름에 많이 나타남을 보였다.

산림지형에서의 유동을 해석하기 위해서는 숲과 복사에너지의 모델링이 필요하다. 숲 지역은 바람의 속도를 줄여주며 난류를 생성하기도 하고 소멸시키기도 한다. 또한 숲 내부의 온도를 유지시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 숲을 잎 부분(leaf area), 줄기 부분(trunk region), 잡목 부분(scrub tree area)으로 나누어 모델링 하였다. 잎 부분은 잎 면적 밀도(leaf area density, LAD)와 잎에서의 유효 항력 계수(effective drag coefficient, $C_{d, leaf}$)을 사용하여 표현하였다. 잎 면적 밀도는 숲의 단위 부피당 잎의 한쪽 면이 차지하는 총 면적을 나타낸 것으로 실험을 통해 얻을 수 있다. 줄기 부분은 줄기를 원형 실린더로 가정하여 모델링 하였다. 잡목 부분은 잎 부분과 줄기 부분의 항력 값을 이용하여 직선으로 모델링 하였다. 산림지형에서의 유동과 온도변화의 원인이 되는 낮 시간 태양 복사 에너지와 밤시간 지면과 대기의 복사 냉각 에너지는 대기에서의 에너지 생성/손실로 표현하였다.

숲과 대기의 모델을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 산림지형 경사면에서의 유동 형태 및 온도변화를 해석하였다. 수치해석에는 상용프로그램인 Fluent를 사용하였으며 미국 서부 Oregon주의 Western Cascade 산맥의 Watershed 1, H. J. Andrews Experimental Forest⁽¹⁰⁾을 기초로 하였다. 본 연구는 자연현상에 대한 기초적인 연구로서 생태계 신진대사, 국지적인 기후예측 모델, CO₂ 및 오염물질의 이동과 확산예측 등 다양한 분야에 응용될 수 있다.⁽¹¹⁾

2. 숲의 모델링

대기경계층(atmospheric boundary layer, ABL)은 지면을 둘러싸고 있는 대기층에서 지면의 영향을 직접적으로 받는 부분을 말한다. 이때 지면은 대기에서 경계면 역할을 하게 된다. 대기경계층에서 보시네스크 가정을 도입한 운동량 방정식에 숲을 모델링 한 항력항 S_i 을 넣으면 산림지역에서의 운동량 방정식 (1)을 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial (P - P_a)}{\partial x_j} + \beta_a (T - T_a) g \delta_{ij} + \nu_a \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} + S_i \quad (1)$$

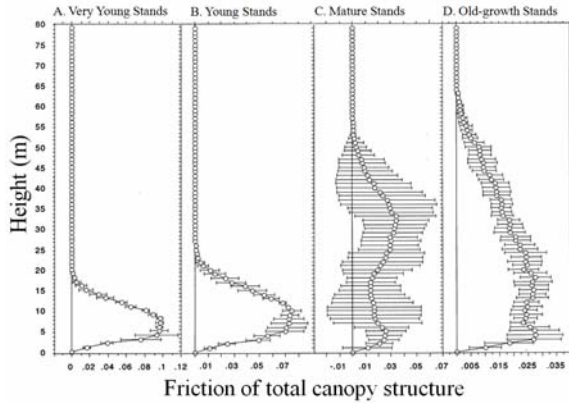


Fig. 2 Vertical distribution of leaf area density of Douglas-fir of different age. (Lefsky et al.⁽¹⁴⁾)

식 (1)에는 큰 규모의 대기 유동에서 고려되는 코리올리 힘이 포함되어 있지 않는데, 이는 코리올리 힘이 편향풍(geostrophic wind)에서는 매우 중요한 의미를 갖지만 본 연구와 같은 작은 규모의 유동 해석에 있어서는 그 효과가 무시되기 때문이다. 숲은 대기경계층에서 약 10% 정도의 높이를 차지하기 때문에 숲을 단순히 표면 거칠기로 표현하는데 한계가 있다. 따라서 숲은 운동량 방정식의 항력 항으로 표현해야 한다. 숲에서의 항력을 나타내는 항력항 S_i 는 잎 부분 항력항 $S_{i, Leaf}$, 줄기 부분 항력항 $S_{i, Trunk}$ 와 잡목 부분 항력항 $S_{i, Scrub}$ 으로 나뉘어진다.

2.1 잎 부분의 항력

잎 부분의 항력은 잎이 차지하는 면적에 크게 의존하며 Thom⁽¹³⁾에 의해 식 (2)와 같이 제안되었다.

$$S_{i, Leaf} = -C_{d, Leaf} a(z) u_i^2 \quad (2)$$

따라서 잎 면적 밀도 $a(z)$ 와 잎의 유효 항력 계수 $C_{d, Leaf}$ 을 알면 잎 부분의 항력을 구할 수 있다.

Fig. 2는 레이더 측정 방법을 통해 얻은 자료로 미국 서부 Oregon주의 Cascade 산맥에 식생 하는 미국 소나무의 잎 면적 밀도를 수령에 따라 나타낸 것이다.⁽¹⁴⁾ 실험 장소인 Watershed 1의 미국 소나무 수령은 대부분 20~30년으로써 B그룹의 Young stands에 속한다.⁽¹⁵⁾

Fig. 2의 x축은 전체 숲을 기준으로 구한 잎 면적 밀도 값을 나타낸다. 그러나 잎 부분의 항력을 구하기 위한 잎 면적 밀도는 Young stands을 기준으로 구한 값이어야 한다. 대부분의 경우 수령에

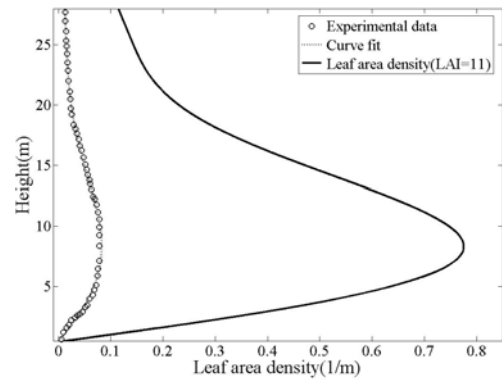


Fig. 3 The vertical profile of the leaf area density, scaled to have LAI=11(Moore et al.⁽¹⁶⁾)

따른 잎 면적 밀도 값은 실험 값으로 주워진다. 그러나 본 연구에서는 수령에 따른 잎 면적 밀도 자료가 없어서 전체 숲을 기준으로 구한 잎 면적 밀도 값을 사용하였는데, 이는 전체 숲을 기준으로 한 잎 면적 밀도의 형태와 Young stands을 기준으로 한 잎 면적 밀도의 형태는 동일하기 때문이다. 따라서 Fig. 2의 Young stands 값을 사용하여 높이에 대한 함수 $f(y)$ 를 구한 뒤에 그 식에 적절한 유효상수 a_{eff} 을 곱하면 식 (3)과 같이 Young stands을 기준으로 한 잎 면적 밀도 값을 구할 수 있다.

$$a(z) = a_{eff} \cdot f(y) \quad (3)$$

식 (3)의 a_{eff} 구하기 위해서 잎 면적 지수(leaf area index, LAI)⁽⁶⁾을 이용하였다. 잎 면적 지수는 식 (4)와 같이 잎 면적 밀도를 높이 방향으로 적분한 값으로 단위 면적당 잎의 한쪽 면이 차지하는 총 면적을 나타낸다.

$$LAI = \int_{z_0}^{z_h} a(z) dz \quad (4)$$

실험을 통해 얻은 Watershed 1의 잎 면적 지수 값은 11이다.⁽¹⁶⁾ 식 (4)의 우측항의 값이 11이 될 때까지 유효상수의 값을 변화시키면서 적분을 수행하여, LAI=11이 되는 유효상수 a_{eff} 을 구하였다.

이 유효상수를 식 (3)에 대입하여 얻은 Young Stands을 기준으로 한 잎 면적 밀도는 Fig. 3의 실선과 같다. Fig. 3의 작은 원은 Fig. 2의 Young stands에서 얻은 값이고 점선은 이 값을 사용해 얻은 $f(y)$ 이다.

잎의 유효 항력 계수는 식 (5)와 같이 Amiro⁽¹⁷⁾와 Massman⁽¹⁸⁾이 제시한 상수 값을 사용하였다.

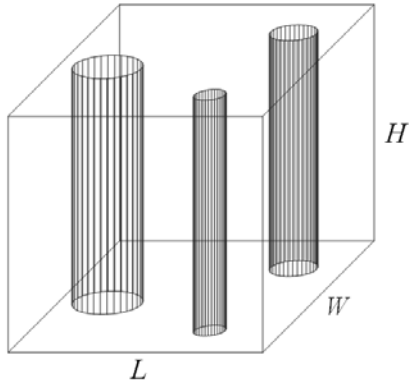


Fig. 4 Trunk region model

$$C_{d, leaf} = 0.3 \tag{5}$$

2.2 줄기 부분의 항력

Young stands 미국 소나무에서 줄기 부분이 차지하는 높이는 대략 4m 에서부터 9m 까지 이다. 줄기 부분의 항력항은 (6)과 같이 표현 하였다.

$$S_{i, Trunk} = -C_{d, trunk} b(z)u_i^2 \tag{6}$$

줄기 둘레밀도 $b(z)$ 을 구하기 위해 Fig. 4 와 같이 일정 지역을 나무 줄기가 차지하고 있다고 가정하였다. 이때 줄기 하나하나를 원형실린더로 가정하였다. 줄기 둘레밀도는 단위 면적당 줄기의 총 둘레길이를 나타내며 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(z) = \frac{\sum_j (\pi D_j)}{L \cdot W} \tag{7}$$

식 (7)에서 높이 H항이 없는 이유는 높이에 따른 나무 단면의 지름은 일정하다고 가정하였기 때문이다. 실험자료를 바탕으로 나무 단면 지름의 합($\sum D_j$) 10m, 가로(L)와 세로(W)방향의 길이 40m 을 얻었으며,⁽¹⁵⁾ 이를 식 (7)에 대입하여 줄기 둘레 밀도 $b(z) \cong 0.02m^{-1}$ 을 구하였다.

줄기 부분의 유효 항력 계수는 식 (8)과 같이 상수를 사용하였다.

$$C_{d, trunk} = 4 \tag{8}$$

2.3 잡목 부분의 항력

숲에서 잡목 부분은 지면에서부터 3m 정도까지 이다. 잡목 부분의 항력항은 식 (9)와 같이 나타

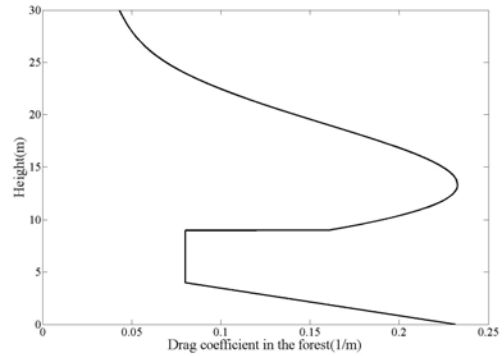


Fig. 5 The vertical profile of the drag coefficient in the forest

내었다.

$$S_{i, Scrub} = -C_{d, scrub} s(z)u_i^2 \tag{9}$$

잡목 면적밀도 $s(z)$ 는 직선으로 모델링 하였으며, 지면에서 가장 큰 값을 가지고 줄기 부분과 만나는 지점에서는 가장 작은 값을 가진다. 지면에서의 값은 잎 부분 항력계수에서 가장 큰 값을 사용하였으며 줄기 부분과 만나는 곳은 줄기 부분 항력 계수와 같은 값을 사용하였다. 이를 바탕으로 구한 잡목 면적 밀도의 분포를 식 (10)에 나타내었다.

$$s(z) = -0.019 \times h + 0.116 \tag{10}$$

잡목 부분의 유효 항력 계수는 식 (11)과 같이 상수를 사용하였다.

$$C_{d, Scrub} = 1 \tag{11}$$

2.4 숲의 항력 모델

지금까지 Watershed 1, Experimental Forest 의 잎 부분, 줄기 부분과 잡목 부분의 항력 모델에 대해 알아 보았다. 이를 바탕으로 얻은 높이에 따른 숲의 항력 모델을 Fig. 5 에 나타내었다. 지면(0m)에서 4m 까지는 $S_{i, Scrub}$ 모델을, 4m 에서 9m 까지는 $S_{i, Trunk}$ 모델을, 9m 에서 숲의 정상(30m)까지는 $S_{i, Leaf}$ 모델을 사용하였다. 전체적인 그래프의 모습이 나무의 모습과 비슷한 것을 볼 수 있다.

3. 수치해석

일반적으로 대기 유동은 비압축성 유동이다. 그

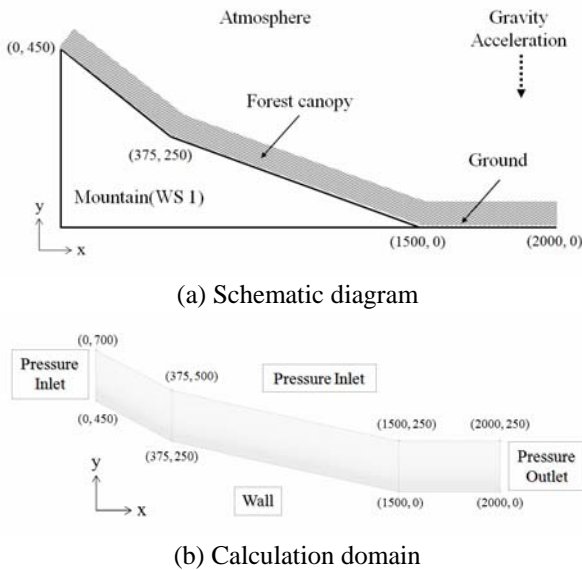


Fig. 6 Schematic diagram and calculation domain of Watershed1 of experimental forest

이유는 대기 속으로 공기가 유입되거나 유출되면 대기 안의 공기 밀도는 높아지거나 낮아지게 되나 대기가 다른 경계 조건에 의해서 구속되어 있지 않는 한 빠른 속도로 평형을 이루기 때문이다. 수치해석시의 온도 조건은 실제 온도가 아닌 온위 (potential temperature)를 사용하였다. 온위란 대기중의 공기를 건조 단열 과정으로 1 bar의 기압까지 옮겼을 때의 온도로 정의 된다. 온위는 단열조건 하에서 열역학 제 1 법칙으로부터 얻어진다. 건조 단열과정의 대기 조건에서 온위 체감률(lapse rate)은 식 (12)과 같다.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z} \equiv \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} = 0 \quad (12)$$

식 (12)을 통해 온위는 높이에 무관한 함수임을 알 수 있다. 이는 수치해석에 있어서 초기값 설정에 매우 유용하다. 위의 관계를 이용하여 수치해석 시에 전체 대기온도의 초기값을 일정하게 주었다.

2 차원 비정상 비압축성 난류유동의 수치해는 상용코드인 Fluent 를 사용해 얻었다. 난류 모델은 부력효과(Buoyancy effect)를 고려한 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 수치해석 알고리즘은 PISO 방법을 사용하였다. 정상상태의 해를 얻기 위해서는 SIMPLE 계열의 방법을 많이 사용하지만 본 연구와 같이 비정상 유동의 경우에는 PISO 방법을 사용하는 것이 더욱 효과적이기 때문이다.

계산영역은 Fig. 6 에 나타난 것처럼 산의 지면에서부터 250m 높이까지 이다. 숲의 높이는 지면에서 30m 까지이며 운동량 방정식의 항력항으로 표현하였다. 산 정상을 기준점(x=0)으로 봤을 때, 약 x=375m 지점에 경사가 변하는 곳이 존재한다.

격자 형상의 크기는 Fig. 6 에서와 같이 x-방향으로 2,000m 이고 y-방향으로는 700m 이다. x-방향의 격자 점은 240 개이며, 격자 간격은 10m 이다. y-방향의 격자 점은 150 개이며, 격자 간격은 지면에서 첫 번째 격자까지는 0.03m 이고, 일정비율로 증가한다.

초기 속도는 0 으로 하였으며, 대기의 상태는 에너지 생성 및 손실로 표현하였다.

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 시간에 따른 유동형태

밤 시간의 대기에서는 복사 냉각이 일어나며, 밤이 깊어질수록 그 크기는 커진다. 본 연구에서는 대기의 복사 냉각을 에너지 손실을 이용하여 표현하였다. 높이에 따른 에너지 손실은 같다고 가정 하였으며 시간에 따른 에너지 손실의 크기는 식 (13)과 같이 모사하였다.

$$Heat\ energy\ (W/m^3) = -0.38 \times \left(\frac{t(\text{sec})}{10000} \right)^{0.7} \quad (13)$$

반면 낮 시간의 대기에는 태양 복사 에너지가 공급된다. 실험 자료를 통해 밤 시간과 낮 시간의 열유속의 절대값 크기를 비교해보면 낮 시간이 밤 시간보다 약 3 배 정도 큰 값을 가진다.⁽⁴⁾ 따라서 낮 시간 에너지 생성의 크기를 밤 시간 에너지 손실의 크기보다 약 3 배 정도 큰 값을 주었다.

낮 시간 숲에서의 높이에 따른 에너지 생성 분포는 Brown과 Covey⁽²⁰⁾가 제안한 식 (14)을 사용하였다.

$$Q_r(z) = \frac{dI(z)}{dz} \quad (14)$$

Where $I(z) = I_H \exp(-\alpha C)$

$$C = \int_{z_0}^h a(z) dz$$

소멸 계수 α 의 값은 0.6, 숲 정상에서의 단위 면적당 에너지 흡수율 I_H 는 $0.4W/m^2$ 를 사용하였다. 잎 면적 밀도 값은 2.1 절의 식 (3)에서 구한 값을 사용하였다. 위의 값들을 이용하여 낮 시간 숲에서의 에너지 생성 분포를 구하면 Fig. 7 과 같

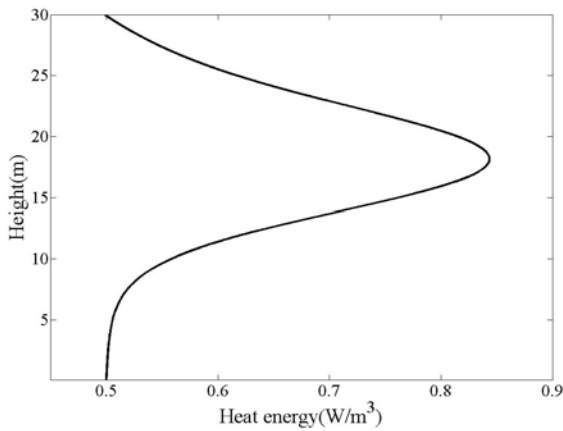


Fig. 7 Vertical profile of the solar heat source

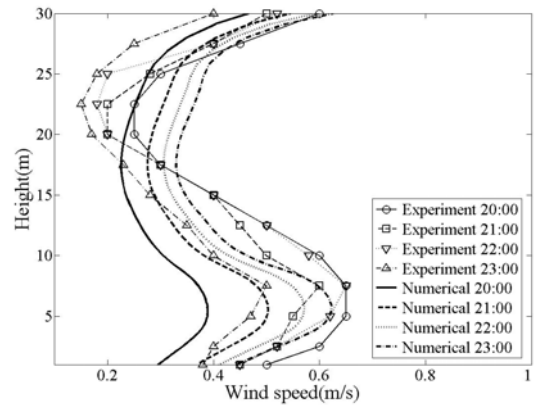


Fig. 9 Variation of vertical profile of wind speed with time

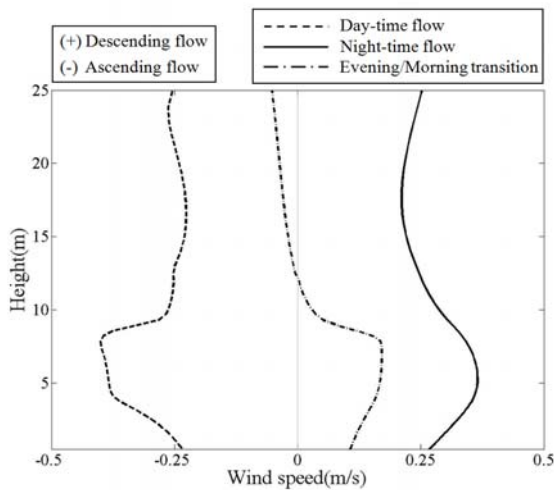


Fig. 8 Vertical profile of wind velocity at x=1300

다. 이때 $Q_r(z)$ 은 특정 시간에서의 값이고 시간에 따라 그 크기는 증가한다. Fig. 7의 높이에 따른 에너지 분포를 관찰하면 태양 광선에 직접적으로 노출된 20m 부근의 밑에서 에너지 생성이 많음을 볼 수 있다.

이른 오전이나 늦은 오후의 대기에서는 태양 복사가 약하고 지면부근에서의 복사 냉각이 대기에 영향을 미치게 된다. 따라서 대기의 상태를 높이에 따라 지면 부근은 에너지 손실로, 밑 부분은 에너지 생성으로 표현할 수 있다. 본 연구에서는 식 (15)과 같이 대기에서의 에너지 분포가 높이에 따라 선형으로 증가하는 것을 사용하였다.

$$\text{Heat energy}(W/m^3) = 0.005 \times h - 0.1 \quad (15)$$

각 시간대별 에너지 모델을 바탕으로 모델시간으로 1시간 동안 수치해석을 수행하였으며, 각 시

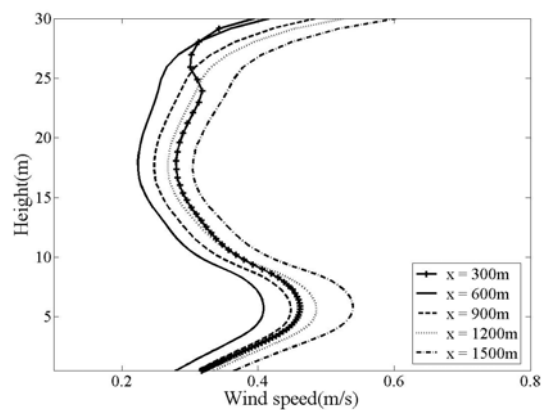


Fig. 10 Variation of vertical profile of wind speed with horizontal line

간대별로 x=1300m에서의 높이에 따른 속도 분포를 Fig. 8에 나타내었다.

밤 시간 대기의 유동은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 하강기류를 형성한다. 또한 바람의 형태는 줄기 부분이 밑 부분보다 속도가 큰 S-모양이다. Pypker 등⁽¹⁰⁾의 실험 자료를 보면 밤 시간 유동은 대략 오후 7시부터 시작되며 유동 형태는 S-모양을 보인다. 낮 시간엔 밤 시간과는 반대로 상승기류가 형성됨을 볼 수 있다. 낮 시간 숲에서의 유동형태는 밤 시간과 마찬가지로 S-모양을 하고 있다. 반면에 이른 오전이나 늦은 오후의 유동 형태는 다른 모습을 보인다. 밑 부분과 그 윗부분에서는 태양 복사로 인해 상승기류가 발생하고 줄기 부분에서는 지면의 복사 냉각으로 인해 하강기류가 발생한다. 이와 같은 유동은 주로 오후 4시~7시, 오전 9시~11시 정도에 관찰된다.⁽¹⁰⁾

4.2 밤 시간 유동해석

배수유동이라 불리는 밤 시간 산에서의 하강기

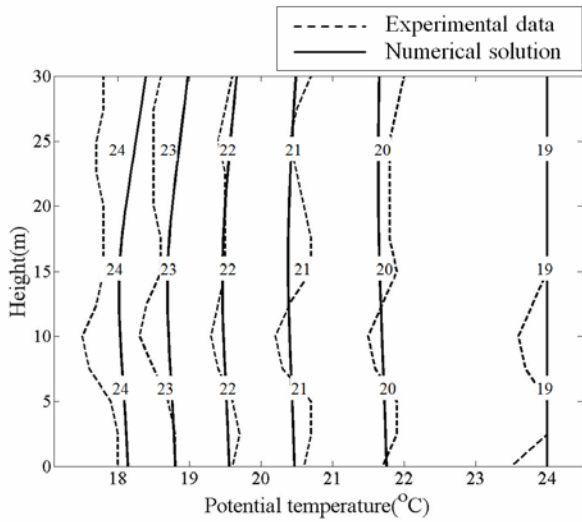


Fig. 11 Nocturnal changes in the potential temperature profile at $x=1200$

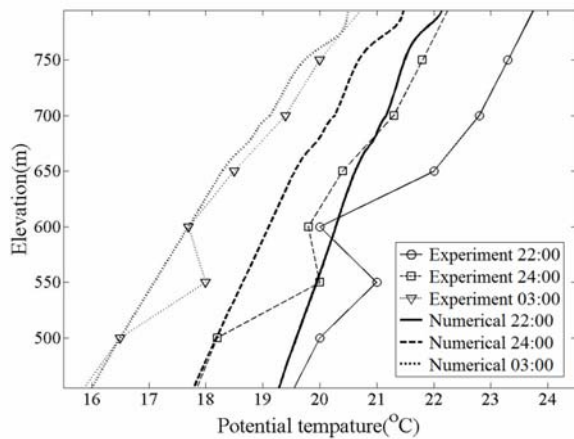


Fig. 12 Nocturnal changes in the potential temperature profile

류를 해석하기 위해 모델 시간으로 8 시간 동안 수치해석을 하였다. 매 시간마다의 계산 결과 자료는 $x=1300$ 인 지점에서 얻었으며, 이를 사용하여 밤 시간 배수유동을 해석하였다.

밤 시간 숲에서의 바람의 형태는 Fig. 9 에서와 같이 모든 시간에 S-형태를 하고 있다. 숲에서 바람의 속도는 시간이 지나면서 전체적으로 커지나, 줄기 부분이 잎 부분보다 조금 더 증가한다. 이는 줄기 부분이 잎 부분보다 항력항이 작기 때문이다. 속도의 상승폭은 시간이 지나면서 둔화된다. 실험 자료를 보면 숲에서의 속도는 대략 1m/s 내외의 값을 가지며 S-형태를 하고 있다. 또한 일반적으로 숲의 정상부분에서 대기로의 속도분포는 높이에 따라 대수적으로 증가한다. Fig. 10 은 21 시 일 때, 산의 정상($x = 0\text{m}$)으로부터의 거리에 따른 속도 분포를 나타낸다. 거리가 멀어짐에 따라 속도

가 증가한다. 그러나 $x=600\text{m}$ 지점의 속도가 $x=300\text{m}$ 지점의 속도보다 작는데, 그 이유는 $x=375\text{m}$ 지점에서 경사가 완만해 지면서 감속이 일어나기 때문이다. 경사면이 완만해 지는 곳에서 감속이 나타나는 것은 Smith 등⁽⁸⁾이 수행한 결과와 동일한 형태이다.

밤 시간 숲에서의 시간에 따른 온위 하강은 Fig. 11 에 나타내었다. 실선은 수치해석을 통해 얻은 값이고 점선은 실험을 통해 얻은 값이다. 그래프 안의 숫자는 시간을 나타낸다. 해가 지고 밤 시간으로 접어드는 19 시 ~ 21 시 사이에 온위 하강 폭이 특히 크다. 시간이 지남에 따라서는 온위 하강의 폭은 둔화된다. 높이에 따른 온위 분포를 보면 지면 부근이 숲의 잎과 대기 부분보다 낮음을 볼 수 있다. 이는 지면의 복사 냉각에 의한 효과 때문이다.

산의 고도에 따른 지면 부근(0.5m)에서의 온위 분포를 Fig. 12 에 나타내었다. 시간이 지남에 따라 지면 부근에서의 온위가 하강함을 볼 수 있다. 고도에 따라서는 산의 정상부분보다 산 아랫부분의 온위가 더 낮음을 볼 수 있다. 이는 찬 공기가 하강하면서 온위하강을 유도하기 때문이다. 실험값이 고도 550m 부근에서 독특한 경향을 보이는 데 이는 측정 위치의 지형적 특징으로 여겨진다. 이 부분을 제외하면 실험값과 수치해석의 경향이 유사한 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론

산림지역의 숲과 대기의 상태를 모델링 하여 시간에 따른 산림지역에서의 공기의 유속과 온도 분포를 수치해석을 통해 알아보았다.

숲은 잎 부분, 줄기 부분, 잡목 부분으로 모델링 하였다. 잎 부분은 잎 면적 밀도와 잎에서의 유효 항력 계수를 이용하여 모델링 하였고 줄기 부분은 원형 실린더를 이용하여 모델링 하였다. 잡목 부분은 직선형태로 모델링 하였다. 실험 자료와 해석 자료의 유동 형태를 비교하여 모델의 타당성을 확인하였다.

밤 시간과 낮 시간 대기의 에너지원은 복사 에너지를 기초로 하여 에너지 생성/손실로 표현 하였다. 시간에 따른 숲에서의 온위 하강에 대한 실험 자료와 수치해석 자료를 비교한 Fig. 10, Fig. 11 을 보면 위의 에너지 원에 대한 표현이 타당함을 확인 할 수 있다.

지금까지는 산림지역에서의 유동에 대한 대부분의 수치해석이 입구 속도를 가정하였으나 본 연구에서는 전체 숲의 초기 속도 분포를 0 으로 하였으며 대기 복사에너지로부터 유도되는 대기의 유동과 온도분포를 비교적 정확히 예측하였다. 본 연구는 산림지형에서의 대기 유동과 온도 변화의

근원을 복사 에너지로 이해함으로써 실제 자연현상에 가까운 해석 방법을 제시하였다.

참고문헌

- (1) Whiteman, C. D., 1990, "Observations of Thermally Developed Wind Systems in Mountainous Terrain. In: W. Blumen (Editor), Atmospheric Processes over Complex Terrain," *American Meteorological Society*, Boston, pp. 5~42.
- (2) Mahrt, L., 1982, "Momentum Balance of Gravity Flows," *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 39, pp. 2701~2711.
- (3) Mahrt, L., Sun, J., Blumen, W., Delany, T. and Oncley, S. 1998, "Nocturnal Boundary-Layer Regimes," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 88, pp. 255~278.
- (4) Mahrt, L., Lee, X., Black, A., Neumann, H. and Staebler, R. M. 2000, "Nocturnal Mixing in a Forest Subcanopy," *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 101, pp. 67~78.
- (5) Mahrt, L., Vickers, D., Nakamura, R., Soler, M. R., Sun, J., Burns S. and Lenschow, D. H. 2001, "Shallow Drainage Flows," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 101, pp. 243~260.
- (6) Yi, C., Monson, R. K., Zhai, Z., Anderson, D. E., Lamb, B., Allwine, G., Turnipseed, A. A., and Burns, S. P. 2005, "Modeling and Measuring the Nocturnal Drainage Flow in a High-Elevation, Subalpine Forest with Complex Terrain," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, D22303.
- (7) Poulos, G. S., Bossert, J. E., Mckee, T. B. and Pielke, R. A. 2000, "The Interaction of Katabatic Flow and Mountain Waves. Part I : Observations and Idealized Simulations," *Journal of Atmospheric Science*, Vol. 57, Issue 12, pp. 1919~1936.
- (8) Smith C. M. and Skillingstad, E. D. 2005, "Numerical Simulation of Katabatic Flow with Changing Slope Angle," *Monthly Weather Review*, Vol. 133, pp. 3065~3080.
- (9) Komatsu, H., Yoshida, N., Takizawa, H., Kosaka, I., Tantasirin C. and Suzuki, M. 2003, "Seasonal Trend in the Occurrence of Nocturnal Drainage Flow on a Forested Slope under a Tropical Monsoon Climate," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 106, pp. 573~592.
- (10) Pypker, T. G., Unsworth, M. H., Lamb, B., Allwine, G., Ekband, S., Sulzman, E., Mix, A. C. and Bond, B. J. 2006, "Cold Air Drainage in Complex in the Oregon Cascade Mountains and Its Applicability in Monitoring Ecosystem Metabolism," *Agricultural and Forest Meteorology*, to be Submitted Aug 2006(Personal Communication)
- (11) Unsworth, M. H., Bond, B. J., Mix, A. C., Pypker T. G. and Mahrt, L. 2004, "Nocturnal Air Drainage in Forest Canopies: A New Way of Studying Physiological Responses to the Weather?," *26th Conference On Agricultural And Forest Meteorology*.
- (12) Raupach M. R., and Thom, A. S. 1981, "Turbulence in and Above Plant Canopies," *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 97~129.
- (13) Thom, A. S., 1975, "Momentum, Mass and Heat Exchange of Plant Communities," *Vegetation and the Atmosphere*, Vol. 1, Academic Press, pp. 101~112.
- (14) Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Acker, S. A. Parker, G. G., Spies T. A. and Harding, D. 1999, "Lidar Remote Sensing of the Canopy Structure and Biophysical Properties of Douglas-Fir Western Hemlock Forests," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 70, pp. 339~361.
- (15) USGS (U. S. Geological Survey), 2003, "Managing for Biodiversity in Young Douglas-Fir Forest of Western Oregon," *Biological Science Report 2002-2006*.
- (16) Moore, G. W., Bond, B. J., Jones, J. A., Phillips N. and Meinzer, F. C., 2004, "Structural and Compositional Controls on Transpiration in 40- and 450-Year-Old Riparian Forest in Western Oregon, USA," *Tree Physiology*, Vol. 24, pp. 418~491.
- (17) Amiro, B. D., 1990, "Comparison of Turbulence Statistics Within Three Boreal Forest," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 51 pp. 99~121.
- (18) Massman, W. J. and Weil, J. C., 1999, "An Analytical One-Dimensional Second-Order Closure Model of Turbulence Statistics and the Lagrangian Time Scale Within and Above Plant Canopies of Arbitrary Structure," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 91 pp. 81~107.
- (19) White, F. M., 1999, "Fluid Mechanics," 3rd Edition, *Mcgraw-Hill*.
- (20) Brown, K. W. And Covey, W., 1966, "The Energy Budget Evaluation of the Micrometeorological Transfer Process Within a Cornfield," *Agric. Meteorology*, Vol. 3, pp. 73~96.