

해안림에 의한 풍속저감 효과의 수치적 모의*

임상준 · 이상호 · 김동엽 · 홍영주

서울대학교 산림과학부

Numerical Simulation of the Wind Speed Reduction by Coastal Forest Belts*

Im, Sangjun · Lee, Sang Ho · Kim, Dongyeob and Hong, Youngjoo

Dept. of Forest Sciences, Seoul National University.

ABSTRACT

The objective of this study is to develop numerical simulation model for analysing the wind speed reduction effect by coastal forest belts. The horizontally homogeneous turbulent flow equations, which are derived from the Reynolds-averaged Navier-Stokes method, both above the tree canopy and within the canopy were first formulated, and a first-order closure scheme with the capability of accounting the bulk momentum transport term within the canopy was employed. The averaged equations were solved numerically by finite difference method, FTCS (forward time centered space) scheme. The proposed model was also used to numerically investigate the effects of structural characteristic of forest belt on the wind speed. The effects of maximum leaf area density were evaluated, with the leaf area density of $1.0\text{m}^2/\text{m}^3$, $2.0\text{m}^2/\text{m}^3$, $3.0\text{m}^2/\text{m}^3$, and $4.0\text{m}^2/\text{m}^3$. Vertical distributions of leaf area, both uniform and varied distribution with a height, were also considered. A comparison of wind profile indicated that there was in good agreements between simulated and measured wind speed. Also, the results showed horizontal wind speed decreased under a height of the tree with increasing maximum leaf area density. In conclusion, in applications where computational efficiency and simplicity are desirable, the proposed numerical model has of great capability to determine the vertical turbulent momentum

* 이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-003-F00027).

Corresponding author : Im, Sangjun, Dept. of Forest Sciences, Seoul National University, San 56-1, Sillim-dong, Gwanak-gu, Seoul 151-921, Korea,
Tel : +82-2-880-4759, E-mail : junie@snu.ac.kr

Received : 24 April, 2009. Accepted : 16 June, 2009.

transport and wind profile in the costal forest belt.

Key Words : *Costal forest belt, Wind speed, Leaf area density, Numerical model, First-order closure scheme.*

I. 서 론

해안림은 해일이나 태풍 등의 자연재해로 인한 피해를 저감시키는 방재적 효과가 매우 크며 또한 환경기능성을 유지시켜주는 어메니티(amenity) 기능도 가지고 있어서(Harada and Kawata, 2004), 그 보존 가치가 매우 크다고 할 수 있다. 하지만, 우리나라의 경우 전체 해안선의 약 15%에 해당하는 933km에 조성된 해안림이 무분별한 휴양시설이나 관광단지의 개발로 인하여 매년 줄어들고 있는 실정이다(서재철 · 최위환, 2005).

해안림의 주요 기능 중의 하나인 방풍기능은 수관이나 수간의 마찰에 의하여 풍속을 감소시키는 것을 일컫는 것으로, 태풍 혹은 국지성 돌풍 등으로부터 인명이나 재산을 보호하는 직접적인 효과뿐만 아니라, 비산먼지나 염분 등 대기 중의 미세성분의 이동을 저감시켜서 피해를 줄이는 간접적인 효과도 가지고 있다. 이러한 해안림의 방풍효과는 식재수종, 식재밀도 등에 따라서 다르게 나타난다.

방풍림에 의한 바람의 이동을 모의하는 방법에는 풍동 실험을 실시하는 방법(정운용 · 박태규, 2002; Gabriels et al., 1997)과 공기동력학적 원리를 이용하여 전산수치해석을 실시하는 방법(Wilson and Flesch, 1999; Vigiak et al., 2003)으로 구분할 수 있다. 전산수치해석을 실시하는 방법은 시 · 공간적 계산 간격, 지배방정식 및 경계조건을 선정하기 어려운 면이 있지만, 실험시간이나 실험재료에 대한 제약 없이 다양한 실험조건에 대한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다(Wang et al., 2001).

Kaiser(1959)는 에러함수(error function)를 이용하여 방풍림에 의한 바람의 영향을 해석적으로

분석하였다. Wilson and Shaw(1977)는 수평변위성분을 평균하는 방법으로 수관 내의 공기 흐름을 해석하는 1차원 모형을 개발하였고, 이 연구는 Raupach and Shaw(1982)에 의해서 수평방향으로 균일한 수관층에 대한 연구로 발전되었다. 그 후, Finnigan(1985)은 수관의 복잡한 임분 구조를 체적 평균법을 이용하여 일반화하였다. Wang and Takle(1995)은 투과성 재료의 난류이송 및 공기이동 해석을 위한 지배방정식을 유도하고, 방풍림의 공기동력학적 성질과 흐름기작을 연구하여 경계층 난류모형(boundary-layer turbulent flow model)을 개발하였다. 이 모형을 이용하여 Wang and Takle(1997)은 방풍벽의 모양에 따른 풍속저감효과를 수치적으로 해석하였다.

방풍림에 관한 국내 연구는 현재 거의 이루어지지 않고 있다. 다만 정운용 · 박태규(2002, 2003)에 의해서 도로 방풍벽에 대한 풍동실험과 2차원 전산유동장 모형(Fluent-5)을 이용한 수치모의가 실시되었을 뿐이다.

본 연구의 목적은 해안림에 의한 풍속저감 효과를 수치적으로 해석할 수 있는 모형을 개발하는 것이다. 이를 위하여 해안림 주변의 공기 흐름에 대한 수학적 모형을 구성하고, 이를 수치적 방법을 통하여 해석하였다. 개발된 모형은 선행 연구 결과를 이용하여 그 적용성을 평가하였고, 최종적으로 해안림의 구조에 따른 풍속 변화를 개발된 모형을 이용하여 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 수목 주변의 공기 유동방정식

수목 주변의 공기 유동을 모형화하기 위하여 시간평균장의 Reynolds 방정식을 이용하였다.

Reynolds 방정식은 점성 유체의 운동을 나타내는 Navier-Stokes 방정식에서 속도를 평균 속도 성분과 요동 속도 성분의 합으로 표시하고, 이를 시간에 대해 평균하여 얻을 수 있다. Reynolds 방정식은 난류가 있는 비압축, 점성 유체에서의 평균류에 관한 운동방정식이라고 할 수 있다. 그 식은 (1)과 같다.

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i' u_j'} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j^2} \quad (1)$$

여기서, u_i , x_i =속도 벡터 및 위치 벡터, p =압력, ρ =유체의 밀도, ν =동점성계수(kinematic viscosity coefficient), t =시간이다.

식 (1)을 수목이 공기 유동에 미치는 영향을 분석하기 위해서 공간에 대하여 평균하여 정리하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial \langle \overline{u_i} \rangle \langle \overline{u_j} \rangle}{\partial x_j} \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} (\langle \overline{u_i' u_j'} \rangle + \langle \overline{u_i' u_j'} \rangle) \\ = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \overline{p} \rangle}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \langle \overline{u_i} \rangle}{\partial x_j^2} \\ & - \frac{1}{\rho V} \int_{A \propto \beta} \overline{p}_n dA + \frac{1}{V} \int_{A \propto \beta} \overline{\tau_{ij} n_j} dA \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, V =체적, τ_{ij} =전단응력 텐서, n =법선 벡터, $\langle \rangle$ 는 공간에 대한 평균을 의미한다.

수관 상층부의 공기 유동방정식은 수관 상층부의 압력 변화를 무시하고, 높이 방향(z 성분)의 1차원 성분만 고려하여 다음 식과 같이 얻어진다.

$$\frac{\partial \langle \overline{u} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \overline{u' w'} = 0 \quad (3)$$

한편, 수관 내 1차원 공기 유동방정식은 아래 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \langle \overline{u} \rangle}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\langle \overline{u' w'} \rangle + \langle \overline{u' w'} \rangle) \\ = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle \overline{p} \rangle}{\partial z} + \nu \frac{\partial^2 \langle \overline{u} \rangle}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (4)$$

2. 1단계 종결모형

Reynolds 방정식은 변수의 수가 방정식의 수보다 많아지는 종결문제(closure problem)가 발생하게 된다. 이 문제를 해결하기 위해서 일반적으로 수치적 해석방법을 이용하는데, 본 연구에서는 경험적인 가정을 바탕으로 종결시키는 난류모형(turbulence model)을 이용하였다.

1) 수관 상층부의 공기 유동방정식

식 (3)에서 $\overline{u' w'}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{u' w'} &= K \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \\ &= l^2 \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right| \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, K =와점성계수(eddy viscosity)이며, 혼합거리(mixing length)를 이용하여 나타낼 수 있다. 수관 상층부의 혼합거리 l 은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$l = \frac{k(z-d)}{1 + \frac{k(z-d)}{\lambda}} \quad (6)$$

여기서, k =von Karman 상수, $\lambda=0.00027 V_g/f$, V_g =지형풍의 풍속, f =coriolis 계수, d =zero면의 변위이다.

최종적으로 정리하면 수관 상층부의 공기 유동은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(l^2 \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right) \quad (7)$$

2) 수관 내의 공기 유동방정식

수관 내의 공기 유동방정식을 나타내는 식 (4)에서 압력 및 표면마찰에 의한 저항력(F_d)은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = -\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{\partial \overline{p}'}{\partial x} \right\rangle + \nu \langle \nabla^2 \overline{u}' \rangle = -C_d A |\overline{u}| \overline{u} \quad (8)$$

여기서 C_d =끌림저항계수(drag coefficient), A =엽면적 밀도(m^2/m^3)를 의미한다.

식 (4)의 좌측 항의 분산 플럭스 ($\langle \overline{u'' w''} \rangle$)와 난류 플럭스 ($\langle \overline{u' w'} \rangle$)는 다음 식과 같이 수평 평균 난류수송 성분으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \langle \overline{u'' w''} + \overline{u' w'} \rangle = -\frac{\partial}{\partial z} (l^2 \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}) + \frac{a(\overline{u_h} - \overline{u})}{1 + bA_r} \left(\frac{z}{h} \right) \quad (9)$$

여기서, $\overline{u_h}$ =수고에서의 풍속, A_r =최대 엽면적 밀도, a, b =수치적 방법으로 결정되는 상수, l =수관 내의 혼합거리이고, l 은 아래와 같은 식으로 계산된다.

$$l(z) = \frac{l_h z}{(1 + 0.4A)h} \quad (10)$$

여기서, l_h =수고에서의 혼합거리이다.

식(4)에 식(8), 식(9), 식(10)을 대입하여 정리하면 수관 내의 공기 유동방정식은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (l^2 \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z}) + \frac{a(\overline{u_h} - \overline{u})}{1 + bA_r} \left(\frac{z}{h} \right) - C_d A_l \overline{u} \overline{u} \quad (11)$$

3. 수치해석

수관 상층부와 수관 내의 공기 유동에 관한 식 (7)과 식 (11)을 수치 해석하기 위해서 FTCS(Forward Time Centered Space) 방법을 이용하였다.

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} = \frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial z^2} = \frac{u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad (13)$$

식 (7)와 식 (11)을 이용하여 식 (12)와 식 (13)을 합하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta t} = D_1(z) \left(\frac{u_{i+1}^{n+1} - 2u_i^{n+1} + u_{i-1}^{n+1}}{(\Delta z)^2} \right) + D_2(z) \quad (14)$$

$$D_1(z) = l^2 \left| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \quad (15)$$

$$D_2(z) = \frac{a(\overline{u_h} - \overline{u})}{1 + bA_r} \frac{z}{h} - C_d A_l \overline{u} \overline{u}, \quad z > h \quad (16)$$

$$D_2(z) = 0, \quad z \leq h \quad (17)$$

식 (14)를 다시 정리하면 다음과 같은 식을 최종적으로 얻을 수 있다.

$$\overline{u}_i^n + D_2(n \Delta z) = - \left(\frac{D_1(n \Delta z) \Delta t}{(\Delta z)^2} \right) \overline{u}_{i-1}^{n+1} + \left(1 + 2 \frac{D_1(n \Delta z) \Delta t}{(\Delta z)^2} \right) \overline{u}_i^{n+1} - \frac{D_1(n \Delta z) \Delta t}{(\Delta z)^2} \overline{u}_{i+1}^{n+1} \quad (18)$$

한편, 본 연구에서 수치해석을 위해서 적용한 경계조건으로 지상부의 풍속 $\overline{u}=0$, 최상층부의 풍속 $\overline{u} = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right)$ 을 사용하였고, 초기조건은 임의로 지정하였다. 여기서, z_0 =표면의 거칠기를 나타내는 거칠기 길이(roughness length), u^* =마찰 속도이다.

4. 모형의 평가

개발된 전산수치모형을 평가하기 위하여 Raynor (1971)의 실측 자료를 이용하였다. Raynor(1971)는 미국 New York주의 Long Island에 위치하고 있는 Brookhaven National Laboratory에서 방풍림의 각 지점과 높이에 대한 풍속을 측정하였다. Raynor(1971)의 모델 숲은 홍송(*Pinus resinosa* Soland.)과 스트로브잣나무(*Pinus strobus* L.)가 1.2m×1.5m 간격으로 심어져 있으며, 식재 후 약 30년 정도가 지난 숲이다. 해안림의 풍속은 모델 숲 내부 60m의 지점에서, 1.75m, 3.5m, 7.0m, 10.5m, 14.0m, 17.5m 등 6곳의 서로 다른 높이에

표 1. 풍속 추정 결과 비교.

측정 높이 (m)	모형에 의해 모의된 풍속 (m/s)	실측된 풍속(m/s)		상대오차(%)
		평균	표준편차	
1.75	0.75	0.57	0.25	31.6
3.50	0.64	0.53	0.23	20.8
7.00	0.79	0.74	0.35	6.8
10.50	2.05	2.70	0.76	-24.0
14.00	3.26	3.01	1.05	8.3
17.50	3.98	3.65	1.53	9.0

풍속계를 설치하여 측정하였다. 풍속자료 등을 얻기 위한 현장 조사는 1963년부터 1968년까지 5년 동안 수행하였다.

현장 조사된 방풍림의 엽면적 밀도, 거칠기 길이, 마찰속도 등의 자료와 개발된 전산수치 모형을 이용하여 모의 풍속을 구하였으며, 이를 실측된 풍속 자료와 비교 분석하였다. 또한, 엽면적 밀도, 엽면적 밀도 함수의 분포 등의 변화에 따른 풍속의 수평성분의 변화를 분석하였다.

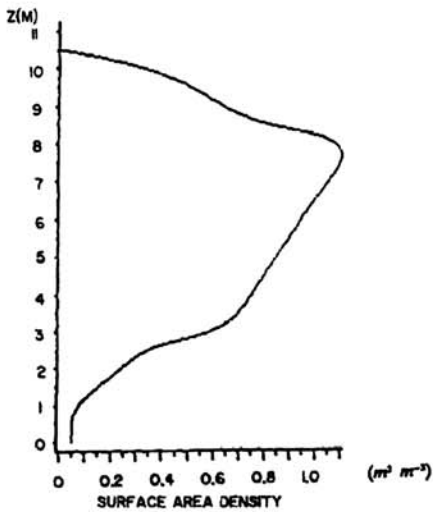


그림 1. 모델 방풍림 내 수고별 엽면적 밀도.

III. 결과 및 고찰

1. 실측 자료와 비교 결과

방풍림 내 수목의 평균 수고는 10.5m이고, 수고별 엽면적 밀도는 그림 1과 같다. 수고 약 8.0m에서 약 $1.1\text{m}^2/\text{m}^3$ 로 최대 엽면적 밀도를 나타내었다. 또한, zero 변위는 8.0m, 거칠기 길이는 1.0m, 마찰속도는 1.4m/s로 조사되었다.

실측된 자료와 전산수치모형의 결과를 비교하여 표 1과 그림 2에 나타내었다. 표 1에서와 같이 높이 7.0m에서 가장 비슷한 결과를 나타내었으며,

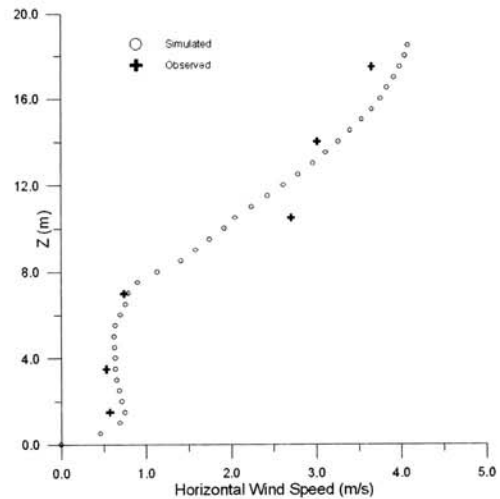


그림 2. 풍속 추정 결과 비교.

1.75m의 높이에서 상대오차 31.6%로 가장 큰 차이를 나타내었다. 높이별 상대오차는 -24.0%~31.6%의 범위를 나타내었으며, 평균은 16.7%였다. 전체적으로 높이 12.0m 이하에서는 전산수치 모형으로부터 모의된 풍속이 실측된 풍속과 비교적 잘 일치하고 있으나, 그 이상의 높이에서는 더 높아질수록 풍속 간의 차이가 커지는 것으로 나타났다. 전체적으로 모의된 결과는 현장 실측 자료의 범위에 모두 포함되고 있는 것으로 나타났다.

Li et al.(1990)은 바람이 개활지-숲을 통과하는 경우에 발생하는 흐름의 수평 및 수직변화를 정상류 해석모형을 통하여 추정하였으며, 개발된 전산모형의 평가를 위하여 본 연구에서 사용된 Raynor(1971)의 모델 숲의 풍속 자료를 활용하였다. Li et al.(1990)의 모형과 본 연구에서 사용된 전산모형은 지배방정식과 모형의 구조 등이 서로 다르기 때문에 정량적 비교는 어렵다. 그러나 두 모형의 추정 결과와 실측된 풍속자료와의 일치 여부를 통하여 비교한 결과, 전체적으로는 두 모형 모두 실측 풍속자료와 비교적 잘 일치하는 추정 결과를 나타내었으나, Li et al.(1990)의 모형 결과가 실측 자료와 더 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 전산모형은 계산상의 편의를 위하여 모형의 구조를 단순화하였기 때문이며, 그 결과 정확도에서는 다소 떨어지지만 계산의 효율성은 더 높다고 할 수

있다.

개발된 전산모형은 정확도를 고려할 때, 실제 수목 주변의 풍속 변화를 비교적 훌륭하게 평가하는 것으로 판단되며, 해안림과 같은 수목에 의한 풍속의 저감 효과를 계량적으로 분석하는데 이용 가능할 것으로 생각된다.

2. 수평 풍속에 대한 최대 엽면적 밀도와 엽면적 밀도 함수 분포의 영향 분석

수목에 의한 풍속 저감 효과는 수간과 수관층의 발달 정도에 큰 영향을 받게 되고, 이것은 엽면적 밀도항을 통하여 모형에서 고려할 수 있다. 엽면적 밀도는 단위 체적당 수목의 줄기 혹은 잎이 차지하고 있는 면적을 의미하며, 수종, 수령, 또는 생육시기에 따라 다른 값을 가지게 된다. 또한, 수목에 의한 풍속 저감 효과를 추정할 때, 엽면적 밀도 함수의 분포 또한 간과할 수 없는 요인으로 작용하게 된다. 엽면적 밀도 함수의 분포는 수종, 수목의 크기, 수간의 모양 등에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 개발된 전산수치 모형을 이용하여 최대 엽면적 밀도와 엽면적 밀도 함수 분포의 풍속에 대한 영향을 분석하였다.

그림 3은 수고 10.0m에서 최대 엽면적 밀도 (A_{max})를 각각 $1.0m^2/m^3$, $2.0m^2/m^3$, $3.0m^2/m^3$, $4.0m^2/m^3$ 으로 변화시킬 때의 엽면적 밀도의 수직적 분포를 나타낸 것이다. 최대 엽면적 밀도는 수

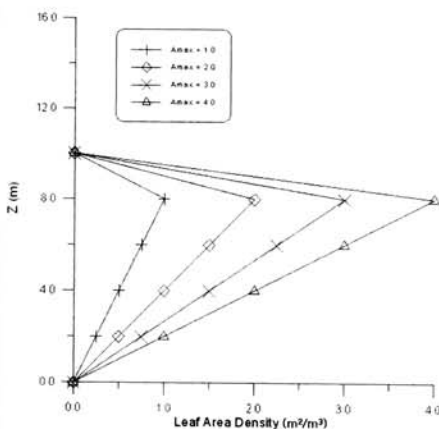


그림 3. 엽면적 밀도의 수직 변화.

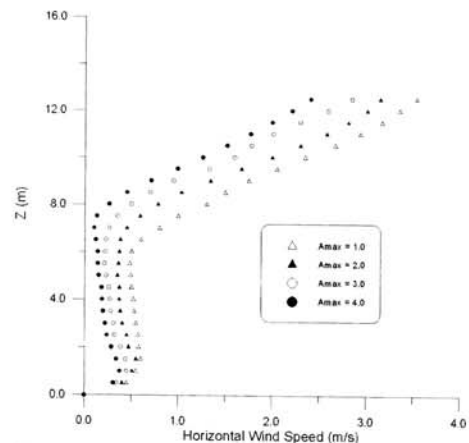


그림 4. 엽면적 밀도 변화에 따른 풍속의 수직 분포.

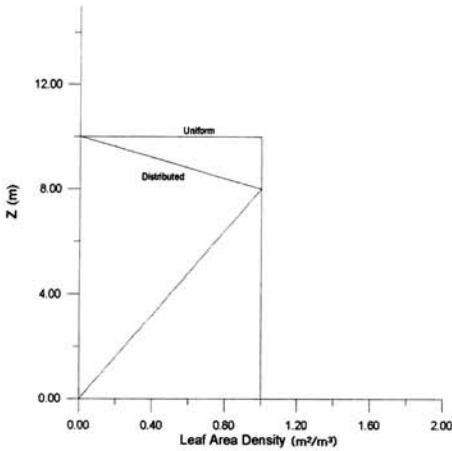


그림 5. 엽면적 밀도 함수의 구성.

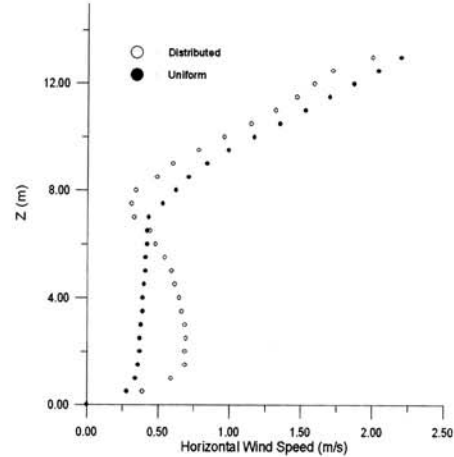


그림 6. 엽면적 밀도의 수직 분포에 따른 풍속의 변화.

고 8.0m에서 발생하고, 지표면에서부터 높이 8.0m까지는 최대 엽면적 밀도가 선형적으로 증가하고, 높이 8.0m 이상에서는 다시 선형적으로 감소하는 것으로 가정하였다.

그림 4는 최대 엽면적 밀도의 변화에 따른 수평 속도의 수직적인 변화를 해석한 결과이다. 그림 4에 따르면 최대 엽면적 밀도가 커질수록 수목에 의한 풍속의 저감 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 그러므로 해안림에 적합한 수종을 선정할 때, 방풍 효과만을 고려한다면 최대 엽면적 밀도가 큰 수종을 선정하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

엽면적 밀도 함수의 분포 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 그림 5와 같은 두 가지 형태의 엽면적 밀도 함수의 분포를 가정하였다. 하나의 형태는 수고가 10.0m인 수종에 대하여 최대 엽면적 밀도($1.0\text{m}^2/\text{m}^3$)가 높이 8.0m에서 발생하며, 수직 분포는 그림 5와 같이 선형적으로 변화하는 것으로 가정하였다. 그리고 다른 하나의 형태는 엽면적 밀도가 $1.0\text{m}^2/\text{m}^3$ 로 전체 구간에 대하여 균일하게 분포하는 것을 가정하였다. 그 결과, 엽면적 밀도의 분포가 균일한 경우 수관 내에서는 풍속의 변화가 거의 없으며, 전체 구간에 대하여 일정한 풍속을 유지하고 있는 것으로 나타났다(그림 6).

IV. 결 론

본 연구는 해안림이 가지고 있는 풍속 저감효과를 수치적으로 해석하기 위하여 실시되었다. 이를 위하여 해안림 주변의 공기 흐름에 대한 수학적 모형을 구성하고, 이를 수치적 해석방법을 통하여 전산수치모형을 개발하였다. 또한, 선행 연구 결과를 활용하여 개발된 전산수치모형의 적용성을 평가하였으며, 해안림의 구조에 따른 영향을 수치적으로 해석하였다.

해안림의 풍속저감 효과를 계산하기 위하여 난류가 있는 비압축 점성 유체의 평균적인 흐름 해석에 널리 이용되는 Reynolds 방정식을 사용하여 1차원 공기 유동방정식을 수관 상층부와 수관 내부로 각각 구분하여 수학적 모형으로 구성하였다. 또한, 1차원 공기유동방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 FTCS 기법을 적용하였다.

해안림 주변의 공기 흐름을 모의하는 전산수치모형을 개발하고 실측 자료를 적용해 본 결과, 개발된 모형의 결과가 실측 자료와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 해안림에 대한 전산수치모형의 응용을 위하여 엽면적 밀도의 변화에 따른 수평풍속의 수직적 변화를 모의한 결과, 최대 엽면적 밀도가 커질수록 풍속이 낮게 측정되어 수목에 의한 풍속의 저감 효과가 커지는 것을

알 수 있었다.

이상의 결과를 정리할 때, 개발된 전산수치모형은 해안림 주변의 공기 이동을 수치적으로 재현하여 주며, 해안림에 의한 풍속 저감을 평가하는 데 적용 가능할 것으로 판단된다. 개발된 모형을 이용한 추정 결과의 정확성을 높이기 위해서 수치해석 시 적용되는 초기조건 값을 추정해내는 연구가 더 필요하다.

인 용 문 헌

- 서재철 · 최위환. 2005. 우리나라 해안림의 현황과 과제. 한국해안림연구회/일본해안림학회 공동학술대회 논문집. pp.14-18.
- 정운용 · 박태규. 2002. 다공성 방풍벽의 방풍성능에 대한 실험적 연구. 대한토목학회논문집 22(6A) : 1481-1490.
- 정운용 · 박태규. 2003. 전산유동장해석을 이용한 다공성 방풍벽의 방풍성능 평가. 대한토목학회논문집 23(5A) : 831-839.
- Finnigan, J. J. 1985. Turbulent transport in flexible plant canopies(In Hutchison, B. A. and B. B. Hicks eds., "The Forest-Atmosphere Interaction"). Netherlands : D. Reidel. pp.443-480.
- Gabriels, D., W. M. Cornelis, I. Pollet, T. V. Coillie and M. Ouassar. 1997. The I.C.E. wind tunnel for wind and water erosion studies. Soil Technology, 10 : 1-8.
- Harada, K., and Y. Kawata. 2004. Study on the effect of coastal forests to Tsunami reduction. Annuals of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ. No.47C.
- Kaiser, H. 1959. The wind-flow at shelterbelts. Translated by J. T. Godfrey, Bev. Dent. Wetterdienstes, 7(53) : 1-36.
- Li, Z., J. D. Lin and D. R. Miller. 1990. Air flow over and through a forest edge : A steady-state numerical simulation. Boundary-Layer Meteorology, 51 : 179-197.
- Raupach, M. R., and R. H. Shaw. 1982. Averaging procedures for flow within vegetation canopies. Boundary-Layer Meteorology, 22 : 79-90.
- Raynor, G. S. 1971. Wind and temperature structure in a coniferous forest and a contiguous field. Forest Science, 17 : 351-363.
- Vigiak, O., G. Sterk, A. Warren and L. J. Hagen. 2003. Spatial modeling of wind speed around windbreaks. Catena, 52 : 273-288.
- Wang, H., and E. S. Takle. 1995. Boundary-layer flow and turbulence near porous obstacles. I : Derivation of a general equation set for a porous medium. Boundary-Layer Meteorology, 74 : 73-88.
- Wang, H., and E. S. Takle. 1997. Model-simulated influences of shelterbelt shape on wind-sheltering efficiency. Journal of Applied Meteorology, 36 : 695-704.
- Wang, H., E. S. Takle and J. Shen. 2001. Shelterbelts and windbreaks : mathematical modeling and computer simulations of turbulent flow. Annual Review of Fluid Mechanics, 33 : 549-586.
- Wilson, N. R., and R. H. Shaw. 1977. A high order closure model for canopy flow. Journal of Applied Meteorology, 16 : 1197-1205.
- Wilson, J. D., and T. K. Flesch. 1999. Wind and tree sway in forest cutblocks. III : a windflow model to diagnose spatial variation. Agricultural and Forest Meteorology, 93 : 259-282.