전산유체공학 기법을 활용한 해안 방재림 조성 효과 분석

박 태 완,¹ 장 세 명,^{*1} 김 성 용,² 이 영 진,² 윤 호 중³

¹군산대학교 기계공학과

²공주대학교 산림자원학과

³국립산림과학원 산림방재과

ANALYSIS ON THE COMPOSITION EFFECT OF FOREST FOR DAMAGE PREVENTION USING CFD

T.W. Park,¹ S.M. Chang,^{*1} S.Y. Kim,² Y.J. Lee² and H.J. Yoon³

¹Department of Mechanical Engineering, Kunsan Nat'l Univ.

²Department of Forest Resources, Kongju Nat'l Univ.

³Department of Forest Damage Prevention, Korea Forest Research institute

To reduce the damage from the coastal disaster such as typhoon and tsunami, a possible option is the eco-friendly approach to minimize the destruction of ecological system. One of feasible idea is the forest for damage prevention artificially arranged along the beach. To understand a precise physics on the flow before and after the forest, we use a CFD method. In this paper, a three-dimensional numerical model has been constructed based on tree cases in a real forest located at Byin-myeon, Seochon-gun, Chungnam. The CFD computation using a commercial code COMSOL multiphysics is performed for the distribution of real spatial coordinate of each tree. Through this investigation, the CFD techniques are shown to be applied to the research of forest composition plan. The physics in the regime from laminar to turbulent flow is qualitatively explained, and the obtained data are compared one another quantitatively.

Key Words : 바람장(Wind Field), 전산유체역학(CFD), 비정상유동(Unsteady Flow), 해안 방재림(Forest for Damage Prevention)

기호 설명

v^* : Friction Velocity

κ : Von Karman's Constant

V_{tree} : Wind Speed at Tree Height

z_{tree} : Tree Height

k : Turbulence Intensity

ϵ : Turbulence Dissipation Rate

1. 서 론

해안성 자연재해(태풍, 쓰나미 등)에 대한 피해를 저감하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 친환경적이고 생태계 파괴를 최소화하는 방법으로서, 방재림에 관한 연구가 관심을 받고 있는 추세이다. 방재림에 의하여 자연재해의 피해가 감소된다는 결과는 알고 있지만, 아직까지는 정밀한 연구가 없었기 때문에, 방재림의 내부와 후방에서의 유동 현상에 대한 메커니즘을 명확하게 이해할 수는 없었다[1].

본 연구에서는 실제 조성되어 있는 충남 서천군 비인면의 산림을 조사하여 얻은 임목 케이스를 토대로 평균적인 임목모형을 3차원 모델링을 하였으며, 상용 코드인 COMSOL Multi-physics를 이용하여 실제 공간 좌표에 임목 모델을 배치하여 계산을 진행하였다. 또한 계산에 대한 타당성을 검증하기 위해 3D 프린터로 축소 모형을 제작하여 풍동 실험 데이터 및 ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT 등 타 상용 코드들의 계

Received: December 17, 2012, Revised: March 14, 2013,
Accepted: March 15, 2013.

* Corresponding author, E-mail: smchang@kunsan.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.069>

© KSCFE 2013

산 데이터와 비교를 하였다. 본 연구를 통하여 CFD 기법들이 산림 분야에 대한 연구에 응용될 수 있음을 밝히고, 층류에서 난류에 이르는 유동 영역에 대하여 유동 물리를 정성적으로 설명하고[2], 나아가 취득된 데이터를 서로 정량적으로 비교하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 지배방정식, 난류 모델, 경계조건

본 연구에서 분석하고자 하는 바람장은 한 공간에서 지표면과 임목의 형상에 따라 속도 및 압력 분포를 갖는다. 통상 평균 풍속이 25 m/s 미만의 바람장 유동을 해석하기 위하여 다음과 같은 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용한다.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 V \tag{2}$$

식 (1), (2)에서 V 는 속도 벡터이며, p 는 압력, ρ, μ 는 각각 공기의 밀도와 점성 계수를 나타낸다. 이 외에 계산 영역의 길이 스케일이 100 m 이상에 이르는 거대 규모이므로, 난류 효과에 대한 고려가 포함되어야 하며, 본 연구에서는 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였다[3].

2.2 임목 모델 개발, 임분 배치

해안 방재림의 효과를 분석하기 위하여 공주대학교와 연계하여 공동으로 임목과 임분에 대하여 모델을 개발하였다[4]. 조사는 충청남도 서천군 비인면 인근에 조성된 해안림이며, 임목 10본을 크기별로 분류하여 별채하였다. 임목 모델은 줄기모형과 수관모형을 따로 구분하여 개발하였다. 줄기모형은 임목을 별채하여 1 m 단위 높이로 구분하여 줄기부분의 단면을 채취하였으며, 채취한 판단에 대하여 수간석해(stem analysis)를 실시하여 Fig. 1(a)와 같이 10가지의 줄기모형을 나타내었다. 수관모형은 1 m 높이 별로 수관, 즉 가지의 길이를 측정하여 Fig. 1(b)와 같이 10가지의 모델을 구현하였으며, Fig. 1(c)와 같이 CATIA V5를 이용하여 10가지의 임목 모형을 3차원으로 구현하였다. 또한, 격자 생성과 계산의 편의를 위하여 지하고(crown height, 지면부터 임목의 첫 가지까지의 높이)가 9.5 m, 수고(tree height, 임목의 높이)가 17.6 m인 평균 임목 모델을 구현하였다. 수관부분은 내부가 꽉 차있는 Solid 형태로 모델링하였다. 임목 모델을 임분에 배치하기 위하여 수중, 흉고직경, 수고 등 표준지 조사를 실시하였으며, GPS 측정기를 이용하여 방위각과 거리를 통한 임목의 위치를

Fig. 1 Tree modeling cases and Average tree model

조사하였으며, 이를 통하여 Fig. 2와 같은 최종 수목 위치 좌표를 얻었다.

2.3 경계조건, 격자 생성

유동공간은 150 (m) × 30(m) × 50(m)의 크기이며, 숲

Fig. 2 Arrangement of tree

Fig. 3 Grid system

은 초기 바람이 입사하는 곳에서 25 m 떨어진 지점에 위치하고 입구 경계조건으로서 통상 난류 강도(turbulence intensity) 5% 내외의 입사류 조건과 평균 수고를 고려한 난류 길이(turbulence length) 조건을 준다. 지표면에서는 점착 조건을 적용한다. 양쪽 옆면은 대칭 경계조건, 윗면은 참고문헌[5]의 난류 운동 에너지(turbulence kinetic energy)와 소산률(turbulent dissipation rate)을 준 개방 조건을 적용한다.

난류 운동 에너지와 소산률에 대한 일반식은 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \tag{3}$$

Fig. 4 Wind speed profile

$$\epsilon = \frac{C_u^{0.75} k^{1.5}}{l} \tag{4}$$

식 (4)에서 ϵ 는 난류 운동 에너지의 소산률, l 은 난류 길이, k 는 난류 운동 에너지를 나타내며, 상수 C_u 는 표준 $k-\epsilon$ 모델의 경우 0.09를 적용한다. 계산 영역에 대한 격자수는 Fig. 3의 경우 약 61만 개이며, 유동 공간 내부의 숲 주변과 숲의 후류 영역에 대하여 조밀한 격자를 형성시켜 계산의 정확도를 높이고자 하였다. 초기 입구에서 바람이 평균 속도 8 m/s로 불 때 바람의 수직분포는 참고문헌[6]의 기상 상관식을 인용하여 다음과 같이 주어진다.

$$v^* = \sqrt{10^{-3} \times [2.717 V_{tree} + 0.142 V_{tree}^2 + 0.0764 V_{tree}^3]} \tag{5}$$

$$V(z) = V_{tree} + \frac{v^*}{\kappa} \left[\ln \frac{z}{z_{tree}} \right] \tag{6}$$

위 식에서 v^* 는 마찰 유속을 나타내며, 통상 1~25 m/s 사이에서 정확한 마찰 유속을 얻을 수 있다. V_{tree} 는 임목 높이에서의 기준 풍속을 의미하며, z_{tree} 는 수고(임목의 높이)를 의미한다. κ 는 Von Karman's constant를 의미하며, 통상적으로 사용되는 0.4를 적용하였다. 식 (5), (6)을 이용하여 계산한 값은 Fig. 4와 같이 그래프로 나타내었으며, 지표면 부근에서는 점착 조건에 의하여 속도가 0 m/s임을 알 수 있으며, 고도가 50 m 부근에서는 기준 풍속인 8 m/s를 넘어 8.7 m/s까지 증가함을 알 수 있다.

2.4 풍동 실험

CFD 코드의 결과값을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 임분 배치한 임목 모델을 3D 프린터를 이용하여 1/200 축소 모형

Fig. 5 Wind tunnel test

을 제작하여 풍동 실험장치에 고정시켜 실험을 하였다. CFD 코드는 COMSOL과 더불어 여러 상용 코드들을 다양한 비교를 위하여 ANSYS-CFX, ANSYS-FLUENT도 같은 조건에 하에 계산한 결과값과 비교를 하였다. 비교위치는 Fig. 6과 같이 축소 모델 앞의 5 cm씩 5 point와 모델 위에서 1.5 cm씩 6 point를 비교하였다.

유동 유사성(flow similarity)의 관점에서 1/200 축소 모형 시험은 실제와 모형 사이에 레이놀즈 수(Reynolds number) 영역의 차이가 존재한다. 기준 풍속 8 m/s에서 숲의 폭을 기준으로 했을 때, 모형의 경우 $Re=8.0 \times 10^4$ 인 반면에 실물의 경우 $Re=1.6 \times 10^7$ 이다. 숲의 영향을 무시한 매끈한 평판의 경우, 모형은 천이점 이전의 층류, 실물은 천이점 이후 완전 난류 유동에 해당한다. 그러나 평균 수고를 고려할 때, 매우 거친 평판 문제의 경우 문헌[7]에서의 실험 데이터와 비교하면, 레이놀즈 수 $10^5 \sim 10^7$ 영역에서의 표면 마찰계수 혹은 항력 계수에 레이놀즈 수가 미치는 영향은 미미할 것으로 판단된다.

3. 연구 결과

3.1 실제 유동 공간 해석 결과

입구 풍속이 8 m/s로 볼 때의 계산된 결과는 Fig. 7과 같

Fig. 6 Position of measurement

Fig. 7 3D Analysis result: velocity field

다. 숲의 후방에서 나무들의 장애물 영향으로 유동 박리 효과가 강한 후방 진입류(back flow)가 발생시키는 것을 관찰할 수 있다[6]. 좀 더 세부적인 결과를 알아보기 위하여 폭 방향(y)의 위치에 따른 x-z 평면에서의 속도 분포와 축 방향(z)의 위치에 따른 x-y 평면에서의 속도 분포에 대하여 알아보았다.

3.1.1 폭 방향 위치(y)에 따른 x-z평면 유속 분포

유동 공간의 폭 방향으로 5개의 Slice로 나누어 각각의 위치에서의 유동장의 변화를 알아보았으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8 (a), (e)인 y = 5, 25 m 지점, 즉 대칭 평면과 가까운 숲 가장자리 부분에서는 수관 바로 뒷부분에서 바람장의 속도가 급격히 줄어들고 이후에서 소폭으로 회복이 되는 것을 알 수 있다. Fig. 8 (b), (c), (d)인 y = 10, 15, 20 m 지점, 즉 숲 내부 단면에서는 수관 뒷부분에서 시작되는 풍속 저감 영역이 고도 40 m 이상, 길이로는 유동 공간 끝까지 영향을 주는 것을 알 수 있다. Fig. 8을 보면, 지면에서 시작되는 경

Fig. 8 X-Z plane velocity distributions

계층이 유동 공간의 높이까지 확대되면서 나무가 많이 밀집되어 있는 숲의 중간 부분 각 수목의 후방에서 풍속이 급격하게 저감되는 부분들이 확연히 드러나는 것을 알 수 있다.

Fig. 8(c)의 경계층 내부를 확대하여 보면 Fig. 9와 같다. 속도 벡터의 방향을 관찰하면, 숲의 후방에 거대한 스케일로 생성되는 경계층의 내부는 유동박리로 인하여 바람이 역류하는

Fig. 9 Flow pattern inside the boundary layer

Fig. 10 Streamlines

후방 진입류(back flow)가 형성되는 것을 알 수 있다. 공간 내의 유동 현상을 유선으로 나타낸 Fig. 10을 보면, 숲 외부 바람장은 경계층의 빗면을 타고 빠르게 지나가며, 경계층을 통과하는 바람장은 속도가 저감되고 경계층 내부 유동의 흐름을 따라 3차원 거대 구조의 외류를 이루면서 이동하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 축 방향 위치(z)에 따른 x-y평면 유속 분포

다음은 높이에 따른 유동 흐름을 비교해 보았다. 총 3가지로 각각 지면에서의 높이, 즉 고도 1, 13, 19.6 m로 정하였으며, 각각의 높이가 의미하는 것은 지표 부분, 나무의 수관 부분, 나무 높이 이상 자유 대기 지점에서 유동의 변화를 알아보기 위해서이며, 그 결과는 Fig. 11과 같다.

Fig. 11(a)에서는 수관 뒷부분에서 속도가 다소 줄어들지만 유동 단면적 감소로 인한 노즐 효과에 의해 임목사이에서 속도가 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있다. 유동박리에 의한 후방 진입류는 숲의 후방 40 m 지점(대략 수고의 2배)에서 본격적으로 시작되는 것을 확인할 수 있으며, Fig. 11(b)에서는 줄기부분에 비해 저해(blockage) 효과가 큰 수관 부분에서 속도 저감 효과가 눈에 띄게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 11(c)에서는 유동 경로 내에 임목이 존재하지 않지만, 유동 경계층의 영향으로 후방 진입류가 발생이 되며 그 영향이 출구부분까지 미치고 있는 것을 알 수 있다.

좀 더 자세히 알아보기 위하여 Fig. 12와 같이 각각의 높이에서 숲의 중간 지점에서의 축방향 속도를 그래프로 나타내었다. 숲은 그래프 상에서 25-45 m지점까지의 영역에 위치한다. Fig. 12(a)를 보면 속도가 숲을 지나 점차 감소가 되며

Fig. 11 X-Y plane velocity distributions

Fig. 12 X-Y plane velocity along horizontal distance

숲의 후방 115 m 지점에서 속도가 음의 값(후방 진입류)을 가지게 된다. Fig. 12(b)에서는 숲의 바로 후방에서부터 속도가 음의 값을 가지며 이후 영역에서 천천히 회복된다. Fig.

Fig. 13 Velocity distribution of the wake

Fig. 14 Kinetic energy rate of fluid

12(c)에서는 60 m 이후에서 속도가 음의 값을 가지며 점차 원래 속도로 회복되어가는 것을 확인할 수 있다. 수관부를 단일 Solid로 모델링하였기 때문에 이러한 후류 속도 분포는 숲의 저해 영향에 의해 다소 과장되어 있는 것으로 평가된다.

3.2 숲 후류에서의 소산 에너지 변화를

Fig. 13의 각 단면(y-z 평면)을 통과하는 유동장의 단위 시간당 운동 에너지, 또는 평균 동력(power)은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

(7)

여기에서 ρ 는 표준 대기의 공기 밀도이며, A 는 길이 방향 (y)의 단면적을 나타낸다.

바람이 숲을 지나 유동 공간을 빠져 나가면서 소산되는 운동 에너지의 양을 알아보기 위해 식 (7)을 이용하여 Fig. 13과 같이 숲의 후방에서 거리마다 면적에 따른 운동 에너지의 값을 구하여 Fig. 14와 같이 수평 거리(y)에 대해 비교하였다. Fig. 14를 보면, 입구에서 들어온 바람은 숲의 후방인 50 m 지점에서 초기 운동 에너지에서 약 20 %가 감쇠되고, 출구 부분인 150 m 지점에서는 유동 박리에 의한 큰 스케일의 후방 진입류에 의하여 약 90 %까지 소산되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 15 Horizontal flow velocity distribution

3.3 CFD 코드와 실험의 비교 및 검증

본 연구에서 벤치마크 검증한 각 상용 CFD 코드들의 계산 결과 값과 풍동 실험 측정값과의 비교는 Fig. 15와 같다. 가로 축 혹은 세로축의 번호는 각각 Fig. 6에 표시한 측정 위치를 의미한다. 임목 모델 앞의 수평 폭 위치를 따라 비교한 그래프인 Fig. 15(a)를 보면 임목이 밀집되어 있는 중간 위치에서 속도가 감소가 되는 것을 확인할 수 있으며, 실험값과 CFD 코드들의 유속 결과 값에서 다소 차이는 있지만 비슷한 추세를 띄는 것을 확인할 수 있다.

임목 모델의 상방에서 비교한 Fig. 15(b)를 살펴보면, 평균 수고와 가까운 두 지점(1),(2))에서 실험값과 CFD 코드의 결과 값은 각 코드마다 상당한 차이가 나는 것을 알 수 있다. 임목 모델에 가까운 위치, 즉 경계층 내부에서는 유속의 계산 결과가 실제 실험값보다 낮은 값을 나타낸다. 이는 측정 모델에서는 표면 거칠기 및 가공 오차에 의한 난류 강도가 다소 증가하기 때문에 혼합 효과가 증대되기 때문으로 추정된다. 따라서 현재의 모델로써 경계층의 두께를 정확히 예측할 수는 없었다. 이후 4개의 지점(3)-(6))에서는 실험값과 CFD 코드의 결과가 비슷한 추세를 보이는 것으로 확인할 수 있다. 전반적인 결과로서, 수직 방향에 대한 정량적 속도 분포는 ANSYS-CFX, COMSOL, ANSYS-FLUENT 순으로 실험값과 일치하였다.

다음으로 Fig. 16과 같이 표면 압력 분포를 적분하여 실험 모델에 작용하는 항력을 비교하였다. COMSOL의 경우 직접

Fig. 16 Comparison of measurement and CFD code data

항력을 계산해 주는 기능을 찾지 못하여, 후류에서의 속도장의 운동량 적분법(momentum integration method)을 이용하여 추정하였다. 전체적으로 모두 오차 8.6% 이내로 일치하지만 ANSYS-CFX가 실험값보다 낮게 나오며, COMSOL은 높게 나오고, ANSYS-FLUENT가 가장 비슷한 결과를 보여준다.

4. 결 론

충청남도 서천군 비인면 인근의 실제 조성된 해안 방재림의 조사를 통하여 임목 모델을 개발하고, 임분 배치를 통하여 임목 후류에서의 유동장을 CFD 기법을 이용하여 가시화하였다. 또한, 풍동 실험을 통한 CFD 코드들의 결과 값을 비교 및 검증을 하였다. 연구 결과 경계층, 유동 박리, 난류 후류, 임목의 후방에서 발생하는 거대 와류 및 후방 진입류 등 다양한 유동 물리 현상에 의하여 바람에 변화가 나타남을 관찰할 수 있었다.

유동 입자의 운동 에너지가 가장 급격하게 감소하는 지점은 숲의 바로 뒤인 후방이며 유동 공간 전체에서는 숲의 후방에 유동박리에 의한 후방 진입류에 의하여 에너지가 약 90% 정도까지 소산이 되는 것을 알 수 있었다. 이는 임목의 수관 부분이 내부가 꽉 차있는 Solid 형태로 모델링을 하여 수관의 저해 효과가 다소 과장되어 나왔을 것으로 예상된다. 이는 추후 연구를 통하여 수관 부분에 정확한 공극 모델(porous model)을 완성하고, 나무 가지가 바람에 대해 흔들리는 효과를 고려하여 다중 물리에 근거한 FSI(Fluid-Structure Interaction) 해석을 수행하면 보다 미시적인 효과를 알 수 있을 것으로 예상된다.

다음으로, 축소모형을 제작하여 풍동실험을 하였으며 이는 상용 CFD 코드들의 결과 값과 비교 및 검증을 실시하였다. 결과는 모두 신뢰할만한 정성적 결과를 보여 주었다. 다만 숲의 뒤편에서 난류 강도에 의하여 결과 값의 차이가 나타나며, 추후 이를 보완하여 적용해야함을 알 수 있었다. 실험값과

CFD 코드의 결과 값들을 같은 격자계에 대해 비교한 결과, 수직 방향 수평풍 분포에서는 ANSYS-CFX, COMSOL, ANSYS- FLUENT 순으로 정량 값이 일치하였으며, 모델 전체의 항력 비교에서는 ANSYS-FLUENT가 가장 실험값과 일치함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국립산림과학원의 2012년도 ‘해안방재림 조성 효과 분석용 수치모델 개발용역’ 과제의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 2012년도 지식경제부의 지원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(20124010203240)의 일부입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2011, Lee, J.P. and Lee, S.J., "Wind engineering study on sheltering effect of a windbreak forest," The Wind Engineering Institute of Korea, pp.10-14.
- [2] 2012, Park, T.W., Chang, S.M. and Lee, B.D., "Benchmark tests for CFD codes for the analysis of wind field in the forest," *Journal of Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol.17, pp.11-14.
- [3] 1993, Wilcox, D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries, Inc., pp.87-89.
- [4] 2012, Kim, S.Y. et al., "Development of tree model for analyzing the effect of coastal disaster prevention forest," Korean Forest Society, Summer Conference.
- [5] 2011, Chang, S.M., Park, T.W. and Zhang, Z.Q., "Measurement and Comparison whit Analysis for the Construction of the Database on Wind Field," (in Korean) *Korea Forest Research Institute Research Service report*.
- [6] 2012, Park, J.H. et al., "Aerodynamic analysis of an offshore wind turbine under wind conditions considering ocean wave interference effects," (in press) *Journal of Korea Society for New and Renewable Energy*.
- [7] 1979, Schlichting, H., *Boundary Layer Theory*, 7th edition, McGraw-Hill, Inc., pp.652-657.