



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2022년04월14일
(11) 등록번호 10-2387251
(24) 등록일자 2022년04월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/28 (2020.01) G06F 111/18 (2020.01)
G06F 111/20 (2020.01) G06F 30/12 (2020.01)
G06Q 50/26 (2012.01)
(52) CPC특허분류
G06F 30/28 (2020.01)
G06F 30/12 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2020-0138926
(22) 출원일자 2020년10월26일
심사청구일자 2020년10월26일
(56) 선행기술조사문헌
KR101943758 B1*
(뒷면에 계속)

(73) 특허권자
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)
(72) 발명자
김재진
부산광역시 남구 용소로 45, 충무관 4313호(대연동)
강건
부산광역시 남구 용소로 45, 충무관 4313호(대연동)
(74) 대리인
남건필, 박종수, 차상윤

전체 청구항 수 : 총 9 항

심사관 : 김경완

(54) 발명의 명칭 수목 향력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법

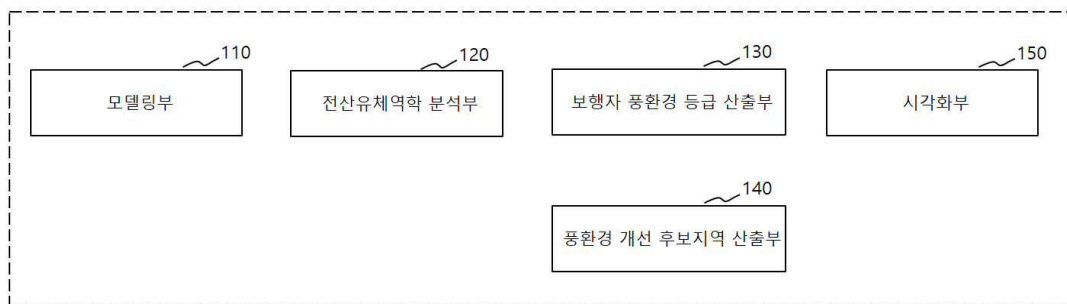
(57) 요약

본 발명은 수목 향력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법에 관한 것으로, 본 발명에 따른 수목 향력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템은 분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입

(뒷면에 계속)

대표도 - 도1

100



력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 모델링부; , 상기 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 전산유체역학 분석부, 상기 분석된 바람장 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출하는 보행자 풍환경 등급 산출부 및 상기 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화하는 시각화부를 포함한다.

(52) CPC특허분류

G06Q 50/26 (2013.01)
G06F 2111/18 (2020.01)
G06F 2111/20 (2020.01)

(56) 선행기술조사문헌

길용식 외 2명, "건축분야 풍영향 평가에 대한 실험 및 수치해석적 접근방법, 전산구조공학 제27권 제3호, 2014.09., pp32-39. 1부.*
김원술 외 2명, "도시 생태공원의 풍환경 평가 적용에 관한 고찰", 한국습지학회지 Volume 21 Issue spc, 2019.12., pp117-122. 1부.*
정수현 외 2명, "보행자 레벨의 풍환경 예측 시 Canopy Model을 적용한 CFD 시뮬레이션 타당성 검증", 한국태양에너지학회 2012년도 춘계학술발표대회 논문집, 2012.03., pp345-353. 1부.*
KR101332559 B1
KR1020120101949 A
KR1020120101952 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711112357
과제번호	2017R1A2B4011470
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	CFD 기반 도시 기상-대기질 모델 성능 개선을 위한 수목효과 매개화 기법 연구
기 여 율	1/1
과제수행기관명	부경대학교
연구기간	2020.03.01 ~ 2021.02.28
공지예외적용	: 있음

명세서

청구범위

청구항 1

분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 모델링부;

상기 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 전산유체역학 분석부;

상기 분석된 바람장 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출하는 보행자 풍환경 등급 산출부; 및

상기 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화하는 시각화부를 포함하되,

상기 전산유체역학 분석부는 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum), 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE) 및 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출하며,

하기 수학식 1을 이용하여 운동량을 산출하고

[수학식 1]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{1}{\rho} F_{tree,i}$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

$$-\overline{u_i u_j} = K_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k.$$

$$K_m = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$F_{tree,i} = -\rho \cdot n_c^3 \cdot C_d \cdot LAD \cdot U_i \cdot |U|$$

하기 수학식 2를 이용하여 난류 운동 에너지를 산출하며

[수학식 2]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon + F_{tree,k}$$

$$F_{tree,k} = n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 4n_c^3 C_d k |U|$$

하기 수학식 3을 이용하여 난류 운동 에너지 소멸율을 산출하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

[수학식 3]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s + F_{tree,\varepsilon}$$

$$R_s = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}$$

$$F_{tree,\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon}{k} n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 6n_c^3 C_d \varepsilon |U|$$

여기에서, x_i 는 i 번째(i^{th}) 직교 좌표(cartesian coordinate)(i 는 정수), U_i 는 i^{th} 평균 속도 성분(mean velocity component), P^* 는 레퍼런스 값과의 압력 편차, ρ 는 공기 밀도(air density), ν 는 동점도(kinematic viscosity, 유체의 점성도를 같은 온도 조건에서 그 유체의 밀도로 나눈 것), u_i 는 i^{th} 평균 속도 성분에서의 변동(fluctuation from the i^{th} mean velocity component), K_m 은 난류 확산률(turbulent diffusivity), κ 는 난류 운동 에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy), δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta) 값, ε 는 TKE 소실율(dissipation rates), C_μ 는 RNG k- ε 난류 클로저 스킴(turbulence closure scheme)의 경험 상수(empirical constant), $F_{tree,i}$ 는 수목 항력 항, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed), $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , η_0 , β_0 는 경험 상수(empirical constant)

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 모델링부는

분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 지표 경계 정보는

지형 고도 정보, 구조물 높이 정보 및 수목 위치 정보를 포함하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 전산유체역학 모델은

RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation) 모델을 기반으로 바람장을 수치적으로 분석하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

청구항 5

삭제

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

삭제

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 보행자 풍환경 등급 산출부는

상기 분석 대상 지역의 기 설정된 높이에서의 바람 속도 정보를 기초로 뷰포트 풍력 등급(Beaufort wind force scale, BWS)에 따라 등급을 산출하여 보행자 풍환경 등급을 산출하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 보행자 풍환경 등급을 기초로 상기 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선 후보 지역을 산출하는 풍환경 개선 후보 지역 산출부를 더 포함하고,

상기 시각화부는 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 산출된 풍환경 개선 후보 지역을 부가하여 시각화하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템.

청구항 11

모델링부가 분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 단계;

전산유체역학 분석부가 상기 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 단계;

보행자 풍환경 등급 산출부가 상기 분석된 바람장 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출하는 단계; 및

시각화부가 상기 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 추가하여 시각화하는 단계를 포함하되,

상기 전산유체역학 분석부가 바람장을 분석하는 단계는 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum), 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE) 및 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출하는 단계를 포함하며

상기 운동량은 하기 수학적 식 1을 이용하여 산출하고

[수학적 식 1]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{1}{\rho} F_{tree,i}$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

$$-\overline{u_i u_j} = K_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k.$$

$$K_m = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$F_{tree,i} = -\rho \cdot n_c^3 \cdot C_d \cdot LAD \cdot U_i \cdot |U|$$

상기 난류 운동 에너지는 하기 수학적 식 2를 이용하여 산출하며

[수학적 식 2]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon + F_{tree,k}$$

$$F_{tree,k} = n_c^3 C_d LAD |\mathbf{u}|^3 - 4n_c^3 C_d k |\mathbf{U}|$$

상기 난류 운동 에너지 소멸율은 하기 수학적 식 3을 이용하여 산출하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법.

[수학적 식 3]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s + F_{tree,\varepsilon}$$

$$R_s = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}$$

$$F_{tree,\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon}{k} n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 6 n_c^3 C_d \varepsilon |U|$$

여기에서, x_i 는 i 번째(i^{th}) 직교 좌표(cartesian coordinate)(i 는 정수), U_i 는 i^{th} 평균 속도 성분(mean velocity component), P^* 는 레퍼런스 값과의 압력 편차, ρ 는 공기 밀도(air density), ν 는 동점도(kinematic viscosity, 유체의 점성도를 같은 온도 조건에서 그 유체의 밀도로 나눈 것), u_i 는 i^{th} 평균 속도 성분에서의 변동(fluctuation from the i^{th} mean velocity component), K_m 은 난류 확산률(turbulent diffusivity), κ 는 난류 운동 에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy), δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta) 값, ε 는 TKE 소실율(dissipation rates), C_μ 는 RNG $k-\varepsilon$ 난류 클로저 스킴(turbulence closure scheme)의 경험 상수(empirical constant), $F_{tree,i}$ 는 수목 항력 항, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD (Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed), $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , n_0 , β_0 는 경험 상수(empirical constant)

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 단계는

상기 모델링부가 분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링하는 단계를 포함하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법.

청구항 13

삭제

청구항 14

삭제

청구항 15

삭제

청구항 16

제11항에 있어서,

풍환경 개선 후보 지역 산출부가 상기 보행자 풍환경 등급을 기초로 상기 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선

후보 지역을 산출하는 단계; 및

상기 시각화부가 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 산출된 풍환경 개선 후보 지역을 추가하여 시각화하는 단계를 더 포함하는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 전산유체역학 모델에 수목 항력 효과를 적용하여 수목이 보행자 풍환경에 미치는 영향을 분석하고 풍환경을 개선할 수 있는 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 도시 지역에서는 건물과 같은 구조물의 고층화와 고밀도화가 진행됨에 따라 구조물에 의한 풍해가 점차 심화되고 있다. 예를 들어, 고층 건물 주변에서 순간적으로 풍압이 증가하거나, 건물 상층의 강한 바람이 건물에 부딪혀 지상으로 하강하여 피해가 발생하기도 한다. 심한 경우, 지상에서 태풍 급의 강풍(예를 들어, 빌딩풍, 먼로풍 등)이 발생하여 건물 주변에서 인적 또는 물적 피해가 발생하기도 한다. 건물에 의해 발생할 수 있는 풍해를 저감하기 위하여 건물의 형태를 변경(예를 들어, 모서리를 둥글게) 하거나, 건물 주변에 방풍벽, 방풍망, 풍혈(바람구멍) 등을 설치하는 방안 등이 광범위하게 연구되고 있다.

[0003] 우리나라의 경우 강풍지역에서 바람을 막기 위해 집 주변에 나무를 심어왔으며, 해외에서도 강풍으로부터 농작물과 거주환경을 보호하기 위해 방풍림을 조성하여 왔다. 수목(tree)은 투과성 장애물로 분류되며 풍속을 감소시킬 수 있다. 예를 들어, 식재 밀도가 높은 방풍림의 경우 수고(tree heights)의 5배 전방과 35배 후방까지 풍속에 영향을 미치고, 수고의 4배 내의 풍속을 절반 이상 감소시킬 수 있다.

[0004] 이처럼 수목은 건물과 함께 유체(예를 들어, 바람)의 유동장에 영향을 미치는 장애물 역할을 할 수 있으나, 도시 지역에서 강풍을 저감시키기 위한 연구들은 주로 건물과 같은 비투과성 장애물들에 대해서만 연구되어 왔고, 수목이나 식생과 같은 투과성 장애물에 대한 연구는 최근에 들어서야 진행되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0005] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 10-1332559(2013.11.15) 3쪽 내지 5쪽

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명은 전산유체역학 모델과 수목 항력 효과가 결합되어 보다 정확하게 도시 지역의 풍환경을 분석할 수 있는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법을 제공한다.

[0007] 본 발명은 전산유체역학 모델에 수목 항력 효과를 적용하여 수목이 보행자 풍환경에 미치는 영향을 분석하고 이를 이용하여 해당 지역의 풍환경을 개선할 수 있는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법을 제공한다.

[0008] 본 발명은 도시 계획이나 조경 계획 시, 건물이나 수목 등의 객체를 배열하고 해당 지역의 풍환경을 사전에 파악할 수 있는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법을 제공한다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템은 분석 대상

지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 모델링부, 상기 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 전산유체역학 분석부, 상기 분석된 바람장 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출하는 보행자 풍환경 등급 산출부 및 상기 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화하는 시각화부를 포함한다.

[0010] 일 실시예에서, 상기 모델링부는 분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링할 수 있다.

[0011] 일 실시예에서, 상기 지표 경계 정보는 지형 고도 정보, 구조물 높이 정보 및 수목 위치 정보를 포함할 수 있다.

[0012] 일 실시예에서, 상기 전산유체역학 모델은 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation) 모델을 기반으로 바람장을 수치적으로 분석할 수 있다.

[0013] 일 실시예에서, 상기 전산유체역학 분석부는 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum), 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE) 및 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출할 수 있다.

[0014] 일 실시예에서, 상기 전산유체역학 분석부는 하기 수학적 식 1을 이용하여 운동량을 산출할 수 있다.

[0015] [수학적 식 1]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{1}{\rho} F_{tree,i}$$

[0016]

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

[0017]

$$-\overline{u_i u_j} = K_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k.$$

[0018]

$$K_m = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

[0019]

$$F_{tree,i} = -\rho \cdot n_c^3 \cdot C_d \cdot LAD \cdot U_i \cdot |U|$$

[0020]

[0021] 여기에서, x_i 는 i 번째(i^{th}) 직교 좌표(cartesian coordinate)(i 는 정수), U_i 는 i^{th} 평균 속도 성분(mean velocity component), P^* 는 레퍼런스 값과의 압력 편차, ρ 는 공기 밀도(air density), ν 는 동점도(kinematic viscosity, 유체의 점성도를 같은 온도 조건에서 그 유체의 밀도로 나눈 것), $\overline{u_i}$ 는 i^{th} 평균 속도 성분에서의 변동(fluctuation from the i^{th} mean velocity component), K_m 은 난류 확산률(turbulent diffusivity), k 은 난류 운동 에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy), δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta) 값, ε 는 TKE 소실율(dissipation rates), C_μ 는 RNG k- ε 난류 클로저 스킴(turbulence closure scheme)의 경험 상수(empirical

constant), $F_{tree,i}$ 는 수목 항력 항, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)

일 실시예에서, 상기 전산유체역학 분석부는 하기 수학식 2를 이용하여 난류 운동 에너지를 산출할 수 있다.

[수학식 2]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon + F_{tree,k}$$

$$F_{tree,k} = n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 4n_c^3 C_d k |U|$$

여기에서, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)

일 실시예에서, 상기 전산유체역학 분석부는 하기 수학식 3을 이용하여 난류 운동 에너지 소멸율을 산출할 수 있다.

[수학식 3]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s + F_{tree,\varepsilon}$$

$$R_s = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}$$

$$F_{tree,\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon}{k} n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 6n_c^3 C_d \varepsilon |U|$$

여기에서, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , η_0 , β_0 는 경험 상수(empirical constant), n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)

일 실시예에서, 상기 보행자 풍환경 등급 산출부는 상기 분석 대상 지역의 기 설정된 높이에서의 바람 속도 정보를 기초로 뷰포트 풍력 등급(Beaufort wind force scale, BWS)에 따라 등급을 산출하여 보행자 풍환경 등급을 산출할 수 있다.

일 실시예에서, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템은 상기 보행자 풍환경 등급을 기초로 상기 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선 후보 지역을 산출하는 풍환경 개선 후보 지역 산출부를 더 포함하고, 상기 시각화부는 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 산출된 풍환경 개선 후보 지

역을 부가하여 시각화할 수 있다.

- [0035] 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법은 모델링부가 분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 단계, 전산유체역학 분석부가 상기 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 단계, 보행자 풍환경 등급 산출부가 상기 분석된 바람장 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출하는 단계 및 시각화부가 상기 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화하는 단계를 포함한다.
- [0036] 일 실시예에서, 상기 분석 대상 지역을 모델링하는 단계는 상기 모델링부가 분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 상기 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0037] 일 실시예에서, 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 단계는 상기 전산유체역학 분석부가 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum)을 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0038] 일 실시예에서, 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 단계는 상기 전산유체역학 분석부가 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE)를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0039] 일 실시예에서, 상기 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석하는 단계는 상기 전산유체역학 분석부가 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0040] 일 실시예에서, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법은 풍환경 개선 후보 지역 산출부가 상기 보행자 풍환경 등급을 기초로 상기 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선 후보 지역을 산출하는 단계 및 상기 시각화부가 상기 시각화된 분석 대상 지역에 상기 산출된 풍환경 개선 후보 지역을 부가하여 시각화하는 단계를 더 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0041] 이상에서 설명한 바와 같이, 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법은 전산유체역학 모델과 수목 항력 효과가 결합되어 보다 정확하게 도시 지역의 풍환경을 분석할 수 있다.
- [0042] 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법은 전산유체역학 모델에 수목 항력 효과를 적용하여 수목이 보행자 풍환경에 미치는 영향을 분석하고 이를 이용하여 해당 지역의 풍환경을 개선할 수 있다.
- [0043] 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법은 도시 계획이나 조경 계획 시, 건물이나 수목 등의 객체를 배열하고 해당 지역의 풍환경을 사전에 파악할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0044] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템을 나타내는 도면
- 도 2는 Kurotani et al. (2001)이 수행한 야외실험의 수목과 측정기기 위치를 도식화하여 나타낸 도면
- 도 3은 수치 모의 실험 별 수목의 입면적 밀도(Leaf Area Density, LAD)를 나타내는 도면
- 도 4는 Kurotani et al. (2001)의 야외실험, 선행 연구(Qi and Ishihara, 2018; Mochida et al., 2008) 및 본 발명의 시스템을 통해 분석한 수목의 풍하 측에서의 무차원 풍속과 난류운동에너지를 나타내는 도면
- 도 5는 Kurotani et al. (2001)의 야외실험과 본 발명의 시스템을 통해 분석한 수목의 풍하 측에서의 민감도 별

무차원 풍속과 난류운동에너지를 나타내는 도면

도 6은 분석 대상 지역의 항공 사진의 일 예를 나타내는 도면

도 7은 도 6의 분석 대상 지역을 모델링한 이미지와 해당 영역 내 3차원 건물 및 수목을 나타내는 도면

도 8은 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급과 바람장을 나타내는 도면

도 9는 분석 대상 지역 내 제1 영역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면

도 10은 분석 대상 지역 내 제2 영역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면

도 11은 건물 주변에서 발생하는 바람장, 연직 속도장 및 수목의 유무에 따른 풍속 비를 나타내는 도면

도 12는 16방위 유입류 풍향에 대하여 분석 대상 지역의 수목 유무에 따른 전체 면적 대비 풍환경 등급 별 면적 비율을 박스플롯(Box plot)으로 나타낸 도면

도 13은 수목 유무에 따른 평균 풍환경 등급 분포, 상위 25%의 풍환경 등급 분포 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면

도 14는 분석 대상 지역에 새로운 수목 식재 시 보행자 고도에서의 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면

도 15는 본 발명의 일 실시예에 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 방법을 설명하는 흐름도

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0045] 이하, 본 발명에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법을 실시하기 위한 구체적인 내용을 설명하면 다음과 같다.

[0046] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템을 나타내는 도면이다.

[0047] 도 1을 참조하면, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템(100)은 모델링부(110), 전산유체역학 분석부(120), 보행자 풍환경 등급 산출부(130), 풍환경 개선 후보지역 산출부(140) 및 시각화부(150)를 포함한다.

[0048] 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템(100)은 전산유체역학 모델에 수목 항력 효과를 반영하여 보다 정확하게 도시 지역의 풍환경을 분석할 수 있고, 이를 도식화할 수 있다. 일 실시예에서, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템(100)은 컴퓨팅 장치(예를 들어, 컴퓨터, PC, 랩탑, 태블릿 등)에서 실행되는 프로그램으로 구현될 수 있다. 다른 실시예에서, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템(100)은 하드웨어 모듈로 구현될 수도 있다.

[0049] 모델링부(110)는 분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 분석 대상 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 분석 대상 지역을 모델링한다. 일 실시예에서, 모델링부(110)는 분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링할 수 있다. 일 실시예에서, 지표 경계 정보는 지형 고도 정보, 구조물 높이 정보 및 수목 위치 정보를 포함할 수 있다. 다른 실시예에서, 모델링부(110)는 사용자로부터 지표 경계 정보를 입력받아 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링할 수도 있다. 모델링부(110)에 실제 도시의 분석 대상 지역을 모델링할 수도 있고, 도시 계획에 따라 변화될 예상 도시의 분석 대상 지역을 모델링할 수 있다.

[0050] 일 실시예에서, 모델링부(110)는 균일 격자계(uniform grid system) 내에서 분석 대상 지역을 모델링할 수 있으며, 격자는 x, y, z 방향으로 각각 기 설정된 크기를 가질 수 있다. 다른 실시예에서, 모델링부(110)는 균일 격자계와 비균등 격자계를 혼합하여(hybrid) 분석 대상 지역을 모델링할 수도 있고, 비균등 격자계 내에서 분석 대상 지역을 모델링할 수도 있다.

[0051] 전산유체역학 분석부(120)는 모델링부(110)에서 모델링된 분석 대상 지역에 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에

의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 통해 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석한다.

[0052] 바람 유입 조건은 하기와 같이 설정될 수 있다. 모델링된 분석 대상 지역에 유입되는 바람은 최초 바람 속도 (initial conditions for velocity) (U , V , W), 난류 운동 에너지(Turbulence Kinetic Energy, TKE) (k) 및 난류 운동 에너지 소실율(dissipation rate) (ε)로 설정될 수 있다.

[0053] 최초 바람 속도는 하기 수학적 식 1로 설정되고, 난류 운동 에너지는 하기 수학적 식 2로 설정되고, 난류 운동 에너지 소실율은 하기 수학적 식 3으로 설정될 수 있다.

[0054] [수학적 식 1]

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cos\theta$$

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \sin\theta$$

$$w(z) = 0$$

[0055]

[0056] [수학적 식 2]

$$k(z) = \frac{u_*^2}{c_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2$$

[0057]

[0058] [수학적 식 3]

$$\varepsilon(z) = \frac{c_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z}$$

[0059]

[0060] 여기에서, α 는 power-law 지수(power-law exponent)이며, u_* 는 마찰 속도(friction velocity), z_0 는 거칠기 길이(roughness length), δ 는 경계층 깊이(boundary-layer depth), κ 는 폰 카르만 상수(von Karman constant), C_μ 는 경험 상수(empirical constant)이다. 해당 값들은 분석조건에 따라 사용자에게 의해 입력받은 값으로 설정될 수 있다. RNG $k-\varepsilon$ 난류 스킴(turbulence scheme)에서, 평균 유동방향 바람 스피드(mean streamwise wind speed)는 z 축의 70m ($z=70$) 높이에서 7.6 m s^{-1} 로 설정될 수 있다. 이러한 경우, 레이놀즈 수(Reynolds number)는 3.52×10^7 이 될 수 있다. 해당 수치는 실시 예이며, 분석 조건에 따라 다르게 설정될 수 있다. 레이놀즈 수는 유체가 유선류나 층류처럼 정상류인지 또는 난류처럼 약간의 요동을 가지지만 평균적으로는 정상류인지를 나타내는 수로 유체의 점성력과 관성력의 비로 나타나는 무차원의 수이다. 레이놀즈 수가 약 2,000보다 작으면 층류가 되고 2,000보다 커지면 난류가 된다.

[0061] 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation) 모델 기반의 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 모델에 수목 항력(Tree Drag) 효과를 적용하여, 분석 대상 지역의 바람장을 분석할 수 있다.

[0062] RANS 모델 기반의 CFD 모델의 지배 방정식 계는 유한 체적법(Finite Volume Method)과 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하여 엇갈림 격자계(Staggered Grid System)에서 풀이되며, 재규격화군(Renormalization Group; RNG) 이론에 근거한 $k-\varepsilon$ 난류 스킴을 기반으로 바람장을 분석한다. 예를 들어, 전산유체역학 분석부(120)는 RANS 모델 기반의 CFD 모델을 통해 분석 대상 지역에서의 바람 유선장(Streamline), 무차원화된 평균 소용돌이도(Normalized Vorticity), 연직 유선장, 속도장, 소용돌이와 재순환 영역, 바람 흐름의 정체 지점(Stagnation-point Height) 및 최대 하강류(Maximum Downdraft) 등을 분석할 수 있다. 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 1.0s 시간 간격(time step)으로 3600초 동안 바람장을 분석

하도록 설정될 수 있다.

[0063] 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 수목의 잎 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적(LAD(Leaf Area Density, 잎 영역 밀도)을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum), 난류 운동 에너지(TKE) 및 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출할 수 있다. 즉, 전산유체역학 분석부(120)는 RANS 모델 기반의 전산유체역학 모델에 수목에 의한 공기압 손실을 반영하기 위해, 운동량 방정식(momentum equation), 난류 운동 에너지(TKE) 및 TKE 소실율(dissipation rates)에 수목 항력 항(tree drag terms) 추가하여 분석 대상 지역의 바람장을 분석할 수 있다.

[0064] 하기 수학식 4는 수목 항력 항이 추가된 운동량 방정식(momentum equation)을 나타내는 식이다.

[0065] [수학식 4]

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) + \frac{1}{\rho} F_{tree,i}$$

[0066]

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

[0067]

[0068] 여기에서, x_i 는 i 번째(i^{th}) 직교 좌표(cartesian coordinate)(i 는 정수), U_i 는 i^{th} 평균 속도 성분(mean velocity component), P^* 는 레퍼런스 값과의 압력 편차, ρ 는 공기 밀도(air density), ν 는 동점도(kinematic viscosity, 유체의 점성도를 같은 온도 조건에서 그 유체의 밀도로 나눈 것), $\overline{u_i}$ 는 i^{th} 평균 속도 성분에서의 변동(fluctuation from the i^{th} mean velocity component)을 나타낸다.

[0069] 수학식 4의 Reynolds stresses는 하기 수학식 5로 파라미터화될 수 있다.

[0070] [수학식 5]

$$-\overline{u_i u_j} = K_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k.$$

[0071]

[0072] 여기에서, K_m 은 난류 확산률(turbulent diffusivity), κ 는 난류 운동 에너지(TKE, Turbulent Kinetic Energy), δ_{ij} 는 크로네커 델타(Kronecker delta) 값을 나타낸다.

[0073] 수학식 5의 난류 확산률(K_m)은 하기 수학식 6으로 나타낼 수 있다.

[0074] [수학식 6]

$$K_m = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

[0075]

[0076] 여기에서, ε 는 TKE 소실율(dissipation rates), C_μ 는 RNG $k-\varepsilon$ 난류 클로저 스킴(turbulence closure scheme)의 경험 상수(empirical constant)를 나타낸다. 일 실시예에서, C_μ 는 0.0845로 설정된 경우를 가정한다.

[0077] 다시 수학식 4에서 운동량 방정식의 수목 항력 항($F_{tree,i}$)은 하기 수학식 7로 나타낼 수 있다.

[0078] [수학식 7]

$$F_{tree,i} = -\rho \cdot n_c^3 \cdot C_d \cdot LAD \cdot U_i \cdot |U|$$

[0079]

[0080] 여기에서, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로써 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)를 나타낸다. 상기 마찰력이나, 잎 항력 계수, 잎 영역 밀도 등은 수목의 종류에 의해 달라질 수 있는 값으로 미리 정해진 값이며, 분석 대상 지역에 포함된 수목의 종류에 따라 다른 값으로 설정될 수 있다.

[0081] 하기 수학식 8는 수목 항력 항이 추가된 난류 운동 에너지(TKE)(turbulent kinetic energy equation)를 나타내며, 수학식 9는 수목 항력 항이 추가된 난류 운동 에너지(TKE) 소실율(TKE dissipation rates)을 나타내는 식이다. RNG $k-\varepsilon$ 난류 클로저 스킴(Turbulence Closure Scheme)에서 TKE 예측 수식(prognostic equation)은 하기 수학식 8과 같이 나타낼 수 있으며, TKE 소실율 예측 수식(prognostic equation)은 하기 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

[0082] [수학식 8]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon + F_{tree,k}$$

[0083]

[0084] [수학식 9]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} - R_s + F_{tree,\varepsilon}$$

[0085]

[0086] 수학식 9의 변형율(strain rate)(R_s)은 하기 수학식 10으로 나타낼 수 있다.

[0087] [수학식 10]

$$R_s = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k}$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}$$

[0088]

[0089] 여기에서, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , η_0 , β_0 는 경험 상수(empirical constant)으로 분석 조건에 따라 사용자에게 의해 다른 값으로 설정될 수 있다. 예를 들어, 해당 값들은 하기와 같이 설정될 수 있다.

[0090] ($C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε , η_0 , β_0) = (1.42, 1.68, 0.7179, 0.7179, 4.377, 0.012)

[0091] 나머지 변수들은 도 4 내지 도 6에서 설명한 바와 같다.

[0092] 다시 수학식 8에서 난류 운동 에너지 수식의 수목 항력 항($F_{tree,k}$)은 하기 수학식 11로 나타낼 수 있다.

[0093] [수학식 11]

[0094]

[0095]

$$F_{tree,k} = n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 4n_c^3 C_d k |U|$$

여기에서, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)를 나타낸다. 상기 마찰력이나, 잎 항력 계수, 잎 영역 밀도 등은 수목의 종류에 의해 달라질 수 있는 값으로 미리 정해진 값이며, 분석 대상 지역에 포함된 수목의 종류에 따라 다른 값으로 설정될 수 있다.

[0096]

다시 수학식 9에서 난류 운동 에너지 소실을 수식의 수목 항력 항($F_{tree,\varepsilon}$)은 하기 수학식 12로 나타낼 수 있다.

[0097]

[수학식 12]

[0098]

[0099]

$$F_{tree,\varepsilon} = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon}{k} n_c^3 C_d LAD |u|^3 - 6n_c^3 C_d \varepsilon |U|$$

여기에서, n_c 는 잎들(Leaves)의 수직 투사(vertical projection)에 의해 덮이는 부분(fraction), C_d 는 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(Leaf Drag Coefficient), LAD(Leaf Area Density)는 잎 영역 밀도로서 단위 체적당 잎이 차지하는 면적, $|U|$ 는 바람 속도(wind speed)를 나타낸다. 상기 마찰력이나, 잎 항력 계수, 잎 영역 밀도 등은 수목의 종류에 의해 달라질 수 있는 값으로 미리 정해진 값이며, 분석 대상 지역에 포함된 수목의 종류에 따라 다른 값으로 설정될 수 있다.

[0100]

다시 도 1을 참조하면, 보행자 풍환경 등급 산출부(130)는 전산유체역학 분석부(120)에서 분석된 바람장 정보를 이용하여 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출한다. 일 실시예에서, 보행자 풍환경 등급 산출부(130)는 분석 대상 지역의 기 설정된 높이에서의 바람 속도 정보를 기초로 뷰포트 풍력 등급(Beaufort wind force scale, BWS)에 따라 등급을 산출하여 보행자 풍환경 등급을 산출할 수 있다. 다른 실시예에서, 보행자 풍환경 등급 산출부(130)는 기 정의된 풍력 등급 산출 기준 가운데 사용자에게 의해 선정된 풍력 등급 기준을 기초로 보행자 풍환경 등급을 산출할 수 있다.

[0101]

시각화부(150)는 모델링부(110)에서 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 시각화된 분석 대상 지역에 보행자 풍환경 등급 산출부(130)에서 산출된 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화한다.

[0102]

일 실시예에서, 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템(100)은 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)를 더 포함할 수 있다. 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)는 보행자 풍환경 등급을 기초로 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선 후보 지역을 산출할 수 있다. 예를 들어, 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)는 기 설정된 등급 이상으로 보행자 풍환경 등급이 나쁜 지역을 풍환경 개선 후보 지역으로 산출할 수 있다. 또한, 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)는 계절에 따른 바람 방향에 따라 해당 풍환경 개선 후보 지역의 풍환경을 개선할 수 있는 수목 식재 위치 후보 지역을 산출할 수도 있고, 해당 후보 지역에 수목이 식재될 경우의 보행자 풍환경 등급을 다시 산출할 수도 있다. 예를 들어, 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)는 바람이 부는 방향으로 건물 등의 구조물이 없는 수목 식재 가능 영역(예를 들어, 노지 영역)을 수목 식재 위치 후보 지역으로 산출할 수 있다.

[0103]

시각화부(150)는 시각화된 분석 대상 지역에 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)에서 산출된 풍환경 개선 후보 지역을 부가하여 시각화할 수 있다. 일 실시예에서, 시각화부(150)는 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)에서 산출된 수목 식재 위치 후보 지역을 더 부가하여 시각화할 수도 있다.

[0104]

이하에서는, 도 1의 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템을 통해 시각화된 예를 나타내는 도면을 이용하여 설명하기로 한다.

[0105]

도 2는 Kurotani et al. (2001)이 수행한 야외 실험의 수목과 측정 기기 위치를 도식화하여 나타낸 도면이다.

[0106]

도 2를 참조하면, Kurotani et al.은 일자로 식재된 수목의 풍하 측에 측정 기기를 설치하고, 해당 측정 기기를 통해 바람과 난류 운동 에너지를 측정하였다. 해당 선행 연구에서 수고(tree height, H)는 7 m이고 지표면에서

수목 하단부까지 높이는 1.2 m이다. Kurotani et al.은 수목 풍하 측으로 각각 0.25H, 0.5H, 1H, 2H, 3H, 4H, 5H의 거리에 지표로부터 수직으로 1.5 m 간격으로 측정 기기를 설치하였다. 본 발명에서는 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(CFD) 모델의 검증을 위해 Kurotani et al.의 야외 실험 조건과 동일하게 측정 위치를 설정하였다.

도 3은 수치 모의 실험 별 수목의 잎 영역 밀도(Leaf Area Density, LAD)를 나타내는 도면이다.

도 3을 참조하면, 선행 연구에서는 수목의 높이에 따라 잎 영역 밀도를 조정하여 민감도 실험을 수행하였다. 본 발명의 모델을 이용한 1번째 분석(VCTL)은 수고에 따라 잎 영역 밀도를 일정하게 하여 분석하였다. 이후 4번의 분석에서 VS01과 VS02는 수고에 따라 잎 영역 밀도가 점점 감소하도록 설정하여 분석하였으며, VS03과 VS04는 수목의 중간 높이까지는 잎 영역 밀도가 감소하다가 더 높아지면 잎 영역 밀도가 다시 증가하도록 설정하여 분석하였다.

도 4는 Kurotani et al. (2001)의 야외실험, 선행 연구(Qi and Ishihara, 2018; Mochida et al., 2008) 및 본 발명의 시스템을 통해 분석한 수목의 풍하 측에서의 무차원 풍속과 난류운동에너지를 나타내는 도면이다.

도 4에 도시된 바와 같이, Kurotani et al. (2001)의 야외실험에서 수목의 풍하 측에서 풍속은 1H 이후부터 수목 중심부에서 풍속이 약해지고, 수목의 상하단부에서 풍속이 강해지는 것을 확인할 수 있다. 난류 운동 에너지는 수목의 풍하측 1H 부근에서 가장 낮았고 2H 이후로 점차 증가하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 특징들은 본 발명의 모델을 이용한 분석 결과(VCTL)에서도 유사하게 나타났으며, 선행 연구들의 결과와 비교했을 때도 본 발명의 모델 결과가 성능이 떨어지지 않았다.

그러나, Kurotani et al. (2001)의 야외 실험 결과와 비교하여, 본 발명의 모델 결과에서는 수목 중심부의 풍속(난류 운동 에너지)이 다소 과소(과대) 모의된 것으로 나타났다. 이는 실제 수목의 경우 높이에 따라 잎 영역 밀도가 균일하지 않은 반면, 본 발명의 모델을 이용한 분석(VCTL)에서는 잎 영역 밀도를 동일하게 설정했기 때문인 것으로 판단된다.

도 5는 Kurotani et al. (2001)의 야외실험과 본 발명의 시스템을 통해 분석한 수목의 풍하 측에서의 민감도 별 무차원 풍속과 난류운동에너지를 나타내는 도면이다.

도 5를 참조하면, 수목의 높이에 따라 잎 영역 밀도를 다르게 설정하며 분석한 결과, 잎 영역 밀도를 균일하게 설정하여 분석한 경우(VCTL)보다 결과가 개선되는 것을 확인할 수 있다. 야외 실험과 민감도 실험 간의 정량적 비교 결과는 하기 표 1과 같다.

[표 1]

Data	Location	Mochida et al. (2008)		Qi and Ishihara (2018)		This study				
		k-e, case C-1	k-e, case C-2	LES	modified k-e	VCTL	VS01	VS02	VS03	VS04
U/U_{ref}	0.25H	-	-	-	-	0.111	0.093	0.099	0.074	0.054
	0.5H	-	-	-	-	0.095	0.052	0.068	0.051	0.039
	1H	0.245	0.038	0.030	0.107	0.085	0.052	0.066	0.049	0.041
	2H	0.284	0.070	0.013	0.090	0.105	0.092	0.094	0.072	0.064
	3H	0.279	0.095	0.057	0.049	0.088	0.061	0.072	0.063	0.058
	4H	0.268	0.095	0.066	0.057	0.037	0.038	0.027	0.030	0.035
	5H	0.324	0.172	0.018	0.056	0.044	0.085	0.058	0.069	0.077
	Avg. (1~5H)	0.280	0.094	0.037	0.072	0.072	0.066	0.063	0.057	0.055
k/U_{ref}^2	0.25H	-	-	-	-	0.007	0.012	0.003	0.005	0.011
	0.5H	-	-	-	-	0.015	0.009	0.011	0.007	0.003
	1H	0.080	0.016	0.007	0.016	0.011	0.011	0.010	0.008	0.006
	2H	0.070	0.013	0.009	0.019	0.013	0.018	0.014	0.013	0.013
	3H	0.045	0.028	0.013	0.032	0.016	0.020	0.017	0.015	0.015
	4H	0.024	0.030	0.020	0.031	0.014	0.017	0.015	0.013	0.011
	5H	0.018	0.025	0.017	0.028	0.011	0.012	0.012	0.010	0.010
	Avg. (1~5H)	0.047	0.022	0.013	0.025	0.013	0.016	0.014	0.012	0.011

도 6은 분석 대상 지역의 항공 사진의 일 예를 나타내는 도면이다

도 6을 참조하면, 분석 대상 지역의 일 예로 도심지에 위치한 부경대학교 대연캠퍼스를 선정하였다. 부경대학교 대연캠퍼스는 전체 면적의 약 15.8%가 초목으로 덮여 있어서, 도시 내에서 식재 밀도가 비교적 높은 지역이다. 해당 캠퍼스 내에는 학생들의 휴식 공간과 친환경 조경을 위해 학교 곳곳에 수목이 식재되어 있다. 예를 들어, 해당 캠퍼스 내의 A 지역에는 10 m 이상의 소나무가 300여 그루, B 지역에는 15 m 이상의 히말라야시다 70여 그루와 수십 그루의 소나무가 혼합되어 식재되어 있고, C 지역과 학교 경계 지역에는 경계를 따라 수목이 혼합되어 식재되어 있는 것을 확인할 수 있다.

도 7은 도 6의 분석 대상 지역을 모델링한 이미지와 해당 영역 내 3차원 건물 및 수목을 나타내는 도면이다.

[0120] 도 7을 참조하면, 분석 대상 지역의 모델링은 부경대학교 대연캠퍼스를 중심으로 설정하여 대상 영역 내에서는 격자 크기가 균일하고, 대상 영역에서 멀어질수록 격자가 커지는 비균등 격자계를 사용하였다. 부경대학교 대연캠퍼스의 지형 고도 정보, 구조물(건물 등)의 위치 및 높이 정보, 수목의 위치정보는 지리정보시스템(geographic information system, GIS) 정보에 포함된 지표 경계 정보를 자료를 이용하였으며, 해당 정보를 이용하여 부경대학교 대연캠퍼스를 3차원으로 모델링하였다. 균일한 격자의 크기(개수)는 x축과 y축 방향으로 각각 5m(200개)이고, z 축 방향으로 0.7 m(175개)로 설정하였다. 비균등 격자의 경우 x축과 y축 방향으로 각각 1.2배씩 64.2 m, z축 방향으로 66.8 m까지 증가하도록 설정하였다. 총 격자의 개수는 x축, y축, z축 방향으로 각각 284, 284, 208개이고, 전체 모델링 영역의 크기는 수평 방향으로 5036.4m, 연직 방향으로 1165.3 m로 설정하였다.

[0121] 수목의 잎 표면 거칠기를 나타내는 잎 항력 계수(C_d)는 풍속에 영향을 미치며, 잎의 표면 특성에 따라 0.2에서 2.0 사이의 값을 가진다. 본 발명에서는 잎 항력 계수(C_d)를 juniper와 Colorado spruce 수목 특성인 1.0으로 사용하였고, 잎 영역 밀도는 3.33으로 설정하였다. 수고는 최소 2.1 m에서 최대 18 m까지 설정하였고, 평균 수고는 9 m로 설정하였다. 해당 설정 값들은 수목의 종류 등 분석 조건에 따라 다르게 설정될 수 있다.

[0122] 초기 유입류 풍향은 서남서풍으로 설정하고, 유입류 풍속은 22.5m 높이에서 6.08 ms⁻¹로 설정하였다. 중립 대기를 가정하여, 바람과 난류 운동 에너지, 난류 운동 에너지 소멸률에 대한 유입 경계 조건은 Castro and Apsley (1997)에서 사용된 연직 분포를 사용하였다.

[0123] 도 8은 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급과 바람장을 나타내는 도면이다.

[0124] 도 8을 참조하면, 도 8은 분석 대상 지역의 보행자 고도에서 풍환경 등급을 분석한 결과를 시각화한 것을 나타낸다. 본 발명은 표 2에 제시된 바와 같이, Davenport 풍환경 등급표를 사용하였으며, Davenport 풍환경 평가 척도는 풍속의 강도에 따라 인체가 느끼는 정도를 공간 용도에 따라 4개의 등급으로 구분한다.

[0125] Davenport 풍환경 등급은 뷰포트 풍력 등급(Beaufort wind force scale, BWS)을 기반으로 지표면 10m 높이에서의 바람 속도(풍속) 값을 사용한다. 따라서, 본 발명에서는 지표면 1.75m에서의 풍속으로 변환하여 사용하였으며, 활동(Activity)이 'Short-term Sitting'인 경우를 기준으로 보행자 풍환경 등급을 분석하였다. BWS가 3등급인 경우에는 풍환경이 ' 좋음 ' 상태를 나타내며, 풍환경이 4, 5, 8등급인 경우에는 풍환경이 각각 ' 약간 불편 ', ' 불쾌 ', ' 위험 ' 상태를 나타낸다.

[0126] [표 2]

Activity	Places	Sensory Level			
		Good	Tolerable	Unpleasant	Dangerous
Walking fast	Sidewalks	 5 (5.3~7.2)	 6 (7.2~9.3)	 7 (9.3~11.5)	 8 (11.5~)
Strolling, Skating	Skating rinks, Parks, Entrances	 4 (3.7~5.3)	 5 (5.3~7.2)	 6 (7.2~9.3)	 8 (11.5~)
Short-term Sitting	Plaza areas, Parks	 3 (2.2~3.7)	 4 (3.7~5.3)	 5 (5.3~7.2)	 8 (11.5~)
Prolonged sitting	Outdoor restaurants, Theatres, Band shells	 2 (~2.2)	 3 (2.2~3.7)	 4 (3.7~5.3)	 8 (11.5~)
Tolerance			< 1/week	< 1/month	< 1/year

[0127]

[0128] 도 8을 참조하면, 수목이 없는 경우((a) 도면) 건물 주변과 건물 사이, 장애물이 없는 나지 등에서 ' 약간 불편 (노랑) ' 등급이 나타났고, 고층 건물 주변에서 부분적으로 ' 불쾌 (주황) ' 등급이 나타났다. 수목이 있는 경우((b) 도면), 수목 항력에 의해 풍속이 감소하였고 학교 내부의 풍환경이 전체적으로 개선된 것을 확인할 수 있다. 이하에서는 풍환경이 나쁜 상태로 나타나는 ①지역과 ②지역을 중점으로 분석하였다.

[0129] 도 9는 분석 대상 지역 내 제1 영역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이고, 도 10은 분석 대상 지역 내 제2 영역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이다.

[0130] 도 9를 참조하면, 도 9는 도 8에 도시된 영역에서 ①지역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등

급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이다.

- [0131] 도 9의 (a)와 같이 수목이 식재되지 않은 상태의 경우, 분석 대상 지역에 서남서풍으로 유입되는 흐름은 건물 사이로 수렴하면서 풍속이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 도 9의 (b)와 같이 수목이 식재된 상태의 경우, 분석 대상 지역의 경계면에 식재된 수목이 1차적으로 바람의 흐름을 약화시키고 건물 사이와 나지 등에 식재된 수목이 2차적으로 바람을 약화시켜 풍환경이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 도 9의 (c)를 참조하면, 수목이 식재된 경우, 분석 대상 지역의 풍환경이 최소 1등급에서 최대 3등급까지 개선된 것을 확인할 수 있다.
- [0132] 도 10을 참조하면, 도 10은 도 8에 도시된 영역에서 ②지역에서 수목의 유무에 따른 보행자 고도에서의 풍환경 등급, 바람장 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이다.
- [0133] 도 10의 (a)와 같이 이 지역은 아파트 단지가 도시 협곡 형태로 배열되어 있는 지역으로, 수목이 식재되지 않은 상태의 경우, 아파트 단지 사이 사이에서 풍환경이 나쁘게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 해당 지역에 대한 분석은 하기 도 11과 같다.
- [0134] 도 11은 건물 주변에서 발생하는 바람장, 연직 속도장 및 수목의 유무에 따른 풍속 비를 나타내는 도면이다.
- [0135] 도 11을 참조하면, 도 11은 도 10의 아파트 단지(건물) 주변에서 발생하는 바람장, 연직 속도장 및 수목의 유무에 따른 풍속 비를 나타내는 도면이다. 도 11에 도시된 바와 같이, 해당 지역의 아파트 단지에 비스듬히 유입되는 상층의 강한 흐름이 건물에 부딪혀 하강하고, 건물을 따라 하강하는 강한 흐름은 지표면에서 역행하게 되어, 결과적으로 보행자 고도에서 풍환경이 악화된다.
- [0136] 다시 도 10을 참조하면, 도 10의 (b)와 같이 수목이 식재된 상태의 경우, 분석 대상 지역의 건물 사이에 식재된 수목이 바람의 흐름을 약화시켜 풍환경이 개선되는 것을 확인할 수 있다. 건물 사이에 수목이 있는 경우, 풍속이 최대 20%이하로 감소한 것을 확인할 수 있다. 도 10의 (c)를 참조하면, 수목이 식재된 경우, 분석 대상 지역의 풍환경이 최소 1등급에서 2등급까지 개선된 것을 확인할 수 있다.
- [0137] 도 12는 16방위 유입류 풍향에 대하여 분석 대상 지역의 수목 유무에 따른 전체 면적 대비 풍환경 등급 별 면적 비율을 박스플롯(Box plot)으로 나타낸 도면이다.
- [0138] 도 12를 참조하면, 수목이 식재되지 않은 상태의 경우, 뷰포트 풍력 등급(BWS) 3등급과 4등급이 각각 24.2%, 8.2%로 학교 전체 면적의 1/3로 나타났다. 인체 활동에 불쾌감을 줄 수 있는 BWS 5등급과 6등급은 1%이하로 나타났다. 동북동풍, 동풍, 동남동풍 등에서는 BWS 5등급과 6등급이 2.6~3%로 비교적 높게 나타났다. 수목이 식재되어 있는 상태의 경우, BWS 3~6등급이 감소하고 2등급이 증가하여 분석 대상 지역의 내부 전반적인 풍환경이 개선된 것을 확인할 수 있다.
- [0139] 도 13은 수목 유무에 따른 평균 풍환경 등급 분포, 상위 25%의 풍환경 등급 분포 및 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이다.
- [0140] 도 13을 참조하면, 분석 대상 지역에 수목이 식재되지 않은 상태의 경우 건물 주변과 건물 사이, 장애물이 없는 나지, 학교 외부의 대도로 등에서 보행자 풍환경이 나쁜 상태로 나타났고, 수목이 식재되어 있는 상태의 경우, BWS 등급이 최대 3등급까지 개선된 것을 확인할 수 있다.
- [0141] 도 14는 분석 대상 지역에 새로운 수목 식재 시 보행자 고도에서의 풍환경 등급 차이를 나타내는 도면이다.
- [0142] 도 14를 참조하면, 수목이 식재된 경우에도 풍환경이 개선되지 않는 지역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 본 발명에서는 풍환경 개선 후보 지역에 새로운 수목을 식재하여 보행자 풍환경이 개선되는지를 여부를 분석하였다.
- [0143] 고층 건물 주변의 경우 상층의 강한 흐름이 건물에 부딪혀 지상으로 하강하게 되면서 풍환경이 악화되게 된다. 일 실시예에서, 풍환경 개선 후보 지역인 고층 건물 주변에서 수목 식재 위치 후보 지역인 벽면 근처에 새로운 수목을 식재하여 풍환경이 개선되는지 여부를 분석하였다. 도 14의 (b)와 (e)를 참조하면, 새로 식재된 벽면 근처의 수목이 하강하는 흐름과 지상에서 역류하는 흐름을 약화시켜 건물 주변의 풍환경을 개선한 것을 확인할 수 있다. 도 14의 (c)와 (f)를 참조하면, 새로운 수목 식재 시 건물 주변에서 풍환경 등급이 최대 2등급까지 개선되는 것을 확인할 수 있다. 한편, 새로운 수목으로 인해 지상의 유체 흐름 패턴이 변하고, 고층 건물 양쪽으로 우회하는 기류에 의해 건물 측면에서 풍속이 약간 가속되어 BWS 등급이 한 등급 증가하는 지역도 나타나는 것을 확인할 수 있다.
- [0144] 도 15는 본 발명의 일 실시예에 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을

이용한 보행자 풍환경 분석 방법을 설명하는 흐름도이다.

- [0145] 도 15를 참조하면, 모델링부(110)는 분석 대상 지역의 지표 경계(Surface Lateral Boundary) 정보를 입력받아 해당 지역의 지형, 구조물 및 수목을 생성하여 상기 분석 대상 지역을 모델링한다(단계 S1510). 일 실시예에서, 모델링부(110)는 분석 대상 지역에 대한 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 정보를 입력받아 해당 정보에 포함된 지표 경계 정보를 이용하여 분석 대상 지역을 3차원으로 모델링할 수 있다.
- [0146] 전산유체역학 분석부(120)는 모델링부(110)에서 모델링된 분석 대상 지역에 대한 바람 유입 조건을 설정하고, 수목에 의해 영향을 받는 수목 항력(Tree Drag) 효과가 적용된 전산유체역학 모델(CFD)을 통해 모델링된 분석 대상 지역의 바람장을 분석한다(단계 S1520).
- [0147] 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 수목의 윗 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum)을 산출할 수 있다.
- [0148] 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 수목의 윗 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 난류 운동 에너지(Turbulent Kinetic Energy, TKE)를 산출할 수 있다.
- [0149] 일 실시예에서, 전산유체역학 분석부(120)는 수목의 윗 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출할 수 있다.
- [0150] 전산유체역학 분석부(120)가 수목의 윗 표면 거칠기와 단위 체적당 잎이 차지하는 면적을 기초로 매개변수화한 수목 항력을 반영하여 운동량(momentum), 난류 운동 에너지(TKE) 및 난류 운동 에너지 소멸율(TKE dissipation rates)을 산출하는 과정은 수학적 4 에서 수학적 12에서 설명한 바와 같다.
- [0151] 보행자 풍환경 등급 산출부(130)는 전산유체역학 분석부(120)에서 분석된 바람장 정보를 이용하여 분석 대상 지역의 보행자 풍환경 등급을 산출한다(단계 S1530). 일 실시예에서, 보행자 풍환경 등급 산출부(130)는 분석 대상 지역의 기 설정된 높이에서의 바람 속도 정보를 기초로 뷰포트 풍력 등급(Beaufort wind force scale, BWS)에 따라 등급을 산출하여 보행자 풍환경 등급을 산출할 수 있다.
- [0152] 시각화부(150)는 모델링된 분석 대상 지역을 가상 공간 상에 3차원으로 시각화하고, 시각화된 분석 대상 지역에 상기 보행자 풍환경 등급을 부가하여 시각화한다(단계 S1540).
- [0153] 일 실시예에서, 풍환경 개선 후보 지역 산출부(140)는 보행자 풍환경 등급 산출부(130)에서 산출된 보행자 풍환경 등급을 기초로 분석 대상 지역 내에서 풍환경 개선 후보 지역을 산출하고, 시각화부(150)는 시각화된 분석 대상 지역에 산출된 풍환경 개선 후보 지역을 부가하여 시각화할 수도 있다.
- [0154] 도 1 내지 도 15를 통해 설명된 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법은 컴퓨터에 의해 실행 가능한 명령어를 포함하는 기록 매체의 형태로도 구현될 수도 있다.
- [0155] 이상 본 발명의 실시예로 설명하였으나 본 발명의 기술적 사상이 상기 실시예로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 기술적 사상을 벗어나지 않는 범주에서 다양한 수목 항력 효과를 반영한 전산유체역학(CFD) 모델을 이용한 보행자 풍환경 분석 시스템 및 이를 이용한 분석 방법으로 구현할 수 있다.

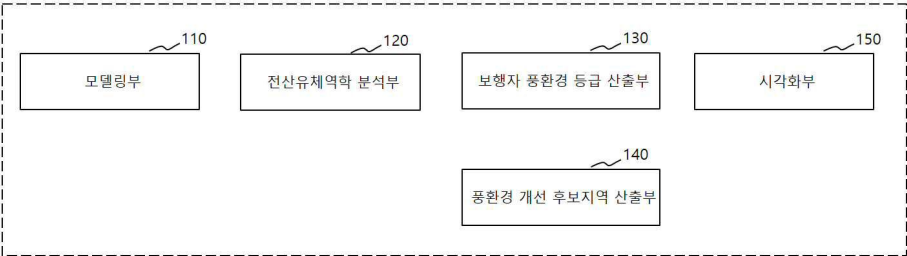
부호의 설명

- [0156] 110 : 모델링부
- 120 : 전산유체역학 분석부
- 130 : 보행자 풍환경 등급 산출부
- 140 : 풍환경 개선 후보 지역 산출부
- 150 : 시각화부

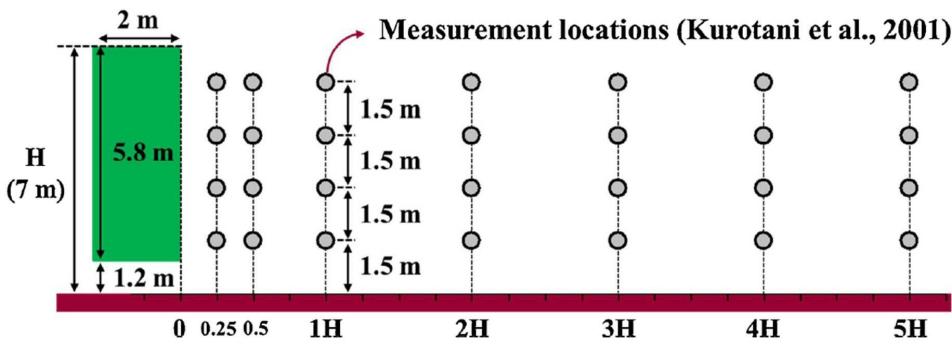
도면

도면1

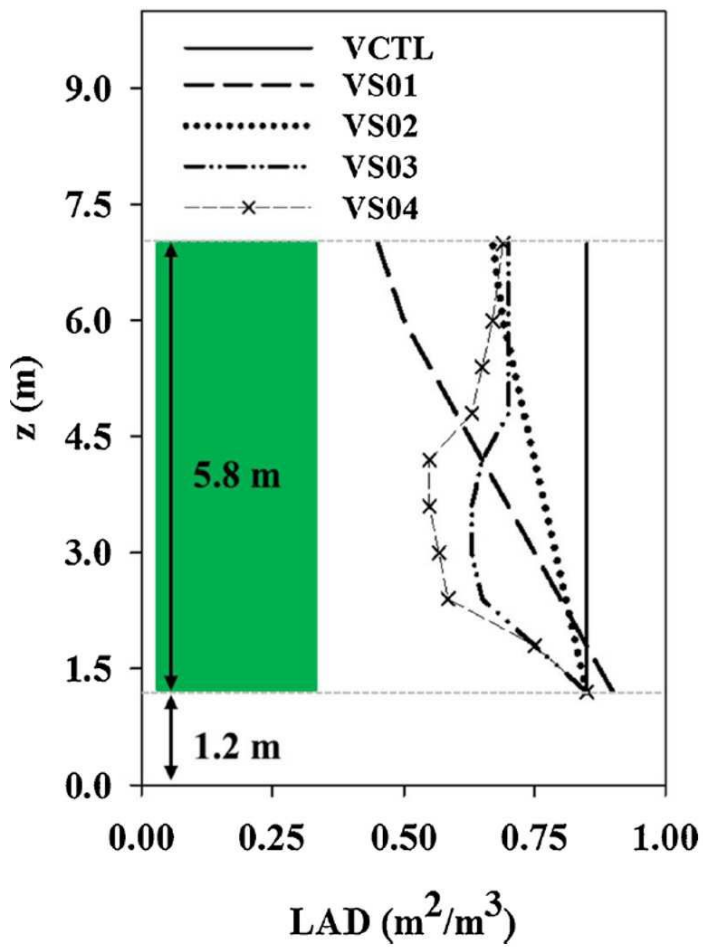
100



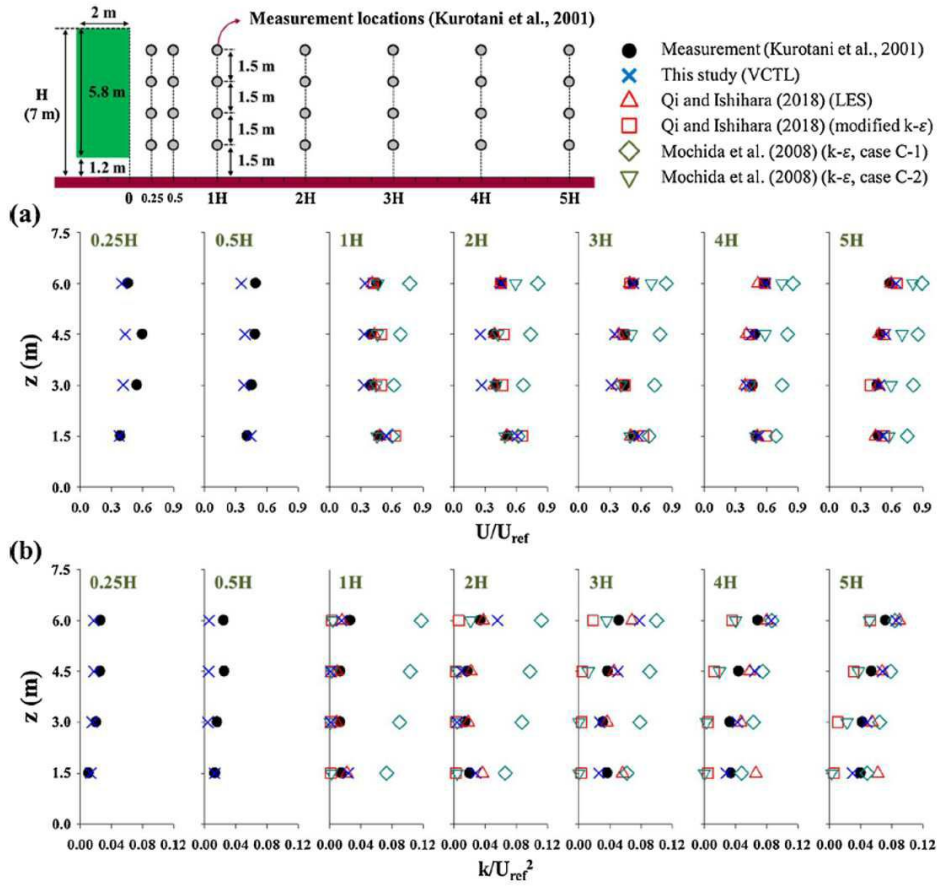
도면2



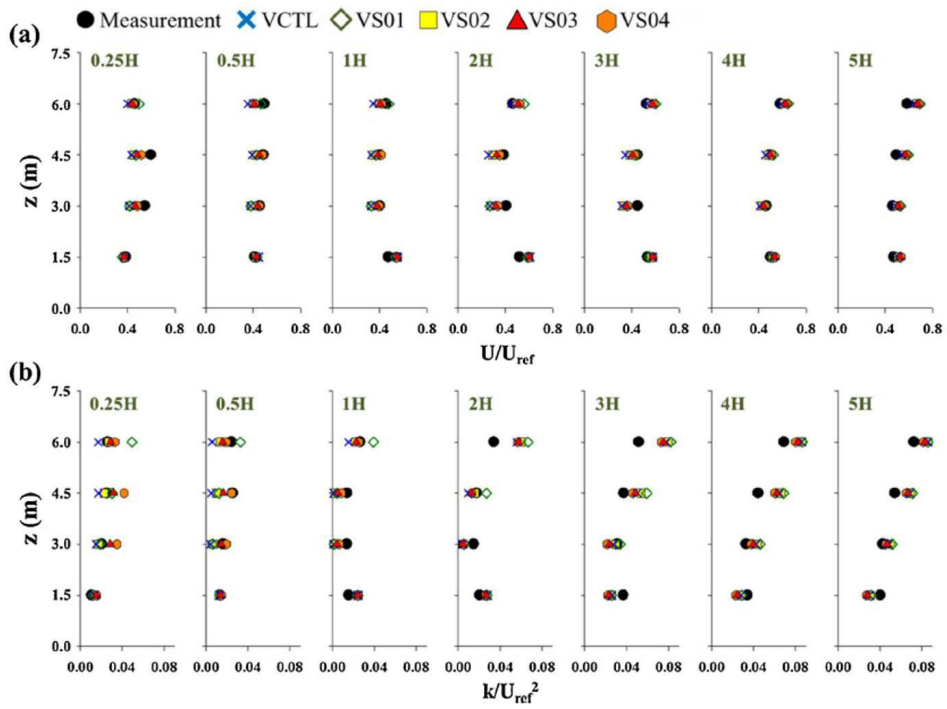
도면3



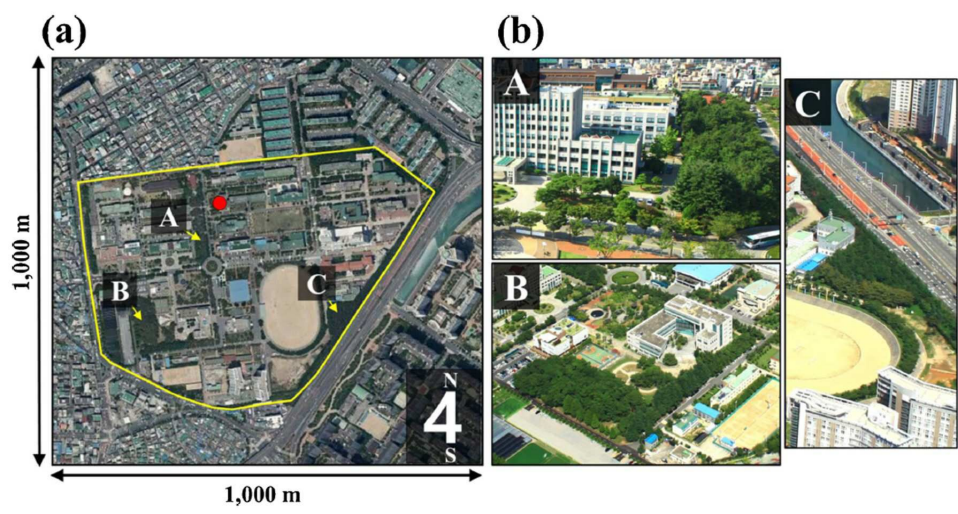
도면4



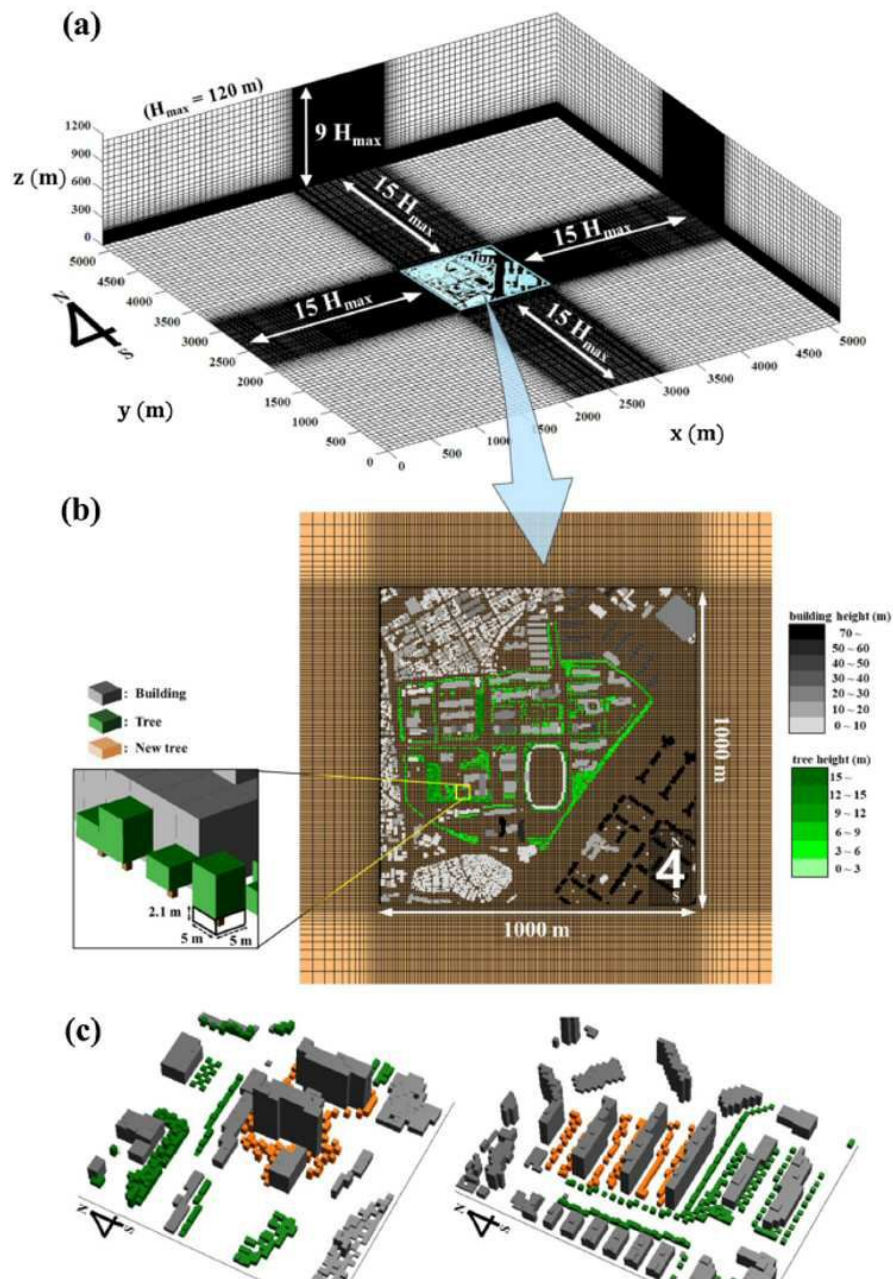
도면5



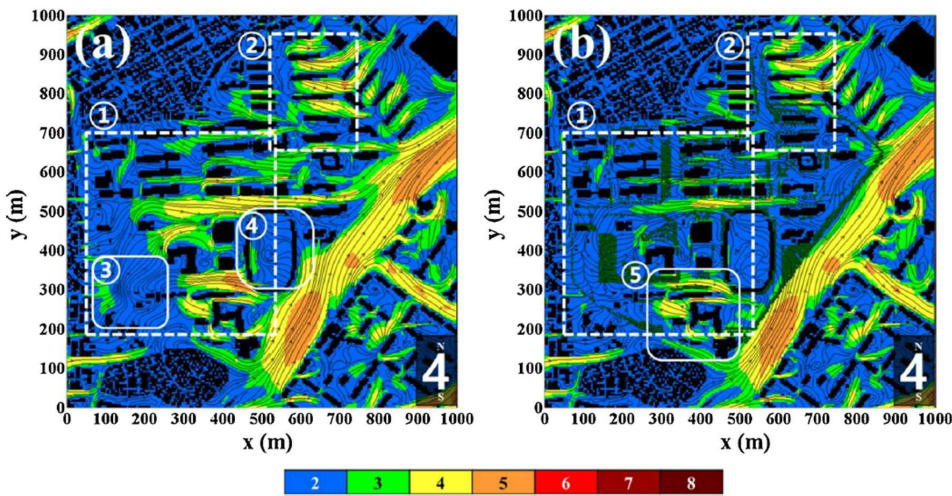
도면6



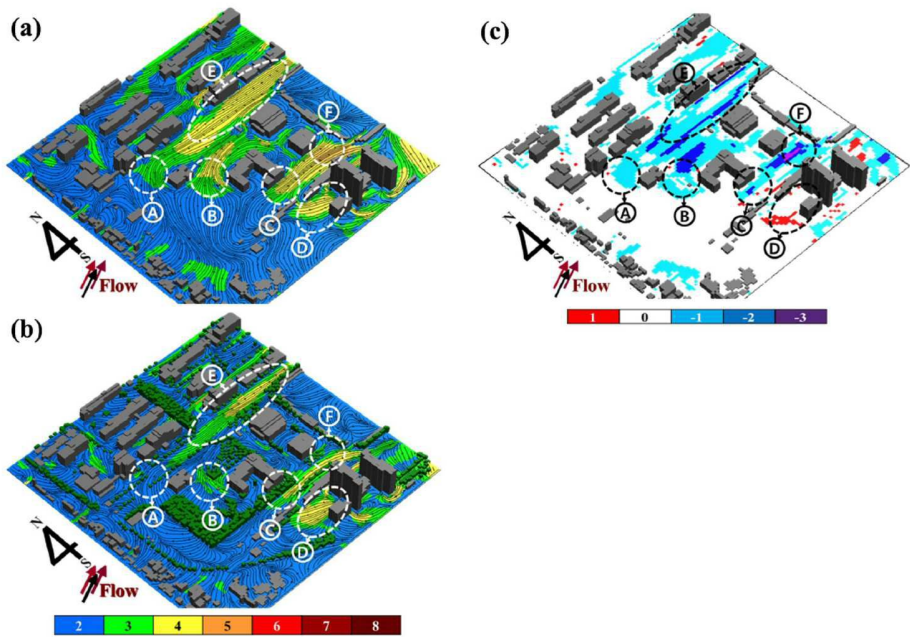
도면7



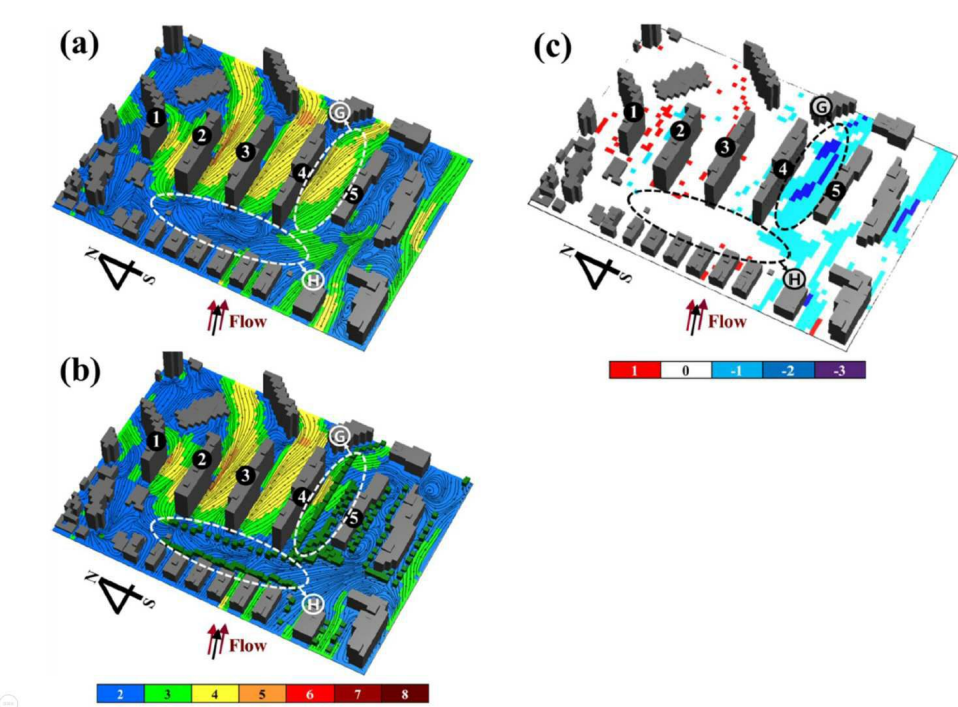
도면8



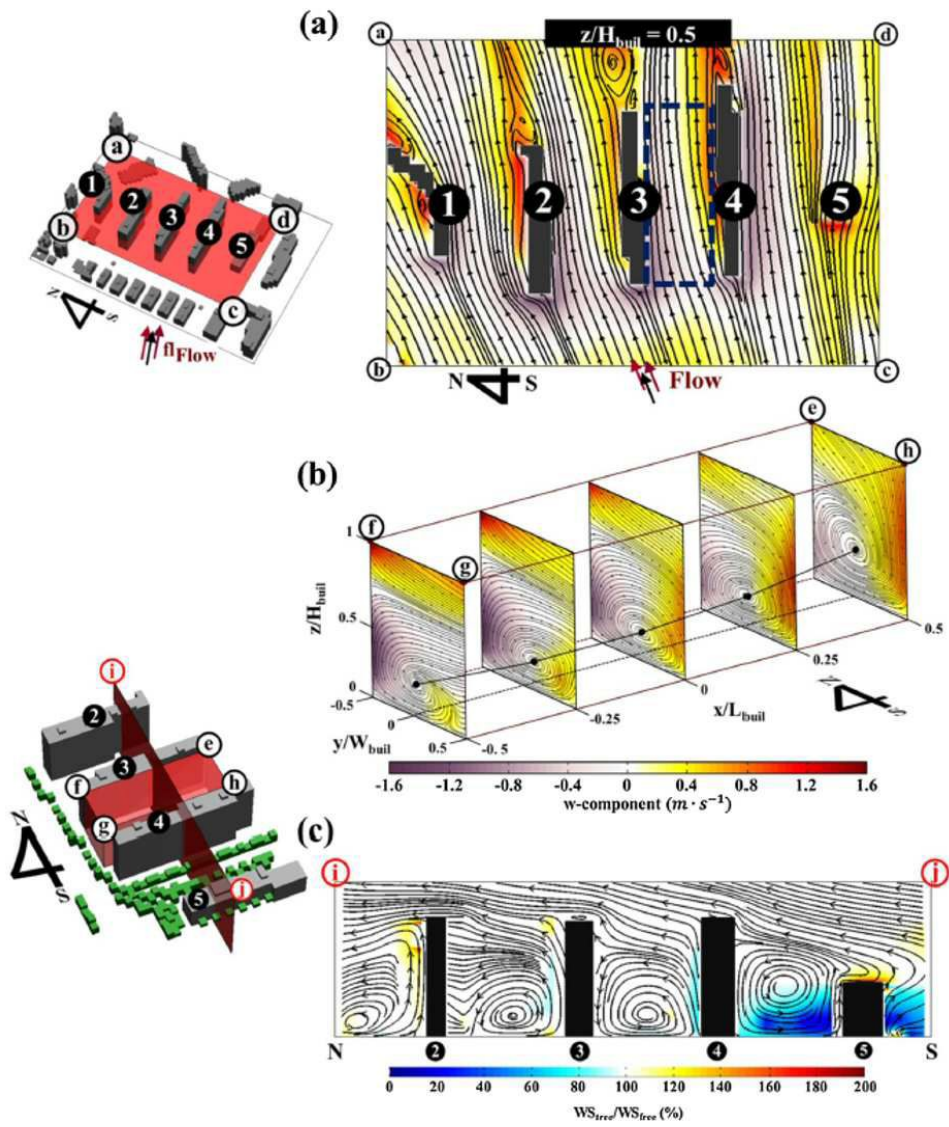
도면9



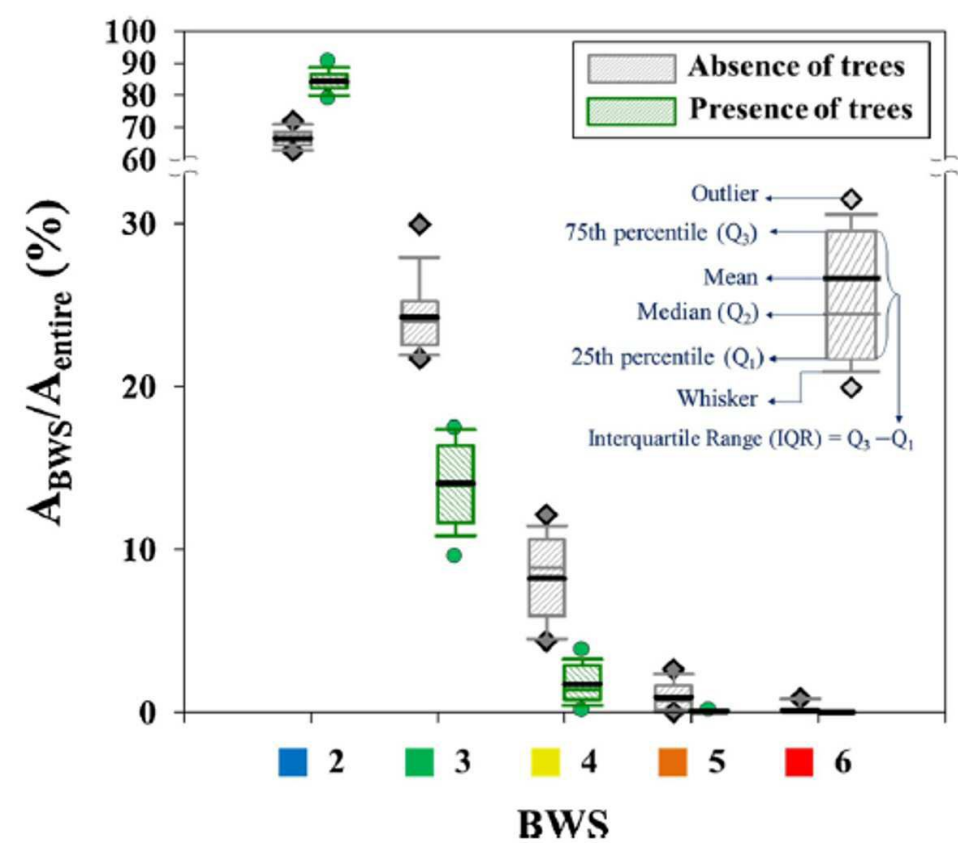
도면10



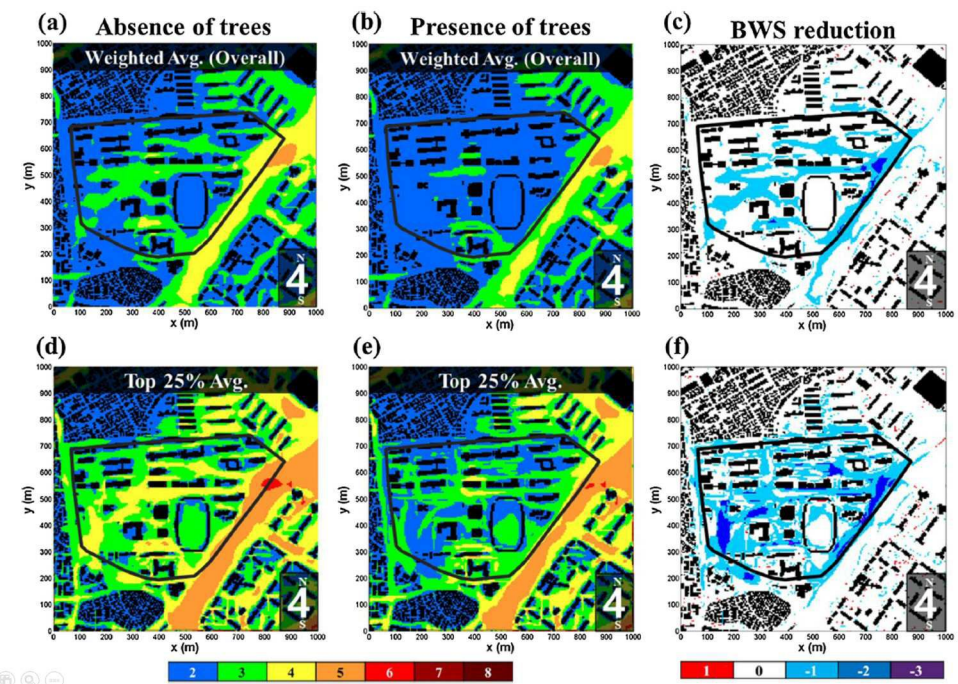
도면11



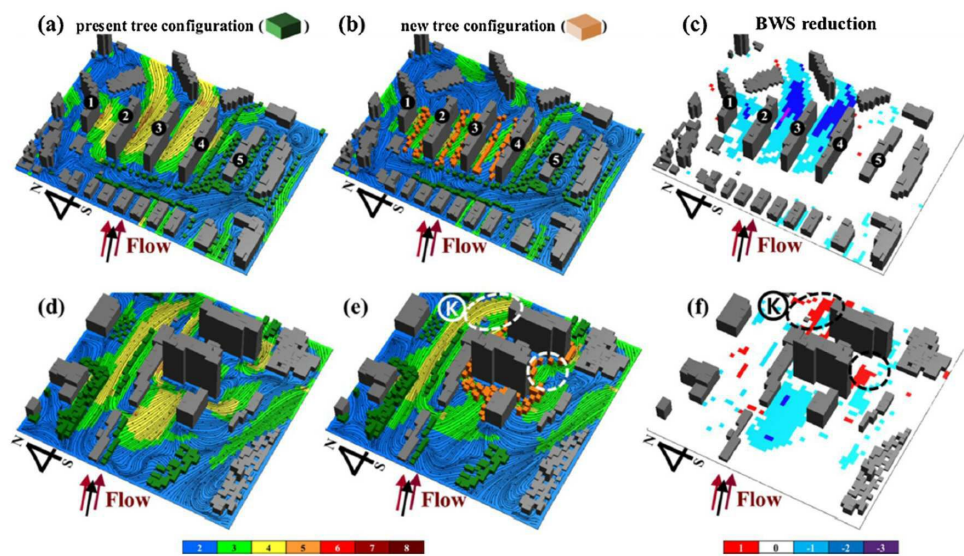
도면12



도면13



도면14



도면15

