



도시지형을 지나는 난류 경계층 유동의 대와류 수치모사

김 병 구,¹ 이 창 훈^{*2}

LARGE-EDDY SIMULATION OF TURBULENT BOUNDARY-LAYER FLOW OVER A URBAN TOPOGRAPHY

Byung-Gu Kim¹ and Changhoon Lee^{*2}

Large-eddy simulation has been conducted to simulate turbulent boundary-layer flows over an array of regularly distributed obstacles considering various cases of a wind incident angle. The effect of wind direction was investigated in the square cube array that periodic boundary condition was imposed. Characteristics of the turbulent flow over the obstacle array have been found to be very sensitive to the direction of prevailing wind or of mean pressure gradient. Velocity of planar average shows that the direction of the velocity is not always aligned with mean pressure gradient but varied with height, specially below the urban canopy. Turbulent statistics are changed sensitively with the direction of mean pressure gradient around 10 degree.

Key Words : 대와류 시뮬레이션(Large-eddy simulation), 도시확산(Urban dispersion),
거친벽 경계층유동(Roughwall boundary-layer), 도시경계층(Urban boundary-layer)

1. 서 론

건물 등 인공구조물이 복잡하게 분포되어 있는 도시지역의 기류분포는 식생층(vegetation canopy)으로 덮여있는 시골지역과는 상당히 다르다. 도시캐노피(urban canopy) 높이 근처 및 하부의 기류분포가 주요 관심 대상이며, 이를 이해함으로써 거주 지역에서 풍환경의 향상, 빌딩풍의 이해를 통한 건축물의 구조적 안전 및 보행자의 안전을 도모할 수 있다. 또 도심에서 배출되는 오염물질의 확산을 예측하기 위한 확산모델 구축에 필수적인 정보를 제공할 수 있다.

도시캐노피유동에 대한 실험적, 수치적 연구는 많은 선행 연구자들에 의해 진행된 바 있다. Hanna et al.[1]는 단순한 형태의 장애물 배열을 지나는 유동에 대한 LES를 수행하여 평균속도 및 난류량을 구하였다. Kanda et al.[2]는 도시캐노피유동에 대한 LES를 수행하여 캐노피 위쪽에서 매우 큰 규모의 난류구조(turbulent organized structure)가 존재함을 보였다.

Coccal et al. [3]은 사각형, 엇갈린 장애물 배열에 대한 직접 수치모사(direct numerical simulation)를 수행하여 평균속도, 난류 및 항력계수 등이 Cheng & Castro의 풍동실험[4]과 잘 일치함을 보여 수치모사가 도시캐노피유동의 해석에 매우 유용한 도구임을 보였다. 또한 Coccal et al.[3]의 DNS (direct numerical simulation)에 의해 혼합길이 (mixing length)는 지면에서 최소이나 캐노피 높이에서 두 번째 최소임이 밝혀졌다. 캐노피 내부에서의 최대값은 중간높이 부근에서 나타났다. 이는 Cionco[5]가 캐노피 내부의 유동장을 모수화하기 위해 도입한바 있고, 이후로도 Macdonald[6], Di Sabatino et al.[7]에서도 사용된 일정혼합길이 가정이 수정되어야 함을 나타낸다.

지금까지 대부분의 연구가 육면체나 정육면체로 이루어진 장애물이 규칙적으로 배치된 배열을 (square, staggered) 대상으로 수행되었다. 이러한 장애물 배열은 실제 도심지 건물의 이상적 분포로 가정되어 실험 및 수치 연구에 사용되었다. 본 연구에서도 균일분포 모형을 사용하여 연구를 수행하였다. 다만 기존 연구에서 풍향이 장애물 면에 수직인 경우가 대부분이었다. 현실적으로 다양한 경우의 풍향이 존재한다. 이를 반영하기 위해 본 연구에서는 수치적 방법을 사용하여 도시캐노피에서의 기류 연구를 수행하였다.

1 연세대학교 계산과학공학과

2 연세대학교 기계공학과/계산과학공학과

* TEL : 02) 2123-2846

* Corresponding author, E-mail: cleee@yonsei.ac.kr

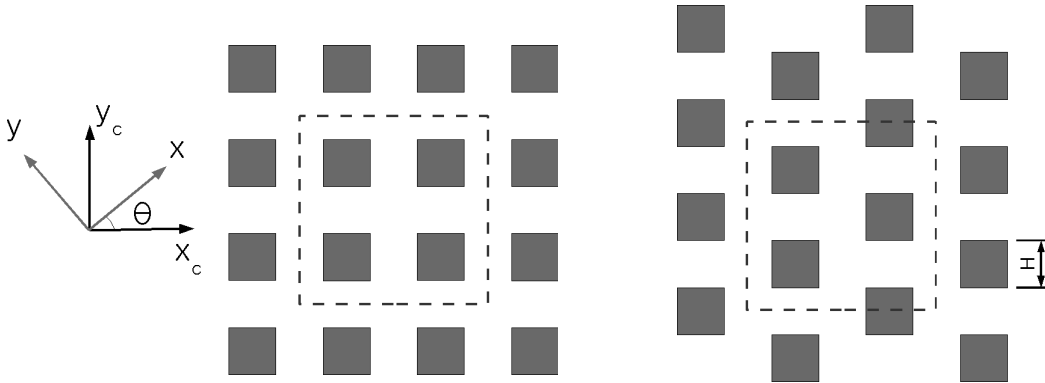


Fig. 1 Configuration of square (left) and staggered array (right). θ and H are the direction of mean pressure gradient and dimension of a cube, respectively.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

본 연구에서 도시캐노피유동의 수치적 연구를 위해 LES를 수행하였으며 filtered Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i^c}{\partial x_i^c} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_i^c}{\partial t} + \frac{\partial U_i^c U_j^c}{\partial x_j^c} = & -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x_i^c} + \delta_{i1} \frac{\partial \langle P_1 \rangle}{\partial x_1^c} \right) \\ & + \delta_{j2} \frac{\partial \langle P_2 \rangle}{\partial x_2^c} + \frac{\partial}{\partial x_j^c} (\tau_{ij} + \nu \frac{\partial U_i^c}{\partial x_j^c}) \end{aligned} \quad (2)$$

풍향과 정렬된 좌표계($x, y, z; U, V, W$)와 구분하기 위해 위치자 c 를 사용하였다. 식 (1)과 (2)는 직교좌표계에서 수치적으로 해석되었다. U_i^c 는 x^c - y^c 좌표계에서 세 방향 속도성분, p 는 압력을 나타낸다. τ_{ij} 는 subgrid-scale (SGS) Reynolds stress를 나타낸다. ν 는 동점성계수이다. $\partial \langle P_1 \rangle / \partial x_1^c$, $\partial \langle P_2 \rangle / \partial x_2^c$ 는 주기적 경계조건에서 유동을 구동하기 위해 x^c , y^c 방향으로 작용하는 평균압력구배로서 위치에 상관없이 상수이다. 본 연구에서는 SGS Reynolds stress 항 τ_{ij} 의 모형을 위해 Smagorinsky 모델을 사용하였으며, Smagorinsky coefficient C_s 로는 bluff body 주위 유동에 적합한 것으로 추천되는 값인 0.1을 사용하였다[8]. Fig. 1은 본 연구에서 고려된 두 가지 형태의 장애물 배열인 square, staggered 배열을 나타낸다. 본 연구에서는 풍향을 고려하기 때문에 평균압력구배의 방향을 주유동방향으로 정의하는 것

이 편리하다. Fig. 1에서 평균압력구배의 방향인 θ 는 임의의 값을 가질 수 있다. 따라서 주유동방향을 x , 횡방향을 y , 수직방향을 z 로 정의한다. 수직방향의 경우 $z = z_c$ 이다. U_1 , U_2 , U_3 는 각각 주유동방향, 횡방향, 수직방향의 속도성분을 나타낸다.

2.2 격자 해상도 및 계산 영역

본 연구에 사용된 LES 코드를 검증하기 위하여 staggered 배열에 대하여 수행된 Cheng & Castro [4]의 풍동실험결과와 비교하였다. 실험의 경우 레이놀즈수 ($Re_\tau = u_\tau \nu / H$)는 433이며, 풍향의 변화를 고려하는 LES의 경우 풍향에 관계없이 동일한 레이놀즈수가 되도록 두 방향의 압력구배를 조정하였다. 즉 u_τ 는 풍향에 관계없이 일정하다. 계산영역의 크기는 Fig. 1에 나타난 것처럼 x_c, y_c, z_c 방향으로 $4H \times 4H \times 6H$ 이다. H 는 정육면체 장애물의 크기이고 장애물 간격 역시 H 로 일정하다. Coceal et al. [3]은 본 연구와 같이 캐노피높이 근처의 난류에 주된 관심이 있는 경우 계산영역의 크기에 따른 결과의 차이는 매우 작으며 $4H \times 4H \times 6H$ 가 충분한 크기임을 보였다. x^c, y^c 방향으로 주기적 조건을, 모든 고체경계에서는 점착조건을 적용하였다. Staggered, square array 모두 packing density = 0.25 이다.

3. 결과 및 고찰

풍향에 따른 난류유동의 변화를 살펴보기 위해 square 배열을 대상으로 풍향 0 ~ 45도 범위로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 풍향에 따른 시간 및 공간 평균된 평균속도의 수직분포이다. 캐노피 내부에서 주유동방향 속도는 풍향이 0도인 경우 가장 크고 45도에 접근할수록 대체적으로 감소한다.

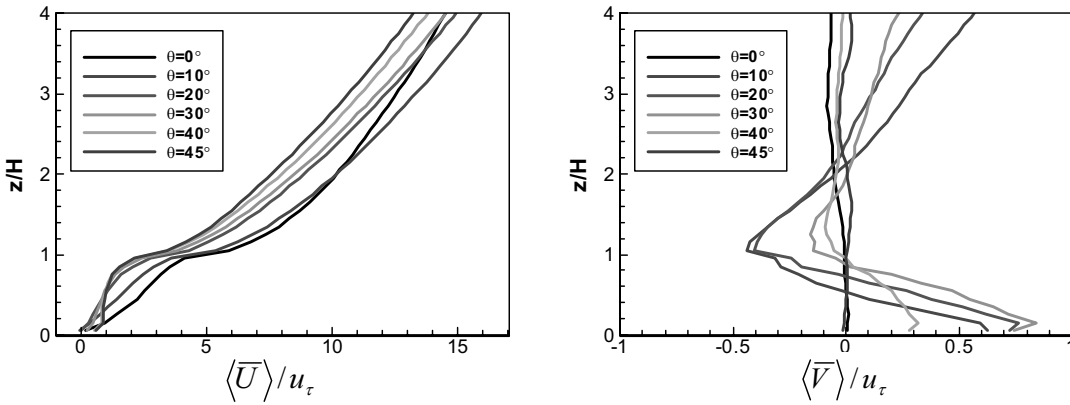


Fig. 2 Streamwise and lateral velocity profiles averaged in time and horizontal space.

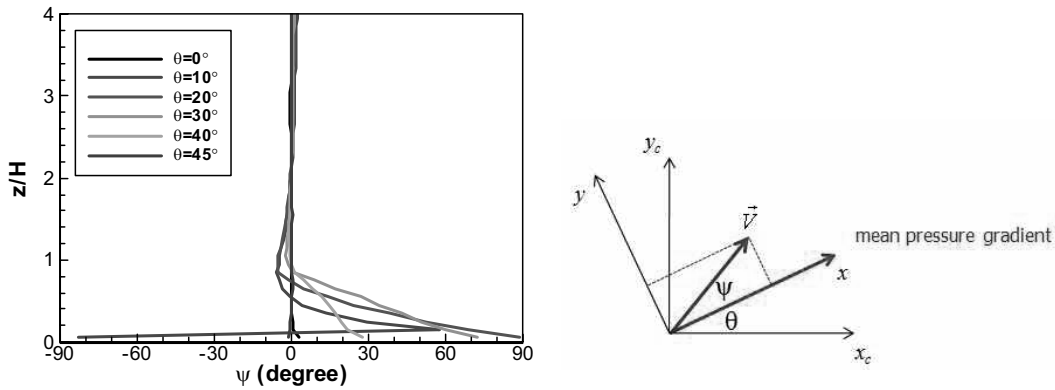


Fig. 3 The angle between the mean velocity vector (\vec{V}) and the mean pressure gradient

다만 지면 근처에서는 20도 이후 증가하는 경향을 보이고 있다. 캐노피 위쪽에서는 풍향이 0 ~ 10도 구간에서 속도가 증가한 이후 10 ~ 45도 구간에서 단조 감소하고 있다. 횡방향 속도분포는 더 흥미로운 결과를 보이고 있다. $\theta=0, 45$ 인 경우 대칭성에 의해 평균속도는 0이다. 그러나 θ 가 증가함에 따라 속도의 방향이 높이에 따라 변함을 알 수 있다. 이는 어느 높이에서의 평균속도의 방향이 반드시 평균압력구배의 방향과 일치하지는 않는다는 것을 의미한다. 바다 근처에서는 풍향 0 ~ 10도 구간에서 속도가 급격하게 증가하였다. 이는 다른 구간에서 풍향의 변위가 같을 때 보인 변화보다 크다. 지면근처에서 최대속도는 $\theta=30$ 도인 경우에, 캐노피 높이에서 최소 속도는 $\theta=10$ 인 경우에 나타난다.

더 자세한 연구를 위해 평균속도가 평균압력구배로부터 어느 정도 이탈하는지를 조사하여 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서 θ 는 평균압력구배의 방향, ψ 는 평균압력구배와 평균속도 사이의 각도를 나타낸다. 캐노피 내부의 하부층에서는 θ 가 0도에서 약간만 증가하더라도 풍향이 평균압력구배를 기준으로 반시계방향으로 급격히 이탈하는 것을 볼 수 있다. 반면 캐노피 높이 근처에서는 시계방향으로 회전하였다. 캐노피 하부에서는 평균속도가 위쪽보다 낮기 때문에 특히 풍향의 변화가 강조되어 나타난다. $\theta = 10$ 일 때 바닥 근처에서 발생하는 역류로 인하여 $\psi \cong -90^\circ$ 정도의 큰 값을 보인다.

4. 결론

도시지형과 유사한 거칠기 배열에서 바람 진입각을 고려한 난류경계층유동 시뮬레이션을 수행하여 평균 속도 및 난류량의 공간적 분포를 얻을 수 있었다. Square 배열에서 풍향 조



건에 따라 유동 특성은 큰 차이를 나타내었다. 풍향이 약 10도 정도만 변경되더라도 유동장에는 큰 변화가 나타났으며 지면에 가까울수록 풍향의 변화가 크게 나타났다.

후 기

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 '다중현상 CFD연구센터(ERC)'의 과제로 수행된 연구입(No.2009-0083510).

참고문헌

- [1] 2002, Hanna, S.R., Tehraniana, S., Carissimoa, B., Macdonald, R. W. and Lohnera, R., "Comparisons of Model Simulations with Observations of Mean Flow and Turbulence within Simple Obstacle Arrays," *Atmospheric Environment*, Vol.36, pp.5067-5079.
- [2] 2004, Kanda, M., Moriwaki, R. and Kasamatsu, F., "Large-eddy Simulation of Turbulent Organized Structures within and above Explicitly Resolved Cube Arrays," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.112, pp.343-368.
- [3] 2006, Coceal, O., Thomas, T.G., Castro, I.P. and Belcher, S.E., "Mean Flow and Turbulence Statistics over Groups of Urban-like Cubical Obstacles," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.121, pp.491-519.
- [4] 2002, Cheng, H. and Castro, I.P., "Near Wall Flow over Urban-like Roughness," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.104, pp.229-259.
- [5] 1965, Cionco, R.M., "A Mathematical Model for Air Flow in a Vegetative Canopy," *Journal of Applied Meteorology*, Vol.4, pp.517-522.
- [6] 2000, Macdonald, R., "Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.97, pp.25-45.
- [7] 2008, Sabatino, Di., Solazzo, S.E., Paradisi, P. and Britter, R., "A Simple Model for Spatially-averaged Wind Profiles Within and Above an Urban Canopy", *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.127, pp.131-151.
- [8] 1998, Shah, K.B., Large-eddy simulations of flow past a cubic obstacle, Stanford University.
- [9] 1986, Raupach, M.R., Coppin, P.A. and Legg, B.J., "Experiments on Scalar Dispersion within a Model Plant Canopy Part I: the Turbulence Structure," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.35, pp.21-52.