

CFD 모델을 이용한 건물군 주변의 흐름 특성 연구

이한경¹⁾ · 김재진^{1)*} · 이영곤²⁾

¹⁾부경대학교 환경대기과학과, ²⁾국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2015년 4월 16일, 수정일: 2015년 6월 16일, 게재확정일: 2015년 6월 16일)

A Study on the Characteristics of Flows around Building Groups Using a CFD Model

Hankyung Lee¹⁾, Jae-Jin Kim^{1)*}, and Young-Gon Lee²⁾

¹⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

²⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research, Jeju, Korea

(Manuscript received 16 April 2015; revised 16 June 2015; accepted 16 June 2015)

Abstract In this study, the characteristics of flows around building groups are investigated using a computational fluid dynamics (CFD) model. For this, building groups with different volumetric ratios in a fixed area are considered. As the volumetric ratio of the building group increases, the region affected by the building group is widened. However, the wind-speed reduced area rather decreases with the volumetric ratio near the ground bottom ($z \leq 0.7H$, here, H is the height of the building group) and, above $0.7H$, it increases. As the volumetric ratio decreases (that is, space between buildings was widened), the size of recirculation region decreases but flow recovery is delayed, resulting in the wider wind-speed reduced area. The increase in the volumetric ratio results in larger drag force on the flow above the roof level, consequently reducing wind speed above the roof level. However, above $z \geq 1.7H$, wind speed increases with the volumetric ratio for satisfying mass conservation, resultantly increasing turbulent kinetic energy there. Inside the building groups, wind speed decreased with the volumetric ratio and averaged wind speed is parameterized in terms of the volumetric ratio and background flow speed. The parameterization method is applied to producing averaged wind speed for 80 urban areas in 7 cities in Korea, showing relatively good performance.

Key words: CFD model, GIS data, flow characteristics, building groups, parameterization method

1. 서 론

도시 지역에서 건물은 대기 흐름 형성에 매우 중요한 외력으로 작용한다(Lee et al., 2009). 도시화로 인해 건물이 고층화되고 집적화되면서 도시 지역에서 건물이 차지하는 부피는 지속적으로 증가하고 있고,

도시 캐노피 내의 흐름과 확산이 중요한 관심사로 떠오르면서 연구 대상이 건물들 사이의 미세 규모에 이를 만큼 세밀해졌다(Toparlak et al., 2015). 기존의 기상 모델이나 대기 확산 모델은 격자계나 분해능 등의 한계로 인해 도시 캐노피 내부의 건물을 모델 내에 직접적으로 반영하는 데 한계가 있다(Gross, 2014). 이러한 한계를 극복하기 위하여, 미세 규모의 대기 흐름 분석이 가능한 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 모델이 주로 사용되고 있다(Kim, 2007; Kim et al., 2012; Kim et al., 2014; Kwak et al., 2015). CFD 모델은 고분해능의 미세 규모 대기 흐름

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, 599-1, Daeyeon 3-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Korea.
Phone : +82-51-629-6645, Fax : +82-51-629-6638
E-mail : jjkim@pknu.ac.kr

을 상세하게 분석할 수 있고 도시 지역의 복잡한 난류와 흐름을 모의할 수 있기 때문에, 최근에 그 사용이 매우 활발하게 이루어지고 있다(Baik et al., 2003; Kim and Baik, 2009; Lee and Kim, 2011; Kwon and Kim, 2014). 초창기의 연구들은 주로 단순한 건물 주변의 흐름이나 도시 협곡이라 불리는 건물과 건물 사이 공간에서의 흐름이나 확산 현상에 관심을 두었다(Brown et al., 2001; Baik et al., 2003). 최근에는 지리정보시스템(geographic information system, GIS)이 구축되면서 실제 도시 지역 건물 정보의 접근이 용이해졌고, GIS를 기반으로 실제 도시 지역의 흐름과 확산에 대한 연구들이 수행되어져 왔다(Chu et al., 2005; Neofytou et al., 2008; Zheng et al., 2010; Toparlar et al., 2015). 이들 연구들에 따르면, 도시 지역에서는 건물에 의해 형성된 2차 순환(도시 협곡 내 소용돌이, 건물 풍하측의 재순환 영역 등)은 매우 복잡하고, 배경 흐름에 비해 풍속이나 풍향의 변화가 매우 크게 일어난다. 특히, 건물은 배경 흐름에 대한 거칠기로 작용하여 건물 부근뿐만 아니라 건물 풍하 지역의 풍속을 감소 시키는 마찰 효과(drag effect)를 일으키기도 하고 건물 사이에서는 부분적으로 풍속을 증가시키는 채널링 효과(channeling effect)를 일으킨다(Lee et al., 2009). 도시 지역에서 건물에 의한 2차 순환과 풍속 · 풍향 변화는 국지 규모 기상 모델의 도시 지역 예측 능력을 저하시켜서 관측 결과와 큰 차이를 유발한다. 따라서, 국지 규모 기상 모델의 예측 자료를 이용하여 도시 지역의 상세 기상정보를 보다 현실적으로 제공하기 위해서는 건물 효과가 반영된 모수화 방안이 필요하다. Kanda et al. (2013)은 LES (Large-eddy simulation) 모델을 이용하여, 도시 지역의 대기 흐름을 수치 모의하고 그 결과 분석에 기초하여 새로운 모수화 방안을 제시한 바 있다.

도시 지역에 분포한 건물은 기하학적 형태가 매우 다양하고, 그 배열도 불규칙적이고 복잡하기 때문에 모수화 방안은 주로 단순화된 형태의 건물 모양과 배열을 대상으로 개발되어 왔으며, 특히 전체 면적에 대한 건물의 평면비(plane area fraction) 또는 앞면비(frontal area fraction)를 고려한 모수화 방안 연구가 수행되어져 왔다(Macdonald et al., 1998; Britter and Hanna, 2003; Sabatino et al., 2007; Santiago et al., 2007). 본 연구에서는 현실적인 건물 형태를 반영한 건물 효과 모수화 방안의 기반을 구축하기 위해, 건물 평면비와 앞면비를 모두 고려할 수 있는 건물 부피비에 따른 건물군 주변 흐름 특성을 조사하고 건물군 부피비와 유입류 풍속을 이용하여 건물군 내부의 평균 풍속을 모수화하였다. 또한, GIS 자료로부터 실제 도시 지역의 지형 자료를 구축하여, 도시 지역에서 시뮬레이션한 풍속과 개발한 모수화 방법으로 계

산한 풍속을 비교 · 분석하였다. 이 논문은 총 4장으로 구성되었다. 서론에서는 연구 배경과 필요성에 대하여 이미 서술하였다. 2장에서는 연구에 사용한 CFD 모델, 실험 설계, 실험 방법에 대하여 기술하였다. 3장에서는 결과를 분석하고 토의하였다. 마지막 장에서는 본 연구 결과를 요약하고 결론을 도출하였다.

2. 연구 방법

2.1 수치모델

본 연구에서 사용한 CFD 모델은 Kim et al. (2014)이 사용한 모델과 동일하다. RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식 계를 사용하였고, 3차원 비정수(nonhydrostatic), 비회전(nonrotating), 비압축(incompressible) 대기 흐름 계를 가정하며, 코리올리 효과를 배제한다. 난류를 모수화하기 위해 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용한다. 지배 방정식 계는 유한 체적법(finite volume method)과 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용하여 엇갈림 격자 계에서 수치적으로 풀이된다.

2.2 실험 설계

COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research)는 건물 주변 흐름을 수치 모의하고자 할 때에는 건물로부터 풍상측, 옆면, 상층 경계면까지 거리를 건물 높이(H)의 5배 이상, 풍하측 경계면까지 거리는 10배 이상이 되도록 권장한다(Franke et al., 2011). 도시 지역 풍속 모수화 방법의 개발을 위하여, 건물과 경계까지의 이격 거리가 COST의 권고를 충족하는 수치 도면을 설정하였다(Fig. 1). 수치 도면의 크기는 x와 y 방향으로 각각 720 m와 520 m이고, 연직 방향은 200 m로 설정하였다. 격자 크기는 x, y, z 방향 모두 2 m로 일정한 등격자계를 사용하였다. 풍상측면 경계로부터 5H에 위

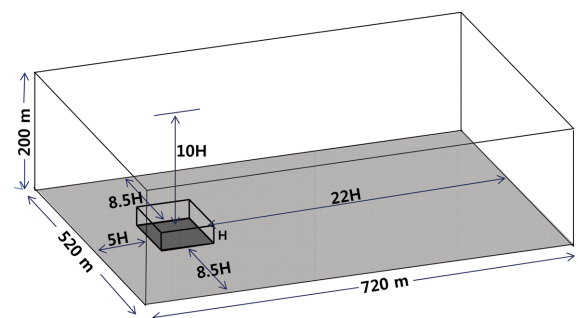


Fig. 1. Numerical domain and building configuration in the control-run (CNTL) case.

Table 1. Summary of the numerical experiments.

Experiments	Volumetric ratio	Plane area ratio (λ_p)
EXP1	0.2	0.1600
EXP2	0.4	0.4096
EXP3	0.6	0.5184
EXP4	0.8	0.7744
CNTL	1.0	1.0000

치하는 일정하고 가로, 세로, 높이가 각각 100 m, 100 m, 20 m인 공간에서 5가지의 건물 부피비(= 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0)를 고려하였다(Table 1). 건물 평면비(plane area fraction, λ_p)는 기준 실험 건물 면적에 대한 건물 면적비로 정의하였다(Kanda et al., 2013). 따라서, 기준 실험(control run, CNTL)의 건물 부피비와 평면비는 모두 1이다. 건물 높이는 20 m로 일정하고 EXP1의 건물 부피비는 기준 실험의 1/5이다.

지면 조건에 충분히 적용하여 발달된(fully developed) 바람의 연직 분포를 초기 경계 조건으로 사용하기 위하여, 장애물이 존재하지 않는 평평한 수치 도면에서 1초 간격으로 3600초 동안 적분하였다. 유입류를 결정하기 위한 초기 바람(U, V, W), 난류 운동에너지(k), 난류 운동에너지 소멸율(ϵ)에 대한 조건은 다음과 같다.

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (1)$$

$$V(z) = 0, \quad (2)$$

$$W(z) = 0, \quad (3)$$

$$k(z) = \frac{1}{C_\mu^{1/2}} U_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2, \quad (4)$$

$$\epsilon(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k^{3/2}}{\kappa z}. \quad (5)$$

여기서 U_* , z_0 , δ , κ 는 각각 마찰속도, 거칠기 길이 (= 0.05 m), 경계층 두께 (= 1000 m), von Karman 상수 (= 0.4)를 나타낸다. 식 (1)~(5)의 초기 조건으로 3600초까지 수치 적분하여 지면 조건에 충분히 적용된 바람, 난류운동에너지, 난류 운동에너지 소멸율을 구한 후, 수치 실험의 유입 경계 자료로 사용하였다. 유입류 풍속 변화에 따른 건물군 내부의 풍속 변화를 조사하기 위하여, 건물 높이를 기준으로 1.5 m s^{-1} 부터 9 m s^{-1} 까지 약 1.5 m s^{-1} 간격으로 변화를 주었다. 위의 과정을 수행함으로써, 바람이 유입되면서 겪는 흐름 발달 과정에서의 연직 분포 변화를 차단할 수 있다. 그리고 풍하 지역에서 건물에 의한 흐름 변화를 조사할 때, 흐름 발달 과정에서 발생한 흐름의 변화

를 최대한 배제할 수 있다. 위의 과정을 통해 시뮬레이션한 유입류를 이용하여 1초의 시간 간격으로 총 3600초 동안 수치 적분을 수행하였다.

도시 지역의 내부 평균 풍속을 배경 흐름 풍속과 건물 부피비로 모수화한 결과를 적용하기 위하여, 우리나라 도시 지역(서울, 대구, 부산, 광주, 울산, 전주, 대전) 중 80개 지역을 검증할 대상 지역으로 선정하였다. GIS로부터 선정된 지역의 지형 정보 자료를 취득하였다. 지역의 크기는 동서 방향과 남북 방향으로 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 이며, 연직 방향은 0.5 km 로 설정하였다. 선정된 도시 지역에서의 흐름을 CFD 모델을 이용하여 수치 모의한 후 풍속을 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 건물군에 의한 풍속 변화 영역 분석

본 연구에서는 먼저 건물군에 의한 풍속 변화 영역을 분석하였다. Figure 2a는 기준 실험에 대해 x 방향의 풍속 성분(U)이 같은 고도의 유입류에 비해 10% 이상 감소되는 변화 영역을 나타낸다. 건물군에 의한 흐름 영향 범위를 정량적으로 정의하고 그 임계값을 정하기는 매우 어렵지만, 본 연구에서는 유입류에 비해 x 방향의 풍속 성분(U)이 10% 이상 감소한 영역을 흐름 영향 범위로 정의하였다.

건물 부피비가 가장 작은 EXP1에서 건물 영향을 받는 영역이 가장 좁았고, 건물 부피비가 증가하면서 영향을 받는 영역이 로그 함수의 형태로 넓어짐을 볼 수 있다(Fig. 2b). 이 결과는 건물 규모가 클수록 넓은 지역의 흐름에 영향을 미친다는 선행 연구 결과(Lee et al., 2009)와 일치한다. 또한, 이는 경계면 영향을 배제하기 위해 COST의 권장 조건에 따라 수치 실험 도면의 크기를 결정해야 한다는 것을 시사한다. 고도별 건물 영향 면적(Fig. 2c)을 보면, 기준 실험의 경우, 건물보다 낮은 고도에서는 건물 영향을 받는 면적이 가장 작지만, 높은 고도까지 건물 영향이 나타났다. 지면 근처부터 약 0.7H까지는 건물 부피비가 작을수록 건물 영향이 넓은 지역에서 나타나고, 상층에서는 그 반대의 경향이 나타났다.

3.2 풍하측 지역의 흐름 특성

3.1장에서는 건물군이 풍하측 넓은 범위에서 흐름에 영향을 미친다는 것을 살펴보았다. 이 절에서는 풍하측 지역에서 건물군에 의한 흐름 변화를 분석하였다. Figure 3은 지면 근처의 바람 벡터장을 나타낸다. 건물군을 향해 유입되는 흐름은 건물군에 부딪히면서 풍상측과 옆면에서 분리되고, 풍하측 재부착점(reattachment point)에서 흐름 수렴이 일어나면서 회복되기 시작한다. 기준 실험의 경우(Fig. 3c), 건물 풍

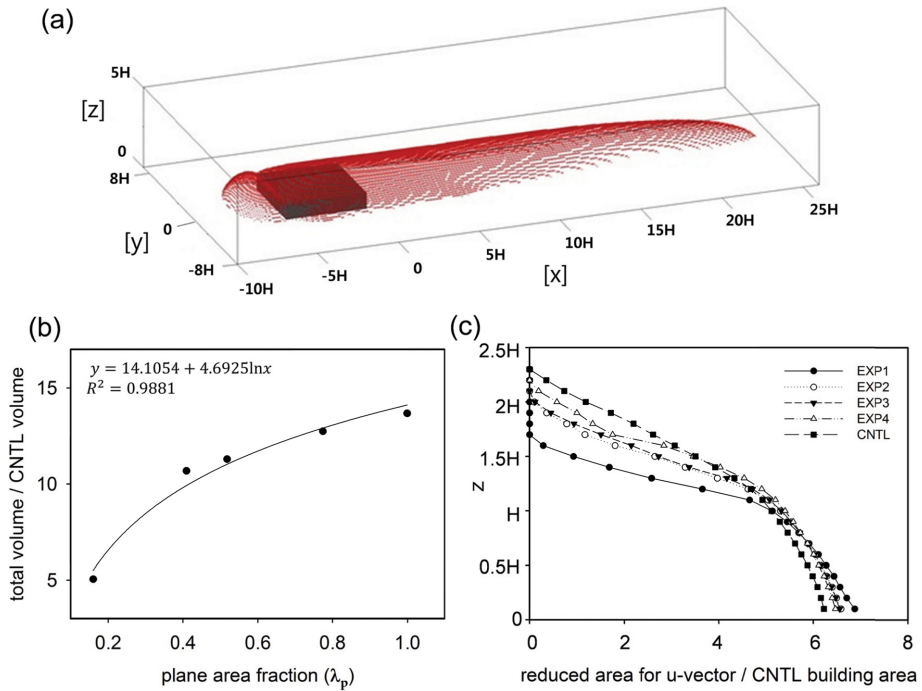


Fig. 2. (a) Isosurface for the 10% reduction region of wind component in the x-direction (U) in the CNTL, (b) total volume of the reduction region in U-vector normalized by the building volume in the CNTL case and (c) U-vector reduced area fraction normalized by the plane area of the building in the CNTL case.

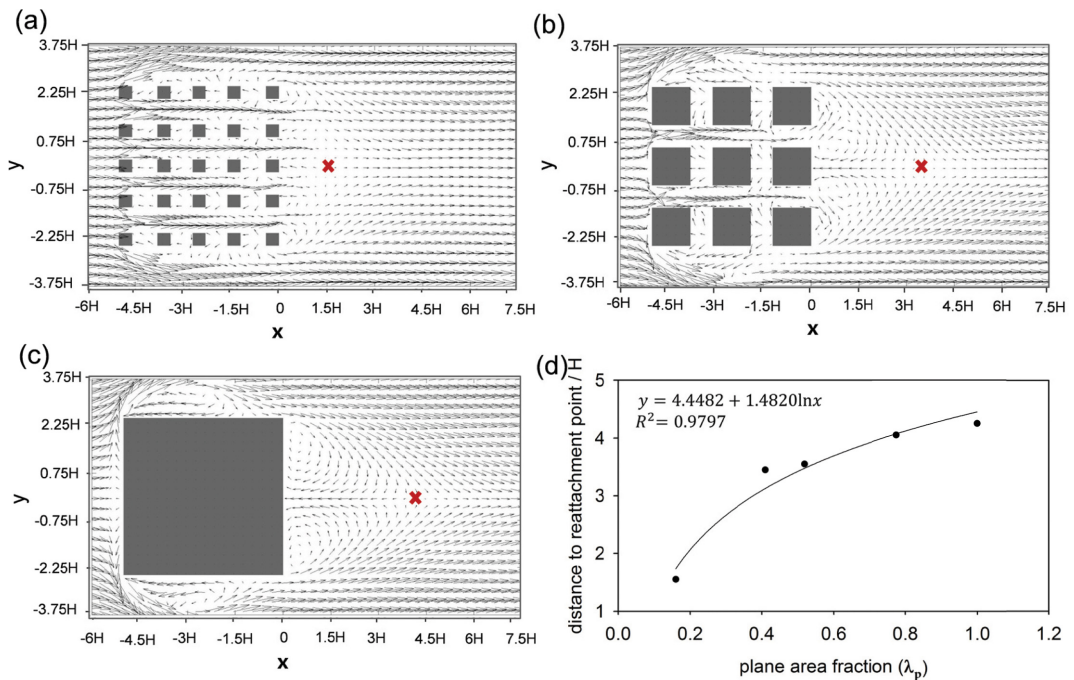


Fig. 3. Wind vectors at $z = 0.05H$ in the (a) EXP1, (b) EXP3, and (c) CNTL cases and (d) the length of reattachment point.

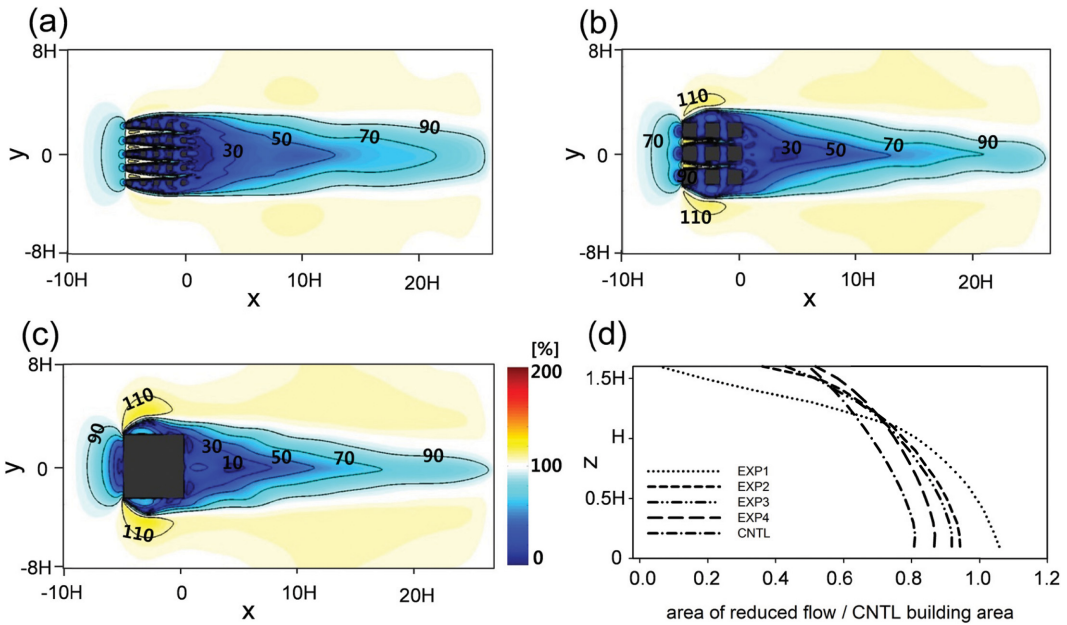


Fig. 4. Contours of the ratio of wind speed to inflow speed at $z = 0.05H$ in the (a) EXP1, (b) EXP3, and (c) CNTL cases and (d) wind-speed reduced area fraction normalized by the plane area of the building in the CNTL case.

상측에서는 말편자소용돌이(horse-shoe vortex) 형성에 따른 역류(reverse)가, 건물 옆면에서는 흐름 분리에 따른 에디 순환이, 풍하측에서는 재순환 영역 형성에 따른 이중 에디 순환(double-eddy circulation)이 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. EXP1과 EXP3 경우에는 격자 크기 때문에 말편자소용돌이 형성에 따른 건물 풍상측 역류가 나타나지는 않았으나, 건물군 옆면과 풍하측의 에디 순환이 형성됨을 볼 수 있다(Figs. 3a and b). 건물 사이 공간 때문에 풍하측 에디 순환이 복잡하게 형성되었고, 건물 부피비가 작을수록 풍하측 에디 순환 크기가 감소하며 건물에서 가까운 지점에서 흐름 재부착(reattachment)이 이루어졌다(Fig. 3d).

Figure 4는 지면 근처($z = 0.05H$)에서 유입류 대비 풍속 변화율을 나타낸다. 모든 실험에서 건물군 풍상측과 풍하측에서 풍속이 유입류보다 감소한 영역이 나타났다. 풍하측 하층의 풍속 감소 영역은 기준 실험의 경우에 가장 좁았고 EXP1 경우에 가장 넓었다. You (2005)는 공극률이 높을 때는 흐름이 건물 사이의 공간으로 유입되면서 풍하측 지역의 흐름 회복이 억제된다고 보고한 바 있다. 흐름이 건물 주위를 돌아 나갈 때, 건물 풍하측 공동 영역(cavity region)과 주변 흐름의 풍속 차이가 생기고 이에 따른 압력 차이가 발생하면서 재순환 영역이 형성된다. 그런데 건물군 사이를 통해 흐름이 공동 영역으로 유입되면, 이와 같

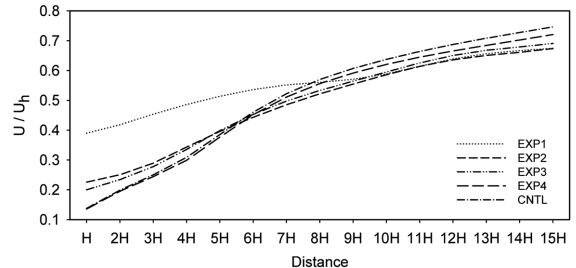


Fig. 5. Volume averaged wind speed normalized by inflow wind speed at $z = H$ with distance from the building group. Average is taken over a volume with the height of H , lateral length of $5H$ (the same length of the building in the CNTL case), and width of H .

은 풍속 차나 압력 차가 감소하고 이에 따라 재순환 영역 형성이 용이하지 않게 된다. 결국, 건물군 사이의 공극은 흐름 재부착 이후의 회복을 억제하게 된다. 공극이 존재하지 않은 기준 실험에서는 재순환 영역의 크기가 가장 크고, 이에 따라 재부착점도 가장 먼 곳에서 형성되지만, 흐름 회복 속도는 가장 빠른 것으로 판단된다. 이에 따라, 풍하측 풍속 감소 지역이 가장 좁게 나타났다.

건물군으로부터의 거리에 따른 풍속 변화를 조사하기 위하여 건물군으로부터 풍하측 방향으로 H 간격

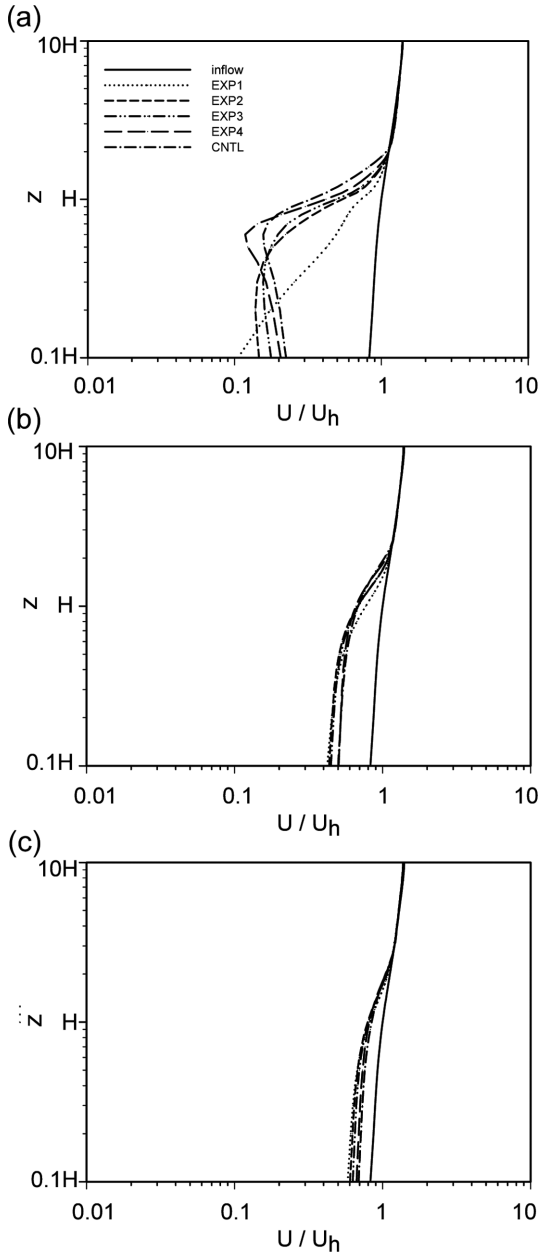


Fig. 6. The vertical profiles of the wind speed in the x-direction (U) averaged over the area of (a) $H \leq x \leq 2H$ and $-2.5H \leq y \leq 2.5H$, (b) $7H \leq x \leq 8H$ and $-2.5H \leq y \leq 2.5H$, and (c) $14H \leq x \leq 15H$ and $-2.5H \leq y \leq 2.5H$.

으로 15H까지 지면과 건물 높이 사이에서 평균한 풍속을 조사하였다(Fig. 5). 건물군으로부터 멀어지면서 흐름 회복이 일어나며 풍속이 증가하는 것을 볼 수 있다. EXP1을 제외하면, 5H까지는 건물 부피비가 클

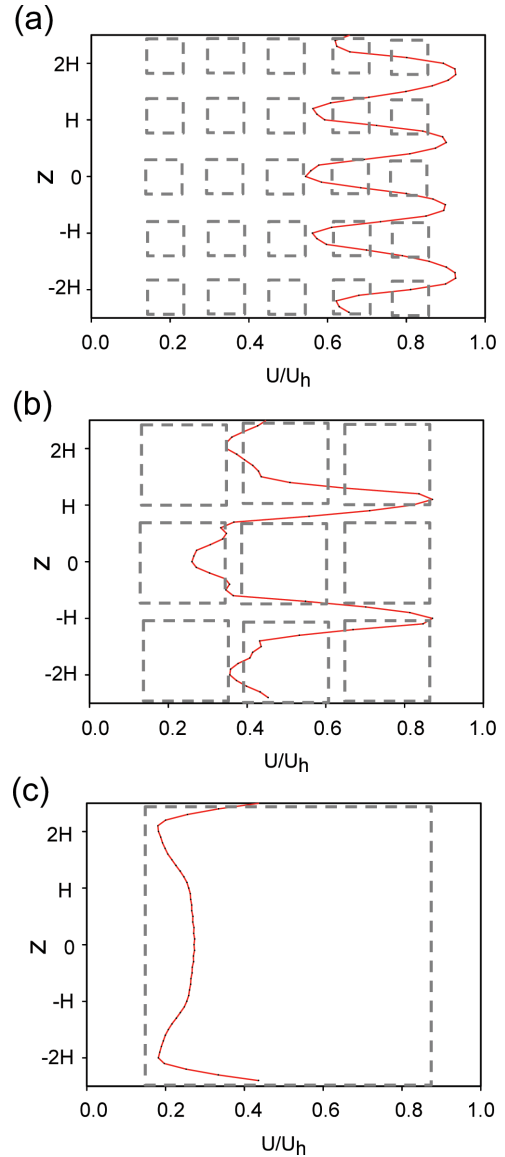


Fig. 7. The horizontal profiles of the wind component in the x-direction (U) at $z = 1.05H$ averaged from $x = -5H$ to $x = 0$ in the (a) EXP1, (b) EXP3, and (c) CNTL cases.

수록 풍속이 작게 나타났고, 6H부터는 반대의 경향이 나타났다. EXP1의 경우에는 10H 이후에 이와 같은 반전이 나타났다.

각 구간별 풍속의 연속 분포를 조사하였다. 건물군과 가까운 지역($x = 2H$)에서는 매우 복잡한 풍속 연속 변화가 일어났다(Fig. 6a). 건물 부피비가 가장 작은 EXP1의 경우에는 건물에 의해 풍하층에서 형성된 재순환 영역이 좁은 범위($0 < x < 1.6H$)에서 나타나기

때문에, 흐름이 회복되면서 고도가 증가함에 따라 풍속(U)이 증가하였다. EXP1을 제외한 나머지 경우에는 풍속이 감소하다가 일정 고도부터 증가하는 경향을 보이는데, 이는 재순환 영역이 나타나기 때문이다. 지면 근처($z = 0.05H$)에서는 건물 부피비가 증가함에 따라 풍속이 증가함을 볼 수 있다. 건물군보다 높은 고도($H \leq z \leq 2H$)에서는 건물 부피비가 증가함에 따라 풍속이 감소하며, 약 $2H$ 고도부터는 건물 부피비에 상관없이 일정한 풍속이 나타났다. 그림으로 나타내지는 않았지만, 건물군으로부터 $H \sim 7H$ 사이의 풍하 지역에서는 건물 부피비와 재순환 영역의 크기가 증가함에 따라 풍속의 연직 분포가 매우 복잡하게 나타났다. $8H$ 떨어진 풍하측 지역에서의 연직 분포를 보면, 재순환 영역이 더 이상 나타나지 않기 때문에 풍속의 반전이 일어나지 않았다(Fig. 6b). 그리고 풍속의 연직 분포가 유입류의 연직 분포로 점차 회복되기 시작함을 볼 수 있다. $15H$ 떨어진 풍하측 지역에서는 풍속의 연직 분포 회복이 더욱 뚜렷해졌고, 부피비가 커질수록 유입류와의 차이가 더욱 감소함을 볼 수 있다(Fig. 6c).

3.3 건물군 지역의 흐름 특성

건물 부피비에 따른 건물군 상층에서의 풍속 변화를 조사하기 위하여, 건물군 지붕 고도의 풍속을 분석하였다. Figure 7은 건물군 지붕 고도($z = 1.05H$)에서 평균($\int_{x=-5H}^{x=0} U dx$)한 풍속 분포를 나타낸다. 건물 사이의 공간에서는 비교적 풍속 감소가 약하고 건물이 위치한 지역에서는 풍속이 감소하는데, 건물의 가장 자리보다는 건물 중심 부근의 풍속 감소가 현저함을 확인할 수 있다. 건물 마찰에 의한 직접적인 영향으로 건물 부피비가 증가할수록 풍속이 더욱 감소되는 경향을 볼 수 있다. 건물군 영역에서 평균한 풍속의 연직 분포를 보면(Fig. 8a), 건물 지붕($z = H$)으로부터 약 $1.7H$ 까지의 고도에서는 건물 부피비가 증가할수록 풍속이 감소하지만, $z \approx 1.7H$ 이상의 고도에서는 반대의 경향이 나타난다. 유체 흐름이 장애물을 만나면, 질량 보존을 만족시키기 위해서 장애물 주위에서 풍속이 부분적으로 증가(speed-up)하는데, 건물 부피비가 증가할수록 건물 지붕 고도에서는 마찰 효과가 커지고 상층에서는 질량 보존에 의한 속도 증가가 커지면서 이와 같은 연직 분포가 나타나는 것으로 판단된다. 건물군에 의한 영향은 약 $8H$ 고도까지 나타나는 것을 확인할 수 있다. 건물 부피비 증가에 따른 연직 시어 강화는 난류운동에너지 생성원으로 작용하여 난류운동에너지를 증가시켰다(Fig. 8b).

Figure 9는 건물군 내부의 고도별 평균 풍속의 연직 분포를 나타낸다. EXP1에서의 풍속이 가장 강하

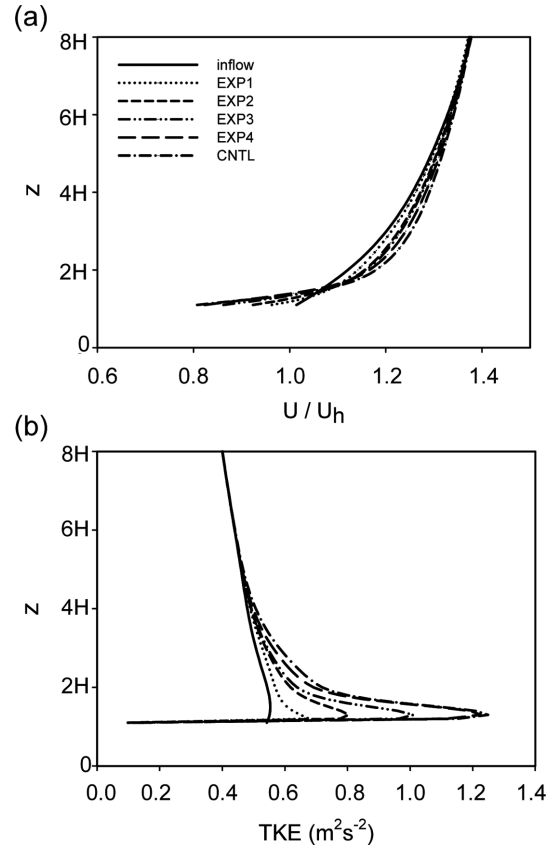


Fig. 8. The vertical profiles of the (a) wind component in the x-direction (U) and (b) turbulent kinetic energy averaged over the area of $-5H \leq x \leq 0$ and $-2.5H \leq y \leq 2.5H$.

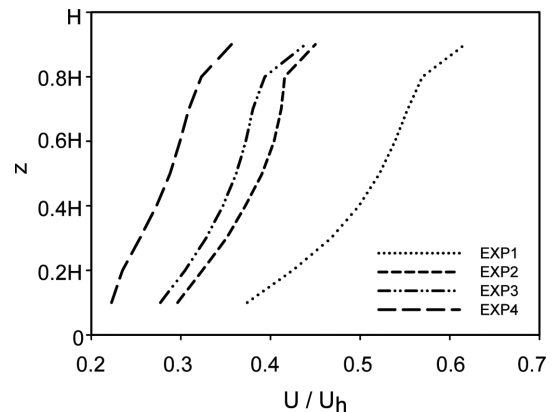


Fig. 9. The vertical profiles of the wind speed in the x-direction (U) averaged within the buildings.

고 건물 부피비가 증가함에 따라 풍속이 감소함을 볼 수 있다. 이는 건물군 부피비가 증가함에 따라 건물

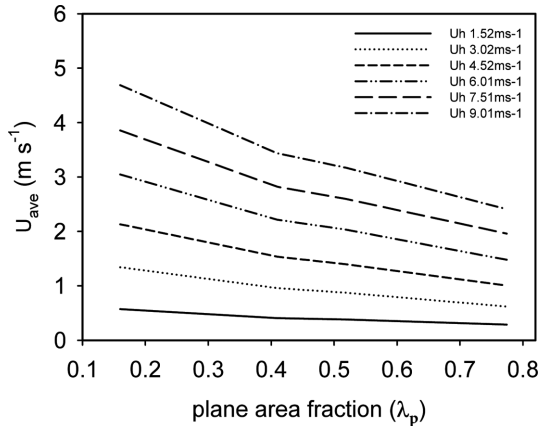


Fig. 10. The wind speed averaged within the buildings with the inflow speed and plane area fraction (λ_p).

군 내부 흐름을 유도하는 지붕 고도의 풍속이 감소 (Fig. 7)하고, 건물에 의한 마찰이 증가하기 때문이다. 도시 지역 내부의 풍속은 건물 등에 의한 마찰 효과 때문에, 배경 흐름에 비해 풍속이 감소하며, 이와 같은 이유로 대부분의 중규모 기상 모델은 도시 지역의 풍속을 과대 모의한다(Byon et al., 2010). 본 연구에서는 도시 지역 내부의 평균 풍속이 배경 흐름 풍속과 건물 부피비와 유의한 관계가 있는지를 조사하기 위하여, 앞에서 기술한 결과를 토대로 건물군 내부의 평균 풍속을 유입류 풍속과 건물 부피비로 모수화하고 이를 실제 도시 지역에서 수치 모의한 결과와 비교하였다. 평균 풍속은 건물 부피비가 증가하고 유입류 풍속이 감소함에 따라 비선형적으로 감소하였다 (Fig. 10). 이와 같은 결과를 바탕으로 건물군 내부의 평균 풍속(U_p)을 건물 부피비와 유입류 풍속으로 모수화하였다. 식 (6)과 같이 평균 풍속을 건물 평면비 (f)와 유입류 풍속에 대한 함수(g)의 곱으로 표현할 수 있다고 가정한다. 이후, 유입류 풍속이 일정할 때 f 를, 건물 평면비가 일정할 때 g 를 각각 회귀분석을 통해서 구한다. 이 과정을 통해 모수화한 건물군 내부 평균 풍속을 식 (6)~(8)로 나타내었다.

$$U_p = f(\lambda_p)/g(U_h), \quad (6)$$

$$f(\lambda_p) = -1.1852\lambda_p^3 + 1.8754\lambda_p^2 - 1.1857\lambda_p + 0.5315, \quad (7)$$

$$g(U_h) = -0.0008U_h^4 + 0.017U_h^3 - 0.1261U_h^2 + 0.3009U_h + 0.7786. \quad (8)$$

개발한 모수화 방법을 우리나라 7개 도시(서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 울산, 전주) 중 80개 지역에 적

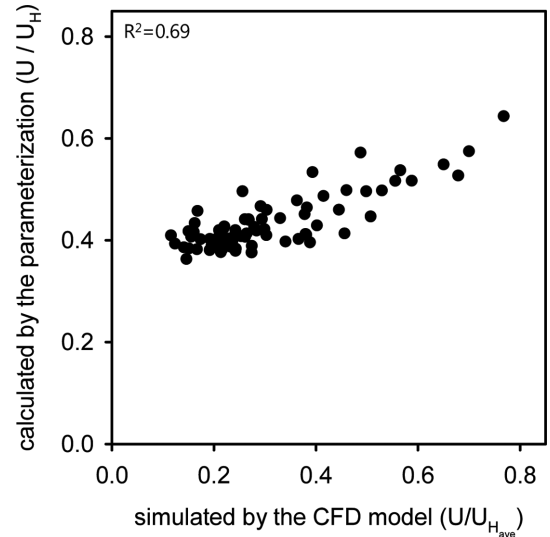


Fig. 11. Wind speed calculated by the parameterization method versus simulated by the CFD model using GIS data for 80 target areas selected in 7 cities in Korea.

용하였다. Figure 11은 모수화 방법으로 계산한 도시 지역 내부 평균 풍속과 CFD 모델을 이용하여 수치 모의한 도시 지역의 평균 풍속을 나타낸다. 평균 풍속을 비교한 결과, $R^2 = 0.69$ 로 본 연구에서 개발한 방법이 도시 지역의 평균 풍속을 비교적 잘 모수한 것을 알 수 있다. 그러나 모수화 방법으로 계산한 풍속은 CFD 모델로 직접 계산한 풍속보다 $0.1\sim 0.2 \text{ m s}^{-1}$ 정도를 과대 모의하는 경향을 보였고, 0.3 m s^{-1} 이하의 작은 풍속은 산출하지는 못했다. 따라서, 향후에 보다 체계적인 방법을 통해 모수화 방안을 보완할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 요약과 결론

본 연구에서는 CFD 모델을 이용하여 건물 부피비 변화가 건물군 주변과 내부 흐름에 미치는 영향을 조사하였다. 건물 부피비에 따른 건물군 주변과 내부의 흐름 특성을 분석하기 위하여, 일정한 공간 내에서 건물 높이는 고정시키고 부피비를 체계적으로 변화시켜 수치 모의하였다. 건물 부피비가 증가할수록 건물군 주변에 영향을 미치는 영역은 넓게 나타났으며, 이는 건물 규모가 커질수록 넓은 지역에서 흐름에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 그러나 건물 높이보다 낮은 고도에서는 건물 부피비가 증가할수록 풍하측의 풍속 감소 지역이 감소하는 경향을 보였고, 상층에서는 반대의 경향이 나타났다. 건물 부피비가 감소(건물군 사이 공간 증가)할수록, 풍하측 재순환 영역 크기는 감

소하였으나 공극 효과 때문에 흐름 회복이 늦어지면서 풍속 변화 영역이 증가하였다. 건물군 지붕 고도에서는 건물 지붕의 마찰 때문에 건물 부피비가 증가할수록 풍속이 감소하였다. 그러나 상층에서는 질량 보존을 만족시키기 위한 속도 증가(speed-up) 현상이 일어나면서 건물 부피비가 증가함에 따라 풍속이 증가하였다. 이와 같은 속도의 연직 분포 변화에 의한 연직 시어 강화는 난류운동에너지를 증가시켰다. 건물군 내부에서는 건물 부피비가 증가할수록 평균 풍속이 감소하였다. 건물군 내부의 평균 풍속을 건물 부피비와 배경 풍속으로 모수화하였다. 모수화 방법을 7개 도시 80개 지역에서 수치 모의한 결과와 비교하였고, 이 방법이 도시 지역의 평균 풍속을 비교적 잘 모수화함을 확인할 수 있었다. 그러나 이 모수화 방법은 도시 지역 평균 풍속을 과대 모의하는 경향을 보이고 약한 풍속을 모의하지 못한다는 한계를 나타냈다. 본 연구에서는 건물 높이와 건물 정면비 변화를 고려하지 않았고, 건물이 규칙적으로 배열된 경우만을 고려하였기 때문에, 이와 같은 한계가 나타난 것으로 판단된다. 향후, 건물 높이, 건물 정면비, 건물 배치 등을 체계적으로 고려한 모수화 방법 개발이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 국립기상과학원 주요사업 “차세대 도시농림 융합스마트 기상서비스 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baik, J.-J., J.-J. Kim, and H. J. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *J. Appl. Meteorol.*, **42**, 1636-1648.
- _____, S. B. Park, and J.-J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model. *J. Appl. Meteorol. Clim.*, **48**, 1667-1681.
- Britter, R. E., and S. R. Hanna, 2003: Flow and dispersion in urban areas. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **35**, 469-496.
- Brown, M. J., R. E. Lawson, D. S. DeCroix, and R. L. Lee, 2001: Comparison of centerline velocity measurements obtained around 2D and 3D building arrays in a wind tunnel. *Int. Soc. Environ. Hydraulics, Tempe, AZ*.
- Byon, J. Y., Y. J. Choi, and B. G. Seo, 2010: Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul. *Atmosphere*, **20**, 13-26 (in Korean with English abstract).
- Chu, A. K. M., R. C. W. Kwok, and K. N. Yu, 2005: Study of pollution dispersion in urban areas using Computational Fluid Dynamics (CFD) and Geographic Information System (GIS). *Environmental Modelling & Software*, **20**, 273-277.
- Franke, J., A. Hellsten, K. H. Schlunzen, and B. Carissimo, 2011: The COST 732 Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment: a summary. *Int. J. Environ. Pollut.*, **44**, 419-427.
- Gross, G., 2014: On the parametrization of urban land use in mesoscale models. *Bound.-Layer Meteor.*, **150**, 319-326.
- Kanda, M., A. Inagaki, T. Miyamoto, M. Gryschka, and S. Raasch, 2013: A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, **148**, 357-377.
- Kim, I. S., and Coauthors, 2003: The influence of around micrometeorology by development of Namak new town. *Environ. Eng. Res.*, **5**, 597-604.
- Kim, J.-J., 2007: The effects of obstacle aspect ratio on surrounding flows. *Atmosphere*, **17**, 381-391 (in Korean with English abstract).
- _____, and J.-J. Baik, 2009: Effects of street-bottom and building-roof heating on flow in three-dimensional street canyons. *Atmosphere*, **27**, 51-527 (in Korean with English abstract).
- _____, E. Pardyjak, D. Y. Kim, K. S. Han, and B. H. Kwon, 2014: Effects of building-roof cooling on flow and air temperature in urban street canyons. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 365-375.
- Kim, M. J., R. J. Park, and J.-J. Kim, 2012: Urban air quality modeling with full O₃-NO_x-VOC chemistry: Implications for O₃ and PM air quality in a street canyon. *Atmos. Environ.*, **47**, 330-340.
- Kwak, K. H., J.-J. Baik, Y. H. Ryu, and S. H. Lee, 2015: Urban air quality simulation in a high-rise building area using a CFD model coupled with mesoscale meteorological and chemistry-transport models. *Atmos. Environ.*, **100**, 167-177.
- Kwon, A. R., and J.-J. Kim, 2014: Improvement of building-construction algorithm for using GIS data and analysis of flow and dispersion around buildings. *Korean J. Remote Sens.*, **30**, 731-742.
- Lee, J. H., J. W. Choi, and J.-J. Kim, 2009: The effects of an urban renewal plan on detailed air flows in an urban area. *J. Korea Assoc. Geographic Inform. Stud-*

- ies, **12**, 69-81.
- Lee, Y. S., and J.-J. Kim, 2011: Effects of an apartment complex on flow and dispersion in an urban area. *Atmosphere*, **21**, 95-108 (in Korean with English abstract).
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, 1998: An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Neofytou, P., M. Haakana, A. Venetsanos, A. Kousa, J. Bartzis, and J. Kukkonen, 2008: Computational fluid dynamics modelling of the pollution dispersion and comparison with measurements in a street canyon in Helsinki. *Environmental Modeling & Assessment*, **13**, 439-448.
- Sabatino, S., R. Buccolieri, B. Pulvirenti, and R. Britter, 2007: Simulations of pollutant dispersion within idealised urban-type geometries with CFD and integral models. *Atmos. Environ.*, **41**, 8316-8329.
- Santiago, J. L., A. Martilli, and F. Martín, 2007: CFD simulation of airflow over a regular array of cubes. Part I: Three-dimensional simulation of the flow and validation with wind-tunnel measurements. *Bound.-Layer Meteor.*, **122**, 609-634.
- Toparlar, Y., B. Blocken, P. Vos, G. J. F. van Heijst, W. D. Janssen, T. van Hooff, H. Montazeri, and H. J. P. Timmermans, 2015: CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Build. Environ.*, **83**, 79-90.
- You, K. P., 2005: Wind tunnel experiment about effect of protection against wind according to the variation porosity of wind fence. *Architectural*, **21**, 109-116.
- Zheng, M. H., Y. R. Guo, X. Q. Ai, T. Qin, Q. Wang, and J. M. Xu, 2010: Coupling GIS with CFD modeling to simulate urban pollutant dispersion. *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference*, 1785-1788.