

도시 지역 대상의 CFD 모델 영역에서 유입류 풍속 추정에 관한 연구

강건 · 김재진*

부경대학교 환경대기과학과

(접수일: 2016년 11월 14일, 수정일: 2016년 12월 26일, 게재확정일: 2016년 12월 28일)

A Study on Estimation of Inflow Wind Speeds in a CFD Model Domain for an Urban Area

Geon Kang and Jae-Jin Kim*

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

(Manuscript received 14 November 2016; revised 26 December 2016; accepted 28 December 2016)

Abstract In this study, we analyzed the characteristics of flow around the Daeyeon automatic weather station (AWS 942) and established formulas estimating inflow wind speeds at a computational fluid dynamics (CFD) model domain for the area around Pukyong national university using a computational fluid dynamics (CFD) model. Simulated wind directions at the AWS 942 were quite similar to those of inflows, but, simulated wind speeds at the AWS 942 decreased compared to inflow wind speeds except for the northerly case. The decrease in simulated wind speed at the AWS 942 resulted from the buildings around the AWS 942. In most cases, the AWS 942 was included within the wake region behind the buildings. Wind speeds at the inflow boundaries of the CFD model domain were estimated by comparing simulated wind speeds at the AWS 942 and inflow boundaries and systematically increasing inflow wind speeds from 1 m s^{-1} to 17 m s^{-1} with an increment of 2 m s^{-1} at the reference height for 16 inflow directions. For each inflow direction, calculated wind speeds at the AWS 942 were fitted as the third order functions of the inflow wind speed by using the Marquardt-Levenberg least square method. Estimated inflow wind speeds by the established formulas were compared to wind speeds observed at 12 coastal AWSs near the AWS 942. The results showed that the estimated wind speeds fell within the inter quartile range of wind speeds observed at 12 coastal AWSs during the nighttime and were in close proximity to the upper whiskers during the daytime (12~15 h).

Key words: CFD model, automatic weather station, estimation of inflow wind speeds, observed and simulated wind speeds, urban area

1. 서 론

도시 지역의 환경문제가 사회적인 이슈로 대두됨에 따라 도시개발사업 시 환경영향평가를 실시하여 환경보전대책을 수립하기 위한 노력이 활발히 진행되고

있다. 도시 지역의 대기환경(기상, 대기질, 악취)과 열환경을 평가·분석하는 방법에는 크게 야외에서 실측하는 방법, 풍동·수조를 이용한 방법, 수치 모델을 이용하는 방법 등이 있다(Baik et al., 2009; Blocken, 2015). 최근의 도시지역 흐름과 확산에 대한 평가는 컴퓨터 성능 향상과 수치 모델의 수치 모의 능력 향상으로 수치 모델에 대한 의존도가 높아지고 있는 추세이고(Kwa and Salim, 2015), 기존의 야외 실험과 풍동·수조 실험은 비용과 시·공간적인 제약으로 인해 주로 수치 모델을 검증하는 부분에 많이 활용되고

*Corresponding Author: Jae-Jin Kim, Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busandaehak-ro 63beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-629-6645, Fax: +82-51-629-6638
E-mail: jjkim@pknu.ac.kr

있다(Wang and McNamara, 2007; Gromke et al., 2008; Blocken et al., 2012). 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)이 구축됨에 따라 상세한 지형 정보의 이용이 가능해 졌고, 이를 기반으로 도시 규모 이하의 상세한 기상과 대기확산 평가가 가능한 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델이 활발하게 활용되고 있다.

CFD 모델을 구동하기 위해서는 수치 도면, 경계 조건, 초기 자료, 격자 체계, 시간 간격, 반복 수렴 조건(iterative convergence criteria) 등의 설정이 매우 중요하고 이들의 설정이 계산 결과에 중요한 영향을 미친다(Franke et al., 2007). 따라서 COST (European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research) Action 732에서는 초기·경계 조건 설정을 위한 최적의 가이드라인을 제시하였고, 이를 바탕으로 CFD 모델을 이용한 많은 연구들이 수행되고 있다(Amorim et al., 2013; Moonen et al., 2013; Gromke et al., 2015). 특히, CFD 모델을 이용하여 도시 지역의 바람을 수치 모의할 때, 그 도시 지역에 분포하는 지형과 건물 배치에 따라 바람(풍향, 풍속)의 특성은 매우 다르게 나타날 수 있고, 수치 모의 결과는 바람에 대한 초기·경계 조건에 대해 매우 민감하게 나타날 수 있다(Schatzmann and Leitl, 2011).

환경영향평가서 작성에 관한 규정(환경부 고시 제 2016-22호)에서는 미기상 영향평가를 수행할 때, 공사가 예정된 현장에서 가장 가까운 기상관측소의 최근 10년간의 자료를 이용하거나, 기상관측소의 자료가 사업지역의 기상현황을 충분히 반영하지 못할 경우 현지조사를 병행하여 수치 모델의 입력자료로 사용하도록 명시하고 있다. 이에 따라, 대부분의 선행 연구에서는 바람에 대한 초기·경계 조건을 현실적으로 설정하기 위해 대상 지역에서 가장 가까운 곳에 위치한 기상관측소의 관측 값을 이용하여 왔다. 그러나 도시 지역에 위치한 대부분의 기상관측소는 주변 건물과 인공구조물에 영향을 직·간접적으로 받기 때문에, 관측 값이 기상관측소 인근 지역(반경 수~수십 km)에 대한 대표성을 가지기 힘들며, 수 m 영역에 대한 국지적 바람 정보만 제공할 가능성이 크다(Yang and Kim, 2015). 미국 Oklahoma City를 중심으로 160여개의 기상 장비를 동원하여 수행한 대규모 야외 관측 실험인 Joint Urban 2003 (Allwine et al., 2004) 결과에 따르면, 중심 업무 지구(Central Business District, CBD) 내부에서는 건물과 장애물에 의해 형성된 복잡한 흐름 때문에 불과 수 m 이내의 거리에서도 관측 값 사이의 시·공간적 변동성이 크게 나타났다(Gowardhan et al., 2011). 이 뿐만 아니라 CBD의 경계에 위치한 관측 지점과 그로부터 1 km 떨어진 도외 지역의 관측 값을 비교하였을 때, 일부 풍향(남풍, 서풍)에 대해서

만 풍속·풍향의 유사함을 보고하였다(Schatzmann and Leitl, 2011). Yang and Kim (2015)은 도시 지역(서울, 대구)의 기상관측소 주변 지역을 대상으로 수행한 수치 실험을 통해 기상관측소 인근 지역에 위치한 건물이나 장애물의 간섭으로 관측된 풍속·풍향이 유입류와 큰 차이가 나타나는 것을 조사하였고 이를 통해 기상관측소 주변 환경의 중요성에 대해 보고하였다.

앞에서도 기술하였듯이, 건물 집적도가 높은 도시 지역의 관측 자료는 건물, 지형, 지표마찰, 난류 등의 영향을 많이 받기 때문에, 도시지역에서 관측된 기상 자료를 보정하지 않고 CFD 모델의 초기·경계 자료로 사용하기에는 부적절하다. 기상 모델과의 접합을 통해 현실적인 초기·경계 자료를 제공할 수는 있지만, 장기간 기상 모델을 수행하는 것 또한 현실적인 제약을 많이 받는다. 따라서, 이와 같은 제약을 극복할 수 있는 방안의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 해안에 인접한 도시 지역에서 관측된 기상 자료와 CFD 모델이 수치 모의한 결과를 비교함으로써, 건물 등에 의해 감소된 풍속을 감안한 배경 대기의 풍속을 추정할 수 있는 방법을 개발하였다. 이를 위해서 부산 남구에 위치한 부경대학교 인근 지역을 대상 지역으로 선정하였고, 부경대학교 내에 설치된 대연 AWS (AWS 942)에서 관측된 기상 자료를 이용하였다.

2. 연구방법

2.1 수치 모형

본 연구는 Kang and Kim (2015)이 사용한 CFD 모델과 동일하다. 이 모델은 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식 계에 기초하며, 흐름이 수목을 지날 때 나타나는 압력 손실을 고려하기 위해 운동방정식과 난류운동에너지 방정식, 그리고 난류운동에너지 소멸률 방정식에 Balczó et al. (2009)에서 사용한 수목 항력항(tree drag term)이 추가되어있다. 이 모델은 Yakhot et al. (1992)이 제안한 재규격화군이론(renormalization group theory, RNG)에 근거한 k-ε 난류 종결 방법을 사용하고, 3차원, 비정수, 비압축 대기 흐름계를 가정한다. 또한 지배방정식 계는 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equation) 알고리즘과 유한 체적법을 이용하고, 엇갈림 격자계(staggered grid system)에서 해석된다. 또한 Versteeg and Malalasekera (1995)가 제안한 벽면 함수(wall function)를 이용하여 벽면 근처에서의 난류 경계층을 모사한다.

2.2 대상 지역

본 연구는 부산광역시 남구 대연동에 위치하고 있는 부경대학교를 대상 지역으로 선정하였다. 부경대

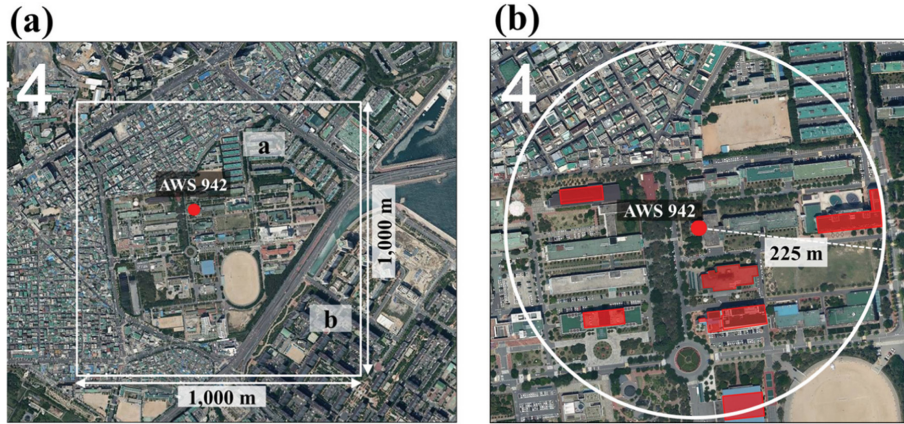


Fig. 1. Aerial photographs around Pukyong National University (from www.daum.net). The red spot in (a) indicates the position of the AWS 942 and the red polygons in (b) indicate the buildings of which heights are higher than the observation height of the AWS 942.

학교 내부에는 대연 AWS (AWS 942) 지점이 위치하고 있다(Fig. 1a). AWS 942 지점으로부터 동쪽으로 약 700 m 거리에 바다가 위치하고, 북서쪽, 서쪽, 남서쪽에는 건물 높이가 비교적 낮은 주거·상업 시설이 분포해 있으며, 남동(북동)쪽에는 높이가 70(40) m 이상인 아파트 단지가 위치하고 있다(a and b in Fig. 1a). Figure 1b의 원은 AWS 942 지점 관측 고도(지상 22.5 m)의 10배에 해당하는 거리를 나타낸다. 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 지상바람 관측 시 관측 고도의 10배 이내에 장애물이 없어야 함을 권장하고 있으나(WMO, 2010), 건물의 집적도가 높은 도시 지역에 위치한 대부분의 기상관측소는 이 기준을 만족시키지 못한다. Figure 1b에서 붉은색으로 표시한 건물은 관측 고도보다 높은 건물을 나타내는데, AWS 942 지점 주위에 건물과 장애물이 다수 존재하고 관측 고도보다 높은 건물이 다수 분포하고 있어 관측 풍향과 풍속에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2.3 수치 실험 설계

본 연구에서는 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS) 자료를 기반으로 지표경계입력 자료를 구축하였다. 수치 도면의 크기를 동서방향으로 1,000 m, 남북방향으로 1,000 m, 연직방향으로 250 m로 설정하였다(Fig. 2). 격자 해상도가 수평방향으로 5 m, 연직방향으로 2.5 m인 등격자계를 사용하였고, 격자 개수는 x, y, z 방향으로 각각 200, 200, 100개이다. 적분 시간 간격은 0.5초로 하여 총 3,600초까지 수치 적분하였다. 바람과 난류 운동에너지, 그리고 그 소멸율에 대한 유입 경계 조건은 중립 대기를 가정하고

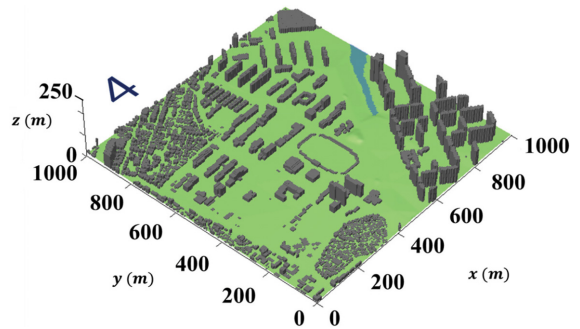


Fig. 2. Three-dimensional configuration for the target area used as the surface boundary condition in the CFD model.

Castro and Apsley (1997)을 참고하여 다음과 같이 설정된다.

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cos\theta, \tag{1}$$

$$v(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \sin\theta, \tag{2}$$

$$w(z) = 0, \tag{3}$$

$$k(z) = \frac{u_*^2}{c_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2, \tag{4}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{c_\mu^{1/2} k^{3/2}}{\kappa z}. \tag{5}$$

여기서 u_* , z_0 , κ , δ 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이

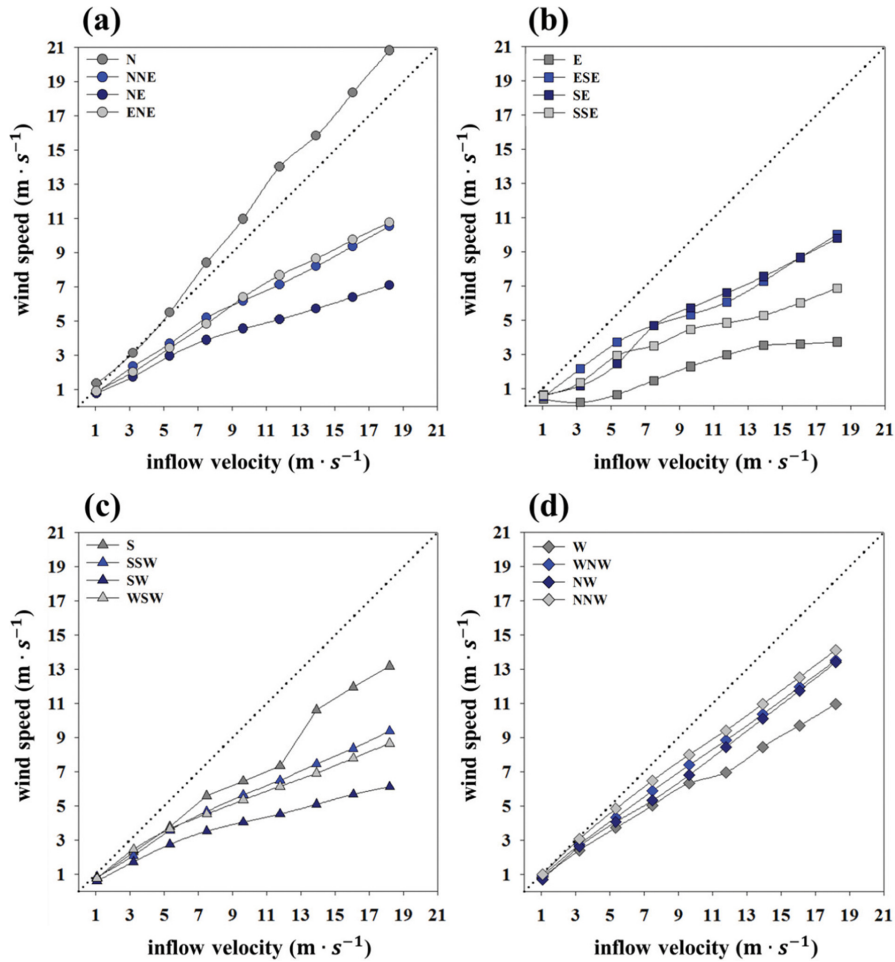


Fig. 3. Comparison of wind speeds simulated at the AWS 942 location and the inflow wind speeds in the (a) northerly (N), north-north-easterly (NNE), northeasterly (NE), east-north-easterly (ENE), (b) easterly (E), east-south-easterly (ESE), southeasterly (SE), south-south-easterly (SSE), (c) southerly (S), south-south-westerly (SSW), southwesterly (SW), west-south-westerly (WSW), (d) westerly (W), west-north-westerly (WNW), northwesterly (NW), and north-north-westerly (NNW) cases.

(0.05 m), von Karman 상수(0.4), 경계층 두께(1000 m)를 의미한다.

본 연구에서는 대연 AWS (AWS 942) 지점에서 CFD 모델이 수치 모의한 바람 자료를 관측 자료와 비교하고, 각 풍향별로 동일한 풍속이 모의되었을 때의 유입류 풍속을 찾는 방식으로 유입류를 역추정하였다. 본 연구에서 사용한 관측 자료는, AWS 942 지점이 현재의 위치로 이전한 날짜(2009년 5월 15일)를 고려하여, 2010년 1월 1일부터 2014년 12월 31일까지 5년 동안 관측된 1시간 평균 풍향·풍속 자료를 사용하였다. 도 단위의 관측 풍향을 이용하였고 무풍(0.3 m s^{-1} 미만의 풍속)의 경우는 분석에서 제외하였다. 그리고 3.2장에서 유입류 역추정 방정식의 검증을 위

하여 AWS 942 지점으로부터 반경 60 km 이내에 위치한 12 지점의 AWS에서 같은 기간 동안(2010.01.01.~2014.12.31) 관측한 풍향·풍속 자료를 이용하였다.

풍속 추정 방정식을 산출하기 위하여, 기준 고도(지상 15 m)에서 유입류 풍속을 1 m s^{-1} 에서 17 m s^{-1} 까지 2 m s^{-1} 간격으로 변화시키고, 총 16방위(북풍, 북북동풍, 북동풍, 동북동풍, 동풍, 동남동풍, 남서풍, 남남동풍, 남풍, 남남서풍, 남서풍, 서남서풍, 서풍, 서북서풍, 북서풍, 북북서풍)의 풍향에 대해 수치 모의하였다.

3. 결과 및 토의

Figure 3은 16방위에 대하여 AWS 942 관측 고도

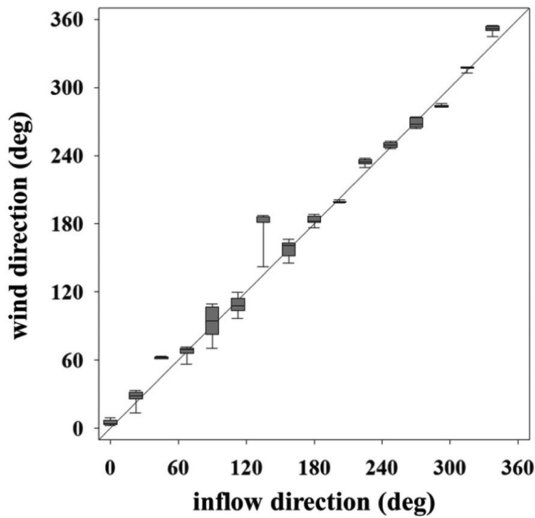


Fig. 4. Comparison of wind directions simulated at the AWS 942 location and the inflow wind directions.

(지상 22.5 m)에서 CFD 모델이 수치 모의한 풍속과 유입류 풍속을 나타낸 것이다. 북풍을 제외하고 전체적으로 관측 지점의 풍속이 유입류 풍속의 60% 이하로 모의되었는데, 이는 건물과 장애물에 의해 풍속이 감소한 것이다. 특히, 북동풍, 동풍, 남남동풍, 남서풍의 경우, 관측 지점 풍속이 유입류의 50% 이하로 모의되었는데, 동풍의 경우에는 유입류 풍속의 15% 이하로 크게 감소하였다. 반면, 북풍의 경우, AWS 942 지점에서 유입류 풍속에 비해 평균 1.1배 강하게 모의되었다.

Figure 4는 16 방위에 대하여 AWS 942 지점에서 CFD 모델이 수치 모의한 풍향과 유입류 풍향을 비교한 것이다. AWS 942 지점에서 수치 모의된 풍향은, 남동풍을 제외하고는, 유입류 풍향과 차이가 평균 7° 이내로 유입류 풍향과 매우 유사하게 나타났다. 남동풍의 경우, 유입류 풍향과 AWS 942 지점에서 수치 모의된 풍향의 차가 비교적 컸다(최대: 52°). 3.1장에서는 유입류 풍향과 관측 지점에서 수치 모의된 풍향 차가 가장 큰 남동풍 경우, 풍속이 가장 약하게 모의되는 동풍 경우, 그리고 풍속이 오히려 증가하는 북풍 경우에 대하여 상세 흐름을 분석하였다. 3.2장에서는 수치 모의한 결과를 이용하여 유입류 풍속 추정 방정식을 구하였다. 추정 방정식을 검증하기 위하여 AWS 942 지점 인근 지역의 해안에 위치한 AWS 관측 자료를 이용하였다.

3.1 상세 흐름 분석(동풍, 북풍, 남동풍)

3.1장에서는 앞서 언급한 남동풍, 북풍, 동풍의 유

입류에 대하여 상세 흐름 특성을 분석하였다. Figure 5는 관측 고도의 수평 풍속 분포와 바람 벡터장을 나타낸다. 수평 풍속 분포는 유입류 풍속과 수치 모의된 풍속의 비를 백분율로 나타냈고, 바람 벡터장은 AWS 942 지점(yellow rectangles in Figs. 5a, 5c, and 5e)의 풍상측 영역(rectangles in red dashed lines in Figs. 5a, 5c, and 5e)을 확대하여 나타냈다. 바람 벡터장에서 검정색(회색) 건물은 관측 고도보다 높은(낮은) 건물을 나타낸다.

남동풍이 부는 경우, AWS 942 지점에서 모의된 풍향은 유입류 풍향과 50° 이상의 차가 났다. 부경대학교 남동쪽에 70 m 이상의 대규모 고층 아파트 단지가 위치하고 있는데 이 아파트 단지 풍하측에 위치한 부경대학교 내에서 매우 복잡한 2차 흐름이 형성되었고 대상 지역으로 유입되는 배경 흐름의 방향이 분산되었으며, 전반적으로 풍속이 약화되었다(Figs. 5a and 5b). AWS 942 지점의 남쪽에는 관측 고도보다 높은 건물이 나란히 배치되어 있고(㉑ in Fig. 5b), ㉑ 지역(붉은 음영) 건물에 의해 흐름이 양쪽으로 분리되어 건물의 측면을 따라 흐르게 된다. 이때 ㉑ 지역 건물에 의해 흐름 분리가 일어나고, 건물 동쪽 벽면을 따라 남풍 계열의 강한 흐름이 형성됨을 확인할 수 있다. ㉑ 지역 건물의 서쪽 벽면을 따라 흐르는 흐름이 AWS 942 지점에 직접적인 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 이는 하층(17.5 m) 흐름에서 더욱 뚜렷하게 볼 수 있는데(wind vectors in the right-top side of Fig. 5b), 관측 지점 남쪽에 인접한 건물들에 의해 흐름이 차단되며 남서쪽 건물들과 남쪽 건물들 사이로 바람 통로가 형성되어 AWS 942 지점에는 남풍으로 편향된 흐름이 나타나는 것을 볼 수 있다. 북풍이 부는 경우, 다른 풍향과 다르게 관측 지점에서 풍속이 강하게 모의되었다(Fig. 5c). 이는 관측 지점의 북쪽에 건물 높이가 비교적 낮은 주거·상업 시설이 분포하고 있어서 관측 고도보다 높은 건물로 인한 흐름 저지가 나타나지 않기 때문이다. 또한 관측 지점의 북북서(북북동)쪽에 위치하고 있는 ㉒(㉓) 지역 건물의 동쪽(서쪽) 인접 구역에서는 질량 보존을 만족하기 위해 풍속이 증가(channeling effect)하게 된다. 이 때, ㉒ 지역의 아파트 단지 사이로 유입되는 흐름으로 인해 ㉓ 지역 풍하측에서 북동풍 계열의 흐름이 나타나게 되고, 이 흐름은 ㉒ 지역 풍하측 흐름과 중첩되어 관측 지점까지 강하게 유지됨을 확인할 수 있다(Fig. 5d). 동풍의 경우, 관측 지점에서 풍속 감소가 가장 크게 수치 모의되었다(유입류 풍속의 15% 이하)(Fig. 5e). 이는 AWS 942 지점의 동쪽에 관측 고도보다 높은 건물이 다수 위치하고, 건물에 의한 풍하측 지역 풍속 감소가 일어나기 때문이다. 특히, 건물 ㉔의 풍상측에는 유입류 풍속의 약 80% 정도의 풍속을 갖는 흐름

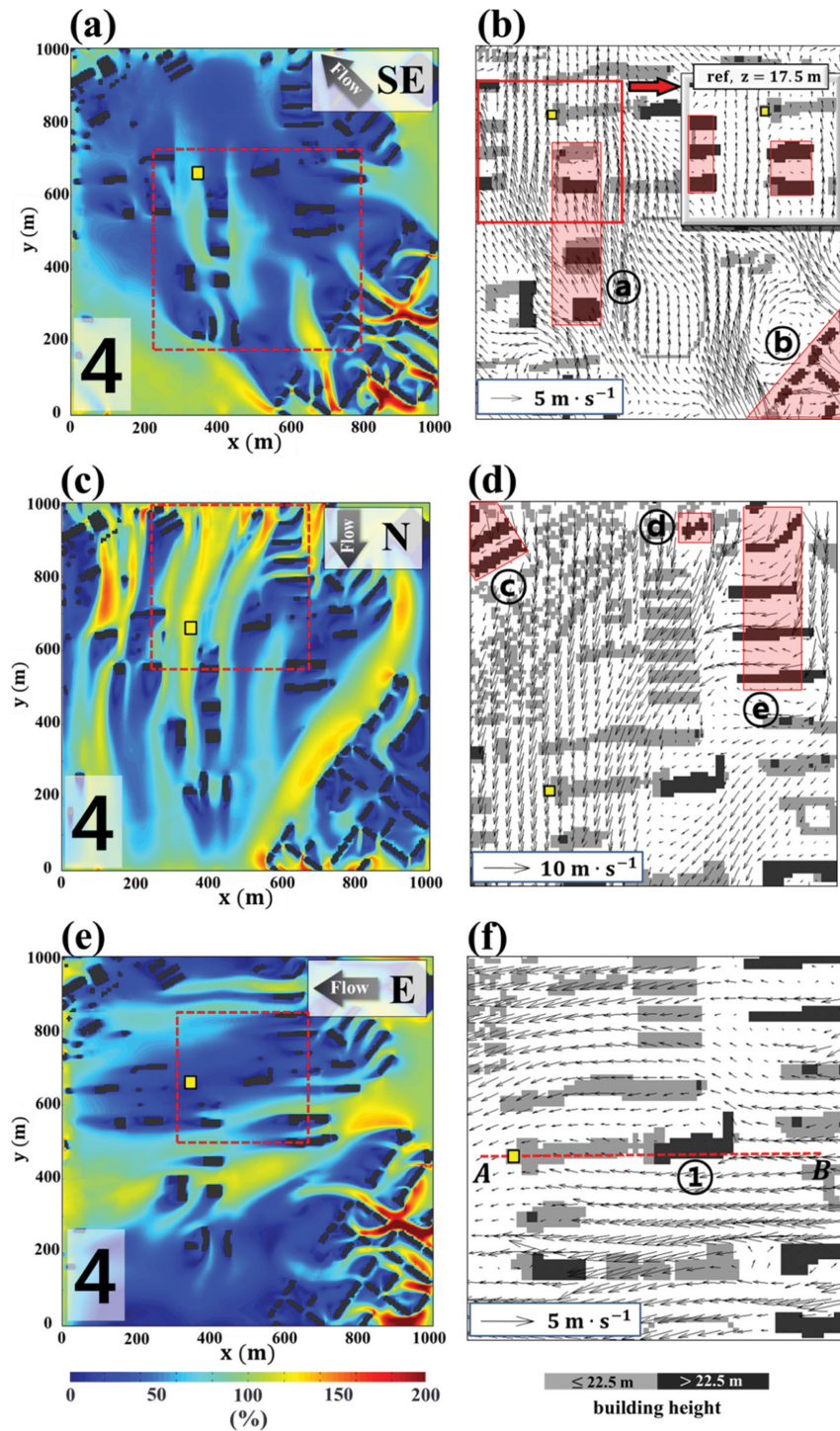


Fig. 5. Contours of simulated horizontal wind speeds in percent for the inflow wind speeds at the observation height of the AWS 942 (left panel) and wind vectors in the rectangles in red dashed lines (right panel) in the southeasterly [(a) and (b)], northerly [(c) and (d)], and easterly [(e) and (f)] cases. The yellow small rectangles in (a), (c), and (e) indicate the AWS 942 station.

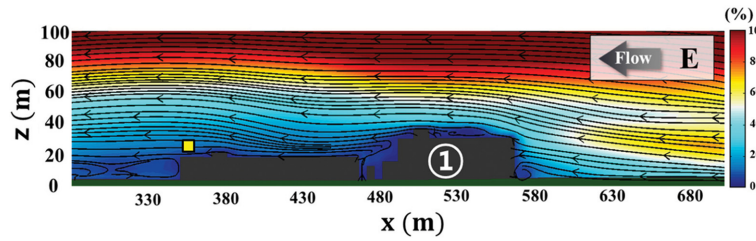


Fig. 6. Streamlines on the cross section along \overline{AB} in Fig. 5f.

Table 1. Formulas for estimating the inflow wind speeds for 16 inflow directions.

Wind direction	Formulas for estimating the inflow wind speeds
W	$y = -0.0078x^3 + 0.1529x^2 + 0.8899x + 0.2365$
WSW	$y = -0.0236x^3 + 0.4409x^2 - 0.0493x + 0.8900$
SW	$y = -0.0225x^3 + 0.5394x^2 + 0.3925x + 0.7414$
SSW	$y = -0.0087x^3 + 0.1974x^2 + 0.8179x + 0.3887$
S	$y = 0.0015x^3 - 0.0513x^2 + 1.8023x - 0.5406$
SSE	$y = -0.0410x^3 + 0.6580x^2 - 0.0863x + 1.3584$
SE	$y = 0.0076x^3 - 0.0725x^2 + 1.8134x + 0.5925$
ESE	$y = -0.0259x^3 + 0.4224x^2 + 0.0696x + 0.9862$
E	$y = \begin{cases} 0.0372x^3 - 0.3785x^2 + 3.33243 - 0.8837, & 78.75^\circ < \text{degree} \leq 90^\circ \\ 0.0873x^3 - 0.2918x^2 + 3.7904x - 0.3436, & 90^\circ < \text{degree} \leq 101.25^\circ \end{cases}$
ENE	$y = 0.0086x^3 - 0.1188x^2 + 2.0364x - 0.5913$
NE	$y = -0.0176x^3 + 0.3923x^2 + 0.6203x + 0.5675$
NNE	$y = -0.0068x^3 + 0.1559x^2 + 0.8089x + 0.4151$
N	$y = 0.0090x^3 - 0.0303x^2 + 1.1248x - 0.2246$
NNW	$y = -0.0027x^3 + 0.0742x^2 + 0.7559x + 0.2366$
NW	$y = -0.0023x^3 + 0.0413x^2 + 1.1972x + 0.0811$
WNW	$y = -0.0021x^3 + 0.0518x^2 + 1.0288x + 0.0755$

이 나타나지만(Fig. 5f), 이 흐름이 건물 ①에 부딪혀 양쪽으로 분리되면서 건물 풍하측에서는 유입류 풍속 대비 13% 이하의 매우 약한 흐름이 나타나는 것을 볼 수 있다. Figure 5f에서 AB 사이의 연직 유선장과 유입류 풍속 대비 풍속장(Fig. 6)을 조사하였다. 건물 ①의 풍하측 뿐만 아니라 풍상측에서도 풍속 감소가 나타나는 것을 볼 수 있다. 건물 ①의 풍상측 면에서는 정체점(stagnation point)을 경계로 흐름이 상하로 분리되고, 건물 전면 하층에 소용돌이가 형성됨을 확인할 수 있다. 건물 풍하측 후류(wake)에서도 풍속이 크게 감소하는 것을 볼 수 있는데, AWS 942 지점은 풍속 감소가 현저히 나타나는 후류 내에 위치하고 있어 풍속이 매우 낮게 모의되었다.

3.2 유입류 풍속 역추정 및 비교 · 검증

3.2장에서는 AWS 942 지점에서 CFD 모델이 수치

모의한 바람 자료를 관측 자료와 비교하고, 각 풍향 별(16 방위)로 동일한 풍속이 모의되었을 때의 유입류 풍속을 찾는 방식으로 유입류를 역추정하였다. 추정된 유입류 풍속의 타당성 검증을 위해 해안지역 12개 AWS 관측 자료와 비교하였다. 유입류 풍속을 추정하기 위하여 다양한 범위(1~17 m s⁻¹) 유입류 풍속을 고려하였고, Marquardt-Levenberg 최소자승법을 이용하여 AWS 942 지점에서 관측 · 수치 모의된 풍속과 유입류 풍속 간의 관계식을 산출하였다(Table 1). 동풍(78.75°~101.25°)의 경우, 유입류가 13.92 m s⁻¹ 이상의 풍속을 갖더라도 AWS 942 지점에서 모의되는 풍속이 일정하게 나타나기 때문에(Fig. 3b), 이를 역으로 추정하게 되면 매우 크게 추정되는 문제점이 발생했다. 따라서, 본 연구에서는 동풍을 78.75°~90°와 90°~101.25°의 범위로 세분화하여 역추정 관계식을 도출하였다.

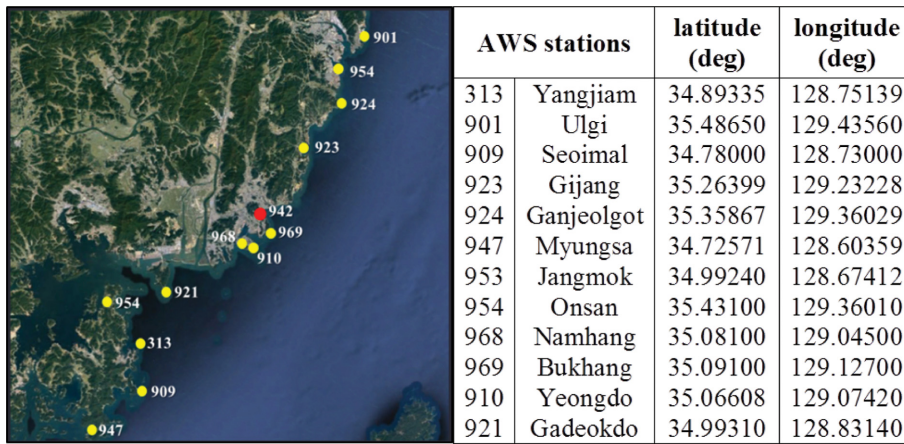


Fig. 7. AWS stations located along the coastlines near the AWS 942.

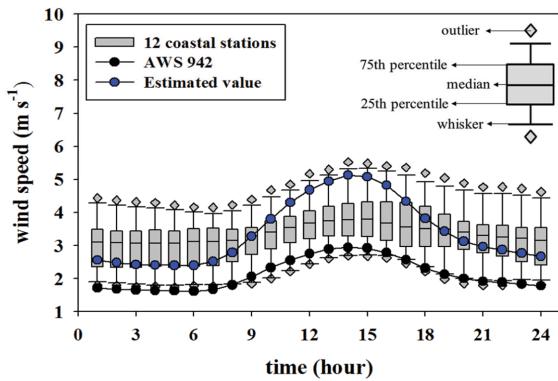


Fig. 8. Diurnal variations of observed wind speeds averaged during the period of 2010~2014 and estimated wind speeds using the formulas in Table 1. Gray boxes indicate the box plot of the observed wind speeds for the 12 AWSs, black circles indicate the observed wind speeds at the AWS 942 station, and blue circles indicate the estimated wind speeds.

수치 실험을 통해 구한 유입류 풍속 추정 방정식을 비교·검증하였다. 검증을 위해서는 비교 대상 지점(수치 도면 유입 경계)에서의 관측이 필요하다. 그러나 장기간 동안 유입류(16 방위)의 관측은 현실적으로 거의 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 건물 등 장애물 영향을 적을 것으로 예상되는 해안 지역 AWS 관측 값과 비교하여 유입류 역추정 방정식을 정성적으로 검증하였다. 해안 AWS 지점은 AWS 942 지점을 중심으로 반경 60 km 이내의 해안 지역에 위치하고 있는 12개 관측소로 선정하였다(Fig. 7).

Figure 8은 AWS 942 지점과 해안 12곳 관측 지점에서 관측한 풍속의 일 변화를 나타낸다. 비교를 위해서, AWS 942 지점이 현재 위치로 이전한 날짜(2009

년 5월 15일)를 고려하여 2010년부터 2014년까지 5년 동안의 자료를 이용하였다. 해안 지역 관측 값은 자료의 분포 정도를 나타내기 위해 box plot으로 나타내었다. 회색 box는 12개 AWS의 관측 풍속 평균 값 중에서 상위 25%에서 75% 사이에 해당하는 사분위수 범위(Inter Quartile Range, IQR)를 나타내고 box plot의 양 끝 값(회색 다이아몬드)은 이상치(outlier)를 나타낸다.

선정한 기상관측소는 대부분 해안선을 따라 위치하고 있지만, 주변의 지형적 특성으로 인해 풍속 차이가 비교적 크게 나는 것을 볼 수 있다. 관측 풍속의 상한과 하한 이상치(outlier)는 각각 북향 AWS (AWS 969)와 기장 AWS (AWS 923)에서 나타났다. AWS 969 지점은 오류도 등대섬의 등대 꼭대기에 위치하고 있어서 건물이나 지형물에 의한 풍속 감소가 거의 일어나지 않을 것으로 판단되고, 대상 지역에 가장 인접하여 위치하고 있기 때문에 대상 지역의 배경 풍속에 대한 가장 적절한 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 반면, AWS 923 지점은 해안으로부터 약 500 m 떨어진 내륙에 위치하고 있어 다른 지점보다 낮은 풍속이 관측되었다. 12개 AWS 관측 풍속의 IQR은 평균 1.01 m s⁻¹로 비교적 일정하였고, 최대(최소)값은 24(12)시에서 1.17(0.82) m s⁻¹로 나타났다. AWS 942 지점의 풍속은 중간값보다 야간(주간)에 1.4(1.0) m s⁻¹ 낮게 나타나고, 하한 이상치와 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 이는 AWS 942 지점이 해안에서 약 700 m 떨어진 도심 지역(부경대학교 캠퍼스)에 위치하고 있어서 건물에 의한 풍속 감소가 크기 때문인 것으로 판단된다.

추정된 풍속은 AWS 942 지점에서 관측된 풍속보다 평균 1.29 m s⁻¹ 컸고, 11시에서 16시까지 값을 제외하고 12개 AWS 풍속의 IQR 내에 분포하는 것을

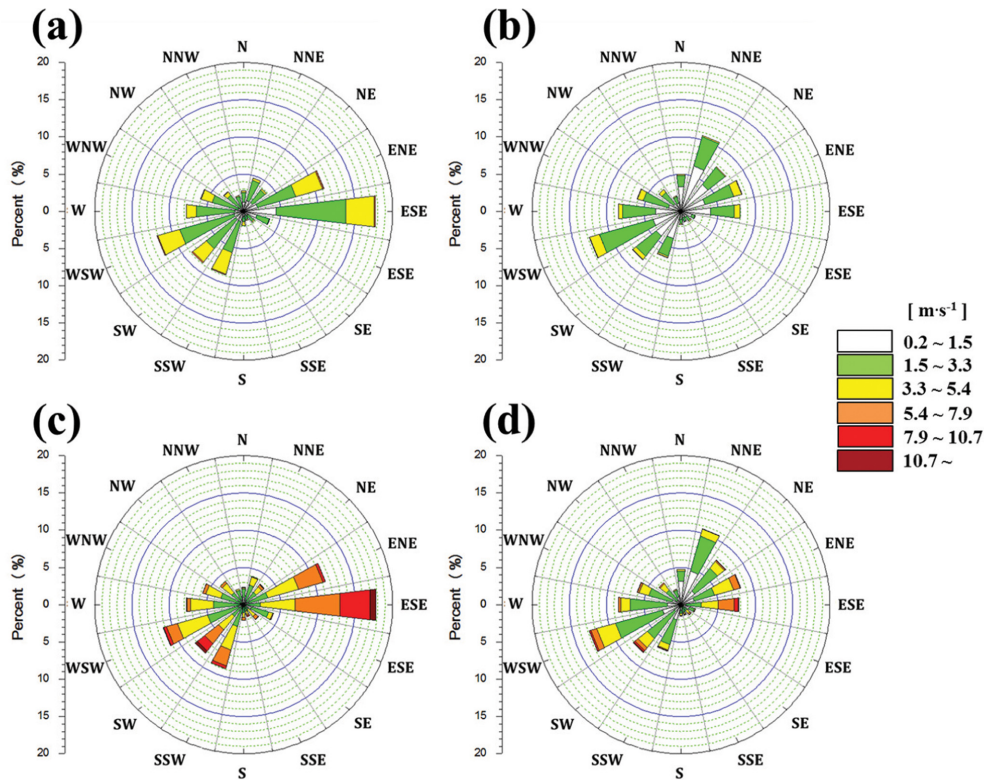


Fig. 9. Wind-rose plots for the observed [(a) and (b)] and estimated wind speeds [(c) and (d)] during the daytime (08~19 h) (left panel) and night time (20~07 h) (right panel) at the AWS 942 station.

볼 수 있다. 추정된 풍속과 12개 AWS 관측 풍속 중간값과의 차는 야간(18시부터 익일 07시까지)과 주간(08시부터 17시까지)에 각각 0.5와 0.7 $m s^{-1}$ 로 AWS 942 관측 풍속에 비해 차가 감소하였다. 12시에서 15시까지는 추정된 풍속이 상한 수염값(whiskers)에 근접한 것을 볼 수 있다. AWS 942 지점에서 관측된 주간 동안의 주풍향이 동풍(18%)과 동북동풍(11%)이고 수치 도면 동쪽 경계면이 바다에 인접함을 감안하였을 때, 주간 동안 상한 수염값에 근접하게 추정된 풍속은 합리적인 것으로 판단된다.

Figure 9는 관측 바람과 추정된 바람을 이용해 작성한 AWS 942 지점의 5년간 주간(08~19시)과 야간(20~07시)의 바람 장미를 나타낸다. Figure 9에서 볼 수 있듯이, AWS 942 지점은 주간에는 동풍계열이 가장 우세하게 나타나고 각 풍향별 강풍 빈도도 주간이 야간보다 높음을 확인할 수 있다. 이로 인해 주간에 추정된 풍속이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 야간에는 동풍계열의 빈도가 상대적으로 낮아지고 각 풍향별 약풍 빈도가 높아지면서 추정된 풍속이 상대적으로 작아지는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 도시 지역에 위치한 대연 AWS (AWS 942) 지점의 주변 환경을 분석하고 AWS 942 지점의 관측 자료를 기반으로 건물의 마찰 효과를 받기 전의 유입류 풍속을 추정하였다. 이를 위하여 CFD 모델의 초기 · 경계 조건을 16 방위의 유입류에 대해 체계적으로 변화시켰다(1 $m s^{-1}$ 부터 17 $m s^{-1}$ 까지 2 $m s^{-1}$ 간격). 수치 모의 결과를 이용하여 풍향별 유입류 풍속 추정방정식을 수립하였고, 이를 검증하기 위해 대상 지역 주변 해안가에 위치한 12개 지점의 5년간(2010~2014년) 관측자료와 비교하였다.

대상 지역인 AWS 942 지점 주변은 관측 고도(약 22.5 m)의 10배 이내의 거리에 건물과 장애물이 다수 존재하고 있고 남동(북동)쪽에는 높이가 70(40) m 이상인 아파트 단지가 위치하고 있다. 따라서 흐름에 대한 건물 영향이 크게 나타났다. 특히, 동풍의 경우 AWS 942 지점의 동쪽에 위치하고 있는 건물들에 의한 흐름 방해가 크게 나타나서 관측 지점 풍속은 유입류 풍속의 15% 이하로 모의되었다. 북풍의 경우,

AWS 942 지점의 북쪽에는 관측 고도보다 높은 건물이 존재하지 않고 건물 사이에서 채널링 효과(channeling effect)가 나타나면서 관측 지점에서 모의된 풍속은 유입류의 110% 이상으로 강하게 나타났다. 풍향의 경우, 대부분 유입류 풍향과 유사하게 나타났지만, 남동쪽에 위치한 대규모 아파트 단지와 관측 지점 주변 건물의 영향으로 유입류인 남풍과 50° 이상 차가 났다.

유입류 풍속 추정방정식을 비교·검증하기 위해, 대상 지역에서 반경 60 km 이내에 위치한 해안 관측소 자료를 이용하였다. 해안 관측소 자료의 5년간(2010~2014년) 일 평균 풍속과 비교하였을 때, AWS 942 지점의 관측 풍속은 해안 지점의 하한 이상치와 유사하게 나타났는데, 이는 AWS 942 지점 주변 건물에 의한 것으로 분석되었다. 추정된 풍속은 야간(20~07시)에는 해안 지점 IQR 내에 분포하였고, 주간(08~19시)에는 다소 높게 나타났다. 주간의 추정 풍속이 높은 이유는 주간에 강풍 빈도가 높은 동풍계열이 우세하고 각 풍향별 강풍 빈도가 야간보다는 주간에 높기 때문인 것으로 분석되었다. 본 연구를 통해 도시 지역에 위치한 AWS의 관측 바람은 주변 건물이나 인공구조물의 영향을 크게 받고 있는 것을 확인하였다. 그리고 보다 현실적인 바람에 대한 초기·경계 조건을 설정하기 위해서는 관측 자료의 보정이 필요하다 고 판단된다.

본 연구에서 개발된 유입류 추정방법을 통하여 유입류 풍속은 추정할 수 있으나, 풍향을 역추정하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 이 추정 방법은 유입류의 풍향과 AWS 지점에서 모의되는 풍향의 편차가 작은 경우에만 사용할 수 있는 한계가 있다. 본 연구에서는 열적 효과를 고려하지 않은 중립대기 상태를 가정한 수치 실험을 수행하였기 때문에 낮 시간 동안 가열에 의한 연직 흐름 발생을 고려하지 못할 가능성이 있다. 향후, 안정·불안정·중립 상태의 대기상태를 고려한 유입류 추정 방법 개발과 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상산업 지원 및 활용기술 개발 사업(KMIPA2015-5042)의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 감사 드립니다.

REFERENCES

- Allwine, K. J., M. J. Leach, L. W. Stockham, J. S. Shinn, R. P. Hosker, J. F. Bowers, and J. C. Pace, 2004: Overview of Joint Urban 2003—An atmospheric dispersion study in Oklahoma City. *Symp. Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone*. AMS, Seattle WA, USA.
- Amorim, J. H., J. Valente, P. Cascão, V. Rodrigues, C. Pimentel, A. I. Miranda, and C. Borrego, 2013: Pedestrian exposure to air pollution in cities: Modeling the effect of roadside trees. *Adv. Meteor.*, **2013**, 7, doi:10.1155/2013/964904.
- Baik, J.-J., S.-B. Park, and J.-J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **48**, 1667-1681, doi:10.1175/2009JAMC2066.1.
- Balczó, M., C. Gromke, and B. Ruck, 2009: Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting. *Meteor. Z.*, **18**, 197-206, doi:10.1127/0941-2948/2009/0361.
- Blocken, B., 2015: Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Build. Environ.*, **91**, 219-245, doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.015.
- _____, W. D. Janssen, and T. van Hooff, 2012: CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environ. Model. Software*, **30**, 15-34, doi:10.1016/j.envsoft.2011.11.009.
- Castro, I. P., and D. D. Apsley, 1997: Flow and dispersion over topography: A comparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flows. *Atmos. Environ.*, **31**, 839-850, doi:10.1016/S1352-2310(96)00248-8.
- Franke, J., A. Hellsten, H. Schlünzen, and B. Carissimo, 2007: *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment*, COST Action 732, *Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models*, Hamburg, Germany.
- Gromke, C., R. Buccolieri, S. Di Sabatino, and B. Ruck, 2008: Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-evaluation of CFD data with experimental data. *Atmos. Environ.*, **42**, 8640-8650, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.08.019.
- _____, B. Blocken, W. Janssen, B. Merema, T. van Hooff, and H. Timmermans, 2015: CFD analysis of transpirational cooling by vegetation: Case study for specific meteorological conditions during a heat wave in Arnhem, Netherlands. *Build. Environ.*, **83**, 11-26, doi:

- 10.1016/j.buildenv.2014.04.022.
- Gowardhan, A. A., E. R. Pardyjak, I. Senocak, and M. J. Brown, 2011: A CFD-based wind solver for an urban fast response transport and dispersion model. *Environ. Fluid Mech.*, **11**, 439-464, doi:10.1007/s10652-011-9211-6.
- Kang, G., and J.-J. Kim, 2015: Effects of trees on flow and scalar dispersion in an urban street Canyon. *Atmosphere*, **25**, 685-692, doi:10.14191/Atmos.2015.25.4.685 (in Korean with English abstract).
- Kwa, S. M., and S. M. Salim, 2015: Numerical simulation of dispersion in an urban street canyon: Comparison between steady and fluctuating boundary conditions. *Eng. Lett.*, **23**, 55-64.
- Moonen, P., C. Gromke, and V. Dorer, 2013: Performance assessment of Large Eddy Simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting. *Atmos. Environ.*, **75**, 66-76, doi:10.1016/j.atmosenv.2013.04.016.
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Schatzmann, M., and B. Leitl, 2011: Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.*, **99**, 169-186, doi:10.1016/j.jweia.2011.01.005.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman, 257 pp.
- Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, 1992: Development of turbulence models for shear flow by a double expansion technique. *Fluid Dyn.*, **4**, 1510-1520, doi:10.1063/1.858424.
- Yang, H.-J., and J.-J. Kim, 2015: Assessment of observation environment for surface wind in urban areas using a CFD model. *Atmosphere*, **25**, 449-459, doi:10.14191/Atmos.2015.25.3.449 (in Korean with English abstract).
- Wang, X., and K. F. McNamara, 2007: Effects of street orientation on dispersion at or near urban street intersections. *J. Wind. Eng. Ind. Aerod.*, **95**, 1526-1540, doi:10.1016/j.jweia.2007.02.021.
- World Meteorological Organization, 2010: *Commission for Instruments and Methods of Observation*. WMO-No. 1064, Geneva.