

CFD 모델을 이용한 도시지역 지상바람 관측환경 평가

양호진¹⁾ · 김재진^{2),*}

¹⁾한국해양과학기술원 부설 극지연구소, ²⁾부경대학교 환경대기과학과
(접수일: 2015년 3월 10일, 수정일: 2015년 6월 2일, 게재확정일: 2015년 6월 2일)

Assessment of Observation Environment for Surface Wind in Urban Areas Using a CFD model

Ho-Jin Yang¹⁾ and Jae-Jin Kim^{2),*}

¹⁾Korea Polar Research Institute, KIOST, Incheon, Korea

²⁾Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 10 March 2015; revised 2 June 2015; accepted 2 June 2015)

Abstract Effects of buildings and topography on observation environment of surface wind in central regions of urban areas are investigated using a computational fluid dynamics (CFD) model. In order to reflect the characteristics of buildings and topography in urban areas, geographic information system (GIS) data are used to construct surface boundary input data. For each observation station, 16 cases with different inflow directions are considered to evaluate effects of buildings and topography on wind speed and direction around the observation station. The results show that flow patterns are very complicated due to the buildings and topography. The simulated wind speed and direction at the location of each observation station are compared with those of inflow. As a whole, wind speed at observation stations decreases due to the drag effect of buildings. The decrease rate of wind speed is strongly related with total volume of buildings which are located in the upwind direction. It is concluded that the CFD model is a very useful tool to evaluate location of observation station suitability. And it is expected to help produce wind observation data that represent local scale excluding the effects of buildings and topography in urban areas.

Key words: Surface wind assessment, observation environment, CFD model, GIS data

1. 서 론

1940년 근대기상관측이 시작된 이래로 기상관측의 규모는 꾸준히 증가하였다. 현재 기상청 산하의 지상 기상관측망은 81개소의 종관기상관측시스템(Automatic Synoptic Observing System, ASOS)과 무인으로 운영 되는 471개소의 자동기상관측시스템(Automatic Weather System, AWS)으로 구축되어 있다. 유인관서에 설치

된 ASOS는 약 36 km의 공간 조밀도로 운영되고, AWS 관측망은 약 13.3 km의 공간조밀도로 운영되고 있다. 지상자동기상관측을 통해 총 14개의 기상요소(기압, 기온, 풍향, 풍속, 습도, 강수량, 강수유무, 일사량, 일조시간, 지면온도, 초상온도, 지중온도, 토양수분, 지하수위)를 생산하고 있다(http://web.kma.go.kr). 생산된 기상요소 자료들은 기상 및 기후예측을 위한 수치모델의 입력자료, 대기환경, 수문, 항공, 건설 등 여러 관련 분야의 서비스 제공에 필요한 중요한 정보로 사용되기 때문에 기상정보에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 특히, 지난 수 세기 동안 급속히 진행된 도시화에 따라 국내 인구의 약 91%가 도시지역으로 집중되었고(Ministry of Land Infrastructure and

*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

Transport, 2013), 인간생활의 중심이 도시지역에서 이루어짐에 따라 도시지역의 기상정보 서비스에 대한 관심과 수요가 크게 급증하였다. 이와 같은 이유로 정확한 도시기상정보의 필요성이 크게 증가되었고, 도시지역 내 기상정보생산을 위한 기상관측소 또한 증가하고 있는 추세이다.

관측소 주변 환경은 대규모 영역(100~1,000 km²)의 특성을 대표하는 관측자료에 영향을 줄 수 있으며, 장비의 오차허용범위를 초과한 왜곡된 관측결과를 발생시킬 수 있다(WMO, 2010). 이러한 문제를 해결하기 위하여 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서는 관측소 주변 환경 상태의 중요성을 강조하고 있으며, 관측소 주변 상태에 따라 관측소의 등급을 분류, 체계화하여 관측자료의 대표성 정도를 평가하고 있다. 이와 유사하게 기상청에서도 관측소 주변환경을 고려한 관측기준을 설정하기 위하여 2006년부터 기상표준화법을 제정하여 시행 중이다. 하지만, 복잡한 환경특성과 비균질성을 가지는 도시지역에서는 WMO나 기상청에서 권장하는 기준을 충분히 만족시키는 관측소들은 많지 않다. 특히, WMO 지상바람관측기준의 경우 일반적으로 지상으로부터의 10 m 고도에 센서가 설치되어야 하며, 관측고도의 10배 이상의 거리 이내에 장애물이 없어야 함을 원칙으로 하고 있지만 건물이 밀집한 도시지역의 경우, 국내외 기준을 만족하는 공간을 확보하기 매우 어려운 실정이다. 이와 같은 이유로 기상표준화법에 따른 관측자료의 신뢰도 등급만을 구분하는 기존의 평가방안뿐만 아니라 실제적인 관측소 주변환경의 영향을 정량적으로 파악할 수 있는 방안이 필요하다.

도시지역에서는 건물과 같은 도시지표 구조물들이 대기의 흐름에 중요한 외력으로 작용하여 매우 복잡한 대기흐름을 유발 시키며 바람의 연직 구조를 변화시킬 수 있다(Britter and Hanna, 2003; Kim, 2007). 대기의 흐름은 작은 장애물에 의해서도 크게 변형될 수 있으므로, 도시지역에 존재하는 관측소들은 구축된 관측망의 조밀도상의 수 km 범위를 대표할 수 있는 바람이 아닌 수 m 범위의 국지적인 특성을 반영한 바람자료를 생산할 가능성이 높다.

전 세계적으로 이와 같은 문제에 공감하여 도시지역 대기흐름의 특성파악과 예측을 위해 MM5, WRF 등의 대기모델들이 많이 사용되고 있지만, 중규모 이상의 기상현상을 분석하고 예측하기 위한 목적으로 개발된 기존의 대기모델들은 해상도의 한계상 미세규모 이하의 건물과 상세지형의 영향을 반영하기 어려운 단점이 있다. 최근, 건물과 상세지형의 영향을 반영한 흐름파악을 위한 방안으로 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 모델을 사용하고 있는 추세이다(Kim and Baik, 2005; Hanna et al.,

2006; Lee and Kim, 2011; García-Sánchez, 2014). 이는 CFD 모델이 기존의 기상현상을 분석하고 예측하기 위해 사용되던 대기모델들과 달리 미세규모에 대하여 고분해능 계산이 가능하고 지형정보를 사용하여 실제도시구조물의 영향파악과 주변흐름을 상세히 묘사할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

따라서, 본 연구에서는 국내 주요 관측소 주변환경에 따른 흐름을 상세 진단하고 관측환경을 평가하고자 한다. CFD 모델을 이용하여 초고해상도 미세규모 흐름을 수치 모의하였고, 관측소 주변환경이 바람관측에 미치는 영향을 분석하여 국내실정과 지역적 특성을 고려한 과학적이고 객관적인 평가 방안을 마련하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 전산유체역학모델

본 연구에서는 도시지역 내 관측소 바람 관측환경 평가를 위해 상세규모의 대기흐름 모의와 평가가 가능한 CFD 모델을 사용하였다. 연구에 사용한 CFD 모델은 Kim (2007)이 사용한 것과 동일하다. 이 CFD 모델은 3차원, 비정수, 비압축, 비회전 흐름 계를 가정한다. 지배방정식 계는 유한체적법(finite volume method)과 엇갈림 격자계(staggered grid system)를 사용하고 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 통해 차분화된다. 이 알고리즘에서는 가정된 압력장하에서 임시적으로 바람성분을 구하고, 질량보존을 만족시키는 압력 변화량을 계산한다. 계산한 압력 변화량으로부터 바람성분의 섭동량을 구하여 바람장과 압력장을 계산한다. 난류 모수화를 위해서 Yakhot et al. (1992)이 제안한 재규격화군이론(renormalization group theory, RNG)에 근거한 RNG $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 이용한다. 벽면경계 근처에서의 난류 경계층 효과를 잘 반영하기 위하여 벽면 함수(wall function)를 사용한다(Versteeg and Malalasekera, 1995). 본 연구에서 사용한 CFD 모델에 대한 더 자세한 수치 과정은 Kim (2007)에 제시되어 있다.

2.2 연구대상지역

CFD 모델을 이용하여 도시지역 내 바람 관측환경 평가를 위하여 인구나 기반시설이 밀집한 도시지역(서울, 대구)에 위치한 관측소를 대상으로 바람 관측환경을 분석·평가하였다. 선정된 지역은 건물이 다수 존재하고 관측소 주변 특이 지형 등 도시지역의 특성이 잘 반영된 곳이다. 대상 지역으로 선정된 관측소와 상세 내용을 Table 1에 제시하였다. Figure 1은 대상 관측소 일대 지역을 나타낸 항공사진이다.

Table 1. Description of the target areas.

Name	Code	Address	Location	
			Latitude (°N)	Longitude (°E)
Gangnam	400	22, Bongeunsa-ro 63-gil, Gangnam-gu, Seoul, Korea	37.5134	127.0470
Yangcheon	405	316-6, Mokdongdong-ro, Yangcheon-gu, Seoul, Korea	37.5296	126.8782
Seogu	846	90-6, Pyeongni-ro 35-gil, Seo-gu, Daegu, Korea	35.8679	128.5442

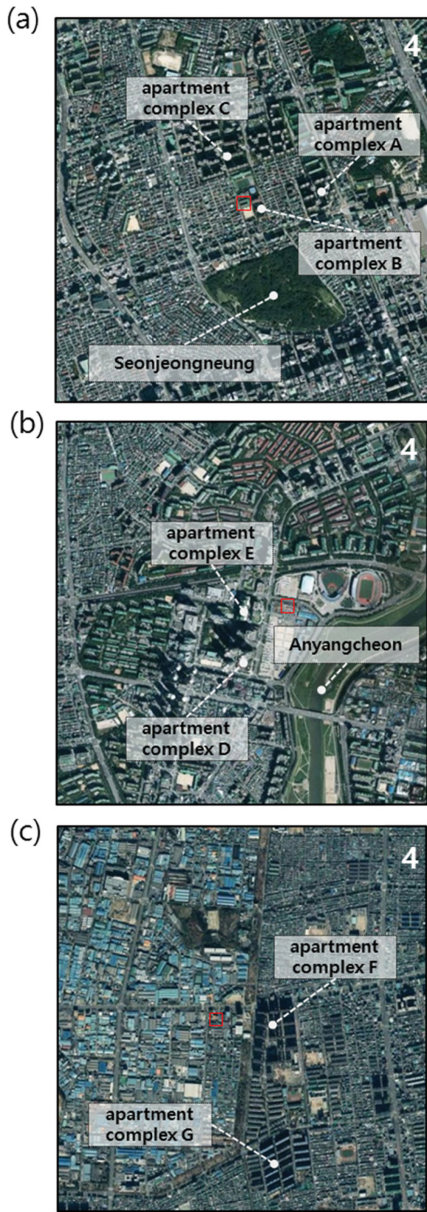


Fig. 1. Aerial photographs for the areas around the (a) Gangnam, (b) Yangcheon, and (c) Seogu AWSs (from <https://www.daum.net>).

서울의 경우, 강남구와 양천구에 위치한 자동기상 관측시스템(AWS)을 선정하였다. 강남(AWS 400)과 양천 지점(AWS 405)은 서울 강남구와 양천구의 정규 기상 관측을 대표하고 있다. 강남 AWS의 경우, 서울 삼릉초등학교 옥상에 설치되어 있으며, 지형, 건물높이, 관측탑 높이를 고려한 관측고도는 약 65 m이다. 관측 지점의 북서쪽으로 약 300 m, 동쪽으로 약 40 m 거리에 20층 이상의 아파트 단지(A, B, C)와 고층건물을 포함하는 주거지와 상업 지역이 위치하고 있다. 양천 AWS의 경우, 목동주차장 인근 건물옥상에 설치되어 있으며, 관측고도는 약 17 m이다. 관측 지점을 중심으로 서쪽으로 약 250 m, 남서쪽으로 약 400 m 거리에 초고층 아파트 단지, D(69층, 4개 동), E(19층)가 각각 위치해 있으며, 주변 대부분 지역이 고층건물로 이루어져 있어 바람 관측환경 평가가 고려되어야 할 지역으로 판단된다. 대구의 경우, 대구 서구에 위치한 AWS 846 지점을 선정하였다. 서구 AWS는 상중이동 주민센터 옥상에 설치되어 있으며, 관측고도는 약 42 m이다. 주위에는 비교적 낮은 건물로 구성된 주거단지에 위치하고 있다. 관측 지점의 동쪽 약 200 m 거리에 아파트 단지(F)가 존재하고 있기 때문에 비교적 낮은 지대에 설치된 관측소의 바람관측자료가 아파트 단지의 영향을 받을 가능성이 높을 것으로 판단된다.

2.3 실험설정

주변 구조물과 지형의 영향을 충분히 반영하기 위하여 관측소를 중심으로 동서로 2 km, 남북으로 2 km 영역을 수치실험지역으로 설정하였다. 수평해상도를 10 m, 연직해상도를 5 m로 설정하여 200 × 200 × 160 개의 등격자계로 구성하였다. 지표경계입력자료는 지리정보시스템(Geographical Information System, GIS) 자료를 사용하여 구축하였다. 도시지역과 같이 복잡한 지형적 특성을 갖는 지역에 대한 미세규모 흐름을 해석하기 위한 방안으로 GIS 자료를 수치모델의 지표경계입력자료로 사용하고 있다(Baik et al., 2009; Lee and Kim, 2011; Choi et al., 2012). 1 m × 1 m의 수평해상도로 제공되고 GIS 자료를 10 m의 수평해상도를 갖는 수치모델에 적용하기 위하여 GIS 자료의 해상도를 1/10로 축소하여 대상 지역의 지표경계입력

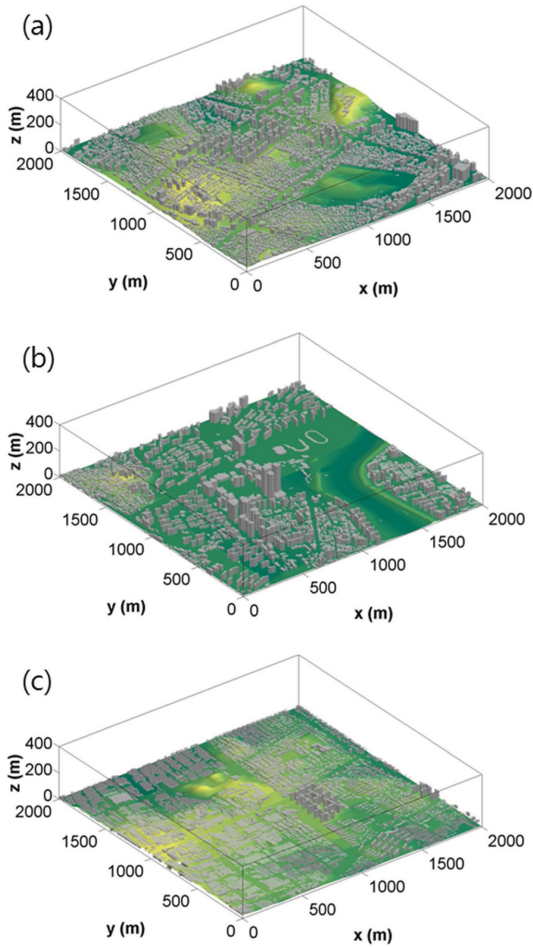


Fig. 2. Three dimensional configurations for the areas around the (a) Gangnam, (b) Yangcheon, and (c) Seogu AWSs.

자료를 구현하였다. Lee et al. (2009)이 사용한 방법으로 구축한 지표경계입력자료는 Fig. 2와 같다.

바람(U , V , W)에 대한 유입 경계 조건은 대기중립 상태를 가정한 로그함수를 사용하였고, 난류운동에너지(k)와 그 소멸율(ε)에 대한 유입 경계 조건은 Castro and Apsley (1997)의 연직분포를 사용하였다. 바람, 난류운동에너지, 소멸률에 대한 유입 경계 조건은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

여기서, u_* , z_0 , κ , θ 는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이 (= 0.05 m), von Karman 상수 (= 0.4), 풍향을 나타낸다. 다양한 풍계에 대한 바람 관측환경 평가 및 분석을 위하여 각각의 대상지역에 대하여 총 16방위(북, 북북동, 북동, 동북동, 동, 동남동, 동남, 남남동, 남, 남남서, 남서, 서남서, 서, 서북서, 북서, 북북서)의 풍향을 고려하였다. 수치 실험은 전산자원의 효율성과 모의안정도를 고려하여 모든 경우에 대하여 적분시간 간격을 2초로 하여 총 3600초 동안 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

이 장에서는 16방위에서 바람이 유입되는 상황을 가정하여 각 관측소 위치에서 모의된 풍향·풍속을 유입류의 풍향·풍속과 비교하여 지상바람 관측환경을 평가하고 관측 지점 주변의 미세 흐름을 분석하였다.

Figure 3은 각 대상지역에서 유입류 풍속과 관측 지점에서 모의된 풍속의 비와 유입류 풍향과 관측 지점에서 모의된 풍향을 비교해 나타낸 것이다. 모든 지점에서 유입류에 비해 관측 지점의 풍속이 전반적으로 작게 수치 모의되었다. 이는 관측 지점 주변에 불규칙하게 분포한 건물과 지형이 거칠기 요소로 작용하여 마찰효과(drag effects)와 가림효과(blocking effects)를 발생시켰기 때문이다. 또한 특정 풍향의 유입류에 대해서, 관측 지점에서 모의된 풍향과 풍속이 유입류와 큰 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 유입류의 방향에 따라 관측 지점 주변의 국지적 요소들이 바람 관측에 큰 영향을 미치고 있음을 의미한다. 이와 같은 요소들에 의한 영향을 파악하기 위해 각 관측소별로 미세 흐름 평가와 분석을 실시하였다.

3.1 강남 AWS (AWS 400)

강남 AWS 지점에서는 남풍(180°)과 남남서풍(202.5°)을 제외한 모든 유입류 풍향에 대해 관측 지점의 풍속이 크게 감소(80% 이하)하였다(Fig. 3a). 풍속 감소는 북서풍이 가장 컸고(유입류 대비 8%), 동남동풍(20%), 동풍(31%), 북북서풍(33%), 북풍(41%), 동북동풍(46%), 서북서풍(52%), 남서풍(77%)의 유입류가 존재할 때, 유입류 대비 60% 이하의 풍속이 관측 지점에서 모의되었다. 이는 강남 AWS를 중심으로 남쪽과 남동쪽을 제외한 지역의 지형 고도가 상대적으로 높

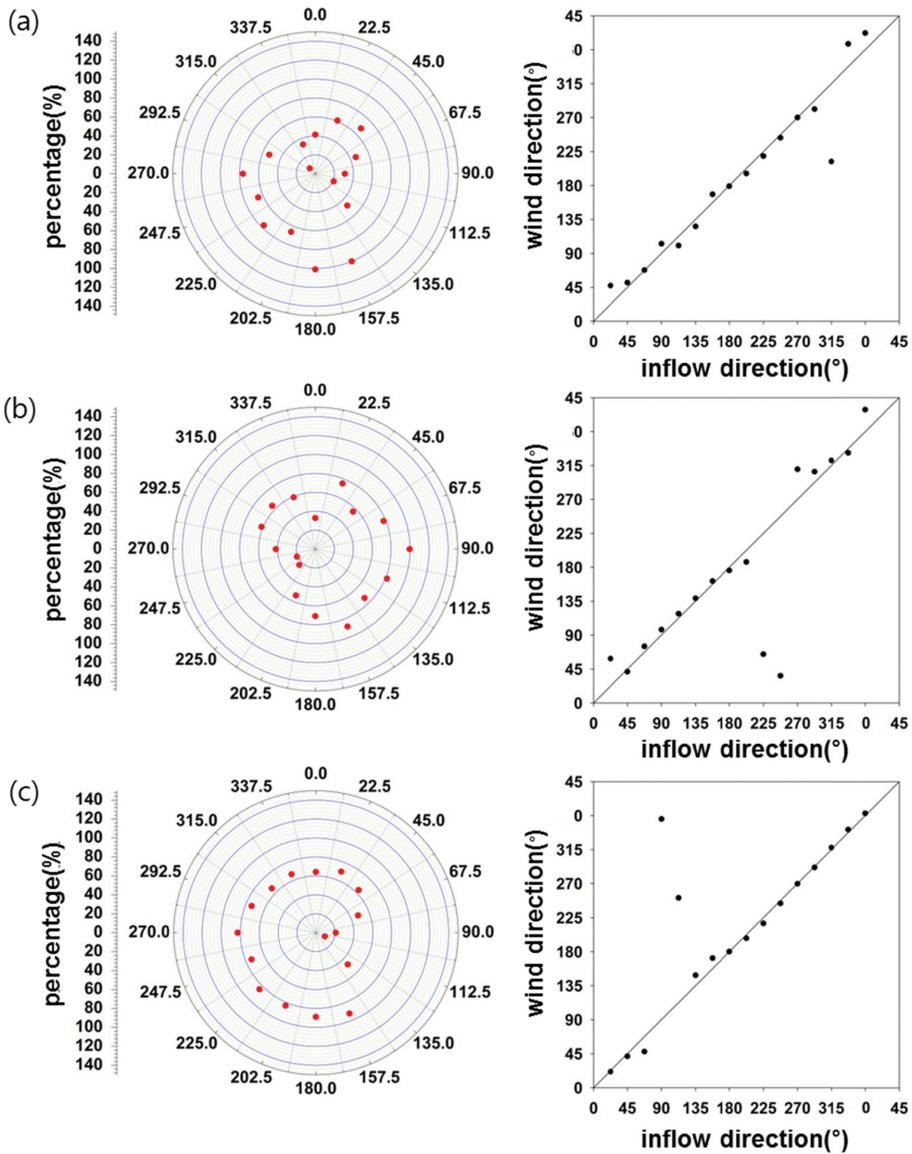


Fig. 3. Ratio of wind speed at the AWS location to inflow (left panel) and comparison of wind direction at the AWS location to 16 inflow directions (right panel) for the (a) Gangnam, (b) Yangcheon, and (c) Seogu AWSs.

기 때문에 남풍과 남남동풍을 제외한 대부분의 풍향에서 지표의 효과가 상대적으로 크게 반영되어 풍속 감소가 나타난 것으로 판단된다. 풍향의 경우, 북서풍의 유입류에 대해, 관측 지점에서 모의된 풍향 차이가 가장 크게 나타났다(Fig. 3a). 유입류와 관측 지점의 모의 풍향 차이가 나타난 원인을 파악하기 위하여 남풍, 동남동풍, 북서풍의 유입류에 대한 미세 흐름을 분석하였다. Figure 4는 남풍, 동남동풍, 북서풍의 유입류에 대한 바람 벡터장과 풍속 분포를 나타낸다. 진

회색 건물은 관측고도보다 높은 건물을 나타낸 것이고, 검은색 실선으로 표시한 부분은 관측 지점을 나타낸다. 남풍의 경우, 강남 AWS의 풍상측(남쪽) 지역은 대부분이 관측고도보다 낮은 저지대이고 남쪽 유입경계로부터 관측 지점 사이에는 높은 건물이나 지형이 거의 존재하지 않기 때문에 풍향이 유입류와 큰 차이를 보이지 않음을 확인할 수 있다(Fig. 4a). 또한 풍상측 인접한 곳에 선릉공원이 위치하고 있어 건물 등과 같은 거칠기 요소의 영향을 받지 않기 때문에

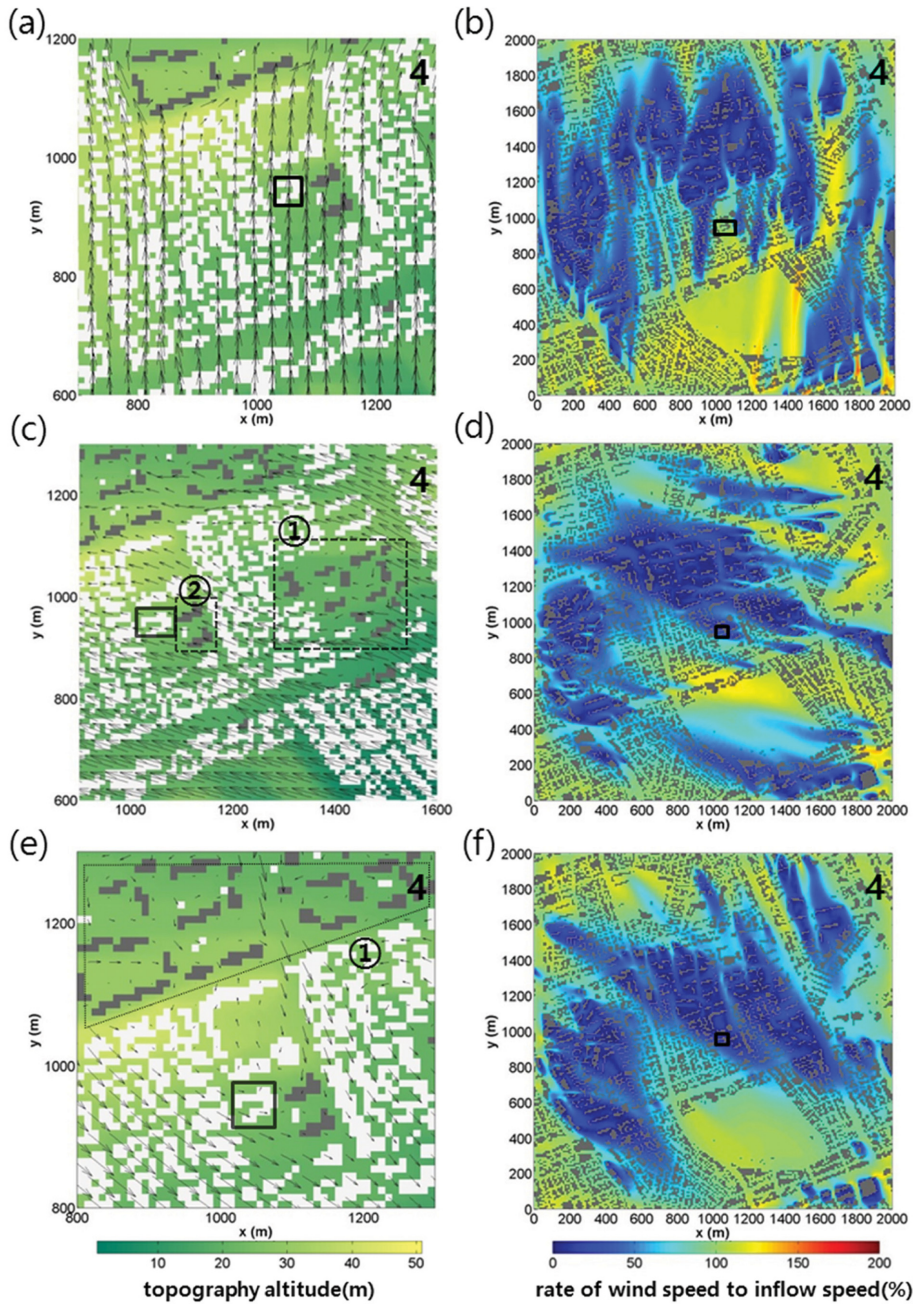


Fig. 4. Wind vector field (left panel) and contours of wind speed at observation height (right panel) for the southerly [(a) and (b)], east-south-easterly [(c) and (d)], and northwesterly [(e) and (f)] cases in the areas around the Gangnam AWS. The retangles in black thick line indicate the Gangnam AWS location.

풍속 감소가 거의 나타나지 않았다(Fig. 4b). 동남동풍의 경우, 동쪽경계에서 유입된 흐름은 강남 AWS 동쪽에 위치한 아파트 단지, A(Fig. 4c의 ①)에 막혀 아파트단지 풍상측에서 흐름 분리가 일어난다. 분리

된 흐름은 다시 아파트 단지, B(Fig. 4c의 ②)에 막혀 강남 AWS 지점에서 동풍에 가까운 풍향이 나타났다. 그리고 아파트 건물들에 의한 마찰효과 때문에 풍하측에 위치한 강남 AWS 지점에서의 풍속 감소가 두

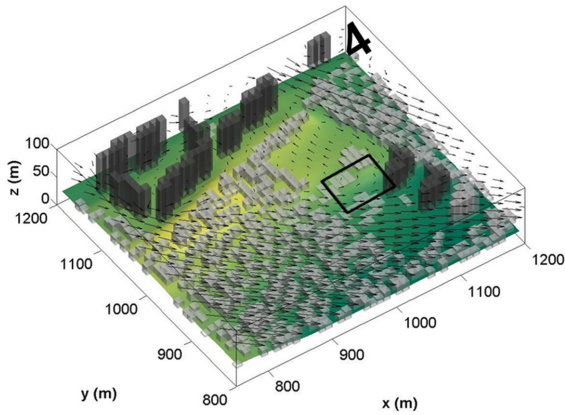


Fig. 5. Wind vector field in detail around the Gangnam AWS in the northwesterly case.

드러졌다(Fig. 4d).

풍향과 풍속 변화가 가장 크게 나타난 북서풍의 경우, 강남 AWS의 북서쪽에 위치한 아파트 단지, C(Fig. 4e의 ①) 내부에서 매우 복잡한 흐름 형태가 나타나며 풍속이 현저하게 감소하는 것을 확인할 수 있다(Figs. 4e, f). 아파트 단지의 풍상측에서는 흐름 분리가 나타나고 아파트 단지 후면에 흐름을 크게 변화시킨다. Figure 5는 강남 AWS 인접지역의 상세 흐름장이다. 아파트 단지, C에 의해 분리된 흐름이 단지 후면에서 수렴하고 이중 에디 순환(double-eddy circulation)이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 즉, C의 풍하측에는 재순환 영역(recirculation zone)이 형성되는데, 강남 AWS 지점이 재순환 영역 내에 위치하면서 남서풍계열의 바람이 나타나고 풍속이 크게 감소함을 확인할 수 있다.

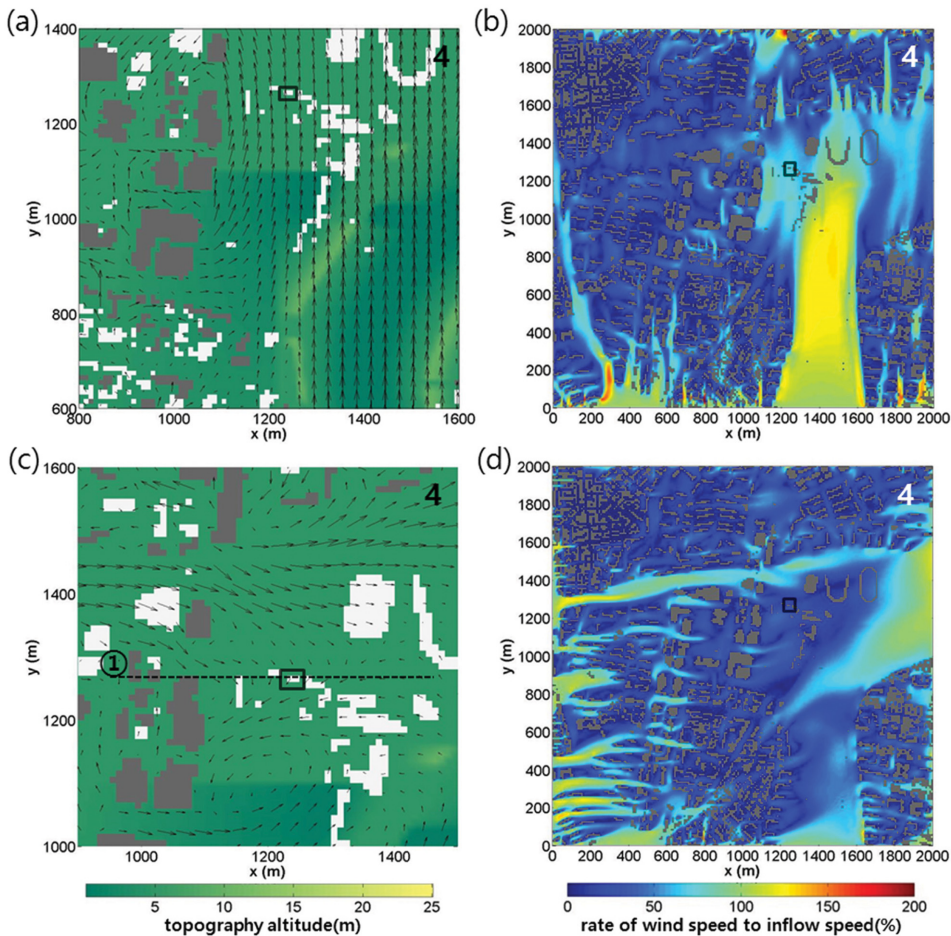


Fig. 6. Wind vector field (left panel) and contours of wind speed at observation height (right panel) for the southerly [(a) and (b)] and west-south-westerly [(c) and (d)] cases in the areas around the Yangcheon AWS. The rectangles in black thick line indicate the Yangcheon AWS location.

3.2 양천 AWS (AWS 405)

양천 AWS 지점은 안양천이 흐르고 있는 동쪽을 제외한 대부분 지역에 고층 건물이 분포한다. 이 때문에, 양천 AWS 지점에서는 북북동풍과 동북동풍~남풍(67.5°~180°) 계열의 유입류를 제외한 모든 풍계에서 풍속이 크게 감소하였다. 특히, 관측 지점의 서쪽에 고층 건물이 밀집되어 있기 때문에 동풍계열에 비해 서풍계열의 바람에서 풍속 감소가 두드러졌다. 남서풍(225°)과 서남서풍(247.5°)의 경우, 관측 지점에서 모의된 풍향은 유입류에 비해 각각 160°와 111° 차이가 났으며 풍속은 각각 유입류의 23%와 20% 수준으로 감소하였다(Fig. 3b). 양천 AWS 지점은 비교적 평탄한 지형에 설치되어 있고, 주변에 고층 건물들이 밀집되어 있기 때문에 고층 건물들이 바람관측에 미치는 영향을 명확하게 확인할 수 있다. Figure 6은 유입류와 풍향은 비교적 잘 일치하였지만 풍속이 감소한 남풍과 풍향과 풍속 변화가 컸던 서남서풍 경우의 바람 벡터장과 풍속 분포를 나타낸 것이다. 남풍의 경우, 남쪽으로부터 유입된 흐름은 개방된 안양천을 지나면서 남풍 계열의 풍향을 유지한 채 관측 지점으로 유입됨을 확인할 수 있다(Fig. 6a). 안양천을 따라 밀집된 건물 때문에 안양천이 비교적 좁은 통로 역할을 하면서 풍속이 강해지는 벤추리효과(venturi effect) 또는 채널링효과(channeling effect)가 나타났다. 안양천에서는 풍속이 부분적으로 증가하였으나, 관측 지점 남쪽의 건물에 의해 풍속이 부분적으로 감소하면서 양천 AWS 지점에서는 유입류와 풍속이 유사하게 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 6b).

서남서풍의 경우, 양천 AWS 주변 흐름은 풍상측에 위치한 아파트 단지(E) 후면에 형성되는 이중 에디 순환의 영향을 주로 받았다. E의 풍상측 면 부근에서 흐름 분리가 일어나면서 시계방향과 반시계방향으로 편향되는 흐름이 생성되었다. E의 풍하측에서는 흐름 재부착(flow reattachment)이 일어나고 이중 에디 순환이 형성되었다. 양천 AWS 지점은 시계방향으로 회전하는 에디 순환의 남쪽에 위치하여 북동풍계열의 바람이 나타났다(Fig. 6c). Figure 7은 파선①(Fig. 6c)에서 조사한 바람 벡터장과 유선장의 연직 단면도를 나타낸다. E의 풍상측에서 상하로 흐름이 분리되고 풍하측에서 재순환 영역이 형성되는데, 양천 AWS 지점이 재순환 영역 내부에 위치하면서 풍속이 크게 감소하였다(Fig. 7).

3.3 서구 AWS (AWS 846)

서구 AWS의 경우, 관측 지점의 동쪽에 위치한 20층 이상의 아파트 단지(F)의 영향이 주로 나타났다. 동풍 계열의 흐름이 유입될 때 풍속 감소가 현저하였는데, 동남동풍과 동풍이 부는 경우에 관측 지점에서

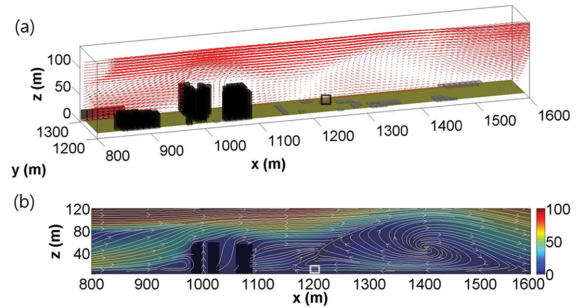


Fig. 7. (a) Wind vector field and (b) streamline field in the x-z plane along the dashed line in Fig. 6c. Contours in Fig. 7b indicate the ratio of wind speed to inflow at the same height.

는 각각 유입류의 11%와 21% 수준의 풍속이 모의되었다(Fig. 3c). 동풍과 동남동풍 경우에 관측 지점에서 모의된 풍향은 각각 북풍과 서남서풍으로 풍향 변화가 크게 나타났다(Fig. 3c). 반면, 낮고 균일한 높이의 건물들이 밀집한 남쪽으로부터 흐름이 유입되는 경우에는 관측 지점의 풍향과 풍속은 유입류와 매우 유사하게 나타났다. 남풍과 동남동풍의 유입류에 대해 미세 흐름을 분석하였다. Figure 8은 남풍과 동남동풍이 부는 경우에 조사한 관측 고도에서의 바람 벡터장과 풍속 분포를 나타낸다. 남풍이 부는 경우, F와 G의 풍상측에서 흐름 분리가 일어나고 풍하측에서 풍속이 크게 감소한다(Fig. 8b). 남쪽 유입경계 부근에서는 F와 G를 제외하고는 관측 고도보다 낮은 건물들이 존재하고 관측 지점의 지형 고도가 풍상측보다 높기 때문에, 유입류 풍향과 거의 일치한 풍향이 모의되었고 풍속 변화도 크지 않았다. 동남동풍의 경우, 서구 AWS 동쪽에 위치한 F의 남동쪽 모서리 부근에서 유입류가 분리되고 풍하측에 이중 에디 순환이 형성된다. F의 내부에서는 채널링효과가 나타나면서 부분적으로 풍속이 증가한 것을 확인할 수 있다. 이중 에디 순환은 서구 AWS 지점을 포함한 광범위한 영역에서 나타나게 되는데, 이중 에디 순환의 역류가 나타나는 지점에서 서구 AWS가 위치하면서 유입류와 거의 반대 풍향인 서남서풍이 나타났다(Fig. 8c). F의 풍하측에서는 아파트 단지에 의한 가림효과와 마찰효과로 인해 풍속 감소가 광범위하게 나타났다(Fig. 8d). 양천 AWS 지역과 유사하게 아파트 건물의 후면에서 연직 방향으로 재순환영역이 생성되었다. 이와 같은 재순환영역의 발생은 풍하측에서 수평적으로 이중 에디 순환을 유발하는 외력으로 작용하여 서구 AWS 지점의 풍속을 감소시키고 역류를 발생시킨 것으로 판단된다(Fig. 9).

3.4 유입류 대비 풍속 분포

대상지역들의 관측지 주변 건물들이 관측 지점의

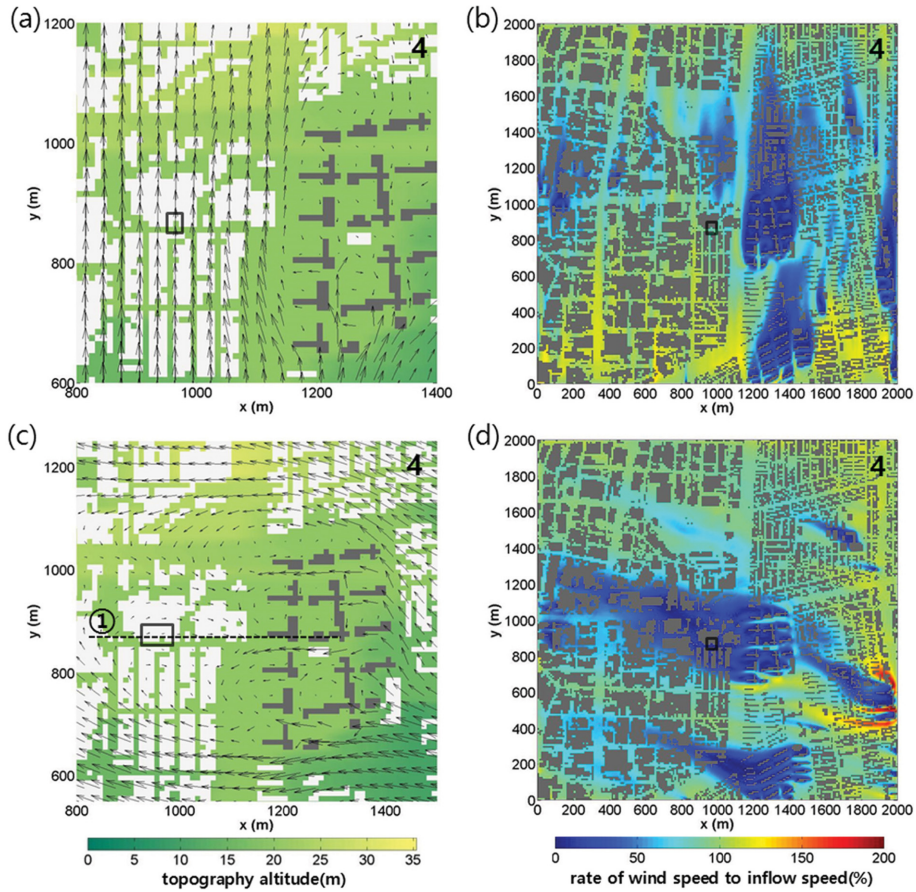


Fig. 8. Wind vector field (left panel) and contours of wind speed at observation height (right panel) for the southely [(a) and (b)] and east-south-easterly [(c) and (d)] cases in the areas around the Seogu AWS. The rectangles in black thick line indicate the Seogu AWS location.

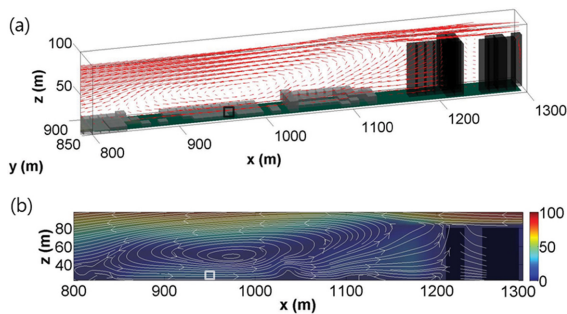


Fig. 9. (a) Wind vector field and (b) streamline field in the x-z plane along the dashed line in Fig. 8c. Contours in Fig. 9b indicate the ratio of wind speed to inflow at the same height.

풍속에 미치는 평균적인 영향을 조사하기 위하여, 16방위 풍향별로 조사한 속도변화 분포를 산술 평균하

여 풍속분포를 조사하였다(Fig. 10). 강남 AWS 지점의 경우, 수치도면의 경계지역에서는 풍속의 변화가 비교적 적게 나타났으나, 고층건물 부근 지역에서는 풍속 감소가 크게 나타났다. 강남 AWS 지점에서는 평균적으로 유입류 풍속의 56% 수준의 풍속이 나타났다. 앞서 기술한 바와 같이 강남 AWS는 주변지역에 대한 대표적인 풍향을 비교적 잘 반영하고 있지만, 주변 건물의 영향 때문에 실제보다 낮은 풍속을 관측할 가능성이 높은 것으로 평가되었다. Table 2에서 보는 바와 같이, 16방위에 대한 유입류 대비 풍속 분포를 평균하였을 때 유입류 대비 풍속이 100% 이하인 지역은 전체 영역에서 약 77%를 차지하였고, 약 38% 지역에서 유입류 대비 60% 이하의 풍속이 나타났다. 양천 AWS 지점의 경우, 관측 지점 주변지역의 건물들은 대다수가 양천 AWS의 관측고도보다 높은 고층 건물들로 이루어져있기 때문에 풍속이 감소하는 영역

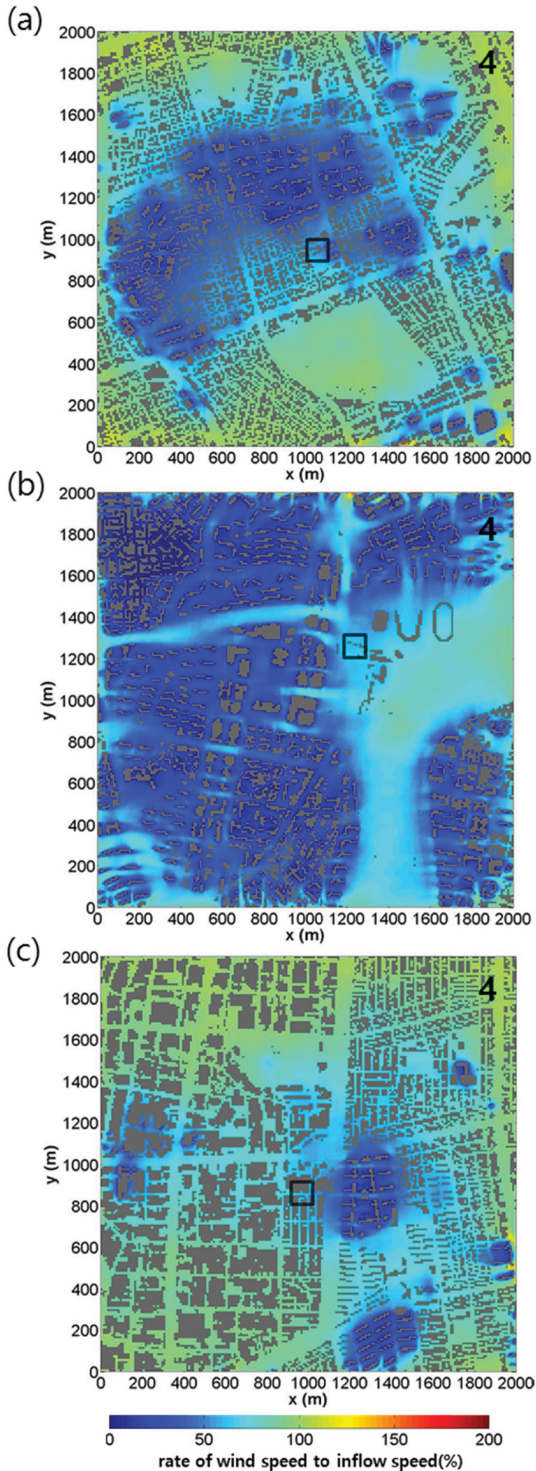


Fig. 10. Contours of wind speed ratio to inflow averaged for 16 inflow directions in the areas around (a) Gangnam, (b) Yangcheon, and (c) Seogu AWSs.

Table 2. Area fraction for the increase and decrease classes of wind speed averaged in the 16 inflow direction cases.

Ratio of wind speed to inflow wind speed (%)	Area fraction (%)		
	Gangnam	Yangcheon	Seogu
0~20	13.32	39.84	5.79
40	10.83	21.41	4.94
60	14.34	14.13	9.07
80	17.63	10.37	25.71
100	20.75	7.92	39.86
120	21.66	5.24	14.2
140	1.42	0.91	0.32
160	0.05	0.12	0.06
180	0.00	0.04	0.03
200	0.00	0.01	0.01

이 광범위하게 나타났다. 유입류대비 풍속이 100% 이하인 영역은 전체영역에서 약 94%를 차지하며, 약 75% 지역에서 유입류 대비 60% 이하의 풍속이 나타났다. 양천 AWS 지점의 풍속은 평균적으로 유입류 풍속의 61% 수준이 나타났다. 비교적 평탄한 지역에 설치되었지만 주변에 위치한 고층빌딩들의 영향이 반영되어 실제보다 낮은 풍속을 관측할 가능성이 높은 것으로 평가되었다. 서구 AWS 지점의 풍속은 평균적으로 유입류 풍속의 64% 수준이 나타났다. 앞서 기술한 지역과 마찬가지로 주로 고층건물 주변에서 풍속 감소가 나타났다. 유입류 대비 풍속이 100% 이하인 영역은 전체영역에서 약 85%를 차지하며, 약 75% 지역에서 유입류 대비 60% 이하의 풍속이 나타났다. 전반적으로 관측소의 주변에 고층 건물이 있거나 관측기기가 설치된 고도보다 높은 지형이 주변에 존재할 경우 관측소가 생산하는 풍속자료에 큰 영향을 줄 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 주요 관측소 주변환경에 따른 흐름을 상세 진단하고 관측환경을 평가하였다. 도시 지역의 특성을 잘 반영하고 인구와 기반시설이 밀집한 서울, 대구 시내에 위치한 관측소를 대상지역으로 선정하였다. 수평해상도와 연직해상도가 각각 10m와 5m인 전산유체역학 모델을 이용하여 미세규모 흐름을 수치 모의하였고, 관측소 주변환경이 바람관측에 미치는 영향을 분석하였다. 보다 현실적인 도시지역 지형과 건물을 반영하기 위하여 지리정보시스템 자료를 이용해 대상지역에 대한 3차원 상세 지표 경계 입력 자료를 구축하였다. 다양한 풍계에 대한 지상바람 관측환경 평가와 분석을 위하여 각각 대상지역에 대하여 총 16방위의 풍향을 유입류로 설정하였다.

강남 AWS, 양천 AWS, 서구 AWS 지점에 대하여 유입류 대비 풍속 변화와 풍향 변화를 조사하여, 도시지역의 건물이나 지형이 도시지역에 위치한 지상바람 관측자료에 미치는 영향을 정량적으로 조사하였다. 관측 지점에서 예측된 풍속은 대부분 풍향의 유입류에 대해 감소하였다. 이는 건물에 의한 마찰효과로 인해 풍하측의 풍속이 감소하는 특성이 잘 반영된 것이다. 관측 지점에서의 풍속 감소는 관측 지점이 건물에 의해 형성된 2차 순환 범위에 포함될 때, 더욱 크게 나타났다.

관측 지점에서 예측된 풍향의 경우, 몇몇 방위를 제외하고는 유입류 풍향과 유사한 것으로 분석되었다. 관측 지점과 주변 건물 사이의 거리가 일정 정도 이상인 경우에는 건물에 의한 흐름 왜곡이 일어난 후에도 흐름이 회복되면서, 유입류와 유사하거나, 거의 일치하는 풍향이 나타났다. 반면, 관측 지점 인근 지역에 높은 건물이 위치해 있거나, 낮은 건물이라 할지라도 건물에 의해 발생한 2차 순환의 범위 내에 위치할 경우에는 유입류 풍향과 차이가 큰 풍향이 나타났다. 본문에서는 기술하지 않았지만, 본 연구를 진행하는 과정에서 풍상측 건물 분포와 풍속 감소를 간의 상관도가 높게 나타나고 있음을 확인하였고, 향후 건물과 풍속 감소율 간의 상관요소를 세분화하고 구체화하여 건물의 분포와 풍속 감소와의 관계를 규명하고자 한다.

본 연구를 통해 관측 시설의 관측환경을 정량적으로 평가하고 분석한 결과, 전산유체역학 모델은 관측환경 변화에 따른 기상관측 지점 주변 지역의 상세흐름장 변화를 예측하고 평가하는 데 매우 유용한 도구임을 확인하였다. 또한, 이를 활용하여 기상관측 자료에 대한 주기적이고 단계적인 평가 관리가 가능할 것으로 판단되며, 도시지역에서 건물과 지형이 미치는 영향을 감안한 바람자료 생산에 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상산업 지원 및 활용기술개발사업(KMIPA2015-5042)의 지원으로 수행되었습니다. 논문에 대해 유익한 지적을 해주신 심사위원님께 감사드립니다.

REFERENCES

- 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.
- Britter, R. E., and S. R. Hanna, 2003: Flow and dispersion in urban areas. *Annu. Rev. Fluid Mech* 2003, **35**, 469-496.
- 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.
- Choi, H. W., D. Y. Kim, J.-J. Kim, K. Y. Kim, and J. H. Woo, 2012: Study on dispersion characteristics for fire scenarios in an urban area using a CFD-WRF coupled model. *Atmosphere*, **22**, 47-55 (in Korean with English abstract).
- García-Sánchez, C., D. A. Philips, and C. Gorié, 2014: Quantifying inflow uncertainties for CFD simulations of the flow in downtown Oklahoma City. *Build. Environ.*, **78**, 118-129.
- Hanna, S. R., M. J. Brown, F. E. Camell, S. T. Chan, W. J. Coirier, O. R. Hansen, A. H. Huber, S. Kim, and R. M. Reynolds, 2006: Detailed simulations of atmospheric flow and dispersion in downtown Manhattan: An application of five computational fluid dynamics models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **12**, 1713-1726.
- 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, 2005: An investigation of flow and scalar dispersion in an urban area using a CFD model. *Atmosphere*, **41**, 821-837 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. H., J. W. Choi, J.-J. Kim, and Y. C. Suh, 2009: The effects of an urban renewal plan on detailed air flow in an urban area. *J. Korean Assoc. Geogr. Inform. Stud.*, **12**, 69-81 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2013: *Statistical Yearbook of Ministry of land infrastructure and transport*. Ministry of Land Infrastructure and Transport, Korea, 926 pp (in Korean).
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. McGraw-Hill, New York, 197 pp.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman, Malaysia, 257 pp.
- World Meteorological Organization, 2010: *commission for instruments and methods of observation*. WMO-No. 1064, Geneva.
- 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. *Phys. Fluids*, **4**, 1510-1520.