

ORIGINAL ARTICLE

유체 역학 기반 도시 기류장 예측을 위한 입력 경계 바람장 특성 연구

이태진 · 이순환^{1)*} · 이화운

부산대학교 지구환경시스템학부, ¹⁾부산대학교 지구과학교육과

A Study of the Characteristics of Input Boundary Conditions for the Prediction of Urban Air Flow based on Fluid Dynamics

Tae-Jin Lee, Soon-Hwan Lee^{1)*}, Hwawoon Lee

Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea

¹⁾*Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea*

Abstract

Wind information is one of the major inputs for the prediction of urban air flow using computational fluid dynamic (CFD) models. Therefore, the numerical characteristics of the wind data formed at their mother domains should be clarified to predict the urban air flow more precisely. In this study, the formation characteristics of the wind data in the Seoul region were used as the inlet wind information for a CFD based simulation and were analyzed using numerical weather prediction models for weather research and forecasting (WRF).

Because air flow over the central part of the Korean peninsula is often controlled not only by synoptic scale westerly winds but also by the westerly sea breeze induced from the Yellow Sea, the westerly wind often dominates the entire Seoul region. Although simulations of wind speed and air temperature gave results that were slightly high and low, respectively, their temporal variation patterns agreed well with the observations.

In the analysis of the vertical cross section, the variation of wind speed along the western boundary of Seoul is simpler in a large domain with the highest horizontal resolution as compared to a small domain with the same resolution. A strong convergence of the sea breeze due to precise topography leads to the simplification of the wind pattern. The same tendency was shown in the average vertical profiles of the wind speed. The difference in the simulated wind pattern of two different domains is greater during the night than in the daytime because of atmospheric stability and topographically induced mesoscale forcing.

Key words : Boundary condition, Urban air flow, CFD, WRF, Numerical model

1. 서론

도시의 급격한 발달에 의하여 도심지 내 대기질 환경이 악화되고 있으며 특히 미세먼지나 오존 등과 같이 인

간의 건강 및 경제 활동에 직접적으로 영향을 미치는 물질의 농도 저감을 위하여 정부 차원의 다양한 연구가 진행되고 있다(Ahn, 2002; Baek and Koo, 2008). 이들 연구는 대기 환경적 측면에서 다양한 대기오염물의 발생

Received 13 June, 2016; Revised 24 June, 2016;

Accepted 24 June, 2016

*Corresponding author : Soon-Hwan Lee, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone: +82-51-510-2706
E-mail : withshlee@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

및 이동 등을 실질적으로 예측하는 데 주안점을 두고 있으며, 다양하고 복잡한 구조물들이 포함되어있는 도심 내에서의 상세한 기상장을 분석하기 위해 수치 모델을 사용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

도시 내에서의 대기오염 물질의 예측은 복잡한 발생원 특성과 기상장 예측 한계로 인하여 많은 어려움이 존재한다. 특히 도시 규모의 기류는 도심 빌딩의 불규칙성과 다양한 인간 활동에 의하여 변동하는 열 특성으로 인하여 수치모형을 통한 접근에 한계를 가진다. 그럼에도 불구하고 도심지 대기의 복잡성을 고려한다면 도시 기류 예측에 수치적인 접근법은 매우 유용한 도구로 인정되고 있다(Baik et al., 2003; Chen et al., 2011).

도심지에서는 건물 협곡 등의 구조물에 의해 지표면의 거칠기가 커지고 열용량이 커지는 등 복잡한 지표면의 특성으로 인해 도시 경계층 내에서 지상의 온도와 바람장의 구조가 다른 교외지역과는 매우 다른 분포를 보인다(Lee et al., 2008). 따라서 이러한 도심 내 구조물들에 의한 열적, 물리적 특성을 반영하기 위한 연구들이 많이 진행되어 왔다. Kusaka et al.(2001)은 도시의 캐노피층 내의 열적 변수들을 단일층에서 계산할 수 있는 단일층 도시 캐노피 모형을 개발하여 지표기온의 일변화를 잘 모의하였다. Baik et al.(2003)은 도시 내의 건물협곡을 반영하기 위해 전산유체역학 (computational fluid dynamic, CFD) 모형을 이용하여 건물과 건물 사이의 기류 분포와 그에 따른 온도와 오염물질의 확산분포를 분석하였다. Lee(2011)은 전산유체역학 모형을 이용하여 산악과 빌딩이 공존하는 부산 지역을 대상으로 한 흐름장을 산출하여 풍력 자원 평가 연구를 실시하였다.

현재 도시 규모의 기상장을 적용한 수치적 연구는 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 종관규모 기상모형인 기상수치해석(numerical weather prediction) 모형을 이용하는 경우와 빌딩 규모의 분석을 위하여 50 m 이하의 초고해상도 공간 규모를 가진 전산유체역학 모형을 이용하는 경우가 있다. 그러나 이러한 수치적 접근법은 각각 한계를 가지고 있다. 기상수치해석 모형의 경우 종관 기상장 예보를 위하여 마찰항 등에 의한 모의 한계로 인하여 도시 빌딩 규모의 고해상도 계산이 어려우며, 전산유체역학 모형의 경우 초고해상도 격자로 인한 막대한 계산 자원이 필요하며, 복잡한 경계조건 적용의 한계로 인하여 예보에 실제 기상장을 정확히 적용하기 어려운 한계

가 있다. 최근 이러한 수치모형의 한계를 극복하기 위하여 기상수치해석 모형과 전산유체역학 모형의 결합을 통한 도시 규모 기상 및 대기오염 농도 예측 정확도 향상을 위한 연구가 이루어지고 있다. 즉 중규모 기상수치해석 모형의 결과를 전산유체역학 모형의 입력장으로 사용하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 도심에서의 복잡한 기류패턴에 의한 오염물질의 수송과 확산에 관한 연구 또한 많이 이루어졌으며, Baik et al.(2009)은 전산유체역학 모형과 중규모 기상수치해석 모형인 MM5 (fifth-generation Pennsylvania State University-National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model)를 결합하여 서울시 도심 내의 기류와 오염물질의 확산을 분석하였다. 미국의 Salt Lake City의 도시를 대상으로 한 Tewari et al.(2010)은 WRF (weather research and forecasting)에서 모의된 기상장을 다운스케일링하여 오일러리안 T&D 모델이 내장된 CFD-Urban의 초기 및 경계조건으로 사용하여 입자의 확산을 분석한 결과, URBAN 2000 IOP10 관측기간 동안의 관측 값과 비교하여 모의성능의 향상을 확인하였으며, Miao et al. (2013, 2014)은 WRF 모형과 공개 전산유체역학 모형인 OpenFOAM (open field operation and manipulation)을 결합하여 도시 내에서의 기류와 오염물질의 확산을 분석하였고 특히 연이은 건물들의 높이 차이에 따른 기류의 패턴을 분석하였다. 그러나 상대적으로 모형 간 서로 다른 격자 공간해상도의 한계로 인하여 두 모형의 결합에 따른 경계층 온도 및 바람의 다운스케일링이 문제점으로 나타난다. 따라서 본 연구는 기상수치해석 모형을 이용하여 기상수치해석 모형의 공간 분해능 특성이 전산유체역학 모형에 입력되는 바람장의 변동 특성을 살펴해보았다. 전산유체역학 모형의 입력장의 개선을 위해 본 연구에서는 서울시를 포함한 수도권 일대를 대상으로 중규모 기상수치해석 모형의 서로 다른 공간해상도로부터 도심으로 유입되는 기상장의 차이를 비교 분석해보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상지역

본 연구는 복잡한 도시 구조를 가진 서울특별시의 미세 기류 연구를 위한 기초 연구로서, 기상수치해석 모형

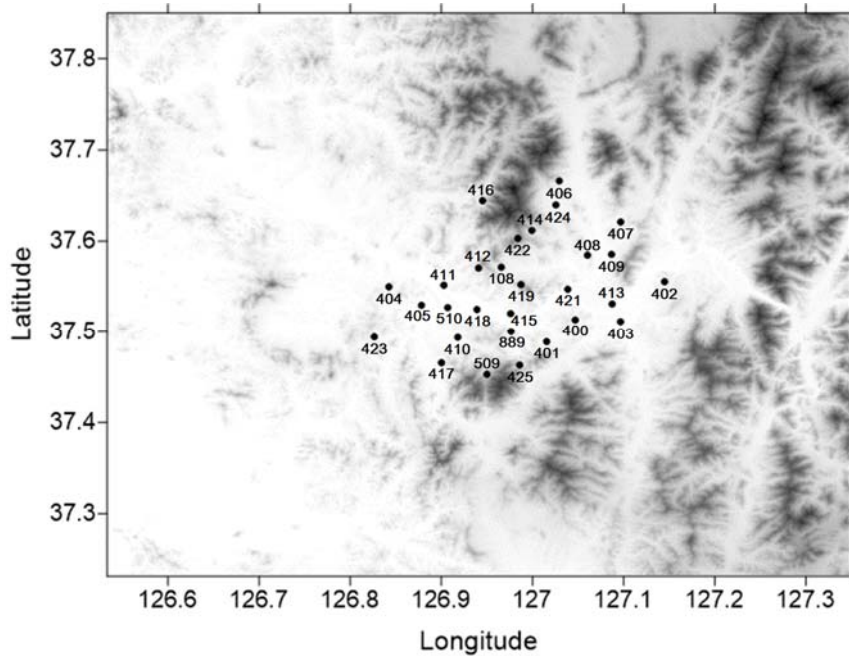


Fig. 1. Topography of Seoul city and geographical locations of 28 meteorological observation sites.

을 통하여 산출되는 경계층 바람장의 특성을 제시한다. 연구 대상 지역은 서울시를 중심으로 설정하였다. 서울시는 천만 인구가 생활하는 한반도 내의 최대 규모의 도심으로 다양한 규모의 빌딩이 복합적으로 존재하기 때문에 서울 도심지 내에 복잡한 기류가 형성될 가능성이 매우 크다. 서울시는 서쪽으로 경기도 평야 지대와 접하여 지형학적으로 트여진 구조를 이루며, 북쪽으로 북한산, 남쪽으로 관악산이 위치한다. 또한 도심 중앙을 한강이 가로지르고 있기 때문에 종관적인 바람은 주로 동서풍 계열이 주를 이룬다.

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 서울시의 지형 구조를 나타낸 것이다. 또한 기상수치해석 모형을 통하여 생산되는 바람장의 검증과 분석을 위하여 서울시 내의 28개 관측소의 기상 요소와 비교하여 기상수치해석 모형의 경계 자료의 해상도에 따른 영향을 평가하였다. 관측지점은 서울시 내에 골고루 분포하고 있으며, 비교 기상 요소는 기온과 바람으로 한정하였다.

2.2. 수치모형과 실험설계

본 연구에 사용한 기상수치해석 모형은 미국 NCAR

(national center for atmospheric research)를 중심으로 개발된 3차원 대기역학 모형인 WRF (weather research and forecasting, Ver.3.7.1) 이다. 이 모형은 다양한 국가에서 기상예보 현업모형으로 사용되고 있으며, 종관규모에서부터 중규모에 이르는 다양한 규모의 기상현상의 분석 및 예측에 사용되고 있다.

기상수치해석 모형에 적용된 물리 모듈을 보면, 장파 복사과 단파 복사는 각각 RRTM (rapid radiation transfer model)과 Dudhia scheme을 적용하였으며, 구름물리는 Single momentum scheme을 채택하였으며, 상대적으로 공간해상도가 큰 경우는 세 종류의 구름물리 과정을 채택하였으며, 작은 경우는 여섯 종류의 구름물리 과정을 적용하였다. 대기 경계층 모형은 YSU (Yonsei univ.) scheme, 지표면 모형은 LSM (land surface model)을 채택하여 계산을 수행하였다. 계산에 적용된 모형의 물리조건은 Table 1에 제시하였다.

수치실험은 상대적으로 종관 규모의 강제력보다 중규모 강제력이 강하게 작용한 사례를 대상으로 수행되었다. 본 연구에서 적용한 사례일은 2015년 9월 18일 09 LST

Table 1. Details of the nested grid domains and physical options used in the WRF model

Domain	D01	D02	D03	D04- case_Small	D04- case_Large
Horizontal grid	89×89	81×87	69×78	42×42	69×66
Resolution	27km	9km	3km	1km	1km
Vertical layers	39 Layers				
Physical process	WRF Single-Moment 3-class scheme		WRF Single-Moment 6-class scheme		
	RRTM scheme				
	Dudhia scheme				
	Noah Land Surface Model				
Initial data	NCEP FNL Operational Global Analysis data				
SST data	RTG SST data				
Time period	2015.09.18.09LST ~ 2015.09.20.09LST				

(local standard time) 부터 9월 20일 09 LST까지 총 48 시간이다. 초기 스피업으로 15시간을 적용하고 분석은 9월 19일 24시간 자료를 이용하였다. 초기 및 경계 조건은 NCEP (national centers for environmental prediction) 의 FNL (final) Operational Global Analysis data 1° 재분석 자료를 사용하였고, 실제 해수면 온도를 적용하기 위해 NCEP의 RTG SST (real time global sea surface temperature) 0.083° 자료를 사용하였다.

기상수치해석 모형의 도메인은 5개의 서로 다른 크기의 도메인으로 구성되어 있으며, 가장 큰 영역을 차지하는 도메인은 89 × 89의 수평격자를 가지고 있으며 수평격자 간 간격은 27 km 이다. 두 번째와 세 번째 도메인은 각각 81 × 87과 69 × 78의 격자수를 가지고 격자 간격은 각각 9 km 와 3 km 이다. 가장 높은 공간해상도를 가지는 네 번째 도메인은 case_Small과 case_Large로 총 두 가지 케이스로 나누어 계산하였으며, 각각의 공간 해상도는 1 km로 동일하고 계산영역에서 차이가 난다(Fig. 2).

상대적으로 작은 영역을 가지는 case_Small 도메인은 수평 격자수가 42 × 42이며 서울 영역만을 포함한다. 반면 case_Large 도메인은 서울 및 주변 지역을 포함하

고 있으며 수평 격자수는 69 × 66 이다. 연직 격자는 모든 영역에서 동일하게 39층으로 구성되며, 지표 부근의 급격한 플러스 변동성을 정확히 표현하기 위하여 지면 가까운 부분을 조밀하게 구성하였다.

본 연구에서는 최고 해상도를 가진 case_Small과 case_Large의 경계 부근에서 산출되는 기상 자료를 정량적으로 비교하여 전산유체역학 모형 계산의 입력장으로 사용되는 경계조건의 차이를 제시한다. 즉 case_Small 도메인 계산의 경우 서울시 경계에서 3 km 공간 분해능을 가진 상위도메인(D3)으로부터 경계 자료를 받으며, case_Large 계산의 경우, 서울시 경계에서 유입되는 자료는 공간해상도 1 km 해상도 자료를 이용하게 된다. 따라서 풍상 측의 도메인 해상도에 따른 서울시 경계로 유입 또는 유출되는 기상 자료 변동을 비교함으로써 도시 영역의 전산유체역학 모형의 경계 자료 특성을 파악할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 종관 기상 환경

Fig. 3은 연구 대상일인 2015년 9월 19일 09 LST와

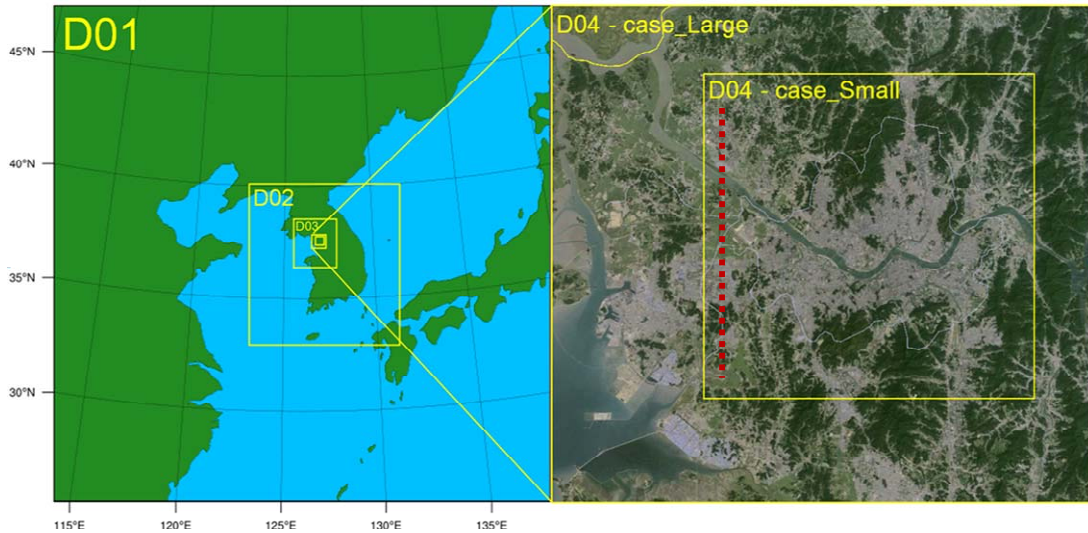


Fig. 2. Model domains used for WRF simulations and satellite image for finest domains(case_Large, case_Small) with different horizontal ranges. Thick dashed line in right panel indicates the vertical cross section line for further analysis.

21 LST의 지상일기도를 나타낸 것이다. 비록 태풍이 일본 태평양 먼 바다에 있지만 한반도는 중국 중앙부에서 발달하기 시작한 고기압의 영향으로 전체가 맑고 강한 하강 기류가 나타난다. 또한 21 LST에서는 태풍은 멀어지고 동시에 중국 내륙에서 강하게 확장하는 고기압의 영향으로, 한반도 전역에서 맑은 날씨가 나타난다. 따라서 한반도 중앙에 위치한 서울시 주변은 중관 강제력이 약화되며 토지 이용 및 지형에 의한 중규모 강제력은 강

화되고 있다. 따라서 주간에는 서울 서쪽에 위치한 서해의 해풍이 발달하기 쉬운 기상 환경이 조성되었다.

수치 모델 결과를 비교하기 위하여 서울시 내에 위치한 28개의 기상 관측 지점으로부터의 자료를 활용하였다 (Fig. 1). Fig. 4는 연구대상일의 서울 28개 지점의 평균 풍향의 시간 변화율을 나타낸 것이다. 12 LST를 기점으로 풍향이 약 130°의 남동풍에서 약 270°의 서풍으로 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 서풍은 오후

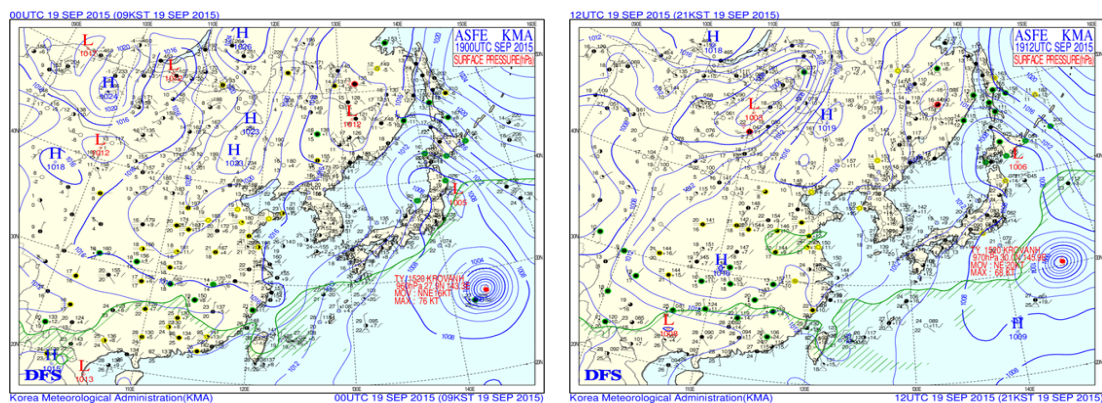


Fig. 3. Surface synoptic charts at 09 LST and 21 LST, 19 September 2015. These charts are provided by KMA (Korea Meteorological Administration).

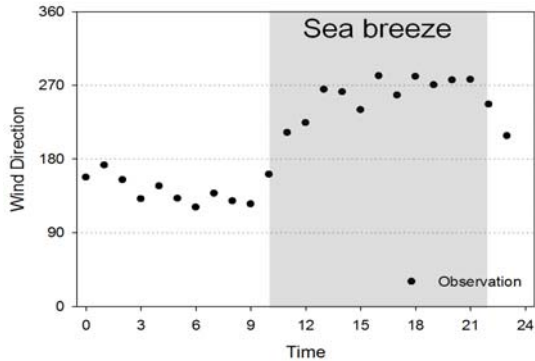


Fig. 4. Temporal variation of averaged wind direction observed at 28 meteorological sites shown in Fig. 1.

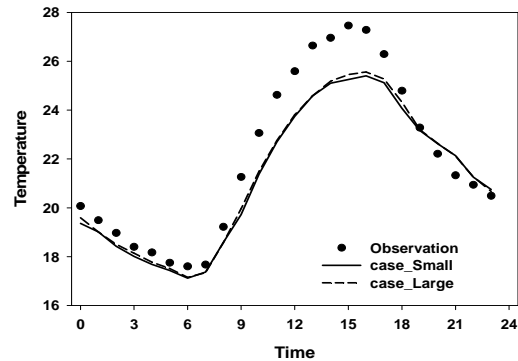


Fig. 5. Temporal variation of averaged surface air temperature observed at 28 meteorological sites in Seoul.

늦게까지 지속된다. 이는 Fig. 3에서 제시된 바와 같이 종관 규모 강제력 약화에 따라 서해상에서 발달한 해풍이 오후가 되면서 서울시 내로 유입되고 있음을 의미한다. 이러한 해풍은 22시를 기점으로 약화되고 있다. 따라서 주간의 경우, 서울시의 서쪽영역이 유입축이 되며 동쪽 영역이 유출축이 된다.

3.2. 서울지역 유입 수평 온도장 분석

Fig. 5는 서울시 내에 위치한 28개의 기상 관측 지점에서 측정된 평균 온도와 수치모형에서 산출된 평균 온도의 시계열을 나타낸 것이다. 수치모형에서 산출된 서울시내의 기온은 관측된 기온에 비하여 전반적으로 과소 모의 되고 있다. 특히 야간에 비하여 주간동안 기온의 과소 모의는 크게 나타난다. 전체적으로 해상도에 상관없

이 수치모형에서 산출하는 서울시 내의 바람장이 실제로 다 강하게 모의되기 때문에 상대적으로 도메인 전체 범위의 해풍 유입에 따른 기온이 낮은 공기의 이류에 의한 것으로 판단된다. 이러한 강한 해풍에 의하여 서울시 내의 평균 기온이 주간에 특히 낮게 나타난 것으로 보인다. 다른 한 가지 특성은 Case_Large의 평균 온도가 Case_Small 보다 관측값에 유사하게 모의하고 있다는 점이다. 주간의 경우 이 두 가지 시뮬레이션에서 차이가 나는데 이는 경계층에서 나타난 바람장 변동에 따른 이류 특성으로 판단되지만 그 차이는 크지 않다.

경계층에서의 기온 차이를 보다 정량적으로 분석하기 위하여 두 가지 수치 실험에서 산출된 기온의 수평 분포를 살펴보았다. Fig. 6은 case_Large 와 case_Small에서 계산된 야간(03 LST)과 주간(15 LST)의 지상 기온

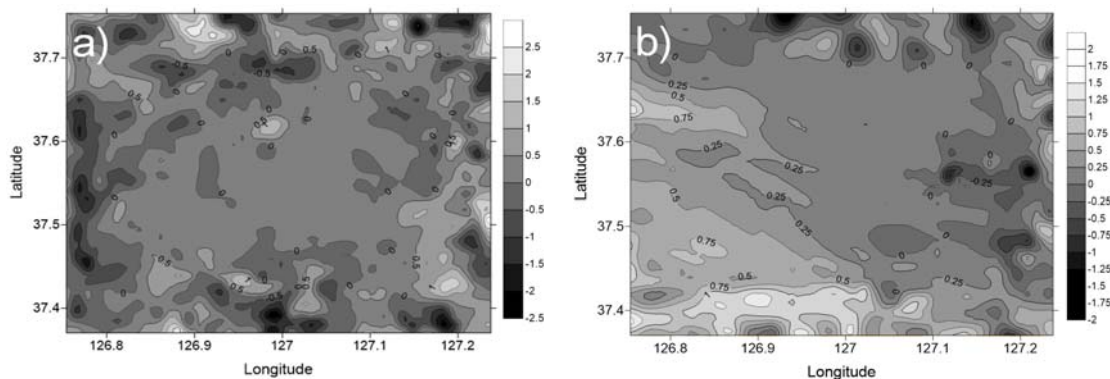


Fig. 6. Differences of the near surface air temperature estimated in case_Small and case_Large at a) 03 LST and b) 15 LST.

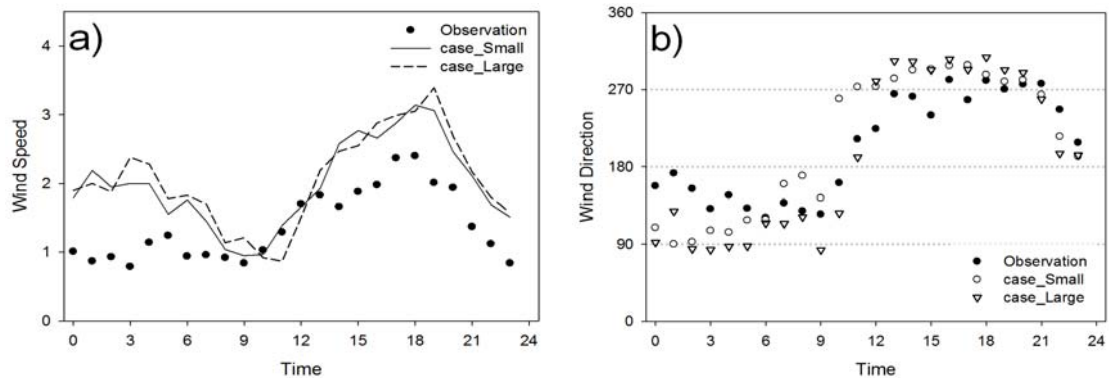


Fig. 7. Temporal variations of observed and estimated a) wind speed and b) wind direction.

차이의 수평 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 서울 도심에서의 차이는 크지 않은데 비하여 산악 지역 및 경계 부근에서는 차이가 크게 나타난다. 즉 유입 및 유출 경계에서 이루어지는 기상장의 차이가 크게 나타나고 있다. 특히 야간의 경우 모든 유출입 경계에서 차이가 크게 나타나며 특히 지형이 높은 곳을 중심으로 강하게 나타나는 경향이 있다. 이는 경계측 부근의 공간 해상도 차이에 의한 지형 강제력이 다르기 때문으로 판단된다. 반면 주간 산악 등에 의한 영향은 풍하 측인 동쪽 경계에서 뚜렷하게 나타나지만 풍상 측인 서쪽 경계에서는 지형에 의한 특성이 약하다. 이는 서울의 서쪽에 위치한 서해에서 발현하는 해풍의 침투와 그에 따른 이류가 더 크게 나타나 산악 지형에 의한 강제력이 약화되기 때문에 단순한 경향의 온도 분포를 나타낸 것으로 보인다. 두 가지 사례에서 계산된 해풍이 유입되는 지역에서 온도경도는 나타나지만 그 차이는 크지 않다.

3.3. 수평장 지상 바람장 분석

Fig. 7은 서울시 내 28개 기상 관측 지점에서의 평균 풍향 풍속과 기상수치해석 모형을 통하여 계산된 바람장의 시계열을 나타낸 것이다. 전체적으로 기상수치해석 모형은 실제 바람장을 과대모의하는 경향이 나타난다. 이러한 풍속 특성이 Fig. 5에서 제시한 바와 같이 기상수치해석 모형에서 나타난 서울 시내의 낮은 기온을 유도하는 것으로 보인다. 풍속의 일변화 경향성은 관측치와 유사하게 나타난다. 또한 풍향의 경우 약간의 편차는 있지만 전체적으로 유사한 변동성을 나타내며, 야간에는

육풍 계열(90°)이 뚜렷하게 나타나며, 주간의 경우 해풍(180°)이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 모형에서 제시된 바람장은 실제 기상장을 잘 모의하는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 각 기상수치해석 모형에서 산출된 수평 바람장의 벡터와 28개 지상 관측 지점에서의 바람 벡터를 나타낸 것이다. 굵은 화살표는 각각 관측 바람 벡터를 의미한다. 전체적으로 평균 바람장과 마찬가지로 서울 시내의 야간 육풍과 주간 해풍의 유입이 정확하게 나타난다. 관측 자료와 비교하면 산악 일부 지역에서 차이가 나타나지만 풍향은 전체적으로 잘 모의하고 있다. 그러나 온도 분포와 마찬가지로 도메인의 경계에 위치하는 유입, 유출지역에서 사례 간의 차이가 나타난다. 특히 주간 풍상측에 해당하는 서쪽 경계 지역(위도 36.6° ~ 37.6°)를 보면, case_Small은 서풍 성분이 강하게 나타나는데 비하여 case_Large는 북서풍 성분이 강하게 나타난다. 이러한 풍향의 변동은 크기는 다르지만 모든 경계에서 나타나고 있다. 이러한 입력 경계에서의 풍향 차이는 상위 도메인의 공간 해상도에 의한 것으로 판단된다.

3.4. 통계분석

두 가지 사례에 대한 통계적 분석을 통하여 수치실험 결과의 타당성을 살펴보았다. Table 2는 두 가지 수치실험을 통하여 산출된 온도와 풍속의 RMSE (root mean square error)와 IOA (index of agreement)를 나타낸 것이다. RMSE는 관측치와 계산치의 차이에 대한 분산의 정도를 나타내는 통계치이며, IOA는 전체적인 시간 경향성의 일치성을 나타낸 것이다. case_Large에서 산출

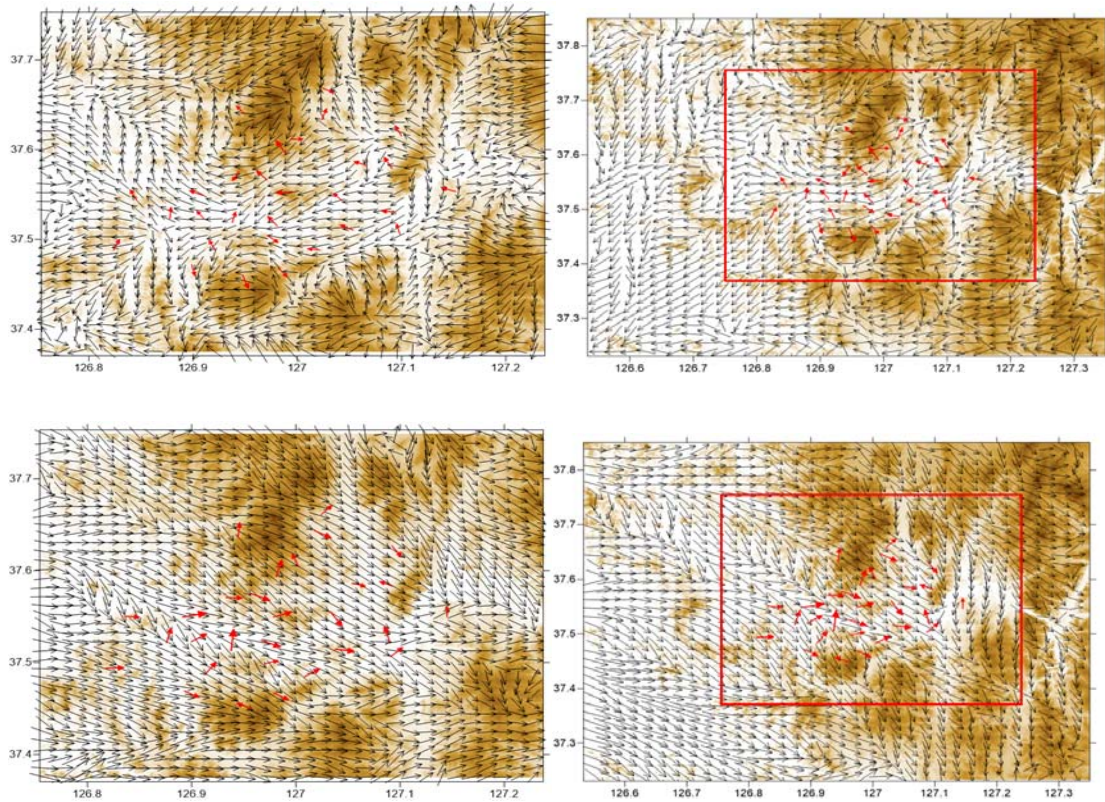


Fig. 8. Wind vectors estimated by case_Small and case_Large at 03 LST(upper panels) and 15 LST(lower panels). Rectangulars in right panels indicate the same area as case_Small. Thick arrows are observed values of wind speed and direction.

된 서울시 내부의 기온과 풍속의 RMSE가 각각 1.53°C 와 1.10 m/s 로 case_Small보다 개선되었으며, IOA 역시 case_Large에서 0.89과 0.61로 약간의 개선이 이루어졌다.

특히 주간 주풍이 흐르는 중구, 성동, 영등포 사이트에서 case_Small에 비하여 case_Large의 풍속 IOA가 각각 0.12, 0.10, 0.09로 뚜렷하게 증가한다. 이러한 통계 분석 결과 주간 서쪽에서 유입되는 해풍의 바람 특성을 case_Large에서 좀 더 정확히 나타낸 것으로 분석할 수 있다. 따라서 도메인의 공간 특성에 따라 도메인의 경계 지역에서 입력 기상장의 차이가 나타나며, 이러한 차이는 풍상층에서 크게 나타나는 경향이 있다.

3.5. 풍상층 연직 단면 기상장 분석

최종 도메인으로 유입되는 기상장의 연직 차이를 파

악하기 위하여 기상요소 변동이 크게 나타난다고 판단되는 서울시 서쪽 경계의 바람 단면을 분석하였다. 분석에는 Fig. 2에 표시된 바와 같이 낮 시간 동안 서울시 내로 해풍이 유입되는 풍상층 단면을 적용하였다. Fig. 9는 지상에서 2 km 고도의 풍속 분포와 벡터 단면을 나타낸 것이다.

먼저 서울시 중심 영역으로 들어오는 영역($37.5^{\circ} \sim 37.6^{\circ}$) 풍속을 보면 위도 37.56° 보다 북쪽에서 case_Large의 풍속이 상대적으로 강하게 나타나며, 남쪽에서는 상대적으로 하층 풍속이 약하게 모인다. 특히 상대적으로 고도가 낮고 한강 주위의 풍속이 크게 나타난다. 이는 Fig. 8에서 본 바와 같이 한강을 중심으로 한 영역에서 바람 수렴이 강하게 나타난다는 것을 의미하며, 이것은 전술한 바와 같이 최상위 도메인의 바깥영역의 지형 및 토지이용 상태에 따른 영향으로 판단된다. 즉 서쪽

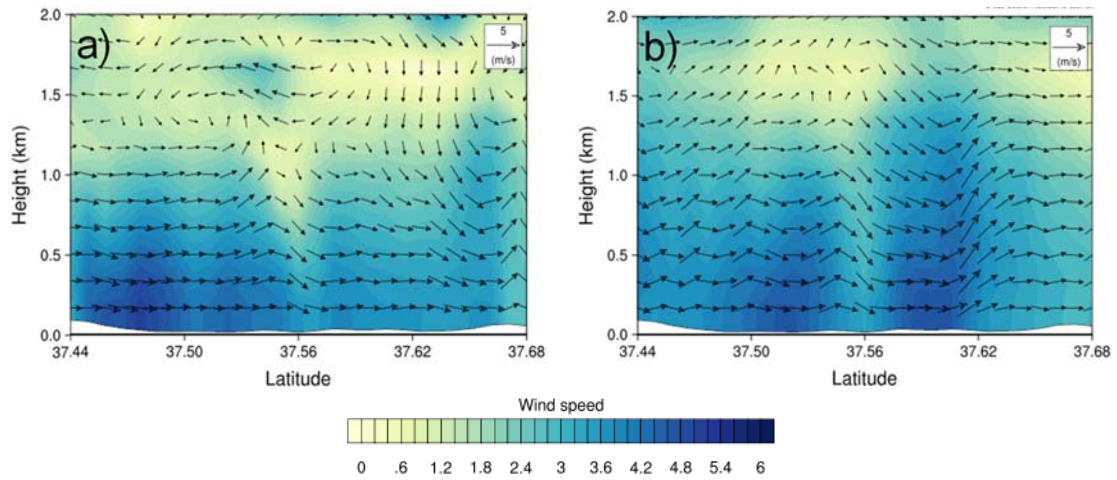


Fig. 9. Vertical cross sections of wind vectors along western boundary line shown in Fig. 2 for a) case_Small and b) case_Large.

경계 바깥쪽에서 공간해상도의 차이에 의하여 경계로 유입되는 수렴이 정확하게 모의되기 때문에 볼 수 있다. 반면 case_Small에서는 풍속의 남북 방향 변동성이 크게 나타난다. 따라서 case_Large는 경계 바깥쪽에서 나타나는 상대적으로 강한 수렴성에 의하여 강한 서풍이 유입되는 반면, case_Small의 경우, 경계 바깥쪽에서 유입되는 해풍의 강도가 약하기 때문에 경계 남북방향의 변동성이 크게 나타난다. 또한 이러한 case_Large의 수렴 강화는 통계적으로 타당한 것으로 보인다(Table 2).

Fig. 10은 서쪽 경계에서 산출된 03 LST(a, b)와 15 LST(c, d) 평균 온위 및 풍속의 연직 프로파일을 나타낸 것이다. 온위의 경우 낮 시간 동안에 혼합층이 뚜렷하게 형성되며, 온위 값에서 약간의 차이가 있으나 크지 않다.

반면 풍속의 경우 혼합층보다 약간 높은 고도까지 case_Large의 풍속이 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 9에서 제시한 바와 같이 서쪽 경계 외부에서 나타나는 해풍의 수렴에 의한 것으로 판단된다.

야간(03 LST)의 경우 주간(15 LST)과 마찬가지로 약간의 연직 온위 분포 차이를 나타내지만 그 차이는 크지 않다. 그러나 풍속의 차이는 하부에서 매우 크게 나타나며 고도 약 1 km 부근에서는 case_Large의 풍속이 약화되는 경향이 나타난다. 이는 Fig. 6에서 제시한 바와 같이 지형 강제력에 의한 영향력이 주간보다는 야간에 더욱 강하게 나타나는데, 경계 외부의 해상도에 따른 지형 강제력의 차이로 설명할 수 있다.

따라서 저해상도 격자 자료의 도메인에서 고해상도

Table 2. Statistical evaluation of the meteorological variables between observations and simulated values for case_Large and case_Small

	Temperature (°C)	wind speed (m/s)	wind direction (°)
Mean (Obs)	22.06	1.38	202.77
case_Large			
RMSE	1.53	1.10	126.07
IOA	0.89	0.61	0.66
case_Small			
RMSE	1.58	1.31	131.7
IOA	0.88	0.57	0.66

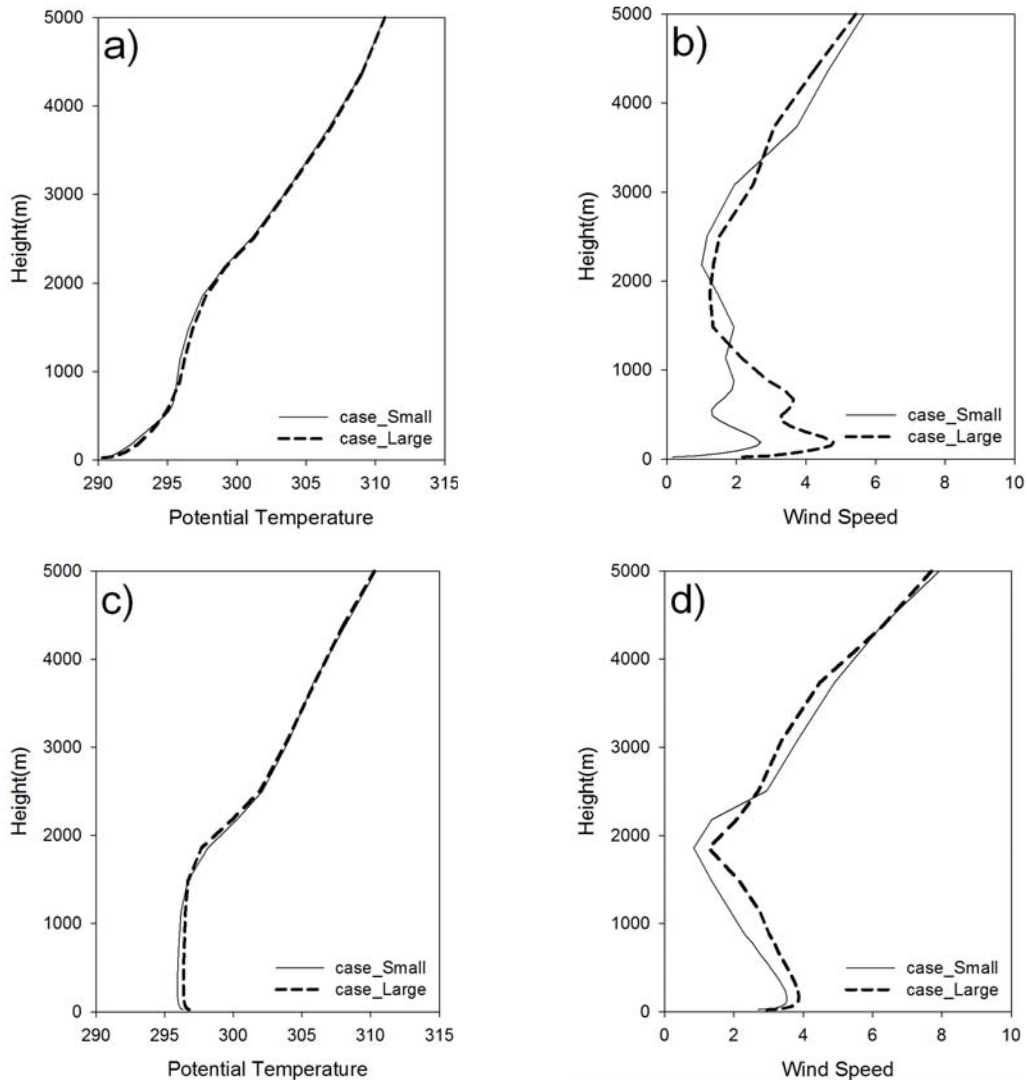


Fig. 10. Vertical profiles of averaged meteorological values. a) potential temperature and b) wind speed at 03 LST c) potential temperature, and d) wind speed at 15 LST.

계산 격자로 유입되는 경계 자료의 경우, 유입되는 저해상도 도메인의 크기를 고려해야하며, 실제 유입자료를 단순화하여 하나의 정상상태로 산출할 경우 격자를 평균하는 규모에 대한 고려가 필요하다.

4. 결론

정밀 도심 흐름장을 분석하기 위하여 전산유체역학

모형을 많이 사용한다. 이들 전산유체역학 모형 실험의 정확도는 대상 영역에 유입되는 기상장의 정확도에 관계한다. 본 연구는 정밀한 도시 기상장 예측을 위한 전산유체역학 접근법의 기초가 되는 유입 경계장의 민감도 및 특성을 기상수치해석 모형 실험을 통하여 분석하였다.

분석에 적용된 모형은 3차원 대기 역학 모형인 WRF이며, 최고 해상도 1 km의 영역을 달리하여 수치실험을

실시하였다. 수치실험 결과는 서울 시내의 28개 기상관측소 자료와 비교를 바탕으로 정량적인 분석과정을 거쳤다. 실험 및 분석 결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 종관 기상학적으로 대기가 안정한 경우 서울시는 서해에서 발달하는 해풍의 영향을 직접적으로 받기 때문에 서울시 내의 전산유체역학적 유입장은 서쪽 지역 경계 정보가 중요하다. 또한 WRF 모형 결과, 서풍 계열의 해풍을 관측치보다 강하게 모의하는 경향이 나타나며, 강해진 해풍으로 인하여 서울 지역의 기온이 실제보다 낮게 모의된다.

2) 최고 해상도 영역이 서로 다른 두 개의 사례(case_Large 와 case_Small)를 비교할 때 지형이 급격하게 변화하는 지역에서 차이가 크게 나타난다. 야간의 경우 북쪽, 남서쪽, 동쪽 산악지역에서 기온 차이가 크게 나타나며, 이에 따른 풍속의 차이도 나타난다. 그러나 주간 경우 해풍 유입에 따라 유입측과 서울시 내의 기온 차이는 감소하는 경향을 보인다.

3) 연직 단면 분석에서, case_Large의 경우 한강을 중심으로 해풍 유입이 강화되는 경향이 보이며, 풍속 역시 증가하는 경향이 나타난다. 이러한 해풍 유입에 따른 수렴성 강화는 관측자료와의 일치성이 높아지는 경향을 나타낸다.

4) 공간적으로 평균화된 연직 프로파일 분석에서 온위의 경우 사례별 차이는 크지 않으나, 풍속의 경우 연직 분포상의 차이가 크게 나타난다. 이러한 공간 해상도별 풍속의 연직 차이는 전산유체역학의 분석에도 영향을 미칠 수 있다.

기상수치해석 모형과 전산유체역학 모형의 결합은 향후 다양한 도시 대기 문제에 적용될 수 있다. 따라서 도시 규모의 수십 m 규모의 고해상도 연구에는 궁극적으로 전산유체역학에 적용되는 초기 바람정보가 중요하다. 따라서 전산유체역학에 적용되는 초기 입력 바람장의 특성을 분석하였다는 점에서 본 연구 결과가 매우 유용한 정보로 활용될 수 있다고 판단된다. 그러나 본 연구는 하나의 종관 사례에 대한 연구로 매우 제한적인 실험 조건에서 실시되었다는 한계가 있다. 향후 다양한 종관 상태에서의 연구 분석이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 화학사고 대응 환경기술개발 사업에서 지원받았습니다(No. 2015001950002).

REFERENCES

- Ahn, S. C., 2002, Blue Sky 21 - Capital region air initiative, Gyeonggy Forum, 4(4), 7-21.
- Baek, S. O., Koo, Y. S., 2008, Critical evaluation of and suggestions for a comprehensive project based on the special act on Seoul metropolitan air quality improvement, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24(1), 108-121.
- Baik, J. J., Kim, J. J., Fernando, H. J. S., 2003, A CFD model for simulating urban flow and dispersion, J. Appl. Meteorol. Clim., 42(11), 1636-1648.
- Baik, J. J., Park, S. B., Kim, J. J., 2009, Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model, J. Appl. Meteorol. Clim., 48(8), 1667-1681.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Loidan, T., Manning, K. W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F. P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A. A., Zhang, C., 2011, The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems, Int. J. Climatol., 31(2), 273-288.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikigawa, Y., Kimura, F., 2001, A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models, Bound.-Lay. Meteorol., 101(3), 329-358.
- Lee, H. W., Choi, H. J., Lee, S. H., Kim, Y. K., Jung, W. S., 2008, The impact of topography and urban building parameterization on the photochemical ozone concentration of Seoul, Korea, Atmos. Environ., 42(18), 4232-4246.
- Lee, S. H., 2011, A numerical study on the characteristics of high resolution wind resource in mountainous areas using computational fluid dynamic analysis, J. Korean Earth Sci. Soc., 32(1), 46-56.
- Miao, Y. C., Liu, S. H., Chen, B. C., Zhang, B. H., Wang, S., Li, S. Y., 2013, Simulating urban flow and

- dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model, *Adv. Atmos. Sci.*, 30(6), 1663-1678.
- Miao, Y. C., Liu, S. H., Zheng, H., Zheng, Y. J., Chen, B. C., Wang, S., 2014, A multi-scale urban atmospheric dispersion model for emergency management, *Adv. Atmos. Sci.*, 31(6), 1353-1365.
- Tewari, M., Kusaka, H., Chen, F., Corirer, W. J., Kim, S., Wyszogrobzki, A. A., Warner, T. T., 2010, Impact of coupling a microscale computational fluid dynamics model with a mesoscale model on urban scale contaminant transport and dispersion, *Atmos. Res.*, 96(4), 656-664.