

인공 도로협곡 관측 자료를 활용한 전산유체역학모델 검증

김도형* · 홍선옥 · 이대근 · 이영곤 · 김백조

국립기상과학원 응용기상연구과

(접수일: 2016년 4월 22일, 수정일: 2016년 6월 14일, 게재확정일: 2016년 8월 9일)

Verification of Computational Fluid Dynamics Model Using Observation Data in Artificial Street Canyon

Do-Hyoung Kim*, Seon-Ok Hong, Dae-Geun Lee, Young-Gon Lee, and Baek-Jo Kim

Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 22 April 2016; revised 14 June 2016; accepted 9 August 2016)

Abstract In this study, performance of a computational fluid dynamics (CFD) model is assessed from analysis on air flow pattern which is observed in the artificial street canyon. Field observations focusing on flows were conducted at an artificial street canyon in Magok region. For the observation of three-dimensional airflow structures, twelve three-dimensional wind anemometers (hereafter, CSAT3) were installed inside the street canyon. The street canyon was composed of two rectangular buildings with 35-m length, 4-m width, and 7-m height. The street width (distance between the buildings) is 7 m, making the street aspect ratio (defined by the ratio of building height to street width) of 1. For the observation of above-building wind, a CSAT3 was installed above the northwest-side building. Southwesterly, westerly and northwesterly were dominant in the street canyon during the observations. Because wind direction is parallel to the street canyon in the southwesterly case, westerly and northwesterly were selected as inflow directions in numerical simulations using a computational fluid dynamics model developed through the collaborative research project between National Institute of Meteorological Sciences and Seoul National University (CFD_NIMR_SNU). The observations showed that a well-structured vortex flow (skimming flow) and an evidence of a small eddy at the corner of the downwind building and ground appeared. The CFD_NIMR_SNU reproduced both the observed flow patterns reasonably well, although wind speeds inside the street canyon were underestimated.

Key words: Computational Fluid Dynamics (CFD) Model, Street Canyon, Three Dimensional Wind Anemometer (CSAT3)

1. 서 론

도시지역의 환경에 대한 관심이 더욱 높아지면서

쾌적하고 안전한 도시 대기환경 조성을 위한 도시기상 정보에 대한 요구가 커지고 있다. 그러나 복잡한 도시 지역의 건물과 지표 구조물들은 대기의 흐름에 중요한 외력으로 작용하여 다양한 크기의 난류를 발생시키고 복잡한 흐름패턴을 유발시킨다(Kim and Baik, 2005a; Lee and Kim, 2011).

도시 지역의 흐름에 관한 연구는 야외에서의 관측 실험, 풍동 및 수조실험, 수치 실험 등을 통해서 수행되어 왔다. 야외 관측실험은 풍동이나 수조 실험과 비

*Corresponding Author: Do-Hyoung Kim, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration 33, Seohobuk-ro, Seogwipo, Jeju 63568, Korea
Phone: ☎ 개인정보 표시제한 Fax: +82-64-738-6515
E-mail: kdhsomc@korea.kr

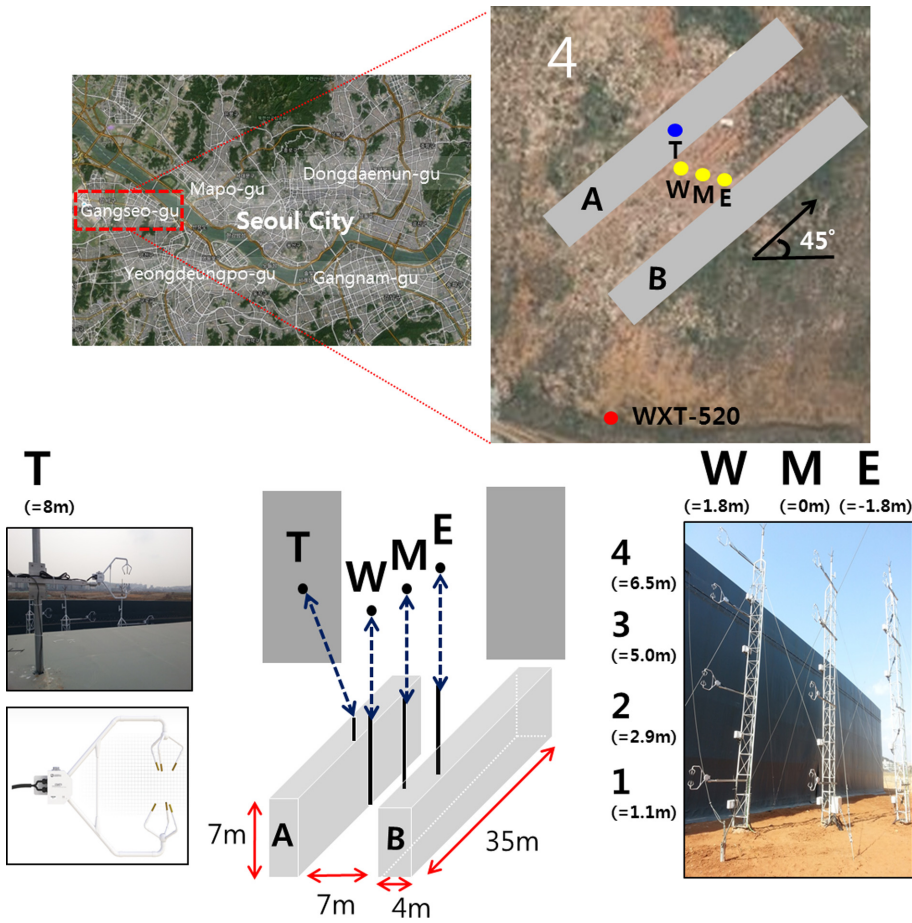


Fig. 1. Schematic explanation of the field experiments for measuring the wind flow around the artificial street canyon at the Magok redevelopment area in the western part of Seoul from April to August 2013. Three 10 m towers (yellow points) attached with four 3-D sonic anemometers (CSAT3, campbell scientific corp. USA) in each four measurement heights (1.1 m, 2.9 m, 5.0 m, and 6.5 m). An additional anemometer (T, blue point) installed on the top of the left building (at the 8 m height) to observe characteristics of main air flows. WXT-520 also installed independently near the artificial street canyon (red point). For selection of main flow and cases adapted to the CFD simulation.

교하였을 때, 상사 이론 등을 사용하지 않고 실제의 대기 흐름과 기온, 습도 등 관련된 다양한 기상 요소들을 직접 분석할 수 있다는 장점이 있다(DePaul and Sheih, 1985; Nakamura and Oke, 1988). Rotach (1995)와 Eliasson et al. (2006)은 스웨덴 예테보리 도시 안의 도로협곡에서 풍향·풍속계를 설치하여 도시 거칠기 하부층에서 생성되는 난류 흐름을 분석하였다. Idczak et al. (2007)은 프랑스 파리 인근에서 4개의 컨테이너로 인공 도로협곡을 설치하여 협곡 내에 생성되는 흐름, 벽면 온도, 리차드슨 수(Ri) 등을 분석하였다. 풍동 및 수조실험 연구는 실제 야외관측에 비해 적은 비용으로 실험을 수행할 수 있다는 장점이 있다(Baik et al., 2000; Uehara et al., 2000; Kim and

Baik, 2005b; Meroney et al., 1996; Liu et al., 2003). Brown et al. (2000)은 건물 군집 모형을 설치하여 2차원 도로협곡의 평균 흐름과 난류 측정에 관한 풍동 실험을 진행하였다. 앞서 기술한 바와 같이 야외 관측실험이나 풍동 및 수조실험 연구는 시간과 공간적 제약, 고비용 문제 등 현실적인 어려움이 존재한다. 이에 반해, 수치실험 연구는 경제적인 장점과 더불어 2000년대 이후 컴퓨터 성능의 급격한 발전에 따라 더욱 활성화되는 추세에 있다(Neophytou and Britter, 2005). 이와 같이 수치실험 연구에서 대표적인 모델은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 모델이며, 도시 지역과 같이 복잡한 구조물의 주변 또는 도로협곡(street canyon)의 기류 및 난류의

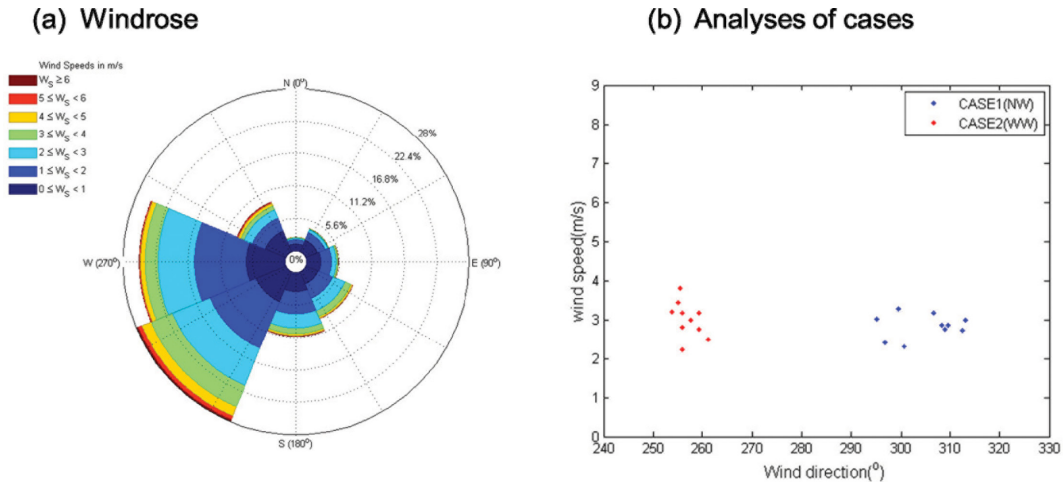


Fig. 2. Characteristics of the wind direction and speed observed from the WXT-520 sensor: (a) the windrose during the experimental period and, (b) the cross distribution between the wind speeds and the wind direction extracted for CASE1 (blue asterisks) and CASE2 (red asterisks).

연구에 활발하게 이용되어 왔다(Sini et al., 1996; Liu and Barth, 2002; Cheng and Hu, 2005).

국내에서도 도시 지역 또는 도시 건물 사이에서 형성되는 도로협곡에 대한 바람 또는 기류분석에 대한 연구가 CFD 모델을 이용하여 매우 활발하게 진행되어 왔다(Baik and Kim, 1999; Baik et al., 2003; Kim and Baik, 2005; Park and Baik, 2007; Kim et al., 2015). 도로협곡에서의 CFD 모델의 검증은 풍동 실험결과를 기반으로 수행되었고, 흐름과 소용돌이를 잘 재연하였다(Kim and Baik, 2004; Kim, 2007). 하지만 실제 도로협곡에서의 야외관측과 CFD 모델의 비교·검증에 대한 국내 연구가 부족한 실정이다. 따라서 실제 대기에서 유입되는 기류의 풍향과 풍속에 의한 도로협곡에서의 흐름 관측과 수치모의에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 실제 건물모형을 설치하여 인공 도로협곡을 구성하였고 3차원 초음파 풍향풍속계를 도로협곡 안에 설치함으로써 협곡 내에 흐름을 상세 관측하였다. 또한 국립기상과학원과 서울대학교가 공동 개발한 CFD_NIMR_SNU 모델을 수행하여 동일한 도로협곡 조건에 대해 기류를 모의하고 결과를 관측 자료와 비교·검증하였다. 이를 통해 도시 내 건물로 인해 발생하는 복잡한 대기 흐름에 대한 분석결과를 제시하였다. 2장에서는 인공 도로협곡에서 실시된 관측 실험과 선정사례에 대한 설명을 제시하고, 3장에서는 CFD_NIMR_SNU 모델을 이용한 수치 실험의 개요와 설계, 4장에는 관측과 수치모의의 결과에 대한 비교·분석결과를 제시하였으며, 마지막 5장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

2. 관측 실험

2.1 관측 개요

관측실험은 2013년 4월 12일부터 7월 11일까지 약 3개월 동안 수행되었다. 본 관측에서는 자동차, 신호등, 가로수 등 주변 지면의 방해요소 영향을 배제하기 위하여 서울 강서구 마곡 재개발 지구의 개활지에 인공 구조물(35 m × 4 m × 7 m) A와 B를 설치하여 인공 도로협곡을 구성하였다(Fig. 1). 건물 모형은 남서에서 북동 방향으로 45° 방향으로 기울어져 있고, 도로폭(건물 사이의 거리)과 건물 높이의 비인 외관비(aspect ratio)는 1이다. 인공 도로협곡 중앙지점(Middle, M)을 기준으로 서쪽(West, W)과 동쪽(East, E)으로 각각 1.8 m 떨어진 지점에 10 m 타워를 설치하고(노란 점), 각 타워의 1.1 m, 2.9 m, 5 m, 6.5 m 높이에 총 12대의 3차원풍향풍속계(CSAT3)를 부착하였다. 인공 도로협곡 상층 기류 관측을 위해 A 건물 옥상(Top, T)에 CSAT3 1대를 별도로 설치하였다. CSAT3는 3차원 바람성분을 10 Hz로 관측하는데, 본 연구에서는 1분 평균값을 분석하였다. 또한 CFD_NIMR_SNU 모델의 주풍 및 풍향별 사례 선정을 위해 인공 구조물과 약 15 m 떨어진 지점에 기상 복합 센서(Vaisala, WXT-520)를 설치하였다(붉은 점).

2.2 사례선정

사례 선정과 CFD_NIMR_SNU 모델의 주 풍향 선정을 위하여, WXT-520 관측 풍향과 풍속 분석을 선행하였다. 전체 기간 동안 WXT-520에서 관측한 바람 장미를 조사하였다(Fig. 2a). 분석 결과, 남서풍(28.0%),

Table 1. Case by experiment wind direction and wind speed observed by the WXT-520 anemometer.

Experiments	Wind direction (deg.)	Wind speed (m s ⁻¹)
CASE1 (2013.06.07)	17:34	296.8
	17:35	295.2
	17:36	299.4
	17:37	309.7
	17:38	308.9
	17:39	306.8
	17:40	312.6
	17:41	313.1
	17:42	308.4
	17:43	300.8
CASE2 (2013.07.02)	22:15	252.7
	22:16	254.9
	22:17	263.5
	22:18	257.4
	22:19	258.9
	22:20	262.1
	22:21	255.6
	22:22	252.2
	22:23	259.4
	22:24	263.6

서풍(25.1%), 북서풍(9.2%) 순서로 빈도가 높게 나타났다. 남서풍일 경우, 바람이 도로 협곡과 평행하게 불게 되면서 가장 전형적인 도로 협곡 흐름 패턴이 나타나지 않는다. 따라서, 본 연구에서 남서풍 사례는 제외하였다.

북서풍과 서풍의 경우 중에서 CSAT3과 WXT-520에서 관측된 자료가 모두 존재하고 2 m s⁻¹ 이상의 풍속으로 풍향이 10분 이상 유지되는 사례를 CASE1(북서풍)과 CASE2(서풍)로 선정하였다(Fig. 2b). 2013년 6월 7일 17시 34분부터 17시 43분까지의 시간을 CASE1으로, 2013년 7월 2일 22시 15분부터 22시 24분까지의 시간을 CASE2의 대상시간으로 선정하였다. Table 1은 CASE1과 CASE2의 기간 동안 WXT-520이 관측한 풍향과 풍속을 나타낸다.

3. 수치모델 실험

3.1 수치모델 개요

복잡한 도시 지역의 상세기류 분석하기 위해 일반적으로 레이놀즈 평균 방정식을 수치적으로 해석하는 RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) 모델과 큰 규모의 Eddy만을 직접 모의하는 LES (Large Eddy Simulation) 모델, 그리고 모든 종류의 Eddy들을 모의하는 DNS (Direct Numerical Simulation) 모델 등 세

종류의 CFD 모델이 주로 활용된다(Li et al., 2006). DNS는 존재하는 가장 작은 크기의 난류를 직접 분해할 수 있고, LES 모델은 간헐적 난류 흐름을 분해할 수 있다. 그러나 이를 위해서는 매우 작은 크기의 격자가 요구되기 때문에 매우 긴 계산 시간을 필요로 한다(Cheng et al., 2003; Yakhot et al., 2006). RANS 모델은 난류 종결 방법을 이용하여 아격자 규모의 난류 효과를 모수화하기 방법을 사용하기 때문에, 비교적 큰 격자 크기를 사용할 수 있는 장점이 있다(Milliez and Carissimo, 2007; Santiago et al., 2007).

본 연구에서는 RANS 방정식계에 기반하여 국립기상과학원과 서울대학교가 공동으로 개발한 CFD_NIMR_SNU 모델을 이용하였다. 인공 도로협곡 주변에서 발생하는 미규모 대기흐름에 대한 수치모의를 수행하고, 그 결과를 관측 값과 비교·분석하였다. CFD_NIMR_SNU 모델은 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 흐름을 가정하며, Yakhot et al. (1992)이 제시한 RNG k-ε 난류 모델을 사용한다. RNG k-ε 난류 모델의 정확도는 Kim and Baik (2004)의 연구에서 Brown (2000)의 풍동 자료를 활용하여 검증된바 있으며 장애물 풍상층의 소용돌이, 지붕 위의 재순환 영역, 도로협곡 소용돌이 등을 잘 모의하였다. 자세한 수치모델에 대한 설명은 Kim and Baik (2004)에 제시되어 있다.

3.2 수치실험 설계

CFD_NIMR_SNU 모델을 이용하여 마곡 지역의 인공 도로협곡 평균 흐름에 대한 수치실험을 수행하였다. 수치실험에 고려한 도로협곡은 2장에서 제시한 관측 실험의 인공 도로협곡과 동일하다. CSAT3 (T in Fig. 1)이 설치된 건물이 A이고, 마주 보는 건물이 B이다. 건물로부터 경계까지의 거리가 건물 높이의 최소 5배 이상이 되도록 120 m × 105 m × 42 m 크기의 계산 영역을 설정하였다(Fig. 3). x, y, z 방향의 크기는 모두 0.5 m이고, 각 방향의 격자 개수는 240, 210, 84개이다. 0.1초의 시간 간격으로 3600초까지 수치 적분하였다. 모델 유입 경계에서 바람(U_{in} , V_{in} , W_{in}), 난류 운동 에너지(k_m) 그리고 난류운동 에너지의 소멸률(ϵ_m)의 연직 분포를 다음과 같이 설정하였다.

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

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

$$W_{in}(z) = 0, \quad (3)$$

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

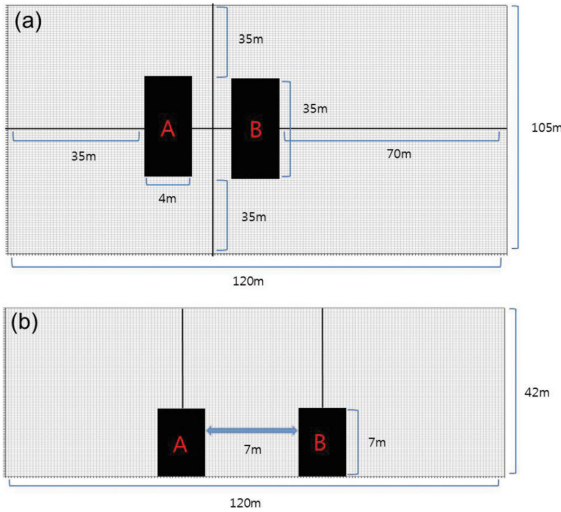


Fig. 3. Concepts of horizontal and vertical model domain.

$$\epsilon_{in}(z) = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{in}^{3/2}}{\kappa z} \tag{5}$$

여기서 θ , U_s , z_0 , δ , κ 는 각각 주변 풍향, 마찰속도, 거칠기 길이(0.05 m), 경계층 두께(1000 m), von Karman 상수(0.4)이다. Table 1에서 보인 각 CASE별 1분 간격의 바람 관측 자료를 이용하여, 유입 경계의 풍향과 풍속을 계산하였다. 또한 지배 방정식계는 엇갈림 격자계에서 유한 체적법(finite volume method)과 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 사용하여 수치적으로 풀이한다.

Table 1에서 제시한 10분간의 풍향과 풍속의 분포가 크지 않지만 모델 유입 경계에서 풍향과 풍속의 변동에 따라 길이가 긴 도로협곡 안에 흐름의 변화가 크다고 예상된다. 따라서 관측 및 수치모의 결과를 직접적으로 비교하여 협곡 안에서의 흐름의 모의정확도를 조사하기 위해 각각 1분에 대한 수치모의 결과와 인공 도로협곡 안에서 관측된 1분 간격의 풍향 및 풍속을 비교 검증하였다.

4. 결 과

4.1 CASE1

CFD_NIMR_SNU 모델의 정확도를 통계적으로 분석하기 위해서 CSAT3 관측자료를 이용하여 수치 모의한 풍향과 풍속의 RMSE (Root Mean Square Error)를 계산하였다(Table 2). 풍향의 RMSE가 가장 작은 지점은 W4 지점(12.89°)이고, 가장 큰 지점은 E1 지점(132.73°)이다. 수치 모델이 풍하측 보다는 풍상측의 풍향을 더 잘 모의 하였다. 풍향과 반대로 풍속의 RMSE가 가장 큰 곳은 W 타워로 1 m s⁻¹에 가까운 오차가 나타났다. 관측 지점 중 RMSE가 가장 작은 지점은 M3 지점에서 0.23 m s⁻¹으로 나타났다. E3 지점에서 1.24 m s⁻¹로 오차가 가장 크게 나타났다.

Figure 4는 2013년 6월 7일 17시 38분과 42분에 인공 도로협곡에서 수치 모의한 풍향 · 풍속을 관측 자료와 비교한 것이다. 풍향의 정확도는 수치 모의 풍향(θ_{CFD})과 관측 풍향(θ_{obs}) 차의 절대 값($|\theta_{CFD} - \theta_{obs}|$)으로 정의하였고, 풍속의 정확도는 수치모의 풍속과 관측 풍속의 비(V_{CFD}/V_{obs})로 정의하였다. CFD_NIMR_SNU 모델은 각 지점별 관측 풍향을 정확하게 재현하

Table 2. To statistically analyze the accuracy of the model, the RMSE was computed for wind direction and wind speed of CSAT3 observation data and CFD_NIMR_SNU model for 10 minutes period by CASE1 experiments.

CASE1 experiments		RMSE (Root Mean Square Error)	
		Wind direction (deg.)	Wind speed (m s ⁻¹)
(W) Tower	W4 (6.5 m)	12.89	1.13
	W3 (5.0 m)	26.90	1.24
	W2 (2.9 m)	33.47	1.06
	W1 (1.1 m)	23.67	0.95
(M) Tower	M4 (6.5 m)	51.93	0.44
	M3 (5.0 m)	29.85	0.23
	M2 (2.9 m)	33.30	0.74
	M1 (1.1 m)	61.94	0.69
(E) Tower	E4 (6.5 m)	87.16	0.42
	E3 (5.0 m)	32.66	0.49
	E2 (2.9 m)	81.81	0.77
	E1 (1.1 m)	132.73	0.90

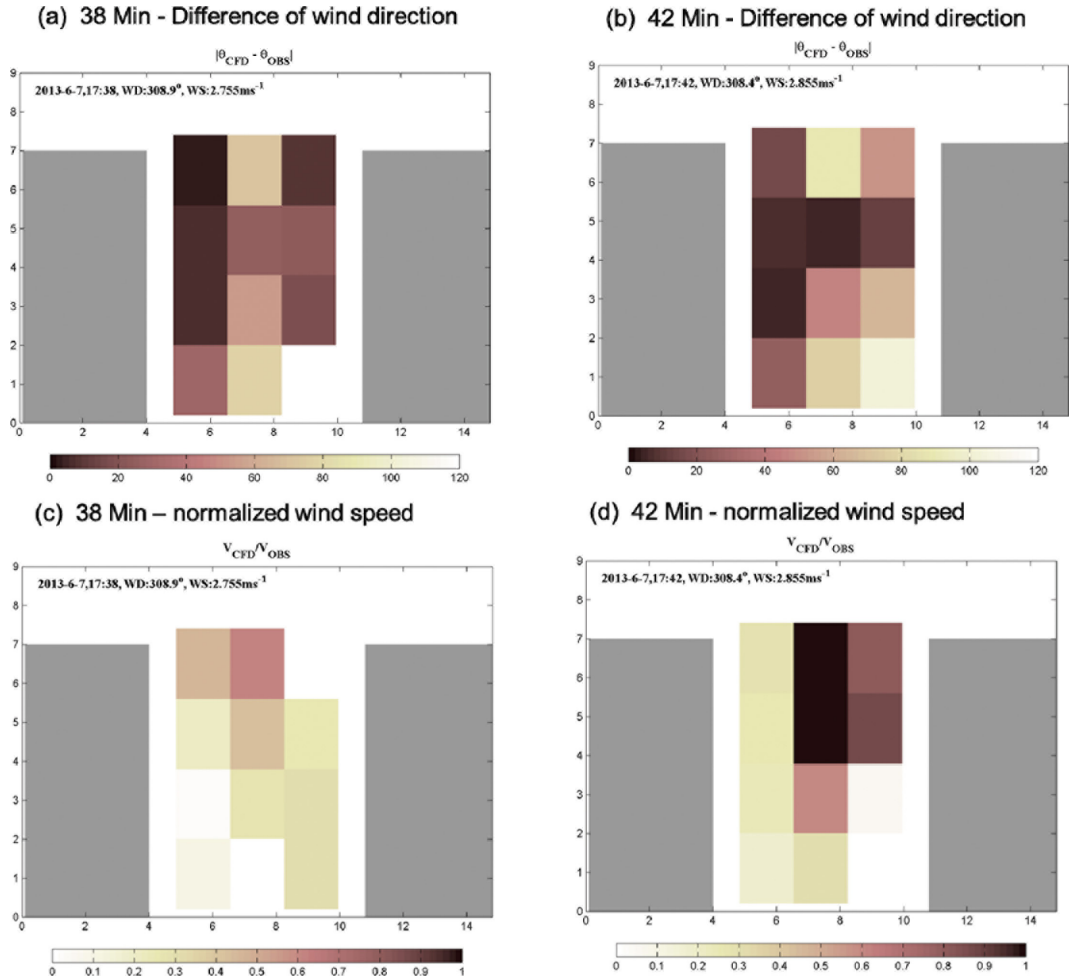


Fig. 4. In Difference of wind direction from CSAT3 observation and CFD_NIMR_SNU model at 2013.06.07 (a) 17:38 and (b) 17:42. Normalized wind speed of CSAT3 observation and CFD_NIMR_SNU model at 2013.06.07 (c) 17:38 and (d) 17:42.

지 못했지만, 인공 도로협곡 내의 패턴은 비교적 잘 재현하였다. W4와 E3 지점의 풍향 차는 20 이하로 비교적 잘 재현하였다(Figs. 4a, b). 하지만 38분과 42분 모두 E1 지점에서는 모의 정확도가 낮은 것을 확인하였다. 풍속 비(V_{CFD}/V_{obs})는 모든 지점에서 1 이하로 나타났다. 38분에서 풍속비의 경우, W4와 M4을 제외한 지점에서는 0.2~0.4으로 수치모의 풍속결과가 과소 모의하는 것을 볼 수 있다(Fig. 4c). 42분에서 풍속비의 경우, M3과 M4에서 1에 가까운 풍속 정확도가 높게 나타났고 W 타워에서 약 0.25가 나타나고 E2와 E1 지점에서는 관측과 수치모의의 풍속이 많은 차이를 보이며 모의 정확도가 낮은 것을 확인하였다(Fig. 4d).

Figure 5는 2013년 6월 7일 17시 34분에 관측과 수치 모의한 바람벡터 및 풍속 분포를 나타낸다. Kim

(2007)의 연구에서 제시한 Brown et al. (2000)의 풍동실험과 Kim and Baik (2004)의 수치 실험 결과와 비교한 바람 벡터장과 같이 정확한 풍향을 모의하지 못하였으나, 풍향 패턴은 유사하게 나타났다. 또한 도로협곡 내 풍속의 경우에도 풍동 실험보다 전체적으로 풍속이 약하게 수치모의 되었고, 다소 풍속의 차이가 크지만 야외 실험과 비교한 본 연구에서도 인공 도로협곡 내의 풍속은 과소 모의 된 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5a). 그러나 CFD_NIMR_SNU 모델은 T 지점의 풍속을 과대 모의함을 볼 수 있다. 34분뿐만 아니라 CASE1 전체시간 동안 T 지점에서 관측된 풍속은 약하게 나타났다. CFD_NIMR_SNU 모델의 벡터장에서 T 지점은 A 건물 지붕 위로 넘어가는 흐름을 생성되고 인공 도로협곡 내에서는 E4를 중심으로 시계 방향의 소용돌이가 형성되었다. 또한 위에서 나

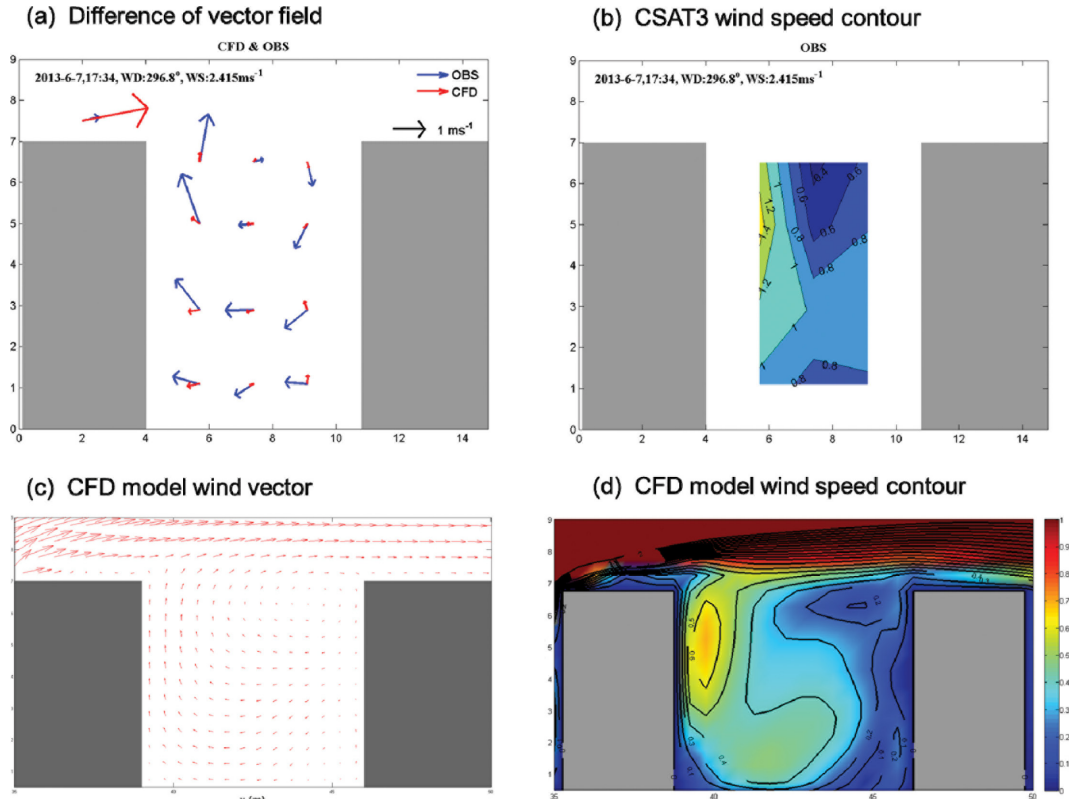


Fig. 5. Model output and observation data of (a) wind vectors, (b) windspeed contour of CSAT3, (c) wind vector of CFD_NIMR_SNU model, (d) wind speed contour of CFD_NIMR_SNU model by CASE1.

타난 소용돌이의 반대 방향의 작은 소용돌이가 E1에서 형성되었다(Fig. 5c). 도로협곡의 너비가 높이에 비해 충분히 좁을 때 나타나는 흐름으로 wake의 형태가 아닌, 협곡에 꼭 차인 소용돌이 형태로 나타나는 흐름을 *skimming flow*라고 정의한다. 수치모의 결과에서도 E4 중심의 소용돌이가 형성되고 A 건물 풍상측 흐름이 B 건물로 넘어가는 흐름이 나타나는 *skimming flow*를 확인하였다. 관측 결과에서는 W3 지점의 풍속이 강하고 E4 지점의 풍속이 약하게 나타났다(Fig. 5b). 수치 모의된 결과에서는 전반적으로 관측 풍속의 50% 정도의 풍속이 나타나고 있지만, 관측 결과와 유사한 풍속 분포 패턴이 나타났다(Fig. 5d). 특히, 풍상측 건물 부근에 나타난 강한 풍속을 잘 모의함을 확인할 수 있다.

4.2 CASE2

인공 도로협곡에 대각으로 부는 바람에 대한 협곡 내 흐름 분석을 위해 CSAT3와 수치모의 풍향과 풍속의 RMSE를 계산하였다(Table 3). CASE1에서 제시된 방법과 같은 관측과 수치모의 결과 값을 이용하여

RMSE를 계산하였다. 풍향의 경우, 전반적으로 CASE1보다 CASE2의 풍향 모의 정확도가 높은 것으로 나타났다. W2와 W1, M4와 M1 지점에서는 RMSE가 12~16°으로 높은 정확도를 보였다. 특히, M2 지점에서 9.87°로 가장 높은 정확도를 나타내었다. E1 지점은 RMSE가 65.53°으로 CASE1에서와 같이 가장 오차가 크게 나타나고, W3과 M3 지점에서는 RMSE가 각각 53.89°와 60.15°으로 큰 오차가 나타났다. 풍속의 경우, W4와 M4 지점에서 RMSE가 1 m s⁻¹ 이상, E4 지점에서 0.84 m s⁻¹으로 타워 6.5 m 고도에서 관측과 수치모의 결과 차이가 크게 나타났다. 풍속 모의 정확도가 높은 지점은 M1과 W1이며, RMSE가 각각 0.15 m s⁻¹, 0.27 m s⁻¹로 나타났다.

Figure 6는 2013년 7월 2일 16분과 21분에 인공 도로협곡에서 수치 모의한 풍향과 관측 풍향의 차의 절대 값($|\theta_{CFD} - \theta_{obs}|$), 풍속의 비(V_{CFD}/V_{obs})를 비교한 것이다. 전체적으로 각 지점별 관측 풍향을 정확하게 재현 하였다. W1과 W2, M1과 M2 지점에서 풍향의 모의 정확도가 높게 나타났고, 이것은 위의 풍향 RMSE 분석 결과와 일치하는 것을 확인 하였다(Figs. 6a, b).

Table 3. The same as Table 2 except for the CASE2 experiments.

CASE2 experiments		RMSE (Root Mean Square Error)	
		Wind direction (deg)	Wind speed (m s^{-1})
(W) Tower	W4 (6.5 m)	24.89	1.60
	W3 (5.0 m)	60.15	0.40
	W2 (2.9 m)	12.63	0.78
	W1 (1.1 m)	16.57	0.27
(M) Tower	M4 (6.5 m)	13.37	1.53
	M3 (5.0 m)	53.89	0.96
	M2 (2.9 m)	9.87	0.65
	M1 (1.1 m)	14.15	0.15
(E) Tower	E4 (6.5 m)	31.10	0.84
	E3 (5.0 m)	24.15	0.65
	E2 (2.9 m)	35.32	0.70
	E1 (1.1 m)	65.53	0.32

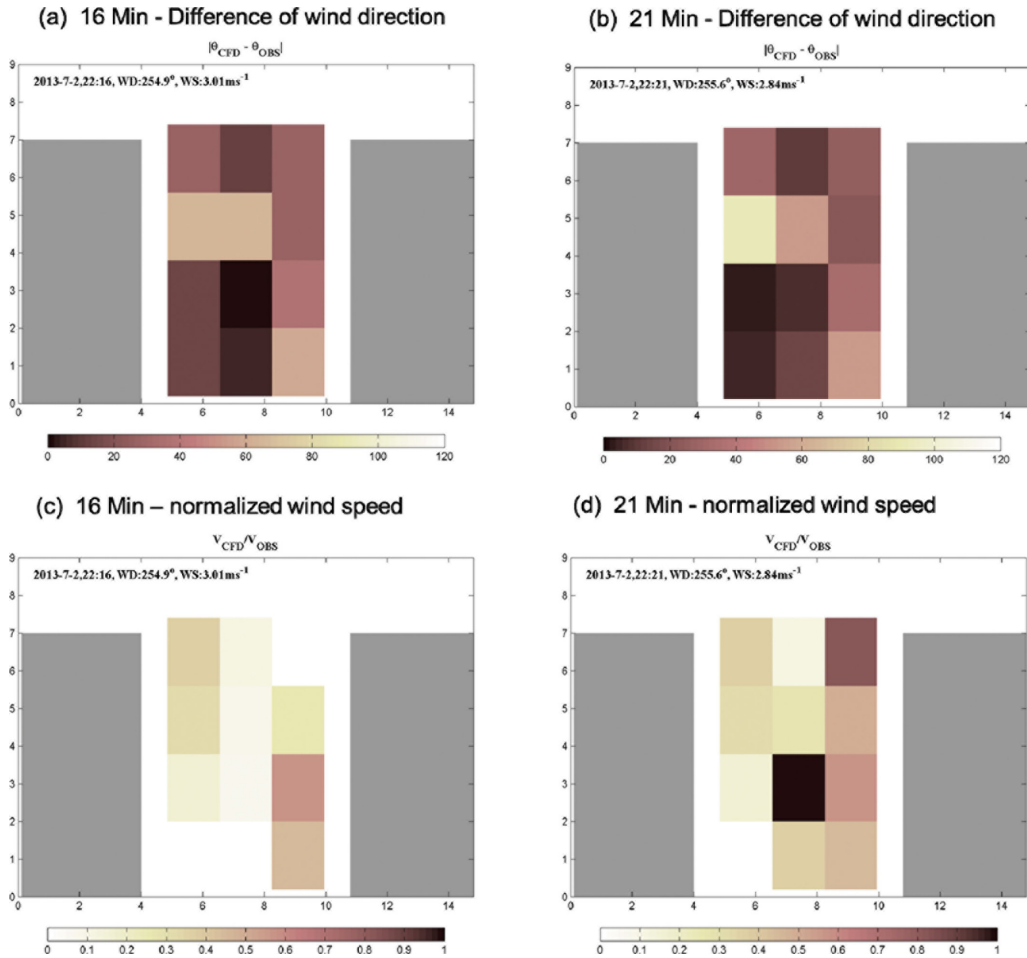


Fig. 6. In Difference of wind direction from CSAT3 observation and CFD_NIMR_SNU model at 2013.07.02. (a) 22:16 and (b) 22:21. Normalized wind speed of CSAT3 observation and CFD_NIMR_SNU model at 2013.07.02 (c) 22:16 and (d) 22:21.

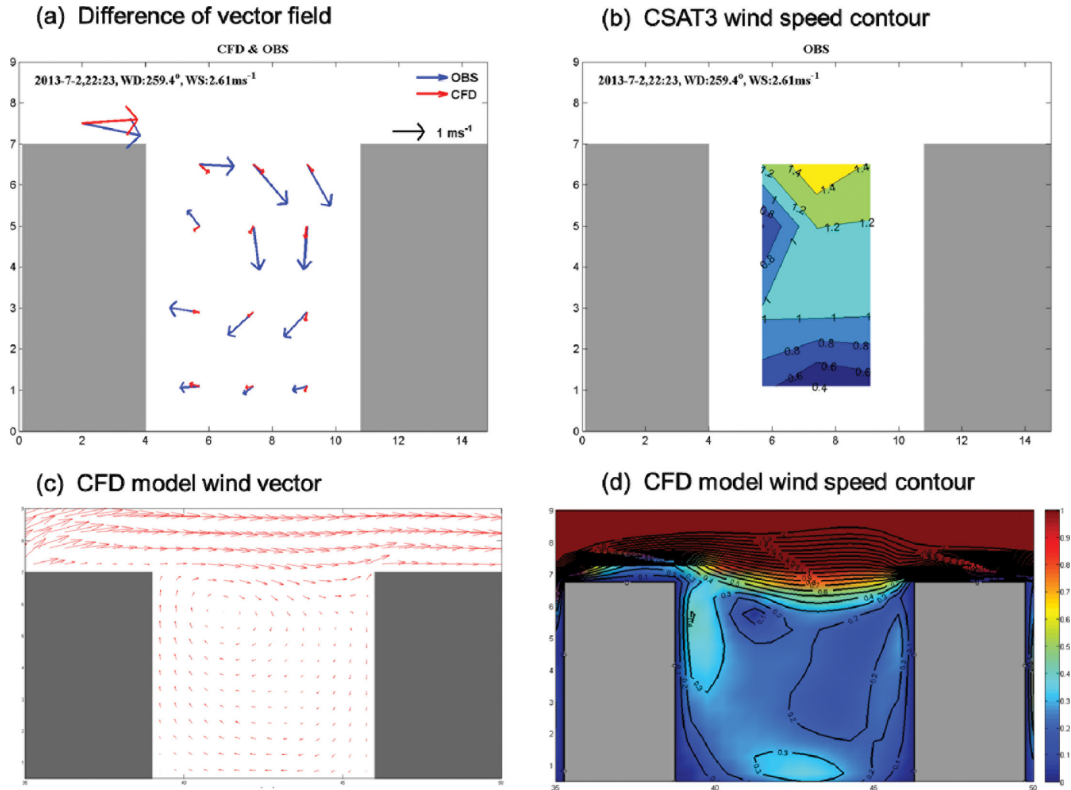


Fig. 7. The same as Fig. 5 except for the CASE2.

풍속은 CASE1 결과와 마찬가지로 CFD_NIMR_SNU 모델이 과소 모의하는 경향을 나타내었다. 16분의 경우, M2에서 풍향은 일치하지만 풍속에서 차이가 크게 나타났지만(Fig. 6c). 하지만 21분의 경우, M2에서 $|\theta_{CFD} - \theta_{obs}|$ 는 약 10, V_{CFD}/V_{obs} 는 1에 가깝게 풍향과 풍속 모두 정확도가 높게 나타났지만(Fig. 6d).

Figure 7은 2013년 7월 2일 23분에 관측과 수치 모의한 바람 벡터와 풍속 분포를 나타낸다. 풍향의 경우에는 CFD_NIMR_SNU 모델이 상당히 잘 재연하고 있는 것을 볼 수 있고, 인공 도로협곡에서 풍속은 CFD_NIMR_SNU 모델이 과소모의하고 있다. CASE1에서 T 지점은 관측 풍속이 약하게 나타났지만, CASE2에서는 약간의 풍향의 차이가 나타났지만 풍속은 잘 모의하는 것을 볼 수 있다(Fig. 7a). 수치모의의 벡터장에서 CASE1에서는 협곡 내 E4를 중심으로 소용돌이가 생성되었지만, CASE2의 경우에는 W4를 중심으로 소용돌이가 생성되었다. 이는 유입류의 방향에 따라 소용돌이가 위치가 변화된다는 것을 보여준다(Fig. 7c). 관측 풍속 분포를 살펴보면, 풍하 측 건물로 유입되는 기류로 인해 협곡 내로 고도 1.1 m 지점들과 W3 지점을 제외하고 1 m s⁻¹ 이상으로 풍속이 나타났

(Fig. 7b). 하지만 수치모의의 풍속에서는 풍상 측 건물에서 흐름이 풍하 측 건물로 넘어가는 흐름으로 인해 협곡 내 유입되는 기류가 약하게 나타났고, 전체적으로 낮은 풍속이 모의 되었다(Fig. 7d).

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 인공 도로협곡에서 수행한 관측을 통해서 도로협곡 상세 패턴을 분석하였고, 이를 이용하여 전산유체역학 모델의 성능을 검증하였다. 상세한 흐름 분석을 위하여 도로협곡 내에 12대의 3차원 풍향풍속계를 설치하고, 건물 지붕에 1대의 3차원 풍향풍속계를 설치하여 약 3개월 동안 관측을 실시하였다. 또한 CFD_NIMR_SNU 모델의 주풍 및 풍향별 사례 분석을 위해 인공 도로협곡 근처에 복합 센서(WXT-520)를 설치하였다. 인공 도로협곡에서 15 m 떨어진 지점에서 관측한 자료를 이용하여 수치 모델 유입 경계의 조건을 결정하였다. 인공 도로협곡에 바람이 직각으로 불어오는 북서풍 사례와 대각 방향으로 불어오는 서풍 사례를 전산 유체역학 모델 검증 사례로 선정하였다. 모델의 유입 경계조건은 각 사례의 WXT-

520 풍향 · 풍속 자료를 사용하였다.

CFD_NIMR_SNU 모델의 모의결과, 풍향의 경우에 정확한 풍향을 모의하지는 못하였으나 협곡 내의 풍향 패턴은 잘 모의함을 확인하였다. 풍속의 경우에는 수치모의 결과가 관측보다 과소 모의 하는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실내 풍동실험 결과와 일치한다. 건물의 외관비가 1인 인공 도로 협곡에서 Skimming flow 패턴이 수치모의에서 나타나게 되며, 이 패턴은 유입경계조건에 사례에 따라 소용돌이의 위치와 크기가 변화한다. 수치모의 결과에서도 북서풍과 서풍 사례의 Skimming flow 패턴이 상이하게 나타나는 것을 확인하였다. 그러나 인공 도로협곡 구조물에 의해 생성되는 흐름 수치모의가 실제 관측 데이터와 차이를 보였으며, 그 이유는 모델 성능의 한계, 유입되는 각종 크기의 난류 효과를 고려하지 못하고 배경장 정보가 정확하지 않기 때문이다.

본 연구에서는 도로협곡에서 상세하게 야외 관측한 첫 번째 연구로써, 건물의 크기와 구조에 의해 생성되는 흐름 분석과 CFD_NIMR_SNU 모델과의 비교 · 검증을 위한 기초 결과를 제시하였다. 향후 도시 지역의 미규모 기상 현상에 대한 이해를 위해서는 건물 주변의 대기 흐름에 영향을 미칠 수 있는 추가 요인들에 대한 관측과 수치모델링을 통한 연구가 중요하다. 따라서 기하학적 요인뿐만 아니라, 열적 요인, 인위적 요인 등을 고려함으로써 보다 개선된 도시기상 및 국지기상에 대한 예측과 분석에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 “차세대 도시 농림 융합 스마트 기상서비스 개발” 의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baik, J.-J., and J.-J. Kim, 1999: A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. *J. Appl. Meteor.*, **38**, 1576-1589.
- _____, J.-J. Kim, and H. J. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1636-1648.
- _____, R. S. Park, H. Y. Chun, and J. J. Kim, 2000: A laboratory model of urban street-canyon flows. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 1592-1600.
- Brown, M. J., R. E. Lawson Jr., D. S. DeCroix, and R. L. Lee, 2000: Mean flow and turbulence measurements around a 2-D array of buildings in a wind tunnel. *11th Joint Conf. on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA*, Long Beach, CA, 35-40.
- Cheng, X., and F. Hu, 2005: Numerical studies on flow fields around buildings in an urban street canyon and cross-road. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 290-299.
- Cheng, Y., F. S. Lien, E. Yee, and R. Sinclair, 2003: A comparison of large eddy simulations with a standard $k-\epsilon$ Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **91**, 1301-1328.
- DePaul, F. T., and C. M. Sheih, 1985: A tracer study of dispersion in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **19**, 555-559.
- Eliasson I., B. Offerle, C. S. B. Grimmond, and S. Lindqvist, 2006: Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **40**, 1-16.
- Idzak, M., P. mestayer, J. M. Rosant, J. F. Sini, and M. V. Violleau, 2007: Micrometeorological measurement in a street canyon during, the joint ATREUS_PICADA experiment. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **124**, 25-41.
- Kim, J. J., 2007: The effects of obstacle aspect ratio on surrounding flow. *Atmosphere*, **17**, 381-391 (in Korean with English abstract).
- Kim, J. J., and J. J. Baik, 2004: A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k-\epsilon$ turbulence model. *Atmos. Environ.*, **40**, 5640-5658.
- _____, and _____, 2005a: An investigation of flow and scalar dispersion in an urban area using a CFD model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 821-837.
- _____, and _____, 2005b: Physical experiments to investigate the effects of street bottom heating and inflow turbulence on urban street-canyon flow. *Adv. Atmos. Sci.*, **22**, 230-237.
- 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).
- Neophytou, M. K., and R. E. Britter, 2005: Modeling the wind flow in complex urban topographies: A computational-fluid dynamics simulation of the central London area. *Proc. 5th GRACM International Congress on Computational Mechanics Limassol*, Cyprus, 29.
- Li, X. X., C. H. Liu, D. Y. C. Leung, and K. M. Lam, 2009: Recent progress in CFD modeling of wind field and pollutant transport in street canyons. *Atmos. Environ.*, **40**, 5640-5658.
- Liu, C.-H., and M. C. Barth, 2002: Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street can-

- yon. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 660-673.
- Liu, H. Z., B. Liang, F. R. Zhu, B. Y. Zhang, and J. G. Sang, 2003: A laboratory model for the flow in urban street canyons induced by bottom heating. *Adv. Atmos. Sci.*, **20**, 554-564.
- Meroney, R. N., M. Pavageau, S. Rafailidis, and M. Schatzmann, 1996: Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyon. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **62**, 37-56.
- Milliez, M., and B. Carissimo, 2007: Numerical simulations of pollutant dispersion in an idealized urban area, for different meteorological conditions. *Bound.-Lay. Meteorol.*, **122**, 321-342.
- Nakamura, Y., and T. R. Oke, 1988: Wind, temperature, and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, **22**, 2691-2700.
- Park, S.-J., and J.-J. Baik, 2005: An investigation of flow and pollutant dispersion in three-dimensional asymmetric street canyons using a CFD model. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **23**, 214-224.
- Patankar, S. V., 1980: *Numerical Heat Transfer and Fluid flow*. McGraw-Hill, 197 pp.
- Rotach, M. W., 1995: Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **29**, 1473-1486.
- Santiago, J. L., A. Martilli, and F. Martin, 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.-Lay. Meteorol.*, **122**, 609-634.
- Sini, J.-F., S. Anquetin, and P. G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **30**, 2659-2677.
- Tutar, M., and G. Oguz, 2002: Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configurations. *Fluid Dyn. Res.*, **31**, 289-315.
- Uehara, K., S. Oikawa, and S. Wakamatsu, 2000: Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **34**, 1553-1562.
- Yakhot, V., S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, 1992: Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Phys. Fluids*, **A4**, 1510-1520.
- Yakhot, A., T. Anot, H. Liu, and N. Nikitin, 2006: Direct numerical simulation of turbulent flow around a wall-mounted cube: spatio-temporal evolution of large-scale vortices. *J. Fluid Mech.*, **566**, 1-9.