

연구논문

## CFD\_NIMR\_SNU 모형을 활용한 은평구 건설 전후의 바람환경 변화 모사 연구

조경미 · 구해정 · 김규랑\* · 최영진

국립기상연구소 응용기상연구과, 기상청  
(2010년 6월 22일 접수, 2011년 8월 13일 승인)

### Wind Field Change Simulation before and after the Regional Development of the Eunpyeong Area at Seoul Using a CFD\_NIMR\_SNU Model

Kyoungmi Cho · Hae-Jung Koo · Kyu Rang Kim\* · Young-Jean Choi

Applied Meteorology Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research,  
Korea Meteorological Administration

(Manuscript received 22 June 2010; accepted 13 August 2011)

### Abstract

Newly constructed, high-rise dense building areas by urban development can cause changes in local wind fields. Wind fields were analyzed to assess the impact on the local meteorology due to the land use changes during the urban redevelopment called “Eunpyeong new town” in north-western Seoul using CFD\_NIMR\_SNU (Computational Fluid Dynamics, National Institute of Meteorological Research, Seoul National University) model. Initial value of wind speed and direction use analysis value of AWS (Automatic Weather Station) data during 5 years.

In the case of the pre-construction with low rise built-up area, it was simulated that the spatial distribution of horizontal wind fields depends on the topography and wind direction of initial inflow. But, in the case of the post-construction with high rise built-up area, it was analyzed that the wind field was affected by high rise buildings as well as terrain. High-rise buildings can generate new circulations among buildings. In addition, small size vortexes were newly generated by terrain and high rise buildings after the construction. As high-rise buildings act as a barrier, we found that the horizontal wind flow was separated and wind speed was reduced behind the buildings.

CFD\_NIMR\_SNU was able to analyze the impact of high-rise buildings during the urban

development. With the support of high power computing, it will be more common to utilize sophisticated numerical analysis models such as CFD\_NIMR\_SNU in evaluating the impact of urban development on wind flow or channel.

Keywords : CFD\_NIMR\_SNU, urban development, wind flow, wind speed, vertical velocity

## 1. 서론

바람의 흐름은 지형이나 건물 등 장애물에 의해서 많은 영향을 받고 있다. 특히 도시나 공항 주변의 바람은 인간 실생활에 많은 영향을 미치고 있으며, 신재생 에너지인 풍력 발전의 차원에서도 바람의 흐름과 풍속의 예측은 중요하다. 또한 도시계획으로 도시 내에 낮은 건물들은 사라지고 대신 높은 건물들이 건설되면서 이에 따라 개발된 지역에는 개발 이전 상황과 비교하였을 때 기상 현상이 변화하여 나타날 수 있다. 낮은 건물들 대신 높은 건물들이 들어선 지역에서의 바람장 변화를 기본으로 하여 도시 기후 변화도 초래할 수 있게 된다. 또한 바람장의 변화는 오염도가 높은 도시에서 풍향이나 풍속에 따른 오염물질의 이동 경로를 예측할 수 있기 때문에 도시 내 바람장의 변화는 매우 중요하다. 이렇듯 도시 내에서의 건물들 사이에서 발생하는 바람은 인간의 활동에 밀접한 연관을 가질 뿐 아니라 도시 내에서 발생하는 오염물질이 이동 경로는 인간의 건강과도 직결되는 문제이기도 하다.

도시 지역에서의 대기 흐름과 오염물질의 분산에 대한 관심의 증대와 함께 레이놀즈 평균한 나비에-스토크스(Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 방정식이나 큰 에디 모사(Large Eddy Simulation, LES)에 기반을 둔 계산 유체 역학 모형(Hunter *et al.*, 1992; Liu and Barth, 2002; Kim and Baik, 2004)을 이용한 연구들이 이루어져 왔다. 대기와 도시 도로 협곡의 바닥과 건물 벽 사이의 온도 차이가 대기 흐름과 오염물질의 분산에 미치는 영향에 대한 실험들과 수치모의 연구가 Uehara *et al.* (2000), Liu *et al.* (2003), Sini *et al.* (1996), Xie *et al.* (2006) 등에 의해 진행되어 왔다. Kim and Baik (1999)은 표준  $k-\epsilon$  난류 모형

을 사용한 이차원의 모형으로 풍상, 풍하측 건물 벽이나 도로 협곡 바닥에 가열이 존재할 때 도시 도로 협곡 흐름과 오염물질의 분산을 모의하고, 그 결과로 생성되는 흐름 장을 열적으로 유도된 흐름과 역학적으로 야기된 흐름의 결합으로 설명하였다. 또한 다양한 건물 외관비와 도시 도로 협곡 바닥에 주어지는 다양한 가열 강도에 대해 광범위한 모의를 실시하여(Kim and Baik, 2001) 열적으로 야기된 흐름과 역학적으로 생성된 흐름이 결합하는 방식에 따라 도로 협곡 내부의 소용돌이가 다섯 개의 체계로 구분됨을 보였다. 그러나 이차원의 모형은 실제 삼차원인 공간을 효율적으로 모사하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 더욱이, 표준  $k-\epsilon$  난류 종결 방법을 포함하는 난류 모형은 바람이 장애물에 부딪히는 영역에서 난류 운동 에너지를 과다하게 모사하는 경향이 있어 이를 대신할 난류 종결 모형이 연구되어 왔다(Castro and Apsely, 1997). 그 중 Yakhot *et al.* (1992)은 재규격화군(Re-Normalization Group, RNG)  $k-\epsilon$  난류 종결 방법을 제안하였고, Kim and Baik (2004)은 3차원의 RNG  $k-\epsilon$  난류 종결 방법을 이용한 계산 유체 역학 모형을 개발하였다. Tsai *et al.* (2005)은 삼차원의 RNG  $k-\epsilon$  난류 모형을 이용하여 지면과 건물의 가열이 도시 도로 협곡 안의 대기 흐름과 오염물질의 분산에 미치는 영향을 연구하였다. 이러한 선행연구들은 단순한 건물을 대상으로 하는 이론적이고 이상적인 건물에 대한 연구가 대부분이며 아직까지 실제 도시 개발에 따른 기상환경 변화에 대한 연구사례는 많지 않다.

본 연구에서는 기존의 이론적인 연구를 바탕으로 실제 낮은 건물이 밀집하였을 때와 높은 건물이 밀집할 때 초기 유입류의 바람장 변화를 CFD (Computational Fluid Dynamics) 모형 수치 모의를 통해서 알아보고자 한다. 실제 서울 은평구를 중심으로 건설되고

있는 뉴타운 지역에 대해서 도시개발 전과 후의 건설 사례를 계산 영역으로 설정하고, CFD\_NIMR\_SNU (National Institute of Meteorological Research\_Seoul National University) 모형을 통해서 개발 전과 후의 바람장 특징을 분석하고자 한다.

## II. 모델 및 실험 설계

### 1. CFD\_NIMR\_SNU 모델

본 연구에서 상세 규모의 대기 흐름을 다루기 위해 이전에 개발한 삼차원 계산 유체 역학 모형을 사용하였다. 사용한 계산 유체 역학 모형에서는 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름계를 고려하고 있다. 운동량과 질량, 스칼라, 그리고 난류 운동 에너지와 소멸률에 대한 지배 방정식은 Patankar(1980)가 제안한 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용하

여 차별화 한다. 그리고 지배 방정식은 엇갈림 격자계(staggered grid system)에서 유한 체적법(finite volume method)을 통하여 수치적으로 풀다. 본 연구에서는 계산 유체 역학(computational fluid dynamic: CFD) 모델로 RNG k- $\epsilon$  난류 모형을 이용하였으며, 이 모형은 표준 k- $\epsilon$  난류 모형에서 비정상적으로 높게 모사된 난류 운동 에너지를 감소시킴으로써 건물 지붕 위의 흐름 분리(flow separation)와 역류(reverse flow)를 잘 모사할 수 있다(김재진 등, 2005). 이 모형은 도시 내부 협곡 흐름과 오염물질의 확산을 잘 모사할 뿐 아니라 최근 산악 화재에 대해서도 적용되어 그 성능이 입증되었다(구해정 등, 2009).

### 2. 실험설계

Figure 1은 건설 전(2007)과 건설 중(2009)의 위성사진과 모델 계산 영역의 건설 전·후(c와 d)의 지형과 건물의 모습이다. 계산 영역의 북쪽 지형이 높고, 동쪽과 남쪽에 비해 서쪽은 비교적 낮은 지형

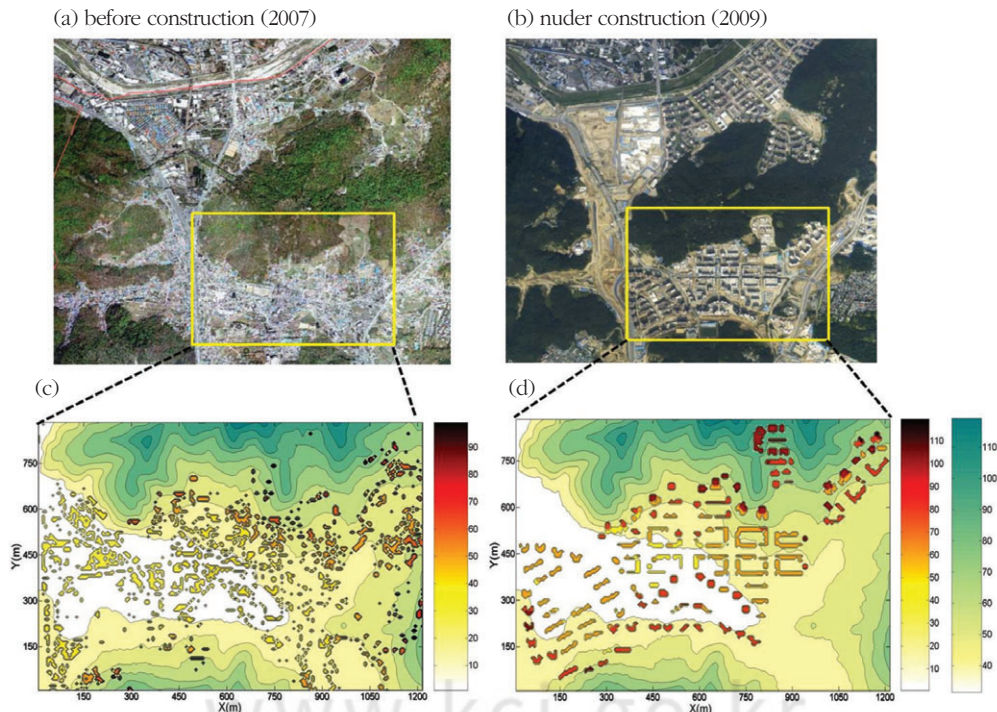


Figure 1. Satellite images (a,b) and topography and buildings of the computational domain before (c), and after (d) the regional development. Green-yellow scale indicates the height of the topography. Black-red-yellow scale indicates the height of the building

Table 1. Frequency and wind speed according to wind direction from the AWS data in 2000 and 2008

	NE		NW		SE		SW	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Frequency of Wind Direction	655	1448	1985	2003	820	567	488	497
Wind Speed at 10 m (ms <sup>-1</sup> )	2.094	1.862	2.534	1.841	2.310	1.696	2.114	1.714

이 분포한다. 건설 전의 건물들은 낮고 그 폭이 좁고 길이가 짧은 반면에 건설 후에는 건물의 높이가 높고 각각의 건물들의 폭이나 길이도 건설 전보다 넓고 길게 분포하고 있다. 건설 전에는 지형의 높이가 지면으로부터 5 m 이하인 지역에 건물들이 분포하지 않은 반면 건설 후에는 이 지역에 20층 내외의 높은 건물들이 형성되었음을 확인 할 수 있다.

건설 전과 후의 은평구의 바람장의 기후 값을 알아보기 위하여 1년 동안의 풍향 빈도와 풍속을 분석하였다. Table 1은 은평구 내에 건물이 건설되기 전과 후의 1년 동안 은평 지역의 자동기상관측 장비 (Automatic Weather Station; AWS) 관측 자료의 풍향과 풍속을 분석한 결과이다. 분석 자료는 은평구에 설치되어 있는 AWS 자료 중 10 m에서의 풍향과 풍속 자료이다. 건설 전의 대표적인 해로 2000년도, 건설 후의 대표적인 해로 2008년도를 선택하여 분석하였다. 사례는 관측소 자료에서 구름의 운량이 5할 이하인 날을 선택하여 분석하였다. 2000년도에 운량이 5할 이하 일수는 180일, 2008년도에는 196일로 나타났다. 풍속 분석 결과에서 두 해의 기후 값은 2000년도가 2008년도 보다 더 강하게 나타났다. 2000년과 2008년 모두 은평 지역에 북서풍 계열의 풍향이 가장 빈번하게 발생하였다. 2000년도에는 북서풍, 남동풍 계열의 풍향이 빈번하게 발생하였고, 2008년도에는 북동풍, 북서풍 계열의 풍향이 빈번하였다. 2000년도와 2008년도를 비교했을 때 북서풍 계열과 남동풍 계열의 풍향 빈도수는 감소한 반면 북동풍 계열과 남서풍 계열의 풍향 빈도수는 증가하였다.

이 모형을 운용하는데 초기 입력 자료는 다음과 같다. 모델 계산 공간으로 유입되는 초기 경계 조건은 Kim and Baik(2004) 및 Baik *et al.*(2007)의 조건을 적용하였다. 식 (1)과 (2)의  $U_{in}$ ,  $W_{in}$  는 입

구 면에서의 바람, 식 (3)의  $k_{in}$ 은 초기 조건으로 주어지는 난류 운동 에너지 그리고 식 (4)의  $\epsilon_{in}$ 은 난류운동 에너지의 소멸률이다.

$$U_{in}(z) = \frac{U_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

$$W_{in}(z) = 0 \quad (2)$$

$$K_m(z) = \frac{U_*^2}{C_\mu^{1/2}} \left(1 - \frac{z}{\delta}\right) \quad (3)$$

$$\epsilon_{in}(z) = \frac{C_\mu^{3/4} K_m^{3/2}}{kz} \quad (4)$$

여기서  $U_*$ 는 마찰속도,  $z$ 는 고도,  $z_0$ 는 거칠기 길이(0.05 m),  $\delta$ 는 경계층 두께 (1,000 m),  $k$ 는 폰 카르만 (von Karman) 상수(0.4),  $C_\mu$ 는 실험적 상수(0.0845)를 나타낸다(모델 및 변수에 관한 상세한 사항은 Kim and Baik (2004) 과 Baik *et al.* (2007)을 참고하기 바란다). 모델의 초기 입력 값인 1,000 m에서의 풍속과 풍향 값은 다음과 같이 AWS 관측자료를 통해서 결정하였다. 2004년부터 2008년까지 5년 동안 은평(지점번호 416) 지역의 AWS 자료의 풍향과 풍속을 분석하여, 총 16개 방향에서 풍향의 빈도수와 그때의 평균 풍속을 분석하였다. 자세한 결과는 Table 2에 나타났다. 빈도수가 가장 높은 풍향은 북서풍류의 유입류로 그때의 평균 풍속을 계산했을 때 10 m에서 1.870 ms<sup>-1</sup>이다. 이 중 풍향의 빈도가 4개 방향에서 각각 가장 높은 빈도수를 나타낸 풍향을 2개 선택(순위 1, 2위 사례), 모두 8개 방향을 선택하여 모형실험을 수행하였다.

본 실험에서는 지표 및 건물 표면의 열 효과를 배제하고 건물의 높이에 따른 효과만을 고려하기 위해 모델 수행에 있어서 지면의 온도는 일정한 상수 값으로 고정하였다. 뉴타운 건설 일부 지역 1,215 m × 885 m 범위를 모델 영역으로 설정하였고 연직 방향으로는 지상 1,040 m까지 고려하였다. 시간 간

Table 2. Wind direction frequency and mean wind speed during the latest 5 years at eunpyeong-gu area (AWS data)

Wind Direction	Degree of Wind Direction	Frequency (Wind Direction)	Mean Wind Speed at 10 m	Rank
Northeast	0 ~ 22.4	1919	1.398	3
	22.5 ~ 44.9	1074	1.115	4
	45 ~ 67.4	3657	1.690	2
	67.5 ~ 89.9	4587	1.738	1
Southeast	90 ~ 112.4	5106	1.746	1
	112.5 ~ 134.9	3422	1.672	2
	135 ~ 157.4	954	1.062	3
	157.5 ~ 179.9	805	0.997	4
Southwest	180 ~ 202.4	916	1.050	4
	202.5 ~ 224.9	1267	1.204	2
	225 ~ 247.4	1237	1.166	3
	247.5 ~ 269.9	1986	1.397	1
Northwest	270 ~ 292.4	5565	1.728	2
	292.5 ~ 314.9	8863	1.870	1
	315 ~ 337.4	1451	1.296	3
	337.5 ~ 359.9	844	1.020	4

Table 3. Computational parameters for model simulation

Case	Wind Direction (°)	U*	U at 1,000 m (U at 10 m)
Case 1	56 (ENE)	0.128	3.168 (1.690)
Case 2	78.5 (ENE)	0.131	3.242 (1.738)
Case 3	101 (ESE)	0.132	3.267 (1.746)
Case 4	146.5 (SSE)	0.126	3.118 (1.672)
Case 5	281 (WNW)	0.130	3.217 (1.728)
Case 6	303.5 (WNW)	0.141	3.489 (1.870)
Case 7	213.7 (SSW)	0.090	2.220 (1.204)
Case 8	258.7 (WSW)	0.105	2.598 (1.397)

격은 0.1초이며 수치 적분 시간은 7,200초이다. 동서방향 격자는 162개, 남북방향은 118개, 연직으로는 80개의 격자수로 수치 모의하였고, 격자 간격은 각각  $\Delta x = 7.5$  m,  $\Delta y = 7.5$  m,  $\Delta z = 13$  m이다. 모델 수치모의는 Table 2에서 순위가 1, 2위인 사례, 총 8개의 사례를 건설 전과 후의 경우를 대상으로 하여 모두 16개 사례에 대한 수치 모의를 수행하였다(Table 3).

### III. 결과

수치 모의 결과는 동풍의 대표적인 사례인 북동풍(사례 2)과 남동풍(사례 3), 서풍의 대표적인 사례

인 북서풍(사례 6)과 남서풍(사례 7)을 분석하였다. 모든 분석의 기준시간은 정상 상태에 도달하는 모델 수행 후 3,600초를 기준으로 분석하였다.

#### 1. 유선 분석

유선은 각 점에서의 흐름의 방향이 그 점에서의 접선 방향과 일치하도록 선으로 나타낸 것이며, 유선분석은 공기의 흐름을 파악할 수 있게 하여 이동 경로, 방향, 거리 등을 가시화 하는데 효과적이다. Figure 2~5는 사례 2, 3, 6, 7에 대해서 건설 전과 건설 후에 지면에서부터 6.5 m에서의 유선을 비교한 그림이다. 검은 색으로 표현된 것은 건물을 의미한다. Figure 2는 북동풍 사례(사례 2)로 건설 전(a)에는 지형의 영향으로 유선은 지형을 따라서 나타나게 되고 유입류의 풍하측에 지형에 의한 흐름이 분리되면서 남북으로( $x = 900$  m,  $y = 750$  m 부근) 시계방향과 반시계 방향의 두 개의 소용돌이가 형성되었다. 하지만 건설 후(b)에는 이 지역에 높은 건물이 형성되면서 위의 흐름은 사라지고, 건물과 건물 사이에 흐름이 분리되면서 새로운 흐름이 형성되며 건물에 의해서 건물의 풍하측에 작은 소용돌이( $x = 975$  m,  $y = 600$  m 부근)들이 유입류의

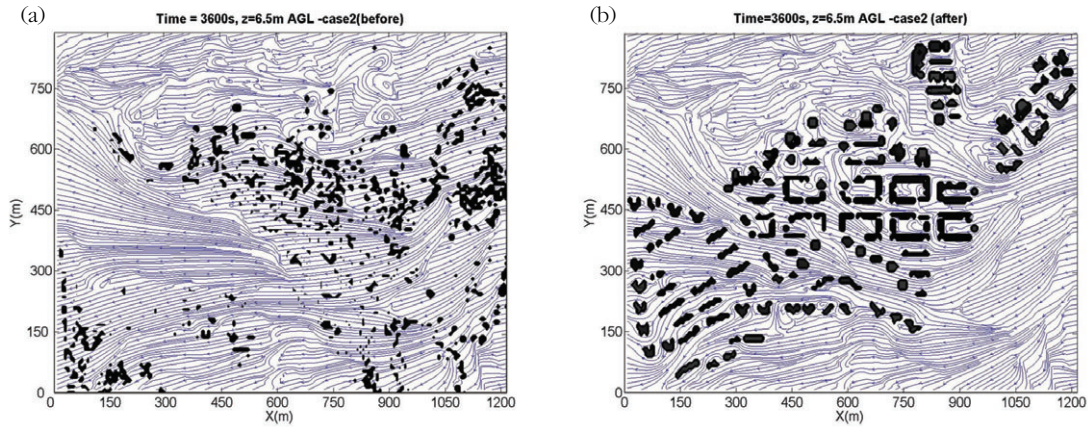


Figure 2. Streamline over a horizontal plane 6.5 m above ground level  $t=3,600s$  with low rise building case (a) and high rise building case (b) in the case 2 of northeasterly wind

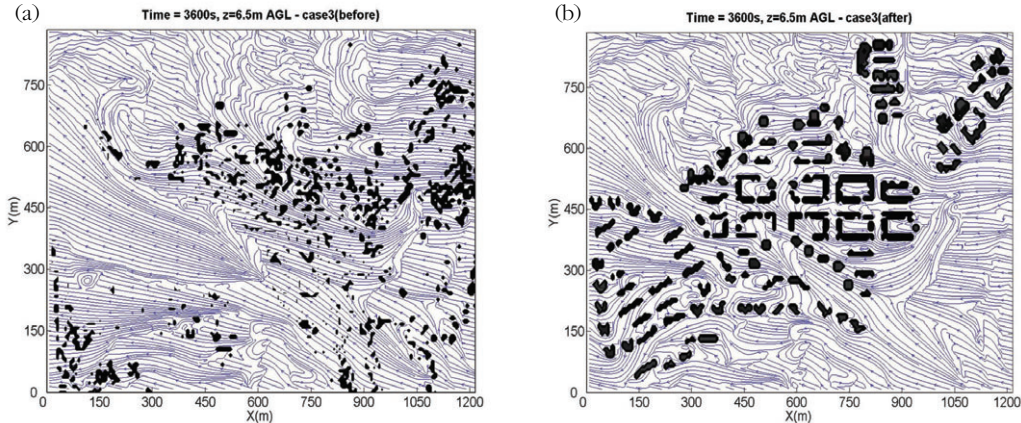


Figure 3. Streamline over a horizontal plane 6.5 m above ground level  $t=3,600s$  with low rise building case (a) and high rise building case (b) in the case 3 of southeasterly wind

방향을 거슬러서 형성된다. 또한 건물 내부에 소용돌이가 형성되는 등 건물이 새로 생성됨에 따라서 흐름의 변화가 발생한다. 건설 후(Figure 2(b)와 3(b))에는 건물 밀집 중심부에 주풍의 방향에 따라 흐름의 특성이 나타난다. 다만 흐름의 속도가 건설 전보다 후에 느려지고 있음을 알 수 있다. 계산 영역의 오른쪽 지역( $x = 1,050\text{ m} \sim 1,200\text{ m}$ ,  $y = 200\text{ m} \sim 450\text{ m}$ )은 도시 계획에 의해 균일한 바람이 유입되고 있다. Figure 4와 5는 서풍계열인 북서풍과 남서풍의 사례에 대한 유선의 흐름을 나타낸 그림이다. 건설 전에는 앞에서 분석한 사례와 비슷하게 나타난다. Figure 4에서는 낮은 건물의 영향은 비교적 적어 흐름이 균일하게 나타나고, 지형

이 높은 지역에서만 풍하측에 작은 소용돌이들이 형성된다. 사례 6(Figure 4)에서는 다른 사례와 다르게 건물과 건물 사이에서 강한 유선 흐름이 형성되었다. 지형의 효과로 인한 작은 소용돌이 생성과 함께 건설 후에는 높은 건물에 의해 생성된 건물 뒤의 작은 소용돌이도 나타난다. 남서풍 계열의 유입류인 Figure 5(b)의 건설 후 유선 분석 결과에서는 지형이 낮은 지역에서 유입류와 다르게 건물과 건물 사이에 북서풍 계열의 흐름이 형성되고, 건물 뒤 풍하측에 소용돌이가 형성된 몇몇 지역을 확인할 수 있다. 즉, 낮은 건물이 밀집한 건설 전 계산영역에서의 바람은 유입류의 풍향과 큰 차이를 보이지 않는 반면 높은 건물이 도시 내에 밀집하여 존재할

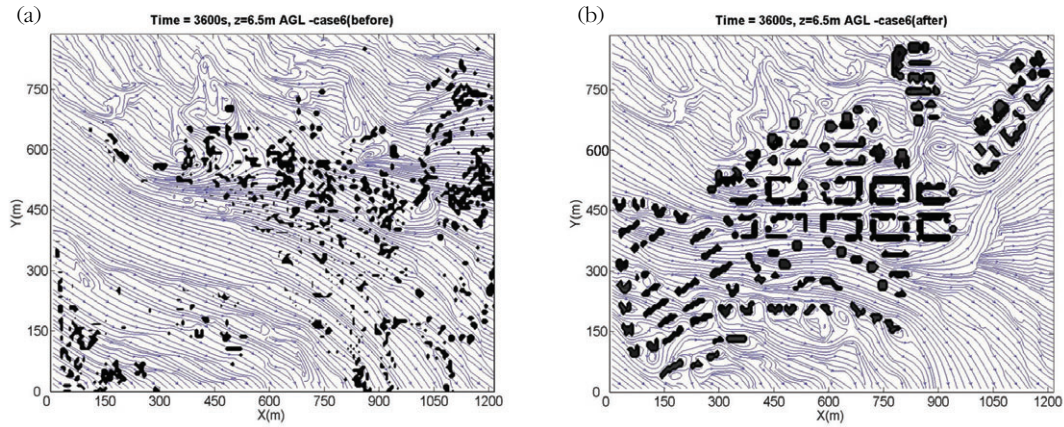


Figure 4. Streamline over a horizontal plane 6.5 m above ground level  $t=3,600s$  with low rise building case (a) and high rise building case (b) in the case 6 of northwesterly wind

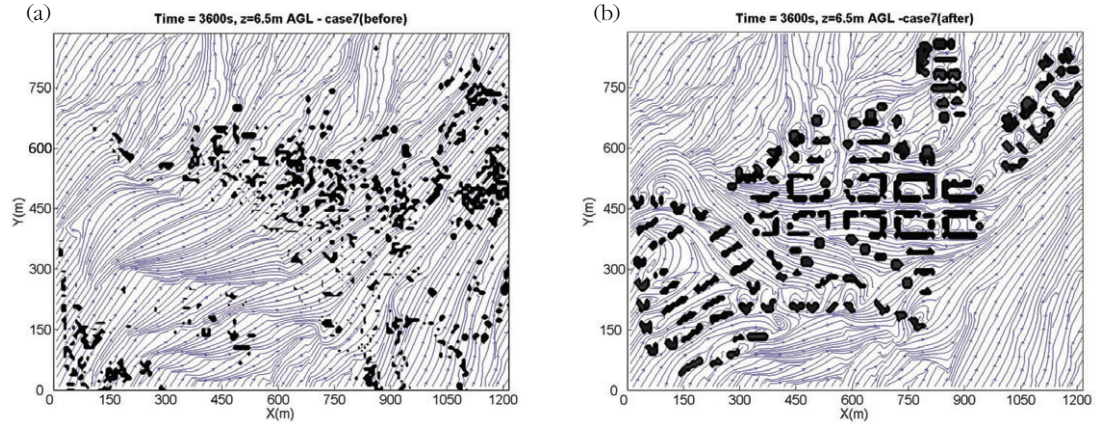


Figure 5. Streamline over a horizontal plane 6.5 m above ground level  $t=3,600s$  with low rise building case (a) and high rise building case (b) in the case 7 of southwesterly wind

경우 건물 주변흐름의 경로와 방향이 변화하게 된다. 건설 전과 후를 비교 했을 때 건설 전은 지형과 유입류의 방향에 따라서 유선의 흐름이 변화하고, 건설 후에는 지형의 영향과 유입류의 영향도 받지 만 높은 건물이 밀집한 지역에서 그 흐름이 복잡하게 변화한다.

## 2. 수평풍속 분석

Figure 6은 건설 전 사례 2(Figure 6b), 사례 3(Figure 6d), 사례 6(Figure 6a), 사례 7(Figure 6c) 실험에 대한 결과를 나타낸 것으로 적분 후 3,600초에서의 지형과 건물을 기준으로 연직 높이

6.5 m에서 평균 수평풍속을 나타낸 그림이다. 색이 진할수록 풍속이 강함을 의미한다. Figure 7은 건설 후 사례들로 고층 건물이 건설됨에 따라 지형에 의한 흐름 특성은 크게 변화가 없으나 건물 주변의 풍속은 건설 전 같은 지역과 비교하여 상대적으로 감소한 것을 알 수 있다. 초기 풍속이 가장 강한 사례인 유입류 북동쪽 사례 Figure 7(a)의 영역 부분을 보면 Figure 6(a)에 비해서 건물 밀집 지역에 풍속이 약하게 모의 되었다. Figure 6과 7을 통해서 높은 건물이 밀집되어 있을 때 그 건물들은 건물 사이의 풍속과 풍향에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 주로 지형의 높이와 복잡도에 따라 풍속의 세기 분포가 다양하게 나타난다. 특히, 고도가 다소

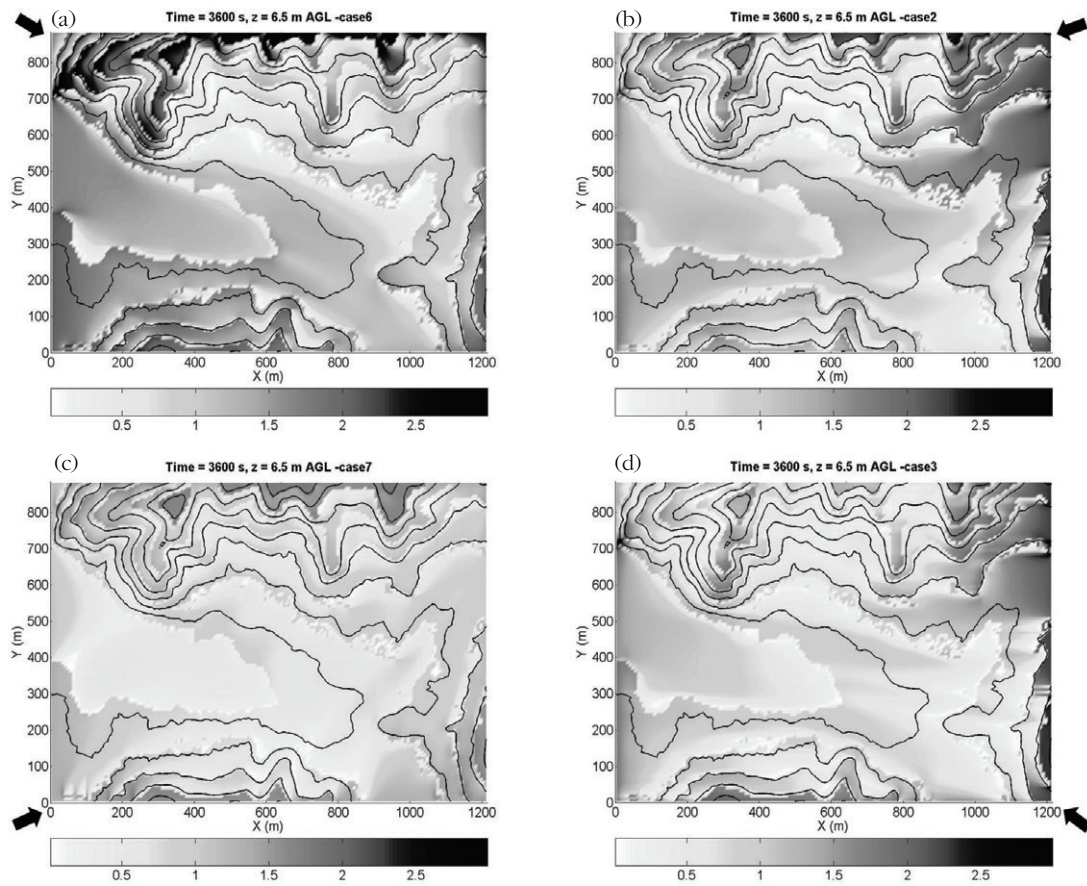


Figure 6. Mean windspeed over a horizontal plane 6.5m above ground level at  $t=3,600$  sec by the low rise building cases with inflow wind directions of (a) northwesterly wind, (b) northeasterly wind, (c) southwesterly wind, and (d) southeasterly wind. Arrow signs indicate the wind directions.

높은 계산영역의 북쪽과 남쪽 지역에서 풍속의 세기가 강해지며, 고도가 낮고 건물들이 밀집한 영역의 중심부에서 풍속의 세기가 상대적으로 약하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 대체로 건물 밀집 지역에서 풍속이 일정하게 유지되고 있는 것으로 보인다. 건물이 하나의 장애물로 작용하여 흐름을 분리시키고 분리된 흐름에서의 풍속은 약해지게 되어 건물 사이의 풍속이 약하게 나타난다.

건설 전과 후에 지면으로부터 84.5 m에서의 풍속의 모의결과(보이지 않음) 유입류에 따라서 그 풍상측의 바람이 강하고 풍하측의 바람이 약하게 모의 되었다. 주풍이 동풍 유입류인 사례 2와 사례 3의 경우 건설 후의 풍속이 지형이 높은 곳에서는 더 강하게 나타났다. 높은 건물이 밀집한 지역에서는

작은 규모의 강한 풍속 지역이 형성되었다. 초기 유입류의 풍속이 강한 사례 6의 경우는 지면으로부터 84.5 m 높이에서도 풍하측과 풍상측에서의 풍속 차이가 나타나지만 초기 풍속이 약한 사례 7의 경우는 계산영역 전체에 대해서 풍속이 일정하게 나타났다. 또 다른 특징적인 것은 건설 전 사례 2, 3, 7의 경우는 거의 전체 계산영역에 대해서 풍속이 일정하지만 건설 후 사례 2와 3의 경우는 지형이 높은 지역에서 풍속이 더 강하게 나타난 것이다. 초기 유입류가 서풍류인 사례 6 실험에서 낮은 건물 실험의 경우 풍상측인 서쪽이 동쪽보다 풍속이 강하게 나타남을 확인하였다.

난류 운동 에너지 분석 결과(보이지 않음), 초기 풍속 값이 약한 사례 7에서는 난류 운동 에너지가



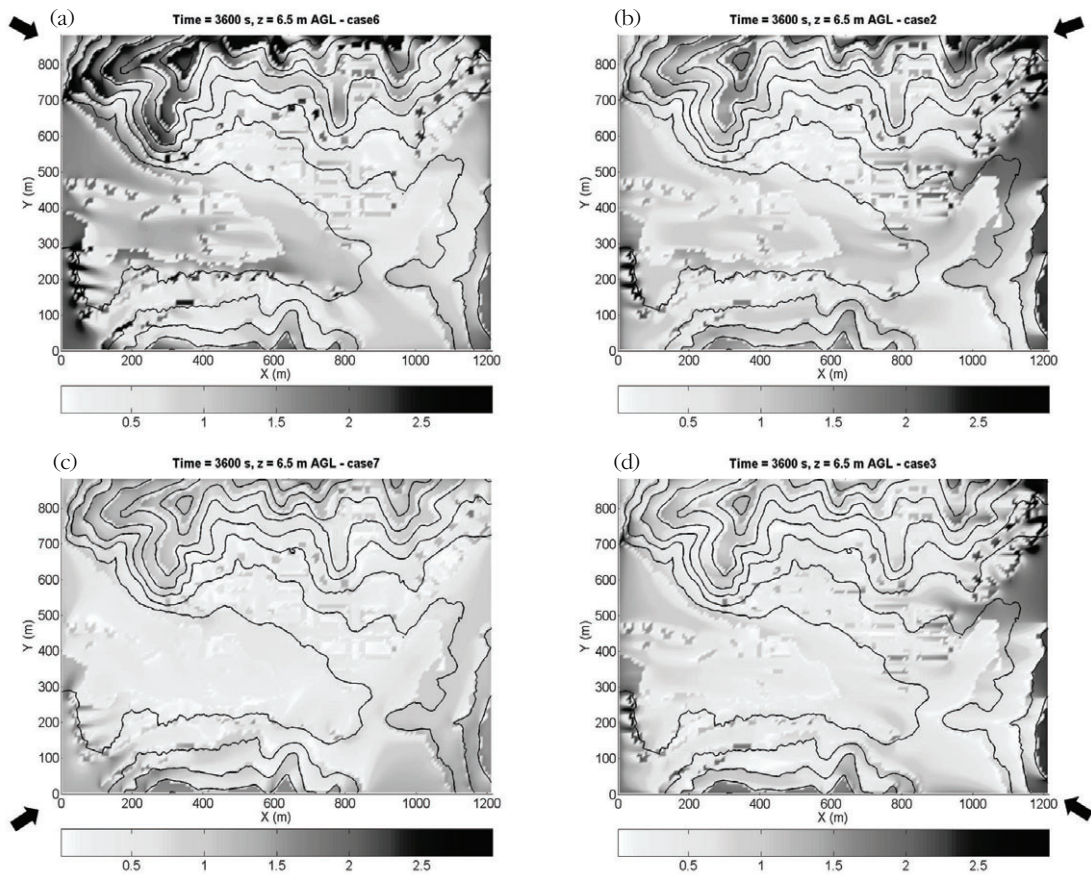


Figure 7. Mean windspeed over a horizontal plane 6.5 m above ground level at  $t=3,600$  sec by the high rise building cases with inflow wind directions of (a) northwesterly wind, (b) northeasterly wind, (c) southwesterly wind, and (d) southeasterly wind. Arrow signs indicate the wind directions.

강해지지 않고, 풍속이 강한 사례 6의 경우는 풍상측에 강한 난류 운동 에너지가 발생하였다. 이것은 강한 바람과 강한 열이 생성 원인인 난류의 특징에서 강한 바람에 의한 난류 즉, 이 지역 건물의 위치 및 지형의 상대적 거칠기에 따라 영향을 받아 발생하는 바람의 층밀림(shear)에 의한 기계적 난류임을 설명 할 수 있다. 건설 후의 난류 운동 에너지도 유입류의 전면과 건물이 높은 지역에서 그 값이 크게 나타났다.

### 3. 연직속도(w) 분석

Figure 8과 9는 지면으로부터 6.5 m에서 사례별 연직 운동을 분석한 결과이다. Figure 8은 건설 전 사례들의 결과이고 Figure 9는 건설 후의 결과

이다. 실선은 지형을 나타내고, 붉은색은 양의 값(상승기류) 푸른색은 음의 값(하강기류)을 의미한다. Figure 8(a)는 북서풍 사례로 풍상측인 서쪽에 상승기류 풍하측인 북동쪽에 하강기류가 나타난다. Figure 8(b)의 사례 2에서는 풍상측인 지형의 동쪽에 상승기류가 나타나고 대부분 지역에 하강기류가 나타난다. Figure 8(c)의 사례 7에서는 건설 전 풍상측에 하강기류, 풍하측에 상승기류가 생성되고, Figure 8(d)의 사례 3에서는 계산영역의 북쪽은 주로 상승기류 남쪽은 주로 하강기류가 형성 되었다. 남풍계열의 유입류인 경우 계산 영역의 북쪽에 지형이 높은 영역에 상승기류가 형성되었다.

Figure 9(a)에서는 높은 건물이 생성됨에 따라서 계산 영역 서쪽 낮은 지형의 영역에 상승기류가 하

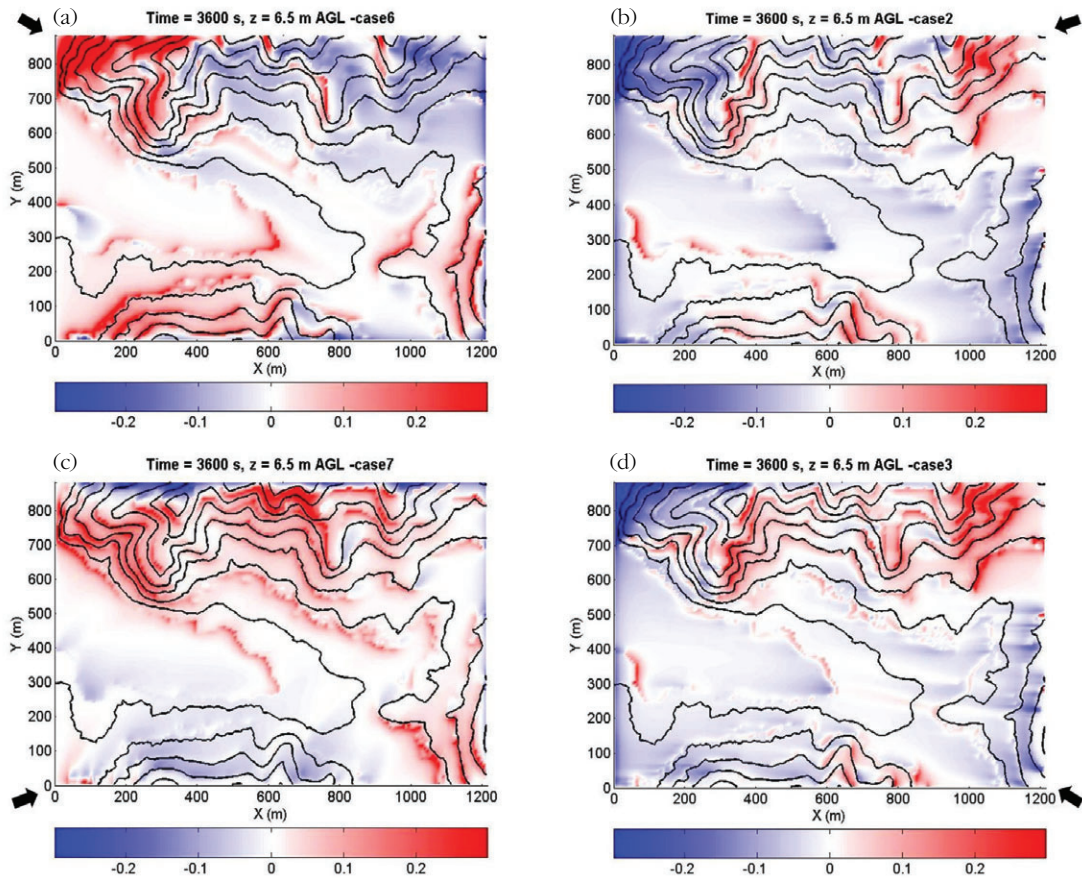


Figure 8. Vertical velocity over a horizontal plane 6.5 m above ground level at t=3,600 sec by the low rise building cases with inflow wind direction of (a) northwesterly wind, (b) northeasterly wind, (c) southwesterly wind, and (d) southeasterly wind. Arrow signs indicate the wind directions.

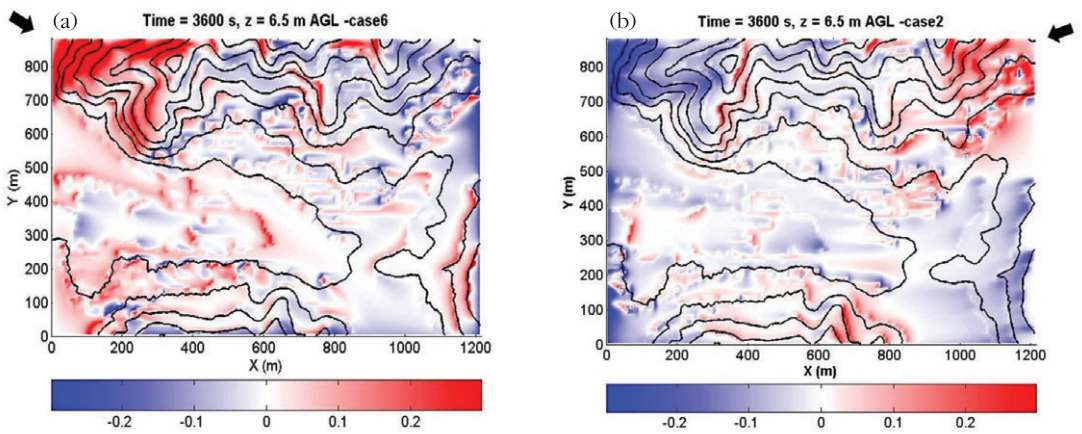


Figure 9. Vertical velocity over a horizontal plane 6.5 m above ground level at t=3,600 sec by the high rise building cases with inflow wind directions of (a) northwesterly wind, (b) northeasterly wind, (c) southwesterly wind, and (d) southeasterly wind. Arrow signs indicate the wind directions.

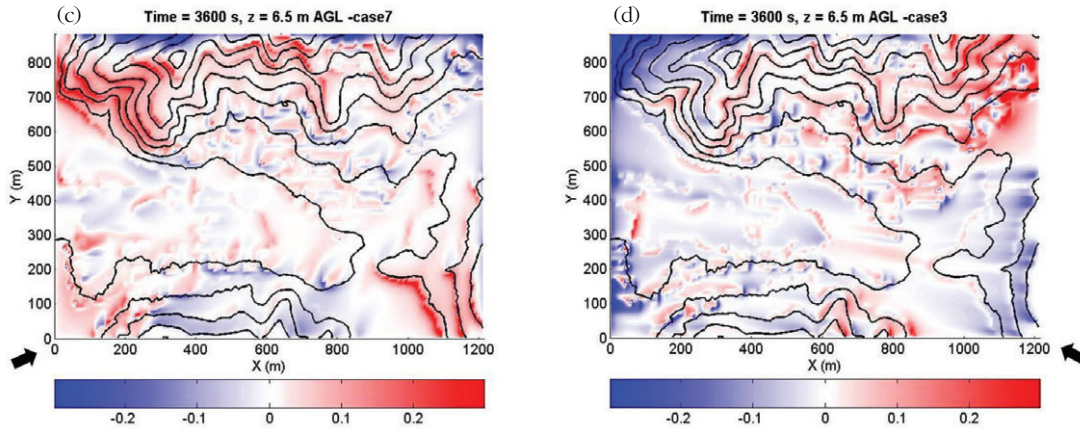


Figure 9. Continue.

강기류로 변화하였다. 계산영역의 중심에 건물 밀집 지역에서는 건물의 영향으로 인한 상승·하강 기류가 나타난다. Figure 9(b)에서 나타낸 사례 2의 경우 건설 전 상승 기류 지역은 건설 후에도 그대로 나타나고 중심지역에만 건물로 인한 상승기류가 형성되었다. Figure 9(c)에서는 건설 후에 계산영역의 남서쪽에 상승기류가 형성되고 중심 지역은 상승기류 세기가 약해지면서 건물들 사이에 하강기류도 함께 나타난다. Figure 9(d)에서 나타낸 사례 3의 경우에는 건설 전 상승기류 영역이 건설 후에는 약해지고 마찬가지로 건물이 형성된 지역에 상승·하강 기류가 나타난다. 유입류의 방향에 따라서 상

승운동 지역과 하강운동 지역이 결정되며 건설 전에는 지형의 영향을 받아 나타나고 있다. 건설 후에는 건설 전에 형성되던 상승 하강 기류와 더불어 건물 형성으로 인해 건물 밀집 지역에 새로운 상승하강 기류가 형성되고 있다.

#### 4. 유입류별 특성 비교

같은 계열의 유입류에 대한 변화를 조사하기 위해 유입류가 동풍 계열인 사례와 서풍 계열인 사례의 풍속을 비교하였다. Figure 10은 같은 북동풍 계열 사례들의 풍속을 비교한 것이다. 지면으로부터 84.5 m 높이에서의 풍속을 나타냈으며 앞의 그

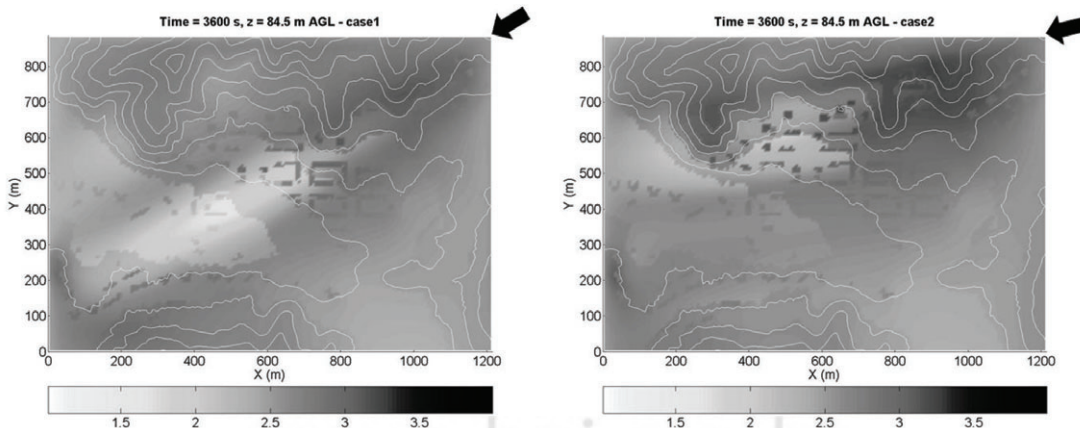


Figure 10. Mean windspeed over a horizontal plane 84.5 m above ground level at t=3,600 sec at high rise building case with inflow northeasterly wind. Contour lines indicate terrain.

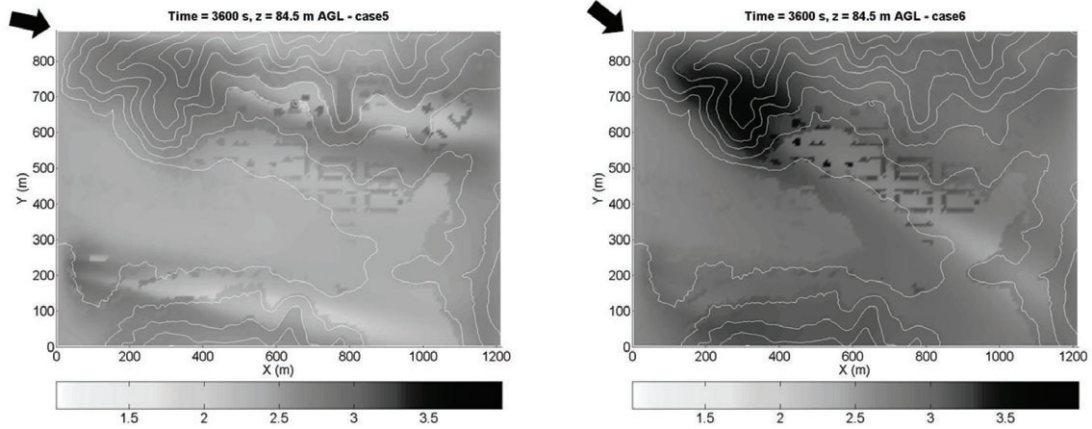


Figure 11. Mean windspeed over a horizontal plane 84.5 m above ground level at t=3,600 sec at high rise building case with inflow northwesterly wind. Contour lines indicate terrain.

림들과 마찬가지로 실선은 지형을 의미하고 높은 건물이 밀집하였을 때의 사례이다. 사례 1(왼쪽)은 모델 초기에 1,000 m에서의 풍속 값이 약  $3.1 \text{ ms}^{-1}$  이고 사례 2(오른쪽)는 약  $3.2 \text{ ms}^{-1}$ 이다. 각 사례에 대한 주풍향은 각각  $56^\circ$  와  $78.5^\circ$ 이다. 그림에서 사례 1보다 사례 2에서 풍속이 더 강하게 나타났으며 주풍향의 방향과 지형의 영향으로 풍상측과 풍하측의 지역 차이가 생긴다. 그에 따라서 강한 풍속 지역과 풍하측의 약한 풍속 지역이 결정된다. Figure 11은 북서풍 계열의 유입류인 사례 5(왼쪽)와 사례 6(오른쪽)의 풍속이다. 사례 5는 초기 풍속이 약  $3.2 \text{ ms}^{-1}$ 이고 사례 6은  $3.4 \text{ ms}^{-1}$ 이며, 주풍향은 각각  $281^\circ$ 와  $303.5^\circ$ 이다. 사례 5에서는 지형이 높은 지역과 건물이 밀집한 지역에 풍속의 차이가 거의 없는 반면에 사례 6의 경우에는 풍상측의 지형에 의해 풍상측과 풍하측의 풍속차이가 더 뚜렷하게 나타난다. 주풍 방향에 따라서 같은 지형이라도 시간이 지나면서 풍속이 다르게 나타날 수 있으며 풍속이 강한 지역과 약한 지역이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 도시 계획 시 개발 지역의 주풍향을 분석하여 건물을 건설할 필요성이 있음을 위의 결과에서 보여주고 있다.

### 5. 속도 연직프로파일

건설 전과 후의 각 지점에서의 수평, 연직속도의

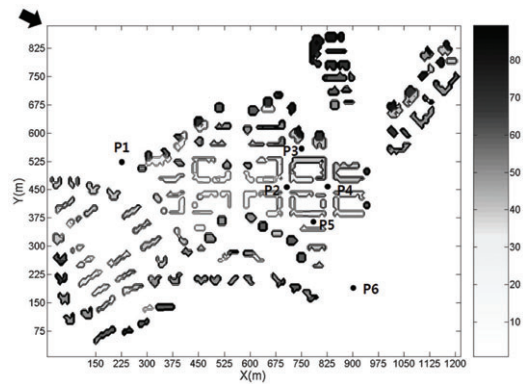


Figure 12. Selected 6 points for vertical profile analysis of horizontal wind speed and vertical velocity. Gray scale indicates building height.

연직프로파일을 분석하기 위해서 풍하측, 풍상측 건물 주변의 지점을 선택하였다. Figure 12는 건설 후의 계산 영역을 기준으로 선택한 6개의 지점을 보여주고, Figure 13의 연직 프로파일은 사례 6(북서풍)에서의 적분 후 3,600초의 자료를 보여주고 있다. P1은  $x = 225 \text{ m}$ ,  $y = 525 \text{ m}$ , P2는  $x = 705 \text{ m}$ ,  $y = 457.5 \text{ m}$ , P3은  $x = 750 \text{ m}$ ,  $y = 555 \text{ m}$ , P4는  $x = 825 \text{ m}$ ,  $y = 457.5 \text{ m}$ , P5는  $x = 780 \text{ m}$ ,  $y = 367.5 \text{ m}$ , P6은  $x = 900 \text{ m}$ ,  $y = 187.5 \text{ m}$  지점이다.

Figure 13은 선택한 6개의 지점에서 수평속도와 연직속도의 연직프로파일을 지면으로부터 6.5 m에서 약 500 m 높이까지 분석하여 나타낸 그림이다.

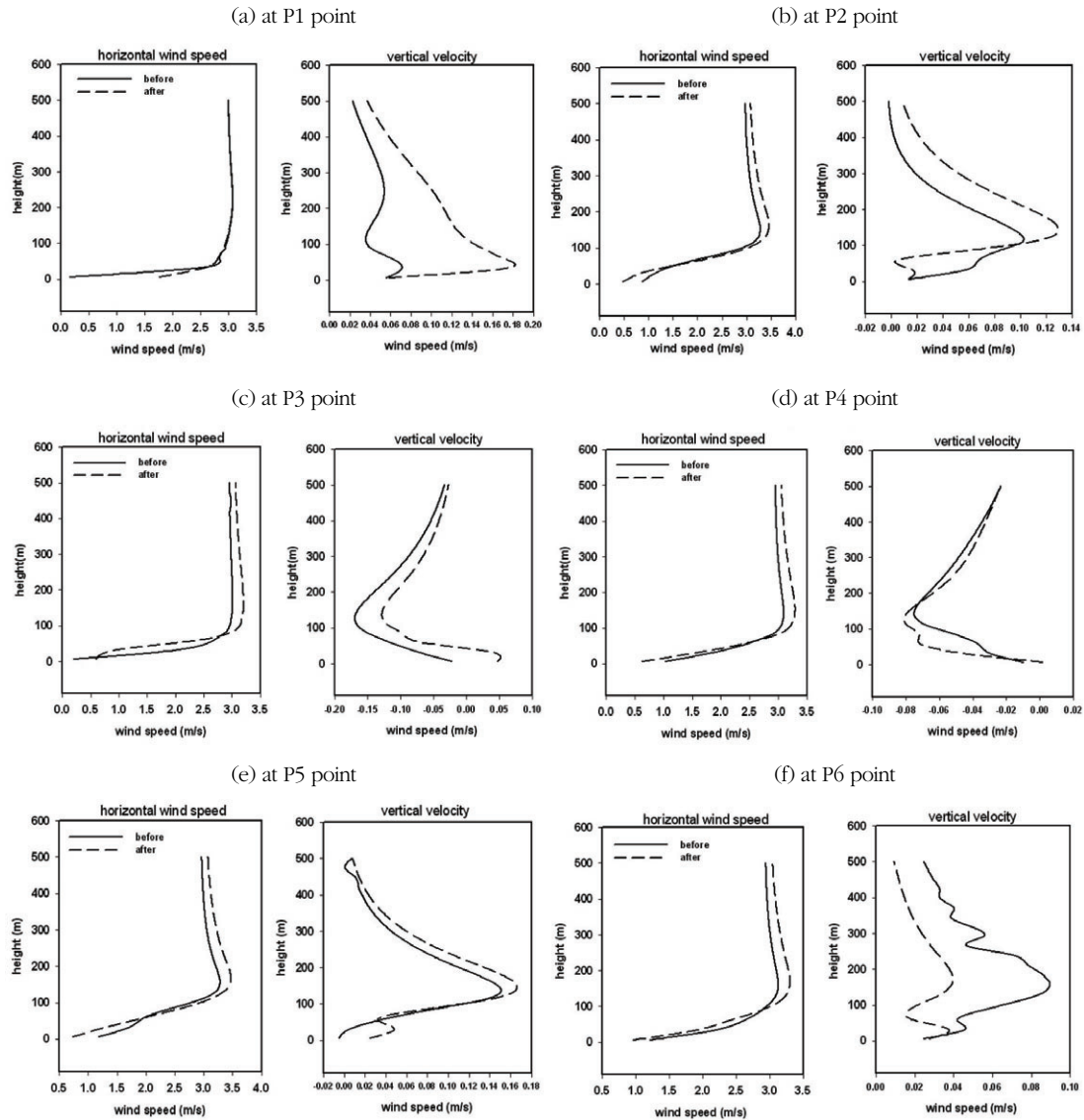


Figure 13. Vertical profile of horizontal wind speed and vertical velocity at the 6 selected points. Solid line indicates result from the low rise building case and dashed line indicates result from the high rise building case.

풍상측 지점인 P1 지점(Figure 13(a))에서 건설 전 후 수평풍속은 6.5 m에서 약  $1.5 \text{ ms}^{-1}$ 의 차이를 보이고 그 이상의 높이에서는 거의 같다. 그러나 연직 속도는 건설 전 보다 건설 후에 분석된 모든 층에서 큰 값을 보이고 건설 전·후 모두 약 500 m까지 상승기류가 존재한다. P2 지점(Figure 13(b))은 건물 밀집 지역의 서쪽으로 수평풍속은 32.5 m를 기준으로 하층에는 건설 전의 풍속이 강한 반면에 상층에는 건설 후의 풍속이 더 강하게 나타난다. 또한

이 지점에서는 건설 후에는 500 m까지 상승 기류만 나타나고, 건설 전에는 448.5 m부터 하강기류가 나타난다. 건물 밀집 지역의 북쪽 지점인 P3(Figure 13(c))에서는 58.5 m를 기준으로 하층에는 건설 전의 수평풍속이, 상층에서는 건설 후의 수평풍속이 강하게 나타난다. 연직속도는 건설 전에는 500 m까지는 하강기류만 나타나고 건설 후에는 58.5 m부터 하강기류가 나타난다. 연직속도는 건설 전보다 후에 더 강함을 보인다. P4(Figure

13(d)는 건물 밀집 지역의 서쪽 지점으로 58.5 m를 기준으로 하층은 건설 전의 풍속이 상층에는 건설 후의 풍속이 더 강하게 나타난다. 건설 전과 건설 후 6.5 m의 연직속도를 제외하고 모두 하강기류가 나타나며 188.5 m를 기준으로 하층에서는 건설 후의 연직속도가 강하고 상층에서는 건설 전의 연직속도가 강하게 나타났다. 건물 밀집지역의 남쪽인 P5(Figure 13(e)) 지점에서 수평풍속은 마찬가지로 58.5 m 높이를 기준으로 하층에는 건설 전이 상층에는 건설 후의 풍속이 강하다. 연직속도는 건설 전 6.5 m에서의 하강기류를 제외하고 약 500 m까지는 상승기류가 나타났다. 연직속도는 84.5 m를 기준으로 하층에는 건설 전이, 상층에는 건설 후의 속도가 더 강하다. 마지막으로 P6(Figure 13(f))은 풍하측 지점으로 수평풍속은 84.5 m를 기준으로 하여 하층에는 건설 전, 상층에는 건설 후의 풍속이 더 강하다. 연직속도는 건설 전의 속도가 건설 후보다 강하게 나타난다. 특히, P1(풍상측) 지점과 P6(풍하측)지점은 다른 지역보다 건설 전과 후의 연직속도의 차이가 크고 연직 분포의 차이도 뚜렷하게 나타나는 특징을 보인다.

6개의 지점에서 수평풍속은 건설 전보다 후에 더 강하게 나타나고, 그 경향은 거의 비슷하다. 풍하측과 풍상측의 지점에서는 건설 후의 수평풍속이 더 강해지는 높이가 80 m 이상의 높이인 반면에 건물 밀집 주변 지역의 지점에서는 32.5 m와 58.5 m로 풍상측과 풍하측 지점보다 그 높이가 낮음을 확인하였다. 수평풍속을 비교 했을 때 풍상측 지점(P1)을 제외한 모든 지점에서는 건설 전보다 후에 전이층이 더 높게 나타났다. 이 전이층을 기준으로 하층에는 건설 전의 수평풍속이 강하고 상층에는 건설 후의 평균풍속이 강하다. 연직속도 프로파일에서 전이층을 기준으로 하층에서의 패턴만 건설 전·후가 다르고 연직 약 100 m 이상(전이층을 기준으로 상층)에서 패턴은 건설 전·후 모두 비슷하다. P4와 풍하측 지점을 제외하고 다른 5개의 지점에서 건설 후의 연직속도가 더 강하게 나타난다.

#### IV. 요약 및 결론

높은 건물 지역(건설 후)에서나 낮은 건물 지역(건설 전)에서나 지표 및 건물 표면의 온도가 일정하다고 가정했을 때, 유입류의 방향이나 초기 풍속 값에 따라 풍속과 풍향이 결정된다. 유입류의 풍상측에 풍속이 강하고 풍하측에 풍속이 약하게 나타났다. 또한, 높은 건물의 영향으로 건물과 건물 사이에 상승 및 하강 기류가 형성되고 밀집한 건물들 사이에서는 풍속이 약하게 나타나는 특징을 보였다.

건설 전 유입류의 풍하측에 시계 방향과 반시계 방향으로 회전하는 두 개의 소용돌이가 형성된다. 건물이 높고 밀집되어 있는 경우는 지형의 영향과 함께 높은 건물의 밀집지역에서는 흐름이 분리되어 유입류의 방향과 다르게 건물과 건물 사이에 복잡한 흐름을 형성하게 된다. 건물에 의해서 건물의 풍하측에 작은 소용돌이들이 유입류의 방향을 거슬러 형성된다. 이에 따라서 수평풍속에도 변화가 생기게 된다. 건물이 하나의 장애물로 작용하여 흐름을 분리시키고 분리된 흐름에서의 풍속은 약해지게 되어 건물 사이의 풍속이 약하게 나타난다. 낮은 건물들로만 존재한 건설 전의 풍속은 지형의 영향으로 형성된다. 연직속도는 유입류의 방향에 따라 상승 지역과 하강지역이 결정된다. 건설 전에는 지형의 영향을 받아 형성되고 건설 후에는 건물 형성으로 인해 건물 밀집 지역에 새로운 상승·하강 기류가 형성된다.

건설 전과 후의 풍상측과 풍하측, 건물 주변의 각 지점에서의 연직 프로파일 분석 결과 수평풍속은 건설 전보다 건설 후에 더 강하게 나타나고, 연직속도는 풍하측을 제외하고 모두 건설 후가 전보다 더 강하게 나타난다. 건물 밀집지역의 동쪽과 남쪽은 상승기류가 주로 일어나고 북쪽과 서쪽은 500 m 높이까지는 대부분 하강기류가 존재한다. 풍상측과 풍하측의 지점에서 건설 전·후의 연직속도의 차이는 건물 밀집 지역의 지점에 비해서 크게 나타난다.

유입류의 방향이나 지형에 의해 결정되었던 이전의 바람장은 높은 건물이 밀집하여 건설됨에 따라 그 흐름이 건물 사이에서 분리되어 건물과 건물 사

이의 바람장을 약하게 하고 건물에 둘러싸인 내부나 유입류의 흐름을 거스르는 작은 소용돌이를 형성하게 된다. 따라서 도시 내에 새로운 건물 건설을 계획할 경우 바람의 흐름을 고려하여 그 흐름을 막지 않도록 건물이 건설되어야 할 것이다.

본 연구에서는 은평구 뉴타운 건설 지역의 일부를 대상으로 한 것이므로 앞으로 뉴타운 전체 지역에 대한 건설 전과 건설 후의 바람장 비교 연구도 필요하다. 또한 건물의 높이에 대한 바람장의 변화를 개괄적으로 살펴보기 위한 연구이므로 지표 근처의 바람장을 좀 더 상세하게 모의하기 위해서는 연직 격자 간격에 대한 고해상도 실험 연구가 필요하다.

## 사 사

본 연구는 국립기상연구소 주요과제인 “녹색성장 지원기술 개발연구”의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

기상연구소, 2007, 국지기상특성 진단 및 기상환경 영향평가 기술 개발 연구 (II), 국립기상연구소 연구보고서

기상연구소, 2008, 국지기상특성 진단 및 기상환경 영향평가 기술 개발 연구 (III), 국립기상연구소 연구보고서

구해정, 최영진, 김규량, 변재영, 2009, 계산유체역학모형 CFD\_NIMR\_SNU를 이용한 국지적으로 가열된 산악지역의 상세 바람 흐름 모사, 한국농림기상학회지, 제 11권, 제 4호, 192-205

김재진, 백종진, 2005, CFD 모형으로 이용한 도시 지역 흐름 및 스칼라 분산 연구, 한국기상학회지, 제 41권, 제 5호, 821-837

Baik, J.-J., R.-S. Park, H.-Y., Chun, J.-J., Kim, 2000: A laboratory model of urban street-canyon flows. J. Appl. Meteor.,

39, 1592-1600.

Baik, J.-J., J.-J. Kim, and H.J.S. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. Journal of Applied Meteorology, 42, 1636-1648.

Baik, J.-J., Y.-S. Kang, and J.-J. Kim, 2007: Modeling reactive pollutant dispersion in an urban street canyon. Atmos. Environ., 41, 934-949.

Baker, J., H. L. Walker, and X. Cai, 2004: A study of the dispersion and transport of reactive pollutants in and above street canyons-a large eddy simulation. Atmos. Environ., 38, 6883-6892.

Brown, M. J., R. E. Lawson Jr., D. S. DeCroix, and R. L. Lee, 2001: Mean flow and turbulence measurements around a 2-D array of buildings in a wind tunnel. 11th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, Long Beach, CA, USA, 35-40.

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.

Caton, F., R. E. Britter, and S. Dalziel, 2003: Dispersion mechanisms in a street canyon. Atmos. Environ., 37, 693-702.

Chen, F., J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part 1: Model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, 129, 569-585.

Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon

- Experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077–3107.
- Eliasson, I., 1996: Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmos. Environ.*, 30, 379-392.
- 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.
- Hunter, L. J., G. T. Johnson, and I. D. Watson, 1992: An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canopy. *Atmos. Environ.*, 26B, 425-432.
- Janjic, Z.I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, 122, 927–945.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 1999: A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *J. Appl. Meteor.*, 38, 1249-1261.
- Kim, J.-J., and J.-J. Baik, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmos. Environ.*, 35, 3395-3404.
- 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.*, 38, 3039-3048.
- Kim, J., K. R. Kim, B.-C. Choi, D. G. Lee, J.-S. Kim, 2008: Regional distribution of perceived temperature estimated by the human heat budget model (the Klima-Michel model) in South Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, (accepted)
- Kim, Y.-H., and J.-J. Baik, 2004: Daily maximum urban heat island intensity in large cities of Korea. *Theor. Appl. Meteor.*, 41, 651-659.
- Kim, Y.-H., and J.-J. Baik, 2005: Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul. *J. Appl. Meteor.*, 44, 591-605.
- Kim, Y.-H., S.-B. Ryoo, J.-J. Baik, I.-S. Park, H.-J. Koo, and J.-C. Nam, 2008: Does the restoration of an inner-city stream in Seoul affect local thermal environment. *Theor. Appl. Climatol.*, 92, 239-248.
- Kovar-Panskus, A., Moulinneuf, L., Savory, E., Abdelqari, A., Sini, J.-F., Posant, J.-M., Robins, A., Toy, N., 2002. A wind tunnel investigation of the influence of solar-induced wall-heating on the flow regime within a simulated urban street canyon. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus* 2, 555-571.
- Liu, C. H., and M. C. Barth, 2002: Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. *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. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20, 554-564.
- Mlawer, E.J., S.J. Taubman, P.D. Brown, M.J. Iacono, and S.A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-K model for the longwave. *Journal of Geophysical*



- Research, 102, 16663–16682.
- Nakamura Y. and T.R. Oke, 1988: Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 22, 2691–2700.
- Offerle, B., I. Eliasson, C.S.B. Grimmond, and B. Holmer, 2007: Surface heating in relation to air temperature, wind and turbulence in an urban street canyon. *Boundary-Layer Meteorol.*, 122, 273–292.
- Richards, K., M. Schatzmann, and B. Leidl, 2006: Wind tunnel experiments modelling the thermal effects within the vicinity of a single block building with leeward wall heating. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, 621-636.
- Rotach, M.W., 1995: Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, 29, 1473-1486.
- Sini, J.-F., S. Anquetin, and P.G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, 30, 2659-2677.
- Uehara, K., S. Murakami, 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.
- Xie, X., Liu, C.-H., Leung, D.Y.C., Leung, M.K.H., 2006. Characteristics of air exchange in a street canyon with ground heating. *Atmos. Environ.*, 40, 6396-6409.
- 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. *Physics of Fluids*, A4, 1510-1520
- <http://www.naver.com>

최종원고채택 11. 08. 15