

CFD 모형을 이용한 도시 지역 흐름 및 스칼라 분산 연구

김재진¹ · 백종진²

¹서울대학교 기후환경시스템연구센터

²서울대학교 지구환경과학부

(2005년 5월 17일 접수; 2005년 10월 31일 승인)

An Investigation of Flow and Scalar Dispersion in an Urban Area Using a CFD Model

Jae-Jin Kim¹ and Jong-Jin Baik²

¹Climate Environment System Research Center, Seoul National University, Seoul, Korea

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 17 May 2005; in final form 31 October 2005)

Abstract

A three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model with the renormalization group (RNG) $k-\epsilon$ turbulence model is used to simulate flow and passive scalar (e.g., pollutants) dispersion in a central business district of Seoul. A particular emphasis is put on the effects of ambient wind direction on flow and pollutant dispersion. For this, three cases with different ambient wind directions (easterly, southeasterly, and northeasterly) are considered. It is shown that the configuration of buildings largely determines wind speed and direction inside and above urban street canyons. Especially, the decrease in wind speed is obviously seen around building-congested areas. In wide streets such as Jongno, Cheonggyecheon, and Euljiro, a main wind is easterly irrespective of the ambient wind directions. Wind speed decreases as going to the central region of the model domain. Relatively strong horseshoe vortices are observed in front of high-rise buildings and wind is strong around the buildings. During a period of pollutant emission, the maximum pollutant concentration appears in recirculation zones behind buildings close to the emission source location. This is because the escape of pollutants is not easy once pollutants are trapped in the recirculation zones. After pollutant emission ceases, the location of the maximum pollutant concentration is shifted downwind. Pollutants are transported downwind mainly by mean flow and dispersed laterally by turbulent diffusion. Lateral dispersion of pollutants is found to be large near an area where high-rise buildings are densely located. This is because building-generated turbulence is strong there.

Key words: CFD model, RNG $k-\epsilon$ turbulence closure model, flow and scalar dispersion, ambient wind direction, building-congested area

1. 서론

도시화가 계속되면서 도시 지역의 인구 밀도와

차량 통행 빈도가 점점 증가하고 있다. 도심 지역에 서의 흐름과 스칼라 분산에 대한 연구는 유체 역학 적인 관심 그리고 차량에 의한 배기 가스의 증가, 예 기치 못한 화재, 유독 가스 물질 배출 사고 등에 의한 피해를 최소화하기 위한 노력의 일환으로 지난 20년 동안 활발히 수행되어 왔다. 도시 흐름과 스칼라 분 산에 대한 연구는 크게 야외 실험 연구 (DePaul and Sheih, 1985, 1986; Nakamura and Oke, 1988; Rotach, 1995), 풍동 혹은 수조를 이용하는 연구 (Meroney *et*

Corresponding Author: Jong-Jin Baik, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
Phone : +82-2-880-6990, Fax : +82-2-883-4972
E-mail : jjbaik@snu.ac.kr

al., 1996; Baik *et al.*, 2000; Brown *et al.*, 2000; Uehara *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2003; Kim and Baik, 2005), 수치 모형을 이용하는 연구 (Lee and Park, 1994; Sini *et al.*, 1996; Baik and Kim, 1999; Kim and Baik, 1999, 2001; Liu and Barth, 2002; Cheng and Hu, 2005)로 나눌 수 있다. 야외 실험은 실제 상황에서 흐름과 스칼라 분산을 파악한다는 점에서 가장 실제적인 방법이지만 고비용을 필요로 하고 정해진 주변 조건 (주변 바람장과 건물 배치 등) 때문에 다른 상황으로의 직접적 적용이 어렵다는 한계를 갖는다. 이와 같은 한계를 극복할 수 있는 접근 방법이 수치 모형을 이용한 연구이다.

지금까지 도시 규모의 흐름과 확산을 수치 모사할 수 있는 다양한 종류의 난류 모형이 개발되어 왔다. 난류 모형은 난류 종결 방법에 따라 분류될 수 있는데 가장 일반적인 난류 종결 방법 중 하나가 표준 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법이다. $k-\epsilon$ 난류 종결 방법은 난류 과정을 비교적 잘 표현하면서 계산 시간이 경제적이라는 장점을 가지고 있다. 그러나 표준 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 포함하는 난류 모형은 바람이 건물 등의 장애물에 부딪히는 지역에서 난류 운동 에너지를 과다하게 모사하는 단점을 가지고 있다 (Castro and Apsley, 1997). 이러한 표준 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법의 단점을 보완할 수 있는 방법들이 개발되어 왔다. 그 중 하나가 재규격화 군 (renormalization group, RNG) 이론에 바탕을 둔 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법이다. 재규격화 군 이론의 기본적인 착안점은 작은 규모의 난류 효과를 큰 규모 운동 및 수정된 점성으로 나타냄으로써 작은 규모 난류를 체계적으로 소거하는 것이다 (Yakhot *et al.*, 1992).

계산 (전산) 유체 역학 모형 개발은 선진 외국에서는 활발하게 진행되어 왔고 이미 상업화 단계에 이르렀지만 국내에서의 개발은 매우 미약한 실정이다. 본 논문에서는 저자가 개발한 계산 유체 역학 모형을 간단히 소개하고 이 모형을 건물이 밀집되어 있는 서울 도심 지역에서의 흐름과 스칼라 분산 문제에 적용해 보았다.

2. 수치 모형

2.1 지배 방정식

본 연구에서 사용한 계산 유체 역학 모형은 Kim

and Baik (2004)과 같다. 이 모형은 3차원, 비정수 (nonhydrostatic), 비회전 (nonrotating), 비압축 (incompressible) 흐름 계를 고려한다. 레이놀즈 평균한 운동량 방정식, 질량 연속 방정식 그리고 스칼라에 대한 수송 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P^*}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{cu_j}) + S_c. \quad (3)$$

여기서 U_i 는 i 방향의 평균 속도 성분, P^* 는 참고값으로부터의 압력 편차이고 C 는 스칼라 (예, 오염 물질)의 평균 농도이다. u_i 와 c 는 각각 U_i 와 C 에 대한 편차이고 ρ_0 은 공기 밀도, ν 는 공기의 동점성 계수, D 는 오염 물질의 분자 확산 계수이며 S_c 는 오염 물질의 원 (source) 항을 나타낸다.

식 (1)과 (3)에서 레이놀즈 스트레스와 난류 속은 다음과 같이 모수화된다.

$$-\overline{u_i u_j} = K_m \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k, \quad (4)$$

$$-\overline{cu_j} = K_c \frac{\partial C}{\partial x_j}. \quad (5)$$

여기서 K_m 과 K_c 는 각각 운동량과 오염 물질의 난류 확산 계수이고 δ_{ij} 는 Kronecker 델타이며 k 는 난류 운동 에너지이다. RNG $k-\epsilon$ 난류 모형에서 K_m 은 다음과 같이 표시된다.

$$K_m = \nu \left(1 + \left(\frac{C_\mu}{\nu} \right)^{1/2} \frac{k}{\epsilon^{1/2}} \right)^2. \quad (6)$$

위 식에서 C_μ 는 경험 상수이다. K_c 의 계산을 위해 사

용되는 난류 Schmidt 수 ($= K_m/K_\epsilon$)는 0.9로 주었다.

재규격화군 이론은 양자전기역학에서 도입된 후 상전이 현상을 설명하는데 크게 공헌하였다. Forster *et al.* (1977)은 재규격화군 개념을 처음으로 난류 문제에 적용하였고 난류 통계를 평가하기 위하여 Yakhot and Orszag (1986)는 재규격화군 방법을 Navier-Stokes 방정식과 스칼라의 수송 방정식에 처음으로 적용하였다. Smith and Reynolds (1992)는 Yakhot and Orszag (1986)가 난류 운동 에너지의 소멸을 방정식을 유도하는 과정에서 발생된 문제를 해결함으로써 이를 더욱 향상시켰으며 Yakhot and Smith (1992)는 난류 운동 에너지 소멸을 방정식의 생성항과 관련된 상수값을 재평가하고 난류 운동 에너지 소멸을 방정식에 추가로 한 항을 도입하였다. 그리고 Yakhot *et al.* (1992)은 추가로 도입된 항에 의해 발생한 종결 문제를 해결하였다. 재규격화군 이론에 관한 보다 자세한 설명은 노의근 (2001)을 참고하라.

본 연구에서 사용한 계산 유체 역학 모형은 RNG $k-\epsilon$ 난류 모형 (Yakhot *et al.*, 1992)을 포함한다. 이 난류 모형은 비선형 응력변형을 (strain rate)을 고려하기 위해 난류 운동 에너지 소멸을 방정식에 소실 항을 추가하고 모형의 경험 상수값을 다르게 사용한다는 점에서 표준 $k-\epsilon$ 난류 모형과 다르다.

난류 운동 에너지와 그 소멸율에 대한 예상 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = -u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \epsilon, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \\ -C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} u_i u_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{K_m}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} - R. \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 σ_k , σ_ϵ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 는 모두 경험 상수이다. 식 (8)의 우변 마지막 항은 다음과 같이 표시된다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{(1 + \beta_0 \eta^3) k}, \quad (9)$$

$$\eta = \frac{k}{\epsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2}. \quad (10)$$

추가된 항, R 은 무차원화된 응력변형을 대개변수 (η)와 균질하게 평형을 이룬 시어 흐름에 대한 이 대개변수의 전형적인 값 ($\eta_0 = 4.8$)과의 상대적 크기에 따라 결정되고 결과적으로 소멸율의 원 (source)을 증가시키거나 감소시키는 역할을 한다.

RNG $k-\epsilon$ 난류 모형에서 다음과 같은 상수값을 사용하였다 (Yakhot *et al.*, 1992).

$$(C_\mu, \sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \beta_0, \eta_0) = (0.0845, 0.7179, 0.7179, 1.42, 1.68, 0.012, 4.377). \quad (11)$$

2.2 지배 방정식의 차분화

지배 방정식 계를 엇갈림 격자계에서 유한 체적법 (finite volume method)과 Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용하여 수치적으로 푼다. 이 알고리즘에서는 매 수치 적분 단계에서 가 정된 압력장 하에서 임시적인 바람 성분 (수평 및 연직)을 구한다. 그리고 바람장의 조정을 통하여 질량 보존 방정식을 만족시키는데 필요한 압력 편차량을 계산한다. 이와 같이 계산된 압력 편차량으로부터 바람 성분의 편차량을 구하고 마지막으로 바람장과 압력장을 계산한다. Fig. 1은 유한 차분을 위한 격자 구조와 제어 공간 (control volume)을 나타낸다. 실선으로 표시된 단위 제어 공간의 경계면의 중심에서는 벡터량 (U , V , W)이 정의되고 단위 제어 공간의 중심에서는 스칼라량 (P^* , C , k , ϵ)이 정의된다. 지배 방정식계를 수치적으로 계산하는 과정에 대한 자세한 내용은 Baik *et al.* (2003)에 주어져 있다.

2.3 비균등 격자계의 적용

비균등 격자계에서 접점값 (interface value, Γ)은 단위 제어 공간에서 다음과 같이 계산된다 (Versteeg and Malalasekera, 1995).

$$\Gamma_w = (1 - f_w) \Gamma_W + f_w \Gamma_P \quad (12)$$

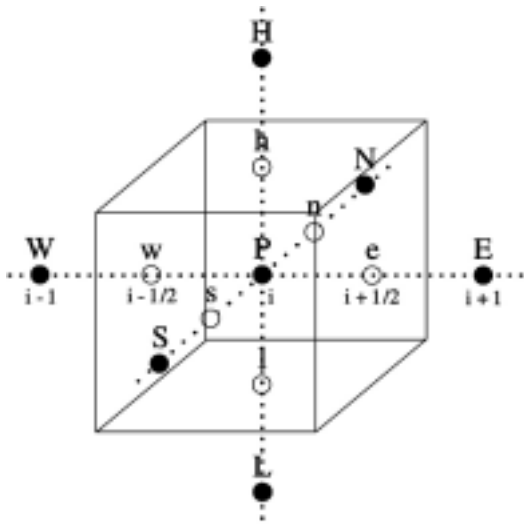


Fig. 1. A sketch of grid structure and control volume for finite differencing. The center point of the control volume is denoted by symbol P and the other surrounding points are denoted by W, w, e, E in the x -direction, S, s, n, N in the y -direction, and L, l, h, H in the z -direction.

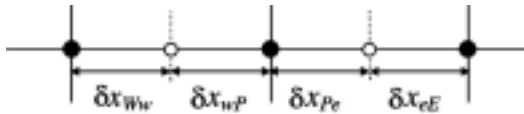


Fig. 2. A sketch of non-uniform grid system. For clarity of the figure, only grid indices in the x -direction are given. See Fig. 1 for nodal points.

$$\Gamma_e = (1 - f_P)\Gamma_P + f_P\Gamma_E \quad (13)$$

여기서 내삽 가중 인자 f_W 와 f_P 는 각각 다음과 같이 주어진다 (Fig. 2).

$$f_W = \frac{\delta x_{Ww}}{\delta x_{Ww} + \delta x_{wP}} \quad (14)$$

$$f_P = \frac{\delta x_{Pe}}{\delta x_{Pe} + \delta x_{eE}} \quad (15)$$

3. 표준 및 RNG $k-\epsilon$ 난류 모형 비교

본 연구에서 사용한 계산 유체 역학 모형을 표준 $k-\epsilon$ 난류 종결 방법을 포함하는 계산 유체 역학 모형

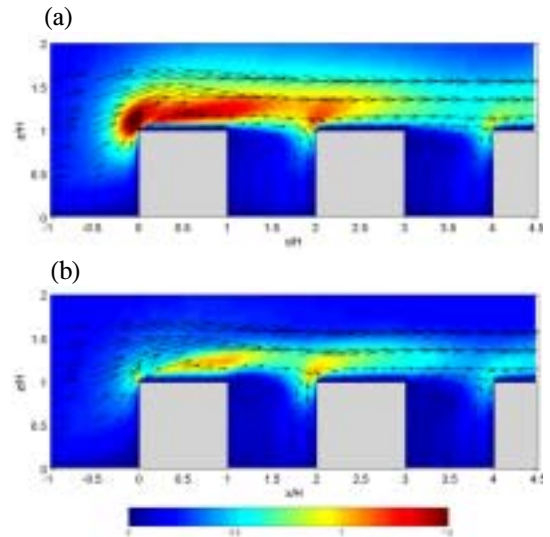


Fig. 3. Wind vector fields normalized by the upstream horizontal velocity (U_T) at the reference height (H) and normalized turbulent kinetic energy fields ($k/(0.5U_T^2)$) simulated by the (a) standard and (b) RNG $k-\epsilon$ turbulence models.

과 비교하였다. 2차원 건물 배열을 고려하였고 주변 바람은 건물에 수직으로 분다고 가정하였다. Fig. 3은 고도 H (건물의 높이)에서의 풍상측 수평 속도에 의해 정규화된 바람 벡터장과 정규화된 난류 운동 에너지 장이다. RNG $k-\epsilon$ 난류 모형은 첫번째 건물의 풍상측 모서리 부근에서 표준 $k-\epsilon$ 난류 모형에 의해 비정상적으로 높게 모사된 난류 운동 에너지를 감소시킴으로써 그 건물 지붕 위의 흐름 분리 (flow separation)와 역류 (reverse flow)를 잘 모사할 수 있었다. 두 경우 모두 도로 협곡에서 1개의 소용돌이가 생성되었다.

4. 수치 실험 설계

청계천 주변 지역을 대상 지역으로 하였고 주변 풍향에 따른 세가지 수치 실험을 수행하였다. Fig. 4는 청계천 주변 지역의 항공사진이다. 본 연구에서는 흰색으로 표시한 경계 내부 지역을 계산 영역으로 하였다. 동서 방향으로 뻗어 있는 공간이 도로인데 위로부터 종로, 청계천로 그리고 을지로이다. 붉은색 점선 원내의 건물이 비교적 높은 건물들이고 청계천로와 을지로 사이의 서쪽에 위치한 건물이 가장 높은 건물이다. 계산 영역은 경도 126도 59분



Fig. 4. A picture of Cheonggyecheon area taken from an airplane (<http://www.rtouch.com/>). The locations of pollutant sources are also indicated. The point sources in the middle, lower, and upper regions at the right of the model domain are for the cases of easterly, southeasterly, and northeasterly ambient-wind, respectively.

6.55초부터 126도 59분 46.1초 사이와 위도 37도 33분 44.2초부터 37도 34분 20.7초 사이의 지역이다. Fig. 5는 계산 영역에 대한 격자계를 보여준다. x 와 y 방향의 격자수는 102개이고 z 방향은 62개이다. x 와 y 방향의 격자 크기는 균일하며 각각 9.72 m와 11.31 m이다. z 방향의 경우 계산 영역 내에서 가장 높은 건물과 높이가 일치하는 33층까지는 격자 크기가 5 m이고 34층부터 41층까지는 1.1의 팽창율로 격자 크기가 증가하다가 41층 이상에서는 격자 크기가 일정하다.

시간 간격을 0.5 초로 하여 수치 모형을 4800 초까지 적분하였다. 처음 1200초 동안은 바람장만 적분하였고 1200초 이후부터 스칼라 물질 (오염 물질이라고 하자)의 수송 방정식을 계산하였다. 30분 동안 오염 물질을 배출하였고 그 후 30분 동안 ($t = 3000\text{초} - 4800\text{초}$)은 오염 물질 배출을 중단한다. 오염 물질은 17.5 m 높이에 위치한 4개의 점 오염원으로부터 100 ppb s^{-1} 의 율로 배출된다. 오염원은 북동풍 (동풍, 남동풍)이 부는 경우에는 계산 영역의 북

동쪽 (동쪽, 남동쪽) 경계부근에 위치한다 (Fig. 4). 바람, 난류 운동 에너지 그리고 난류 운동 에너지의 소멸율에 대한 유입 (inflow) 경계 조건은 다음과 같다.

$$U_{in}(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \cos \theta, \quad (16)$$

$$V_{in}(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \sin \theta, \quad (17)$$

$$W_{in}(z) = 0, \quad (18)$$

$$k_{in}(z) = \frac{1}{C_\mu^{1/2}} U_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta} \right)^2, \quad (19)$$

$$\varepsilon_{in}(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}}{\kappa z}. \quad (20)$$

여기서 θ , U_* , z_0 , δ 그리고 κ 는 각각 주변 풍향, 마찰 속도, 거칠기 길이 (= 0.05 m), 경계층 두께 (=

1000 m) 그리고 von Karman 상수 (= 0.4) 이다. 유출 경계, 측면 경계 그리고 상층 경계에서 모든 변수의 경도가 0인 경계 조건을 사용하였다. 건물 벽면과 꼭대기 그리고 바닥 경계에서는 벽면 함수를 이용하였다 (Kim and Baik, 2004).

5. 결과 및 토의

5.1 동풍이 부는 경우 ($\theta = 180^\circ$)

계산 영역 내에서 건물에 의한 바람의 연직 구조 변화를 조사하기 위하여 계산 영역 내 모든 지점의 바람을 평균한 속력과 유입류의 속력을 비교하였다 (Fig. 6). 유입류의 풍향에 따라 약간의 차이가 존재

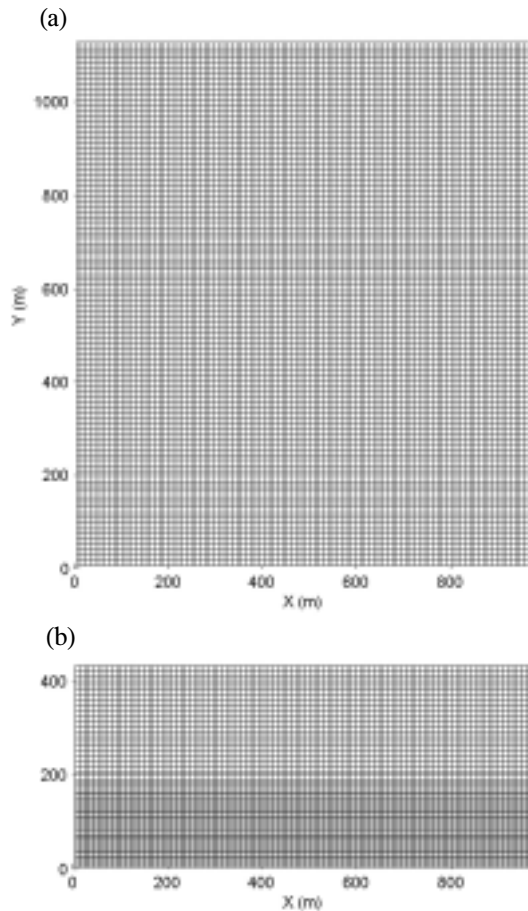


Fig. 5. (a) Top view and (b) side view of the computational domain and grid system.

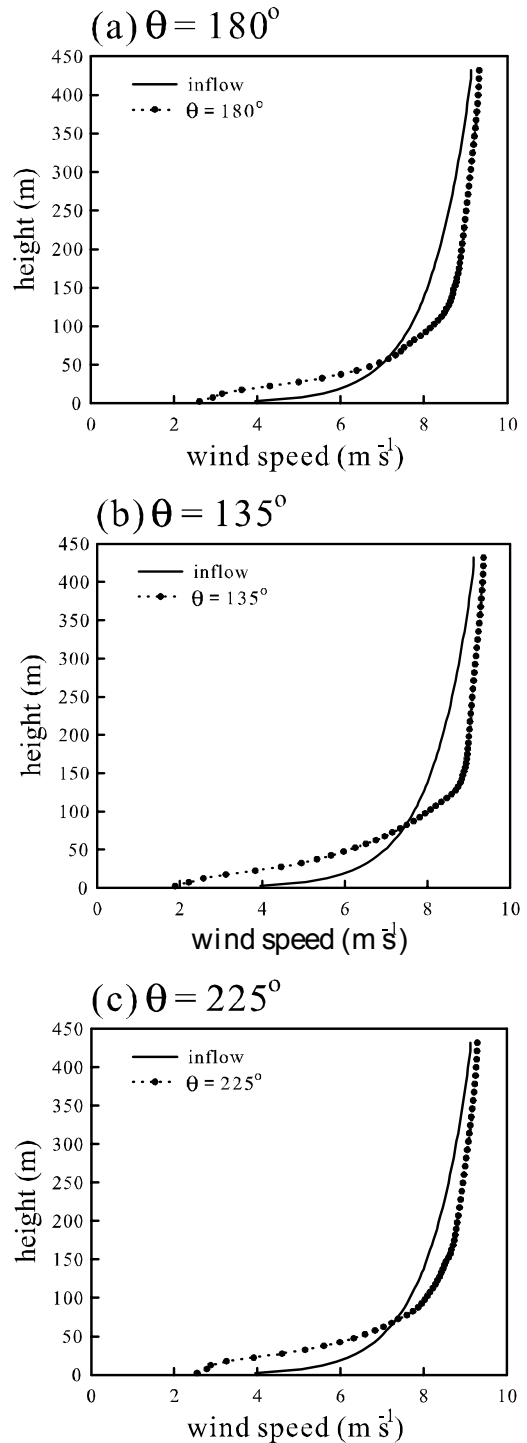


Fig. 6. Vertical profiles of wind speed averaged over the whole model domain in the cases of (a) $\theta = 180^\circ$, (b) $\theta = 135^\circ$, and (c) $\theta = 225^\circ$.

하지만, 하층에서는 건물에 의한 끌림 현상 때문에 풍속이 감소하고 상층에서는 하층의 풍속 감소를 보상하기 위해 풍속이 증가하는 것을 볼 수 있다. 건물 높이나 배치 등이 같더라도 유입류의 풍향에 따라 하층의 풍속 감소율이나 상층의 풍속 증가율이 달라진다. 이는 유입류의 풍향이 복잡한 도시 지역의 흐름장 형성과 이에 따른 오염 물질 수송의 결정에 중요한 영향을 미침을 보여준다. Fig. 7a는 지면으로부터 첫번째 고도 ($z = 2.5$ m)에서 모사된 바람 벡터장이다. 건물이 드물게 존재하는 계산 영역의 동북쪽에서 풍속과 풍향은 유입류(주변 바람)의 풍향과 큰 차이를 보이지 않는다. 종로, 청계천로 그리고 을지로 등 동서 방향으로 뻗어 있는 큰 도로를 따라서 부는 바람의 경우 풍향은 크게 바뀌지 않았으나 풍하지역으로 갈수록 풍속이 감소하는 것을 볼 수 있다. 큰 도로 사이의 건물이 밀집한 지역에서는 풍속이 크게 감소하였을 뿐만 아니라 풍향도 크게 바뀌었음을 알 수 있다. 청계2가 사거리와 을지로2가 사거리 부근에 위치(Fig. 4)한 비교적 높은 건물의 풍상측에서는 유입류의 방향과 정반대의 풍향이 나타나는데 이는 건물의 풍상측 벽면의 정체점(stagnation point) 아래에서 편자 소용돌이(horse-shoe vortex)가 생성됨에 따른 것이다. 특히 청계천로와 을지로 사이의 서쪽에 위치한 건물(계산 영역에서 가장 높은 건물)의 풍상측에서 강한 편자 소용돌이가 형성되었음을 확인할 수 있다. 그리고 질량 보존을 만족시키기 위해 건물 양 옆으로 강한 바람이 불고 있음을 알 수 있다.

오염 물질이 배출되는 고도 ($z = 17.5$ m)에서 조사한 바람 벡터장(Fig. 7b)을 보면 건물에 의한 건물 풍하측에서의 풍속 감소 효과를 확인할 수 있다. 특히 높은 건물이 밀집되어 있는 을지로 남쪽의 건물 풍하측에서 풍속 감소가 현저하게 나타남을 볼 수 있다. 그리고 비교적 높은 건물의 풍상측에서는 건물에 의한 가로막힘으로 인해 풍속이 현저하게 감소하고 건물 주위에서는 질량 보존을 만족시키기 위해 강한 바람이 발생되고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 오염 물질 배출을 고려한 후 1시간 동안의 $z = 2.5$ m에서 오염 물질 농도 분포를 상용 로그 규모로 나타낸 것이다. $t = 0 - 1800$ 초까지는 오염 물질이 배출되고 $t = 1800$ 초 이후에는 오염 물질 배

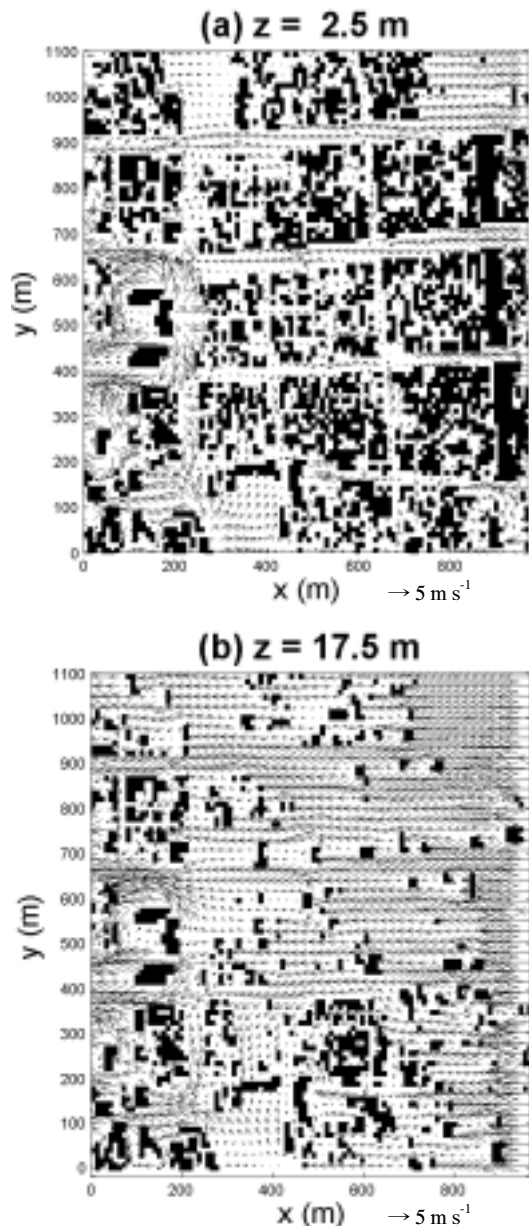


Fig. 7. Wind vector fields at (a) $z = 2.5$ m and (b) $z = 17.5$ m at $t = 4800$ sec in the case of easterly ambient-wind.

출이 없다. 오염 물질 배출 시작 600초 후의 농도 분포(Fig. 8a)를 보면 상층 오염원($z = 17.5$ m)으로부터 배출된 오염 물질이 점차 풍하측과 하층으로 수송되는데 남북 방향으로 길게 위치한 건물(대림상가)의 풍하측에서 오염 물질 농도가 높게 나타난다.

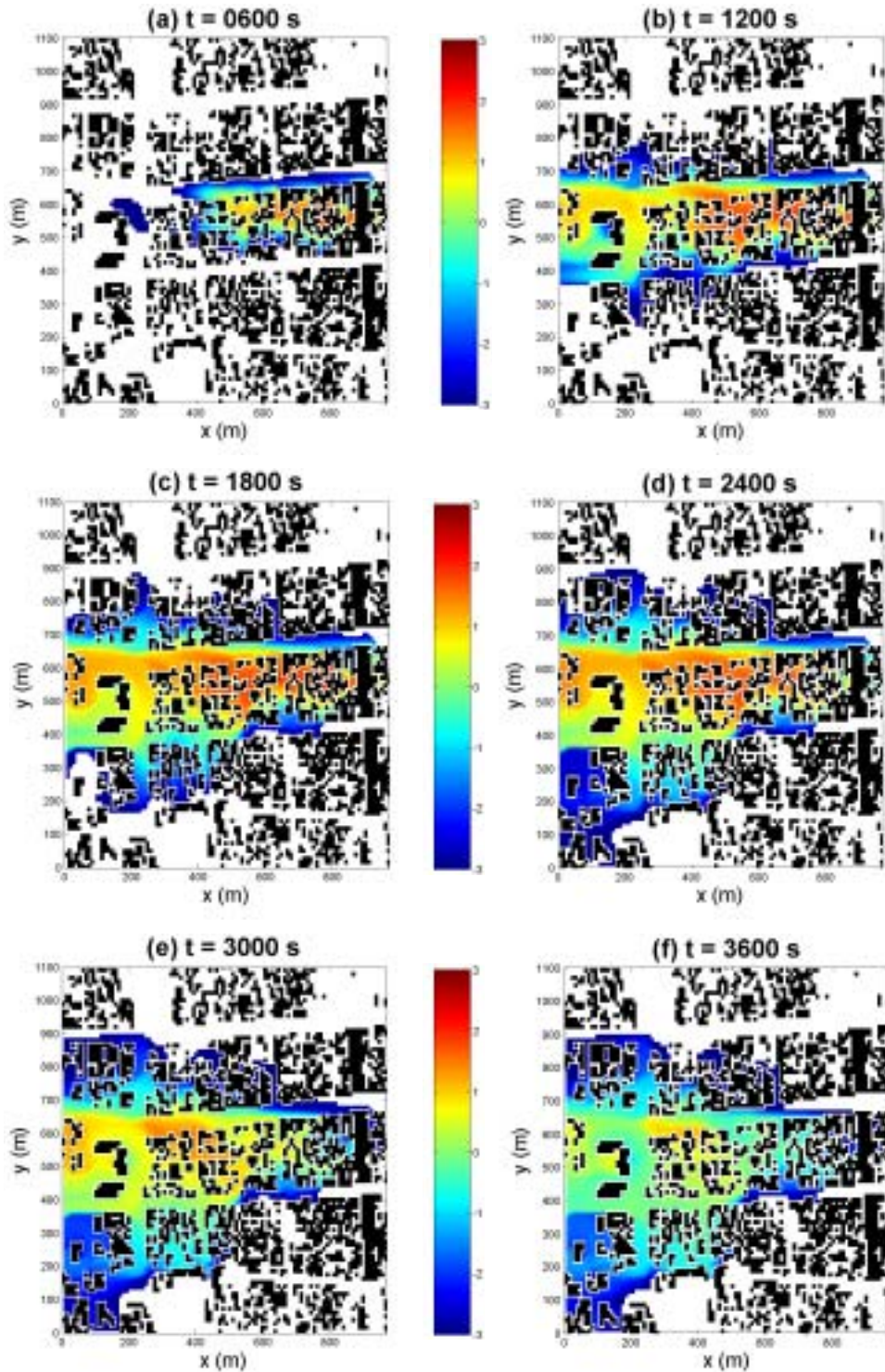


Fig. 8. Pollutant concentration fields (log scale in base 10) at $z = 2.5$ m at $t =$ (a) 600 s, (b) 1200 s, (c) 1800 s, (d) 2400 s, (e) 3000 s, and (f) 3600 s since pollutant release starts in the case of easterly ambient-wind.

오염 물질 배출이 진행되는 동안에는 이 건물의 풍하측에서 농도가 높게 나타났다 (Figs. 8a, 8b, 8c). 이 지역은 건물이 매우 밀집되어 있어서 풍속이 매우 작고 (Fig. 7a) 그림으로 나타내지는 않았지만 난류 운동 에너지와 난류 확산 계수도 매우 작기 때문에, 일단 유입된 오염 물질의 탈출이 용이하지 않기 때문으로 사료된다. 그러나 배출이 멈춘 후에는 오염원으로부터의 오염 물질 유입이 차단되어 이 지역에서의 농도가 감소하기 시작하면서 높은 농도가 나타나는 지역도 점차 풍하측으로 이동함을 알 수 있다 (Figs. 8d, 8e, 8f). 시간이 지남에 따라 오염 물질은 계산 영역의 서쪽 경계까지 수송되고 남북 방향으로의 수송도 점차적으로 증가한다. 오염원의 위치를 기준으로 했을 때 북쪽보다는 남쪽으로의 오염 물질 수송이 빠르게 진행되는데, 이는 하층에서 북풍 계열보다는 남풍 계열의 바람이 강하게 나타나기 때문이다 (Fig. 7a).

오염원 높이에서의 오염 물질 농도 분포 (Fig. 9)를 보면 배출이 진행되는 동안 오염원 지역에서 최고 농도가 나타난다. 이 때 오염원으로부터 가까운 풍하측 지역 ($x > 500$ m)에서는 비교적 높은 건물이 존재하지 않기 때문에 건물에 의한 바람장의 뒤틀림도 적어서 x 의 변화에 따른 지점별 최고 오염 농도는 오염원과 같은 위치 (y)에서 나타난다. 그러나 $x < 500$ m 지역에서는 건물에 의한 바람의 뒤틀림 현상이 점차 강화되면서 지점별 최고 오염 농도가 나타나는 위치는 오염원 위치에서 이탈함을 알 수 있다. 지면 근처 (Fig. 8)에서와 마찬가지로 시간이 지남에 따라 남북 방향으로의 오염 물질의 난류 확산이 활발하게 진행되며 배출이 멈춘 후에는 오염 물질 농도가 높게 나타나는 지점도 풍하측으로 이동한다. 건물의 풍하측 후면에서는 풍속이 매우 감소하는 재순환 (recirculation) 지역이 형성되면서 (Fig. 7b) 그곳에서 오염 물질의 농도가 높게 나타난다.

5.2 남동풍이 부는 경우 ($\theta = 135^\circ$)

Fig. 10a는 $z = 2.5$ m에서의 바람 벡터장이다. 동쪽 경계 부근의 종로, 청계천로 그리고 을지로에서는 유입류의 방향이 남동쪽임에도 불구하고 바람이 건물에 부딪힌 후 방향이 바뀌면서 동풍 계열의 바

람이 부는 것을 볼 수 있다. 이 바람은 풍하측으로 가면서 속도가 감소한다. 동풍이 부는 경우와 마찬가지로 건물이 밀집한 지역에서는 풍속이 크게 감소할 뿐 만 아니라 풍향도 크게 바뀌었음을 알 수 있다. 청계천2가 사거리와 을지로 2가 사거리 사이에 위치하는 높은 건물 주변의 풍속이 크게 증가하였고 $x \sim 250$ m 지점의 남쪽 경계 부근에서도 풍속이 크게 증가하였다. 바람이 높은 건물에 부딪히는 경우 하층에서는 공기가 건물을 넘어가지 못하고 돌아가야 하기 때문에 풍속이 크게 증가함을 볼 수 있다.

$z = 17.5$ m에서의 바람 벡터장 (Fig. 10b)을 보면 건물에 의한 건물 풍하측에서의 바람 감소 효과를 확인할 수 있다. 특히 높은 건물이 밀집되어 있는 을지로2가와 을지로3가 사이의 남쪽 일부 지역 ($250 \text{ m} < x < 400 \text{ m}$)에서는 풍속이 현저하게 감소함을 볼 수 있다. 이와 대조적으로 남쪽 경계 부근에 위치한 높은 건물 ($x \sim 250$ m 지점) 주위로 강한 바람이 불고 있고 청계천로와 을지로의 서쪽 경계 부근에서는 강한 동풍 계열의 바람이 불고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 $z = 2.5$ m에서의 오염 물질 농도 분포이다. 배출 시작 600초 후의 농도 분포 (Fig. 11a)를 보면 상층 오염원 ($z = 17.5$ m)으로부터 배출된 오염 물질이 점차 풍하측과 하층으로 수송되는데 배출이 진행되는 동안 오염원 풍하측의 약 400 m 지점에서 최고 농도가 나타난다. 그러나 동풍이 부는 경우 (Fig. 8)에 비해 최고 농도가 감소하였다. 시간이 지나면서 오염 물질은 이류와 난류확산에 의해 풍하측과 측면으로 수송되는데, 유입류의 방향을 기준으로 했을 때 비교적 높은 건물이 많이 존재하는 서남쪽 방향의 측면 난류확산이 동북쪽 방향의 측면 난류확산보다 더 활발하게 일어난다. 이는 그림으로 나타내지는 않았지만 높은 건물에 의한 난류 발생이 보다 활발하게 일어나고 이에 의한 오염 물질의 난류 속이 증가하였기 때문이다.

Fig. 12는 $z = 17.5$ m에서의 오염 물질 농도 분포이다. 배출이 진행되는 동안 오염원 지역에서 최고 농도가 나타난다. 남동풍이 부는 경우에 오염원으로부터 배출된 오염 물질이 수송되는 경로 주변의 건물 높이는 동풍이 부는 경우에 비해 상대적으로 낮다. 따라서 배출이 멈춘 후 오염 물질의 수송이 빠르게 진행되면서 동풍이 부는 경우 (Fig. 9)와 비교했

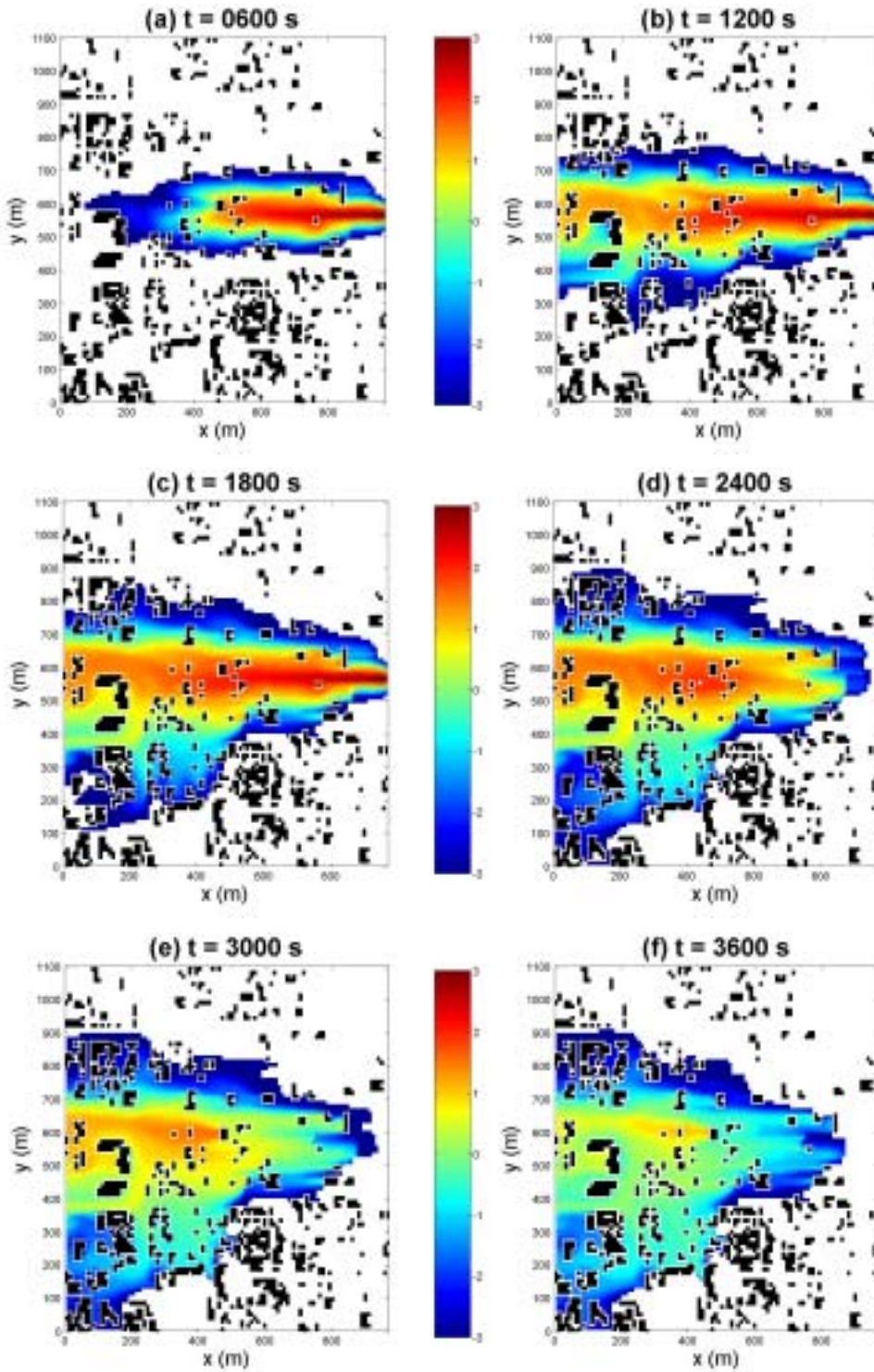


Fig. 9. Pollutant concentration fields (log scale in base 10) at $z = 17.5$ m at $t =$ (a) 600 s, (b) 1200 s, (c) 1800 s, (d) 2400 s, (e) 3000 s, and (f) 3600 s since pollutant release starts in the case of easterly ambient-wind.

을 때 오염 물질의 최고 농도가 빠르게 감소하고 오염 물질의 측면 난류확산도 상대적으로 좁게 일어난다. 그러나 높은 건물 밀집 지역의 풍하측(을지로2가와 을지로2가 사이의 남쪽 지역)에서는 풍속이 매우 약하기 때문에 (Fig. 10b) 배출이 멈춘 후에도 상

당 시간 동안 비교적 높은 오염 물질 농도가 나타난다 (Figs. 12e, 12f).

5.3 북동풍이 부는 경우 ($\theta = 225^\circ$)

Fig. 13a는 북동풍이 부는 경우 $z = 2.5$ m에서의 바람 벡터장이다. 건물이 없는 종로시민공원 (계산 영역의 북동쪽) 부근에서는 건물에 의한 바람의 뒤틀림이 없기 때문에 북동풍이 분다. 그러나 동쪽 경계 부근의 종로, 청계천로 그리고 을지로에서는 남동풍이 부는 경우와 마찬가지로 유입류가 북동풍이지만 바람이 건물에 부딪힌 후 방향이 바뀌면서 동풍 계열의 바람이 분다. 앞에서 살펴본 두 경우와 마찬가지로 건물이 밀집한 지역에서는 풍속이 크게 감소할 뿐 만 아니라 풍향도 크게 바뀐다. 청계천로와 을지로 서쪽 경계 부근의 높은 건물 주변의 풍속이 역시 크게 증가하였다. 이 건물의 하층에 강한 편차 소용돌이가 형성되었음을 확인할 수 있고 또한 이 건물 주변에서 풍속이 강함을 알 수 있다. $z = 17.5$ m에서의 바람 벡터장 (Fig. 13b)을 보면 건물에 의한 바람 감소 효과 때문에 북동쪽에서 계산 영역 중심에 가까이 올수록 풍속이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14는 $z = 2.5$ m에서의 오염 물질 농도 분포이다. 이류와 난류확산에 의해 풍하측으로 수송되는 오염 물질이 종로 남쪽의 건물 밀집 지역에 유입되면서 이 지역에서 오염 물질 농도가 높게 나타난다. 또한 오염 물질이 종로를 통과할 때 종로를 따라 부는 바람에 의해 측면(서쪽)으로의 수송이 활발해진다. 1800초 이후의 오염 물질 농도 분포를 보면, 을지로 남쪽의 서쪽 경계 부근에 위치한 건물의 풍하측에서 오염 물질 농도가 이 건물 풍상측보다 오히려 높게 나타난다. 이는 오염 물질이 건물 풍하측에 형성된 재순환 지역에 갇혀서 빠져 나오지 못한 결과로 사료된다.

$z = 17.5$ m에서의 오염 물질 농도 분포 (Fig. 15)를 보면 오염 물질이 배출되는 동안 최고 농도는 오염원 근처에서 나타나다가 배출이 중단된 이후에는 최고 농도 지역이 풍하측으로 이동하고 있으며 높은 건물이 위치한 지역에서 오염 물질 농도가 상대적으로 높게 나타나고 있다.

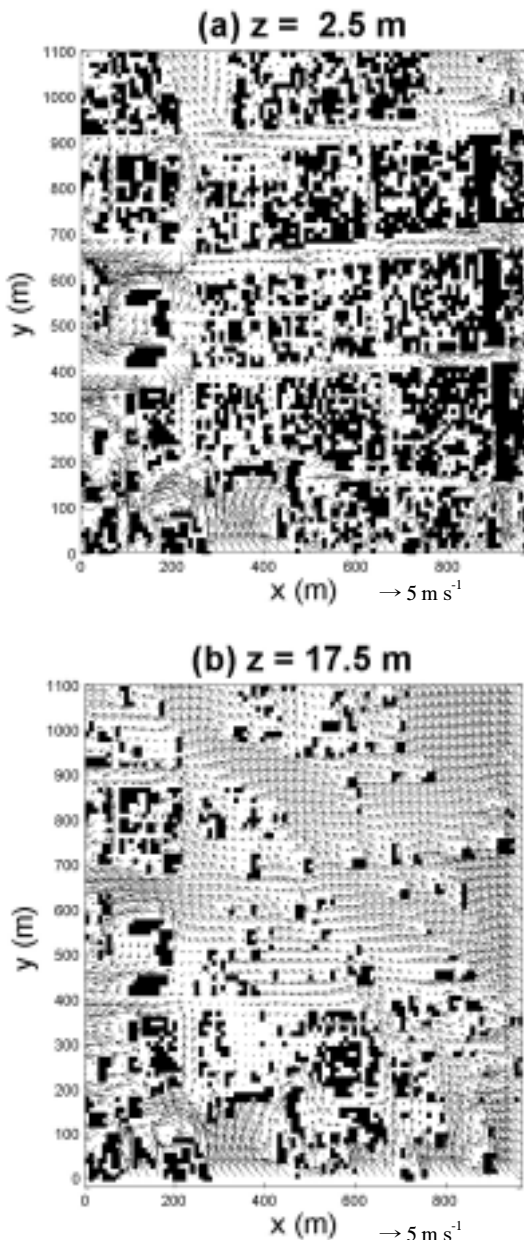


Fig. 10. The same as in Fig. 7 except for southeasterly ambient-wind.

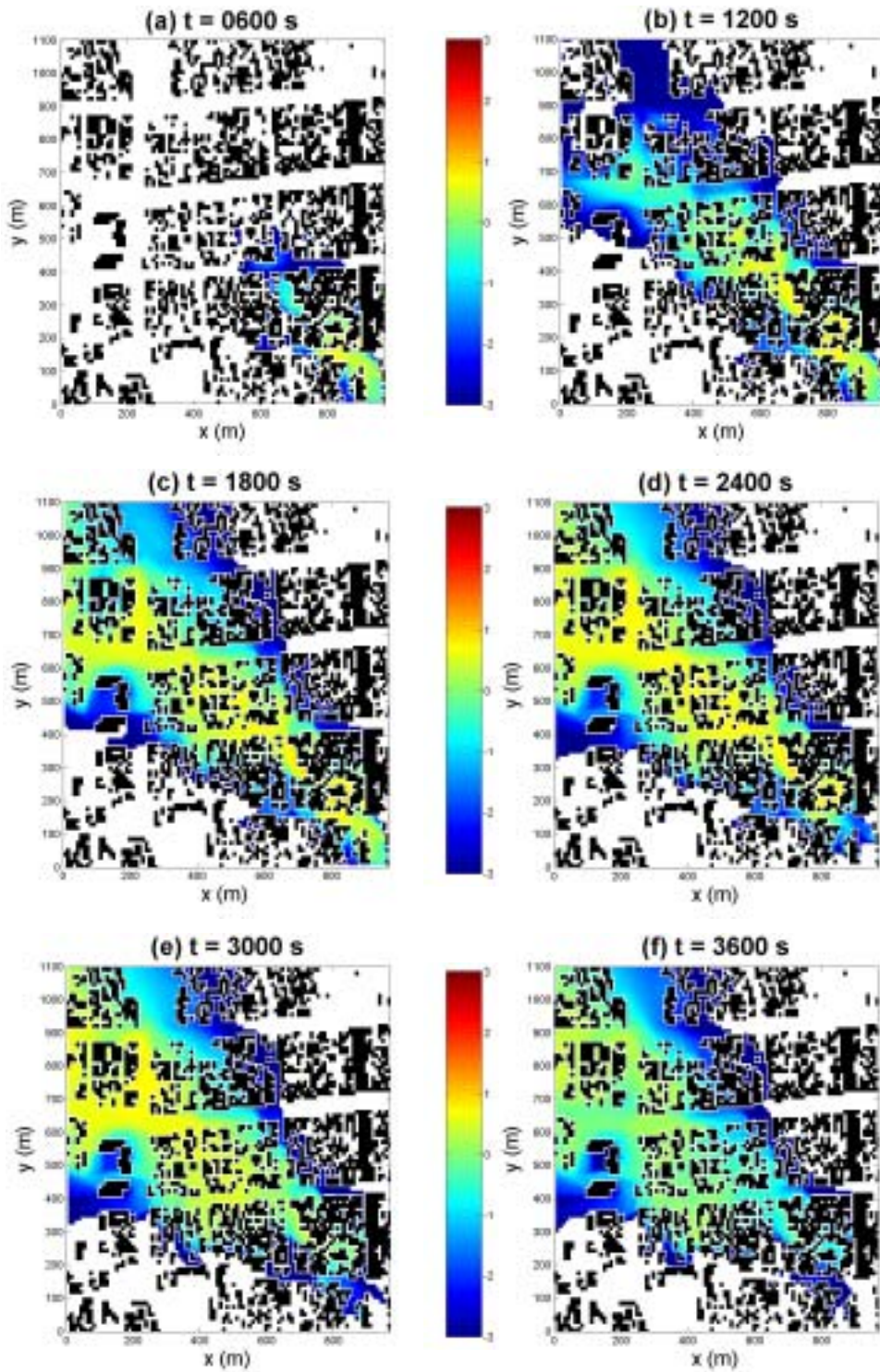


Fig. 11. The same as in Fig. 8 except for southeasterly ambient-wind.

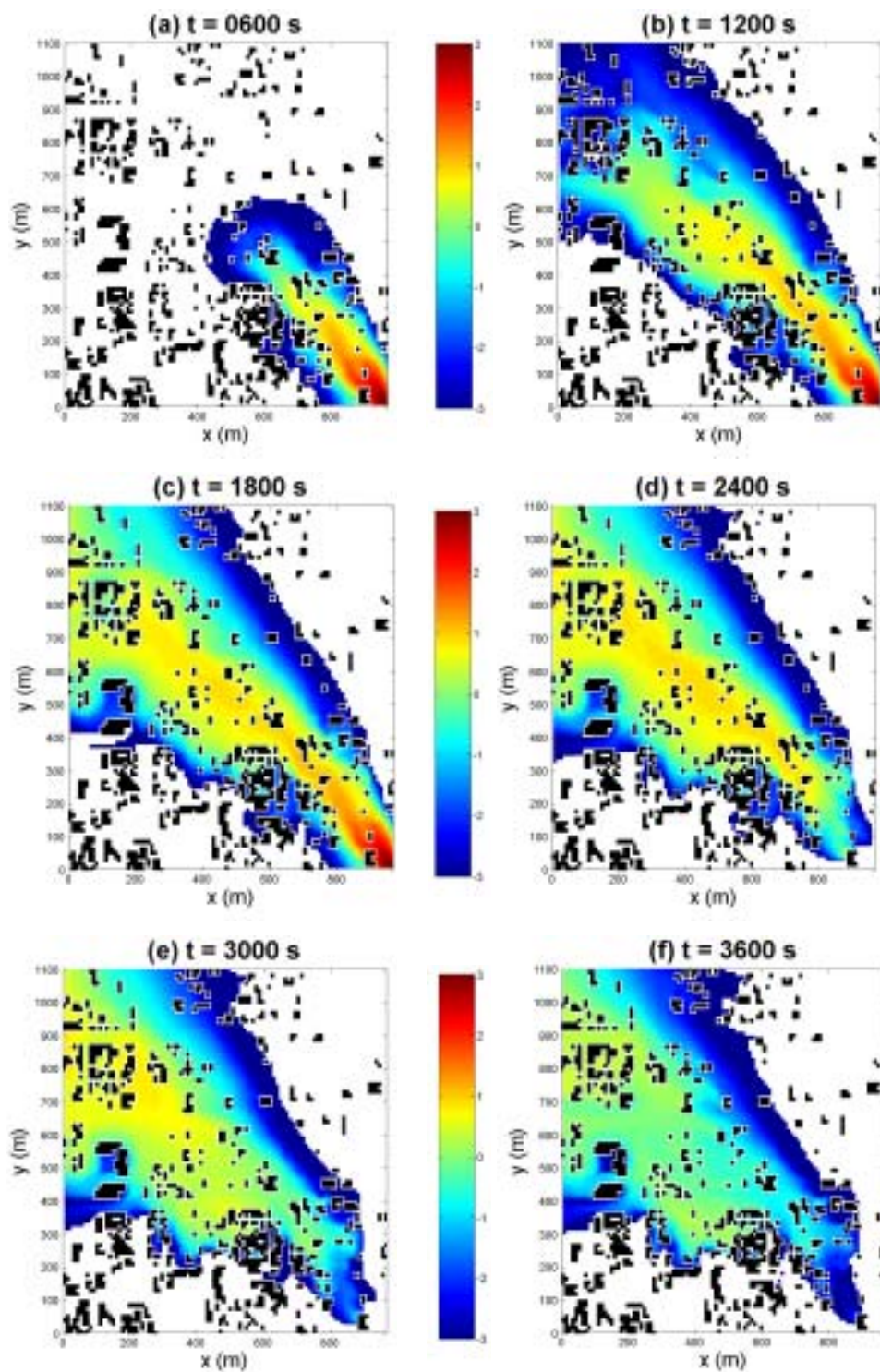


Fig. 12. The same as in Fig. 9 except for southeasterly ambient-wind.

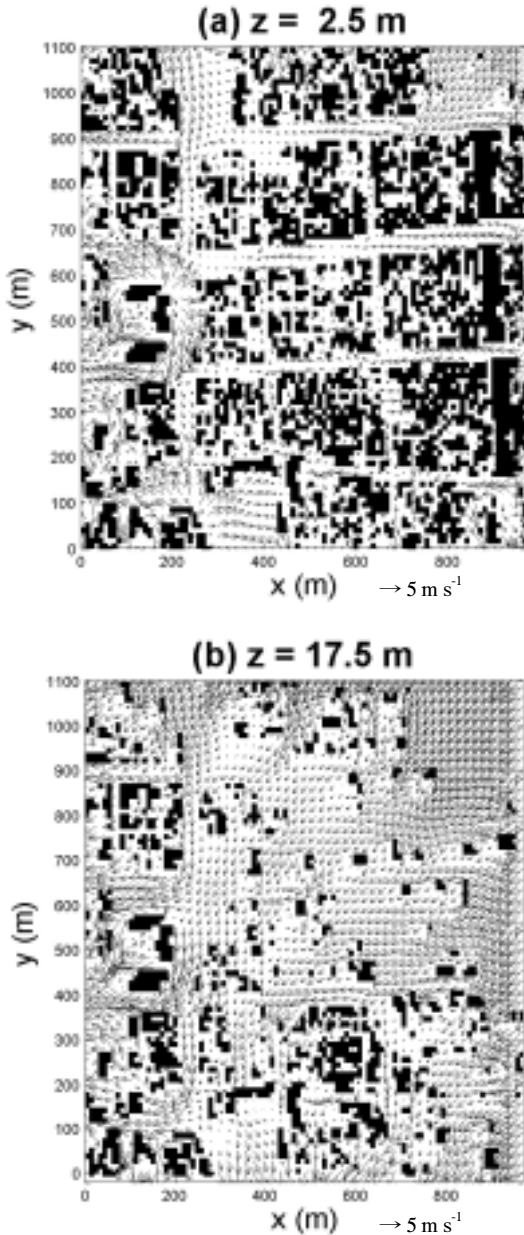


Fig. 13. The same as in Fig. 7 except for northeasterly ambient-wind.

6. 요약 및 결론

계산 유체 역학 모형을 이용하여 서울 도심 지역에서의 흐름과 오염 물질 분산을 조사하였다. 주변 바람의 방향이 동풍, 남동풍 그리고 북동풍인 경우

에 대하여 수치 실험을 수행하였다. 건물에 의해 풍속 및 풍향이 크게 바뀔 수 있었다. 특히 건물이 밀집한 지역에서는 풍속의 감소가 뚜렷하였고 종로, 청계천로, 을지로와 같은 큰 도로에서는 유입되는 바람의 방향과 관계 없이 주로 동풍이 불었으며 계산 영역 중심으로 들어오면서 풍속이 크게 감소하였다. 고층 건물의 풍상측에서 비교적 강한 강도를 갖는 편자 소용돌이가 형성됨을 확인할 수 있었고 질량 보존을 만족시키기 위해 이 건물의 옆으로 강한 바람이 부는 것을 확인할 수 있었다.

오염원으로부터 배출된 오염 물질의 최고 농도는 배출이 진행되는 동안은 오염원 부근의 건물 뒤에 형성되는 재순환 지역에서 주로 나타났다. 이는 재순환 지역으로 유입된 오염 물질의 탈출이 용이하지 않기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 배출이 멈춘 후에는 더 이상의 오염 물질이 유입되지 않으면서 최고 오염 물질 농도가 나타나는 지점도 점차 풍하측으로 이동하였다. 시간이 흐르면서 오염 물질은 이류와 확산에 의해 풍하측 지역으로 수송될 뿐 만 아니라 측면 방향으로의 수송도 이루어졌다. 그리고 비교적 높은 건물이 많은 지역에서는 측면으로의 난류확산이 더욱 활발하게 나타났다. 이는 높은 건물일수록 강한 난류를 발생시키기 때문으로 사료된다.

본 연구에서는 건물이 밀집되어 있는 도심 지역에서 주변 풍향이 바람장과 오염 물질 확산에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 유입 조건이 적분 시간 동안 변화하지 않는다고 가정하였고 화학 반응을 하지 않는 스칼라를 고려하였다. 현재 중규모 기상 모형과 계산 유체 역학 모형 접합 기술을 개발하고 있고 또한 화학 반응을 포함한 계산 유체 역학 모형을 개발하고 있다. 개발한 (개발 중인) 계산 유체 역학 모형은 수치 모사를 통한 유체 현상의 기본적인 이해뿐만 아니라 환경 영향 평가 등을 포함한 여러 목적에 유용하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 기상연구소 “전산 유체 역학 모형 개발 및 이를 이용한 도시 지역 상세 기상 예측” 연구 과제와 한국과학재단에서 지원하는 SRC/기후환경연

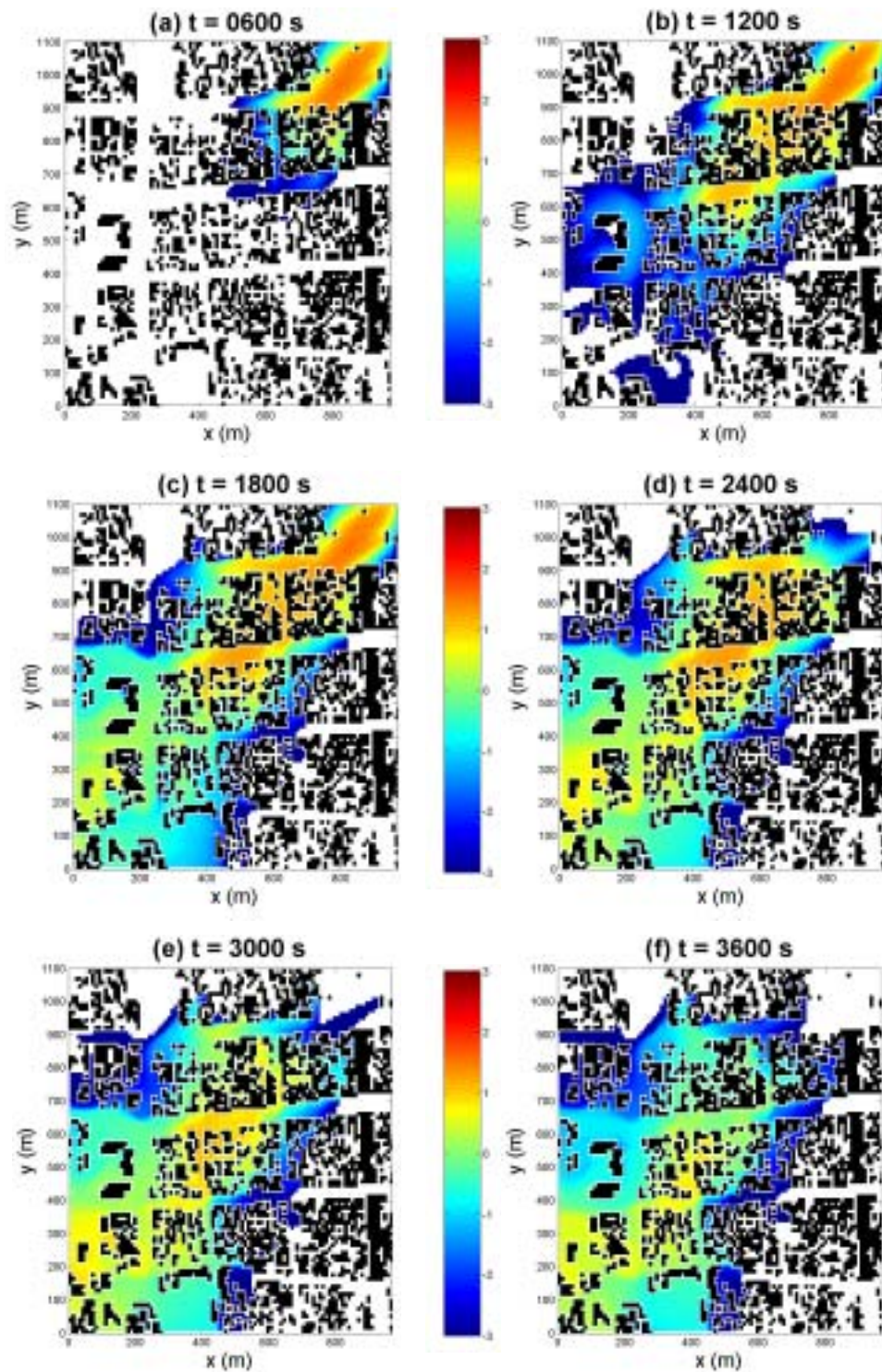


Fig. 14. The same as in Fig. 8 except for northeasterly ambient-wind.

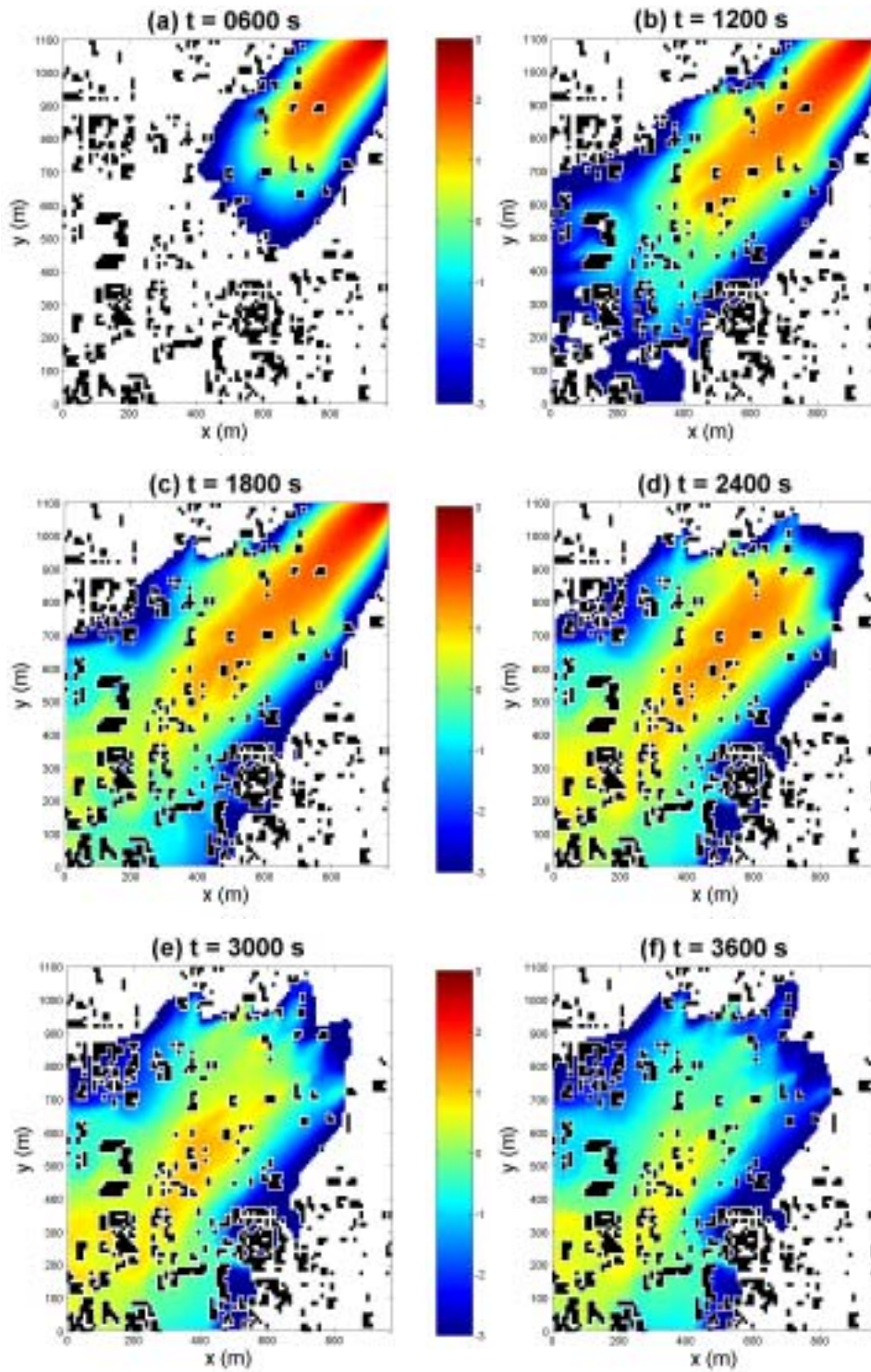


Fig. 15. The same as in Fig. 9 except for northeasterly ambient-wind.

구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 노의근, 2001: 난류론, pp 103-110. 시그마프레스.
- 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.
- _____, 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.
- _____, J.-J. Kim, and H. J. S. Fernando, 2003: A CFD model for simulating urban flow and dispersion. *J. Appl. Meteor.*, **42**, 1636-1648.
- 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 Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA*, Long Beach, CA, U.S.A., 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.
- 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.
- DePaul, F. T., and C. M. Sheih, 1985: A tracer study of dispersion in an urban street canyon. *Atmos. Environ.*, **19**, 555-559.
- _____, and _____, 1986: Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmos. Environ.*, **20**, 455-459.
- Forster, D., D. R. Nelson, and M. J. Stephen, 1977: Large distance and long time properties of a randomly stirred field. *Phys. Rev. A* **16**, 732-749.
- 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.
- _____, and _____, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating. *Atmos. Environ.*, **35**, 3395-3404.
- _____, and _____, 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.
- _____, and _____, 2005: 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, I. Y., and H. M. Park, 1994: Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. *Atmos. Environ.*, **28**, 2343-2349.
- 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. *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. Aerodyn.*, **62**, 37-56.
- Nakamura, Y., and T. R. Oke, 1988: Wind, temperature, and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.*, **22**, 2691-2700.
- Patankar, S. V., 1980: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, New York.
- 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.
- Smith, L. M., and W. C. Reynolds, 1992: On the Yakhot-Orszag renormalization group method for deriving turbulence statistics and models. *Phys. Fluids*, **A4**, 364-390.
- 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.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman, Malaysia.
- Yakhot, V., and S. A. Orszag, 1986: Renormalization group analysis of turbulence. *J. Sci. Comp.*, **1**, 3-51.
- _____, _____, 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.
- _____, L. M. Smith, 1992: The renormalization group, the ϵ -expansion and derivation of turbulence models. *J. Sci. Comp.*, **7**, 35-61.