한국대기환경학회지 제 21 권 제 5 호
J. KOSAE Vol. 21, No. 5 (2005) pp. 525~535
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

CFD 모형을 이용한 도시 도로 협곡에서의 흐름 체계 분류

Classification of Flow Regimes in Urban Street Canyons Using a CFD Model

김 재 진[a] · 백 종 진[1),*]
서울대학교 기후환경시스템연구센터
[1)]서울대학교 지구환경과학부
[a]현주소 : 기상청 수치예보과

(2005년 7월 7일 접수, 2005년 10월 6일 채택)

Jae-Jin Kim[a] and Jong-Jin Baik[1),*]
Climate Environment System Research Center, Seoul National University, Seoul, Korea
[1)]*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*
[a]*Current affiliation : Numerical Weather Prediction Division, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea*

(Received 7 July 2005, accepted 6 October 2005)

Abstract

Using a three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model with the $k-\varepsilon$ turbulence closure scheme based on the renormalization group theory, flow regimes in urban street canyons are classified according to the building and street aspect ratios. The transition between skimming flow (SF) and wake interference flow (WIF) is determined with the size of double-eddy circulation generated behind the upwind building. The transition between WIF and isolated roughness flow (IRF) is determined with the flow reattachment distance from the upwind building. The critical aspect ratios at which the flow transition occurs are found and compared with those in previous studies. The results show that the flow-regime classification method used in this study is quite reasonable and that the values of the critical aspect ratios are generally consistent with those in fluid experiments or large-eddy simulation. The regression equation describing a relation between the building and street aspect ratios at the flow-regime transition is presented.

Key words : CFD model, Flow regime, Urban street canyon, Double-eddy circulation, Flow reattachment

1. 서 론

지난 수 십년 동안 진행되어온 도시화와 산업화는 주거 형태나 생활 방식에 큰 변화를 가져왔다. 도시로의 인구 이동이 가속화 되었고 도시 지역의 인구 밀도와 차량 운행 빈도가 현저하게 증가하였다. 그리고 경제 수준과 생활 수준이 높아지면서 양적 성장에 주력하였던 과거와는 달리 보다 안정적인 주거 환경을 추구하는 등 삶의 질적인 향상에 큰 관심을

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2-880-6990, E-mail : jjbaik@snu.ac.kr

쏟고 있다. 건물을 지을 때에도 그 건물의 건설이 주변 환경(통풍 환경, 조망권, 일사권 등)에 미치는 영향을 고려하는 노력을 기울이고 있다. 특히 대단위 주거 단지나 공업 단지를 조성할 경우에는 날씨 및 기후의 지역적인 특성을 고려한 단지의 설계를 통하여 바람길을 최대한 확보하는 등 주거 환경의 최적화를 도모하고 있다. 또한 위해 물질의 위험성을 조사하는 환경 영향 평가를 통하여 예기치 않은 대형 화재나 생화학적 공격으로부터 인명과 재산을 보호하는데 관심을 기울이고 있다. 이와 같은 관심 사안을 실현하고자 도시 지역에서의 흐름과 확산 특성을 규명하려는 연구가 지난 20년 동안 활발하게 진행되어 체계적이고 이론적인 기반을 마련하여 왔다.

도시 지역에서의 흐름과 확산에 대한 연구는 크게 야외 관측(Rotach, 1995; Nakamura and Oke, 1988; DePaul and Sheih, 1986), 풍동과 수조를 이용하는 실험(Kim and Baik, 2005; Brown *et al.*, 2000; Baik *et al.*, 2000; Uehara *et al.*, 2000; Meroney *et al.*, 1996), 그리고 수치 모사(Baik and Kim, 2002, 1999; Kim and Baik, 2001, 1999; Kim *et al.*, 2001; Sini *et al.*, 1996; Lee and Park, 1994)로 연구가 수행되어 왔다. 야외 관측은 실제 상황에서 흐름과 확산을 파악한다는 점에서 가장 현실적인 방법이긴 하지만 비용이 많이 들고 주어진 주변 조건(유입 바람장과 건물 구조 및 배치) 때문에 다른 상황으로의 직접적인 적용이 어렵다는 한계를 갖는다. 수치 모형을 이용한 연구는 비용이 적게 들고 다양한 주변 조건에도 적용할 수 있는 방법이다. 그러나 기존의 기상 모형은 개개 건물을 고려할 수 없다는 한계를 가지고 있다. 따라서 건물이 밀집되어 있는 도심 지역에서의 대기 환경 문제를 해결하는데 기상 모형을 직접적으로 적용하기는 어렵다.

개개 건물의 영향과 작은 규모의 대기 운동을 효과적으로 고려할 수 있는 방법은 계산 유체 역학(computational fluid dynamics, CFD) 모형을 이용하는 것이다. CFD 모형은 작게는 수 미터, 크게는 수 킬로미터의 대기 운동을 수치 모사할 수 있기 때문에 도시 지역에서의 흐름과 확산 연구에 많이 이용되어 왔다. 특히 911 참사 이후에는 사람들이 매우 붐비는 도심 지역이나 경기장 주변에서 자행될 수 있는 가상적 생화학적 테러 상황에 대비해서 CFD 모형을 이용하여 각각의 시나리오에 대한 대응 방안을 마련하고 피해를 극소화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 CFD 모형은 최근에 부각되고 있는 새집증후군이나 작업장환경 등 실내 대기 환경 문제를 해결하고 지하철 화재 발생시의 대처 방안을 마련하는데 이용될 수 있다.

하지만 계산 능력과 초기 자료의 제약 때문에 대형 화재로 인한 유독 가스의 방출이나 테러리스트에 의한 생화학 공격 등 실제 비상 사태가 발생하였을 때 CFD 모형을 이용하여 즉각적인 대응 방안을 수립하는 것은 거의 불가능하다. 또한 대기 오염 물질이나 유해 물질의 중·장거리 수송을 수치 모의할 경우에도 개개 건물을 직접적으로 반영하기는 매우 어렵다. 따라서 도시 지역에서의 흐름과 확산에 결정적인 요소인 건물에 의한 효과를 적절하게 모수화하고 주어진 조건(주변 풍향, 건물 외관비 등)에서의 대기 흐름이나 이에 의한 오염/유해 물질의 수송 특성을 가늠할 수 있어야만 실제 상황에서 즉각적인 대응이 가능하다. 본 연구는 유체역학적인 관심사와 함께 이와 같은 취지에서 시작한 것으로 여기서는 도시 도로 협곡에서의 흐름을 결정하는 주요 요소 중의 하나인 외관비에 따른 흐름 체계를 분류하고자 한다.

2. 흐름 체계 분류 방법

도시 도로 협곡에서의 흐름을 결정하는 주요 요소에는 기하학적 요소, 기상학적 요소, 열적 요소 그리고 지형적 요소 등이 있다. 도시 도로 협곡에서의 흐름에 영향을 미치는 기하학적인 요소 중에서 가장 대표적인 것이 도시 도로 협곡의 높이와 너비의 비로 정의되는 외관비이다. 도시 도로 협곡에서는 크게 3가지의 흐름 체계 [isolated roughness flow (IRF), wake interference flow (WIF), skimming flow (SF)]가 관측된다. 흐름 체계는 건물 길이와 협곡 높이의 비, 건물 높이와 건물 간 너비의 비 그리고 풍상측과 풍하측 건물 사이에 형성된 소용돌이와 흐름 재부착(flow reattachment) 유무에 의해 분류된다(Hunter *et al.*, 1992; Hunter *et al.*, 1990-91; Oke, 1988). IRF는 도시 도로 협곡의 너비가 충분히 넓을 때 형성된다. 이 흐름 체계에서는 풍상측 건물 뒤에서 형성된 소용돌이와 풍하측 건물 전면에 형성된 편자 소용돌이

(horse-shoe vortex) 사이의 상호 작용이 일어나지 않고 흐름 재부착이 일어나서 풍상측 건물에 의해 교란되기 전의 상태로 흐름이 재조정된다. WIF는 건물 사이의 너비가 충분히 넓지 못할 때에 형성된다. 이 경우에는 흐름 재부착이 일어나기 전에 풍하측 건물에 의해 흐름이 교란되며 풍상측 소용돌이와 편자 소용돌이 사이의 상호 작용이 일어난다. SF는 건물 간 너비가 충분히 좁아서 소용돌이가 도시 도로 협곡 내부에 완전히 갇혀 있는 흐름을 말한다.

도시 도로 협곡에서의 흐름 체계를 분류하는 방법에는 두 가지가 있다. 첫 번째 방법은 Hussain and Lee (1980)가 사용한 방법으로 풍상측과 풍하측 건물 벽에서의 압력 계수를 측정하여 외관비에 따른 압력 계수의 변화 경향으로부터 흐름 체계를 분류하는 방법이다. 이 때 압력 계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = \frac{\frac{1}{H}\int_0^H P dz}{\frac{1}{2}\rho U_H^2} \tag{1}$$

여기서 ρ는 공기 밀도, H는 도시 도로 협곡의 높이, U_H는 H에서의 평균 풍속 그리고 P는 압력 편차이다. SF에서는 협곡의 공간이 넓어짐에 따라 두 벽면에서의 압력 계수가 감소한다. WIF에서는 협곡이 점점 더 넓어지면서 풍상측 벽에서는 압력 계수가 감소한다. 주변 바람과 협곡 바람이 분리된 SF와는 달리 주변 바람이 풍하측으로 접근함에 따라 협곡 내부로 침투하게 되고 풍하측 건물에 부딪히면서 풍하측 벽에서의 역학적 압력이 증가한다. 이런 이유로 풍하측 벽에서는 압력 계수가 증가한다. IRF에서는 협곡이 넓어짐에 따라 두 벽면에서의 압력 계수가 모두 감소한다.

흐름 체계를 분류하는 두 번째 방법은 Hunter *et al.* (1992)이 제안한 방법이다. 그들은 도시 도로 협곡에서 형성되는 이중 에디 순환의 크기가 일정 정도의 크기로 제한된다는 가정 하에서 흐름 체계를 분류하였다. 즉, 이중 에디 순환의 크기는 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지 거리의 두 배라고 가정하였다(그림 1a). 이 방법에 의하면 SF에서 WIF로의 전이가 일어날 때의 외관비는 도시 도로 협곡의 높이와 이중 에디 순환 크기의 비가 된다. 그

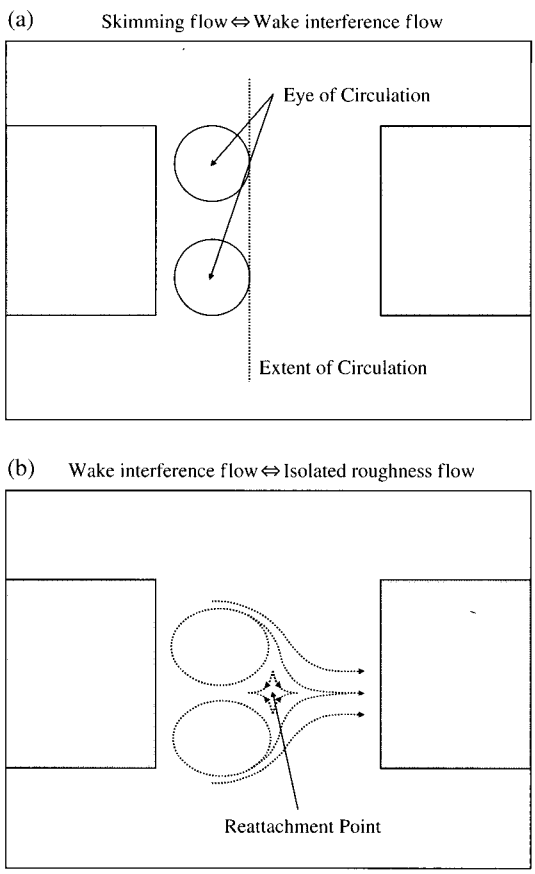

Fig. 1. Schematics for classifying flow regimes in urban street canyons: (a) transition between skimming flow (SF) and wake interference flow (WIF) and (b) transition between WIF and isolated roughness flow (IRF).

리고 Hunter *et al.* (1992)은 WIF에서 IRF로의 전이는 $z = 0.45H$에서 조사한 x-y 평면에서의 바람 벡터장에서 바람 방향과 주변 바람 방향과의 차이가 10° 이하인 지점에서 일어난다고 가정하였다.

Hussain and Lee (1980)의 방법은 역학적인 관점에서 흐름 체계를 분류하는 방법이지만 이를 위해서는 건물 높이(H)와 협곡 너비(W)의 비율 뿐만 아니라 건물 높이와 건물 길이(L)의 비율까지도 고려해야 하기 때문에 아주 많은 경우의 도시 도로 협곡에 대한 수치 실험을 수행해야 한다. 또한 WIF와 IRF 사이의 전이에 관한 설명이 여전히 명확하지 못하다는 단점을 가지고 있다. Hunter *et al.* (1992)의 방법은 이

중 에디 순환의 크기가 모든 높이에서 일정하다는 가정에서 출발한다. 그러나 Kim and Baik (2004)의 결과에 따르면 이중 에디 순환은 높이에 따라 그 크기와 중심 위치가 변한다. 그리고 WIF와 IRF 사이의 전이에 대한 설명도 역학적인 근거에 의하지 않았으며 지극히 자의적이다.

따라서 본 연구에서는 계산 시간을 많이 절감하기 위해서 Hunter *et al.* (1992)이 제안한 방법을 사용하되 이를 수정하고 보완하여 흐름 체계를 분류하였다. SF에서 WIF로의 전이는 이중 에디 순환의 크기에 의하지만 고도에 따른 평균한 값을 이용하였다. WIF에서 IRF로의 전이는 풍상측 건물 후면에서 형성되는 재순환 지역(recirculation zone)의 크기와 흐름 재부착이 일어나는 지점을 이용하였다(그림 1b).

3. 수치 모형 및 실험 설계

3.1 지배 방정식과 수치 방법

본 연구에서 사용한 CFD 모형은 Kim and Baik (2004)이 사용한 것과 같다. 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 흐름 계에서 레이놀즈 평균한 운동량 방정식, 질량 연속 방정식은 다음과 같다.

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

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j}=0. \tag{3}$$

여기서 U_i는 i 방향의 평균 속도 성분, P^*는 참고 압력으로부터의 압력 편차이다. u_i는 U_i에 대한 편차, ρ_0은 공기 밀도 그리고 ν는 공기의 동점성 계수이다.

식 (2)에서 레이놀즈 스트레스는 다음과 같이 모수화된다.

$$-\overline{u_iu_j}=K_m\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\delta_{ij}k. \tag{4}$$

위 식에서 K_m은 운동량의 난류 확산 계수, δ_{ij}는 Kronecker 델타 그리고 k는 난류 운동 에너지이다. 재규격화 군 이론에 근거한 k-ε 난류 모형에서 K_m은 다음과 같이 표시된다.

$$K_m=\nu\left(1+\left(\frac{C_\mu}{\nu}\right)^{1/2}\frac{k}{\varepsilon^{1/2}}\right)^2 \tag{5}$$

여기서 C_μ는 경험 상수이고 ε은 난류 운동 에너지 소멸률이다.

본 연구에서 사용한 CFD 모형은 재규격화 군 이론에 근거한 k-ε 난류 모형(Yakhot *et al.*, 1992)을 포함한다. 이 난류 모형이 표준 k-ε 난류 모형과 다른 점은 비선형 응력변형율(strain rate)을 고려하기 위해 난류 운동 에너지 소멸율 방정식에 소실 항을 추가하고 모형의 경험 상수값을 다르게 사용한다는 점이다. 난류 운동 에너지와 그 소멸율에 대한 예상 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t}+U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=-\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{K_m}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right)-\varepsilon, \tag{6}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+U_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=-C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}\overline{u_iu_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right)-C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}-R. \tag{7}$$

여기서 σ_k, σ_ε, $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$는 경험 상수이다. 식 (7)의 우변 마지막 항은 추가된 응력변형율 항으로써 다음과 같이 주어진다.

$$R=\frac{C_\mu\eta^3(1-\eta/\eta_0)\varepsilon^2}{(1+\beta_0\eta^3)k}, \tag{8}$$

$$\eta=\frac{k}{\varepsilon}\left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial U_i}{\partial x_j}\right]^{1/2}. \tag{9}$$

Yakhot *et al.* (1992)에 따라서 다음과 같은 상수값을 난류 모형에서 사용하였다.

$$(C_\mu,\ \sigma_k,\ \sigma_\varepsilon,\ C_{\varepsilon 1},\ C_{\varepsilon 2},\ \beta_0,\ \eta_0)=(0.0845,\ 0.7179,\ 0.7179,\ 1.42,\ 1.68,\ 0.012,\ 4.377). \tag{10}$$

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 풀었다. 이 알고리즘에서는 매 수치 적분 단계에서 가정된 압력장 하에서 임시적인 바람 성분(수평 및 연직)을

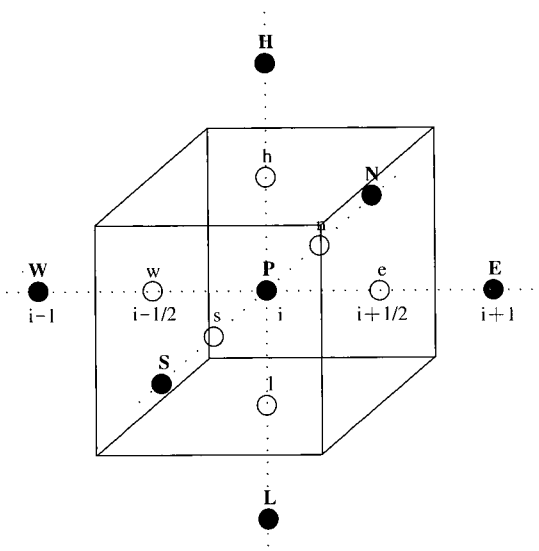

Fig. 2. A schematic of grid structure and control volume for finite differencing. The center point of the control volume is denoted by symbol *P* and the other surrounding points are denoted by *W, w, e, E* in the *x*-direction, *S, s, n, N* in the *y*-direction, and *L, l, h, H* in the *z*-direction.

구한다. 그리고 바람장의 조정을 통하여 질량 보존 방정식을 만족시키는데 필요한 압력 편차량를 계산한다. 이와 같이 계산된 압력 편차량으로부터 바람 성분의 편차량을 구하고 마지막으로 바람장과 압력장을 계산한다. 그림 2는 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^*, k, ε)이 정의된다. 수치 풀이 방법에 대한 상세한 내용은 Baik *et al.*(2003)에 주어져 있다.

3. 2 벽 경계 조건

유체 흐름을 수치 모사할 때 고려해야 하는 사항 중의 하나가 벽 경계 조건이다. 벽 바로 근처에서는 매우 얇은 아점성층(viscous sub-layer)이 존재하고 그 위에 완충층(buffer layer)과 난류 코어(turbulent core)가 존재한다. 난류 경계층에서 모든 규모의 흐름을 분해하기 위해서는 격자 간격이 충분히 작아야 하고 이에 따라 계산 시간도 많이 소요된다. 이러한

Table 1. Near wall relations (from Versteeg and Malalasekera, 1995)

• Momentum equation tangential to wall wall shear stress $\tau_w = \rho C_\mu^{1/4} k_p^{1/2} u_p / u^+$ wall force $F_s = -\tau_w A_{cell}$
• Momentum equation normal to wall normal velocity = 0
• Turbulent kinetic energy equation net k-source per unit volume $S_k = (\tau_w u_p - \rho C_\mu^{3/4} k_p^{3/2} u^+)\Delta V / \Delta y_p$
• Dissipation rate equation set nodal value $\varepsilon_p = C_\mu^{3/4} k_p^{3/2} / (\kappa \Delta y_p)$

*Here, u^+, A_{cell}, and Δy are the nondimensional velocity, wall area of the control volume (ΔV), and the distance to the solid surface. The subscript p denotes the nearest wall node.

문제를 극복하고 벽 경계 효과를 적절하게 표현하기 위해서 일반적으로 벽 함수(wall function)를 도입하여 사용한다. 난류에서 벽 경계 조건의 설정은 다음의 값을 구하는 것으로부터 시작한다.

$$y^+ = \frac{\Delta y_p}{\nu}\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}. \tag{11}$$

여기서 y_P는 고체 벽에서 첫번째 격자점까지의 거리이다. y^+가 11.63보다 큰 지역이 난류층이고 이 지역에서 식(11)이 적용된다. 이 경우에 격자점 P는 난류 경계층에서 로그 법칙이 적용되는 지역에 놓여 있다고 생각할 수 있다. 이 지역에서 벽 함수는 로그 법칙으로 표현되고 시어 스트레스나 열속 등을 계산하는데 사용된다. 벽 함수 표현 방정식은 매우 다양하지만 본 연구에서는 가장 최적화되고 보편화된 형태의 벽 함수(Versteeg and Malalasekera, 1995)를 사용하였다(표 1).

3. 3 실험 설계

그림 3은 모형 계산 도면이다. 건물 높이(H = 20 m)와 건물 너비(모형 경계로부터의 너비 = 20 m)는 일정하고 건물 길이(L)가 다른 7 경우(L/H = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7)를 고려하였다. 격자 간격은 x, y, z 방향 모두 2 m이고 x와 z방향의 cell 개수는 각각 121개와 31개이다. y 방향의 cell 개수는 L/H가 1일 때 51개이고 L/H가 7일 때 111개이다. 따라서 모형 계산 영역 크기는 x와 z방향은 각각 240 m와 60 m이고 y 방향은 L/H가 1일 때 100 m이고 L/H가 7일 때 220 m이다. 풍상측 건물 후면에서 형성되는 흐름이 풍하측

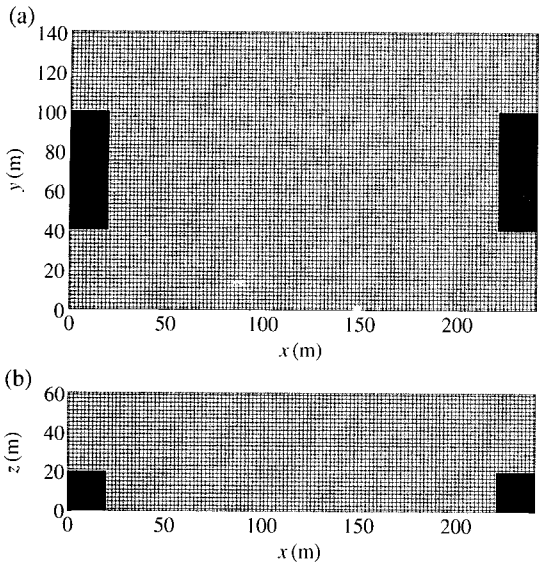

Fig. 3. (a) Top view and (b) side view of the computational domain and grid system.

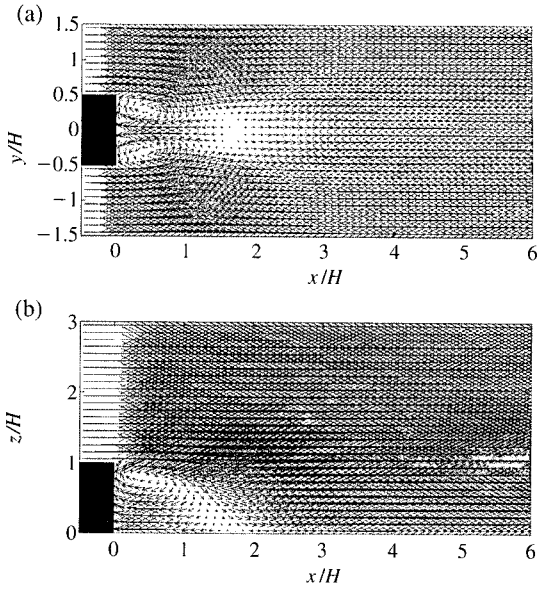

Fig. 4. Wind vector fields at (a) $z/H = 0.05$ and (b) $y/H = 0$ in the case of $L/H = 1$.

건물에 의해 교란 되지 않도록 도시 도로 협곡 너비(W)를 충분히 크게 설정하였다($W = 10H$). 시간 간격을 0.1초로 하여 2,400초까지 모형을 수치 적분하였다. 바람, 난류 운동 에너지 그리고 난류 운동 에너지의 소멸율에 대한 유입 경계 조건은 다음과 같다.

$$U_{in}(z) = \frac{U_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \tag{12}$$

$$V_{in}(z) = 0, \tag{13}$$

$$W_{in}(z) = 0, \tag{14}$$

$$k_{in}(z) = \frac{1}{C_\mu^{1/2}} U_*^2 \left(1 - \frac{z}{\delta}\right)^2, \tag{15}$$

$$\varepsilon_{in}(z) = \frac{C_\mu^{3/4} k_{in}^{3/2}}{\kappa z}. \tag{8}$$

여기서 U_*, z_0 (= 0.05 m), δ (= 1,000 m) 그리고 κ (= 0.4)는 각각 마찰 속도, 거칠기 길이, 경계층 두께 그리고 von Karman 상수이다. 유입 경계에서 x 방향의 속도 성분 U는 식(12)의 형태로 일정한 속도로 유지되고 y 방향의 속도 성분 V와 z 방향의 속도 성분 W는 항상 0으로 유지된다. 난류 운동 에너지와 그 소멸율의 유입 경계 조건은 Castro and Apsley (1997)를 참고하였다.

Table 2. Normalized distance from the upwind building to the center of double eddy circulation and normalized distance to the reattachment point in the case of $L/H = 1$.

$L/H = 1$	$t =$ 1200 s	$t =$ 1600 s	$t =$ 2000 s	$t =$ 2400 s	Average
$z = 13$ m	0.4	0.4	0.5	0.5	0.45
$z = 9$ m	0.55	0.6	0.6	0.6	0.59
$z = 5$ m	0.55	0.6	0.6	0.6	0.59
$z = 1$ m	0.45	0.5	0.5	0.45	0.48
					0.53
Reattachment	1.5	1.4	1.6	1.5	1.5

4. 결과 및 토의

그림 4a는 L/H가 1이고 $t = 2400$ s일 때 $z = 1$ m에서의 바람 벡터장이다. 풍상측 건물 후면에 이중 에디 순환이 대칭적으로 형성된 것을 볼 수 있다. 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지의 거리는 시간에 따라 변화하고 또한 높이에 따라 일정하지 않다(표 2). 이중 에디 순환의 크기는 건물 중간 높

이에서 가장 크고 지표면 근처와 건물 지붕 고도로 접근함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 네 고도(z = 1, 5, 9, 13 m)에서 평균한 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지의 거리는 0.53H이다. 따라서 Hunter *et al.* (1992)의 방법에 의하면 L/H = 1인 도시 도로 협곡에서 SF에서 WIF로의 흐름 전이는 W/H = 1.06일 때 일어난다. 이 값은 Hunter *et al.* (1992)의 결과(0.8) 보다는 크고 Oke (1988)가 기존의 실험 연구 결과를 종합하여 제시한 결과(1.3) 보다는 작은 값이다. 즉, 본 수치 모형의 결과가 표준 k-ε 난류 모형을 포함하는 정상 상태 모형을 사용한 Hunter *et al.* (1992)의 결과에 비해서는 향상되었지만 여전히 값이 크다. 흐름 재부착은 평균적으로 풍상측 건물로부터 풍하측 1.5H 지점에서 일어난다 (그림 4b). 즉, L/H = 1인 도시 도로 협곡에서 WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 W/H = 1.5에서 일어난다. 이 값은 Oke (1988)의 결과(2.3)와 Hunter *et al.* (1992)의 결과(1.8) 보다 작은 값이다. 하지만 앞서 수행된 많은 풍동 실험과 큰 에디 모사 수치 실험 결과에 따르면 입방체 장애물 후면에서 형성되는 재순환 지역의 크기는 장애물 높이의 약 1.2~1.45배 정도이다 (Tutar and Oguz, 2002; Murakami, 1997). 다시 말하면 L/H = 1일 때 본 수치 모형이 Oke (1988)와 Hunter *et al.* (1992) 보다 현실적인 결과를 제공한다.

그림 5a는 L/H가 2이고 t = 2400 s일 때 z = 1 m에서의 바람 벡터장이다. 앞서 살펴본 L/H = 1인 경우와 마찬가지로 풍상측 건물 후면에 이중 에디 순환이 대칭적으로 형성되고 이중 에디 순환의 크기는 건물 중간 높이에서 가장 크고 지표면 근처와 건물 지붕 고도로 접근함에 따라 감소한다. 네 고도에서 평균한 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지의 거리는 0.79H이다 (표 3). 따라서 SF에서 WIF로의 흐름 전이는 W/H = 1.58일 때 일어난다. 이 값은 Oke (1988)의 결과(1.6)와 일치하고 Hunter *et al.* (1992)의 수치 실험 결과(1.1)와 비교하였을 때 매우 향상된 결과이다. 흐름 재부착은 풍상측 건물로부터 풍하측 2.7H 지점에서 일어난다 (그림 5b). 즉, WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 W/H = 2.7일 때 일어난다. 이 결과는 Oke (1988)의 결과(2.7)와 일치하고 Hunter *et al.* (1992)의 결과(3.1) 보다 향상된 것이다.

L/H = 3인 경우도 대칭인 이중 에디 순환이 형성되는 등 (그림 6a) 전체적으로 L/H = 1과 2인 경우와

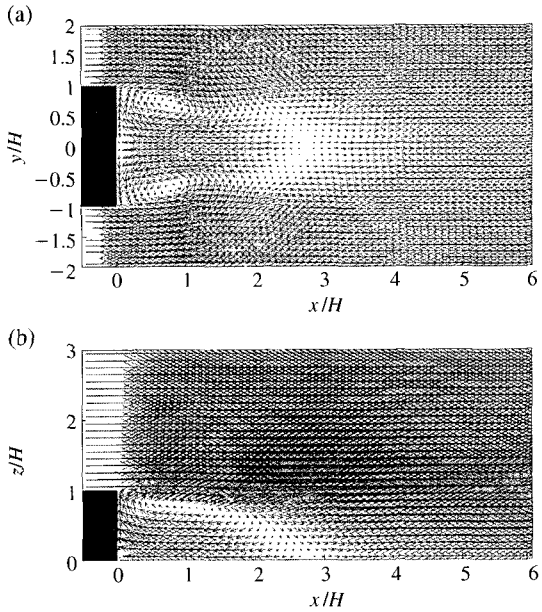

Fig. 5. Wind vector fields at (a) z/H = 0.05 and (b) y/H = 0 in the case of L/H = 2.

Table 3. Normalized distance from the upwind building to the center of double eddy circulation and normalized distance to the reattachment point in the case of L/H = 2.

L/H = 2	t = 1200 s	t = 1600 s	t = 2000 s	t = 2400 s	Average
z = 13 m	0.75	0.65	0.8	0.75	0.74
z = 9 m	0.8	0.85	0.8	0.85	0.83
z = 5 m	0.8	0.8	0.85	0.85	0.83
z = 1 m	0.7	0.8	0.8	0.8	0.78
					0.79
Reattachment	3.3	2.5	2.4	2.6	2.7

유사하지만 풍하측 건물 앞에 형성되는 편자 소용돌이의 강도가 상대적으로 강해진다. 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지의 거리는 0.81H이다 (표 4). 따라서 이 경우 SF에서 WIF로의 흐름 전이는 W/H = 1.62일 때 일어난다. 이는 Oke (1988)의 결과(1.6)와 일치하며 Hunter *et al.* (1992)의 결과(1.4) 보다 향상된 것이다. 그리고 흐름 재부착은 풍하측 3.5H 지점에서 일어난다 (그림 6b). 즉, WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 W/H = 3.5일 때 일어난다. WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 Oke (1988)에 따르면

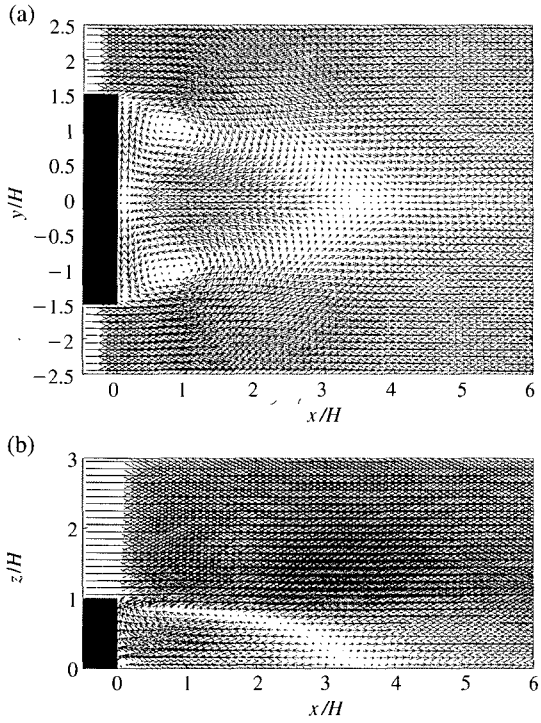

Fig. 6. Wind vector fields at (a) $z/H = 0.05$ and (b) $y/H = 0$ in the case of $L/H = 3$.

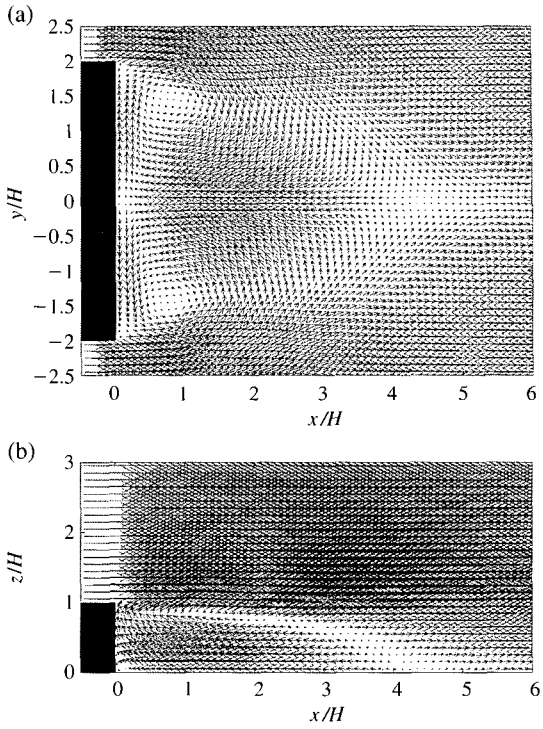

Fig. 7. Wind vector fields at (a) $z/H = 0.05$ and (b) $y/H = 0$ in the case of $L/H = 4$.

Table 4. Normalized distance from the upwind building to the center of double eddy circulation and normalized distance to the reattachment point in the case of $L/H = 3$.

$L/H = 3$	$t =$ 1200 s	$t =$ 1600 s	$t =$ 2000 s	$t =$ 2400 s	Average
$z = 9$ m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$z = 5$ m	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$z = 1$ m	0.8	0.8	0.85	0.85	0.83
					0.81
Reattachment	3.6	3.7	3.4	3.3	3.5

Table 5. Normalized distance from the upwind building to the center of double eddy circulation and normalized distance to the reattachment point in the case of $L/H = 4$.

$L/H = 4$	$t =$ 1200 s	$t =$ 1600 s	$t =$ 2000 s	$t =$ 2400 s	Average
$z = 9$ m	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
$z = 5$ m	0.75	0.8	0.8	0.75	0.78
$z = 1$ m	0.85	0.8	0.85	0.8	0.83
					0.82
Reattachment	4.0	4.3	4.1	4.2	4.15

$W/H = 2.9$일 때 일어나는데 본 수치 모형의 결과는 Hunter *et al.* (1992)의 수치 모형 결과(4.1) 보다는 항상 되었지만 Oke (1988)가 종합한 결과보다 다소 큰 값이다.

$L/H = 4$인 경우에 풍상측 건물로부터 이중 에디 순환 중심까지의 평균 거리는 $0.82H$로 SF에서 WIF로의 흐름 전이는 $W/H = 1.64$에서 일어난다(그림 7a, 표 5). 이 결과는 Oke (1988)의 결과(1.6)와 거의 일치한다. 흐름 재부착은 풍하측 $4.15H$에서 일어난다. 따라서 WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 $W/H = 4.15$일 때 일어난다. 이 값은 Oke (1988)의 결과(3.0) 보다 큰 값이다. $L/H = 5, 6, 7$인 경우 SF에서 WIF로의 흐름 전이는 각각 $W/H = 1.66, 1.72, 1.74$에서 일어났고 WIF에서 IRF로의 흐름 전이는 각각 4.78,

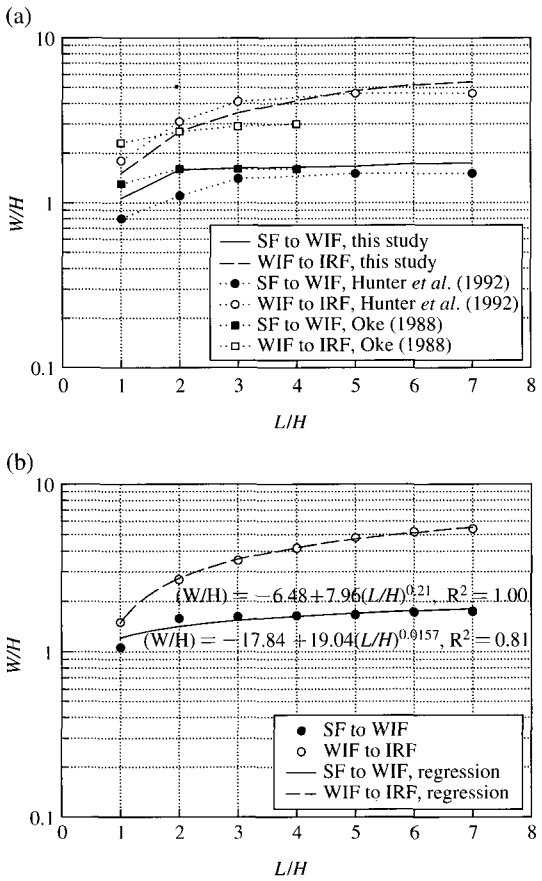

Fig. 8. (a) Threshold aspect ratios and (b) regression curves at which the transitions between flow regimes occur.

5.18, 5.4에서 일어났다.

그림 8은 SF에서 WIF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비와 WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비 (L/H, W/H)를 나타낸 것이다. SF에서 WIF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비의 경우 $L/H=1$인 경우를 제외하고는 Oke (1988)의 결과와 거의 일치하며 Hunter *et al.* (1992)의 수치 실험 결과에 비해 많이 향상되었음을 알 수 있다. 흐름 전이가 일어날 때 외관비 사이의 관계식을 회귀 분석을 통해 구하였다.

$$(W/H) = -17.84+19.04\,(L/H)^{0.0157},\ R^2=0.81. \quad (17)$$

$L/H=1$일 때를 제외하고는 거의 일정한 값을 갖기 때문에 R^2 값이 다소 낮게 나타난다.

WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비의 경우 건물 외관비 (L/H)가 비교적 작을 때에는 Oke (1988)의 결과와 잘 일치하였으나 건물 외관비가 커지면서 Oke (1988)가 제시한 결과와의 차이가 증가함을 알 수 있다. 특히 $L/H=1$일 때에는 풍동 실험 결과나 큰 에디 모사 수치 실험 결과와 비교하였을 때 본 수치 실험의 결과가 Oke (1988)가 제시한 결과보다 현실적인 것이었다. WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어날 때 외관비 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$(W/H) = -6.48+7.96\,(L/H)^{0.21},\ R^2=1.00. \quad (18)$$

Oke (1988)의 결과에 따르면 WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비는 건물 외관비가 어느 정도 커지면서 거의 일정하게 나타난다. 그러나 본 수치 연구의 결과와 Hunter *et al.* (1992)의 수치 연구에서는 건물 외관비가 증가함에 따라 흐름 전이가 일어나는 외관비가 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 한편 건물 외관비가 비교적 큰 경우 ($L/H>5$), WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비는 본 수치 실험의 결과가 Hunter *et al.* (1992)의 결과보다 약간 크다.

5. 요약 및 결론

계산 유체 역학 모형을 이용하여 도시 도로 협곡에서 건물 외관비와 도시 도로 협곡 외관비에 따른 흐름 체계를 분류하였다. 흐름 체계를 조사하는 두 가지 방법 중에서 계산 시간을 크게 절약할 수 있는 방법을 선택하였고 이를 보완하여 이용하였다. 이중 에디 순환의 크기를 이용하여 skimming flow (SF)에서 wake interference flow (WIF)로의 흐름 전이가 일어나는 외관비를 결정하였고 흐름 재부착이 일어나는 거리를 이용하여 WIF에서 isolated roughness flow (IRF)로의 흐름 전이가 일어나는 외관비를 결정하였다. 이중 에디 순환의 크기는 시간에 따라 그리고 높이에 따라 그 크기가 일정하지 않았고 흐름 재부착이 일어나는 거리도 시간에 따라 일정하지 않았기 때문에 이를 평균한 크기와 거리를 이용하였다. SF에서 WIF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비의 경

우 풍동 실험에 기초한 선행 연구 결과와 매우 잘 일치하였다. WIF에서 IRF로의 흐름 전이가 일어나는 외관비의 경우 건물 외관비(*L/H*)가 비교적 작을 때에는 선행 연구 결과와 잘 일치하였으나 건물 외관비가 증가함에 따라 차이가 증가하였다.

본 연구에서는 외관비에 따른 흐름 체계의 전이를 파악하는데 초점을 맞추었기 때문에 각 흐름 체계에서 오염/유해 물질의 거동에 대한 조사는 이루어지지 않았다. 이에 대한 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단에서 지원하는 SRC/기후환경연구센터의 지원과 기상연구소(연구 과제: 전산유체 역학 모형 개발 및 이를 이용한 도시 지역 상세 기상 예측)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

Baik, J.-J. and J.-J. Kim (1999) A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons. Journal of Applied Meteorology, 38, 1576-1589.

Baik, J.-J., R.-S. Park, H.-Y. Chun, and J.-J. Kim (2000) A laboratory model of urban street-canyon flows. Journal of Applied Meteorology, 39, 1592-1600.

Baik, J.-J. and J.-J. Kim (2002) On the escape of pollutants from urban street canyons. Atmospheric Environment, 36, 527-536.

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.

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. Atmospheric Environment, 31, 839-850.

DePaul, F.T. and C.M. Sheih (1986) Measurements of wind velocities in a street canyon. Atmospheric Environment, 20, 455-459.

Hunter, L.J., I.D. Watson, and G.T. Johnson (1990-91) Modelling air flow regimes in urban canyons. Energy and Building, 15/16, 315-324.

Hunter, L.J., G.T. Johnson, and I.D. Watson (1992) An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. Atmospheric Environment, 26B, 425-432.

Hussain, M. and B.E. Lee (1980) An investigation of wind forces on three dimensional roughness elements in a simulated atmospheric boundary layer flow. Report BS 56, Department of Building Science, Faculty of Architectural Studies, University of Sheffield.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik (1999) A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. Journal of Applied Meteorology, 38, 1249-1261.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik (2001) Urban street-canyon flows with bottom heating. Atmospheric Environment, 35, 3395-3404.

Kim, J.-J., J.-J. Baik, and H.-Y. Chun (2001) Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, 947-966.

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. Atmospheric Environment, 38, 3039-3048.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik (2005) Physical experiments to investigate urban street-canyon flow. Advances in Atmospheric Sciences, 22, 230-237.

Lee, I.Y. and H.M. Park (1994) Parameterization of the pollutant transport and dispersion in urban street canyons. Atmospheric Environment, 28, 2343-2349.

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. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 62, 37-56.

Murakami, S. (1997) Current status and future trends in computational wind engineering. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67/68, 3-34.

Nakamura, Y. and T.R. Oke (1988) Wind, temperature, and

stability conditions in an east-west oriented urban canyon. Atmospheric Environment, 22, 2691-2700.

Oke, T.R. (1988) Street design and urban canopy layer climate. Energy and Building, 11, 103-113.

Patankar, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, pp. 126-131.

Rotach, M.W. (1995) Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon. Atmospheric Environment, 29, 1473-1486.

Sini, J.-F., S. Anquetin, and P.G. Mestayer (1996) Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. Atmospheric Environment, 30, 2659-2677.

Tutar, M. and Oguz, G. (2002) Large eddy simulation of wind flow around parallel buildings with varying configurations. Fluid Dynamics Research, 31, 289-315.

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. Atmospheric Environment, 34, 1553-1562.

Versteeg, H.K. and W. Malalasekera (1995) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, Longman, Malaysia, pp. 198-203 and 243-244.

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.