

# 도시협곡내 유동장 해석을 위한 새로운 E-ε 난류 모델의 개발

## Development of a New E-ε Turbulence Model for Analysing the Air Flow Field within an Urban Street Canyon

정 상 진 · 박 옥 현<sup>1)</sup>

경기대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>부산대학교 환경공학과  
(1999년 2월 13일 접수, 1999년 4월 18일 채택)

Sang Jin Jeong and Ok Hyun Park<sup>1)</sup>

*Dept. of Env. Eng., Kyonggi University*

<sup>1)</sup>*Dept. of Env. Eng., Pusan National University*

(Received 13 February 1999; accepted 18 April 1999)

### Abstract

A new E-ε turbulence numerical model is proposed for analysing the turbulent air flow field within an urban street canyon. In this model the equations of eddy viscosity and energy dissipation are reformed by considering the Kolmogorov time scale and streamline curvature effect. Application results of the new E-ε model have been compared with those of standard E-ε model and Yang and Shih's one, which are commonly used ones in engineering field, and with field experiment results of DePaul and Sheih. The new model appears to be generally superior to other both models in the prediction of an air flow field within street canyon.

**Key words** : street canyon, air flow field, numerical model, Kolmogorov time scale, E-ε model

### 1. 서 론

도시협곡에서 오염물질의 주된 배출원으로는 지표부근 도로상의 자동차들과 인근 건물들의 굴뚝 등을 들 수 있다. 도시협곡 내에서 오염물질의 이동과 확산을 정확히 예측하기 위해서는 도시협곡내의 유동장에 관한 정확한 정보가 필요하다.

도시협곡내의 유동장은 (i) 주변의 기상조건에 의한 天蓋 (canopy) 부근의 평균유동, (ii) 다양한 협곡내 순환 난류흐름과 (iii) 단면비 ( ; 도로폭에 대한 건물높이의 비)의 증대에 따라 다수의渦 (vortex cell)

를 가지는 복잡한 場이다. 도시협곡 내에서의 유동장 정보를 얻는 방법으로는 현장관측, 물리적 모형 실험 그리고 수치해석 등을 들 수 있다.

현장관측 연구로는 DePaul과 Sheih (1986), Roach (1995)의 연구가 있다. DePaul과 Sheih (1986)은 Chicago 중심부에 있는 폭이 24.5 m, 상류측 건물높이 33.5 m 하류측 건물높이 40 m (단면비가 약 1.4) 인 협곡 내에서 풍선을 띄워 사진 촬영하고, 촬영된 사진을 분석하여 평균유속과 난류량을 조사한 결과를 보고하였다. 그들은 관측된 자료를 이용하여 평균유속과 난류량의 고도에 따른 변화 경향을 제시하였다. Roach (1995)는 스위스 쥐리히에 있는 폭 15

m, 높이 18.3m(단면비 1.2)인 도시협곡 내부와 주변에서 온도, 상대습도, 풍속을 조사하였다. 그는 관측된 자료를 무차원량으로 표시하여 무차원 고도에 따른 무차원 평균풍속 분포 및 무차원 난류량의 분포 등에 관한 자료를 제시하고 있다.

도시협곡내의 유동장에 대한 실험실내의 연구로는 Hoydysh와 Dabberdt(1988), 정(1997), 정과 박(1998)의 연구가 있다. Hoydysh와 Dabberdt(1988)는 풍동을 사용하여 협곡 폭에 대한 상류측 빌딩의 높이 비는 0.67로 고정하고 협곡 폭에 대한 하류측 건물 높이의 비를 2.0, 1.0, 0.67인 모형 협곡에서 유동 특성을 관측하였다. 정(1997) 및 정과 박(1998)은 수로장치에서 중립 대기층을 모의하고, 단면비가 0.428에서 3.2까지에 걸쳐 여러 값들을 가지는 도시협곡을 설치하여 단면비에 따른 협곡내의 평균 유동장의 변화, 형성되는 vortex cell 개수 그리고 vortex cell이 형성되는 위치 등을 관찰하였다. 그러나 이들의 연구에서도 도시협곡내의 평균 유속과 난류에너지 분포 등에 대한 자료는 불충분한 실정이다.

도시협곡내의 유동장에 관한 최근의 수치해석 연구로는 Hunt 등(1992), Ca 등(1995), 그리고 Simi 등(1996)이 있다. Hunt 등(1992)은 단면비 변화에 따라 Oke(1988)가 구분한 흐름 상태인 스쳐 지나가는 흐름(skimming flow), 후류 접촉면 흐름(wake interface flow), 분리된 조도 흐름(isolated roughness flow)에 관해 E-ε 난류모델을 사용하여 조사하였다. Ca 등(1995)은 LES( ; Large Eddy Simulation)을 사용하여 2차원 Navier-Stokes 방정식과 열전도 방정식을 풀이하였다. 또한 그들은 협곡내에서 단면비 변화에 따른 vortex cell의 형성과 열적 난류와의 관계를 연구하였으나 협곡내의 난류에너지 분포에 대해서는 다루지 않았다.

Simi 등(1996)은 표준 E-ε 난류모델을 사용하여 vortex cell의 형성과 건물에서 나오는 열이 협곡내 오염물의 확산에 미치는 영향 등을 조사하였다. 그들에 의하면 표준 E-ε 난류모델은 단일 건물 후면에서 생기는 재순환 영역의 크기를 15~20% 정도 과소 평가한다. 그러므로 표준 E-ε 난류모델이 도시협곡내의 유동장을 정확히 예측할 수 있을지 검토할 필요가 있는 것 같다. 또한 도시협곡은 3면이 벽면이므로 벽면부근의 난류에너지 생성 및 분포와

점성에 기인한 에너지소산 작용이 표준모델에서의 유동장 모의에 영향을 줄 것이다. 그래서 많은 연구자들이 난류에너지(E) 및 에너지소산율(ε) 관계 방정식의 개발을 시도하였는데, Lin과 Leschziner(1994)는 단일 건물 후면의 재순환 영역을 재현하기 위하여 Yakhot 등(1986)의 RNG( ; Renormalization group) E-ε 모델과 그들 자신이 개발한 Low Reynolds number E-ε 모델을 사용하였다. Yang과 Shih(1993)는 벽면부근의 시간스케일을 Kolmogorov 시간스케일을 사용하여 수정한 E-ε 난류모델을 개발하여 수로내의 유동장을 계산하였다. 그러나 이들 수정된 E-ε 모델들을 도시협곡내의 유동장 예측을 위하여 사용한 예는 없는 것 같다.

도시협곡 내에서 유동은 3벽면 부근의 점성영역으로 둘러싸인 내부 회전류가 존재하는 복잡한 유동장을 나타낸다. 협곡내 회전류의 존재는 유선의 곡률을 형성하고, 유선의 곡률은 전단층내에서 난류수송에 영향을 미치게 된다. 또한 표준 E-ε 난류모델은 벽면부근까지 연장하여 사용되기 위해서는 벽면부근의 점성효과를 고려해야 한다.

본 연구에서는 이러한 점들에 착안하여 협곡내 벽면부근의 점성효과와 회전류에 의한 에너지 전달을 모두 고려할 수 있는 새로운 E-ε 난류모델을 개발하였다. 개발된 E-ε 난류 모델 적용 결과를 확인하기 위하여 공학에서 널리 사용되는 표준 E-ε 난류모델, 벽면부근의 점성효과만 고려하는 Yang과 Shih(1993)의 모델을 적용한 계산 결과 그리고 DePaul과 Sheih(1986)의 현장관측 결과와 비교 검토하였다.

## 2. 모델의 서술

### 2.1 지배방정식

정상 상태 난류유동에 대한 지배방정식은 평균화된 Navier-Stokes 방정식과 연속방정식으로 각각 식 (1) 및 (2)와 같다(Zhang, 1994).

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (1)$$

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

여기서  $U_j$ 와  $u_i$ 는 유속의 평균 및 변동성분을 나타내고,  $P$ 는 압력의 평균이고,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\nu$ 는 동점성 계수이다. 식 (1)의 Reynolds 응력은 Boussinesq渦점성(eddy viscosity) 가정을 사용하면 식 (3)과 같이 표시된다.

$$-\overline{u_i u_j} = u_t \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} E \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이고,  $E$ 는 난류 운동 에너지이다. 표준 E-ε 모델에서 난류渦점성(turbulent eddy viscosity)  $u_t$ 는 식 (4)와 같다.

$$u_t = \frac{C_\mu E^2}{\epsilon} \quad (4)$$

여기서  $C_\mu$ 는 계수이고,  $\epsilon$ 은 난류 에너지소산율이다. 여기서  $E$ 와  $\epsilon$ 은 식 (5) 및 (6)과 같다.

$$U_j \frac{\partial E}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_E} \right) \frac{\partial E}{\partial x_j} \right] + P_E - \epsilon \quad (5)$$

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} P_E \frac{\epsilon}{E} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{E} \quad (6)$$

여기서  $P_E$ 는 생성항으로 식 (7)과 같다.

$$P_E = u_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left[ \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$C_\mu$ ,  $C_{\epsilon 1}$ ,  $C_{\epsilon 2}$ ,  $\sigma_E$ ,  $\sigma_\epsilon$ 는 계수로 표준 E-ε 난류모델에 서는 식 (8)과 같다.

$$C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_E = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3 \quad (8)$$

## 2.2 표준 E-ε 난류모델의 수정

### 2.2.1 벽면부근 점성효과와 고려

난류 길이스케일은 에너지 함유와의 크기로 결정된다. 벽면부근에서 에디 크기는 길이  $y$ 의 차수를 가진다. Hanjalic와 Launder (1975)에 의하면 벽면부근 난류 속도장은 식 (9)과 같이 확장된다.

$$\begin{aligned} u' &= a_1 y + a_2 y^2 + \dots \\ v' &= b_1 y^2 + \dots \\ w' &= c_1 y + c_2 y^2 + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $a_1, b_2, c_1$ 은 영이 아닌 유한한 값이다. 그러므로 난류 속도스케일은 벽면부근으로 접근하면 영으로 접근한다. 그러나 난류 시간스케일은 에너지 함유와의 길이스케일과 난류속도스케일의 비로 영에 접근하지 않는다(Yang and Shih, 1993). 따라서 벽면부근에서 유동을 재현할 수 있는 새로운 시간스케일이 필요하다. Yang와 Shih (1993)은 벽면부근의 시간스케일을 Kolmogorov 시간스케일로 제한하였다. 이와 유사하게 Abe 등(1993)은 벽면부근에서 Kolmogorov 속도스케일  $u_c = (\nu \epsilon)^{1/4}$ 을 사용하여 새로운 모델을 제안하였다. Abe 등(1993)에 따르면 Kolmogorov 속도스케일을 사용할 경우  $u_c$ 은 벽면부근에서 유한의 값을 가지고 벽면부근의 한계 거동인  $-uv \sim y^3$ 을 재현한다. 본 연구에서도 벽면부근의 유동을 Yang과 Shih(1993)에 따라 Kolmogorov 시간스케일을 사용하였다.

Yang과 Shih(1993)는 벽면에서 멀리 떨어진 곳에서 난류 시간스케일을  $E/\epsilon$ 이라고 하고, 벽면부근에서 시간스케일( $T_t$ )을 Kolmogorov 시간스케일로 하여 이를 식 (11)과 같이 나타내었다.

$$T_t = E/\epsilon + T_w \quad (11)$$

여기서  $T_w$ 는 Kolmogorov 시간스케일로 식 (12)와 같다.

$$T_w = C_w (\nu/\epsilon)^{1/2} \quad (12)$$

여기서  $C_w$ 는 계수로 0.5에서 3.0사이의 값을 가지며 이 범위에서 계산결과에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타나므로, 본 연구에서는 1.0을 사용하였다.

ε식인 식 (6)에서 벽면부근에서 소산율의 소멸에 관련되는 항을 식 (11)의 시간스케일을 사용하여 다시 쓰면 식 (13)이 구해진다.

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \left( C_{\epsilon 1} P_E - C_{\epsilon 2} \epsilon \right) \frac{\epsilon}{E + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (13)$$

식 (13)과 표준 E-ε 난류모델 식 (6)의 다른 점은 우변 두 번째 항이다. 이 항은 벽면에서 멀리 떨어진 경우  $(\nu \epsilon)^{1/2}$ 이  $E$ 에 비하여 훨씬 작으므로 표준 E-ε 난류모델 식과 같게 된다.

차원해석에서 에디점성( $\nu$ )과 난류의 속도 및 길이 스케일 사이에는 식 (14)의 관계가 있다.

$$u_t \sim u_t l_t \quad (14)$$

여기서  $u_t$ 는 난류 속도스케일이고  $l_t$ 는 난류 길이 스케일이다. 레이놀즈수가 큰 경우 E- $\epsilon$  난류모델에서는  $l_t \sim E^{3/2}/\epsilon$ ,  $u_t \sim E^{1/2}$ 의 관계가 있으므로 에디점성은 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu f_u E^2 / \epsilon \quad (15)$$

여기서  $f_u$ 는 댐핑(damping)함수이다. 본 연구에서는 Yang과 Shih(1993)에 따라 일반적인 유동 상황에 적용될 수 있는 식 (16)과 같이 독립함수  $R_y$ 를 사용하는 댐핑함수(식 (17))를 사용하였다.

$$R_y = E^{1/2} y / \nu \quad (16)$$

$$f_u = [1.0 - \exp(-d_1 R_y - d_3 R_y^3 - d_5 R_y^5)]^{1/2} \quad (17)$$

여기서 계수들은  $d_1 = 1.5 \times 10^{-4}$ ,  $d_3 = 5.0 \times 10^{-7}$ ,  $d_5 = 1.0 \times 10^{-10}$ 이다.

### 2.2.2 유선의 곡률 수정

Bradshaw (1973)의 실험 연구에 의하면 normal stress들 사이에서 난류 전단응력과 비등방성들은 유선의 곡률에 대단히 민감하지만, 여러 이론적 연구자들은 이러한 민감도가 표준 E- $\epsilon$  모델에는 반영되어 있지 않다고 하였다(Leschziner와 Lodi(1981)). 따라서 Leschziner와 Lodi(1981)는 대수응력 모델을 이용하여 유선의 곡률효과를 고려하는 E- $\epsilon$  난류 모델을 개발하였다. 그들에 따르면 표준 E- $\epsilon$  모델에서 유선방향의 변형에 대한 소산율의 효과를 나타내기 위하여 2차원의 경우  $\epsilon$ 식에서 생성항( $P_t$ )을 식 (18)과 같이 수정하였다.

$$P_t = \left[ C_1' P_E - C_1'' \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right] \frac{\epsilon}{E} \quad (18)$$

식 (18)에서  $C_{\epsilon 1} = C_1' - C_1''$ 이고, Leschziner와 Rodi(1981)는 이들 계수를 각각  $C_1' = 2.24$ ,  $C_1'' = 0.8$ 을 사용하였다. 본 연구의 계산에서 이들 계수는 결과치에 큰 영향을 주는 것이 관측되었으므로, 최적 값으로  $C_1' = 2.24$ ,  $C_1'' = 0.73$ 을 사용하였다.

식 (13)에 식 (18)의 관계식을 대입하면 벽면부근의 점성효과와 유선의 곡률효과를 고려한  $\epsilon$ 식은 식

(19)와 같이 된다.

$$U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \left[ \left[ C_1' P_E - C_1'' \nu_t \left( \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \epsilon \right] \frac{\epsilon}{E + \sqrt{\nu \epsilon}} \right] \quad (19)$$

Leschziner와 Rodi(1981)는 유선의 곡률효과를 고려하기 위해서는 E- $\epsilon$  난류 모델에서 계수  $C_\mu$ 에 식 (20)의 관계식을 곱하여 사용할 것을 제안하였다.

$$f_s = \frac{1}{\left[ 1 + K \frac{E^2}{\epsilon^2} \left( \frac{\partial U_s}{\partial n} + \frac{U_s}{R_c} \right) \frac{U_s}{R_c} \right]} \quad (20)$$

여기서 K는 계수(=0.570312)이고  $U_s$ 는 유선방향 유속,  $R_c$ 는 유선의 곡률반경을 나타낸다.

식 (20)을 식 (15)에 고려하면 벽면효과와 유선의 곡률효과가 고려된 에디점성 관계식은 식 (21)과 같이 쓸 수 있다.

$$\nu_t = C_\mu f_u f_s E^2 / \epsilon \quad (21)$$

이상의 결과에서 벽면부근의 점성만 고려한 Yang과 Shih의 난류모델은 식 (5), (13), (15)로 표시되고, 본 연구에서 사용한 벽면부근의 점성과 유선의 곡률효과를 고려한 난류모델은 식 (5), 식 (19) 그리고 식 (21)로 표시된다. 따라서 본 연구에서 사용한 새로운 모델과 Yang과 Shih 모델의 차이점은 에디점성식과 에너지소산율식에서 유선의 곡률효과를 추가로 고려한 점이다.

### 2.3 수치수법과 경계조건

제안된 모델들의 편미분 방정식을 이산화하기 위하여 Patankar(1980)가 제시한 제어체적법(Control Volume Method)을 이용한 TEACH-2E 모델(1983)을 사용하였고, 사용된 좌표계는 직교좌표계이다. 그림 1에서는 DePaul과 Sheih(1986)의 현장을 모의하기 위하여 사용한 격자를 나타내었다. 계산에 사용된 격자는 80×90으로 협곡 주변은 1m 간격으로 조밀한 격자를 사용하였다.

TEACH-2E 모델에서는 방정식을 풀기 위한 알

고리즘으로 SIMPLE을 사용하고, 각 방정식은 삼각 대각행렬 알고리즘을 사용하여 풀이한다. 여기서 사용하는 차분법은 hybrid scheme이다. 본 연구에서는 이류항과 확산항을 동시에 취급하고, 방정식 내의 나머지 항들은 Patankar (1980)에 따라 선원항 (source term)으로 취급하여 선형화 하였다.

본 연구에서는 현장측정 결과에 대한 각 수치 모델의 모의 능력을 평가하기 위하여 현장 관측과 동일한 초기조건을 사용하였다. 표 1에서는 각 모델에서 사용된 초기조건과 경계조건을 나타내었다. 세 가지 모델 모두 초기조건으로 상부 경계에서 수평

방향 평균 풍속을 4 m/s로 하고 수직방향의 풍속은 없는 것으로 가정하였다. 평균 풍속의 수직방향 변화는 풍속의 지수법칙을 사용하였다. 경계조건은 벽면 부근에서 난류에너지 소산율을 제외하고는 3가지 모델 모두 동일한 조건을 사용하였다.

### 3. 계산 결과와 고찰

DePaul과 Sheih (1986)는 단면비 1.4 (도로 폭 24.5 m 상류측 빌딩 높이 33.5 m 하류측 빌딩높이 40 m)인 도시협곡에서 헬륨을 채운 직경이 0.5 m인 풍선을 띄워 유동장을 관측하였다. 그들은 협곡내에 띄운 풍선의 이동경로를 사진 촬영한 후 분석하여 협곡단면 전체의 속도장을 구하고, 협곡의 상류측 (바람이 불어오는 쪽) 벽면 부근, 하류측 벽면부근 그리고 협곡 중앙에서의 평균풍속과 난류운동에너지의 고도에 따른 변화를 검토하였다. 그림 2는 도시협곡 전 단면 내에서 관측된 평균 유동장과 본 연구에서 수치모델을 적용하여 구한 유동장을 비교해 보기 위하여 작성된 것이다. 여기서 x는 협곡내에서 도로폭 방향 거리를 나타내고 있다.

그림 2에서 나타난 바와 같이 3개의 E-ε 난류 모델을 적용한 수치해석의 결과는 협곡내 약 30m 높이 근처에서 풍속이 건물 지붕위에서의 풍속과 평행하고 수직방향으로 유속 벡터가 협곡내에서만 존재하는 현장 관측의 평균적인 유동패턴을 대체적으로 잘 모의하고 있음을 알 수 있다. 그러나 현장관측 (a)에서는 하류측 10m 고도 부근에서 발생한 작

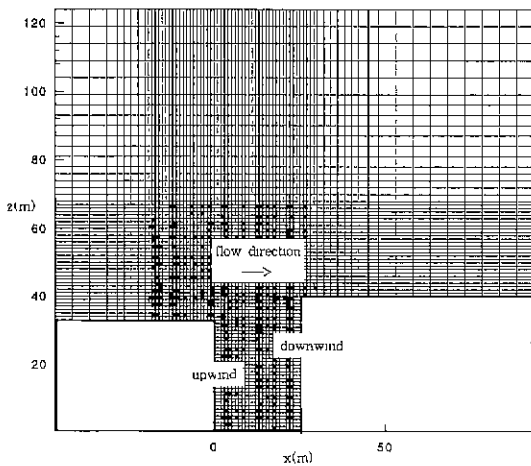


Fig. 1. Street canyon geometry and numerical meshes.

Table 1. Initial and boundary conditions of numerical experiment.

condition	initial condition	boundary condition
Num. Exp		
Standard E-ε model	$\frac{U(z)}{U_r} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^{1/7}$ $U_r = 4 \text{ m/s}$ $W = 0$ $E = 0.03 \times U_r^2$ $c = E^{1/2} / 0.35 L$ $(L = 1 \text{ m})$	Bottom and wall : $\frac{\partial U}{\partial x} = 0, V = 0, E = 0, \epsilon = \frac{2\nu E}{z_r^2}$ $z_r$ : distance between wall to nearest grid point outlet : $\frac{\partial U}{\partial x} = 0, \frac{\partial E}{\partial x} = 0, \frac{\partial c}{\partial x} = 0$ upper boundary : $\frac{\partial U}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial E}{\partial z} = 0, \frac{\partial \epsilon}{\partial z} = 0$
Yang & shuh's model (1993)	Same as standar E-ε model	Same as standard E-ε model, except $\epsilon_w = 2\nu \left(\frac{dE^{1/2}}{dy}\right)^2$ $\epsilon_w$ : ε on the wall
New model (1999)	Same as standard E-ε model	Same as Yang & Shin's model

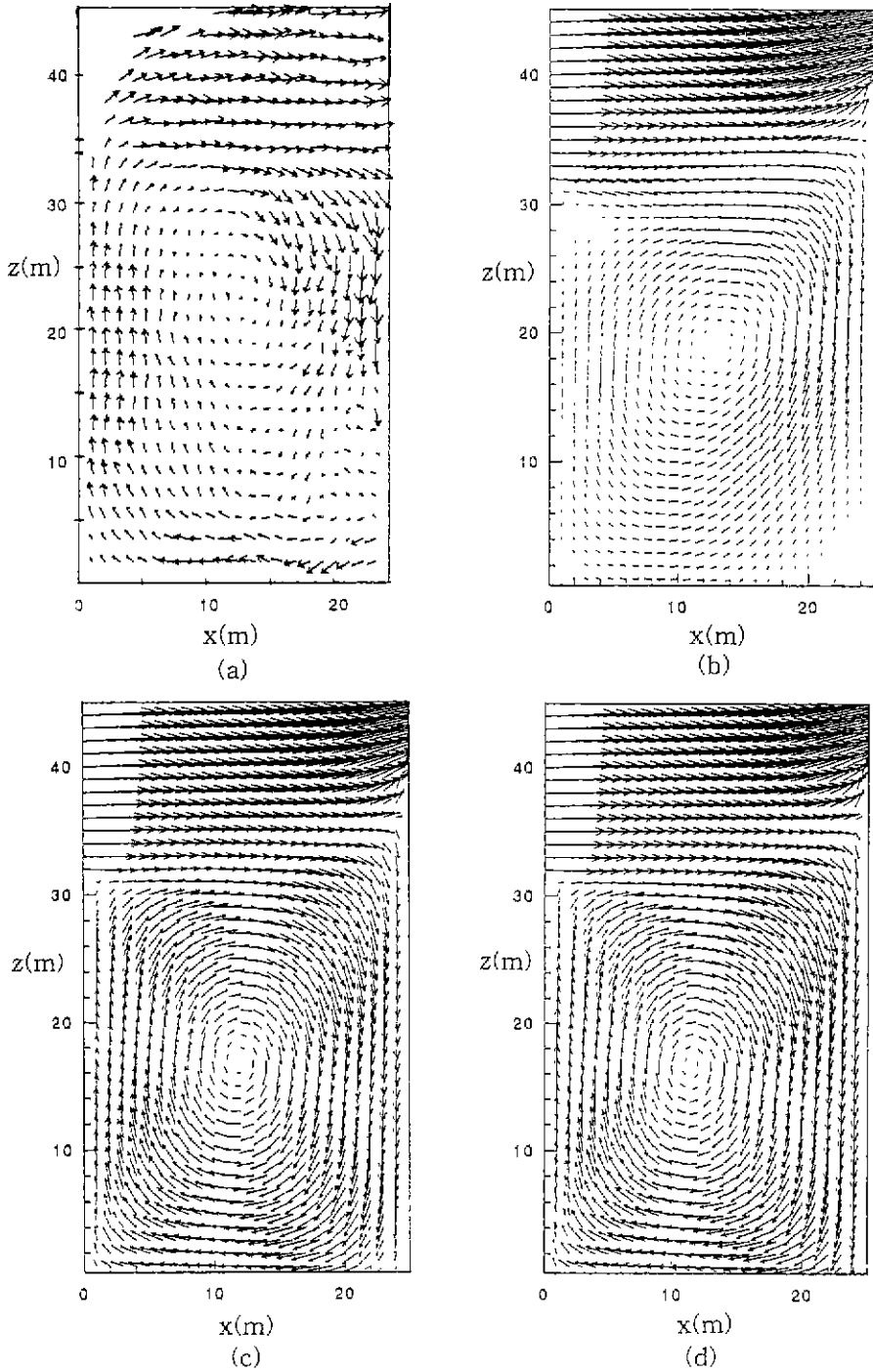


Fig. 2. Comparison of field experiments with calculated values of mean velocity vectors within street canyon.  
(a) Field experiment (DePaul and Sheih, 1986) (b) Standard E-ε turbulence model  
(c) Yang and Shin's model (1993) (d) This study (1999)

은渦는 표준 E-ε 모델의 경우만 하류측 하단에서 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 Yang와 Shih (1993)와 본 연구의 모델에서는 나타나지 않고 있다. 이와 같은 결과는 DePaul and Sheih (1986)의 속도벡터 측정결과가 건물 상부 풍속 자료를 3단계 (2~3 m/s, 3~4 m/s, 4~5 m/s)로 나누어 수집한 3가지 경우 자료를 모두 합해서 평균하여 나타낸 반면 수치해석의 결과는 단일풍속 (4 m/s)을 적용한데 부분적인 이유가 있는 것 같다. 하류측 건물 높이가 40m인데도 하류측 같은 고도 부근의 실측한 유선들이 수치실험의 결과와 달리 밀집하지 못하는 것은 검토를 요하는 것 같다.

그림 3에서는 협곡 단면의 상류측(벽면에서 3.5 m 떨어진 위치), 중심부 그리고 하류측(벽면에서 3.5 m 떨어진 위치)에서 수평방향 평균유속의 고도에 따른 변화를 나타내었다. 3가지 모델 모두 바닥부근에서 음의 유속 값을 나타내며 이는 협곡내 시계방향 순환류를 나타낸다. 또한 특히 상류측 건물 높이 이상에서 고도 증가에 따라 풍속이 증가하는 현장 관측의 패턴을 잘 모의하고 있다. 지표 부근의 유속은 표준 E-ε 모델 보다 Yang과 Shih의 모델과 새 모델이 현장 관측결과에 가까운 값을 나타내고 있으며, 특히 원으로 표시된 새 모델이 사각형으로 표시된 Yang과 Shih 모델보다 현장 관측에 더 가까운 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 기존의

모델에서는 고려하지 않은 유선의 곡률효과와 바닥부근의 점성효과를 새 모델에서는 적절히 고려한 때문으로 생각된다.

그림 4에서는 협곡 단면의 상류측, 중심부 그리고 하류측 공간에서 연직방향 평균 유속의 고도에 따른 변화를 나타낸 것이다. 상류측에서는 Yang과 Shih 그리고 새 모델이 표준 E-ε 모델보다 현장관측의 재현이 좋은 것으로 나타났으나, 협곡 중앙과 하류측의 변화 패턴은 3가지 모형 모두 잘 모의하지 못하는 것으로 나타났다.

그림 5에서는 협곡 단면 전체 기류속도의 scalar 총량의 고도별 평균값,  $(U^2+W^2)^{1/2}$ 을 나타낸 것이다. 이 프로파일의 기울기는 협곡 외부에서 내부로 이동하는 운동량의 고도에 따른 변화 추세를 나타낸다(DePaul and Sheih, 1986). 전체적으로 표준 E-ε 모델의 결과는 바닥부근 7m까지의 감소하는 변화 패턴을 잘 모의하지 못하고 있으나 Yang와 Shih 그리고 새 모델은 바닥부근에서 감소하고 그 이상의 고도에서 증가하는 현장관측의 변화 패턴을 잘 모의하고 있다. 그러나 이들도 10m에서 30m 사이에서 현장관측의 증가 패턴을 잘 모의하지 못하고 있는 것 같다. 그러나, 새 모형은 Yang과 Shih 모델보다 현장관측에 가까운 값을 나타내고 있다.

그림 6에서는 협곡 중앙에서 난류 운동에너지의 높이에 따른 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있

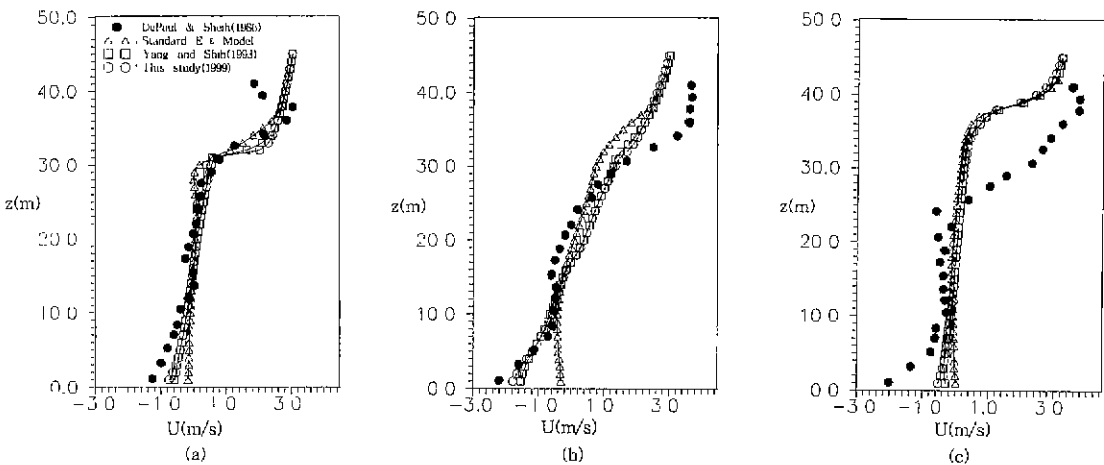


Fig. 3. Comparison of mean horizontal velocity profiles within street canyon. (a) upwind side (b) center (c) downwind side

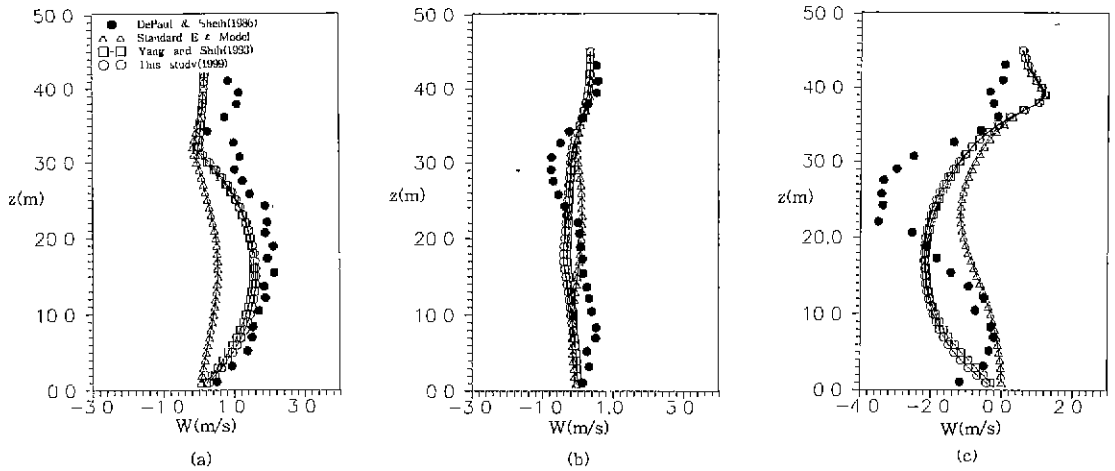


Fig. 4. Comparison of mean vertical velocity profiles within street canyon.  
 (a) upwind side (b) center (c) downwind side

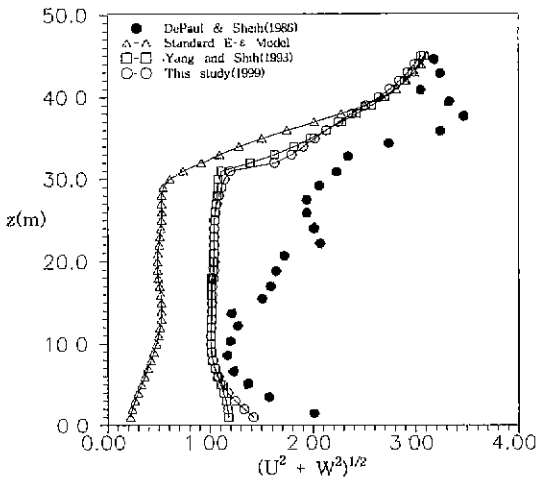


Fig. 5. Comparison of averaged magnitude of wind velocity profiles. Connected lines show numerical results.

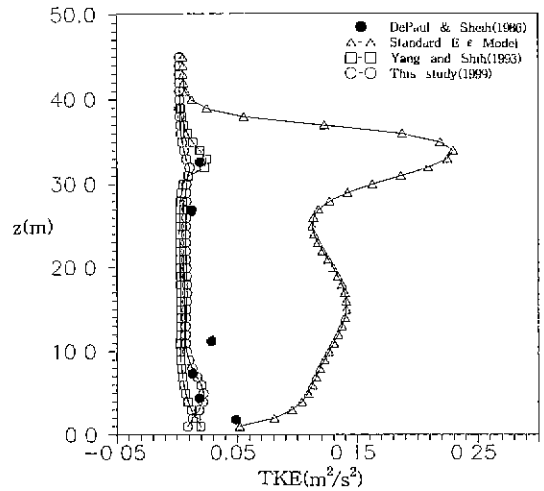


Fig. 6. Comparison of turbulent kinetic energy profiles at street center.

듯이 표준 E-ε 모델은 전체적으로 난류 운동에너지  
 를 3배 정도 과대 평가하는 것으로 나타난 반면,  
 Yang과 Shih 그리고 새 모델은 현장관측 결과와 유  
 사한 값 및 분포를 나타내고 있다. 또한, 바닥부근에  
 서 Yang와 Shih 모델은 고도증가에 따라 감소하는  
 경향을 나타내는 반면, 새 모델은 고도에 따라 증가  
 하는 경향을 나타낸다. 그러나 바닥부근을 제외하고

는 새 모델의 결과가 현장 관측결과를 잘 모의하는  
 것으로 나타났다

#### 4. 결 론

현장에서 관측된 도시협곡내의 유동장을 모의하  
 기 위하여 벽면부근의 점성효과와 협곡내 회전류의  
 곡률 효과를 고려한 새로운 E-ε 난류 모델을 개발



하고 그 적용 결과를 표준 E-ε 난류 모델 및 Yang과 Shih의 E-ε 난류 모델 적용결과 그리고 DePaul과 Sheih(1986)의 현장 관측 결과와 비교해봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

유속 벡터의 경우 3가지 수치 모델 모두가 현장 관측의 전반적인 흐름 패턴을 잘 모의하였다. 협곡 단면의 3부위 즉 협곡의 상류측 공간, 중심부, 그리고 하류측 공간에서 표준 E-ε 모델을 제외한 2가지 모델 모두 수평방향 풍속의 고도에 따른 변화를 잘 모의하였으며, 특히 새 모델의 재현성이 가장 우수하였다. 고도에 따른 난류 운동에너지 분포는 표준 E-ε 모델이 현장관측 자료를 3배 정도 과대 평가한 반면, Yang과 Shih 모델과 새 모델은 유사한 계산 값을 나타내었다. 그리고 난류 운동에너지의 고도에 따른 변화는 바닥 부근을 제외하고는 새 모델이 현장관측 결과를 더 잘 모의하는 것으로 나타났다. 새 모델은 벽면 혹은 바닥부근에서의 공기 점성효과와 유선곡률 효과를 고려해서 개발되었으므로 이들 효과가 공존하는 불규칙한 유동장 해석에 사용될 수 있을 것이다.

### 감 사

본 연구는 1996년 과학재단 특정연구 "복잡한 지형에서의 대기확산에 관한 연구" (과제번호 96-0601-03-01-2) 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

정상진 (1997) 도시협곡 내에서 흐름장에 관한 연구, 대한 환경공학회지, 19(11), 1407-1418.  
 정상진, 박옥현 (1998), 도시협곡 내에서 대기오염물질의 수송과 확산 (I): Vortex cell의 형성과 최대농도의 발생, 대한환경공학회지, 20(7), 967-975.  
 DePaul, F.T. and Sheih, C.M. (1986) Measurements of wind velocities in a street canyon, *Atm. Env.*, 20(3), 455-459.  
 Roach, M.W. (1995) Profiles of turbulence statistics in and above an urban street canyon, *Atm. Env.*, 29(13), 1473-1486  
 Hoydysh, W.G. and Dabberdt, W.F. (1988) Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons, *Atm. Env.*, 22, 2677-2689.

Hunt, L.J., Johnson, G.T. and Watson, I.D. (1992) An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon, *Atm. Env.*, 26B, 425-432.  
 Oke, T.R. (1988) Street design and urban canopy layer climate, *Energy Bldng.*, 11, 103-113.  
 Ca. V.T., Asaeda, T., Ito, M. and Aimfield, S. (1995) Characteristics of wind field in a street canyon, *J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyns.*, 57, 63-80.  
 Sin, J.F., Anquetin, S. and Mestayer, P.G. (1996) Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyon, *Atm. Env.*, 30(15), 3659-2677.  
 Lin, F.S. and Leschziner, M.A. (1994) Assessment of turbulent transport models including non-linear RNG eddy viscosity formulation and second-moment closure for flow over a backward-facing step, *Computers and Physics*, 23(8), 983-1004.  
 Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. and Speziale, C.G. (1992) Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique. *Phys. Fluids A* 4(7), 1510-1520.  
 Zhang, C.X. (1994) Numerical predictions of turbulent recirculating flows with a K-ε model, *J. of Wind Eng. and Ind. Aerodyns.*, 51, 177-210.  
 Hanjalic, K. and Launder, B.E. (1975) Contribution Towards a Reynolds-Stress Closure for Low-Reynolds-Number Turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, 74(4), 593-610.  
 Yang, Z. and Shih, T.H. (1993), New time scale based E-ε model for near-wall turbulence, *AIAA Journal*, 31(7), 1191-1198.  
 Leschziner, M.A. and Rodi, W. (1981) Calculation of Annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence-model variations, *Transactions of the ASME*, 103, 352-360.  
 Abe, K., Nagano, Y., Kondoh, T. (1993) Numerical prediction of separating and reattaching flows with a modified low-Reynolds-number k-ε model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46 & 47, 85-94  
 Bradshaw, P. (1973) Effects of streamwise curvature on turbulent flows. *AGARDograph*, 169.  
 Patankar, S.V. (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, 197.  
 Gosman, A.D. and Ideriah, F.J.K. (1983) *Teach-2E: A General Computer Program for Two-dimensional, Turbulent, Recirculation Flows*, Dep. of Mechanical Eng. Imperial College, London, S.W. 7, 130.