

평균풍속 및 난류 예측을 위한 도심지 모델

김병구[†] · 이창훈* · 김석철** · 주석준*** · 장동두*** · 심우섭[‡]

Urban Model for Mean Flow and Turbulence

Byung-Gu Kim, Changhoon Lee, Seogcheol Kim, Dong Du Jang, Seok-Jun Joo,
Woo-Sup Shim

Key Words: Urban model(도심지모델), Urban dispersion(도심지확산), Wind tunnel(풍동), Obstacle array(장애물 배열)

Abstract

The study of model for velocity and turbulence within the urban canopy was carried out. To evaluate existing urban model we conducted wind tunnel experiment and large-eddy simulation (LES). Mean velocity profile and turbulence are measured within simple three different obstacle arrays. To obtain supplemental data and to verify morphological model large-eddy simulation was performed. Several methods have been used to achieve embodying the flow field in urban area. Recently, morphological method obtaining flow parameters from the statistical or physical representation of obstacle elements is a arising method. It was found that all morphological model, evaluated in this study, over predict the friction velocity, most sensitive one among the flow parameters. Velocity and turbulence in the urban canopy layer were improved by the correction using 'true' friction velocity.

1. 서 론

도시지형에서 화생방 공격이나 사고 또는 의도적으로 방출된 독성오염물질로 인한 인적 물적 피해 가능성이 증대하고 있다 따라서 이를 예측할 수 있는 시스템의 개발이 필요한 시점이다. 외국에서 개발된 여러 도심지 확산모형은⁽¹⁻⁴⁾ 이상적인 조건에서 개발 검증된 모델이다. 제한적이지만 국내에서 수행된 모형에 의한 선행연구결과에 의하면 기존의 도심지 확산모형이 서울과

같은 균질하지 않은 건물로 구성된 도심지에서의 확산은 제대로 예측하지 못한 것으로 보고되고 있다. 아직까지 체계적으로 도심지모형이 평가되고 한계점들이 밝혀지지 않은 상황이다. 신뢰할 만한 도심지모형 알고리즘을 개발하기 위해서는 풍동실험이나 수치실험을 통한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 기존에 존재하는 도시모델인 Hanna & Britter, MacDonald et al., Theurer, Rule of thumb 등에 대한 조사를 수행하여 정확도를 평가하였다. 모델을 수행, 평가하기 위해 3가지 형태의 균질도시모형에 대하여 풍동실험과 LES (Large-eddy simulation)를 이용한 수치실험을 수행하였다.

2. 풍동실험 및 수치해석

풍동실험은 도심지모델의 검증을 위한 자료축적 및 CFD (computational Fluid Dynamics) 해석결

[†] 연세대학교 대학원

* 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : cleee@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2846 FAX : (02)312-2159

** Boolt Simulation

*** TESolution

[‡] 국방과학연구소

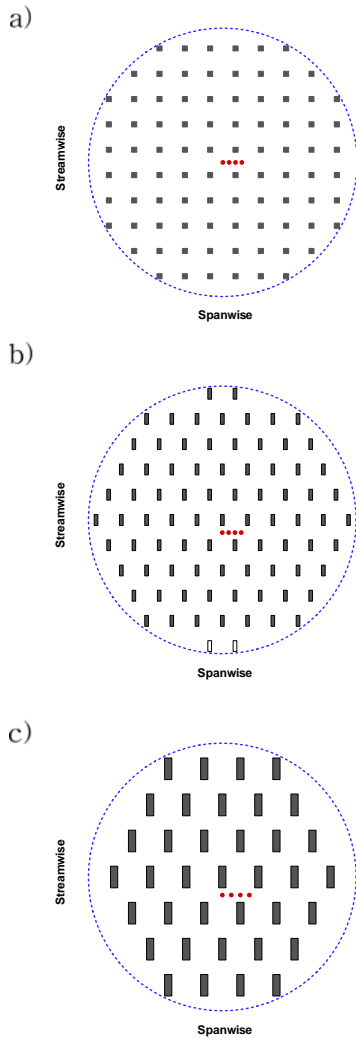


Fig. 1 Schematic plan view for obstacle arrays A, B and C.

과의 신뢰도를 평가하기 위해서 수행하였다. 실험모형은 이상화된 도시지형조건을 가정하여 형태가 동일한 블록모형을 Fig. 1과 같이 규칙적으로 배열하였다. 본 실험에서 측정된 항목은 모형별 각 지점의 고도에 따른 평균풍속 및 난류강도이며 측정점은 Fig. 1와 같다.

실험에 사용한 풍동은 대형 경계층 풍동으로서 open-circuit (suction) 형식이며, 측정부의 크기는 8.0(W)×2.5(H)×23.2m(L)이다. Fig. 1의 도시모형 A, B, C 세 가지에 대하여 모형을 회전함으로써 여러 풍향에 대한 실험을 수행하였다. 단 측정점의 위치는 회전하지 않고 고정되어 있다. 각 도시모형별 장애물의 치수는 모형 A, B, C에 대하여 가로 세로가 각각 4 cm × 4 cm, 4 cm × 12 cm, 8 cm × 24 cm 이고 높이는 20 cm 로 동일

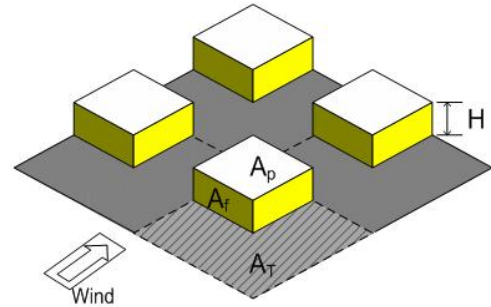


Fig. 2 Definitions of morphological parameter.

하며 간격은 가로 세로 방향으로 각각 28 cm, 28 cm, 40 cm 이다.

본 연구에서는 또한 LES를 수행하여 실험으로부터 얻기 힘든 자료를 보충하였다. 비압축성 Navier-Stokes 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + f_x + \nu_T \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) u \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + f_y + \nu_T \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + f_z + \nu_T \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) w \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

위 식에서 ν_T 는 난류점성계수로서 모델이 필요한 항이다. 본 연구에서는 Smagorinsky의 모델을 사용하였다⁽⁵⁾. 입구조건은 실험에서 얻어진 접근류를 사용하였으며 좌우측 경계와 위쪽 경계면에서는 미끄러짐 경계조건을 적용하였다.

3. 도시모델

도시모델에서 지형피복도를 사용하는 것은 오차가 큰 단점이 있고, 수치해석은 정확한 대신 큰 비용이 들며 대규모 도시지역에서는 현실적으로 적용하기가 불가능하다. 따라서 장애물로 부터 유동파라미터를 구하는 지형학적방법 (morphological method)이 도시모델을 위한 새로운 방법으로 떠오르고 있다. 본 연구에서는 도시모델을 편의상 세 가지 모델로 구분하였다. 첫째 유동변수에 대한 지형모델 (morphological model), 두 번째로 바람장에 대한 속도모델 (velocity model)이다. 세 번째, 난류량에 대한 난류모델이다. Fig. 2는 도시모형으로서 지형인자의 정의를 나타내며 이로부터 면적비($\lambda_p = A_p/A_T$)와 전면면적비($\lambda_f = A_F/A_T$) 및 canopy 높이 (H)를 정의

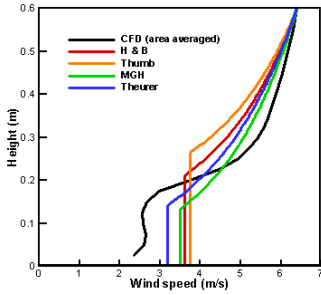


Fig. 3 Urban model A, wind direction 0

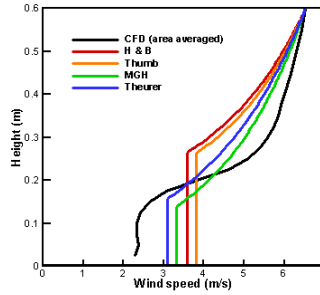


Fig. 4 Urban model A, wind direction 40

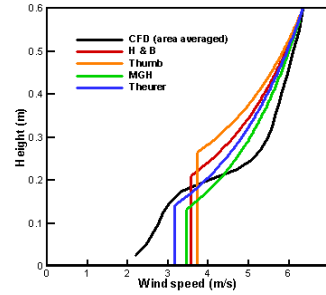


Fig. 5 Urban model B, wind direction 0

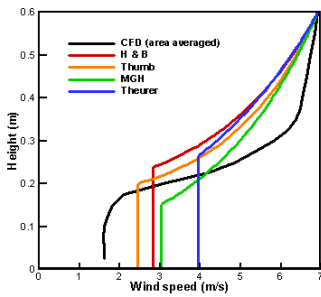


Fig. 6 Urban model B, wind direction 40

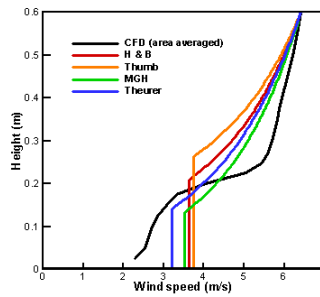


Fig. 7 Urban model C, wind direction 0

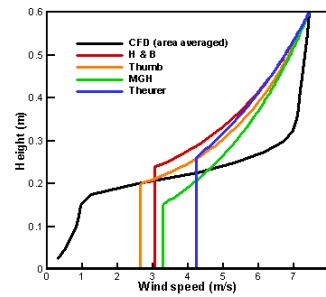


Fig. 8 Urban model C, wind direction 40

할 수 있다.

지형모델에 대한 조사를 수행하였으며, 그 대상은 유동 파라미터인 거칠기길이 z_0 , 배체두께 d 를 동시에 제안하는 것으로 하였다. Hanna & Britter⁽¹⁾는 전면면적비를 여러 구간으로 나누어 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$z_0/H = \lambda_f \quad \text{for } \lambda_f < 0.15 \quad (5)$$

$$z_0/H = 0.15 \quad \text{for } \lambda_f \geq 0.15 \quad (6)$$

$$d/H = 3\lambda_f \quad \text{for } \lambda_f < 0.05 \quad (7)$$

$$d/H = 0.15 + 5.5(\lambda_f - 0.05) \quad (8)$$

for $0.05 < \lambda_f < 0.15$

$$d/H = 0.7 + 0.35(\lambda_f - 0.15) \quad (9)$$

for $0.15 < \lambda_f < 1.0$

(if $\lambda_f > 1.0$, then set $\lambda_f = 1.0$)

Grimmond & Oke⁽³⁾는 모든 λ_f 구간에서 단순하게 적용할 수 있는 식을 제시하였다.

$$z_0/H = 0.1 \quad (10)$$

$$d/H = 0.7 \quad (11)$$

MacDonald, et al.⁽²⁾은 물리적인 접근 방법으로 Lettau의 모델을 확장하여 다음의 모델을 제시하였다.

$$\frac{z_0}{H} = \left(1 - \frac{d}{H}\right) \exp\left(-\left(0.5\beta \frac{C_D}{\kappa^2} (1 - d/H)\lambda_f\right)^{-0.5}\right) \quad (12)$$

$$\frac{d}{H} = 1 + A^{-\lambda_p}(\lambda_p - 1) \quad (13)$$

Theurer⁽⁴⁾는 실제 스케일의 도시 및 풍동실험의 결과로부터 다음 모델을 제시하였다.

$$\frac{z_0}{H} = 1.6\lambda_f(1 - 1.67\lambda_p) \quad (14)$$

$$\frac{d}{H} = 1.67\lambda_p \quad (\lambda_p < 0.6) \quad (15)$$

현재까지 개발된 Hanna & Britter, Cionco, MacDonald의 속도모델은 속도분포를 높이에 따라 2 - 3 가지로 구분하여 제시하고 있다. 지면에서 충분히 먼 곳의 속도는 모든 모델에서 대부분 포로 모델링하고 있다. 대수분포는 다음과 같다.

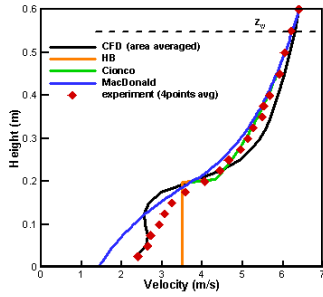


Fig. 9 Urban model A, wind direction 0

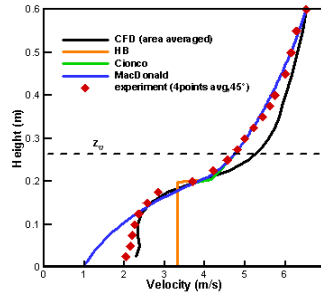


Fig. 10 Urban model A, wind direction 40

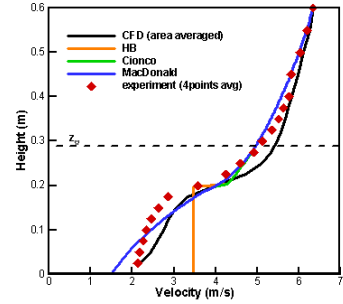


Fig. 11 Urban model B, wind direction 0

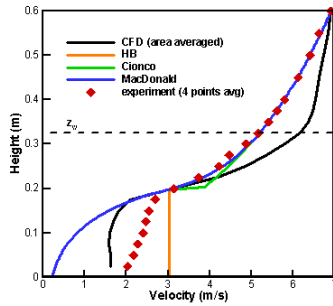


Fig. 12 Urban model B, wind direction 40

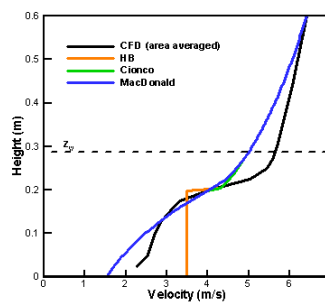


Fig. 13 Urban model C, wind direction 0

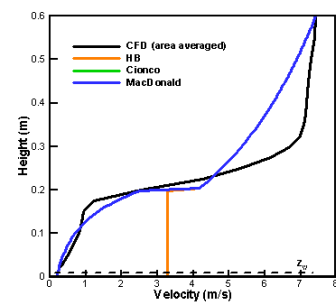


Fig. 14 Urban model C, wind direction 40

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln[(z-d)/z_0] \quad (16)$$

Canopy 하부층에 대한 첫 번째 모델은 지수함수 분포를 주는 것이다. Cionco (1965)는 수목층에서 전단응력과 항력의 균형을 가정하여 다음과 같은 속도분포를 얻었다.

$$\frac{u}{u_H} = \exp(\alpha(\frac{z}{H} - 1)) \quad (17)$$

여기서 α 는 감쇠계수(attenuation coefficient)로서 MacDonald⁽⁶⁾는 $\alpha = 9.6\lambda_f$ 를 최적 관계식으로 제시하였다. Hanna & Britter⁽¹⁾ canopy 내부의 속도를 일정하다고 간주한 특성속도(u_c)를 제시하였다.

$$\frac{u_c}{u_*} = \left(\frac{2}{\lambda_f}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ for } \lambda_f > 0.15 \quad (18)$$

$$\frac{u_c}{u_*} = (z_0/2H)^{-\frac{1}{2}} \text{ for } \lambda_f < 0.15 \quad (19)$$

특성속도 모델과 지수분포 모델의 단점은 canopy 층에서 상부의 로그분포속도와 하부의 속도분포가 연결되지 않아 불연속적인 속도분포가

발생할 수 있다는 것이다. 이러한 단점을 해결하고 보다 정확한 속도분포를 모델링하기 위해 MacDonald⁽⁶⁾는 $H < z < z_w$ 범위에서 속도분포를 다음과 같이 수정시키는 matching profile을 제안하였다.

$$u(z) = \frac{u_*}{B} \ln\left(\frac{A+Bz}{A+BH}\right) + C \quad (20)$$

계수 A, B, C는 MacDonald⁽⁶⁾을 참고할 수 있다. 이 모델은 가장 정교한 모델이긴 하나, 모델 상수의 수가 증가하며 z_w 에 대해 매우 비선형적인 모형이므로 입력되는 파라미터의 값에(d , l_c , z_0 , u_H/u_* 등) 따라 결과가 크게 달라지는 단점이 있다.

지형모델 및 속도모델을 본 연구에서 수행된 풍동실험 및 LES 자료와 비교 검증 하여 모델의 성능을 평가하였다. 네 가지 지형모델과 세 가지 속도모델로부터 12가지 모델 조합이 가능하며, 본 연구에서 제시된 풍동모형 A, B, C와 풍향 0도 40도인 경우에 대하여 평가를 수행하였다. 먼저 지형모델을 평가하여 정확성을 검정하였다.

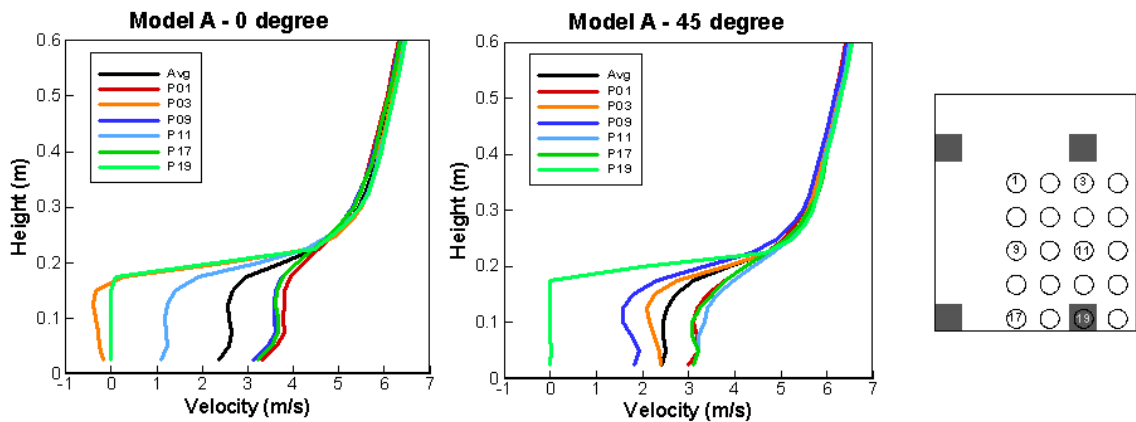


Fig. 15 One-point mean velocity profiles measured at six points and their locations in the cube array. Black line is the average of twenty one-point mean velocities.

파라미터 값을 평가하는 경우이므로 속도모형을 Hanna & Britter 모델로 고정하고 네 가지 지형모델에 대하여 조사하였다. 대수층에서 속도분포의 정확성을 평가함으로써 모델의 정확도를 비교할 수 있다. 비교 대상은 CFD 결과이다. Figs. 3 ~ 8에서 모든 풍동모형과 풍향에 대해 조사한 결과 대수층 속도 분포는 MGH 모델이 가장 근사하게 나타나고 있다. 그러나 가장 근사한 경우에도 속도구배가 크게 나타나고 있는데 이는 마찰속도가 크게 예측되었기 때문이다.

다음으로 속도모델에 대한 평가를 수행하였다. 위 지형모델 평가에서 MGH 모델이 가장 근사한 파라미터를 제시하였으므로 이 모델을 지형모델로 고정하고 세 가지 Hanna & Britter, Cionco, MacDonald 속도모델에 적용하였다. Figs. 9 ~ 14에 풍동 실험, CFD 및 모델로부터 얻어진 속도를 비교하였다. Hanna & Britter 모델의 경우 대수층 속도분포는 잘 들어맞고 있으나 canopy 하부에서 항상 과대평가하는 경향이 있다. 이는 대수층의 오차와 마찬가지로 마찰속도가 과대평가되었기 때문이다. Cionco 모델은 대수층에서 같은 모델을 사용하나 canopy 층에서는 지수분포를 사용하므로 보다 현실감 있는 속도분포를 기대할 수 있다. 그림에서 보듯이 지면에 근접할수록 속도가 감소하는 현상을 나타내고 있다. 다만 많은 경우 속도가 과소평가 되고 있으며, 아래의 지수분포와 위쪽의 대수분포가 canopy에서 항상 연결된다는 보장은 되지 않는다. MacDonald 모델은 canopy 근처에 matching layer를 사용함으로써 두 속도분포가 항상 연결되고 자연스러운 속도 변화

를 기대할 수 있게 한 것이다. Figs. 9 ~ 13에서 matching layer의 속도분포가 성공적으로 구현되어 지수분포와 대수분포가 매끄럽게 연결되고 있음을 알 수 있다. 다만 Fig. 14처럼 matching layer가 canopy 보다 낮은 경우가 발생하는데 이 경우 matching 분포는 기대할 수 없으며 Cionco의 모델과 동일하게 처리하였다. 이 현상은 MacDonald 모델의 비선형성에 기인한 것으로 매우 정밀하게 계산된 모델 파라미터를 사용하면 해결할 수 있다. 그러나 이는 인위적 조치로서 본 연구의 목적과는 부합하지 않으므로 파라미터의 의도적인 조정을 통한 해결은 고려하지 않았다.

마지막 평가로서 난류모델에 대한 평가를 수행하였다. 난류량은 오염물질의 확산에 큰 영향을 주는 양이기 때문에 정확하게 예측되어야 한다. 일반적으로 한 점에서 시간 평균한 난류량을 사용하고 있으나 이러한 방법은 도시지역과 같이 평균풍속의 변화가 공간적으로 매우 큰 곳에서는 적당하지 않을 수 있다. 이는 Fig. 15에서 보듯이 여러 점에서 측정된 각각의 시간평균 속도가 큰 차이를 보인다는 것에서도 확인 할 수 있다. 따라서 평균속도의 공간변화를 보정할 필요가 있다⁽⁷⁾. 보정한 난류량은 다음과 같다.

$$\text{난류}^2(\text{보정후}) = \text{난류}^2(\text{보정전}) + \langle (\text{시간평균속도} - \text{면적평균속도})^2 \rangle \quad (21)$$

Fig. 16은 보정 전후의 난류량을 비교한 것으로, 보정한 뒤 지면근처의 난류량이 보다 잘 예측되고 있음을 알 수 있다. 모형 A, B 모두 풍향 0도인 경우의 canopy 내부 난류량을 제외하고 모델의 난류량이 크게 예측되고 있다. 특히 횡방향 난류의 경우 주유동방 및 수직방향 난류에 비해

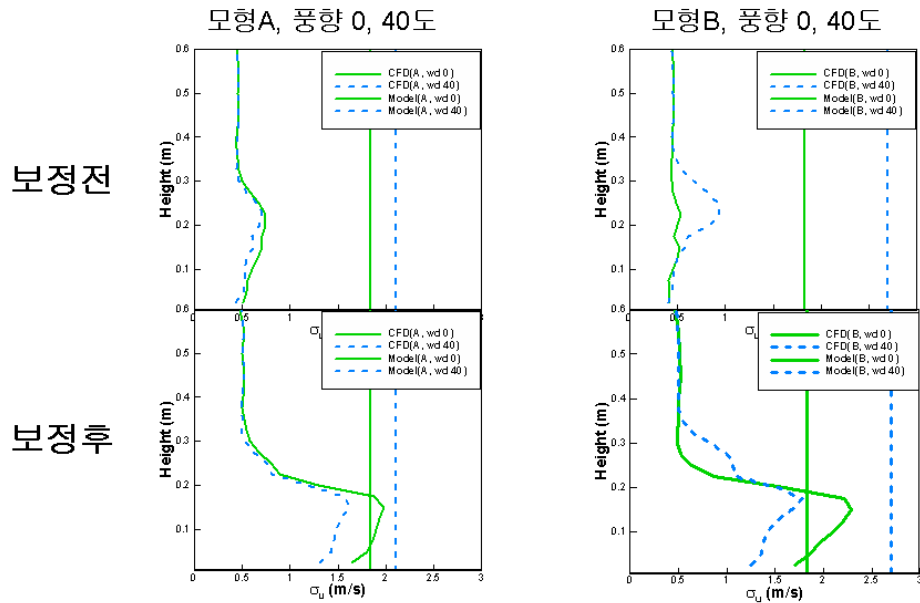


Fig. 16 Comparison of streamwise turbulence before the correction and after the correction. Left: obstacle array A; right: obstacle array B.

확산에 크게 영향을 미치므로 확산모델로부터 예측된 농도분포는 실제보다 낮게 예측될 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

기준에 제시된 도시모델의 정확도를 평가하기 위해 풍동실험 및 LES 결과와 비교하였다. 모든 모델에서 유동 파라미터가 큰 차이를 보였다. 이로 인해 속도는 canopy 내부에서 큰 오차를 보였으며 난류량의 경우 경계층 전체에서 큰 오차를 보였다. 도시모델의 최종관심 대상인 확산예측에서도 큰 오차를 보일 것으로 예상할 수 있다. 현재 단계에서 어느 모델이 가장 정확한지 판단하기는 힘들다. 만약 유동파라미터의 ‘참’값을 구할 수 있다면 모델의 성능을 직접적으로 평가하고 개선할 수 있는 기준을 마련할 수 있을 것이며, 현재 이와 관련된 연구가 진행되고 있다.

참고문헌

(1) Hanna, S. R., Britter, R. E., 2002, *Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites*, CCPS, New York.
 (2) MacDonald, R. W., Griffiths, R. F. and Hall,

D. J., 1998, "An Improved Method for the Estimation of Surface Roughness of Obstacle Arrays," *Atmospheric Environment*, Vol. 32, No. 11, pp. 1857~1864.
 (3) Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R., 1999, "Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form," *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 38, pp. 1261~1292.
 (4) Theurer, W., 1993, *Dispersion of ground-level emissions in complex built-up areas*, Doctoral thesis, University of Karlsruhe, German.
 (5) Smagorinsky, J., 1963, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment," *Monthly Weather Review*, Vol. 91, pp. 99-164.
 (6) MacDonald, R. W., 2000, "Modelling the Mean Velocity Profile in the Urban Canopy Layer," *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 97, pp. 25-45.
 (7) Britter, R. E. & Hanna, S. R., 2003, "Flow and Dispersion in Urban Areas," *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol. 35. pp. 469-496.