

고층건물에 작용하는 풍하중에 관한 수치 해석적 연구

송지수*, 박승오*, 김동우**, 하영철***

Numerical study of wind load on the high-rise building

C.S.Song*, S.O.Park*, D.W.Kim** and Y.C.Ha***

Key Words : High-rise building, wind load, URANS, turbulence model

Abstract

The wind load on building surface is numerically investigated. The geometry of target building is a square cross section and aspect ratio (height (H) to width (d)) is 6. On building surface, the pressure was measured, compared to obtained value from numerical simulation. The numerical simulations were done using URANS with three different turbulence models such as v2-f model, k- ω model, and k- ϵ model, respectively. The v2-f model showed the best agreement with experimental data in simulating mean pressure coefficients on front, rear and side surface. But unsteady characteristics of pressure history measured on surface is shown a discrepancy between experiment and numerical simulation.

1. 서론

최근에 전 세계적으로 고층 건물의 건설이 활발히 이루어지고 있다. 고층 건물에 있어서 풍하중 (wind load)이라 불리는, 바람에 의한 하중은 건물의 안정성과 거주민의 안락성에 큰 영향을 주는 중요한 요소이다. 따라서 고층건물 주변의 유동장을 이해하고 예측하는 것은 실용적으로 매우 중요한 의미가 있다.

Wang 등[1]은 PIV 실험장비를 이용하여 건물과 유사한 형태인 사각주 주변의 유동장을 연구하였다. 건물 모형의 단면은 정사각형이고 높이와 폭의 비를 의미하는 변장비(aspect ratio)는 각각 3, 5, 7이었다. 그들은 모형 건물의 변장비가 5 이상일 경우에 2차원 사각실린더 주변의 유동장에서 볼 수 있는 Karman 와 떨어짐(vortex shedding)이 존재함을 확인하였다[1].

본 연구에서는 변장비가 6인 고층건물을 대상으로, 3개의 난류모형을 사용하여 URANS 계산을 수행하고 그 결과를 실험치와 비교하였다. 이를 통해 본 연구에서 사용된 난류모형의 예측 성능과 한계에 대해서 고찰하고자 하였다. 그리고 본 연구에서 사용된 실험데이터는 금오공과대학교의 풍동장비를 이용하여 측정되었다.

2. 지배방정식과 난류모델

URANS 방법의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{Continuity equation: } \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum equation:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\nu S_{ji} - \tau_{ij}] \quad (2)$$

운동량방정식 내에 있는 레이놀즈 응력이라 불리는 미지수, τ_{ij} 를 구하기 위해서 난류모델식이 같이 풀려야 한다.

2.1 난류 모델

본 연구에서는 3가지의 난류모형을 사용하여 고층 건물 주변의 비정상적인 유동 특성을 모사하고, 그 예측 성능을 비교하고자 하였다.

2.1.1 k- ϵ turbulence model (Launder-Sharma)

오랫동안 널리 사용되어져 오고 있는 표준 k- ϵ 난류모델은 Launder and Spalding [2]에 의해서 제안되었다. 표준 k- ϵ 난류모델을 바탕으로 하여 수정된 난류모델도 많이 제시되었다. 본 연구에서는 Launder and Sharma [3]가 수정한 k- ϵ 난류모델을 이용하였다. 이 모델은 표준 k- ϵ 난류모델에 비해서 수치적으로 안정적이라고 알려져 있다. 난류 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j k - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{ij} S_{ij} - \epsilon + \Phi_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j \epsilon - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - c_{\epsilon 2} f_2 \frac{\epsilon^2}{k} + \Phi_\epsilon \quad (4)$$

모델 상수는 다음과 같다.

$$c_{\mu} = 0.09, c_{\epsilon 1} = 1.45, c_{\epsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$\nu_t = c_{\mu} f_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon}, \Phi_k = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial y} \right)^2, \Phi_\epsilon = 2 \frac{\nu}{\nu_t} \left(\frac{\partial^2 u_s}{\partial y^2} \right)^2$$

$$f_{\mu} = \exp(-3.4/(1+0.02Re_t^2)),$$

* KAIST 항공우주공학과, songchisu@kaist.ac.kr

** TE 솔루션

*** 금오공과대학교 건축공학부 ycha@kumoh.ac.kr

$$f2 = 1 - 0.3 \exp(-Re_t^2), Re_t = \frac{k^2}{\nu \epsilon}$$

2.1.2 k- ω turbulence model

Wilcox[4]는 난류 소산률(ϵ) 대신 비소산률 (specific rate of dissipation (ω))를 이용하여 난류 모델을 제시하였다. k- ω 난류모델에서는 벽 근처에서 과도한 격자수를 줄이기 위해 제안된 벽함수가 이용되지 않고, 경계층 내부의 점성저층을 직접 수치해석한다. k- ω 난류모델은 박리를 수반하는 유동의 수치해석 시 좋은 예측성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 난류모델식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j k - (\nu + \sigma^* \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{tij} S_{ij} - \beta^* \omega k \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j \omega - (\nu + \sigma \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{tij} S_{ij} - \beta \omega^2 \quad (6)$$

모델상수는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{5}{9}, \beta = \frac{3}{40}, \beta^* = \frac{9}{100}, \sigma = 0.5, \sigma^* = 0.5, \nu_t = \frac{k}{\omega}$$

2.1.3 v2-f turbulence model

v2-f 난류모델은 Durbin[5]에 의해 제안되었다. 이 모델은 비정상적인 유동 해석 시 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 이 모델은 k- ϵ 표준 모델에 v2와 f에 관한 방정식이 추가된다. v2는 레이놀즈 응력 중 한 성분이고, f는 타원형 함수이다. 모델 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j k - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = \tau_{tij} S_{ij} - \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j \epsilon - \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) = \frac{c'_{\epsilon 1} P - c_{\epsilon 2} \epsilon}{T} \quad (8)$$

$$\frac{\partial v^2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(U_j v^2 - (\nu + \nu_t) \frac{\partial v^2}{\partial x_j} \right) = k f - \nu^2 \frac{\epsilon}{k} \quad (9)$$

$$L^2 \nabla^2 f - f = (1 - c_1) \frac{\left[\frac{2}{3} - \frac{v^2}{k} \right]}{T} - c_2 \frac{P}{k} \quad (10)$$

모델상수는 다음과 같다.

$$L = C_L l, l^2 = \max \left[\frac{k^3}{\epsilon^2}, C_\eta^2 \left(\frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \right], T = \max \left[\frac{k}{\epsilon}, 6 \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \right],$$

$$c'_{\epsilon 1} = 1.4 \times \left(1 + 0.045 \left(\frac{k}{\nu^2} \right)^{1/2} \right), C_\mu = 0.22, c_1 = 1.4,$$

$$c_2 = 0.3, c_{\epsilon 2} = 1.9, \sigma_\epsilon = 1.3, C_L = 0.25, C_\eta = 85.0,$$

$$\nu_t = C_\mu \nu^2 T.$$

3. 경계조건과 계산영역, 격자계

3.1 입력조건

수치해석 시 이용된 속도분포와 난류 운동 에너지의 분포 등 입력조건은 풍동실험에서 측정된 값을 바탕으로 구성하였다.

3.1.1 속도 profile

입력속도분포는 지수함수를 이용하여 구성하였다. 그림 1-(a)에는 수치해석과 실험에서 측정된 속도분포를 함께 나타내었다. 그리고 이 때 이용된 지수

값(α)은 0.25 으로 풍동에서 측정된 속도분포와 잘 일치한다.

$$U(z) = U_s \left(\frac{z}{z_s} \right)^\alpha, \alpha = 0.25 \quad (11)$$

3.1.2 난류운동에너지 profile

Yoshie 등[6]은 난류운동 에너지의 수직분포를 생성시키는 방법에 대하여 언급한 바 있다. 난류운동 에너지는 난류강도의 수직분포와 속도의 분포로부터 식 12을 이용하여 얻어진다. 본 연구에서 난류 강도의 수직분포는 풍동에서 측정된 값을 이용하였다. 그림 1-(b)에는 난류운동에너지의 수직분포를 나타내었다.

$$k(z) = (I(z) U(z))^2 \quad (12)$$

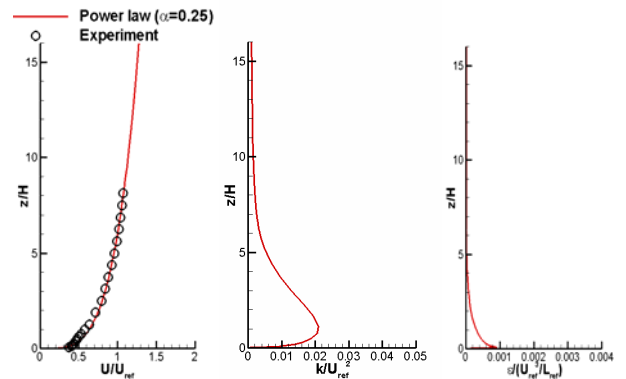
3.1.3 소산률(ϵ) profile

소산률의 수직분포를 생성시킬 때는 다음의 가정을 이용한다. 즉 난류의 생성(P_k)과 소산률(ϵ)이 평행하다고 가정하면 식 13과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon(z) \cong P_k(z) \cong -\overline{u'w'}(z) \frac{dU(z)}{dz} \cong C_\mu^{1/2} k(z) \frac{dU(z)}{dz} \quad (13)$$

따라서 속도의 수직 분포를 알고 있다면 식 13으로부터 소산률의 수직분포를 구할 수 있다.

$$\epsilon(z) = C_\mu^{1/2} k(z) \frac{U_s}{z_s} \alpha \left(\frac{z}{z_s} \right)^{(\alpha-1)} \quad (14)$$



(a) 입력속도 (b) 난류운동에너지 (c) 소산률
그림 1 입력조건 profile

3.2 계산 영역과 격자테스트

본 연구에서 사용된 계산 영역은 그림 2에 도시하였다. 계산 영역의 높이는 실험이 수행되었던 풍동의 측정부(Test section)의 높이와 일치한다. 횡방향으로의 폭은 Rodi[7]이 2차원 사각실린더 주변의 유동장 해석 시 이용했던 길이와 같게 하였다. 그리고 건물의 폭과 기준속도를 바탕으로 한 레이놀즈 수는 62000이다.

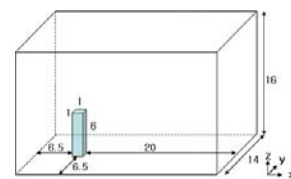


그림 2 계산영역

k- ω 난류모델을 이용하여 격자테스트를 수행하였다. 표 1에는 격자테스트에서 사용된 3가지의 격자계를 나타내었다. 바람이 불어오는 건물의 앞면의 중심선을 따른 평균 풍압분포를 비교함으로써 case 2를 본 연구의 격자계로 선정하였다.

표 1 격자테스트

Cases	N_x, N_y, N_z
Case1	137, 91, 97
Case2	121, 81, 81
Case3	101, 61, 61

본 연구에서 사용된 수치해석 코드는 절점(node) 기반으로 구성되어 있으며, 3차원 비압축성 Navier-stokes 방정식을 완전 내재적 분할법(fully implicit fractional step)을 이용하여 계산하였다. 대류항의 경우 5차의 풍상차분법을 이용하여 차분하였고, 나머지 항들은 2차 정확도의 중앙차분법을 적용하였다[8].

4. 결과

풍동실험 시, 건물 모형의 각 표면에 50개씩의 압력 홀(hole)을 뚫어서 시간에 따른 풍압 데이터를 측정하였다. 그리고 수치해석 시에는 건물 각 면당 25개의 지점에서 계산된 비정상 풍압데이터를 저장하였다.

그림 3-(a)는 건물의 앞면에서 중심선을 따른 평균 풍압계수의 분포를 나타내었다. 건물의 낮은 부분($z/D < 3$)에서 v2-f 모델은 가장 좋은 성능을 보인 반면, k- ω 난류 모델은 높은 부분($z/D > 3$)에서 실험치와 유사하게 예측되었다. 건물의 정면에서의 평균압력분포도를 그림 4-(a)에 나타내었는데 3개의 난류 모델 모두 실험치와 유사하게 예측된다.

그림 3-(b)에는 건물 후면의 중심선을 따른 평균 풍압계수의 분포를 나타내었다. 3개의 수치해석 방법 모두 실험치와 유사한 경향성을 보이나, v2-f 모델이 실험치와 가장 유사하게 예측된다. 건물 후면에서의 풍압계수의 분포 역시 v2-f 모델이 실험치와 가장 유사하게 예측됨을 알 수 있다.

그림 3-(c)에는 건물 옆면의 중심선을 따른 평균 풍압계수 분포를 나타내었다. 전체적으로 v2-f 모델과 k- ω 모델이 k- ϵ 모델보다 전체적으로 실험치와 잘 일치하였다.

다음으로 건물의 후면 중심선상의 높이가 약 $z/D=5$ 인 지점에서 저장된 시간에 따른 풍압의 데이터를 비교하였다. k- ϵ 모델의 경우에는 해가 정상상태로 수렴하였고 따라서 건물 주변의 비정상적인 특성이 모사되지 않았다. k- ω 모델과 v2-f 모델의 경우, 풍압은 시간에 대해서 섭동을 하였으나 그 폭은 차이를 보였다. (그림 5) v2-f 모델의 경우에는 k- ω 모델의 경우보다 섭동폭이 2배가량 크다. v2-f 모델이 다른 두 모델에 비해서 비정상적인 특성이 잘 반영되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 풍동실험을 통해 측정된 풍압의 섭동폭은 v2-f 모델이 비해서

훨씬 크게 예측이 되었다. 이런 차이는 비정상적인 난류 유동의 특성을 예측하는데 있어서 URANS 방법의 한계로 생각된다.

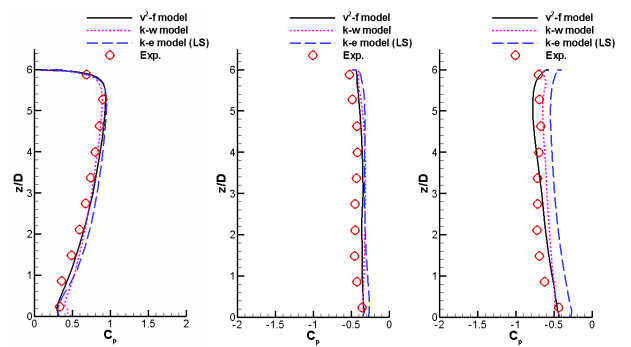


그림 3. 건물 모형 표면의 평균 풍압계수 분포

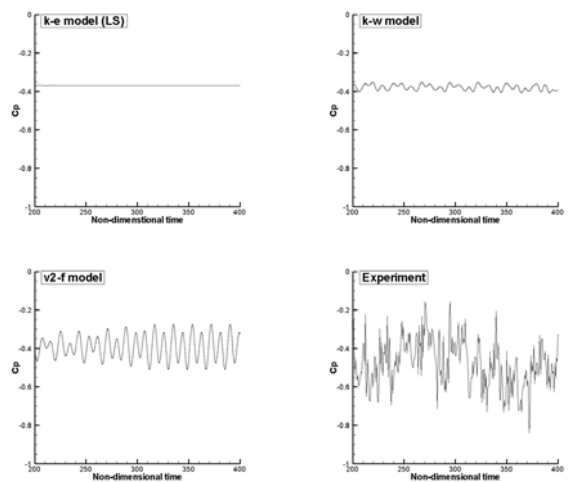


그림 5. 모형 표면에서 측정된 시간에 따른 풍압계수

5. 결론

본 연구에서는 URANS 계산을 통해서 예측된 건물 표면의 풍압 분포와 시간에 따른 풍압 섭동을 실험데이터와 비교하였다. 대상건물은 단면이 정사각형이고 변장비가 6인 건물이다. 수치해석 시 사용된 난류모델은 v2-f 모델, k- ω 모델 그리고 k- ϵ (L-S) 모델 등이다.

수치해석을 통해 예측된 건물의 각 면의 중심선을 따른 평균압력 계수는 모두 실험치와 유사한 경향을 보였다. 하지만 전체적으로 v2-f 모델의 결과가 가장 실험치와 근접하였고 특히, 건물 정면과 후면에서 평균압력계수의 분포는 v2-f 모델이 가장 좋은 예측 성능을 보였다. 또한 풍압의 비정상적인 특성은 모델에 따라 큰 차이를 보였다. k- ϵ 모델은 해가 정상상태로 수렴하여 비정상 특성이 제대로 반영되지 않은 반면 k- ω 모델과 v2-f 모델은 비정상적인 특성이 보였다. 특히 v2-f 모델의 경우 k- ω 모델보다 섭동폭이 컸으나 실험에서 측정된 값보다 작았다.

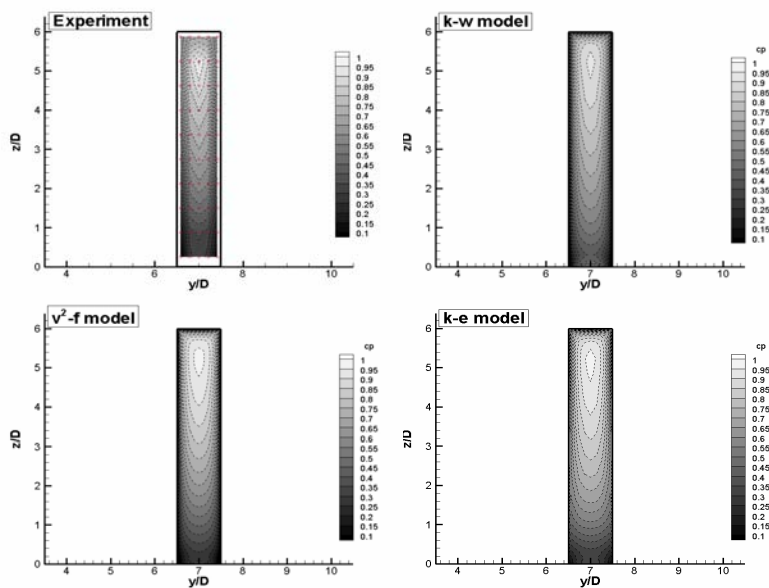
후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초 연구사업 (R01-2006-000-10520-0)의 지원으로 수행되었습니다..

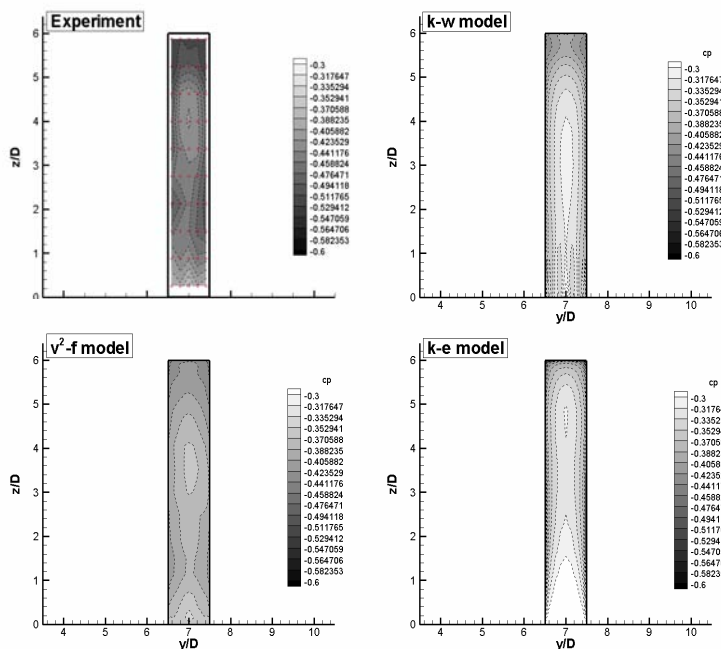
참고문헌

[1] Wang, H.F. et al, Flow structure around a finite length square prism, 15th Australasian fluid mechanics conference, Sydney, 2004.
 [2] Launder, B.E., Spalding, D.B., The numerical computation of turbulent flows, Comp. Methods in App. Mech. & Engr., 3, (1974), pp.269-289.
 [3] Launder, B.E., Sharma, B.I., Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Letters in Heat and Mass Transfer., 1, 1974, pp. 131-138.
 [4] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD, second edition. 2000.
 [5] Durbin, P.A., Petterson Reif, B.A., Statistical

theory and modeling for turbulent flows, 2000.
 [6] Yoshie, R. et al, Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 95, 2007, 1551-1578.
 [7] Rodi, W. et al, Status of large eddy simulation: results of a workshop, Journal of Fluid Engineering, 119, 1997, 248-262.
 [8] Chang et al, Assessment of Predictive Capabilities of Detached Eddy Simulation to Simulate Flow and Mass Transport Past Open Cavities, Journal of fluids engineering, 129, 2007, 1372-1383.



(a) 건물 모형 정면



(b) 건물 모형 후면

그림 4. 평균 풍압계수의 분포