

난류모델에 따른 건물주위의 유동 예측

이승호*·여재현*·허남건**·최창근***

A Prediction of the Flow Characteristics around Buildings with the Turbulent Models

Seung Ho Lee*, Jae Hyun Yeo*, Nahmkeon Hur** and Chang-Koon Choi***

Key Words : Pressure Coefficient(풍압계수), Flow Analysis(유동해석), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Turbulence Model(난류 모델), LES(대와동모사), Standard $k-\epsilon$ model, RNG $k-\epsilon$ model

Abstract

In the present study, turbulent flows around cubic and L-shape buildings were simulated numerically. Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, LES turbulence models were adopted for the present simulation. The wind pressure coefficients from these results were compared with the available experimental data. The result of RNG $k-\epsilon$ and LES turbulent models gave better prediction than that of standard $k-\epsilon$ turbulent model which is widely used in the turbulent flow simulation.

1. 서론

도시화가 급속도로 진행되면서 면적대비 건물의 높이가 증가하고, 건물의 대형화가 이루어지고 있다. 또한 각 건물의 용도와 특성을 살려, 획일화된 건축 구조물 보다는 다양한 형태의 건물이 건축되고 있다. 고층 건물의 구조적 안전성은 지진하중 및 풍하중에 매우 취약함을 보이는데, 건축물이 일정 규모 이상이 된다면 구조 강성이 작아지고 이로 인하여 고유 진동주기가 길어진다. 따라서 바람에 민감하게 반응하여 경우에 따라서 큰 진동을 일으키게 되기 때문에 지진하중보다는 풍하중이 안전성을 결정하는 중요한 인자가 된다.

바람에 의해서 건축물에 발생하는 풍압은 실제 형상의 풍압을 측정하는 방법과 풍동 실험을 이용한 모형실험, 그리고 수치해석적인 방법으로 해석할 수 있다. 이러한 방법으로 건축물 주변의 풍압 해석은 여러 연구자들에 의해서 수행되었다. Castro와 Robins[1]는 풍동 실험을 통해서 정육면체 주변의 유동을 해석하여 압력분포를 측정하였고, Banks 등[2]은 풍향에 따른 압력 분포를 측정하여 유동 가시화 방법기법으로 나타내고 접근하는 유동에 대하여 지붕에 발생하는 와의 공기역학적 특성을 제시하였으며, Franchini 등[3]은 풍동실험을 이용해서 건축물 지붕에 난간 벽을 설치하여 난간 벽의 유무와 지붕 높이에 따른 최대풍압계수, 평균풍압계수 및 음압계수 등을 선행된 연구와 비교하였다. 또한 Richards 등[4]은 6m 정육면체 건축물에 실질적인 풍압계수를 실험 측정하고 이를 풍동실험과 비교 검증 하였다.

위와 같이 건축물의 내풍 특성에 관한 연구는 많은 부분이 풍동 실험에 의하여 이루어 졌다. 하지만 최근 들어 전산유체

역학(CFD)의 발전과 더불어 수치 시뮬레이션의 이용이 잦아지고 있다. 따라서 복잡한 구조를 가지고 있는 형상의 유동 현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고 기존 설계를 개선해 나가는 사례들이 증가하고 있다. Gomes 등[5]은 여러 가지 모양을 가진 건축물에 대해서 여러 풍향각에 따른 유동현상을 해석하였다. 이러한 수치 시뮬레이션의 목적은 실제크기의 실험이나 풍동실험에 비해 시간 단축 및 경비 절감에 있으나 시뮬레이션을 통해서 유동 현상을 어떠한 방법을 이용하여 얼마나 정확하게 나타내느냐가 가장 중요하다.

대기에서 발생하는 바람의 대부분이 난류이고 구조물에 작용하는 풍하중역시 난류에 영향을 받는다. 따라서 수치 시뮬레이션을 이용하여 구조물에 작용하는 풍하중을 예측할 때, 어떠한 난류모델을 사용하여 난류를 해석하느냐가 관건이 될수 있다. 그러므로 건축물 주변의 유동 해석에 있어서 신뢰할만한 난류모델에 대한 연구가 이루어 져야 한다. 본 연구에서는 단순화된 건물에 대해 난류모델의 영향에 대해 확인하기 위해 수렴성이 가장 좋고 많이 사용되는 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 일부 문헌[6]에서 경계층 박리 및 재부착 등의 예측이 가능한 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델, 큰 에디는 직접 계산하고 작은 유동은 모델링을 통해 계산하는 LES(Large Eddy Simulation)난류모델을 이용하여 수치 시뮬레이션을 통한 건축물 표면의 압력분포를 검토하고자 한다. 또한 건축물의 형상에 따라 건축물 주변의 유동에 대한 정확한 예측을 위해 난류모델 선택 및 난류모델에 따른 유동장의 변화, 공기역학적 특성, 풍압계수를 수치 시뮬레이션을 통해 조사하고 그 타당성에 대해 검증하였다.

2. 해석 조건 및 방법

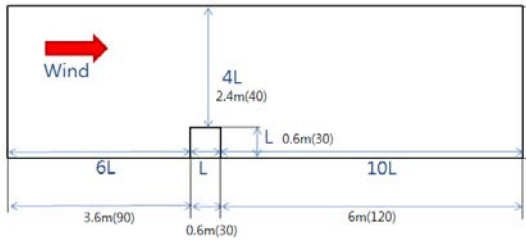
2.1 해석 모델과 격자 생성

본 연구에서 해석한 모델은 풍동실험을 이용한 모형실험의 건축물을 모델링 하였다. 이러한 모델로 해석한 결과는 일반적인

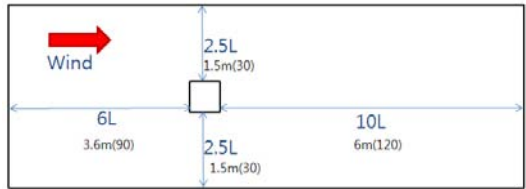
* 서강대학교 대학원

** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

*** KAIST 토목학과, cck@cais.kaist.ac.kr



(a) vertical cross section



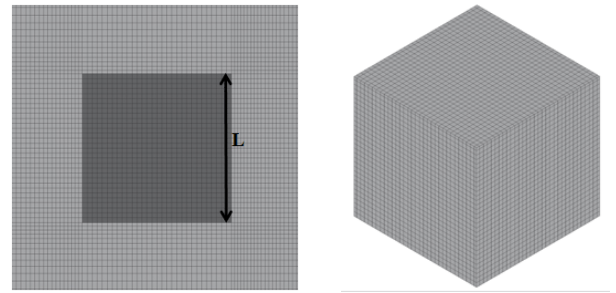
(b) horizontal cross section

Fig. 1 Computational domain

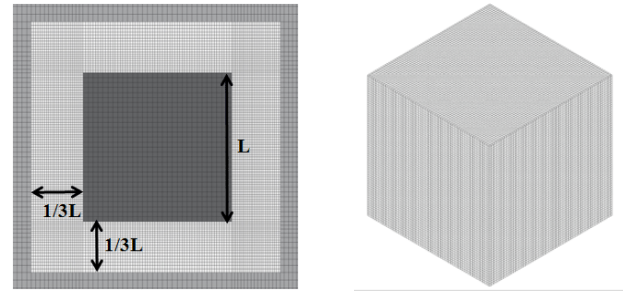
건축물 주위의 바람에 의해 발생하는 평균풍압계수 및 박리, 재부착, 재순환 유동 등의 복잡한 공기 역학적 특성을 나타내어 준다. 해석 모형에 적용한 건축물은 정사각형 건물로서 크기는 0.6m×0.6m×0.6m(가로×세로×높이)이고 위치는 건물의 한쪽 모서리 길이를 L로 했을 때 Fig. 1의 (a),(b)와 같이 입구 쪽에서 6L, 상단부에서 4L, 측면에서 2.5L, 출구 쪽에서 10L만큼 떨어져 있도록 설정하였다. 건축물의 표면 최소 격자 크기는 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델에서 Fig. 2(a)와 같이(30×30×30) 설정하였으며 사용된 해석 격자는 총 1,510,000개 이다. LES 난류 모델은 Fig. 2(a)와 같이 건축물 주변의 1/3L영역의 격자를 가로, 세로, 높이방향으로 2배의 수(60×60×60)로 생성하여 격자를 설정하였고 사용된 해석 격자는 총 2,160,900개이다. 또한 L-모양 건물은 Fig 3(a),(b)와 같이 정육면체 건물과 크기는 같고 모양만 다르게 설정하였다. 난류모델에 따른 영향을 알아보기 위해서 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델, LES 난류 모델을 적용하여 해석한 결과로부터 얻어진 풍압계수를 수직방향과 수평방향으로 선행된 실험 값과 비교하여 나타내었다. 경계 조건은 입구면과 출구면을 대기 압력조건으로 양단 끝에 적용하였으며 입구면과 출구면을 제외한 모든 면에는 벽조건을 부여하였다. 입구조건에 입력되는 속도는 균일한 유동으로 10m/s로 설정하였고 난류 강도는 사각형건물은 0.5%로, L형건물은 0.1%로 설정하였다.

2.2 해석 방법

수치 시뮬레이션을 수행하는 데에 있어서 Opteron 2.4GHz 4CPU 리눅스 클러스터 환경에서 상용 프로그램인 STAR-CD V3.24와 를 사용하였다. 수치해석에 총 소요된 시간은 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 18-24시간이고, LES난류모델은 242시간이다. Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 모형실험 내 유동을 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하였고, 압력보정 알고리즘은 SIMPLE을 사용하였다. LES 난류모델은 PISO 알고리즘을 사용하여 비압축성 유동을 해석하였고 유동장에서 대류항과 확산항은 MARS를 이용하여 계산하였다. 시간의



(a) standard $k-\epsilon$ and RNG $k-\epsilon$ turbulence models (30×30×30)



(b) LES turbulence models (60×60×60)

Fig. 2 Computational meshes around the cube

이산화 방법은 Crank-Nicolson Method를 적용하였고 Time step은 0.01초로 설정하여 50초를 해석한 후에 Time step을 0.001초로 재설정하여 5초간의 풍압계수를 평균하여 결과로 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단순화된 사각형 건물

적용된 난류 모델에 따른 단순화된 정사각형 건축면에 작용하는 풍압계수의 분포를 Fig. 4(a),(b)에 건물의 중심으로 수직과 수평방향으로 나타내고 선행된 실험 논문과 비교 하였다. Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델 그리고 LES난류모델에서 건물의 상류면에서 가장 큰 부압을 가지며, 상류면 중앙 부분에서 정체점(stagnation point)이 생긴다. 이 정체점을 중심으로 멀어질수록 풍압계수가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 건물의 상류면에서는 standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델, LES 난류모델이 모두 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 건물의 윗면과 측면의 압력 분포를 보면, Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용했을 때 가장 크게 압력 강하 현상이 나타난다. 이는 Fig. 4에서와 같이 건물 상단 전면 모서리 부분과 양쪽 모서리부분에서의 박리 현상을 예측 못한 결과로 추정되고 건물 표면에 작용하는 평균 풍압 계수는 난류 에너지가 크게 예측되었기 때문이다. 반면 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 사용해서 해석을 한 경우는 실험값과 매우 근접하게 예측 되었다. RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 복잡한 3차원 유동에서 난류 에너지를 크게 예측하는 것을 방지하기 위해 난류에너지 소산률 방정식에 난류에너지 값을 보정하기 때문에 건물 상단부분과 모서리 부분에서 생기는 유동 분배현상으로 인한 재순환 및 박리 현상을 대체적으로 잘 나타

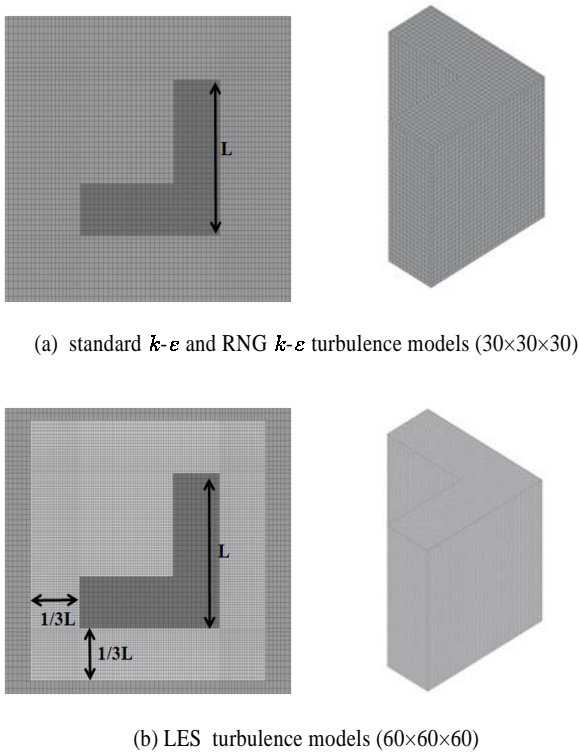
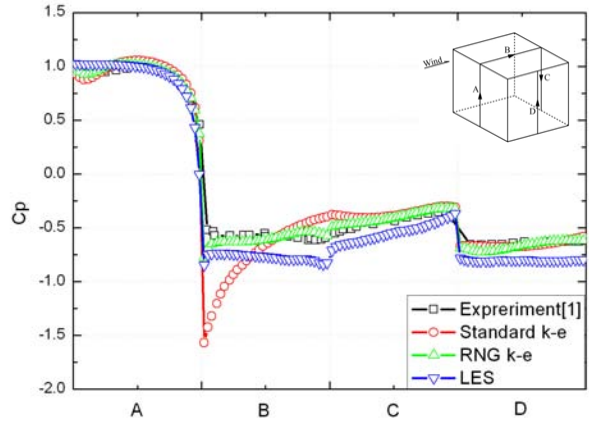


Fig. 3 Computational meshes around the L-shape

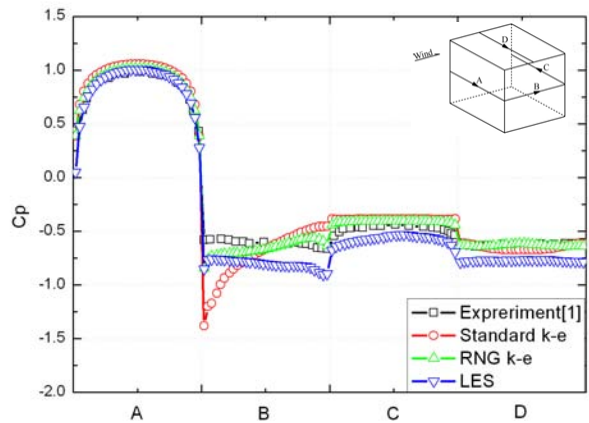
낸다. 그러나 경향성면에 있어서는 상류면에서 건물의 뒤쪽으로 갈수록 감소하는 경향성과, 측면에서의 거의 일정한 압력분포를 LES 난류 모델이 더욱 잘 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, LES 난류 모델의 경우, 실험값과의 오차가 RNG $k-\epsilon$ 난류모델 보다 큰 값을 나타내지만 각 면에서 압력분포의 경향성을 더 잘 예측하였다

3.2 단순화된 L형 건물

건물에 따른 풍압계수 및 건물이 주변 환경에 미치는 영향을 확인하고자 단순화된 L-모양의 건물을 수치해석 하였다. Fig 5의 (a),(b),(c)는 균일 유동이 건축면에 작용하는 평균 풍압 계수의 분포를 유동 방향을 중심으로 수직 방향으로 수평 방향으로 실험 논문과 비교한 것이다. 유동 방향과 수직하는 상류면의 풍압 계수(a)는 해석에 사용 되었던 모든 난류 모델이 대체적으로 실험 값과 유사한 압력 계수와 경향성을 나타내었으나 RNG $k-\epsilon$ 난류모델과 LES 난류 모델이 특히 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 유동 방향과 평행하는 옆면의 풍압계수(b)에서는 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델은 실험값에 비해 낮은 압력분포를 예측하였다. 이에 반해 LES 난류 모델의 해석 결과가 풍압계수와 경향성 측면에서 현상을 더욱 잘 예측하였다. 수평방향의 풍압계수(c) 에서도 실험값과 가장 잘 일치하는 난류 모델은 LES 난류 모델이며, 경향성도 잘 예측하고 있다. standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델로 예측한 풍압계수는 서로 같은 경향성을 가지고 유동 방향과 수직인 면에서는 실험값과 대체적으로 일치하지만, 유동 방향에 평행한 안쪽 면에서는 풍압 계수의 절대값과 경향성 면에서 모두 오차가 발생한다. 특히 모서리 부분에서 박리현상에 의해 발생하는 압력강하현상은 LES 난류 모델을 이용한 해석이 비교적 정확히 예측 할 수 있었다.



(a) vertical cross section

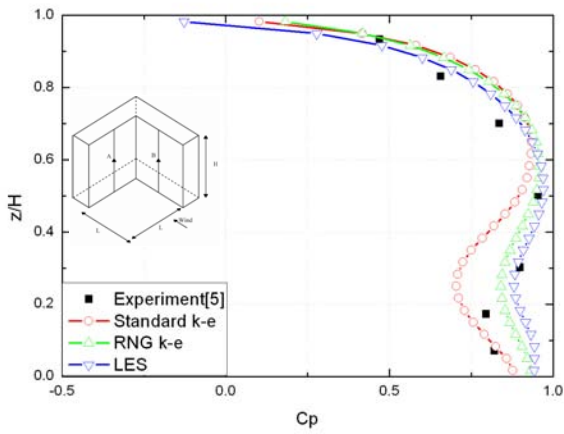


(b) horizontal cross section

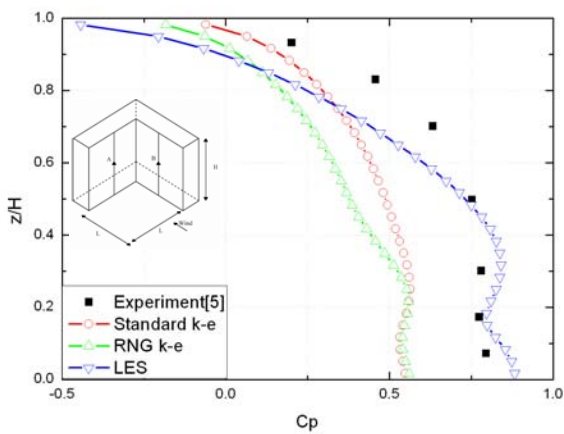
Fig. 4 Comparison of the wind pressure coefficients around the cube with Castro and Robins' experiments[1]

4. 결론

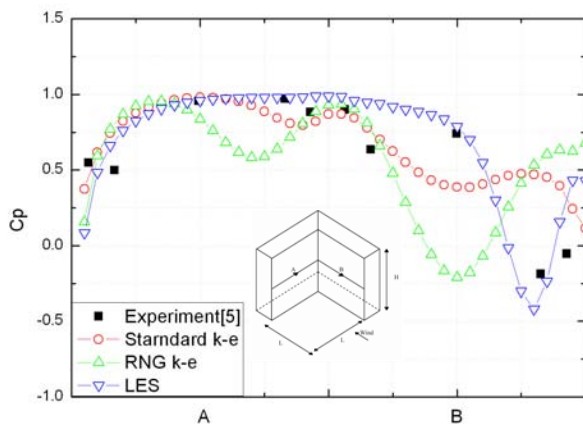
본 연구에서는 건축물에 작용하는 풍압을 알아보기 위하여 단순화된 건물면에 작용하는 풍압계수 해석을 수행 하였다. 해석에 사용된 건물은 정사각형 모양의 건물과 L-모양의 건물을 비교 분석하였고 실험값과 비교하여 오차와 경향성을 바탕으로 난류 모델의 영향을 검토하였다. 효율적인 난류모델을 확인하기 위하여 해석에 적용된 난류 모델은 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델, LES 난류 모델이다. 해석 결과, 각각의 난류 모델을 이용하여 계산한 풍압계수는 모두 실험결과와 유사한 결과를 나타낸다. 하지만 정사각형 건물의 해석에 있어서 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용한 해석에서는 유동의 박리가 일어나는 건물의 윗면과 측면에서 난류 에너지를 과도하게 예측하기 때문에 풍압계수가 실험결과와 차이를 보였다. L-모양의 건물을 해석할 때에는 경향성에 있어서 Standard $k-\epsilon$ 난류모델과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델에 비해 LES 난류 모델을 이용하여 해석하였을



(a) vertical cross section-A



(b) vertical cross section-B



(c) horizontal cross section

Fig. 5 Comparison of the wind pressure coefficients around the L-shape with Gomes' experiments[5]

때 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 이용하는 것이 수렴성 측면에서 안정된 결과를 얻을 수 있지만 급격한 edge를 가지는 건물의 풍공학적 문제를 해결할 때, 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 RNG $k-\epsilon$ 난류모델 및 LES 난류 모델을 사용하는 것이 보다 효과적이다. 또한 경향성 예측이 중요한 해석인 경우에는 LES 난류 모델을 이용하여 풍압해석을 하는 것이 가장 효과적이다.

후기

본 연구는 건설교통부가 건설기술기반구축사업의 지원으로 수행중인 이상기상 대비 구조물의 내풍설계기준 정비 및 개발사업의 일환으로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Castro, I.P. and Robins, A.G., "The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams," J. Fluid Mech., Vol.79(2), (1977), pp.307-335.
- [2] Bankds, D., Meroney, R.N., Sarkar P.P., Zhao Z. and Wu F., "Flow visualization of conical vortices on flat roofs with simultaneous surface pressure measurement," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.84, (1999), pp.65-85.
- [3] Frabchini, S., Pindado, S., Meseguer J. and Sanz-Andres A., "A parametric, experimental analysis of conical vortices on curved roofs of low-rise buildings," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.93, (2005), pp.639-650.
- [4] Richards, P.J., Hoxey, R.P. and Short L.J., "Wind pressures on a 6m cube," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.89, (2001), pp.1553-1564.
- [5] Gomes, M.G., Rodrigues, A.M. and Mendes P., "Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.93, (2005), pp.741-756.
- [6] Zhang, A., Gao, C. and Zhang, L., "Numerical simulation of the wind field around different building arrangements," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.93, (2005), pp.891-904.
- [7] STAR-CD Methodology Version 3.24, Computational Dynamics Ltd., (2004)
- [8] 이용, 명현국, " $k-\epsilon$ 난류 모델을 이용한 건물 주위의 난류 유동 예측" 대한기계학회 1999년도 춘계학술대회 논문집 B, (1999), pp.112-117