

강풍피해 위험성 평가를 위한 건물군 주위 유동해석

최춘범[†] · 양경수^{*} · 이승수^{**} · 함희정^{***}

Numerical simulation of turbulent flow around a building complex for development of risk assessment technique for windstorm hazards

Choon-Bum Choi , Kyung-Soo Yang , Sungsu Lee and Hee-Jung Ham

Key Words : Large Eddy Simulation(대와동모사), Immersed Boundary Method(가상경계법), building complex(건물군), windstorm hazards(풍해)

Abstract

Strong wind flow around a building complex was numerically studied by LES. The original motivation of this work stemmed from the efforts to develop a risk assessment technique for windstorm hazards. Lagrangian-averaged scale-invariant dynamic subgrid-scale model was used for turbulence modeling, and a log-law-based wall model was employed on all the solid surfaces including the ground and the surface of buildings to replace the no-slip condition. The shape of buildings was implemented on the Cartesian grid system by an immersed boundary method. Key flow quantities for the risk assessment such as mean and RMS values of pressure on the surface of the selected buildings are presented. In addition, characteristics of the velocity field at some selected locations vital to safety of human beings is also reported.

기호설명

U : 기준 속도
 h : 기준 높이
 f_i : 운동량 부가
 ν : 동점성 계수
 ρ : 밀도
 x_i : 3 차원 직교 좌표계 방향 성분
 $\overline{u_i}$: 여과된 속도
 Re : 레이놀즈 수(= Uh/ν)
 τ_{ij} : Subgrid-scale stress tensor
 z_0 : 바닥 및 건물표면 거칠기(roughness)
 z_{0in} : 입구 바닥 표면 거칠기
 K : von-Karman constant(≈ 0.4)

u^* : friction velocity
 p_h : 입구 h 높이에서의 압력
 $\langle \rangle$: 시간 평균
 C_p : 압력계수(= $(p - p_h)/(\frac{1}{2}\rho U^2)$)
 $C_{p,rms}$: 압력변동계수(= $\sqrt{\langle (p - p_h)^2 \rangle}/(\frac{1}{2}\rho U^2)$)
 D : 순간 풍하중(kgf)
 \overline{D} : 시간평균 풍하중(= $1/\Delta t \int_0^{\Delta t} D(t) dt$)
 D' : 풍하중 섭동 성분
 k : turbulent kinetic energy(= $\langle u_i' u_i' \rangle / 2$)

1. 서론

태풍을 비롯한 강풍이 인간에게 주는 피해는 다양하다. 태풍은 그 자체만으로도 보행을 비롯한 실외활동에 지장을 줄 뿐만 아니라, 인공 건축물의 파괴를 초래하며, 이로써 발생한 인공 구조물의 파편은 인간에게 2 차적인 피해를 가져다 준다. 최근에 우후죽순으로 건설되고 있는

[†] 인하대학교 기계공학과 대학원
E-mail : springcb@naver.com
TEL : (032)860-8771 FAX : (032)868-1716

^{*} 인하대학교 기계공학과 교수
^{**} 충북대학교 구조시스템공학과 교수
^{***} 강원대학교 건축공학과 교수

초고층 주상복합 건물들과 같이 건물들이 밀집되어 있는 지역에서 이러한 풍해(windstorm hazards)에 대한 대책이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 복잡한 건물군 주위 풍환경을 해석함으로써, 보행 높이에서의 강풍의 정도를 평가하고 건물 외벽 및 창문의 파손 가능성을 예측하기 위해 건물표면에서의 압력분포를 계산하였다.

단일 건축물에 대한 풍환경 연구는 실험적으로나 수치적으로 활발히 진행되었다^(1,4). 1977년 Castro and Robin⁽¹⁾이 실험을 통해 정육면체 표면의 압력분포를 측정 한 이후로 한 개의 cube 주위 유동에 대한 연구는 심화되어 왔으며, 최근에는 DES 와 LES 등의 수치해석적 방법이 시도되고 있다. 반면 복잡한 형상의 건물군 주위 풍환경 연구는 풍동실험에 국한되어 있으며 그 수도 적은 것이 현실이다.

본 연구에서는 높은 레이놀즈수의 유동을 효율적으로 계산하기 위해 LES 기법이 사용되었으며 최근에 발표된 Lagrangian-averaged scale-invariant dynamic subgrid-scale model⁽⁵⁾을 차용함으로써 형상이 복잡한 건물군 유동을 보다 정확히 계산하였다. 자세한 동적 아격자 모델 기법은 Meneveau 등의 논문⁽⁵⁾을 참고하기 바란다.

본 연구에서는 격자에 구애받지 않고 복잡한 건물군을 형상화하기 위해 가상경계법⁽⁶⁾에 기초를 두어 수치적 해석을 수행하였으며, 높은 레이놀즈 수 하에서의 지면과 건물외벽에서의 no-slip 조건을 대체하기 위해 log-law 에 기초한 벽모델⁽⁷⁾을 사용하였다.

2. 수치해석 기법 및 검증

2.1 지배 방정식

LES 를 위한 3 차원 비압축유동의 연속방정식 과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

식 (1), (2)는 기준 속도 U , 기준 길이 h 로 무차

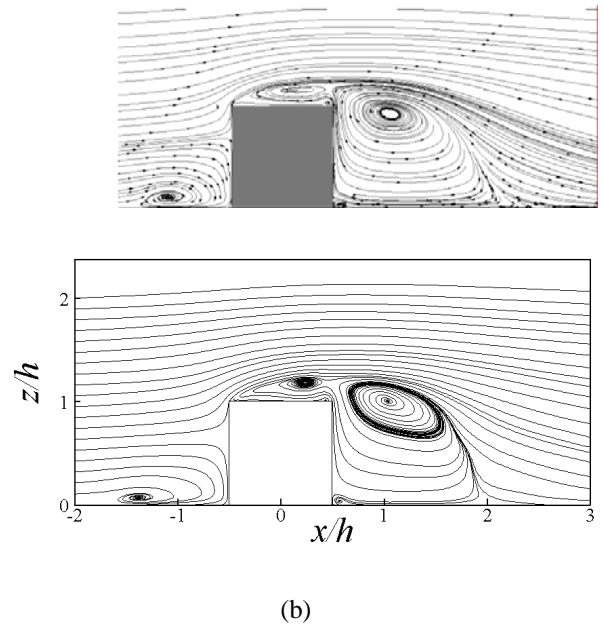


Fig. 1 Comparison of streamline in the vertical center plane: (a) result of DES⁽⁴⁾, (b) present LES calculation.

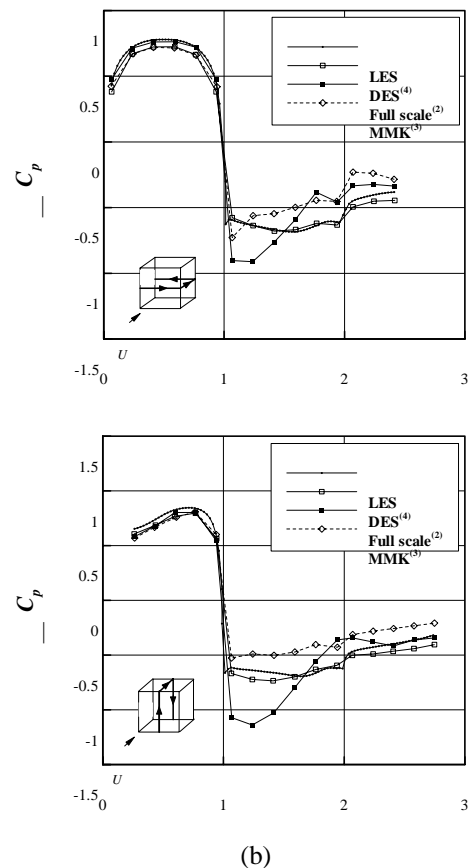


Fig. 2 Comparison of pressure coefficient: (a) along the horizontal center line, (b) along the vertical center line.

원된 식이며, 가상 경계법이 적용됨으로써⁽⁶⁾ 운동량 부가 f_i 가 추가되었다. x_j 는 직교좌표계의

각 방향좌표를 의미하며 x_1 이 주유동방향(x), x_2 이 횡방향(y), x_3 가 수직방향(z)으로 각각 정의된다. P 와 τ_{ij} 는 각각 필터된 압력과 subgrid-scale stress 성분을 의미한다. 무차원 파라미터 Re 는 레이놀즈 수 ($=Uh/\nu$)로 정의되었다.

각 지배 방정식은 직교좌표계에서 유한체적법(Finite Volume Method)으로 차분되었다. 공간 차분은 점성항의 경우 중앙차분법을 사용하였고, 대류항은 QUICK(Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics) 방법을 사용하였다. 시간 차분은 대류항에 대하여 3 차 정확도의 Runge-Kutta 양해법(explicit)으로 적분하였고 점성항에 대하여 Crank-Nicolson 의 음해법(implicit)으로 적분이 수행되었다. 연속방정식과 운동량 방정식을 분리하기 위하여 fractional step 기법⁽⁸⁾이 사용되었다.

2.2 바닥에 부착된 정육면체 주위의 유동

수치해석 기법에 대한 검증은 바닥에 부착된 사각 cube 주위의 난류유동 해석을 통해 이루어졌다. 계산영역은 DES⁽⁴⁾를 이용한 선행연구와 동일한 크기로 주었으며 입구에서의 속도 분포는 실험논문⁽²⁾에 나온 정보에 입각하여 log 함수로 주었다. 입구 난류강도는 난수(random number) 생성을 통해 실제 측정조건⁽²⁾과 동일하게 구현하였다. 사용된 격자수는 $192 \times 128 \times 96$ 이며 장애물 표면의 최소격자 크기는 $0.025h$ 이다. 여기서 h 는 정육면체의 높이이다.

Fig. 1 은 중앙단면에서의 평균 유동장을 유선으로 나타낸 그림이며 DES 결과와 비교하고 있다. 장애물 상류의 말굽와류와 후류에서의 아치와류(arch vortex)가 형성되어 있으며 두 결과의 topology 가 거의 동일한 것을 알 수 있다.

Fig. 2 는 표면에서의 평균 C_p 의 분포를 타 논문⁽²⁻⁴⁾과 비교한 것으로써, 전체적으로 DES 결과와 흡사하며 부분적으로 실측값에 더 가까운 것을 확인할 수 있다. 장애물의 윗면이나 측면에서 suction 이 잘 구현되지 않는 것은 DES 결과와 본 연구 결과의 공통점으로써 Wilson 등⁽⁴⁾이 언급한 바와 같이 표면에서의 열전달이 계산에 포함되지 않았기 때문으로 판단된다.

3. 계산영역과 경계 조건 및 건물 형상

본 연구에서 사용된 건물군은 Louka 등이 계산한 독일 Hanover 의 Goettinger Strasse 이다⁽⁹⁾. 계산

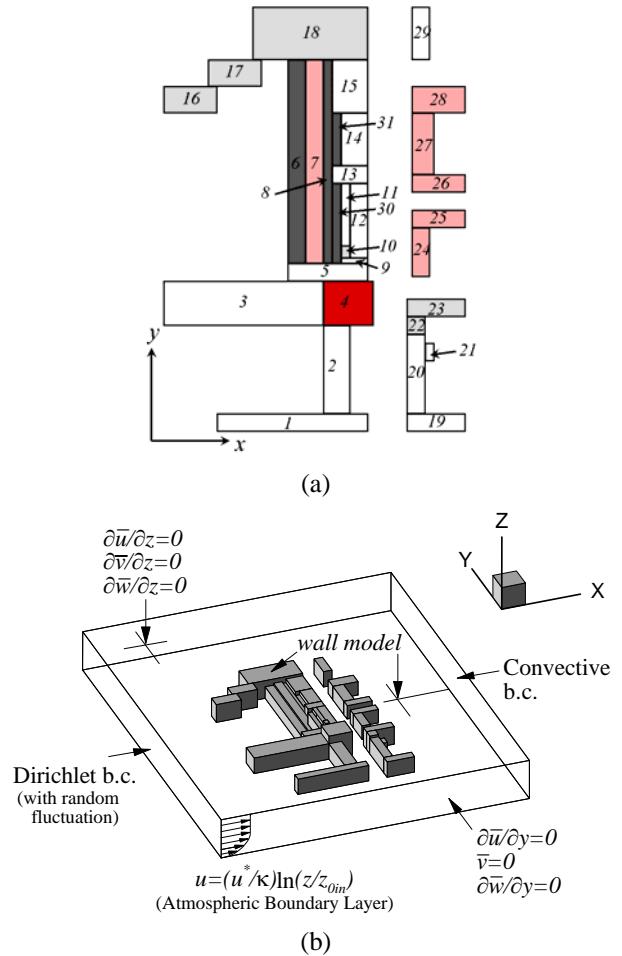


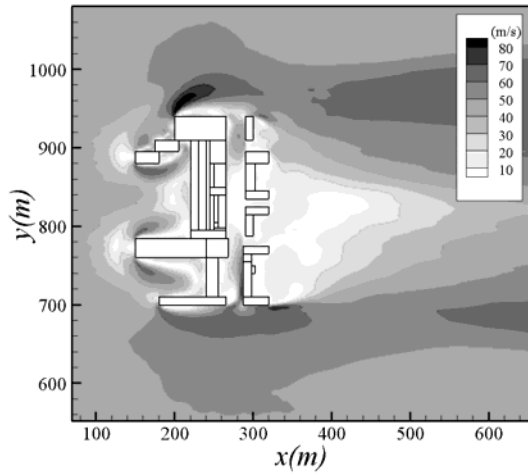
Fig. 3 Physical configuration: (a) geometry of building complex, (b) boundary condition

영역의 크기는 x 방향으로 1320m, y 방향으로 1640m, z 방향으로 300m 이며 건물의 형상은 Fig. 3(a)에 나타내었다. 총 31 개의 건물은 일련번호를 통해 Fig. 3(a)와 같이 구분하였다. 특히 4 번 건물의 높이는 30m 이며 가장 높은 건물에 해당한다. 자세한 건물형상 정보는 Louka 등의 논문⁽⁹⁾을 참고하기 바란다. 격자수는 격자 검증을 통해 $160 \times 160 \times 48$ 이 사용되었다.

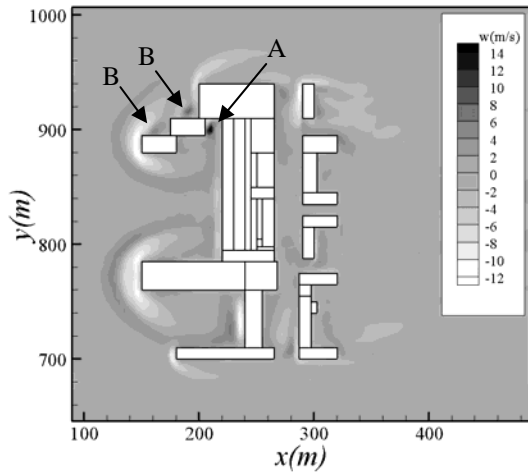
경계 조건은 Fig. 3(b)에서와 같이 입구와 출구에서는 Dirichlet 경계 조건과 대류경계조건이 각각 사용되었으며 계산영역의 횡방향 두 측면은 slip 조건을 사용하였다. 수직방향 천정면은 u, v, w 모두에 대해 수직방향 구배가 0 인 조건을 사용함으로써 유동의 출입을 허용하였다.

입구 속도는 일반적인 대기 경계층(Atmospheric Boundary Layer) 분포를 따르며 다음과 같은 함수로 주었다.⁽⁹⁾

$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln(z / z_{0in}) \quad z < 100m$$



(a)



(b)

Fig. 4 Averaged wind speed contours at $z=1.5\text{m}$: (a) magnitude of horizontal velocity components, (b) vertical velocity.

$$u = 100 \text{ m/s} \quad z \geq 100\text{m} \quad (3)$$

여기서 $u^* = 5.263$, $\kappa = 0.4$, $z_{0in} = 0.05\text{m}$ 이다. 입구 난류강도의 구현은 난수(random number) 생성을 통해 이루어졌으며 spalart 의 논문⁽¹⁰⁾에서 제시된 경계층 내 난류강도 분포를 rescale 하여 적용하였다. 또한 바닥면과 건물표면에 대한 wall model 적용 시 z_0 값은 0.01m 를 사용하였다.

4. 결과

4.1 속도장과 국부적 상승 와류

Fig 4(a)는 보행자에게 직접적으로 영향을 줄 수 있는 높이인 1.5m 에서 시간평균된 수평 속도의 크기를 나타낸 그림이다. 건물군 전체의 양수평측면 부 위에서 비교적 큰 풍속을 보이고 있으며 돌출된 건물인 16번과 3번 건물의 주위에

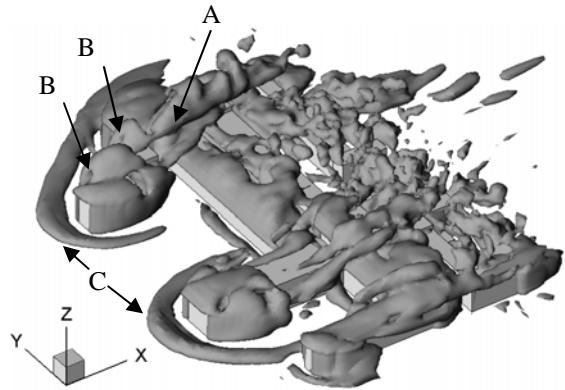


Fig. 5 Vortical structure around building complex ($Q=0.1$)⁽¹¹⁾.

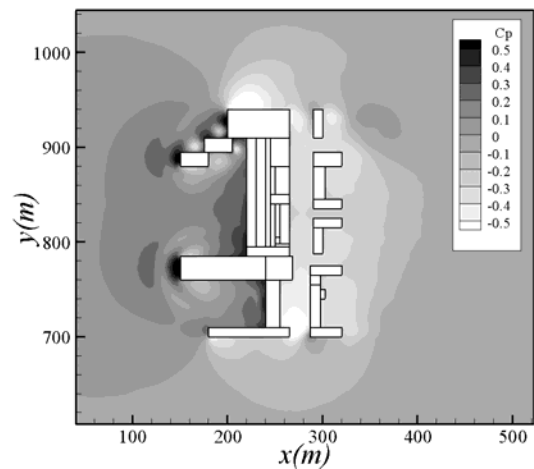


Fig. 6 Contour of averaged pressure coefficient around the building complex at $z=1.5\text{m}$.

Table 1 Wind loading on each building

No.	$\bar{D}(\text{kgf/m}^3)$	D'_{rms}	No.	$\bar{D}(\text{kgf/m}^3)$	D'_{rms}
1	14.33	2.12	16	12.63	2.99
2	24.97	4.05	17	11.25	2.47
3	2.57	0.71	18	8.11	1.09
4	7.87	1.36	19	12.68	2.24
5	7.46	1.28	20	5.78	2.78
6	18.79	3.61	21	3.30	1.80
7	2.13	0.87	22	8.16	4.39
8	1.23	0.45	23	3.48	1.79
9	3.23	1.92	24	4.18	2.39
10	7.92	4.67	25	3.01	1.89
11	5.49	2.60	26	2.55	1.60
12	1.19	0.78	27	0.48	0.56
13	1.83	0.95	28	2.31	1.19
14	1.50	0.99	29	9.33	3.38
15	2.47	1.43	30	0.47	0.27
			31	0.84	0.36

서도 큰 풍속을 나타내고 있다. 동일 높이 입구 유속의 2 배 가까이 증가한 것을 볼 수 있는데 주목할 사항은 20 번 건물 앞쪽의 건물 사잇길에서도 풍속이 크다는 것이다. 협소한 길목에서의 갑작스런 강풍은 보행에 지장을 줄 수 있다.

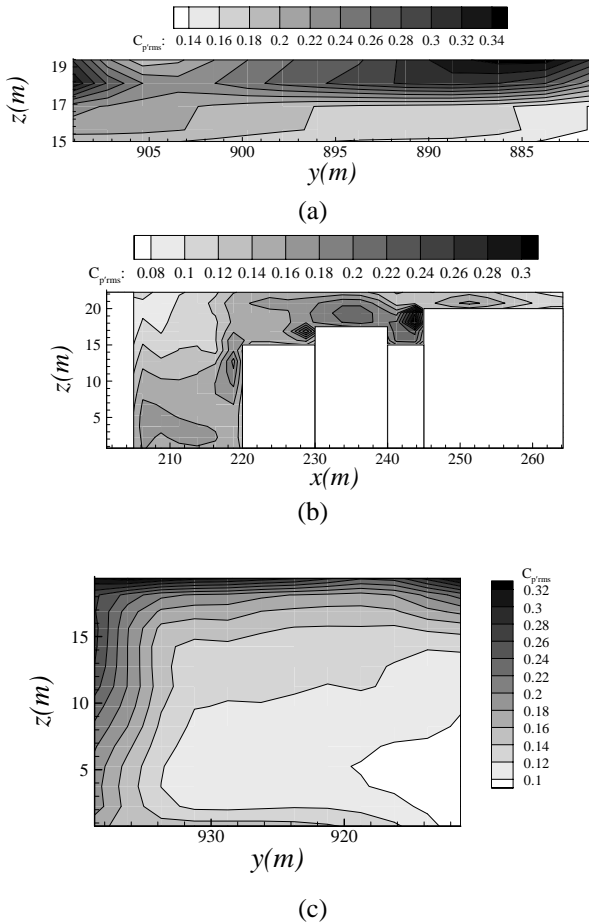


Fig. 7 Contours of RMS of pressure fluctuation on the surfaces of the selected buildings: (a) windward face of building No. 15, (b) spanwise inward face of building No. 18, (c) windward face of building No. 29.

Fig 4(b)는 1.5m 높이에서의 수직방향 속도분포를 나타낸 그림이다. 16,17,18 번 건물 주위에서 상승기류가 집중되어있는 것을 알 수 있으며(A, B) 특히 17, 18 번, 그리고 6 번 건물로 둘러 쌓인 지역(A)에 가장 강한 수직방향 속도가 존재하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 상승기류는 와류를 동반하여 발생하며 Fig. 5 에서도 확인할 수 있다. Fig. 5 는 vortical structure $Q^{(1)}$ 를 가시화한 것이다. A 와 B 로 표시한 것과 같이 상승와류가 수직방향으로 높이 치솟은 모습을 볼 수 있다. 또한 돌출된 건물 상류바닥 근처에서는 잘 알려진 말굽와류를 선명하게 확인할 수 있다(C).

4.2 건물이 받는 풍하중 계산

각 건물이 받는 풍하중을 Table 1 에 나타내었다. 풍하중은 수평방향으로 받는 힘 벡터의 크기로 계산하였으며, 단위 체적당 받는 풍하중으로 표준화하였다. 풍하중은 시간 평균된 하중(\bar{D})과

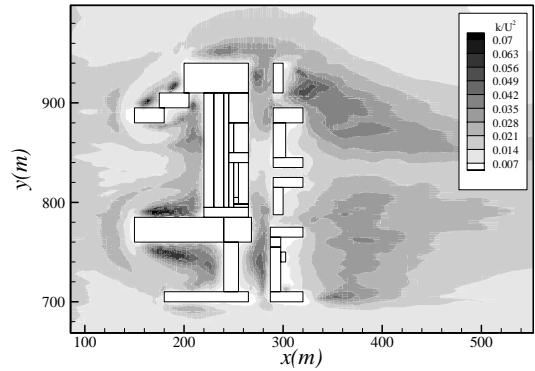


Fig. 8 Contour of normalized Turbulent kinetic energy at $z=1.5m$.

순간 섭동 하중(D')으로 나타낼 수 있다. 순간 섭동의 크기는 rms (Root-Mean-Square)로 계산하였다.

단위 체적당 평균 풍하중(\bar{D})은 2 번 건물에서 24.97 kgf/m^3 로 가장 크게 나타났으며 섭동 하중은 10 번 건물에서 4.67 kgf/m^3 로 가장 크게 나타났다. Fig. 6 의 평균 압력 분포에서 볼 수 있듯이 2 번, 6 번 건물은 건물 앞에서의 압력이 뒤보다 커지면서 큰 풍하중을 받으며 1 번 건물은 양 측면의 압력차가 커지면서 큰 풍하중을 받게 된다. 10 번과 22 번 건물의 단위 체적당 순간 섭동 하중이 크게 측정된 것은 건물의 체적이 워낙 작기 때문이며, 18 번 건물의 자체 평균 풍하중은 363600 kgf 로 2 번 건물 다음으로 크게 측정되었으나 건물 체적이 크기 때문에 단위 체적당 값은 상대적으로 작게 산출되었다. 일반적으로 건축물의 설계에서 평균 풍하중도 중요하지만 풍하중의 섭동량이 더욱 중요하게 작용한다. 2 번 건물이 평균 풍하중과 풍하중의 섭동량이 매우 커서 다른 건물보다 풍하중의 영향을 가장 크게 받을 것으로 예측된다.

4.3 건물 표면 압력 변동량

강풍에 따른 건물의 파괴 가능성은 건물의 표면 압력과 직결된다. 보다 자세히 말하면, 평균 압력 분포보다는 압력의 변동량이 더욱 중요한 인자가 된다. Fig. 7 은 강한 압력 변동량이 관찰된 3 개의 건물면에 대한 압력 변동계수($C_{p,rms}$)를 나타낸 것이다. 각각 15 번 건물의 상류쪽면, 18 번 건물의 횡방향 안쪽면, 29 번 건물의 상류쪽면에서의 압력 변동계수의 분포를 보여주고 있으며 최대 0.35 까지 상승하는 것을 알 수 있다. 강한 표면 압력의 변화로 인해 유리창이 깨질 가능성이 커지게 되며 특히 건물 지붕의 모서리의 경

우, 타일과 같은 외장재나 기와가 떨어져 나갈 가능성이 커진다.

4.4 난류 강도

실제 안전과 더 직결되는 물리량은 평균 풍속 보다는 섭동량일 것이다. 급변하는 바람은 지속적인 강풍보다 보행에 더욱 방해가 된다. 평균 수평풍속과 Fig. 8 에서 나타낸 turbulent kinetic energy 가 모두 높은 지역은 3 번 건물 주위와 2 번, 20 번 건물 사이로써 보행 시 위험도가 가장 높다고 하겠다.

5. 결 론

최근 2002 년 루사, 2003 년 매미, 2006 년 에위니아(Ewiniar)와 같은 태풍으로 인해 피해액은 수조억원을 웃돌고 있다. 하지만 그에 대한 예상과 대책은 턱없이 부족한 현실이다. 뿐만 아니라 최근 급격히 건설되고 있는 주상복합 등의 대형 고층건물은 국부적인 순간 강풍을 초래하기도 한다. 따라서 본 연구의 결과는 그에 대한 수치적인 예측을 통해 강풍의 피해를 최소화할 수 있는 방법을 도출할 수 있는 가능성을 시사한다.

최근 발표된 Lagrangian-averaged scale-invariant dynamic subgrid-scale model 을 구현함으로써 LES model 의 정확성을 확보하였으며, 복잡한 형상을 구현할 수 있는 가상경계법과 고체면에 대한 log-law 에 입각한 wall model 을 사용하여 높은 레이놀즈수에서의 유동을 보다 타당하게 계산할 수 있었다.

강풍은 건물 표면의 압력저하를 초래하며 외장재의 파손을 유발하며 그로 인해 인간에게 2 차적인 피해를 가져온다. 복잡하게 밀집된 건물군 내에서 보행자의 이동을 저해할만한 순간 돌풍이 발생할 수 있음을 알 수 있었으며, 국부적인 소용돌이 바람이 발생하여 이물질이 정체되거나 비산할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 실존하는 다양한 건물주위의 풍환경 해석이 가능함을 보여주었으며, 다양한 풍환경 하에서의 건물 주위 위험성 평가에 대한 응용성을 시사하고 있다.

후 기

이 논문은 2005 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-042-D00306).

참고문헌

- (1) Casto, I. P. and Robins A. G., 1977, "The Flow Around a Surface-mounted Cube in Uniform and Turbulent Streams," *J. Fluid Mech.*, Vol. 79, part 2, pp. 307~335.
- (2) Richards, P. J., Hoxey, R. P. and Short, L. J., 2001, "Wind Pressures on a 6m Cube," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 89, pp. 1553~1564.
- (3) Richards, P. J., Quinn, A. D., and Parker, S., 2005, "A 6m Cube in an Atmospheric Boundary Layer Flow. Part 2 Computational Solutions," *Wind Struct.*, Vol. 5, pp. 177~192.
- (4) Wilson, R. P., Haupt, S. E., Peltier L. J. and Kunz R. F., 2006, "Detached Eddy Simulation of Atmospheric Flow about a Surface Mounted Cube at High Reynolds Number," *Proceedings of FEDSM2006*, July 17~20, Miami, FL.
- (5) Meneveau, C., Lund, T. S. and Cabot, W. H., 1996, "A Lagrangian Dynamic Subgrid-scale Model of Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 319, pp. 353~385.
- (6) Balaras, E., 2004, "Modeling Complex Boundaries Using an External Force Field on Fixed Cartesian Grids in Large-eddy Simulations," *Comput. Fluids*, Vol. 33, pp. 375~404.
- (7) Bou-Zeid, E., Meneveau, C. and Parlange, M., 2005, "A Scale-dependent Lagrangian Dynamic Model for Large Eddy Simulation of Complex Turbulent Flows," *Phys. Fluids*, Vol. 17, pp. 25~105.
- (8) Kim, J. and Moin, P., 1985, "Application of a Fractional-Step Method to Incompressible Navier-Stokes Equations," *J. Comput. Phys.*, Vol. 59, pp. 308~323.
- (9) Louka, P., Ketzler, M., Sahn, P., Guilloteau, E., Moussiopoulos, N., Sini, J. -F., Mestayer, P. G. and Berkowicz, R., 2001, "CFD Intercomparison Exercise within TRAPOS European Research Network," *the 7th Conference on Environmental Science and Technology*, Sept., Ermoupolis, Syros, Greece. pp. 267~275.
- (10) Spalart, P. R., 1988, "Direct Simulation of a Turbulent Boundary Layer up to $R_\theta=1410$," *J. Fluid Mech.*, Vol. 187, pp. 61~98.
- (11) Jeong, J. and Hussain, F., 1995, "On the Identification of a Vortex," *J. Fluid Mech.*, Vol. 285, pp. 69~94.