

건축물의 풍하중을 예측하기 위한 수치풍동기법

이 명 성,¹ 이 정 희,² 허 남 건,^{*3} 최 창 근⁴

A GUIDE FOR NUMERICAL WIND TUNNEL ANALYSIS IN ORDER TO PREDICT WIND LOAD ON A BUILDING

Myungsung Lee,¹ Jung Hee Lee,² Nahmkeon Hur^{*3} and Chang-Koon Choi⁴

A numerical wind tunnel simulation is performed in order to predict wind loads acting on a building. The aim of the present study is to suggest a guideline for the numerical wind tunnel analysis, which could provide more detail wind load distributions compared to the wind code and expensive wind tunnel experiments. To validate the present numerical simulation, wind-induced loads on a 6 m cube model is predicted. Atmospheric boundary layer is used as a inlet boundary condition. Various effect of numerical methods are investigated such as size of computational domain, grid density, turbulence model and discretization scheme. The appropriate procedure for the numerical wind tunnel analysis is suggested through the present study.

Key Words : 수치풍동(Numerical wind tunnel), 풍하중(Wind load), 건축물(Building), 대기경계층(Atmospheric boundary layer), 풍하중기준(Wind code), 건축구조기준(Building code)

1. 서 론

건설기술의 발달과 재료적 특성의 발전으로 건물들은 점점 고층화, 대형화되고 있다. 구조물이 장대화 될수록 구조강성은 작아지고 풍하중에 의한 진동에 취약하게 된다. 따라서 이와 같은 건축물의 구조 설계 시 건축물 전체에 작용하는 풍하중에 대하여 구조 내력상 안전하도록 하여야 한다. 현재 건축물의 구조내력의 기준 및 구조계산의 방법에 사용되는 풍하중은 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙과 같은 건축법으로 규정된다. 위 규정에서 제시된 풍하중은 적절한 풍동실험에 의해 건축물의 형태에 따른 풍력계수로 산정되고 있다. 일반적으로 풍동실험은 구조물의 직접적인 모형을 통하여 구조물에 대한 풍공학적 특성을 해석하기 때문에 대규모의 실험 장비를 갖춘 전문가를 요구하고, 준비 기간이 길고 비용도

상당히 많이 소요되며 결정적으로 측정점에 대한 실험적인 제약이 존재한다.

최근 전산유체역학의 발전으로 수치 시뮬레이션의 이용이 증가함에 따라 복잡한 유동현상을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하고 건축물의 구조 설계를 개선하는 사례들이 많이 보고되고 있다. 이러한 수치해석 연구가 증가하는 것은 소요 시간 단축 및 경비 절감이 주된 이유라고 할 수 있다. 그러나 수치 시뮬레이션은 격자의 조밀도나 난류 모델과 같은 해석 조건들이 해석 결과에 영향을 미칠 수 있기 때문에 실제 현상을 재현할 수 있는 적절한 수치 모델링 및 해석 기법이 매우 중요하다.

건물에 작용하는 풍하중을 수치해석하기 위해서는 유동과 같은 물리현상을 표현할 수 있는 지배방정식과 그 해를 구하기 위한 수치적 가정이 요구된다. 지배방정식을 수치적으로 해석하기 위해서 우선 경계조건 혹은 초기조건이 필요하다. 이후 경계면의 영향을 받지 않으며 계산 컴퓨터의 용량을 고려하여 수치계산 영역이 설정되고, 그 영역 안에 격자를 생성한다. 이 격자를 기반으로 편미분방정식 형태의 지배방정식이 이산화되고 여러 가지 수치적 가정이 더해져서 컴퓨터로 풀 수 있는 연립방정식을 만들 수 있다. 수치계산이 수행되면 그

1 정희원, 서강대학교 대학원

2 정희원, 서강대학교 다중현상 CFD 연구센터

3 종신회원, 서강대학교 기계공학과

4 KAIST 건설 및 환경공학과

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

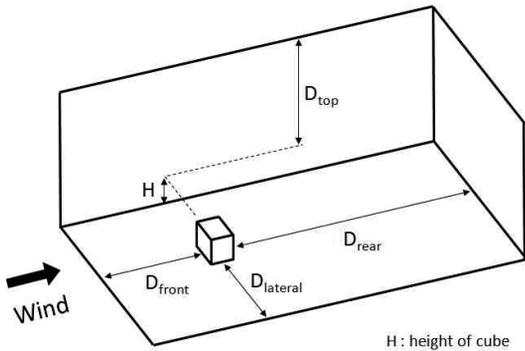


Fig. 1 Schematic diagram of a numerical wind tunnel. All dimension of the domain is functions of the height of the cube.

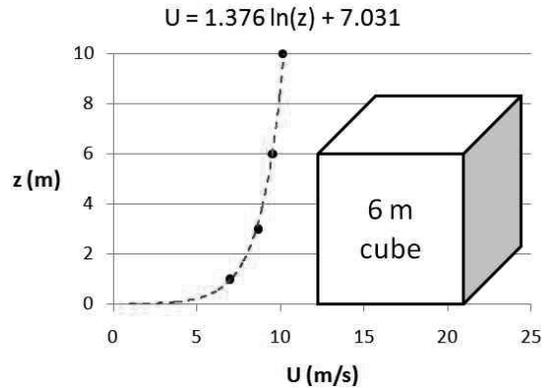


Fig. 3 A wind profile of atmospheric boundary layer flow. Symbols denote measurement from the field test[4].

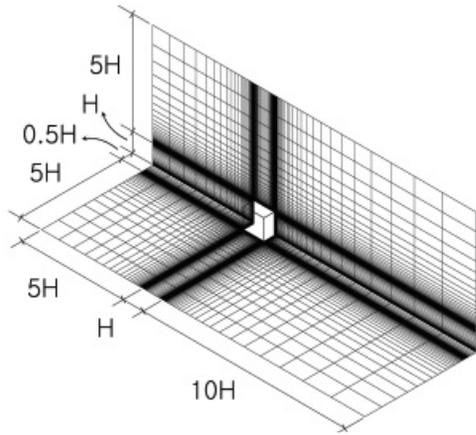


Fig. 2 Computational domain and grid system. Note that a symmetric condition is adopted at the center plane of the cube.

결과를 시각화하고 정량적으로 분석하며 사용가능한 실험값과 비교함으로써 수치 시뮬레이션의 신뢰성을 검증한다. 이때 수치결과와 측정값의 차이가 발생하면 수치 가정이 실제 현상을 적절히 반영하지 못하는 것이므로 적절한 수치 모델링 및 조건을 다시 고려하여 물리적 현상을 실제적으로 모델링할 수 있는 수치해석 기법을 선별 혹은 개발한다. 위 절차들을 반복적으로 수행함으로써 결과적으로 건물에 작용하는 풍하중을 실제적으로 예측할 수 있는 적절한 수치풍동기법을 도출할 수 있다.

건물의 풍하중을 수치적으로 예측하는 선행 연구 중에서 일본 건축학회의 풍하중 기준에 기여한 Yoshihide et al.[1]과 Tamura et al.[2]의 연구 결과는 상당히 유용한 정보를 제공한다. 또한 수치풍공학 기법으로 건축물에 작용하는 풍하중을 예측하기 위한 다양한 시뮬레이션 기법의 기본 지배방정식과 난류 모델에 대해 자세히 기술한 Franke[3]의 논문도 상당히

유용하다. 본 연구에서는 위 논문들을 참고하여 건축물에 작용하는 풍하중을 적절하게 예측할 수 있는 수치풍동 시뮬레이션 기법에 대한 가이드라인을 제공하고자 한다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서 건물의 풍하중을 예측하기 위한 수치해석 기법을 제시하기 위해 사용된 모델은 cube이다. 물론 cube 자체로는 매우 단순한 형태이지만, cube를 지나는 유동은 박리되고 다양한 종류의 와류가 cube 주변에서 생성되기 때문에 단순한 형태의 cube 주변의 유동 해석도 유체 역학 측면에서 여전히 매우 복잡한 문제이다. 본 연구에 사용된 cube 모델은 Silsoe Research Institute에서 6 m cube를 사용한 full scale 실험결과가 존재하고, 풍동 실험이나 CFD 결과도 역시 많은 자료가 있어서 비교가 용이하다[4].

Fig. 1은 6 m cube에 작용하는 풍하중을 예측하기 위한 계산 영역이다. 경계면의 영향을 소거하기 위해 cube로부터 경계면까지 적절한 간격을 두어야 한다. 선행 연구자들[1-3,5]의 결과와 본 연구의 예비해석을 통하여, cube와 입구 경계면, 옆면, 그리고 뒷면 사이의 거리(D_{front} , $D_{lateral}$, D_{top})는 cube 높이의 5배로 정하고, cube와 출구 경계면 사이의 거리(D_{rear})는 cube 높이의 10배로 정하였다. 이 때 계산 영역의 크기가 수치해석 결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 Cube와 경계면 사이의 거리를 변화시키며 다양한 케이스에서 수치해석을 수행하였다.

Fig. 2에는 정해진 계산 영역 안에 생성된 격자들이 나타나 있다. 본 연구에서 적용된 난류 모델에 적절한 y^+ 를 만족시킬 수 있도록 cube 표면으로부터 첫 번째 격자 두께를 계산한 후 계산 격자 모델링 시 일반적으로 사용되는 1.2의 격

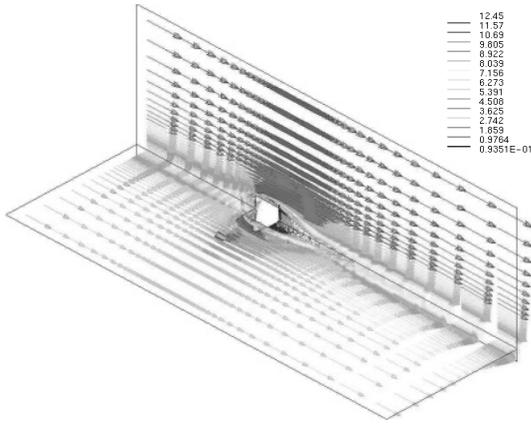


Fig. 4 Velocity vector distribution through the vertical and horizontal center section of the cube.

자 생성비를 적용하여 전체 격자계를 구성하였다. 격자 생성비에 따라 전체 계산 영역의 격자 밀집도가 변하므로 다양한 격자비가 수치해석 결과에 미치는 영향이 분석되었다. 입구 경계면에 적용하는 속도 프로파일은 Silsoe Research Institute에서 측정된 값[4]을 사용하였고 Fig. 3과 같이 로그 형태로 입구 경계면에 적용하였다.

수치해석에 사용된 상용 프로그램은 STAR-CD[6]이고, 상용 코드에서 제공하는 여러 가지 난류 모델을 사용하여 계산을 수행하였다. 질량, 운동량 보존 방정식과 standard $k-\epsilon$ 난류 모델의 k 와 ϵ 의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

위 지배방정식에서 $\nu_t (= C_\mu k^2/\epsilon)$ 는 isotropic eddy viscosity이고, $S_{ij} (= \partial u_i/\partial x_j + \partial u_j/\partial x_i)$ 는 mean stress tensor이며, σ_k , σ_ϵ , C_μ , $c_{\epsilon 1}$, $c_{\epsilon 2}$ 는 난류 상수이다. 전체 격자수는 약 55만개

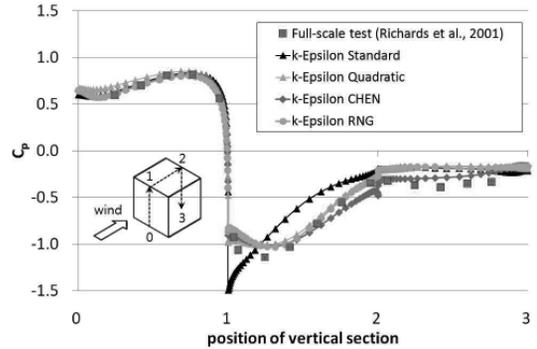


Fig. 5 Effect of the turbulence model on the prediction of pressure coefficient. LUD scheme is adopted in these computations.

내외로 64bit Single CPU AMD Opteron Linux Cluster를 사용하였고, 약 300 스텝 이전에 유동이 완전히 수렴되었으며, 전체 계산 시간은 약 30분 정도 소요되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 cube의 수직과 수평 중간 단면에서의 속도분포이다. 수직 단면의 속도분포에서 입구 경계면에 적용된 대기 경계층 유동(ABL)을 볼 수 있다. cube에서 발생하는 복잡한 유동 현상이 경계면 쪽으로 가면서 homogeneous한 유동의 형태로 변하는 것으로 보아 경계면이 유동에 미치는 영향이 미미하도록 계산 영역이 적절하게 설정된 것으로 확인된다.

수치풍동 기법의 신뢰성을 검증하기 위해 6 m cube를 사용한 full scale 실험[4]에서 측정된 압력계수와 본 연구의 수치풍동 시뮬레이션으로 예측된 값을 Fig. 5와 Fig. 6과 같이 정량적으로 비교하였다. 이때 압력계수는 cube 표면에 작용하는 압력을 상류의 cube 높이에 대한 동압으로 나눠서 무차원화한 수치이다.

Fig. 5는 난류 모델의 종류가 수치해석 결과에 미치는 영향을 보여준다. 난류 모델을 비교하기 위한 모든 해석 케이스에서 수치도식(numerical scheme)은 2차 정확도의 선형상류차분도식(Linear Upwind Differencing, LUD)이 사용되었다. LUD는 상류차분도식(Upwind Differencing, UD)보다 수치 확산이 적은 장점이 있다. 수치해석 결과에서 다른 난류 모델보다 standard $k-\epsilon$ 난류 모델이 상당히 부정확한 결과를 보이고 있다. 특히 풍상면의 모서리와 윗면의 경향이 완전히 다른 것을 알 수 있다. Standard $k-\epsilon$ 난류 모델은 20년 이전에 개발된 이후로 다양한 공학 분야에 널리 활용되고 있다. 하지만 건축물 주위의 유동이 박리 혹은 재부착되면서 높은 압력 구배가 발생하는 경우에 실제 현상을 제대로 모사하지 못하는 한계를 보이고 있다[3]. 특히 standard $k-\epsilon$ 모델은 cube 전면부의

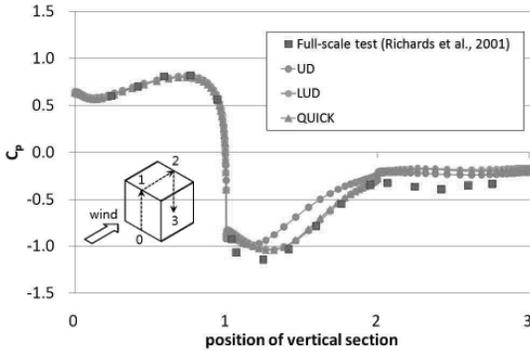


Fig. 6 Effect of the discretization scheme on the prediction of pressure coefficient. Note that RNG $k-\epsilon$ turbulence model is used in this comparison.

유동이 정체되는 영역에서 난류 에너지를 과다하게 예측하는 문제(stagnation point anomaly)가 있기 때문에, 풍상면(windward side)에서 상향예측된 난류 에너지가 비정상적으로 높은 압력을 야기하고, 이로 인해 풍상면의 모서리에서 발생하는 박리를 제대로 모사하지 못한다. 이와 같은 이유로 Fig. 5의 위치 1에서 standard $k-\epsilon$ 모델로 예측된 압력계수가 실험값과 차이를 보이고 1-2 영역에서 정성적으로도 차이를 보인다.

standard $k-\epsilon$ 난류 모델에서 발생하는 문제의 원인은 크게 두 가지 측면으로 분석할 수 있다[3]. 첫째 난류 에너지 k 를 정량적으로 과다하게 예측하고, 둘째 소산율 ϵ 또한 부정확하게 예측하는 것이다. 이와 같은 standard $k-\epsilon$ 모델의 한계를 극복하기 위해 그 동안 많은 난류 모델들이 개발되어 왔는데, 그 중에서 ReNormalization Group (RNG) $k-\epsilon$ 모델은 소산율 ϵ 에 대한 수정 방정식에 추가항을 제시하였다. 아래 식은 RNG $k-\epsilon$ 모델의 소산율 ϵ 에 대한 지배방정식으로, 이전 절에 언급한 standard $k-\epsilon$ 모델에 항이 추가된 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_j}(\epsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + c_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \nu_t S_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - c_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \\ & - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3} \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $\eta = Sk/\epsilon$ 이고, $\eta_0=4.38$, $\beta=0.012$ 의 난류 상수가 사용된다. Fig. 6과 같이 RNG 모델은 standard $k-\epsilon$ 모델보다 압력 예측이 더 우수하며 속도 분포도 역시 잘 예측되는 장점이 있다. 다른 종류의 난류 모델도 역시 standard $k-\epsilon$ 모델보다 우수한 결과를 보여주긴 하지만, quadratic $k-\epsilon$ 모델은 풍상면에서 다소 압력을 상향예측하고 CHEN $k-\epsilon$ 모델은 cube

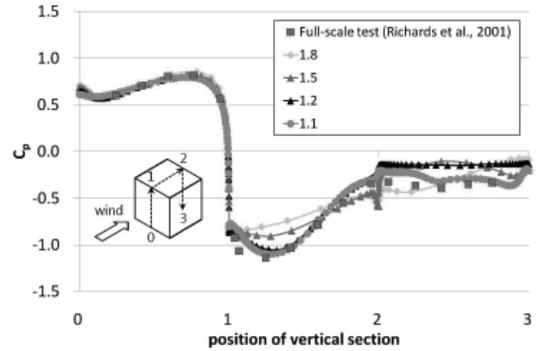


Fig. 7 Effect of the grid density near the cube on the prediction of pressure coefficient. Note that the grid density is varied by changing vertex generation ratio from the cube surface.

의 풍하측 모서리의 박리되는 영역에서 다소 부정확한 결과를 보인다. 이와 같은 이유로 RNG $k-\epsilon$ 모델은 건축물에 작용하는 풍하중을 예측하는 용도로 가장 일반적으로 사용할 수 있는 two equation 난류 모델로 알려져 있다[3].

Fig. 6은 이산화 도식의 차수가 수치해석의 결과에 미치는 영향을 보여준다. 이 해석 케이스들은 난류 모델로 앞서 검증된 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 3가지 서로 다른 도식을 사용하여 압력계수를 비교한 결과, 1차 정확도의 UD의 경우 cube의 윗면(1-2)에 작용하는 압력을 하향 예측하는 경향이 있다. 하지만 LUD, QUICK과 같이 2차, 3차 정확도의 이산화 도식을 사용한 시뮬레이션에서 실험값과 유사한 결과가 나타났다. 수치계산의 효율성 측면에서 볼 때, 상류의 2개 노드와 하류의 1개 노드를 사용하는 3차 정확도 도식인 QUICK (Quadratic Upstream Interpolation of Convection Kinematics)보다 2차 정확도 도식인 LUD가 더 유리할 것으로 생각된다.

Fig. 7은 격자 밀집도가 압력분포에 미치는 영향을 나타낸다. Cube 주변의 박리와 와류를 정확하게 해석하기 위해서 cube 표면에 격자를 집중시킬 필요가 있다. 이를 위해 해석격자 모델링 시 cube 표면에서 첫 번째 격자 두께를 기준으로 일정한 간격으로 격자점을 생성시켰다. Fig. 7은 이 격자점 생성비를 1.1, 1.2, 1.5, 1.8로 변화시키며 수치해석한 결과이다. 격자점 생성비를 1.5와 1.8로 설정한 경우 cube 주변의 유동을 포착하기에 격자의 수가 부족하기 때문에 cube의 윗면과 풍하면의 압력 예측의 정확성이 떨어진 것으로 생각된다. 격자점 생성비 1.1과 1.2는 풍상면과 윗면의 압력 분포 예측이 서로 유사한 결과를 보여 주지만, 격자점 생성비 1.1의 경우 풍하면 압력 예측의 정확성이 상당히 우수하게 나타났다.

Fig. 8과 Fig. 9는 계산 영역의 크기가 수치해석 결과에 미치는 영향을 보여준다. 수치해석에 설정된 경계면이 cube와 너무 가깝게 정의되면 경계면이 cube 주변의 유동에 영향을

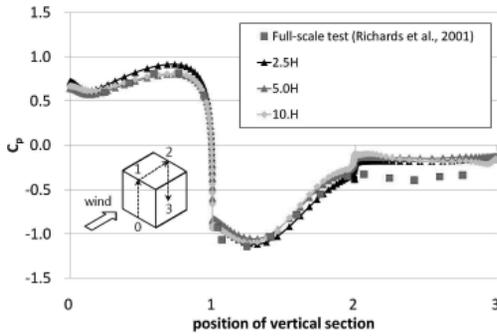


Fig. 8 Effect of the distance between the inlet boundary and the cube on the prediction of pressure coefficient.

미칠 수 있기 때문에 cube와 경계면 사이의 적절한 간격을 유지하는 것이 중요하다. 이 때 cube 높이(H)의 정수배로 간격을 정의하였다. Fig. 8에서 입구 경계면과 cube 사이의 거리가 5.0H보다 작으면 풍상면의 압력 분포를 상향 예측하는 경향이 나타났다. 이는 입구 경계면이 cube에 너무 근접해서 경계면이 cube 주변의 유동에 영향을 미치는 것으로 생각된다. Fig. 9는 cube와 출구 경계면 사이의 거리가 수치해석에 미치는 영향을 분석한 것으로 선행 연구자들[1-3]이 제시한 10.H보다 더 작은 5.0H에서도 유사한 결과가 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 수치풍동 시뮬레이션으로 건축물에 작용하는 풍하중을 적절하게 예측할 수 있는 수치 모델링 기법 및 계산 조건이 연구되었다. 실험값이 존재하는 6 m cube에 작용하는 압력 분포를 다양한 수치해석 기법을 사용하여 예측하고 비교하였다. 본 연구를 통하여 계산 영역의 경계면이 cube 주변의 유동에 영향을 미치지 않도록 경계면과 cube 사이의 적정 간격을 제시하였고, 난류 모델에 따른 y+에 기반하여 격자 간격을 1.1배 만큼 증가시키며 해석 격자를 구성했을 때 2차 정확도의 이산화 기법인 LUD와 RNG $k-\epsilon$ 난류 모델이 건물에 작용하는 풍하중을 실제 실험과 유사하게 예측하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 수치풍동 시뮬레이션 기법은 건축구조법령의 풍하중기준과 상대적으로 고비용이 소요되는 풍동실험보다 자세한 유동 및 압력 분포를 도출할 수 있는 장점이 있다. 또한 본 연구의 수치풍동 시뮬레이션 기법은 기존의 풍동 실험에서 수행하기 어려운 특수한 형상의 건축물이나 건축물 사이의 간섭 현상을 분석하는 데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

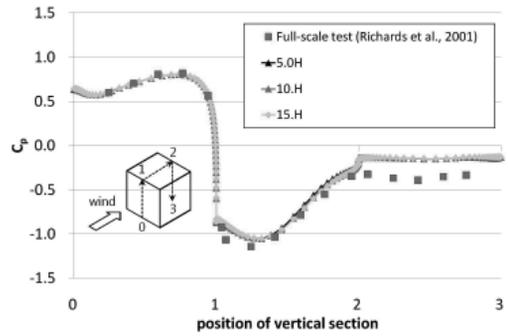


Fig. 9 Effect of the distance between the cube and outlet boundary on the prediction of pressure coefficient.

본 연구는 이상기후대비시설기준강화 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- [1] 2008, Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. and Shirasawa, T., "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, pp.1749-1761.
- [2] 2008, Tamura, T., Nozawa, K. and Kondo, K., "AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, pp.1974-1984.
- [3] 2007, Franke, J., "Introduction to the prediction of wind loads on buildings by computational wind engineering (CWE)," *Wind Effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures*, Springer Vienna, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol.493, pp.67-103.
- [4] 2001, Richards, P.J., Hoxey, R.P. and Short, L.J., "Wind pressures on a 6 m cube," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.89, pp.1553-1564.
- [5] 2005, 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, pp.741-756.
- [6] 2004, Computational Dynamics Ltd., STAR-CD V3.26 manual, London.