

Canopy Model 적용을 통한 도심지 풍환경 예측 CFD 시뮬레이션 결과의 보정

정수현*, 홍인표**, 최종규***, 송두삼****

*성균관대학교 대학원(taijisuhyeon@naver.com), **삼성물산 건설부문 주임(dlsvy1341@naver.com),
***성균관대학교 대학원(ccckenny@naver.com),
****성균관대학교 건축공학과 교수, 공학박사(dssong@skku.edu)

Modification of CFD results for Wind Environment in Urban area with Tree Canopy Model

Jung, Su-Hyeon* Hong, In-Pyo** Choi, Jong-Kyu*** Song, Doo-sam****

*Graduate School, Sungkyunkwan University(taijisuhyeon@naver.com)

**Samsung C&T(dlsvy1341@naver.com)

***Graduate School, Sungkyunkwan University(ccckenny@naver.com)

****Department of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University(dssong@skku.edu)

Abstract

Recently rapid urbanization facilitates development of high-rise building complex including apartment and office building in urban area. Many problems related with high-rise building are reported. Especially, unpleasant strong winds in pedestrian area are frequently encountered around the high-rise building.

CFD simulation methods are used to analyze the wind environment of pedestrian level in high-rise building block. However, the results show differences between CFD and measurement. This difference is attributed to improper use of CFD. Conventional CFD simulation for wind environment around high-rise building does not describe the effect of trees, shrubs and plants near ground which affect the wind environment of pedestrian level. Canopy model can be used to reproduce the aerodynamic effects of trees, shrubs and plants near ground. In this paper, CFD simulation methods coupled with the tree canopy model to predict wind environment of pedestrian level in high-rise residential building block were suggested and the validity was analyzed by comparison between measurement and CFD results.

Keywords : CFD(Computational Fluid Dynamics, 전산유체역학), Canopy Model(캐노피모델), Wind environment (풍환경), Pedestrian level(보행자레벨)

submit date : 2012. 6. 4, judgment : 2012. 6. 4, publication decide date : 2012. 6. 26
communication author : Song, Doo-Sam(dssong@skku.edu)

기 호 설 명

- U : Z(m) at a height of wind velocity
- U_r : Z_r(m) at a height of wind velocity
- α : Surface roughness
- F_i : Extra term added in the momentum equation
- F_k : Extra term added in the transport equation of k
- F_ε : Extra term added in the transport equation of ε
- η : Fraction of the area covered with trees
- α : Leaf area density
- C_f : Drag coefficient for canopy
- U_s : Velocity at reference height

1. 서 론

최근 도시로의 인구 집중으로 인해 도심 거주자를 위한 고층형 공동주택들이 건설되고 있다. 고층 주거단지는 종래의 저층 주거에서 경험하지 못했던 빌딩풍이라는 풍환경 장애

높이에 해당하는 강한 바람이 건물 측면 또는 상부에서 박리(剝離)하고 고층 건물에 부딪혀서 하강하여 주변의 저층 건물 또는 보행자 레벨의 강풍에 의한 장애를 유발하는 현상을 말한다¹⁾.

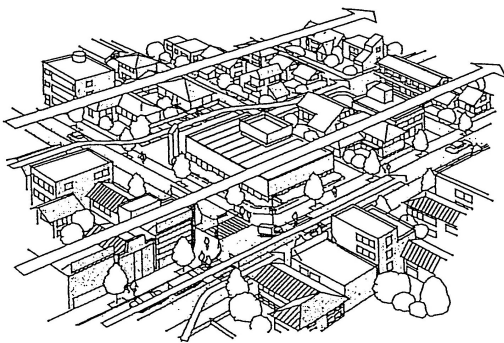
$$U = U_r \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha \quad (1)$$

U : 높이 Z(m)에서 풍속

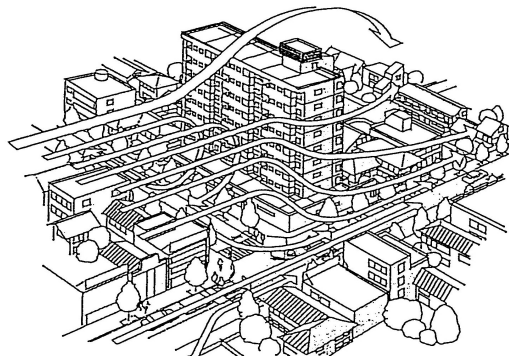
U_r : 높이 Z_r(m)에서 풍속

α : 지표면 거칠기

도시의 고층 건물주변의 강풍발생에 따른 환경장애를 평가하기 위한 풍환경 평가기준으로 Penwarden은 사람과 사물에 미치는 바람의 영향과 풍속과의 관계를 정의한 척도로는 Beaufort풍력계급(wind force scale)을 제시하였다²⁾. Davenport는 분석대상 지역의 용도, 사람들의 활동량(Activity level)에 대해 Beaufort Number와 풍속 발생빈도의 2가지 조합에 대해 그 지역의 풍환경이 쾌적(Comfort), 허용(Tolerable), 불쾌(Unpleasant), 위험(Dangerous)



(a) Air flows around the low-rise buildings



(b) Air flow around the high-rise buildings

Fig. 1 Local strong wind amplified by high-rise buildings

를 동반하게 된다. 빌딩풍이란 Fig. 1과 같이 저층 건물이 연속되어 있는 도심 공간에 고층 건물이 위치할 경우, 식 1)과 같이 고층건물

1) Wind Engineering Institute, 2005. Basics for wind environment around the high-rise building, Kajima publishing co., pp. 30-31.

2) Penwarden, A. D., 1973. Acceptable wind speeds in towns, Building Science 8, pp. 259-267.

등으로 평가하였다³⁾. Murakami는 강풍의 발생 빈도를 이용한 풍환경 평가 방법⁴⁾과 풍속비를 이용한 평가방법⁵⁾을 제시했다

도심지 건물 주변의 풍환경을 예측하는 방법으로는 풍동실험과 전산유체역학 (CFD : Computational Fluid Dynamics)가 사용되고 있다. CFD는 기존 풍동실험에서 다루지 못했던 광범위한 도시 스케일의 풍환경 분석이 가능함에 따라 최근 많이 이용되고 있다⁶⁾.

국내의 경우도 CFD를 이용하여 보행자 레벨에서의 풍환경 예측이 이루어지고 있다⁷⁾. 그러나 국내의 경우, CFD 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 보장하기 위한 해석영역설정(Domain size), 격자분할(Mesh generation), 경계조건 설정 등에 관한 가이드라인이 부재한 상황이다.

이에 본 연구에서는 CFD를 통한 도심지 고층형 공동주택 단지에 대한 신뢰성 있는 풍환경 예측 방법을 제시하고자 한다. 이와 관련한 선행 연구로 필자 등은 도심지 내 공동주택 단지과 같이 연속된 도심 공간 내에서 CFD 시뮬레이션에서 inlet 경계조건이 되는 풍속프로파일의 설정의 타당성에 대한 검토를 한강변 아파트 단지에 대한 실측과 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다⁸⁾.

본 논문에서는 공동주택 단지 내 보행자 레벨에서의 CFD를 통한 풍환경 예측 방법으로 보행자 레벨의 풍환경에 영향을 미치는 지표면 거칠기(roughness), 수목의 영향을 고려할 수 있는 Canopy Model을 CFD 시뮬레이션에 적용하여 Canopy Model이 종래의 풍속 프로파일만을 고려하였을 경우와 비교하여 실측 결과값, CFD 시뮬레이션 예측값과 차이를 어느 정도로 최소화 할 수 있는지를 검토하고자 한다.

2. 연구방법



Fig. 2 Measurement Site and locations

2.1 실측

실측 대상지는 한강변에 위치한 서울시 반포지구 H아파트단지로 단지 내 건물 높이는 대략 48m이다. 대상 단지 내 보행자 레벨의 풍향/풍속 분포를 측정하기 위해 단지 내 총 7지점을 선정하였다. 1~6번 지점은 단지내에 위치하고 있고, 7번 지점은 한강에서 불어오는 바람을 측정하기 위한 한강지점이다. 한강지점은 Davis 기상관측장비를 사용하였고, 나머지 지점은 Lutron AM-4214SD 열선 풍속계와 간이 풍향계를 사용하였다. 간이 풍향

- 3) Isyumov, N. and Davenport A. G., 1975. The ground level wind environment in built-up areas, Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, London, pp.420-422.
- 4) Murakami S. et. al., 1981, Investigation on statistical characteristics of wind at ground level and criteria for assessing wind-induced discomfort : Part-I Long-term observation of wind at ground level in built-up area, Transactions of the Architectural Institute of Japan. (310), pp. 88-97 [in Japanese]
- 5) Murakami S. et. al., 1993, Investigation on wind environment for renovation project at Kyushima area in Nagoya, Architectural Institute of Japan [in Japanese]
- 6) P.J. Jones, G.E. Whittle, 2003. Computational fluid dynamics for building air flow prediction?current status and capabilities, Building and Environment Vol. 27(3), pp. 321-338.
- 7) Kim D.H. et al., 2006. CFD based prediction of wind road in site planning of apartment housing, Annual Conference Proceeding of the Architectural Institute of Korea BookII, pp. 665-668.
- 8) Hong I.P., Song D.S., 2012. A Study on Inlet Flow Profile in CFD Simulation for Predicting Wind Environment in Urban Area, Journal of AIK Vol. 28(1), pp. 311-318.

계는 인원을 배치하여 데이터를 5분 간격으로 수집하였다. 측정은 2011년 8월 5일~6일에 걸쳐 이루어 졌다⁸⁾.

2.2 CFD 시뮬레이션

CFD 시뮬레이션은 CD-Adapco사의 Star-CCM+ Ver 5.06을 이용하여 이루어 졌으며, CFD 시뮬레이션의 결과치의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 해석영역설정(Domain size), 주변 건물 또는 주변 지형에 관련한 Modeling detail, 격자분할(Grid generation), Inlet 경계조건, 수렴조건(Convergence criteria) 등은 일본 건축학회에서 작성한 CFD 가이드라인에 의거하여 작성하였다⁹⁾.

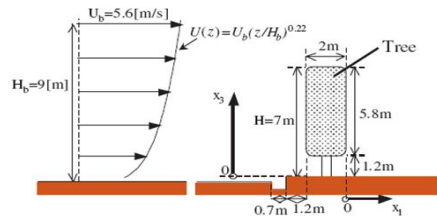
도심지 또는 공동주택 단지에서 저층건물, 입간판, 수목, 자동차와 같이 작은 규모의 물체 또는 장애물 등에 의해 보행자 레벨의 기류는 속도가 감소되고 기류가 혼합화하는 정도는 증가하여 난류 형성이 촉진된다. 이러한 현상을 CFD 시뮬레이션을 통해 모사하기 위해 운동량방정식에서 $-F_i$ 를 추가하여 풍속의 감소를 표현하였고, κ - ϵ 수송방정식에서 $+F_k$ 와 $+F_\epsilon$ 을 추가하여 난류에너지와 소산율의 증가를 모사하였다¹⁰⁾.

수목을 모사하기 위해 사용된 Tree canopy model¹⁰⁾은 다음과 같다.

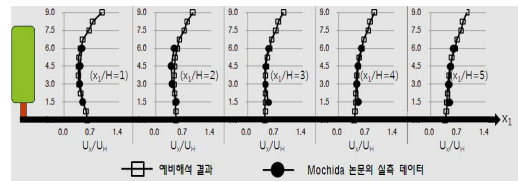
$$F_i = \eta C_f a < \overline{u_i} > \sqrt{ < \overline{u_i} > } \quad (2)$$

$$F_k = < \overline{u_i} > F_i \quad (3)$$

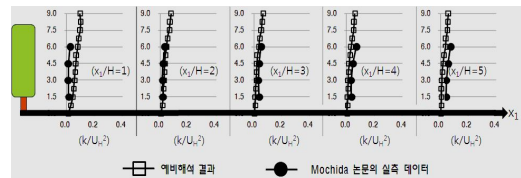
$$F_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} C_{pe1} F_k \quad (4)$$



(a) Configuration of test model and inflow condition



(b) Air-velocity



(c) Turbulent energy-k

Fig. 3 Validation of tree canopy model

식(1)은 운동량 방정식의 추가항이고 식(2)와 식(3)은 각각 난류에너지 k와 난류에너지 소산율 ϵ 의 감소를 표현하기 위한 수송방정식 추가항이다. η 는 지면에서 수목이 차지하는 비율, C_f 는 항력계수, a 는 나뭇잎의 앞면적 조밀도를 뜻한다. C_{pe1} 는 F_ϵ 의 Canopy Model에 대한 계수이다.

3. Tree Canopy Model을 적용한 예비해석

실측을 실시한 공동주택 단지에 대한 보행자 레벨의 풍환경 예측을 위한 CFD 시뮬레이션에 Tree Canopy Model을 적용하기 위한 선행 연구로 Mochida 등¹⁰⁾이 수행하였던 Tree Canopy Model을 본 연구에서 사용한 CFD 툴인 Star-CCM+11)에 구현하였다.

9) Tominaga Y., 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, pp. 1749-1761.

10) Mochida A., Tabata Y., Iwata T., Yoshino H., 2008. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, pp. 1667-1677.

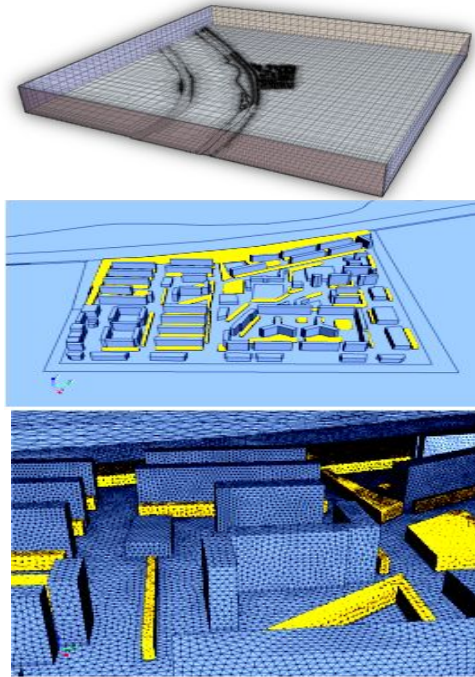


Fig. 4 CFD simulation domain and mesh generation

이를 통해 본 연구에서 구현한 Tree Canopy Model이 Mochida 등¹⁰⁾이 수행하였던 연구 결과와 일치하는지에 대한 분석을 실시하였다.

예비해석 결과, 본 연구에서 구현한 Tree Canopy Model이 기존의 Mochida 등¹⁰⁾이 제시한 실측결과와 매우 일치하는 결과를 보였다. 결과적으로 본 연구에서 Star-CCM+에 구현한 Tree Canopy Model은 매우 신뢰할 만 한 것으로 나타났다.

4. CFD를 통한 공동주택 단지 내 보행자 레벨의 풍환경 예측

CFD 시뮬레이션을 통해 공동주택 단지 내 보행자 레벨의 풍환경 예측에 있어서 Tree Canopy Model의 적용 유무가 풍속분포의 신뢰도에 미치는 영향을 검토하였다.

4.1 수치해석 대상 및 조건

분석 대상지는 2.1의 실측대상지와 동일하며, 대상지에 대한 모델링 및 격자구성은 Fig. 4와 같다. Fig. 4와 같이 계산영역(domain)의 크기는 AIJ Guideline⁹⁾에 의거하여 작성하였다. 또한 격자사이즈는 보행자 주변의 풍속분포를 정확하게 시뮬레이션하기 위해 최소 Grid Size는 1m로 설정하였으며, 바닥면에 Prism Layer를 설정하여 지표면으로부터 2m 이내에 최소 3개 이상의 격자가 배치될 수 있도록 하였고, 대상지는 도메인 상에서 중심에 위치하도록 하였다.

Table. 1 CFD simulation cases

Cases	Details
Case 1	Wind profile for inlet
Case 2	Wind profile for inlet+Roughness length
Case 3	Wind profile for inlet+Canopy Model

Table. 2 CFD boundary conditions

Turbulence model	- Standard k-ε model
State	- Steady State
Pressure correction	- SIMPLE
Wind Direction	- NE (measurement result)
Inlet Wind Profile	$-U = U_r \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha$ $U_r : 2.48\text{m/s,}$ $Z_r : 8\text{m (해발고도, 지표면에서 2m)}$ $\alpha : \text{surface roughness[-],}$ 0.15 $k = \frac{3}{2} (U \times I)^2,$ $\epsilon = C_\mu \frac{\kappa^2}{v_t}$ $I : 0.15, C_\mu : 0.09,$ $v_t : \text{난류점성계수}$
Domain Setting	- Size : 3500×3500× 500(m3) - Outlet : Pressure Outlet - Bottom : Non-slip - Top & Side : Free slip
Grid Type	- Trimmer, Prism Layer
Grid Division	- 5,438,302 Cells

11) Star CCM+ 5.06 Training Manual

시뮬레이션 케이스는 종래의 풍환경 분석 방법으로 대상공간에 대해 풍속프로파일을 적용하여 대상공간 내 풍속분포를 분석하는 방법 (Case 1)에 대해 Case 1에 추가하여 지표면 근처의 풍환경에 영향을 미치는 물체에 대한 모델링이 어려운 경우에 지표면에 거칠기(Roughness Length)인 Z_0 (값¹²⁾을 통해 지

Table. 3 Roughness Length Values

Z_0 (m)	Class Names	Position
1.6	continuous urban area	Modeling portion of the building except for areas
1.1	coniferous forest in urban area	Tree(coniferous tree)
0.1	main roads and railways	Road
0.1	parking lots	Apartment complex parking & road
0.001	fresh water	Hangang
0.001	bare soil in built-up area	Hangang park & Apartment complex playground

표면 공기저항을 묘사하는 방법(Case 2), 그리고 본 연구에서 제안하고 있는 풍속프로파일과 더불어 Tree Canopy Model을 설정하는 방법(Case 3) 등 모두 3가지 케이스에 대해 CFD 시뮬레이션 분석을 실시하였다. 특히 Case 3의 경우, 분석 대상단지 내 수목을 3D로 표현한 상태에서 Tree Canopy Model을 적용하였다. Case 2에서 분석 대상단지 내 각 지점에 대한 Roughness Length value는 Table 3과 같다.

CFD 시뮬레이션 경계조건은 Table 2와 같다. 기준 풍속 및 풍향조건은 실측결과⁽⁸⁾와 같으며, 시뮬레이션은 정상상태, 비압축성 유동으로 가정하였다. 난류모델은 $k-\epsilon$ High

Reynolds Number 모델을 적용하였으며, 압력보정 알고리즘은 SIMPLE을 사용하였다. 전체 계산 격자수는 5,438,302개이다.

풍속프로파일의 α 값은 건물이 연속되는 도심 시가지의 경우는 통상 α 값=0.33을 적용하고 있으나 본 연구에서는 분석 대상단지에 대한 실측 결과를 바탕으로 α 값=0.15를 적용하였다⁽⁸⁾.

4.2 수치해석 결과 분석

Fig. 5는 분석 대상단지에 대한 풍속분포를 보이고 있다. 해석결과 종래의 CFD 방법과 같이 inlet에 풍속프로파일(α 값)을 설정하는 Case 1의 풍속분포와 거기에 지표면에 거칠기(Roughness Length)를 추가하는 Case 2의 풍속분포는 거의 유사한 분포를 보이고 있다. 그러나 풍속프로파일에 Tree Canopy Model을 추가한 Case 3의 경우는 Case 1, Case 2의 풍속분포와는 뚜렷한 차이를 보이며 특히 바람이 단지 내로 불어 들어오는 풍상측(그림에서 상부측)에서 풍속 저하가 분명하게 나타나고 있다. 또한 단지 내 건물 주변에서도 수목에 의한 풍속 저하가 현저하게 나타나고 있다.

Fig. 6은 분석 대상단지의 각 지점별 풍속 측정치에 대해 CFD 시뮬레이션을 통해 산출된 각 지점별 풍속을 나타내고 있다. 실측결과와 비교하여 Tree Canopy Model을 추가한 Case 3의 풍속 결과는 바람이 불어오는 쪽(단지 상부)인 측정점 1, 2, 3에서는 실측결과와 매우 일치하는 결과를 보였다. 그러나 종래의 공동주택 단지에 대한 바람길 시뮬레이션 방법(Case 1) 또는 거기에 추가하여 지표면 거칠기(Roughness Length)를 설정한 Case 2의 풍속분포는 실측치와는 매우 상이한 결과를 보였다.

한편 Case 3의 경우에도 측정점 5번 지점에서는 시뮬레이션 예측치가 실측결과와 비교하여 풍속값이 다소 크게 나타나는 결과를 보였다. 이와 같은 경향은 Case 1, 2도 유사하

12) John S. Irwin, 1979. A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surfaceroughness and stability, Atmospheric Environment Vol. 13(1), pp. 191-194.

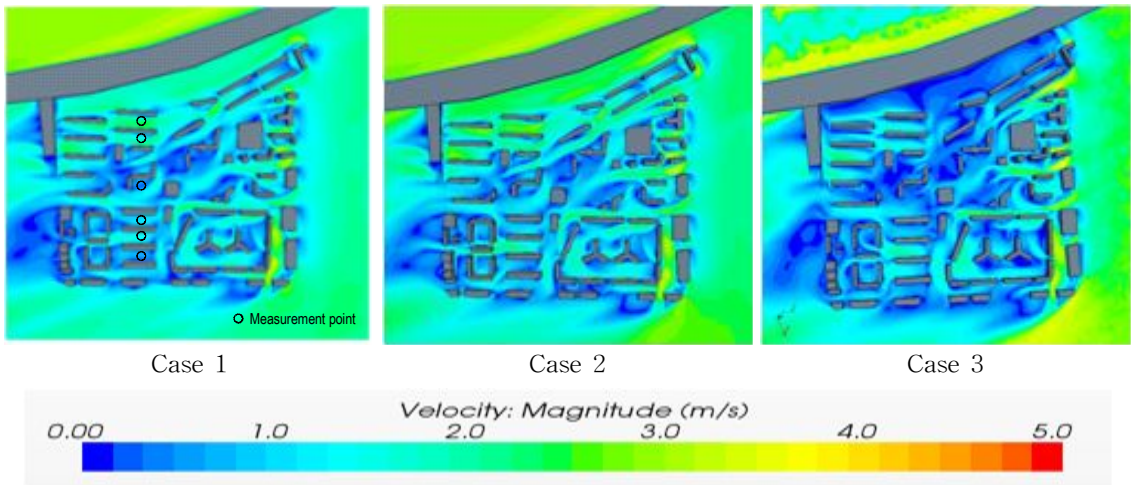


Fig. 5 Distribution of wind velocity : 2m height from the ground

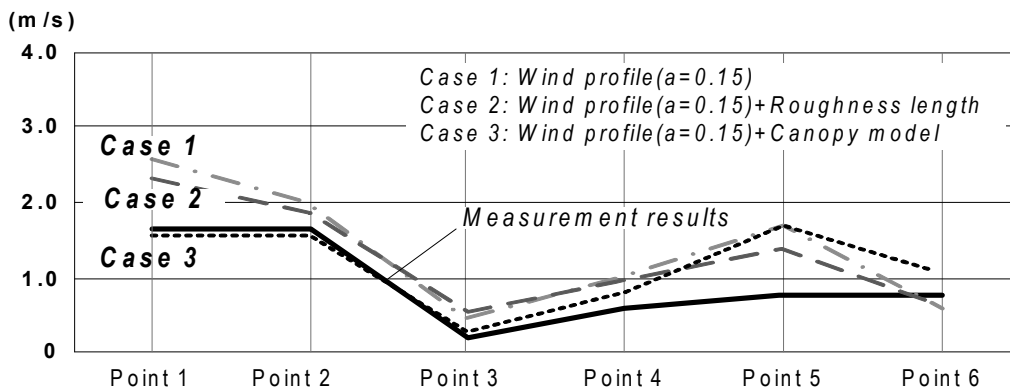


Fig. 6 Wind velocity of each point between CFD and measurement results

게 나타났다. 그 원인은 측정점 5에 인접하여 도로와 인접 단지에 위치한 주동이 방풍벽 역할을 함으로써 CFD 해석상에서는 그 부분의 풍속이 다소 크게 나타날 수 있으며, 그 영향이 지표면 거칠기나 수목에 의한 풍속 저감효과보다 우세하게 나타나기 때문으로 판단된다.

그러나 본 연구에서 검토한 도심지 공동주택 단지 내 보행자 레벨에 대한 풍속분포를 CFD 해석을 통해 실제 풍속값과 가장 유사하게 모사하는 방법으로는 Case 3의 Tree Canopy Model을 추가한 경우가 가장 정확도가 높은 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 도심지 공동주택 단지에서 보행자 레벨의 풍환경 해석 결과의 신뢰도를 향상시키기 위한 방법으로 종래의 CFD 시뮬레이션 방법에 건물 주변의 수목이나 인공구조물 등에 의한 풍속저감, 난류에너지의 증가를 표현할 수 있는 Tree Canopy Model을 적용하여 이 방법이 종래의 CFD 시뮬레이션 방법에 비해 어느 정도로 계산 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있는지에 대해 검토하였다.

검토결과, 종래의 도심지 풍속프로파일만

적용하는 경우, 또는 거기에 지표면 거칠기계수(Z0)를 적용하는 경우와 비교하여 단지 내 주동 주변에 수목을 3D로 모델링하고 Tree Canopy Model을 CFD 기본 운동방정식, 수송방정식 등에 추가한 경우가 실측 결과와 매우 일치하는 결과를 보였다.

이 결과를 통해 공동주택 단지 또는 건물이 연속된 도심지에 대한 바람길 시뮬레이션을 위한 CFD 분석 시, 종래의 inlet 풍속 프로파일만을 적용한 방법은 단지 내 보행자 레벨의 실제 풍속값 보다 다소 과장된 풍속값을 예측할 수 있어, 이러한 차이를 최소화하기 위해서는 반드시 Tree Canopy Model을 추가한 CFD 시뮬레이션을 실시해야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 수목의 형상을 실제와 비교하여 단순화하였으며, 또한 수목의 종류도 한 가지로 전부 동일하게 모델링하였다. 즉 실제 분석 대상단지에 식재된 수목의 종류를 상세하게 표현하지는 못하여 CFD 해석결과가 실제 풍속 측정치와 다소 차이를 나타내고 있어 추후에는 수목에 대한 모델링 방법에 대해서도 검토가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.20120000735).

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MEST)(No. 20120000735)(R11-2005-056-02004-0).

References

1. Wind Engineering Institute, 2005. Basics for wind environment around the high-rise building, Kajima publishing co., pp. 30-31.

2. Penwarden, A. D., 1973. Acceptable wind speeds in towns, Building Science 8, pp. 259-267.

3. Isyumov, N. and. Davenport A. G., 1975. The ground level wind environment in built-up areas, Proc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, London, pp.420-422.

4. Murakami S. et. al., 1981, Investigation on statistical characteristics of wind at ground level and criteria for assessing wind-induced discomfort : Part-I Long-term observation of wind at ground level in built-up area, Transactions of the Architectural Institute of Japan. (310), pp. 88-97 [in Japanese]

5. Murakami S. et. al., 1993, Investigation on wind environment for renovation project at Kyushima area in Nagoya, Architectural Institute of Japan [in Japanese]

6. P.J. Jones, G.E. Whittle, 2003. Computational fluid dynamics for building air flow prediction?current status and capabilities, Building and Environmnet Vol. 27(3), pp. 321-338.

7. Kim D.H. et al., 2006. CFD based prediction of wind road in site planning of apartment housing, Annual Conference Proceeding of the Architectural Institute of Korea Book II, pp. 665-668.

8. Hong I.P., Song D.S., 2012. A Study on Inlet Flow Profile in CFD Simulation for Predicting Wind Environment in Urban Area, Journal of AIK Vol. 28(1), pp. 311-318.

9. Tominaga Y., 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics

- 96, pp. 1749–1761.
10. Mochida A., Tabata Y., Iwata T., Yoshino H., 2008. Examining tree canopy models for CFD prediction of wind environment at pedestrian level, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, pp. 1667–1677.
 11. Star CCM+ 5.06 Training Manual
 12. John S. Irwin, 1979. A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability, *Atmospheric Environment* Vol. 13(1), pp. 191–194.
 13. Qingyan Chen, 2004. Using Computational Tools to Factor Wind into Architectural Environment Design, *Energy and Buildings*, Vol. 36, pp. 1197–1209.
 14. Xianting Li, Zhen Yu, Bin Zhao, Ying Li, 2005. Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings, *Building and Environment* Vol. 40 pp. 853–866.