아파트 주거의 배치계획에 있어 CFD에 의한 풍환경의 예측과 평가

Prediction and Evaluation of the Wind Environment in Site Planning of Apartment Housing by CFD

손 세 형*
Sohn, Saehyung

Abstract

Diverse problems in wind environment has occurred through rapid urbanization and growth of high-rise building numbers, This study aims to propose the CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation method and evaluation standard of wind environment in site planning of high rise apartment housing. The CFD simulation method proposed in this study is not existing detail simulation, but it is the method that a designer can correct and develop the design through immediate evaluation of design options in concept design phase. Therefore, the proposed CFD simulation method of wind environment in this study uses the BIM based CFD tool in which the 3D model in concept design phase can be used as for the CFD simulation.

In this paper, the study examines existing evaluation standards of comfortableness level in wind environment for pedestrian near buildings, and selects new evaluation method which is possible to apply to the proposed CFD simulation method. In addition, it is to examine calculation time-spending and appropriate mesh division method for finding CFD result which is useful to find the best design options in aspect of wind environment in concept design phase. Furthermore, it proposes the wind environment evaluation method through BIM based CFD simulation.

키워드 : 풍환경, 유동현상, 시뮬레이션, 건물정보모델링
Keywords : Wind environment, CFD(Computational Fluid Dynamics), Simulation, BIM(Building Information Modelling)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

급격한 도시화로 인해 건물이 점차 고층화, 고밀도화 되면서 다양한 풍환경 문제가 발생하고 있다. 예를 들면, 건물사이에 강풍이 발생하여 건물 주변에 계획된 공공공간(Open space)이나 보행 공간을 원활하게 사용할 수 없다거나, 반대의 경우로, 고층건물이 들어섬으로 인하여 바람이 불지 않아, 열이나 오염물질이 정체되어 보행자 또는 가로상에 휴식을 취하는 사람들이 불쾌적해지는 사례 등이 그 예이다. 이러한 현상은 초고층 빌딩의 주변뿐만 아니라, 10층 정도의 건물 주변에서도 발생한다.[1] 따라서 고층주거 건물 계획 시에도 풍환경에 대한 고려가 필요하다.

바람에 의한 피해를 줄이기 위해서는, 건물의 계획 단계에서부터 건물의 형태 또는 배치에 따른 건물주변의 풍환경을 예측하고 적절한 대책을 세워야 한다. 건물 주변에 계획된 다양한 외부공간, 시설물들의 사용 목적을 검토하고, 이러한 시설물 들을 이용하는 사람들이 풍환경 측면에서 불쾌하지 않도록 계획되어야 할 것이다. 아울러 건물 신축에 따른 풍환경 변화로 주변 건물의 자연환기 성능 및 보행자의 풍환경 쾌적성에 영향을 미치지 않도록 계획단계에서 검토를 해야 할 것이다.

건물의 외부공간 풍환경 분석을 목적으로 진행된 기존의 연구들은 대부분 고층 건물 주변의 기류분석에 초점을 맞추고 있다. R. Yoshie[2], Cheng-Hu Hu[3] 등은 건물주변의 기류분석을 위한 CFD시뮬레이션의 결과에 영향을 주는 인자들인 계산조건, 도메인사이즈, 격자의 수, 난류모델 등에 관한 검토를 하였으며, 이를 통해 유의한 결과를 얻기 위한 적절한 값(조건)을 제시하였다. Qingyan Chen[4]은 CFD를 활용하여 실내/외의 기류흐름 및 자연환기효과에 관련된 연구를 진행하였다. 이외에도 건축물 내외의 공기흐름을 분석한 다수의 논문을 찾아볼 수 있다.[5] 그러나 기존의 연구들은 건물주변의 풍환경 분석을 위한

* (주)종합건축사사무소 건원, 성균관대학교 건축학과 겸임교수
(sohn6969@gmail.com)

상세한 CFD방법론에 중점을 두고 있으며, 계획단계에서 디자이너가 디자인 안에 대해 신속히 풍환경을 검토할 수 있는 방법론에 대해 제시하고 있는 연구의 예는 보고되어 있지 않다.

또한 Arno Schlueter[6]는 BIM을 기반으로 설계자들이 초기디자인 단계에서 설계안의 에너지 성능을 평가하고 수정할 수 있도록 간단한 시뮬레이션 방법을 제안하고 있다.

본 연구는 건물의 계획단계에서 건물 주변의 풍환경을 예측하고 평가하기 위한 풍환경 평가지표에 관한 고찰 및 BIM을 기반으로 하는 CFD툴을 사용하여 풍환경 해석 방법을 제시하는데 목적이 있다. 특히 건물 계획단계에서 설계자가 작성한 설계안에 대해 전문적인 지식 없이도 신속하고 간단하게 풍환경을 평가할 수 있는 방법론을 제시할 것이다.

2. 풍환경 평가기준의 고찰

기존 연구에서 정의된 건물주변의 강풍발생에 따른 환경장애를 평가하기 위한 풍환경 평가기준은 다음과 같다.

2.1 Penwarden의 평가기준

사람과 사물에 미치는 바람의 영향과 풍속과의 관계를 정의한 척도로는 Beaufort풍력계급(wind force scale)이 있다. 이것은 원래 파랑과 풍속과의 관계를 정의한 것으로, Penwarden은 표1과 같이 기존의 Beaufort를 사람과 풍속의 관계로 수정한 평가기준을 제시했다.[7]

그러나 인체에 대한 바람의 영향은 단순히 평균풍속뿐만 아니라 빈도, 순간적인 강풍 등에 기인하는 것으로 풍속의 크기만을 고려하는 Beaufort 풍력계급만으로 풍환경을 평가하는 데는 한계가 있다. 그 후 Penwarden은 '평균풍속이 5m/s를 초과하는 확률이 0.2% 미만이라면 그 풍속은 허용할 만하다'는 빈도를 고려한 풍환경 평가 기준을 제시했다.[8]

2.2 Davenport의 평가기준[9]

Davenport는 대상 지역의 용도 또는 인간 활동량의 각 카테고리마다 Beaufort Number와 풍속 발생회수 등 2개의 지표(표2)로 그 지역의 풍환경의 허용 가능 여부를 판단하는 기준을 제시하였다. 예를 들어, 공원에서 산책하는 경우 Beaufort Number가 5에 해당하는 풍속인 21m/s의 바람이 연간 발생회수가 '1회/주' 미만이면 Tolerable하지만, 그 이상이면 Tolerable하지 않다. 평가풍속은 대상 지역의 지상 높이 6ft(1.83m)에 대한 평균풍속 혹은 유효풍속을 사용하며, 유효풍속은 식(1)과 같이 정의하고 있다.

$$Ve = V + 1.5Vrms \qquad (1)$$

V: 1시간 평균풍속 [m/s],

Vrms: 1시간 동안 관측된 풍속의 난류 표준편차

표 1. Penwarden의 Beaufort 풍력계급

Beaufort Number	Velocity (m/s)	Effects
0,1	0-1.5	Calm, no noticeable wind
2	1.6-3.3	Wind felt on face
3	3.4-5.4	Wind extends light flag, Hair is disturbed, Clothing flaps
4	5.5-7.9	Raises dust, dry soil and loose paper, Hair disarranged
5	8.0-10.7	Force of wind felt on body, Drifting snow becomes airborne, Limit of agreeable wind on land
6	10.8-13.8	Umbrellas used with difficulty, Hair blown straight, Wind noise on ears unpleasant, Windborne snow above head height(blizzard)
7	13.9-17.1	Inconvenience felt when walking
8	17.2-20.7	Generally impedes progress, Great difficulty with balance in gusts
9	20.8-24.4	People blown over by gusts

표 2. Tentative Comfort Criteria for Windiness

Ama ctivity	Areas Applicable	RELATIVE COMFORT			
		Comfort	Tolerable	Unpleasant	Dangerous
Walking fast	Sidewalks	5	6	7	8
Strolling, skating	Parks, entrance skating rinks	4	5	6	8
Standing, sitting short exposure	Parks, plaza areas	3	4	5	8
Standing, sitting long exposure	Outdoor restaurants band shells, theatres	2	3	4	8
Representative criteria for acceptability			< 1/wk.	< 1mo.	< yr.

Units : Beaufort Number, Temperature > 10℃

2.3 Murakami의 평가기준

Murakami는 강풍의 발생빈도를 이용한 풍환경 평가방법과 풍속비를 이용한 평가방법을 제시했다.

1) 강풍의 발생빈도를 이용한 방법[10]

14층으로 건설된 공동주택 주변의 저층주택에 거주하

는 거주자들을 대상으로 바람으로 인한 피해, 풍속과의 관계 등을 2년간에 걸쳐 조사하여 표3과 같은 평가기준을 제시하였다. 무라카미는 거주자의 생활 사이클을 고려하여, 평가풍속으로 일 최대 순간풍속을 사용했다. 평가에 사용한 풍속지표는 평가시간 2~3초, 측정높이 1.5m의 일최대 순간풍속이 10, 15, 20m/s인 3종류의 바람을 사용한다.

표 3. Acceptable criteria for wind environment based on occurrence frequency of daily maximum gust wind speed

class	Effect of strong wind	Areas applicable (example)	Level of assessment of strong wind and acceptable exceedance frequency (at a height of 1.5m)		
			Daily maximum gust wind speed (m/s)		
			10	15	20
			Daily maximum mean wind speed (m/s)		
			10/GFb	15/GFb	20/GFb
1	Area used for purposes most susceptible to wind effects	Shopping street in residential area; outdoor restaurant	10 (37days per year)	0.9 (3days per year)	0.08 (0.3days per year)
2	Areas used for purposes not too susceptible to wind effects	Residential area; park	22 (80)	3.6 (13)	0.6 (2)
3	Areas used for purposes least susceptible to wind effects	Office street	35 (128)	7 (26)	1.5 (5)

[a]When these criteria are applied, values of wind-tunnel experimental maximum mean wind speed may be used as the indicator of wind speed. Maximum mean wind speed can be given by converting the gust wind speed using gust factor.
[b]GF =gust factor (height 1.5m, averaging time 2-3 s). Area where wind speeds are particularly high(1.6-2.5); typical city area(2.0-3.5).

2) 풍속비를 이용한 방법[11)]

기상청의 풍속측정 위치인 지상 10.6m에서 건물 건설 전/후의 풍속을 비교한 속도비로 풍환경을 평가한다.
U1과 U2 는 다음과 같이 정의한다.

U1= 건물이 없을 때 바람의 속도 / 기상청의 측정 속도
U2= 건물이 있을 때 바람의 속도 / 기상청의 측정 속도

풍환경 유의지역으로 분류되는 조건은 다음과 같다.

$$U1 \geq 0.72 \text{ or } \frac{U2}{U1} \geq 1.10$$

풍속비 평가방법은 신축건물의 건설이 주변건물 및 지역에 미치는 영향 등을 평가할 수 있는 방법이다.

2.4 Melbourne의 평가기준[12)]

연 최대 순간풍속(Annual Maximum Gust)에 기초한 평가척도로, 사람에 대한 강풍의 영향이라는 관점에서 풍속자료로 순간치를 사용했다. 풍속지표로서 연최대 순간풍속을 사용하는 것은 Melbourne의 지표뿐이다. 적은 관측치를 기준으로 평가기준을 제시했다는 것이 본 평가방법의 최대단점이다.

표 4. Melbourne의 풍환경 평가기준

>23m/s	Completely unacceptable
<16m/s	Generally acceptable
<13m/s	Generally acceptable for stationary short-exposure activities
<10m/s	Generally acceptable for stationary long-exposure activities

2.5 그 외 평가기준

그 외 Yoshida[13)], Jackson[14)], Lawson[15)] 등에 의한 풍환경 평가기준이 있으며, Jackson은 지상 10m를 기준으로 한 Beaufort 척도를 건물주변의 풍환경 평가에 적당한 높이인 지상 2m의 기준으로 변환하여 사용한다.

표 5. 여러 풍환경 평가기준의 비교

제시자	references	평가풍속	평가기준	k	측정 높이
Penwarden	[7]	절대풍속	Beaufort (1973)	-	
Penwarden	[8]	1시간 평균풍속	초과확률 (1975)	-	1-2m
Davenport	[9]	1시간 평균풍속	Beaufort + 발생회수	1.5	10m
Murakami	[10]	일 최대 순간풍속	강풍의 발생빈도	-	1.5m
Murakami	[11]	건설 전/후 풍속	풍속비	-	-
Melbourne	[12]	연 최대 순간풍속	초과확률, 강제발생회수	-	-
Yoshida	[13]	연 평균풍속	지역구분 + 초과확률	-	5-10m
Jackson	[14]	5분 평균풍속	Beaufort + 발생확률	3.0	2m
Lawson	[15]	3초, 15분 평균풍속	Beaufort + 초과확률	-	-

3. BIM based CFD Simulation to analyze the wind environment around the building

3.1 BIM based simulation tool

친환경 건축물을 실현시키기 위해서는 건축물의 에너지 사용량 및 환경성능 평가가 건물 설계단계부터 유지관리 및 폐기단계까지 수행되어야 한다. 최근 이러한 건축물의 친환경성능 분석을 위해 BIM기술을 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. BIM에 기반한 설계안의 친환경 성능 분석은 설계자가 설계단계에서 작성한 건물 디자인안 및 건축정보(dimension, material property)을 그대로 성능분석에 활용함으로써 성능분석에 요구되는 시간을 대폭 줄일 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 BIM을 기반으로 하여, 건물 설계단계에서 활용할 수 있는 풍환경 성능 평가방법을 제시하고자 한다. 따라서, BIM 파일을 사용하여 CFD 시뮬레이션을 할 수 있는 툴인 Design Builder를 사용하였다. Design Builder는 BIM파일을 사용하여 건물부하계산, 에너지 소비량 산출 및 실내/외 기류분포 등 간단한 CFD분석이 가능한 툴로써, Revit, ArchiCAD에서 작업한 gbXML 형식의 BIM 모델링 파일을 불러올 수 있는 기능을 제공한다. 프로그램 사용 방법이 비교적 간단하기 때문에, 설계 초기단계에서부터 건물의 에너지 및 환경 요소를 계산하여 설계에 반영할 수 있는 자료로 활용할 수 있으며, Design Builder에서 제공하는 CFD는 실내/실외 공간의 속도, 압력, 온도분포의 해석이 가능하다.

3.2 Case study

본 장에서는 본 연구에서 제안하는 BIM에 기반한 CFD 시뮬레이션 방법에 의한 풍환경 해석방법을 case study를 통해 기술하고자 한다.

1) 대상건물 개요

해석 대상공간은 비교적 간단한 탑상형(A) 2개동과 판상형(B, C) 4개동으로 이루어진 총 6개동의 건물을 대상으로 하였다. 각 건물의 높이는 A건물은 101.5m, B건물은 70m, C건물은 50.4m이다.

2) 시뮬레이션 조건

① Domain Size

시뮬레이션을 수행하기 위한 가장 첫 단계로, Design Builder를 실행하고 gbXML파일을 불러온다. 파일을 불러온 모습은 그림2와 같으며, 현재는 건물 Mass만 존재하는 상태이다. 만일, 지형이 건물 주변의 풍환경에 미치는 영향을 알고 싶다면, 지형요소와 건물을 함께 모델링한 파일을 불러온다.

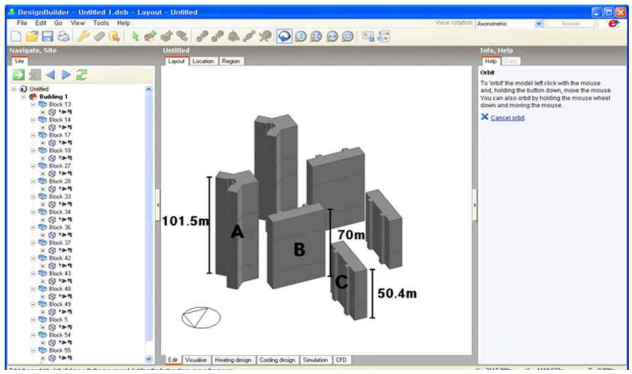

그림 2. gbXML file insert

모델링 파일을 불러온 뒤에, 자신이 원하는 해석영역 크기를 설정해주어야 한다. 이 단계를 도메인 설정이라고 한다. 도메인 사이즈는 계산결과에 영향을 미치기 때문에, 대상 지역의 지형, 건물 배치, 건물의 높이를 고려하여 설정해야 한다. 따라서 도메인 사이즈의 적절한 선택이 필수적이며, Hu[16] 등의 연구에서는 최소도메인 사이즈로 x축 길이는 장애물 길이의 5배, y축 길이는 장애물 너비의 3배, z축 높이는 장애물 높이의 5배로 제시하고 있다. 본 연구의 CFD 해석에도 이를 적용하여 x축은 683m, y축은 443m, z축은 최고 건물높이의 5배인 507m로 설정하였다. (그림3 참조)

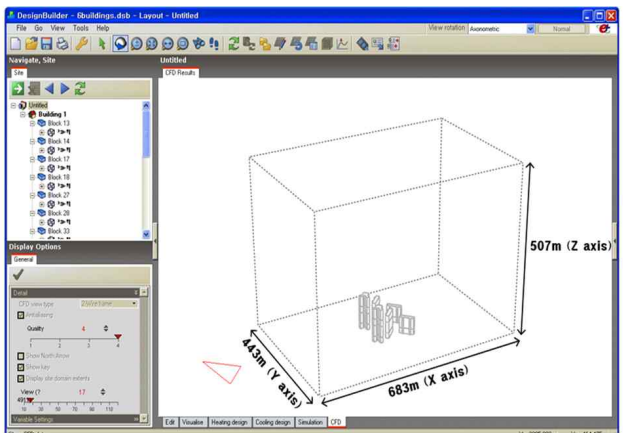

그림 3. 도메인생성

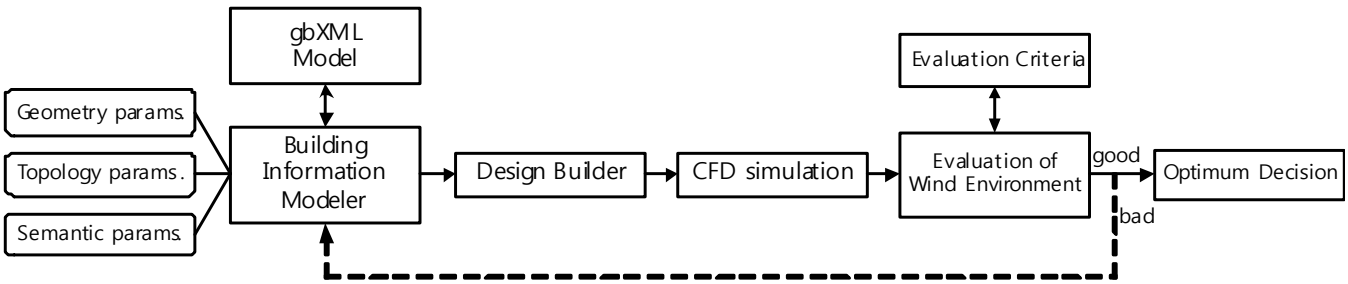

그림 1. BIM 및 풍환경 평가 프로세스

② 격자 생성

계산 격자는 기류분포의 분석 정도를 결정하기 때문에 CFD에서 중요한 요소이다. 격자의 크기를 너무 크게 할 경우에는 건물 주변의 기류분포에 대해 정밀한 계산결과를 얻을 수 없으며, 반대로 간격이 너무 조밀할 경우에는 시간이 기하급수적으로 소요된다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 계획단계에서 계획안에 대한 풍환경 평가 시 유의한 결과값을 제시하기 위해 적정한 Mesh size에 대해 검토하기 위해 3가지 유형(10m, 5m, 3m)의 최소 mesh size에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

Design Builder CFD에서 제공하는 자동 격자 생성 알고리즘을 활용하여 Fig. 4와 같은 해석격자(직육면체 형상의 격자)를 생성하였다. 구하고자 하는 계산 영역의 경우 mesh 밀도를 최대화하며, 그 외 영역은 점차 증가하는 형태로 메쉬를 생성하는 것이 일반적인 방법이다. 따라서 해석 대상의 중심부의 최대 메쉬 사이즈는 각 케이스 별로 10m×10m×10m(Case 1), 5m×5m×5m(Case 2), 3m×3m×3m(Case 3)로 설정하였으며, 주변부 격자의 크기는 점차적으로 증가시켰다. 격자의 증가 비율은 1.2로 설정하여 격자 사이에 발생할 수 있는 오차를 최소화하였다.[17]

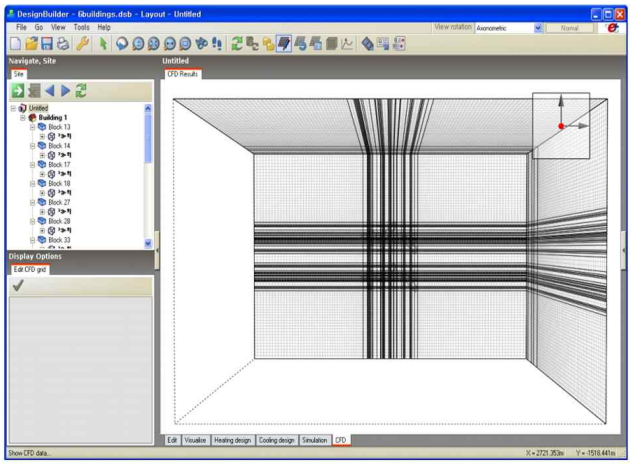

그림 4. 격자 생성

③ Boundary Condition

계산 도메인의 경계조건 설정은 CFD 결과의 정확도에 매우 중요한 영향을 미친다. 건물 주변의 기류 흐름에 대한 경계조건 및 입력조건은 3가지 case에 동일하게 설정하였으며,(표6) 생성된 셀의 개수는 표7과 같다.

건물 주변의 풍환경평가를 위한 CFD시뮬레이션은 일반적으로 LES(Large eddy simulation)나 Navier-Stokes equation modeling으로 나눌 수 있으며, 전자의 방법의 후자의 경우에 비해 더욱 정교한 결과를 제시할 수 있다. 하고 있다.[18] 그러나 LES방법의 경우, 많은 계산시간이 소요되어 설계단계에서의 검토에는 아직 사용되지 않고 있다. 본 연구에서도 Navier-Stokes equation modeling에 기반하는 CFD시뮬레이션을 실시하였으며, 난류계산은 standard k-ε model을 사용하였다.

표 6. 경계조건 및 입력조건

Turbulence Model	standard k-ε
Wind direction	North
Wind Profile	V1=5m/s,Boundarylayerheightd(m)= 370.0 Flow exponent a = 0.22 (suburban)
Temperature	Isothermal
Discretisation	FVM

표 7. 격자분할 데이터

Case (Minimum grid size)	Case 1	Case2	Case3
	10m	5m	3m
Number X cells	69	98	151
Number Y cells	74	87	115
Number Z cells	30	57	92
Max aspect ratio	21.2	12.0	13.3

3) 해석 결과

① 풍속분포의 Mesh Dependence

CFD 시뮬레이션을 수행한 뒤, 케이스별 풍속 데이터를 비교하였다. 풍속을 비교한 기준 높이는 8.4m로, 10m, 5m, 3m로 격자 분할한 결과 생성된 z좌표 중 지상에 가장 가까운 공통 위치로 설정하였다.

기류 분석결과 비교를 위한 slice 위치는 건물과 건물 사이의 영역으로, X축에 평행한 단면 C1과 Y축에 평행한 단면 C2, C3로 총 3개의 부분으로 설정하였다. (그림5) 시뮬레이션에 소요된 시간과 컴퓨터 사양은 appendix A와 B에 기록하였다.

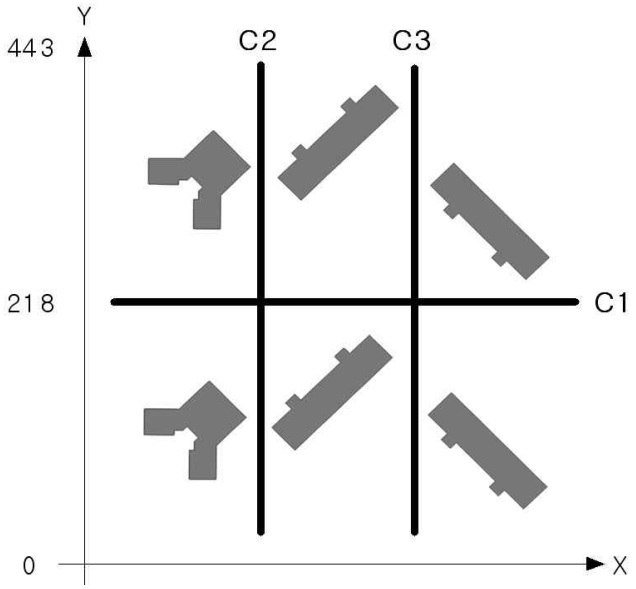

그림 5. Investigated locations (C1, C2, C3)

가장 작은 격자간격인 3m를 기준으로 비교했을 때, 격자간격 10m는 큰 차이를 보이나 격자간격 5m의 경우

3m의 결과와 유사하게 나타났다. (그림6) 이러한 결과를 바탕으로, 설계단계에서 계산시간은 최소화하며 유의한 데이터를 얻는 최대 격자 간격으로 5m를 제안한다.

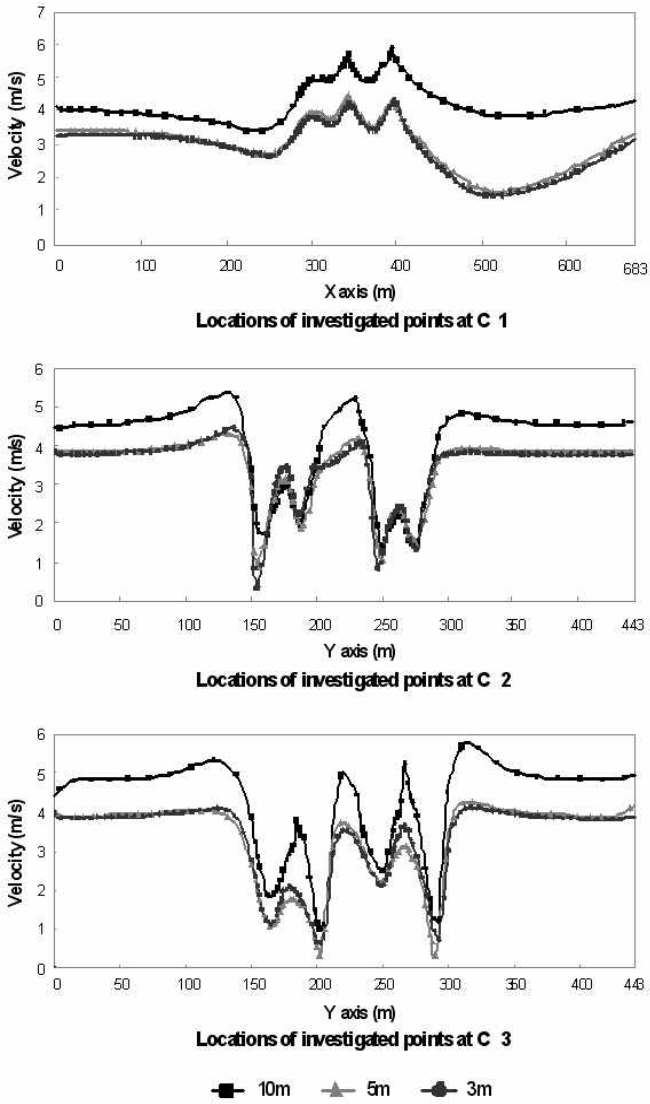

그림 6. 격자유형 별 풍속데이터 비교

② 풍환경 성능평가

디자인 초기단계에서 계획안의 풍환경 성능 평가는 보행자레벨에서의 풍환경 쾌적성 평가와 신규 조성되는 building block이 주변건물의 풍환경에 미치는 영향에 대해 검토 해야한다. 본 연구에서는 풍환경 검토를 위해 정상상태 CFD 시뮬레이션을 수행하였으며, 보행자레벨의 풍환경 쾌적성 평가는 앞에서 검토하였던 풍환경 평가기준 중에서 Penwarden의 Beaufort 풍력계급을 사용하였고, 신축에 따른 풍환경 변화는 Murakami의 풍속비를 이용한 풍환경 평가방법을 사용하였다.

a) Beaufort풍력계급을 통한 보행자레벨의 풍환경평가

보행자 레벨의 풍환경을 평가하기 위해 지상 1.5m에서의 풍속 분포를 Beaufort 계급으로 구분하여 figure 7과 같이 나타내었다. 단지 내에 Beaufort 계급3 이상의 풍속이 분포하는 것으로 보아, 건물 주변의 풍환경이 좋지 않음을 알 수 있다. 또한 건물 주변의 남북축으로 계급4 이상의 풍속이 분포하여, 보행자들이 이 구역을 이용할 때 불쾌함을 느낄 것으로 생각된다.

b) Murakami의 풍속변화비를 통한 신축에 따른 풍환경 평가-신축건물이 해당지역 및 주변지역의 풍환경에 미치는 영향의 평가

본 논문에서 수행한 시뮬레이션에서, 단지 내에 건물이 없을 때 지상 1.5m에서의 reference air velocity ratio(U1)는 3.15 m/s이다. 이를 바탕으로 신축에 따른 해당지역의 풍속 변화 ($\frac{U2}{U1}$,U2: 신축 후 해당지역 풍속비)가 1.10 이상인 지역은 풍환경 측면에서 유의(need attention)하다고 할 수 있으며 분석 결과는 그림8과 같다.

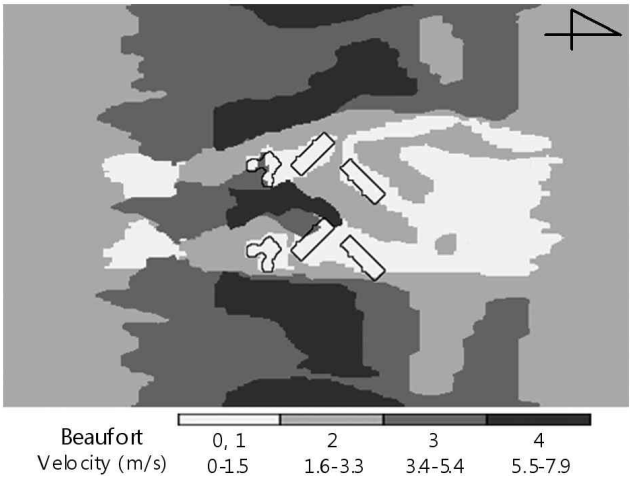

그림 7. Beaufort로 나타낸 단지 내 풍속분포

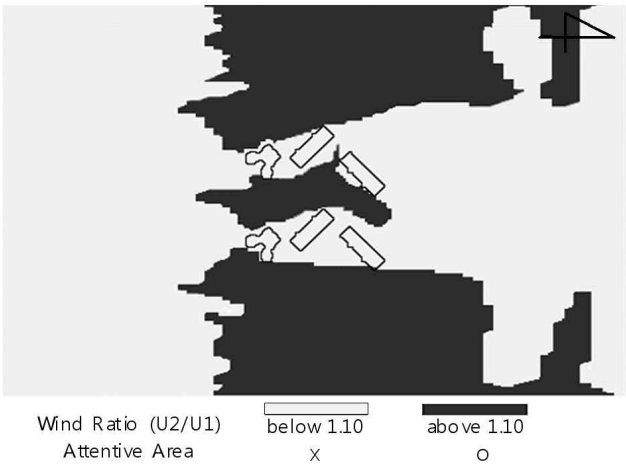

그림 8. 풍속비로 나타낸 단지 내 풍환경 유의지역

4. 결 론

본 논문에서는 건물 주변의 풍환경 쾌적성을 평가할 수 있는 기존의 평가기준들에 대해 고찰하고, 본 연구에서 제안하는 CFD시뮬레이션 방법론에 적용 가능한 평가

기준을 선정하였다. 또한 풍환경 측면에서 최적한 설계대안을 선정하기 위한 CFD 시뮬레이션에서 풍속분포 결과와 계산시간(CPU time)등에 영향을 끼치는 격자생성(Mesh generation)에 대한 검토를 실시하였다.

검토결과, 공동주택단지와 같은 대규모 단지에서의 풍환경 평가를 실시하는 경우에는 최대 mesh size를 5m 정도로 설정하여도 풍환경 측면에서는 상당히 의미 있는 결과를 도출 할 수 있었다.

또한, 계획단계에서 풍환경 평가를 위한 정상상태 CFD 시뮬레이션을 실시할 경우, Beaufort wind force scale과 Murakami의 풍속비 평가방법은 타당한 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 보행자 주변의 풍환경 쾌적성에 대한 평가방법으로 Penwarden의 Beaufort wind force scale을 사용하였으며, 신축에 따른 풍환경변화는 Murakami의 풍속비(Wind Change Ratio)를 사용하였다.

본 연구에서 제시한 BIM에 기반한 풍환경 평가방법은 계획단계에서 풍환경을 적절하게 평가할 수 있음으로써 계획단계에서 풍환경 측면에서 최적한 디자인안을 찾는데 매우 유용한 툴로 활용될 수 있을 것이다.

Appendices

Appendix A.

표 A1. Computer Specification

CPU	AMD Athlon(trn) X2 250 Processor, 3013 MHZ
RAM	3.00 GB
Graphic Card	NVIDIA GeForce 210 (512MB)

Appendix B.

표 A2. CPU time for CFD simulation

	Case 1 (10m)	Case2 (5m)	Case3 (3m)
CPU time(h)	1h 30min	12h	20h

참고문헌

1. 高橋文夫, 目黑區內商店風害調査, 日本建築學會換氣分科會資料, 昭和50年3月
2. Yoshie R., et. al.,(2007), Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the Architectural Institute of Japan, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 95, pp. 1551-78.
3. Cheng-Hu Hu(2005), Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area, Building and Environment Vol. 406, pp.17-31.
4. Qingyan Chen (2004), Using computational tools to factor wind into architectural environment design, Energy and Buildings Vol. 36, pp.1197-1209.
5. 노지웅(2008), CFD에 의한 아파트 단지의 빌딩풍에 관한 사례연구, 한국생태환경건축학회논문집 vol.8-4, pp.37-42.
6. Arno Schlueter and Frank Thesseling (2009), Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages Automation in Construction Vol. 181, pp.53-63.
7. Penwarden A. D. (1973) Acceptable wind speeds in towns Building Science Vol. 8, pp.259-267
8. Penwarden A. D. and Wise AFE (1975), Wind environment around buildings, Building Research Establishment Report, HMSO
9. Isyumov N. and Davenport A.G.(1975) The ground level wind environment in built-up areas Prc. 4th Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures London, pp.420-422
10. 村上周三 外 (1983), 市街地低層部における風の性狀と風環境評価に關する研究(III)-居住者の日誌による風環境調査と評価尺度に關する研究, 日本建築學會論文報告集, 第325号, pp.74-84.
11. 村上周三 (1993), 名古屋市牛島地區再開發計劃に關する檢討, 日本建築工學研究會.
12. M.H.Melbourne (1978), Criteria for environmental wind conditions,Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, pp.3241-49.
13. 吉田正昭, 眞田早敏 (1978), 新宿副都心の風ー市街地の特性, 第5回構造物の耐風性に關するシムポジウム論文集.
14. P.S.Jackson (1978), The evaluation of windy environments Building and Environment Vol.13, pp.251-60.
15. Lawson T.V. (1980), Wind effects on building Ⅰ&Ⅱ, Applied Science Publishers.
16. Hu C.H. and Wang F. (2005), Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area, Building and Environment Vol. 406, pp.17-31.
17. Cowan I.R., Castro I.P. and Robins A.G. (1997), Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.67, pp.535-545.
18. S. Murakami, Overview of turbulence models applied in CWE-1997, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74.76(1998) 1.24.

투고(접수)일자: 2010년 3월 30일
심사일자: 2010년 3월 30일
게재확정일자: 2010년 4월 21일