

보행자 레벨의 풍환경 예측 시 Canopy Model을 적용한 CFD 시뮬레이션 타당성 검증

정수현*, 홍인표**, 송두삼***

*성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과(tajisuhyeon@naver.com),

**삼성물산 건설부문 주임(dlsvy1341@naver.com),

***성균관대학교 건축공학과 부교수, 공학박사(dssong@skku.edu)

Validation of applying Canopy model to predict wind environment of pedestrian level by CFD simulation

Jung, Su-Hyeon*, Hong, In-Pyo**, Song, Doosam***

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

**Director of Engineering and Construction Group, Samsung C&T Corporation(dlsvy1341@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. The reason for the difference is that conventional CFD simulation couldn't consider the effect of trees, shrubs and plants which affect the wind environment. Canopy model is a solution to solve the limitation of CFD analysis.

In this paper, the canopy model to predict wind environment of pedestrian level by CFD simulation will be proposed and the validity will be analyzed by comparison of measurement and CFD prediction.

Keywords : 전산유체역학 CFD(Computational Fluid Dynamics), 캐노피모델(Canopy model), 보행자영역 풍환경 (Wind environment of pedestrian level)

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

최근 급격한 도시화로 인해 도심지에는 사무실, 아파트 등 고층빌딩이 증가하고 있다. 도심지의 과도한 인구유입으로 인해 도시의

건물은 점점 고층화되고 밀집되어 고층건물 주변에서 발생하는 강풍으로 인한 환경장애가 크게 문제가 되고 있다. 특히 초고층 건물 주변이나 아파트 단지 코너에서 발생하는 강

풍은 보행자의 풍환경에 가장 많은 영향을 미치는데, 건물주변에 계획된 공용공간이나 보행공간을 원활하게 사용할 수 없게 하며, 갑작스런 돌풍이 발생하여 건물의 간판, 외장유리, 나무 및 조경시설의 파손에 의해 보행자가 큰 피해를 입게 된다. 반대로 바람이 불지 않아 열이나 오염 물질이 정체되어 보행자 또는 휴식을 취하는 사람들에게 불쾌감을 준다. 이러한 현상은 초고층 건물 주변뿐만 아니라 10층 정도의 고층 건물 주변에서도 발생하고 있다.¹⁾ 따라서 보행자 영역에 발생하는 풍환경을 예측하여 보행자의 피해를 최소화하고 쾌적한 도시환경이 될 수 있도록 대책을 마련해야 한다.

풍환경을 예측하는 방법으로는 풍동실험과 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)이 사용되고 있다. 풍동실험은 실험 및 해석에 대해 많은 시간을 필요로 하고 작은 스케일에서만 할 수 있는 단점을 가지고 있으나 CFD는 기존 풍동실험에서 다루지 못했던 광범위한 도시스케일의 풍환경 분석이 가능함에 따라 최근에 많이 이용되고 있다. 유럽이나 일본의 경우에는 풍동실험과 실측 그리고 CFD 시뮬레이션 결과를 분석하여 CFD 가이드라인을 만들고 건물주변뿐만 아니라 보행자영역의 풍환경에 대한 분석도 체계화시켰다. 하지만 국내에는 CFD에 대한 정확한 가이드라인이 없어 불명확하게 분석이 실시되고 있다.

보행자 영역에는 다양한 유체학적저항요소가 존재하고 있는데 그 요소에는 주변의 소규모건물, 자동차, 주변 간판 및 가건물, 그리고 수목(Canopy)이다. 수목(Canopy)은 유체학적저항요소 중 풍환경에 영향을 크게 미치는 중요한 요소로 바람의 속도를 감소시킬 뿐만 아니라 난류에너지의 소산률을 증가시키는 역할을 하고 있다. CFD 시뮬레이션 시 수목(Canopy)을 적용하지 않았을 경우에는

지표면상에 아무런 장애물이 없이 풍환경을 분석하는 것이나 다름없다. 그 결과물은 결국 실측한 결과와 차이가 난다.

따라서 본 연구에서는 보행자 영역의 풍환경을 정확히 분석하기 위해 우리나라와 자연환경이 비슷한 일본의 가이드라인 중 Mochida가 제시한 canopy model을 적용하여 수목(Canopy)이 풍환경에 미치는 영향에 대해 알아보고 CFD 시뮬레이션 이용 시 Canopy Model을 적용할 것을 제안하는데 목적을 두고 있다.

1.2 연구방법 및 절차

보행자 영역의 풍환경 예측 시 유체학적저항 요소를 적용한 CFD 시뮬레이션 분석방법을 알아보기 위해 다음과 같이 진행하였다.

(1) 보행자 영역의 분석을 위한 CFD 모델링을 위해 일본의 AIJ²⁾ 가이드라인을 분석하였다.

(2) 일본 AIJ 가이드라인 중 유체학적저항 요소를 적용한 Canopy Model에 대해 분석 및 방법을 고찰하였다.

(3) 대상지를 선정하여 실측하고 실측데이터를 정리하여 CFD 입력조건을 추출하였다.

(4) CFD 모델링 시 Canopy Model을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 모델링하여 실측값과 시뮬레이션 풍속값을 비교하였다.

(5) 실측값과의 비교를 통해 어떤 경우가 보행자 영역의 풍환경을 가장 잘 나타내었는지 알아보았다.

2. AIJ CFD 가이드라인 소개

AIJ Working Group에 의해 2008년 발표된 가이드라인은 실측과 풍동실험, CFD 시뮬레이션을 실시하여 각 변수가 CFD 결과값에 미치는 영향을 파악 및 7개의 Benchmark

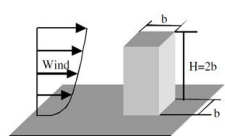
1) 이수미의 1명 BIM에 기반한 계획설계 단계에서 풍환경 예측 및 평가 방법의 제안 p.267-273, 2010

2) Yoshihide Tominaga, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008

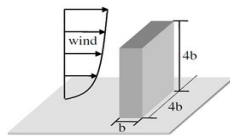
Test를 통해 풍환경 분석을 위한 가이드라인을 체계화하였다.(표 1, 그림 1 참조)

표 1 일본 AIJ 가이드라인

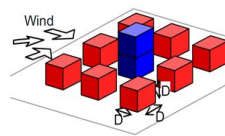
구분	입력조건
1. Domain Size	<ul style="list-style-type: none"> - 연직방향높이 : 대기경계층 높이로 설정 - 측면경계 : 최외곽 경계 - Blockage Ratio : 3% - 도메인 확장이 필요한 경우 : 바람이 불어오는 쪽으로 큰 건물이나 지형이 있는 경우
2. Modeling Detail	<ul style="list-style-type: none"> - 주변건물 높이 대상건물 높이 H기준으로 1H~2H - 각 방향에 대해 하나의 블록 이상 모델링 - 유체학적 지형 : Roughness Length인 Z_0값을 건물군 경계로부터 Boundary까지 설정
3. Treatment of Obstacle Smaller than Grid	<ul style="list-style-type: none"> - Mochida가 제안한 Canopy Model을 Domain상에 적용
4. Grid Discretization	<ul style="list-style-type: none"> - 건물 높이의 1/10(0.5~5m)정도로 설정 - 해석 도메인 내 풍속 추출 : 지표면으로부터 1.5~5m높이에 3번째나 그 이상 되는 격자를 배치하여 추출 - 급속한 풍속변화가 존재하는 곳 : Stretching Ratio on Adjacent Grid가 1.3이나 그 이하 값이 되도록 설정 - 프리즘 격자 사용할 것 - Fine Grid와 Coarse Grid의 개수 : 1.5배 - 모델 형상이 복잡한 경우 : 격자밀도 다른 영역에서 Grid의 Aspect Ratio가 과하지 않게 함
5. Initial & Boundary Condition	<ul style="list-style-type: none"> - Inlet의 풍속 프로파일 : 메인 전체 영역에 대하여 설정, 지수법칙 사용 - Outlet : 모든 변수의 구배를 0으로 설정
6. Convergence of Solution	<ul style="list-style-type: none"> - 시뮬레이션이 발산하거나 수렴하지 않는 경우 아래의 사항 체크 (1) 격자의 Aspect Ratio와 Stretching Ratio가 너무 크게 설정되었는지 여부 (2) Relaxation Coefficient of The Matrix Solver가 너무 작게 설정되었는지 여부 (3) Vortex Shedding과 같은 일시적인 변동이 시뮬레이션 내에서 발생하는지 여부



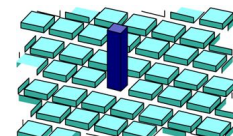
(a) 2:1:1 square prism



(b) 4:4:1 square prism



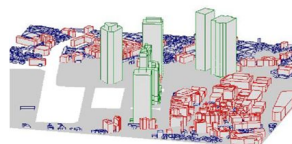
(c) Simple city blocks



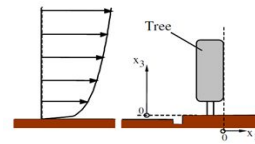
(d) High-rise building in city



(e) Building complexes with simple building shapes in actual urban area



(f) Building complexes with complicated building shapes in actual urban area



(g) Two-dimensional pine tree

그림 1. Benchmark Test를 위한 7가지 모델

3. Canopy Model을 적용한 CFD 시뮬레이션

3.1 Canopy Model 소개

보행자영역에는 소규모 건물, 건축물 주변 간판, 수목, 자동차와 같이 grid보다 작은 물체지만 풍환경에 영향을 미치는 중요한 인자가 있다. 이중 수목은 풍환경에 가장 영향을 미치는 인자이기 때문에 수목에 의한 풍속감소 효과가 큰 곳에서는 수목을 3D로 모델링해야 한다. 이에 따라서 Mochida는 수목모델링 부분에 풍속감소와 난류에너지 증가, 난류에너지 소산율 증가를 표현할 수 있는 Canopy Model을 설정하여 수목의 영향을 표현하였다.

3.2 Canopy Model 적용방법

Canopy Model 적용방법은 AIJ 가이드라인 중 Mochida가 제안한 방법으로 사용한다.

수목에 의한 풍속감소와 난류에너지 및 난류에너지 소산율의 증가를 표현하기 위한 식은 다음과 같다.

$$F_i = \eta C_f a < \bar{u}_i > \sqrt{< \bar{u}_i >} \quad \text{식(1)}$$

$$F_k = < \bar{u}_i > F_i \quad \text{식(2)}$$

$$F_\epsilon = \frac{\epsilon}{k} C_{pe1} F_k \quad \text{식(3)}$$

첫 번째 식은 풍속감소를 묘사하기 위한 운동량 방정식의 추가항이고, 두 번째와 세 번째 식은 난류에너지 k와 난류에너지 소산율 ϵ 의 감소를 표현하기 위한 수송방정식 추가항이다. η 은 지면에서 숲이 차지하는 비율, C_f 는 항력계수, a 는 나뭇잎의 면적 조밀도를 뜻한다. 또한 C_{pe1} 는 F_ϵ 의 Canopy Model에 대한 계수이다.³⁾

3.3 Canopy Model 적용한 예비해석

실제 대상지에 적용하기 전 Mochida가 제시한 방법으로 예비해석을 해보았다.

예비해석 시 사용한 $C_{pe1}=1.5$ 이고 $\eta C_f a=1$ 이다. (그림 2~4 참조)

예비해석 결과 Canopy Model은 풍속감소와 난류에너지 증가를 나타냈다. 또한 Mochida의 논문에서 제시하는 실측 풍속 및 난류에너지와 유사한 패턴을 보였다.

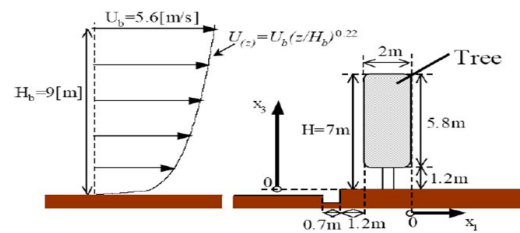
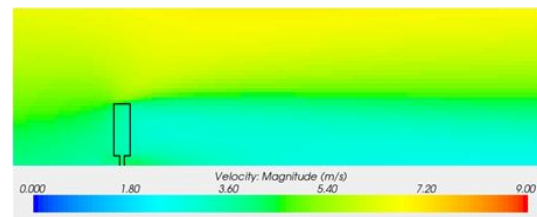
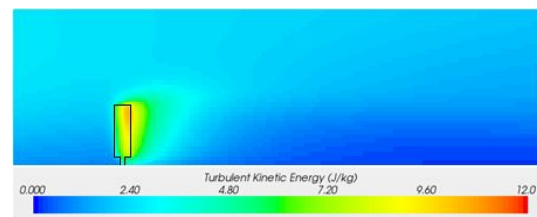


그림 2. Mochida의 Canopy Model



(a) 예비해석에 대한 풍속 분포



(b) 예비해석에 대한 난류에너지 분포

그림 3. 예비해석에 대한 스칼라량 데이터

3) Hur N.G, Lee M.S, Yang S.J, Numerical Simulation of Ventilation in the Storage Hall of Tripitaka Koreana at Haein Temple in Case of Building Rearrangement, Journal of SAREK, Vol. 19, No. 5 p.p. 379~385, 2007

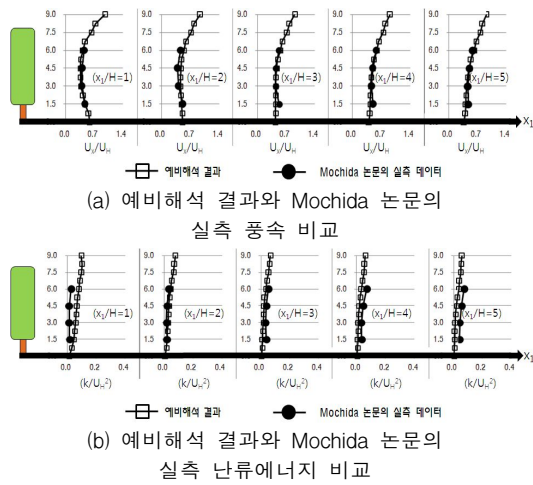


그림 4. 예비해석 결과와 Mochida 논문의 실측 데이터 비교

4. 실 측

4.1 대상지 개요

대상지는 한강변에 위치한 서울시 반포구의 H아파트 단지로 대략 48M높이로 지어진 공동주택이다. 또한 높이 10M이상의 수목이 넓은 면적에 분포하고 있어 Canopy Model을 적용하기에 적합한 대상지라고 생각하여 선정하였다.



그림 5. 실측 대상지(붉은 점선 부분)



그림 6. 풍속/풍향 측정 지점 위치

4.2 측정방법

도심지의 풍속/풍향 분포를 측정하기 위해 서울시 반포지구의 H아파트(12층) 단지를 대상으로 총 7지점의 풍속/풍향을 측정하였다. 측정을 위해 한강지점은 Davis 기상관측장비를 사용하였고, 1~6번 지점은 Lutron AM-4214SD 열선 풍속계와 간이 풍향계를 사용하였다. 간이 풍향계에는 인원을 배치하여 풍향 데이터를 5분 간격으로 수집하였다.

4.3 측정결과

8월 5일과 6일에 측정된 한강지점의 주풍향은 NE, NNE이며, 이 바람은 실측 대상지인 H아파트 단지의 풍환경 분포에 주된 영향을 미친다. 또한 아파트 단지 주변에 수목이 울창하게 자리있어 한강에서 부는 바람이 단지 내로 유입될 때 풍속감소가 일어났다. 5일과 6일 모두 4번 지점의 풍속이 빠르게 나타났지만, 전반적으로 유사한 풍속패턴을 보이고 있다.

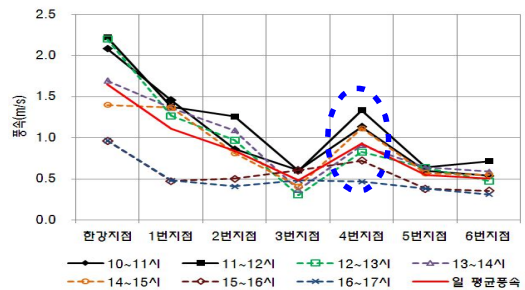


그림 7. 8월 5일 한강 및 1~6번 지점의 시간평균 풍속

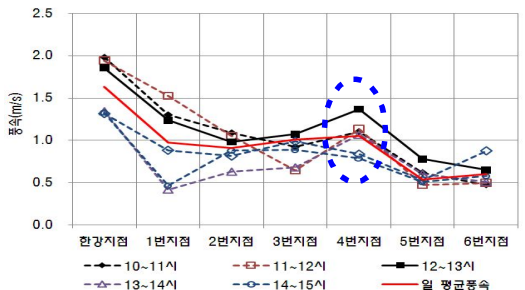


그림 8. 8월 5일 한강 및 1~6번 지점의 시간평균 풍속

5. 실측값과 시뮬레이션 비교

5.1 CFD 시뮬레이션 Process

CFD는 외부환경 분석 시 주로 이용하는 시뮬레이션 Tool로써 Computational Fluid Dynamics의 약자이다. CFD 시뮬레이션 해석 시 절차로는 ① 대상지역 및 주변상황 분석 ② Star-CCM+ Ver 5.06에 의한 대상지역 및 건축물의 3D Modeling ③ CFD 해석을 위한 Mesh 및 Grid Generation 수행 ④ CFD 해석수행 ⑤ CFD 해석결과 분석으로 이루어진다.

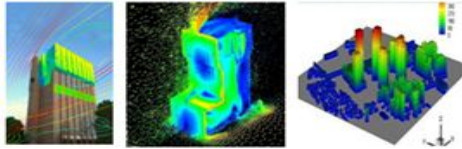


그림 9. CFD 시뮬레이션을 이용한 외부환경 분석화면

5.2 CFD 시뮬레이션 공통조건

CFD 시뮬레이션을 수행하기 위해 CD-Adapco사의 Star-CCM+ Ver 5.06을 사용하였고,⁴⁾ 표2에 시뮬레이션 경계조건⁵⁾을 나타내었다. 경계조건 설정은 AIJ CFD 가이드라인을 기준으로 선정한 것이다.

본 연구에서 중점적으로 다루고 있는 지표면으로부터 2m 이내의 풍환경을 정확하게 시뮬레이션하기 위해 실측 대상지의 최소 Grid Size는 1m로 설정하였다⁶⁾ 또한 바닥면에 Prism Layer를 설정하여 지표면으로부터 2m 이내에 최소 3개 이상의 격자가 배치될 수 있도록 하였고, 대상지는 도메인 상에서 중심에 위치하도록 하였다.

4) Star CCM+ 5.06 Training Manual

5) Qingyan Chen, Using Computational Tools to Factor Wind into Architectural Environment Design, Energy and Buildings, Vol. 36, p.p. 1197-1209, 2004

6) Xianting Li, Zhen Yu, Bin Zhao, Ying Li, Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings, Building and Environment Vol. 40 p.p. 853-866, 2005

5.3 기존 CFD방법

대상건축물 및 주변지형분석 후 실측데이터를 통해 시뮬레이션 입력조건 추출하고 경계조건입력(표 2 참조)하고 α 값은 지표면조건에 따른 α 값⁷⁾을 참조하여 일반적인 도심지 지역의 풍환경 분석 시 적용되는 0.33으로 하였다.

표 2. CFD 경계조건

Turbulence model	- Standard k- ϵ model
State	- Steady State
압력보정 알고리즘	- SIMPLE (비압축성 유동으로 가정)
Wind Direction	- NE(8월 5일 11시 30분 풍향)
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, 지표면에서2m) $k = \frac{3}{2}(U \times D)^2$, $\epsilon = C_\mu \frac{\kappa^2}{v_t}$ $I : 0.15$, $C_\mu : 0.09$, v_t : 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

5.4 Canopy Model 적용

기존 CFD 시뮬레이션에 Canopy Model을 적용하여 해석하였다. 수목이 있는 부분에 풍속 감소와 난류에너지 및 난류에너지 소산율의 증가를 표현하기 위한 추가 방정식을 적용하기 위해서는 수목이 모델링된 부분과 해석 도메인의 Interface 처리가 필요하다. 하지만 Trimmer grid의 경우 수목과 해석 도메인의 Interface 처리 시 Grid의 각 면이 일

7) Qingyan Chen, Using Computational Tools to Factor Wind into Architectural Environment Design, Energy and Buildings, Vol. 36, p.p. 1197-1209, 2004

치하지 않는 경우가 있기 때문에 Tetrahedral Grid 타입의 격자체계를 이용하여 실시하였다.

5.5 결과 값 비교 및 분석

기존 CFD방법과 Canopy Model을 적용하여 해석한 결과 수목을 3D로 표현하고 Canopy Model을 적용한 모델은 실측 대상지 수목 부분의 풍속감소를 정확히 표현하였다. 여기에 그치지 않고 실측값과 오차를 더 줄이기 위해 α 값을 변화시켜 Canopy Model을 적용해 보았다. 실측 데이터와 가장 작은 편차를 보이는 경우를 찾기 위해 각 지점별 실측 풍속과 시뮬레이션 풍속 값의 편차를 살펴보았다. (그림 13~15 참조)

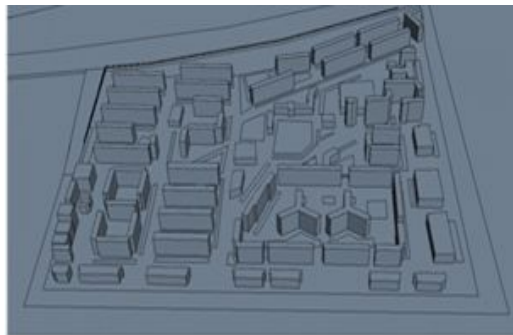


그림 10. 실측 대상지 3D 모델링 및 Grid Discretization



그림 11. 도메인 내 Canopy Model의 적용

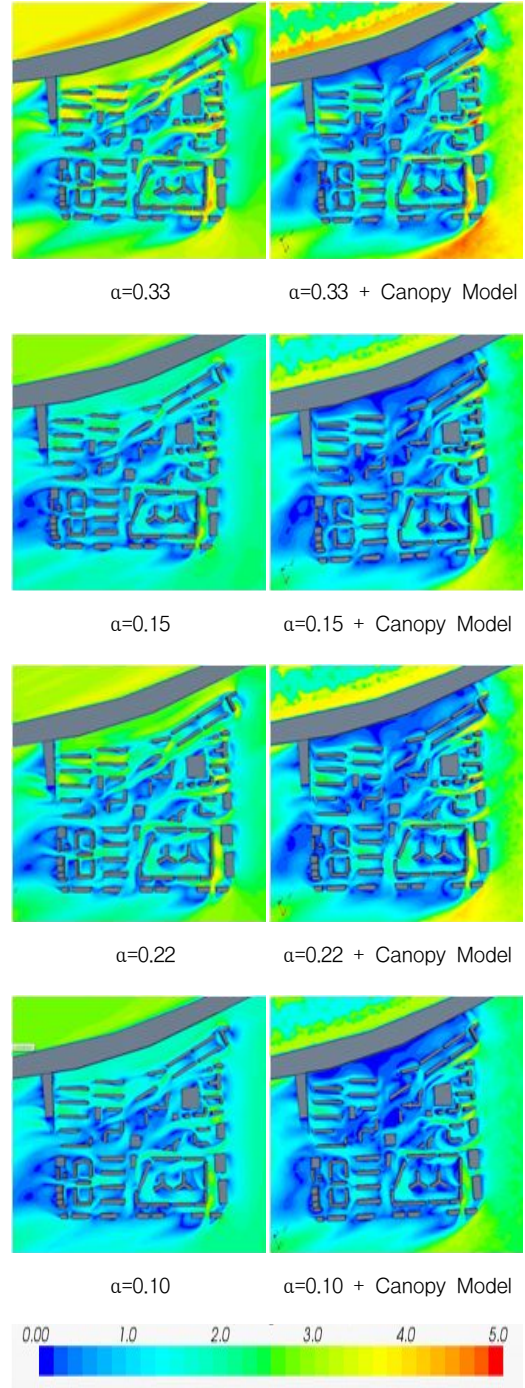


그림 12. 기존 CFD 적용방법과 Canopy Model을 적용한 2m 높이 풍속 분포

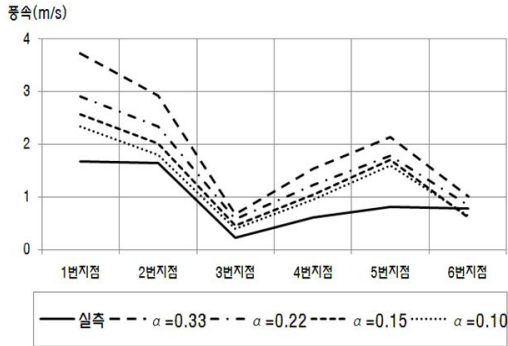


그림 13. α 값의 변화(기존 CFD방법)

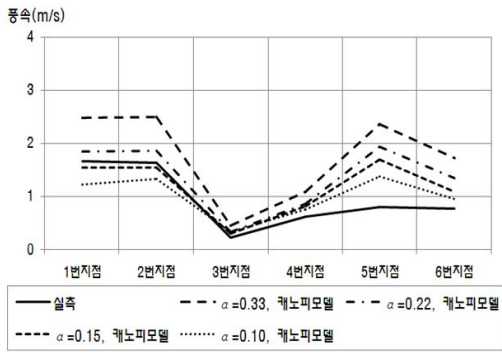


그림 14. α 값의 변화 & Canopy Model 적용 (Canopy Model 적용)

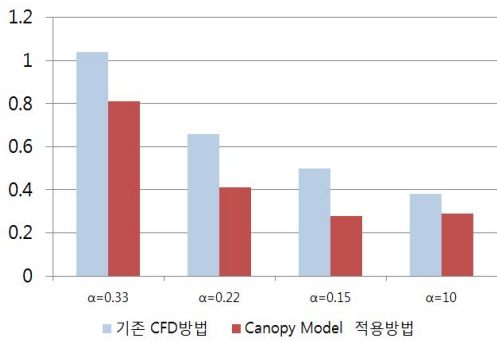


그림 15. 실측과 CFD 시뮬레이션 풍속 편차

5.6 해석 결과

기존 CFD방법으로 해석하였을 경우보다 Canopy Model을 적용함으로써 0.23, 0.25, 0.22, 0.09만큼의 편차를 더 줄일 수 가 있었다. 풍속 평균편차 값 중 가장 작은 차이를 보이는 경우는 $\alpha=0.15$ & Canopy Model을 적용한 것이다.

6. 결론

본 연구를 통해 일반적인 도심지 CFD 시뮬레이션 시 풍속프로파일 값 $\alpha=0.33$ 을 사용하고 수목에 대한 영향을 고려하지 않지만, 본 연구의 실측 대상지와 같이 주풍향 방향에 특수한 지형이 존재하는 경우에는 도시 특성을 고려하여 α 값을 설정해야 한다.

또 한 대상지와 같이 조경의 비중이 큰 지역일 경우에는 수목을 모델링한 후 풍속감소와 난류에너지 증가를 표현할 수 있는 Canopy Model을 적용하여 풍환경 분석을 실시해야 한다는 것을 알 수 있었다.

Canopy Model을 적용하여 CFD 시뮬레이션을 사용한다면 실측값과 비슷한 풍속을 예측할 수 있으며, 설계계획단계에서도 단지배치나 건물의 디자인을 계획하는데 많은 도움을 줄 수 있을 것이다. 국내에도 지역특성에 따라 적절히 사용할 수 있는 CFD 가이드라인을 설정하여 엔지니어가 정확히 풍환경을 예측하여 도심의 풍환경 문제를 예방하고 대책마련을 해야 한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 「세계수준의 연구중심대학(WCU)육성사업」의 지원을 받아 수행되었음(R332011000100270)

참 고 문 헌

1. 홍인표외 2명 도심지 풍환경 예측 시 CFD 시뮬레이션 적용방법에 대한 연구
2. 이수미외 1명 BIM에 기반한 계획설계 단계에서 풍환경 예측 및 평가방법의 제안 p.267~273, 2010
3. Yoshihide Tominaga, AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings,

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008
4. Hur N.G, Lee M.S, Yang S.J, Numerical Simulation of Ventilation in the Storage Hall of Tripitaka Koreana at Haein Temple in Case of Building Rearrangement, Journal of SAREK, Vol. 19, No. 5 p.p. 379~385, 2007
 5. Star CCM+ 5.06 Training Manual
 6. Qingyan Chen, Using Computational Tools to Factor Wind into Architectural Environment Design, Energy and Buildings, Vol. 36, p.p. 1197~1209, 2004
 7. Xianting Li, Zhen Yu, Bin Zhao, Ying Li, Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings, Building and Environment Vol. 40 p.p. 853~866, 2005
 8. Qingyan Chen, Using Computational Tools to Factor Wind into Architectural Environment Design, Energy and Buildings, Vol. 36, p.p. 1197~1209, 2004