

도시·건축형태 모델링의 정밀도(LOD. Level Of Detail)가 CFD 시뮬레이션 결과에 미치는 영향

김현우¹, 이건원^{2*}

¹주식회사 어반시스템즈, ²호서대학교 건축학과

The Impacts of LOD of Urban and Building From Modeling on the CFD Simulation Results

HyunWoo Kim¹, Gunwon Lee^{2*}

¹Urbansystems

²Department of Architecture, Hoseo University

요 약 최근 기후변화 대응이 중요한 이슈로 떠오르며, 도시개발 및 재개발이 인근 지역의 기후변화에 미치는 영향을 측정하고, 적절한 기후변화 대응 방법을 모색하기 위해 환경영향평가, 건축심의 등에서 CFD 시뮬레이션이 널리 사용되고 있다. 본 연구는 CFD 시뮬레이션을 수행할 때, 중요 이슈로 제기되는 모델링 정밀도가 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 도출하고자 했다. 본 연구에서는 모델링 정밀도를 LOD1부터 LOD4까지 4가지 단계로 분류하여, 각각 토지피복만 모델링한 경우(LOD1), 박스에 가깝게 단순한 매스만 모델링한 경우(LOD2), 지붕부까지만 정밀하게 모델링한 경우(LOD3), 지붕부는 물론, 저층부까지 완전히 정밀하게 모델링한 경우(LOD4)까지 준비하였다. 이를 실제 기상청 AWS가 설치된 독산초등학교 인근 지역에 적용하여 각각 시뮬레이션한 결과와 실제 기상 측정치와의 비교를 통해서 모델링 정밀도에 따른 시뮬레이션 결과와 실측치를 비교하였다. 실제로, LOD4가 가장 실측치와 유사하였으나 모델링에 소요되는 시간과 노력을 고려할 때, LOD3 수준이 적절함을 도출할 수 있었다. 본 연구 결과는 향후 CFD 시뮬레이션 모델링시 참고할 수 있는 기초자료로서의 의미를 갖는다.

Abstract Among the increasingly important climate change solutions, CFD simulation is widely used in environmental effects evaluation and architectural review. These evaluations and reviews are conducted to estimate the effects of urban development and redevelopment projects on the climate change of nearby areas and come up with measures to combat climate change. Along these lines, this study aims to identify the impacts of the LOD (Level of Detail) of modeling, one of the major attributes of a CFD simulation, on the simulation results. The LOD ranges from LOD1 to LOD4: LOD1 deals with only land coverage, LOD2 encompasses a simple mass, LOD3 includes specific elements, including roofs, and LOD4 contains both roofs and lower floors. This study compared the simulation results by each LOD and the actual measurements of weather in Docksan Elementary School, where the AWS is installed. The analysis results show that LOD4 has the most similar value to the actual measurements. However, while considering the time and effort put into performing the modeling, it is concluded that LOD3 is the most appropriate level. In essence, this study is expected to be the groundwork for the modeling of CFD simulations in the future.

Keywords : Urban Design, Modeling, CFD, LOD, Wind Speed

본 연구는 국토교통부 쇠퇴지역 재생역량 강화를 위한 기술개발사업의 연구비지원(21TSRD-B151228-03)에 의해 수행되었음

*Corresponding Author : Gunwon Lee(Hoseo Univ.)

email: gwlee@hoseo.edu

Received October 20, 2021

Accepted December 6, 2021

Revised November 17, 2021

Published December 31, 2021

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

파리기후 변화협약 체결로 기후변화대응을 위한 도시 기후환경 및 도시·건축 에너지 관리가 더욱 중요해지고 있다. 탄소중립도시 조성을 위해서 역시 도시관리 시, 기후변화에 미치는 영향을 저감하고 에너지 절약적인 도시 공간을 조성하는 것은 필수적이다. 또한, 변화된 기후에 적응하기 위한 도시기후에 회복력있는 도시(Resilient City) 조성 역시 그 중요성이 더해가고 있다.

이렇듯 도시기후환경 관리의 중요성이 높아짐에 따라 관련 연구들이 증가하고 있다. 특히, 도시기후를 정밀하게 모사하여 도시형태, 도시피복에 변화를 주는 계획행위가 도시기후환경에 미치는 영향을 연구하기 위해 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 시뮬레이션을 활용한 연구들이 주목받고 있다.

하지만 CFD는 현실에 가깝게 모사한 것으로 그 예측값과 실측값의 차이가 매우 중요하다. 그 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 해석영역설정, 격자매쉬 크기, 물리모델 설정, 경계조건 설정 등이 중요한 이슈로 다루어지고 있다. 또한 현실에서의 도시·건축의 형태를 어느 정도 수준에서 유사하게 모사하는 것이 결과의 신뢰성에 영향을 미치는가 역시 중요한 이슈 중의 하나이다. 특히, 도시설계나 건축설계 분야에 있어서 도시를 구성하는 건축물의 형태를 어느 정도 정밀하게 모사해야 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있을지는 매우 중요하다. 하지만 이에 대한 충분한 연구가 부족하여 이에 대한 정확한 기준이 부재한 실정이다. 따라서, 본 연구는 도시관리시 기후변화대응의 적절성 검토를 위해 각광받고 있는 CFD 시뮬레이션 방법론의 신뢰성을 확보하기 위해서 모델링시 정밀도 수준(LOD: Level of Detail, 이하 LOD)이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 다만, 관련 연구가 충분하지 않은 상황임을 고려하여 상대적으로 단순한 풍환경 시뮬레이션을 통해서 이를 확인하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 공간적 범위는 서울특별시 금천구 시흥대로 104길 31에 위치한 독산 초등학교 및 그 반경 100m 지역으로 한정했다. 이 곳에는 현재 기상청에서 설치한 자동기상측정망(AWS: Automatic Weather Station, 이하 AWS)가 설치되어있어 지역 내 정확한 기후 및 기상 데이터를 분 단위로 획득할 수 있다는 장점이 있다.

연구를 위한 시간적 범위는 2021년으로 설정했다. 실

제로, 기초 지형 및 형상 데이터는 해당 지역에 대해서 국토지리정보원에서 제공하는 최신 자료인 2005년을 기준으로 하되, 현재의 변화상을 반영하여 2021년을 기준으로 최신화했다. 또한, 활용한 기본 경계조건 및 기상 데이터 역시 2021년 7~8월의 자료를 활용했다.

연구방법으로는 선행연구를 바탕으로 연구문제 및 연구의 프레임워크를 설정하고, 이에 따라 LOD1~4까지의 모델링을 수행했다. 이를 바탕으로 CFD 시뮬레이션을 실시하여 기상청 AWS 실측 데이터와의 적합성을 살펴봄으로써 향후 CFD 시뮬레이션을 위한 모델링 시의 시사점을 도출했다.

2. 이론적 검토

2.1 CFD와 LOD

도시 및 건축의 형태는 도시 미기후와 건축물 에너지 소비량에 영향을 미치는 것으로 알려져있다. 실제로, D.J.Sailor(2013)는 건물의 높이와 건물 사이의 간격의 형태가 복사에너지에 영향을 미쳐 도시협곡의 바닥이 비도시의 협곡보다 밤에 열이 유지되는 경향이 있다고 말했다[1]. Baruch Givoni(1998)는 높은 건물이 밀집해 있는 지역이 다른 지역에 비해 풍속이 상대적으로 느리다는 것을 밝혔다[2]. 이진원(2016)은 건물 간의 인동간격, 건물 사이의 풍속변화, 1층부 후퇴 깊이가 건물에너지 사용량 변화에 영향을 미친다고 밝힌 바 있다[3].

이러한 미기후에 대한 연구를 위해 다양한 연구방법들이 활용되었으나 최근 컴퓨터 파워의 발전으로 CFD 시뮬레이션이 다양하게 적용되고 있다. CFD는 전산유체역학의 약어로 컴퓨터를 이용해 수치 해석적 방법으로 유체 유동 문제를 풀고 해석하는 방법이다. 최근에 컴퓨터의 연산능력이 비약적으로 발전함에 따라 mock-up(Mock-Up) 실험을 진행할 수 없는 거대한 규모 및 설정할 수 없는 특수한 환경을 대상으로 하는 연구에서 주목받고 있다. CFD의 정확도가 과거와 비교하여 많이 향상되었다고는 하나 설정하는 해석영역, 경계조건, 격자 크기, 모델링 정밀도 등에 따라 시뮬레이션 예측값에 따라 많이 좌우된다.

LOD는 비디오게임, 렌더링 및 모델링 소프트웨어, GIS 및 3D 도시 모델링에서 사용되는 개념으로 객체의 중요도, 시점과 객체의 상대속도 및 위치 차이에 따라 모형의 정밀도 수준을 조절하여 작업 및 연산과정의 부하를 줄이는 것을 목표로 하는 기법을 말한다.

2.2 선행연구 검토

본 연구와 관련이 있는 선행연구들은 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 물리모형의 배치 및 형상이 미기후에 미치는 영향을 분석한 연구들이다. 다른 하나는 CFD 시뮬레이션 예측값의 신뢰도 제고를 위한 연구들이다.

먼저, 오금동 외(2019)는 1949년부터 2019년까지의 중국 베이징 내 아파트의 기본배치특성을 분석하기 위해서 차오양구와 통저우구의 322개 단지사례 중 12개의 대표 유형을 선정하여 ENVI-met을 활용하여 분석하였다. 결과적으로, 온열 쾌적성에 좋은 건물의 형상과 배치 방식으로 판상형 건물을 동향으로 병렬배치를 한 유형임을 밝혀낸 바 있다[4]. 최창호·조민관(2012)은 서울을 대상으로, 2000년부터 2006년 기간에 대해서 CFD 프로그램(STREAM)을 사용하여 서울지역의 아파트 중 가장 많은 형태인 판상형과 탑상형의 특징을 연구함으로써 판상형 건물의 격자형 배치는 탑상형 건물의 경우보다 단지 내부의 환기성능이 떨어짐을 밝혀낸 바 있다[5]. 박진철·배용규(2021)는 1974년에 완공되어 40년이상 사용된 노후된 한강변 판상형 공동주택단지를 대상으로 기상청 폭염특보가 발효된 2020년 8월 25일 8시부터 다음날까지 총 24시간 동안 보행자 레벨의 온도분포 특성을 분석하기 위해 단지 내 측정기준점 10곳을 선정하여 높이 1.5m 보행자 레벨에서 실측을 진행하였고, Envi-met을 사용하여 대상지 내 물리적 조건에 따른 풍향 및 풍속에 차이가 있음과 이에 따라 동시간대 보행자레벨의 온도분포가 2도까지 차이남을 밝힌 바 있다[6]. 김태원 외(2017)는 AWS를 통해 서울시 내 높은 온도를 보이는 상위 3개 지역인 광진구, 송파구, 서초구 내 300m × 300m 크기의 대표 유형을 대상으로 2012~2015년 총 3년의 기간에 대해서 CFD 프로그램(STAR-CCM+)을 이용한 시뮬레이션을 실시함으로써 건축물의 밀집 형태에 따라 바람길이 다르게 형성되며 건축물의 밀도가 높게 배치된 경우 공기의 흐름이 초입부근에 정체되어 그 흐름이 원활하지 않음을 밝힌 바 있다[7].

두 번째 유형의 연구들은 다음과 같다. 정수현 외(2012)는 서울시 반포지구 H아파트 단지를 대상으로 2011년 8월 5~6일에 걸쳐 7곳에 대해서 보행자 레벨에서의 실측을 실시하였고 이를 CFD 프로그램(STAR-CCM+)을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 기존의 건축물만 있는 경우, 지표면의 거칠기를 추가한 경우, 수목을 추가한 경우 세 가지 유형으로 LOD를 구분하였는데, 모델링 정밀도와 실측 결과와의 관계를 밝힌 바 있다[8]. 조관행 외(2011)는 H대학교 캠퍼스를 대

으로 CFD 프로그램(STAR-CCM+)을 사용하여 시뮬레이션을 사용하여 적절한 수준의 매쉬격자의 크기를 제안하고 있다[9]. 조정훈 외(2012)는 일본 신주쿠 지역의 초고층 빌딩이 밀집한 지역을 대상으로 1975년 12월부터 1983년 11월까지 현장에서 실측데이터를 활용하여 풍동실험과 CFD 시뮬레이션(STAR-CCM+) 간의 비교를 실시하였다. 결과적으로 풍동실험의 신뢰도가 상대적으로 높음과 CFD 시뮬레이션은 난류모델에 따라서 신뢰도가 차이가 있음을 밝힌 바 있다[10]. 이민형 외(2020)는 다중선형회귀분석을 통해 격자 품질 예측 모델을 구축하기 위해서 종속변수인 최대 비수직성(non-orthogonality)와 최대 왜도(skewness)에 독립변수인 역 기하의 수(ITC.: Inverse topology count. 이하 ITC), 표면 면적과 볼륨 비(SAV.: Surface area to volume ratio. 이하 SAV), 형상 복잡도(SC.: Shape complexity. 이하 SC)를 설정하여, 격자품질에 영향을 미치는 형상특성지표를 검토했다. CFD 프로그램(OpenFOAM)을 이용하여 격자를 생성하였으며, 분석결과 ITC와 SAV는 품질 지표 예측에 유의한 지표이나 SC는 그렇지 않음을 확인하였다[11]. A.Ricci et al.(2017)은 풍동실험과 CFD 시뮬레이션을 교차분석을 통해 CFD 물리모델의 정밀도에 따른 예측값의 신뢰도 제고를 목표로, 이탈리아의 항구근처에 위치한 리보르노(Livorno) 시 Quartiere La Venezia에 한 블록을 대상지로 하여, 높이가 동일한 모델, 동의 분리 및 높이차를 반영한 모델, 지붕의 형상을 반영한 모델로, 점차 세밀도가 증가하는 세 단계로 구분하여 연구를 진행했다. 또한 Quartiere La Venezia의 도시 전체를 대상으로는 높이가 동일한 모델, 동의 분리 및 높이차를 반영한 모델의 두 단계로 나누어 CFD 프로그램(OpenFOAM)을 사용하여 분석하였다. 블록과 도시 전체를 대상으로 한 두 연구에서 모두 결과 정확도와 모델링 시간을 고려할 때, 동의 분리 및 높이차를 반영한 모델이 적절함을 밝혀냈다[12].

기존의 연구들은 다음과 같은 한계를 노정하고 있었다. 먼저, 실측값을 활용하는 부분에서 한계가 노정되었다. 실측값을 활용하지 않거나, 실측을 하여도 이를 시뮬레이션 결과와 비교를 하지 않거나 일부 데이터만을 활용하는 등 연구진에 의해 임의적으로 얻어진 데이터를 활용하였다.

두 번째로, 모델링을 실시함에 있어서 풍동실험과의 비교를 위해서 실제 크기를 모사하기 보다는 축소된 모형을 활용하였다. 모형의 크기 자체는 시뮬레이션에 영향을 미치지 않으나 모형의 크기에 적절한 격자 크기 상정

은 영향을 미칠 수 있다. 이러한 부분이 시뮬레이션 실시
에 있어서 고려되어야 하나 그러한 고려가 없었다.

이러한 한계를 극복하고자 본 연구는 첫째, 공인된 실
측데이터인 기상청의 AWS를 기반으로 하였다. 둘째,
CFD 시뮬레이션 물리모형의 크기를 실제 사이즈로 모델
링하고, 이에 적절하게 격자 크기를 설정하였다.

3. 분석 체계

3.1 분석 대상지역 설정

분석 대상지역은 서울특별시 금천구 시흥대로104길
31을 중심으로 주변 100m 반경으로 설정했다. 대상지는
앞서 언급한 바와 같이 기상청 AWS가 설치되어 있어
공인된 기상 데이터를 분 단위로 얻을 수 있다는 장점
이 있다. 기상청 AWS 설치 지역들 중 지형 효과를 무시할
만하며, 주변에 건축물이 다수 배치되어 있어 도시 미기후
연구에 시사점을 줄 수 있는 지점들 중에서 선정하였다.

또한, 해당 대상지는 노후 저층 밀집 주거지로 2020년
'서울형 도시재생활성화지역'으로 선정되기도 하였으며,
독산 초등학교 인근 지역으로 향후 개발 시, 교육환경영향
평가 대상이 되는 지역이기도 하여 환경적 부하 분석이 중
요하다. 이에 본 연구에서의 CFD 시뮬레이션을 위한 모
델링 기법이 향후 영향평가 시, 시사점을 줄 수 있을 것으
로 판단되어 선정했다. 또한, 대상지는 고밀 주거지이며
주차환경개선지구로, 주택부설 주차장 및 내집 주차장 확
보에 따라 향후 필로티 구조 선택이 불가피함에 따라 본
연구의 필로티 여부에 대한 모델링 가이드라인이 향후 해
당 대상지에 CFD 시뮬레이션을 위한 모델링 시 시사점을
제공할 수 있을 것으로 생각되어 선정하였다.

해당 대상지역은 제2종 일반주거지역이며, 110개의
건물과 1개의 초등학교를 포함하며 가장 많은 건물의 유
형은 주택으로 개발되어 있다.



Fig. 1. Site Status

3.2 적용 대상 설정

CFD 시뮬레이션을 위한 대상지 모델링 시, 4단계로
모델링 정밀도를 구분하였다. 1단계는 LOD1 수준으로
이차원 평면정보 위에 재료에 따른 물성 만 설정하였다.
2단계는 LOD2 수준으로 LOD1에 높이값을 추가한 3차
원 입체정보를 바탕으로 모델링을 하였다. 3단계는
LOD3 수준으로 높이값이 더해진 LOD2에 지붕의 구체
적인 형상을 추가하여 모델링하였다. 4단계는 LOD4로
지붕의 형상이 추가된 LOD3에 저층부 공간인 필로티의
구체적인 형상을 반영하여 모델링하였다. 이상의
LOD1~LOD4 수준을 다이어그램으로 정리하면 아래
Fig. 2와 같다.

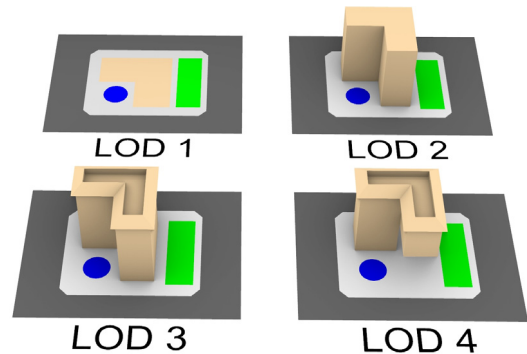


Fig. 2. LOD Model

3.3 분석 모델 설정

3.3.1 활용자료 및 격자 생성

해당 대상지의 건물, 도로 등 기본 도시·건축형태와 관
련된 자료는 국토지리정보원의 2015년도 SHP 데이터를
활용하였다. 녹지, 아스팔트 등의 피복정보는 'V-World'
의 공간정보와 토지피복지도 자료를 참고하여 반영하였
다. 2015년 이후의 상황에 대해서는 민간 지도포털과 현
장답사를 통해 2021년 기준으로 최신화하였다. 이를 활
용하여 $1\text{km} \times 1\text{km} \times 0.05\text{km}$ 의 모델링 영역을 설정하고,
도메인은 Hu&Wang(2005)의 연구 기준에 따라 가로와
세로는 5배, 높이는 10배를 상정하여, $5\text{km} \times 5\text{km} \times 0.5$
 km 로 설정하였다[13]. 이에 대해 Trimmed Mesh와
Prism Layer 3개를 적용하여 격자를 생성하였다. 각 모
델별로 적용 안의 형태가 다소 달라서 격자 수의 차이는 낮
으나 대부분 약 2천 1백만 개 내외의 격자가 생성되었다.

3.3.2 경계조건 및 물리모델 설정

본 연구에서는 CFD모델을 활용하여 시뮬레이션을 시

행했다. 이에 적용된 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이며, 대표적인 난류모델인 Realizable K-epsilon Turbulence 모델이 적용하였다. 이러한 모형의 CFD시뮬레이션을 위하여 Siemens사의 STAR-CCM+ v13.06을 활용하였다.

이 분석을 위해서 기상자료는 기상청 AWS 중 광역적인 기상데이터를 수집하는 종관 기상데이터의 2021년 7~8월의 평균 풍속, 평균 풍향, 평균 온도 등의 기상데이터를 활용하였다. 서울시 내에는 두 군데의 종관기상데이터 측정소가 있는데, 이 중 서울기상청의 종관기상데이터를 활용하였다. 이는 남남서쪽(187도)에서 고도 85m에서 2.07 m/s의 바람이 불어오는 상태를 가정하였으며, 평균 대기 온도는 27.5℃로 상정하였다.

Table 1. Boundary Conditions

Contents		Conditions
Domain Size		5,000 m × 5,000 m × 500 m
Cell Type		Trimmed Mesh
Cell		21,000,000
Prevailing Wind Direction		SouthSouthWest(187°)
Inlet	Velocity	2.07m/s(Height: 85m)
	Temperature	27.5℃
Outlet Condition		Pressure Outlet
Surface Condition		Concrete, Asphalt, Green, Soil

이 분석을 위해서 적용한 경계조건은 아래와 같다. 피복은 기본적인 대지, 녹지, 아스팔트, 건축물(콘크리트), 흙으로 상정하여 다음의 열복사 특성을 정의하였다 [14,15]. 열복사 특성은 각각 밀도(ρ), 비열(C_p), 열전도 계수(k), 방사율(ϵ)이다. 여기서 지표면의 두께는 표피의 온도변화 영향을 받지 않도록 충분한 깊이(4m)까지 설정하였다. 단, 녹지의 경우에는 증발잠열을 고려하였다.

Table 2. Property of Surface material

	ρ kg/m ³	C_p J/kg·K	k W/mK	ϵ
Concrete	2050	960	1.0	0.81
Asphalt	2120	920	0.698	0.96
Green	1500	1842	2.6	0.6
Soil	1500	1842	2.6	0.6

4. 분석결과

4.1 모델 간 비교

LOD1~LOD4의 시뮬레이션 결과의 정확도를 검토하기 위해서 독산초등학교에 설치되어있는 기상청 AWS를 활용하였다. 이 측정기는 방재용 AWS로 전국에 500여 곳에 설치되어 있는 기상 자료 수집장치이다.

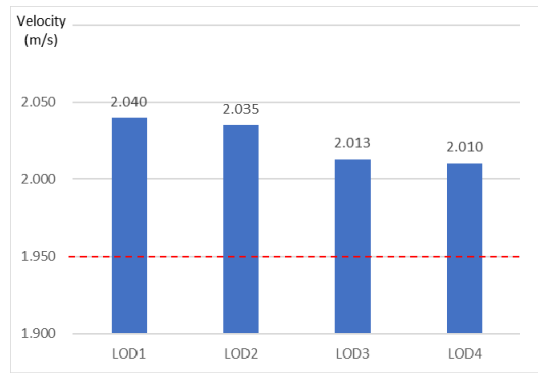


Fig. 3. Comparison of Simulation Results of LOD2, LOD3, and LOD4 and Actual Measurements of Weather

독산초등학교의 7~8월에 측정된 기상청 AWS의 측정값은 고도 45m 기준으로, 평균 1.95m/s를 기록하였다. 이를 바탕으로 LOD1 ~ LOD4까지의 시뮬레이션 값을 비교하였다. 그 결과 가장 근접한 값은 LOD3과 LOD4로 나타났다. LOD3은 0.063m/s의 차이가 났으며, LOD4는 0.06m/s의 차이가 나타났다.

분석시간은 모델링 시간과 시뮬레이션 수행시간으로 구분하였다. 모델링 시간에서는 선정리 등 모델링 준비시간은 제외하였고, 시뮬레이션 수행시간에는 격자 생성시간을 포함하였다. 시뮬레이션 수행을 위해 Intel Xeon Gold 6226R (2.9GHz, 22MB cache) 16코어×2, Samsung 32GB DDR4 2933Mhz PC4-23400×12로 총 32코어의 CPU와 384GB의 RAM을 갖는 워크스테이션이 사용되었다.

LOD1의 경우, 모델링 시간은 총 45분, 시뮬레이션 수행시간은 1시간 38분(98분), 총 2시간 23분(143분)이 소요되었다. LOD2의 경우, 모델링 시간은 총 55분, 시뮬레이션 수행시간은 2시간 12분(132분), 총 3시간 7분(187분)이 소요되었다. LOD3의 경우, 모델링 시간은 1시간 35분(95분), 시뮬레이션 수행시간은 3시간 29분(209분), 총 5시간 4분(304분)이 소요되었다. LOD4의 경우, 모델링 시간은 총 2시간 5분(125분), 시뮬레이션 수행시간은 4시간 6분(246분), 총 6시간 11분(371분)이 소요되었다. 결국, LOD2는 LOD1에 비해서 44분을 소

요하여 0.005m/s의 정확도를 얻었다. LOD3는 161분을 더 소요하여 0.027m/s를, LOD4는 228분을 더 소요하여 0.032m/s의 정확도를 얻었다.

이를 투입된 소요시간인 1분을 기준으로 계산하면, LOD1에 비교할 때, LOD2는 1분 당 1.136×10^{-4} m/s의 정확도를, LOD3는 1분 당 1.677×10^{-4} m/s의 정확도를, LOD4는 1분 당 1.403×10^{-4} m/s의 정확도를 얻은 셈이다. 이러한 결과를 통해, 소요 시간 대비 정확도는 LOD3이 가장 높다고 판단할 수 있다.

4.2 분석결과

위와 같이 기상청 AWS와 동일한 높이인 고도 45m에서의 풍속 값을 비교함으로써 모델로서의 적정성을 평가하였다. 다음으로는 실제 도시 외부공간에서 보행자들에게 의미 있는 보행자 레벨인 1.5m 높이에서의 각 모델별 차이를 살펴보았다. 바람의 속도를 LOD 모델별로 비교하기 위해서 0~2m/s로 고정하여 시각화하였으며, 범례 역시 이에 맞췄으므로 LOD1 이외 범례는 생략하였다.

먼저, LOD1의 시뮬레이션 결과, 건축물과 대상지가 만나는 남측 지역에서 풍속의 저하가 관찰되었다. 이러한 풍속 저하는 다시 대상지를 지나며 속도가 빨라지게 되었다. 구체적인 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 4와 같다.

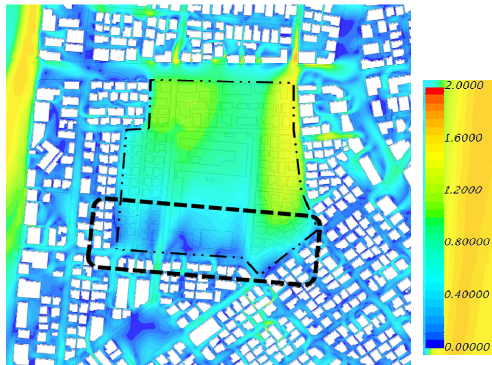


Fig. 4. Simulation Results of LOD1

LOD2의 경우에는 초등학교 건물 사이에 긴 운동장 중앙부에서 바람의 속도 저감이 관찰되었다. 초등학교 북측부를 지나며 일부 속도가 회복되었으나 다시 북측의 건축물군을 지나며 군데군데 풍속의 저하가 관찰되었다. 구체적인 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 5와 같다.

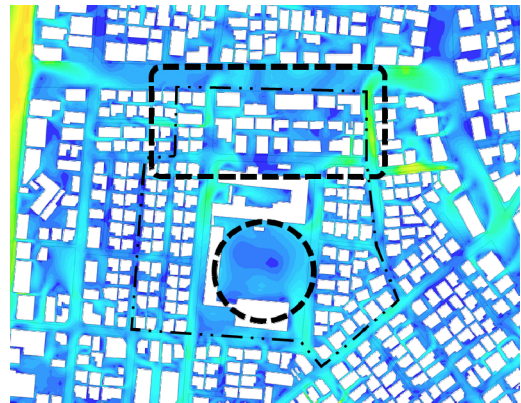


Fig. 5. Simulation Results of LOD2

다음으로 LOD3의 경우에는 LOD2에 비해서 운동장 주변의 풍속 패턴이 변화된 것이 관찰되었다. 실제로 지붕의 형상을 모델링함으로써 상부 바람의 흐름이 변화면서 운동장 중앙부에 섬처럼 풍속의 패턴이 나타나던 것에서 건물과 건물 사이부에서 바람 속도가 저하되는 구간이 나타났다. 또한 초등학교 북측 건물군에서 바람 속도가 더 저하된 것이 관찰되었다. 다만, 초등학교에 인접한 건물과의 사이에서 바람속도 저하는 다소 완화되었다. 구체적인 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 6에서 확인할 수 있다.

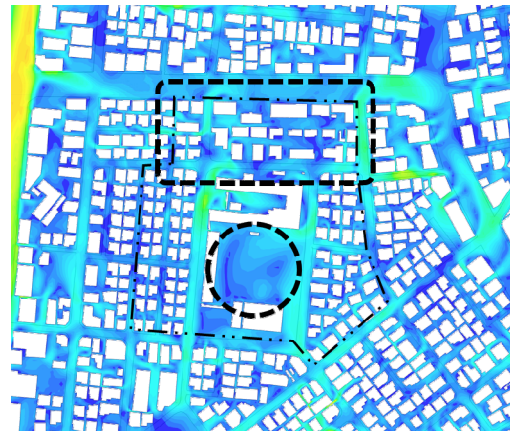


Fig. 6. Simulation Results of LOD3

마지막으로 LOD4의 경우에는 중앙부 운동장의 바람 패턴이 다시 변화한 것을 관찰할 수 있었다. 이는 독산초등학교 남측 건물에 필로티가 모델링되면서 다시 바람의 패턴이 변화되었기 때문이다. 실제로 초등학교 남측 건물과 서측 건물 사이가 벌어지면서 바람이 유입되고 서측에 풍속이 저하되던 구간이 개선되면서 바람의 속도가

저하되던 구간은 보다 동측으로 이동한 것이 관찰되었다. 또한, 초등학교 북측 건물군에서 필로티가 모델링되면서 전반적으로 바람의 속도 저하 현상이 개선된 것을 관찰할 수 있었다. 기타 구체적인 시뮬레이션 결과는 아래 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

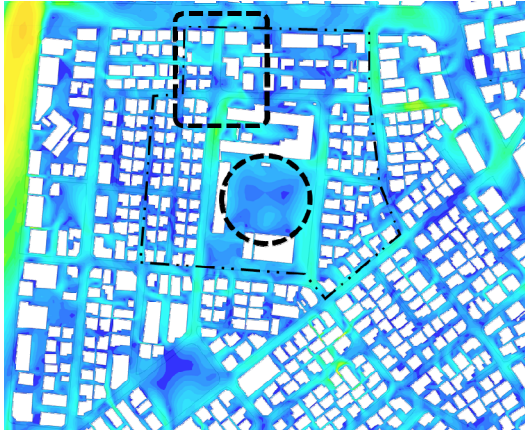


Fig. 7. Simulation Results of LOD4

LOD1~4까지의 보행자 레벨(1.5m)에서의 바람속도를 비교하면 아래 Fig. 8과 같다.

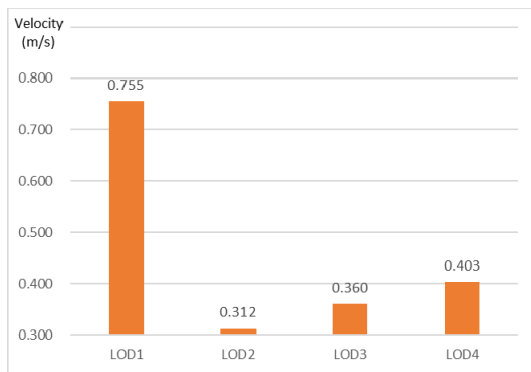


Fig. 8. Comparison of Modeling by LOD

실제로 LOD2의 경우가 가장 느렸으며, LOD1이 가장 빨랐다. LOD1의 경우에는 다른 모델들과 차이가 커서 모델로서의 가치는 상당히 떨어진다고 볼 수 있었다.

5. 결론

이상의 분석결과를 바탕으로 다음의 시사점을 도출할 수 있었다. 첫째, 토지피복만을 모델링하는 LOD1 수준

의 모델링은 국지 범위의 풍환경 시뮬레이션에서는 적절하지 않음을 알 수 있었다. 토지피복 특히, 물성 정보를 바탕으로 건물 또는 블록을 하나의 판으로 모델링하는 방법은 실제로 넓은 범위의 기상 시뮬레이션에서는 종종 활용되는 기법이다. 하지만 적어도 1km 이내, 격자의 크기가 1m 수준의 미시공간에 대한 풍환경 시뮬레이션에서는 그 정확도가 다른 모델들에 비해서 크게 낮게 나타났기 때문에 이는 적절한 모델링 방법이 아니라고 판단할 수 있었다.

둘째, 건물을 박스 형태로 모델링하는 LOD2와 지붕부를 상세히 모델링하는 LOD3, 지붕 및 저층부까지 상세히 모델링하는 LOD4 중 투입 시간 및 노력 대비 가장 효율적인 모델링 방법은 LOD3로 나타났다. LOD3는 상부 바람의 모사가 상대적으로 정확하고, 이를 바탕으로 실제 측정값에 근사한 결과를 나타냈다. 물론, LOD4가 실제 측정값에 더 가깝게 나타났으나 모델링에 상당한 시간이 들어가는 점을 고려할 때 LOD3 수준이 적절하다고 판단된다. 다만, LOD3도 도시 내 미시공간을 대상으로 하는 대공간 CFD 시뮬레이션에서 건물 모델링에 가장 많이 사용되는 LOD2 보다는 상당한 시간을 소비하므로 반드시 LOD3가 최고의 방법이라고 단정짓기는 어렵다. 또한 본 연구의 결과는 주로 고층부 바람의 속도를 비교했으므로 LOD3가 더 적절한 방법으로 도출되었을 가능성을 완전히 배제하기는 어렵다. 이 점은 본 연구의 한계이기도 하며, LOD3의 적절성을 저층부에서도 증명할 수 있는 추가 연구가 필요하다고 사료된다. 또한 이러한 한계 속에서도 LOD3가 적절한 모델링 방법이라고 하더라도 LOD3 수준에서 LOD2에 비해서 시간을 더 단축할 수 있는 모델링 기법에 대한 추가 연구가 필요하다고 사료된다.

셋째, 보행자 레벨을 모사하는 저층부 풍환경 모사에 있어서는 LOD4 수준의 모델링이 필요하다. 특히, 실제 대상지의 건축물들이 필로티 구조가 많이 분포되는 경우에 대해서는 LOD4 수준의 모델링에 대한 적용 여부 검토가 필요하다. 실제로, 고도 1.5m에서의 시뮬레이션 결과를 볼 때, LOD2는 활용하기 어려운 수준으로 판단되었으며, LOD3가 차선으로 채택될 수 있는 수준이긴 하였으나 실제로 정성적으로 바람의 거동을 살펴볼 때 필로티 구조가 있는 경우 상당한 패턴에서의 차이가 발견되었다. 이 부분은 보다 추가적인 연구로, 실제 어느 정도 차이가 나는지에 대한 보행자 레벨에서의 실측 값을 이용한 비교분석이 필요하다.

본 연구는 도시건축 설계자의 관점에서 CFD 시뮬레

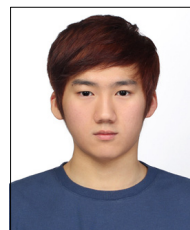
이전 시 도입 가능한 모델링 기법별로 시뮬레이션 정확도를 비교 분석했다는 점에서 의미가 크다. 하지만 앞서 언급한 바와 같이, 기상청 AWS의 설치 고도가 주로 4~5층 건축물 위 특히, 옥상으로부터 10m 이상인 지점에 설치되어 있었 대부분 40~50m 높이를 갖기 때문에 높은 지점에서의 모델링 정확도 검토는 가능하였으나 특히, 관심사인 보행자 레벨에서의 공식적인 실측값을 얻지 못해 정확도를 판별하지 못했다는 점은 한계를 갖는다. 이 부분은 후속 연구를 통해서 검증이 필요하다고 사료된다.

References

- [1] D. J. Sailor, "Energy Buildings and Urban Environment", *Climate Vulnerability*, Vol.3, pp.167-182, March. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00321-X>
- [2] Baruch Givoni, *Climate Considerations in Building and Urban Design*, p.480, Wiley, 1998, p.464.
- [3] G. W. Lee, *Developing Energy-Saving Form-based Urban Design Model for Climate Change Response*, Ph.D dissertation, Korea University, Seoul, Korea, pp.151-178, 2016.
- [4] J. D. Wu, J. H. Lee, S. H. Yoon, "An Aalysis on Micro-climate Characteristic of Apartments in Beijing, China Using ENVI-met Simulation", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure& Construction*, Vol.35, No.8, pp.169-176, Aug. 2019.
DOI: https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2019.35.8.169
- [5] C. H. Choi, M. K. Cho, "A Study on Apartment Ventilation Path using the CFD", *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol.6, No.2, pp.93-98, Jun. 2012.
- [6] J. C. Bak and W. K. Bae, "A Study on the Characteristics of the 24-hour Temperature Distribution of Pedestrian Level in the Outdoor Space of Apartment Complex through CFD Simulation", *Urban Design Institute Conference 2021*, pp.19-24, Apr. 2021.
- [7] T. W. Kim, I. S. Kang, E. J. Choi, M. H. Chung, "Wind Path Analysis by Complex Types using CFD Simulation", *Architectural Institute of Korea Spring Conference 2021*, Vol.37, No.1, pp.585-586, Apr. 2017.
- [8] S. H. Jung, I. P. Hong, J. K. Choi, D. S. Song, "Modification of CFD results for Wind Environment in Urban area with Tree Canopy Model", *Journal of Korean Solar Energy Society*, Vol.32, No.3, pp.185-193, Jun. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7836/kses.2012.32.spc3.185>
- [9] K. H. Cho, J. H. Lee, J. O. Yoon, "The Analysis of Modeling by CFD Simulation for Prediction Wind Environments", *Architectural Institute of Korea Conference 2011*, Vol.31, No.2, pp.431-432, Oct. 2011.
- [10] J. H. Cho, S. R. Yim, K. S. Lee, S. E. Han, "A Study on the Evaluation of Wind Environment and Analytical Method Using CFD Analysis", *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure& Construction*, Vol.28, No.7, pp.99-106, Jul. 2012.
- [11] M. H. Lee, C. M. Kim, G. Y. Park, S. W. Lee, C. H. Choi, "Grid Quality Prediction for CFD Model of Buildings using Geometry Characteristic Index", *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol.14, No.6, pp.577-588, Dec. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200049>
- [12] A. Ricci, I. Kalkman, B. Blocken, A. Freda, M.P. Repetto "Local-scale forcing effects on wind flows in an urban environment: Impact of geometrical simplifications", *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, Vol.170, No.5, pp.238-255, Nov. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.08.001>
- [13] C. H. Hu, F. Wang, "Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area", *Building and Environment*, Vol.40, pp.617-631, May. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.016>
- [14] E. J. Park, "Quantification of CO₂ Uptake by Urban Trees and Greenspace Management for C Sequestration", Gyeonggi Development Research Institute, 2009.
- [15] J. H. Lee, J. G. Kim, and J. O. Yoon, "CFD Simulations of the Ground Surface Temperature and Air Temperature, Air flow Coupled with Solar Radiation", *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, Vol.14, No.3, pp.65-70, Jun. 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2014.14.3.065>

김 현 우(HyunWoo Kim)

[정회원]



- 2021년 8월 : 호서대학교 공과대학 건축학과 졸업 (건축학사)
- 2020년 11월 ~ 현재 : ㈜어반시스 템즈 도시건축연구팀 사원/연구원

<관심분야>
건축설계, 도시설계

이 건 원(Gunwon Lee)

[종신회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 학국사학과 졸업/건축공학과 복수전공수료
- 2008년 2월 : 고려대학교 건축공학과 건축계획학 전공 석사
- 2016년 8월 : 고려대학교 건축학과 도시계획 및 도시설계학 전공박사

- 2009년 3월 ~ 2014년 2월 : ㈜서울건축 종합건축사사무소
사원/대리
- 2014년 3월 ~ 2017년 2월 : 목원대학교 건축학부 조교수
- 2017년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 건축학과 조교수, 부교수

〈관심분야〉

도시설계, 도시재생, 스마트시티, 지속가능한 도시, 도시 미
기후 관리