



RESEARCH ARTICLE

건물 음영 지표 개발용 데이터베이스 구축을 위한 GIS 기반 도시 단위 EnergyPlus 시뮬레이션

이동혁^{1*} · 김덕우²

¹한국산업기술시험원 시스템에너지본부 선임연구원, ²한국건설기술연구원 건축에너지연구소 수석연구원

Urban-scaled EnergyPlus Simulation Based on GIS to Construct Database for Supporting Development of Building Shading Indicator

Yi, Dong-Hyuk^{1*} · Kim, Deuk-Woo²

¹Researcher, System & Energy Division, Korea Testing Laboratory, Hwaseong, Korea

²Senior Researcher, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

*Corresponding author: Yi, Dong-Hyuk, Tel: +82-31-548-1065, E-mail: dhyi@ktl.re.kr

ABSTRACT

As widely acknowledged, building energy use is strongly interplayed with neighboring buildings, such as shading or incident solar radiation. In other words, it is important to investigate building energy characteristics, not by a sole building but with a group of buildings. In this regard, the authors suggest the process of the urban-scaled building simulation using the geographic information system (GIS) to build the database that reflects the shading and the solar radiation that enter the building surface and is helpful for the development of building shading indicator. The GIS is a database that combines the geometric information of buildings as well as the properties of both buildings and the city. In this study, EnergyPlus was chosen as a dynamic building simulation tool, and the comprehensive process including gathering model information, customizing building footprint data, generating models, executing simulations, and organizing the urban-scaled building surface database.

주요어 : 지리정보시스템, EnergyPlus, 도시 규모 시뮬레이션, 음영 효과, 건물 간 상호작용

Keywords: Geographic information system, EnergyPlus, Urban-scaled simulation, Shading effect, Interactions between buildings

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2024 April, 18(2): 85-97
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20240008>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: December 27, 2023

Revised: March 2, 2024

Accepted: March 20, 2024

© 2024 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

탄소중립은 인류의 지속가능성을 위한 전 세계 공통 과제에 해당하고, 우리나라는 이를 위해 2020년부터 제로에너지건축 의무화의 범위를 점진적으로 확대하고 있다. 또한, 2021년 10월 우리나라 정부는 2030년 건물부문 온실가스 저감목표를 32.8%로 설정하였으며 (MOLIT, 2021), 이로 미루어 볼 때 도시 단위의 건물에너지 성능평가의 역할이 보다 중요해질 것으로 전망된다. 건물에너지 시뮬레이션은 물리 법칙에 기초하여 건물시스템의 동적 거

등을 모사한 것으로, 가상 실험을 통해 건물성능을 정량화 할 수 있다는 관점에서 가치가 높다(Augenbroe, 2012). 국내에서는 아직 개별 건물 단위의 시뮬레이션이 주를 이루고 있는 반면, 국외에서는 (a) 도시 규모 에너지 평가(Qomi et al., 2016; Hong et al., 2016; Oregi et al., 2018; Lu et al., 2019), (b) 미시기후, 열섬 현상 등 도시 환경 인자와 건물에너지 소비 간 상관 분석(Hong et al., 2013; Pisello et al., 2015; Lindberg et al., 2018; Katal et al., 2019), (c) 도시 단위 지역 냉방 최적화(Chow et al., 2004) 등의 문제에서 도시 단위 건물에너지 시뮬레이션이 널리 활용되고 있다. 환원하면, 도시 단위 및 개별 건물 단위 시뮬레이션의 차이는 건물 간 상호작용의 포함 여부에 비롯된다. 특히, 전자의 경우, 건물 성능인자(단열, 축열, 기밀, 일사 차단 등)와 더불어 성능 외적인자에 대한 영향을 포함시킬 수 있으므로 합리적인 결과를 얻을 수 있게 된다. 지리정보시스템(geographical information system, 이하 GIS)은 도시 단위 시뮬레이션의 주 입력정보에 해당하며, 이는 위치, 2차원 평면, 3차원 매스 등의 공간정보를 중심으로 하여 인구, 에너지, 교통 등 도시 속성정보가 결합된 데이터베이스에 해당한다. 이는 기계학습, 군집분석, 시뮬레이션 등 이종(異種) 기술과의 연계가 용이하던 장점을 가지고 있으며, 국내에서는 ① 인접건물 및 지형을 고려한 일사량(Kim, 2014) 및 신재생 발전량 예측(Moon, 2013; Jung et al., 2018; Oh, 2020), ② 건물에너지 참조모델 구축(Ahn et al., 2016), ③ 도시형태(Li et al., 2021) 및 공원계획(Kim et al., 2019)과 건물에너지 사용량의 상관분석 등 도시 빅데이터 분석 문제에서 주로 활용되어 왔다. 한편, 다른 건물, 공작물(工作物), 나무, 지형 등 주변 물체에 의한 음영 효과는 냉난방 부하와 관련된 건물성능 외적인자에 해당한다. 하지만, 건물에너지 평가에서 이에 대한 논의는 현재 이루어지고 있지 않으며, 이로 인해 건물 성능이 동일하더라도 입지 조건에 따라 과소 또는 과대 평가되는 경우가 존재하게 된다. 참고로, 음영 효과가 건물 냉난방 부하에 미치는 영향은 기후, 건물 형태, 외피 설계, 건물 부하특성, 건물 높이 및 면적에 따라 달라질 수 있으나, 기존 연구 결과를 참고하면 주변 물체를 고려하지 않을 경우 실내 온도에 대해서는 약 2°C (Simá et al., 2015), 건물 총 에너지 사용량에 대해서는 약 4% (Yu and Pan, 2018), 냉방 에너지 및 부하의 경우에는 10% 이상 (Lam, 2000; Chan, 2012; Ko and Huh, 2015; Ichinose et al., 2017; Hsieh et al., 2018; Javanroodi et al., 2018) 과다 평가될 수 있고, 난방 부하의 경우에는 20% 이상(Chan, 2012; Ichinose et al., 2017) 과소 평가될 수 있다고 알려져 있다. 하지만, 음영 효과의 중요성에 대한 논의는 상당 부분 이루어졌으나, 현재 연구들은 개별 건물 중심의 비교 실험에 한정하여 이루어지고 있으며, 다수 건물을 대상으로 하여 연구(예: 도시 및 건물유형별 음영 특성 및 에너지 정규화 방법에 대한 논의)는 아직 이루어지고 않고 있고 건물 에너지 제도에서 역시 반영되고 있지 않고 있다. 저자들은 (1) 국내 GIS 기반 건물 음영 시뮬레이션에 대한 지식 공유가 이루어지지 않은 점, 그리고 (2) 연구자들이 공유 자산으로써(shared knowledge asset) 활용 가능한 데이터베이스가 부재한 점이 주된 원인으로 작용한다고 판단한다. 이에 따라, 건물 음영 지표 개발의 기반 자료 구축을 위해 GIS와 EnergyPlus (Crowley et al., 2001)를 연계하고자 한다. EnergyPlus는 미국 에너지부에서 개발한 건물 에너지 시뮬레이션 도구로, 열평형법(heat balance equation)에 기반하여 건물 냉난방 부하가 이루어지며, 외피 및 공기 열평형 매니저

(surface & air heat balance manager), 전도 전달함수 계산 모듈(conduction transfer function calculation module), 천공 모델 모듈(sky model module), 음영 모듈(shading module) 등 동적 해석을 위한 계산 모듈을 내장하고 있다. 본 연구 주제와 관련된 것은 음영 모듈이며, 태양 위치 및 건물 기하학에 기반하여 외피 유입일사 및 외피 음영면적에 대한 계산을 수행한다. 본 연구에서는 행정안전부에서 배포 한 도로명주소 전자지도 데이터베이스(MOIS, 2023; 이하 행안부 GIS)를 GIS 원시 자료로 채택하였다. Figure 1 및 아래 ①-④는 전체 프로세스를 요약한 것이다.

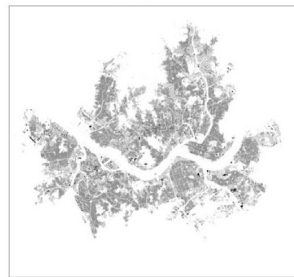
- ① GIS 분석: 좌표 변환에 필요한 측지 좌표계, 투영 좌표계 및 타원체 정보 확인
- ② 모델 생성 프로그램 작성: 행안부 GIS를 입력 받아 대상 및 인접 건물의 형상정보가 모두 반영된 EnergyPlus 모델 파일(IDF)을 자동 생성하는 IDF generator 작성
- ③ 모델링 및 시뮬레이션: 외피로의 유입일사 및 음영비율에 대한 데이터를 건물별로 수집하기 위해 EnergyPlus 모델링 및 시뮬레이션 수행
- ④ 건물 외피 음영/일사 데이터베이스 구축: 시뮬레이션 결과를 취합하여 건물 음영 지표 개발의 기반 데이터베이스 구성

② IDF generator

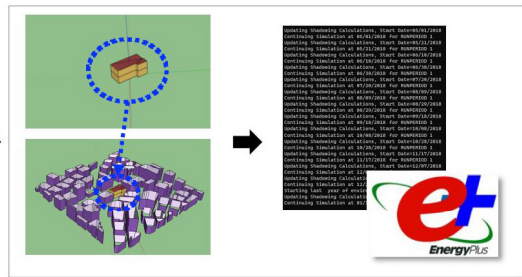


GIS preprocessing

- coordinate modification for fitting to EnergyPlus scheme
- polygon triangulation to avoid concave surface modeling
- buffer analysis to set shading area by building



① GIS analysis



③ EnergyPlus modeling & simulation

Building ID	Building Name	Building Type	Building Area (m²)	Building Volume (m³)	Building Height (m)	Building Orientation	Building Shading Area (m²)	Building Incident Solar Radiation (kWh/m²)
B001	Building A	Office	1000	10000	10	North	500	10000
B002	Building B	Residential	2000	20000	10	South	1000	20000
B003	Building C	Commercial	1500	15000	10	East	750	15000
B004	Building D	Industrial	3000	30000	10	West	1500	30000
B005	Building E	Public	1200	12000	10	South	600	12000
B006	Building F	Office	800	8000	10	North	400	8000
B007	Building G	Residential	1800	18000	10	East	900	18000
B008	Building H	Commercial	1400	14000	10	West	700	14000
B009	Building I	Industrial	2500	25000	10	South	1250	25000
B010	Building J	Public	1100	11000	10	North	550	11000

④ Database for shading & incident solar radiation of building surface

Figure 1. Process of urban-scaled EnergyPlus simulation for database supporting development of building shading indicator

행안부 GIS와 기상 데이터

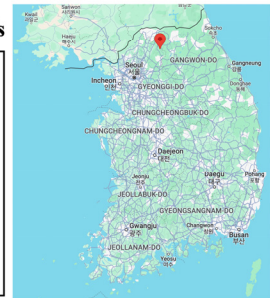
행안부 GIS는 ERSI사에서 제안한 shapefile(이하, SHP 파일)을 포맷으로 하고, 건물 2차원 폴리곤(geometry), 지상층수(GRO_FLO_CO), 주소구성요소(SIG_CD: 시군구코드, EMD_CD: 읍면동 코드, MNTY_YN: 산/대지 구분코드, LNBR_MNNM: 지번 본번, LNBR_SLNO: 지번 부번), 건물일련번호(BUL_MAN_NO), 건물용도코드(BDTYP_CD) 등 31개 열로 구성되어 있으며, 기본키는 SIG_CD 및 BUL_MAN_NO와 같다. 참고로, 경위도 좌표와 직교 좌표 간 변환을 위해서는 타원체 위치기준에 해당하는 측지 좌표계(geodetic coordinate reference system), 지구 형태를 근사시킨 타원체(ellipsoid), 구면 좌표에서 평면 좌표로의 변환 규칙을 정의한 투영 좌표계(projected coordinate system) 정보가 필요하며, 행안부 GIS의 적용 사항은 아래와 같다:

- 측지 좌표계: 지구 질량중심을 타원체 중심으로 하는 ITRF 2000 (Figure 2(a))이 적용되어 있다
- 타원체: 장축 반지름(적도 반지름)은 6,378.13 km, 단축 반지름은 6,356.752 km, 편평률은 1/298.257로 하는 GRS80이 적용되어 있다
- 투영 좌표계: 위도 38° 경도 127.5°를 기준 원점으로, 횡축 메르카토르 도법(transverse Mercator projection, Figure 2(b))을 투영법으로 하는 UTM-K가 적용되어 있다

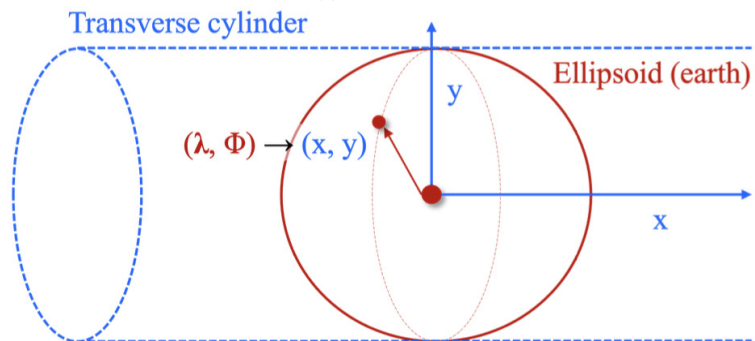
+proj=tmerc +lat_0=38 +lon_0=127.5 +k=1 +x_0=1000000

+y_0=2000000 +ellps=GRS80 +units=m +no_defs

- Ellipsoid: GRS80
- Origin: latitude 38°, longitude 127.5° (Gapyeong-gun, Gyeonggi-do)
- Reference coordinate : (1000000, 2000000)
- Unit: m (meter)



(a) ITRF 2000



(b) Transverse Mercator projection (λ & Φ : latitude & longitude)

Figure 2. Geographic information of the GIS of the Ministry of the Interior and Safety

행안부 GIS는 월별로 갱신되며(‘16-‘20년까지는 12월만, ‘21년은 10-12월, ‘22년부터는 전 월), 본 연구에서는 하나의 사례로써 ‘22년 12월 데이터를 채택하였다. 서울시의 16구 (Table 1, 총 359,287 건물)을 대상 지역으로 고려하였으며 시물레이션 기간(데이터베이스 기간)은 ‘18년-‘19년으로(24개월) 설정하였다. 참고로, 음영/일사 데이터 베이스는 지역 및 연도 별로 구축될 예정이며, 본 논문의 결과는 이에 대한 일부 결과임을 밝힌다. 향후, 이들 데이터 베이스를 활용하여 도시 형태 변화(GIS 데이터 시점), 기후 변화(기상데이터 시점) 및 지역과 도시 단위 음영 지표 간 상관성에 대한 분석을 수행할 예정이다. 상기 24개월 기간에 대해 미국 재생에너지연구소(NREL)의 태양 복사 데이터베이스(NREL, 2023; Figure 3)와 기상청의 지상 종관기상관측 데이터(ASOS)를 조합하여 EnergyPlus 시물레이션에서 활용될 기상파일(EPW 파일)을 작성하였다. 참고로, 음영 시물레이션을 정확히 수행하기 위해서는 직달 및 산란 일사 정보를 모두 확보할 필요가 있으나, 국내 ASOS에는 전 일사량 정보만 포함되어 있어, 부족한 정보를 보완하기 위해 NSRDB에서 제공하는 서울지역 직산분리 일사 데이터를 도입하였다. 기상 정보 관련해서, 향후 다음 사항에 대해 음영 지표의 비교 분석을 수행할 예정이다: (1) 특정 시점의 기상 데이터와 평년 기상데이터(TMY, TRY 등) 간 차이, (2) 직산 분리 알고리즘 간 차이.

- NSRDB: 수평 전 일사량, 직달 및 산란 일사량(단위: W/m^2)
- ASOS: 건구온도, 이슬점온도, 상대습도, 대기압, 풍향, 풍속, 운량, 적설량

Table 1. 16 districts of Seoul chosen in this study

District (sigungu code)	# of buildings	District (sigungu code)	# of buildings
Jongno-gu (11110)	24761	Mapo-gu (11440)	24275
Jung-gu (11140)	15101	Guro-gu (11530)	22486
Yongsan-gu (11170)	22197	Yeongdeungpo-gu (11560)	23375
Seongdong-gu (11200)	16763	Gwanak-gu (11620)	32486
Gwangjin-gu (11215)	25321	Seocho-gu (11650)	17957
Dongdaemun-gu (11230)	28234	Gangnam-gu (11680)	23635
Dobong-gu (11320)	9172	Songpa-gu (11710)	23471
Eunpyeong-gu (11380)	30579	Gangdong-gu (11740)	19474

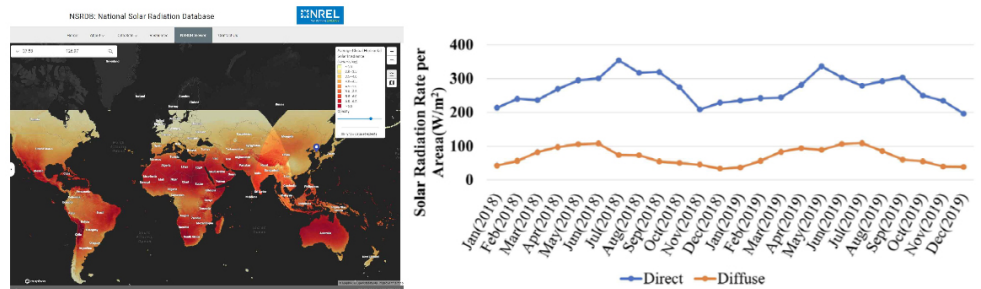


Figure 3. NSRDB web page (left) and solar radiation data used in this study (right)

EnergyPlus 모델 생성 프로그램(IDF generator)

프로그램 구성

IDF generator (Figure 4)는 Python 3.10 언어로 작성되었고, GIS 파일에 있는 건물 폴리곤 정보(2차원)를 EnergyPlus 좌표 체계에 맞춰 수정(좌표 이동 및 회전 방향 수정, 평면 볼록화 등)하고 인접건물을 탐색 후 음영 객체로 변환하여 대량의 EnergyPlus 모델을 자동으로 생성하는 것을 목적으로 한다. IDF generator 작성에 활용된 주요 라이브러리는 아래와 같다.

- GeoPandas: SHP 파일을 데이터베이스 형태로 호출
- Shapely: GIS 폴리곤 조작
- Pyproj: GIS 좌표계 조작
- Eppy: IDF 작성
- tripy: 평면 볼록화(ear-clipping 알고리즘 기반 평면 삼각분할)

```

from eppy.modeleditor import IDF
import pickle, os
from pyproj import Proj
from shapely.geometry import Polygon
from multiprocessing import Pool
from functools import partial
from geopandas import GeoDataFrame, GeoSeries, overlay
from tripy import earclip
import numpy as np

IDF.setidname('Energy+.idd')

def xy_to_lonlat(x, y, crs):
    myproj = Proj(crs)
    lonlat = myproj(x, y, inverse = True)
    return lonlat

def triangulate_within(polygon):
    poly = list(polygon.iloc[0].exterior.coords)
    tri = [Polygon(tr) for tr in earclip(poly) if Polygon(tr).area > 0.001]
    return tri

def find_adj_bldgs(polygons, poly, crs, buffer):
    boundary = GeoDataFrame(GeoSeries(poly.buffer(buffer, join_style = 2)), columns = ['geometry'])
    boundary.crs = crs
    adj_bldgs = overlay(boundary, polygons, how = 'intersection', keep_geom_type = True)
    return adj_bldgs

def polygon2pts(polygon, ccw):
    is_ccw = polygon.exterior.is_ccw
    points = list(zip(*polygon.exterior.coords.xy))

    if is_ccw != ccw:
        points.reverse()

    n_points = len(points) - 1
    return points, n_points

```

→ Loading IDF structure file (IDD)

→ Making the polygon convex based on triangulation method (ear-clipping algorithm)

→ Finding adjacent buildings based on buffer operation

→ Correcting polygon rotation

Figure 4. Written program to convert GIS to EnergyPlus model considering shading effect

모델 설정

다수의 시뮬레이션이 수반됨을 감안하여, 본 연구에서는 건물 외피 음영/일사 데이터베이스 구축에 필요한 정보 만을 반영하여 EnergyPlus 모델(버전: 9.0)을 구성하였고, 향후 타 연

구자들이 연구 목적에 맞춰 수정할 수 있도록 하였다. 조닝의 경우 층별 단일 존을 고려하였고, 외피의 경우 불투명 외부 외피(외벽, 지붕, 최하층 바닥)만을 고려하였으며, 행안부 GIS에는 개구부 관련 정보(창면적비 등)가 부재하여 창호는 배치하지 않았다. 그리고, 인체, 조명, 기기 등 내부 발열 모델링과 HVAC 모델링은 고려하지 않았다. 그리고, IDF 구조를 단순화하여 연구자들이 목적에 맞춰 커스터마이징 할 수 있도록 하였다. 이런 맥락에 따라, 외피 재료 관련해서, 각 재료의 속성 정보(열전도율, 밀도, 비열, 두께)를 상세히 입력하는 “Material” 클래스 대신 외피 열저항 정보만 입력하는 “Material:NoMass”(축열을 고려하지 않는 재료 모델링 방법) 클래스를 적용하였다. 건물 높이정보 관련해서, 행안부 GIS는 건물 높이정보를 포함하고 있지 않으며 지상 층수만을 포함하고 있다. 이런 이유로, 본 연구에서는 모든 층의 높이를 3.5 m로 가정하여 존 및 외피 높이 정보를 생성하였다. 마지막으로, 아래와 같이 외피 유입 일사 및 음영과 관련된 3개 변수가 월 단위(‘18년 1월, ..., ‘19년 12월)로 출력되도록 하였다.

- Surface Outside Face Sunlit Fraction(외피 면적 중 직달 일사가 도달하는 비율, 0-1)
- Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area(외피 유입 전 일사량, W/m^2)
- Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation Rate per Area (외피 유입 직달 일사량, W/m^2)

Ear-clipping 알고리즘(Eberly, 2008)을 활용한 오목 평면 처리

음영 계산 관련해서, EnergyPlus (9.0버전 기준)에서는 평면에 유입된 음영 중 중복부분을 처리하기 위해 convex Weiler-Atherton 알고리즘(Weiler and Atherton, 1977) 및 Sutherland-Hodgman 알고리즘(Sutherland and Hodgman, 1974)과 같은 폴리곤 절단기법(polygon clipping methods)이 활용된다. 단, 이들 알고리즘은 오목 폴리곤에 대해 부정확한 절단 결과가 도출될 수 있기 때문에, 외피의 오목 평면 모델링은 권장되지 않는다. 이런 이유로, GIS의 원본 폴리곤을 삼각 면들로 분할하는 과정을 적용하였다. Ear-clipping 알고리즘(Figure 5)은 대표적인 평면 삼각분할 방법으로, 평면을 오목하게 만드는 정점(ear)을 점진적으로 소거하는 방식으로 평면 분할이 진행된다. 좌표 회전방향이 반시계방향을 따른다고 가정하였을 때, 전체 프로세스는 다음과 같이 요약된다:

- 연속된 세 정점 $p(i-1)$, $p(i)$, $p(i+1)$ 에 의해 정의되는 두 벡터의 사잇각이 180° 이내라면, $p(i)$ 는 ear입(Figure 5의 적색 파선 참조)
- $p(i)$ 가 ear이면, $p(i)$ 는 탐색에서 제외(Figure 5의 ⊗)
- 모든 정점을 탐색하면, 삼각면을 외부에서 내려 보았을 때 정점들이 반시계방향으로 회전되도록 좌표 수정

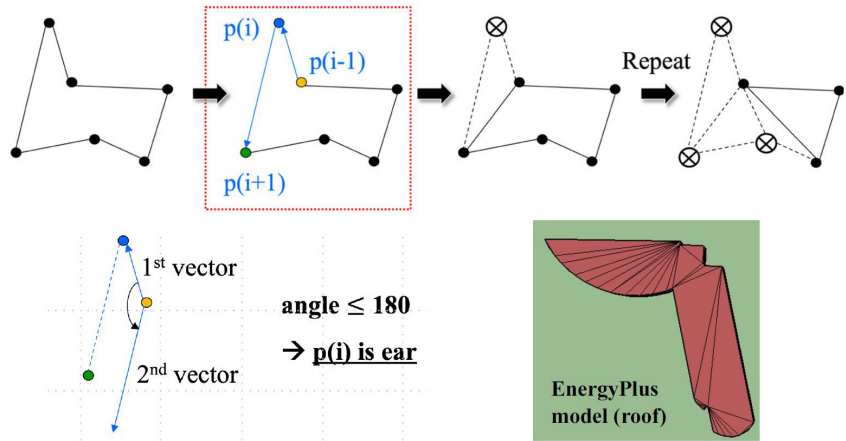


Figure 5. Polygon triangulation based on ear-clipping algorithm

GIS buffer 연산을 활용한 인접 건물 탐색

Buffer는 건물 경계를 일정 폭(이하, buffer 거리) 만큼 확장시키는 연산으로(Figure 6), 도시의 근접분석 문제에서 주로 활용된다. 인접 건물에 의한 음영 효과는 서로 마주보는 두 건물의 외피 간 거리에 따라 달라짐을 가정하면, buffer 연산 결과는 음영 영역으로 고려될 수 있다. 이런 맥락에 따라, buffer 거리는 사용자 입력정보로 적용하였고(기본값: 50 m), 건물별로 음영 영역을 계산하기 위해 shapely 라이브러리에서 제공하는 buffer 메소드를 활용하였다.

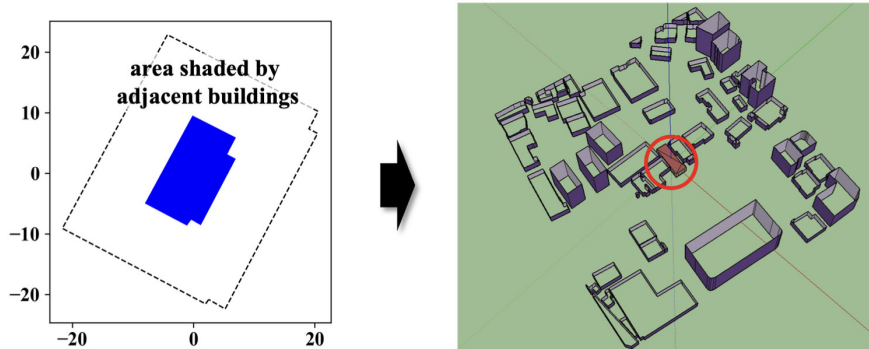


Figure 6. Setting shading area by building using buffer operation of GIS

인접 건물(음영 객체) 형상 모델링

인접 건물(Figure 6 우측 그림의 보라색 물체)은 중간 층 없이 1개 존으로 구성되어 있고, 건물 높이와 동일한 높이를 갖는 외벽만 배치되어 있다고 가정하였다. 외벽 좌표정보는 “Shading:Building: Detailed” 클래스의 정점 객체(예: Vertex 1 X-coordinate: 1번째 정점의 x축 좌표)로 반영된다. 외피 정점들은 외부에서 외피를 바라보았을 때 반시계 방향으로 회전되도록 계산되었다. Figure 7은 EnergyPlus 모델 내 인접 건물 형상정보를 조회한 예시에 해당한다.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		Shading0_0	Shading0_1	Shading0_2	Shading0_3	Shading0_4	Shading0_5
Transmittance Schedule Name							
Number of Vertices		4	4	4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	8.95229261E+03	8.95914261E+03	8.97473261E+03	8.98223261E+03	8.95862261E+03	8.94504261E+03
Vertex 1 Y-coordinate	m	2.09768165E+04	2.09838265E+04	2.09688265E+04	2.09765475E+04	2.09990065E+04	2.09835565E+04
Vertex 1 Z-coordinate	m	7	7	7	7	7	7
Vertex 2 X-coordinate	m	8.94504261E+03	8.95229261E+03	8.95914261E+03	8.97473261E+03	8.98223261E+03	8.95862261E+03
Vertex 2 Y-coordinate	m	2.09835565E+04	2.09768165E+04	2.09688265E+04	2.09765475E+04	2.09990065E+04	2.09835565E+04
Vertex 2 Z-coordinate	m	7	7	7	7	7	7
Vertex 3 X-coordinate	m	8.94504261E+03	8.95229261E+03	8.95914261E+03	8.97473261E+03	8.98223261E+03	8.95862261E+03
Vertex 3 Y-coordinate	m	2.09835565E+04	2.09768165E+04	2.09688265E+04	2.09765475E+04	2.09990065E+04	2.09835565E+04
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0
Vertex 4 X-coordinate	m	8.95229261E+03	8.95914261E+03	8.97473261E+03	8.98223261E+03	8.95862261E+03	8.94504261E+03
Vertex 4 Y-coordinate	m	2.09768165E+04	2.09838265E+04	2.09688265E+04	2.09765475E+04	2.09990065E+04	2.09835565E+04
Vertex 4 Z-coordinate	m	0	0	0	0	0	0
Vertex 5 X-coordinate	m	0	0	0	0	0	0

Figure 7. Shading objects (walls of adjacent buildings) in EnergyPlus model

IDF 생성 및 시뮬레이션 결과파일

GeoPandas 라이브러리 및 Python 표준 객체 직렬화 모듈(Pickle)을 이용하여 서울지역 SHP 파일을 구 단위(시군구 코드)로 분류하여 데이터베이스(GeoPandas DataFrame)로 변환 후 Python 3에서 읽기 가능한 이진 파일(binary file)로 내보냈다(예: “종로구” 이진 파일은 24,761 건물 정보를 포함). 그리고, 각 이진 파일을 입력 정보로 하여 각 건물에 대응되는 IDF를 구 단위로 생성하였고, 시뮬레이션 결과 파일 역시 동일 방식으로 저장하였다(Figure 8). IDF 및 결과 파일의 이름은 건물 및 용도의 식별을 고려하여 “BUL_MAN_NO”_“BDTYP_CD”로 지정하였다. 마지막으로, 결과 파일 중 CSV 파일로부터는 “외피별 3개 출력정보”를, HTML 파일로부터는 “외피별 외피면적 및 방위정보”를 추출하여 데이터베이스 구축에 활용하였다.

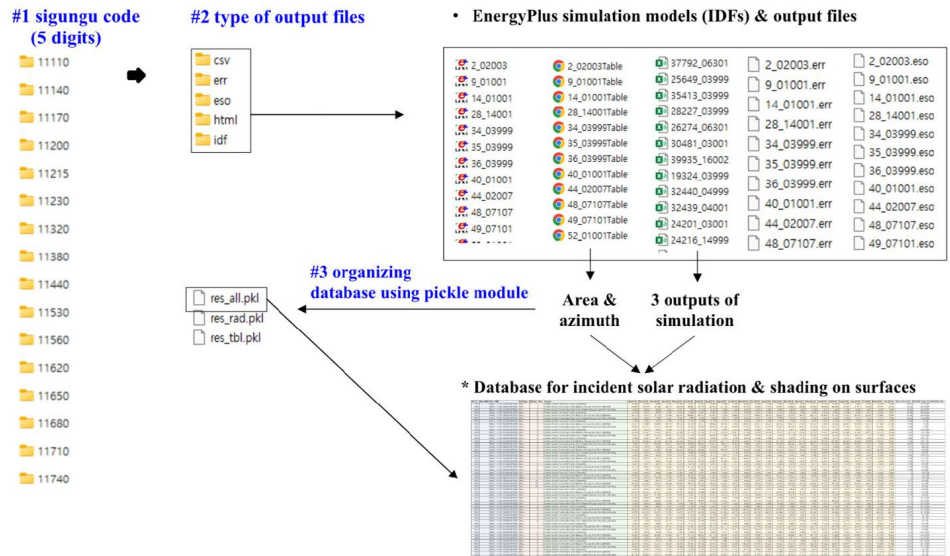


Figure 8. Hierarchy of simulation output files for development of building shading index

도시단위 건물 음영/일사 데이터베이스

건물 음영/일사 데이터베이스(Figure 9)는 건물식별정보, 외피식별정보, 시뮬레이션 출력 변수, 24개월 시뮬레이션 결과값, 외피 면적 및 방위정보로 구성하였다. 시뮬레이션 데이터

는 구 단위(즉, 데이터베이스 수는 16개)로 취합하였고, Pickle 모듈을 이용하여 이진 파일 형태로 내보냈다. 본 연구에서 구축한 건물 음영/일사 데이터베이스 열은 다음과 같다:

- 건물식별정보: SIG_CD(시군구 코드), BUL_MAN_NO(건물일련번호), PNU(19자리 필지코드)
- 외피식별정보: WallType(외피유형), WallIdx(외피 번호), Floor(층수)
- 시뮬레이션 출력변수: Surface Outside Face Sunlit Fraction, Surface Outside Face Incident Solar Radiation Rate per Area, Surface Outside Face Incident Beam Solar Radiation Rate per Area
- 24개월 시뮬레이션 결과값: Jan (2018), Feb (2018), ..., Dec (2019)
- 외피 면적 및 방위정보: Gross Area [m²](면적), Azimuth [deg](방위각), Cardinal Direction(방위표)

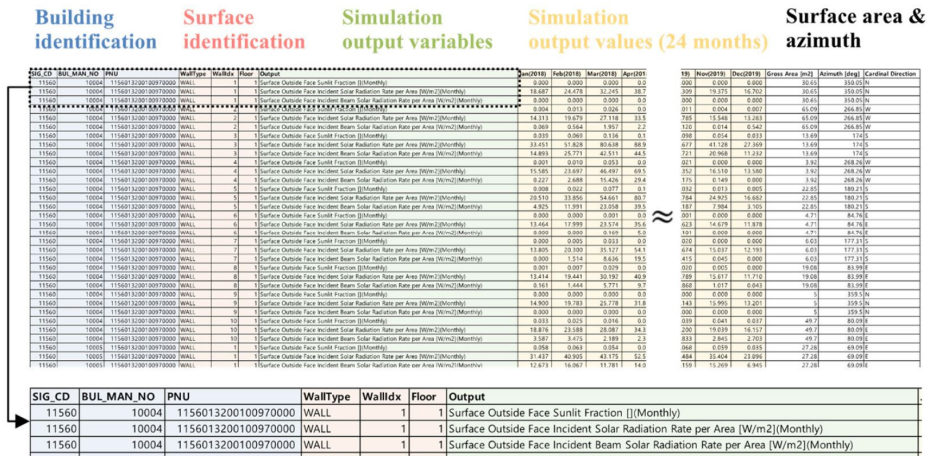


Figure 9. Organization of database for shading & incident solar radiation of building surfaces

Figure 10은 Figure 9의 건물 음영/일사 데이터베이스를 이용하여 2018년 7월 서울시 16개 구에 소재한 건물 379,287동에 대한 음영 효과를 도식화한 것이다. 본 사례에서는 시뮬레이션 출력변수 중 “Surface Outside Face Sunlit Fraction”을 활용하였고, 건물 단위 지표로

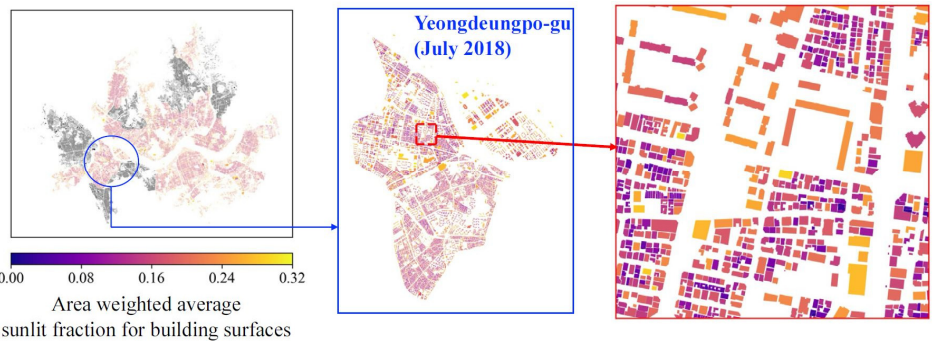


Figure 10. Area weighted average sunlit fraction for building surfaces (July 2018, black colored region: Unimplemented)

변환하기 위해 해당 변수에 대한 외벽 면적 기중평균을 건물별로 계산하였다. 계산 값은 클수록(Figure 10에서 노란색에 가까울 수록) 다른 외피에 의해 가려지는 정도가 낮아짐을 의미하며, Figure 10의 적색상자를 통해 동일 지역 내에서 건물들의 인접 수준에 따라 해당 값(음영 효과)이 달라짐을 알 수 있다.

위 사례연구에서는 음영/일사 데이터베이스의 활용 가능성을 논하기 위해 외벽에 대한 음영 지표(안)에 한하여 논하였으며, 향후 외피(외벽, 지붕) 간 비교 분석을 수행하여 향후 건물 단위 음영 지표의 도출 방향을 결정할 예정이다.

결론

외피에 유입되는 음영 및 일사량은 음영 지표 개발의 기반 정보에 해당하나, 현장 측정을 통해 이를 확보하는 것은 경제성 관점에서 어려운 것이 현실이다. 이를 극복하기 위해, GIS 기반 가상실험(도시 규모 EnergyPlus 시뮬레이션)을 도입하였고, 모델링 과정에서 수반되는 이중 정보(GIS vs. EnergyPlus) 간 변환 과정, 그리고 각 과정의 고려 사항에 대해 논하였다. 끝으로, 건물 음영/일사 데이터베이스를 활용하여 서울시 16개 구에 속한 건물들의 음영 효과를 분석한 사례를 소개하였고, 해당 데이터베이스에 건물 간 기하학적 상호작용을 적절히 반영되어 있음을 보였다. 본 연구는 음영 효과 관련하여 건물 에너지 연구분야의 공유 지식 자산 마련하기 위한 기초 설계 단계에 해당하며, 현재 다루지지 않은 (1) 도시 내 건물 집단(building block)의 형태 변화, (2) 기후 변화, (3) 동일 지역 내 지형 차이(등고면) 등을 반영하여 음영/일사 데이터베이스의 완성도를 높이고, (4) 건물 단위 음영지표와 에너지 사용량 간 상관 분석을 수행하여 연구 결과의 활용 가능성을 확보할 것이다. 그리고, 후속 연구를 통해 건축 분야의 디지털 트윈 관련해서 GIS의 부가가치를 발굴할 예정이다:

- GIS, BIM 및 건물에너지 시뮬레이션을 연계하여 건물에너지 리트로핏 의사결정 프레임워크 구축
- 인구, 소득수준, 교육열 등 도시 사회인자(social factor)가 반영된 건물에너지 평가체계 마련

후기

본 연구는 국토교통과학기술진흥원(No. RS-2023-00244769, 건물부문 탄소중립 가속화를 위한 건물에너지소비 데이터 통합관리 기반기술 개발) 및 한국산업기술진흥원(No. P0014268, 스마트 HVAC 실증지원(4/4))의 지원을 받아 수행 되었습니다.

References

1. Ahn, K.U., Kim, Y.M., Kim, Y.S., Yoon, S.H., Shin, H.S., Park, C.S. (2016). Development of a Profiling System for Energy Performance Assessment of Existing Buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 32(12), 77-87.

2. Chan, A.L.S. (2012). Effect of adjacent shading on the thermal performance of residential buildings in a subtropical region. *Applied Energy*, 92, 516-522.
3. Chow, T.T., Chan, A.L., Song, C.L. (2004). Building-mix optimization in district cooling system implementation. *Applied Energy*, 77(1), 1-13.
4. Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witter, M.J., Glazer, J. (2001). EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and buildings*, 33(4), 319-331.
5. Hong, T., Chang, W.K., Lin, H.W. (2013). A fresh look at weather impact on peak electricity demand and energy use of buildings using 30-year actual weather data. *Applied Energy*, 111, 333-350.
6. Hong, T., Chen, Y., Lee, S.H., Piette, M.A. (2016). CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency. *Urban Computing*, 14.
7. Hsieh, C.M., Li, J.J., Zhang, L., Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, 159, 382-397.
8. Ichinose, T., Lei, L., Lin, Y. (2017). Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China. *Energy and Buildings*, 136, 199-210.
9. Javanroodi, K., Mahdavinejad, M., Nik, V.M. (2018). Impacts of urban morphology on reducing cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate. *Applied Energy*, 231, 714-746.
10. Jung, M.S., Moon, C.J., Chang, Y.H., Kim, Y.G., Lee, S.H. (2018). A Study on Design of Optimal Location for Renewable Energy Facility Using GIS. *The Journal of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, 13(2), 357-368.
11. Katal, A., Mortezaadeh, M., Wang, L.L. (2019). Modeling building resilience against extreme weather by integrated CityFFD and CityBEM simulations. *Applied Energy*, 250, 1402-1417.
12. Kim, E.J. (2014). Development of a solar insolation calculation module in urban context using the sunlit fraction and sky-view factor. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 30(7), 229-236.
13. Kim, K., Yi, C., Lee, S. (2019). Impact of urban characteristics on cooling energy consumption before and after construction of an urban park: The case of Gyeongui line forest in Seoul. *Energy and Buildings*, 191, 42-51.
14. Ko, J.H., Huh, J.H. (2015). Analysis of Cooling and Heating Loads considering the Impact of Solar Shading by Adjacent Buildings in Density Cities. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 31(7), 57-64.
15. Lam, J.C. (2000). Shading effects due to nearby buildings and energy implications. *Energy Conversion and Management*, 41(7), 647-659.
16. Lindberg, F., Grimmond, C.S.B., Gabey, A., Huang, B., Kent, C.W., Sun, T., Theeuwes, N.E., Järvi, L., Ward, H.C., Capel-Timms, I., Chang, Y., Jonsson, P., Krave, N., Liu, D., Meyer, D., Olofson, K.F.G., Tan, J., Wästberg, D., Xue, L., Zhang, Z. (2018). Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP): An integrated tool for city-based climate services. *Environmental Modelling & Software*, 99, 70-87.

17. Lu, X., Hinkelman, K., Fu, Y., Wang, J., Zuo, W., Zhang, Q., Saad, W. (2019). An open source modeling framework for interdependent energy-transportation-communication infrastructure in smart and connected communities. *IEEE Access*, 7, 55458-55476.
18. Oregi, X., Hermoso, N., Prieto, I., Izgara, J.L., Mabe, L., Sismanidis, P. (2018). Automatised and georeferenced energy assessment of an Antwerp district based on cadastral data. *Energy and Buildings*, 173, 176-194.
19. Pisello, A.L., Pignatta, G., Castaldo, V.L., Cotana, F. (2015). The impact of local microclimate boundary conditions on building energy performance. *Sustainability*, 7(7), 9207-9230.
20. Qomi, M.J., Noshadravan, A., Sobstyl, J.M., Toole, J., Ferreira, J., Pellenq, R.J.M., Ulm, F., Gonzalez, M.C. (2016). Data analytics for simplifying thermal efficiency planning in cities. *Journal of the Royal Society Interface*, 13(117), 20150971.
21. Simá, E., Chagolla-Aranda, M.A., Huelsz, G., Tovar, R., Alvarez, G. (2015, 12). Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. *Building Simulation*, 8(6), 711-723.
22. Sutherland, I.E., Hodgman, G.W. (1974). Reentrant polygon clipping. *Communications of the ACM*, 17(1), 32-42.
23. Weiler, K., Atherton, P. (1977). Hidden surface removal using polygon area sorting. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 11(2), 214-222.
24. Li, N., Yi, D.H., Bansal, P. Quan, S.J. (2021). Urban Form Typology and Building Energy Use: Empirical Investigation in Seoul. *Proceedings of the CUE 2021-Applied Energy Symposium 2021: Low carbon cities and urban energy systems*, Matsue, Japan/Virtual, Sept. 4-8, 2021.
25. Yu, C., Pan, W. (2018). Effects of shading on the energy consumption of high-rise office buildings in Hong Kong. In *2018 Building Performance Analysis Conference and SimBuild*. ASHRAE.
26. Eberly, D. (2008). Triangulation by ear clipping. *Geometric Tools*, 2002-2005.
27. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2021). 2050 Carbon Neutrality Roadmaps, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
28. Augenbroe, G. (2012). The role of simulation in performance based building. In *Building Performance Simulation for Design and Operation*. London: Routledge, 39-60.
29. Moon, S.J. (2013). The Study on Supervised Classification about Satellite Imagery for the Mapping of Wind Resource, Master's Thesis, Jeju National University.
30. Oh, M.C. (2020). Development of GIS based PV Power Calculation Algorithm Considering Building Roofs and Facades using High-resolution Urban Spatial Data, Doctoral Thesis, Seoul National University.
31. Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (2023). Address-Based Industry Support Service. Available at: <https://business.juso.go.kr> [Accessed on December 26, 2023].
32. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023). NSRDB: National Solar Radiation Database. Available at: <https://nsrdb.nrel.gov> [Accessed on December 26, 2023].