

BIM기반의 공동주택 주동 유형별 건물에너지 시뮬레이션 비교에 관한 연구

A Comparative Study of Building Energy Simulations for Building Types in Multiple Stock Housing based on BIM(Building Information Modeling)

이 병 호* 이 건 원** 여 영 호***
Lee, Byeongho Lee, Geonwon Yeo, Youngho

Abstract

The energy efficient design of the multiple stock housing is very important not only to save energy but also to increase sustainability in a whole city because the multiple stock housing type is dominated in the major residential supply markets in Korea. During the early design phase of the multiple stock housing type, the architect need convenient and accurate tools for evaluating energy consumptions based on building types rapidly.

Building Information Modeling(BIM) is introduced as useful tool systems providing interoperability between 3rd dimensional modeling tools and environmental engineering analysis tools, and could reduce time and cost for unnecessary modeling works in the analysis. However, it is still hard to apply to building design practice and integrated energy simulation techniques because interoperability using industrial standard file formats such as IFC and gbXML is still underdeveloped.

Therefore, the purpose of this study is to perform the building energy simulations, to compare the results on typical building types in multiple stock housing based on BIM, and to clear the problems using industrial standard file formats between 3rd dimensional modeling and building energy simulation software. In addition, through comparisons with simulation results according to the typical building types such as building forms, orientations, and building stories, the interrelation ship and characteristics of BIM based building energy simulation software are analysed and evaluated.

키워드 : 건물정보모델링, 주동형태, 건물에너지 시뮬레이션, 정보호환성

Keywords : Building Information Modeling, Building Type, Building Energy Simulation, Interoperability

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

지속가능한 성장을 위한 여러 노력 가운데 화석에너지의 사용 절감과 이에 따른 이산화탄소 배출절감 및 대기오염물질 배출절감은 지구온난화 방지 및 건강하고 쾌적한 거주환경을 유지하는데 가장 일차적인 부분이라 할 수 있다. 국내 에너지 사용량 중 건물부문 에너지 사용량은 서울과 같은 대도시의 경우 전체 에너지 소비의 55% 정도로서 그 중 주거부문의 사용량은 2005년 기준 64% 내외로 보고되고 있다.(정창현 외 4인, 2009) 현재 공동주택의 공급이 전체 주거부문의 대다수를 차지하고 있으며 소비자의 선호도가 매우 높은 현실을 감안할 때 설계단

계에서의 공동주택의 에너지 소비량에 대한 예측과 절감방안에 대한 연구는 에너지 절약 뿐 아니라 도시의 지속가능성을 높이기 위한 기초적 연구라 할 수 있다.

지금까지 공동주택에 대한 건물에너지 소비에 대한 연구는 사례조사를 통하여 실제 소비한 연료량을 조사하는 방법과 건물에너지 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 소비량을 분석하는 방법이 주로 사용되고 있다. 전자는 기존 공동주택단지의 에너지공급유형, 사용자의 주거생활패턴과 유지관리조건 등에 따라 편차가 심하며 조사내용에 따라 단지내 주동들의 형태와 건물향, 배치조건 등이 갖는 특이성을 반영하기가 매우 힘들다. 특히, 판상형 형태의 주동형태유형이 지배적이었던 기존 단지의 사례조사 결과를 타워형 등 새로운 주동형태유형에 적용하기 힘든 경우가 많다. 후자의 경우도 지금까지 실무적으로 쓰이고 있는 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들의 대다수가 건축설계에서 쓰이고 있는 CAD 모델링 데이터와의 호환이 이루어 지지 않기 때문에 건물에너지 시뮬레이션 분석시 중복적인 모델링 작업을 위해 많은 시간과 비용이 지출

* 주식회사 서울건축부설 하이테크설계연구소장, 건축학박사
(leebbh@yahoo.com)

** 주식회사 서울건축부설 하이테크설계연구소 연구원, 박사수료
(since1968@live.com)

*** 교신저자, 고려대학교 건축학과 교수 (yhyeo@korea.ac.kr)

되고 있다. 특히 다양한 주동형태 디자인과 단위주호 평면구성이 결정되는 초기설계단계에서의 활용은 이러한 시간 및 비용 때문에 실무적으로 활용되지 못하고 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 3차원 건축설계 모델링정보와 환경 분석 등 외부 프로그램 간의 정보호환성(Interoperability) 제공 및 건물생애주기 전반에 걸친 다양한 활용을 위해 도입된 Building Information Modeling(이하 BIM) 설계환경이 아직까지 국내에서 구조물 시공성 검증 또는 비정형 건물 디자인 등 제한적인 분야에서 주로 사용되고 있었으나 최근 들어 토지주택공사 등을 통해 공동주택의 설계 분야에도 시범적으로 적용되고 있으며 BIM기반의 정보호환성에 입각한 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들의 신제품 또는 버전업의 등장이 활발하게 전개되고 있다.

따라서 본 연구는 건축설계 실무적으로 쓰이고 있는 BIM 모델링 소프트웨어와 정보호환 형식이 다른 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들을 사용하여 공동주택 대표적 주동유형에 대해 건물에너지 시뮬레이션 분석을 실시하여 다음 두가지 결과를 분석하는 것을 목적으로 하였다. 첫 번째로 BIM기반 작업수행 과정시 정보호환 형식과 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들의 특성에 따른 모델링 방법 및 정보호환성, 시뮬레이션 조건설정에 따른 편의성 등 활용상의 문제점을 분석하였다. 두 번째로 판상형과 탑상형으로 대표되는 공동주택 주동 유형의 시뮬레이션 결과비교를 통하여 시뮬레이션 프로그램간의 상관성 및 향별, 층별 유형에 따른 건물에너지 소비량 특성을 분석하였다.¹⁾

1.2 연구범위 및 방법

본 연구의 범위는 공동주택의 다양한 주동유형중 현재 많이 계획되고 있으며 대표적인 주동유형인 판상형의 4주호 유형과 탑상형 'Y'자형의 4주호 유형을 연구의 대상으로 선정하였다. 또한 단위주동의 단지 배치계획을 고려하여 향별, 층수별로 다양화했는데, 동향, 남동향, 남향, 남서향, 서향으로 향에 따라 5가지로 구분을 했으며, 층수별로는 6층, 12층, 18층의 3가지로 구분을 함으로써 모두 30가지로 주동 유형을 분류하였다.

연구의 방법으로는 첫 번째 단계로, 공동주택 건물에너지 시뮬레이션 관련 및 BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 분석기법 관련 선행연구 분석과 BIM기반 모델링 프로그램 및 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램의 조사 및 검토를 통해서 공동주택 주동 모델링과 건물에너지 시뮬레이션에 적합한 프로그램들을 선정하였다.

두 번째로, 각 주동 유형별 건물 에너지 시뮬레이션의 수행에 앞서 관련 문헌 및 기준을 검토하여 최대한 동일 조건의 모델링기준 및 건물에너지 시뮬레이션 가정조건, 각 프로그램별 세부 기준들을 설정하였다.

세 번째로, 앞서 설정한 30가지 공동주택 주동 유형에 대해 선정된 모델링 프로그램으로 모델링한 후, 호환파일 형식변환을 통해 export한 후, 각각의 BIM지원 에너지 시뮬레이션 프로그램에 import하여 에너지 소비량 분석을 수행하였다. 이 시뮬레이션 결과들을 분석함으로써 각 결과들이 갖는 상관관계 및 의미를 분석할 수 있었으며, 또한 각 에너지 시뮬레이션 프로그램별의 특징을 정리하였다. 이외에 BIM기반 에너지 시뮬레이션 작업수행시 모델링 부분과 시뮬레이션 부분으로 구별하여 각 분석항목별 호환성 및 편의성에 대해 간략히 평가하였다.

선행연구 분석을 통해 선정된 모델링 프로그램은 ArchiCAD v13.0이며 BIM지원 에너지 시뮬레이션 프로그램 중 호환파일 형식에 따라 대표적인 것으로 Add-on 기반의 Eco Designer v13.0, gbXML 호환파일기반의 Design Builder v.2.0, IFC 호환파일기반의 Riuska v.6.0 이 선정되었으며 유형별 시뮬레이션 결과비교를 위하여 공동주택 건물에너지효율등급제에서 사용되고 있는 웹기반 에너지성능평가프로그램에 대해서도 동일 조건하에서 분석을 수행하여 결과비교에 사용하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 공동주택 건물에너지 시뮬레이션 관련 선행연구

BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 기법이 최근들어 도입되기는 했으나 아직 공동주택 분야에서 많이 쓰이고 있지 못하고 있다. 기존의 연구들은 국내에서 사용이 일반화되어있으나 BIM을 지원하지 않는 건물에너지 시뮬레이션 소프트웨어²⁾들을 주로 활용하여 아래 4가지 범주의 연구가 많이 수행되었다.

첫 번째로 공동주택 내부 Activity의 단순성과 유사한 내부평면 및 층고, 자연환기 및 저온수 바닥복사 난방시스템이라는 동일한 조건하에서 발코니의 확장 및 이중창호 설치여부, 창면적, 단열재의 두께변화 등의 단위세대 외피설계요소와 에너지 소비량 관련 연구가 많이 수행되었다. 정창현 외 3인(2009), 김시현 외 4인(2008), 안영섭 외 3인(2007) 등이 대표적이다.

두 번째로 공동주택 에너지 성능평가에 대한 기준을 설정하기 위하여 '표준주택'이라는 개념을 설정하고 이를 산출하기위한 프로그램의 개발 및 적용에 관한 일련의 연구가 한국건설기술연구원에 의해 수행되었으며 이를 통하여 에너지관리공단 웹사이트에서 '에너지 효율등급 평가 프로그램'이 개발 완료되었고 건축물 에너지효율등

1) 건물에너지 소비량 특성 분석시 같은 모델링 유형에 대해 시뮬레이션 프로그램별 결과값 차이 원인분석이 아닌 모델링 유형변화에 따른 결과값의 패턴적 변화에 대한 정성적 비교를 의미함. 시뮬레이션 프로그램별 결과값은 기후데이터의 차이, 모델링 변환시 외피조건에 대한 미세한 변경, 외피조건 및 실내조건설정과 HVAC시스템 적용 알고리즘의 차이, 에너지 시뮬레이션 계산엔진의 열해석 알고리즘 차이 등 다양한 이유로 차이가 발생하며 이재혁 외 2인(2009)의 연구에 따르면 ESP-r의 경우, 난방에너지 계산결과가 TRNSYS의 70~80% 수준이라고 함.

2) 국내 공동주택연구에 많이 쓰이는 건물에너지 시뮬레이션 프로그램은 DOE-2 기반 시리즈, EnergyPlus, TRNSYS, ESP-r 등이 선호되고 있다. 유기형 외 2인(2006), 이재혁 외 2인(2009), 김민환 외 3인(2008), 정창현 외 3인(2009), 최원기 외 2인(2007), 유호선 외 4인(2004), 황선취 외 2인(2008), 장원준 외 3인(2009).

급 인증제에 공식적으로 쓰이고 있다. 관련 논문으로는 유기형 외 2인(2006), 안병립 외 3인(2009), 송승영 외 2인(2009) 등이 대표적이다.

세 번째로 국내 공동주택의 계획경향이 동일 단위세대 평면이 코어를 중심으로 대칭되게 배치되는 경우가 많아 열적 조건이 동일한 대표적 단위세대에 대한 시뮬레이션 결과를 건물 1개동 전체로 해석할 때, 고려되어야 하는 조건에 대한 연구가 수행되었다. 윤성환 외2인(2009), 유호선 외 4인(2004), 최원기 외2인(2007) 등이 대표적이다.

네 번째로 BIM을 지원하지 않는 시뮬레이션의 경우, 건물모델링이 분석시간보다 많은 작업량을 요구하기 때문에 자연스럽게 모델링의 간략화에 대한 연구가 김민환 외 3인(2008), 유호선 외 3인(2007), 권한술 외 4인(2008)에 의해 수행되었으며 건물모델링 간략화 수준에 따라 아래 그림 1과 같이 단위동법, 단위세대법(세대내 간벽없음), 단위세대법(세대내 간벽있음)으로 구별된다.

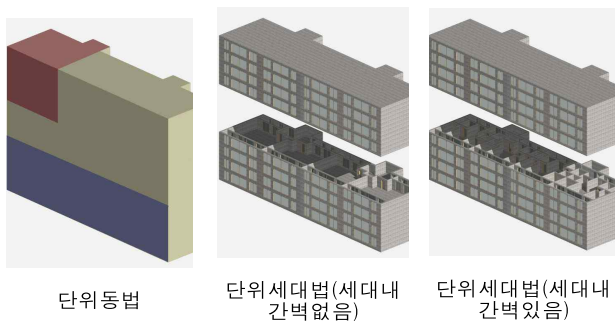


그림 1. 공동주택 시뮬레이션 모델링의 간략화 수준모형

단위동법의 경우, 유호선 외 3인(2007)의 연구에 따르면 단위세대법과의 오차가 1%미만이라고 하였으나 김민환 외 3인(2008)의 연구에 따르면 세대내 간벽이 없는 경우 내벽의 체적 감소에 따른 축열작용 감소로 냉·난방부하가 크게 차이나는 결과를 보이고 있어 건축계획과 일치하는 모델링이 정확한 결과를 나타낸다고 볼 수 있다.

상기 선행연구들을 종합적으로 분석해 볼 때, 유사한 평면이 반복적으로 계획되고 실내 Activity와 설비시스템의 동일하다는 공동주택의 특성상 정확한 모델링 정보를 제공하면서도 모델링 시간을 획기적으로 줄여줄 수 있는 BIM 기반 시뮬레이션 프로그램의 적극적 활용과 이를 이용한 분석기법의 개발은 시간과 경제적 타당성뿐만 아니라 건물에너지 소비량 분석의 정확도가 향상되는 이점이 있다고 할 수 있다.

2.2 BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 분석기법 관련 선행연구

BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 분석을 수행하기 위해서는 BIM 모델링 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 건물에 대한 모델링 작업 후 모델링 프로그램에서 시뮬레이션 프로그램이 인식가능한 호환파일 형식으로 변환하는 과정이 필요하고, 호환파일을 건물에너지 시뮬레이션 프로그램에서 불러들인 후 시뮬레이션 프로그램에서의

조건 설정작업을 거쳐 시뮬레이션을 수행하는 단계를 거치게 된다.

이러한 점에서 관련 선행연구는 크게 세 가지로 구분이 가능한데, 먼저 BIM 프로그램 간의 모델링 성능을 비교하는 연구들이 있다. 장원준 외3인(2009)은 BIM기반 에너지 시뮬레이션 프로그램들을 소개한 후 지속가능한 건축을 위한 건축설계 프로세스를 제안하였다.

두 번째로, BIM 프로그램에서 에너지 시뮬레이션 프로그램들이 인식가능한 파일 형식인 IFC(Industry Foundation Classes, 이하IFC)³⁾나 gbXML(Green Building XML schema, 이하 gbXML)⁴⁾ 등으로의 변환가능성 및 변환시 발생하는 문제점에 대해서 비교·검토한 연구들이 있다. 김지원·옥중호(2009)는 대표적인 BIM 프로그램인 ArchiCAD와 Revit을 이용한 모델링이 IFC형식으로 변환되었을 경우의 모델링 소실치와 관련 문제점을 비교·검토하였고 황선휘 외2인(2008)은 기존 BIM기반 설계지원 도구를 검토한 후 저에너지 설계지원도구인 LEB-CAD 및 LEB-CAD DB의 필요성에 관한 연구를 수행하였다.

세 번째로는 변환된 파일형식이 에너지 시뮬레이션 프로그램에서 불러들였을 경우 발생하는 문제점 및 에너지 시뮬레이션 프로그램별 분석과정·결과 상의 문제점과 차이점을 검토하는 연구로 문현준 외3인(2009)은 BIM기반 설계지원 프로그램 및 에너지 시뮬레이션 프로그램에 대해서 비교한 뒤 케이스 분석을 통해 각 연동방법 및 호환상의 문제점을 분석한 후, 문제점 해결을 위한 웹기반 성능분석 인터페이스의 구축 결과를 제시하고 있다. 이러한 연구는 본 연구의 첫 번째 목적과 유사하나 공동주택을 대상으로 한 연구는 아직 없으며 BIM기반 시뮬레이션 적용시 편의성 등을 단계별, 항목별로 평가하고 있는 않다는 점에서 본 연구와 차별성을 보인다.

2.3 BIM 모델링 프로그램과 건물에너지 시뮬레이션 프로그램 조사 및 선정

전술한 선행연구들에 대한 고찰을 통해서 BIM 모델링 프로그램과 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들을 조사하였다. 먼저 BIM 모델링 프로그램으로는 Graphissoft사의 ArchiCAD, AutoDesk사의 Revit Architecture, Bentley사의 (Microstation) Bentley Triforma, Ghery Partners사의 Digital Project 등 매우 다양한 프로그램들이 존재하나 국내 설계사무소에서는 ArchiCAD와 Revit Architecture가 주로 사용되고 있다.⁵⁾ 일단 국내사용이 많은 ArchiCAD와 Revit의 특징 및 간략한 장단점을 표 1과 같이 정리하였고, 이 프로그램들 중 본 연구에서는 공동

3) 건설분야의 특성정보를 국제적인 표준정보교환체계로 변환하기 위해 IAI(International Alliance for Interoperability)에 의해 개발된 파일 호환 형식, 김지원·옥중호(2009)

4) Green Building XML schema는 BIM에 의해 작성된 건물속성을 공학분석도구에 전달하기 위해 개발된 파일호환 형식이며 Autodesk 등 BIM 공급회사가 지원하는 dba gbXML.org의 규약으로 진행되고 있다.

5) Sketch-up과 연동하여 EnergyPlus 시뮬레이션을 수행할 수 있는 프로그램도 있으나 SketchUp은 3차원 모델링은 가능하나 일반적으로 객체지향의 BIM 소프트웨어에 해당하지 않기 때문에 제외하였다.

표 1. 대표적인 BIM 모델링 프로그램의 개요 및 호환파일 지원 비교

| | ArchiCAD | Revit Architecture |
|-------------------------|--|--|
| 개발회사 | Graphisoft (헝가리) | Autodesk (미국) |
| 개발년도 | 1982 | 2000 |
| 최신버전 | ArchiCAD 13.0 (2009) | Revit Architecture 2010 |
| 개요 | <ul style="list-style-type: none"> ·GDL로 작성된 라이브러리 기반 모델링 ·Layer 기능으로 객체의 구별과 2D와 3D 작업 환경의 유기적인 연동이 상대적으로 쉬움. ·모델링이 상대적으로 용이하나 새로운 객체생성 및 고급기능 사용시 GDL프로그래밍 언어를 사용해야 함. ·파일용량이 작아 작업대기시간이 짧음. | <ul style="list-style-type: none"> ·파라메트릭 기법(패밀리)기반의 모델링 ·각 뷰간의 양방향 호환성이 보장 ·설계도 변경시 효율적임. ·요소간 간섭점검기능 보유 ·파일용량이 상대적으로 커서 일반적으로 작업대기시간 김. |
| 에너지시뮬레이션 프로그램과의 호환파일 지원 | <ul style="list-style-type: none"> ·IFC 2x3 호환파일 형식 export가능 ·gbXML 파일로의 변환시 추가 Add-on 프로그램 (Encina)의 설치가 필요 ·EcoDesigner라는 Add-on 프로그램을 통하여 자체적인 건물에너지 시뮬레이션 수행이 가능 | <ul style="list-style-type: none"> ·IFC 2x3 호환파일 형식 export가능 ·gbXML 호환파일 형식 export가능 |

*출처: 문현준 외3인(2009), 각 프로그램 제작사 제공 자료 및 저자에 의한 평가 종합

주택 모델링 작업에 비교적 용이하고 현재 Add-on 프로그램으로 건물에너지 시뮬레이션 분석을 수행할 수 있는 ArchiCAD v.13.0을 모델링 프로그램으로 선정하였다.

표 2. 주요 BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 프로그램

| 구분 | 특징 | 가능호환 파일형식 |
|-----------------------|---|------------------------------|
| IES/VE | <ul style="list-style-type: none"> ·분석모듈의 조합에 따라 Lighting, Solar, Thermal, CFD, HVAC 등의 분석이 가능 ·모듈마다 매우 전문적인 지식이 요구됨. | gbXML |
| Ecotect | <ul style="list-style-type: none"> ·일영 분석, 주광을 분석, 음환경 분석, 외피 태양복사에너지 분석 등으로 활용가능 ·인터페이스가 뛰어나나 건물에너지 분석을 위한 설정이 자체적으로 제공되지 않음 | gbXML IFC(제한적임) |
| Green Building Studio | <ul style="list-style-type: none"> ·Revit Architecture와 연동되는 에너지시뮬레이션 프로그램으로 온라인 서비스로 제공 ·Add-On을 통해 export된 gbXML파일을 업로드하면 분석결과가 온라인으로 제공되거나 정밀도가 떨어지고 옵션이 충분치 않음 | Add-on, gbXML, On-line |
| Eco Designer | <ul style="list-style-type: none"> ·ArchiCAD와 연동되는 에너지 시뮬레이션 프로그램으로 Struoft사의 VIP-Core 시뮬레이션 엔진기반임. ·초기설계단계에 최적화되어 있어 비교적 다루기 쉬움 | Add-on 프로그램 |
| Design Builder | <ul style="list-style-type: none"> ·EnergyPlus를 기반으로 그래픽 인터페이스 구성이 편리하게 되어있으며 초기설계단계와 실시설계 단계에 따라 설정치를 조절할 수 있으며 설정옵션을 사용자가 쉽게 변경할 수 있다. CFD 분석이 가능 ·복잡한 형상의 경우 gbXML import시 누락되거나 잘 못 인식되는 경우가 있음 | gbXML |
| Riuska | <ul style="list-style-type: none"> ·DOE-2.1E 기반의 IFC파일을 완전히 지원하는 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램 ·복잡한 형상의 경우에도 비교적 잘 import가 됨. 국내 사용자가 많지 않음. | IFC |

*출처: Eddy Krygiel · Bradley Nies(2008), 문현준 외3인(2009), 각 프로그램 제작사 제공 자료 및 저자에 의한 평가 종합

BIM에 기반한 건물에너지 시뮬레이션 프로그램으로 대표적인 것들로는 IES/VE, Ecotect, Green Building Studio, EcoDesigner, DesignBuilder, Riuska 등이 국내에 도입되어 사용되고 있다. 상기 프로그램들의 특징과 모델링 프로그램과의 호환파일 형식은 표 2와 같다.

본 연구에서는 Add-on 용 프로그램과 gbXML 파일 호환 형식 및 IFC 파일호환 형식에 기반한 대표적인 시뮬레이션 프로그램으로써 국내 공동주택에 대한 시뮬레이션 기준설정이 용이하며 초기설계단계 위주로 개발된 EcoDesigner, DesignBuilder, Riuska를 선정하였다. 추가로 BIM기반은 아니나 국내 공동주택의 건물에너지 시뮬레이션 프로그램으로써 공식적으로 사용되고 있는 웹기반 에너지성능평가프로그램과의 결과비교를 통하여 각 BIM기반 시뮬레이션 프로그램들 간의 상관성과 주동 유형별 에너지 소비량 결과 패턴을 정성적으로 비교하였다.

3. 대표적 주동 유형설정 및 시뮬레이션의 조건설정

3.1 대표적 주동 유형설정

1) 주동 모델링 기본 가정 조건

주동의 유형은 국내에서 많이 계획되고 있는 판상형과 탑상형으로 모두 단위세대당 전용면적 84~85㎡인 국민주택규모 중 판상형의 경우 4호 조합을 초과하거나 장변길이가 60m 이상인 경우 서울시 공동주택심의에서 불가하다는 점을 고려하여, 4호 조합, 장변길이 46.67m로 구성하였다. 탑상형의 경우 김지영 외 2인(2008)의 연구결과에 의하면 탑상형 주동의 형태 중 양날개형(Y자형)이 가장 일반적으로 나타나는 형태로, 조사 주동 475개 중 282개(59.4%)가 이에 해당하는 것으로 나타났다 기술한바 있다. 그러므로 본 연구에서도 탑상형의 대표적인 주동형태로 양날개형으로 4호 조합형을 선정하였다. 두 주동형식 모두 층고 2.9m, 발코니 비 확장형을 기본으로 하였으며 유형의 기본수치와 층별 유형의 전용면적은 아래 표 3, 4와 같이 설정하였다. 또한 벽면율, 외피면적 등 주동 형태유형 이외에 건물에너지 시뮬레이션에 크게 영향을 미칠 수 있는 요소는 최대한 비슷하게 계획하였다.

6) 지식경제부 주관으로 난방에너지 사용량과 이에 따른 CO2 배출량을 기준으로 표준주택과 비교하여 등급을 평가하는 건물에너지효율등급제에 사용되는 프로그램임. 에너지관리공단 홈페이지에서 건물 및 단위세대 개요, 난방공간 및 비 난방공간별 외피특성을 입력하면 가변난방도일법에 기초하여 건물의 난방에너지 소비량을 계산한다. 유키형 외 2인(2006) 참조.

위와 같은 주동 모델링 기본 가정조건에 따라 설정된 판상형 및 탑상형 기준층 평면도와 ArchiCAD 모델링 예시이미지는 그림 2, 3, 4와 같고 외벽 및 창호, 세대내 간벽 및 바탕마감재, 단열재 등이 모델링되었다.

표 3. 연구대상 주동 유형의 기본수치

| 구분 | 판상형 (1-4호 동일) | 탑상형 | |
|----------------------------|------------------|---------------|---------------|
| | | 1,2 호 (전면) | 3,4 호 (후면) |
| 세대당 전용면적(m ²) | 84.585 | 84.233 | 84.519 |
| 세대당 서비스면적(m ²) | 35.748 | 37.299 | 26.794 |
| 세대당 공용면적(m ²) | 22.978 | | 13.124 |
| 기준층 전용면적(m ²) | 338.34 | | 337.50 |
| 외주길이(m) | 129.80 | | 128.80 |
| 기준층 벽면율(%) ⁷⁾ | 68.81 | | 66.62 |
| 기준층 외피면적(m ²) | 376.42 | | 373.52 |

표 4. 유형별 층별 전용면적

| 구분 | 판상형 | 탑상형 |
|-----------------|----------|----------|
| 6층형 전용면적 합계 | 2,030.04 | 2,025.00 |
| 12층형 전용면적 합계 | 4,060.08 | 4,050.00 |
| 18층형 전용면적 합계 | 6,090.12 | 6,075.00 |

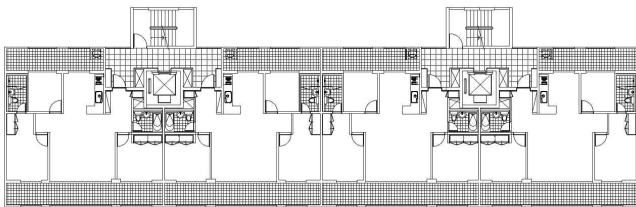


그림 2. 판상형 주동 기준층 평면도

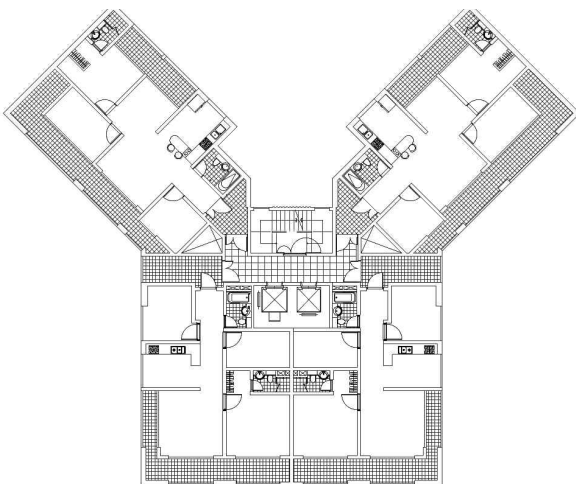


그림 3. 탑상형 주동 기준층 평면도

7) 유기형 외 2인(2006)의 연구에 따르면 기존 공동주택의 벽면율이 50%비율로 보고되고 있으나 최근 에너지 절약을 고려한 건축심의 기준 및 지구단위계획기준 등의 강화에 따라 60~70%대로 상향되고 있음을 고려하였다.

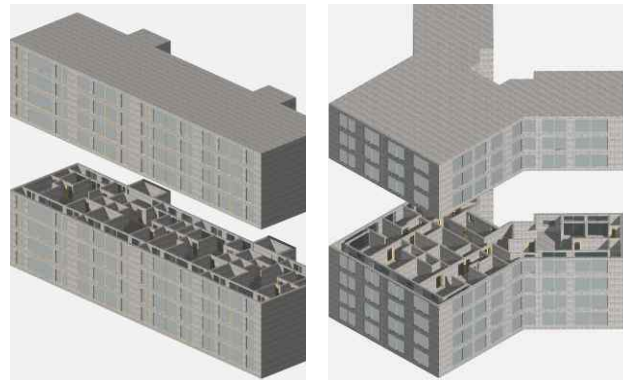


그림 4. ArchiCAD를 사용한 판상·탑상형 주동 모델링 이미지

2) 호환파일 형식 비교 검토

BIM기반 건물에너지 시뮬레이션을 수행하기 위해서 모델링 프로그램에서 시뮬레이션 프로그램으로 호환파일 형식 변환절차가 필요하다. ArchiCAD Add-on용 프로그램인 EcoDesigner의 경우에는 별도의 파일변환이 필요하지 않으나 Riuska의 경우에는 IFC, DesignBuilder의 경우에는 gbXML 호환파일 형식으로 변환이 필요하다. 변환된 파일은 본래 모델링 정보값을 소실없이 가지고 있어야 정확한 분석이 가능하다. 그러므로 본 절에서는 모델링 요소가 시뮬레이션 프로그램을 지원하는 호환파일로 변환될 때의 정보호환성(Interoperability)을 선행연구 및 실험을 통해서 분석하였고 그 결과는 다음 표 5와 같다.

정보호환성 분석에 따르면 각 호환파일형식마다 모델의 정보 손실도에서 차이가 발생하고 있으며 이것은 각 파일형식의 고유한 차이에서 발생하는 현상이라고 생각된다. 특히, IFC 파일은 모델링된 벽을 기준으로, gbXML은 공간을 기준으로 영역설정이 되어 변환된다는 점에서 큰 차이를 보인다고 판단된다. 따라서 IFC는 아래 그림 5에서와 같이 gbXML 보다 상대적으로 곡선이나 복잡한 형태의 파일변환에 유리하다.⁸⁾

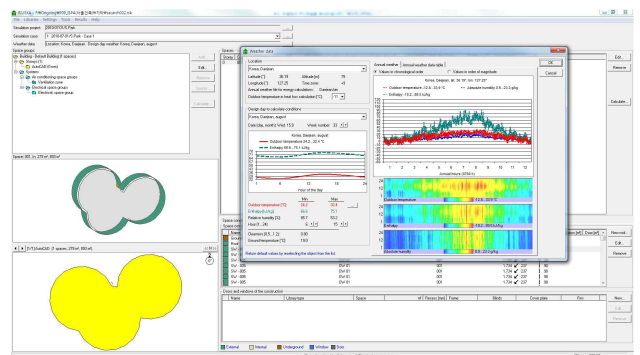


그림 5. Riuska에서 곡선형태의 IFC파일 Import

8) 문현준 외3인(2009)의 연구에 따르면 IFC는 gbXML에 비해 Drawing units, Building type, Location의 측면에서 호환성이 떨어지나 두 파일형식 간의 Geometry 부분의 호환성은 유사한 것으로 나타났다. 하지만 본 연구에서 Geometry 부분만을 좀 더 분석한 결과, 곡선뿐 아니라 복잡한 모델링의 Geometry 호환성은 IFC가 gbXML 보다 더 좋은 것으로 나타났다.

표 5. BIM모델링 작업요소와 건물에너지 시뮬레이션 프로그램별 정보호환성 비교평가

| 대항목 | 세항목 | EcoDesign (Add-on기반) | Riuska (IFC 기반) | DesignBuilder (gbXML 기반) |
|------------------|-----------|--|---|---|
| 영역 설정 | 내부영역설정 | 설정 필요 | 설정 필요 | 설정 필요 |
| | 외부영역설정 | 설정 필요 | 설정 불필요 | 설정 필요 |
| 레이어 설정 | | 설정 불필요 | 설정 필요 | 설정 불필요 |
| Geometry | Shape 인식 | 인식 | 인식 | 인식 |
| | Area 인식 | 인식 | 인식 | 인식 |
| | Volume 인식 | 인식 | 인식 | 인식 |
| 모델형상 인식 | 복잡한 형상 인식 | 인식 | 부분적으로 문제 발생 | 찾은 문제 발생 |
| | 곡선 형상 인식 | 인식 | 인식 | 부분적으로 문제 발생 |
| | 두께 인식 | 인식 | 인식 | 인식 |
| | 라이브러리 인식 | 인식 | 비인식 | 비인식 |
| | 복합체 인식 | 인식 | 인식 | 비인식 |
| 위치 인식 | | 인식 | 비인식 | 인식 |
| 변환시 모델정보의 선택 자유도 | | 낮음 | 매우 높음 | 낮음 |
| 모델링 변경시 정보 손실도 | | 높음 | 낮음 | 낮음 |
| 종합 평가 | | <ul style="list-style-type: none"> 파일변환시 후처리가 필요하며, 모델정보가 손실없이 보존되는 장점이 있음. 변환시 모델정보의 자유도가 낮고, 모델을 수정한 경우 정보 손실도가 높은 단점이 있음. | <ul style="list-style-type: none"> 파일변환시 후처리가 비교적 적게 필요하며, 변환시 모델정보의 자유도가 매우 높고, 모델을 수정한 경우 정보 손실도가 낮다는 장점이 있음. 파일변환시 복잡한 형상의 모델의 경우 정보의 손실이 발생하는 단점이 있음. | <ul style="list-style-type: none"> 모델을 수정한 경우 정보 손실도가 낮다는 장점이 있음. 파일변환시 후처리가 필요하며, 변환시 모델정보의 자유도가 낮으며, 파일변환시 복잡한 형상의 모델의 경우 정보의 손실이 크게 발생하는 단점이 있음. |

표 8. 사용유리의 성능기준

| 종류 | 구성(mm) | | | 열적 특성 | | |
|-------|--------|-----|----|-------------------------------|------|-------------------------------------|
| | 외판 | 공기층 | 내판 | 열관류율 (W/m ² ·K) | SHGC | Infiltration (l/m ²) |
| 맑은 유리 | 6 | 6 | 6 | 3.1 | 0.66 | 3.06 |

3.2 시뮬레이션 조건설정 및 편의성 분석

1) 시뮬레이션 기본조건 설정

시뮬레이션에 앞서 각각의 건물에너지 시뮬레이션 프로그램에서 공통적으로 적용한 기본조건은 아래와 같다. 모델링에 따른 외피의 열관류율 기준설정은 중부지역 법적 설계기준⁹⁾ 이상으로 계획하여 표 6과 같다. 모델링에 사용된 주요 재료의 열정수값은 표 7과 같이 설정하였으며 사용유리의 성능기준은 표 8과 같다.

표 6. 각 부위별 외피 모델링 두께와 적용 열관류율

| 부위 | 두께(mm) | | | 적용 열관류율 (W/m ² ·K) | 법적기준 열관류율 (W/m ² ·K) |
|----|--------|-----|-----|----------------------------------|------------------------------------|
| | 석고* | 단열재 | 벽두께 | | |
| 외벽 | 10 | 65 | 300 | 0.342 | 0.47 |
| 측벽 | 10 | 65 | 300 | 0.342 | 0.35 |
| 바닥 | 10 | 90 | 200 | 0.258 | 0.35 |
| 지붕 | 10 | 110 | 200 | 0.215 | 0.29 |

* 석고보드는 실제로 9.5mm가 사용되나 편의상 10mm 적용

표 7. 각 재료별 열정수값

| 구분 | 열전도율 (Watt/m℃) | 비열 (J/kg℃) | 밀도 (kg/m ³) |
|------------------|-------------------|---------------|----------------------------|
| 보통 콘크리트 | 1.396 | 880 | 2,200 |
| 콘크리트 블록 (경량) | 0.535 | 1,050 | 1,500 |
| 시멘트벽돌 | 1.396 | 880 | 1,800 |
| 석고(보드) | 0.175 | 1,130 | 910 |
| 스티렌 발포판 (압출법) | 0.026 | 1,260 | 40 |

* 출처: 대한건축학회(2003), 건축환경계획, p.77

2) EcoDesigner 세부조건 설정과 편의성 분석

EcoDesigner는 시뮬레이션 대상 주동을 둘러싼 위치와 주변 환경정보를 설정할 수 있는데, 설정된 조건은 아래 표 9와 같다.

표 9. EcoDesigner 주변환경 조건 설정

| 구분 | 설정내용 |
|-----------------|-----------------------|
| Location | Seoul* |
| Wind Protection | Partly Protected |
| Surroundings | Garden |
| Facade Shading | Very Shaded / Complex |

* 소프트웨어 공급사에서 작성한 기후파일과 연동되며 상세 내용은 확인되지 않음.

또한 탐상형 18층 남향 주동유형에 대한 시뮬레이션 시 화면 이미지는 ArchiCAD 프로그램위 Add-on으로 다음의 그림 6의 중앙부 윈도우 창과 같이 표시된다.

9) 국토해양부령 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 2009

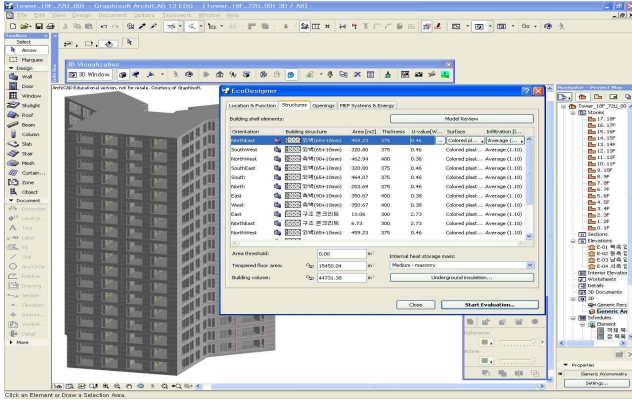


그림 6. EcoDesigner의 탑상형 18층 남향 주동유형 입력화면

EcoDesigner는 실별로 Activity를 설정할 수 없고 건물단위로만 설정이 가능하다. 단, 건물단위에 대해 2가지 용도와 그 면적비율을 설정할 수 있기 때문에 용도를 난방이 되는 면적비율만큼 'Residential'과 난방이 이루어지지 않는 면적비율만큼 'Parking Space/Service Area'로 설정하였으며 각각의 면적 비율은 아래의 표 10과 같다.

표 10. 주동유형별 난방과 비난방 면적비율

| | 관상형 | 탑상형 |
|----------------------------------|---------|---------|
| 난방 (Residential) | 62.23 % | 67.25 % |
| 비난방 (Parking Space/Service Area) | 37.77 % | 32.75 % |

또한 외벽과 지붕의 실내 및 실외측 표면 열전달저항 값이 국내기준과 달리 기본설정되어있어 표 11과 같이 설정하였다.

표 13. EcoDesigner에 대한 BIM기반 시뮬레이션 적용시 편의성 평가

| 대분류 | 소분류 | 분석내용 | 편의성 평가 |
|---------------------|--|---|--------|
| BIM Modeling Import | import시 default data(template)사용 | DefaultFillAssignments.xml 와 DefaultValues.xml 을 텍스트 편집기로 변경 가능 | 나쁨 |
| | preview 제공 | 모델링 프로그램과 통합되어 있으므로 불필요 | 매우 좋음 |
| | 형상 import option | 모델링 프로그램과 통합되어 있으므로 불필요 | 매우 좋음 |
| | import processing | 모델링 프로그램과 통합되어 있으므로 불필요 | 매우 좋음 |
| | 속성정보 import | 형상정보만 import되고 모델링 소프트웨어에서 정의된 모든 속성정보는 소실 | 아주 나쁨 |
| | import 후 형상수정 | 모델링 프로그램과 통합되어 있으므로 불필요 | 매우 좋음 |
| Simulation | 대용량 데이터 import | 대규모건물도 가능. 관상형 아파트 기준35층정도까지 인식될 수 있음 | 매우 좋음 |
| | 기후 및 주변 환경조건설정 | 기 제공된 기후파일이 있는 경우 선택만 하면되나 새 파일등록은 온라인서버를 통해 다운받거나 *.vipclimate파일을 수동으로 편집하여 설치하여야 함. | 보통 |
| | Activity 설정 | 11종류의 occupancy와 schedule, set point temperature, internal heat gain profile을 기본으로 제공하며 텍스트 편집기로 변경가능 | 보통 |
| | Building materials & Envelope | 다양한 재료의 default와 사용자 변경가능 | 매우 좋음 |
| | HVAC와 Lighting 설정 | 온수공급온도, 냉방 및 환기시스템, 환기율, 히트펌프, 솔라패널 등은 사용자 설정조절가능하나 새로운 시스템작성은 불가하고 변경을 위해서는 외부 VIP-Energy프로그램을 이용해야 함. | 보통 |
| | 시뮬레이션 시간 | 매우 빠른 속도로 결과를 보여주며 18층인 경우도 1분내 처리함. | 매우 좋음 |
| 결과물 | 건물면적및 체적, 외피 열관류율값, 에너지원에 따른 연간 총사용량, 단위면적당 사용량, 이산화탄소 배출량, 탄소발자국, 월별 부하비교표를 PDF파일형식으로 보여줌 | 좋음 | |

표 11. 외벽과 지붕의 실내 및 실외측 표면 열전달저항

| | 열전달계수 항목 | 관련 수치 |
|----|------------------------------------|--------------------------|
| 외벽 | External Heat Transfer Coefficient | 23.3 W/m ² ·K |
| | Internal Heat Transfer Coefficient | 9.1 W/m ² ·K |
| 지붕 | External Heat Transfer Coefficient | 23.3 W/m ² ·K |
| | Internal Heat Transfer Coefficient | 11.6 W/m ² ·K |

MEP 시스템 설정은 표 12와 같고 BIM기반 시뮬레이션 적용에 따른 편의성은 아래 표 13과 같다.

표 12. EcoDesigner MEP 시스템 설정

| 구분 | MEP 설정 항목 | 관련 수치 |
|---------------|----------------------|-------------|
| Water Temp. | Hot Water Generation | 10 - 60°C |
| | Cooling Type | Natural |
| Ventilation | Ventilation Type | Natural |
| | Air Change per Hour | 0.7 회/h* |
| Energy Source | Heating | Natural Gas |
| | Other energy use | Electricity |

* 에너지성능평가프로그램 기준과 동일

3) DesignBuilder 세부조건 설정과 편의성 분석

DesignBuilder는 지역설정 및 기본 자재물성, 각 부분별 시뮬레이션 기본값을 지원하는 템플릿을 상세하고 제공하고 있으며 기후데이터 파일에 대한 지원도 나머지 프로그램에 비해 매우 뛰어나다. 서울의 경우 인천 국제공항의 IWEC 기후데이터를 기본적으로 제공하고 있다. 기후 설정 이외 지중온도, 강수량, 일광절약시간 등 세부적 주변환경 조건에 대해 상세한 설정이 가능하다.

재료 및 외피 열관류율 설정은 EcoDesigner와 동일하게 설정하였고 각 실의 용도를 모두 'Dwell_DomBed' 로 설정하였으며 실내 난방공간의 온도 및 환기 세부조건은 다음 표 14과 같이 에너지성능평가기준과 유사하게 설정

하였다. 판상형 12층 남향 주동유형에 대한 시뮬레이션 시 화면 이미지는 아래의 그림 7과 같다.

표 14. DesignBuilder 실내 난방공간의 온도 및 환기 설정

| 구분 | 온도 및 환기 설정 | 관련 수치 |
|-------|------------------------|-------|
| 실내 온도 | Cooling Design Value | 27℃ |
| | Cooling Setpoint Value | 26℃ |
| | Heating Setpoint Value | 20℃ |
| | Heating Design Value | 19℃ |
| 환기 | Air Change Rates | 0.7 |

HVAC 시스템은 바닥 온수 복사난방시스템과 유사하게 System Type 을 ‘Underfloor heating system’ 으로, Schedule을 ‘Dwell_DomBed’로 설정하였고 Lighting Load ‘5.585 W/m²’, Natural ventilation 설정, Heating system CoP 는 0.9로, 기타 세부사항은 EcoDesigner 에 준하여 설정하였다. DesignBuilder의 설정은 설계수준과 모델링의 간략화 정도에 따라 간략한 설정 및 디폴트값 적용에서 세밀한 옵션적용에 이르기까지 시뮬레이션 목적에 따라 변경할 수 있다는 점이 장점이다.

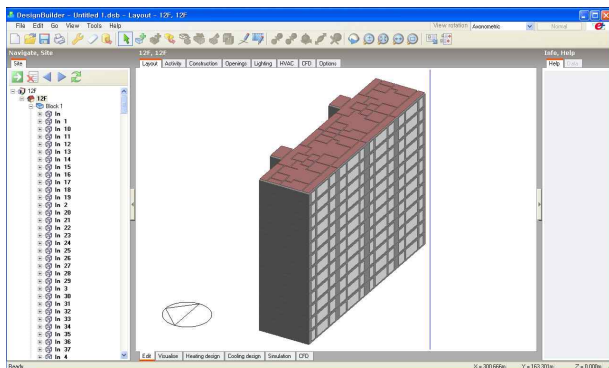


그림 7. Design Builder의 판상형 12층 남향 주동 입력화면

BIM기반 시뮬레이션 적용에 따른 편의성은 아래 표 15와 같이 분석하였다.

4) Riuska 세부조건 설정과 편의성 분석

Riuska에서는 지역설정에 대한 기본값이 있는 데, 서울의 경우 인천(Incheon)을 기준하였고 이는 인천국제공항의 기후데이터를 사용하고 있으리라 예상된다. 지역 설정 이외 EcoDesigner와 같은 세부적 주변환경 조건에 대한 설정은 없다.

재료 및 외피 열관류율 설정은 EcoDesigner와 동일하게 설정하였고 각 실의 용도를 모두 ‘Bedroom’으로 설정하였다. 판상형 12층 남향 주동유형에 대한 시뮬레이션 시 화면 이미지는 다음의 그림 8과 같다.

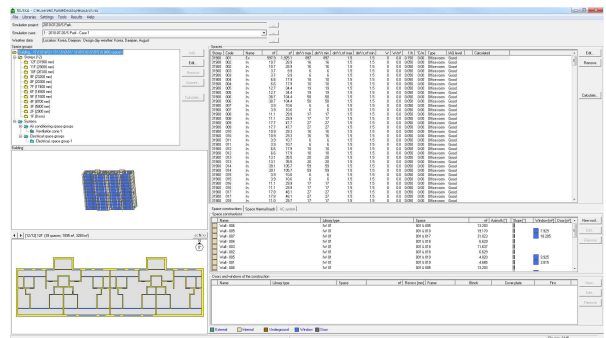


그림 8. Riuska의 판상형 12층 남향 주동유형 입력화면

실내 난방공간의 온도 및 환기 설정은 표 14의 DesignBuilder 실내 난방공간의 온도 및 환기 설정과 동일하게 하였고 HVAC 시스템은 국내 공동주택에 사용되는 바닥 온수 복사난방시스템에 대한 설정이 없으므로 공조시스템을 기본으로 에너지성능평가의 기준과 유사하

표 15. DesignBuilder에 대한 BIM기반 시뮬레이션 적용시 편의성 평가

| 대분류 | 소분류 | 분석내용 | 편의성 평가 |
|---------------------|--|---|--------|
| BIM Modeling Import | import시 default data(template) 사용 | default 또는 사용자가 Activity, Construction(외피재료), Glazing, HVAC and Hot water, Lighting별 template설정가능, 사전에 세부적인 template 설정 및 저장 가능 | 매우 좋음 |
| | preview 제공 | Plan view 에서 Axonometric까지 6가지 뷰선택 | 좋음 |
| | 형상 import option | building blocks, shade surfaces 옵션설정 | 좋음 |
| | import processing | 자동으로처리되며벽체,슬라브,창문,문등으로구분,여러재료로구성된복합벽체구성은단일벽체로변경되어import됨 | 보통 |
| | 속성정보 import | 형상정보만 import되고 모델링 소프트웨어에서 정의된 모든 속성정보는 소실 | 아주 나쁨 |
| | import 후 형상수정 | 자체 modeler가 있어 수정이 가능함 | 보통 |
| Simulation | 대용량 데이터 import | 건물규모가 매우 크거나 내부가 여러실로 되어있는 경우 제대로 인식하지 못하거나 시간이 매우 많이 소요되기도 함. 본 연구대상 판상형 아파트 기준 20층정도까지 인식될 수 있었음. | 나쁨 |
| | 기후 및 주변 환경조건설정 | epw, tmy, tmy2, iwec, wyec2, esp-r,wea 등 다양한 기후데이터 전환기능 제공 | 매우 좋음 |
| | Activity 설정 | 실별 조닝 설정 가능, Metabolicdata, occupancy, schedule, setpointtemperature, 가전기구 등 매우 상세한 설정 가능 | 매우 좋음 |
| | Building materials & Envelope | 다양한 재료의 default와 사용자 변경가능 | 매우 좋음 |
| | HVAC와 Lighting설정 | 다양한system default와 사용자 설정조절가능하나 새로운 시스템작성은 불가 | 좋음 |
| | 시뮬레이션 시간 | 형상의 복잡도, 조닝의 개수, 시뮬레이션 조건설정 등에 따라 큰 차이가 나며 본 연구대상 판상형 18층인 경우 3시간 20분 정도 소요되었음 | 나쁨 |
| 결과물 | 조닝별, 건물별, 일별, 월별 등 결과물과 변환된 모델의 DXF를 Export 가능 | 매우 좋음 | |

표 16. Riuska에 대한 BIM기반 시뮬레이션 적용시 편의성 평가

| 대분류 | 소분류 | 분석내용 | 편의성 평가 |
|---------------------|-----------------------------------|---|--------|
| BIM Modeling Import | import시 default data(template) 사용 | default 설정가능, 사전에 세부적인 template 설정 및 저장 가능 | 좋음 |
| | preview 제공 | 없음, 로딩 속도가 빠름 | 좋음 |
| | 형상 import option | 없음, 로딩 속도가 빠름 | 좋음 |
| | import processing | 자동으로처리되며벽체,슬라브,창문,문등으로구분,여러재료로구성된복합벽체구성은단일벽체로변경되어import됨 | 보통 |
| | 속성정보 import | 형상정보만 import되고 모델링 과정에서 정의된 모든 속성정보는 소실됨 | 아주 나쁨 |
| | import 후 형상수정 | 일람표에서 수치적으로 일부수정이 가능함 | 나쁨 |
| Simulation | 대용량 데이터 import | 건물규모가 매우 크거나 내부가 여러실로 되어있는 경우에도 잘 인식되며 본 연구대상 판상형 아파트 기준 35층정도까지 인식될 수 있었음. | 매우 좋음 |
| | 기후 및 주변 환경조건설정 | DOE-2.1E 기후데이터 지원 | 보통 |
| | Activity 설정 | 실별 조닝설정가능 | 좋음 |
| | Buildng materials and Envelope | 다양한 재료의 default와 사용자 변경이 어느 정도 가능하나 창문의 경우 제작사의 등록이 필요함. | 보통 |
| | HVAC와 Lighting 설정 | system default가 매우 제한적임 | 나쁨 |
| | 시뮬레이션 시간 | 비교적 빠른 속도로 결과를 보여줌 | 좋음 |
| 결과물 | 다양한 시뮬레이션 결과물과 평면상 그래픽 결과물도 표현가능함 | 매우 좋음 | |

게 다음과 같이 설정하였다. 먼저 System Type을 'Constant Air Volume'으로, Schedule을 'AC: mo-su 24h'로 설정하였고 Electrical Space Group - Space Thermal Loads의 Load Type을 'Lighting'으로, '5.585 W/m²', Schedule in Sizing을 'mo-su 24h 100%'로, Schedule in Energy를 'mo-su 24h 50%'로 각각 설정하였다. 또한 BIM기반 시뮬레이션 적용에 따른 편의성은 다음 표 16과 같이 분석하였다.

5) 에너지성능평가프로그램 세부조건 설정

에너지성능평가프로그램은 본 연구에서 다룬 BIM기반 에너지분석 프로그램들과는 달리 전체 주동단위로 분석하는 것이 아니라 각 단위세대 위치별, 향별 조건차이에 따라 별도로 입력하여 분석하고 주동단위로 합산하는 방식이다. 그러므로 본 연구에서 시뮬레이션 대상인 판상형 및 탑상형 주동을 다음 그림 9와 같은 위치적 조건 및 향에 따라서 각각 구분하여 분석 후 합산하여 주동유형에 대한 에너지 소비량을 계산하였다.

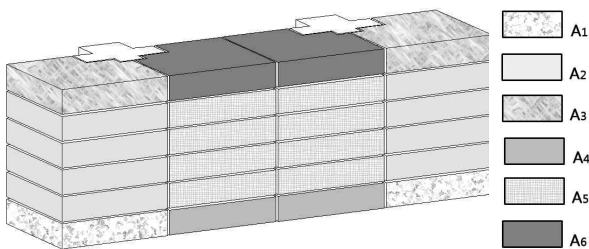


그림 9. 판상형 6층 주동유형의 위치별 단위세대 구분

건물개요에서 시뮬레이션 기본조건을 바탕으로 입력하였고 건물의 난방시스템을 '지역난방'으로 설정하였다.10) 난방공간의 시간당 환기율(회)을 '0.7'로 설정하였고

10) 본 연구에서 설정한 주동유형에 대해 난방시스템 설정을 '개별난방'으로 하는 경우 건물에너지효율등급제에서 정의한 '표준주택'의 에너지소비량보다 높게 나타나는 현상이 나타났다. 이의 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

비난방공간의 시간당 환기율(회)은 '2'로 설정하였다.

그림 10은 판상형 남동향 단위세대에 대해 입력한 후 결과를 표시하는 화면을 보여주고 있다.

그림 10. 에너지성능평가프로그램 판상형 남동향 단위세대의 시뮬레이션 결과 화면

4. 시뮬레이션 결과분석 및 BIM기반 시뮬레이션 기법 적용시 문제점 분석

4.1 시뮬레이션 결과분석

1) 종합분석

판상형 및 탑상형 주동의 각 유형에 대한 Eco Designer, DesignBuilder, Riuska, 에너지성능평가프로그램에 의한 연간 건물에너지 소비량 시뮬레이션 결과를 정리하면 다음 표 17과 같다.

전체적으로 연간 건물에너지 소비량은 'EcoDesigner < DesignBuilder < Riuska < 에너지성능평가' 순서의 경향이 나타났다. 시뮬레이션간의 결과 값은 기후 데이터 입력조건, 건물형태 데이터변환 조건, 시뮬레이션 세부 조건설정, 해석방정식 및 시뮬레이션 프로그램 알고리즘의 차이로 인해 프로그램별로 상이할 수 있으나 대체적으로 같은 모델링의 경우 조건설정변화에 따른 증감은 일치하는 경향이 있다.11)

표 17. 판상형 및 탑상형 주동유형별 연간 총 에너지소비량 시뮬레이션 결과

단위: kWh/year

| 층수 | 관상형 | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 6 | | | | | 12 | | | | | 18 | | | | |
| | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 |
| ED | 140,534 | 123,558 | 114,731 | 130,481 | 142,562 | 287,454 | 252,500 | 236,495 | 266,709 | 290,913 | 442,230 | 389,106 | 365,611 | 410,792 | 447,231 |
| DB | 162,070 | 149,209 | 136,420 | 149,010 | 163,153 | 323,570 | 297,890 | 272,830 | 295,410 | 323,000 | 482,430 | 443,210 | 406,010 | 439,300 | 481,850 |
| RI | 193,000 | 193,000 | 193,000 | 193,000 | 193,000 | 386,000 | 386,000 | 386,000 | 386,000 | 386,000 | 576,000 | 576,000 | 576,000 | 576,000 | 576,000 |
| 성능 | 206,342 | 205,774 | 205,194 | 205,170 | 215,523 | 397,972 | 396,834 | 395,671 | 395,623 | 416,296 | 589,602 | 587,894 | 586,147 | 586,076 | 617,070 |

| 층수 | 탑상형 | | | | | | | | | | | | | | |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 6 | | | | | 12 | | | | | 18 | | | | |
| | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 | 동 | 남동 | 남 | 남서 | 서 |
| ED | 155,957 | 150,904 | 150,476 | 151,867 | 156,458 | 313,814 | 306,836 | 305,583 | 308,418 | 317,789 | 483,275 | 472,627 | 470,525 | 474,894 | 489,188 |
| DB | 152,880 | 146,470 | 144,150 | 146,410 | 152,480 | 306,950 | 294,020 | 288,930 | 296,050 | 314,740 | 463,260 | 443,780 | 435,930 | 446,830 | 474,910 |
| RI | 200,576 | 200,576 | 200,576 | 200,576 | 200,576 | 401,152 | 401,152 | 401,152 | 401,152 | 401,152 | 601,728 | 601,728 | 601,728 | 601,728 | 601,728 |
| 성능 | 192,757 | 208,474 | 213,149 | 217,929 | 218,691 | 372,162 | 403,053 | 412,153 | 421,520 | 423,046 | 551,567 | 597,631 | 611,156 | 625,112 | 627,401 |

*ED: EcoDesigner의 에너지소비량, DB: DesignBuilder의 에너지소비량, RI: Riuska의 에너지소비량, 성능: 에너지성능평가프로그램의 에너지소비량

2) 프로그램별 시뮬레이션 결과 상관성 비교분석

각 시뮬레이션 프로그램별 결과값과 결과 간의 상관관계를 분석한 다음 표 18에서 보여지는 것처럼 모든 프로그램의 결과 간의 상관관계가 매우 높게 나타났다. 특히, EcoDesigner 와 DesignBuilder 간의 상관관계가 1에 준하는 수준으로 상당히 높게 나타났다. 여기서 흥미로운 것은 Riuska 의 결과 값과 에너지성능평가프로그램의 결과 값과의 상관관계가 거의 일치한다는 것이다. 이는 EcoDesigner 및 DesignBuilder 와 에너지성능평가와의 상관관계 보다 상대적으로 매우 높게 나타난다는 것이다.

탑상형 시뮬레이션 결과 간의 상관분석결과와 판상형 시뮬레이션 결과 간의 상관분석결과와 비교해 볼 때, ‘EcoDesigner -DesignBuilder’, ‘Riuska-에너지성능평가프로그램’ 간의 상관성을 제외한 다른 상관성이 탑상형에서 소폭 하락한 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 모델링 형태의 복잡함과 상관성이 있을 것으로 판단되는데, 그 때문에 전체적인 결과치 간의 상관성이 판상형에 비해 낮아진 것으로 생각된다.

이와는 달리 ‘EcoDesigner-에너지성능평가프로그램’, ‘DesignBuilder-에너지성능평가프로그램’ 간의 상관관계는 ‘Riuska-에너지성능평가프로그램’과는 달리 판상형에서 탑상형으로 시뮬레이션 대상이 변화됨에 따라 상관성이 크게 떨어진 것을 알 수 있었다. 프로그램의 해석상의 차이일 수도 있으나 전문한 대로 건물형태 모델링이 호환 파일로써 변환하는데 이용되는 IFC 와 gbXML 두 파일 형식 간의 차이가 주원인으로 판단된다. 왜냐하면 EcoDesigner는 ArchiCAD 모델링을 파일변환없이 그대로 해석으로 전환되며 DesignBuilder는 gbXML 파일형식을 import한 후 해석하지만 ArchiCAD 모델링 후 EcoDesigner 실행을 위해 필요한 선작업들을 확인해보면 gbXML으로 파일변환하는 것과 유사한 것을 알 수 있다.

또한 본 연구를 통해 밝혀진 ‘Riuska-에너지성능평가프로그램’ 간의 높은 상관성 결과를 바탕으로 가변난방도일법에 기반한 에너지성능평가프로그램의 결과값과 DOE-

2.1E 기반의 Riuska 가 유사한 결과값을 보이고 있으며 Riuska 가 BIM기반의 모델링을 지원하며 상대적으로 빠른 결과를 제공한다는 점에서 국내에서 많이 사용되는 HVAC시스템설정 등이 지원된다면 Riuska의 시뮬레이션 결과를 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

표 18. 에너지 시뮬레이션 결과 간 상관분석결과: 판상형 및 탑상형

| | Eco Designer | Design Builder | Riuska | 성능 | |
|-----|----------------|----------------|----------|----------|----------|
| 판상형 | Eco Designer | 1 | .998(**) | .981(**) | .987(**) |
| | Design Builder | | 1 | .982(**) | .987(**) |
| | Riuska | | | 1 | .999(**) |
| | 성능* | | | | 1 |
| 탑상형 | Eco Designer | 1 | .998(**) | .961(**) | .927(**) |
| | Design Builder | | 1 | .902(**) | .937(**) |
| | Riuska | | | 1 | .989(**) |
| | 성능* | | | | 1 |

* 성능: 에너지성능평가프로그램
**상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의함

3) 층별 유형 결과분석

판상형 및 탑상형에 대한 층별 유형 연간 단위전용면적당 건물에너지 소비량을 그래프로 표현하면 다음의 그림 11, 12와 같다.

위의 결과비교를 통하여 첫 번째로 층수가 높아짐에 따라서 일반적으로 연간 단위전용면적당 에너지 소비량이 감소하고 있었다.

11) 이재혁 외 2인(2009), p.0006

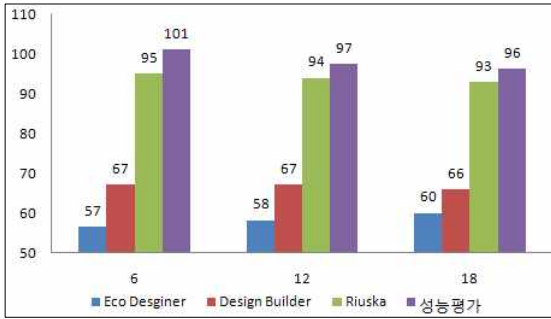


그림 11. 판상형 층별 단위에너지소비량(남향 기준, 단위: kWh/m²·year)

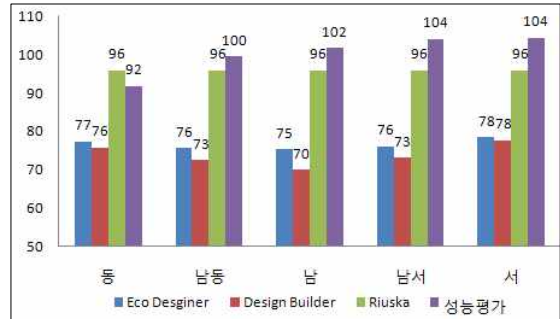


그림 14. 탑상형 향별 단위에너지소비량(12층기준, 단위: kWh/m²·year)

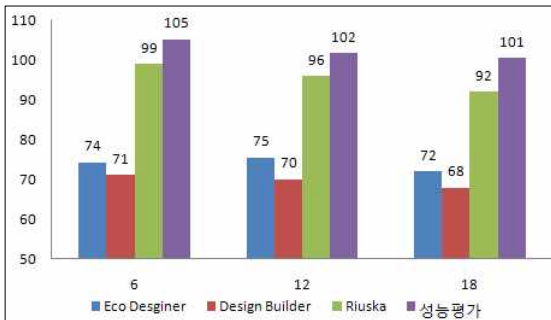


그림 12. 탑상형 층별 단위에너지소비량(남향기준, 단위: kWh/m²·year)

다만 EcoDesigner 만 판상형에서 단위에너지 소비량이 약간 높아졌다는 점에서 다른 시뮬레이션 프로그램의 결과와 반대의 결과를 보여주고 있으나 이에 대한 원인분석은 차후 보다 다양한 주동형식과 층수에 대해 시뮬레이션이 진행되어야 파악될 수 있다고 생각된다. 두 번째로 층수가 높아짐에 따라 판상형보다 탑상형의 경우 연간 단위전용면적당 에너지 소비 감소량이 컸다. 이러한 경향이 나타난 이유는 외피면적의 차이에 따라 그 단위 에너지소비량의 변화가 크게 부각된 것으로 판단된다.

4) 향별 유형 결과분석

판상형 및 탑상형에 대한 향별 유형 연간 단위전용면적당 건물에너지 소비량을 그래프로 표현하면 아래의 그림 13, 14와 같다.

위의 결과비교를 통하여 대체로 남 < 남동 < 남서 < 동 < 서향의 순서로 연간 단위전용면적당 건물에너지 소비량이 증가하는 것을 알 수 있다.

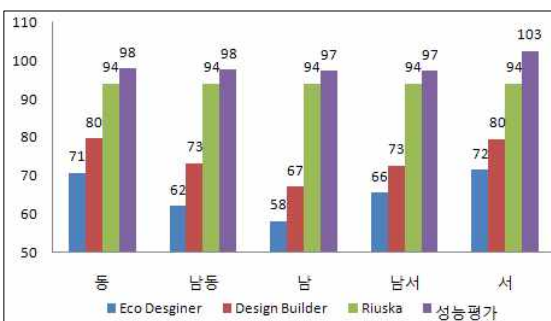


그림 13. 판상형 향별 단위에너지소비량(12층기준, 단위: kWh/m²·year)

이러한 경향은 태양 열에너지취득과 관련이 있는 것으로 그 경향이 가장 큰 프로그램은 EcoDesigner, DesignBuilder 순이며, Riuska 에서는 결과 값의 변화가 없고 에너지성능평가프로그램에서는 그 경향이 작거나 탑상형의 경우 동향이 가장 적게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 이러한 점에서 EcoDesigner, DesignBuilder 는 에너지시뮬레이션에서 향별 수직 외피에 대한 태양에너지 취득에 더 가중치를 두고 있으며, Riuska 와 에너지성능평가프로그램은 향별 태양에너지 취득에 대한 차이가 적다는 것을 알 수 있다.

두 번째로 연간 단위전용면적당 건물에너지 소비량은 탑상형보다 판상형의 경우 그 감소량이 컸다. 이러한 경향이 나타난 이유는 판상형의 모든 세대가 주향을 향하는 구조로 되어 있으므로 탑상형보다 건물 주향에 더 민감하게 반응하기 때문인 것으로 생각된다.

세 번째로, 프로그램 설정시 방위를 설정하는 항목이 있었음에도 불구하고 Riuska는 향과 상관없이 같은 값을 나타내고 있으며 모델링 파일변환이전에 향을 변화시킨 IFC파일을 import 하여도 같은 결과가 나온 것으로 보아 Riuska 는 향별 수직 외피에 대한 태양에너지 취득값을 별도로 산정하지 않거나 기본설정으로 입력된 기후데이터의 일사량 데이터의 오류로 추정된다. 이에 대해 프로그램 제작사의 시급한 개선이 요구된다고 할 수 있다.

4.2 BIM기반 시뮬레이션 기법 적용 시 문제점 분석

본 연구를 통하여 공동주택에 대한 BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 기법 적용과정에서 다음과 같은 문제점들이 관찰됐다.

먼저, BIM기반 건물에너지 시뮬레이션 프로그램들이 국외에서 제작된 것이므로 국내 기준 적용시 일부 문제점이 드러났다. 특히, 국내에서 주로 사용되는 건축자재의 열 정수값이 입력되어 있지 않거나 일반적으로 통용되는 값과 차이가 있어서 일관된 적용이 어려웠다. 특히 벽체 단열과 관련된 수치들은 수동 설정 또는 입력이 대부분 가능해서 그 적용에 큰 문제가 없었으나 창이나 문의 경우에 시뮬레이션 프로그램 자체적으로 라이브러리를 가지고 있으며 사용자에게 의한 추가적인 라이브러리 등록이 어려운 경우에는 세부설정 시 정상적이 아닌 방법으로 진행하였다. 또한 시뮬레이션 프로그램이 국내 주

요 도시들에 대한 충분한 위치정보 및 정확한 기후데이터 값을 모두 제공하지 않거나 새로 등록하기 매우 어렵게 되어 있는 경우가 많아 연구수행 시 동일하게 적용하기가 매우 어려웠으며 실제 사용 시에도 많은 어려움이 예상된다. 이러한 어려움에 대해서는 국내 사용자 및 프로그램 공급사와 국외 제작사간의 원활한 정보교류와 지원을 통해 해결해 나가야 한다고 생각된다.¹²⁾

두 번째로, 복잡한 모델링의 경우 에너지 시뮬레이션 프로그램으로의 변환 과정에서 많은 문제점이 드러났다. 변환과정에서 모델링 정보값이 부분적으로 소실되거나 import가 불가능한 경우도 있었다. 특히 여러 대안을 검토하기 위해서 기존 모델링을 수정해서 사용하는 경우에 모델링 정보값이 잘못 변환되거나 소실되는 경우가 많아 기존의 모델링을 수정하기 보다는 새롭게 작성해야 하는 경우가 많았다. 모델링 정보 소실정도는 형상이 복잡한 탑상형의 경우에 더 잦았으며, gbXML 변환시 자주 발생했고, DesignBuilder로 모델링을 변환-입력하는 경우에 더 자주 발생했다. 특히 DesignBuilder의 시뮬레이션 엔진인 EnergyPlus로의 정보변환이 내부적으로 일어나는데 복잡한 모델링의 경우 시뮬레이션 중 다운되는 문제점 등이 많이 발생하였다. 이러한 문제점은 근본적으로 모델링 및 시뮬레이션 프로그램 제작사와 호환파일 형식을 개발하는 단체의 지원에 일차적으로 의존해야 하지만 시뮬레이션 목적과 모델링 특성을 고려한 적합한 프로그램의 선정을 통하여 최적의 작업과정 및 분석결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

또한 같은 시뮬레이션 소프트웨어인 경우에도 모델링 방법에 따라 소실되는 정도가 다르므로 모델링 작업 시 각 프로그램별 특성에 맞게 모델링 작업을 해주어야 하는 것으로 일부 프로그램에서는 이러한 오류를 줄이기 위해 별도의 모델링 가이드라인을 제공하고 있다. BIM기반 작업 시 모델링 프로그램과 시뮬레이션 프로그램간의 특성을 미리 파악하여 상세한 모델링 가이드라인을 만들어 작업하는 것이 좋다고 판단된다.

세 번째로, 모델링파일을 정상적으로 변환하였을 경우에도 재료에 대한 열적 성능정보 등 속성정보가 import되지 않고 시뮬레이션 프로그램에서 다시 설정해 주어야 하는 번거로움이 있다. 이는 현재 모든 BIM기반 시뮬레이션 프로그램에서 발생하는 문제점으로 역시 모델링 및 시뮬레이션 프로그램 제작사와 gbXML이나 IFC 등 호환파일 형식을 개발하는 단체의 지원에 전적으로 의존해야 하지만 프로그램에 따라 시뮬레이션 작업 전 템플릿의 설정, 자주 쓰는 디폴트 수치의 조정 등을 준비하여 시간적 손실을 줄이는 것이 필요하다고 판단된다.

네 번째로, 프로그램별 모델링을 import 하고 시뮬레이션하는 시간이 매우 상이하게 관찰되었다. 이것은 각 프로그램별 인터페이스 모듈의 효율성과 시뮬레이션 모듈의 복잡성, 알고리즘에 따라 상이할 수밖에 없으며 모델

링을 읽어 들이는 시간과 시뮬레이션 분석시간으로 나누어 볼 수 있다. 먼저 모델링을 읽어 들이는 시간은 모델링 종류와 크기에 따라 매우 상이하나 대체적으로 Riuska, EcoDesigner, DesignBuilder 순서였다. 시뮬레이션에 걸리는 시간은 EcoDesigner, Riuska, DesignBuilder 순서였다.¹³⁾ 시뮬레이션 시간을 줄이기 위해서는 모델링을 가능한 한 간략히 하는 것이 좋으나 그럴 경우 시뮬레이션 결과가 부정확해지므로 적절한 모델링 수준을 유지한 채로 가급적 같은 조닝을 통합하고 시뮬레이션 세부 조건설정 시 지나치게 상세한 옵션설정과 불필요한 결과물은 출력하지 않도록 하는 것이 중요하다고 생각된다.

마지막으로 공동주택 건물에너지효율등급제에서 사용되고 있는 웹기반 에너지성능평가프로그램에 대해서도 동일 조건하에서 분석을 수행하여 시뮬레이션 결과와 비교를 통해 의미있는 상관관계를 확인하였다.

웹기반의 에너지성능평가프로그램의 경우에는 전술한 바대로 매 항목별로 수동으로 그 수치를 입력해야 하며 주동 전체로 입력하는 것이 아니라 각 주호별로 관련 수치를 입력해서 그 후에 따로 계산해야 하는 불편함 등으로 인해 시간의 소요가 상당하고 모델링과의 연관관계를 파악하기 어렵다. 특히, 외형이 복잡하거나 그 외피에 곡선이 들어간 경우, 입력수치 확인이 수작업으로 불가능한 경우가 있어 3차원 모델링을 통해 수치를 확인하고 입력해야 하는 어려움이 있다. 곡면 모델링의 호환파일 import를 지원하는 BIM기반의 건물에너지 시뮬레이션 기법이 이러한 문제점을 쉽게 해결해 주리라 생각된다.

5. 결론

본 연구는 ArchiCAD v13.0 BIM 모델링 소프트웨어를 사용하여 공동주택 판상형 및 탑상형으로 대표되는 주동 유형에 대한 모델링 작업후 BIM 기반의 에너지 시뮬레이션 프로그램 중 호환파일 형식에 따라 대표적으로 Add-on 기반의 Eco Designer v13.0, gbXML 호환파일기반의 Design Builder v.2.0, IFC 호환파일기반의 Riuska v.6.0 를 사용하여 건물에너지 시뮬레이션 분석을 실시하였다.

BIM기반의 건물에너지 시뮬레이션 분석과정 중 모델링과정과 호환파일 변환과정, 시뮬레이션 프로그램에서의 import 및 시뮬레이션 준비과정에 걸쳐 항목별 정보호환성과 편의성을 분석하였다. 연구대상 공동주택 주동 유형 모두 선정된 3개 프로그램에서 성공적으로 건물에너지 시뮬레이션이 가능하였으나 모델링 방법 또는 호환파일 형식에 따라 인식이 안되거나 정보가 소실되는 경우도 발생하여 수차례 시행착오를 거쳐 수행되었으며 아직 어

12) DesignBuilder의 경우 온라인 사용자포럼을 통해 지속적이며 매우 적극적인 지원이 이루어지고 있으며 본 연구기간 중에도 질의한 내용에 대해 매우 성실한 답변을 얻을 수 있었다.

13) Riuska 나 EcoDesigner의 경우 수분내에 결과값이 제공되는 것이 일반적이었으나 DesignBuilder의 경우에는 수시간까지도 소요되었다. 실제 시뮬레이션 시간은 모델링 종류 및 시뮬레이션 목적에 따른 세부설정조건과 컴퓨터 사양에 따라 매우 크게 차이가 날 수 있어 본 연구 시 본격적으로 분석하지 않았다.

떤 프로그램에서도 모델링 시 선정된 재료의 열전도율 등 속성정보가 import 되고 있지 못해 별도로 입력하여 시뮬레이션을 진행 할 수 밖에 없었다.

Add-on 기반의 Eco Designer는 ArchiCAD 모델링을 프로그램내부에서 변환하여 사용하므로 정보호환성이 좋고 매우 빠른 결과물을 제공해주고 있으나 세부적인 설정이 매우 제한적이다. gbXML 호환파일기반의 Design Builder는 매우 편리한 인터페이스, 상세한 세부설정 기능제공, 신뢰성 있는 시뮬레이션 결과와 프로그램내에서 CFD분석을 같이 수행할 수 있는 장점이 있으나 호환파일 변환과 import가 아직 완벽하지 않고 시뮬레이션 시간이 제일 많이 소요되었다. IFC 호환파일기반의 Riuska는 IFC 호환파일을 거의 완벽하게 지원하고 있으나 시뮬레이션을 위한 세부설정기능이 제한적이며 국내 기준을 적용하기 힘들게 되어 있다.

위와 같이 프로그램별로 정보호환성과 편의성의 분석 결과는 장, 단점이 있는 것으로 판단되어 시뮬레이션 목적과 모델링 특성을 고려하여 적합한 프로그램의 선정, 모델링 및 시뮬레이션 가이드라인 작업을 통하여 최적의 작업과정 및 분석결과를 얻을 수 있다고 생각된다.

공동주택 주거 유형에 대한 분석결과는 전체 프로그램이 모두 의미있는 상관관계에 있으므로 어떤 프로그램을 사용하여도 상대적적인 관점에서 유형별로 시뮬레이션 결과를 비교 분석할 수 있었으나 Riuska의 경우, 항별 분석이 동일한 결과를 보여주고 있어 시급한 개선이 필요하다. 하지만, Riuska는 에너지성능평가프로그램과의 상관성이 높고 곡면 모델링 등 사용 편의성이 매우 높아 BIM기반의 건물에너지 시뮬레이션 작업에서의 효율은 매우 뛰어나다고 할 수 있다.

아직 BIM기반의 건물에너지 시뮬레이션 기법이 모든 건물에 적용될 수 있도록 완벽하진 않지만 선정된 공동주택 주동유형들에 대해 타당성있는 분석결과를 제시하였고 개방형 호환파일과 BIM기반의 건물에너지 시뮬레이션 기법에 대해 지속적인 연구와 적극적인 활용이 뒷받침된다면 설계단계 시 작성되는 BIM모델링을 이용하여 빠르고 간편하게 건물에너지 소비량분석을 실시할 수 있으며 이를 통하여 지속가능한 주거계획을 손쉽게 이룰 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음 (R11-2005-056-01001).

참고문헌

1. 권한솔 외 4인, 공동주택의 연간 난방부하 예측을 위한 단위 동법의 적정성, 한국건축친환경설비학회 춘계학술발표대회, 2008, pp.1-4.
2. 김민환 외 3인, 단지 규모 주택의 에너지 사용량 시뮬레이션

- 방법론에 관한 기초연구, 대한설비공학회 하계학술발표대회, 2008, pp.931-936.
3. 김시현 외 4인, 공동주택의 에너지 성능 최적화를 위한 개방 유형별 외피성능, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 28(1), 2008, pp.555-558.
4. 김언용 외 2인, Building Information Modeling (BIM)에서의 협업체계와 적용사례, 한국 CAD/CAM 학회 학술발표회 논문집, CAD/CAM/CAE System 2호, 2005, pp.689-692.
5. 김지영 외 2인, 답상형 공동주택의 주동배치 및 평면 계획에 따른 자연환기 성능 평가와 개선 방안, 대한건축학회논문집 계획계 제24권 제3호, 2008.
6. 김지원·육중호, IFC를 통한 BIM 데이터의 상호연동 시 문제점분석 및 개선방향 설정에 관한 연구, 한국건설관리학회 논문집 10(6), 2009. pp. 88-98.
7. 김치훈 외 3인, 외피 열성능에 따른 건물에너지효율등급 분석 연구, 한국태양에너지학회 논문집 29(5), 2009, pp.59-64.
8. 김치훈 외 3인, 건물외피 단열성능에 따른 건물에너지효율등급 평가 연구,
9. 대한건축학회, 건축환경계획, 기문당, 2003.
10. 문현준 외 3인, BIM 기반 건축환경 성능분석 인터페이스 개선방안 연구, 대한건축학회논문집 계획계 25(10), 2009, pp.271-278.
11. 박유원 외 2인, 한국형 아파트의 난방에너지 분석3: 실내설정 조건의 영향, 설비공학논문집 17(8), 2005, pp.722-728.
12. 박유원 외 3인, 한국형 아파트의 합리적 난방에너지 평가를 위한 자연환기 모델, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, 2004, pp.1202-1207.
13. 손보식, IFC 포맷을 활용한 BIM S/W의 건물정보모델 교환 방법론 연구, 대한건축학회논문집 계획계 25(3), 2009, pp.29-38.
14. 송승영 외 2인, 국내외 주거용 건물 에너지성능 인증제도 상의 건물 에너지성능 평가방법 비교분석, 한국건축친환경설비학회 추계학술발표대회, 2009, pp.275-278.
15. 안병립 외 3인, 지역에 따른 주거용 건물에너지효율등급 분석 연구, 한국태양에너지학회 논문집 29(5), 2009, pp.53-58.
16. 유기형 외 2인, 공동주택의 에너지효율등급 평가기법 개발 및 등급 설정에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 22(12), 2006, pp.319-326.
17. 유호선 외 4인, 한국형 아파트의 난방에너지 분석1: 위치의 영향, 설비공학논문집 16(1), 2004, pp.101-110.
18. 윤성환 외 2인, 공동주택의 세대위치별 열부하 특성 분석, 대한건축학회논문집 계획계 25(10), 2009, pp.289-296.
19. 이덕형, 공동주택의 입면 변화에 따른 일조 현황 분석: Skyline 변화를 중심으로, 광운대 대학원 석박사학위 논문, 2006.
20. 이봉진 외 3인, 한국형 아파트의 난방에너지 분석2: 난방방식에 따른 차이, 설비공학논문집 16(5), 2004, pp.459-466.
21. 이재혁 외 2인, 건물에너지효율등급 평가도구와 상세해석프로그램의 비교 분석, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, 2009, pp.3-8.
22. 인하대학교 건축환경설비 연구실 편저, TRNSYS를 이용한 건물 에너지 해석, 도서출판, 건기원, 2004.
23. 장원준 외 3인, 지속가능 건축을 위한 BIM기반 건축 설계 프로세스에 관한 기초적 연구, 한국문화공간건축학회논문집 26, 2009, pp.13-20.
24. 진승호, BIM(Building Information Modeling) 기반의 친환경 건축 시뮬레이션 시스템에 관한 연구, 한국건설관리학회 학술

- 발표대회, 2008. 11.
25. 정찬현 외 3인, 이중창호 적용을 통한 공동주택 에너지 소비량 저감 성능평가, 대한건축학회논문집 계획계 25(12), 2009, pp.393-401.
 26. 정찬현 외 4인, 서울 주거부문 에너지 소비량 저감 전략에 따른 효과 분석, 대한건축학회논문집 계획계 25(11), 2009.11, pp.323-331.
 27. 최원기 외 2인, 아파트의 열성능 분석을 위한 시뮬레이션 방법론에 관한 연구: TRNSYS를 이용한 모델링 방법론을 중심으로, 대한건축학회논문집 계획계 23(9), 2007, pp.155-162.
 28. 최현아 외 2인, 환경 분석에 기반한 건축 설계 프로세스에 관한 연구, 대한건축학회, 2008.
 29. 최현아 외 2인, 환경분석에 기반한 건축 설계 프로세스에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 28(1), 2008. 10. pp.643-646.
 30. 황선휘 외 2인, 저에너지 건축물 설계를 위한 BIM 기반 지원 도구 및 데이터베이스 관리방안 연구, 추계학술발표대회 논문집 8(2), 2008, pp.3-10.
 31. Arno Schlueter, Frank Thesseling, Building Information Model based Energy/Exergy Performance Assessment in Early Design Stages, Automation in Construction 18, 2009, pp.153-163.
 32. Chuck Eastman 외 3인 공저(이강 외 5인 공역), BIM Handbook, 시공문화사, 2009.
 33. David Nicholson-Cole, 「The GDL Cookbook」, Marmalade Graphics, 2001.
 34. DesignBuilder Software Ltd., 「DesignBuilder 2.1 Printable Documentation」. www.designbuilder.co.uk
 35. Eddy Krygiel · Bradley Nies, 「Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling」, Wiley Publishing, Inc., 2008.
 36. Encina Ltd., 「ArchiCAD gbXML Export Reference Manual」, 2008.
 37. Granlund, Riuska software help file.
 38. Graphisoft, 「Advanced Graphisoft EcoDesigner User Guide」, 2009.
 39. Tuomas Laine, Erja Reinikainen and et al., Intergrated LCA-Tool for Ecological Design, Seventh International IBPSA Conference, 2001. 8. pp.739-746.
 40. 에너지관리공단, 에너지 성능평가 프로그램,
<http://www.kemco.co.kr/building/v2>
 41. Autodesk, Green Building Studio,
<http://www.greenbuildingstudio.com>
 42. The Open Green Building XML Schema, Inc.(dba gbXML.org), <http://www.gbxml.org>

투고(접수)일자: 2010년 7월 20일

심사일자: 2010년 7월 22일

게재 확정일자: 2010년 8월 18일