



객체지향 물리적 모델링 기법을 활용한 BIM기반 통합 건물에너지 성능분석 모델 구축 및 활용을 위한 프레임워크 개발 - 건물 열부하 시뮬레이션 중심으로 -

A Framework Development for BIM-based Object-Oriented Physical Modeling for Building Thermal Simulation

정운성*

Jeong, WoonSeong*

* Corresponding author, Dept. of Architectural Engineering, Ewha Womans University, South Korea (wsjeong@ewha.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This paper presents a framework development for BIM (Building Information Modeling)-based OOPM (Object-Oriented Physical Modeling) for Building Thermal Simulation. The framework facilitates decision-making in the design process by integrating two object-oriented modeling approaches (BIM and OOPM) and efficiently providing object-based thermal simulation results into the BIM environment. **Method:** The framework consists of a system interface between BIM and OOPM-based building energy modeling (BEM) and the visualization of simulation results for building designers. The interface enables a BIM models to be translated into OOPM-based BEM automatically and the thermal simulation from the created BEM model immediately. The visualization module enables the simulation results to be presented in BIM for building designers to comprehend the relationships between design decisions and the building performances. For the framework implementation, we utilized the Modelica Buildings Library developed by the Lawrence Berkeley National Laboratory as a thermal simulation solver. We also conducted an experiment to validate the framework simulation results and demonstrate our framework. **Result:** This paper demonstrates a new methodology to integrate BIM and OOPM-based BEM for building thermal simulation, which enables an automatic translation BIM into OOPM-based BEM with high efficiency and accuracy.

© 2015 KIEAE Journal

KEYWORD

건물 열부하 시뮬레이션
건축정보모델링
물리적 모델링

Building Thermal Simulation
Building Information Modeling
Object-Oriented Physical Modeling

ACCEPTANCE INFO

Received August 24, 2015

Final revision received September 19, 2015

Accepted September 22, 2015

1. 서론**1.1. 연구의 배경 및 목적**

전 세계적으로 건물 에너지 사용량이 전체 에너지 소비량의 약 40%를 차지하고 있으며,¹⁾ 국내 조사에 따르면 건축물 및 건축물 내 시설물의 에너지 사용량은 국내 에너지 총 소비량의 약 25%를 차지하고 있다.²⁾ 이러한 건축물에서의 에너지 소비량 감소를 위해, 합리적인 기준 강화 및 여러 가지 제도적인 장치들을 수립하고 운영하고 있다. 대표적으로 건물 에너지 효율 등급 및 친환경건축물 인증제가 도입되었고, 2020년 건축물 부분 예상 에너지 소비량의 15% 절감을 목표로 2005년에 건설교통부에서 에너지 절약 설계기준을 강화하였다.^{2),3)} 또한 건축물 에너지 사용량을 줄이며 환경부하를 저감할 수 있는 친환경/저에너지 건축물 구축을 위한 기술 개발 및 연구가 활발히 진행되고 있으며, 설계단계에서 건축물의 에너지 사용 성능을 분석, 예측하는 기술

개발 및 적용이 점차 증대하고 있다^{4),5),6)}. 친환경 건축물 구축 기술들을 초기 설계단계에서 적용하기 위해서는 다양한 성능 분석 도구들의 활용이 필수적이며, 다양한 성능 분석 도구들을 통해 건축물의 에너지 성능 분석 및 에너지 소비량 예측이 가능하다. 이러한 건축물의 에너지 사용량 분석은 건축물 설계단계에서 결정되는 형상, 외피 구성 재료, 평면 및 배치 등의 요소들을 기반으로 산출된다. 즉, 건축물의 생애주기 동안 소비되는 건물 에너지 사용 총량을 산출하는 결정적인 요소들이 초기 설계단계에서 결정 이루어진다.⁷⁾ 결과적으로 초기 설계단계에서 에너지 성능 분석을 통해 생애주기 동안 소비되는 건축물 에너지 소비량 예측 과정이 친환경/저에너지 건축물 구축을 위한 필수적 과정으로 여겨지고 있다.

하지만, 다음과 같은 제약적 조건들로 인해 현재 설계단계에서 에너지 성능분석 도구의 효율적 활용이 어려운 상황이다.

- 설계과정에서 생성되는 정보들이 건축정보모델 기반 성능 분석 도구들 혹은 전통적인 에너지 성능분석 도구들과의 정보교환의 한계로 인해, 설계정보가 수동으로 재입력되는

과정이 수반되며 이로 인해 많은 시간과 노력이 요구된다.

- 현재 주로 사용되고 있는 에너지 성능분석 엔진들은 미국과 유럽의 기준에 맞추어 개발되었고 단위 호환의 문제와 국내 사용되는 자재별 열적 성능, 기후, 설계기준 등에 대한 상이함으로 인해 직접 적용의 어려움이 존재한다.⁸⁾
- 에너지 분석 전문가들에게 특화된 사용자 인터페이스로 인해 설계자들의 에너지 분석 도구들의 손쉬운 사용이 어려우며, 신뢰할만한 에너지 분석 모델 생성을 위해 많은 사전지식이 요구된다.
- 에너지 성능분석 결과들로 제공되는 많은 양의 숫자 기반의 테이블과 도표들은 설계자들로 하여금 설계된 건물 부재와 에너지 성능과의 직접적 상관관계를 효율적으로 파악하는데 어려움을 주고 있다.

한편, 건축정보모델링(Building Information Modeling, BIM)의 활용하여 에너지 분석 과정에 80% 정도의 시간과 노력이 수반되는⁴⁾ 3차원 모델링 과정을 효율적으로 지원하고 있지만, 건물 설계단계에서 건물에 포함되어 있거나 연관되어 있는 성능에 대한 분석을 위하여 설계와 성능분석 시뮬레이션이 보다 긴밀히 통합되어야 한다.⁷⁾ 따라서 설계단계에서 생성되는 BIM기반 설계정보를 에너지 분석과정에 보다 직접적으로 활용하여 에너지 분석과정의 효율성을 증대시키고, 건물부재기반의 성능분석 결과의 손쉬운 도출 및 실시간 설계단계의 효율적 반영을 가능케 하는 연구가 필요하다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 설계단계에서 건물 성능분석을 통한 설계 대안들 간의 의사결정 지원 환경을 개발하기 위해, BIM과 객체지향 물리적 모델링(Object-Oriented Physical Modeling, OOPM) 기반의 통합 성능분석 모델을 사용하여, BIM 기반 건물에너지 성능분석 시스템 인터페이스 개발 및 구현을 중심으로 연구가 진행되었다. 즉, BIM과 OOPM 기반 통합 건물에너지 성능분석 모델(OOPM-based Building Energy Model, OOPMBEM)간의 효율적 데이터 교환을 위해 BIM 기반 OOPMBEM 모델을 자동 생성하고 성능분석 결과를 BIM 환경에 효과적으로 제공하는 시스템 인터페이스 개발 및 구현에 주안점을 두었다. 본 연구를 위해 BIM 기반 통합 건물에너지 성능분석 모델 생성 및 분석 결과 자동 도출을 위한 데이터 흐름도를 작성하였다. 그림 1에서 표현되듯이, BIM 기반 OOPM 모델 생성을 위해 OOPM 모델 데이터 구조의 분석 및 필수 모델 정보의 변환이 이루어져야 한다. 이를 위해, 두 모델사이의 데이터 분석을 통한 데이터 변환 프로세스를 정의하고 이를 기반으로 모델 자동생성 시스템 인터페이스를 구현하였다. 구체적인 개발 단계는 다음과 같이 진행되었다.

- 1단계 (확장 BIM 모델 생성): BIM 기반 OOPM 모델을 통한 성능분석 시뮬레이션 실행을 위해, BIM 모델에서 결여된 재료 물성정보 및 공간경계정보와의 매핑을 위한 건물 부재간의 관계정보를 입력하는 단계를 설정하였다. 이를 위해, 일차적으로 OOPM 기반 참조 라이브러리의 자료구조 분석이 이루어졌고, 동시에 BIM 저작도구에서 제공하는 API(application

programming interface)를 통해 BIM의 자료구조를 분석하였다. 분석 결과를 기반으로 두 모델사이의 매핑관계를 정의한 뒤, BIM으로부터 OOPM 모델의 건물모델 기술정보를 생성할 수 있도록 필요 정보를 입력하였다. 사용자로부터 필수 정보의 입력과 건물 부재와의 관계정보를 추출하기 위해 관련 명령어를 API를 기반으로 제작하였다.

- 2단계 (BIM 기반 OOPM 모델 생성 및 시뮬레이션 실행): 생성된 확장 BIM 모델을 기반으로 성능분석 시뮬레이션을 위한 OOPM 모델이 자동 생성될 수 있도록 객체기반 프로그래밍 언어인 C#을 활용해 시스템 인터페이스를 제작하였다. 이를 위해, 일차적으로 참조 시뮬레이션 라이브러리와 연동을 위해, 객체기반 물리적 언어인 Modelica 언어를 통해 라이브러리의 핵심 클래스를 건물 모델 시점으로 새롭게 정의하였다 (ModelicaBIM 라이브러리 제작). 새롭게 정의된 ModelicaBIM 라이브러리를 통해, BIM 모델 정보를 OOPM을 위한 객체들로 전환될 수 있도록 시스템 인터페이스 내부에 함수들로 정의하였다. 이러한 함수들을 시스템 인터페이스 내부에서 호출함으로써, 건물모델 기술정보들(그림 1의 Model Description 부분)이 Modelica 기반의 객체 형태로 생성된다. 또한, 시스템 인터페이스를 통해 OOPM 모델 내부의 성능분석을 위한 컴포넌트들을 ModelicaBIM에서 미리 정의된 객체정보를 호출하여 건물모델 기술부분에서 정의된 객체와 연결함으로써 생성하였다 (그림 1의 Equation Description 부분). 완성된 OOPM 모델을 통해 성능분석 시뮬레이션이 즉시 실행될 수 있도록 특정 시뮬레이션 어플리케이션(Dymola)을 시스템 인터페이스 내부에서 호출할 수 있도록 관련 함수를 정의하였다. 또한 Dymola 내부에서 실행된 많은 성능분석 결과 중 선택된 결과만을 추출하기 위해, 스크립트 기반의 명령어를 Dymola에서 자동 실행할 수 있도록 시스템 인터페이스 내부에서 정의하였다.

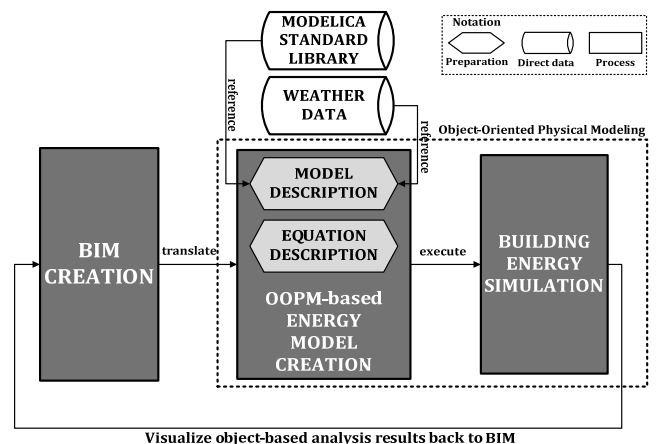


Fig. 1. Data flow diagram between BIM and OOPM-based Building Energy Model

- 3단계 (성능분석 결과의 제공): Dymola를 통해 준비된 그래프 기반의 성능분석 결과를 BIM 저작 도구 내에서 즉시 검토할 수 있도록 개발된 사용자 인터페이스를 시스템 인터페이스

스 내부에서 호출하였다. 사용자 인터페이스를 통해 설계자들은 도출된 결과를 빠르게 확인할 수 있고, 제공된 저장 기능을 통해 다른 성능분석 결과들과의 비교를 할 수 있다.

본 연구는 광범위한 성능분석 시뮬레이션 분야를 범위에 넣기에는 한계가 있어, 통합 성능분석 모델에 가장 중요시 되는 열부하 시뮬레이션(thermal simulation)을 중심으로 BIM 기반 객체 지향 에너지 성능분석 모델 개발을 위한 연구를 진행하였다. 즉, 본 연구에서는 열부하 시뮬레이션 모델을 BIM 기반 OOPM으로 자동 생성한 후, 열부하 분석 결과를 BIM 환경으로 즉시 제공하는 시스템 인터페이스 개발 및 구현을 중심으로 연구가 진행되었다.

2. 문헌조사

2.1. 기존 건물 에너지 시뮬레이션

미국 에너지 분과 보고서⁹⁾에 따르면, 400개 이상의 건물 에너지 시뮬레이션 도구들이 개발되어지고 있지만, 일부의 프로그램들만이 학계와 산업분야에서 널리 사용되고 있다.^{10), 11)} 건물 에너지 시뮬레이션 도구들은 건물 생애주기 동안의 에너지 성능과 열 쾌적성 평가를 목적으로 하고 있고, 입력 방식, 출력물, 사용자 인터페이스, 프로그래밍 언어, 그리고 컴퓨터 플랫폼에 따라 각기 다른 방식으로 개발되었다.⁹⁾ 예를 들어, DOE-2와 EnergyPlus는 에너지 시뮬레이션 도구 이외의 다른 S/W들 간의 데이터 교환을 가능하게 하는 기능들로 인해 건물 생애주기 동안 여러 단계에서 폭넓게 사용된다.¹⁰⁾ DOE-2, ESP-r 및 EnergyPlus와 같은 전통적인 시뮬레이션 프로그램들의 엔진들은 FORTRAN, C 및 C++와 같은 컴퓨터 프로그램 언어들 통해 개발되어 왔다.^{11), 15), 16), 17)} DOE-2.1E, EnergyPlus, 그리고 IESVE는 각기 고유의 사용자 인터페이스(GUI)를 제공하는데, BDL Processor는 DOE-2.1E를, DesignBuilder는 EnergyPlus를 위해 그리고 SunCast와 ApacheSim은 열분석을 위한 GUI로 IESVE를 위해 각각 개발되었다.^{18), 19), 20)}

이러한 GUI들은 건물 성능분석을 수동계산 시 발생하는 많은 시간과 노력을 효과적으로 줄여줌으로써 설계자들로 하여금 여러 디자인 대안들에 대한 효율적 건물 성능평가를 가능케 하였다.¹¹⁾ 현재 건물 성능분석 전문가들은 입력 파일 생성과 성능분석 결과 분석을 용이하게 해주는 Simergy, OpenStudio, DesignBuilder 그리고 IESVE와 같은 전용 GUI들을 사용한다.

하지만, 이러한 GUI들은 건물 성능평가 전문가 이외의 실무자들이 건물 에너지 성능분석을 원활히 수행하기 위해서는 심도 있는 열부하 반응에 대한 이해와 배경지식 및 에너지 시뮬레이션 자체에 관한 사전지식 습득이 요구된다.^{10), 12)} 그리고 개개인의 작업방식과 에너지 시뮬레이션 도구 자체의 복잡성으로 인해 에너지 성능분석 전문가뿐만 아니라 비전문가들 역시 GUI 사용에 어려움이 있다.^{13), 14)}

최근 들어, 건물설계 단계와 통합된 성능분석 프로세스를 제공하기 위해, BIM 기반 수치 분석 도구들이 부각되고 있다.²¹⁾ 기존 에너지 성능분석 전용 GUI들과 관련된 시뮬레이션 과정을 비

교해 볼 때, BIM 기반의 시뮬레이션 도구들은 다음과 같은 특징들이 있음을 알 수 있다.

- 설계과정에서 이미 생산된 건물 정보들을 건물에너지 모델 생성을 위한 GUI를 통해 재기입하는 과정을 생략함으로써, 기존 건물 정보들의 직접적인 재사용의 용이하다.
- 건물 성능 최적화를 위한 파라메트릭 디자인이 친환경 건물 설계를 위한 중요한 요소로 부각되는 점을 고려해볼 때, BIM 기반 건물 에너지 모델 생성 및 시뮬레이션이 디자인 커뮤니티에서 활발히 요구되고 있다.

결과적으로, 설계 과정에서 에너지 시뮬레이션의 보다 효율적 사용을 위해서, BIM 기반의 건물에너지 시뮬레이션 도구들은 1)사용하기 쉬운 GUI와 2)BIM과 건물에너지 모델 간의 효과적이고 효율적인 정보교환 및 모델변환을 위한 시스템 인터페이스, 그리고 3)시뮬레이션을 통한 분석 결과를 직관적이며 손쉽게 확인이 가능한 인터페이스 제공이 필요하다.

2.2. 건물 에너지 시뮬레이션을 위한 BIM

최근, BIM은 건축, 엔지니어링, 건설 산업에서 가장 대두되는 기술로써²²⁾, 다양한 저작 도구들(Revit Architecture, AECOsim Building Designer V8i, ArchiCAD)을 활용해 손쉬운 BIM 모델 저작이 가능하다. 이러한 도구들은 다음과 같은 이점들을 제공함으로써 디자인 과정에서 활발히 사용되고 있다.

- BIM은 건물 생애주기 동안 생성되는 건물부재정보 및 각 부재들의 속성정보들을 포함하는 종합적인 건물 정보들에 대한 접근을 가능하게 한다.²²⁾
- BIM을 활용한 파라메트릭 디자인은 설계단계 동안 진행되는 계획안에 대해 참여자들 사이의 빠른 상호 의견교환을 통한 실시간 설계정보 업데이트를 가능하게 한다.²³⁾

설계과정을 뒷받침할 수 있는 BIM의 역량은 건설 산업 및 건축 교육 전반의 변화를 일으킬 것이라고 예측되고 있다.²²⁾ 하지만, 다음과 같은 제약점들은 건물 시뮬레이션 수행에 있어 BIM의 직접적 사용을 어렵게 만들고 있다.

- 에너지 시뮬레이션을 위해 요구되는 필수 물리적 속성정보들의 일부 부재.
- BIM 저작도구들을 통해 생성된 BIM 모델의 초기 속성정보들에 에너지 시뮬레이션을 위한 실제 건물 데이터를 입력에 있어 지정된 파라미터의 수정 및 추가의 어려움.
- BIM과 에너지 시뮬레이션 사이의 서로 다른 객체 의미(object semantics)로 인한 정보 교환의 어려움.

예를 들어, 태양광 흡수율과 적외선 흡수율에 대한 파라미터 및 실제 데이터가 에너지 시뮬레이션 모델 생성에 있어 필수적이지만, 기존 저작 도구를 활용해 생성된 BIM 모델에는 이러한 정보들의 입력 및 수정이 어려운 상황이다. 또한, BIM 모델에서 생성된 방(room) 객체들은 에너지 시뮬레이션에서는 공간(zone) 정보로 정보 변환이 필요하며, 방 객체를 통한 건물 위상정보가 에너지 시뮬레이션에서는 공간경계정보로의 정보 매핑이 필요하다.

IFC와 gbXML과 같은 표준 데이터 모델을 통해 일부 에너지 시뮬레이션 도구들이 BIM과 정보 통합을 이루고 있지만, 신뢰할만한 에너지 모델 생성을 위해 공간정보에 대한 확인 및 수정과 같은 부차적인 과정이 요구된다.²⁴⁾ 예를 들어, DOE2.2를 기반으로 하는 Green Building Studio는 Revit을 통한 웹기반 에너지 분석을 제공하지만, 사용자들은 신뢰할만한 gbXML 파일 생성을 위해 에너지 시뮬레이션 설정들을 완료해야 한다. 더욱이, 현재 사용되는 BIM 기반 에너지 시뮬레이션 도구들이 에너지 모델 생성의 편의성을 제공하지만, 시뮬레이션 결과들을 설계과정에서 행해지는 의사결정에 직관적이며 효율적으로 반영하기에는 여전히 어려운 상황이다.²⁵⁾ 일반적으로, 에너지 시뮬레이션 도구들은 테이블과 도표를 통해 많은 양의 수치 기반 결과들을 제공한다. 이러한 시뮬레이션 결과들의 표현들은 건물성능과 설계 부재들 간의 상관관계를 표현하는데 어려움이 있다. 즉, 제공되는 테이블과 도표만으로 설계 부재단위 대비 전체 건물성능 영향 정도를 직관적이며 효율적으로 파악하기에는 어려움이 있다.

결과적으로, 설계자들이 여러 설계 대안들 간에 성능분석 결과를 통한 효율적 의사결정을 진행하기 위해, 충분한 정보를 실시간으로 제공받기에는 어려운 상황이다. 기존의 BIM 기반 건물성능분석 접근 방법과 비교해 볼 때, 본 연구에서 제시하는 방법론을 통해 OOPM 기반 시뮬레이션 엔진을 사용한 BIM 기반 OOPM 에너지 모델을 실시간으로 자동 생성할 수 있으며, 도출된 성능평가 결과를 실시간으로 설계자에게 제공할 수 있다.

2.3. 건물 에너지 시뮬레이션을 위한 객체 기반 물리적 모델링

다중 도메인 시뮬레이션의 효과적 이용을 촉진하기 위해서, 객체기반 물리적 모델링(OOPM)이 개발되어 왔다.²⁶⁾ OOPM은 구조화된 수식 기반의 모델링 기술들을 제공함으로써 빠르게 성장하는 연구 분야이다.²⁷⁾ OOPM의 효율적인 구현을 위해 단 일화 된 새로운 Modelica 언어가 개발되었고, Modelica 언어를 통해 엔지니어들과 설계자들은 대수미분식 기반의 동적행동 모델링을 용이하게 수행할 수 있게 되었다.²⁷⁾

또한, Modelica 기반의 OOPM(Modelica based OOPM, ModelicaOOPM)은 에너지 시뮬레이션에서 일어나는 복잡한 물리적 시스템의 설계를 용이하게 해주었다.²⁸⁾ 이러한 에너지 시뮬레이션을 위한 ModelicaOOPM은 빠른 모델 추가와 하위 시스템 모델들의 추출이 용이하다는 점에서, 여러 대안들의 신속한 평가를 위한 가상의 프로토타입핑을 ModelicaOOPM을 통해 쉽게 구현할 수 있다.²⁷⁾

2.4. BIM 기반 OOPM 모델의 필요성

ModelicaOOPM 에너지 모델은 구현된 각각의 에너지 관련 부재들 간의 위상(topology) 정보를 제공해 줌으로써, 객체 지향 건축 모델링(BIM)에서의 건물위상정보와 자연스러운 데이터 매핑(room-to-zone translation)이 가능하다.

미국 로렌스 버클리 국립 연구소는 Modelica 기반 에너지 시뮬

레이션 라이브러리(LBNL Modelica Buildings Library)를 개발하였고, 열전달 모델링과 시뮬레이션 시스템을 ModelicaOOPM으로 구현하였다.²⁶⁾ 배포된 라이브러리는 객체 지향 건물 에너지 시뮬레이션을 위한 동적 모델과 제어 시스템 구현을 위한 클래스들을 정의하였고 각종 열부하 시뮬레이션을 지원한다.²⁹⁾ 하지만, 라이브러리 사용자들은 건물 모델을 생성하고 시뮬레이션 결과를 확인하기 위해서는 Modelica 프로그래밍 지식과 에너지 시뮬레이션에 관한 경험이 필수적이다. 라이브러리와 연동된 ModelicaOOPM을 BIM을 통해 자동 생성하고 시뮬레이션 결과를 BIM 환경에서 표현된다면, 건물 설계자들은 손쉽게 에너지 시뮬레이션 결과를 확인하고 다수의 대안들 사이의 효율적인 의사결정 도구로써 ModelicaOOPM 모델을 활용할 수 있다.

3. BIM 기반 객체지향 물리적 에너지 성능 분석 모델 생성 및 에너지 시뮬레이션을 위한 프레임워크 개발

3.1. 개발 개요

본 연구는 BIM 기반 객체지향 물리적 에너지 모델을 활용해 초기 설계 단계부터 실시간 건물 성능분석을 적극적으로 수행할 수 있는 기술을 개발하여 프로세스 중심의 친환경 성능분석이 가능하게 하는 것이 본 연구의 궁극적인 목표이다. 이를 위해 BIM 도구를 기반으로 한 실시간 건물 에너지 성능분석 프레임워크를 개발하였다. 즉, 설계과정에서 바로 실시간으로 BIM 기반 물리적 에너지 성능분석 모델을 생성 후, 건물 에너지 성능분석이 실행되어 성능분석 결과를 설계자에게 바로 전달되어 설계가 진행되는 성능분석 기반 설계 환경을 만들고자 하였다. 앞서 논의한 것과 같이 본 연구에서는 방대한 건물 에너지 성능분석 중에서 가장 핵심이 되는 열부하 시뮬레이션에 초점을 맞추었다. 즉, BIM 모델을 통해 자동 생성된 객체기반 물리적 모델이 참조된 에너지 시뮬레이션 엔진(LBNL Modelica Buildings Library)을 통해 각 건물 부재의 열 흐름, 실내 연간 온도변화, 연간 냉난방 부하와 같은 열부하 시뮬레이션이 자동으로 실행된다. 또한 계산된 시뮬레이션 결과는 즉시 BIM 저작 도구에서 표현됨으로써, 설계자로 하여금 원하는 부재의 시뮬레이션 결과를 실시간으로 확인할 수 있게 하였다.

본 프레임워크(BIM2OOPMBEM)는 기존 BIM 도구를 기반으로 하는 일종의 add-in 형태로 구현되었다. 즉, 사용 BIM 저작 도구인 Revit Architecture 2013(이후에는 Revit)을 활용하여 BIM 모델을 저작하였고, Autodesk에서 제공하는 SDK(software development kit) API를 활용하여 add-in 형태의 프로토타입(Revit2Dymola)을 개발하였다. 즉, Revit2Dymola 실행을 통해, BIM 기반 Modelica 물리적 모델(BIM based Modelica OOPM, BIMModelicaOOPM)의 자동 생성 및 에너지 시뮬레이션 구동 환경(Dymola)과의 데이터 교환 및 통신이 이루어지도록 구현하였다.

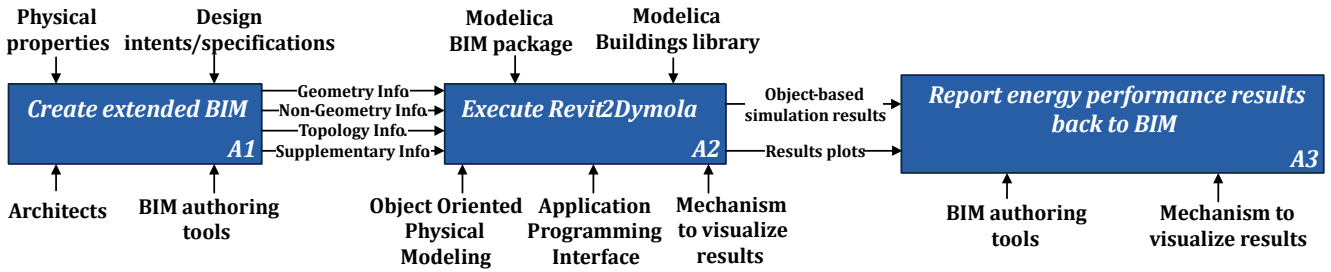


Fig. 2. Overall process diagram for the BIM2OOPM framework describing data flow for the model translation to create BIM-based ModelicaOOPM models, the thermal simulation, and the simulation results representation into BIM

3.2. BIM2OOPMBEM 프레임워크 개발 방법

BIM2OOPMBEM 개발은 세단계로 구성되는데, 1) 확장 BIM 모델을 생성하기 위한 사전처리 단계, 2) Revit2Dymola 프로토타입 개발, 그리고 3) 검증에 의해 벤치마크 에너지 모델을 활용한 사례 연구 수행 단계로 진행하였다.

1) 확장 BIM 모델 생성을 위한 사전처리 단계

BIMModelicaOOPM 에너지 모델 생성을 위해, BIM 모델에 정의되어 있지 않지만 에너지 모델에서는 요구되는 파라미터들을 추가, 혹은 기존 파라미터들의 변환, 그리고 새로이 요구되는 값에 대한 계산 과정을 포함하는 일련의 사전처리 과정을 고안하였다. 파라미터 추가 과정은 현재 BIM 모델에 정의되어 있지 않거나 수정이 필요하며, BIM과 에너지 모델 사이의 객체 매핑과 BIMModelicaOOPM 모델 생성을 위해 요구되는 필수 정보를 추가하는 단계이다. 이를 위해, AddingPhysicalParameters 명령어를 개발하여 에너지 모델에서 요구되는 물성정보들을 BIM 모델에 추가하였다.

예를 들어, BIM에서는 벽, 바닥, 지붕, 창문, 문등과 같은 객체들은 3D 객체로 인식하지만, 에너지 모델에서는 BIM에서 정의된 3차원 객체를 면적만을 고려한 면들(surfaces)로 인식한다. 또한, BIM과 선택된 시뮬레이션 엔진(LBNL Modelica Buildings Library)사이의 정보 변환이 필요하다. 예를 들어, BIM에서 방으로 인식된 정보를 공간이라는 정보로 변환하기 위해 방 객체를 형성하는 주변 객체들(벽, 바닥, 지붕 혹은 천정)의 정보를 기반으로 공간경계정보로의 변환이 필요하다. 이를 위해 방 객체를 BIM에서 생성하여, 방 객체 단위로 벽들의 분할 및 바닥과 지붕 관계를 방 객체안의 미리 정의된 파라미터를 통해 입력하였다.

파라미터 계산 과정은 BIM 모델 안에 정의되거나 새롭게 추가된 정보 값들을 조합하여, 창문틀 비율과 같은 파라미터에 새로운 값을 계산하는 과정이다. 추가되는 계산 과정을 수행하기 위해 기존의 객체에 새로운 파라미터를 정의하고 입력된 값을 통해 필요한 정보를 계산하도록 구현하였다.

이러한 두 모델사이의 상이한 객체 인식의 차이, 혹은 정보 값들의 부재로 인해 에너지 모델에서 요구하는 정보들을 추가할 수 있도록 Revit API를 활용하여 새로운 명령어를 개발하였다. 또한, 기존 파라미터를 이용 혹은 새롭게 추가하여 에너지 모델에서 요구하는 정보들을 생성할 수 있도록 개발하였다.

2) Revit2Dymola 프로토타입 개발

Revit2Dymola 프로토타입은 1) BIMModelicaOOPM 모델을 자동 생성함으로써, BIM 모델과 LBNL 라이브러리 기반 ModelicaOOPM 모델 사이의 손실 없는 정보 교환을 가능하게 해주며, 2) BIMModelicaOOPM 모델을 통한 에너지 성능분석 시뮬레이션을 실시간으로 실행시키며, 그리고 3) 도출된 객체 기반 에너지 성능분석 결과 값들을 다시 Revit 환경에서 제공하는 역할을 수행한다. Revit2Dymola 프로토타입은 시스템 인터페이스와 사용자 인터페이스로 구성되는데, 시스템 인터페이스를 통해 BIMModelicaOOPM 모델의 자동생성 및 성능분석 시뮬레이션이 실행되며, 사용자 인터페이스를 통해 설계자들은 객체 기반 성능분석 결과들의 확인 및 저장할 수 있어 일련의 성능분석 결과들을 쉽게 비교할 수 있다. 시스템 인터페이스 개발을 위해 CreatingBuildingTopology 명령어를 개발하여 BIM 모델의 건물위상정보를 에너지 모델의 공간경계정보로 전환하였고, 확장된 BIM 모델 정보를 통해 Modelica 코드들로 구성된 BIMModelicaOOPM 모델을 생성하도록 개발하였다. 예를 들어, 4개의 외벽들과 바닥, 지붕으로 구성되어 하나의 방을 형성하는 건물에 대해, BIM 모델에서 인식한 4개의 외벽을 CreatingBuildingTopology 명령어를 통해 시뮬레이션 엔진에서 인식하는 외부경계 정보(construction boundary) 값으로 전환하여 경계 값이 4인 Modelica 코드를 생성할 수 있다.

3) 프레임워크 검증에 의한 사례 연구 수행

BIM2OOPMBEM 프레임워크의 검증에 의해 벤치마크 에너지 모델인 BESTEST Case 600을 사용한 사례 연구를 진행하였다. 검증은 서로 다른 시뮬레이션 도구들을 사용하여 성능분석 결과 값(실내 온도와 냉난방 부하)들을 비교를 통해 수행하였다.

3.3. BIM2OOPMBEM 프레임워크 구현

BIM2OOPMBEM 프레임워크는 그림 2에서 보이는 것과 같이 3단계의 구현 프로세스로 구성되는데, IDEFO³⁰⁾ 모델 표현기법을 통해 각 단계에서 요구되는 제어(Control), 메커니즘(Mechanism), 그리고 입출력 정보를 표현하였다. 예를 들어, 확장 BIM 모델 생성(A1)을 위해, Revit이라는 BIM 저작 도구를 메커니즘으로 사용하였고, 많은 물리적 특성 중에 에너지 모델에서 요구되는 재료의 물성정보를 규정하기 위해 물리적 속성(physical properties)을 제어로 사용하였다. 각 단계를 통해 구현

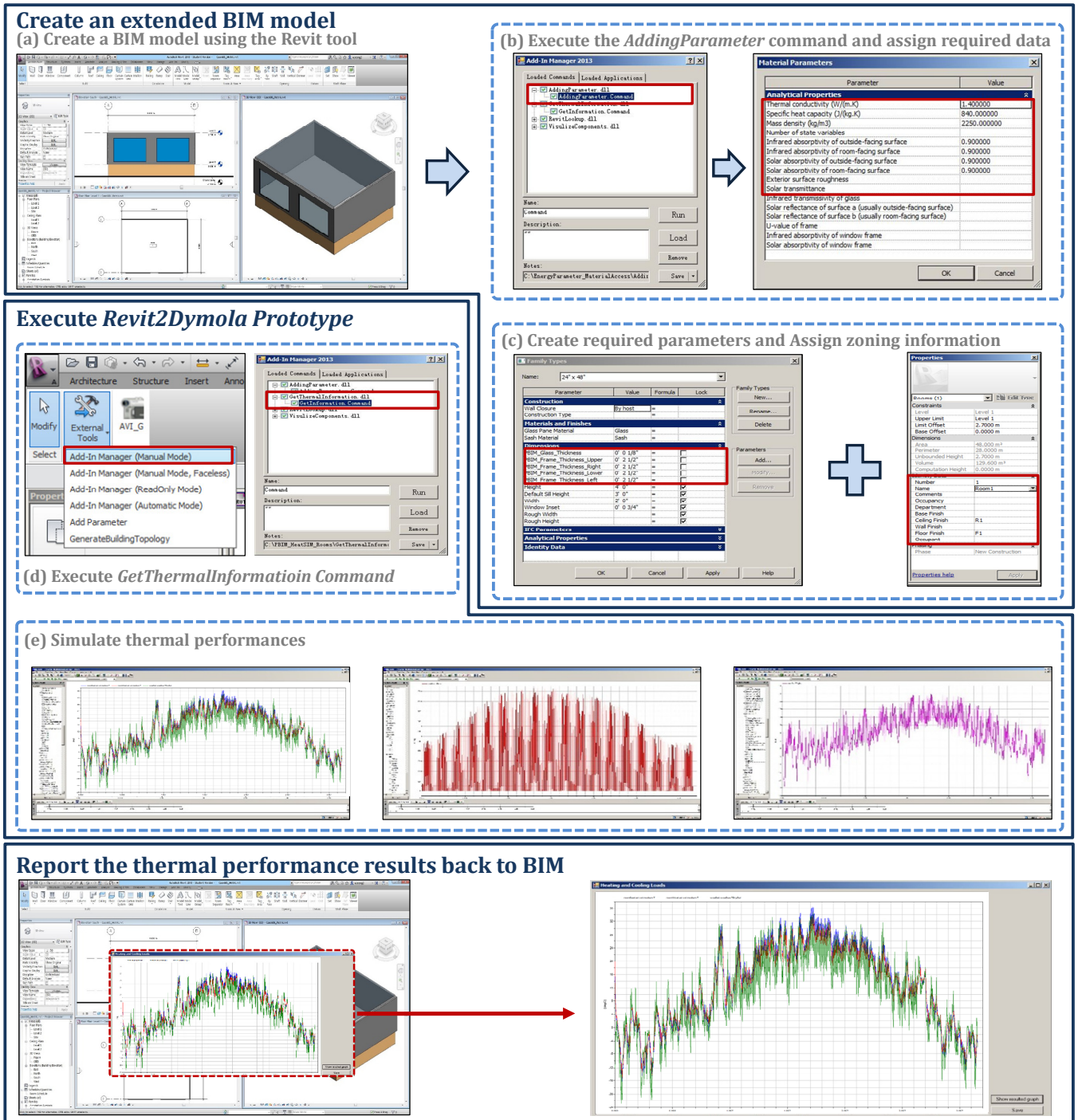


Fig. 3. BIM to ModelicaOOPM workflow by using the BESTEST Case 600 model as a case study

되는 내용은 다음과 같다.

1) 확장 BIM 모델 생성(그림 2의 A1)

BIMModelicaOOPM 모델은 확장 BIM 모델 생성 단계를 통해 참조된 시뮬레이션 엔진에서 요구하는 재료의 물성정보를 포함할 수 있게 된다. 이를 위해, AddingPhysicalParameters 명령어를 Revit API를 기반으로 C#언어로 개발하였고 그림 3의 b)에서 보이는 것과 같이 기존 BIM 모델에서 정의되지 않은 물리적 속성 파라미터들이 정의되어 있고 입력창을 통해 관련 값들을 BIM 모델에 입력할 수 있도록 구현하였다.

또한, 에너지 시뮬레이션 엔진에서 정의된 각 창문의 창문틀 비율 정보를 BIM 모델 정보를 통해 BIMModelicaOOPM 모델에 정의될 수 있도록 필요한 파라미터들을 정의하였다. 즉, BIM 모델의 생성된 창문 정보를 통해 생성된 창문틀 비율을 계산하기 위해 필요한 파라미터들을 그림 3의 c)의 왼쪽 그림과 같이 구현하였다.

끝으로, 열부하 시뮬레이션을 위한 공간경계정보 값들이 반드시 정의되어야 하는데, BIM 모델의 객체 정보를 공간경계정보들로 전환하기 위해 객체간의 관계 설정이 필요하였다. 이를 위

해, 공간경계정보를 필요로 하는 시뮬레이션 엔진의 공간 객체(zone)는 BIM 모델안의 방(room)이라는 객체로부터 전환될 수 있도록 하였다. 또한, 방이라는 객체를 통해 공간경계정보 값들을 생성하기 위해, 방을 형성하는 객체들(벽, 바닥, 천정(혹은 지붕))과 방과의 관계설정이 필요하다. 방 객체 안에 기본적으로 정의된 천장마감과 바닥마감이라는 파라미터를 통해 방 객체와 연결된 천장(혹은 지붕)과 바닥의 관계를 설정할 수 있었고, 설정된 관계 정보는 *CreatingBuildingTopology* 명령어를 통해 건물위상정보를 통한 공간경계정보 전환 시 추출되어 공간경계정보 값들로 생성된다. (그림 3의 c)의 왼쪽 그림 참조)

2) *Revit2Dymola* 프로토타입 실행(그림 2의 A2)

열부하 시뮬레이션을 위해 요구되는 에너지 정보들로 갱신된 확장 BIM 모델이 생성되면(그림 2의 A1 단계), *BIM2OOPMBEM* 프레임워크는 *Revit2Dymola*를 통해 *BIMModelicaOOPM* 모델을 생성, 열부하 시뮬레이션 실행, 그리고 시뮬레이션 결과 값들을 출력한다.

① BIM 기반 *ModelicaOOPM* 모델 생성

*Revit2Dymola*는 BIM과 LBNL Modelica Buildings library 시뮬레이션 엔진 각각의 자료구조와 두 모델 사이의 객체 의미론을 활용하여 *BIMModelicaOOPM* 모델을 생성한다. 즉 확장된 BIM 모델로부터 설계자 관점보다는 엔지니어 관점으로 구성된 *ModelicaOOPM* 에너지 모델을 BIM 모델과 동일한 건축모델 관점으로 구성된 *ModelicaOOPM* 모델을 생성하였다. 예를 들어, 열부하 시뮬레이션을 위해서 LBNL Modelica Buildings library의 *MixedAir* 클래스를 통한 객체를 생성이 필요한지만, *MixAir* 클래스에서 요구하는 속성정보를 건축모델 관점인 새로운 Room 클래스의 속성정보들로 맵핑시켰다. Room 클래스와 같은 래퍼클래스(wrapper class)를 통해 BIM 모델과 동일한 객체 의미론을 따르는 에너지 모델을 생성하였다. Room 클래스와 같은 래퍼 클래스뿐만 아니라 Floor, Roof, Wall, 그리고 Material과 같은 건축 모델 관점의 새로운 클래스들을 Modelica 언어로 정의한 후, *BIMModelicaOOPM* 모델의 건물 모델 정보를 정의된 클래스들로부터 생성된 객체들로 구성하였다. (그림 4 참조)

```

1 FBIM.BIMPackage.Material Walls181758(x=0.2032, k=1.4, c=840, d=2240, R=0.145142857142857)
2 *;
3
4 FBIM.BIMPackage.Material Floors181951(x=0.2032, k=1.4, c=840, d=2240, R=0.145142857142857)
5 *;
6
7 FBIM.BIMPackage.Material Roofs182021(x=0.2032, k=1.4, c=840, d=2240, R=0.145142857142857)
8 *;

```

Material

Fig. 4. A partial Modelica code block representing material objects for wall, floor, and roof generated by *Revit2Dymola*

그림 4에서 보이는 것과 같이 Modelica 언어를 사용하여 건축 모델 의미론을 따르는 객체들을 자동생성하기 위해, *ModelicaBIM* 패키지를 개발하였다. *ModelicaBIM* 패키지는 BIM과 같은 의미론을 따르는 클래스들을 포함하고 있으며, 각각의 클래스들은 에너지 모델에서 요구하는 속성들이 정의 되어 있다. 예를 들어, 그림 4에서와 보이는 것과 같이, Material이라는 클래스는 사용된 재료의 두께(x), 열전도율(k), 열용량(c), 질량밀도(d), 열저항

(R)과 같은 속성정보들을 정의하고 있으며, 두께에 대한 정보 값은 BIM 모델에 이미 정의되어 있는 값으로 대체되어 진다.

이러한 *ModelicaBIM* 패키지를 통한 건물 모델 정보를 표현하는 객체들을 BIM 모델로부터 자동생성하기 위해, Revit API와 C#을 활용하여 일련의 함수들(functions)을 개발하였다. 개발된 함수들은 또한 *BIMModelicaOOPM* 모델이 시뮬레이션 엔진을 통해 열부하 시뮬레이션이 실행될 수 있도록 에너지 객체들(예, 날씨 정보를 제공하는 기상 파일 연결을 위한 객체)을 생성하며, 공간경계정보 값을 계산하여 방 객체가 포함하는 공간경계 정보 변수의 값을 제공한다. 즉, 확장 BIM에서 생성된 벽들과 이미 정의된 방과 천정, 바닥과의 관계 정보를 *CreatingBuildingTopology* 명령어를 통해, 건물 모델의 형태와 정의된 방 객체들의 개수에 따라 공간경계정보 값들이 계산되어 *BIMModelicaOOPM* 모델의 정의된 변수의 대응 값들로 제공한다.

이렇게, *Revit2Dymola*는 열부하 시뮬레이션이 실행될 수 있도록 *BIMModelicaOOPM* 모델을 확장된 BIM 모델과 LBNL Modelica Buildings library, 그리고 *ModelicaBIM* 패키지를 통해 생성한다.

② 열부하 시뮬레이션 실행

생성된 *BIMModelicaOOPM* 모델을 실시간 열부하 시뮬레이션 실행을 위해, Dymola³¹⁾라는 통합개발환경(Integrated Development Environment, IDE) 시뮬레이션 어플리케이션을 사용하였다. Dymola는 사용자가 Modelica 언어를 활용하여 OOPM 모델을 생성할 수 있게 환경을 제공해줄 뿐 아니라, 생성된 *ModelicaOOPM* 모델을 통해 건물 성능분석 시뮬레이션을 실행이 가능하다. 본 연구에서는 Dymola 어플리케이션을 *BIMModelicaOOPM* 모델 생성을 위한 저작 도구로 활용하였고, LBNL Modelica Buildings library를 열부하 시뮬레이션에 연동될 수 있도록 Dymola 환경을 설정한 후, *Revit2Dymola*를 통해 시뮬레이션이 구동되도록 개발하였다. 즉, *Revit2Dymola*가 *BIMModelicaOOPM* 모델을 Modelica 코드로 생성 후, 곧바로 Dymola를 통해 열부하 시뮬레이션이 실행될 수 있도록 *Revit2Dymola* 내에 관련 함수들을 개발하였다. 이를 위해, C# 언어를 통해 Dymola 내의 시뮬레이션 구동을 위한 구체적인 명령어들(execute, plot 등)을 호출할 수 있는 함수들을 개발하였다. (그림 3의 Execute *Revit2Dymola* 부분 참조) 또한, Revit과 Dymola 사이의 통신을 위해, .NET 기반 어플리케이션들이 동적 데이터 교환이 가능하게 해주는 NDde 라이브러리를 사용하였다. NDde 라이브러리는 다음과 같은 Dymola 명령어들이 *Revit2Dymola*를 통해 실행될 수 있게 해주며, Dymola 명령어 실행에 의해 열부하 시뮬레이션이 시작되고 계산된 결과를 그래프를 통해 표현된다.

- *OpenModel*: 시뮬레이션 전체 시간과 시간 간격이 설정된 에너지 시뮬레이션을 실행시키기 위해, *Revit2Dymola*에 의해 생성된 Dymola 파일을 여는 명령어.
 - *IncludePlot*: 시뮬레이션 완료 후, 계산된 성능분석 결과들 중에서 요청된 결과 값만을 그래프로 생성하는 명령어.
- OpenModel*과 *IncludePlot* 명령어는 스크립트 형식으로

Revit2Dymola에 의해 생성되며, simulate와 같은 구체적인 Dymola 명령어를 포함하고 있으며, NDde를 통해 Revit2Dymola가 Dymola에게 두 명령어를 실행시킬 수 있도록 요청할 수 있다. 즉, Dymola 어플리케이션이 시뮬레이션 시간과 BIMModelicaOOPM 모델이 생성된 파일 경로 정보를 입력받은 후, 열부하 시뮬레이션이 Revit에서 백그라운드 형태로 자동 실행된다.

③ 시뮬레이션 결과 값들 출력

Modelica를 활용한 시뮬레이션은 객체 기반 결과 값들을 제공하며, LBNL Modelica Buildings library를 사용한 BIMModelicaOOPM은 설계자에게 건물부재 기반 열부하 성능 평가 결과들(방 온도 변화, 열전도에 의한 열 흐름, 냉난방 부하 등)을 제공한다. 이러한 기능들은 설계자들이 건물 전체의 성능 확인뿐만 아니라, 각각 건물 부재에 대한 성능 확인에 도움을 줄 수 있으며, 성능저하가 발생하는 부재에 대한 개선 방향을 결정하는 지원 도구로 사용될 수 있다.

Revit2Dymola는 Revit에서 선택된 부재에 대해 열부하 정도를 확인할 수 있게 제공한다. Revit2Dymola에 의해 생성된 Dymola 스크립트들은 자동으로 BIMModelicaOOPM의 대응되는 객체들이 선택될 수 있게 해주며, 이를 기반으로 시뮬레이션 결과 값이 그래프로 제공된다. (그림 3의 (e) Simulate thermal performance 부분 참조)

3) 객체기반 에너지 성능분석 결과를 BIM 모델에 제공(그림 2의 A3)

마지막 단계로, 설계자에게 객체 기반 데이터 그래프로 표현된 시뮬레이션 결과를 제공하기 위해, 본 연구에서는 다음 2가지 기능을 구현하였다. (그림 3의 Report the thermal performance results back to BIM 부분 참조)

- 생성된 결과 그래프의 시각화
그림 3의 e)부분에서 보이는 것과 같이 Dymola를 통해 데이터 그래프가 생성되면, 설계자들이 Revit 내에서 즉시 시뮬레이션 결과 그래프를 확인할 수 있도록 사용자 인터페이스 창을 개발하였다. 이러한 기능을 통해 결과 그래프와 BIM 모델의 대응되는 건물 부재와의 연결이 가능하다.
- 제공된 결과 그래프의 저장 및 종료
Dymola를 통해 생성된 데이터 그래프가 Revit에서 시각화 단계가 완료된 후, 저장 버튼을 통해 시각화된 그래프를 .JPG와 같은 파일 형식으로 저장할 수 있다. 이러한 기능을 통해 설계자들은 다른 디자인 옵션들에 대한 성능평가 비교에 활용할 수 있다.

4. 프레임워크 검증

본 연구에서는 개발된 BIM2OOPMBEM 프레임워크를 검증하기 위해서, 사례분석을 시행하였다. 본연구의 사례분석을 위해 BIM2OOPMBEM 프레임워크를 BESTEST Case 600³¹⁾에 적용시킨 후, 두 개의 ModelicaOOPM 모델의 결과

값을 비교하였다. 프레임워크 적용을 위해, BESTEST Case 600 모델을 Revit을 통해 생성 후, BIMModelicaOOPM생성을 위해 확장 BIM 모델 생성 단계를 시행하였다. 그리고, Revit2Dymola 프로타입을 실행시켜 확장 BIM 모델을 BIMModelicaOOPM로 전환하였고 열부하 시뮬레이션을 실행시켰다. 끝으로 Dymola를 통해 생성된 객체기반 시뮬레이션 결과 값들 중, 방 온도 변화 값과 냉난방 부하 결과 값을 Revit을 통해 나타내었다. 시뮬레이션 결과 값 검증을 위해, 2가지 ModelicaOOPM 모델을 준비하여 결과 값을 비교하였다. 하나는 Revit2Dymola를 통해 자동 생성된 ModelicaOOPM 모델(BIMModelicaOOPM)이고, 나머지는 LBNL Modelica Buildings library에서 제공하는 방법론을 수동으로 적용시켜 생성하였다. 프레임워크 검증을 위해 본 연구는 제시한 2가지 버전의 모델을 통해 생성된 시뮬레이션 결과 값이 매우 유사하거나 같을 것이라는 가설을 설정하였고 이를 검증하였다.

4.1. 프레임워크 적용

BESTEST Case 600 모델에 BIM2OOPMBEM을 적용시키기 위해 다음과 같은 모델 설정^{31),32)}에 기초하여 Revit을 통해 그림 3의 (a)와 같이 BIM 모델을 생성하였다.

- 하나의 공간으로 구성된 방 객체의 가로, 세로, 높이는 각각 8.0m, 6.0m, 2.7m이다.
- 남쪽을 향하는 6.0m²의 창문이 남쪽 외벽에 존재하며 내부에는 문이 존재하지 않는다.
- 건물 외벽의 재료는 표1에서 기술된 물성으로 정의된다.
- 건물 음영(building shading)이 존재하지 않으며, 재실자와 기구에 의한 내부 열 획득도 발생하지 않는다.
- 건물 바닥은 지상에 접하지 않은 상태로 지상보다 높은 위치에 존재한다.
- 건물은 미국 콜로라도 덴버에 위치하며, 덴버의 기후 상태를 따른다.
- 건물은 경량 구조로 건축되었으며, 20° C의 난방과 27° C의 냉방 설정 온도를 갖는다.

Table 1. Material specification for BESTEST 600 from [31] and [33]

Material	Thickness (m)	Thermal conductivity (W/m K)	Specific heat capacity (J/kg K)	Mass density (kg/m ³)
Floor(outside to inside)				
Insulation	1.003	0.040	0	0
Timber flooring	0.025	0.140	1200	650
Roof(outside to inside)				
Wood siding	0.019	0.140	900	530
Fiberglass quit	0.1118	0.040	840	12
Plasterboard	0.010	0.160	840	950
Exterior wall(outside to inside)				
Wood siding	0.009	0.140	900	530
Fiberglass quilt	0.066	0.040	840	12
Plasterboard	0.012	0.160	840	950

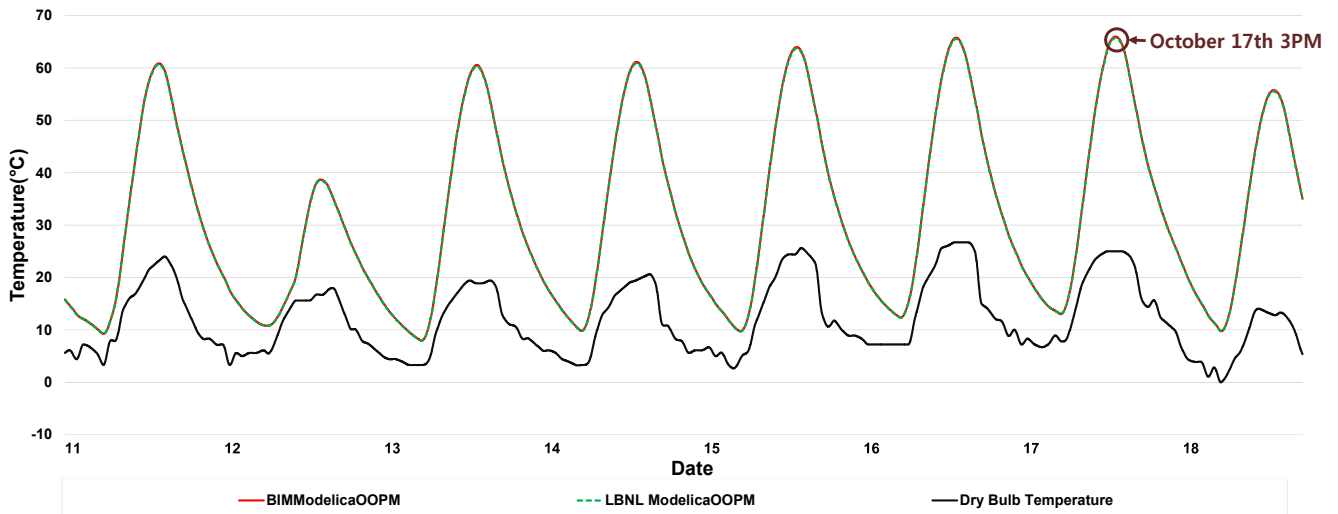


Fig. 5. Maximum temperature comparison between BIMModelicaOOPM and LBNL ModelicaOOPM from October 11th to 18th.

열부하 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 간격은 3600초, 총 시뮬레이션 시간은 1년으로 설정하였다.

그림 3의 (a)와 같이 제시된 모델 설정에 근거한 BIM 모델을 생성 후, 확장 BIM 모델을 생성하기 위해 3장에서 언급한 단계들을 진행하였다.

1) 표1과 같은 부가적인 재료의 물성을 각 건물 부재를 형성하고 있는 재료에 추가하기 위해 그림 3의 (b)와 같이 *AddingPhysicalParameters* 명령어를 실행시켜 구체적인 값들을 적용시켰다.

2) 남쪽 외벽에 존재하는 창문에 그림 3의 (c)와 같이 창문틀 비율을 계산하기 위한 파라미터를 생성한 후, 참고 문헌에 설정된 창문틀의 구체적인 값으로 설정하였다.

3) 방 객체를 통해 BIMModelicaOOPM 모델의 공간 객체를 정의하기 위해 그림 3의 (c)와 같이 방 객체를 설정하고 생성된 바닥과 지붕의 객체의 이름을 방 객체의 속성 창을 통해 명시하였다.

확장된 BIM 모델이 생성된 후, 그림 3의 (d)와 같이 *Revit2Dymola* 프로토타입을 실행시켰다. 프로토타입내의 *CreatingBuildingTopology* 명령어를 통해 BIMModelicaOOPM 모델의 공간경계정보 변수들의 값들이 계산되어 적용되며, 그림 4와 같은 건축모델 관점으로 표현된 BIMModelicaOOPM 모델이 생성된다. BIMModelicaOOPM 모델이 생성되면, NDde 라이브러리를 통해 Dymola 어플리케이션이 BIMModelicaOOPM 모델이 기술된 파일을 열고 열부하 시뮬레이션을 실행시킨다. (그림 3의 (e) 참조). 시뮬레이션 실행 후, 그림 3에서 나타나듯이 시뮬레이션 결과 값을 그래프로 표현한 실행 창이 Revit을 통해 제공된다.

이와 같이 BIM2OOPMBEM을 BESTEST Case 600에 적용 시킴으로써, BIM을 설계 및 건물 성능분석을 위한 공통 사용자 인터페이스로 적용시킬 수 있으며, BIM과 라이브러리 기반 ModelicaOOPM 사이의 정보 호환성을 지원할 수 있을 것으로 기대된다.

4.2. 시뮬레이션 결과 값 비교 및 분석

시뮬레이션 결과 값의 검증은 위해, *Revit2Dymola* 프로토타입을 통해 생성된 BIMModelicaOOPM 모델의 시뮬레이션 결과 값과 LBNL Modelica Buildings library를 통해 생성된 LBNL ModelicaOOPM 모델의 시뮬레이션 결과 값을 비교하였다. 한편, LBNL Modelica Buildings library 자체의 검증은 이미 [34]를 통해 수행되었다. 본 연구에서는 BESTEST Case 600에 대응하기 위해 다른 종류의 ModelicaOOPM 모델을 생성하였는데, 하나는 그림 3과 같이 *Revit2Dymola*을 통해 자동 생성되었고(BIMModelicaOOPM 모델), 다른 하나의 모델은 라이브러리가 제공하는 모델 생성 방법을 참조하여 수작업으로 진행 되었다(LBNL ModelicaOOPM 모델). 두 개의 다른 버전의 ModelicaOOPM 모델을 통해 다음과 같은 2가지 종류의 시뮬레이션을 실행하였다.

- HVAC 시스템 모듈 없이 연간 방 온도 변화 시뮬레이션
- 기본 HVAC 시스템 모듈을 적용하여 연간 발생하는 냉난방 부하 계산 시뮬레이션

기본 HVAC 시스템 모듈과의 연결을 위해, ModelicaBIM 라이브러리에 정의된 기본 에너지 컴포넌트와 참조된 LBNL Modelica Buildings 라이브러리 내의 HVAC 모듈정보 (Case600 모델)를 연결한 후, 그 정보를 BIMModelicaOOPM 모델 생성시 호출할 수 있도록 정의하였다.

결론적으로, BIMModelicaOOPM 모델의 방 온도 변화는 LBNL ModelicaOOPM 모델의 경우와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 연중 최고 방 온도는 두 모델에서 모두 10월 17일 오후 3시에 나타났으며(그림 5 참조), 최저 온도는 1월 4일 오전 7시에 발생하였다. 최고 온도로 계산된 10월 17일 오후 3시에 BIMModelicaOOPM 모델의 경우 65.7°C와 LBNL ModelicaOOPM 모델의 경우는 65.9°C로 각각 계산되었다(그림 5 참조). 또한, 최저 온도를 나타내는 1월 4일 오전 7시에 BIMModelicaOOPM 모델과 LBNL ModelicaOOPM 모델 각각은 영하 19.85°C와 영하 19.83°C로 계산되었다.

연간 방 온도 변화 시뮬레이션에 이어, 냉난방 부하 시뮬레이션을 실행하였다. 냉난방 부하 결과 역시, 두 모델 모두 매우 유사한 결과를 나타내었다. 그림 6에서 보이듯이, *BIMModelicaOOPM* 모델의 경우 5.47 MWh와 6.94 Mwh의 난방과 냉방 부하가 각각 계산되었고, *LBNL ModelicaOOPM* 모델의 경우는 5.44 MWh와 6.94 Mwh의 난방과 냉방 부하가 각각 산출 되었다. 또한 도출된 시뮬레이션 결과는 다른 ASHRAE Standard 140-2007에 기술된 다른 시뮬레이션 도구들(ESP, BLAST, DOE2, TRNSYS)의 시뮬레이션 결과 값들과 비교하였다.(그림 6참조)

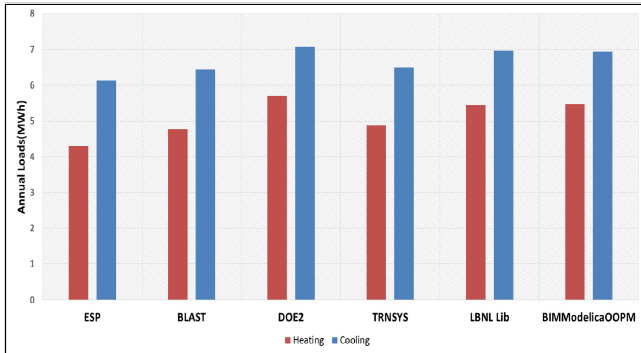


Fig. 6. Annual heating and cooling loads comparisons of the *BIMModelicaOOPM* and other simulation tools in (ASHRAE 2010) including *LBNL's* model

결과적으로, *Revit2Dymola* 프로토타입은 *LBNL* 라이브러리를 통해 생성된 *OOPM* 모델의 시뮬레이션 결과 값과 매우 유사하게 도출하였다. 이러한 결과는 두 모델 모두 *LBNL* 라이브러리의 알고리즘을 적용하였기에 예상된 결과이다. 하지만, 두 모델은 서로 다른 모델 구조와 모델링 방법으로 생성되었다는 점에서 그 차이점이 있다. 이러한 차이점으로 인해, 만약 *BIMModelicaOOPM* 모델이 정확히 생성되지 않았다면 결과 값의 편차는 매우 크게 나타났을 것이다. 즉, 모델 구조적인 측면에서, *BIMModelicaOOPM* 모델은 건축 모델 관점에서 객체들이 생성되었고(MixedAir 클래스로부터 생성된 객체 대신, 개발된 래퍼클래스를 통한 방 객체를 생성), 모델링 측면에서는 *BESTEST 600* 모델을 *BIMModelicaOOPM* 모델은 자동으로 *LBNL ModelicaOOPM* 모델은 수동으로 생성되었다는 점이다. 자동 생성 방법론은 에너지 모델 생성 시 건축 모델의 특성을 보다 합리적으로 정교하게 반영할 수 있다. 즉, *LBNL* 모델의 경우 남쪽 2개의 창문에 대해 전체 창문 면적을 합산한 후 정확히 양분해서 모델 생성에 적용시키는 방식이지만, *Revit2Dymola*는 남쪽 벽을 각각의 창을 기준으로 나눈 뒤, 각각의 벽이 창문을 포함하는 알고리즘으로 에너지 모델을 생성하였다.

본 연구에서 개발된 방법은 에너지 모델 생성에 있어 건축 모델 정보를 보다 덜 함축시킬 수 있으며, 시뮬레이션 결과 값이 객체기반으로 생성됨으로써 구체적인 건물 부재의 열부하 성능을 검토할 수 있게 제공한다.

5. 결론

본 연구는 BIM과 OOPM 사이의 건물 성능분석을 위한 통합 방법론을 제시하였다. BIM과 OOPM을 활용하여 새롭게 제시된 방법론은 객체기반 모델을 활용하여 데이터 통합 방법을 제시했다는 점에서 건축 모델과 에너지 모델 사이의 정보호환을 향상시키려 했다. 향후 사용자들은 BIM과 에너지 모델 사이의 정보 매핑에 있어 검증된 장점들을 활용함으로써, 수동으로 행해지던 정보 매핑에서 소요되었던 많은 시간들을 절약할 수 있다.

또한, *BIM2OOPMBEM* 프레임워크는 BIM을 설계 제작 모델과 에너지 시뮬레이션 모델을 위한 공통 모델로 사용될 수 있게 제시하였다. 즉, BIM을 활용한 공통모델이 에너지 시뮬레이션에 효율적으로 사용된다는 점은, BIM 모델이 건물 생애주기의 모든 단계에서 활용되기 때문에 제시된 프레임워크를 통한 건물 성능 분석 방법론이 건물 상세 정보가 준비된 단계이거나 초기 개념설계 단계, 혹은 건물 유지/보수 단계 등에 적용할 수 있음을 보여준다.

본 연구에서 제시한 프레임워크를 보다 발전시키기 위해 다음과 같은 연구가 향후 추가될 것으로 사료된다. 첫째, 건물위상정보를 에너지 모델의 공간경계정보로의 전환에 있어 완전 자동화 단계를 구현하기 위해 건물위상정보 전환을 위한 알고리즘을 개발이 필요하다. 둘째, 확장 BIM 모델 생성 시, 수반되는 물성정보 기입에 있어 에너지 모델 생성에 필수적으로 요구되는 정보 값을 제공하는 데이터베이스 구축 및 부재 재료 정보와의 연동이 필요하다. 이를 통해 사용자들에 의한 정보기입 과정에서 발생할 수 있는 오류를 줄일 것으로 고려된다. 셋째, *Dymool*를 통한 *ModelicaOOPM* 생성에 있어 *Modelica*의 시각적 표현 모듈의 자동 생성 환경을 개발함으로써, 객체 기반 에너지 모델의 보다 효율적인 생성 및 수정을 제공할 것으로 고려된다. 마지막으로, BIM과 OOPM 모델과의 정보 매핑 방법론을 열부하 시뮬레이션 모델뿐만 아니라 자연채광, CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 등과 같은 다중 도메인을 포함하는 통합 건물 성능분석 모델에 적용함으로써 보다 종합적인 성능분석 결과를 실시간으로 설계자에게 제공할 수 있을 것으로 고려된다.

Acknowledgements

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (No. NRF-2013R1A1A1010562)

References

- [1] NSTC, Federal Research and Development Agenda for Net-Zero Energy, High-Performance Green Building, 2008.
- [2] 안광호, 김형근, 최용석, “에너지 시뮬레이션을 통한 친환경학교의 에너지절약 계획방안에 관한 연구”, 대한건축학회 논문집: 계획계, Vol. 27, No. 12, 2011.12 // (Kwang-ho An, Hyung-Keun Kim, Young-Seok Choi, “A Study on Energy Conservation Plan of Eco-friendly School by EnergyPlus”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 27, No. 12, 2011)

- [3] 국토해양부, 건축물 에너지절감 혁신방안, 2007 // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, The Innovation Strategies for Building Energy Saving, 2007)
- [4] 이원길, 조원준, “BIM기반 건축물 설계 과정에서 실시간 에너지 성능 분석을 위한 기술 개발에 관한 연구”, 한국생태환경건축학회 논문집, Vol. 13, No. 1, 2013.2 // (Yun-Gil Lee, Won-Jun Cho, “A Study on the Development of the Technology of Evaluating the Performance of Energy”, Journal of the KIEAE, Vol. 13, No. 1, 2013)
- [5] 문현준, 최민석, 유승호, 박진우, “BIM 기반 건축환경 성능분석 인터페이스 개선방안 연구”, 대한건축학회 논문집: 계획계, Vol. 25, No. 10, 2009.10 // (Hyeun-Jun Moon, Min-Seok Choi, Seung-Ho Ryu, Jin-Woo Park, “Building Performance Analysis Interface based on BIM”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 10, 2009)
- [6] Hyangok Oh, Daegu Cho, Hyang-In Jang, Soungwook Hong, and Myung Sik Lee, “Prototype Development for BIM based Thermal Insulation and Condensation Performance Evaluation of Apartment Housings”, Architectural Research, Vol. 17, No. 2, 2015.
- [7] 오세민, 김용진, 박철수, 김인한, “BIM 기반 시뮬레이션 모델의 상호운용성을 이용한 건물 에너지 성능평가”, 대한건축학회 논문집: 계획계, Vol. 27, No. 6, 2011.6 // (Se-Min Oh, Yong-Jin Kim, Cheol-Soo Park, In-Han Kim, “Building Energy Performance Assessment using Interoperability of BIM-based Simulation Model”, Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 27, No. 6, 2011)
- [8] 유정호, 김가람, “BIM과 연계된 에너지분석 시스템의 국내 적용 현황”, 건설관리 학술지, Vol. 13, No. 3, 2012 // (Jeong-ho Yoo, Ka-ram Kim, “Domestic Application of BIM-based Building Energy Analysis Tools”, KICEM, Vol. 13, No. 3, 2012)
- [9] U.S. Department of Energy (U.S. DOE). Best Direction | Building Energy Software Tools, 2015.
- [10] T. Maile, M. Fischer, V. Bazjanac, “Building energy performance simulation tools-a life-cycle and interoperable perspective”, Center for Integrated Facility Engineering (CIFE) Working Paper 107, 2007.
- [11] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, B.T. Griffith, “Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs”, Building and Environment Journal, Vol. 43, 2008.
- [12] S. Attia, “State of the Art of Existing Early Design Simulation Tools for Net Zero Energy Buildings: A Comparison of Ten Tolls.” Technical report. Louvain La Veuve, Belgium, 2011.
- [13] E. Gratia, de A. Herde, “A Simple Design Tool for the Thermal Study of an Office Buildings”, Energy and Buildings, Vol. 34, 2002.
- [14] S. Punjabi, V. Miranda, “Development of an Integrated Building Design Information Interface”, Proceedings of IBPSA ‘05 Building Simulation Conference, 2005.
- [15] J. Clarke, “Energy Simulation in Building Design”, Oxford, UK: Butterworth Heinemann, 2001.
- [16] F. C. Winkelman, B. E. Birsdall, W. F. Buhl, K. L. Ellington, A. E. Erdem, J. J. Hirsch, S. Gates, “DOE-2 supplement, version 2.1E”, Technical Report, Report No. LBN-34947, Lawrence Berkely National Laboratory, Berkely, CA, 1993.
- [17] M. Wetter, “Modelica-based Modeling and Simulation to support Research and Development in Building Energy and Control Systems.” Journal of Building Performance Simulation, Vol. 2, No. 2, 2009.
- [18] J. Good, A. Frisque, D. Phillips, “The Role of Wind in Natural Ventilation Simulations using Airflow Network Models.” Proceedings of the third national conference of IPSA-USA, Berkeley, CA. 2008.
- [19] DesignBuilder Software, “DesignBuilder – Building Design, Simulation and Visualization – Building Simulation ... Made Easy”, 2015.
- [20] IESVE, “<VIRTUAL Environment> – Integrated Environmental Solutions”, 2015.
- [21] A. Aksamija, “Analysis and Computation: Sustainable Design in Practice”, Design Principles and Practices: An International Journal, Vol. 4, No. 4, 2010.
- [22] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston, “BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors”, Hoboken, NJ: Wiley, 2008.
- [23] G. Lee, R. Sacks, C. M. Eastman, “Specifying Parametric Building Object Behavior (BOB) for a Building Information Modeling System”, Automation in Construction, Vol. 15, No. 6, 2006.
- [24] General Services Administration, “3D-4D Building Information Modeling”, 2015.
- [25] V. Bazjanac, “IFC BIM-Based Methodology for Semi-Automated Building Energy Performance Simulation”, Berkeley, CA, 2008.
- [26] M. Wetter, “Modelica-based Modeling and Simulation to Support Research and Development in Building Energy and Control System”, Journal of Building Performance Simulation. Vol. 2, No. 2, 2009.
- [27] P. Fritzson, “Principle of Object-Oriented Modeling and Simulation with Modelica 2.1”, Piscataway, NJ:IEEE Press, 2010.
- [28] P. Fritzson, P. Bunus, “Modelica – A General Object-Oriented Language for Continuous and Discrete-Event System Modeling and Simulation”, Proceedings of the 35th annual simulation symposium, San Diego, California, Vol. 35, 2002.
- [29] M. Wetter, “Modelica Buildings library”, Journal of Building Performance Simulation. Vol. 7, No. 4, 2014.
- [30] National Institute of Standards and Technology(NIST), “FIPS Publication 183: Integration Definition of Function Modeling(IDEF0)”, Gaithersburg, MD, 1993.
- [31] Judkoff, R., J. Neymark, “International Energy Agency Building Energy Simulation Test (bestest) and Diagnostic Method.” NREL/TP-472-6231. National Renewable Energy Lab., Golden, CO, 1995.
- [32] Pedersen, C. O., R. J. Liesen, R. K. Strand, D. E. Fisher, “A Toolkit for Building Load Calculations”, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2001.
- [33] ASHRAE, “ASHRAE Standard. Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI/ASHRAE Standard 140-2007)”, Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2010.
- [34] Nouidui, T. S., M. Wetter, W. Zuo., “Validation and Application of the Room Model of the Modelica Buildings Library.” Proceedings of the ninth international Modelica conference, Munich, Germany, September. Modelica Association., 2012.