

건물에너지 95% 자동화 최종보고서

2016. 10. 26

Infrastructure
R&D

주관연구기관 / 경희대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 (국토교통과학기술진흥원장) 장관 귀하

‘건물에너지 모델의 정확도 95% 달성을 위한 확률보정 자동화 기술 개발’(연구개발 기간 : 2014.10.16 ~ 2016.10.26) 과제의 최종보고서 6부를 제출합니다.

2016. 12. 30.

주관연구기관명 : 경희대학교 산학협력단 (홍충선) (인)

주관연구기관책임자: 윤근영

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	15CTAP-C078849-02	해당 단계 연구 기간	14.10.16 ~ 16.10.26	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	창조형모험			
연구과제명	대과제명				
	세부과제명	건물에너지 모델의 정확도 95% 달성을 위한 확률보정 자동화 기술 개발			
연구책임자	윤근영	해당단계 참여 연구원 수	총: 6명 내부: 6명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 100,000천원
		총 연구기간 참여 연구원 수	총: 6명 내부: 6명 외부: 명	총 연구개발 비	정부: 100,000천원 기업: 천원 정부 외: 천원 계: 100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	경희대학교 공과대학			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	
요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)				보고서 면수	

- 국내외 많은 산업 분야에서 건물에너지 모델의 이용이 확대되고 있으며, 건물에너지의 실질적인 절감을 위해서는 건물에너지 모델의 신뢰성 향상과 정확성 확보가 필수적임.
- 본 기술개발은 건물에너지 모델의 오차유발요소를 도출하고 입력변수별 경계 조건을 설정하였으며, 미지 변수에 대한 확률적 분포 특성을 반영하는 샘플링 기법을 개발함.
- 개발된 확률적 샘플링 기법을 이용하여 시뮬레이션 입력변수별 데이터를 도출하였으며, 에너지 모델의 입력 변수 생성을 위한 최적의 라틴하이퍼큐브 기반 에너지 모델 생성 기법을 개발함.
- 건물에너지 모델의 확률보정을 일괄적으로 처리할 수 있는 자동화 시스템을 개발함.
- 확률보정 자동화 기술의 검증을 위하여 일반 사무소 건물의 실제 에너지 사용량 데이터를 확보하고, 실측데이터 및 확률보정 자동화 시스템의 예측량 비교를 통하여 개발된 기술의 정확도 90% 달성을 실증함.

국문 요약문

연구의 목적 및 내용	■ 본 연구는 건물에너지 모델의 에너지 소모량 예측치의 부정확성을 개선하기 위해 시뮬레이션 입력변수의 확률적 특성을 고려한 확률보정 기법을 개발하고, 이를 활용하여 대상 건물에 대한 최소한의 정보만으로 시뮬레이션 모델의 예측 정확도 90%를 달성할 수 있는 건물에너지 모델의 확률 보정 자동화 기술을 개발하는 것을 최종 목표로 하며, 주요 연구개발 목표는 아래와 같음. • 건물에너지 모델의 입력 변수별 확률 분포 및 입력 표준안 개발 • 시뮬레이션의 입력 변수 생성을 위한 최적의 샘플링 기법 개발 • 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술 개발 ■ 연구개발의 목표를 달성하기 위하여 본 연구에서는 아래와 같은 연구를 진행함. • 건물에너지 모델의 오차를 유발하는 입력변수 • 건물에너지 모델의 입력변수별 확률분포 산정 • 미지 변수에 대한 확률적 분포 특성을 반영하는 샘플링 기법 선정 • 확률적 샘플링 기법을 이용한 시뮬레이션 입력 변수별 데이터 도출 • 다 변수 입력 요소에 대한 건물에너지 모델 자동화 생성기술 개발 • 실제 건물을 대상으로 개발된 자동화 확률보정 기술의 정확성 검증				
연구개발성과	■ 본 연구에서는 건물에너지 시뮬레이션의 정확도를 95% 확보할 수 있는 확률 보정 자동화 기술을 개발함으로써 건물에너지 모델의 신뢰성을 확보하고 건물 에너지 분야의 기반 기술을 확보함. ■ 본 연구는 LHS 기반 건물에너지 모델의 자동 생성 기법을 개발하였으며, 본 자동 생성 기법은 건물 에너지 보정 분야에 적용됨을 물론 건물 외피 및 시스템의 최적화 및 민감도 분석에도 활용될 수 있는 방법론적 우수성을 지니고 있음.				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	■ 본 연구의 최종성과물은 건물에너지 시뮬레이션의 오차를 발생시키는 입력 요소를 도출하고, 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있는 건물에너지 모델의 자동화 확률보정 기술로써 다음과 같은 다양한 분야에 활용될 것으로 예상됨. • 정확도가 보증된 신뢰할 수 있는 건물에너지 모델의 구축은 건축설계 사무소, 건설사, 건축설비 설계 사무소, 친환경 에너지 컨설팅 업체, 건물 자동제어 업체, 냉난방기기 제조사 등에서 필수적으로 요구되는 기술로써 본 최종성과물은 다양한 기술수요처에 활용될 수 있음. • 본 최종성과물은 새로운 개념의 정립에서 벗어나 개념의 실제 적용 가능성에 대한 평가가 완료되어 이를 기반으로 다양한 제품이 소프트웨어 형태로 개발될 것으로 예상됨. • 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술은 건물에너지 시뮬레이션이 활발히 적용되지 못한 건물에너지 시스템의 실시간 제어 및 고장예지진단에 활용되어 새로운 신산업을 창출할 것으로 예상됨.				
핵심어 (5개 이내)	건물에너지	에너지 시뮬레이션	확률보정	건물에너지 모델	불확실성

< SUMMARY >

Purpose & Contents	▪ This study aims to develop the probabilistic calibration method that generates the energy simulation models with a prediction accuracy of 95%, so that the inaccuracy of the simulation model results can be improved. The specific aims of this study are as follows; • The development of probabilistic distributions of input variables to energy simulation models • The development of optimal sampling methods to generate energy simulation models • The development of automatic calibration method for building energy models ▪ In order to achieve the aims, the following research was carried out; • Selection of input variables that cause the inaccuracy of simulation models • Development of probabilistic distributions of input variables • Selection of sampling techniques that consider probabilistic distributions • Derivation of data for simulation input variables using probabilistic sampling • Development of automatic calibration method for building energy models • Verification of the accuracy of the developed calibration method that was applied to the real building
Results	▪ This study develops the probabilistic calibration method of building energy model that enables the prediction accuracy of 95 % and obtains the reliability of the energy model and the core technology in the building energy area. ▪ The LHS based energy model generation technique developed in this study can be applied to the calibration of energy model and the optimization and sensitivity analysis of building envelope and system.
Expected Contribution	▪ The final outcomes of this study, which are the automatic calibration method that improve the simulation accuracy, can be applied to various areas including as follows; • The reliable energy simulation models are prerequisite in architectural design and consulting firms, construction companies, building automatic controls and heating ventilation and air-conditioning companies. • The final outcomes are verified using the real world data, so that the software based on the developed outcomes will be developed. • The developed method can extend the application areas of the simulation models in real-time controls and fault detection.
Keywords	Building Energy Energy Simulation Probabilistic Calibration Building Energy Model Uncertainty

< Contents >

Chapter 1. Summary	7
1.Objectives	7
2.Necessity	8
3.Scopes	13
Chapter 2. Recent development in domestic and foreign countries	15
1. Trends in research	15
2. Trends in patents	20
3. Summary	21
Chapter 3. Results and outcomes	23
1. Development of automatic probabilic calibration method	23
2. Verification	33
Chapter 4. Achievement of purposes and contributions	57
1. Achievement	57
2. Contributions	58
Chapter 5. Application plans for research outcomes	59
Chapter 6. Collected information on foreign technology	60
1. Trends in industry	60
2. Validation of energy progrmas	61
3. Energy model and building control	63
Chapter 7. Security of research outcomes	65
Chapter 8. Equipment registered in NTIS	66
Chapter 9. Safety activities for the research	67
Chapter 10. Key research outcomes	70
Chapter 11. Etc	71
Chapter 12. References	72

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요	7
1. 연구개발 목적	7
2. 연구개발의 필요성	8
3. 연구개발 범위	13
제2장. 국내외 기술 개발 현황	15
1. 국내외 연구동향	15
2. 국내외 관련 기술 특허 동향	20
3. 종합결론	21
제3장. 연구 수행 내용 및 성과	23
1. 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술개발	23
2. 건물에너지 모델의 확률보정 기술 검증	33
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	57
1. 목표달성도	57
2. 관련 분야 기여도	58
제5장. 연구개발성과의 활용 계획	59
1. 연구결과의 활용방안	59
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	60
1. 국외 산업 동향	60
2. 건물에너지 프로그램의 검증	61
3. 건물에너지 프로그램과 건축물의 제어	63
제7장. 연구개발성과의 보안등급	65
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	66
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	67
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	70
제11장. 기타 사항	71
제12장. 참고 문헌	72

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구의 최종목표

본 연구는 건물에너지 시뮬레이션의 신뢰성 향상을 위해 시뮬레이션 입력변수의 확률적 특성을 고려한 확률보정 기법을 개발하고, 이를 활용하여 대상 건물에 대한 최소한의 정보만으로 시뮬레이션 모델의 예측 정확도 95%를 달성할 수 있는 건물에너지 모델의 확률 보정 자동화 기술을 개발하는 것을 그 최종 목표로 하며, 주요 연구개발 목표는 아래와 같다.

- 건물에너지 모델의 입력 변수별 확률 분포 및 입력 표준안 개발
- 시뮬레이션의 입력 변수 생성을 위한 최적의 샘플링 기법 개발
- 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술 개발

나. 최종목표의 성격 및 설정근거

본 연구의 최종 목표와 설정근거는 표 1과 같다.

표 1. 최종 목표와 설정근거

최종 목표	성격 및 설정근거
건물에너지 모델의 입력 변수별 확률 분포 및 입력 표준 안 개발	건물에너지 시뮬레이션의 신뢰성 확보를 위한 가장 필수적인 데이터로 건물에너지 모델링의 구축을 위한 표준 자료 제공
	기존 연구 문헌, 선진 외국의 권장 데이터, 실제 건물에 대한 실측치 및 건축물리 이론을 바탕으로 건물에너지 모델링의 입력변수 범위를 선정
시뮬레이션의 입력 변수 생성을 위한 최적의 샘플링 기법 개발	수동 보정의 한계를 극복하기 위하여 건물에너지 모델의 입력 변수를 단일 값이 아닌 확률분포를 지닌 변수로 생성할 수 있는 기반 기술
	건물에너지 모델의 다 입력변수에 대한 샘플링이 가능하며 동시에 연산 시간을 단축할 수 있는 이론적으로 우수하며 실제 구현이 용이한 샘플링 기법을 도출
건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기 술 개발	불확실성 인자에 대한 에너지 모델 샘플링, 에너지 시뮬레이션 실행, 보정오차 기준 만족 모델의 도출로 구성된 확률보정 기술의 자동화 패키지 기술
	본 연구의 최종 목표인 최소한의 건물 정보를 이용하여 건물 에너지 모델의 예측 정확도 95%를 달성할 수 있는 핵심 기술

2. 연구개발의 필요성

가. 온실가스 감축의 필요성

인간의 무분별한 화석연료 사용에 기인한 지구 온난화는 인류의 생존을 위협하는 가장 심각한 문제이다 [1]. 지구의 평균온도는 1900년 이후에만 0.7도 상승하였으며, 지구온난화의 주범인 대기 중의 이산화탄소 농도 역시 약 30% 상승하였다. 이러한 온난화 현상은 지속적으로 발생하여 2100년에는 지구의 평균온도가 1990년 대비 약 1.5 - 6도까지 상승할 것으로 예측되고 있다 [2]. 특히, 우리나라는 도시화와 산업화의 영향으로 연평균온도가 같은 기간 무려 1.7도나 상승하는 등 우리나라는 급격한 기후 변화를 겪고 있다 (그림 1).

2003년 유럽에서는 여름철 이상고온 현상으로 인하여 약 삼만명의 사망자가 발생하는 등 지구 온난화 현상은 국가 경제 발전을 위해함은 물론 국민의 건강을 크게 위협하고 있는 실정이다. (그림 2).

세계 각국은 지구온난화 현상을 막기 위한 공동의 노력을 기울이고 있으며, 1992년 기후변화협약 (UNFCCC), 1997년 교토의정서 (Kyoto Protocol)로 구체화 되었음. 이에 따라 미국, 유럽 연합, 일본 등 OECD에 가입된 주요 선진국 들은 1990년 대비 평균 5.2%의 온실가스를 감축해야 하는 의무를 지게 될 것으로 예상된다. 또한, 2007년 발리 로드맵 (Bali Action Plan)이 채택됨에 따라 기후변화협약에 주요 선진국뿐만 아니라 개발도상국이 모두 참여하게 되었다.

우리나라는 2009년 코펜하겐 합의 (Copenhagen Accord)에서 확정된 것처럼 아직 온실가스의 의무감축 국가는 아니지만, 세계 10위의 온실가스 배출국이자 GDP 세계 13위인 점을 고려해 보면 우리나라에 대한 직간접적인 압력은 더욱 가중되고, 어떠한 형태로든 온실가스 감축의무가 부가될 가능성이 매우 높다. 온실가스 감축의무는 국가 경제 및 산업 전반에 걸쳐 광범위한 영향을 미칠 것이며, 에너지 소비 절약은 지구 온난화 방지 뿐 아니라 국가 경제의 안정적 발전을 위해서도 필수적이다.

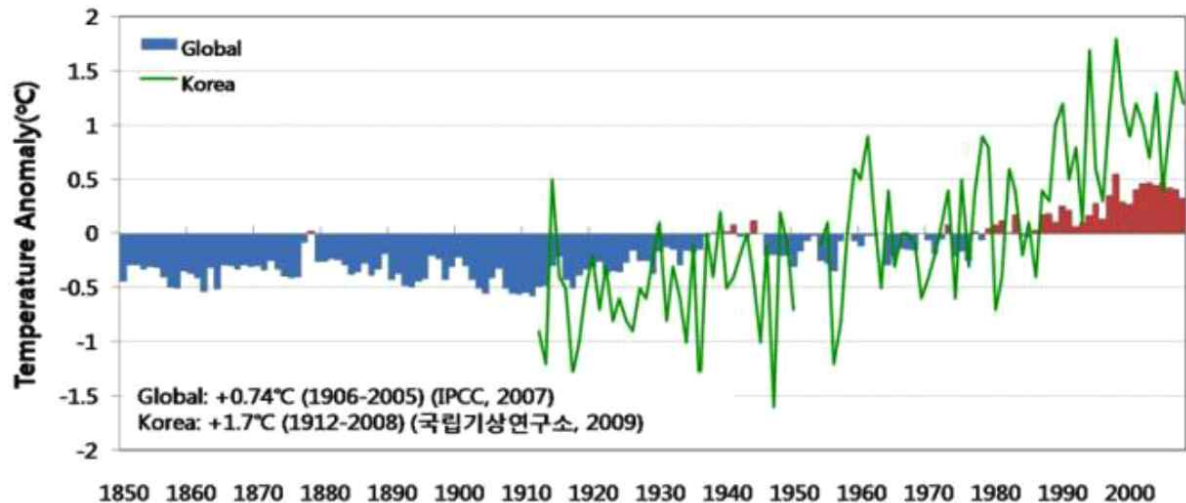


그림 1. 우리나라의 연평균 온도 변화 (출처: 기상청 기후과학국)

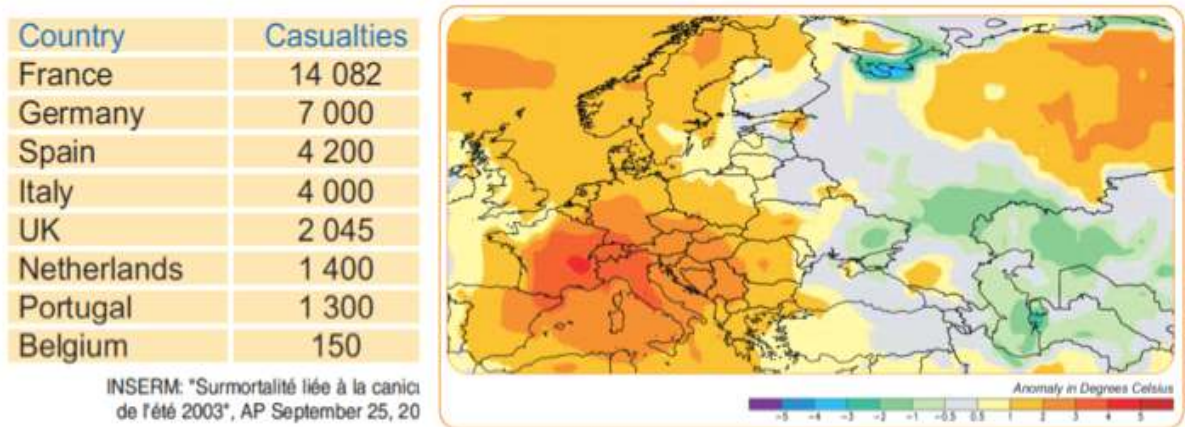


그림 2. 2003년 유럽 이상고온 현상으로 인한 사망자 수 분포 (출처: UNEP)

나. 건물분야의 온실가스 배출

건축물에서 배출되는 온실가스는 전 지구 온실가스 배출량의 약 30%를 차지하고 있으며, 미국을 포함한 선진 외국은 국가 온실가스 배출량의 약 40%가 건물로부터 발생하고 있다. 우리나라의 경우, 건물 분야는 2010년 기준으로 국가 총에너지소비의 약 24%를 차지하고 있으며, 온실가스 배출량은 20%가 건물분야에 기인하고 있다. (그림 3) [3].

특히 건물 부문의 온실가스 배출 비율은 인구의 밀집도가 높은 도시의 경우 더욱 심화되어 서울의 경우는 전체 온실가스 배출 중 건물부문이 차지하는 비율이 약 60%에 해당한다. 건물부문의 용도별 온실가스 배출량을 분석한 연구결과에 따르면 난방, 냉방, 조명과 급탕등과 같은 건물성능 관련 부문의 탄소배출량의 비율을 주거용 건물의 경우 64%, 비주거용 건물의

경우는 94%에 해당하는 등 건물의 성능을 향상시키는 것이 중요하다.

특히 우리나라는 경제수준의 발달로 인하여 쾌적한 환경을 추구하고 서비스업이 차지하는 비중이 높아질 것으로 예상되기 때문에 건물에서 소비되는 에너지량이 선진국 수준인 약 40%에 도달할 것으로 예상되며, 2020년에는 건물부분의 에너지 소비량이 49.4 백만 TOE로 수송부분의 에너지 소비량인 44.1 백만 TOE를 앞지를 것으로 예상된다 [4]. 따라서, 국가 전체의 온실가스 저감을 위해서는 건물 부분의 에너지 절약과 신재생 에너지의 적극적인 활용을 통한 온실가스 배출저감이 매우 중요하다.

부문별 최종에너지 소비(2000-2010)

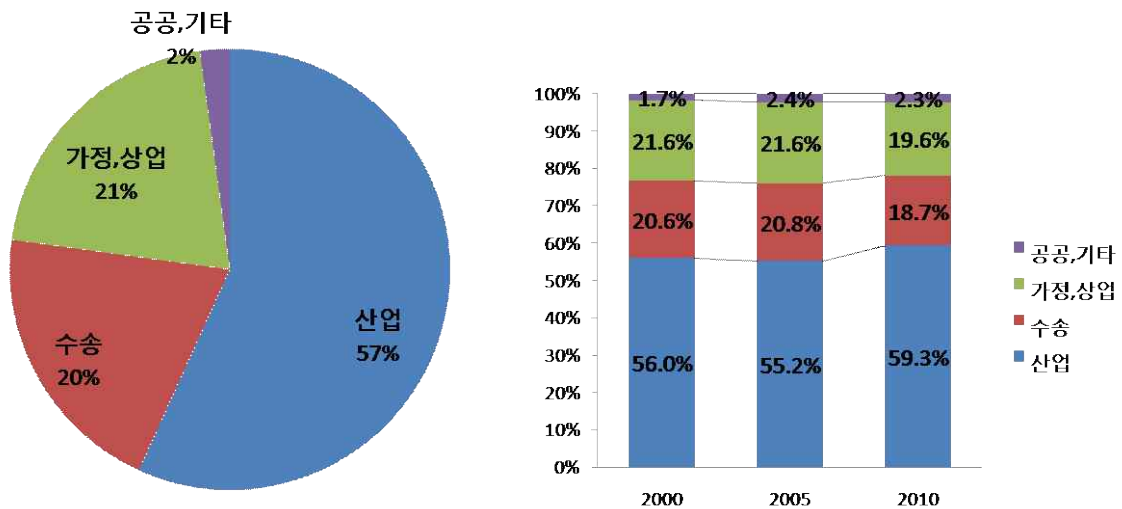


그림 3. 우리나라의 부문별 최종에너지 소비

다. 건물 에너지 절약 관련 정부정책

현재 우리나라는 2020년까지 배출전망치 대비 온실가스를 30% 감축하는 것을 국가 온실가스 중기감축목표로 설정하였으며, 이러한 목표 달성을 위하여 건축물 온실가스 감축이 매우 중요하다. 정부는 2020년까지 건물 부분의 온실가스를 배출 전망치 대비 26.9% 감축하기로 하였으며, 이러한 목표를 달성하기 위한 각종 정책을 시행하고 있다. 또한, 정부는 주거용 신축 건물의 경우 에너지 사용량을 2017년까지 패시브 하우스 수준인 60% 감축, 2025년까지는 제로에너지를 의무화하는 등 대책을 마련하고 있다.

특히, 2013년 녹색건축물 조성 지원법을 제정하여 에너지 소비 총량제, 녹색건축인증제, 에너지 효율등급인증제, 에너지 소비 증명제 등 녹색건축물의 보급 촉진하기 위한 다양한 정책을 시행하고 있다. 에너지 소비 총량제는 일정 규모 이상의 건축물의 1차 에너지 소요량을 건물 에너지 프로그램을 이용하여 산출하고, 그 결과를 표시 및 관리하는 제도로 국토교통부와 서울시에서는 각각 ECO2-OD 및 BESS 4.0 프로그램을 제공하고 있다. 또한, 건축물의 에너지 소비 증명제는 건축물의 매매나 임대시에 공인된 건물에너지 프로그램을 이용하여 산정한 에너지 소모량과 실제 에너지 사용량에 기재된 건축물의 에너지 평가서를 거래 계약서에 포함하도록 하고 있으며, 이는 건축물의 에너지 소비 감축에 크게 기여할 것으로 평가된다.

이러한 정부의 건물 부문의 온실가스 감축 정책이 성공을 거두기 위해서는 건물의 설계 및 운영의 단계에서 다양한 에너지 절약 방법에 대한 정량적이고 신뢰할 수 있는 평가가 가능한 건물의 에너지 시뮬레이션 모델이 필수적이다.

라. 건물에너지 프로그램의 부정확성

건물의 성능평가를 위한 대표적인 화이트 박스 모델인 에너지 시뮬레이션 프로그램은 건물 에너지 요구량 예측결과가 실제 건축물의 에너지 소비량과 많은 차이를 나타내고 있어 그 신뢰성에 한계가 있다. 이에 따라 건물에너지모델을 활용한 컴퓨터 시뮬레이션은 많은 장점에도 불구하고 건축물의 설계 및 운영에 있어서의 활용이 제한적인 실정이다 [5].

미국 MIT의 Norford 교수팀은 DOE-2를 이용하여 초에너지 절약형 건물을 설계하고 완공 후 실제 건물의 에너지 소비량을 모니터링하고, 완공 후 건물은 DOE-2 시뮬레이션 결과보다 약 2배의 에너지를 소비하고 있는 것을 밝혀냄. 또한 시뮬레이션의 오차는 프로그램의 결함이 아닌 실제 건물의 사용과 시뮬레이션에 적용된 가정과의 차이에 기인한다는 것을 입증하였다 [6].

2000년대 후반 미국의 그린빌딩협회 (US Green Building Council)에서는 전세계적으로 가장 많이 사용되고 있는 친환경건축물 인증제도인 LEED를 획득한 건물을 대상으로 건물에너지 프로그램의 에너지 소비량 예측량과 완공 후의 실제 에너지 소비량에 대한 비교 연구를 진행하였다 [7]. 그들의 연구 결과에 의하여 ASHRAE의 기준에 따라 검증이 이루어진 프로그램이 사용되었는데도 불구하고 개별 건물의 에너지 소비량의 예측을 시뮬레이션의 결과는 정확성이 떨어지는 것으로 나타난. 즉, 실제 건물의 에너지 소비량은 시뮬레이션의 에너지 소비량 예측치의 최소 약 0.5배에서 최대 약 2.8배에 해당하는 것으로 분석되었다. (그림 4).

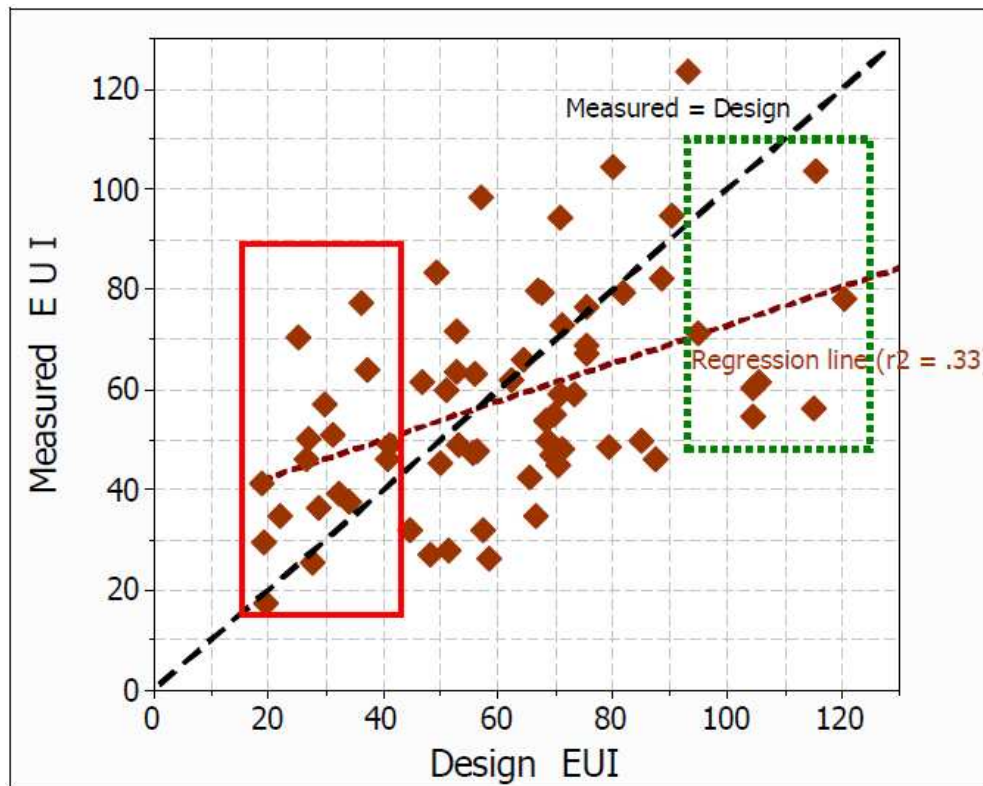


그림 4. 시뮬레이션 결과와 실제 에너지 소비량의 오차

마. 문제점 및 연구개발의 필요성

건물에너지 시뮬레이션의 많은 장점에도 불구하고 실제 활용은 매우 제한적이다. 그 대표적인 이유는 실제 건물의 에너지 사용량과 시뮬레이션 결과와의 상당한 차이가 발생하여 시뮬레이션 결과의 신뢰성이 결여되기 때문이다. 이에 따라 선진 외국에서는 IPMVP Guideline, ASHRAE Guideline 14, ASHRAE Standard 140 등을 제정하여 프로그램의 신뢰성을 테스트 하는 기준을 마련하는 등 시뮬레이션의 정확성을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 국내에서는 아직 이에 대한 연구가 현저히 부족한 실정이다. 따라서, 건물에너지 시뮬레이션 결과의 정확성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술을 개발하고 보급하는 것이 절실하다.

3. 연구개발 범위

연구개발 단계에 따른 세부 연구 내용 및 범위는 아래 표 2와 같다.

표 2. 연차별 주요연구내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	건물에너지 모델의 입력 변수별 확률분포 및 입력 표준안 개발	- 건물에너지 모델의 오차유발 요소 도출 - 건물에너지 모델의 입력변수별 확률분포 범위 산정
	시뮬레이션 입력 변수 생성을 위한 최적 샘플링 기법 개발	- 다 변수에 대한 샘플링 기법 도출 - 건물에너지 모델의 확률보정 개념 정립
2차년도	시뮬레이션 입력 변수 생성을 위한 최적 샘플링 기법 개발	LHS를 이용한 시뮬레이션 입력 요소별 에너지 모델 도출
	건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술 개발	- 건물에너지 모델 확률 보정의 단계별 시스템 구현 - 확률보정 건물에너지 모델의 자동화 생성 기술 구현 - 확률보정 자동화 기술의 검증

건물에너지 모델의 입력 변수별 확률 분포 및 입력 표준안은 건물에너지 시뮬레이션의 신뢰성 확보를 위한 가장 필수적인 데이터로 건물에너지 모델링의 구축을 위한 표준 자료 제공을 제공하며, 기존 연구 문헌, 선진 외국의 권장 데이터, 실제 건물에 대한 실측치 및 건축물리 이론을 바탕으로 건물에너지 모델링의 입력변수 범위를 선정하였다.

시뮬레이션의 입력 변수 생성을 위한 최적의 샘플링 기법은 수동 보정의 한계를 극복하기 위하여 건물에너지 모델의 입력 변수를 단일 값이 아닌 확률분포를 지닌 변수로 생성할 수 있는 기반 기술로 건물에너지 모델의 다 입력변수에 대한 샘플링이 가능하며 동시에 연산 시간을 단축할 수 있는 이론적으로 우수하며 실제 구현이 용이한 샘플링 기법이다.

건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술은 불확실성 인자에 대한 에너지 모델 샘플링, 에너지 시뮬레이션 실행, 보정오차 기준 만족 모델의 도출로 구성된 확률보정 기술의 자동화 패키지 기술로, 본 연구의 최종 목표인 최소한의 건물 정보를 이용하여 건물 에너지 모델의 예측 정확도 95%를 달성할 수 있는 핵심 기술이다. 본 연구의 연구개발 개요 및 범위는 그림 5와 같다.

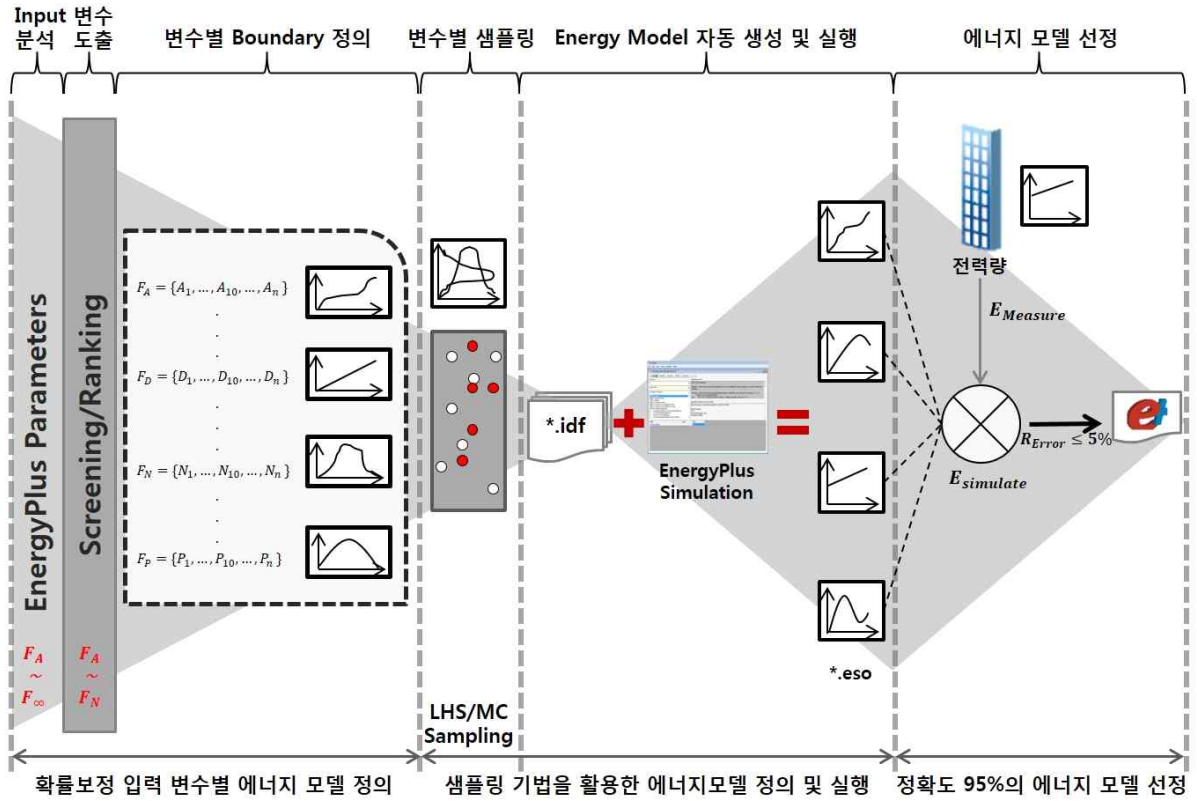


그림 5. 연구개발의 흐름도

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내외 연구동향

가. 건물에너지 모델

화이트 박스 모델 [8] 은 열전달(Heat and mass transfer)의 기본 원칙에 기반하여 건축물의 물리적 구성요소인 벽체, 유리, 실내공간, 냉난방 시스템과 건물 외부와의 열평형 방정식을 구축하고 이러한 수학적모델을 이용하여 건물의 에너지 성능을 예측하게 되며, 이때 열평형 모델은 각 물리적 요소간의 전도, 대류, 복사와 확산에 의한 동적 열전달 현상을 고려한다 (그림 6).

동적 열전달 현상이 고려된 최초의 화이트 박스 모델 시뮬레이션 기법은 1960년대 초 미국에서 개발된 GATC 프로그램 [9]이며, 이 모델은 개발 당시 컴퓨터 성능의 한계로 인하여 건물-시스템-플랜트 부하를 개별적으로 처리(Loads-Systems-Plant modeling)함으로써 요소간의 상호작용의 고려가 불가능하며, 시간에 따른 열적 변화를 정확히 예측하지 못하는 한계가 있다.

캐나다 NRC 연구소의 Stephenson 과 Mitalas 연구팀은 이러한 한계를 극복하기 위하여 실내 복사열 획득을 열용량에 따라 분산시키는 응답계수법 [10] 개발하였으며, 건물-시스템-플랜트 사이의 동적 열변화 현상을 모사할 수 있게 되었다.

또한, 이 응답계수법은 1970년대 초 미국의 위스콘신대학에서 개발된 TRNSYS [11]과 1990년대 초 미국 에너지성 산하의 LBNL에서 개발된 DOE-2 [12] 프로그램에 적용되는 등 초창기 건물 시뮬레이션의 비약적인 발전을 가져오게 되었다.

영국 Strathclyde 대학의 Clarke 교수는 1970년대 수치차분-동시 해석법 (Numerical discretization and simultaneous solution method) [14]을 개발하였으며, 열평형방정식을 유한체적법을 이용하여 건축물의 구성 요소 뿐만 아니라 시스템과 플랜트까지 적용할 수 있는 기틀을 마련하였다 (그림 7).

이 방법은 응답계수법의 한계인 열분산(Thermal diffusion)의 시간에 대한 선형성 가정이 요구되지 않는 것으로 건축물의 열평형 관계에 대하여 실제와 거의 유사한 모사가 가능하며

특히 분단위의 세밀한 분석이 가능한 장점을 지니고 있다.

또한 수치차분-동시해석법은 1970년대에 열평형방정식에 기초를 둔 최초의 건물에너지 해석 프로그램인 ESP-r [15]의 기반이 되었으며, 2000년대 초에는 미국의 에너지성에서 DOE-2를 대체하는 프로그램인 EnergyPlus [16]에도 적용이 되는 등 건물에너지 시뮬레이션에 널리 사용되게 되었다.

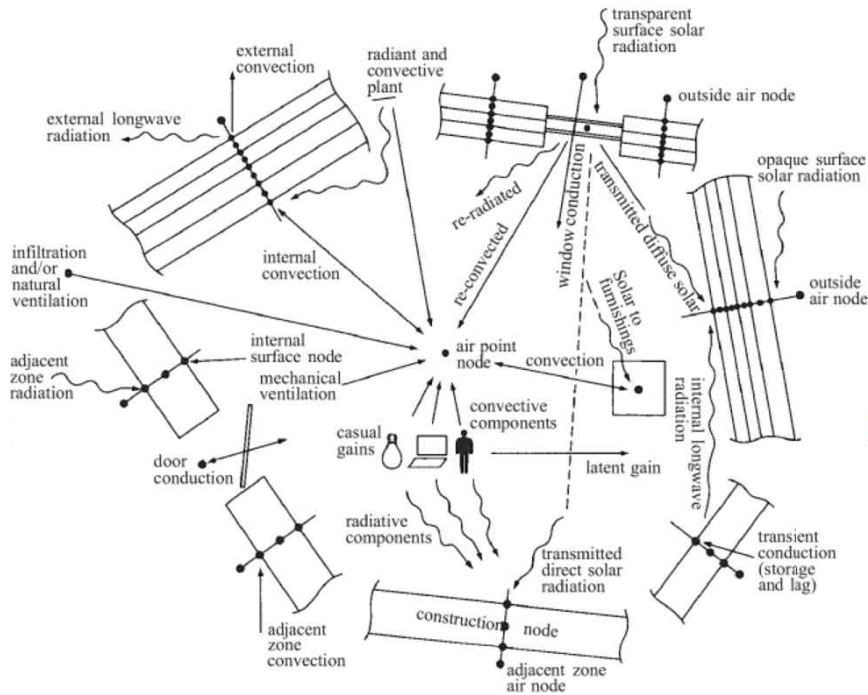


그림 6. 건물에너지 성능 예측을 위한 화이트 박스 모델 [13]

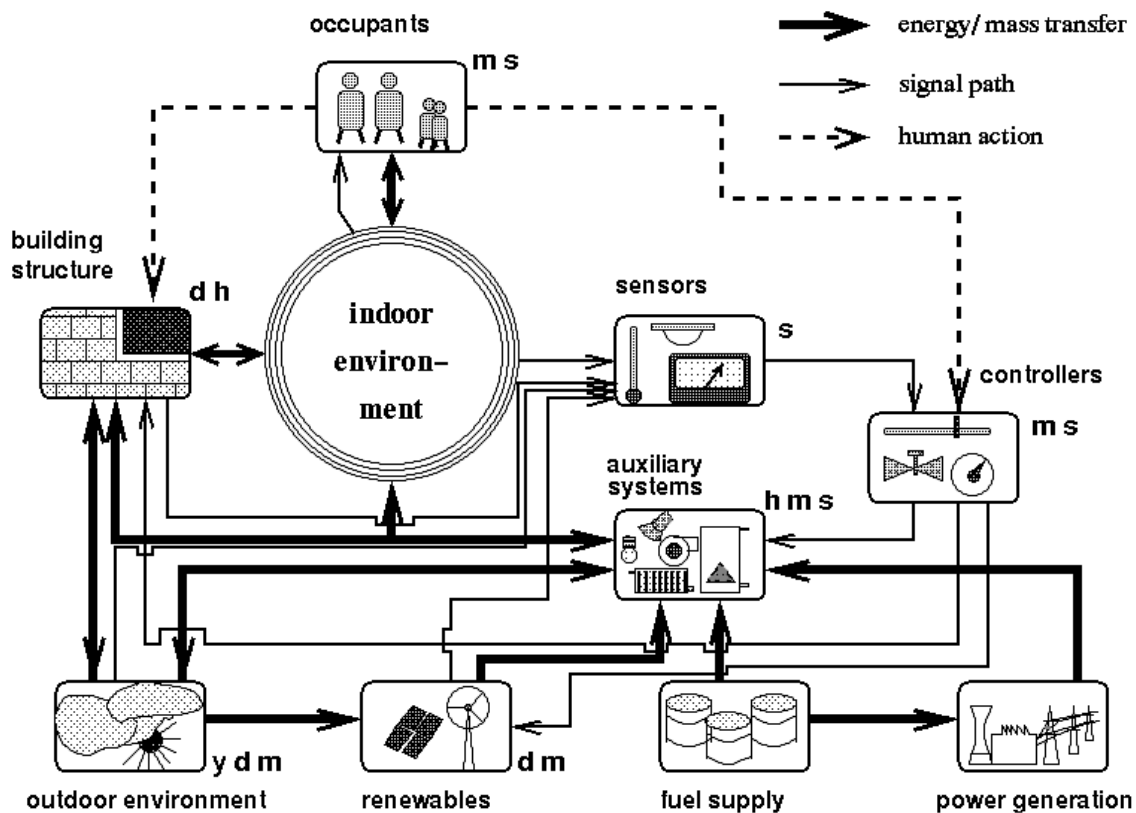


그림 7. 열평형법 기반 수치차분-동시해석법을 적용한 건물에너지 성능 예측 [17]

화이트 박스 모델 기반의 건물에너지 시뮬레이션은 전통적으로 건물 설계 단계에서 에너지 절감을 위한 설계의 최적화 단계에서 주로 사용되었으나, 건물에너지 시뮬레이션 모델은 건물의 완공 후 건물 에너지 시스템의 제어에도 적용이 가능하다.

에너지 시뮬레이션이 건물의 시스템 제어에 활용될 수 있는 가능성은 2000년대 초에서야 미국 LBNL의 Haves 팀 [18]에 의해 제시되었으며, Haves 팀은 동적 에너지 시뮬레이션 프로그램을 이용한 건물에너지 관리시스템(Building Energy Management and Control System: BEMCS)의 최적화에 필수적인 BEMCS 시스템과 에너지 시뮬레이션의 데이터 교환 방법에 대한 연구를 발표하였다.

2011년 미국 LBNL의 Wetter팀은 건물에너지 관리시스템과 건물에너지 시뮬레이션의 데이터 교환을 가능하게 하는 미들웨어 플랫폼인 BCVTB (Building Control Virtual Test Bed)를 개발 [19]하고 이를 실제 건축물 시스템 운영의 최적화에 적용한 사례를 발표함. BCVTB

는 다양한 시뮬레이션 프로그램 EnergyPlus, ESP-r, Radiance, Trnsys 등과 Matlab/Simulink를 연동할 수 있는 기능을 제공하였다. (그림 7).

2010년 펜실베이니아 대학의 Mangharam 교수팀 [20]은 MLE+ 라는 Matlab 기반의 툴박스를 발표함. MLE+는 Matlab/Simulink의 모든 기능을 EnergyPlus 연동 실제 건물에너지 관리 시스템의 운영에 적용할 수 있어 Matlab의 툴박스를 활용한 다양한 최적화 제어기법을 개발할 수 있으며, 실제로 Siemens는 MLE+를 활용한 건물에너지 관리시스템을 개발 [21]한 바 있다.

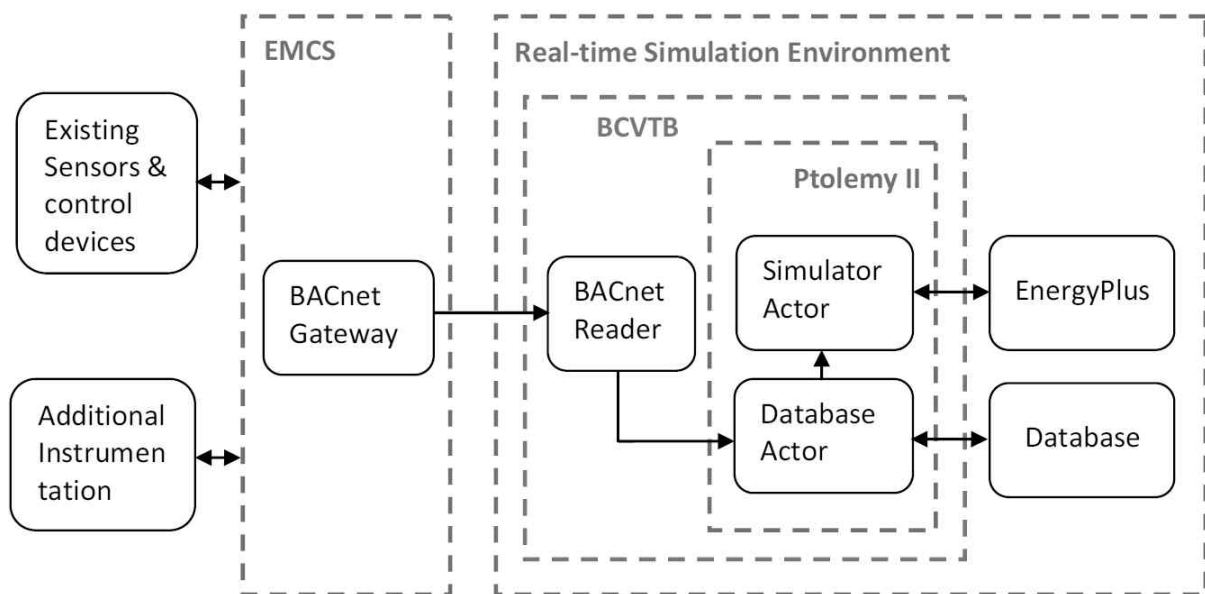


그림 8. BCVTB를 이용한 EnergyPlus의 건물에너지 관리시스템 운영

나. 건물에너지 모델의 부정확성

시뮬레이션 결과의 오차로 인한 건물 에너지 프로그램에 대한 신뢰성의 저하는 미국에서 뿐만 아니라 유럽에서도 매우 활발히 조사되고 있는 심각한 문제로 인식되고 있다.

스웨덴의 한 주거단지를 대상으로 한 연구 결과에서도 시뮬레이션 결과와 실제 건물의 에너지 사용량은 큰 편차를 보이고 있음. 특히, 주거용 건물의 최대 에너지 소비처인 난방 시스템의 경우는 실제 난방 에너지의 소비량이 시뮬레이션 결과와 최대 3배의 편차를 나타내고 있다 (그림 8) [22].

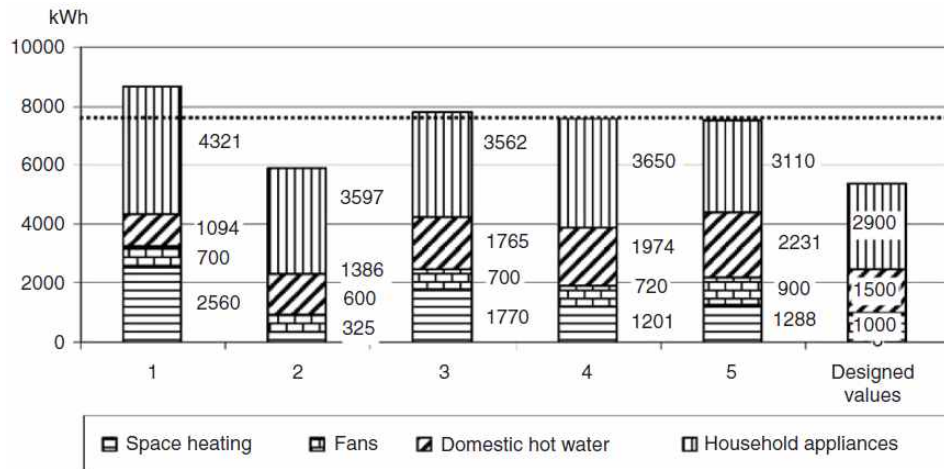


그림 9. 설계 단계의 에너지 소모 예측치 및 실제 에너지 소모량 비교실증

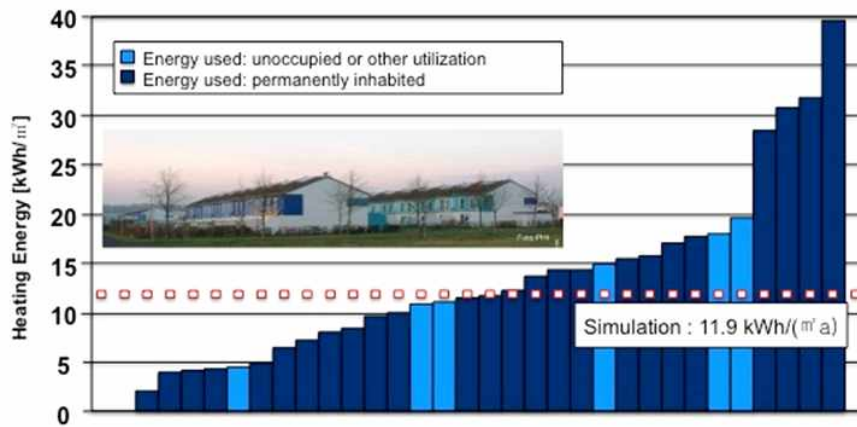


그림 10. PHPP 시뮬레이션 결과와 실제 에너지 사용량과의 오차

독일의 패시브 하우스 연구소에서는 최초의 패시브 하우스 단지를 대상으로 난방에너지 사용량의 모니터링을 건물의 완공 이후 지속적으로 실시하고, 그 결과를 건물 설계 단계에서 사용한 패시브 하우스 공인 에너지 시뮬레이션 프로그램인 PHPP (Passive House Program Package)와 비교하였다 [23].

그 결과 PHPP 프로그램의 난방 에너지 소모량은 12 kWh/m^2 로 나타났으나, 동일한 건물의 구조임에도 불구하고 개별 건물의 실제 난방에너지 소비량은 최소 4 kWh/m^2 에서 최대 40 kWh/m^2 로 나타나 PHPP 결과와 큰 차이가 있는 것으로 분석되었다 (그림 9).

2. 국내외 관련 기술 특허 동향

국내의 건물 에너지 시뮬레이션 관련 선행 특허 동향을 분석해 보면 주로 건물 에너지 모델을 구축하는 방법과 건물 에너지 시뮬레이션 결과의 분석 및 시뮬레이션 결과를 이용한 건물 설계 방법에 대한 특허 등록이 주를 이루고 있다. 특히, BIM과 건물에너지 모델간의 호환성을 증가시켜 BIM 모델만으로 쉽게 건물에너지 시뮬레이션이 가능하도록 하는 특허가 가장 많은 것으로 분석되었다.

국외 특허 동향을 살펴보면, 건축상세도면을 이용한 건물에너지 모델을 구성하는 방법과 다양한 건축 대안에 대한 성능평가를 함에 있어서 건물 매스, 평면 구성, 냉난방 시스템의 종류로 구분하여 각각의 건물에너지 시뮬레이션의 적용방법에 대한 특허 기술이 주를 이루고 있다.

국내외 건물에너지 시뮬레이션 관련 기술 특허 동향을 종합적으로 분석해 보면, 건물에너지 시뮬레이션의 구축과 결과의 활용에 대한 기존 특허는 다수 존재하고 있으나, 건물에너지 시뮬레이션의 정확성을 높이는 기술에 대한 선행 기술은 찾아보기 힘든 것으로 나타나 이에 대한 기술 선점이 매우 시급한 것으로 판단된다 (표 3, 4).

표 3. 국외 특허 동향

출원인	출원/등록번호	특허명
Chaisuparasmikul Pongsak	11784333	Method and system for integrating computer aided design and energy simulation
Lee Young Min	12697787	Assessing, forecasting and simulating energy consumption of buildings using energy efficiency coefficient
ADITAZZ, INC	13834430	System and method for realizing a building using automated building mass configuration generation
ADITAZZ, INC	13833386	System and method for evaluating the energy use of multiple different building massing configurations

표 4. 국내 특허 동향

출원인	출원/등록번호	특허명
주식회사 에코시 안	101254201000	건물 에너지 시뮬레이션 결과 분석 시스템 (System for analyzing energy simulation result of construction)
주식회사 에코시 안	1012267050000	건물 에너지 시뮬레이션의 연동 입력 시스템 (System for interlocking input of energy simulation for construction)
경북대학교 산학 협력단	1012644090000	BIM을 이용한 건물 에너지 시뮬레이션 방법 (A method of building energy simulation using BIM)
경희대학교 산학 협력단	1013940220000	BIM을 이용한 건물 외피 형태 자동화 생성 및 이를 이용한 건물 에너지 시뮬레이션 방법 (Method for the BIM-based automation of building envelope form generation and building energy simulation)
성균관대학교 산 학협력단	1012758970000	에이전트 행동을 고려한 건물에너지 시뮬레이션 시스템 및 그 방법 (Energy simulation system considering action of agents and the method thereof)
비에치티엔지니어 링 건축사사무소 주식회사	1020120037442	시뮬레이션을 통한 고 에너지 효율을 갖는 건물 설계 시스템 및 이를 사용한 건물 설계 방법 (Design system of building having high energy efficiency using simulation and design process thereof)
경희대학교 산학 협력단	1013937500000	BIM을 이용하여 정보호환성을 향상시킨 건물 에너지 시뮬레이션 방법(A method of data information interoperability enhanced building energy simulation using BIM)
성균관대학교 산 학협력단	1020120120754	웹 기반 프로세스 모델을 이용한 에너지 시뮬레이션 및 이를 이용한 시뮬레이션 방법 (Energy simulation system using web-based process model and simulation method using the same)

3. 종합결론

본 과제의 SWOT 분석 결과 건물에너지 시뮬레이션 분야의 국내외 시장은 지속적으로 확대될 것으로 예상되며, 국가차원에서도 건축물의 탄소 배출 저감을 위한 다양한 정책이 시행되고 있다.

그러나, 국외의 실증연구 결과에 따르면 건물에너지 시뮬레이션의 결과가 부정확하여 신뢰성에 문제가 있는 것으로 나타났으며, 선진 외국에서도 프로그램 자체의 신뢰성을 평가하는 기

준 연구는 진행되었으나, 개별 시뮬레이션 결과의 정확성을 향상시키기 위한 연구는 결핍 단계이며, 국내에서는 아직 이에 대한 연구가 거의 전무한 실정이다.

따라서, 시뮬레이션의 결과를 근본적으로 향상시킬 수 있는 확률보정 자동화 방법에 대한 기술을 선점하여 국가차원의 탄소 배출 저감 정책과 국내 업체의 시장 점유율 증가에 기여하는 것이 절실하다.

S	국가 정책	W	건물에너지 시뮬레이션의 신뢰성 부재
	에너지 소비 총량제, 건축물의 에너지 소비 증명제 등 건물 에너지 시뮬레이션의 활용도가 높은 정책을 시행 중임. 특히 건축물의 탄소배출 저감을 위한 국가적 의지가 강함. 본 연구는 시뮬레이션 신뢰성을 근본적으로 향상시켜 국가 정책의 크게 기여할 수 있음.		국외 실증 연구결과에 따르면 실제 건물의 에너지 사용량과 건물에너지 시뮬레이션의 예측값과는 큰 차이가 발생함. 국외의 경우도 프로그램 자체의 신뢰성 평가에 대한 기준은 있으나, 개별 시뮬레이션 결과의 정확성을 높이기 위한 연구는 아직 초보적인 단계임.
O	국내외 시장의 활성화	T	국내 시장의 경쟁 심화
	건물에너지 분야의 시장은 전세계적으로 매년 14%, 국내는 23%로 증가할 것으로 예상되는 등 건물 에너지 시장에 대한 민간 부문의 관심이 증가됨. 건물에너지 관련 사업에서 건물에너지 시뮬레이션을 활용한 다양한 사업 모델이 존재함.		세계적인 기업인 IBM, AutoDesk, Siemens, Johnson Controls 등이 자체 개발한 건물에너지 프로그램을 활용하여 국내의 건물에너지 절약 및 제어 시장에 진출하고 있음. 기술 선점을 위한 정부의 지속적인 지원이 필요.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. 건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술 개발

가. 건물에너지 모델의 입력 변수 및 경계조건 도출

영국 런던대학의 Davies 교수팀은 건물의 설계 단계에서 시뮬레이션을 통한 정확한 에너지 소요량을 도출하기 위하여 시뮬레이션의 오차가 발생하는 다양한 원인을 조사한 바 있다. 그들의 연구에 따르면 오차의 발생 원인은 건물에너지 프로그램 자체의 문제가 아니라 구축된 건물에너지 모델의 부정확성에 기인하며 자세한 내용을 살펴보면 아래와 같다.

모델의 단순화: 시뮬레이션 과정에서 실제 건물의 복잡한 구조와 형상을 단순화가 이루어져 구축된 모델이 대상 건물과 차이를 나타나게 된다.

건물 완공 전후의 변화: 건물에너지 모델에 입력한 건물 외피의 열성능, 냉난방 시스템의 효율, 제어 방식 등은 건물의 시공성과 건물의 기능에 따라 건물 완공 후 변화될 수 있으며, 이에 따라 오차가 발생한다.

건물의 사용자: 건물의 사용자들은 건물의 온도설정 및 환기, 조명, 각종 기기의 실제 사용을 결정하게 되면 건물의 에너지모델의 가정과 실제 건물의 사용패턴은 많은 차이를 나타내게 되며, 이러한 재실자 행태의 불확실성은 시뮬레이션 결과의 정확성에 영향을 미치는 가장 중요한 요소이다.

건물에너지 모델의 요소 중 특히 건물 사용자 요소에 대한 불확실성의 제거가 건물에너지 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있는 가장 효과적인 방법이라는 Davies 팀의 연구 결과는 미국 그린빌딩협회와 영국 캠브리지 대학 Steemers 팀의 연구결과도 뒷받침되고 있다.

따라서 건물에너지 시뮬레이션의 신뢰성과 정확성을 높이기 위해서는 건물에너지 모델의 불확실성을 제거할 수 있는 기술개발이 필수적이다. 이는 건물에너지 시뮬레이션의 오차가 생기는 근본적인 이유가 바로 건물에너지 프로그램을 이용하여 구축된 건물에너지 모델이 실제 건물과 물리적 구조 및 건물의 운영과 많은 차이가 있기 때문이다. 정밀한 해석 알고리즘

이 적용되고 국제적인 기준에 따라 그 신뢰성이 검증된 건물에너지 프로그램은 매우 정확한 건물에너지 소비량의 예측이 가능하다. 그러나 모델링 입력 요소의 불확실성으로 인하여 건물에너지 모델은 결과적으로 실제 건물과는 다르게 구축이 되고, 이에 따라 시뮬레이션의 오차가 발생하게 되는 것이다.

ㄱ. 오차유발요소

본 시뮬레이션으로 건물의 동적 거동을 구현하기 위해서는 매우 다양한 입력변수들이 필요하며, 이러한 입력변수의 값들은 확률적 특성으로 인해 시뮬레이션 모델과 실제 값 사이에 큰 차이를 유발한다.

건물에너지 소비량은 침기율, 열관류율과 같은 건물의 건물 요소로 인해 소비되는 에너지와 기기부하, 조명부하, 실내설정온도와 같은 재실자 요소로 인한 에너지 사용, 그리고 HVAC를 통한 외기도입량, 실외기 효율과 같은 시스템 요소로 인해 소비되는 에너지로 나눌 수 있다. 위에서 언급한 요소들을 표로 정리하면 표 5와 같다.

표 5. 각 오차유발 요소

	Name
1) 재실요소 (내부발열)	Thermal Zone People
	Thermal Zone Lights
	Thermal Zone Equip
2) 재실요소 (시간 별 스케줄)	BLDG_OCC_SCH
	BLDG_LIGHT_SCH
	BLDG_EQUIP_SCH
	ACTIVITY_SCH
	CLOTHING_SCH
	INFIL_QUARTER_ON_SCH
3) 재실요소 (시스템 사용)	ERVoperationSch
4) 재실요소 (설정 온도)	Heating Setpoints_ASHRAE
	Cooling Setpoints_ASHRAE
5) 건물 요소	Insulating board of Glass
6) 건물 요소	Low E glass
7) 건물 요소 (Infiltration)	Zone infiltration
8) 시스템 요소 (HVAC을 통한 외기도입량)	Design specification : outdoor air_zone
9) 시스템 요소 (실외기 효율)	VRF cooling COP

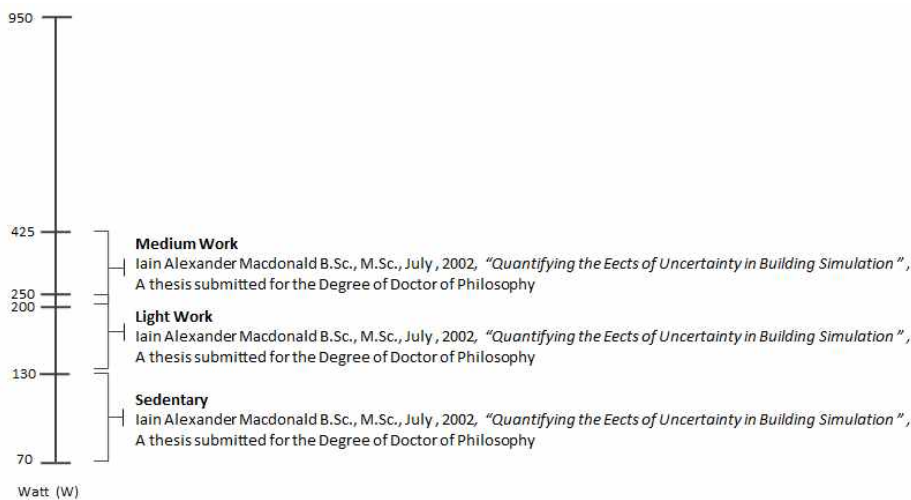
ㄴ. 경계조건 설정

건물에너지시뮬레이션 모델의 구축을 위해서는 많은 입력 요소들이 필요하지만 그 입력 요소의 불확실성으로 인하여 시뮬레이션 결과와 건물의 실제 에너지 사용량이 차이가 나게 된다. 오차율의 90%를 차지하는 재실자의 재실 스케줄, 조명 스케줄, 기기 스케줄 등 사용자 요소에 관한 다양한 보정 요소를 선정하여 재실자로 인해 생기는 오차율을 감소시킨다.

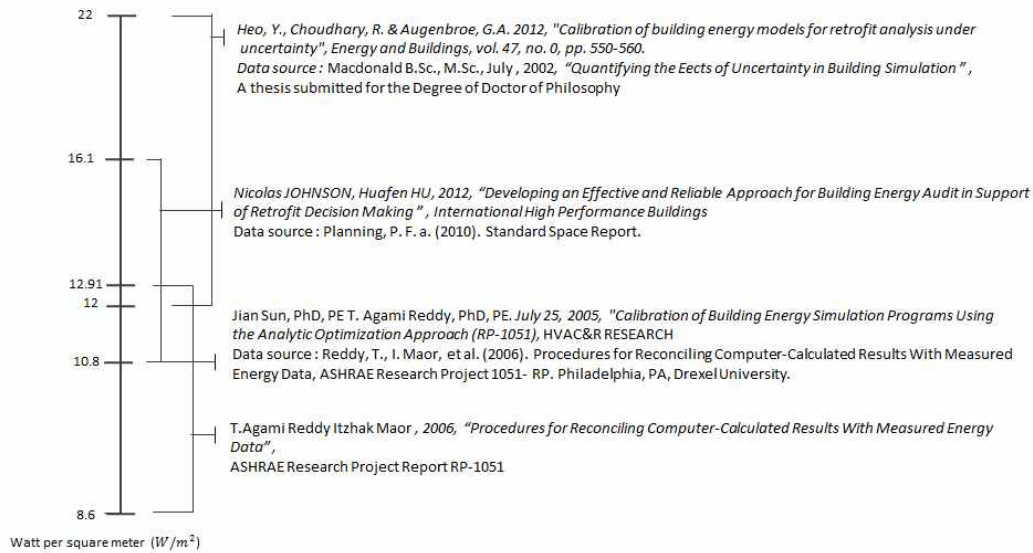
선정된 재실요소, 건물요소, 시스템 요소에 오차유발 요소의 경계 조건을 설정하기 위해 문헌 조사를 실시하여 연구를 위한 오차유발요소별 경계조건에 대한 정보를 수집하였다. 내부 발열(기기 발열)에 대해 수집한 경계조건 내용은 다음과 같다. 각각의 오차유발 요소의 최대값과 최소값을 조사하여 변수들의 Range 값을 설정하였으며, 이는 보정요소 모델링에 가장 중요한 value 값을 설정 하는데 필요한 자료로 사용된다.

재실자, 기기 및 조명에 의한 내부발열에 대한 기존 실측 연구를 종합하면 그림 10과 같이 정리할 수 있다. 재실자 내부 발열은 한사람당 70 W에서 950W에 해당한다. 조명에 의한 열 획득은 1.1W/m^2 에서 18.3W/m^2 에 해당하는 것으로 조사되었다. 기기에 의한 내부발열은 8.6W/m^2 에서 22W/m^2 의 범위를 나타낸다.

a) 인체발열



b) 기기발열



c) 조명발열

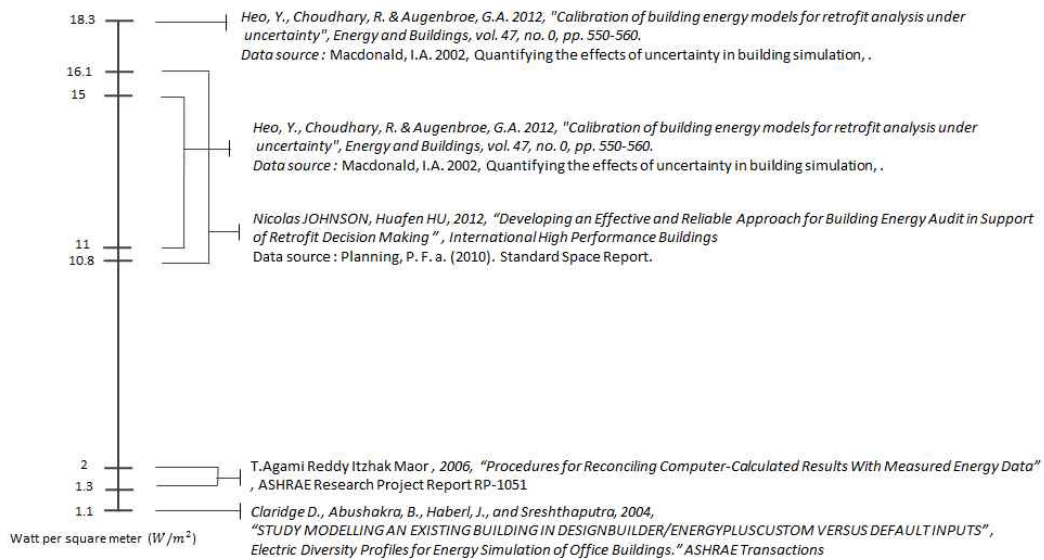


그림 11. 실내 내부 발열

건물의 사용 스케줄은 건물에너지 사용을 중요한 요소이며, 특히 건물에너지 모델의 불확실성이 매우 큰 것으로 알려져 있다. 기존 문헌을 통해서 도출한 건축물의 사용 스케줄은 그림 11과 같다.

BLDG_OCC_SCH : WD (Through : 25, Jan)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.53	0.53	0.64	0.64	0.64	0.64	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34

BLDG_OCC_SCH : WD (Through : 29, Mar)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Claridge D., Abushakra, B., Haberl, J., and Sreshthaputra, 2004, "STUDY MODELLING AN EXISTING BUILDING IN DESIGNBUILDER/ENERGYPLUS CUSTOM VERSUS DEFAULT INPUTS", Electric Diversity Profiles for Energy Simulation of Office Buildings," ASHRAE Transactions.

BLDG_OCC_SCH : WD (DOE Commercial Reference Buildings Report)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.2	0.95	0.95	0.95	0.5	0.95	0.95	0.95	0.95	0.7	0.4	0.4	0.1	0.1	0.05	0.05

BLDG_LIGHT_SCH : WD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.24	0.24	0.24	0.25	0.26	0.29	0.43	0.68	0.81	0.86	0.86	0.84	0.84	0.85	0.85	0.83	0.69	0.54	0.46	0.44	0.35	0.27	0.25	0.25

Claridge D., Abushakra, B., Haberl, J., and Sreshthaputra, 2004, "STUDY MODELLING AN EXISTING BUILDING IN DESIGNBUILDER/ENERGYPLUS CUSTOM VERSUS DEFAULT INPUTS", Electric Diversity Profiles for Energy Simulation of Office Buildings," ASHRAE Transactions.
Data source : Claridge D., Abushakra, B., Haberl, J., and Sreshthaputra, A. (2004) "Electric Diversity Profiles for Energy Simulation of Office Buildings," ASHRAE Transactions: AN-04-3-3 (RP-1095).

BLDG_LIGHT_SCH : WD (DOE Commercial Reference Buildings Report)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.3	0.3	0.1	0.05

BLDG_EQUIP_SCH : WD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.2	0.05	0.05	0.05	0.05	0.15	0.4	0.7	0.85	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.85	0.75	0.63	0.58	0.55	0.65	0.55

Guang Yang, August 2012, "ENERGY SIMULATION IN EXISTING BUILDINGS: CALIBRATING THE MODEL FOR RETROFIT STUDIES BY Guang Yang", A Thesis Presented to the FACULTY OF THE USC SCHOOL OF ARCHITECTURE UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree MASTER OF BUILDING SCIENCE

BLDG_EQUIP_SCH : WD (DOE Commercial Reference Buildings Report)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4

ACTIVITY_SCH : All

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120

Michael Deru, Kristin Field, Daniel Stader-Bing Liu, Mark Halverson, Dave Winiarski, and Michael, Kyle Benne, Brent Griffith, Joe Huang and Paul, February, 2011, " U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock." NREL

CLOTHING_SCH : Through 04/30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

CLOTHING_SCH : Through 09/30

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

CLOTHING_SCH : Through 12/31

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Michael Deru, Kristin Field, Daniel Stader-Bing Liu, Mark Halverson, Dave Winiarski, and Michael, Kyle Benne, Brent Griffith, Joe Huang and Paul, February, 2011, " U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock." NREL

INFIL_QUARTER_ON_SCH : WD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1	1	1	1	1	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	1	1

Michael Deru, Kristin Field, Daniel Stader-Bing Liu, Mark Halverson, Dave Winiarski, and Michael, Kyle Benne, Brent Griffith, Joe Huang and Paul, February, 2011, " U.S. Department of Energy Commercial Reference Building Models of the National Building Stock." NREL

그림 12. 건축물의 사용 스케줄

나. 최적 샘플링 기법 개발

건물에너지 시뮬레이션의 예측보정기법은 크게 수동보정기법, 실측보정기법, 확률보정기법으로 구분할 수 있다.

수동보정기법은 직관과 경험적 지식을 바탕으로 건물에너지 프로그램의 사용자가 시행착오를 통해 미지의 변수에 대한 값을 추정하여 보정을 실시하는 것이다. 이 방법은 건물의 완공 전이나 실측이 불가능한 경우에 가장 널리 사용되고 있는 방법이다.

실측보정기법은 2002년 미국의 ASHRAE에서 제안(ASHRAE Guideline 14)한 것으로 건물의 에너지 절약효과를 검증하기 위하여 건물의 실측을 바탕으로 건물에너지 모델을 보정하는 방법이며, 가장 널리 사용되고 있다. 실측보정기법은 건물에너지 모델을 구축한 후 건물에너지 시뮬레이션 결과와 실제 에너지 소비량을 비교하게 된다. 일치하지 않는 경우 실측한 자료를 바탕으로 건물에너지 모델을 반복적으로 수정하여 시뮬레이션의 결과가 실제 에너지 소비량의 오차가 기준을 만족하도록 한다. 이러한 실측보정기법은 건물에너지 모델을 보정하기 위하여 건물의 실측이 요구되어 모델링의 비용과 개발 시간이 매우 크며, 특히 건물에너지 모델의 모든 요소들이 측정이 가능하지는 않다는 단점이 있다.

이와 같은 단점을 해결하기 위한 확률보정기법은 대상건물의 실측을 하지 않고, 건물에너지 모델의 입력변수에 대하여 사용자가 예상하는 확률분포를 입력하는 방법이다. 즉, 입력변수에 대한 단일 값이 아닌 확률분포로 도출된 입력 변수를 이용하여 보정을 하는 방법이다. 확률보정기법은 대상 건물의 실제 값을 정확히 모사가 가능하도록 각 변수들에 대한 확률적 특성을 고려할 수 있으므로 수동보정이나 실측보정보다 더 우수한 장점이 있다. 본 연구에서는 건물에너지 모델의 자동화 보정기술로 확률보정기법을 활용하고자 한다.

본 확률보정기법의 핵심은 각 변수에 대한 확률 샘플링 기법이며, 본 연구에서는 LHS (Latin Hypercube Sample)기법을 적용하여 건물에너지 모델의 다 입력변수에 대한 샘플링을 구축하였다. LHS는 집단의 특정 클래스의 불확실성 평가를 위해 개발되었으며, 서로 다른 변수 $X_1, X_2, \dots, X_k$ 가 가정된 확률분포를 따르며 변화할 때, 각 확률구간 중 정규분포의 중심 값에 가장 근접한 Y 를 가지는 X 를 선택하여 k 개의 X 변수들이 조합된 N 개의 표본을 산출한다. LHS 샘플링은 각 변수에 대한 확률분포를 이용한 샘플링기법으로, 일반적인 샘플링 방법인 Monte Carlo 기법에 비하여 계산 시간을 단축할 수 있다는 특징이 있으며, 그림13에서 볼 수 있는 것처럼 각 변수에 대하여 생성되는 표본의 분포가 균일하다는 장점이 있다.

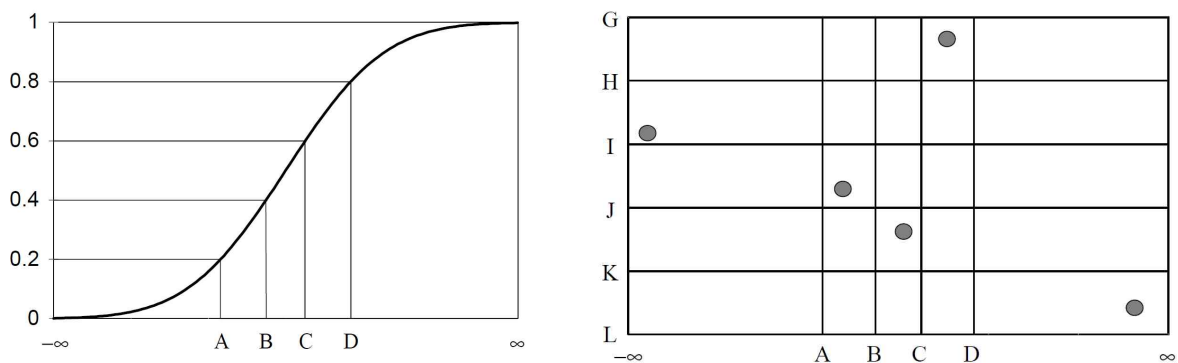


그림 13. 표본 개수가 5개인 경우의 누적확률분포와 샘플링 결과의 예

본 연구에서는 오픈소스 프로그램인 jEPlus를 활용하여 EnergyPlus에 대한 LHS 확률보정을 위한 샘플링을 실시하였다. jEPlus는 영국의 De Montfort University의 Zhang에 의하여 개발되었으며, GPL 라이선스에 따라 프로그램의 상업용, 비상업용 무료 이용, 프로그램의 자유로운 수정 및 배포가 가능하다 (그림 14).

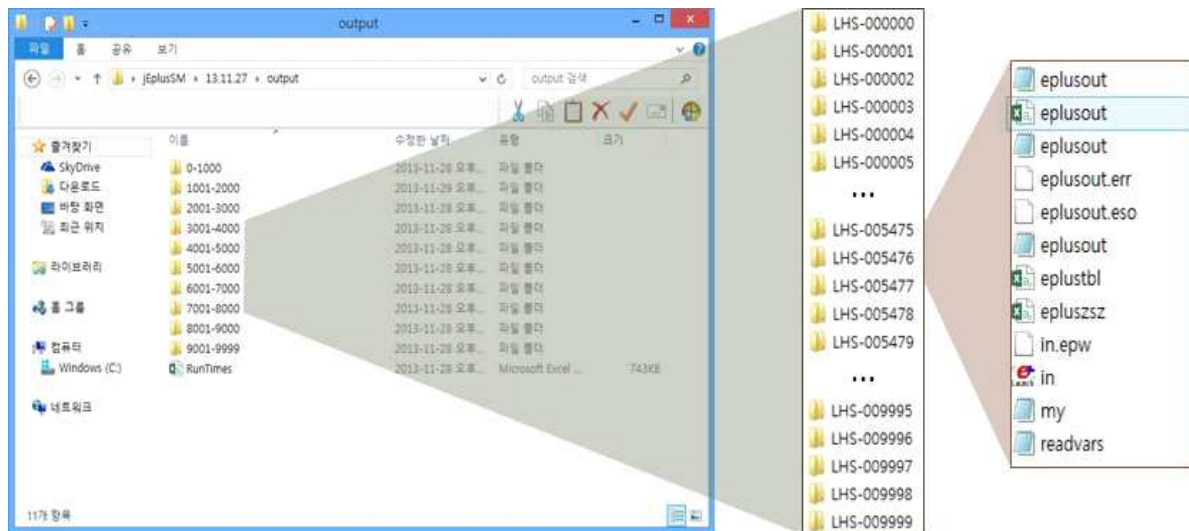


그림 14. LHS 확률 보정이 반영된 건물에너지 모델의 결과물

다. 확률보정 자동화 기술 개발

ㄱ. 최적 에너지 모델의 선정 기준

Measurement & Verification (M&V)기준에서는 시뮬레이션 모델을 보정한 후, 실제 측정값(에너지소비량)과 비교를 통해 보정된 시뮬레이션의 정확도를 판단한다. 세 개의 대표적 M&V가이드는 시뮬레이션 모델의 정확도 판단을 위한 오차지표로써, MBE(Mean Bias Error)와 CVRMSE(Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error)를 제시하고 있으며, 두 개의 오차지표의 값이 작을수록 보정이 잘 되었다고 판단한다. 표 6에 각각의 M&V가이드의 허용오차지표 값을 나타내었다.

표 6. 대표적 M&V가이드의 오차지표 허용기준

보정 간격	오차지표	ASHRAE Guideline 14	IPMVP	FEMP
Monthly	MBE	$\pm 5\%$	$\pm 20\%$	$\pm 15\%$
	CV(RMSE)	$\pm 15\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$
Hourly	MBE	$\pm 10\%$		
	CV(RMSE)	$\pm 30\%$		

오차지표의 기준은 보정 간격에 따라 다르며, 한 달 간격으로 보정을 실시한 경우 세 개의 M&V 가이드의 오차지표 기준이 모두 다름을 알 수 있었다. 그러나 한 시간 간격으로 보정을 실시한 경우의 오차지표 기준은 MBE와 CV(RMSE)가 각각 $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ 으로 동일하였다.

실시한 대표적인 M&V가이드의 고찰을 통해, 본 논문에서 실시된 M&V보정(실측 보정)의 기준 가이드를 ASHRAE Guideline 14로 선정하였으며, 보정 간격은 한 시간으로 하여 보정 후 시뮬레이션 모델 검증 시 오차지표의 기준으로 MBE $\pm 10\%$ 와 CV(RMSE) $\pm 30\%$ 를 사용하였다.

ㄴ. 확률보정 자동화 툴 개발

본 연구에서는 건물에너지 모델의 확률보정을 자동화할 수 있는 툴을 개발하였으며, 개발된 툴의 구성은 그림 15와 같다.

(1) 입력파일 생성

전 처리기로서 지정한 Excel 파일로부터 ID, Search String 등을 읽어 들어 XML 형식의 .jep 파일을 생성한다.

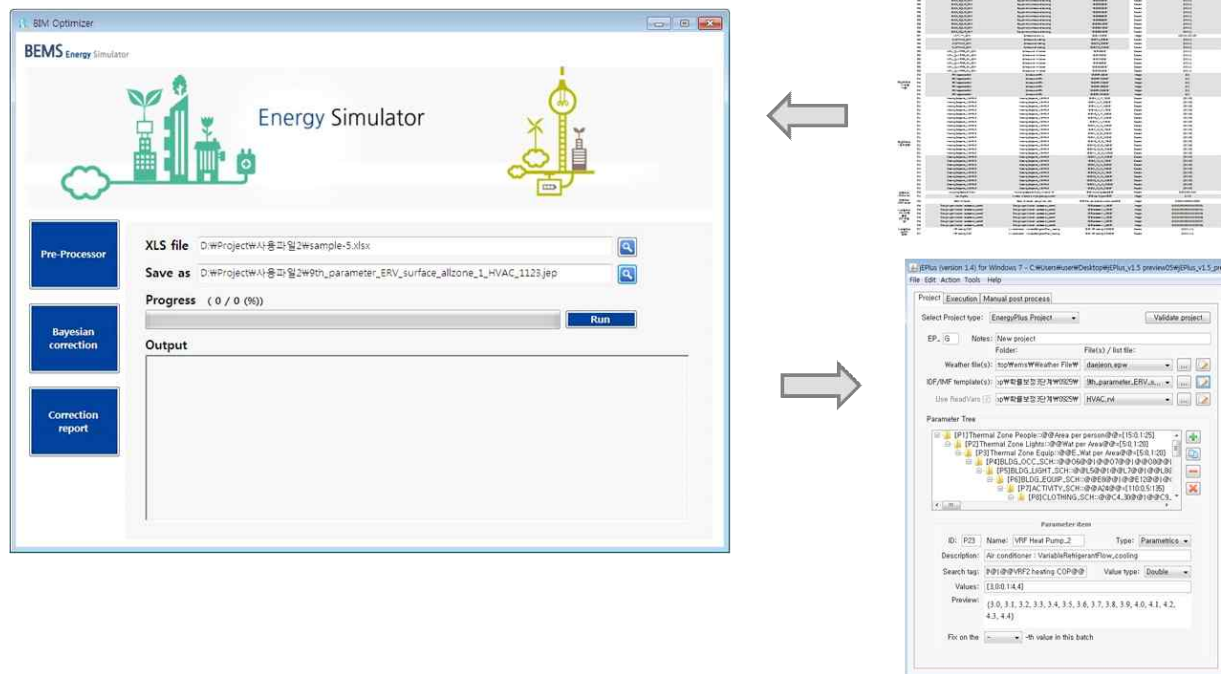


그림 15. 일체화 툴 구성

Pre-Processor 에서 지정한 Excel 파일로부터 Search String을 읽어, IDF 파일의 Search String 값을 @@[String]@@ 형태로 변환하는 기능을 수행하게 된다 (그림 16).



그림 16. pre-processor

(2) 확률보정 실행

문자열 전환 작업이 끝난 뒤 입력된 JEplus 커맨드 명령을 수행 및 시뮬레이션을 진행하여 LHSXXXXXX 디렉토리를 생성하는 기능 수행 한다 (그림 17).



그림 17. LHS시뮬레이션 RUN

(3) 최적 에너지 모델 도출

시뮬레이션 결과과 있는 디렉토리와 Real Value 가 들어 있는 Excel 파일을 지정한 후, NMBE 값에 대한 범위와 나머지 옵션을 선택하여 실행을 하면 지정한 NMBE 값 이하의 값을 갖는 LHS 디렉토리의 목록을 출력하며, 가장 낮은 값을 갖는 디렉토리를 지정해 준다 (그림 18).

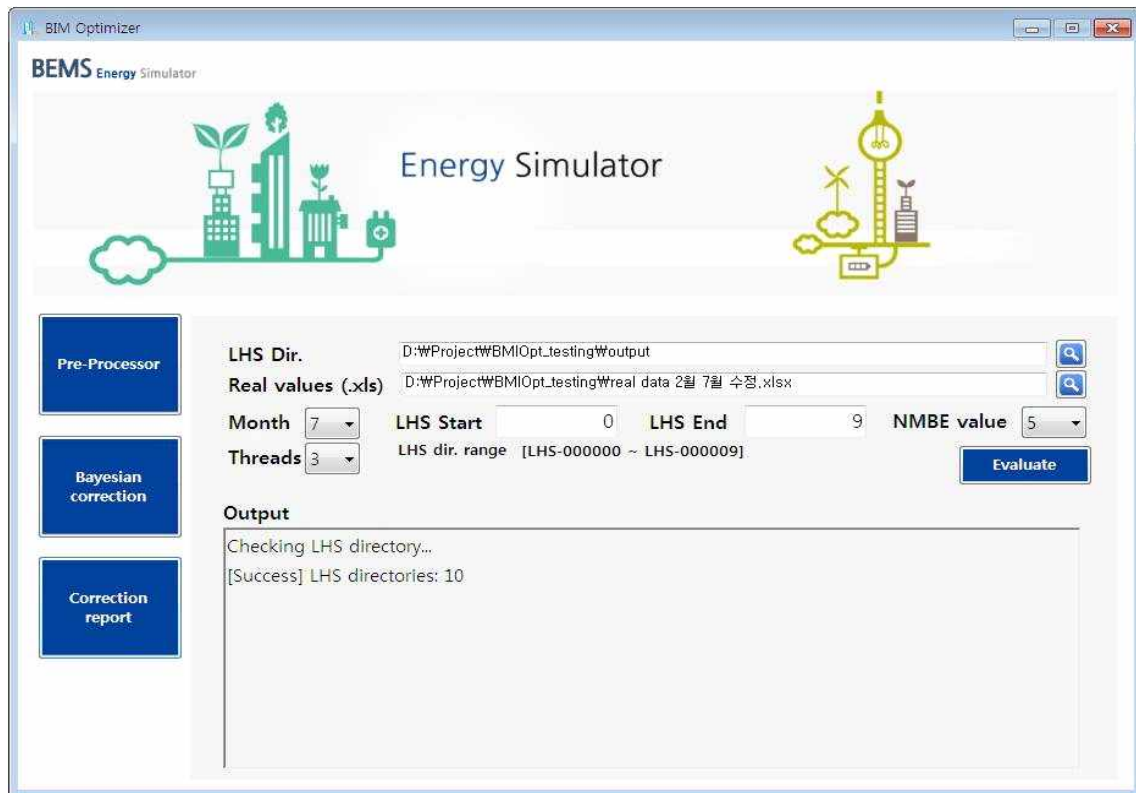


그림 18. 최적 BEM 도출

2. 건물에너지 모델의 확률보정 기술 검증

본 연구에서 개발된 건물에너지 모델의 확률보정 기술을 검증하기 위하여 실제 건물에 대하여 건물에너지 모델을 구축하고, 에너지 사용량을 측정한 후 개발된 확률보정 기술을 적용하여 개발된 기술을 검증하였다.

가. 대상건물의 개요

건물에너지시뮬레이션의 보정을 위해 실존하는 건물을 대상건물로 선정하였다. 대상건물은 경기도 수원시 매탄동에 위치하고 있으며, 지하1층부터 지상7층의 규모를 지닌 OpenPlan 형태의 사무소 건물이다. 건물 지상층의 대부분은 사무실과 실험실로 구성되어 있다. 두 개의 회의실을 포함한 공조공간의 면적은 1248㎡이다. 표 7과 그림 19는 대상 사무실의 건축개요와 평면도이다.

표 7. 대상 사무실의 건축 개요

위치	경기도 수원시			
건물용도	사무소 건물 (OpenPlan)			
건물방위	남동향			
건물체적[m3]	11913.83			
바닥면적[m2]	1588.51			
재실인원[명]	125			
평면구성	실	개수	실	개수
	공조실	2	EPS/TPS	2
	계단실	3	ELEV실/비품실	1
	회의실	2	Pipe Shaft	5
	전산실	2	화장실	2
열관류율 [W/m2·K]	외벽 : 0.307 W/m2·K 내벽 : 0.403~0.473 W/m2·K 천정 : 0.316 W/m2·K 바닥 : 2.525 W/m2·K 창호 : 2.85 W/m2·K			

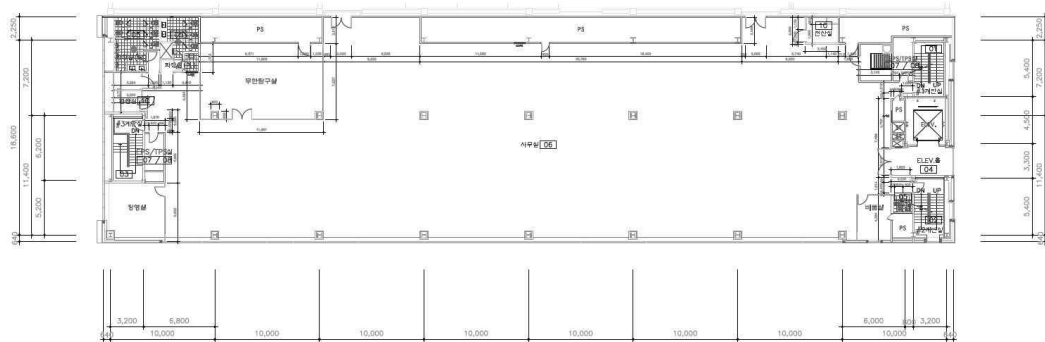


그림 19. 대상 사무실 평면도

나. 공조시스템의 개요

대상공간에 적용된 공조시스템은 시스템에어컨의 종류 중 하나인 냉매 유량 가변형 시스템 (VRF: Variable Refrigerant Flow System)으로 별도의 전열교환기(ERV: Energy Recovery Ventilator)가 설치되어 있는 형태이다. VRF System은 한 대의 실외기에 여러 대의 실내기

를 연결하여 개별 및 분산공조가 가능한 공조시스템으로써, 대상공간에는 3대의 실외기와 26대의 실내기가 설치되어 있으며, 실외기 3대 중 1대만 용량이 다른 모델이다. 대상공간에 설치된 공조기의 특성과 공조계통도는 표 8, 그림 20과 같다.

표 8. 대상 사무실 공조기 특성

종류	모델명	EA	공조기 성능(냉방/난방)
ERV	RHF-200EB85S	5	2000CMH
VRF	DVM+4 26HP	2	75.4/84.9kW
	DVM+4 24HP	1	69.6/78.4kW
실내기	AVXC4H072B3	26	7.2/8.1kW

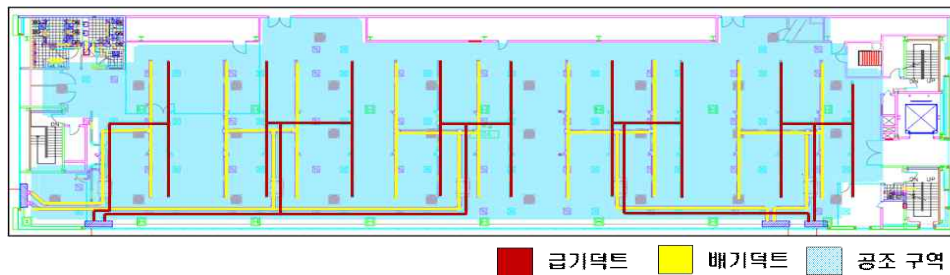


그림 20. 대상 사무실 공조계통도

다. 기상데이터

시뮬레이션 사용된 기상데이터는 대상건물이 위치한 수원시의 과거 30년동안의 기후를 대표하는 기상데이터로, Meteonorm 프로그램을 이용하여 EnergyPlus의 기상데이터 파일형태인 epw 형식이다.

사용된 기상데이터의 외부온도와 습도를 분석해보았다. 선정된 수원시 기상데이터의 연평균 기온은 10.5℃, 습도는 71.67%였으며 여름철(6월-8월)과 겨울철(11월-2월)로 나누어 분석한 결과, 여름철의 평균기온은 23℃로 나타났으며, 겨울철의 평균기온은 0.5℃였다. 여름철과 겨울철의 평균습도는 각각 80.33%, 67.25%로 나타나, 여름철에는 다습하다.

라. 건물 모델링

대상건물의 건축적인 형상은 DesignBuilder Software를 이용하여 모델링되었다. 대상공간의 내부는 건축도면을 참고하여 기존 평면형태로 모델링한 후, 대상사무실의 공조계통도를 참고하여 추후 공조시스템의 모델링을 고려해 OpenPlan형태였던 하나의 Zone을 6개의 Zone으로

재구성하였다. 그림9, 10은 각각 대상건물의 모델링 모습과 내부 Zoning 모습이다.

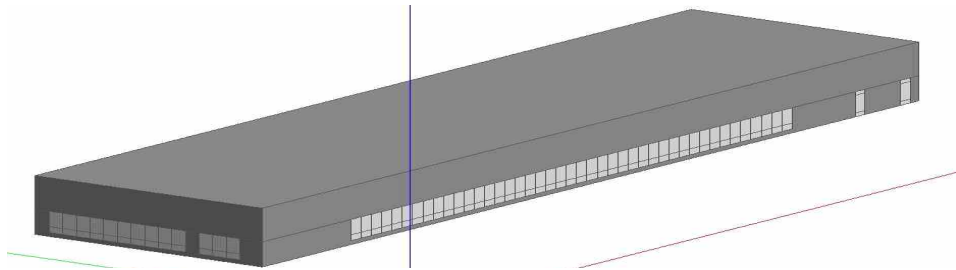


그림 21. 건물 모델링 모습

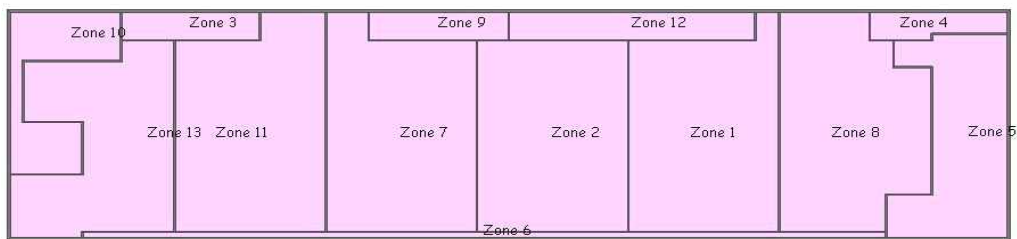
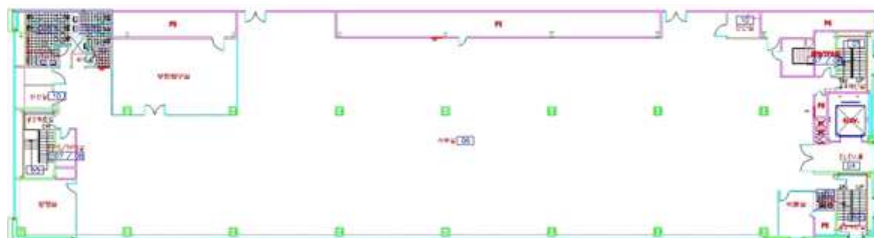


그림 22. 대상 사무실의 Zoning 모습

마. 건물 재료의 물성치

건물의 형상모델링 이후 EnergyPlus 상에서(idf파일 이용) 건물 벽체 및 재료에 대한 세부입력을 실시하였다. 벽체의 경우, 대상건물의 벽체안내도를 참고하였으며, 창호의 블라인드의 경우 실측을 통해 사용된 재료의 정보를 파악하여 입력하였다. 그림 23은 대상건물의 벽체안내도, 표 9,10은 유리과 블라인드의 재료 및 물성치이다.



부호	색상	내용	부호	색상	내용	부호	색상	내용	부호	색상	내용	부호	색상	내용	부호	색상	내용
W1		STUD 100+방화석고19T 4P	W6		STUD 100+필란석고12.8T 2P	W11		STUD 66+방수석고12.8T 2P+리플18T	W16		STUD 100+방화석고19T 4P+방수석고12.8T 1P+리플18T						
W2		STUD 66+필란석고12.8T 2P (기판)	W7		STUD 66+필란석고12.8T 2P	W12		STUD 100+방수석고12.8T 2P+리플18T	W17		CH-STUD 100+방화28T 1P+방화18T 3P+방수12.8T 1P+리플18T						
W3		CH-STUD 100+방화석고28T 1P+방화석고18T 3P	W8		STUD 100+필란석고12.8T 4P	W13		STUD 100+방수석고12.8T 4P+리플18T	W18		CH-STUD 100+방화28T 1P+방화18T 3P+STUD 66+방수12.8T 2P+리플18T						
W4		CH-STUD 100+방화석고28T 1P+필란석고12.8T 2P	W9		STUD 66+필란석고12.8T 2P (편다어)	W14		STUD 100+방수석고12.8T 4P+리플18T 양면	W19		STUD 100+방화석고19T 2P						
W5		STUD 100+STUD 66+필란+필란+필란석고12.8T 6P	W10		STUD 100+유리판 위부+필란석고12.8T 4P	W15		STUD 66 2P+방수석고12.8T 4P+리플18T 양면									

그림 23. 대상공간의 벽체안내도

표 9. 대상공간 벽체의 재료특성

유리			블라인드		
항목	내용	두께[mm]	종류	창과의 거리[m]	두께[m]
종류	칼라복층유리	24	KPI AA BE	0.17	0.001
구성	BZ Glazing	6	49024		
	CL Glazing	6	(방염 블라인드)		
	공기층	12			

표 10. 대상건물의 부위별 재료 및 물성치

대상건물의 부위별 재료 및 물성 치(9층)						
	Material	두께 (mm)	열전도율 (W/m*K)	밀도 (kg/m^3)	비열 (J/(kg*K))	비고
외벽_설비코어부분 (북향)	알루미늄	3	221	2740	896	ASHRAE
	유리면 보온판 2호	60	0.047	8	800	ASHRAE
	공간	100	0.025	1	1024	TAB 기술서
	압출법보온판 1호	13	0.04	25	800	ASHRAE
	철근콘크리트 웅벽	200	2.3	2300	880	DIN
	시멘트 몰탈	18	0.25	1150	840	ASHRAE
외벽_ 사무실부분 (동서 남향)	알루미늄	3	221	2740	896	ASHRAE
	유리면보온판 2호	60	0.047	8	800	ASHRAE
	공간	150	0.025	1	1024	TAB 기술서
	유리면보온판 2호	60	0.047	8	800	ASHRAE
내벽_설비 코어부분	철근콘크리트 웅벽	300	2.3	2300	880	DIN
	공간	50	0.025	1	1024	TAB 기술서
	화강석 몰갈기	30	3.3	2700	1000	KS (1000=DIN)
커튼 월_창문	로이유리	6	0.76	2500	840	한글라스에서 제공하는 두께 참조
	공간	12	0.025	1	1024	
	로이유리	6	0.76	2500	840	한글라스에서 제공하는 두께 참조
바닥_설비 코어 부분 (북향)	콘크리트	101.6	2	2400	900	ASHRAE
	시멘트 몰탈	50	0.25	1150	840	ASHRAE
	화강석 몰갈기	30	3.3	2700	1000	KS (1000=DIN)

바닥_사무실 부분 (동 서 남향)	콘크리트	101.6	2	2400	900	ASHRAE
	시멘트 몰탈	27	0.25	1150	840	ASHRAE
	비닐계 타일 (ALC400)	3	0.27	700	800	KS (비열NO)
천장_설비 코어 부분 (북향)	콘크리트	101.6	2	2400	900	ASHRAE
	공간	223	0.025	1	1024	TAB 기술서
	석고보드	9.5	0.19	800	1674	TAB 기술서
	방수 석고보드	9.5	0.21	800	1008	TAB 기술서
천장_사무실 부분 (동 서 남향)	콘크리트	101.6	2	2400	900	ASHRAE
	공간	223	0.025	1	1024	TAB 기술서
	석고계 텍스	6	0.16	640	115	ASHRAE

바. 공조시스템 모델링

EnergyPlus상에 대상 사무실에 설치된 있는 공조시스템인 VRF System과 ERV를 모델링하기에 앞서, 먼저 시스템의 개념도를 작성하였다. 그림 24는 본 에너지시뮬레이션에 적용된 공조시스템의 개념도이며, 총 세 대의 VRF 중 한 대의 모습을 대표적으로 나타내었다.

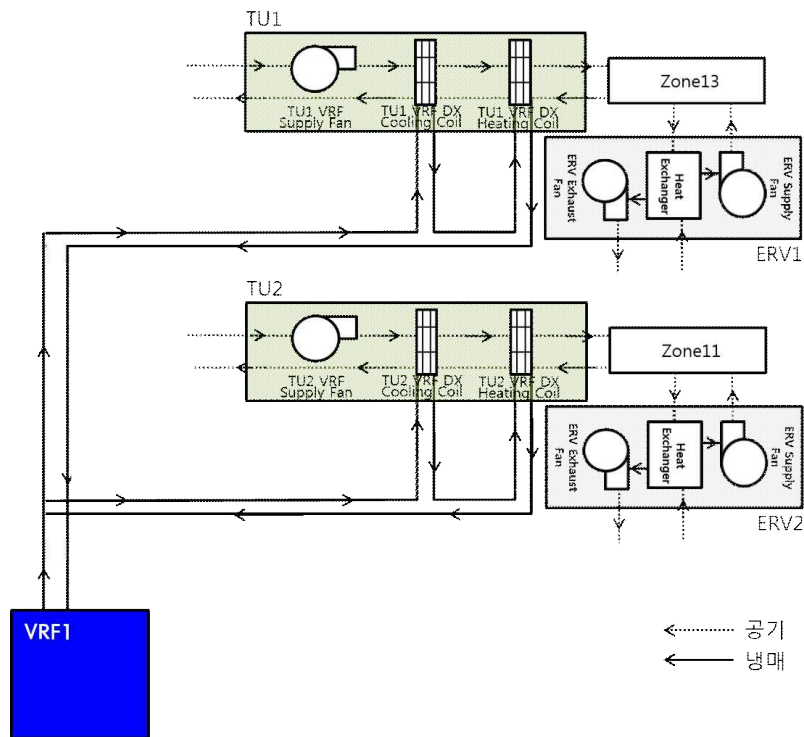


그림 24. 사무실 공조시스템 개념도(VRF+ERV)

에너지시뮬레이션에서 공조존은 총 6개로, VRF(실외기) 한 대당 2개의 공조존을 담당하도록 모델링 되었으며, 각 존마다 한 대의 ERV가 모델링 되었다. 또한 1개의 공조존에는 적게는 세 대, 많게는 다섯 대의 실내기(TU: Terminal Unit)가 연결되어있다. 즉, VRF 한 대는 최

소 여섯 대에서 최대 열 대의 실내기와 한 대의 ERV가 연결되어 있다.

그림 25는 세 대의 VRF가 담당하고 있는 실내기들의 모습을 대상 사무실 평면도 위에 표시한 것으로, 그림에 파란색 네모가 실내기를 나타낸다. 대상 사무실에 설치된 VRF 세 대 중 용량이 작은 한 대(VRF2)를 실내기 개수가 적은 존과 연결되도록 모델링 하였으며, 용량이 동일한 나머지 두 대의 VRF(VRF1, VRF3)는 각각 열 대의 실내기를 담당하도록 모델링 하였다.

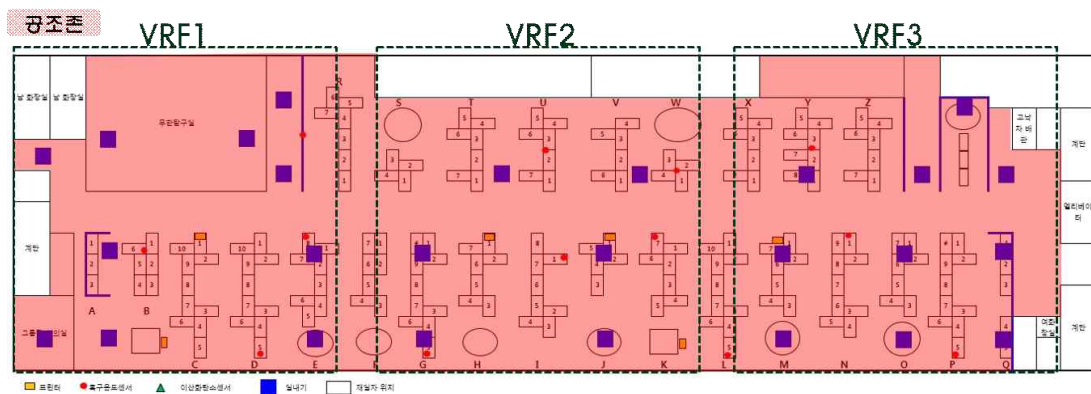


그림 25. VRF 별 실내기 담당현황

표 11. 공조기기의 성능

HVAC	구분	구성요소	성능			개수
VRF+ERV	VRF	VRF HeatPump (실외기)	Cooling	Rated capacity [kW]	69.6	1
				COP	3.5151	
			Heating	Rated capacity [kW]	78.4	
				COP	4.5057	
		Zone Terminal Unit (실내기)	Cooling	Rated capacity [kW]	75.4	2
				COP	3.7234	
			Heating	Rated capacity [kW]	84.9	
				COP	4.6141	
	ERV (열교환기)	Supply Fan	Rated capacity [kW]		autosize	26
			Rated capacity [kW]		autosize	
			Efficiency		0.7	
			Maximum flow rate [m³/s]		autosize	
		Exhaust Fan	Supply air flow rate [m³/s]		0.55	4
					0.275	2
		Heat Exchanger	Exhaust air flow rate [m³/s]		0.55	4
					0.275	2
		Heat Exchanger	Nominal Electric Power [W]		550	4
					275	2

표 11은 대상 사무실에서 사용하고 있는 공조기기의 용량 및 COP를 나타낸 성능특성이며, 이러한 기기들의 특성뿐만 아니라, VRF(실외기)의 냉난방 성능곡선의 계수 또한 실제 사용된 VRF의 냉난방 능력표를 참고하여 입력하였다.

EnergyPlus상에 VRF의 성능곡선은 냉방11개, 난방10개로 총 21개의 성능곡선이 존재한다. 각각의 성능곡선의 계수는 냉난방 능력표를 이용하여 회기분석을 통해 산출되며, 표 12는 모델링 된 VRF 성능곡선의 이름을 나타낸다.

표 12. VRF 냉난방 성능곡선(Performance Curves)의 성능곡선

구분	성능곡선 이름
냉방	Cooling Capacity Ratio Modifier Function of Low Temperature
	Cooling Capacity Ratio Boundary
	Cooling Capacity Ratio Modifier Function of High Temperature
	Cooling Energy Input Ratio Modifier Function of Low Temperature
	Cooling Energy Input Ratio Boundary Curve
	Cooling Energy Input Ratio Modifier Function of High Temperature
	Cooling Energy Input Ratio Modifier Function of Low Part-Load Ratio
	Cooling Energy Input Ratio Modifier Function of High Part-Load Ratio
	Cooling Combination Ratio Correction Factor
	Cooling Part-Load Fraction Correlation
	Piping Correction Factor for Length in Cooling Mode
난방	Heating Capacity Ratio Modifier Function of Low Temperature
	Heating Capacity Ratio Boundary Curve
	Heating Capacity Ratio Modifier Function of High Temperature
	Heating Energy Input Ratio Modifier Function of Low Temperature
	Heating Energy Input Ratio Boundary
	Heating Energy Input Ratio Modifier Function of High Temperature
	Heating Energy Input Ratio Modifier Function of Low Part-Load Ratio
	Heating Energy Input Ratio Modifier Function of High Part-Load Ratio
	Heating Combination Ratio Correction Factor Curve
	Heating Part-Load Fraction Correlation

사. 실내발열부하 및 스케줄

건물에너지시뮬레이션에서 재실자로 인한 에너지소비량의 영향은 재실밀도, 조명부하 및 기

기부하, 그리고 각각의 스케줄에 따라 반영된다. 표 13은 시뮬레이션에 입력된 실내발열 부하이며, 그림 26은 실내발열스케줄을 그래프로 나타낸 모습이다.

표 13. 실내발열부하 및 측정방법

	실내발열부하	실측방법
재실밀도(Person/m ²)	0.09	총 재실인원/바닥면적
조명부하(W/m ²)	12.16	(총 조명개수X조명의 소비전력)/바닥면적
기기부하(W/m ²)	13.97	(총 기기개수X기기의 소비전력)/바닥면적

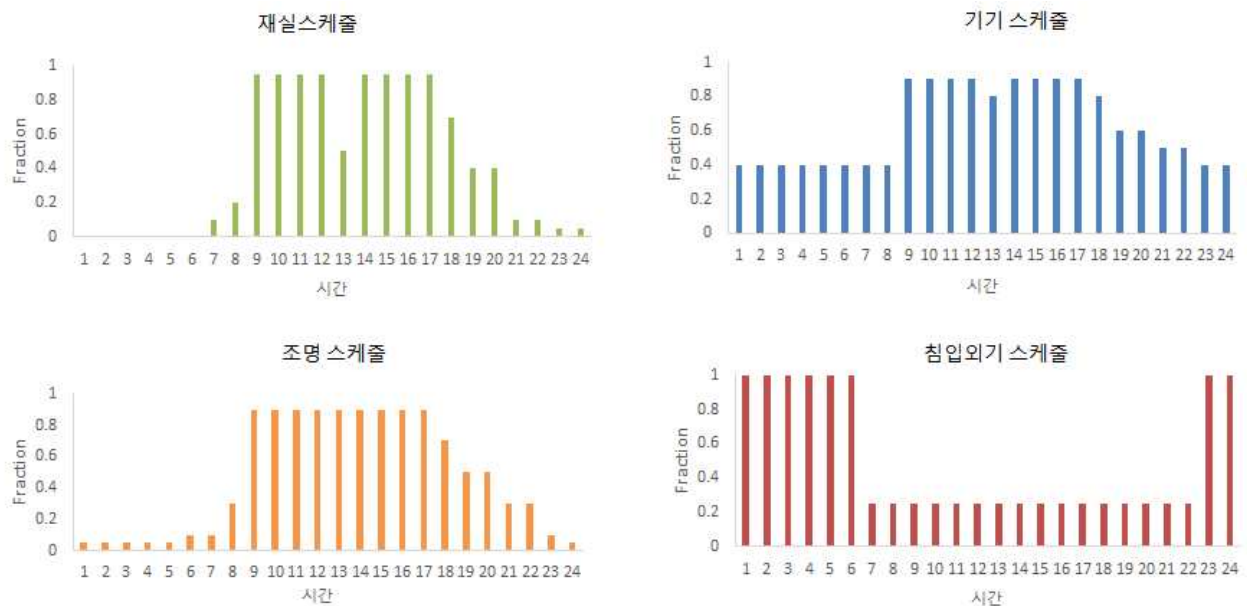


그림 26. 실내발열스케줄

아. 현장실측

보정요소의 실제 현황파악을 위해 실시된 현장실측은 다양한 방법으로 실시되었다. 기상데이터의 보정을 위한 외부센서데이터의 수집, 실내발열부하 및 스케줄 보정을 위해 보정기간 중 하루를 대상건물에 방문하여 매 시간별 실내발열요소들의 변화관찰을 통한 데이터의 수집, 그리고 HVAC System 운영 및 기기특성의 데이터 수집을 위한 건물 관계자와의 인터뷰를 진행하였다.

기상데이터의 보정을 위해 설치된 외부센서를 통해 보정기간동안의 대상건물의 외기조건데이터를 취득하였다. 센서를 통해 취득한 대상건물의 외기조건은 외부온도 및 습도, 일사, 풍향, 풍속이다.

실내발열부하 및 스케줄 보정을 위해 대상건물을 방문하여 현장실측을 실시하였다. 현장실측은 오전 7시부터 오후 10시까지 진행하였으며, 총 재실인원 과 총 조명개수 및 기기개수 그리고 시간 별 재실인원 및 켜진 조명의 개수와 기기(컴퓨터본체 및 모니터, 프린터, 회의용 모니터)의 개수를 체크하였다.

카탈로그를 통해 확인할 수 없었던 실외기의 최소부분부하율과 압축기 한 대당 크랭크케이스의 소비전력은 대상건물의 관계자와의 인터뷰를 통해 확인하였다. 또한 보정기간동안의 공조기 운영스케줄과 설정온도 및 ERV 작동상태 등은 건물 관리자로부터 자료를 받아 실제 적용된 값으로 보정하였다. 표 14는 현장실측요소 및 데이터 취득 방법이다.

표 14. 현장실측요소 및 실측방법

실측항목		실측방법
외부 온·습도, 일사량, 풍향, 풍속, 실내 온·습도		센서를 통한 데이터 취득
실내발열부하 및 스케줄		한 시간 간격으로 실측
공조시스템 운영관련	공조시스템 운영스케줄	건물관계자로부터의 데이터 취득
	공조시스템 설정온도	
	ERV 작동상태	
VRF 실외기 특성	최소부분부하율	건물관계자 인터뷰
	압축기 별 크랭크케이스 소비 전력	

(1) 현장실측 결과 기상데이터

센서를 통해 취득한 대상건물의 외기조건 중 온도와 상대습도에 대하여 보정 전에 사용했던 기상데이터의 값들과 비교를 실시하였다.

그림 27은 보정 전과 후의 외부온도 및 습도를 나타낸 그래프이다. 데이터를 분석한 결과, 보정기간동안 대상건물의 평균외부온도는 22.2℃로 나타났으며 보정 전 사용했던 기상데이터의 평균외부온도는 18.4℃로, 보정 후 기상데이터의 평균기온이 3.8℃ 더 높은 것을 알 수 있었다. 상대습도의 경우, 보정 전 기상데이터의 상대습도평균은 76.6%, 보정 후 사용된 기상데이터의 상대습도평균은 66.1%로 나타나 보정 후 상대습도가 10.5% 낮았다.

또한 동일한 날, 동일한 시각임에도 불구하고 보정 전과 후의 온도차가 최대 9.7℃(9월21일 오전 8시경), 습도차는 63%(9월 16일 오후 3시경)까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이에 따라 실측보정 시 기상데이터의 보정에 따른 영향이 클 것으로 사료되었다.

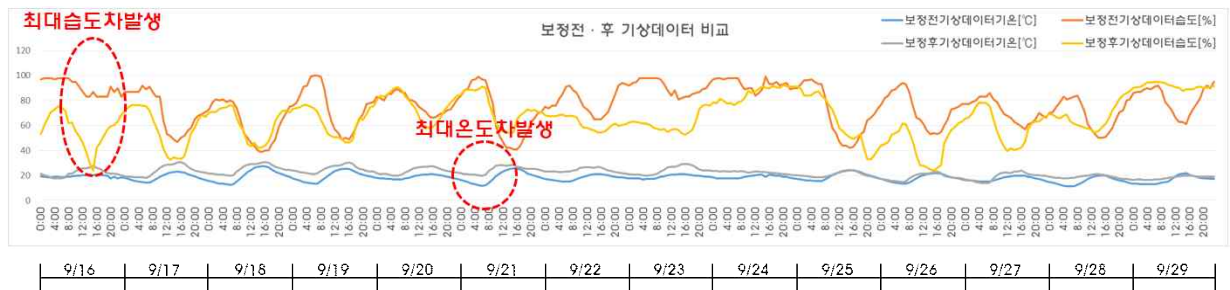


그림 27. 보정 전·후 외부온도 및 습도 비교

보정 전·후의 외부온도와 습도에 대하여 통계적이 유의성 평가를 위해 t검정을 실시하였다. 그 결과, 표 15와 같이 유의수준 0.05일 때 유의확률이 모두 0.001미만으로 나타나 통계적으로도 보정 전과 후의 외부온도와 습도가 유의미한 수준에서 서로 차이가 있음을 알 수 있었다.

표 15. 보정 전·후 온도 및 습도 t검정 결과

Independent Samples Test							
	t-test for Equality of Means						
	t	df	P	M e a n Difference	S t d . E r r o r Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
						Lower	Upper
온도	-14.268	656.579	.000	-3.7899	.2656	-4.3115	-3.2683
습도	8.413	670	.000	10.5395	1.2528	8.0797	12.9993

(2) 현장실측 결과 실내발열부하

현장실측을 통해 채실밀도, 조명부하, 기기부하를 산정하였다. 채실밀도는 대상 사무실에 근무하는 총 채실인원을 사무실의 바닥면적으로 나누어 산출하였으며, 조명부하 및 기기부하는 각각이 소비하는 전력을 바닥면적으로 나누어 산출하였다. 따라서 채실밀도의 단위는 Person/m²이며, 조명과 기기부하의 단위는 W/m²이다.

대상 사무실의 총 재실인원을 파악하기 위해 그림 28의 자리배치도를 이용하여 사무실에서 사용되고 있는 컴퓨터 본체들의 자리를 표시하고 그 개수를 확인하였다. 그 결과, 총 125명의 재실자가 근무하고 있는 것으로 파악되었다.

조명부하 산출 전, 조명이 소비하는 총 소비전력을 산출하기 위해 대상 사무실에 설치된 조명(형광등)의 개수와 조명1개의 소비전력을 조사하였다. 그 결과, 사무실 조명의 총 개수는 732개였으며 조명 1개의 소비전력은 28W였다.

기기부하 산출 시 포함된 기기의 종류는 컴퓨터 본체, 모니터, 프린터, 회의용 모니터로, 각 기기의 개수를 확인한 결과, 본체는 125대, 모니터는 246대, 프린터 6대, 회의용 모니터가 총 8대였다.

표 16과 같이 실측결과에 따라 실내발열부하를 산정한 결과, 재실밀도는 $0.079\text{인}/\text{m}^2$, 조명부하는 $11.52\text{W}/\text{m}^2$, 기기부하는 $12.90\text{W}/\text{m}^2$ 으로 나타났으며 보정 전에 입력 값보다 모두 수치가 감소한 것을 알 수 있었다.

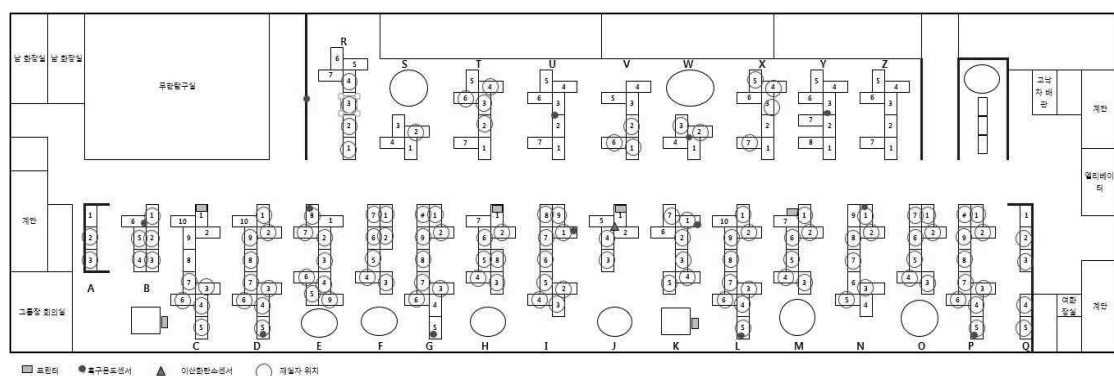


그림 28. 대상사무실의 자리배치도

표 16. 보정 전·후 실내발열부하

	보정 전			보정 후		
구분	총 수		실내발열부하	총 수		실내발열부하
재실	140명		재실밀도:0.09 (Person/m ²)	125명		재실밀도:0.079 (Person/m ²)
조명	690개		조명부하:12.16 (W/m ²)	732개		조명부하:11.52 (W/m ²)
기기	본체	165개	기기부하:13.97 (W/m ²)	본체	125개	기기부하:12.90 (W/m ²)
	모니터	242개		모니터	246개	
	프린터	4개		프린터	6개	
	-	-		회의용 모니터	8개	
실측일	2012.01.18			2013.09.25		

(3) 현장실측 결과 실내발열스케줄

실내발열스케줄 측정을 위해 현장실측일의 오전 7시부터 오후 10시까지 한 시간 간격으로 대상 사무실의 재실인원과 켜진 조명 및 기기들의 개수를 관찰하였다. 한 시간 간격으로 대상 사무실의 재실인원과 켜진 조명 및 기기들의 개수를 관찰하였다. 관찰된 시간 별 재실인원과 조명, 기기의 개수는 각각의 총 수에 대한 비율(재실밀도, 조명밀도, 기기밀도)로 나타내어 시뮬레이션에 입력하였다.

재실밀도의 경우, 출근시간대인 오전 7시에는 전체 재실인원의 약 10%정도인 12명이 재실하여 9.6%로 나타났으며, 점심시간인 오후 12시에는 단 4명만이 재실하고 있어 3.2%로 가장 낮은 재실밀도를 나타냈다. 재실밀도가 가장 높은 시간은 오후 2시였으며 전체 재실인원의 62.4%인 78명이 재실하고 있었다.

표 17. 재실, 조명, 기기스케줄 측정결과

	재실		기기					조명	
			본체	모니터	프린터	회의용 모니터	평균		
총 수	125		125	246	6	8		732	
시 간	개수	밀도	개수	개수	개수	개수	밀도	개수	밀도
7:00	12	9.60	12	24	6	3	39.2	720	98.4
8:00	35	28.0	35	70	6	3	48.5	720	98.4
9:00	69	55.2	69	138	6	2	59.1	675	92.2
10:00	70	56.0	70	140	6	2	59.5	687	93.9
11:00	68	54.4	68	136	6	3	61.8	732	100
12:00	4	3.20	68	70	6	4	58.2	687	93.9
13:00	68	54.4	68	136	6	5	68.0	687	93.9
14:00	78	62.4	78	156	6	4	69.0	687	93.9
15:00	75	60.0	75	150	6	5	70.9	732	100
16:00	77	61.6	77	154	6	4	68.6	687	93.9
17:00	75	60.0	75	150	6	6	74.0	687	93.9
18:00	46	36.8	63	126	6	6	69.2	687	93.9
19:00	63	50.4	63	126	6	5	66.0	687	93.9
20:00	68	54.4	68	136	6	3	61.8	675	92.2
21:00	39	31.2	39	78	6	2	47.0	675	92.2
22:00	23	18.4	23	46	6	3	43.6	675	92.2

조명밀도는 관찰한 모든 시간에서 90%이상으로 나타났다. 이는 출·퇴근시간이나 점심시간과 같이 재실인원이 많지 않은 시간에도 사무실 조명의 대부분을 켜두기 때문으로 사료된다.

기기밀도는 컴퓨터 본체, 모니터, 프린터, 회의용 모니터에 대한 각각의 밀도를 산출한 뒤 그 값들의 평균을 전체 기기밀도로 산정하였다. 기기밀도를 관찰한 결과, 재실인원이 현저하게 감소하는 점심시간대(12시)에도 기기밀도가 그 앞 시간대와 비슷하게 나타남에 따라, 한번 켜진 기기들은 퇴근 전까지 끄지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 오전7시의 기기밀도는 약 40%로 동일한 시간의 재실밀도인 10%보다 30%높게 나타난 결과, 퇴근 시에도 기기를 끄지 않는 경우가 많음을 알 수 있었다.

그림 29와 같이 보정 전 입력되었던 실내발열스케줄과 보정 후 스케줄을 비교하였다. 빨간

선으로 표시된 보정 전·후의 오전 7시와 8시의 실내발열스케줄을 비교한 결과 보정 전에는 해당시간의 스케줄이 부재함을 알 수 있었다. 따라서, 보정 후 동일한 시간에 입력된 채실, 조명, 기기밀도에 의해 보정 전후의 시뮬레이션 값에 차이가 있을 것으로 판단되었다.

또한 파란 선으로 표시된 점심시간대의 조명스케줄에서도 보정 전의 조명밀도는 10%였으나 보정 후 조명밀도는 93.9%로 큰 차이를 보였으며, 녹색 선으로 표시된 점심시간대의 채실밀도의 경우에도 보정 전·후의 밀도가 각각 55%와 3.2%로 큰 차이가 있었다.

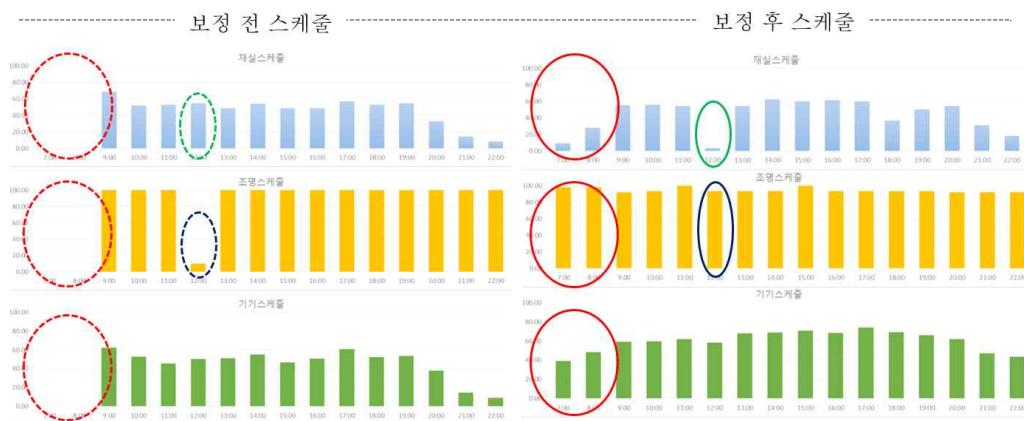


그림 29. 보정 전·후 실내발열스케줄

(4) 현장실측 결과 HVAC System

공조시스템의 보정을 위해 실시한 현장실측은 대상 사무실의 공조를 담당하는 실외기의 위치파악이다. 대상건물을 방문한 현장 실측일에 실외기가 놓인 위치를 파악하여 공조도면상에 표시된 실내기와의 거리를 산정하였다.

대상 사무실의 공조를 담당하는 실외기 3대는 모두 대상건물 4층에 위치하고 있었다. 대상건물의 건축도면(입면도)을 참고하여 대상 사무실 천장에 설치된 실내기와 외부에 위치한 실외기의 수직거리를 산정한 결과, 실외기와 실내기 사이의 수직거리는 1.5m임을 알 수 있었다. 시뮬레이션 상에 입력 시 실외기와 실내기 사이의 수직거리는 실외기의 위치를 기준으로 입력해야 함에 따라 -1.5m로 모델링 하였다.

실외기와 실내기 사이의 수평거리는 각 실외기가 담당하는 실내기 중 실외기와의 수평거리

가 가장 먼 실내기와의 거리를 기준으로 산정하였다. 3대의 실외기가 담당하는 실내기와의 수평거리는 각각 38.5m, 23.1m, 61.5m였으며, 산정된 수직, 수평거리를 VRF 보정 값으로 입력하였다. 이 외의 공조시스템에 관련된 입력값들은 건물관계자와의 인터뷰를 통해 정보를 취득하였으며 표 16과 같이 보정 전·후 공조시스템의 입력 값을 정리하였다.

표 18. 보정 전·후 공조시스템 입력 값

		보정 전				보정 후			
ERV(전열교환기) 작동상태		On				Off			
공조기 운영스케줄	On	Off 이 외 시간				7-23시			
	Off	10-12시,17-19시,23-7시				On 이 외 시간			
공조기 설정온도[℃]		26				26			
VRF	실외기-실내기의 거리[m]	수평	VRF1	VRF2	VRF3	수평	VRF1	VRF2	VRF3
			30	30	30		38.5	23.1	61.5
		수직	10			수직	-1.5	-1.5	-1.5
	크랭크케이스 히터 파워[W/compressor]		30				60		
	부분 부하율		0.25				0.5		

(5) 오차지표 확인

기상데이터에서부터 침기울까지 차례대로 보정을 실시한 후, 보정기간동안의 대상건물에서 적산전력량계로 측정한 실제 전기에너지소비량과 시뮬레이션을 통한 실측 보정 결과를 오차 지표[MBE, CV(RMSE)]를 통해 나타내었다. 본 연구에서 보정가이드로 선정된 ASHRAE Guide 14에서 제시하는 MBE와 CV(RMSE)의 기준은 각각 $\pm 10\%$, $\pm 30\%$ 이내이다.

표 19는 보정기간동안의 대상 사무실의 실제 전기에너지소비량과 시뮬레이션을 통한 실측보정 후 에너지소비량을 일 별로 나타낸 결과이다. 보정 후의 시뮬레이션 결과값은 기상데이터에서부터 침기울까지 각 보정요소를 누적 변화시켜 산출하였다.

실측 보정의 오차지표를 산출한 결과, 기상데이터, 실내발열부하 등의 실측 한 데이터로 보정한 후에는 오차지표의 기준을 만족시키지 못하였으나, 침기울 0.1과 0.2로 보정한 경우에 MBE와 CV(RMSE)값이 검증기준을 만족하는 것으로 나타났다. 그 중에서도 침기울을 0.2로

보정한 경우, 두 개의 오차지표 값이 각각 0.3%와 16%로 최소값을 나타냈다.

표 19. 보정기간동안의 실제에너지소비량 및 보정 전·후 시뮬레이션 결과

보정날짜	실제에너지 소비량 [kWh]	시뮬레이션 값[kWh]									
		보정 전	보정 후								
			기상 데이 터	실내 발열	ERV	공조 스케줄	VRF	0.1	0.2	0.3	0.4
9/16	328	423	432	430	347	456	478	293	322	354	384
9/17	344	411	458	458	363	471	495	311	340	372	402
9/18	313	415	431	431	329	438	450	252	286	320	353
9/19	321	410	465	466	325	432	442	249	282	315	346
9/20	272	448	423	423	321	431	439	244	278	312	344
9/21	295	421	425	425	322	432	441	242	278	312	344
9/22	310	445	413	413	315	423	483	237	271	304	337
9/23	413	422	455	454	357	465	492	298	328	361	393
9/24	368	423	439	451	359	462	485	306	337	368	396
9/25	339	423	434	434	348	454	472	302	329	358	386
9/26	267	407	393	392	334	440	414	290	316	344	371
9/27	262	394	418	415	338	445	417	289	316	345	374
9/28	207	470	419	422	315	406	449	232	262	292	322
9/29	148	481	471	469	338	412	445	223	255	286	317
평균	299	428	434	435	337	441	457	269	300	332	362
MBE		43.1	45.1	45.3	12.5	47.3	52.9	10.0	0.3	10.9	21.1
CV(RMSE)		50.9	50.0	50.2	22.8	50.1	55.6	19.2	16.0	19.1	26.2

(6) 현장실측 결론

보정기간동안, 보정 전 기상데이터 파일의 외부온도, 습도, 일사, 풍향, 풍속을 대상건물의 옥상에서 측정한 데이터로 변경한 후, 보정 전과 후의 평균외부온도와 상대습도에 대하여 비교한 결과, 외부기온은 보정 후에 평균 3.8℃가 더 높았으며 상대습도는 10.5% 더 낮았다. 또한 동일한 날, 동일한 시각임에도 불구하고, 외부온도와 상대습도가 최대 9.7℃, 63%까지 나타남에 따라 기상데이터로 인한 보정 결과의 영향이 클 것으로 사료되었다.

실내발열부하를 측정한 결과, 재실밀도는 0.079Person/m², 조명부하는 11.52W/m², 기기부하는 12.90W/m²으로 나타났으며 보정 전에 입력 값보다 모두 수치가 감소한 것을 알 수 있었다.

실내발열스케줄 측정을 위해 현장실측일의 오전 7시부터 오후 10시까지 한 시간 간격으로 대상 사무실의 재실인원과 켜진 조명 및 기기들의 개수를 관찰하였다. 재실밀도의 경우, 점심시간인 오후 12시에 3.2%로 가장 낮은 재실밀도를 나타냈으며, 오후 2시에 62.4%로 가장 높은 재실밀도를 나타냈다. 조명밀도는 출·퇴근시간이나 점심시간과 같이 재실인원이 많지 않은 시간에도 사무실 조명의 대부분을 켜둠으로 인해 관찰한 모든 시간에서 90%이상으로 나타났다. 기기밀도를 관찰한 결과, 출근 시 켜진 기기들은 퇴근 전까지 끄지 않는 것으로 나타났다. 또한 오전 7시의 기기밀도는 약 40%로 동일한 시간의 재실밀도인 10%보다 30%높게 나타나, 퇴근 시에도 기기를 끄지 않는 경우가 많음을 알 수 있었다.

공조시스템의 보정을 위해 대상 사무실의 실외기의 위치를 파악한 후, 실외기와 실내기의 수직, 수평거리를 산정하였다. 그 결과 실외기와 실내기사이의 수직거리는 1.5m였으며, 3대의 실외기가 담당하는 실내기와의 수평거리는 각각 38.5m, 23.1m, 61.5m였다. 또한 건물관계자와의 인터뷰를 통한 공조시스템 관련 데이터인 VRF의 부분부하율, 압축기 한 대당 크랭크 케이스 히터 파워, 실내 설정온도는 각각 0.5, 60W, 26℃였다.

실측보정 모델이 실제에너지소비량과 유의미한 수준에서 서로 차이가 없음을 알 수 있었다. 그러나, 본 결과에서 간과해서는 안 되는 사실은 보정 요소 중, ERV운영스케줄을 제외하고는 보정 전 시뮬레이션 값보다 실측값으로 보정 한 후의 오차지표 값이 더 크게 나타났다는 것이며, 또한 결국 실측 데이터가 아닌 침기율 값의 보정을 통해 오차지표의 기준을 만족시켰다는 것이다. 즉, 실제 대상건물에서의 관측값이 시뮬레이션 모델의 보정에는 큰 효과가 없음을 알 수 있었다.

자. 건물에너지 모델의 자동화 확률보정 기술 검증

(1) 보정요소 변수 설정

실측 보정과의 비교를 위해 확률보정에 사용한 보정요소는 실측보정 시 선정했던 보정요소와 동일하게 선정하였다. 그러나, 확률적 보정은 실측 보정과는 달리 보정 값으로 추출될 변수집단을 보정 실시 전에 설정 해 주어야 한다. 각 보정요소의 변수집단은 본 연구에서 도출한 사무소 건물에 대한 각 보정요소 별 기준값을 기준으로 하였으며 최소값과 최대값, 그리고 간격으로 설정되었다.

먼저 침기율에 설정된 [0.1:0.2:1.0]은 비고란의 설명처럼, 0.1ACH에서부터 0.2간격으로 1.0ACH까지를 변수로 설정한다는 의미로 이를 개별로 분리하여 나타내면 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 와 같다. 즉 총 5개의 변수 중 하나가 LHS에 의해서 침기율의 보정 값으로 선정되었다.

표 20. 확률적 보정요소 및 변수 값 설정

보정요소			입력범위 [최소값:간격:최대값]	비고
Infiltration[ACH]			[0.1:0.2:1.0]	예)0.1부터 0.2간격으로 1.0까지 즉, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 중에서 LHS를 통해 한 가지 변수 값 추출
HVAC	설정온도[℃]	냉방	[20:1:28]	난방설정온도가 냉방온도보다 높지 않아야 하므로 경우의 수를 따져 개별로 코딩
		난방	[18:1:26]	
	HVAC스케줄		점심, 저녁on/off	오전10-12시(점심시간), 오후5-7시(저녁시간)
	ERV운영스케줄		on/off	-
	ERV모드		(터보, 강, 약)	공조기 카탈로그값을 참고하여 각 모드별 ERV송풍량 W 열교환기소비전력 W ERVfan정압이 동시에 변경되도록 코딩
	실외기-실내기간 거리[m]	수직	{-1.5, 6, 11, 18.5}	대상건물의 건축도면 참고
수평		[10:10:80]		
실내발열 부하	재실밀도[person/㎡]		[0.04:0.04:0.2]	실측값이 범위의 중간 값이 되도록 입력범위 선정(실측값0.079)
	조명부하[W/㎡]		[5:5:20]	실측 값=11.52
	기기부하[W/㎡]		[5:5:30]	실측 값=12.9
실내발열 스케줄	오전7시,오후6시		ASHRAE 1254RP Small office 재실, 조명, 기기스케줄 ± 0.2	예) ASHRAE 1254RP의 7시 재실스케줄:0.33, 조명 및 기기스케줄:0.8 변수세팅 ={0.13 0.6,0.33 0.8,0.53,1.0}
	오전8시,오후5시			
	오전9시-11시, 오후1시-4시			
	오후12시			
	오후7시-10시			

냉난방설정온도는 건축물에너지절약설계기준에서 제시하는 온도를 기준으로 변수를 설정하였으며, 실외기와 실내기간의 거리 및 시스템의 성능과 같이 대상건물에 실제로 설치된 공조 시스템과 관련 보정요소는 대상건물의 건축도면 및 카탈로그를 참고하여 변수범위를 설정하였다. 실내발열스케줄의 경우, 본 연구에서 도출한 실내발열 부하에 대한 경계조건을 기준으로 변수범위를 설정하였다.

(2) 오차지표 확인

확률적 보정 결과를 확인하기 위해, LHS를 통해 추출된 만 개의 시뮬레이션 결과 중에서 보정기간동안의 실제에너지 소비량과 비교한 MBE와 CVRMSE 값이 허용범위를 만족하는 결과파일만 도출하였다.

만 개의 파일 중 $|MBE|$ 가 10%이하인 파일의 개수는 708개였으며, $CV(RMSE)$ 가 30%이하인 파일의 개수는 1745개였다. 여기서 $|MBE|$ 와 $CV(RMSE)$ 의 기준을 모두 만족하는 파일들의 개수를 추린 결과, $|MBE|$ 가 10%이하, $CV(RMSE)$ 가 30%이하인 파일은 만 개 중 708개였으며, $|MBE|$ 기준을 만족하는 모든 파일이 $CV(RMSE)$ 의 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 이 중 223개의 파일은 $CVRMSE$ 가 20% 이하였다.

표 21. MBE , $CV(RMSE)$ 허용범위를 만족하는 보정 결과 파일

샘플링 개수	$ MBE \leq 10\%$	$CV(RMSE) \leq 30\%$	$ MBE \leq 10\%,$ $CV(RMSE) \leq 30\%$	$ MBE \leq 10\%,$ $CV(RMSE) \leq 20\%$
10000	708	1745	708	223

(3) 보정기간동안의 평균에너지소비량

$|MBE| \leq 10\%$, $CV(RMSE) \leq 30\%$ 로 만족하는 708개의 파일의 평균에너지소비량을 분석하였다. 보정기간인 14일(2주)에 대한 708개 파일의 평균에너지소비량은 302.87kWh이며 평균의 표준오차는 0.42로 산출됨. 이는 대상공간에서 사용된 실제에너지소비량의 평균(299.07kWh)과 비교하였을 때, 약 1.3%의 차이로 매우 근사한 값을 가졌다.

(4) 보정변수에 대한 빈도분석

LHS 샘플링을 통해 추출된 각 보정요소 별 변수들에 대하여 빈도분석을 실시하였다. SPSS 통계프로그램을 이용하여 $|MBE| \leq 10\%$, $CV(RMSE) \leq 30\%$ 를 만족하는 708개의 파일의 각 보정요소 별 산출된 변수들의 빈도분석을 실시한 결과는 표 20과 같다.

첫 번째 보정요소인 침기율(Infiltration[ACH])에서는 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9의 총 5개의 변수 중 '0.1'이 전체 708개의 파일에 대하여 54.2%의 비율로 가장 많이 추출되었으며 두 번째 보정요소였던 냉난방 설정온도[°C]에서는 냉방은 '26', 난방은 '20'이 가장 많은 비율로 추출되었다.

세 번째 공조스케줄에서는 점심, 저녁시간 전·후 한 시간씩 공조를 하지 않는 '0'의 비율이 81.8%로 대부분을 차지했으며, ERV(전열교환기) 운영스케줄의 경우 모든 공조시간동안 ERV를 가동하지 않는 'off'의 비율이 76.7%로 나타났다.

다섯 번째 보정요소인 ERV가 on일 때 추가적으로 보정되는 다섯 번째 보정요소인 ERV 모드
의 경우, 터보·강·약이 추출된 전체 파일의 수는 ERV 운영스케줄이 on으로 추출된 파일의
개수(165개)와 동일하며, 각각의 터보, 강, 약의 추출비율은 3%, 30.9%, 66.1%로 나타나 ‘약’
의 경우가 가장 많이 추출되었다.

여섯 번째 보정요소는 VRF시스템의 실외기와 실내기 사이의 수직, 수평거리로[m], 수직거리
는 -1.5, 6, 11, 18.5 중 ‘-1.5’가 27.1%의 비율로 가장 많이 추출되었으며, 수평거리는 10에서
80까지의 변수가 전반적으로 고르게 추출되었으나 그 중에서 ‘60’이 14%로 가장 높은 비율
을 나타냈다.

일곱 번째 보정요소인 실내발열부하에서 채실밀도[person/m²]는 0.04, 0.08, 0.12, 0.16, 0.2의
총 5개의 변수 중 0.08이 24.6%로 가장 많이 추출되었으며, 조명부하와 기기부하[W/m²]에서
는 각각 33.8%, 27%의 비율로 ‘5’가 가장 많이 추출되었다. 여덟 번째 보정요소인 실내발열
스케줄은 ASHRAE 1254-RP 보고서의 Small Office 스케줄을 참고하여 오전7시와 오후6시,
오전8시와 오후5시, 오전9시-11시와 오후1시-4시, 오후12시, 오후7시-10시로 구분하여 변수
를 세팅하였다. 스케줄 변수 설정 시, 조명스케줄과 기기스케줄은 동일하게 세팅되었다.

오전7시와 오후6시의 채실스케줄[총 채실인원에 대한 해당 시간대의 채실인원 비율]은 0.13,
0.33, 0.53 중 ‘0.13’이, 조명 및 기기스케줄[전체 조명(기기)수에 대한 해당 시간대의 켜진 조
명(기기) 수의 비율]은 0.6, 0.8, 1.0 중 ‘0.6’이 35.3% 비율로 가장 많이 추출되었다. 오전8시
와 오후5시의 채실스케줄은 ‘0.47’이 34.7%, 조명 및 기기스케줄은 ‘1.0’이 65.3%의 비율로 가
장 많이 추출되었으며, 오전9시-11시에는 채실스케줄과 조명 및 기기스케줄 모두 ‘0.6’이
35.9%로 가장 많이 추출되었다. 점심시간대인 오후12시의 채실스케줄은 ‘0.55’가 33.9%, 조명
및 기기스케줄은 ‘1.0’이 66.1%로 가장 높은 비율을 차지하였으며, 오후7시-10시에는 채실스
케줄이 64.3% 비율로 ‘0’이, 조명 및 기기스케줄은 35.7%의 비율로 ‘0.07’이 가장 많이 추출되
었다.

표 22. 확률적 보정요소의 변수에 대한 빈도분석 결과

침기율 [ACH]		설정온도[℃]				공조스케줄		ERV 운영스케줄		ERV모드	
		냉방		난방							
변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]
0.1	54.2	20	4.1	18	15.8	0	81.8	Off	76.7	약	66.1
0.3	35.0	21	6.4	19	25.8	1	18.2	On	23.3	강	30.9
0.5	10.5	22	10.9	20	27.0					터보	3.0
0.7	0.3	23	15.7	21	19.2						
0.9	0	24	16.2	22	8.6						
		25	20.6	23	3.2						
		26	26.1	24	.3						
		28	0	26	0						
실외기-실내기 거리[m]				실내발열부하							
수직		수평		재실밀도[인/㎡]		조명부하[W/㎡]		기기부하[W/㎡]			
변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]
-1.5	27.1	10	13.0	0.04	23.4	5	33.8	5	27.0		
6.0	24.0	20	12.4	0.08	24.6	10	26.8	10	23.9		
11.0	26.8	30	11.0	0.12	21.8	15	22.3	15	20.1		
18.5	22.0	40	12.3	0.16	15.8	20	17.1	20	14.5		
		50	12.0	0.2	14.4			25	9.2		
		60	14.0					30	5.4		
		70	13.4								
		80	11.9								
실내발열스케줄											
오전7시, 오후6시				오전8시, 오후5시				오전9시-11시, 오후1시-4시			
재실		조명 및 기기		재실		조명 및 기기		재실		조명 및 기기	
변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]	변수	비율 [%]
0.13	35.3	0.6	35.3	0.47	34.7	0.8	34.7	0.6	35.9	0.6	35.9
0.33	34.0	0.8	34.0	0.67	33.8	1	65.3	0.8	33.3	0.8	33.3
0.53	30.6	1	30.6	0.87	31.5			1	30.8	1	30.8
오후12시						오후7시-10시					
재실		조명 및 기기		재실		조명 및 기기		재실		조명 및 기기	
변수	비율[%]	변수	비율[%]	변수	비율[%]	변수	비율[%]	변수	비율[%]	변수	비율[%]
0.55	33.9	0.8	33.9	0	64.3	0.03	30.6				
0.75	33.5	1	66.1	0.2	35.7	0.05	33.6				
0.95	32.6					0.07	35.7				

(5) 실측 보정 결과와의 비교

건물에너지시뮬레이션의 최적보정기법을 선정하고자, 앞에서 다뤘던 실측 보정의 결과와 LHS 확률적 보정 결과를 비교하였다.

본 연구에서 사용된 보정간격은 한 시간 간격으로, 이에 따른 오차지표 $|MBE|$ 와 $CV(RMSE)$ 의 허용범위는 각각 10%이내, 30%이내이다. ASHRAE guideline 14에 따르면, 각각의 오차지표의 값이 작을수록 보정결과가 더 좋다고 판단한다.

표 23. 실측보정과 확률적 보정에 대한 $|MBE|$, $CV(RMSE)$ 비교

	실측 보정 결과	확률적 보정 결과
$ MBE $	0.3%	0.07%
$CV(RMSE)$	16.01%	18.18%

표 22에 나타난 실측 보정 결과의 $|MBE|$ 값과 LHS 확률적 보정 결과의 $|MBE|$ 값을 비교해 보면, 확률적 보정이 0.07%, 실측 보정 결과가 0.3%로 확률적 보정 후의 결과가 $|MBE|$ 값이 더 작음을 알 수 있다. 그러나 $CV(RMSE)$ 값에서는 이와 반대로 실측 보정 결과의 $CV(RMSE)$ 값이 확률적 보정 결과의 $CV(RMSE)$ 값 보다 약 2% 작게 나타났다.

오차지표 $|MBE|$ 값이 나타내는 의미는 실제 값과 시뮬레이션 값의 평균의 유사정도이다. 표 22에 나타난 바와 같이 $|MBE|$ 값이 더 작은 확률적 보정 결과의 평균에너지소비량이 실제에너지소비량(299.07kWh)과 더 근사한 값을 가짐을 알 수 있다. 반면, $CV(RMSE)$ 값은 보정간격에 따른 실제 값과 시뮬레이션 값에 대한 패턴의 유사정도를 의미한다. 패턴의 유사함은 실제 값과 시뮬레이션 값의 차이가 아무리 큰 경우라도 유사하게 나타날 수 있다. 이는 표 22에서 $|MBE|$ 와 $CV(RMSE)$ 가 허용범위를 만족하는 확률적 보정 결과 파일 개수의 차이를 통해 확인 할 수 있다. $|MBE|$ 기준을 만족하는 결과 파일은 708개였으나, $CV(RMSE)$ 만을 기준으로 하였을 때 허용오차범위를 만족하는 파일은 1745개로, 이 중 708개를 제외한 나머지 1037개의 파일의 시뮬레이션 값들은 실제 값과의 $|MBE|$ 가 모두 10%를 초과하였다. 따라서 본 논문에서는 $|MBE|$ 를 기준으로 확률적 보정 결과와 실측 보정 결과를 비교하였으며 그 결과, $|MBE|$ 값이 더 작은 확률적 보정 결과가 실측 보정 결과보다는 더 정확하다고 판단하였다.

(6) 건물에너지 모델의 예측 정확도 95% 달성 내용

본 연구에서 개발된 확률보정 기법의 정확도를 분석하기 위하여 실측을 통하여 얻은 시스템의 실제 에너지 사용량과 확률보정기법을 적용한 건물에너지 모델의 에너지 사용량 예측결과를 비교하였다. 건물에너지 모델의 선정을 위해서는 CV(RMSE)값을 사용하였으며, CV(RMSE)값이 30% 이하인 에너지 모델군과 CV(RMSE)값이 20%이하인 에너지 모델군으로 나누어 분석을 진행하였다. 분석결과, CV(RMSE) 값이 30% 이하인 에너지 모델의 건물에너지 사용량 평균값은 302.87 kWh, CV(RMSE) 값이 20% 이하인 에너지 모델의 에너지 사용량 예측값의 평균은 300.92 kWh로 나타났다. 이를 실제 에너지 사용량인 299.07 kWh와 비교해 보면, CV(RMSE) 값이 30% 이하인 에너지 모델의 정확도는 98.7%, CV(RMSE) 값이 20% 이하인 에너지 모델의 정확도는 99.4%에 해당한다. 따라서, 본 연구에서 개발한 건물에너지 모델의 확률보정 기법의 정확도는 본 연구의 목표치인 정확도 95%를 초과 달성한 것을 알 수 있다.

표 24. 실제에너지 사용량과 확률보정 결과 비교

	실측 결과 (실제에너지 사용량)	확률 보정 결과		
			CV(RMSE)≤30% (파일개수:708개)	CV(RMSE)≤20% (파일개수:223개)
에너지	299.07 kWh	평균값	302.87kWh	300.92kWh
		최소값	299.25kWh	

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표달성도

가. 연구개발 목표 및 달성도

목표	달성도	달성내용	보고서 관련 Page
건물에너지 모델의 입력변수별 확률분포 및 입력변수 생성을 위한 최적 샘플링 기법 개발	100%	건물에너지모델의 오차를 발생시키는 오차 유발 요인을 도출하고 요소에 대한 경계조건을 도출	페이지 23 - 27 제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 가. 건물에너지 모델의 입력 변수 및 경계조건 도출
		건물에너지 오차 발생 요인에 대한 자동화 보정이 가능하도록 LHS 샘플링 활용 건물 에너지 모델을 생성함	페이지 27 - 29 제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 나. 최적 샘플링 기법 개발
건물에너지 모델의 확률보정 자동화 기술 개발	100%	불확실성 인자에 대한 에너지 모델 샘플링, 시뮬레이션 실행, 보정오차 기준 만족 모델의 도출로 구성된 확률보정의 단계별 프로세스를 통합하는 자동화 패키지 기술 개발	페이지 30 - 33 제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 다. 확률보정 자동화 기술 개발
		비주거용 사무소 건물 에너지 모델의 예측 정확도 95%를 달성	페이지 33 - 56 제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 2. 건물에너지 모델의 확률보정 기술 검증

나. 양적 최종성과 목표 및 달성도

최소성과목표	최종성과목표	달성여부	상세내용
SCI(E)학술지1건	SCI(E)학술지1건	달성	SCIE 학술지 2편 게재
일반학술지1건	일반학술지1건	달성	한국연구재단 등재학술지 1편 게재
국내특허출원1건	국내특허출원1건	달성	국내특허 출원 1건

2. 관련 분야 기여도

가. 기술적 기여도

본 연구는 아직 선진국에서도 개념 정립이 미완성된 확률 보정 자동화 기술을 개발함으로써, 건물에너지 모델의 신뢰성을 근본적으로 향상시키고 건물에너지 절약 분야의 기반 기술을 선점하는 등의 기술적인 기여도가 크다고 판단된다.

본 연구의 LHS 기반 건물 에너지 모델의 자동화 생성 방법론은 건물 에너지 모델 뿐 아니라 다른 분야의 시뮬레이션의 입력 모델 생성에 적용할 수 있는 등 다양한 방법론적 응용이 가능하며, 본 방법론을 적용한 연구의 활성화가 예상된다.

나. 사회·경제적 기여도

본 연구결과를 바탕으로 확률 보정 자동화 기술이 건물의 설계 및 운영에 보급될 경우, 건축물의 에너지 및 온실가스 배출을 효과적으로 감소시키며 동시에 건물 재실자의 쾌적성과 국민의 공공복지를 향상시킬 수 있는 등 본 연구는 사회·경제적으로도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 연구의 최종 결과물의 국내 에너지 관리 업체 및 냉난방기기 관련 업체에 기술 이전되어 국내업체의 기술발전에 기여하는 등 경제적인 효과도 기대가 된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구결과의 활용방안

본 연구의 성과물은 건물에너지 시뮬레이션의 오차를 발생시키는 입력 요소를 도출하고, 입력요소별 경계조건 선정 및 LHS 샘플링 기법 개발로 건물에너지 모델의 확률보정 기술로써 다양한 분야에 활용될 수 있다.

정확도가 보증된 신뢰할 수 있는 건물에너지 모델의 구축은 건축설계 사무소, 건설사, 건축설비 설계 사무소, 친환경 에너지 컨설팅 업체, 건물 자동제어 업체, 냉난방기기 제조사 등에서 필수적으로 요구되는 기술로써 다양한 기술 수요처에 적용이 가능하다.

본 최종성과물은 새로운 개념의 정립에서 벗어나 개념의 실제 적용 가능성에 대한 평가가 완료되었으므로, 본 연구에서 개발한 툴 이외에 사용이 편리하고 BIM과 쉽게 연동을 할 수 있는 소프트웨어의 개발에도 활용할 예정이다.

본 연구의 성과물은 에너지 소비 총량제 및 에너지 소비 증명제 등에 사용되는 건물에너지 소모량 산정의 정확성을 높이며, 특히 그린리모델링 창조센터에서 시행하고 있는 그린리모델링 이자 지원사업 등에 활용될 수 있으므로, 그린리모델링 창조센터와 긴밀한 협조를 할 예정이다.

자동확률 보정의 정확성 및 적용성의 검증을 위해서 IPMVP 국제 기준에 따라 실제 건물의 에너지 사용량과 본 연구의 자동확률 보정 기술이 적용된 시뮬레이션의 비교를 위한 실증 연구 등에도 적용할 예정이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 국외 산업 동향

세계적인 에너지환경 컨설팅 업체인 Navigant research은 건물에너지관리시스템(BEMS)은 2012년 17.8억 달러 규모에서 연평균 15% 증가하여 2020년 약 56억 달러 규모로 3배 이상 성장할 것으로 전망하고 있다 (그림 30).

BEMS 시장에서 하드웨어보다는 건물에너지를 예측, 분석하는 소프트웨어 시장이 성장을 주도하며, 시뮬레이션 구축에 필요한 BIM 시장도 2020년까지 65억 달러로 성장하는 등 건물에너지 시뮬레이션의 시장이 증대될 것으로 예측된다.

또한 Global Insight은 건축물의 에너지 효율화 시장은 2020년까지 전세계적으로 연간 14%로 증가하여 2020년에는 약 1500억 달러에 달할 것으로 예상하고, 특히 국내에서는 연간 시장 성장율이 약 23%에 달할 것으로 전망하고 있다.

이에 따라 Goggle, Microsoft 등의 IT 전문 기업들도 PowerMeter, Hohm 등 에너지 데이터의 시각화를 기반으로 하는 에너지 모니터링 소프트웨어를 제작 배포하는 등 건물에너지 시뮬레이션의 활용한 건물에너지 시장 분야는 계속해서 확대되고 있어, 시장 선점을 위한 기술 개발이 시급한 실정이다.

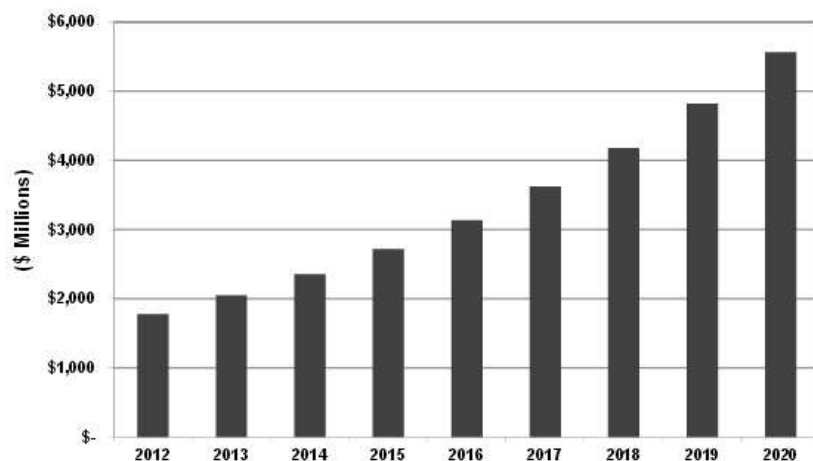


그림 30. 전세계 BEMS 시장 전망

2. 건물에너지 프로그램의 검증

건물에너지 시뮬레이션 모델을 구축하기 위한 건물에너지 프로그램은 해석 알고리즘의 종류와 적용 범위에 따라 전 세계적으로 400여개 이상이 존재하며, 계속해서 새로운 프로그램이 개발되고 있다.

미국 NREL의 Neymark 연구팀은 IEA 연구 프로그램을 통해 에너지 프로그램의 정확성과 신뢰성을 검증할 수 있는 체계적인 방법론을 개발하였다. 그들이 제시한 방법론은 크게 수학적 엄밀해의 이용, 프로그램 간의 비교 검증, 실제 건물과의 에너지 소비량 비교로 구분할 수 있음 (표 24).

ASHRAE는 3가지 검증 방법 중 표준화가 용이하며, 측정에 대한 불확실성이 적은 수학적 엄밀해의 이용과 프로그램 간의 비교 검증 방법을 이용하여 세계 최초로 건물에너지 프로그램의 신뢰성을 검증하는 기준을 제시하였다. (그림 31).

표 25. 프로그램 검증 방법별 특징

Method	Advantages	Disadvantages
• Empirical (Test of program)	• Approximate truth standard within experimental accuracy • Any level of complexity	• Experimental uncertainties ① Instrument calibration, spatial/temporal discretization ② Imperfect knowledge/specification of experimental object (building) being simulated • Only a limited number of test conditions are practical
• Analytical (test of solution process)	• No input uncertainty • Exact mathematical truth standard	• Limited to highly constrained cases for which analytical solutions can be derived
• Comparative (Relative test of model and solution process)	• No input uncertainty • Many diagnostic comparisons possible • Any level of complexity	• No absolute truth standard (only statistically based acceptance ranges are possible)

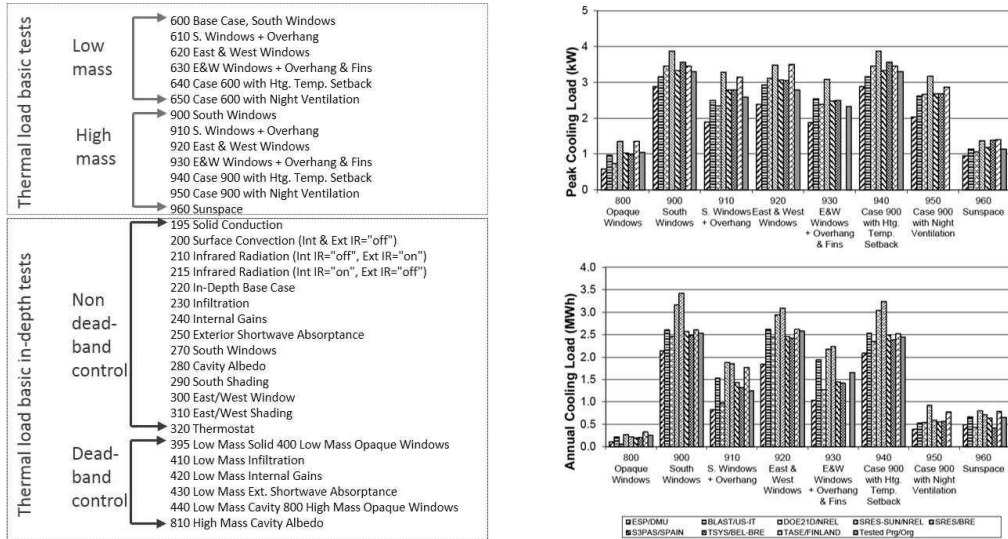


그림 31. ASHRAE 140-2011 이용 건물 냉난방 부하 테스트의 예

2002년 미국 ASHRAE는 에너지 절약 효과를 정량적으로 검증하기 위해 시뮬레이션을 활용하는 방법을 제안하였으며, 이때 건물에너지 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 Neymark 연구팀이 제시한 방법 중 실제 건물의 에너지 사용량과의 비교 방법(Empirical test)을 채택하였다.

표 26. 프로그램 검증 방법별 특징

	ASHRAE Guideline 14-2002	IPMVP-2012 Volume 1	FEMP Guidelines
Step 1	Produce a calibrated simulation plan	Assume other necessary input parameters, and document them	Collect data
Step 2	Collect data.	Gather actual weather data from the calibration period	Input data and test baseline model
Step 3	Input data into simulation software and run model	Run the simulation and verify that it predicts operating parameters	Calibrate the baseline model
Step 4	Compare simulation model output to measured data	Compare the simulated energy results with the metered energy data	Create and refine the performance period model
Step 5	Refine model until an acceptable calibration is achieve	Evaluate patterns in the differences between simulation results and calibration data(plot)	-
Step 6	-	Revise input data in step 1 and repeat steps 3 and 4	-

ASHRAE 가이드라인 14는 IPMVP (International Performance Measurement and Verification Protocol)23)와 FEMP24)에도 반영되어 가장 널리 적용되고 있으며, 각 가이드라인의 모델의 보정을 위한 단계를 정리하면 표 25와 같다.

ASHRAE의 가이드라인은 수동 보정 (Manual calibration)에 해당하는 것으로 시뮬레이션 결과를 보정하기 위해서는 시행착오를 통한 미지 변수의 값을 추정해야함. 이러한 수동 보정은 많은 시간과 노력이 요구되는 단점이 있다.

시뮬레이션 모델의 정확도 판단을 위한 오차지표로는 MBE (Mean Bias Error)와 CVRMSE (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error)가 상용되고 있으며, 두 개의 오차지표의 값이 작을수록 시뮬레이션의 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

3. 건물에너지 프로그램과 건축물의 제어

컴퓨터의 비약적인 발전과 건물에너지 프로그램의 사용 편의성이 향상되었는데도 불구하고, 실무에 있어서는 건물에너지 시뮬레이션의 적용이 제한적인 것이 사실임. 이는 건물에너지 모델을 구축하기 위해서는 여전히 건축물의 재료, 구조 및 공법과 냉난방 시스템과 건물의 사용에 대한 전문적인 지식이 필요하기 때문이다.

이처럼 건물에너지 모델을 구축하는데 필요한 많은 시간과 고비용으로 인하여 Johnson Controls 및 Siemens 등은 실제 건물에 대한 에너지 관리를 위해서는 정밀한 동적 에너지 시뮬레이션이 아닌 간략화 된 방법을 사용하고 있는 실정이며, 건물에너지 시뮬레이션은 새로운 기술 개발이나 연구용으로만 제한적으로 적용되고 있다 (그림 32).

화이트박스 모델을 이용한 건물에너지 관리시스템의 운영은 아직 연구의 초기 단계에 있으며, 특히 건물 냉난방의 시스템의 제어를 위해서는 분단위의 시뮬레이션이 필요하나 건물에너지 관리시스템과의 연동된 시뮬레이션은 시뮬레이션에 소요되는 시간이 일반 시뮬레이션에 비해서 약 10배 증가하는 것으로 나타났다.

예를 들어 미국의 전형적인 사무소 건물에 적용된 건물에너지 관리시스템 연동 빌딩 시스템

은 시뮬레이션 대상 기간이 1주일인 경우 시뮬레이션 시간이 약 50분 정도 소요되는 것으로 나타나는 등 건물에너지 관리시스템의 운용에 화이트박스 모델인 건물에너지 시뮬레이션을 적용하는 것은 한계가 있다.

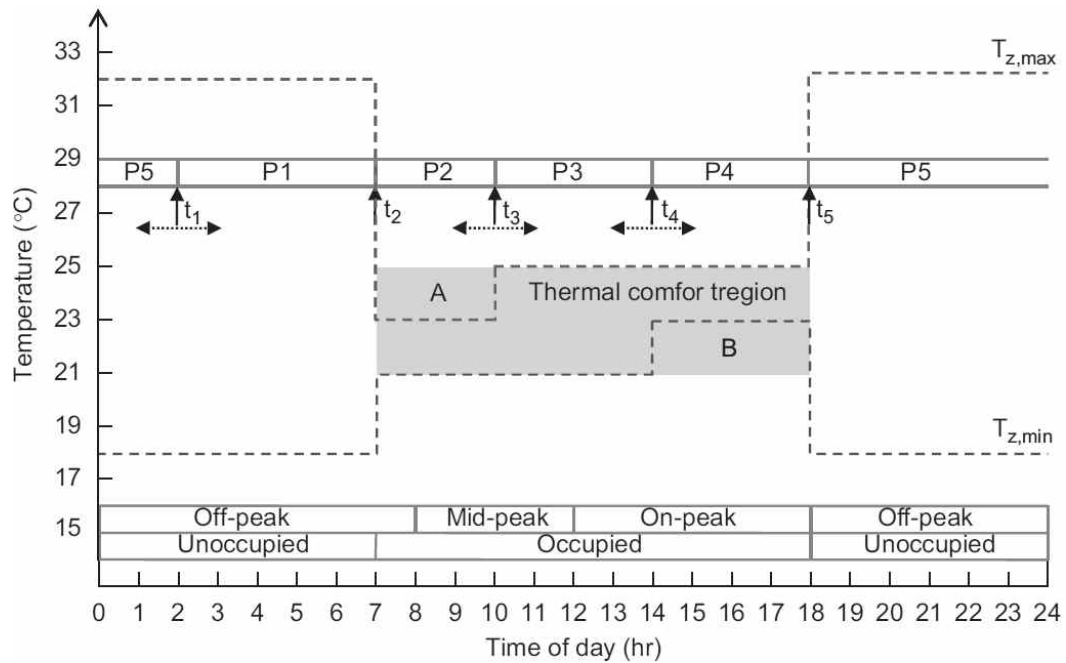


그림 32. 간소화된 건물에너지 모델을 이용한 건물에너지 제어의 예

제7장. 연구개발성과의 보안등급

가. 보안등급의 분류

보안	일반
	○

나. 결정사유

본 과제의 공고 및 2차 평가접수 안내서와 평가위원회의 결정에 따라 보안등급은 일반에 해당함.

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

해당사항 없음

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

본 연구의 연구책임자가 속한 경희대학교 국제캠퍼스는 연구실 안전환경 조성에 관한 법률에서 정한 연구실 안전점검 및 정밀안전진단, 연구활동종사자 건강검진, 안전교육, 기타 안전관리 사항 등의 업무를 수행하고 있다.

가. 안전교육

경희대학교에서는 실험실습 참여 학생 및 연구원들을 대상으로 온, 오프라인으로 안전점검 및 교육을 의무적으로 실시하고 있다. 이는 연구실 안전환경 조성에 관한 법률 및 시행령에 따른 것으로 실험실습 참여 학생 및 연구원을 대상으로 안전교육을 실시하였다. 안전 교육은 2014년 1학기(2014.04.01.~2014.06.20.), 2학기(2014.09.01.~2014.10.31), 2015년(2015.04.01.~2015.11.30.), 2016년 (2016.09.19.~2016.11.30.)에 각각 실시하였다. 교육내용은 연구실안전, 연구실 안전수칙 및 사고 시 행동요령, 전기안전, 컴퓨터안전, 소방 안전, 화재 시 행동요령, 가스안전, 사고사례, 화학안전, 화학사고 시 대응요령, 기계 안전, 건설안전, 하학사고 시 대응요령등이다.

표 27. 안전교육 콘텐츠

구 분	Contents	
	필수	선택 (학기별 동일 콘텐츠 수강 불가)
1학기	- 연구실안전 - 연구실 안전수칙 및 사고 시 행동요령 - 전기안전 - 컴퓨터안전	- 화학안전 - 화학사고 시 대응요령 - 기계안전 - 건설안전 - 예술안전 - 생물학적안전 - LMO안전 - 방사선안전
2학기	- 소방안전 - 화재 시 행동요령 - 가스안전 - 사고사례	



그림 33. 경희대학교 온라인 안전교육

나. 사고발생 시 긴급대책 및 후속 조치 수립

실험실 안전사고 발생 시, 사고를 인지 및 신고 접수 → 현장을 확인하여 사고의 정도를 파악 → 경미한 사고의 경우 초기 대응으로 사고 현장을 수습하고, 필요 시 유관기관에 신고 과정 → 사고 보고서를 작성한다. 대응 과정 중 야간 및 휴일에 사고가 발생하면 당직자, 경비업체가 상황실을 접수하여 비상연락망을 가동하여 사고 상황에 대응한다.

그 밖에도 소방/안전시설 등을 보수하고 가스전도방지장치 설치, 위험물저장소 조성, 위험기계기구 방호장치 등을 설치하여 기타 안전환경을 개선하고 있다. 이와 같이 제안 과제에의 연구실은 국가연구개발사업의 수행 시 필요한 연구실의 안전 확보를 위해서 해당기관에서 다양한 방법으로 제공되고 있는 안전교육 훈련을 충실히 이수하고 있다. 또한 연구(실험)실의 정기정밀안전진단을 철저히 하며 안전관리에 힘쓰고 있다.

www.edufs.or.kr

공제가입증서

“저희 공제회는 공제계약자와 해당공제 약관에 의하여 공제계약을 체결하고 그 증거로 이 증서를 드립니다.”

교육시설재난공제회


(우:446-701)
 경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732경희대
 학교국제캠퍼스
 경희대학교국제캠퍼스출장구하

반드시 확인하셔야 할 사항

- 공제가입증서공제회원의 내용이 약관과 일치하지 않거나 잘못된 경우, 또는 각종 간담사항에 대해서는 자취 공제회에 문의하여 주시기 바랍니다.
- 공제금의 청구 및 계약서 사본을 보관하실 때에는 본 공제가입증서공제회장이 필요하오니 소중히 보관하여 주십시오.
- 공제금에 지급서류가 불합격할 경우에는 다음 서류를 갖추어 자취 공제회에 청구하여 주십시오.
 - ① 청구내공제회 양식
 - ② 사고증정서(사망진단서, 입원진단서 입원처분확인서 등)
 - ③ 신분증
 - ④ 청구주체의 장의 사고증위서본


교육시설재난공제회
Education Facility Disaster Relief Association

그림 34. 경희대학교 공제 가입 증서

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

본 연구개발과제의 대표적 연구실 적은 표 27과 같다.

표 28. 대표적 연구실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Development and application of the load responsive control of the evaporating temperature in a VRF system for cooling energy savings	경희대학교	제1, 교신저자	Energy and Buildings	2.973	2016.03.15	단독사사	SCI
2	논문	The neural network predictive model for heat island intensity in Seoul	경희대학교	교신저자	Energy and Buildings	2.973	2015.01.01	중복사사	SCI
3	논문	건물에너지 모델의 재실자 요소를 활용한 간편한 확률보정	경희대학교	교신저자	한국건축친환경설비학회논문집		2015.06.30	단독사사	
4	특허	사용자 요소가 반영된 건물 에너지 모델링 시스템 및 방법	경희대학교	제1	대한민국		2015.12.30	단독사사	국내특허출원

제12장. 기타 사항

기타 특이 사항은 없음.

제12장. 참고 문헌

- 1) 윤근영, 2011, 도심지에 위치한 건축물을 위한 BIPV 시스템의 설계 및 평가, 태양에너지, 한국태양에너지학회, Vol.10, No.1, pp.22-29
- 2) Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds), 2007, Climate Change 2007: Synthesis Report, IPCC, Geneva, Switzerland
- 3) 에너지경제연구원, 국가에너지통계종합정보시스템(<https://www.keei.re.kr>),
- 4) 에너지관리공단, 2013, 2013 에너지통계핸드북, 에너지관리공단
- 5) Hensen et al., 2007, On building performance simulation in a changing environment, Proceedings of the 38th Int Congress on Heating, Refrigeration and Air-Conditioning, KGH, Belgrade, pp.57-69
- 6) Norford I.K. et al., 1994, Two-to-one discrepancy between measured and predicted performance of a low-energy office building: insights from a reconciliation based on the DOE-2 model, Energy and Buildings, Vol.21, pp.121-131
- 7) Turner C. and Frankel M., 2008, Energy Performance of LEED® for New Construction Buildings, New Buildings Institute
- 8) H. Hens, 2007, Building physics - heat, air and moisture: Fundamentals and engineering methods with examples and exercises, Ernst & Sohn, Berlin, Germany
- 9) GATC, 1967, Computer program for analysis of energy utilization in postical facilities: Volume 1 User's manual, General American Transportation Coporation, Niles, USA.
- 10) D.G. Stephenson and G.P. Mitalas, 1967, Cooling load calculations by thermal response factor method, ASHRAE Transaction, 73, 508-515
- 11) S.A. Kellin et al., 2010, TRNSYS 17: A transient system simulation program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA
- 12) F.C. Winkelmann et al., 1991, DOE-2 Engineers Manual, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, CA, USA
- 13) J. Clarke, 2002, Energy simulation in building design, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK
- 14) I. Beausoleil-Morrison, 2000, The adaptive coupling of heat and air flow modelling within dynamic whole-building simulation, PhD thesis, University of Strathclyde,

Glasgow, UK.

15) ESRU, 2002, The ESP-r system for building energy simulation, User guide version 10 series, University of Strathclyde, Glasgow, UK

16) DOE, 2012, EnergyPlus Engineering Reference, Department of Energy, USA

17) J. L. M. Hensen, J.A. Clarke, 2000, Building systems and indoor environment: simulation for design decision support, Proceedings of the International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture & Urban Planning, Eindhoven:Eindhoven University of Technology, 177-189

18) P. Haves et al., 2001, Use of whole building simulation in on-line performance assessment: Modeling and implementation issues, Proceedings of 7th International IBPSA conference building simulation 2001, Rio de Janeiro

19) M. Wetter, 2011, Co-simulation of building energy and control system with building controls virtual test bed, Journal of Building Performance Simulation, 4, 185-203.

20) W. Bernal et al., 2012, A tool for integrated design and deployment of energy efficient building controls, 4th ACM workshops on Embedded Sensing Systems for Energy-Efficiency in Buildings, Toronto, Canada

21) K. Ji et al., 2011, Prognostics enabled resilient control for model-based building automation systems, Proceedings of Building Simulation 2011: 12th conference of IBPSA, Sydney

22) Karson F. et al., 2007, Measured and predicted energy demand of a low energy building: important aspects when using building energy simulation, Building Services Engineering Research and Technology, Vol.28, pp.223-236

23) Passive House Institute, 2011, Passive House Designer Training Handbook, PHI, Darmstadt, Germany

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 최종보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.