https://doi.org/10.21289/KSIC.2022.25.6.1135

리빙랩(Living-lab) 설계를 위한 BEMS 및 EnergyPlus 기반 재실 여부 고려 공조계획 도출

Design of Living Lab with BEMS via EnergyPlus for Scheduling HVAC System Considering Occupancy Schedule

이재호[1], 김성중[2], 윤용태[3], 김경훈[4*]

Jae-Ho Lee[1], Sung-Joong Kim[2], Yong-Tae Yoon[3], Kyoung-Hoon Kim[4*]

〈Abstract〉

Due to increase in concerns related to the climate change, state-wide promotion of the carbon neutrality has been in progress thus far. Smart City could be one of the measures as the initiative to mitigate the missions process. The primary purpose of Smart City can be summarized to be maximization of the social net-beneift to be returned for the local citizens and derivation of the optimal pattern of the energy consumption could belong to one of the elements included in the net-benefit. Currently, the energy consumption by the buildings has been determined to be responsible for the greatest consumption among the sectors considered to be energy-intensive. Moreover, considering the fact that the consumption by operations of HVAC is responsible for nearly 40% in the commercial buildings, it is virtually not possible to optimize schedules for the energy consumption with considerable deliverables from the perspective of the urban planners. Thus, the methods to implement the optimal schedules for the HVAC commissioned with the OHUs were concluded to be the suitable candidate resources for the simulation by EnergyPlus capable of monitoring the thermal changes in each subject space in the present research.

Keywords : Smart City, OHU, Net-benefit, HVAC, Energy-saving

1 준정회원, 공동1저자, 서울대학교 전기정보공학부, 박사과정
E-mail: lee8808@snu.ac.kr
2 준정회원, 공동1저자, 서울대학교 전기정보공학부, 박사과정
E-mail: gianthips@snu.ac.kr
3 정회원, 제2저자, 서울대학교 전기정보공학부, 교수,
E-mail: ytyoon@snu.ac.kr
4* 정회원, 교신저자, KT, 차장(공학박사),
E-mail: hoonkim@daum.net

1 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University
2 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University
3 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University
4* Korea Telecom

1. 서 론

2000년대 사물인터넷(IoT), 센싱(sensing) 및 정보통신기술의 발전은 기존 개발자 일방 주도로 폐쇄적인 환경에서 이루어졌던 각종 기술 및 서비스 개선 방식의 패러다임 시프트를 이루어 냈다. 몇몇 회사들은 발전된 정보통신기술을 적극적으로 활용하여, 이용대상자들의 실제 생활 환경 속에서 자신들의 제품/서비스 프로토타입을 테스트하고, 그 결과를 최종 제품/서비스의 개선에 이용하기 시작하였다[1].

초기의 리빙랩(living Lab)은 이와 같은 기술 및 서비스 개선 방식의 패러다임 시프트 과정에서 등장한, 이용대상자들의 직접 참여를 고려하여 설계된 개방형 제품/서비스 테스트 환경을 지칭하였다 [1, 2]. 그러나 이용대상자의 능동적 참여와 의견 교환을 운영의 동력으로 삼는 리빙랩의 본질적 특성은, 리빙랩의 제품/서비스 테스트 도구로의 단순 활용을 넘어, 공동체 문제 해결과 같은 보다 높은 가치의 지향을 가능케 하였다 [3-7].

이로 말미암아 오늘날 리빙랩은 환경, 복지, 교육, 지역문제 등 다양한 분야의 문제들의 해결을 위해 활용되고 있다 [3-7]. 특히 지구온난화 문제가 심각해지고, 탄소 배출량 절감에 대한 전지구적 노력이 가속화됨에 따라, 에너지 테마는 리빙랩의 주요 분야 중 하나로 자리잡았다. 스웨덴의 HSB Living Lab은 25개의 방으로 구성된 기숙사 건물을 활용하여 녹색기술을 적용할 시의 사용자 생활 패턴 데이터를 검토, 녹색 기술의 개선점을 연구하였고, 영국의 SUSLAB은 사용자들의 건물 내 에너지 및 수자원 소비패턴 데이터를 연구하여 효과적인 에너지 절감 방안을 연구하였다 [5, 9]. 독일의 Smarthome Lab은 센싱 장비를 이용하여 각종 에너지 및 공기질 데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 에너지 기술의 수요를 파악하는 연구를 진행하였다 [5, 9]. 이들 에너지 리빙랩은 각종 관련 데이터를 적극 이용하여 건물 이용자의 삶의 질과 에너지의 효율적인 활용을 도모한다는 공통점을 지닌다. 즉, 에너지 리빙랩은 데이터를 측정하는 IoT센서와 이를 수집하기 위한 통신망, 통합플랫폼이 갖추어진 환경을 운영의 필요조건으로 삼는다.

“도시의 경쟁력과 삶의 질 향상을 위하여 건설, 정보통신 등을 융복합하여 건설된 도시기반시설을 바탕으로 다양한 서비스를 제공하는 지속가능한 도시”로 정의되는 스마트시티는 이와 같은 에너지 리빙랩의 효율적인 운영을 위한 환경이 될 수 있을 것으로 보인다 [10]. 스마트시티는 통신망, IoT 센서, 통합플랫폼을 운영을 위한 기반 환경으로 삼고, 통합운영센터를 통해 데이터 저장, 공유, 가공, 분석 기능 그리고 이에 기반한 서비스를 제공한다 [11]. 이와 같은 스마트시티의 기능은 에너지 리빙랩의 구현 과정에서 데이터 활용을 위해 필요한 노력을 절감하고, 리빙랩의 단발성의 운영이 아닌 지속적인 운영을 촉진시킬 수 있다.

국토교통부의 스마트시티 혁신성장동력프로젝트에 참여 중인 본 연구팀은 이와 같은 점에 착안하여, 프로젝트가 진행 중인 시흥 스마트시티 내 건축물들의 에너지 절감 방안을 도출하기 위한 리빙랩을 설계하였다. 연구팀은 시흥 지역 내 집단에너지사업자가 공급하는 중온수를 활용하는 산업체 및 공기관 건물이 많고, 이들 건축물 대부분이 중온수에 기반하는 공조시스템을 운영 중이나, 공조시스템 에너지 사용량이 전체 건축물 에너지 사용량의 35%에 달함에도 불구하고 중온수 기반 공조시스템의 특성상 마땅한 제어방안이 없는 점에 착안하여, 이들 건물에 적합한 BEMS 기반 공조시스템 운영안을 도출하였다 [12]. 운영안을 테스트하기 위한 리빙랩의 대상 건물로는, 스마트시티 혁신성장동력프로젝트의 허브이자 시흥 스마트시티

의 데이터센터가 위치한 서울대학교 교육협력동을 선정하였다.

2. 재실 실적을 반영한 중온수 기반 공조시스템 운영 방안

2.1 공조시스템의 분류 및 일반적인 중온수 기반 공조시스템의 한계점 검토

공기조화는 기계 장치를 이용하여 실내의 온도나 습도 따위의 공기 상태를 보건에 맞게 조절하는 일을 뜻한다 [13].

공조시스템은 풍량 제어방식에 따라 크게 정풍량 기반 제어방식인 CAV (constant air volume)와 변풍량 기반 제어 방식인 VAV (variable air volume)으로 나누어볼 수 있다. 인버터를 활용하지 않는 CAV는 VAV 방식에 비해 초기투자비용 및 유지비용이 저렴하다는 특징을 지닌다. 그러나 팬의 속도 제어에 기반한 온도제어가 불가하다. 한편 공조시스템은 주요 공조설비에 따라 OHU(outdoor- air handling unit)와 AHU(air handling unit) 기반 시스템으로 나누어볼 수도 있다. 통상적인 OHU 공조시스템은 시설 내 환풍 설비가 별도로 없기에, 건물 내부 습도가 높은 경우나 분진 및 오염가스가 많은 경우, 내부 공기를 전량 외부로 배출시키고 새로운 공기를 들여오는 방식을 취한다. 이러한 특성으로 인해 OHU는 데이터센터나 클린룸이 필요한 산업시설이나 수영장, 식당과 같이 냄새에 민감한 공간에서 이용된다. 그러나, 외부 공기에 전량 의존하여 공조를 진행하는 특성에 따라, AHU에 비해 에너지 소비량이 많다.

공조시스템은 에너지원에 따라 전기식과 중온수식으로도 나누어볼 수 있다. 전기식은 설비의 규모가 크지 않고, 설치가 간편하며, 개별 제어가 가능하다. 이에 전기식 공조시스템은 보통 중소규모의 건물에 주로 사용된다. 그러나 전기를 에너지원으로 이용하기에 운영 비용이 저렴하지 않다는 단점을 지닌다. 중온수식은 운영에 필요한 냉동기나 열교환기, 냉각탑 등 설비의 규모가 무척 크고 설치가 쉽지 않기에, 건물의 설계단계에서부터 설비 선정에 있어 많은 검토가 필요하고, 초기투자 비용도 크다. 다만, 전기에 비해 무척 저렴한 중온수를 이용하므로 운영 비용을 절약할 수 있다. 이러한 특성으로 인해, 중온수식은 공장이나 공기관 등 공조실을 갖춘 대형 건축물에서 이용된다.

중온수식 공조시스템은 소각로나 열병합발전 등에서 생산된 열을 이용한다는 점에서, 에너지원의 이용효율을 높일 수 있고, 따라서 친환경적이다 [14]. 그러나 일반적으로 공조실을 통해 수동 중앙제어되므로, 건물이나 외부 상황을 실시간으로 반영하거나 최적화 솔루션을 연계하여 운용하기보다 계절 단위로 정해진 스케쥴에 따라 운전된다. 또한 수동 중앙제어 중 열쾌적도를 공간별로 고려하지 쉽지 않기에, 복도와 화장실 등 실제 이용도가 높지 않은 공간에서 에너지 낭비가 이루어질 수도 있다.

2.2. BEMS에 기반한 재실스케쥴 반영 공조시스템 운영 방안

건물에너지 관리시스템인 BEMS(building energy management system)에 기반한 공조시스템 운영은 이와 같은 중온수 기반 공조시스템의 에너지 절감 방안 마련에 있어 솔루션이 될 수 있다. 연면적 10,000제곱미터 이상 공기관의 BEMS 설치가 의무화되고, 각종 정책 지원금을 통해 BEMS 설치에 대한 지원이 이루어지는 현 상황에서, 대형 건물의 BEMS 설치율은 점점 높아져 가고 있다 [15].

BEMS에 기반한 공조시스템은 기존 공조실에서

의 수동제어에 기반한 공조시스템 운영과 달리 건물의 상황 및 각종 기상 조건을 실시간 반영한 운전이 가능하다는 장점을 지닌다. BEMS는 공조시스템 운영 스케쥴 도출에 필요한 정보를 각종 센서를 통해 실시간 취득하여 운영에 반영할 수 있으므로, 운영 스케쥴의 분 단위 생성 및 각종 상황 변화에 대한 즉각 대응이 가능하다. 뿐만 아니라 BEMS는 운영 스케쥴을 도출함에 있어 시스템에 설치된 최적화 엔진을 활용할 수 있다는 장점도 지닌다.

Fig. 1은 이와 같은 BEMS의 장점을 이용한 공조시스템의 운영 방안을 나타낸다. BEMS는 외기의 온도, 습도, 실내 각 공간의 온도 및 습도, 그리고 공간별 재실에 따른 열쾌적도 기준과 재실스케쥴에 대한 정보를 실시간으로 입력받으며, 탑재된 최적화 엔진을 통해 공조시스템의 각 구성 요소별 운영을 결정한다 [16-19]. 예를 들어 공조시스템이 CAV 방식을 취할 경우, 팬에 대한 최적화 엔진의 출력은 공조시스템을 이루는 요소별 실시간 on/off 결정이 되며, VAV 방식을 취할 경우, 팬에 대한 최적화 엔진의 출력은 공조시스템을 이루는 요소별 on/off 및 변속 결정이 된다. 새로운 공조시스템 운영 방안은 건물의 각 공간별 용도 및 재실 여부를 고려하여 실시간으로 공조 여부를 결정하는 방식으로 공조 에너지를 절감한다.

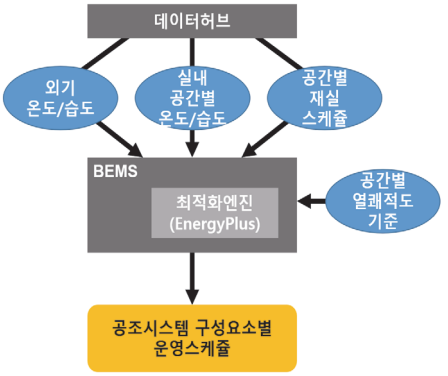

Fig. 1 Operations scheme of water supplied HVAC system considering occupancy schedules

2.3 최적화 엔진의 결정

건물의 공간별 용도와 재실실적을 고려한 공조시스템 운영 방안의 최적화 엔진으로는 EnergyPlus를 이용한다. EnergyPlus는 북미 에너지청(DOE, departement of energy)에서 개발된 프로그램으로, 복사시계열법에 근거하여 최대 공조부하를 산

Table 1. Comparison of simulations engine for assessment of building energy consumption

특성	EnergyPlus	DOE-2	BLAST
스케쥴링 주기	분단위까지 가능	1시간단위로 가능	분단위까지 가능
코드 편의성	사용자 직접 가능	불가능	사용자가 자체적으로 가능
내부대류 계산 방법	온도에 따른 대류변화 감지 가능 및 내부 발열물체 고려 가능	내부 발열물체 고려 전산모의 가능	온도에 따른 대류변화 감지 가능 및 내부 발열물체 고려 가능
열적 쾌적성	재실인원의 활동성 및 발열양 평가 가능	반영 불가	재실인원의 활동성 및 발열양 평가 가능
난방/냉방수 흐름 계통	가능	가능	불가
공기 흐름 계통	가능 (coil/fan/zone/box)	불가	불가
공조 설비의 열발산 감지 여부	가능	불가	가능

출하는 실무용 프로그램과 달리, 열평형법에 근거하여 공조부하 및 공조시스템 운영 스케쥴에 대한 실시간 계산을 수행한다.

실시간 계산을 수행할 수 있는 프로그램에는 EnergyPlus 외에도 DOE-2와 Blast가 있으나, EnergyPlus는 Openstudio나 Designbuilder 등 GUI(graphic user interface) 프로그램을 플러그인으로 이용할 수 있고, 다양한 환경변수들을 반영할 수 있다는 장점을 지닌다. 또한 라이브러리를 통해 다양한 공조시스템 요소들을 구현할 수 있다는 장점을 지닌다. Table 1은 EnergyPlus와 DOE-2, Blast의 특성별 비교 내역이다.

2.4 데이터허브 연계 리빙랩을 통한 공조시스템 운영 방안의 테스트

2장을 통해 살펴본 공간별 재실스케쥴을 고려한 BEMS 기반 중온수 공조시스템 운영 방안은 서울대학교 교육협력동 내 에너지리빙랩을 구축하여 테스트한다. 경기도 시흥시 서울대학로 173에 위치한 서울대학교 교육협력동은 서울대학교 시흥캠퍼스의 본부가 위치한 건물로 캠퍼스의 행정 허브 역할 및 강의동의 기능을 수행하는 한편, 지역 랜드마크로 시흥시에서 이루어지는 다수 행사가 주최되는 장소이기도 하다.

Fig. 2 Educational hall in seoul national university at Siheung

교육협력동의 공조시스템은 한국지역난방공사에서 공급되는 중온수를 열원 및 냉동원으로 사용하며, 그 외 팬, 펌프, 냉각탑의 운영의 에너지원으로 전기를 사용한다. 교육협력동에는 에너지 절감의 목적으로 BEMS가 기설치되어 있으나, 현재 공조시스템은 지하1층의 공조실을 통해 계절 단위 스케쥴에 따라 사실상 수동으로 전일 운전되고 있다. 따라서 교육협력동 공간의 각 공간별 재실일정은 고려되지 않고 있으며, 이로 인하여 미사용 공간에서 에너지의 낭비가 발생한다. 또한 공조시스템은 OHU에 기반하고 있기에 앞서 다룬 바와 같이 공기질 유지 과정에서 소모되는 에너지 비용이 높은 편이기도 하다. 그러나 공조시스템은 CAV 방식을 취하고 있기에 팬의 변속 제어가 불가하고 오로지 on/off 제어의 형태를 취해야 한다. 즉, 공조시스템의 에너지 소비량 절감의 여지가 있음에도 불구하고, 공조시스템의 특성상 절감을 위해 취할 수 있는 옵션은 많지 않은 것으로 보이며, 이에 BEMS에 기반한 새로운 운영 방안을 테스트 하기에 적합하다.

한편 서울대학교 교육협력동의 8층에는 시흥스마트시티 혁신성장동력프로젝트의 데이터허브인 시티랩(City Lab)이 위치해있다. 시티랩은 시흥 스마트시티 프로젝트의 각 세부과제에서 수집되는 데이터를 수집하고 저장하는 한편, 데이터를 쉽게 가공하고 분석할 수 있는 기능을 제공한다. 시티랩에는 프로젝트에 참여하는 세부과제 기관을 통해 이미 시흥 지역 내 외기 온도 및 습도에 대한 데이터가 실시간으로 수집되고 있고, 데이터를 저장하기 위한 서버와 각종 보안, 접속, 전송 시스템이 구축되어 있다. 따라서 데이터허브와 BEMS를 연계할 경우, 재실스케쥴의 데이터화 및 저장, 외부 기상 데이터, 실내 온습도 데이터의 수집 및 저장에 필요한 별도의 노력을 절감할 수 있다.

리빙랩은 새로운 공조시스템 운영 방안을 교육협력동에 적용하고, 적용 전후 교육협력동 이용자들의 열쾌적도를 설문을 통해 조사한 뒤, 설문 결과를 공간별 열쾌적도에 반영하는 형태로 운영한다. 운영 기간의 기상 및 운영방안 적용에 따른 실내 각 공간별 온습도 변화는 데이터허브 상 기록하여, 이후 새로운 공조시스템을 시흥시 전역에 보급함에 있어 자료로 활용한다.

3. EnergyPlus를 활용한 재실스케쥴 고려 중온수 기반 공조시스템 운영 방안 도출

최적화 엔진인 EnergyPlus를 통해 새로운 공조시스템 운영 방안을 도출하기 위해서는 실제 운영 건물의 열원 설비, 냉동설비의 상세 내역, 중온수 계통도, 냉난방 부하의 계통도에 대한 정보가 필요하다.

Table 2와 Table 3는 건물의 열원 설비와 냉동설비의 내역이다. 교육협력동은 현재 총 3대의 열교환기를 운영하고 있으며, 각 열교환기는 건물 내 급탕, OHU 및 FCU 난방수를 환수 후 공급하는 역할을 수행한다. 교육협력동의 냉동기와 냉각탑은 2대씩 설치되어 있으나, 캠퍼스의 미완공으로 인해 냉각수의 수요가 크지 않은 상태이고, 이에 따라 교번제어로 운영 중이다. 각 냉동 및 열원 설비가 이용하는 에너지원은 한국지역난방공사에서 공급되는 섭씨 105도의 중온수이다.

Fig. 3과 Fig. 4는 EnergyPlus 내 입력한 중온수 계통도이다. 교육협력동은 한국지역난방공사에서 공급받은 중온수를 펌프를 이용하여 냉동기로 보내며, 냉동기는 중온수를 받아 건물 내 이용되는 냉수를 생성한다. Fig. 5는 건물의 층별 OHU와 해당 OHU가 담당하는 건물 내 열 구역을 나

Table 2. Technical specifications of heat sources in the subject educational hall

종류	용도	용량	비고	
열교환기	급탕	43,000 kcal/h	운전압력	18 LPM (1차)
				18 LPM (2차)
	난방	2,456,000 kcal/h		712 LPM (1차)
				4,273 LPM (2차)

Table 3. Technical specifications of chillers and cooling towers in the subject educational hall

종류	용도	용량	비고	
냉동기	냉방	530 USRT	1차측 온도	95도
			2차측 온도	55도
냉각탑	냉방	1,050 CRT	송풍 용량	5,886 CMM

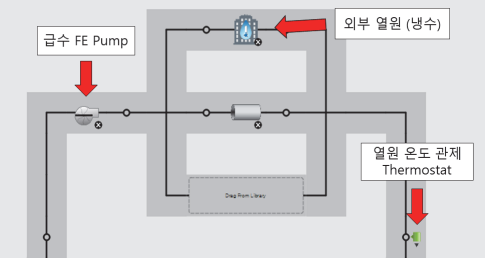

Fig. 3 Supply side of the HVAC system in the subject educational hall

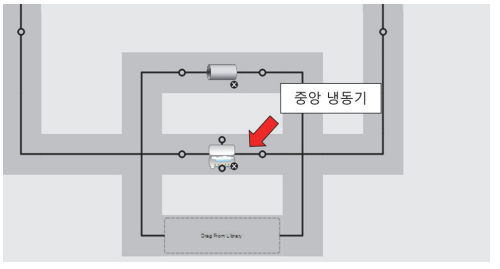

Fig. 4 Demand side of the HVAC system in the subject educational hall

타나는 계통도이다. OHU 1기가 각 층을 담당하는 점을 고려하여, 송풍 및 환풍 목적의 팬은 1기씩 배치하였으며, OHU 내부 설치된 냉방 및 난방 코일 또한 각 1기씩 배치하였다. 냉방 및 난방 코일에 들어가는 온수온도와 냉수온도는 건물 운영 내역과 동일하게 60도 및 7도로 설정하였다.

운영 방안 도출에 필요한 재실실적은 서울대학교 시흥캠퍼스 본부의 협조를 통해 확보하였다. EnergyPlus 내에서 각 공간들은 강의실과 같은 정기적 사용 공간과 화장실, 복도, 계단과 같은 비정기적 사용 공간으로 나누었으며, Fig. 6와 같이 각 공간별 전체 수용 가능 인원 대비 재실 비율 입력을 통해 반영하였다. 이용자의 인체 발열량은 사무공간에서의 인체 발열량 기준인 130W로 설정하였다.

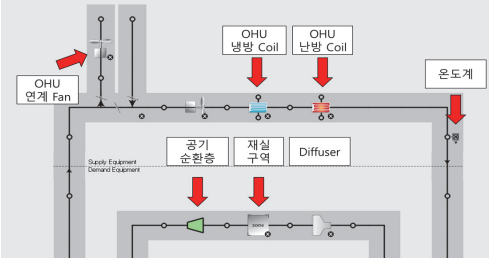

Fig. 5 Air loop in each floor

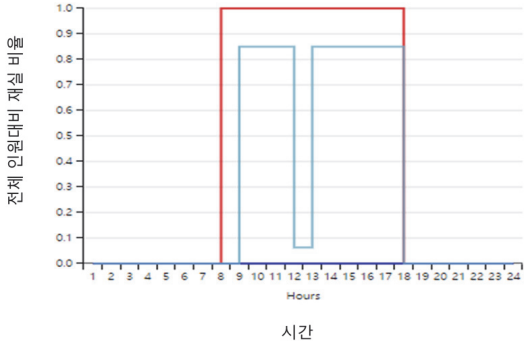

Fig. 6 Regular operations schedule considered in the simulation

4. 시뮬레이션을 통한 운영 방안 효과 검증

공간별 재실스케쥴을 고려한 BEMS 기반 중온수 공조시스템 운영 방안의 적용 효과는 실제 리빙랩의 운영에 앞서 EnergyPlus 시뮬레이션 기능을 통해 확인할 수 있다. 연구팀은 건물의 공간별 재실스케쥴이 확보되고 기상데이터가 데이터허브에 확보된 2021년 하절기를 대상으로 시뮬레이션을 진행하였고, 이를 통해 냉방 부하, 공조시스템의 에너지 사용량, 공조시스템의 각 구성 요소별 에너지 사용량, 경제성 변화를 검토하였다.

기존 운영 방식 대비 새로운 운영 방안의 효과를 비교 검토하기 위해, 재실스케쥴을 고려하지 않는 운영 방식을 함께 시뮬레이션하였으며, 편의에 따라 이를 대조군, 새로운 운영 방안을 실험군으로 칭하도록 한다. 대조군과 실험군 모두에서 열쾌적도는 공공기관 온도 유지범위인 26-28도로 설정하였다. 즉, 대조군 하에서 교육협력동 내 모든 공간들은 26-28도의 범위에서 공조되고, 실험군 하에서 교육협력동 내 공간들은 재실 일정이 있는 경우에 26-28도의 범위에서 공조된다.

4.1 2021년 하절기 냉방부하, 전력사용량 및 구역별 평균 온도 검토

Table 4는 시뮬레이션 기간인 2021년 6월, 7월 및 8월의 대조군 및 실험군의 냉방부하 산출

Table 4. Cooling load simulated in the simulations periods

기간	대조군	실험군	외기 평균온도 (C)
	냉방부하 (MBtu)	냉방부하 (MBtu)	
6월	12.25	9.7	21.6
7월	19	11.49	27.2
8월	16.22	13.83	25.2

결과이다. 실별 재실스케쥴을 고려하여 공조시스템을 운영할 경우, 냉방 부하량은 6월, 7월, 8월 각각 대조군 대비 20.82%, 39.53% 및 14.73% 가량 절감된다.

Table 5는 시뮬레이션 기간인 2021년 6월, 7월 및 8월의 대조군 및 실험군의 공조시스템의 전력사용량 산출 결과이다. 전체 냉방부하의 월별 절감율과 비교할 때 전력의 절감율은 무척 작은 편으로, 냉방부하의 절감이 대부분 중온수량의 절감을 통해 이루어짐을 알 수 있다.

Table 6과 Table 7는 대조군과 실험군에서의 각 공조시스템 구성요소별 전력사용량이다. 교육협력동 공조시스템 중 전기를 사용하는 주요 요소로는 팬과 펌프, 냉각탑을 꼽을 수 있다. 팬은 OHU를 통해 공조된 공기를 각 공간으로 보내는 역할을, 펌프는 공조 목적의 난방수와 냉방수를 순환시키는 역할과 수수한 중온수를 건물 내 이용하기 위해 순환시키는 역할을, 냉각탑은 냉동기의 응축수를 냉각시켜 재사용할 수 있게 하는 역할을 수행한다.

계산 결과 공조시스템의 전력사용량은 모두 팬에서 감소하는 것으로 나타나며, 펌프와 냉각탑의 전력사용량은 변화가 없는 것으로 나타나는데, 이는 시흥캠퍼스가 2025년 개교 예정으로, 아직까지 교육협력동의 이용률이 높지 않기 때문으로 해석할 수 있다. 즉, 대조군에서 만들어지는 냉온수량은 이미 공조시스템의 운영을 위한 최소 필요 수준으로 유지되고 있기에, 새로운 공조시스템 운영방안은 펌프와 냉각탑의 전력사용에는 영향을 주지 못한다. 교육협력동의 이용률이 높아지고 재실스케쥴의 변화가 빈번해질 경우에는 본 연구의 시뮬레이션과 달리 냉동기의 가동률 및 응축수의 순환량, 중온수 사용량에 변화가 발생할 것으로 보이며, 이는 냉각탑과 펌프에서의 전력 절감으로 이어지게 된다.

Table 8은 시뮬레이션 기간인 2021년 6월, 7월, 8월 교육협력동 각 층의 평균온도를 나타낸

Table 5. kWh energy demand simulated in the simulations periods

기간	대조군	실험군	외기온도 (C)
	전력사용량 (kWh)	전력사용량 (kWh)	
6월	223,993	223,758	21.6
7월	234,852	234,171	27.2
8월	232,706	232,297	25.2

Table 6. Component-wise electricity consumption in the simulations periods (without occupancy schedule)

구성내역	6월	7월	8월
팬	24,722	28,946	26,812
펌프	151,200	156,240	156,240
냉각탑	33,604	34,724	34,724

Table 7. Component-wise electricty consumption in the simulations periods (with occupancy schedule)

구성내역	6월	7월	8월
팬	24,488	28,267	26,401
펌프	151,200	156,240	156,240
냉각탑	33,604	34,724	34,724

Table 8. Average temperature in each floor during the simulations periods

층별	대조군			실험군		
	평균온도 (C)			평균온도 (C)		
	6월	7월	8월	6월	7월	8월
4	22.8	25.1	24.3	26.8	29.4	29.1
5	23.8	26.7	26.1	26.9	28.7	29.2
6	24.4	27.3	26.5	25.9	30.4	26.6
7	25.2	26.9	26.7	29.1	32.6	27.0
8	26.1	27.5	27.4	23.9	28.1	30.8
9	25.9	27.2	26.6	24.2	27.4	29.5
10	26.1	28.2	27.6	22.9	24.8	27.7

다. 대조군에 비해 실험군의 평균 온도가 증가한 것은 실험군이 공간별 재실스케쥴을 고려했기 때문으로, 실험군 하에서 재실스케쥴이 없는 공간들이 이용자들의 열쾌적도 기준인 26-28도 범위 밖에서 공조됨을 나타낸다. 이는 새로운 운영 방안이, 설계한 바와 같이 재실스케쥴이 없는 공간 및 비정기적 이용 공간의 열쾌적도 유지를 포기하는 형태로 에너지를 절감하고 있음을 뜻한다.

4.2 새로운 공조시스템 운영 방안 적용의 경제적 효과 검토

서울대학교 교육협력동에서 이용 중인 중온수와 전기 요금제는 모두 2부제로, 계약요금과 사용량 요금으로 구성된다. Table 9는 교육협력동의 중온수 및 전기의 사용량 요금으로, 중온수 요금은 시간의 변화에 무관하게 동일하고, 전기요금은 교육용(을) 고압 A의 선택II로 부하 시간에 따라 변동하는 시변제임을 확인할 수 있다.

Table 10은 교육협력동의 중온수 및 전력 계약요금 계산 결과로, 각각의 계약량 3,741Mcal/h, 7,141kW에 요금 단가인 361.98KRW/(Mcal/h)와 6,908KRW/kW을 곱하여 도출한다. 계약요금의 경우 계약량과 단가가 대조군과 실험군 모두 동일하기에, 비용의 차이가 발생하지 않는다.

대조군은 시뮬레이션 기간인 6월, 7월, 8월 각각 3,089Mcal, 4,791Mcal, 4,090Mcal의 중온수를 소모하였으며, 실험군은 같은 기간 2,446Mcal, 2,897Mcal, 3,487Mcal의 중온수를 사용하였다. 계산 결과 실험군의 중온수 사용량은 대조군의 중온수 사용량에 비해 6월, 7월, 8월 각각 20.82%, 39.53%, 14.74% 줄어드는 모습을 보인다. 대조군과 실험군 각각의 전력 사용량은 Table 5의 결과와 동일하며, 실험군의 전력사용량은 6월, 7월, 8월 각각 대조군에 비해 0.1%, 0.29%, 0.18% 줄어드는 모습을 보인다. Table 11은 대조군과 실험군 각각에서의 중온수 사용량과 전력사용량을 바탕으로 계산한 사용량 요금 계산 결과로, 실험군의 사용량 요금은 대조군에 비해 6월, 7월, 8월 각각 0.37%, 1.04%, 0.42% 줄어드는 모습을 보인다. 사용량 요금의 감소 비율은 중온수 사용량보다 전력 사용량의 감소 비율에 가까운 모습을 보이는데, 이는 중온수 요금이 전기 요금에 비해 무척 저렴하기 때문인 것으로 보인다. 그러나 이와 같은 결과가 새로운 운영 방안의 에너지 비용 개선 효과가 작다는 것을 뜻하지는 않는다. 4.1에서 다룬 바와 같이, Table 10과 Table 11의 결과는 교육협력동의 이용률이 낮아 냉온수가 공조시스템 운영에 필요한 수준에서 운영되는 상황에서 도출

Table 9. Utilization price of each type of energy source

기간	전기요금 (KRW/kWh)	난방요금 (KRW/Mcal)
경부하	40.3	25.11
중부하	85.0	
첨두부하	150.9	

Table 10. Forward price of each type of energy source

기간	계약 전력요금 (KRW)	계약 중온수요금 (KRW)
6월	49,844,180	1,354,167
7월		
8월		

Table 11. Total cost of energy simulated in each simulations period

기간	대조군 Energy비용 (KRW)	실험군 Energy비용 (KRW)	외기온도 (C)
6월	20,605,855.0	20,528,821.0	21.6
7월	21,757,936.0	21,532,048.6	27.2
8월	21,491,477.4	21,400,659.3	25.2

된 것으로, 향후 교육협력동의 이용률이 높아지고 재실스케쥴의 변화가 빈번해질 경우에는 냉각탑과 펌프 또한 공조시스템 운영 스케쥴에 고려되어 에너지 비용의 개선 효과가 커질 수 있다.

5. 결 론

공조시스템은 건물 내 온도 및 습도 조절에 있어 중요한 역할을 수행하는데, 그 에너지 소비량은 건물 전체 에너지 소비량의 약 35%를 차지한다. 따라서 건축물을 통한 에너지 및 탄소배출량 절감에 있어 공조시스템은 반드시 고려되어야 한다.

중온수에 기반한 공조시스템은 일반적으로 중앙공조실을 통해 수동 제어되므로, 에너지 절감의 옵션이 다양하지 않다는 단점을 지닌다. BEMS에 기반한 공조시스템의 운영은 이와 같이 절감 옵션이 다양하지 않은 중온수 기반 공조시스템의 운영 대안이 될 수 있다.

BEMS는 실시간으로 각종 데이터를 수집하여 연산에 활용할 수 있다는 장점을 지니므로, 연구팀은 BEMS 내 최적화엔진으로 EnergyPlus를 설치하고, 각 재실 스케쥴에 따라 공간의 이용자 열쾌적도를 조절하는 형태의 공조시스템을 운영하는 방안을 시뮬레이션하였다. 한편 해당 방안을 스마트시티의 데이터허브 기능을 활용하여 리빙랩 형태로 검증하는 것의 이점을 논하였다.

리빙랩 운영 후보지인 서울대학교 교육협력동을 대상으로 2021년 하절기에 대해 새로운 공조시스템 운영방안을 시뮬레이션한 결과, 공조부하는 적게는 약 15%, 많게는 약 40% 가량 줄어드는 모습을 보였다.

향후 연구에서는 본 운영방안의 적용에 따른 중온수 기반 건물의 에너지 절감 및 이용자 열쾌적도의 변화를 서울대학교 교육협력동 내 데이터허브에 기반한 리빙랩 운영을 통해 검증한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부, 과학기술정보통신부 스마트시티 혁신성장동력프로젝트 중 3-4 세부과제 “리빙랩 혁신모델 기반 개방형 데이터허브 플랫폼 구축 및 검증”(22NSPS-C149834-05)의 지원을 통해 작성되었습니다.

참고문헌

[1] A. Folstad, “A Living labs for innovation and development of information and communication technology: a literature review,” The Electronic Journal for Virtual Organizations and Networks, vol.10, (2008).

[2] Feurstein, K., Hesmer, A., Hribernik, K. A., Thoben, K. D., & Schumacher, J, “Living Labs: a new development strategy,” European Living Labs-a new approach for human centric regional innovation, pp. 1-14, (2008).

[3] 성지은, 송위진, 정병걸, 최창범, 윤찬영, 정서화, & 한규영, “국내 리빙랩 현황 분석과 발전 방안 연구. 정책연구,” pp. 1-194, (2017).

[4] 성지은, 송위진, & 박인용, “사용자 주도형 혁신모델로서 리빙랩 사례 분석과 적용 가능성 탐색,” 기술혁신학회지, vol.17, no. 2, pp. 309-333, (2014).

[5] 성지은, & 박인용, “시스템 전환 실험의 장으로서 리빙랩: 사례분석과 시사점,” 기술혁신학회지, vol.19, no. 1, pp. 1-28, (2016).

[6] Alavi, H. S., Lalanne, D., & Rogers, Y, “The five strands of living lab: a literature study of the evolution of living lab concepts in HCI,” ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), vol.27, no. 2, pp. 1-26, (2020).

[7] Edwards-Schachter, M. E., Matti, C. E., & Alcántara, E, “Fostering quality of life through social innovation: A living lab methodology study case,” Review of policy research, vol. 29, no. 6, pp. 672-692, (2012).

[8] 성지은, 송위진, & 박인용, “리빙랩의 운영 체계와 사례,” STEPI Insight, no. 127, pp. 1-46, (2013).
[9] D. V. Keyson, “SusLab NWE: Sustainable Labs North West Europe”, (2014).
[10] 이재용, & 한선희, “스마트시티법 재개정의 의미와 향후 과제,” 한국도시지리학회지, vol.20, no. 3, pp. 91-101, (2017).
[11] 김경훈, "스마트시티의 동향과 추진 방향", 정보통신기획평가원 주간기술동향, (2019).
[12] Liang, X., Hong, T., Shen, G.Q, “Occupancy data analytics and prediction: A case study,” Building and Enviornment, vol. 102, (2017).
[13] 표준국어대사전, “공기조화.” [Online]. Available: https://ko.dict.naver.com/#/entry/koko/390cdee69ba34b06a5909e3e63efee50.[Accessed: 26-Oct-2022].
[14] 경향신문, “‘하절기 에너지수요관리, 친환경·저비용 지역냉방으로 해결” [Online], Available: http://www.kharn.kr/news/article. html?no=3747
[15] 경향신문, “‘그린뉴딜·탄소중립 실현’ BEMS 보조금 직접지원” [Online], Available: http://www.kharn.kr/news/article.html?no=15459
[16] W. Son, Y. Choi, “지열을 이용한 공조외기부하저열 시스템의 설계 및 도입 효과에 관한 연구 – 실측결과 및 열성능 예측을 위한 수치모델의 제안,” 한국산업융합학회, vol.7, no. 3, pp. 223-240, (2004).
[17] D. Park, S. Choi, “Analysis of Oversizing Causes and Improvement Plans through Comparative Analysis of Cooling Actual Energy and Energy Simulation by General Building Types,” Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 19, No. 5, pp.87-92, Oct. (2019).
[18] 조수연, 이승복, “건물데이터를 통한 건물에너지 절감 가능성에 대한 연구 : 도시단위의 거시적 분석부터 미시적 건물 에너지 분석사례,” 한국설비공학회, Vol.29, no. 11, pp. 580-591, (2017).
[19] 최종대, 윤근영 “재실밀도 변화에 따른 건물 에너지 사용량 분석을 위한 예비조사,” 한국태양에너지학회, vol.31, no. 2, pp. 130-133, (2011).

(접수: 2022.11.01. 수정: 2022.11.29. 게재확정: 2022.12.05.)