

2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

부하보상제어를 적용한 동시 냉난방 시스템의 에너지 절감 및 열쾌적 분석

Energy Saving and Thermal Comfort Analysis of Simultaneous Heating and Cooling system with Load Reset Control

○이 유 진* 이 석 현** 신 대 옥***
Lee, Yu-Jin Lee, Seok-Hyun Shin, Dae-Uk

Abstract

Simultaneous heating and cooling systems(SHC) are effective in buildings that require heating and cooling at the same time. However, the usage of auxiliary heating and cooling systems are inevitable because of the variable occurrence of the loads. Therefore, in order to increase the use of the SHC, a load reset control(LRC) method that changes the set temperature according to the amount of heating and cooling load has been proposed. In this study, energy saving rate and comfort improvement were analyzed by comparing the existing constant temperature control method and the LRC method using simulation. As a result of the study, it was confirmed that a small amount of energy can be reduced while satisfying a comfortable temperature.

키워드 : 동시 냉난방 시스템, 히트펌프, 에너지 절감, 열쾌적, 부하보상제어

Keywords : Simultaneous Heating and Cooling systems, Heatpump, Energy Saving, Thermal Comfort, Load Reset Control

1. 서론

최근 실내 발열 증가로 인해 겨울에도 냉방 부하가 발생하거나, 건물 유형에 따라 한 건물에서 냉난방이 동시에 필요한 경우가 발생하게 된다. 이러한 경우 에너지를 절감시키기 위한 방안으로 동시 냉난방 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으나, 냉난방 부하량이 항상 동일하지는 않기 때문에 보조 냉난방 시스템이 불가피하게 필요하다. 한편 보조 냉난방 시스템은 동시 냉난방 시스템에 비해 COP(Coefficient Of Performance)가 낮아 같은 양의 부하 제거 시 더 많은 에너지를 요구한다.

따라서 냉난방 에너지를 절감시키기 위해 COP가 높은 동시 냉난방 시스템의 사용량을 늘리고, COP가 낮은 보조 냉난방 시스템의 사용량을 줄이는 Load-Balancing 개념이 제시되었다(Shin, et al. 2015). 이는 냉난방 부하 중 적은 쪽의 부하를 증가시켜 부하의 균형을 맞추므로써 동시 냉난방 시스템의 사용량을 늘리고자 하였다. 부하를 증가시키는 방법으로는 실의 설정 온도를 쾌적 범위 내에서 변경하고자 하였으며 이를 바탕으로 부하보상제어(Load

Reset Control) 방법이 선행연구(이유진, 2023)에서 제안되었다. 해당 연구에서는 냉방 부하가 난방 부하보다 크게 발생하는 건물을 대상으로 난방 설정 온도를 변경하여 냉난방 부하의 균형을 맞추고자 하였다. 연구 결과 에너지가 절감되면서도 쾌적 범위에 가까운 온도를 유지할 수 있었다.

하지만 해당 연구는 난방 온도만을 변경한다는 점에서 한계가 있었고, 실제 건물에서는 냉난방 부하량이 실시간으로 변화할 수 있음을 고려하여 후속 연구에서 냉난방 온도를 모두 변경할 수 있도록 개선된 부하보상제어 방법을 제안하였다. 따라서 본 논문에서는 부하보상제어를 적용하여 에너지 절감 및 열쾌적 향상 가능성을 검증하고자 한다.

2. 부하보상제어의 개요 및 운영방안

2.1. 부하보상제어의 개요

부하보상제어는 Load-Balancing 개념을 구체화하기 위해 제안되었으며, 건물의 냉난방 부하량 변화에 따라 실의 설정 온도를 변경하여 냉난방 부하의 균형을 맞추는 제어 방법이다. 외기 온도에 따라 설정 온도가 변경되는 외기보상제어와 같이 냉난방 부하량에 따라 설정 온도가 변경되므로 부하보상제어라고 정의하였다.

2.2 냉난방 부하량 파악에 대한 고찰

동시 냉난방 시스템의 사용량을 늘리려면 냉난방 부하

* 군산대 건축공학과 박사과정

** 군산대 건축공학과 석사과정

*** 군산대 건축공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Architectural Engineering,

Kunsan National University, daeuk.shin@kunsan.ac.kr)

이 연구는 2024년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일
부임. 과제번호:2022R1F1A1063065

량이 균등해야 하며, 이를 위해 현재 건물에서의 부하량을 파악할 필요가 있다. 이는 성층 탱크 내부의 냉난방이 가능한 물의 양, 즉 에너지 잔여량을 확인하는 방법을 적용하였다. 먼저 각 탱크 내부에 사용 가능한 물이 가득 차 있다가 실의 부하 제거를 위해 탱크 내부의 물이 어느 정도 사용됐다고 가정한다. 이때 난방 탱크 내부의 잔여 에너지가 냉방 탱크 내부의 잔여 에너지보다 많다면 상대적으로 냉방 에너지를 많이 사용한 것이므로, 현재 냉방 부하가 난방 부하보다 크게 발생하는 것이다. 반대로 냉방 탱크 내부의 잔여 에너지가 난방 탱크 내부의 잔여 에너지보다 많다면 상대적으로 난방 에너지를 많이 사용한 것이므로, 현재 난방 부하가 냉방 부하보다 크게 발생함을 알 수 있다.

2.3 냉난방 설정 온도에 대한 고찰

현재 건물에서의 부하량을 파악했다면 설정 온도를 변경하여 부하량을 균등하게 만들어야 한다. 이때 온도를 임의로 변경할 경우 불쾌적인 환경이 조성될 수 있으므로, 먼저 건물 유형을 특정한 후에 해당하는 쾌적 온도 범위를 조사하였다. 본 논문에서 대표적으로 적용한 건물은 상시 냉방 부하가 발생하는 데이터센터와 겨울철 난방 부하가 발생하는 사무실이 같이 있는 건물이며, 온도의 범위는 건물 유형에 따라 변경될 수 있다.

냉방 실의 설정 온도는 ASHRAE에서 제안하는 데이터센터의 실내환경조건(ASHRAE, 2019)에 따라 건구온도 (18-27)°C를 만족하도록 설정하였다. 다음으로 난방 실의 설정 온도 범위는 사무실에서의 활동을 고려하였을 때 ASHRAE(2020)에서 제안하는 (18-24)°C를 만족하도록 설정하였다.

다음으로 온도가 급격히 달라지면 인체가 불쾌적을 느낄 수 있으므로 쾌적 범위 내에서 몇 °C의 단계를 두고 변경할 것인지 결정해야 한다. 온도의 단계는 표 1과 같이 ISO 7730(2005)에서 제안하는 여름철 일반적인 사무실에서의 열 쾌적 범위를 참고하여 설정하였다. 이는 세 가지 등급의 열 쾌적 범위를 규정하며 일반적인 쾌적 범위인 PMV ± 0.5를 만족하는 온도 단계는 3°C이므로 냉방 설정 온도 단계는 3°C로 설정하였다. 다만 Liu, et al.(2014)에 따르면 온도 상승 조건보다 온도 하강 조건에서 열적 체감의 변화가 더 크게 나타나며, 즉 인체는 따뜻한 것보다 차가운 것에 더 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. ISO 7730은 여름철 기준이므로 난방 설정 온도의 단계는 한 단계 위인 2°C로 설정하는 것이 적절하다고 판단하였다.

표 1. 실내 열환경 3등급 (ISO 7730)

Class	PMV range	Temperature range (°C)	PPD(%)
A	-0.2<PMV<+0.2	24.5±1	<6
B	-0.5<PMV<+0.5	24.5±1.5	<10
C	-0.7<PMV<+0.7	24.5±2.5	<15

2.4 부하보상제어의 수립 및 운영방안

부하보상제어는 크게 네 단계로 구분된다. 첫째, 이전 시점의 난방 설정 온도를 확인한다. 둘째, 탱크 내부의 잔여 에너지를 파악하여 냉난방 부하량을 확인한다. 셋째, 이전 시점의 냉방 설정 온도를 확인한다. 마지막으로 실의 설정 온도를 변경하는 순서로 운영되며 이는 그림 1과 같다.

만약 현재 건물에서 냉방 부하가 난방 부하보다 크다면, 난방 설정 온도를 한 단계 올려 난방 부하를 증가시킨다. 이때 이전 시점에 난방 설정 온도가 24°C로 난방 쾌적 범위 내의 최고 온도일 경우에는 더 이상 높일 수 없으므로, 냉방 에너지가 사용되는 속도를 늦추기 위해 냉방 설정 온도를 이전 시점보다 한 단계 높인다. 반대로 난방 부하가 냉방 부하보다 크다면, 냉방 설정 온도를 한 단계 낮춰 냉방 부하를 증가시킨다. 이때 이전 시점에 냉방 설정 온도가 18°C로 냉방 쾌적 범위 내의 최저 온도일 경우에는 더 이상 낮출 수 없으므로, 난방 에너지가 사용되는 속도를 늦추기 위해 난방 설정 온도를 이전 시점보다 한 단계 낮춘다. 만약 냉/난방 설정 온도가 모두 쾌적 범위 내의 최저/최고 온도이거나, 현재 냉난방 부하량이 동일하다면 현재의 설정 온도를 유지한다.

해당 제어 프로세스는 동시 냉난방 시스템의 사용량을 증가시키기 위해 냉방 탱크와 난방 탱크 내부의 잔여 에너지량을 균등하게 맞추는 것에 초점을 두었다. 또한 쾌적 범위를 만족할 수 있도록 탱크와 히트펌프의 용량이 이상적으로 설계됨을 가정하였다.

3. 방법론

대상 건물은 동시 냉난방 시스템 적용이 필요한 건물로, 본 논문에서는 데이터센터가 있는 사무실 건물을 대상으로 하였다. 시뮬레이션 기간은 냉방 부하와 난방 부하가 동시에 발생하는 1월을 기준으로 하였다. 구조물의 열관류율은 균산시를 기준으로 설정하였으며, 2004년부터 2018년까지의 평균 기후자료 데이터를 이용하였다(Rescources of free climate data, April 2023).

시뮬레이션 모델링은 위에서 제안한 제어 프로세스를 적용할 수 있는 에너지 흐름 시뮬레이션 분석 프로그램인 TRNSYS를 이용하였다. 기존의 일정온도제어 방법과 부하보상제어 방법의 두 가지를 모델링 하였다. 일정온도제어 방법은 에너지를 가장 적게 사용하는 온도로만 유지되며, 냉방은 27°C, 난방은 18°C이다. 부하보상제어 방법은 제어 프로세스에 따라 냉방은 (18-27)°C에서 3°C의 단계로, 난방은 (18-24)°C에서 2°C의 단계로 변경된다. 부하보상제어 방법이 적용된 동시 냉난방 시스템 모델링은 그림 2와 같다. 수열원을 사용하는 동시 냉난방 시스템과 공기열원을 사용하는 보조 냉난방 시스템이 공통적으로 설치되어 있으며, 냉난방 실의 설정 온도를 제어하는 제어 장치에만 차이가 있다.

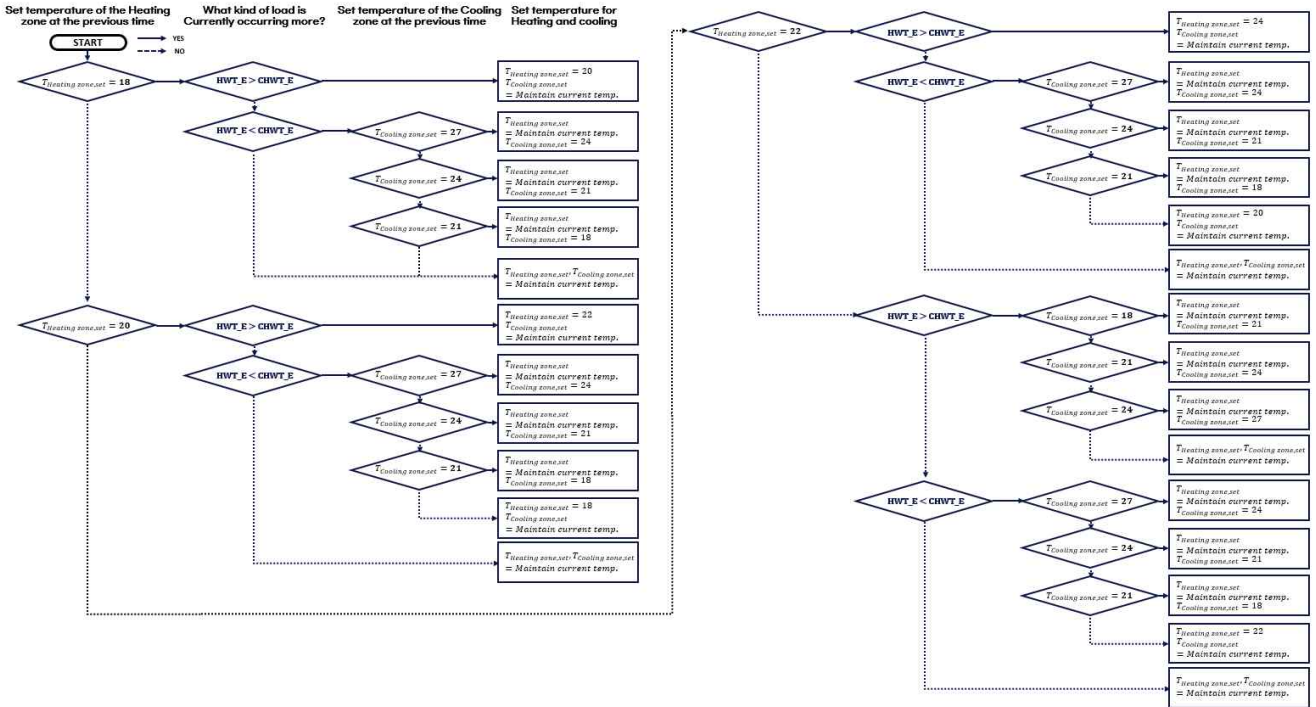


그림1. 부하보상제어 냉난방 온도 설정 프로세스 (flow-chart)

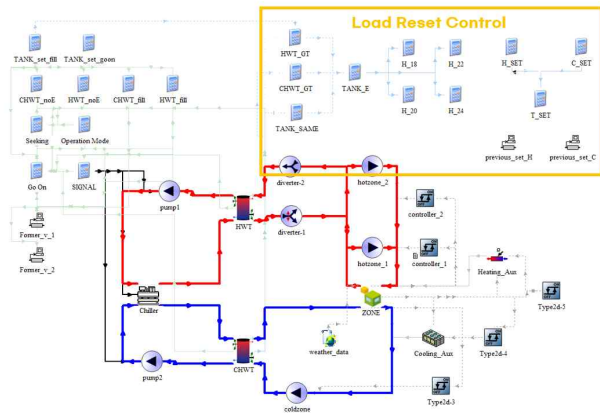


그림2. 부하보상제어 TRNSYS 모델링

4. 결과 및 분석

본 절에서는 동시 냉난방이 발생하는 건물에 대해 일정 온도로 제어되는 방법과 부하량에 따라 실시간으로 온도가 변경되는 방법을 적용하여 에너지 절감량 및 쾌적도를 분석하였다.

먼저 동시 냉난방 시스템과 보조 냉난방 시스템이 제거한 부하량 및 평균 COP를 확인했을 때 일정온도제어 방법은 표 2, 부하보상제어 방법은 표 3과 같다. 이론적으로 응축기 측의 COP가 증발기 측의 COP보다 약 1.0 높기 때문에 두 방법 모두 냉방 부하보다 많은 양의 난방 부하가 제거되었다. 또한 수열원을 사용하는 동시 냉난방 시스템의 평균 COP가 공기 열원을 사용하는 보조 냉난방 시스템

Table 2. 일정온도제어 방법의 부하 제거량 및 평균 COP

	Heating Load	Cooling Load	COP
SHC system	19,262 MJ	15,525 MJ	4.73
AUX system	263 MJ	5,733 MJ	3.58

Table 3. 부하보상제어 방법의 부하 제거량 및 평균 COP

	Heating Load	Cooling Load	COP
SHC system	20,111 MJ	15,742 MJ	4.75
AUX system	413 MJ	5,005 MJ	3.58

의 COP보다 높음을 확인할 수 있다. 일정온도제어 방법과 부하보상제어 방법을 비교하였을 때 동시 냉난방 시스템으로 제거된 냉난방 부하량이 소폭 증가하였으며, 보조 냉방 시스템으로 제거된 냉방 부하량이 소폭 감소하였다. 평균 COP에는 두 시스템 모두 큰 차이가 없음을 확인하였다.

다음으로 부하보상제어가 적용된 냉난방 실의 1월 한 달 동안의 실온 및 설정 온도는 그림 3과 같다. 그래프를 확인하였을 때, 각각 설정 온도의 최고/최저 온도가 아닌 중간 단계의 온도는(난방의 경우 20℃, 22℃, 냉방의 경우 21℃, 24℃) 유지되는 경우보다 최고/최저 온도로 변경하기 위한 단계로만 설정되었다고 판단된다. 일정온도제어 방법(without LRC)과 부하보상제어 방법(with LRC)의 냉난방 설정 온도 분포는 각각 표 4 및 표 5와 같다.

에너지 분석 결과 기존의 일정온도제어 방법에서 냉난방 부하 제거에 소요되는 총 에너지는 4,957MJ이고, 부하보상제어 방법에서 냉난방 부하 제거에 소요되는 총 에너지는 4,827MJ이다.

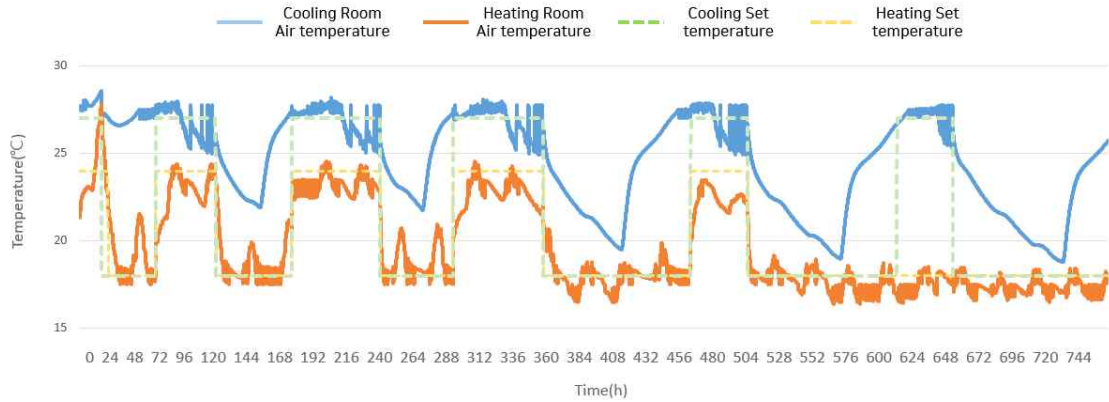


그림3. 부하보상제어가 적용된 냉난방 실의 공기 온도 및 설정 온도 변화

Table 4. 제어 방법별 난방 설정 온도 분포 (1월)

°C	without LRC				with LRC			
	18	20	22	24	18	20	22	24
%	100	0	0	0	68.2	0.1	0.1	31.6

Table 5. 제어 방법별 냉방 설정 온도 분포 (1월)

°C	without LRC				with LRC			
	18	21	24	27	18	21	24	27
%	0	0	0	100	63.7	0.2	0.2	36.0

부하보상제어 방법 적용 시 일정온도제어 방법에 비해 약 2.62%의 에너지를 절감할 수 있으면서도 난방의 경우 더 높은 온도, 냉방의 경우 더 낮은 온도를 유지할 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 냉난방 부하가 동시에 발생하는 건물의 에너지 절감을 위해 냉난방 부하량에 따라 실시간으로 냉난방 설정 온도를 변경할 수 있는 부하보상제어를 적용하여, 에너지 절감 및 쾌적성 향상을 확인하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 부하보상제어의 에너지 절감 및 쾌적성 향상을 확인하였다. 일정온도 제어 대비 2.62%의 에너지를 절감할 수 있고, 난방의 경우 더 높은 온도, 냉방의 경우 더 낮은 온도를 유지할 수 있었다.
- (2) 건물에 따른 탱크와 히트펌프의 적절한 용량이 설계된 다면 다양한 유형 및 크기의 건물에서도 부하보상제어 방법이 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 쾌적 범위를 만족할 수 있도록 이상적으로 설계되었기 때문에 추후 용량 산정에 대한 분석이 필요하다.
- (3) 해당 건물 기준으로 부하보상제어에서 제안하는 온도의 단계는 총 4단계였으나, 최고/최저 온도가 아닌 중간 단계의 온도는 유지되는 경우가 적게 발생했다. 이

는 추후 보완이 필요한 문제점으로 확인되며, 중간단계의 온도 분포가 늘어날 경우 에너지 절감률이 커질 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Shin, D. U., Leigh, T. H., Joe, G. S., Kim, M. G., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2015). Energy performance of balabced heat recovery systems with load-balancing, *Energy Procedia*, 78, 2445-2451.
2. 이유진. (2023). 동시 냉난방 시스템 적용 건물의 동계 에너지 절감을 위한 부하보상제어 방법 개발, 군산대학교학위논문
3. ASHRAE. (2019). ASHRAE Handbook Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA*.
4. ASHRAE. (2020). ASHRAE Standard Thermal environmental conditions for human occupancy. *ANSI/ASHRAE*, 55, 5.
5. ISO 7730 (2005). *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*
6. Liu, H., Liao, J., Yang, D., Du, X., Hu, P., Yang, Y., & Li, B. (2014). The response of human thermal perception and skin temperature to step-change transient thermal environments. *Building and environment*, 73, 232-238.
7. Repository of free climate data for building performance simulation [Website]. (2023, Apr 13), https://www.climate.onebuilding.org/WMO_Region_2_Asia/KOR_South_Korea/index.html
8. 이유진, 이석현, 신대욱. (2023). 동시 냉난방 시스템의 에너지 절감을 위한 실시간 냉난방 온도 설정 프로세스 개발, *대한건축학회 학술발표대회 논문집*