

건물부문 탄소중립을 위한 열 네트워크 기반 그리드 최적화 전략

Heat Network-based Grid Optimization Strategy for Carbon Neutrality in the Building Sector

오이태규* 정보경** 김정욱***
Lee, Tac-Kyu Jung, Bo-Kyung Kim, Jeong-Uk

Abstract

This study presents a strategy for achieving carbon neutrality in the building sector through a heat-sharing system under climate change scenarios. A multi-objective optimization model based on Mixed Integer Linear Programming(MILP) was developed to minimize energy costs, carbon emissions, and peak loads while maximizing self-sufficiency. Four climate scenarios (Current, RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) were simulated for both normal and extreme winter days over a 48-hour horizon. The results revealed that paradoxically, building operation costs decreased under warming scenarios due to the reduction in heating demand. For instance, in the RCP8.5 normal-day scenario, total costs decreased by 19.4% compared to the Current scenario, while self-sufficiency increased by 8.3%. Pareto frontier analysis demonstrated trade-offs between economic and environmental objectives, identifying a knee point around 8,900 kgCO₂ and 2,580 thousand KRW as the optimal balance. These findings confirm the effectiveness of heat-sharing systems in enhancing energy self-sufficiency and reducing peak loads under future climate conditions, offering important policy implications for carbon pricing, incentive design, and advanced building energy management systems(BEMS).

키워드 : 탄소중립, 기후변화, 수요관리, 열 공유, 최적화

Keywords : Carbon Neutrality, Climate Change, Demand-side Management, Heat Sharing, Optimization

1. 서론

1.1 연구의 배경

전 세계 통계에 의하면 건물에서 소비되는 최종에너지는 약 30%, 온실가스 배출은 약 26%를 차지한다. 건물 부문에서의 탄소중립 실현은 기후변화 대응의 핵심으로 인식되고 있다 [1]. 국제에너지기구(IEA)에 따르면 건물 부문의 2050년 탄소중립 목표 달성을 위해서는 2030년까지 에너지 집약도를 연평균 약 4% 감소시켜야 한다 [2]. 특히 도시화가 급속하게 진행되어 온 아시아 지역에서는 2050년까지 건물 에너지 수요가 두 배 이상 증가할 것으로 예상되어 탄소배출 감축을 위한 실질적인 관리 전략이 요구되고 있다 [3].

특히, 건물의 냉난방 에너지 수요를 적절히 관리하기 위한 방안 마련이 시급하다. 기후변화정부간협의체(IPCC)

제7차 평가보고서에 의하면 SSP2-4.5 시나리오 하에 2050년까지 건물 부문 냉방 수요는 65~95% 증가하고 난방 수요는 40~60% 감소할 것으로 상향 전망되었다 [4]. 과거 Isaac and van Vuuren(2009)의 연구 결과에서는 기후변화의 영향으로 급격한 건물 냉난방 수요 변화를 야기하고 그리드의 피크 부하를 증가시킬 것으로 예상되었다 [5]. Lee, TK and Kim, JU(2019)의 연구에서는 기후변화에 따른 냉방에너지 수요 증가에 대응하기 위해 적절한 공조설비 도입이 필요할 것으로 전망했다 [6].

최근 다른 시각에서는 냉방에너지 수요 증가뿐만 아니라 난방에너지 수요 변화에 대한 우려를 나타내는 경우가 있다. Sailor and Pavlova(2003)와 Van Hooff et al.(2016)의 연구와 같이 난방에너지 수요의 감소에도 불구하고 건물 내부의 과열 문제로 인한 에너지 시스템 효율 저하가 그 원인이다 [7,8]. 현대 건물은 높은 단열 성능과 기밀성으로 인해 내부발열이 충분한 난방원의 역할을 하지만 잉여 열이 활용되지 못하고 냉방부하로 작용하면서 에너지 낭비가 심화되고 있다. 특히, 상업용 건물은 내부발열의 밀도가 높아 겨울철에도 냉방이 필요한 경우가 있고 이때 발생하는 다량의 폐열이 방출되면서 에너지 낭비와 동시에 도시 열섬효과를 야기하고 있다. 최근 급증하고 있는 대규모 데이터센터의 발열은 이를 가중시키는 원인으로 작용할 수 있다.

건물에서의 열 부하는 전력망 운영에도 직접적인 영향을 준

* 에너지엑스 이노베이션그룹 선임연구원, 공학박사

** 에너지엑스 이노베이션그룹 대표, 공학박사

*** 상명대학교 전기공학과 교수, 공학박사

(Corresponding author : Department of Electrical Engineering, Sangmyung University, jukim@smu.ac.kr)

이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원에 의한 결과의 일부임.

과제번호: No. RS-2023-00217322

다. 상업용 건물이나 데이터센터에서 발생하는 높은 수준의 발열은 겨울철에도 냉방을 요구하며 전력망의 피크 수요를 가중시키고 예비력 확보에 부담이 될 수 있다. 특히, 피크 시간대에 운전되는 화석연료 발전기는 발전 단가가 높을 뿐만 아니라 탄소배출 강도가 높아 탄소중립 실현에 역행하는 조치일 수 있다.

1.2 연구의 목적

열 공유(Heat Sharing)는 건물 내부에서 발생하는 잉여 열을 처리할 수 있는 기술적 방안 중 하나다. 열 공유는 건물 내에서 발생하는 잉여 열을 회수하여 열 수요가 있는 다른 건물로 재분배하는 분산형 관리 기술이다. 열 공유 시스템의 원리는 엑서지(Exergy) 관점에서 열에너지의 질적 차이를 고려한 계층적 활용에 있다. 고온의 폐열은 직접 난방에 활용하고 중온의 폐열은 열펌프의 열원으로 활용하며 저온의 폐열은 예열 용도로 사용할 수 있도록 한다 [9].

열 공유의 개념은 기후변화로 인한 냉난방 수요 변화와 건물의 에너지 낭비 문제, 동시에 전력망의 피크 부하 관리와 탄소배출 저감에도 기여할 수 있다. 예로 데이터센터나 상업용 건물에서 발생하는 폐열은 일반적으로 외부로 방출되지만 에너지 소비 패턴이 다른 인근 주거용 또는 공공건물의 난방 또는 급탕 부하로 활용될 수 있다 [10]. 축열을 결합한 시스템의 경우 저부하 시간대 열을 저장하고 피크 시간대에 저장된 열을 활용하는 부하이동(Load Shifting)을 이행하여 수요 변동성을 완화할 수 있다 [11]. 재생에너지 사용 비중이 높은 시간대에 열 공유를 활용하여 탄소집약도가 높은 발전기의 운전을 줄임으로써 탄소배출을 저감하는 것도 가능하다 [12].

본 연구에서는 상기 열 공유의 효과를 근거로 적절한 열 공유 시스템을 도입하여 에너지 그리드의 탄소배출 저감과 계통의 안정성 및 피크 완화를 동시에 고려할 수 있는 운영 전략을 도출하기 위해 다목적 최적화를 수행하고 기후변화 시나리오 하 시스템 운영 효과를 분석하고자 한다.

2. 연구의 방법론

2.1 전체 프레임워크

본 연구의 프레임워크 적용대상은 서로 다른 용도를 갖는 건물들의 조합으로 구성된 건물군(Building Cluster)이다. 건물군은 데이터센터와 상업용 건물과 같은 잉여 열이 큰 건물과 주거 또는 공공건물과 같이 상대적으로 열 수요를 필요로 하는 건물을 포함한다. 건물군은 열 공급 측과 수요 측으로 구분하였으나 실제 열의 공급은 양방향성을 갖는 구조가 적절하다.

건물군은 에너지 그리드로부터 전기, 열을 공급받으며 필요한 경우 건물군 자체적으로 열원을 공급하는 열 네트워크를 갖는다. 열 네트워크는 지역 열원 축열조를 포함하고 있으며 열 공급원과 열 수급원의 브릿지 역할을 한다.

본 연구에서의 열 공유 시스템은 에너지 그리드를 통해 공급받는 에너지를 최소화하기 위해 잉여 열을 활용한 자체 수급을 우선하고 부족분을 그리드로부터 공급받는 구조로 가정하였다.

2.2 최적화 설계

본 연구에서 다루는 최적화 문제는 다목적 최적화 구조이며 에너지 비용 최소화, 탄소배출 최소화, 피크 완화(부하 평균화), 자급률 최대화 총 4가지의 목적함수를 동시에 고려하는 모델이다. 다목적 최적화 문제는 다음 수식 (1)과 같이 정의한다. 앞서 기술한 목적함수를 모두 고려하며 각 목적함수는 아래 수식 (2)-(5)를 따른다.

$$\min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 - Z_4 \quad (1)$$

수식 (2)의 Z_1 은 에너지 그리드로부터 구매하는 총 에너지 비용함수다. 각 시간대별 열에너지와 전력 구매 비용의 합으로 정의되며 시간대별 가격 변동을 반영한다. 여기서, 변수는 열에너지 구매 비용(P_t^h), 전력 구매 비용(P_t^e), 열에너지 사용량(g_t^h), 전력 사용량(g_t^e)으로 정의한다.

$$Z_1 = \sum_{t=1}^{24} (P_t^h \cdot g_t^h + P_t^e \cdot g_t^e) \quad (2)$$

수식 (3)은 각 에너지원의 사용에 따른 탄소배출에 따른 환경 비용함수이며 각 에너지원의 탄소배출 계수(α)와 탄소 가격(β)의 곱으로 환경 비용을 산출한다.

$$Z_2 = \beta \cdot \alpha \cdot \sum_{t=1}^{24} (g_t^h + g_t^e) \quad (3)$$

Z_3 는 전력망의 안정성 확보에 관한 목적함수이며 피크 부하의 완화를 목적으로 한다. Z_3 는 아래 수식 (4)와 같이 정의할 수 있다. 피크 페널티 가중치(γ)와 피크 허용 배수(λ)를 기준으로 최대 전력 사용량이 평균 사용량의 λ 배를 초과할 때 페널티를 부과하여 부하 평균화를 유도한다.

$$Z_3 = \gamma \cdot \max \left(0, \max_{t \in T} (g_t^e) - \lambda \cdot \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} g_t^e \right)^2 \quad (4)$$

수식 (5)의 Z_4 는 건물군의 열에너지 자급률에 관한 목적함수로 자체 열 수급에 대한 보상 가중치(δ)를 두어 자체 공급량(u_t)에 비례하여 자급률 향상을 유도한다.

$$Z_4 = \delta \cdot \sum_{t=1}^{24} u_t \quad (5)$$

본 최적화 모델의 제약은 크게 에너지 밸런스 제약, 축열조 운영 제약, 에너지 그리드 공급 제약으로 구분한다.

첫째, 에너지 균형 제약은 아래 수식 (6)-(8)과 같이 정의한다. 이 제약은 자체 열 공급량, 에너지 그리드의 열 공급량, 축열조 방열량(d_t) 합이 열에너지 수요(D_t)와 축열조의 축열량(c_t) 합과 같아야 함을 정의한 것이다. 방열 시의 운송 열 손실은 고려하지 않는다. 자체 열 공급량은 축열조의 용량을 고려하여 시간당 최대 수급량을 제한한다.

$$u_t + g_t^h + d_t = D_t + c_t, \forall t \in T \quad (6)$$

$$u_t \leq S_t, \forall t \in T \quad (7)$$

$$u_t \leq D_t, \forall t \in T \quad (8)$$

둘째, 축열조의 운영 제약은 다음 수식 (9)~(14)에서 정의한다. 축열조의 에너지 저장량 변화(s_t)는 축열과 방열의 효율($\eta_{ch,dis}$)을 고려하여 아래 수식 (9)와 같이 정의한다.

$$s_t = s_{t-1} + \eta_{ch} \cdot c_t - \frac{d_t}{\eta_{dis}}, \forall t \in T \quad (9)$$

축열조의 에너지 저장 상태 조건은 순환 조건을 적용하여 아래 수식 (10)을 따르며 물리적 용량 제한(C_{max})은 수식 (11)과 같다.

$$s_0 = s_{24} \quad (10)$$

$$0 \leq s_t \leq C_{max}, \forall t \in T \quad (11)$$

축열조의 축열과 방열 속도는 시간당 최대 축열량(R_{ch}^{max})과 시간당 최대 방열량(R_{dis}^{max}) 제약을 통해 제한되며 다음 수식 (12)와 (13)을 따른다.

$$0 \leq c_t \leq R_{ch}^{max}, \forall t \in T \quad (12)$$

$$0 \leq d_t \leq R_{dis}^{max}, \forall t \in T \quad (13)$$

동시 축열과 방열을 제한하기 위해 축열조의 축열량과 방열량의 합은 시간당 최대 축열/방열량을 넘을 수 없도록 정의한다. 이는 다음 수식 (14)를 따른다.

$$c_t + d_t \leq \max(R_{ch}^{max}, R_{dis}^{max}), \forall t \in T \quad (14)$$

셋째, 에너지 그리드 공급제약은 용량에 의해 제한되며 그리드의 에너지 공급량은 계통의 열 공급 한계량(G_h^{max})과 전력 공급 한계량(G_e^{max})을 넘어설 수 없도록 한다.

$$0 \leq g_t^h \leq G_h^{max}, \forall t \in T \quad (15)$$

$$0 \leq g_t^e \leq G_e^{max}, \forall t \in T \quad (16)$$

각 상태변수의 비음제약(Non-negative condition)은 다음 수식 (17)을 만족하도록 한다.

$$g_t^h, g_t^e, c_t, d_t, u_t, s_t \geq 0, \forall t \in T \quad (17)$$

3. 실험 설계

3.1 기후변화 시나리오 모델링

IPCC 대표농도경로(RCP) 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 건물 열수요 변화를 반영하였다 [13]. RCP2.6 시나리오에서는 정상일 1.2°C, 극한일 2.0°C의 외기온도 상승할 것으로 가정하였으며 RCP4.5 시나리오에서는 각각 2.5°C, 4.5°C로 상향 적용하였다. RCP8.5 시나리오에서는 정상일 4.5°C, 극한일 8.0°C 상승으로 극단적 온난화를 가정하였다.

건물별 외기온도 상승에 대한 민감도 계수는 용도별 특성을 고려하여 주거 건물은 정상일 0.75, 극한일 1.20, 사무용 건물은 정상일 0.45, 극한일 0.80으로 정의하였다.

열수요 산정은 난방도시(Degree Hour) 개념을 활용하였

으며 이는 외기온도와 기준온도의 차이를 기반으로 정의하였다.

3.2 에너지 설비 및 계통 조건

건물군 내 주요 에너지 설비는 축열조, 폐열회수 열펌프, 가스 열펌프, 전기히터, 지역난방, 태양광 발전으로 구성하였다. 축열조는 최대용량 2,000[kWh], 충/방전을 250[kWh/h]로 설정하였으며 충/방전 효율은 각각 0.88과 0.82를 적용하였다. 시간당 손실률은 0.8[%]로 가정하였다. 폐열회수 열펌프는 최대 1,200[kW] 용량과 COP 2.8을 적용하였다. 가스 열펌프는 최대 600[kW] 용량에 효율 95%를 적용하였고 전기히터는 400[kW] 용량과 95%의 효율을 갖는 보조열원으로 설정하였다. 지역난방은 최대 1,000[kW]의 공급 한계를 가지며 [14], 태양광 발전은 700[kW] 용량을 설치하여 시간대별 발전량을 자가소비 하는 구조로 구현하였다.

3.3 경제성 및 환경성 데이터

경제성 분석을 위해 시간대별 차등 전력요금을 적용하였다. 피크 시간대는 165 [KRW/kWh], 심야 시간대는 66 [KRW/kWh]로 설정하였다 [15]. 탄소집약도는 전력의 경우 0.35-0.52 [kgCO₂/kWh] 범위를 적용하여 시간대별 변동성을 고려하였으며 가스는 0.20 kgCO₂/kWh, 지역난방은 0.24 [kgCO₂/kWh]로 고정값을 사용하였다 [16]. 탄소가격은 40,000 [KRW/tCO₂]를 기준으로 ±50% 변동성을 반영하도록 정의하였다 [17].

4. 실험 결과

4.1 시나리오별 운영 결과

시나리오별 48시간 최적화 결과를 종합한 지표는 표 1에 정리하였다. 기후변화가 진행될수록 건물군의 총 운영비용은 뚜렷한 감소 추세를 보였으며 탄소배출량 또한 이에 비례하여 줄어들었다. 특히, 현재의 정상일 대비 RCP8.5 정상일에서는 총비용이 약 19% 절감되었고 극한일에서는 55% 수준의 비용 절감이 관찰되었다. 이러한 결과는 난방부하의 절대량이 크게 줄어든 데 기인하며 이는 기후변화가 단편적으로는 건물 에너지 비용 절감에 긍정적 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

자급률과 피크 저감률 역시 온난화 시나리오에서 개선되는 양상을 보였다. 특히 RCP8.5 정상일의 경우 자급률은 8.3%에 도달하였으며 피크 저감률은 25%로 나타났다. 이는 폐열회수 열펌프와 축열조가 상호보완적으로 운전하면서 열 수요의 상당 부분을 자급할 수 있었기 때문이다. 반면 극한일에서는 수요의 절대량이 커지면서 이러한 효과가 일부 상쇄되었으나 여전히 현재의 극한일 대비 개선 효과가 유지되었다. 결과적으로 기후변화는 건물군 에너지 시스템에서 비용 관리·탄소배출 관리·피크 수요관리 모두에 구조적 변화를 야기할 수 있을 것으로 예상된다.

4.2 열 수요 변화와 역설적 효과

그림 1과 그림 2는 각각 현재의 정상일과 RCP8.5 시나리오

하 정상일에서의 열 수급 특성을 나타낸다. 현재 정상일에서는 난방 수요가 크고 이에 따라 지역난방과 전기히터 의존도가 높게 나타났다. 축열조는 야간에 충전되지만 주간 방열 효과는 제한적이었으며 폐열회수 열펌프의 활용 비중도 상대적으로 낮았다. 반면 RCP8.5 정상일에서는 지역난방의 수급률은 여전히 높은 수준을 유지했지만 가스 히트펌프의 사용이 줄고 축열조의 기여도가 높아져 열 공유 효과가 강화되었다. 축열조는 전형적인 야간 충전-주간 방열 패턴을 보이며 자급률 향상에 기여하였다.

실험결과에 의하면 기후변화는 반드시 부정적 영향만을 주는 것이 아니라 특정 조건에서는 운영비용 절감이라는 역설적 효과(paradoxical effect)를 나타낼 수 있음을 확인하였다.

표 1. Performance under climate change scenarios

Scenario	Climate	Cost [KRW]	Self-Sufficiency [%]	Peak Reduction [%]
Current	Normal	2,077	6.8	19.0
	Extreme	7,814	3.6	4.9
RCP2.6	Normal	1,984	6.8	21.6
	Extreme	6,768	2.7	5.0
RCP4.5	Normal	1,870	7.2	24.1
	Extreme	5,347	2.4	6.0
RCP8.5	Normal	1,673	8.3	25.0
	Extreme	3,522	2.5	7.6

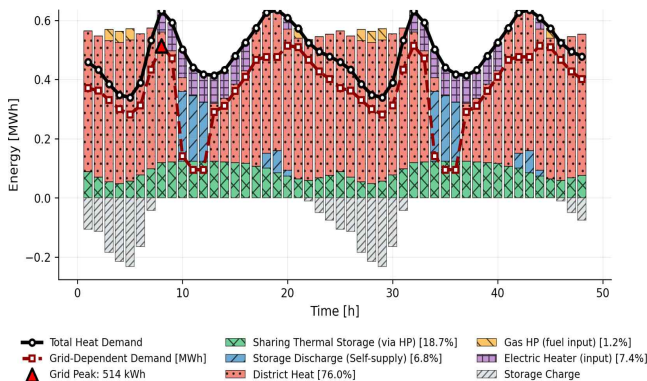


그림 1. Energy mix on a normal day under current climate

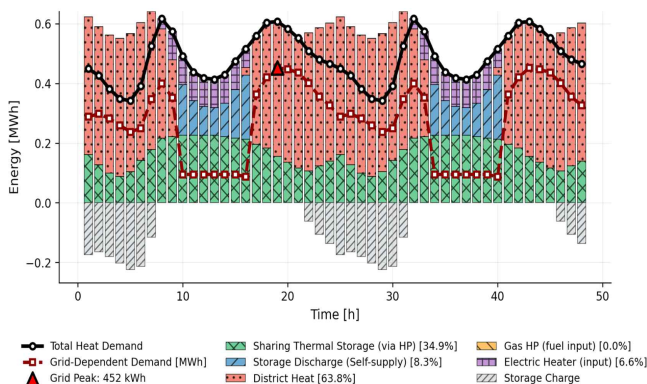


그림 2. Energy mix on a normal day under RCP8.5 scenario

5. 결론 및 시사점

본 연구는 기후변화 시나리오를 반영한 건물군 열 공유 시스템의 최적 운영 전략을 MILP 기반 다목적 최적화로 분석하였다. 기후변화가 진행될수록 난방부하가 완화되면서 총 운영비용과 탄소배출량이 절감되었으며 자급률과 피크 저감을 또한 온난화 시나리오에서 개선되는 양상을 보였다.

이러한 결과는 열 공유 기반의 수요자원 관리가 기후변화에 유효한 대응 전략임을 시사한다. 정책적으로는 실시간 폐열 모니터링과 예측형 축열 운영 등 탄소가격 신호와 연계한 열 네트워크 투자 지원이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구는 기초모델 기반 실험에 한정된 바 시뮬레이션 고도화와 실제 그리드 수준을 모방할 수 있는 규모의 연구가 필수적이며 실증방안 연구에 대한 후속과제로 남는다.

참고문헌

- [1] International Energy Agency, "Buildings - Energy System," IEA, 2024.
- [2] International Energy Agency, "Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector," IEA, 2021.
- [3] Asian Development Bank, "Asia's Journey to Prosperity: Policy, Market, and Technology Over 50 Years," ADB, 2020.
- [4] IPCC, "Climate Change 2023: Synthesis Report," Cambridge University Press, 2023.
- [5] Isaac & van Vuuren (2009), "Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change," Energy Policy, vol. 37, no. 2, pp. 507-521, 2009.
- [6] Lee, Tae-Kyu, & Kim, Jeong-Uk (2019). A Study on the Analysis of Changing Building Energy Demand and Countermeasures according to the Climate in the Future. Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 13(6), 456-472.
- [7] Sailor, D.J., & Pavlova, A.A., "Air conditioning market saturation and long-term response of residential cooling energy demand to climate change," Energy, vol. 28, no. 9, pp. 941-951, 2003.
- [8] Van Hooff, T., et al., "On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings," Building and Environment, vol. 99, pp. 92-105, 2016.
- [9] Wang, X., Jin, M., Feng, W., Shu, G., Tian, H., & Liang, Y. (2018). Cascade energy optimization for waste heat recovery in distributed energy systems. Applied Energy, 230, 679-695.
- [10] Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 504-522.
- [11] Strbac, G. (2008). Demand side management: Benefits and challenges. Energy Policy, 36(12), 4419-4426.
- [12] Siler-Evans, K., Azevedo, I. L., Morgan, M. G., & Apt, J. (2012). Marginal emissions factors for the U.S. electricity system. Environmental Science & Technology, 46(9), 4742-4748.
- [13] IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report, Cambridge Univ. Press, 2023.
- [14] Lund, H., Østergaard, P. A., Chang, M., et al., "The status of 4th generation district heating: Research and results," Energy, 164, pp. 147-159, 2018.
- [15] KEPCO, Electricity Tariff System in Korea, Korea Electric Power Corporation, 2022.
- [16] Ministry of Environment, National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 2023.
- [17] World Bank, State and Trends of Carbon Pricing 2023, Washington D.C., 2023.