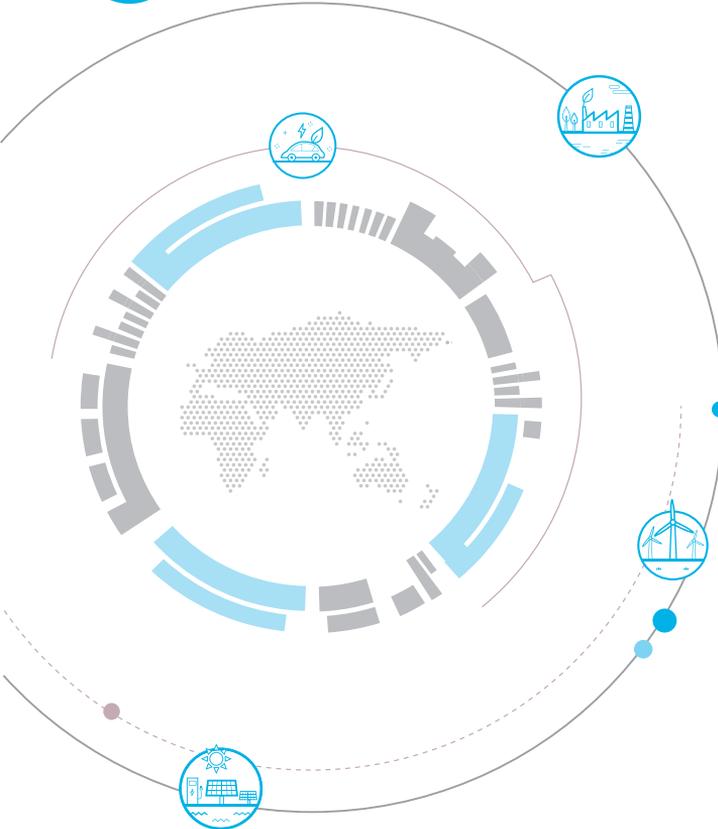


기본연구
22-12



KOREA ENERGY ECONOMICS INSTITUTE

• 김재엽·김현제

지열냉난방 시스템 보급을 통한 환경편익 개선효과 분석

지열냉난방 시스템 보급을 통한 환경편익 개선효과 분석

An Analysis on the Improvement Effect of Environmental Benefit
from the Promotion of Geothermal Air-conditioning and
Heating System in Korea

김재엽·김현제



에너지경제연구원
Korea Energy Economics Institute

저 자 김재엽, 김현제

연 구 진

연구책임자 김재엽(에너지경제연구원 부연구위원)
김현제(에너지경제연구원 선임연구위원)

연구참여자 박정순(에너지경제연구원 명예선임연구위원)

목 차

요약 ix

제1장 서론 1

제2장 지열냉난방 시스템 운영원리 및 기술 현황 5

- 1. 집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템 운영원리 6
 - 1.1. 지열냉난방 시스템 작동 기제 6
 - 1.2. 지열냉난방 시스템에 적용된 히트펌프 작동 원리 8
- 2. 국내외 지열냉난방 시스템 기술 동향 9
 - 2.1. 국내 건물 부문 지열냉난방 관련 정책 및 기술개발 현황 9
 - 2.2. 해외 지열냉난방 관련 기술개발 현황 14
- 3. 소결 16

제3장 국내외 지열냉난방 시장 동향 및
해외 주요국 지열냉난방 이용 사례 17

- 1. 국내외 지열냉난방 시장 동향 17
 - 1.1. 해외 지열냉난방 시장 동향 17
 - 1.2. 국내 지열냉난방 시장 동향 20
- 2. 해외 주요국 지열냉난방 이용 사례 23
 - 2.1. 미국 지열냉난방 이용 사례 23
 - 2.2. 프랑스 지열냉난방 이용 사례 26
- 3. 소결 28

제4장 국내 지열냉난방 시스템 경제성 평가 31

- 1. 지열냉난방 시스템 경제성 분석을 위한 기초정보 32
 - 1.1. 냉난방 방식별 초기투자비용(Capital Cost) 32

1.2. 냉난방 방식별 유지관리비용(O&M Cost)	37
1.3. 지열냉난방 시스템 실측 기반 에너지산출량	38
1.4. 냉난방 방식별 에너지 비용	40
2. 냉난방 시스템 경제성 분석 방법론	48
2.1. 냉난방 시스템 경제성 분석의 주요 방법론 소개	48
2.2. 생애주기비용(Life Cycle Cost) 분석 방법론	50
3. 냉난방 방식별 경제성 분석 결과	51
3.1. 경제성 분석 공통 전제	51
3.2. 지열냉난방 시스템 비용 현금흐름	54
3.3. 전통냉난방 시스템 비용 현금흐름	60
3.4. 냉난방 방식별 경제성 분석 결과 비교	65
4. 소결	73

제5장 국내 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익 분석 77

1. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 설계	78
1.1. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 설계 시 주요 검토 사항	78
1.2. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 구성	83
2. 지열냉난방 시스템 보급에 따른 온실가스 배출량 변화 분석	86
2.1. 온실가스 직접 배출량 분석	86
2.2. 온실가스 간접 배출량 분석	87
3. 소결 - 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익 평가	95

제6장 국내 지열냉난방 시스템 보급을 위한 정책제언 99

1. 지열냉난방 시스템 경제성 측면	101
1.1. 에너지비용 절감 효과의 지속가능성	101
1.2. 지열냉난방 시스템 구축의 비용 부담과 편익 향유	104
1.3. 냉난방 시스템 경제성 비교를 위한 정보 공유의 필요성	105

2. 지열냉난방 시스템 환경성 측면	106
2.1. 건물 부문 온실가스 직접감축 효과의 확대	106
2.2. 발전 부문 온실가스 배출량 증가 대응	107
제7장 결론	109
<hr/>	
1. 주요 결론 및 시사점	109
2. 한계점 및 향후 과제	113
참고문헌	115
<hr/>	

표 목차

〈표 2-1〉 국내 지열 부문 연구개발 과제 현황 정리	13
〈표 3-1〉 전세계 지열에너지 이용 설비용량 및 직접이용량 변화	18
〈표 3-2〉 전세계 지열에너지 직접이용 종류별 설비용량	18
〈표 3-3〉 전세계 지열에너지 이용형태별 직접이용량	19
〈표 3-4〉 2019년 기준 지열에너지 직접이용 국가별 현황	20
〈표 3-5〉 국내 공공 건물 신재생에너지 설치 의무화에 따른 지열설비 시공 계획	21
〈표 3-6〉 우리나라의 지열에너지 직접이용 현황	22
〈표 3-7〉 미국 내 지열 지역난방 시스템 순용량 및 연간 지열에너지 이용량	23
〈표 3-8〉 미국 내 지열 지역난방 시스템 초기 자본비용 및 보조금 비율	24
〈표 4-1〉 수주지열정 지열냉난방 시스템 초기투자비용	34
〈표 4-2〉 국내 주요 가스보일러 제조사별 시장점유율 및 가스보일러 단가	35
〈표 4-3〉 전통냉난방 시스템 초기투자비용	37
〈표 4-4〉 냉난방 방식별 연간 유지관리비용 정보 요약	38
〈표 4-5〉 2021년 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 에너지 산출량 실적	39
〈표 4-6〉 부산 감전동 아파트 월별 냉난방부하	40
〈표 4-7〉 한전 ‘심야전력 을(Ⅱ)’ 전기요금표 (2022.4.1. 기준)	42
〈표 4-8〉 한전 주택용 전력(고압) 전기요금표 (2022.4.1. 기준)	43
〈표 4-9〉 국내 주요 가스보일러 열효율 실적	43
〈표 4-10〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 월별 전력소비 세부 분류	44
〈표 4-11〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 에너지비용 (전기요금) 산정	45
〈표 4-12〉 전통냉난방 시스템 적용 시 에너지비용 산정	46

〈표 4-13〉 지열냉난방 시스템의 경제성 분석 선행연구 방법론 및 주요결과 요약	49
〈표 4-14〉 2011~2021년 주택난방용 도시가스 소매요금 및 한전 구입전력비 변화	53
〈표 4-15〉 한전 ‘심야전력 을(II)’ 전기요금 변화	53
〈표 4-16〉 한전 주택용 전력(고압) 전기요금 변화	54
〈표 4-17〉 주택난방용 도시가스 소매요금 변화	54
〈표 4-18〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (기준 에너지가격)	55
〈표 4-19〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 상향)	57
〈표 4-20〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 하향)	59
〈표 4-21〉 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (기준 에너지가격)	60
〈표 4-22〉 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 상향)	62
〈표 4-23〉 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 하향)	64
〈표 4-24〉 냉난방 시스템 간 초기투자비용 비교 (NPV 기준)	65
〈표 4-25〉 냉난방 시스템 간 유지관리비용 및 설비교체비용 비교 (NPV 기준)	66
〈표 4-26〉 에너지가격 전제에 따른 냉난방 시스템별 에너지비용 비교	66
〈표 4-27〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교 (NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)	68
〈표 4-28〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교 (NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)	70
〈표 4-29〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교 (NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)	72

〈표 5-1〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방의 전통냉난방 대비 에너지소비 변화	79
〈표 5-2〉 2030 NDC 상향안과 제10차 수급계획 총괄분과위 2030년 전원구성 목표	81
〈표 5-3〉 국민의힘 윤석열 대통령 후보 공약집 주택공급 정책 정리	82
〈표 5-4〉 국민 주거안정 실현방안 - 연간 주택보급량 및 보급 추정치	82
〈표 5-5〉 2030년 지열냉난방 시스템 우선보급 대상 추정	83
〈표 5-6〉 국내 지열냉난방 시스템 보급 환경 시나리오 구조	85
〈표 5-7〉 2030년 지열냉난방 시스템 도입 시 감축 가능한 온실가스 직접 배출량	87
〈표 5-8〉 M-Core SUDP 5단계 알고리즘 요약	88
〈표 5-9〉 M-Core 전력계통 모의 DB의 기준 열량단가	91
〈표 5-10〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급에 따른 전력소비 증가	93
〈표 5-11〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급 시나리오별 발전믹스	94
〈표 5-12〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급 시 발전원별 온실가스 배출량 변화	95
〈표 5-13〉 2030년 지열냉난방 보급 시나리오별 온실가스 배출 순 변화	97
〈표 6-1〉 2018~2022년 9월 주택난방용 도시가스 소매요금 전국 평균값	102

그림 목차

[그림 1-1] 연구 흐름도	3
[그림 2-1] 지열냉난방 시스템 작동 원리 개념도 (개방형 vs. 밀폐형)	7
[그림 2-2] 지열냉난방 시스템 작동 원리 개념도 (여름철 vs. 겨울철)	7
[그림 2-3] 히트펌프 구성요소별 작동원리 도식화	8
[그림 2-4] 국내 제로에너지건물 효율등급 달성 목표	10
[그림 2-5] 신재생에너지 기술 지열 부문 국내 연구개발 과제 수 변화	11
[그림 2-6] 신재생에너지 기술 지열 부문 국내 연구개발비 변화	12
[그림 2-7] 뮌헨 Molasse 퇴적물 분지 GRAME 프로젝트의 구조	14
[그림 2-8] 스위스 취리히 FGZ 프로젝트의 지열 지역냉난방 공급 시스템	15
[그림 3-1] 2006~2019년 국내 지열원 히트펌프 설비 보급 추이	21
[그림 3-2] 프랑스 EHPAD 시설 전경 및 지열냉난방 설비	27
[그림 3-3] 프랑스 Westhoffen 단독주택 전경 및 지열 탐침 시추작업	28
[그림 4-1] 냉방철(5~9월) 전력소비량 및 비용 차이 (지열 vs. 전통)	47
[그림 4-2] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)	67
[그림 4-3] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)	69
[그림 4-4] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)	71
[그림 4-5] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ① (NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)	73
[그림 4-6] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ② (NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)	74
[그림 4-7] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ③ (NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)	74

[그림 5-1] M-Core 최적화 시뮬레이션 관계도	89
[그림 5-2] SUDP 알고리즘 수행 과정	90
[그림 5-3] 2030년 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따른 온실가스 배출 순 변화	97

요약

1. 연구의 필요성 및 목적

■ 연구의 필요성

- 정부는 기후변화협약 등 에너지 관련 주변 여건의 변화에 대응하기 위해 환경친화적 신재생에너지의 보급을 확대하는 정책을 추진 중
- 그러나 실제 지열에너지를 활용하는 사업은 정체 또는 축소되고 있는 상황
 - 2050 탄소중립 달성 과정에서 태양광과 풍력 외 지열에너지 활성화를 위한 방안 검토 필요
- 최근 이상기후로 우리나라는 여름철 냉방전력 소비가 크게 상승하고 변동성 역시 확대되고 있으며, 난방열 에너지는 완만한 상승세
 - 겨울철 난방용 에너지사용이 증가하면 도시가스 및 석유제품 소비 증가에 따른 환경피해액도 점증할 것으로 전망

■ 연구의 목적

- 본 연구는 건물에 적용 가능한 지열에너지 냉난방시스템의 활성화를 위한 정책 방향을 제시함으로써 탄소중립에 기여할 수 있는 재생에너지원 활용의 다양성 제고에 기여
 - 구체적으로는 지열냉난방시스템의 경제성 분석과 에너지 소비량 분석을 통해 활용 가능한 신재생에너지자원으로서의 타당성을 평가하고,

- 건물 특히 집단주거시설(아파트)에 적용 가능한 지열냉난방시스템의 보급과 활성화를 위한 정책 방향을 제시하는 한편,
- 지열냉난방시스템의 에너지 절감량(전력 및 가스 등)을 추정하여 온실가스 및 오염물질 배출량 저감의 구체적 수준을 파악

2. 연구내용 및 주요 분석 결과

■ 경제성 분석 결과

- 국내 집단 주거시설(아파트)에 대한 지열냉난방 시스템(급탕 제외) 운영의 경제성은 에너지가격 수준에 따라 다소 차이는 있지만 상대적으로 높은 에너지가격 체계에서 최소 20년차 이후, 그보다 낮은 에너지가격 수준에서는 최소 26년차 이후부터 전통냉난방(도시가스 보일러 + 에어컨) 시스템 대비 비용 우위 발생
 - 30년 운영기간 동안 총 0.1~2.1억 원의 편익(NPV 기준)이 발생해 지열냉난방 초기투자비용(약 21억 원) 대비 수익률은 10% 이하로 매우 낮으며, 경제성이 없다고 보아도 무방
 - (기준 에너지가격) 2022년 상당 기간 유지된 2022년 4월 가격을 기준 에너지가격으로 설정
 - (에너지가격 상향) 러-우크라이나 사태에 따라 유가 급등효과가 더 반영된 2022년 10월 에너지가격을 '상향가격'으로 반영
 - (에너지가격 하향) 2011~2021년 기간 동안 최저 수준의 주택난방용 도시가스 소매가격 및 구매전력비를 기록한 2020년의 에너지가격을 반영 → 2021년 1월 에너지가격을 '하향가격'으로 반영
- 지열냉난방은 초기투자비용 등 고정비 측면에서 고비용 냉난방 방식이며, 이를 전통냉난방에 대비 에너지비용(변동비) 절감분으로 일부 상쇄 가능하지만 가구 냉난방 부문에서 전통냉난방에 대해 선행연구 수준(운영 후 10년차)의 경제성을 확보하는 것은 무리

- 조성한김현재(2019) 등 선행연구의 방법론에 기반하여 지열냉난방 시스템을 적용한 가구(세대)와 동일한 냉난방 부하량 및 부하패턴을 전통냉난방으로 충족시켰을 때의 에너지비용 비교
 - 분석 대상 지열냉난방 시스템은 난방시기(1~4월, 10~12월)에 송풍(공기순환) 수준의 냉방 제공
 - 축열조와 히트펌프를 사용하는 본 연구의 지열냉난방 시스템은 선택공급약관에 따라 심야 전기요금제를 적용 → 지열냉난방의 에너지비용이 주택용 전기요금과 가스요금을 적용받는 전통냉난방의 에너지비용보다 저렴
 - 그러나 30년 설비 운영에 대해 최근 고유가 충격을 반영한 2022년 10월 에너지 가격을 적용하더라도 가구별 냉난방에 있어 선행연구 수준 이상의 유의미한 경제성 확보(운영 후 10년차 이내 전통냉난방 대비 총 비용 경쟁력 확보)는 불가능할 것으로 추정
- 주거안정 등 공공성을 바탕으로 한 정책적 보급 대상인 국민임대주택 등을 대상으로 지열냉난방 시스템을 우선적으로 공급 필요
- 에너지비용 절감 편익은 기본적으로 지열냉난방 최종 소비자인 입주자 및 세입자에게 귀속되므로 건설사 입장에서 초기투자비용 부담에 대한 경감 없이 지열냉난방 사업 추진은 쉽지 않은 상황
 - 따라서 국민 주거안정이라는 정책 명분을 바탕으로 정책자금 지원이 상대적으로 용이한 국민 임대아파트에 대해 지열냉난방 시스템을 우선적으로 보급하는 상황을 고려

■ 환경편익 분석 결과 (2030년 임대주택 220만 호 대상)

- 난방기간 주택난방용 도시가스 소비를 지열난방이 완전히 대체함으로써 건물 부문 온실가스 직접 배출량 감소
- 지열냉난방 시스템은 전통냉난방 시스템과 달리 지열에너지와 전기 히트펌프를 이용해 냉난방 수요를 충족
 - 지하수 열원+냉난방기 히트펌프 이용에 따른 전력소비 발생

- 전통냉난방 방식 대비 증가한 전력소비는 발전 부문의 온실가스 배출량 증가로 이어지며, 이는 지열냉난방 시스템의 간접 온실가스 배출량에 해당
- 분석대상 아파트(277세대)의 가구 냉난방에 대해 지열냉난방 적용 시 전통냉난방 대비 연간 전력소비는 약 86,695kWh 증가
 - 냉방철(5~9월)은 에어컨 대비 에너지(전력)소비효율이 높아 동일한 냉방 부하에 대해 약 1,037kWh의 전력소비 절감
 - 난방철(1~4월, 10~12월)은 도시가스 소비를 전력으로 전면 대체하면서 연간 약 87,732kWh의 전력소비가 신규 발생
- 신정부 주택보급 정책 등을 바탕으로 2030년 임대주택 보급량(220만 호) 추산
 - 2030년 신축 임대주택 추정치에 대해 지열냉난방을 보급한 수준에 따라 2030년 건물 부문 온실가스 직접 배출량은 58,870~588,697CO₂ton 감소
- 지열냉난방 시스템 보급으로 2030년 발전 부문에 대해 온실가스 간접 배출량은 지열냉난방 보급 환경에 따라 25,676~263,455CO₂ton 증가
 - 지열냉난방 시스템을 임대주택 220만 호에 단계적으로 적용했을 때 사회 전체적으로 발생하는 온실가스 순(純) 변화량은 33,194~325,241CO₂ton 감소

< 2030년 지열냉난방 보급 시나리오별 온실가스 배출 순 변화 >

(단위: CO₂ton)

시나리오	지열냉난방 보급률	발전단			소비단	온실가스 배출 순 변화량 (e)
		석탄 (a)	LNG (b)	유류 (c)	가스난방 (d)	
Red	10%	8,139	17,536	0.7	-58,870	-33,194
	20%	16,325	34,255	0.7	-117,739	-67,159
Yellow	30%	20,940	53,035	0.7	-176,609	-102,634
	40%	23,056	71,177	0.7	-235,479	-141,245
Green	100%	91,337	172,117	1.8	-588,697	-325,241

주: CO₂ 순 변화량(e) = (a) + (b) + (c) + (d)
 자료: 저자 직접 작성

- 신승진·허성호·박지영(2021) 등 선행연구에 따르면 2001~2019년 평균 연료 사용량을 기준으로 측정된 1톤 이하 용달 차량의 연간 온실가스 배출량은 약 18.09CO₂ton 수준이므로,

- 지열냉난방 시스템 도입에 따른 순 온실가스 감축량 최소 추정치인 33,194 CO₂ton은 1톤 이하 용달차량 1,835대의 연간 온실가스 배출량에 해당
- CO₂ 감소량(직접 배출 감소) 대비 증가량(간접 배출 증가) 비율은 약 2:1

3. 결론 및 정책제언

■ 결론

- 국내 지열냉난방 실제 운영 사례를 토대로 경제성 분석을 진행한 결과 에너지 가격이 특별히 높게 유지되지 않는 한, 국내 지열냉난방 시스템은 가구 냉난방에 있어 설비 운영 26년차 이후부터 전통냉난방 대비 미약한 경제성 확보
 - 따라서 건설사 입장에서는 전통냉난방 대신 지열냉난방을 도입할 경제적 인센티브가 없는 것이 현실
 - 다만 미국 각 주에서는 지열난방 사업에 대해 보조금을 지급하면서까지 건물 탈탄소화의 방안으로 지열 이용 가능성을 연구하고 있으며, 유럽에서도 천부 지열원을 이용한 대규모 지역난방 프로젝트를 추진 중
 - 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방은 건물 부문 탄소중립을 이행하는 몇 안 되는 대안인 점을 감안할 때, 경제성 논리만으로 관련 기술개발과 설비보급을 중단하기보다 탄소중립 이행에 기여하는 환경편익 측면에서 정책 지원 근거를 찾을 필요성 존재
- 환경편익 분석 결과 220만 호 임대주택에 대해 주택난방용 도시가스 소비를 지열에너지+전력으로 대체하면서 2030년 건물 부문 온실가스 직접 배출량은 58,870~588,697CO₂ton 감소
 - 지열원 히트펌프 난방으로의 대체 등에 따른 전력소비 증가량이 발전 부문 온실가스 배출량에 미친 영향은 25,676~263,455CO₂ton 증가
 - 온실가스 직접 배출 감소량을 간접 배출 증가량으로 상쇄해 사회 전체적인 온실가스 변화량은 △33,194~325,241CO₂ton이므로 환경성 측면에서 지열 냉난방은 긍정적 시스템이며 건물 부문 탈탄소화에 명확히 기여

■ 정책제언

- 정책적 차원에서 지열냉난방 시스템 주요 기술 및 부품(지열공, 히트펌프 등)에 대한 R&D 지원 필요
 - 에너지비용 절감 편익은 에너지가격 수준에 따라 크게 변동하므로, 이에 의존한 경제성 개선은 항구적 경제성 개선으로 보기 어려움
 - 정부의 R&D 지원 확대의 동력을 확보하기 위해 국내 지열이용에 대한 주민 수용성 제고를 위한 노력 필요
- 설비보조금 지원 등을 통한 건설사의 초기투자비용 및 운영유지비 부담 완화
 - 지열냉난방 시스템 구축의 비용 부담 주체와 편익 향유 주체가 상이
 - 초기투자비용 등은 건설사업자 부담, 에너지비용 편익은 최종 소비자(입주자 및 세입자)가 향유 → 탄소중립 이행이라는 정책목표 달성을 위한 지열냉난방 보급에 또 다른 장애요소
 - 현재 기술 수준과 비용 구조에서 지열냉난방 사업 자체는 전통냉난방 대비 경제성 확보가 어려우므로 비용 부담 주체와 편익 향유 주체가 다른 점에 착안한 재정적 인센티브(보조금 등) 제공 필요 → 건물 부문 탄소중립 정책목표 달성을 위한 지열냉난방 시스템 보급을 유도
- 지열냉난방 연구 목적으로 시스템 실증 및 운영 정보 공유를 위한 플랫폼 운영
 - 최소한 에너지 부문 전문가들에게는 지열냉난방 프로젝트와 관련된 세부 투자비, 기술 정보, 에너지소비 데이터 등을 공유 필요
- 지열냉난방 보급 범위 확대(임대→민간)를 유도하기 위한 세제혜택 및 정책 인센티브 설계 필요
 - 임대 건물에 대해서만 보급을 한정하면 지열냉난방 환경편익 확대도 제한적이므로 민간 건물에 대한 지열냉난방 확대를 위한 정책지원 필요
- 지열냉난방 확대에 따른 발전 부문 온실가스 배출 비용 증가분을 최종 소비자(입주자 및 세입자)에 전가 → 지열냉난방의 전력소비 절감을 유도
 - 발전 부문 온실가스 배출 비용의 소비자 전가 경로를 강화한다면 지열냉난방 전력소비 절감과 발전량 감축을 통한 발전 부문 온실가스 배출을 감축 가능

제1장

서론

탄소중립이 글로벌 에너지 이슈를 선점한 이래, 우리나라도 사회 각 부문의 탈탄소 목표를 구체화하고 있다. 아울러 그러한 목표를 달성하기 위한 다양한 전략이 전문가들 사이에서 백가쟁명 식으로 흘러나오는 상황이다. 이 중 건물 부문의 탈탄소화도 국가 온실가스 감축목표(NDC) 달성에 한 축을 담당하고 있는데, 건물 냉난방으로부터 배출되는 온실가스를 감축하는 것은 건물 부문 온실가스 배출 목표 달성에 중요한 역할을 할 것으로 평가된다.

화석연료 기반의 건물난방은 반드시 온실가스를 배출한다. 따라서 난방연료 소비에서 발생하는 온실가스를 제로화 하는 전략이 필요하며, 여기서 ‘난방의 전력화’라는 표현이 등장하게 되었다. 즉 가스 난방을 신재생에너지 등 무탄소 전원 기반의 전기 난방으로 대체 시 난방용 도시가스 등의 소비가 발생하지 않을 것이므로 건물 부문에서의 직접적인 온실가스 배출량이 감소한다. 한편 건물 냉방의 경우 에어컨의 전력소비에 따라 발전 부문에서 온실가스가 간접적으로 배출된다.

결국 가스난방과 에어컨(전기냉방기¹⁾)을 사용하는 세대는 냉난방 과정에서 온실가스를 지속적으로 배출할 수밖에 없으며, 신재생에너지를 이용한 난방의 전력화를 달성할 경우 난방용 도시가스 소비는 크게 감소할 것이다. 또한 신재생에너지를 이

1) 한국에너지공단 효율등급제도 홈페이지의 에너지소비효율등급 표시제도 신고제품 분류체계 상 전기냉방기에 해당한다(https://eep.energy.or.kr/certification/certi_intro.aspx, 접속일자: 2022.10.15).

용한 난방 시스템이 널리 확산된다면 에어컨 전력소비 증가에 따른 발전 부문에서의 간접적인 온실가스 배출 문제로부터도 보다 자유로워질 수 있을 것이다. 그러나 우리는 신재생에너지 기반의 난방 전력화가 과연 온실가스 감축에 순효과만 발생시킬 것인지에 대해 합리적 의문을 가져 볼 필요가 있다.

난방의 전력화는 히트펌프나 전기보일러 등을 이용해 원하는 온도를 달성하게 되는데 전기는 가스보다 열량이 떨어진다²⁾. 따라서 동일한 온도 달성에 난방용 도시가스 대비 더 많은 열량의 전기가 투입되어야 한다. 이렇게 되면 도시가스 난방 시 발생하지 않았던 전력소비가 크게 늘어나게 되고, 이는 발전 부문의 온실가스 배출량 증가로 이어질 것이다. 즉 난방의 전력화는 건물 난방 부문에서 직접적인 온실가스 배출 감소를 유발하겠지만 발전 부문에서는 온실가스 배출량 증가를 간접적으로 일으키는 셈이다.

본 연구의 지열난방 시스템은 지열원(상온 지하수)과 히트펌프를 결합해 건물을 난방한다. 히트펌프를 단독으로 이용하는 것과 달리 지열원을 결합하고 있어 난방 온도 조절 폭을 상대적으로 작게 하면서도 원하는 온도를 달성할 수 있다는 측면에서 난방 효율이 높다. 이러한 방식은 난방 전력화의 한 종류로 분류할 수 있겠으나, 신재생에너지원인 지열을 히트펌프와 결합하였으므로 화석연료로 생산된 전력만을 소비하는 난방 방식 대비 환경성이나 에너지효율 측면에 차이가 존재한다. 아울러 난방 측면에서도 지열원을 이용해 여름철 목표 냉각온도까지 빠르게 도달할 수 있으므로³⁾ 상온의 공기를 목표온도까지 냉각하는 에어컨보다 히트펌프 전력소비가 적다. 따라서 지열난방 시스템은 난방 모두에서 건물 부문 온실가스 배출을 직간접적으로 감소시킬 수 있는 ‘친환경 난방 시스템’으로 볼 수 있다.

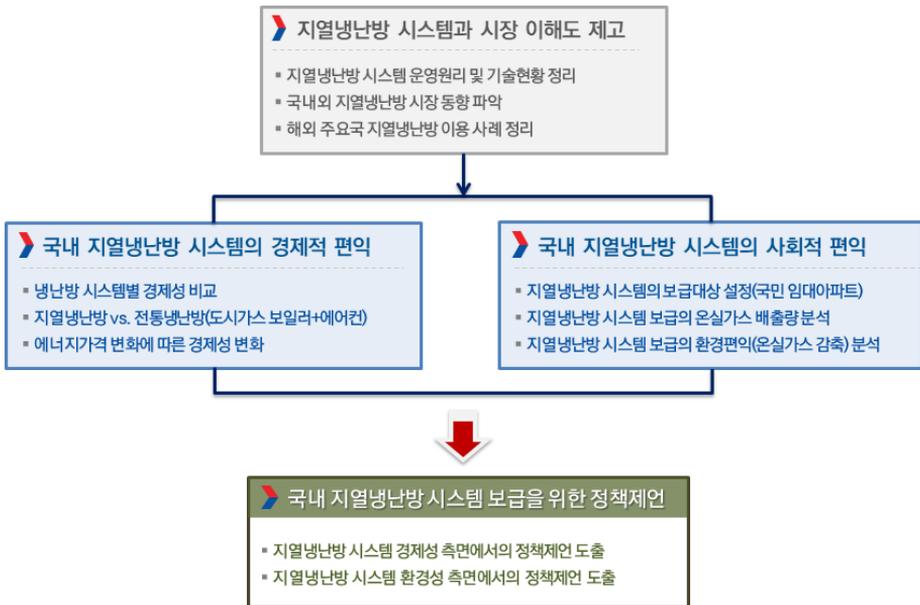
지열은 국내외에서 대표적인 신재생에너지원으로 분류되고 있다. 그러나 인지도는 태양광과 풍력만큼 높지 않으며 국내에서는 포항지진과 관련된 에너지원으로 각인이 돼, 그 이용 및 보급에 있어 부정적 인식이 강해진 에너지자원이다. 그럼에도 불구하고 탄소중립 목표 달성에 유용한 에너지원이라는 사실에는 변함이 없으므로 건물 부문에서의 적절한 이용 방안은 지속적으로 검토될 필요가 있다. 먼저 제2장에서는 지열에너지의 난방 부문 활용의 원리와 지열난방의 기술적 특성 등을 살

2) 에너지법 시행규칙(2022.1.21.) 「에너지열량 환산표」에 따르면 순발열량 기준 도시가스(LNG)는 단위당 약 9,290kcal, 소비기준 전기는 단위당 2,290kcal 수준이다.

3) 상온의 지하수 온도가 여름철 대기온도보다 낮으므로 목표 온도까지 빠르게 도달할 수 있는 것이다.

펴봄으로써 지열에너지에 대한 독자들의 기초적인 이해를 돕고자 한다. 이후 제3장에서 국내외 지열에너지 이용 현황을 살펴보고 제4장에서 국내 지열냉난방 시스템 보급이 유발하는 경제적 편익을 분석할 것이다. 제5장에서는 사회적 편익 중 환경편익을 중심으로 지열냉난방 시스템 보급 효과를 분석한다. 마지막 제6장에서는 국내 지열냉난방 시스템의 보급의 경제성과 환경편익을 분석한 결과를 토대로 국내 지열냉난방 시스템 보급의 당위성을 검토하고 보급 활성화를 위한 정책을 제안하면서 보고서를 마무리한다. 보고서의 흐름을 아래 [그림 1-1]과 같이 나타내보았다.

[그림 1-1] 연구 흐름도



자료: 저자 직접 작성

제2장

지열냉난방 시스템 운영원리 및 기술 현황

2030 NDC 상향안과 2050 탄소중립 시나리오 등을 통해 부문별 탄소배출 저감 목표가 강화된 가운데 ‘전력화(electrification)’는 건물 부문 온실가스 배출 감축을 위한 대표적 전략으로 평가되고 있다. 특히 난방의 전력화는 LNG, 석유 등 화석에너지 사용을 무탄소 전력소비로 대체하는 것이므로 건물 부문 탄소중립 달성을 위한 주요 과제며, IEA 등에서는 ‘히트펌프(heat pump)’ 활성화를 난방 전력화의 핵심 수단으로 고려하고 있다. 본 연구의 분석 대상인 ‘수주지열정(Standing Column Well, 이하 SCW)⁴⁾ 지중열교환기를 이용한 지열냉난방 시스템’은 신재생에너지 자원인 지열원과 히트펌프를 결합해 건물을 냉난방하는 일련의 기술체계를 지칭하며, 본 장에서는 SCW 지중열교환기를 이용한 지열냉난방 시스템의 주요 기술과 운영원리에 대해 간단히 살펴볼 것이다. 지열냉난방은 일반 대중에게 여전히 낯선 방식의 신재생에너지 기반 냉난방 시스템이고 2017년 포함지진 이후 국내 지열원 이용에 대한 부정적 인식이 팽배해진 현 상황을 고려⁵⁾, 본 장에서 지열을 이용한 냉난방 시스템의 작동 원리와 R&D 현황 등을 독자들에게 환기시킴으로써 지열냉난방 시스템 원리와 특징에 대한 기초적인 이해를 우선적으로 도모하려 한다.

4) 수주(Standing Column, 水柱)는 우물이 지표면 아래 지하수로 채워져 있는 포화두께, 즉 우물 내 물 기동을 의미한다. 만약 깊이가 200m인 우물에서 지하수가 지표면 아래 10m까지 분포되어 있다면 이 우물의 수주(포화두께)는 190m 수준이다.

5) 복수의 지열냉난방 및 난방업계 관계자들의 의견에 따르면 2017년 포함지진 이후 지열냉난방 관련 지원 사업을 수주하는 것이 더욱 어려워졌고, 기존 냉난방 대비 시공 난이도가 상승하여 공기(工期)가 길어질 뿐 아니라 지열 이용을 위한 천공행위 자체에 대한 입주인들의 반발로 인해 건설사들이 신축 주거건물에 지열냉난방 시스템을 적용할 유인은 더욱 낮아졌다고 한다.

1. 집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템 운영원리

1.1. 지열냉난방 시스템 작동 기제

일반적으로 집단 주거시설에 적용된 지열냉난방 시스템은 지하 200~500m 깊이 10~20℃의 수온에서 기인한 ‘천부지열’을 활용하며⁶⁾, 본 연구의 분석 대상인 지열냉난방 시스템은 SCW 지중열교환기를 이용한 지하수열원 히트펌프 기술을 적용하고 있다⁷⁾. 상온의 지하수를 순환시켜 지중과 직접적으로 열교환을 하므로 ‘개방형’ 시스템으로도 지칭된다. 사실 과거 국내 지열냉난방 시스템 시공 사례를 살펴보면 깊이 200m 이내의 지열공을 뚫고 천공구간 전체에 U자 형태의 지열관을 설치한 후 천공구간 전체를 다시 메운 지열냉난방 시스템 시공이 주류를 이루고 있었다. 설치된 지열관에 부동액을 순환시켜 지중과 간접적으로 열교환을 하는 구조이므로 ‘밀폐형’ 시스템으로 지칭된다.

SCW 지중열교환기는 지열우물공에 지하수를 순환시켜 직접적인 열교환을 발생 시킨다. 따라서 1개의 심정(deep well)을 열공급원(heat source)과 열배출원(heat sink)으로 동시에 이용 가능하므로, SCW 기술을 이용한 개방형 지열냉난방 시스템은 다량의 지열관을 설치해 부동액을 순환시킨 후 간접적으로 열을 교환하는 밀폐형 지열냉난방 대비 설치 부지를 절감할 수 있다는 장점이 있다. 이는 부지가 협소하고 냉난방과 급탕을 동시에 필요로 하는 집단 주거시설에 지열냉난방 시스템 적용을 용이하게 만드는 주요 요소로 작용한다.

열효율 측면에서도 직접적으로 열을 교환하는 SCW 지열냉난방 시스템이 간접적으로 열을 교환하는 밀폐형 지열냉난방 시스템보다 우위에 있으며⁸⁾, 환경적 측면에서도 밀폐형은 부동액 누수 시 심각한 지하수 오염으로 이어질 수 있어 지하수를 직접 이용하는 개방형 시스템이 상대적으로 우위에 있다. 특히 본 연구의 SCW 지열냉난방 시스템은 관내로 일정량의 지하수를 취수 후 밀폐된 설비 내에서만 순환시키는 방식(closed-loop system)을 채택하여 지하수 오염문제로부터 비교적 자유롭다.

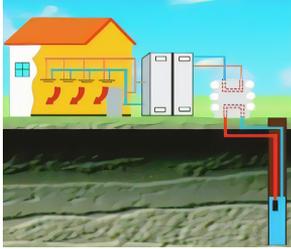
6) kharn(칸). 2020.2.10. [오해와 진실] 지열냉난방 시스템 분야. <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=11947> (검색일: 2022.10.1)

7) 지하 심도로 보았을 때 통상 10~300m 수준까지를 천부지열 깊이로 보고 있으나, 이는 평균적 깊이에 해당하며 상온(10~20℃)의 지하수를 이용하는 경우 천부지열을 활용한 지열냉난방 시스템으로 분류 가능하다. 즉 심부지열을 이용한 경우는 상온 이상의 뜨거운 지열수 또는 암반열을 이용하는 경우에 해당하므로 상온의 지하수를 이용하는 지열냉난방 시스템은 천부지열 이용 사례에 해당한다.

8) 동일 용량에 대해 개방형·밀폐형 설비시공 비율은 1:10 수준까지 보는 경우도 있다.

[그림 2-1] 지열냉난방 시스템 작동 원리 개념도 (개방형 vs. 밀폐형)

• 개방형 지열냉난방 시스템 (SCW)



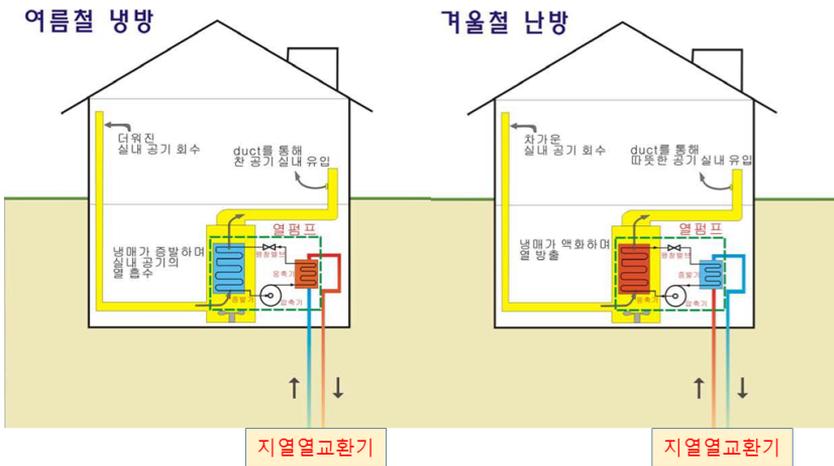
• 밀폐형 지열냉난방 시스템



자료: ㈜GGK(2020). p.1 그림 재인용

SCW 기술을 활용하는 지열냉난방 시스템은 크게 지중부(地中部), 기계실, 집단 주거시설의 세 부분으로 구성된다. 먼저 지중부는 지하 시추공을 뚫어 지하수를 끌어 올리는 부분에 해당하며, 기계실은 지중열교환기, 히트펌프, 저장조(저장탱크) 및 급탕조로 구성된다. 난방철에는 지중부에서 끌어올린 지하수가 열교환기를 거쳐 히트 펌프로 들어가고, 히트펌프로 유입된 지하수는 고온수화 되어 난방에 활용된다. 반 대로 냉방철에는 히트펌프로 유입된 지하수가 저온수화 되어 냉방에 활용된다. 즉 히트펌프는 지중의 열을 지하로 방출 또는 실내로 흡수하여 냉난방에 필요한 온도를 일정하게 유지하는 역할을 하므로, 지열냉난방 시스템의 핵심 장치로 볼 수 있다.

[그림 2-2] 지열냉난방 시스템 작동 원리 개념도 (여름철 vs. 겨울철)



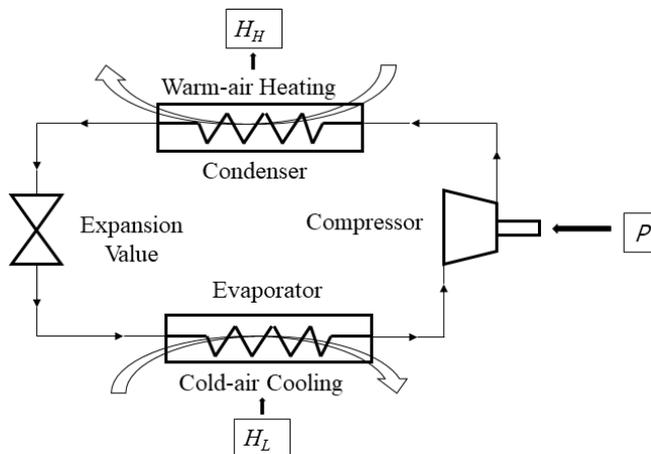
자료: 한국에너지공단(2020). p.610 그림 재인용

한편 기계실에는 냉온수 순환펌프를 설치해 히트펌프로부터 나오는 냉온수를 수축 열조(냉온수탱크)로 운반한다. 이 중 수축열조에 해당하는 저탕조 및 급탕조는 지열원 히트펌프에서 발생된 냉온수를 저장하는 장치며, 저장된 물은 펌프를 통해 여름철 냉방과 겨울철 난방에 활용된다. 이상의 원리를 도식화해보면 [그림 2-2]와 같다.

1.2. 지열냉난방 시스템에 적용된 히트펌프 작동 원리

전술하였듯 지열냉난방 시스템에서 히트펌프는 냉난방열을 공급하는 핵심 설비며, 크게 증발기(evaporator), 응축기(condenser), 압축기(compressor), 팽창밸브(expansion valve)로 구성되어 있다. 증발기에서는 열을 흡수하고 응축기에서는 열을 방출하므로, 응축기를 통해 난방을 하고 증발기를 통해 냉방을 하는 개념으로 이해할 수 있겠다. 한편 압축기는 증발기로부터 유입된 저압저온 냉매증기를 압축하여 고압고온의 냉매증기로 전환하고, 팽창밸브는 응축기에서 유입된 냉매액체를 팽창시켜 저압저온의 기체와 액체의 혼합냉매로 전환하는 역할을 담당한다. 이러한 각각의 기능들이 유기적으로 연결되어 냉난방에 이용되려면 냉매를 시스템 내에서 순환시키는 압축기의 역할이 중요한데, 이 때 순환에 필요한 에너지는 전기모터를 통해 공급된다. 히트펌프의 구성요소별 작동원리는 아래 [그림 2-3]과 같이 나타낼 수 있다.

[그림 2-3] 히트펌프 구성요소별 작동원리 도식화



자료: 조성한김현제(2020), p.595 그림 재인용

조성한김현제(2020)⁹⁾에 따르면 히트펌프의 성능은 ‘성능계수(Coefficient of Performance, COP)’로 나타낼 수 있다. 지열냉난방 시스템 내 히트펌프에는 에너지보존법칙이 적용되므로 압축기에 공급된 에너지(P)와 증발기에서 흡수한 열에너지(H_L)의 총합만큼의 에너지(H_H)를 응축기에서 방출한다($P + H_L = H_H$). 따라서 히트펌프의 COP(COP_{HP})와 냉방기의 COP(COP_C)는 각각 압축기에 공급된 에너지 대비 응축기에서 방출된 에너지의 양(H_H) 또는 증발기에서 흡수한 에너지의 양(H_L)의 비율로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$COP_{HP} = \frac{H_H}{P}, \quad COP_C = \frac{H_L}{P}, \quad \text{where } P + H_L = H_H \quad (1)$$

$$COP_{HP} = \frac{P + H_L}{P} = 1 + \frac{H_L}{P} = 1 + COP_C \quad (2)$$

상기 COP 관계식은 공급된 에너지 대비 획득한 난방 에너지 또는 냉방 에너지의 비율을 나타낸다. 예를 들어 COP_{HP} 가 3인 경우 COP_C 는 2가 되므로 압축기에 1kW의 전력을 공급하면 증발기에서 2kW의 에너지를 흡수하고 응축기에서 3kW의 에너지를 방출하는 것으로 이해할 수 있는데, [그림 2-3]에서 표현된 바와 같이 H_H 가 응축기에서 방출되면 난방이 되며 H_L 의 에너지를 증발기에서 흡수하면 냉방이 되는 개념이다.

2. 국내외 지열냉난방 시스템 기술 동향

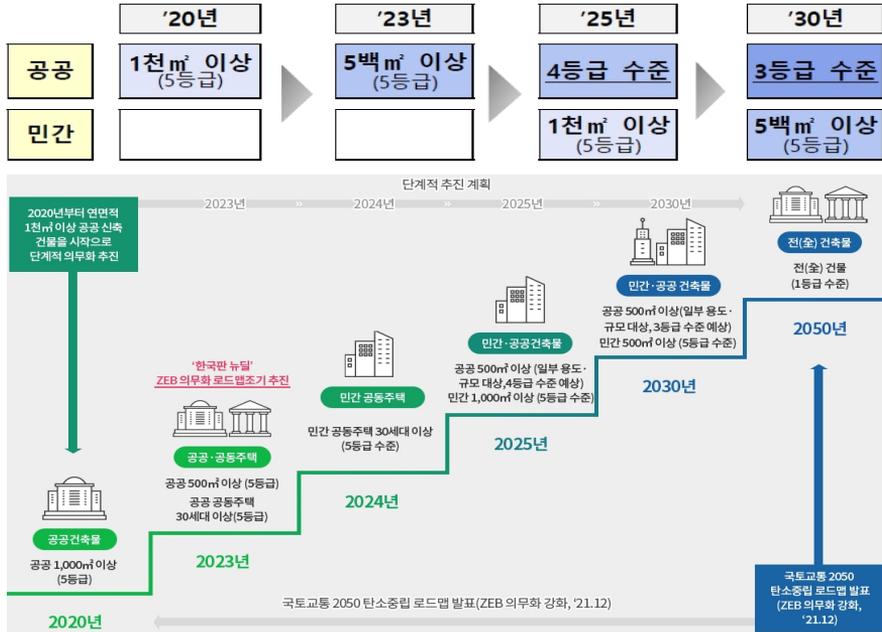
2.1. 국내 건물 부문 지열냉난방 관련 정책 및 기술개발 현황

국내에서 지열냉난방 시스템은 2004년 공공기관 의무화 제도를 통해 보급되기 시작했다. 이후 국가 신재생에너지 보급 정책과 지자체의 건물 부문 신재생에너지 공급 의무 조례 제정 등에 힘입어 한국토지주택공사(Korea Land and Housing Corporation, 이하 LH) 등 국토교통부 산하 공공기관과 민간 건설업체의 관심이 높아진 상태다.

9) 조성한김현제(2020). pp.595-596 내용 참조

특히 LH의 경우 「2050 탄소중립을 위한 녹색건축 활성화 방안(2021.6)¹⁰⁾과 「제로 에너지건축 보급 확산 방안(2021.6)¹¹⁾, 「국토교통 탄소중립 로드맵(2021.12)¹²⁾」 등에 따라 2030년 기준 3단계 이상의 제로에너지건물 인증 기준 충족을 위해¹³⁾ 태양광 외 신재생에너지원으로 지열원의 활용을 본격적으로 검토해야 할 것으로 예상된다.

[그림 2-4] 국내 제로에너지건물 효율등급 달성 목표



주: 공동주택 30세대 이상은 2025년 의무화
 자료: 국토교통부(2021.6.2.), p.5; 한국에너지공단 홈페이지(https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do, 접속 일자: 2022.10.3.) 그림 재인용

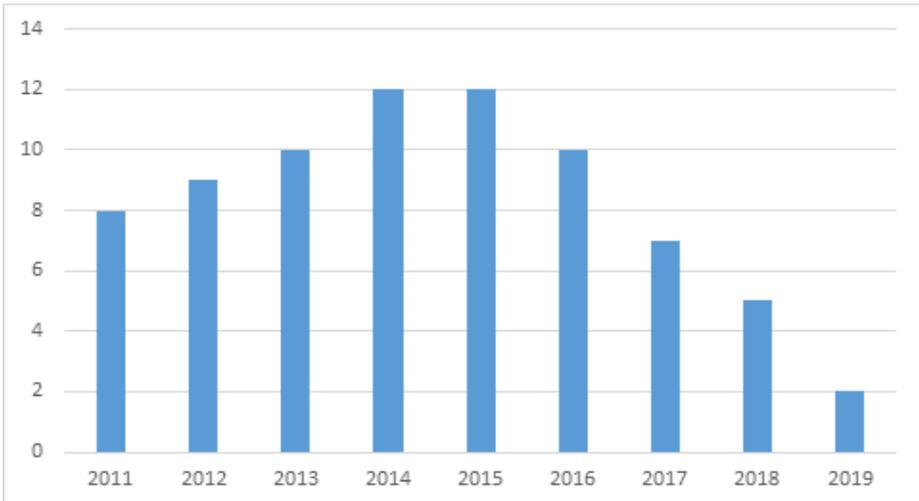
- 10) 국토교통부(2021.6.2.), p.5 내용 참조
- 11) 국토교통부(2021.6.21.), pp.2~3 내용 참조
- 12) 국토교통부(2021.12.), pp.5~6 내용 참조
- 13) 제로에너지건물 인증등급은 에너지효율등급(1++ 이상)과 건물에너지관리시스템(BEMS) 등이 설치된 건물을 대상으로 에너지자립률에 따라 5개 등급으로 구분된다.

ZEB등급	에너지자립률	전제 조건
1등급	100% 이상인 건축물	① 에너지효율등급 1++등급 이상 (최고1+++ ~ 최저7등급) ② 건물에너지관리시스템(BEMS) 또는 원격전자식검침기 설치
2등급	80 이상 ~ 100% 미만인 건축물	
3등급	60 이상 ~ 80% 미만인 건축물	
4등급	40 이상 ~ 60% 미만인 건축물	
5등급	20 이상 ~ 40% 미만인 건축물	

주: '에너지자립률'은 건축물 에너지 소비량 대비 신재생에너지 생산량을 의미

지난 2021년 6월 및 12월에 수립된 상기 정책들을 종합해 보면 신축건물에 대한 제로에너지건물 등급제 시행에 있어 공공 부문의 역할이 강화되었다. 이에 소규모 공공건물(500㎡ 이상)은 2023년까지 5등급을 달성해야 하며, 공공 부문 건물 전체적으로는 2025년 4등급, 2030년 3등급을 달성해야 한다(그림 2-4) 참조). 따라서 공공 임대주택 등을 신규 보급하는 과정에서 태양광을 우선적으로 고려하더라도, 2030년 신축 공공 임대주택의 에너지자립률이 60% 이상이 되려면 태양광 외 신재생에너지원의 추가적인 적용을 검토해야 할 것이다. 또한 한국에너지공단의 ‘건축물 에너지효율등급 인증평가 프로그램(ECO2)’에서 인정되는 신재생에너지원(태양광, 태양열, 지열, 열병합발전, 수력)중 태양광 외 건물 단위에 적용 가능성이 높은 에너지원은 지열이라는 점까지 감안하면¹⁴⁾ 국내 주택 보급 정책에 있어 지열냉난방 활용을 위한 기초적인 토대는 어느 정도 마련된 상태다.

[그림 2-5] 신재생에너지 기술 지열 부문 국내 연구개발 과제 수 변화



자료: 한국에너지공단(2020), p.640 표를 바탕으로 저자 직접 작성

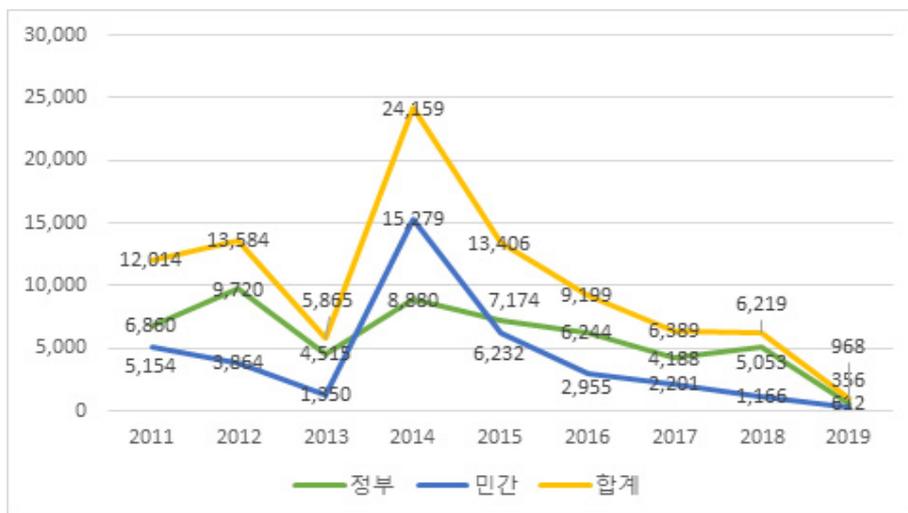
한편 국내 지열 부문 연구개발(R&D)은 2001년부터 한국에너지기술평가원의 ‘신재생에너지 개발사업 연구비 지원’을 중심으로 진행되어 왔다. 지열에너지 활용 중에서도 지열원 기반 히트펌프 시스템의 성능 개선 또는 실증 연구가 주를 이루었고,

14) 태양열은 열매체 누수 등 하자요인에 대한 우려가 있으며 열병합발전은 공동주택에 대한 적용 관련 연구가 아직 충분히 이루어지지 않아 상용화까지 해결해야 할 과제가 산적해 있다.

기업주관 또는 기업의 공동참여 형태로 활발한 기술개발이 진행되어 왔다. 그러나 2015년 이후부터 국내 지열 부문 R&D 과제 수는 감소하기 시작해 2019년에는 불과 2개의 R&D만 진행된 것으로 파악되었다(그림 2-5) 참조)15). 지열 부문 연구개발비도 2014년 최고치(약 241억 원)를 기록 후 하락세를 보여 2019년에는 9.7억 원 수준으로 축소되었다(그림 2-6) 참조).

[그림 2-6] 신재생에너지 기술 지열 부문 국내 연구개발비 변화

(단위: 백만 원)



자료: 한국에너지공단(2020), p.640 표를 바탕으로 저자 직접 작성

지열냉난방 관련 세부 기술요소별로 연구 현황을 살펴보면 주로 지열 히트펌프 시스템 및 지중열교환기 등 가격 경쟁력을 확보할 수 있는 열공급 시스템 부문에 대한 연구가 중점적으로 지원되었다(〈표 2-1〉 참조). 특히 지중열교환기는 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 주요 요소로 지열냉난방 보급 활성화 관점에서 국산화와 저비용 시공을 위한 R&D 필요성이 높은 분야로 평가받고 있다. 집단 주거 시설에 대한 수주지열형 지열냉난방 시스템 적용 연구는 2016년부터 진행되었는데, 대규모 아파트 세대에 지열냉난방 시스템을 직접 보급하고 운영 성과를 모니터링한 국내 최초의 실증 연구로 평가된다.

15) 2017년 이후의 국내 지열에너지 관련 R&D가 감소한 것은 포항 지진의 영향으로 지열활용 자체에 대한 주민 수용성이 크게 하락했기 때문인 것으로 보인다.

〈표 2-1〉 국내 지열 부문 연구개발 과제 현황 정리

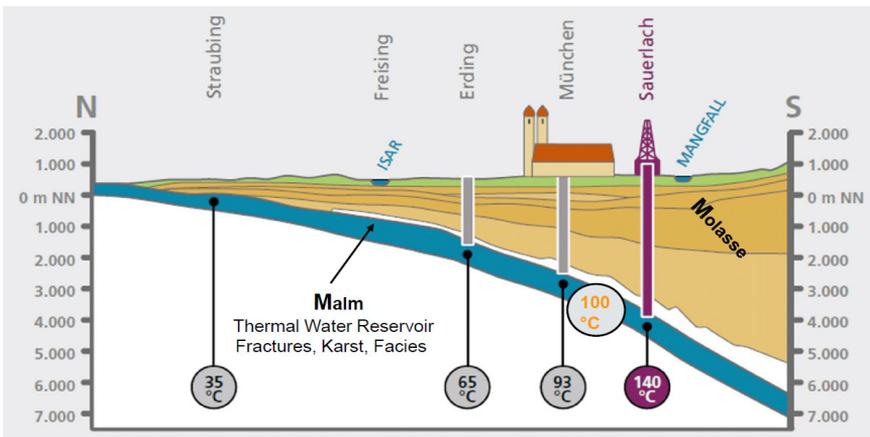
과제 시작 연도	과제명
2010	<ul style="list-style-type: none"> - 직접순환식(DX) 수직밀폐형 지열원 열펌프 시스템 기술 구축(3년) - R410A 원심 압축기를 이용한 지열 히트펌프 시스템(3년) - 앵커(anchor)와 로우프를 이용한 고심도 고열량 지중 열교환기 장치 개발(2년) - 소규모 분산형 지열시스템 개발(3년) - MW급 지열발전 상용화 기술개발(3년)
2011	<ul style="list-style-type: none"> - 저온 지열원 100kW급 ORC 발전 기술 개발(5년) - 내식형 직접 순환식 지중열교환 시스템 기술 개발(2년) - 대규모 현장타설 콘크리트 말뚝에 적합한 지열교환 시스템의 설계 및 시공법 개발(3년)
2012	<ul style="list-style-type: none"> - 개방형 지열 냉난방 시스템의 설계 시공기준 확립 및 신뢰성 확보를 위한 실증 연구(3년) - 비주거용 지열 히트펌프 시스템의 보조 히트싱크 활용 기술 개발(3년)
2013	<ul style="list-style-type: none"> - 2,000RT급 지열, 공기열 하이브리드 열원 냉·난방 시스템 개발(1년) - EGS 인공저류층 생성 시뮬레이터 개발(3년) - ICT 융합 지열 시스템의 지능형 통합유지·관리 기술 개발(3년) - 지열 저류층 4차원 영상화 기술 개발(3년)
2014	<ul style="list-style-type: none"> - 울릉도 지열발전을 위한 심부 지열자원 평가기술 개발 - 지열에너지 활용 판넬 구조물 지붕 용설시스템 개발 - 분산열원 이용 지열 냉난방 시스템 상용화 기술
2015	<ul style="list-style-type: none"> - 심부지열 직접 열활용을 위한 Co-axial (동축) 단일 대규모 지중열교환기 개발 - 300~450m 고심도 수직밀폐형 지중 열교환기장치 사업화 개발 - 기존 지하공간 시설에 지열에너지 성능 부여를 위한 에너지 구조체와 최적화 기법 기반 설계·시공 기술 개발 - 용수활용이 가능하고 소규모에서 115.5kW, 대규모에서 525kW 이상 성능을 가진 지하수 정호 결합 밀폐-개방형 복합지열시스템(CWG 시스템) 개발
2016	<ul style="list-style-type: none"> - 지열원 냉난방시스템 에너지생산량 산정 및 모니터링 기술 개발 - 지열원 히트펌프식 열풍건조기 개발 - 집단 주거시설의 고밀도 대용량 지열시스템 실현을 위한 수주지열정(SCW) 기술 개발 - 수직밀폐형 지중열교환기 및 지열원 히트펌프 시스템 성능 향상에 관한 실증 연구
2018	<ul style="list-style-type: none"> - 포항지진과 지열발전의 연관성 분석 연구
2019	<ul style="list-style-type: none"> - 포항 지열발전 실증부지 지진 활동 및 지하수 변화 모니터링 시스템 구축

자료: 한국에너지공단(2020). p.640 표 재인용

2.2. 해외 지열냉난방 관련 기술개발 현황¹⁶⁾

독일, 스위스 등 지열에너지를 적극적으로 활용하는 해외 주요국에서는 지열에너지를 이용한 지역난방 R&D 프로젝트가 진행 중이다. 먼저 독일 뮌헨에서 진행되고 있는 ‘GRAM¹⁷⁾ 프로젝트’가 유명한데, Molasse 퇴적물¹⁸⁾ 분지의 지열수를 지역난방에 활용하고 동시에 지열발전의 적용 가능성까지 타진하는 프로젝트다(그림 2-7 참조).

[그림 2-7] 뮌헨 Molasse 퇴적물 분지 GRAME 프로젝트의 구조



자료: 한국에너지공단(2020), p.639 그림 재인용

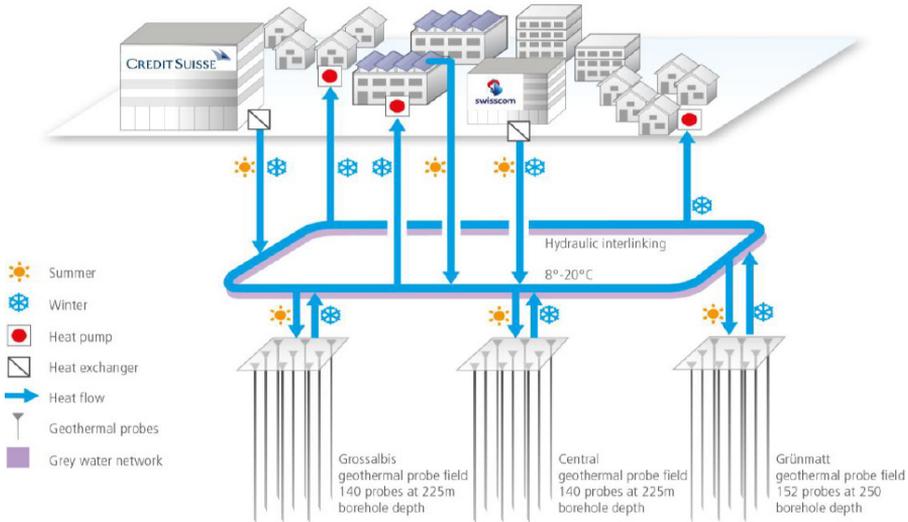
유럽에서의 지열원 히트펌프를 활용한 냉난방 시스템 연구는 ‘계간축열(seasonal thermal energy storage)에 의한 냉난방 밸런스’ 확보와 지역 냉난방을 공급하는 ‘스마트 열 그리드(Smart Thermal Grid)’의 구현을 중심으로 추진되고 있다. 즉 겨울 외 계절의 잉여 열에너지를 지열 히트펌프를 통해 계간축열 후 겨울철에 난방 열로 활용하여 연간 냉난방 밸런스를 확보하는 것이다. 이와 관련된 대표적 실증연구 사업이 바로 스위스 취리히의 ‘FGZ(Familienheim-Genossenschaft Zurich) 프로젝트’인데, [그림 2-8]에서 확인할 수 있듯 취리히 지역 전체에 지열원 히트펌프를 통한 계간축열 기반 지역냉난방을 구현하고자 한다¹⁹⁾.

16) 한국에너지공단(2020), pp.638~639의 관련 내용 요약

17) GRAME은 ‘Optimized and Sustainable Reservoir Development for Deep Geothermal Plants in the Bavarian Molasse Basin’의 독일어 약자에 해당한다.

18) 몰라세(Molasse) 조산기(造山期)에 삭마작용(削磨作用)으로 형성된 두꺼운 퇴적층을 의미한다(사이언스올 홈페이지, <https://www.scienceall.com/%EC%A1%B0%EC%82%B0%EC%9A%B4%EB%8F%99orogeny>, 접속일자: 2022.10.14).

[그림 2-8] 스위스 취리히 FGZ 프로젝트의 지열 지역냉난방 공급 시스템



자료: 한국에너지공단(2020). p.639 그림 재인용

한편 EU 지원으로 추진된 바 있는 ‘ReGeoCities 프로젝트(2012~2015년)’는 천부지열원에 대한 인식을 제고하고 천부지열원 이용에 걸림돌이 되는 법규제 체계를 개선하는 데에 초점을 두었다. 따라서 천부지열원 이용을 지역계획에 포함시키는 것이 프로젝트의 주요 목표들 중 하나였다. ReGeoCities 프로젝트 결과에 따르면 천부지열원 활용의 효용과 가치는 매우 크지만 관련 기술 개발이 상대적으로 느린 상황이다. 이를 개선하기 위해 동(同) 프로젝트는 크게 네 가지의 핵심 과제를 제시하였는데 첫째, 열 부문의 탈탄소화를 목표로 한 일관된 에너지 전략 확립, 둘째, 천부지열 활용과 관련된 규제 철폐 및 시장진입장벽 최소화, 셋째, 소규모 천부지열 프로젝트에 대한 재정지원(혁신적 금융모델 개발), 넷째, 천부지열 관련 프로젝트의 승인 및 지원 결정을 돕기 위한 교육(관련 기술 종사자 및 공무원 등을 대상)으로 요약할 수 있겠다.

19) 스위스 취리히 FGZ 프로젝트의 지열 지역냉난방 공급대상 인구는 약 5,700명이다. 해당 인구가 거주하는 2,300가구의 아파트 및 주택, 그리고 상업시설에 연간 80GWh의 냉방과 35GWh의 난방이 공급될 계획이다.

3. 소결

본 장에서는 지열냉난방 기술의 원리와 국내외 기술개발 동향을 살펴보면서 지열 냉난방 시스템에 대한 기초적인 이해도를 제고해보았다. SCW 지열냉난방 기술을 중심으로 지열원과 히트펌프가 어떤 작용을 거쳐 건물을 냉난방하며, 비록 국내의 경우 2017년 포항지진 이후 다소 위축된 측면이 있으나 지열냉난방 시스템의 효과적인 활용을 위한 R&D가 국내외를 불문하고 활발히 진행되어 왔다는 점을 확인할 수 있었다. 특히 독일, 스위스와 같은 국가에서는 개별 건물 단위에 대한 지열냉난방 시스템 적용을 넘어 지구(地區) 단위에서의 적용을 시도하면서 지열냉난방의 ‘규모의 경제(economy of scale)’ 실현을 타진하고 있는 것으로 판단된다.

이렇듯 해외 선진국에서는 지열과 히트펌프의 결합이 열에너지 소비의 효율을 높이면서 건물 냉난방의 온실가스 직간접 배출량을 최소화하는 유용한 대안이라는 점에 초점을 맞추고, 지열냉난방 기술 발전이 시장 형성으로 이어질 수 있는 인적·물적·제도적 지원을 종합적으로 마련해나가고 있다. 이는 지열원의 특성에 대한 세부적인 고려 없이 지진과 같은 외부충격에 지열 관련 R&D의 일괄적인 위축 현상을 보이고 있는 우리나라와 특별히 차별화되는 부분이기도 하다.

건물 및 지역을 대상으로 한 지역냉난방 기술 자체에 대해 대내외적 관심도가 결코 낮지 않다면 국내외 지열냉난방 시장 동향은 어떠할까? 기술 연구에 대한 관심과 지원이 활발하다면 일정 수준 이상의 시장이 형성되었을 것으로 예상되는 바, 제3장에서는 국내외 지열냉난방 시장 규모와 동향, 지열냉난방 시스템을 실제로 도입·이용 중인 해외 사례를 구체적으로 살펴볼 것이다.

제3장

국내외 지열냉난방 시장 동향 및 해외 주요국 지열냉난방 이용 사례

제2장에서 우리는 지열냉난방 시스템의 운영원리와 기술적 특성에 대해 살펴보았다. 지하 200~500m 수준의 천부지열과 히트펌프를 활용하는 지열냉난방은 연중 일정한 온도를 유지하는 지하수를 활용, 여름철 냉방 및 겨울철 난방의 효율을 제고할 수 있다. 특히 난방의 전력화를 중심으로 2030 NDC 상향안 및 2050 탄소중립 목표 달성에 기여할 수 있다. 우리나라에서도 2017년 포항지진이 발생하기 전 2014~2015년까지 지열냉난방 관련 R&D가 활발했다. 본 장에서는 국내외 지열냉난방 시장 동향을 살펴보고 해외 주요국 지열냉난방 활용 사례를 구체적으로 살펴보고자 한다.

1. 국내외 지열냉난방 시장 동향

1.1. 해외 지열냉난방 시장 동향

지열에너지 직접이용 범주에는 지열원 히트펌프, 지역난방, 온천 및 수영장, 온실 난방, 수산업, 산업용 등이 포함되며 지열냉난방을 포함한 전세계 지열에너지 직접이용량은 1995년 이후 설비용량 증가세와 더불어 꾸준히 확대되고 있다. 실제로 2020년 기준 전세계 지열에너지 직접이용 설비용량은 약 107,627MWth 수준으로

2015년 대비 약 51.8% 증가하였으며, 이에 상응한 지열에너지 이용량은 2015년 대비 약 72.3% 증가한 약 283,580GWh로 파악된다(〈표 3-1〉 참조).

〈표 3-1〉 전세계 지열에너지 이용 설비용량 및 직접이용량 변화

구분	1995	2000	2005	2010	2015	2020
설비용량 (MWth)	8,664	15,145	28,269	48,493	70,885	107,627
연간 이용량 (TJ)	112,441	190,699	273,372	423,830	592,638	1,020,887
연간 이용량 (GWh)	31,234	52,972	75,937	117,731	164,622	283,580

주: 환산계수(TJ → GWh)는 약 0.278 적용
 자료: Lund and Toth(2020). pp.6~7 표 내용 일부 발췌

지열원의 편재성(偏在性)이 극심할 경우 지열을 이용한 대규모 지역난방은 지열원 히트펌프 기반 냉난방 대비 시장 확장성이 크지 않다. 현재 기술 수준에서 지열에너지의 원거리 수송은 쉽지 않다 보니 수요지와 지열에너지 공급지와의 거리가 경제성 평가에 중요한 요소일 수밖에 없고, 결국 지열원의 편재성이 지열 지역난방의 확산에 한계점으로 작용하는 것이다.

〈표 3-2〉 전세계 지열에너지 직접이용 종류별 설비용량

(단위: MWth)

이용형태	1995	2000	2005	2010	2015	2020
지열원 히트펌프	1,854	5,275	15,384	33,134	50,258	77,547
지역난방	2,579	3,263	4,366	5,394	7,602	12,768
온천 및 수영장	1,085	3,957	5,401	6,700	9,143	12,253
온실난방	1,085	1,246	1,404	1,544	1,972	2,459
수산업	1,097	605	616	653	696	950
산업용	544	474	484	533	614	852
농업용 건조	67	74	157	125	161	257
기타	353	251	457	410	439	541
합계	8,664	15,145	28,269	48,493	70,885	107,627

주: 기타에는 융설(融雪, road heating) 목적의 지열활용 등을 포함
 자료: Lund and Toth(2020). p.6 표 편집

한편 지열냉난방의 주요 구동 원리인 지열원 기반 히트펌프는 지열에너지를 활용하는 주요 방식들 중 하나로 자리잡고 있다. 2020년 기준 전세계 지열원 기반 히트펌프의 총 설비용량은 약 77,547MWth, 지열에너지 직접이용량은 약 166,662GWh 수준이었다. 이는 같은 해 전세계 전체 지열에너지 직접이용 설비용량(107,627MWth)의 72.1%, 전체 지열에너지 이용량(283,580GWh)의 약 58.8%에 해당하는 규모다(〈표 3-2〉 및 〈표 3-3〉 참조).

〈표 3-3〉 전세계 지열에너지 이용형태별 직접이용량

(단위: GWh)

이용형태	1995	2000	2005	2010	2015	2020
지열원 히트펌프	4,060	6,465	24,306	55,597	90,791	166,662
지역난방	10,619	11,924	15,349	17,507	24,630	45,272
온천 및 수영장	4,373	22,096	23,061	30,392	33,225	51,131
온실난방	4,373	4,962	5,739	6,462	8,066	9,952
수산업	3,748	3,259	3,049	3,200	3,320	3,770
산업용	2,811	2,839	3,019	3,263	2,904	4,553
농업용 건조	312	288	559	454	564	980
기타	937	1,138	854	856	1,121	1,260
합계	31,233	52,971	75,936	117,731	164,621	283,580

주: 환산계수(TJ → GWh)는 약 0.278을 적용

자료: Lund and Toth(2020). p.7 표 편집

한편 전세계 88개국에서 지열에너지 직접이용 사업을 확대하고 있는데, 이 중 중국의 지열에너지 직접이용 설비용량은 2019년 기준 40,610MWth로 1위를 차지하였다. 같은 해 중국의 지열에너지 직접이용량은 약 123,192GWh로 집계되었는데, 이를 바탕으로 역산해보면 가동률은 대략 34.6% 수준으로 파악된다. 미국의 2019년 지열에너지 직접이용량(42,447GWh)과 설비용량(20,713MWth)은 중국에 이어 2위를 차지하였으나 각각 중국의 1/2, 1/3 수준에 불과했고 가동률은 약 23.4%로 나타났다. Lund and Toth(2020)²⁰⁾에 따르면 2019년 전세계 지열에너지 직접이용 설비의 평균 가동률은 약 30.1%로 추정되며, 지열에너지 직접이용 총 설비용량이 1,000MWth 이상인 국가들 중 가동률이 가장 높은 국가는 터키로 2019년 기준 약 49.6%를 기록하였다(〈표 3-4〉 참조).

20) Lund and Toth(2020). pp.38~39 Appendix 참조

〈표 3-4〉 2019년 기준 지열에너지 직접이용 국가별 현황 (설비용량 1,000MWth 이상)

국가	설비용량 (MWth)	이용량 (GWh)	가동률 (%)
중국	40,610	123,192	34.6
미국	20,713	42,447	23.4
스웨덴	6,680	17,333	29.6
독일	4,806	8,094	19.2
터키	3,488	15,162	49.6
프랑스	2,598	4,800	21.1
일본	2,570	8,534	37.9
아이슬란드	2,373	9,333	44.9
핀란드	2,300	6,500	32.3
스위스	2,197	3,692	19.2
캐나다	1,831	4,031	25.1
네덜란드	1,719	2,318	15.4
우크라이나	1,607	1,413	10.0
한국	1,490	967	7.4
이태리	1,425	3,032	24.3
노르웨이	1,150	3,500	34.7
오스트리아	1,096	2,401	25.0
헝가리	1,024	2,973	33.1

자료: Lund and Toth(2020). pp.38~39 Appendix 표 발췌 및 재인용

1.2. 국내 지열냉난방 시장 동향

국내 역시 지열원 기반 히트펌프를 중심으로 지열에너지 시장이 형성되고 있다²¹⁾. 특히 심병완 외(2021)²²⁾에 따르면 우리나라의 경우 지하수가 풍부한 암반대수층이 분포한 지역이 많아 SCW 기술 등을 적절히 활용한다면 지열냉난방을 위한 천부지열원 이용에 큰 어려움이 없다. 이는 충분한 수리지질학적 검토가 이루어지고 적절한 기술이 적용될 경우 국내에서 지열원 히트펌프를 이용한 냉난방 시스템 보급에 큰 무리가 없다는 점을 시사한다. 실제로 [그림 3-1]에서 확인할 수 있듯, 2006~2019

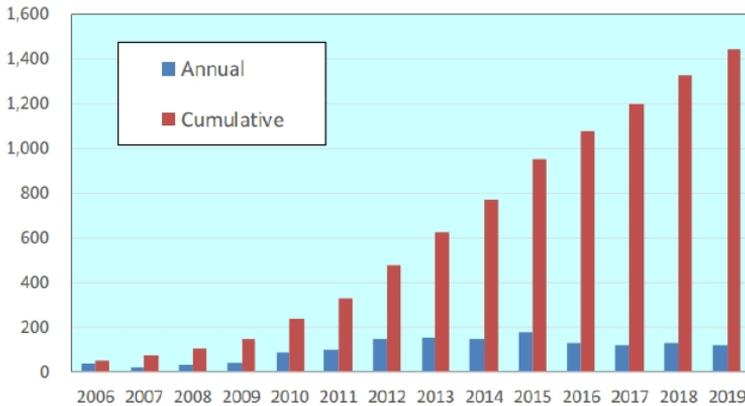
21) 국내의 경우 해외와는 달리 지열발전 시장이 형성되지 못하고 있으며 2022년 현재 지열발전에 대한 연구가 일부 진행되고 있으나 가동 중인 지열발전소는 전무하다. 특히 2017년 11월 포항 지진의 원인으로 지열발전이 주목되면서 국내 지열발전 개발사업은 거의 중단된 상태다. 현재는 해외 지열발전 플랜트 시공 등을 중심으로 국내 기업(현대 엔지니어링 - 케냐 지열발전소 건설 사업 등) 진출이 이루어지고 있는 것으로 파악된다.

22) 심병완 외(2021). pp.33~34 내용 참조

년 기간 동안 국내 지열원 히트펌프 설비용량(누적치)은 꾸준히 증가하는 양상을 보였다. 특히 공공 부문 신재생에너지 공급 의무화 제도와 관련 보조금 제도의 시행 등에 힘입어 2011년 이후 매년 100MWth 내외의 신규 설비가 보급되고 있으며, 2019년까지 공공 부문에 대해 총 1,192MWth의 지열설비가 설치된 것으로²³⁾ 파악된다(〈표 3-5〉 참조). 2018년 기준 95.8MWth의 신규설비가 보급되었지만 2019년 38% 가량 하락하여 59.6MWth의 설비가 보급되었는데, 이는 2017년 포항 지진으로 인해 지열에너지 이용에 대한 주민수용성이 크게 저하된 점에서 기인했을 것으로 추정된다.

[그림 3-1] 2006~2019년 국내 지열원 히트펌프 설비 보급 추이

(단위: MWth)



자료: 한국에너지공단(2020). p.622 그림 재인용

〈표 3-5〉 국내 공공 건물 신재생에너지 설치 의무화에 따른 지열설비 시공 계획

(단위: MWth)

구분	'10	'11	'12	'13	'14	'15	'16	'17	'18	'19	합계
지열 설비용량	254.2	114.0	119.8	134.6	98.3	112.5	111.1	92.2	95.8	59.6	1,192

주: 한국에너지공단에 제출된 공공건물 지열설비 시공 계획 실적으로, 실제 설치는 계획 대비 2~3년 지연되거나 일부 취소될 수 있다.
자료: 한국에너지공단(2020). p.633 표 편집 및 재인용

23) 한국에너지공단에 제출된 시공계획 기준으로 집계된 통계며, 실제 설치는 계획 대비 2~3년 지연되거나 일부 취소될 수 있다.

한국에너지공단(2020)²⁴)은 국내 지열에너지 직접이용을 지열원 히트펌프, 목욕 및 수영, 개별난방²⁵), 지역난방²⁶), 온실난방²⁷)으로 구분하고 있다. 해당 통계에 따르면 2019년 기준 공공과 민간 부문을 통틀어 총 1,490MWth 지열에너지 직접이용 설비가 보급되었고, 이 중 지열원 기반 히트펌프는 약 1,446MWth가 보급되어 전체 직접이용 설비용량의 약 83%를 차지하였다(〈표 3-6〉 참조).

〈표 3-6〉 우리나라의 지열에너지 직접이용 현황 (2019년 12월 31일 기준)

이용분야	설비용량 (MWth)	연간 직접이용량	
		TJ	GWh
지열원 히트펌프	1,446.2	2,889	802.5
목욕/수영	32.6	507.6	141.0
개별난방	8.6	53.4	14.8
지역난방	2.2	31.3	8.7
온실	0.2	1.3	0.4
합계	1,490	3,483	967.4

주: 환산계수(TJ → GWh)는 약 0.278을 적용
 자료: 한국에너지공단(2020). p.621 표 편집 및 재인용

국내 지열원 기반 히트펌프 보급의 대표적인 사례를 살펴보면 공공 부문에서는 세종시 정부청사에 보급된 약 5,700RT(20MWth²⁸) 규모의 지열냉난방 시스템, 민간 부문에서는 부산 감전동 집단거주시설에 300RT(1.06MWth) 용량의 지열냉난방 시스템이 대표적이다. 특히 본 연구의 주요 분석대상인 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템은 집단 주거시설(민간임대, 277세대 아파트) 세대 냉난방에 지열원 히트펌프 기반 지열냉난방 시스템을 적용, 안정적으로 운영 중인 몇 안 되는 사례다.

24) 한국에너지공단(2020). p.621 내용 참조
 25) 국내 개별난방은 온천수를 이용한 건물난방이 대표적(부곡, 동래 온천)
 26) 국내 지열 지역난방은 인천 강화군 석모도 21가구에 대한 지역난방에 해당
 27) 국내 온실난방은 석모도 지열수를 이용한 온실난방이 대표적
 28) 1RT는 약 0.00352MWth

2. 해외 주요국 지열냉난방 이용 사례

2.1. 미국 지열냉난방 이용 사례

NREL(2021)²⁹⁾에 따르면 미국은 2020년 현재 총 23개의 지열 지역난방 시스템이 상용화 프로젝트 단계에 진입한 상태이며, 이들 23개의 지열 지역난방 시스템으로부터 연평균 75MWth의 지열이 이용되고 있다. 23개의 지열 지역난방 시스템 중 4개는 2000년 이후에 설치되었으며, 모두 캘리포니아와 오리건 주(州)에 소재한 것으로 알려졌다³⁰⁾. 미국 내 지열 지역난방 규모는 0.1~20MWth까지 다양하게 분포해 있으며, 23개 평균 4MWth 규모로 집계된다(〈표 3-7〉 참조).

〈표 3-7〉 미국 내 지열 지역난방 시스템 순용량 및 연간 지열에너지 이용량

소재지(州)	지열 지역난방 시스템	가동시점	용량(MWth)	지열 이용량(GWh)
1	아이다호 Warm Springs Water District	1892	3.6	8.8
2	아이다호 Ketchum District Heating	1929	0.9	1.9
3	오리건 Oregon Institute of Technology	1964	6.2	13.7
4	사우스다코타 Midland	1969	0.1	0.2
5	아이다호 College of Southern Idaho	1980	6.3	14
6	사우스다코타 Philip	1980	2.5	5.2
7	캘리포니아 Susanville	1982	5.6	3.4
8	콜로라도 Pagosa Springs	1982	5.1	4.8
9	아이다호 Idaho Capitol Mall	1982	3.3	18.7
10	네바다 Elko District Heat	1982	3.8	6.5
11	아이다호 Boise City District Heating	1983	20.6	42.3
12	네바다 Warren Estates	1983	1.1	2.3
13	캘리포니아 San Bernardino	1984	12.8	22
14	오리건 City of Klamath Falls	1984	4.7	10.3
15	네바다 Elko County School District	1986	4.3	4.6
16	네바다 Manzanita Estates	1986	3.6	21.2
17	뉴멕시코 Gila Hot Springs Ranch	1987	0.3	0.9
18	아이다호 Fort Boise Veteran's Hospital	1988	1.8	3.5
19	아이다호 Kanaka Rapids Ranch	1989	1.1	2.4
20	캘리포니아 Canby / I'SOT	2003	-	1.2
21	오리건 Lakeview Prison	2005	11.7	-
22	오리건 Lakeview District Hospitals + Schools	2014	1.6	4.4
23	캘리포니아 Modoc Schools / Alturas	2017	0.44	-

자료: NREL(2021). p.28 표 편집 및 재인용

29) NREL(2021). pp.26~27 내용 참조

30) 나머지 15개는 1970년대 및 1980년대에 설치되었다.

한편 NREL(2021)³¹⁾에서 지열 지역난방 프로젝트 관련 정부 보조금 현황을 조사한 결과 23개 지열 지역난방 프로젝트 중 12개는 에너지부(Department of Energy, DOE)의 재정지원을 받은 것으로 알려졌다. 12개 프로젝트의 보조금 지원 실적을 살펴보면 초기 자본비용(CAPEX) 중 보조금을 통해 조달된 자금의 비중은 평균 60% 수준이다(〈표 3-8〉 참조).

〈표 3-8〉 미국 내 지열 지역난방 시스템 초기 자본비용 및 보조금 비율

소매지(州)	지열 지역난방 시스템	가동개시	초기 자본비용	보조금을 통한 금융조달 비율
1 사우스다코타	Philip	1980	\$1,218,884	77%
2 콜로라도	Pagosa Springs	1982	\$1,364,000	20%
3 네바다	Elko District Heat	1982	\$827,000	100%
4 캘리포니아	Susanville	1982	\$2,400,000	77%
5 아이다호	Boise City District Heating	1983	\$7,128,000	68%
6 오리건	City of Klamath Falls	1984	\$2,801,000	82%
7 캘리포니아	San Bernardino	1984	\$6,000,000	34%
8 네바다	Elko School District	1986	\$1,500,000	17%
9 아이다호	Fort Boise Veteran's Hospital	1988	\$7,500,000	100%
10 캘리포니아	Canby / I'SOT	2003	\$1,400,000	36%
11 오리건	Lakeview Hospitals + Schools	2014	\$3,837,250	29%
12 캘리포니아	Modoc Schools / Alturas	2017	\$4,963,448	80%

자료: NREL(2021). p.35 표 편집 및 재인용

또한 GeoDH(2014)³²⁾는 지열 지역난방 시스템의 경우 시추 시공의 난이도가 높아 자본집약적(capital intensive)이지만 유지관리에 소요되는 비용은 기존 지역난방 시스템 대비 상대적으로 낮은 편으로 보고 있다. 따라서 지열 지역난방 시스템 보급에 있어 정부 보조금 지원이 투자 경제성 확보에 중요한 요소라는 점에 대해서는 미국 정부 내에서도 일정 수준 합의에 이른 것으로 추정된다.

Kevin, M., et al(2019)³³⁾에 따르면 미국에서 23개의 지열 지역난방 프로젝트가 진행되고 있지만 지열의 직접이용이 미국 내 전체 열수요에서 차지하고 있는 비중

31) NREL(2021). pp.35~36 내용 참조(나머지 프로젝트에 대해서는 정보 미비로 보조금 지원 여부를 파악 불가)

32) GeoDH(2014). p.42 내용 참조

33) Kevin, M et al(2019). p.42 내용 참조

은 0.1~0.16%에 불과하다. 이는 러-우크라이나 전쟁이 발생하기 전까지 미국 천연 가스 가격이 상대적으로 낮은 반면³⁴⁾ 지열 지역난방 시스템 설비비를 보전할 수 있는 인센티브가 부족했고, 주민 수용성 개선 노력도 미흡했기 때문인 것으로 예상된다³⁵⁾. 특히 지열의 직접이용 확대와 관련된 DOE의 기술지원 프로그램은 2020년에 대부분 종료되었고, 주 정부 단위에서 지원되던 지열 지역난방 시스템 보급 지원사업도 최근 몇 년 사이에 모두 종료되었다³⁶⁾. 기추진 된 23개 사업 그 이상의 지원은 중단된 상태로 보아야 할 것이다.

그렇다면 미국 내 지열 지역난방 시스템 개발 확대에 어떤 장애가 있기에 23개 프로젝트 이후 사업 추진이 지지부진한 것일까? 이에 대해 NREL(2021)³⁷⁾은 다양한 지열 지역난방 보급 장애요소를 크게 세 가지 유형으로 분류하였다. 먼저 첫 번째 장애요소는 **‘정책·시장 장벽’**이다. 지열원을 난방열로 이용할 때 저렴한 경쟁 난방연료(천연가스 등)와의 가격경쟁은 필연적이다. 지열원 이용 기술은 아직까지 신기술의 영역으로 분류되므로 러-우크라이나 전쟁 등 외부 충격에 의해 이례적 고유가 국면에서는 지열냉난방의 가격경쟁력 확보가 용이하겠지만 COVID-19 유행에 의한 2020년 상반기 초저유가 상황 등 반대 국면이 발생할 경우는 가스 등 경쟁연료에 대한 가격경쟁력 확보가 어렵다. 결국 초기 자본비용을 회수할 수 있는 정부의 투자 인센티브 제공과 관련 전문가 육성이 지열원 기반 난방 확산에 중요한 역할을 할 것이다. 그러나 경쟁 난방연료와의 가격경쟁에서부터 경제성 확보에 적신호가 켜지는 경우가 많아 관련 투자 인센티브와 인력 양성을 일관되게 추진하는 것이 어려운 ‘정책·제도적 딜레마’에 놓인 것으로 보인다.

두 번째 장애요소는 **‘사회적 수용성 장벽’**이다. 지열원 기반 난방열의 공급 측면에 있어 경제성 확보 문제 해결에 정책·시장 장벽이 장애요소로 작용한다면 수요 측면에서는 사회적 수용성 장벽이 주요 장애요소로 평가된다. 미국에서도 우리나라와 마찬가지로 지열원 이용에 대한 일반 대중의 인식이 매우 낮은 편으로 평가되며, 사실 여부와 무관하게 지열원 이용 사업이 투자규모 대비 안전 리스크가 상대적으로 크다는 인식이 일반화 될 우려가 상존한다.

34) 1960~2020년 기간 동안 지열 지역냉난방 시설 도입 실적을 살펴보면 1980년대 지열 지역난방 개발 활성화는 같은 시기 동안 나타났던 경쟁연료(석유 및 천연가스) 가격 강세와 맞물려 나타난 것으로 보인다(NREL(2021), p.27).

35) NREL(2021), p.28 내용 참조

36) NREL(2021), pp.43~51 내용 요약

37) NREL(2021), p.38 내용 참조

마지막 세 번째 장애요소는 ‘기술적 장벽’이다. 미국 내 주요 지열원 공급지는 서부에 집중되어 있다. 반면 열 수요지는 동부에 집중되어 있어 수급 지역 간 거리가 상당히 멀다. 따라서 지열에너지를 수요지로 전달하는 것이 기술적으로 매우 어려운 상황이다. 또한 이미 다양한 냉난방 시스템이 보급된 미국에서 지열냉난방 시스템을 도입하려면 개조비용에 대한 부담이 클 수밖에 없다. 지열냉난방 시스템의 핵심 기술 중 하나인 지열정 시추에 아직까지 많은 비용이 소요되는 점도 대표적 기술적 장벽으로 언급된다.

이렇듯 지열 지역난방과 관련된 프로젝트를 오래 전부터 추진한 미국에서도 지열원 이용에 있어 다양한 장애요인이 존재하고 이를 해결하는 것이 쉽지 않아 보인다. 다만 미국 내 주거 부문, 상업부문, 산업 부문의 에너지소비 총량에서 냉난방이 차지하는 비중이 25%를 넘고 연간 비용은 2,700억 달러에 달하는 만큼 지열냉난방의 성장 잠재력은 결코 작지 않다. 따라서 바이든 행정부 수립 후 파리협정 복귀 및 적극적 기후변화대응 정책기조 등을 감안할 때 지열원 등을 활용한 미국 냉난방 시장의 탈탄소화는 미국 탈탄소 정책의 주요 경로가 될 것으로 예상된다³⁸⁾.

2.2. 프랑스 지열냉난방 이용 사례

IEA는 프랑스에서 복수의 지열에너지 직접이용 프로젝트를 진행하고 있다. 이하에서는 본 연구와 관련 있는 주거시설 지열냉난방 사례를 중심으로 관련 내용을 살펴보고자 한다.

① EHPAD Le Champgarnier³⁹⁾

먼저 살펴볼 사례는 프랑스 Meung Sur Loire에 위치한 ‘노인복지주택’이다. 해당 노인복지주택은 2013년에 완공된 주거시설로, 132개의 객실(욕실, 주방 포함)과 치료실로 구성되어 있다(연면적 6,500㎡). EHPAD의 지열냉난방 시스템의 초기투자 비용은 388,000유로(약 535,875천원⁴⁰⁾)며, 이 중 29%는 기금(ADEME 재생에너지기금⁴¹⁾)을 통해 조달한 것으로 파악된다. 냉난방과 급탕에 지열을 직접 이용하

38) 자세한 내용은 NREL(2021). p.39 내용 참조

39) IEA(2021a) pp.1~2 내용 요약

40) 1유로 = 1381.12원 전제

41) 프랑스 환경에너지관리청(Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, ADEME)의 재생에너지기금(Heat Fund

고 있으며, 여름철 냉방 시 히트펌프를 우회하는 ‘외기 냉방(free cooling)’을 적용하여 비용을 절감하는 것으로 알려졌다. EHPAD에 적용된 지열냉난방 시스템의 설계수명은 60년이며, 55m 깊이의 석회암 저류층에 지열정 2개를 설치하였다(지열수 온은 약 13℃).

EHPAD 지열냉난방 시스템의 연간 지열에너지 이용량은 난방에 대해 399MWh, 냉방에 대해 22MWh, 급탕에 대해 235MWh 수준이며, COP는 온수에 대해 3.4, 시설 냉방에 대해 5.7 수준인 것으로 보고된다. 한편 EHPAD 지열냉난방 시스템이 연간 절감하는 CO₂(이하 온실가스) 배출량은 약 133CO₂ton 수준이다.

[그림 3-2] 프랑스 EHPAD 시설 전경 및 지열냉난방 설비



주: (좌) 시설 전경, (우) 기계실
자료: IEA(2021a), p.1 그림 재인용

② 단독주택 - Westhoffen⁴²⁾

IEA가 주거 시설에 대해 지열냉난방 시스템을 적용한 두 번째 사례는 프랑스 동부 Strasbourg 인근 Westhoffen 마을의 단독주택(detached house)이다. 해당 단독주택의 연면적은 약 180㎡로 냉난방과 급탕에 대해 지열에너지를 이용하고 있다(지열수온은 약 13℃). EHPAD와 마찬가지로 여름철 냉방 시 히트펌프를 우회하는 외기 냉방을 적용, 냉방비용을 절감하는 구조며 연간 총 에너지소비 중 87%는 난방(64%)과 급탕(23%)에서 기인한다(히트펌프 COP는 약 4.4 수준).

해당 단독주택의 연간 지열에너지 이용량은 약 10MWh 수준이며 축열조 대신 축열 버퍼탱크를 적용하였는데, 건물 규모가 상대적으로 작아 버퍼탱크만으로 축열에 큰 무리가 없었기 때문인 것으로 추정된다. 프랑스 환경규정(RT 2012)⁴³⁾에 준하여

for Renewables)

42) IEA(2021b) pp.1~2 내용 요약

건설된 주거시설로 에너지효율이 극대화되어 있으며, 연간 에너지소비 비용은 300유로(보조금 제외)에 불과하다. 초기투자비용은 약 35,000유로(483,392천원⁴⁴⁾ 수준으로 알려졌다.

[그림 3-3] 프랑스 Westhoffen 단독주택 전경 및 지열 탐침 시추작업



주: (좌) 단독주택 전경, (우) 지열 탐침을 위한 시추작업 현장
 자료: IEA(2021b), p.1 그림 재인용

3. 소결

지금까지 전세계 지열원 히트펌프 기반 지열냉난방 등 지열에너지 직접이용 시장 동향과 국내 지열냉난방 시장 동향, 해외 주요국(미국, 프랑스)의 지열냉난방 이용 사례를 살펴보았다. 국내의 지열원 직접이용 시장 동향과 지열냉난방 이용 사례를 통해 우리는 국내외를 불문하고 지열냉난방 시스템의 핵심 요소로서 지열원 히트펌프는 관련 기술개발과 시장형성이 빠르게 진행되었으며, 재생열 이용을 통한 냉난방 탈탄소화의 핵심 수단으로 지열의 활용 가능성이 크다는 점 또한 확인할 수 있었다.

다만 현재 시점에서 지열정을 시추하는 기술의 난이도는 여전히 높은 편이며 상온 상태의 지하수에 도달하기까지 탐지 및 시추 비용이 많이 소요될 뿐 아니라, 천부지열원을 이용한다 하더라도 안전에 대한 주민 수용성을 확보하기가 쉽지 않다는 점은 지열원을 이용하려는 모든 국가들의 극복 과제인 듯 하다. 특히 미국의 경우 19세기 말(1892년)부터 지역난방 등에 지열을 이용하는 시도를 꾸준히 이어오다가 결국 경제성 확보의 어려움-재정지원 등에 대한 추진동력 약화-기술개발 약화-주민

43) 연간 에너지소비량 60kWh/m² 이하, 연간 온실가스 배출량 3CO₂/m² 미만으로 제한

44) 1유로 = 1381.12원 전제

수용성 개선여지 축소의 악순환이 이어지면서 냉난방 부문에서의 지열이용은 답보 상태에 있는 듯하다.

한편 IEA는 지열 관련 연구 프로그램(IEA Geothermal Technology Collaboration Programme)을 별도로 운영하고 있으며, 프랑스 등에 지열냉난방 관련 프로젝트의 성과를 꾸준히 모니터링하고 있다. 본 연구의 분석대상인 주거시설에 대한 지열냉난방 프로젝트 중심으로 살펴보면 프랑스의 경우 지열원 히트펌프를 이용해 냉난방과 급탕을 모두 공급하고 있다는 점이 특징적이었다. 우리나라의 경우 건물 냉난방과 급탕 전체에 지열원 히트펌프를 적용한 사례를 찾아보기가 쉽지 않으며, 국내에서 건물 급탕 부문까지 지열원을 이용하는 구체적 방안은 향후 별도의 실증사업을 통해 발굴되어야 할 사안이다.

냉난방 부문의 전력화는 건물 부문 탈탄소화의 주요 정책수단들 중 하나다. 전세계적으로 지열원 히트펌프를 이용한 냉난방은 지열에너지 직접이용 유형 중 가장 빠른 속도로 확산되는 이용 방식이다. 이러한 양상은 포항 지진이 발생하기 전 우리나라도 예외는 아니었으며, 난방연료의 대체 및 냉난방 에너지소비효율 제고에 지열에너지의 이용 가치가 뛰어나다는 점은 국내외 전문가들 사이에서도 일정 수준 합의에 이른 것으로 보인다.

본 장의 국내외 사례 분석을 통해 탈탄소 사회로의 이행에 있어 지열에너지의 이용 가치가 높다는 점을 확인할 수 있었다. 또한 미국과 프랑스 모두 지열원 히트펌프 기반 냉난방 시스템의 초기투자비용 규모 및 비용 조달방안을 체계적으로 점검하고 있다. 따라서 현재 국내 지열냉난방 시스템이 경쟁 냉난방 방식(가스보일러 + 에어컨) 대비 어느 정도 수준의 경제성을 확보하고 있을지 등을 구체적으로 진단해 볼 필요가 있다. 이는 지열원 히트펌프 기반 지열냉난방 시스템의 국내 확산 가능성 및 국내 확산의 잠재적 장애요인을 살펴볼 수 있는 첫걸음이 될 것이다.

제4장

국내 지열냉난방 시스템 경제성 평가

지금까지 제2장에서는 수주지열정 지열냉난방 시스템의 운영원리와 기술적 특성을 살펴보았고 이어 제3장에서는 국내외 지열원 히트펌프를 포함한 지열 직접이용 시장 동향 및 미국과 프랑스의 냉난방 부문 지열이용 사례를 검토해 보았다. 지열원 직접이용 중 지열원 히트펌프를 냉방이나 난방에 적용하는 사례가 빠르게 증가하고 있으나 지열이용에 대한 안전 이슈는 국내외에서 동일하게 발생하고 있다는 점, 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방 경제성과 환경성을 확보하기 위한 기술개발이 꾸준히 추진되어 왔다는 점, 그리고 LNG 등 경쟁열원과의 상대가격은 지열냉난방 경제성 확보에 중요한 요소라는 점 등이 주요 내용이었다.

한편 지열 직접이용 관련 국내 현황을 조사하는 과정에서 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방 시스템이 아파트 형태의 집단 주거시설에 적용된 몇 가지 사례를 확인할 수 있었다. 부산 감전동 민간임대 아파트(277세대), 국민임대 공동주택인 서울 노원 이지하우스(121세대)는 100세대 이상의 집단 주거시설에 지열냉난방 시스템을 적용한 국내 대표 사례다. 다만 부산 감전동 민간임대 아파트의 경우 급탕을 제외한 바닥난방 및 공간냉방에만 지열원을 이용하고 있고 노원 이지하우스의 경우 냉난방을 포함해 급탕영역에도 지열원을 적용한 점에서⁴⁵⁾ 다소 차이가 있다.

45) kharn(칸). 2022.2.11. 노원 이지하우스, 4년간 E모니터링 결과 공개. <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=18627>
(검색일: 2022.10.1)

본 연구는 신축 집단주거시설 중심의 지열냉난방 시스템 확대와 관련 환경편의 분석에 초점을 맞추고 있다. 이에 신재생에너지 보급 활성화를 위한 정부 주도의 실증사업형 건물⁴⁶⁾보다는 민간 건설사가 분양을 주도한 대중적 아파트면서 도심지역 부지절감이 용이한 지열냉난방 시스템을 도입, 신뢰성 있는 데이터 제공이 가능한 사례를 탐색하였다. 그 결과 급탕은 제외되지만 바닥난방과 공간냉방에 지열을 5년간 안정적으로 이용하고 있는 부산 감전동 민간임대 아파트를 중심으로 이하의 분석을 진행하게 되었다⁴⁷⁾.

전통냉난방(도시가스 보일러+에어컨) 방식 대비 경제성 확보 수준은 향후 국내 지열냉난방 사업과 지열 관련 후속 R&D 사업 확대를 결정하는 중요한 요소들 중 하나일 것이다. 따라서 본 연구는 277세대 부산 감전동 민간임대 아파트(2018년 준공)에서 2022년 현재까지 안정적으로 이용 중인 수주지열정 지열냉난방 시스템의 2021년도 운영 데이터(10분 단위)를 추출, 국내 집단 주거시설에 적용된 지열냉난방 시스템의 경제성을 구체적으로 진단해보았다. 이하에서는 국내 지열냉난방 시스템 경제성 평가에 적용된 전제와 경쟁 냉난방 시스템과의 비용우위 평가 결과 등을 검토해 볼 것이다.

1. 지열냉난방 시스템 경제성 분석을 위한 기초정보

1.1. 냉난방 방식별 초기투자비용(Capital Cost)

1.1.1. 지열냉난방 시스템

본 연구의 경제성 평가 대상인 지열냉난방 시스템은 277세대 아파트 세대에 냉난방을 공급할 수 있는 규모다. 주요 설비는 히트펌프, 지열 우물공, 축열조 등으로 구성되어 있다. 초기 투자비가 높은 설비를 중심으로 도입 규모를 정리해보면 다음과 같다.

46) 정책 활성화 목적의 실증사업형 건물의 경우 에너지효율 극대화를 위한 다양한 조치를 최대한으로 적용하는 경우가 많아 일반적 사례로 소개하기에는 지나치게 미래지향적이라는 비판이 있을 수 있다.

47) 따라서 본 연구의 지열냉난방 시스템은 급탕을 제외한 지열원 히트펌프 냉난방을 지칭한다.

① 지열 우물공

가장 많은 비용이 투입된 설비는 지열 우물공으로, 상온 지하수의 열원을 확보하는 핵심 설비다. 시공 전 세대별 평균면적과 건물 단열효과 등을 감안해 277세대의 냉난방 부하를 먼저 추정하였고, 그 결과 분석 대상 아파트에는 총 9개의 지열 우물공 천공이 필요했다(상온 지하수 심도는 약 540m). 지열 우물공 1개당 단가는 8천만원 수준이므로 해당 아파트의 지열 우물공 시공에 총 7.2억 원의 비용이 소요되었다.

② 히트펌프

건물 건설 당시 세대별 냉난방 부하를 전망한 결과에 따르면, 분석 대상 아파트에는 50RT 규격의 히트펌프 6대(총 300RT)면 냉난방 부하를 충분히 감당할 것으로 보았다. 설비규격과 해당 아파트 전용면적(약 13,923㎡)을 고려하여 역산해보면 1RT 당 약 14평의 냉방이 가능한 수준이다⁴⁸⁾. 초기 시공 당시 50RT 히트펌프 1대당 단가는 약 5천만원 수준이었으므로 총 3억 원의 비용이 히트펌프 확보에 투입된 셈이다.

③ 축열조 및 축열장비

277세대 아파트에 대해 난방열 공급을 히트펌프만으로 조달하면 세대당 전기요금 부담이 커질 수 있다. 또한 지하수로부터의 열원공급이 원활하지 않은 상황이나 난방 부하가 갑자기 커질 경우를 대비한 백업 열원 확보의 필요성 등을 고려해 축열조를 설치하였다. 따라서 분석 대상 아파트에는 약 557.4톤 용량의 축열조 1식과 423RT 규모의 축열장비가 함께 설치되었다. 축열조 시공에 약 2억 원의 비용이 소요되었고 축열장비 설치에 5천만원의 비용이 투입되었다.

④ 세대 배관(바닥코일+Fan Coil Unit) 및 냉난방 자동제어 장치

각 세대가 지열원을 냉난방에 직접 이용하기 위해서는 277세대에 배관과 냉난방 자동제어 장치를 설치해야 한다. 지열냉난방 시스템에서 각 세대별로 냉난방에 필요한 배관은 바닥난방을 위한 바닥코일과 공기조화(空氣調和, Air Conditioning)에 필요한 Fan Coil Unit(FCU)으로 구성된다. 지하수와 히트펌프를 통해 만들어진 냉난방열을 코일형태의 배관으로 흘려보내 바닥난방 및 공간난방을 하는 것이다. 각

48) 1평은 약 3.3㎡이므로 13,923㎡는 약 4,212평이다. 따라서 부산 감전동 277세대 아파트에 설치된 히트펌프 1RT는 약 14평의 냉방이 가능한데 지열냉난방 시스템 운영 5년차인 2022년 현재, 연간 냉난방 부하를 충분히 감당하고 있는 것으로 알려졌다.

세대별 냉난방 관련 배관 설치에 150만원이 투입되었고 전체 세대에 대해 약 4.2억 원이 소요되었다. 자동제어장치는 277세대에 총 1.2억 원이 투입되었다.

이와 같이 주요설비(①~④) 시공 관련 비용을 포함해 지열냉난방 시스템 전체를 구축하는 데에 약 21.8억 원이 필요한 것으로 파악된다. 이 중 지열원 추출 및 온도 조절과 직접적으로 관련된 설비비용은 약 13.4억 원으로 61.6%를 차지하며, 축열 조와 세대별 배관 등과 관련된 부대설비 비용은 약 8.4억 원으로 38.4%를 차지하였다(〈표 4-1〉 참조).

〈표 4-1〉 수주지열정 지열냉난방 시스템 초기투자비용

설비구분	규격	수량	수명	단가(천원)	총 비용(천원)
히트펌프	50RT	6대	10년	50,000	300,000
심정펌프	4kW	9대	10년	3,500	31,500
기타 지열장비	-	1식	30년	210,000	210,000
지열 우물공	540m	9식	100년	80,000	720,000
트렌치 배관	-	9공	100년	3,500	31,500
지열 자동제어	50RT × 6대	1식	50년	50,000	50,000
지열설비 Subtotal					1,343,000
축열조내부 공사	557.4ton	1식	50	200,000	200,000
축열장비 설치 공사	423RT (부하)	1식	30	50,000	50,000
실내 기계실 장비 도입	423RT (부하)	1식	30	50,000	50,000
실내장비 배관 공사 (바닥코일+FCU)	-	277세대	10	1,500	415,500
실내 자동제어 공사	277세대	1식	50	120,000	120,000
부대설비 공사 Subtotal					835,500
총합					2,178,500

자료: ㈜TEN 내부자료(자료취득일: 2022.4.2)

1.1.2. 전통냉난방(가스보일러 + 에어컨) 시스템

가스보일러 난방과 에어컨 냉방을 이용하는 전통냉난방 시스템은 지열냉난방 시스템 대비 초기투자비용 규모가 상대적으로 작다. 전통냉난방 시스템의 주요 설비비용은 가스보일러와 에어컨 시공, 바닥난방 시공 등에서 발생하는 것으로 조사되었다. 분석 대상 아파트에 전통냉난방 시스템을 적용했을 때 발생하는 주요 설비비용을 정리하면 다음과 같다.

① 개별난방 가스보일러

분석 대상인 부산 감전동 277세대 아파트에 지열난방 대신 개별 가스난방을 적용한다면 각 세대에 가스보일러 설치비용이 발생한다. 본 연구는 국내 주요 가스보일러 제조사(귀뚜라미, 경동나비엔, 린나이, 대성 켈틱)의 온라인몰 판매가격을 조사하고⁴⁹⁾ 각 제조사의 2020년 국내시장 점유율⁵⁰⁾로 가중평균한 값을 가스보일러 1대의 단가로 적용하였다⁵¹⁾. 구체적인 가스보일러 모델은 분석 대상 아파트 각 세대의 대체적인 전용면적(평균 50.26㎡)과 2020년 3월부터 콘덴싱 보일러가 의무화된 점을 고려하여 선정하였다. 이러한 기준에 따라 4개 제조사 가스보일러 1대의 가격은 약 879,450 원으로 설정하였으며, 이를 277세대 전체에 설치하므로 총 2.4억의 비용이 개별 가스난방을 위한 보일러 설치에 소요된다. 2.4억의 가스보일러 설치 관련 비용은 전통 난방 시스템 전체 초기투자비용의 약 13.7%를 차지하였다. 가스보일러 1대의 벤치마크 가격 산정에 활용한 정보는 아래 <표 4-2>와 같다.

<표 4-2> 국내 주요 가스보일러 제조사별 시장점유율 및 가스보일러 단가

제조사	모델	가격(천원)	국내시장 점유율 (%)		
			양사 평균	A사 자료	B사 자료
귀뚜라미	거꾸로 ECO 콘덴싱	690	28.5	35.0	22.0
경동나비엔	NCB353-18K(LNG, FF)	930	35.0	35.0	35.0
린나이	RC600-27KF	1,100	19.5	15.0	24.0
대성 켈틱	DNC-18K	840	17.0	15.0	19.0
가중평균 및 합계		879.5	100.0	100.0	100.0

주: 4개 제조사 20평형대 콘덴싱 가스보일러 기준값(879.5천원)은 4개사 국내시장 점유율로 가중평균한 값
 자료: (1) MK 뉴스. 2020.5.26. 보일러 시장 점유율 1위는... 경동-귀뚜라미 “내가 최고”. <https://www.mk.co.kr/news/business/view/2020/05/534587> (검색일: 2022.10.1.)

(2) 귀뚜라미 온라인 스토어(http://krstore.co.kr/shop/list.php?ca_id=10, 접속일자: 2022.10.2)

(3) 경동나비엔 공식 쇼핑몰(<https://navienmall.co.kr>, 접속일자: 2022.10.2)

(4) 린나이 공식제품몰(<http://www.rinnaimall.com/mall/index.asp>, 접속일자: 2022.10.2)

(5) 대성켈틱 본사몰(<http://minishop.gmarket.co.kr/celticmall>, 접속일자: 2022.10.2)

49) 가스보일러 가격을 검색해보면 판매자별로 가격할인율이 상이해 어떤 가격이 표준가격인지 판명이 불가능한 수준이다. 이에 본 연구는 각 제조사의 공식 온라인몰 판매가격을 조사하여 공인 단가 수치로 활용하였다.

50) MK 뉴스. 2020.5.26. 보일러 시장 점유율 1위는... 경동-귀뚜라미 “내가 최고”. <https://www.mk.co.kr/news/business/view/2020/05/534587> (검색일: 2022.10.1)

51) 민간기업의 경우 시장점유율에 대한 정보공시가 영업비밀인 경우가 많다. 이에 경동나비엔과 귀뚜라미의 2020년 국내시장 점유율은 양사 발표수치가 다소 상이하여 두 발표수치의 평균값으로 절충하였다.

② 에어컨 및 자동제어장치

에어컨 단가는 아파트 건설계획 초반(지열냉난방 시스템 채택 전) 개별 가구에 대한 전기에어컨 도입을 고려했을 때 검토된 가격정보를 입수하여 활용하였다. 따라서 에어컨 단가와 시공비를 합쳐 세대당 약 246만원의 비용이 발생하며, 이를 277세대에 모두 적용하면 약 6.8억 원의 에어컨 설비비용이 추산된다. 또한 에어컨 자동제어장치 구축 시 277세대에 대해 총 1.2억 원이 투입되어야 한다. 에어컨과 자동제어장치 시공에 소요되는 비용은 전통냉난방 시스템 전체 초기투자비용의 약 52.7%에 달해 가장 큰 비중을 차지하였다.

③ 바닥난방 및 실내배관

전통냉난방 시스템을 채택할 경우 난방을 위한 부대시설(바닥난방, 실내배관 등) 시공이 반드시 수반되어야 한다. 15~20평형대 세대에 대해 바닥난방에 필요한 보일러 배관⁵²⁾ 시공비는 약 123만원의 비용이 책정되었고, 기타 실내배관에는 약 49만원이 책정되었다. 이를 277세대에 각각 시공해야 하므로 바닥난방 시공에 소요된 총 비용은 약 3.4억 수준이며, 실내배관 시공에 소요된 총 비용은 약 1.4억 원 수준으로 파악되었다. 바닥난방 및 실내배관 시공에 투입된 비용이 전통냉난방 시스템의 초기투자비용 전체에서 차지하는 비중은 약 31.3% 수준으로, 에어컨 및 자동제어장치 설치에 투입된 비용에 이어 상위 두 번째를 차지한다.

전통냉난방 시스템의 주요 설비(①~③)를 포함한 전체 초기투자비용은 약 15.2억 원 수준으로 산출되었다. 이는 지열냉난방 시스템 초기투자비용인 21.8억 원의 69.7%에 해당하는 비용이며 지열공 시추 등 시공 난이도 등을 감안하면 합리적 수준의 비용격차로 판단된다. 전통냉난방 시스템 설비별 비용 구성을 정리하면 아래 <표 4-3>과 같다.

52) 가정용 도시가스 보일러 기반의 난방 시스템에서 바닥난방 배관은 65℃ 수준의 뜨거운 온수를 순환시켜야 하므로 지열 바닥난방과 달리 폴리에틸렌 기반의 엑셀 파이프 등을 이용한다.

〈표 4-3〉 전통냉난방(도시가스 보일러 + 에어컨) 시스템 초기투자비용

설비구분	규격	수량	수명	단가(천원)	총 비용(천원)
가스보일러	100만kcal/h	277대	10년	879.5	243,608
바닥난방 시공	-	277세대	50년	1,229	340,500
실내배관 시공	-	277세대	10년	492	136,200
에어컨 시공	6,000kcal/h	277대	10년	2,458	681,000
실내 에어컨 자동제어장치	277 세대	1식	50년	120,000	120,000
총합					1,521,308

자료: ㈜TEN 자문 등을 바탕으로 저자 직접 작성

1.2. 냉난방 방식별 유지관리비용(O&M Cost)

지열냉난방 시스템과 전통냉난방 시스템의 공통 유지관리비용 항목은 조성한김현제(2019)⁵³의 분류체계와 운영관리 업체의 자문을 바탕으로 크게 일반관리비, 운영인건비, 시설점검비로 구성하고 지열냉난방 시스템의 경우 열교환기와 지하수에 대한 주기적인 점검 항목을 별도로 추가하였다.

1.2.1. 공통 유지관리비용

일반관리비와 운영인건비는 관리인력 1인이 상주하면서 냉난방 시스템 운영 전반에 대한 모니터링 또는 간단한 경상관리에 소요되는 비용이다. 냉난방 설비가 원활히 작동하는지 여부를 상시 모니터링하면서 이상이 발생했을 때 운영관리 업체에 연락해 적절한 조치를 취하는 역할에 해당하므로 조성한김현제(2019)⁵⁴에서는 지열냉난방과 전통냉난방 시스템 사이에 비용 차이가 발생하지 않는 것으로 가정하고 있다. 이에 대해 다소 강한 가정이라는 의견이 있을 수 있으나 공통 유지관리비용 요소에 대해서는 선행연구에서 설정한 원칙 외에 명시적 근거를 찾기 어려운 한계가 있었다. 따라서 본 연구도 일반관리비, 운영인건비, 상시 점검비에 대해서 지열냉난방 시스템과 전통냉난방 시스템 사이에 차이가 없는 것으로 간주하며 일반관리비(6백만 원/년), 운영인건비(15백만 원/년), 상시 점검비(0.4백만 원/년)를 모두 합쳐 총 21.4백만 원의 공통 유지관리비용이 발생한다.

53) 조성한김현제(2019). p.255 내용 참조

54) 조성한김현제(2019). p.255 내용과 운영관리 업체의 의견을 종합

1.2.2. 지열냉난방 시스템 고유 유지관리비용

앞서 지열냉난방 시스템의 기술적 특성에서 살펴본 바와 같이 지열냉난방 시스템 운영 시 주기적인 열교환기 점검과 지하수 영향조사를 시행해야 한다. 분석대상 아파트에 지열냉난방 시스템을 구축하고 유지관리 중인 업체의 기준에 따르면 열교환기는 10년 주기로 1회 점검이 필요하며 지하수는 5년 단위로 영향조사 계획이 수립되어 있다. 지열냉난방 시스템 열교환기 점검과 지하수 영향조사와 관련된 구체적인 비용은 공통 유지관리비용 정보와 마찬가지로 조성한김현재(2019)⁵⁵⁾의 수치를 준용하였다⁵⁶⁾. 열교환기 점검비용(0.1백만 원/년)과 지하수 영향조사 비용(1.8백만 원/년)을 합쳐 총 1.9백만 원의 고유 유지관리비용이 지열냉난방 시스템 운영 과정에서 발생한다.

〈표 4-4〉 냉난방 방식별 연간 유지관리비용 정보 요약

(단위: 천원)

구분		SCW 지열냉난방 시스템	전통냉난방 시스템
공통	일반관리비	6,000	6,000
	운영인건비	15,000	15,000
	점검비	400 (연 2회)	400 (연 2회)
고유	열교환기 점검비용	100 (10년에 1회)	-
	지하수 영향조사	1,800 (5년에 1회)	
합계		23,300	21,400

자료: 조성한김현재(2019). p.255 정보를 바탕으로 저자 정리

1.3. 지열냉난방 시스템 실측 기반 에너지산출량

지열냉난방 시스템의 에너지비용을 산출하기 위해서는 먼저 분석 대상 건물에 설치된 지열냉난방 시스템의 실제 COP를 조사할 필요가 있다. 이에 본 연구는 분석 대상 아파트의 2021년 지열냉난방 시스템 전체 생산열량 및 소비전력, 히트펌프 소비전력 실적치를 직접 조사해보았다(〈표 4-5〉 참조)⁵⁷⁾. 지열냉난방 시스템 전체 생산열량을 전력량 단위로 환산해보면 월 평균 약 107,674kWh, 월 평균 소비전력은 약 34,052kWh 수준으로 나타났다. 한편 지하수 열원의 온도 조절의 핵심인 히트펌프

55) 조성한김현재(2019). p.255 내용 참조

56) 물론 조성한김현재(2019). p.255 수치의 적정성은 분석대상 아파트의 지열냉난방 시스템 구축 및 관리 업체의 검토를 거쳤다.

57) 분석 대상 지열냉난방 시스템 자체의 COP를 추정하기 위해 별도 설치된 전자 모니터링 시스템으로 공용 부문을 포함한 건물 전체의 월별 생산열량 및 소비전력, 히트펌프의 월별 소비전력의 2021년 실적치를 추출하였다.

프의 소비전력은 월 평균 약 25,358kWh 수준이었다. 지열냉난방 시스템의 신재생 에너지 순(純) 생산량을 전체 지열냉난방 시스템의 연간 생산열량에서 연간 시스템 소비전력을 차감하여 추산해보면 약 883,472kWh로 도출된다⁵⁸⁾. 앞서 제3장에서 살펴본 프랑스 노인복지주택(EHPAD)의 신재생에너지 생산량이 약 511,824kWh 수준인 점을 감안하면⁵⁹⁾ 합리적인 수준의 신재생에너지 생산량으로 판단된다.

〈표 4-5〉 2021년 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 에너지산출량 실적

월	생산열량 (kWh)	시스템 소비전력 (kWh)	히트펌프 소비전력 (kWh)	시스템 전체 COP	히트펌프 COP
1월	117,478	36,523	34,493	3.22	3.41
2월	161,168	56,911	33,712	2.83	4.78
3월	189,737	63,890	26,971	2.97	7.03
4월	45,990	21,172	7,410	2.17	6.21
5월	34,295	8,947	7,138	3.83	4.80
6월	60,449	19,390	17,742	3.12	3.41
7월	150,555	49,277	45,384	3.06	3.32
8월	168,079	56,911	51,393	2.95	3.27
9월	76,761	24,505	19,759	3.13	3.88
10월	55,805	15,801	11,800	3.53	4.73
11월	83,320	22,541	20,171	3.70	4.13
12월	148,455	32,752	28,323	4.53	5.24
합계	1,292,092	408,620	304,296	3.16	4.25
평균	107,674	34,052	25,358	3.25	4.52

주: ① COP = 생산열량/소비전력, ② 파란 부분은 냉방기(5~9월) ③계량기 오류로 리셋된 데이터 제외
자료: ㈜TEN 내부자료(자료취득일: 2022.4.5)를 바탕으로 직접 정리

앞서 제2장에서 살펴본 지열냉난방 시스템 주요 부품별 성능계수 수식은⁶⁰⁾ 결국 소비전력 대비 생산열량의 비율에 해당하므로 2021년 분석 대상 아파트의 지열냉난방 시스템 전체 월평균 COP는 약 3.25, 히트펌프 자체의 월평균 COP는 약 4.52 수준으로 추정되었다. 또한 해당 아파트 냉난방 사용 패턴에 따라 냉방기는 5~9월, 그 외의 기간을 난방기로 구분할 수 있다. 이에 따라 지열냉난방 시스템과 히트펌프의 냉방기 평균 COP는 각각 3.22, 3.74 수준으로 나타났으며 난방기 평균 COP는 각각 3.28, 5.08 수준으로 추정되었다.

58) 이는 생산열량 전체가 신재생에너지원으로 조달된 것을 가정한 것이며, 만약 화석에너지로부터 조달된 비율을 반영한다면 일부 감소할 것이다(신재생에너지 생산량 산출과 관련된 엄밀한 분석은 조성한·김현재(2020)의 pp.596~597 참조).

59) 주어진 정보의 한계 내에서 제3장 EHPAD의 지열에너지 이용량(656MWh)을 냉난방시스템 생산열량으로 간주하고 온수 및 냉방 COP의 산술평균값(4.6)으로 나누어 소비전력량(144.2MWh)를 역산 후 생산열량에서 차감하여 추산한 결과다.

60) 제2장 p.7 수식(1)과 수식(2) 참조

1.4. 냉난방 방식별 에너지 비용

1.4.1. 집단 주거시설(부산 감전동 아파트) 에너지소비량

세대별 전용면적(약 50.6㎡)과 단위부하(90~95kcal/hm²) 등을 고려한 월별 지열 냉난방 시스템 가동률(2019~2021년 월별 평균값)과 월 가동일을 바탕으로 아파트 가구(세대) 전체⁶¹⁾ 냉난방 부하량 및 부하패턴을 추정해보면 <표 4-6>과 같다. 해당 건물의 지열냉난방 시스템은 난방철에도 송풍(공기순환) 수준의 냉방은 가능한 것으로 파악되었는데, 이는 지하수 열원 이용을 냉방철과 난방철로 구분함으로써 축열조 설치비용을 절감하고 열교환 효율과 냉난방 성능을 극대화하기 위한 의도가 반영된 것으로 보인다. 이러한 설비 구조적 특성에 따라 분석 대상 아파트의 월간 냉난방 수요는 냉방철과 난방철이 이분화 된 양상을 나타낸다⁶²⁾.

<표 4-6> 부산 감전동 아파트 월별 냉난방부하

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	합계
냉난방 구분	난방				냉방					난방			
가동률 (%)	88	72	53	25	20	50	72	69	45	30	40	70	-
월가동일 (일)	31	28	31	30	15	30	31	31	16	31	30	31	-
부하량 (MWh)	104.1	65.8	37.2	15.8	4.2	37.4	109.0	107.0	20.2	24.5	26.3	65.0	616.4

주: 부하량 = 세대 냉난방 일최대부하량 × 가동률/100 × 월가동일
 자료: ㈜TEN 자문 등을 바탕으로 저자 직접 작성

제2장 지열냉난방 시스템 운영 원리에 따라 실제 현장에서는 지열원 히트펌프 전력소비에 따른 전기요금 부담을 절감하면서 백업열원도 확보하기 위해 축열조를 설치하는 경우가 많다. 만약 사시사철 냉매형 에어컨 수준의 냉방성능을 유지하려면

- 61) 공용 부문에 대한 냉난방은 제외한 세대 냉난방 부하를 의미한다. 조성한김현재(2019) 등 기존 선행연구에서는 공용 부문과 상가 등을 포함한 아파트 건물 전체의 최대 냉난방 부하를 산출·활용하였다. 이에 본 연구는 2018년 가구에너지 상설표본조사의 33~66㎡의 가구에너지(전력, 도시가스) 소비량을 참고해 분석 대상 아파트의 세대별 면적(약 50㎡)에 맞는 냉난방 부하량을 재추정하였다.
- 62) 본 연구에서는 지열냉난방 시스템을 적용한 건물에 전통냉난방을 적용했다면 에너지소비량이 얼마나 변화할 것인지를 살펴봐야 하므로 이하 전통냉난방 시스템의 에너지비용 추정에서도 지열냉난방 시스템의 월간 에너지소비패턴을 동일하게 적용해야 한다. 즉 지열냉난방 시스템의 에너지 소비량과 소비패턴을 전통냉난방 시스템으로 총괄시킬 때 에너지비용에 어떤 차이가 있을지를 살펴보는 방법론이다.

냉방과 난방을 위한 축열조를 각각 별도로 구축해야 할 것이다. 이 경우 축열조의 추가 설치를 위한 부지확보 문제가 고려되어야 하며 초기투자비용 부담의 가중을 피할 수 없다. 따라서 분석 대상 지열냉난방 시스템의 경우 난방철에는 송풍 수준의 최소 냉방 기능만을 제공하여 월간 냉난방 수요 특성에 맞춰 냉난방 기능을 집중시키는 방식이 적용된 것으로 추측된다⁶³⁾.

이러한 특성을 종합하여 추산된 분석 대상 아파트의 냉방철(5~9월) 월평균 가동률은 약 51% 수준이며, 월평균 가동일은 약 24.6일로 추정된다. 난방철(5~9월 외 기간) 월평균 가동률은 약 54% 수준이었으며 월평균 가동일은 약 30.3일이었다. 다만 5월과 9월의 냉방 가동일은 각각 15일, 16일로 한달(30일) 중 절반 정도만 냉방 수요가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 2018년 지열냉난방 시스템 가동 이후 입주민들이 5월과 9월에 냉방을 특별히 요구하지 않았음을 의미하는데, 5월 및 9월 부산 지역의 기온과 습도가 별도 냉방이 필요 없을 정도로 적정 수준이었다는 뜻이기도 하다⁶⁴⁾.

한편 지열냉난방 시스템의 일최대냉난방 부하량은 냉방에 대해 약 13,741kWh(최대부하일 24시간 가동, 부하지수 38.5%), 난방에 대해 약 9,012kWh(최대부하일 24시간 가동, 부하지수 35.5%)로 나타났다. 557.4톤의 축열조 용량과 423RT의 축열장비 규모, 약 8℃ 수준의 축열온도차 환경을 고려해 축열량은 냉방기에 약 4,926kWh, 난방기에 약 4,987kWh로 산출되었다.

1.4.2. 냉난방 연료 및 전기요금 구분

① 지열냉난방 시스템

히트펌프를 이용한 지열냉난방 시스템은 냉난방 시 전기를 사용하며 사용전력에 대한 전기요금제는 축열조 사용으로 인해 ‘심야전력 을(II)’이 적용된다. 한국전력공사 선택공급약관⁶⁵⁾은 전기사업법 제49조 제2호(기금의 사용 - 전력수요 관리사업) 및 에너지이용 합리화법 제9조(에너지공급자의 수요관리 투자계획)의 규정에 의해 ‘전력수요관리사업을 효율적으로 시행하는 데 필요한 사항을 정하고 있으며 심야전력 요금

63) 냉난방 시스템 사용자 입장에서 상시 원하는 온도의 냉방이 쉽지 않은 점은 기존 에어컨 냉방을 선호하게 만드는 요소라 판단된다. 이와 관련된 문제는 본 연구 제5장 환경편익 분석 시나리오 설계에서 보다 상세히 다루고자 한다.

64) 따라서 지열냉난방 시스템이 상대적으로 극단적 기후환경을 지닌 장소에 설치될 경우 월별 냉난방 부하 차이가 있을 수 있으며, 에너지비용에 다소 차이가 있을 수 있다는 점을 추측할 수 있다.

65) 한국전력공사(2022.10). pp.1~6 내용 참조

및 기타 공급조건, 부하관리기기 및 고효율 기기를 설치하는 경우 등에 적용하고 있다. 이 중 ‘심야전력’은 심야전력기기를 설치해 기타시간대(매일 22:00~익일 8:00)에 필요한 열에너지 및 전기에너지를 심야시간대에 생산·저장하기 위한 전력을 의미하며⁶⁶⁾, ‘심야전력기기’는 축열식 난방·온수기기 또는 축열식 냉난방설비 및 ESS식 냉난방설비를 지칭한다⁶⁷⁾. 본 연구의 분석 대상인 지열냉난방 시스템은 히트펌프와 축열조(20kW 이상, 24시간 전기 사용)를 포함하고 있으므로 냉난방에 소요된 전력에 대해 ‘심야전력 을(Ⅱ)⁶⁸⁾’이 적용된다⁶⁹⁾. ‘심야전력 을(Ⅱ)’은 크게 기본요금과 전력량요금으로 구성되며, 기본요금은 7,160원에 월간 총 사용전력량 중 기타시간대 사용전력량 비율을 곱한 값으로 부과된다. 전력량 요금은 심야시간대(23:00~9:00)에 대해 겨울철(11월~익년 2월)은 62.2원/kWh의 요금이 부과되며 기타계절은 45.1원/kWh의 요금이 부과된다. 기타시간대 전력량 요금은 88.3원/kWh 수준이다(〈표 4-7〉 참조).

〈표 4-7〉 한전 ‘심야전력 을(Ⅱ)’ 전기요금표 (2022.4.1. 기준)

기본요금 (원/kW)	전력량 요금 (원/kWh)	
7,160원 × (기타시간대 사용전력량 / 월간 총 사용전력량)	심야시간대 (23:00~9:00)	겨울철: 62.2 기타계절: 45.1
	기타시간대 (9:00~23:00)	88.3

자료: 한전 사이버지점 홈페이지(<https://cyber.kepco.co.kr/dkepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00107.jsp>, 접속일자: 2022.10.10)

② 전통냉난방 시스템(도시가스 보일러 + 에어컨)

가스보일러와 에어컨으로 구성된 전통냉난방 시스템의 경우 도시가스와 전기를 난방연료로 소비한다. 한국전력 기본공급약관에 의거, 분석 대상 아파트는 표준전압 3,000V 이상 고객에 해당해 ‘주택용 전력(고압) 요금제’를 적용 받는다⁷⁰⁾. 아울러 본 연구에서는 전통냉난방 시스템 전력소비량 산출의 편의를 위해 냉난방 외 월 전기 사용량은 하계(7~8월)에 대해서는 300kWh, 기타계절(1~6월, 9~12월)은 200kWh로 가정하였다. 주택용 전력(고압) 요금제 구조는 〈표 4-8〉과 같다.

66) 한국전력공사(2022.10). p.3 내용 참조

67) 한국전력공사(2022.10). p.4 내용 참조

68) 한국전력공사(2022.10). p.6 내용 참조

69) 한전 전기요금표에 따르면 심야전력은 한전이 인정하는 심야전력 이용기기를 설치해 전력사용이 적은 심야(23:00~9:00)에 열, 온수, 또는 열을 생산, 저장하였다가 하루 종일 난방, 급탕 또는 냉방에 이용하는 경우에 적용된다. 본 연구의 지열냉난방 시스템은 축열조를 설치하여 냉난방에 이용하므로 심야전력 요금제를 적용받을 수 있는 요건을 갖추었다.

70) 한국전력공사(2022.10.1). p.39 내용 참조

〈표 4-8〉 한전 주택용 전력(고압) 전기요금표 (2022.4.1. 기준)

계절 구분	구간	기본요금(원/호)	전력량 요금(원/kWh)
하계 (7~8월)	① 300kWh 이하	730	78.2
	② 301~450kWh	1,260	147.2
	③ 450kWh 초과	6,060	215.2
계절 구분	구간	기본요금(원/호)	전력량 요금(원/kWh)
기타계절 (1~6월, 9~12월)	① 200kWh 이하	730	78.2
	② 201~400kWh	1,260	147.2
	③ 400kWh 초과	6,060	215.2

자료: 한전 사이버지점 홈페이지(<https://cyber.kepco.co.kr/kepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00101.jsp>, 접속일자: 2022.10.10)

한편 난방용 연료인 도시가스에 대해서는 전기요금 적용 시점(2022.4.1)과 일치시켜 도시가스협회 부산광역시 요금(2022.4.1. 조정분)인 15.5704원/MJ을 적용한다. LNG 도입단가 변동에 따라 발전단가와 전기요금도 변동해야 하므로 특정 전기요금 수준에 상응하는 LNG 도입단가와 소매요금을 적용하면 이상적일 것이다. 그러나 국내 전기요금은 연료비 연동 기반이 확립되었음에도⁷¹⁾ 국민경제와 산업에 미치는 영향 등을 고려해 전기요금 조정, 특히 인상에 보수적으로 접근하는 경향이 있다. 아울러 LNG 도입단가가 도시가스 소매요금에 영향을 주기까지의 시차를 명확히 특정할 수 없는 한계도 있으므로 본 연구는 소비자 관점에서 동일한 시점(2022.4.1)의 전기요금과 도시가스 소매요금을 적용하였다. 또한 2020년 3월 콘덴싱 보일러 의무화 조건에 따라 한국에너지공단 효율등급제도의 가정용 가스보일러 주요 제품별 열효율 실적인 92.3%를 적용한다(〈표 4-9〉 참조).

〈표 4-9〉 국내 주요 가스보일러 열효율 실적

제조사	모델	가격(천원)
귀뚜라미	거꾸로 ECO 콘덴싱	92.2
경동나비엔	NCB353-18K(LNG, FF)	92.2
린나이	RC600-27KF	92.6
대성 쉘텍	DNC-18K	92.5
평균		92.3

자료: 한국에너지공단 효율등급제도 가정용 가스보일러 자료(https://eep.energy.or.kr/certification/certi_list_149.aspx, 자료추출일: 2022.9.15.)

71) 산업통상자원부(2020.12.17). pp.1~3 내용 참조

1.4.3. 냉난방 방식별 월 에너지비용 산출

① 지열냉난방 시스템

분석 대상 아파트 전체 가구에 대한 지열냉난방 시스템 심야전력 소비량에 대해 살펴보면⁷²⁾, 난방기(1~4월, 10~12월) 월평균 심야전력 소비량은 약 12,533kWh 수준 이었고 냉방기(5~9월) 월평균 심야전력 소비량은 18,307kWh 수준이었다. 냉방을 위한 지열원 히트펌프 전력소비량이 난방을 위한 히트펌프 전력소비량 대비 약 46.1% 더 높게 나타난 셈이다. 이하에서 에어컨의 냉방철 전력소비량보다 얼마나 적은지를 살펴보면 기존 에어컨 냉방방식 대비 에너지소비효율 측면에서의 경쟁력을 가늠할 수 있을 것이다.

〈표 4-10〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 월별 전력소비 세부 분류

(단위: kWh)

월	심야 총전력량	심야 야간전력량	심야 주간전력량
1월	26,958	16,954	10,004
2월	17,037	13,096	3,941
3월	9,640	9,640	·
4월	4,092	4,092	·
5월	1,378	1,378	·
6월	12,316	8,830	3,486
7월	35,935	17,891	18,044
8월	35,259	18,318	16,941
9월	6,646	5,295	1,352
10월	6,334	6,334	·
11월	6,825	6,825	·
12월	16,845	13,318	3,527
합계	179,265	121,971	57,295

주: 방냉펌프 사용시간 = 월별 냉난방부하량(kWh)/냉난방 담당부하(kW)

자료: 실적치를 바탕으로 저자 직접 작성

72) 가구별 냉난방 전력소비량을 감안할 때 지난 2019년 동일한 감전동 아파트 지열냉난방 시스템에 대해 경제적 평가를 진행한 조성현·김현제(2019)의 경우 아파트 가구(세대)를 포함한 건물 전체(상가, 공용 부문 등 포함) 냉난방 소비전력을 대상으로 경제성을 평가한 것으로 추정된다. 그러나 본 연구는 같은 아파트의 가구 냉난방(급탕 제외)만을 대상으로 별도 추정한 냉난방 부하량을 토대로 지열냉난방 시스템의 에너지비용을 추정한다.

심야전력량 전체에서 기타시간대 전력소비량은 주간 히트펌프 전력사용량에 해당하며, 본 연구에서는 이를 ‘심야 주간전력량’으로 약칭한다. 반대로 심야시간대 전력소비량은 야간 히트펌프 전력사용량에 해당하고, 본 연구는 이를 ‘심야 야간전력량’으로 지칭한다. 1년 동안의 전체 심야전력 소비량(179,265kWh) 중 심야 야간전력량이 차지하는 비중은 약 68%였으며, 심야 주간전력량이 차지하는 비중은 약 32% 수준이었다(〈표 4-10〉 참조).

〈표 4-11〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 에너지비용(전기요금) 산정

(단위: 천원)

월	심야 기본요금	심야 사용요금		합계
		야간	주간	
1월	689.1	1,054.6	883.3	2,627
2월	429.6	814.6	348.0	1,592
3월	184.2	434.8	·	619
4월	184.2	184.6	·	369
5월	184.2	62.1	·	246
6월	525.7	398.2	307.8	1,232
7월	932.5	806.9	1,593.3	3,333
8월	892.3	826.1	1,495.9	3,214
9월	377.7	238.8	119.4	736
10월	184.2	285.6	·	470
11월	184.2	424.5	·	609
12월	388.8	828.4	311.4	1,529
합계	5,157	6,359	5,059	16,575 (59.8)

주: (·)는 세대당 연간 에너지비용 부담액

자료: 실적치를 바탕으로 요금제(주택용 전력(고압), 심야전력)

한편 선택공급약관에 의거, 축열조 사용에 따라 히트펌프에 대해서는 심야전기요금제를 적용한다. 따라서 심야전기요금(기본요금 + 전력량 요금)은 〈표 4-7〉의 ‘심야전력 을(II)’ 부과기준에 따라 심야시간대와 기타시간대 히트펌프 전기소비량으로 나누어 〈표 4-11〉과 같이 산정된다. 종합해보면 분석대상 아파트의 지열냉난방 시스템은 전체 가구에 대해 난방철 총 7,814천원, 냉방철 총 8,761천원 수준의 에너지비용(전기요금)을 발생시키는 것을 확인할 수 있다(세대당 年 냉난방 부문 에너지비용 부담액은 약 59.8천원).

② 전통냉난방 시스템(도시가스 보일러 + 에어컨)

지열냉난방 시스템을 적용했을 때의 월간 냉난방 수요에 대해 전통냉난방 시스템을 적용할 경우 냉방기(5~9월)에는 에어컨 가동에 따른 전력소비가 발생하고 난방기(1~4월, 10~12월)에는 도시가스 난방에 따른 주택난방용 도시가스 소비가 발생할 것이다. 전력소비에 대해서는 앞서 상술한 바와 같이 주택용 전력(고압) 전기요금제를 적용하고 주택난방용 도시가스 소비에 대해서는 도시가스협회 부산광역시 요금(2022.4.1. 조정분)을 적용하였다.

〈표 4-12〉 전통냉난방 시스템 적용 시 에너지비용 산정

월	전력량 (kWh)	도시가스 소비량 (MJ)	기본요금 (천원)	전력량요금 (천원)	가스요금 (천원)	합계 (천원)
1월	·	405,847	·	·	6,319	6,319
2월	·	256,486	·	·	3,994	3,994
3월	·	145,132	·	·	2,260	2,260
4월	·	61,609	·	·	959	959
5월	1,394	·	349	205	·	554
6월	12,455	·	349	1,833	·	2,182
7월	36,342	·	349	5,349	·	5,698
8월	35,659	·	349	5,249	·	5,598
9월	6,722	·	349	989	·	1,338
10월	·	95,349	·	·	1,485	1,485
11월	·	102,748	·	·	1,600	1,600
12월	·	253,601	·	·	3,949	3,949
합계	92,572	1,320,772	1,745	13,625	20,566	35,936 (129.7)

주: ①1kWh = 3.6MJ 적용, ②(·)는 세대당 연간 에너지비용 부담액, ③도시가스는 난방용 도시가스만 해당(급탕 제외)
자료: 저자 직접 작성

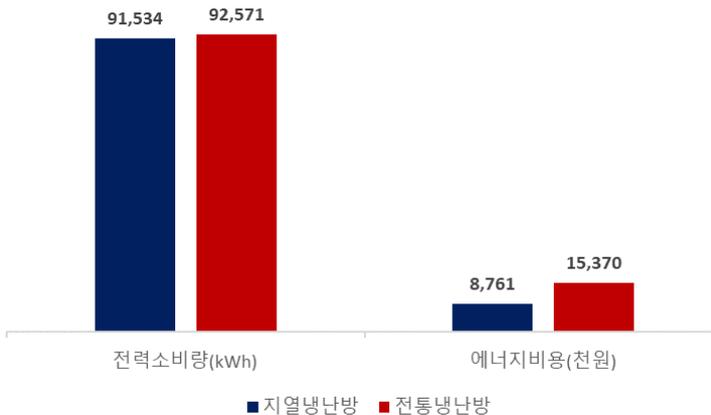
먼저 본 연구는 5~9월 월별 냉방부하(〈표 4-6〉 참조)에 맞는 에어컨 전력소비량 산정을 위해 시중 타워형 및 천장형 에어컨 중 증소형 면적 세대에 적합한 기종을 고려, 약 3.0의 COP를 적용하였다⁷³⁾. 도시가스 소비량은 분석 대상 아파트의 월별 냉난방 부하량에 대해 전력량-열량 환산계수(3.6)⁷⁴⁾ 적용 후 〈표 4-9〉의 가스보일러

73) 2022년 기준 LG전자 휘센 에어컨의 경우 냉난방 절전형 및 한랭지 강화형 모델을 기준으로 COP는 2.6~3.6 수준에서 형성된다. 본 연구는 부산 지역 15~20평형대 소형 아파트에 도입 가능한 기종을 중심으로(고급형 모델 제외) 약 3.0의 COP를 적용한다(자세한 내용은 LG전자(2022), pp.256~265 참조).

효율로 보정하여 추산하였다. 이에 따라 분석 대상 아파트의 냉방기 5개월 간 에어컨의 전력소비량은 총 92,572kWh, 난방용 도시가스(LNG) 소비량은 1,320,772MJ 수준일 것으로 추정되었다.

주택용 전력(고압) 전기요금제와 도시가스협회 부산광역시 주택난방 요금(2022.4.1. 조정분)을 적용해 월별 에너지비용을 산정해보면 냉방기 에어컨 전력소비량에 대해 총 15,370천원의 전기요금이 발생하고 난방기 도시가스 사용에 대해 총 20,566천원의 가스요금이 발생한다. 즉 분석 대상 아파트에 전통냉난방 시스템을 적용하면 연간 약 35,936천원의 에너지비용이 유발되어 세대당 연간 약 129.7천원의 부담이 발생하는 것으로 분석된다. 5~9월 냉방에 소요되는 전기소비량을 보면 전통냉난방 시스템이 약 92,571kWh의 전력을 소비하고 지열냉난방 시스템이 약 91,534kWh의 전력을 소비하는 것으로 나타났다. 전통냉난방 시스템에서 냉방철 약 1,037kWh 초과소비가 발생하는 셈이며, 이는 전통냉난방 시스템 이용 시(약 15,370천원) 지열냉난방 시스템 이용(약 8,761천원) 대비 연간 약 6,609천원의 에너지비용이 더 발생하는 결과로 이어진다(그림 4-1) 참조).

[그림 4-1] 냉방철(5~9월) 전력소비량 및 에너지비용 차이 (지열 vs. 전통)



자료: 저자 직접 작성

74) 1kWh = 3.6MJ 적용

2. 냉난방 시스템 경제성 분석 방법론

2.1. 냉난방 시스템 경제성 분석의 주요 방법론 소개 75)

지열냉난방 시스템의 경제성 분석에는 다양한 회계학적 분석 방법론이 활용되어 왔다. 대표적인 분석 방법에는 초기투자비법(Initial Investment Cost), 투자이익률법(Savings to Investment Ratio), 내부수익률법(Internal Rate of Return), 회수기간법(Payback Period) 및 생애주기비용 분석법(Life Cycle Cost, LCC) 등이 있다.

먼저 ‘초기투자비법’은 초기 투자비만을 비교해 대안을 선택하는 경제성 평가 방법론으로, 운영비가 별도로 발생하지 않는 경우에 대해 주로 사용된다. ‘투자이익률법’은 각종 대안에 대해 투자금액 당 이익률을 산출하여 투자금액 효율성을 판단하고 이익률의 대소로 대안 간 우열을 판별하는 경제성 평가 방법론이다. ‘내부수익률법’은 발생된 이익의 현재가치(Net Present Value, NPV)가 초기 투자액과 같아지는 할인율을 내부수익률이라 정의하고 대안별 내부수익률의 대소를 비교해 안을 선택하는 방법론이다. ‘회수기간법’은 여러 대안들이 창출하는 이익에 따라 투자금액의 회수기간을 정하고, 회수기간의 정도를 고려해 경제성을 판단하는 방법론이다. 마지막 ‘생애주기비용 분석법’은 경제성 분석 대상물의 초기 도입단계부터 사용 후 폐기까지의 모든 비용⁷⁶⁾을 일정 시점의 가격으로 환산해⁷⁷⁾ 가장 비용이 적게 소요되는 안을 선택하는 방법론이다.

과거에는 초기투자비법으로 특정 사업의 경제성 평가를 많이 진행하였으나 비용 정보가 너무 단순해 경제성 및 사업성 예측에 한계가 있었다. 내부수익률법과 투자수익률법은 초기투자비법 대비 정교한 분석이 가능한 장점이 있지만 계산방법이 어려워 직관적인 이해가 쉽지 않은 단점도 있다. 최근 경제성 분석에서는 대안의 진행과정과 상품의 감가(減價)까지 동시에 고려한 회수기간법 및 생애주기비용 분석법이 다양하게 활용되고 있다. 특히 지열냉난방 경제성 분석에 생애주기비용 분석법이 널리 적용되고 있는 바, 본 연구에서는 다양한 선행연구(〈표 4-13〉 참조)의 지열냉난방 생애주기비용 분석 방법론을 참고해 집단 주거용 건물에 대한 지열냉난방 비용 정보를 상향식으로 수집하여 전통냉난방 방식과의 비용흐름을 비교해보려 한다.

75) 냉난방 시스템 경제성 분석 방법론 개관 자료는 김진성·송성호·정교철·차장환(2015)의 pp.600~601을 요약

76) 초기투자비용, 에너지비용, 유지관리비용, 시설교체비용, 폐기비용 등

77) 물가상승률과 할인율을 적용해 적정 현재가치를 환산하는 것이다.

〈표 4-13〉 지열냉난방 시스템의 경제성 분석 선행연구 방법론 및 주요결과 요약

적용대상	논문	경제성 분석방법	분석 결과
사무실용 건물	임효재·송윤석·공형진·박성구 (2004)	생애주기비용 분석	<ul style="list-style-type: none"> 지열시스템의 총 비용이 대안 시스템 대비 32% 수준인 것으로 분석 대안 시스템의 에너지비용은 전체 운영비 중 93%, 지열시스템의 에너지비용은 38%
사회복지원	박성룡 (2006)	기존시스템과의 비용 비교 분석	<ul style="list-style-type: none"> 난방에너지 비용은 지열에너지 히트펌프를 활용 시 약 63.4% 절감효과 냉방에너지 비용은 약 30%의 절감효과 비용초기 설치비는 7년차에 회수
고등학교 신축 도서관	조정식·손병후 (2009)	생애주기비용 분석법과 회수기간법을 활용	<ul style="list-style-type: none"> 대안시스템 대비 지열원 열펌프시스템이 수명 기간 동안 순이익은 1,034백만 원, 내부수익률은 17.5%, 투자 회수기간은 4년
도서관	최창호 (2012)	생애주기비용 분석에 의한 기존 냉난방 시스템과의 비교함으로써 분석	<ul style="list-style-type: none"> 60년 후 18억 원 이상의 에너지 절약이 가능한 것으로 분석 초기투자비용은 5~7년차에서 회수
주거용 및 사무용 건물	나선익·강은철·이의준 (2014)	연간 총 비용을 대안 설비와 비교	<ul style="list-style-type: none"> 초기설비비용의 단순 투자회수기간은 10.7년으로 분석
온실	김진성·송성호·정교철·차장환 (2015)	생애주기비용 분석에 의한 냉난방의 4가지 방식을 비교 분석	<ul style="list-style-type: none"> 면세유와 농업용 전력을 사용한 경우, 화석연료 사용 시스템이 지열냉난방 시스템보다 1.9배~2.6배 정도 높 비면세유와 일반용전력을 사용하는 경우, 화석연료 사용 시스템이 지열냉난방시스템보다 1.5배~3.6배 정도 높게 나타남
농촌의 표준주택	조정홍·남유진 (2017)	생애주기비용 분석법과 ROI(Return on Investment) 분석	<ul style="list-style-type: none"> 경유보일러 대비 13년차에 초기투자비용 회수
복합기능 건물	강경우·신지현·김상현·조영흠 (2017)	기존시스템과 지열복합시스템과의 비교 분석	<ul style="list-style-type: none"> 기존시스템과 지열복합시스템의 초기투자비는 각각 3,367백만 원과 3,363백만 원 수준 기존시스템과 지열복합시스템의 연간운전동력은 각각 574.6TOE와 434.5TOE 지열복합시스템이 약 24%의 에너지절감
집단 주거시설 (아파트)	조성한·김현재 (2019)	생애주기비용 분석법과 회수기간법을 활용	<ul style="list-style-type: none"> 총 비용 측면에서 지열냉난방시스템이 대안 시스템보다 1,103,347천원 적게 지출되는 것으로 분석 초기투자비용과 유지관리비용은 지열냉난방 시스템이 높게 측정되었으며, 에너지비용과 교체비용은 대안시스템이 높은 것으로 분석 지열냉난방시스템의 초기비용 회수는 11년

자료: 각 연구 주요 연구결과를 저자 직접 요약

2.2. 생애주기비용(Life Cycle Cost) 분석 방법론

전술하였듯 생애주기비용 분석법(이하 LCC 분석법)은 분석 대안을 설정하고 대안 별 사업 및 설비의 생애주기 동안 모든 비용을 예측해 총합을 산정하여 비교·분석한다. 주요 비용정보는 초기투자비용, 에너지비용, 유지관리비용, 시설교체비용으로 구분되며, 설비 또는 사업의 생애주기는 20~30년 또는 그 이상의 장기인 사례가 많아 초기 투자비 투입 이후 발생하는 비용은 투자 시점의 현재가치(Present Value, PV)로 환산 후 총합을 구한다. 생애주기 전체의 총 비용(LCC)의 현재가치(PV)는 다음과 같다.

$$PV(LCC) = I + \sum_{i=1}^n \frac{(1+p)^i}{(1+r)^i} (E_i + M_i + R_i)$$

I : 초기투자비용, E_i : i 년도의 에너지비용, M_i : i 년도의 유지관리비용

R_i : i 년도의 시설교체비용, p : 생애주기 동안의 물가상승률

r : 현재가치를 산출하기 위한 할인율, n : 생애주기

앞서 설명한 주요 비용변수를 요약하면 다음과 같다. 먼저 지열냉난방 시스템의 초기투자비용은 순수 지열공사 비용과 지열 외 부대시설 공사 비용으로 구분되며, 순수지열 공사에는 히트펌프, 심정펌프, 기타지열장비, 지열우물공, 트렌치배관, 지열 자동제어 설치가 포함되어 있다. 지열 외 부대시설 공사에는 축열조, 축열장비, 실내 기계실 장비, 실내장비 배관, 실내자동제어장치 관련 공사가 포함된다(〈표 4-1〉 참조). 한편 시설교체비용은 히트펌프, 심정펌프, 실내장비 배관(바닥코일+FCU) 등의 주요 설비의 수명에 따라 생애주기 동안 교체되는 비용을 의미한다. 지열냉난방 시스템의 에너지비용은 시스템 가동에 소요되는 모든 전력소비에 대한 요금에 해당한다(〈표 4-11〉 참조). 냉난방 시스템 유지관리비용에는 〈표 4-4〉와 같이 일반관리비, 운영 인건비, 점검비가 기본적으로 포함되며, 지열냉난방 시스템의 경우 고유 유지관리 비용으로 열교환기 점검과 지하수 영향조사 비용이 추가된다. 이제 앞서 상세하게 살펴본 지열냉난방 및 전통냉난방 시스템의 비용 정보와 LCC 분석법을 적용한 경제성 분석 결과를 살펴보도록 하자.

3. 냉난방 방식별 경제성 분석 결과

3.1. 경제성 분석 공통 전제

3.1.1. 비용 정보의 현재가치화를 위한 전제(물가상승률 및 할인율)

전술한 LCC 분석 방법론에서 제시한 바와 같이, 비용 정보의 적절한 현재가치화를 위해서는 물가상승률과 할인율에 대한 전제가 선행되어야 한다. 먼저 물가상승률의 경우 통계청의 2011~2021년 소비자물가상승률 연평균 값인 1.57%를 적용하였다. 할인율은 KDI(2021)⁷⁸⁾의 방식을 채택, 국내 예비타당성조사 등에서 널리 활용되고 있는 ‘사회적 할인율’ 4.5%를 적용하였다⁷⁹⁾. 예비타당성조사의 사회적 또는 재무적 할인율 4.5%는 신재생에너지 설비 경제성 분석에서 널리 채택되고 있는 조건이며, 조성한김현제(2019)⁸⁰⁾에서도 동일한 수준의 할인율을 경제성 분석에 적용한 바 있다. 마지막으로 냉난방 시스템(지열냉난방 및 전통냉난방)의 운영기간은 「도시 및 주거환경정비법 시행령」 제2조⁸¹⁾의 노후-불량건축물 범위 조건(20~30년)과 국내 아파트 평균 수명에 맞추어 30년으로 설정하였다⁸²⁾. 냉난방 시스템 운영기간에 대한 가정은 조성한김현제(2019)⁸³⁾에도 동일하게 적용되어 있다.

3.1.2. 에너지가격 전제

지열냉난방 시스템의 경제성 평가는 화석연료를 이용한 난방과 에어컨 냉방으로 구성된 전통냉난방 시스템과의 비용 비교로 진행되는 경우가 많다. 또한 2019년 통계청 아파트주거환경통계⁸⁴⁾에 따르면 국내 아파트 난방 부문에서는 여전히 도시가

78) KDI(2021). pp.185~186 내용 참조

79) 사업 특성에 맞춘 할인율의 도출 및 적용도 유의미할 수 있으나 본 연구는 지열냉난방 시스템의 환경편익에 초점을 맞춘 연구며 국내 지열이용에 대한 별도의 할인율 도출을 위한 자료가 충분하지 않은 점 등을 감안해 예비타당성조사와 선행연구가 준용한 사회적 또는 재무적 할인율 4.5%를 선택하였다.

80) 조성한김현제(2019). p.253 내용 참조

81) 「도시 및 주거환경정비법 시행령」 제2조(노후-불량건축물의 범위) 제3항 내용 참조

82) The Science Times. 2021.2.16. 아파트는 언제 놓고 어떻게 변해가나?. <https://www.sciencetimes.co.kr/news/%EC%95%84%ED%8C%8C%ED%8A%B8%EB%8A%94-%EC%96%B8%EC%A0%9C-%EB%8A%99%EA%B3%A0-%EC%96%B4%EB%96%BB%EA%B2%8C-%EB%B3%80%ED%95%B4%EA%B0%80%EB%82%98> (검색일: 2022.10.2)

83) 조성한김현제(2019). p.253 내용 참조

84) 통계청 아파트주거환경통계(https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_756&vw_cd=MT_ZTITL&list_id=11_4&scrd=8&seqNo=&lang_mode=ko&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTITL&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do, 자료추출일: 2022.10.7)

스 난방이 52.4%로 과반을 차지하고 있고 이 경우 에어컨 냉방을 동반할 가능성이 높다. 이에 본 연구는 지열을 이용한 신재생열 기반 냉난방 시스템이 전통냉난방 시스템을 대체하는 구도로 경제성 및 환경성을 평가하는 것이 정책적 시사점 도출에 용이하다고 판단하였다.

앞서 살펴본 바와 같이 지열냉난방 시스템은 전통냉난방 시스템 대비 설비구성이 상이해 초기투자비, 시설교체비용, 유지관리비 측면에서 근본적인 차이가 존재하며, 기술의 난이도와 성숙도를 고려할 때 초기투자 및 설비관련 비용(시설교체 및 유지비 포함)이 전통냉난방 시스템 대비 비싸다. 그러나 냉난방 에너지소비 측면에서 살펴보면 두 시스템 모두 냉방기에는 전기를 공통적으로 소비하며, 난방기에만 소비 에너지가 다르다. 즉 본 연구의 전통냉난방 시스템에서는 도시가스를 소비하는 반면 지열냉난방 시스템은 히트펌프 사용에 따라 전기를 소비하는 것이다. 다만 축열조를 사용하는 지열냉난방 설비 특성 상 적용되는 전기요금제는 상이하다는 특징이 있다.

제3장 미국 사례에서 살펴보았듯 지열을 이용한 난방은 LNG 등 경쟁 난방연료의 가격에 의해 연간 에너지비용 부문에서의 경쟁력 확보 수준이 달라질 수 있다. 특히 유류 등 국제 화석연료 가격이 저렴할 경우 가스난방과 지열원 히트펌프를 이용한 난방의 에너지비용의 격차가 크게 줄어들 수도 있다. 따라서 본 연구는 먼저 2022년 10월 대비 상대적으로 낮은 2022년 4월의 전기요금과 부산지역 주택난방용 도시가스 소매요금을 ‘기준 에너지가격’으로 설정하였다. 그 다음 러-우크라이나 사태 장기화로 기준 에너지가격 대비 상향된 2022년 10월 에너지가격과 2011~2021년 기간 중 전기요금 수준과 주택난방용 도시가스 소매요금이 가장 낮았던 시기인 2021년 1월의 에너지가격을 각각 적용해 지열냉난방 및 전통냉난방 시스템의 경제성 분석의 설명력을 제고하였다. 국내 주택난방용 도시가스 소매요금의 경우 2022년 10월에는 동년 4월 대비 약 45.2% 인상된 값을 나타냈다. 반면 2011~2021년 기간의 국내 주택난방용 도시가스 소매요금 전국 최저값들 중 2020~2021년 요금이 약 14.2243원/MJ⁸⁵⁾로 가장 낮았고 전기요금은 2020년 한전전기요금 구입전력비가 약 45.6조⁸⁶⁾로 같은 기간 내 최저치를 기록했다(〈표 4-14〉 참조). 본 연구는 이러한 에너지가격 변동을 최대한 반영하려 하였으며, 에너지가격 수준별로 심야전

85) 도시가스협회 연도별 도시가스 요금표(<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 자료추출일: 2022.10.5) 중 2021년 1월 1일 기준 서울특별시 주택난방용 도시가스 소매요금에 해당

86) 한국전력공사(2016.12.1), p.1; 한국전력공사(2021.12.28), p.1 내용 참조

력 을(II) 및 주택용 전력(고압) 전기요금 변화와 주택난방용 도시가스 요금 변화를 정리하면 <표 4-15>~<표 4-17>과 같다.

<표 4-14> 2011~2021년 주택난방용 도시가스 소매요금 및 한전 구입전력비 변화

연도	주택난방용 도시가스 소매요금(원/MJ)	구입전력비(억 원)
2011	18.9357	391,536
2012	20.0750	456,586
2013	21.1549	455,071
2014	22.2053	470,046
2015	17.4919	434,242
2016	15.3614	434,170
2017	14.7572	468,441
2018	15.3449	522,216
2019	15.9347	516,298
2020	14.2243	455,757
2021	14.2243	565,811

주: 2021년 구입전력비는 예산기준(나머지 연도는 결산기준)

자료: ① 도시가스협회 연도별 도시가스 요금표(<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 자료추출일: 2022.10.5)

② 한국전력공사(2016.12.1) 및 한국전력공사(2021.12.28)의 p.1 구입전력비 자료

<표 4-15> 한전 '심야전력 을(II)' 전기요금 변화

기본요금 (원/kW)	전력량 요금 (원/kWh)				
	시간대 구분	기준('22.4.1)	상향('22.10.1)	하향('21.1.1)	
7,160원 × (기타시간대 사용전력량 / 월간 총 사용전력량)	심야시간대 (23:00~9:00)	겨울철	62.2	69.6 (11.9%)	57.3 (△7.9%)
		기타계절	45.1	52.5 (16.4%)	40.2 (△10.9%)
	기타시간대 (9:00~23:00)		88.3	95.7 (8.4%)	83.4 (△5.5%)

주: ()는 2022.4.1. 대비 변화율

자료: 한전 사이버지점 홈페이지(<https://cyber.kepco.co.kr/dkepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00107.jsp>, 접속일자: 2022.10.10)

〈표 4-16〉 한전 주택용 전력(고압) 전기요금 변화

계절 구분	구간	기본요금 (원/호)	전력량 요금(원/kWh)		
			기준 ('22.4.1)	상향 ('22.10.1)	하향 ('21.1.1)
하계 (7~8월)	① 300kWh 이하	730	78.2	85.6 (9.5%)	73.3 (△6.3%)
	② 301~450kWh	1,260	147.2	154.6 (5.0%)	142.3 (△3.3%)
	③ 450kWh 초과	6,060	215.2	222.9 (3.6%)	210.6 (△2.1%)

계절 구분	구간	기본요금 (원/호)	전력량 요금(원/kWh)		
			기준 ('22.4.1)	상향 ('22.10.1)	하향 ('21.1.1)
기타계절 (1~6월, 9~12월)	① 200kWh 이하	730	78.2	85.6 (9.5%)	73.3 (△6.3%)
	② 201~400kWh	1,260	147.2	154.6 (5.0%)	142.3 (△3.3%)
	③ 400kWh 초과	6,060	215.2	222.9 (3.6%)	210.6 (△2.1%)

주: ()는 2022.4.1. 대비 변화율

자료: 한전 사이버지점 홈페이지(<https://cyber.kepco.co.kr/kepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEHP00101.jsp>, 접속일자: 2022.10.10)

〈표 4-17〉 주택난방용 도시가스 소매요금 변화

연도	기준 (2022.4.1)	상향 (2022.10.1)	하향 (2021.1.1)
원/MJ	15.5704	22.6096 (45.2%)	14.2243 (△8.6%)

주: ① ()는 2022.4.1. 대비 변화율

② 상향된 주택난방용 도시가스 소매요금은 해당 시기 강원 영동지역 소매요금

③ 하향된 주택난방용 도시가스 소매요금은 해당 시기 최저값인 서울특별시 소매요금

자료: 도시가스협회 연도별 도시가스 요금표(<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 자료추출일: 2022.10.5)

3.2. 지열냉난방 시스템 비용 현금흐름

3.2.1. 기준 에너지가격(2022.4.1. 전기요금)

지금까지 살펴본 지열냉난방 시스템의 초기투자비용, 에너지비용, 유지관리비용, 설비 교체주기 및 비용 등의 정보를 바탕으로 물가상승률(1.57%)과 사회적 할인율(4.5%), 설비 운영기간(30년) 그리고 '기준 에너지가격(2022.4.1)' 조건을 적용해 LCC 분석을 진행해보았다. 먼저 냉난방 시스템 간 비용의 상호 비교를 위해 지열냉난방 시스템 세부 설비별 교체주기에 따른 비용 발생을 반영, 30년 동안의 현금흐름을 〈표 4-18〉과 같이 작성해야 한다.

〈표 4-18〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (기준 에너지가격)

(단위: 천원)

연차	초기투자 비용	에너지 비용	유지관리 비용	시설교체 비용	비용 합계	현재가치 (NPV)
0	2,178,500	.	.	.	2,178,500	2,178,500
1	.	16,836	23,666	.	40,502	38,758
2	.	17,100	24,039	.	41,139	37,672
3	.	17,369	24,417	.	41,786	36,617
4	.	17,642	24,801	.	42,443	35,591
5	.	17,920	25,191	.	43,111	34,594
6	.	18,202	25,587	.	43,789	33,625
7	.	18,488	25,989	.	44,477	32,683
8	.	18,779	26,398	.	45,177	31,768
9	.	19,074	26,813	.	45,887	30,878
10	.	19,374	27,235	931,600	978,209	629,896
11	.	19,679	27,663	.	47,342	29,172
12	.	19,988	28,098	.	48,087	28,355
13	.	20,303	28,540	.	48,843	27,561
14	.	20,622	28,989	.	49,611	26,789
15	.	20,946	29,445	.	50,391	26,038
16	.	21,276	29,908	.	51,184	25,309
17	.	21,610	30,379	.	51,989	24,600
18	.	21,950	30,856	.	52,807	23,911
19	.	22,295	31,342	.	53,637	23,241
20	.	22,646	31,835	1,088,932	1,143,412	474,108
21	.	23,002	32,335	.	55,337	21,957
22	.	23,364	32,844	.	56,208	21,342
23	.	23,731	33,360	.	57,092	20,744
24	.	24,105	33,885	.	57,990	20,163
25	.	24,484	34,418	.	58,902	19,598
26	.	24,869	34,959	.	59,828	19,049
27	.	25,260	35,509	.	60,769	18,516
28	.	25,657	36,067	.	61,725	17,997
29	.	26,061	36,635	.	62,695	17,493
30	.	26,471	37,211	.	63,681	17,003
합계	2,178,500	639,104	898,414	2,020,532	5,736,550	4,023,529

자료: 조성한·김현제(2019) p.256의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

분석 대상 아파트 지열냉난방 시스템의 현금흐름을 살펴보면 초기투자비용은 <표 4-1>에서 도출한 바와 같이 약 2,178,500천원으로 반영된다. 기준 에너지가격(2022.4.1. 에너지가격) 전제 하에 30년 동안 지출된 전체 가구 냉난방에 대한 에너지비용 현금흐름의 합계는 약 639,104천원으로 추산되며, 유지관리비 현금흐름의 총합은 약 898,414천원으로 도출되었다. 한편 세부 설비(히트펌프, 심정펌프, 실내기계, 배관 등 설계수명 10년 부품) 교체비용의 30년 현금흐름은 총 2,020,532천원으로 반영되었다. 따라서 LCC 분석법에 따라 상기 주요 비용(초기투자비용, 에너지비용, 유지관리비용, 설비교체비용)의 현금흐름 총합(약 5,736,550천원)을 지열냉난방 시스템 관련 비용의 총합으로 이해할 수 있겠다.

지열냉난방 시스템의 주요 비용구성요소에 대한 현금흐름을 현재가치(PV)로 환산해보면 초기투자비용은 약 2,178,500천원, 전체 가구 냉난방에 대한 에너지비용 총합의 현재가치는 약 329,889천원, 그리고 유지관리비용 총합의 현재가치는 약 463,739천원으로 추정된다. 30년 기간 동안 교체비용 총합의 현재가치는 약 1,051,401천원 수준이었다. 결국 분석 대상 아파트 지열냉난방 시스템의 30년 운영에 따른 총 비용(LCC)은 현재가치 기준으로 약 4,023,529천원으로 평가된다.

3.2.2. 에너지가격 상향(2022.10.1. 전기요금)

최근 러-우크라이나 사태의 장기화 및 국제 에너지공급망 교란으로 국제 에너지 가격의 변동성이 커진 상황이다. 특히 유가 및 LNG 가격 급등으로 한전의 연료비 정산 부담이 그 어느 때보다 커졌으며, 한전의 급격한 적자누적과 자본잠식을 막기 위한 전기요금 인상은 불가피한 실정이다⁸⁷⁾. 이에 정부와 한전은 2022년 10월 1일자로 전기요금 인상을 전격 공시하였고⁸⁸⁾, 본 연구는 이를 반영해 기준 에너지가격(2022.4.1) 대비 전기요금이 인상되었을 때 지열냉난방 시스템의 현금흐름을 살펴 보았다. 따라서 2022년 10월 1일자 전기요금 ‘심야전력 을(II)’에서 심야시간대 전력량요금은 2022년 4월 1일 대비 약 11.9~16.4% 상승했고 기타시간대 전력량요금은 약 8.4% 상승했다. 또한 ‘주택용 전력(고압)’의 전력량요금은 약 3.6~9.5% 인상된 것으로 나타났다(<표 4-15> 및 <표 4-16> 참조).

87) 한겨레(2022.9.30). ‘전기도시가스요금 10월부터 가구당 2,270원5,500원 인상’. <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1060851.html> (검색일 : 2022.10.3)

88) 산업통상자원부(2022.9.23). pp.1~2 내용 참조

〈표 4-19〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 상향)

(단위: 천원)

연차	에너지비용		총 비용(에너지가격 상향 반영)	
	기준 에너지가격(22.4)	에너지가격 상향(22.10)	비용 합계	현재가치(NPV)
0	.	.	2,178,500	2,178,500
1	16,836	18,183	41,849	40,047
2	17,100	18,469	42,508	38,926
3	17,369	18,759	43,176	37,835
4	17,642	19,054	43,855	36,775
5	17,920	19,354	44,545	35,745
6	18,202	19,659	45,245	34,744
7	18,488	19,968	45,957	33,771
8	18,779	20,282	46,680	32,825
9	19,074	20,601	47,414	31,905
10	19,374	20,925	979,760	630,894
11	19,679	21,254	48,917	30,143
12	19,988	21,588	49,686	29,298
13	20,303	21,928	50,468	28,478
14	20,622	22,272	51,262	27,680
15	20,946	22,623	52,068	26,905
16	21,276	22,979	52,887	26,151
17	21,610	23,340	53,718	25,418
18	21,950	23,707	54,563	24,706
19	22,295	24,080	55,421	24,014
20	22,646	24,459	1,145,225	474,859
21	23,002	24,843	57,178	22,688
22	23,364	25,234	58,078	22,052
23	23,731	25,631	58,991	21,434
24	24,105	26,034	59,919	20,834
25	24,484	26,443	60,861	20,250
26	24,869	26,859	61,818	19,683
27	25,260	27,282	62,791	19,132
28	25,657	27,711	63,778	18,596
29	26,061	28,147	64,781	18,075
30	26,471	28,589	65,800	17,569
합계	639,104 (329,889)	690,255 (356,292)	5,787,700	4,049,931

주: ()는 에너지비용 총합의 현재가치(PV)

자료: 조성한·김현제(2019) p.256의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

최근 에너지가격 급등 효과(2022.10.1. 에너지가격)를 반영할 경우 전력만을 소비하는 지열냉난방 시스템의 에너지비용 및 총 비용의 현금흐름은 <표 4-19>과 같이 작성된다. 30년 운영 기간 동안 지열냉난방 시스템 총 에너지비용의 현재가치는 356,292천원으로 급등 전 기준 에너지가격(2022.4.1)을 적용했을 때(329,889천원) 대비 약 8% 증가한 값을 보였다. 에너지가격 상향 시 지열냉난방 시스템 총 비용의 현재가치는 약 4,049,931천원 수준으로 추정되는데, 8%의 가구 냉난방 에너지비용 증가는 0.7%의 총 비용 증가로 이어진 셈이다.

3.2.3. 에너지가격 하향(2021.1.1. 전기요금)

만약 에너지가격이 2022년 4월보다도 하방 안정적이라면 지열냉난방 시스템의 에너지비용에는 어떤 변화가 있을까? 이를 살펴보기 위해 본 연구는 2022년 4월 대비 안정적인 에너지가격을 선택해 현금흐름을 확인해 볼 필요가 있다. 본 연구에서는 기준 에너지가격(2022.4.1) 대비 상대적으로 안정적인 에너지가격으로 2021년 1월의 심야 및 주택용 전기요금 수준을 적용(<표 4-15> 및 <표 4-16>), 지열냉난방 시스템의 가구 냉난방 에너지비용 변화를 살펴보았다.

2021년 1월 1일자 전기요금 심야전력 을(II)에서 심야시간대 전력량요금은 2022년 4월 1일 대비 약 7.9~10.9%, 기타시간대 전력량요금은 약 5.5% 가량 낮다. 아울러 2022년 1월 1일자 주택용 전력(고압)의 전력량요금은 2022년 4월 1일 대비 약 2.1~6.3% 낮다. 기준 에너지가격(2022.4.1)보다 상대적으로 안정적인 전기요금(2021.1.1)을 적용했을 때 지열냉난방 시스템의 LCC 현금흐름은 <표 4-20>과 같다.

2021년 1월 1일자의 안정적 에너지가격을 적용할 때 30년 지열냉난방 시스템 운영 시 가구 전체 냉난방으로 발생하는 총 에너지비용의 현재가치는 약 312,407천원으로 추정된다. 기준 에너지가격(2022.4.1)을 적용했을 경우 가구 전체 냉난방에 대한 총 에너지비용의 현재가치(329,889천원) 대비 약 5.3% 낮은 수준이다. 상대적으로 안정적인 에너지가격 적용에 따른 5.3%의 에너지비용 감소는 지열냉난방 시스템의 총 비용(현재가치 기준)에서 약 0.4%의 감소로 이어진다(4,023,529천원 → 4,006,046천원).

〈표 4-20〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 하향)

(단위: 천원)

연차	에너지비용		총 비용(에너지가격 하향 반영)	
	기준 에너지가격(22.4)	에너지가격 하향(21.1)	비용 합계	현재가치(NPV)
0	.	.	2,178,500	2,178,500
1	16,836	15,943	39,610	37,904
2	17,100	16,194	40,233	36,842
3	17,369	16,449	40,866	35,810
4	17,642	16,707	41,508	34,807
5	17,920	16,970	42,161	33,832
6	18,202	17,237	42,824	32,884
7	18,488	17,508	43,498	31,963
8	18,779	17,784	44,182	31,068
9	19,074	18,063	44,877	30,198
10	19,374	18,347	977,182	629,235
11	19,679	18,636	46,299	28,530
12	19,988	18,929	47,027	27,730
13	20,303	19,227	47,767	26,954
14	20,622	19,529	48,518	26,199
15	20,946	19,836	49,281	25,465
16	21,276	20,148	50,056	24,751
17	21,610	20,465	50,844	24,058
18	21,950	20,787	51,643	23,384
19	22,295	21,114	52,455	22,729
20	22,646	21,446	1,142,212	473,610
21	23,002	21,783	54,118	21,473
22	23,364	22,126	54,970	20,872
23	23,731	22,474	55,834	20,287
24	24,105	22,827	56,712	19,719
25	24,484	23,186	57,604	19,167
26	24,869	23,551	58,510	18,630
27	25,260	23,921	59,430	18,108
28	25,657	24,298	60,365	17,601
29	26,061	24,680	61,314	17,108
30	26,471	25,068	62,279	16,628
합계	639,104 (329,889)	605,234 (312,407)	5,702,680	4,006,046

주: ()는 에너지비용 총합의 현재가치(PV)

자료: 조성한·김현제(2019) p.256의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

3.3. 전통냉난방 시스템 비용 현금흐름

3.3.1. 기준 에너지가격(2022.4.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

지열냉난방 시스템 분석 방식과 동일한 에너지가격 변동(기준-상향-하향)을 가정할 때 기준 에너지가격(2022.4) 조건에서 전통냉난방 시스템의 30년 운영에 따른 LCC 현금흐름을 작성해보면 <표 4-21>과 같다. 먼저 도시가스 보일러와 에어컨을 이용한 전통냉난방 시스템의 초기투자비용은 약 1,521,308천원으로 추산되었다.

한편 전통냉난방 시스템을 30년간 운영할 경우 전체 가구 냉난방에 대한 에너지 비용 현금흐름의 총합은 약 1,321,693천원, 유지관리비용 현금흐름의 총합은 약 825,153천원으로 산출되었다. 마지막으로 30년 운영기간 동안 10년 주기로 교체가 필요한 도시가스 보일러, 에어컨, 실내배관에 대해 총 2,689,329천원의 교체비용이 발생한다.

따라서 전통냉난방 시스템 30년 운영의 LCC는 총 6,421,448천원 수준이다. 이를 현재가치화 해보면 총 4,061,888천원이며 주요 비용요소별로 현재가치를 세분화하면 초기투자비용 약 1,521,308천원, 시설교체비용 약 1,399,415천원, 에너지비용 약 715,242천원, 유지관리비용 약 425,923천원으로 구성되어 있음을 알 수 있다.

<표 4-21> 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (기준 에너지가격)

(단위: 천원)

연차	초기투자 비용	에너지 비용	유지관리 비용	시설교체 비용	비용 합계	현재가치 (NPV)
0	1,521,308	.	.	.	1,521,308	1,521,308
1	.	36,502	21,737	.	58,238	55,730
2	.	37,076	22,078	.	59,154	54,169
3	.	37,659	22,426	.	60,084	52,652
4	.	38,251	22,778	.	61,029	51,177
5	.	38,853	23,137	.	61,989	49,743
6	.	39,464	23,500	.	62,964	48,350
7	.	40,084	23,870	.	63,954	46,996
8	.	40,715	24,245	.	64,960	45,679
9	.	41,355	24,627	.	65,982	44,400
10	.	42,006	25,014	1,239,960	1,306,980	841,601

(단위: 천원)

연차	초기투자 비용	에너지 비용	유지관리 비용	시설교체 비용	비용 합계	현재가치 (NPV)
11	·	42,666	25,408	·	68,074	41,947
12	·	43,337	25,807	·	69,144	40,772
13	·	44,019	26,213	·	70,232	39,630
14	·	44,711	26,625	·	71,336	38,520
15	·	45,414	27,044	·	72,458	37,441
16	·	46,128	27,469	·	73,598	36,392
17	·	46,854	27,901	·	74,755	35,372
18	·	47,591	28,340	·	75,931	34,382
19	·	48,339	28,786	·	77,125	33,418
20	·	49,100	29,239	1,449,369	1,527,707	633,453
21	·	49,872	29,698	·	79,570	31,572
22	·	50,656	30,165	·	80,822	30,688
23	·	51,453	30,640	·	82,093	29,828
24	·	52,262	31,122	·	83,384	28,993
25	·	53,084	31,611	·	84,695	28,181
26	·	53,919	32,108	·	86,027	27,391
27	·	54,767	32,613	·	87,380	26,624
28	·	55,628	33,126	·	88,754	25,878
29	·	56,503	33,647	·	90,150	25,153
30	·	57,392	34,176	·	91,568	24,449
합계	1,521,308	1,385,658	825,153	2,689,329	6,421,448	4,061,888

자료: 조성한김현제(2019) p.257의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

3.3.2. 에너지가격 상향(2022.10.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

기준 에너지가격(2022.4.1)보다 높은 수준의 에너지가격(2022.10.1)을 적용 시 에너지가격 상승에 따른 가구 냉난방 에너지비용 부담은 상대적으로 저렴한 심야 전기요금제를 적용받는 지열냉난방 시스템보다 전통냉난방 시스템에서 더 크게 나타날 것으로 예상된다. 실제로 2022년 10월 주택난방용 도시가스 소매요금과 주택용 전기요금의 상승을 반영해보면 30년 간 전체 가구 냉난방에 대한 총 에너지비용은 현재가치 기준 약 913,917천원 수준으로 추정된다. 이는 2022년 4월 에너지가격을 적용했을 때 대비 약 27.8% 증가한 수치며(〈표 4-22〉 참조), 현재가치로 산출한 총

비용 관점에서는 약 4.9%의 비용증가로 이어졌다(4,061,888천원 → 4,260,563천원). 타 전기요금제 대비 상대적으로 저렴한 심야 전기요금제가 적용되는 지열냉난방 시스템이 동일한 수준의 에너지가격 인상에 대해 가구 냉난방 에너지비용에서 약 8%, 총 비용에서 약 0.7%의 증가를 보였던 점과 비교할 때, 도시가스 등 화석연료 의존도가 높은 전통냉난방 시스템이 에너지가격 인상에 더 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

〈표 4-22〉 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 상향)

(단위: 천원)

연차	에너지비용		총 비용(에너지가격 상향 반영)	
	기준 에너지가격(22.4)	에너지가격 상향(22.10)	비용 합계	현재가치(NPV)
0	.	.	1,521,308	1,521,308
1	36,502	46,641	68,377	65,433
2	37,076	47,374	69,453	63,600
3	37,659	48,119	70,545	61,818
4	38,251	48,876	71,655	60,087
5	38,853	49,645	72,782	58,404
6	39,464	50,426	73,926	56,768
7	40,084	51,219	75,089	55,177
8	40,715	52,024	76,270	53,632
9	41,355	52,842	77,469	52,129
10	42,006	53,674	1,318,648	849,114
11	42,666	54,518	79,925	49,250
12	43,337	55,375	81,182	47,870
13	44,019	56,246	82,459	46,529
14	44,711	57,131	83,756	45,226
15	45,414	58,029	85,073	43,959
16	46,128	58,942	86,411	42,728
17	46,854	59,869	87,770	41,531
18	47,591	60,810	89,150	40,367
19	48,339	61,767	90,553	39,237
20	49,100	62,738	1,541,346	639,108
21	49,872	63,725	93,423	37,069
22	50,656	64,727	94,893	36,031
23	51,453	65,745	96,385	35,021

(단위: 천원)

연차	에너지비용		총 비용(에너지가격 상향 반영)	
	기준 에너지가격(22.4)	에너지가격 상향(22.10)	비용 합계	현재가치(NPV)
24	52,262	66,779	97,901	34,040
25	53,084	67,829	99,441	33,087
26	53,919	68,896	101,004	32,160
27	54,767	69,980	102,593	31,259
28	55,628	71,080	104,206	30,384
29	56,503	72,198	105,845	29,532
30	57,392	73,334	107,510	28,705
합계	1,385,658 (715,242)	1,770,558 (913,917)	6,806,347	4,260,563

주: ()는 에너지비용 총합의 현재가치(PV)

자료: 조성한김현제(2019) p.256의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

3.3.3. 에너지가격 하향(2021.1.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

기준 에너지가격(2022.4.1)보다 낮은 수준의 에너지가격(2021.1.1)이 적용될 경우 전통냉난방 시스템과 지열냉난방 시스템의 에너지비용 격차가 줄어들 것이다. 그러나 국내 전기요금은 연료비 상승을 적기에 반영하지 못해 전반적으로 낮은 수준을 유지해왔고, 지열냉난방 시스템은 그 중에서도 저렴한 요금제인 심야 전기요금제 적용을 받을 뿐 아니라 지열원 온도차를 이용해 히트펌프의 전력소비 효율을 제고 하였으므로, 에너지비용 측면에서 전통냉난방 시스템에 우위를 점할 공산이 크다.

이와 같은 합리적 추론 하에 2022년 4월의 기준 에너지가격 대비 2021년 1월의 안정적 에너지가격을 적용, 전통냉난방 시스템의 가구 냉난방 관련 총 에너지비용을 추정해보면 30년 시스템 운영 시 현재가치로 약 670,829천원의 비용이 도출된다. 이는 2022년 4월 기준 에너지가격을 적용했을 때 대비 약 6.2% 감소한 수치며, 총 비용(현재가치 기준) 측면에서 약 1.1%의 감소로 나타난다(4,061,888천원 → 4,017,475천원). 심야 전기요금제 자체가 매우 저렴하다보니 에너지비용 측면에서 지열냉난방의 제도적 비용우위를 발생시키지만 상대적으로 낮은 에너지가격 전제에서 주택난방용 도시가스 소매요금이 기준 에너지가격 대비 약 8.6% 인하됨에 따라 (<표 4-17 참조) 전통냉난방 시스템의 에너지비용 경쟁력이 다소 개선된 셈이다. 2021년 1월의 안정적 에너지가격 전제에서 30년 기간 동안의 전통냉난방 시스템 에너지비용 및 총 비용 현금흐름을 작성한 결과는 아래 <표 4-23>과 같다.

〈표 4-23〉 부산 감전동 아파트 전통냉난방 시스템 LCC 현금흐름 (에너지가격 하향)

(단위: 천원)

연차	에너지비용		총 비용(에너지가격 하향 반영)	
	기준 에너지가격(22.4)	에너지가격 하향(21.1)	비용 합계	현재가치(NPV)
0	-	-	1,521,308	1,521,308
1	36,502	34,235	55,972	53,561
2	37,076	34,773	56,852	52,061
3	37,659	35,320	57,746	50,603
4	38,251	35,876	58,654	49,185
5	38,853	36,440	59,577	47,807
6	39,464	37,013	60,514	46,468
7	40,084	37,595	61,465	45,167
8	40,715	38,187	62,432	43,901
9	41,355	38,787	63,414	42,672
10	42,006	39,397	1,304,372	839,921
11	42,666	40,017	65,424	40,314
12	43,337	40,646	66,453	39,185
13	44,019	41,285	67,498	38,087
14	44,711	41,935	68,560	37,021
15	45,414	42,594	69,638	35,983
16	46,128	43,264	70,733	34,976
17	46,854	43,945	71,846	33,996
18	47,591	44,636	72,976	33,043
19	48,339	45,338	74,124	32,118
20	49,100	46,051	1,524,658	632,189
21	49,872	46,775	76,473	30,344
22	50,656	47,511	77,676	29,494
23	51,453	48,258	78,898	28,667
24	52,262	49,017	80,139	27,864
25	53,084	49,788	81,399	27,084
26	53,919	50,571	82,679	26,325
27	54,767	51,366	83,979	25,588
28	55,628	52,174	85,300	24,871
29	56,503	52,994	86,642	24,174
30	57,392	53,828	88,004	23,497
합계	1,385,658 (715,242)	1,299,615 (670,829)	6,335,405	4,017,475

주: ()는 에너지비용 총합의 현재가치(PV)

자료: 조성한·김현재(2019) p.256의 방법론 및 일부 비용을 참고하여 저자 직접 작성

3.4. 냉난방 방식별 경제성 분석 결과 비교

3.4.1. 냉난방 시스템 주요 비용요소별 특징 비교

① 초기투자비용

각 냉난방 시스템의 세부 비용요소를 현재가치 기준으로 살펴보면, 먼저 지열냉난방 시스템의 초기투자비용은 지하 타공 및 우물공 설치 등에 따른 시공 난이도와 지열원 이용을 위한 부대설비(히트펌프, 축열조, 바닥코일, FCU 등) 공사 등의 요소가 반영돼 전통냉난방 시스템 대비 약 43.2% 더 높게 나타났다(〈표 4-24〉 참조). 지열냉난방 시스템 사업에 있어 초기투자비용은 생애주기의 가장 첫 단계부터 직면하게 되는 비용열 위 요소며, 전통냉난방과의 비용 비교 시 어떤 요소에서 초기투자비용의 열위를 극복 하는지를 중점적으로 살펴볼 필요가 있다.

〈표 4-24〉 냉난방 시스템 간 초기투자비용 비교 (NPV 기준)

비용 구분 (백만 원)	지열냉난방 시스템	전통냉난방 시스템
초기투자비용	2,179	1,521

자료: 저자 직접 작성

② 유지관리비용 및 설비교체비용

30년의 생애주기 가운데 설비교체비용(현재가치)은 전통냉난방 시스템이 다소 높게 나타난다. 분석 결과에 따르면 30년 운영 가정 시 전통냉난방 시스템의 설비교체비용은 지열냉난방 시스템 대비 약 33.1% 높다. 이는 각 냉난방 시스템의 설비별 내구연한 차이에서 비롯된 현상으로, 지열냉난방 시스템의 경우 히트펌프, 심정펌프, 실내 기계실 장치, 바닥코일 및 FCU를 제외한 나머지 설비는 30년 이내에 별도 교체가 필요하지 않지만⁸⁹⁾ 전통냉난방 시스템은 30년 운영기간 동안 가스보일러, 에어컨 및 실내배관 등이 10년 주기로 교체되어야 한다(〈표 4-1〉 및 〈표 4-3〉 참조). 도시 가스 보일러와 에어컨의 신규 교체비용이 높은 탓에 30년 생애주기 내 전통냉난방 시스템의 설비교체비가 지열냉난방 시스템보다 높게 나타난 것으로 추정된다. 한편 현재가치화 한 유지관리비용은 두 냉난방 시스템이 비슷한 수준이지만, 열교환기와 지하수영향조사에서 차이가 발생해 지열냉난방 시스템이 전통냉난방 시스템보다 약 8.9% 높게 형성되었다(〈표 4-25〉 참조)

89) 이는 물론 양질의 설비유지관리가 전제되었을 때의 내구연한으로 보아야 할 것이다.

〈표 4-25〉 냉난방 시스템 간 유지관리비용 및 설비교체비용 비교 (NPV 기준)

비용 구분 (백만 원)	지열냉난방 시스템	전통냉난방 시스템
유지관리비용	464	426
설비교체비용	1,051	1,399

자료: 저자 직접 작성

③ 에너지비용

초기투자비용과 설비교체비용은 고정자본 투자비며 유지관리비용은 고정 운영비로 분류되므로 초기투자비용, 설비교체비용, 유지관리비용 모두 광의(廣義)의 고정비에 해당한다. 그러나 에너지비용은 적용 시기에 따라 연료비 등 글로벌 에너지가격과 국내 요금 수준에 영향을 받게 되므로 전형적인 변동비로 볼 수 있다. 이에 본 연구는 지열냉난방 시스템과 전통냉난방 시스템 각각에 대해 에너지가격 변화에 따른 현금흐름 변화를 세부적으로 살펴보았다(〈표 4-18〉~〈표 4-23〉 참조).

30년 운영기간을 가정할 때 현재가치로 나타난 냉난방 시스템별 에너지비용을 정리하면 아래 〈표 4-26〉과 같다. 에너지비용이 각 냉난방 시스템 전체 비용에서 차지하는 비중은 ‘기준 에너지가격(2022.4.1) 전제’에서 지열냉난방 및 전통냉난방 각각 8.2%, 17.6% 수준이다. ‘에너지가격 상향(2022.10.1) 전제’에서는 각각 8.8%, 21.5% 수준이며, ‘에너지가격 하향(2021.1.1) 전제’에서는 각각 7.8%, 16.7% 수준으로 추산된다. 30년 생애주기에서 지열냉난방과 전통냉난방의 에너지비용이 시스템별 총 비용에서 차지하는 평균 비중은 각각 8.3%와 18.6%로, 냉난방 시스템의 비용 경쟁력에 에너지비용이 미치는 영향은 전통냉난방이 지열냉난방보다 2배 가량 큰 것으로 평가할 수 있을 것이다(〈표 4-26〉 참조).

〈표 4-26〉 에너지가격 전제에 따른 냉난방 시스템별 에너지비용 비교

(단위: 백만 원)

에너지가격 구분	지열냉난방 시스템	전통냉난방 시스템
기준 에너지가격('22.4.1)	330 (8.2%)	715 (17.6%)
에너지가격 상향('22.10.1)	356 (8.8%)	914 (21.5%)
에너지가격 하향('21.1.1)	312 (7.8%)	671 (16.7%)
평균 비중	8.3%	18.6%

주: ()는 각 냉난방 시스템의 30년 생애주기 전체 비용(NPV)에서 에너지비용이 차지하는 비중

자료: 저자 직접 작성

3.4.2. 냉난방 시스템 현금흐름 비교

① 기준 에너지가격(2022.4.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

이상의 주요 비용요소별 결과 비교를 통해 고정비 측면에서는 지열냉난방 시스템이 전통냉난방 시스템에 대한 비용경쟁력을 확보하기 힘들다는 점을 확인할 수 있었다. 이미 지열냉난방 시스템은 초기투자비 부문에서 전통냉난방 시스템 대비 40% 이상 더 많은 비용이 투입되는 구조를 가지고 있기 때문이다. 다만 변동비에 해당하는 에너지비용 수준에 따라 지열냉난방의 비용경쟁력이 다소 개선될 여지는 있을 것이다.

먼저 기준 에너지가격(2022.4.1) 전제에서 각 냉난방 시스템의 생애주기(30년) 동안 발생하는 총 비용의 현재가치 흐름을 살펴보면, 지열냉난방 시스템 이용으로 유발되는 비용(4,024백만 원)은 도시가스 보일러 및 에어컨 기반 전통냉난방 시스템 이용으로 발생하는 비용(4,062백만 원)의 약 99.1% 수준이다. 지열냉난방 시스템 도입 시 전통냉난방 시스템 대비 약 38.4백만 원의 비용이 절감되는 것으로 나타나지만 지열냉난방 시스템 구축에 21.8억 원의 자본을 투입해 30년을 운영한 결과라는 점을 감안한다면, 지열냉난방이 전통냉난방 대비 비용경쟁력을 가졌다고 보기는 어렵다. 실제로 2022년 4월의 기준 에너지가격 전제에서 지열냉난방 시스템이 전통냉난방 시스템 대비 비용 우위를 점하는 시기는 시스템 운영 26년차부터인 것으로 추정되었다(그림 4-2) 및 <표 4-27> 참조).

[그림 4-2] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)



자료: 저자 직접 작성

〈표 4-27〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교(NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)

(단위: 백만 원)

운영 연차	지열냉난방 시스템 (SCW 지열냉난방)	전통냉난방 시스템 (도시가스 보일러 + 에어컨)	지열냉난방 시스템 비용(누적)우위 수준
0	2,179	1,521	-657.2
1	2,217	1,577	-640.2
2	2,255	1,631	-623.7
3	2,292	1,684	-607.7
4	2,327	1,735	-592.1
5	2,362	1,785	-577.0
6	2,395	1,833	-562.2
7	2,428	1,880	-547.9
8	2,460	1,926	-534.0
9	2,491	1,970	-520.5
10	3,121	2,812	-308.8
11	3,150	2,854	-296.0
12	3,178	2,895	-283.6
13	3,206	2,934	-271.5
14	3,232	2,973	-259.8
15	3,258	3,010	-248.4
16	3,284	3,047	-237.3
17	3,308	3,082	-226.5
18	3,332	3,116	-216.1
19	3,356	3,150	-205.9
20	3,830	3,783	-46.5
21	3,852	3,815	-36.9
22	3,873	3,845	-27.6
23	3,894	3,875	-18.5
24	3,914	3,904	-9.7
25	3,933	3,932	-1.1
26	3,953	3,960	7.3
27	3,971	3,986	15.4
28	3,989	4,012	23.3
29	4,007	4,037	30.9
30	4,024	4,062	38.4

자료: 저자 직접 작성

② 에너지가격 상향(2022.10.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

기준 에너지가격(2022.4.1) 대비 상향된 에너지가격(2022.10.1) 전제에서 30년간 지열냉난방 시스템을 운영할 경우 지열냉난방 시스템 이용으로 유발되는 비용의 현재가치는 약 4,050백만 원으로 전통냉난방 시스템 이용 시 발생하는 비용의 현재가치(4,261백만 원)의 95% 수준으로 추정된다. 기준 에너지가격 대비 상대적으로 높은 에너지가격이 반영되면서 여름철 냉방 전력소비 효율이 높고 저렴한 심야전기요금제를 적용받는 지열냉난방 시스템의 가구 에너지비용 절감효과가 부각된 셈이다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 상향된 에너지가격 전제 하에 30년 운영을 가정하면 지열냉난방은 전통냉난방 대비 약 210.6백만 원의 비용이 절감되는 것을 확인할 수 있다. 기준 에너지가격(2022.4.1) 전제일 때 비용 절감액(38.4백만 원)과 비교하면 절감폭이 약 5.5배 정도 개선된 수준이다. 또한 상향된 에너지가격 체계에서 지열냉난방 시스템이 전통냉난방 시스템 대비 비용 우위를 점하는 시기는 시스템 운영 20년 차로, 기준 에너지가격 체계(2022.4.1)에서의 비용 우위 발생 시점보다 6년 앞당겨졌다(그림 4-3) 및 <표 4-28> 참조). 가구 냉난방 관련 에너지비용이 지열냉난방과 전통냉난방의 상대적 경제성에 미치는 영향이 작지 않다는 점을 방증(傍證)하는 결과다. 그러나 20억이 넘는 지열냉난방 시스템의 초기투자비와 30년 운영기간 중 20년차 이후부터 비로소 전통냉난방보다 비용이 낮아지는 구간이 발생하는 점을 감안할 때 지열냉난방 시스템에 대한 민간의 투자 인센티브는 거의 없다고 보아야 할 것이다.

[그림 4-3] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)



자료: 저자 직접 작성

〈표 4-28〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교(NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)

(단위: 백만 원)

운영 연차	지열냉난방 시스템 (SCW 지열냉난방)	전통냉난방 시스템 (도시가스 보일러 + 에어컨)	지열냉난방 시스템 비용(누적)우위 수준
0	2,179	1,521	-657.2
1	2,219	1,587	-631.8
2	2,257	1,650	-607.1
3	2,295	1,712	-583.1
4	2,332	1,772	-559.8
5	2,368	1,831	-537.2
6	2,403	1,887	-515.2
7	2,436	1,943	-493.7
8	2,469	1,996	-472.9
9	2,501	2,048	-452.7
10	3,132	2,897	-234.5
11	3,162	2,947	-215.4
12	3,191	2,995	-196.8
13	3,220	3,041	-178.8
14	3,248	3,086	-161.2
15	3,274	3,130	-144.2
16	3,301	3,173	-127.6
17	3,326	3,215	-111.5
18	3,351	3,255	-95.8
19	3,375	3,294	-80.6
20	3,850	3,933	83.7
21	3,872	3,970	98.0
22	3,894	4,006	112.0
23	3,916	4,041	125.6
24	3,937	4,075	138.8
25	3,957	4,109	151.6
26	3,977	4,141	164.1
27	3,996	4,172	176.2
28	4,014	4,202	188.0
29	4,032	4,232	199.5
30	4,050	4,261	210.6

자료: 저자 직접 작성

③ 에너지가격 하향(2021.1.1. 전기요금 및 주택난방용 도시가스 소매요금)

기준 에너지가격(2022.4.1) 대비 하향된 에너지가격(2021.1.1) 체제에서 30년간 지열냉난방 시스템을 운영하면 현재가치로 환산한 지열냉난방 시스템 총 비용은 약 4,006백만 원으로 현재가치로 나타난 전통냉난방 시스템의 총 비용인 4,017백만 원과 거의 유사한 수준이다. 또한 하방 안정적인 에너지가격이 지속되는 상황에서 지열냉난방이 전통냉난방에 비용우위를 보이는 시점도 운영 후 29년차로 나타난다. 이는 사업자가 전통냉난방을 포기하고 지열냉난방을 도입할 경제적 유인이 전혀 없다고 평가해도 무방한 수준이다(그림 4-4 및 <표 4-29> 참조).

COVID-19와 러-우크라이나 사태 등 거시경제에 대한 커다란 외부 충격을 경험하면서 우리는 초저유가와 초고유가가 단기에 번갈아 나타날 수 있음을 알게 되었다. 2021년 1월의 낮은 에너지가격이 장기간 지속될 수도 있고 2022년 10월의 높은 에너지가격이 한동안 지속될 수 있다. 글로벌 에너지가격 변동성이 그 어느 때보다 큰 현재 시점에서, 에너지가격 수준에 따라 설비 구축에만 20억 상당을 투자해야 하는 지열냉난방 사업이 사실상 경제성 확보가 어렵다는 본 분석결과는 획기적인 고정비 절감 없이 국내 지열냉난방 시스템 확대를 논하는 것이 무의미하다는 것을 간접적으로 암시한다.

[그림 4-4] 냉난방 시스템별 현금흐름 시각화 (NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)



자료: 저자 직접 작성

〈표 4-29〉 냉난방 시스템별 현금흐름 비교(NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)

(단위: 백만 원)

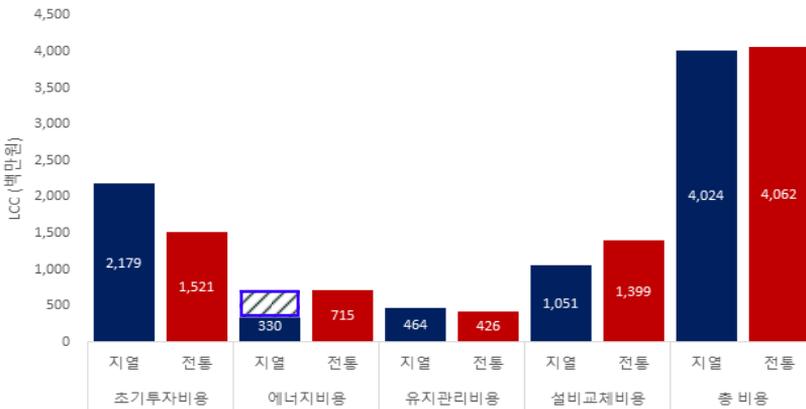
운영 연차	지열냉난방 시스템 (SCW 지열냉난방)	전통냉난방 시스템 (도시가스 보일러 + 에어컨)	지열냉난방 시스템 비용(누적)우위 수준
0	2,179	1,521	-657.2
1	2,216	1,575	-641.5
2	2,253	1,627	-626.3
3	2,289	1,678	-611.5
4	2,324	1,727	-597.1
5	2,358	1,775	-583.2
6	2,391	1,821	-569.6
7	2,423	1,866	-556.4
8	2,454	1,910	-543.6
9	2,484	1,953	-531.1
10	3,113	2,793	-320.4
11	3,142	2,833	-308.6
12	3,169	2,872	-297.2
13	3,196	2,910	-286.0
14	3,222	2,947	-275.2
15	3,248	2,983	-264.7
16	3,273	3,018	-254.5
17	3,297	3,052	-244.5
18	3,320	3,085	-234.9
19	3,343	3,117	-225.5
20	3,816	3,750	-66.9
21	3,838	3,780	-58.0
22	3,859	3,809	-49.4
23	3,879	3,838	-41.0
24	3,899	3,866	-32.9
25	3,918	3,893	-25.0
26	3,937	3,919	-17.3
27	3,955	3,945	-9.8
28	3,972	3,970	-2.5
29	3,989	3,994	4.6
30	4,006	4,017	11.4

자료: 저자 직접 작성

4. 소결

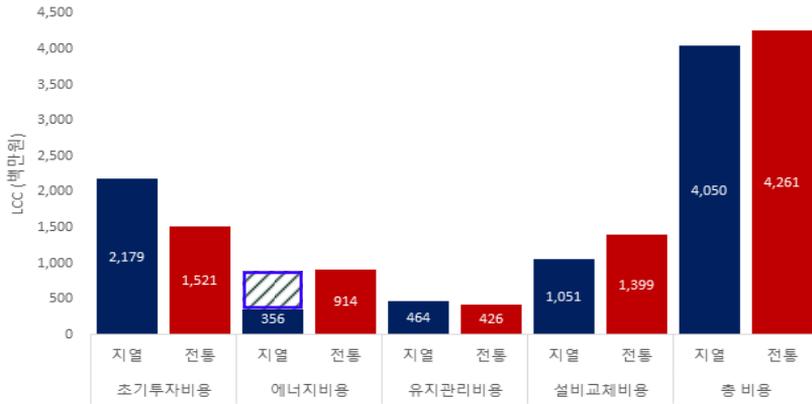
국내 집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템은 전통냉난방 시스템 대비 초기 투자비와 유지관리비가 상대적으로 높다. 특히 본 연구의 분석대상 지열냉난방 시스템의 초기투자비는 전통냉난방 시스템보다 약 40% 가량 높은 수준이다. 이러한 초기투자비에서의 격차는 30년 운영을 가정할 때 전통냉난방 대비 경제성 확보를 어렵게 만드는 주요 요소로 판단된다. 다만 냉난방 효율에 있어 연중 일정한 온도를 유지하는 지하수열을 이용하는 지열냉난방 시스템은 나름의 강점이 있고, 저렴한 심야요금제를 적용받는 제도적 이점이 지열냉난방 시스템과 결합되면서 에너지가격 수준에 따라 경제성이 미약하게나마 개선되는 양상도 보였다. 주요 비용요소별 격차를 시각화 한 자료([그림 4-5]~[그림 4-7])에서도 확인할 수 있듯, 초기투자비용과 유지관리비용 부문에서 발생한 지열냉난방 시스템의 비용열위를 에너지비용에서 만회하는 부분이 작지 않다. 만약 2022년 러-우크라이나 사태 등에 따른 고유가 국면이 장기화된다면 도시가스 보일러와 에어컨으로 구성된 전통냉난방에 대해 지열냉난방이 가격경쟁력을 확보하는 것이 보다 용이해질 수 있다. 그러나 중요한 점은 2022년 10월의 높은 에너지가격 체계에서 운영연한 30년의 지열냉난방 시스템이 가동 20년차 이후에야 겨우 전통냉난방 시스템에 비용우위를 보인다는 것이다. 따라서 국내 지열냉난방 사업의 경제성은 없다고 보는 것이 타당해 보인다.

[그림 4-5] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ① (NPV, 2022.4.1. 기준 에너지가격)



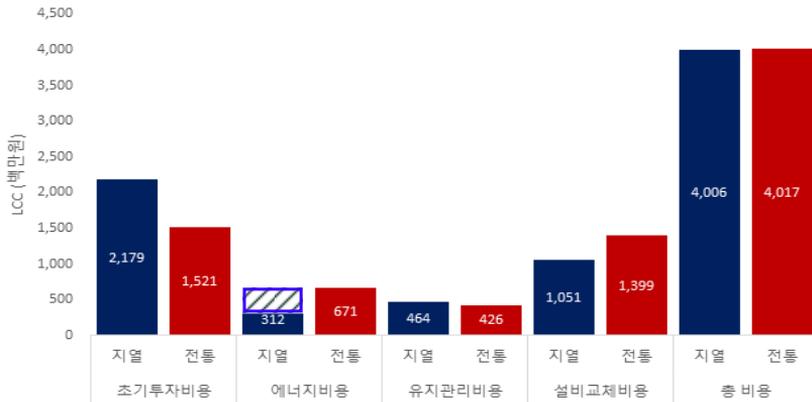
자료: 저자 직접 작성

[그림 4-6] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ② (NPV, 2022.10.1. 에너지가격 상향)



자료: 저자 직접 작성

[그림 4-7] 냉난방 시스템 비용요소 시각화 ③ (NPV, 2021.1.1. 에너지가격 하향)



자료: 저자 직접 작성

한편 본 연구에서 지열냉난방을 도입한 아파트는 소형 민간 임대아파트에 해당한다. 이는 이후 제5장에서 중요하게 고려되어야 할 요소들 중 하나로, 지열냉난방 시스템이 2017년 이후 지열이용에 대해 저하된 주민수용성을 극복하고 꾸준히 보급되려면, 저소득층 및 청년층의 주거안정이라는 정책목표를 지닌 국민 임대아파트 등을 중심으로 지열냉난방 시스템을 우선적으로 보급하는 방안을 고려해 볼 필요가 있다. 또한 본 연구는 부지절감이 용이하고 지하수 오염 우려가 상대적으로 적은 지열냉난방 시스템 운영 사례를 분석하고 있으나, 지열냉난방 사업이 전통냉난방 사업 대비 비용우위를 미약하게나마 확보할 수 있는 시점은 시스템 도입 후 최소 20년 이후부터로(2022년 10월 에너지가격 가정)⁹⁰⁾ 경제성이 확보되지 않는다. 아울러 지열냉난방이 전통냉난방 대비 에너지소비효율이 높아 가구 냉난방 에너지비용에서 우위를 보이더라도 이는 아파트 입주자(최종 소비자)가 누리는 혜택이다. 시스템을 보급하는 사업자 입장에서는 에너지비용 절감이라는 혜택보다 277세대 냉난방 기준 수십억에 달하는 초기투자비용 조달 및 회수에 대한 부담을 경감시켜주는 정책·재정적 지원이 보다 직접적 혜택으로 다가올 것이다. 이러한 측면에서 국민 주거안정이라는 정책 명분을 토대로 정책자금 지원이 상대적으로 용이한 국민 임대아파트에 대해 지열냉난방 시스템을 시범적으로 확대해나가는 방안이 현실적이라 판단된다.

90) 물론 관련기술의 극단적인 기술진보와 초고유가 등을 가정하면 경제성 확보 시점이 얼마든지 앞당겨질 수 있을 것이나, 경제성 분석의 현실성 확보를 위해 지열냉난방의 비용절감을 위한 극단적 가정은 배제한다.

제5장

국내 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익 분석

제4장에서 우리는 국내 277세대 집단 주거시설(아파트)에 보급된 지열냉난방 시스템이 에너지가격 수준에 따라 전통냉난방 시스템 대비 설비 도입 후 최소 20년 이상은 되어야 미약하나마 상대적인 경제성을 보이는 점을 확인할 수 있었다. 또한 에너지가격이 매우 낮은 수준에서 안정적으로 유지된다면 운영 후 29년차부터 전통 냉난방 대비 비용경쟁력을 겨우 확보하거나 경제성 확보가 아예 불가능한 상황도 충분히 발생할 수 있다는 점을 알 수 있었다.

결국 현재 기술 수준에서 경제성 논리로 도시가스 난방과 에어컨 냉방을 주축으로 하는 전통냉난방을 지열냉난방으로 대체할 근거는 빈약하다. 그렇다면 미국, 유럽 등 해외 선진국에서 보조금을 지급하면서까지 냉난방에 지열원을 이용하려는 노력은 왜 이루어지고 있는 것일까? 이에 대한 답을 찾으려면 지열냉난방의 경제적 편익(economic benefit)이 아닌 사회적 편익(social benefit)에 대한 분석이 필요해 보인다.

사회적 편익을 다양하게 정의할 수 있지만 본 연구는 지열냉난방의 사회적 편익 중 ‘환경편익(environmental benefit)’ 분석에 초점을 맞추고자 한다. 비록 국내에서 지열냉난방 시스템을 보급하기 위한 사업성 및 경제성 측면의 근거는 확보하기 어렵지만 부문별 탄소중립 목표 달성 과정에서 지열냉난방이 건물 냉난방 부문에서의 탄소저감에 기여하는 바를 확인할 수 있다면, 이는 기후변화대응 및 탈탄소 사회 이행이라는 정책적 목적으로 지열냉난방 시스템 보급을 지원하는 명분이 될 수 있

을 것이다. 따라서 본 장에서는 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방 시스템이 국내 온실가스 배출량에 어떤 영향을 미치는지 ‘지열냉난방 시스템 보급 시나리오 분석’을 통해 구체적으로 살펴보려 한다.

1. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 설계

본 연구를 진행하면서 지열냉난방 사업 종사자들의 자문의견을 수렴해 보면, 지열 냉난방 사업 추진 시 크게 두 가지의 어려움을 확인할 수 있었다. 먼저 첫 번째 어려움은 지열 냉방의 기술적 특징에서 비롯된 사안이었다. 일반적으로 지열 냉방의 경우 냉매를 이용한 에어컨 냉방 대비 목표 온도까지 도달하는 데에 더 많은 시간이 소요된다. 부산 감전동 아파트의 지열냉난방 시스템 운영 초반까지만 해도 에어컨 대비 상대적으로 더딘 냉각반응으로 인해 입주민들의 불만이 적지 않게 발생했던 것으로 파악되었다. 두 번째 어려움은 지열원 이용의 안전에 대한 대중의 우려였다. 일부 민간 아파트 재개발 과정에서 지열냉난방 시스템 도입에 대한 논의가 있었지만 지하수주정 타공 및 지하수 유실 등에 의한 지반 붕괴 우려 등 안전 이슈가 대두되면서 민간분양 아파트에 대한 지열냉난방 시스템 구축이 좌절된 상황도 확인할 수 있었다. 이러한 현실적 어려움들을 감안한다면 중단기적으로 민간 주택에 지열냉난방 시스템을 일괄적으로 확대하는 시나리오로는 적시성 있는 시사점 도출이 어려워 보인다. 따라서 본 연구는 국내 주택 부문 지열냉난방 시스템 보급 환경을 최대한 반영하여 현실성 있는 시나리오 구조 설계를 목표로 다음과 같은 사항을 중점적으로 고려하였다.

1.1. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 설계 시 주요 검토 사항

1.1.1. 냉난방 유형별 에너지 소비량 비교

냉난방 유형별 에너지 소비량의 변화는 크게 두 가지 측면을 고려해야 한다. 먼저 지열원 히트펌프를 적용한 지열냉난방 시스템의 경우 전통냉난방 시스템의 난방철 가스소비 대신 전력소비가 발생하게 된다. 즉 전통냉난방 시스템 난방에서 발생하지 않았던 전력소비가 새롭게 발생하는 것이다. 다음으로 고려할 사항은 냉방철 전력소비가 지하수 온도 이용에 따른 냉방효율 개선으로 절감된다는 점이다. 제2장 지열냉

난방 기술적 특성에서 이미 살펴보았지만 지열냉난방 시스템은 여름철 대기온도보다 낮은 지하수 온도의 특성을 이용하므로, 이론적으로 실내온도 하강 시 에어컨 냉방보다 더 적은 에너지(전력)가 소모된다. 이는 지열냉방의 효율이 에어컨의 냉매를 이용한 냉방보다 에너지소비효율이 더 높다는 의미기도 하다. 이를 확인하기 위해 분석 대상 아파트의 지열냉난방 시스템과 전통냉난방 시스템의 실제 월별 에너지 및 전력소비량을 정리해보았다(〈표 5-1〉 참조). 구체적 수치로도 확인되듯, 분석 대상 아파트에 지열냉난방 시스템이 도입되면서 전통냉난방 도입 대비 냉방기(5~9월) 동안 약 1,037kWh의 전력소비를 절감하는 것으로 추정되었다.

〈표 5-1〉 부산 감전동 아파트 지열냉난방의 전통냉난방 대비 에너지소비 변화

월	전통냉난방 시스템		지열냉난방 시스템	전통 → 지열의 E소비 변화	
	도시가스 소비 (MJ)	전력 소비 (kWh)	전력 소비 (kWh)	도시가스 (MJ)	전력 (kWh)
1월	405,847	·	26,958	-405,847	26,958
2월	256,486	·	17,037	-256,486	17,037
3월	145,132	·	9,640	-145,132	9,640
4월	61,609	·	4,092	-61,609	4,092
5월	·	1,394	1,378	·	-16
6월	·	12,455	12,316	·	-139
7월	·	36,342	35,935	·	-407
8월	·	35,659	35,259	·	-399
9월	·	6,722	6,646	·	-75
10월	95,349	·	6,334	-95,349	6,334
11월	102,748	·	6,825	-102,748	6,825
12월	253,601	·	16,845	-253,601	16,845
합계	1,320,772	92,571	179,266	-4,019,031	86,695

자료: 저자 직접 작성

다만 연간으로 냉난방 시스템별 에너지소비량⁹¹⁾을 비교해보면 지열냉난방 시스템은 난방기(1~4월, 10~12월) 도시가스 소비를 대체하지만 전력소비를 발생시키면서 전통냉난방 대비 연간 약 87,732kWh의 전력소비가 늘어났다. 따라서 지열원 기반 고효율 냉방으로부터의 전력소비 절감분(약 1,037kWh)을 상쇄해보면 지열냉난방 시스템 도입으로 전통냉난방 시스템 대비 연간 86,695kWh의 전력이 더 소모되는 것

91) 소비량 비교를 위해 환산계수(1kWh = 3.6MJ)를 적용, 열량단위(MJ)를 전력량(kWh)으로 환산하였다.

으로 나타났다⁹²⁾. 지열원 히트펌프 이용으로 연간 전력소비가 증가하는 결과로부터 우리는 발전단 전력생산 증가에 따른 전환 부문 온실가스 배출량 증가와 난방연료(도시가스 등) 대체에 따른 건물 부문 온실가스 배출량 감소를 짐작할 수 있다.

1.1.2. 온실가스 간접 배출량 분석을 위한 전원믹스 전제

앞서 살펴본 바에 따르면 지열냉난방 시스템 이용은 전통냉난방 대비 연간 전력 소비량을 증가시켜 발전 부문에서의 온실가스 배출을 증가시킨다. 이는 난방 부문 전력화에 따른 온실가스 간접배출 증가에 해당한다. 따라서 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익을 분석하기 위해서는 발전 부문에서의 온실가스 배출 증가를 구체적으로 살펴보아야 하며, 본 연구는 2030년에 대해 지열냉난방 시스템 보급이 유발하는 발전 부문 온실가스 배출량 변화를 분석해보고자 한다.

2030년 기준 지열냉난방 시스템 보급이 유발하는 전력수요 및 전력생산량 증가의 온실가스 배출 영향을 살펴보려면 2030년의 전원믹스에 대한 고민이 반드시 선행되어야 한다. ‘2030 국가 온실가스 감축목표(National Determined Contribution, NDC) 상향안⁹³⁾’은 2030년 전원믹스 전제를 수립하기 위해 가장 먼저 고려해야 할 자료로, 2030년 발전(전환) 부문 온실가스 배출 목표(약 1.5억 CO₂ton) 달성을 위한 전원믹스 내용이 포함되어 있다. 또한 지난 8월에 발표된 ‘제10차 전력수급기본계획 총괄분과위 실무안⁹⁴⁾’은 올해 말 발표 예정인 제10차 전력수급기본계획(이하 제10차 수급계획)의 전력정책 방향성을 제시하고 있는데, 원전비중 확대와 신재생 에너지의 합리적 보급으로 2030년 NDC 상향안의 전환 부문 온실가스 배출목표를 맞추고 있다. 본 연구는 제한적이기는 하나 제10차 수급계획의 큰 방향을 담고 있는 총괄분과위 실무안의 2030년 발전믹스와 전력수요 등의 전제를 최대한 고려할 것이다(〈표 5-2〉 참조⁹⁵⁾).

92) 전통냉난방 시스템의 난방용 도시가스 사용량을 전력량으로 환산해 ‘에너지소비효율’을 비교하는 것과 혼동해서는 안 된다. 본 연구의 지열난방은 지열원 히트펌프를 이용한 난방의 전력화에 해당한다. 따라서 도시가스를 대체해 전기와 지열로 난방을 하게 되므로 전통난방에서 발생하지 않던 전력소비가 발생한 것이다.

93) 관계부처 합동(2021.10.18). p.6 내용 참조

94) 산업통상자원부(2022.8.30). pp.2~5 내용 참조

95) 해당 내용을 M-Core DB에 구체적으로 구현한 방식은 아래 내용에서 별도로 다룰 것이다.

〈표 5-2〉 2030 NDC 상향안과 제10차 수급계획 총괄분과위 2030년 전원구성 목표

(단위: TWh)

구분		원전	석탄	LNG	신재생	무탄소	기타	합계
2030 NDC 상향안	발전량	146.4	133.2	119.5	185.2	22.1	6.0	612.4
	비중	23.9%	21.8%	19.5%	30.2%	3.6%	1.0%	100%
10차 수급계획(안)	발전량	201.7	130.3	128.2	132.3	13.9	8.6	615.0
	비중	32.8%	21.2%	20.9%	21.5%	2.3%	1.3%	100%

주: 무탄소 전원은 수소암모니아 발전을 의미

자료: 산업통상자원부(2022.8.30), p.5 표 일부 발췌 및 재인용

2030년 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따라 발전단에서의 전력생산 증가량과 온실가스 배출량에도 차이가 발생할 것이다. 본 연구는 2030 NDC 상향안과 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안 등의 전원구성을 최대한 반영해 ‘발전 부문 전력계통 모의(M-Core)’를 진행할 것이다. 이를 통해 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따른 발전 부문 온실가스 간접 배출량 변화를 구체적으로 살펴볼 수 있으리라 판단된다.

1.1.3. 신정부 주택공급 정책

2030년 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 설계에 앞서 윤석열 신정부의 주택공급 정책을 검토해야 한다. 그러나 정부의 주택공급 정책 검토에 앞서 집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템 보급 범위에 민간 분양분을 포함시켜야 할지에 대해 고민이 있었다. 주택보급 관련 공공기관⁹⁶⁾ 관계자들과 자문을 거친 결과 세대 냉난방과 급탕 자체가 아직 실증사업 단계에 머물러 있고, 관련 자료도 충분치 않아 민간 분양분까지 지열 냉난방을 적용하는 것은 상당히 장기적 관점에서 진행되어야 할 사업이라는 결론에 도달했다. 이에 본 연구는 임대형 집단 주거시설 중심의 지열냉난방 보급을 고려한다.

한편 기축건물의 냉난방 시스템을 지열냉난방 시스템으로 교체하는 작업은 이론적으로는 가능하나 현실적으로는 부지확보, 기반공사, 안전성 등 해결해야 할 장애 요인이 너무 많아 지열냉난방 보급 대상으로 부적절하다는 의견이 전문가들의 중론(衆論)이었다. 해외에서도 지열냉난방이 적용되지 않은 기축건물을 지열냉난방으로 교체한 실제 사례를 찾아보기 힘들었던 점을 고려해 본 연구의 시나리오 분석 대상은 신축 집단 주거시설(아파트)로 한정한다.

96) 한국토지주택공사, 서울주택도시공사, 한국지역난방공사 등

‘윤석열 대통령 후보 공약집97)’에서는 임기 내(2027년까지) 총 주택공급 목표를 ‘250만 호 + α ’로 설정한 바 있다. 이 중 공공임대주택은 50만 호, 나머지 민간분양 200만 호 중 취약계층 대상 임대보급 비율을 30%로 할당하였다. ‘ α ’ 보급분은 청년원가주택98) 30만 호 등이 포함된다. 이를 바탕으로 역산해보면 250만 호 중 임대주택 비율은 44%(110만 호) 수준이며, 청년원가주택은 별도 공급되는 공공분양주택으로 정리할 수 있다(〈표 5-3〉 참조).

〈표 5-3〉 국민의힘 윤석열 대통령 후보 공약집 주택공급 정책 정리

· 총 주택공급량(2023~2027년)	2,500,000호	
- 공공임대	500,000호	임대주택 비율 44%
- 민간공급 중 취약계층(임대) 할당 30%	600,000호	
- 청년원가주택(별도)	300,000호	

자료: 국민의힘(2022). pp.112~123 내용을 토대로 직접 요약

최근 2022년 8월, 정부는 ‘국민 주거안정 실현방안99)’을 발표하고 2023~2027년 기간 동안 270만 호의 주택 공급계획을 제시하였다. 다만 2023~2027년 기간 동안 주택공급 목표량은 제시되었으나 270만 호에 공공임대주택 비율이 얼마나 포함되어 있는지는 명시되지 않은 한계가 있다. 이에 본 연구는 ‘국민 주거안정 실현방안’의 2023~2027년 주택보급 추세가 2030년까지 이어지는 것으로 가정하고 2030년 주택보급량을 추정하였다(〈표 5-4〉 참조).

〈표 5-4〉 국민 주거안정 실현방안 - 연간 주택보급량 및 보급 추정치

(단위: 천호)

구분	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
연간보급 호수	470	540	560	560	570	540	540	540
누적	-	1,010	1,570	2,130	2,700	3,240	3,780	4,320

주: 2028~2030년은 국민 주거안정 실현방안에서 밝힌 연평균 주택보급량(54만 호)이 유지되는 것으로 가정하여 추정
 자료: 관계부처 합동(2022.8.16). pp.37~38 내용을 바탕으로 직접 작성

97) 국민의힘(2022). p.113 내용 참조

98) 시세의 70% 가격으로 공공사업자 공공분양을 진행하는 주택으로 청년·신혼부부·생애최초 주택 구입자에 한해 공급되며, 의무 거주기간은 5년이다(의무거주기간 5년 경과 후에는 LH, SH 등 공공기관에 환매 가능).

99) 관계부처 합동(2022.8.16). pp.37~38 내용 참조

지열냉난방 시스템 보급대상 주택 유형(신축 임대형 주택)과 윤석열 신정부 주택 공급정책을 종합적으로 반영해 지열냉난방 우선보급 대상 집단 주거시설을 추산하면 약 220만 호의 임대주택이 공급될 것으로 전망된다(〈표 5-5〉 참조). 전술하였듯 2030년 총 주택공급량은 ‘국민 주거안정 실현방안’을 토대로 추정할 수 치며, 임대주택과 취약계층 대상 민간임대 비율은 대통령 공약집의 비율(44%)을 적용하였다. 그리고 청년원가주택은 공공성이 높은 점을 감안해 30만 호가 별도 보급되는 것으로 가정하였다.

〈표 5-5〉 2030년 지열냉난방 시스템 우선보급 대상 추정

• 2030년 총 주택공급량	4,320,000호	
- 공공임대	864,000호	44%
- 민간공급 중 취약계층(임대) 할당	1,036,800호	
• 청년원가주택(별도)	300,000호	
• 합계	2,200,800호	

자료: 저자 직접 작성

1.2. 지열냉난방 시스템 보급 시나리오 구성

전술한 세 가지 요소에 대한 검토(냉난방 유형별 연간 에너지소비량 차이, 지열냉난방 시스템의 온실가스 간접 배출량 분석을 위한 2030년 전원믹스 전제, 신정부 주택공급 정책)를 바탕으로 국내 지열냉난방 시스템 보급 시나리오를 설계해보려 한다. 먼저 고려할 사항은 국내에서 지열냉난방 시스템 사업은 일부 건물을 제외하고 전국 단위로 볼 때 여전히 실증 단계에 머물러 있으며, 실증사업들의 경과 등 사업 관련 정보도 충분히 축적되어 있지 못하다¹⁰⁰⁾. 이런 환경에서 민간 집단 주거시설을 대상으로 지열냉난방 시스템 도입을 설득하거나 정책적으로 강제하는 것은 현실적으로 불가능해 보인다.

이에 따라 본 연구는 지열냉난방 시스템을 공공성(주거 안정화 등)이 강한 신축 임대주택 중심으로 보급하는 방안을 대안으로 고려하였으며, 신정부 주택보급 정책을 종합한 결과 2030년 기준 약 220만 호의 임대주택이 잠재적 지열냉난방 시스템

100) 실증사업과 관련된 정보 자체가 민간 업체와 관련된 경우가 많아 대체로 대외비인 한계도 있다.

적용 대상 집단 주거시설(아파트)로 분류되었다(표 5-5) 참조). 한편 임대주택 단지 기준으로 지열냉난방 시스템을 어떤 비율로 보급할 것인지에 대해 또 다른 의문이 제기될 수 있다. 이 부분에 대해서는 지열냉난방 시스템의 연간 에너지비용 절감이 비교적 명확하므로¹⁰¹⁾ 단지 내 일부 세대에 대해서만 지열냉난방을 적용한다면 세대 간 형평성에 문제가 발생할 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 지열냉난방이 특정 임대주택 단지에 보급될 경우 전체 세대에 대해 동일하게 보급되는 것으로 간주한다. 다만 2030년 임대주택 220만 호 전체에 대해 지열냉난방이 무조건 보급된다고 보는 것은 지나친 단순화로 인식될 수 있고 본 연구의 경제성 평가 결과에 대해 업계의 의견도 다양할 수 있다¹⁰²⁾. 따라서 2030년 지열냉난방 보급이 가능한 국내 220만 호의 임대주택 중 지열 직접이용을 위한 정책적, 기술적 환경(이하 지열냉난방 보급 환경)이 갖추어진 정도를 3단계로 분류해 지열냉난방 시스템 보급률을 나누어 온실가스 배출량 변화를 살펴보려 한다.

한편 서울주택도시공사(이하 SH)는 서울특별시(이하 서울시)에 대한 공공 임대아파트 공급을 담당하고 있으며, 서울시는 체계화된 건물 신재생에너지 보급 기준을 자체적으로 제정·적용 중인 대표적인 지자체다¹⁰³⁾. SH는 임대아파트를 포함, 2021년 이후 신규보급이 확정된 지열냉난방 설비용량을 총 3,771kW로 집계하고 있으며, 이 중 아파트 공용시설이 아닌 세대 냉난방을 위한 지열냉난방 설비용량을 약 975kW 수준으로 계획하고 있다¹⁰⁴⁾. 본 연구는 SH에서 2021년 신규 보급이 확정된 3,771kW의 지열냉난방 설비용량 중 세대 냉난방용 설비(975kW)가 차지하는 비중인 약 25.9%를 지열에 대한 수용성이 저하된 현재 수준의 지열냉난방 보급률 기준점으로 삼는다.

이제 지열냉난방 시스템 보급 환경을 설정해보자. 먼저 지열냉난방 보급 환경이 지금보다 더 악화된 상황을 1단계 보급 환경으로 분류, ‘시나리오 Red’로 지칭한다. 주민 수용성을 포함해 지열냉난방 보급 환경이 현재보다 더 악화된 상황에 해당하며,

101) 본 연구 제4장에서 지열냉난방 시스템의 연간 에너지비용이 가스보일러와 에어컨을 사용하는 전통냉난방 시스템의 41.4%에 불과하다는 점을 이미 확인하였다.

102) 예를 들어 지열냉난방 시스템의 상용화 사례가 적어 부산 감전동 아파트 사례의 경제성 평가 결과를 일반화하기 어렵다는 의견도 있을 수 있다.

103) 서울시는 고시를 통해 2015년 주거용 민간건축물에 대해 신재생에너지 설치 의무비율 2%, 비주거용 민간건축물에 대해서는 신재생에너지 설치 의무비율 7%를 적용한 이래, 2022년 현재 각각 9%, 12%의 설치 의무비율을 적용 중이다. 정부 정책 및 사업성 등을 감안해 신재생에너지 설치 의무비율을 3년 단위로 재수립하게 되어 있다(서울특별시(2017.9.28). p.5 참조).

104) SH가 세대에 대한 지열냉난방 도입을 본격적으로 고려한 것은 2021년이 처음이다(SH 내부자료 중 대외공개 가능한 정보 활용)

2030년 지열냉난방 보급 대상 임대주택 220만 호 중 최대 10%까지만 지열냉난방 시스템이 보급되는 보수적 상황을 상정한 시나리오다. 그 다음 2단계 보급환경은 SH의 2021년 세대 냉난방용 지열냉난방 시스템 보급비중인 25.9%를 기준으로 포항지진 후 지열이용에 대한 수용성이 떨어진 현재의 보급환경이 소폭 개선·악화되는 상황을 포괄, 220만 호의 임대아파트에 대한 보급률 20~40%의 ‘시나리오 Yellow’를 설정한다. 마지막 3단계 보급환경은 국내 지열이용과 관련된 대중의 인식 개선을 적극적으로 유도하고 지열발전과 지열냉난방의 기술적 특성을 명확히 구분해 천부 지열에 한해서는 정책·재정적 지원을 최대한 활성화 하는 낙관적(optimistic) 상황을 가정, 220만 호 임대주택 전체(100%)에 지열냉난방 시스템을 보급하는 ‘시나리오 Green’을 고려한다. 이와 같은 지열냉난방 시스템 보급 시나리오를 <표 5-6>과 같이 정리해보았다.

〈표 5-6〉 국내 지열냉난방 시스템 보급 환경 시나리오 구조

시나리오 구분	Red	Yellow	Green
지열냉난방 보급률	~ 10%	20 ~ 40%	100%
지열냉난방 보급량 (호)	~ 220,080	440,160 ~ 880,320	2,200,800

자료: <표 5-3> ~ <표 5-5> 내용을 바탕으로 저자 직접 작성

사실 제2장에서 살펴본 ‘국토교통 2050 탄소중립 로드맵’과 ‘국내 제로에너지 건물 효율등급 달성 목표’에 따라 공공 부문과 민간 부문 각각 3등급(건물 에너지자립률 60~80%), 5등급(민간 건물 에너지자립률 100%)을 달성해야 하는 점 등을 감안할 때, 2030년 220만 호의 임대주택의 냉난방 부문에서조차 신재생에너지 기반 에너지자립을 제대로 하지 못한다면 민간 영역으로의 지열냉난방 보급은 쉽지 않은 목표라 생각된다. 그러나 국내 지열이용 시장 자체가 정체되거나 위축된 현재 시점에서 낙관적인 가정에 의존해 2030년의 환경편익을 분석한다면 지열냉난방 시스템 보급이라는 목적에 함몰되어 왜곡된 시사점을 제시할 수 있다. 따라서 이하에서는 <표 5-6>의 보급환경 시나리오에 따른 환경편익을 균형감 있게 살펴보려 한다.

2. 지열냉난방 시스템 보급에 따른 온실가스 배출량 변화 분석

2.1. 온실가스 직접 배출량 분석

2.1.1. 도시가스 난방연료 소비의 전력 대체와 온실가스 배출 감축

본 연구의 분석 대상인 277세대의 아파트에 대해 도시가스 난방이 적용되었다면, 연간 이 건물 냉난방으로부터의 온실가스 배출량은 얼마나 될 것인가? 본 연구 제4 장에서는 지난 5년 동안 가구 냉난방 부문에 지열냉난방 시스템을 성공적으로 운영 중인 감전동 277세대 아파트를 대상으로, 전통냉난방을 도입했을 때의 에너지소비량을 동시에 검토하였다.

감전동 277세대 아파트가 전통냉난방 시스템 이용 시 도시가스 소비에서 비롯된 온실가스 배출량은 해당 건물의 난방에서 기인한 온실가스 직접 배출량에 해당한다. <표 4-12>에서 전통냉난방 시스템 적용을 가정한 감전동 아파트가 연간 소비하는 주택난방용 도시가스 사용 총량(급탕 제외)은 약 1,320,772MJ 수준이었다. 여기에 온실가스 배출계수(56,100kg/TJ)를 적용하면 감전동 아파트 277세대가 1년 중 도시가스 난방을 했을 때의 온실가스 배출량은 약 74.1CO₂ton으로 추정된다.

2.1.2. 시나리오별 온실가스 직접 배출량 감축

지열냉난방 시스템 도입 시 전통냉난방 시스템의 난방기(1~4월, 10~12월) 주택 난방용 도시가스 사용량이 전력으로 대체된다. 이 때 주택난방용 도시가스 소비로부터 발생했던 온실가스 배출량이 감소하는데, 이는 분석 대상 아파트의 온실가스 직접 배출량 감소에 해당한다. 따라서 분석 대상 아파트에 지열냉난방 시스템을 적용 시 주택난방용 도시가스 소비의 감소에 기인한 온실가스 감축량(74.1CO₂ton)을 바탕으로, 지열냉난방 시스템 보급 환경(Red, Yellow, Green, <표 5-6> 참조)에 따라 온실가스 배출량을 추정해보면 다음과 같다¹⁰⁵⁾.

105) 정부의 임대주택 보급계획에서 최소한 지역별 할당량 정보를 얻을 수 있다면 지역별 기온, 난방열 사용량 등에 맞춰 에너지소비 등의 가정을 차별화할 수 있을 것이다. 그러나 아쉽게도 미래 임대주택 보급계획에 지역별 할당 정보는 파악하기 어려웠다. 이에 본 연구의 환경편익 분석에서는 부득이 지열냉난방 적용 임대아파트의 에너지소비 등의 특성이 분석 대상 아파트와 동일하게 유지된다고 가정하였다.

먼저 현재보다 지열냉난방 보급 환경이 악화된 상황을 가정한 ‘시나리오 Red’에서는 연간 약 58,870CO₂ton, 2017년 포항지진 이후부터 현재까지 유사한 수준의 보급환경을 유지하는 ‘시나리오 Yellow’에서는 연간 약 117,739~235,479CO₂ton의 온실가스 직접 배출량 감소가 나타난다. 지열냉난방 보급을 위한 여건이 전격적으로 개선된 ‘시나리오 Green’에서는 연간 약 588,697CO₂ton의 온실가스 직접 배출량이 줄어들었다. 결과적으로 지열냉난방 시스템 1년 운영 시 보급 환경에 따라 건물 부문 온실가스 직접 배출량은 최소 58,870CO₂ton에서 최대 588,697CO₂ton까지 감축될 수 있다. 특히 ‘시나리오 Green’의 온실가스 직접 배출 감축량(588,697CO₂ton)은 2030 NDC 상향안의 건물 부문 온실가스 직접배출 목표량(약 35,000천CO₂ton)의 1.7%, 2018년 대비 건물 부문 필요 온실가스 감축량(약 17,100천CO₂ton)의 3.4%에 해당하는 값이다. 지열냉난방 시스템 도입으로 전통냉난방 시스템 대비 감축할 수 있는 온실가스 직접 배출량을 보급 환경 시나리오별로 정리해보면 아래 <표 5-7>과 같다.

<표 5-7> 2030년 지열냉난방 시스템 도입 시 감축 가능한 온실가스 직접 배출량

시나리오	지열냉난방 보급률	지열냉난방 보급량 (호)	온실가스 직접 배출량 감축분 (CO ₂ ton)
Red	10%	220,080	58,870
Yellow	20%	440,160	117,739
	30%	660,240	176,609
	40%	880,320	235,479
Green	100%	2,200,800	588,697

자료: 저자 직접 작성

2.2. 온실가스 간접 배출량 분석

지열냉난방 시스템 도입으로 전통냉난방 시스템 대비 증가하는 전력소비는 건물 부문에서의 직접적인 온실가스 배출량은 감소시키지만 발전 부문에서의 온실가스 간접배출을 유발할 것이다. 발전 부문에서의 온실가스 간접 배출량을 구체적으로 추정하기 위해 본 연구는 국내 전력시장 급전환경을 효과적으로 구현하여 국내 전력시장의 계량 분석에 널리 활용되고 있는 M-Core를 이용, 전력계통 모의를 진행하고자 한다.

2.2.1. 전력계통 모의(M-Core) 전제

① M-Core SUDP 알고리즘의 원리 및 DB 구성

M-Core는 강제풀 시장(Mandatory Pool)이면서 변동비 반영시장(Cost Based Pool)인 국내 전력시장을 구현한 전력계통 모의 패키지로, 스프레드시트(spreadsheet) 기반의 알고리즘 분석을 핵심으로 한다. 발전기 단위에서 상향식(bottom-up)으로 전력계통을 모의하며, 전력계통 모의에 필요한 기초정보에는 발전설비 진입·폐지 일정, 일/시간대별(1년 8,760시간) 전력수요 전망치, 발전기별 예방정비 계획, 제약발전 조건¹⁰⁶⁾, 시간대별 재생에너지 발전 패턴 등이 포함된다. M-Core는 이러한 기초정보들을 이용해 스프레드시트 기반의 SUDP(Single Unit Dynamic Programming) 알고리즘 분석을 진행한다.

〈표 5-8〉 M-Core SUDP 5단계 알고리즘 요약

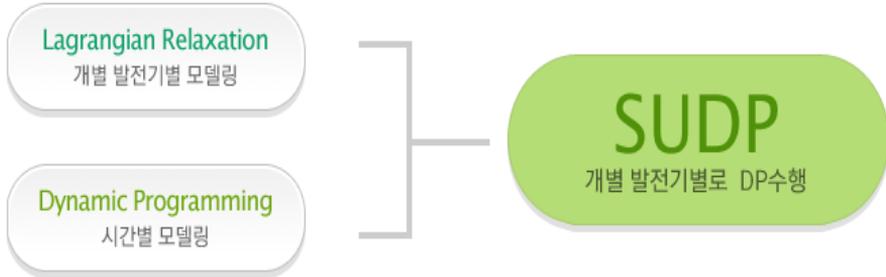
알고리즘 단계	단계별 발전기 DP 주요 특징
1단계	공급 가능용량이 90% 수준일 때 발전 평균비용이 낮은 순서로 발전기들의 기동 우선순위를 결정
2단계	모든 발전기들의 시간대를 초기화(OFF 상태, ON/OFF 중 택일)
3단계	하한 및 고정계약 조건이 적용되는 발전기는 제약시간대의 기동정지계획 상태를 'ON' 상태로 설정
4단계	지역별(수도권, 비수도권, 제주) ON 상태 발전기들의 공급 가능 용량 합과 실질수요, 전체 지역 ON 상태 발전기들의 공급 가능 용량 합과 총 실질수요를 초기화
5단계	모든 시간대의 각 지역 한계가격을 높은 값으로 설정

자료: 장인의 공간(2019). pp.10~11; 박우영·이상람·김재엽(2021). p.46 표 재인용

SUDP 알고리즘 분석은 총 5단계에 걸쳐 진행되는데(〈표 5-8〉 참조), 분석의 최종 목표는 '발전기별 최적 기동정지계획 및 출력값' 도출이다. 이를 위해 알고리즘 분석 단계별로 개별 발전기의 '발전비용 최소화'를 위한 모델링(Lagrangian Relaxation)과 '시간대별 모델링(Dynamic Programming, DP)'이 수반된다(그림 5-1 참조).

106) 열계약, 연료계약, 발전기 출력제한 등이 이에 해당한다.

[그림 5-1] M-Core 최적화 시뮬레이션 관계도



자료: 장인의공간 홈페이지(http://www.masterspace.co.kr/renewal/product/product01_01.asp#, 접속일: 2022.10.15.)

SUDP 알고리즘 분석의 최종 목표는 발전기별 발전비용의 극소화(cost minimization)를 위한 최적 기동정지계획과 최적해를 도출하는 것이다. 따라서 전력계통 운영에 필요한 주요 정보¹⁰⁷⁾를 제약조건으로, 발전기 기동정지계획의 목적함수(objective function)를 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$\min Cost = \sum_{i \in ALLGEN} \sum_{t=1}^{t \leq NT} ((a_i p_{i,t}^2 + b_i p_{i,t} + c_i) \times FC_i \times ON_{i,t} \times SC_i \times UP_{i,t})$$

ALLGEN: 총 발전기 그룹

NT: 분석 시간

a_i : 발전기 (i)의 비용 2차 함수

b_i : 발전기 (i)의 비용 1차 함수

c_i : 발전기 (i)의 비용 상수

$p_{i,t}$: 발전기 (i)의 t 시간에서의 출력

FC_i : 발전기 (i)의 열량 단가

$ON_{i,t}$: 발전기 (i)의 t 시간에서의 운전 여부 (1 운전, 0 정지)

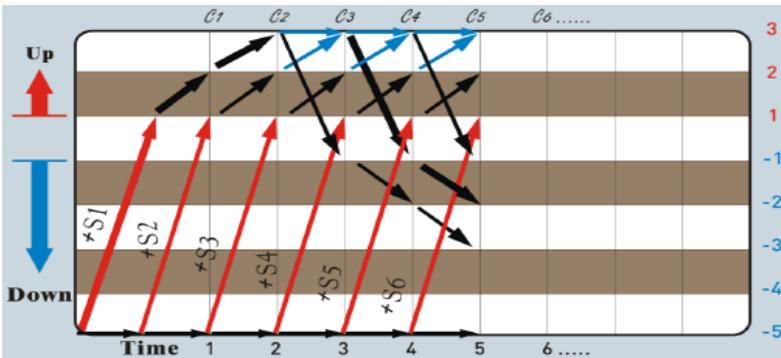
SC_i : 발전기 (i)의 기동 비용

$UP_{i,t}$: 발전기 (i)의 t 시간에서의 기동 여부 (1 기동, 0 비기동)

107) 일/시간대별 전력수요 전망, 발전기별 출력 제약, 발전기별 최소운전 및 정지시간, 송전제약 등이 포함된다.

한편 SUDP 알고리즘 수행 전 국내 전력시장의 급전규칙에 의거, 비중앙 발전기, 시운전 발전기, 수력 및 양수 발전기, 신재생 발전설비는 우선적으로 가동시켜 관련된 발전량을 일/시간대별 전력수요에서 먼저 차감한다. 이후 나머지 전력수요에 대해 원자력, 석탄, LNG 등 전통전원으로부터의 발전량을 배분한다. 아울러 SUDP 알고리즘은 발전기별 변동비를 반영한 ‘경제급전(economic dispatch)’ 원칙을 따른다. 즉 평균 발전비용이 낮은 발전기는 급전순위가 상대적으로 높을텐데, 급전순위가 높은 발전기들에 대해서는 최소 운전시간 및 정지시간에 대한 정보를 토대로 ‘동적 계획상태(DP state)’를 작성한다. 예를 들어 어떤 발전기의 상태가 양(+)¹⁰⁸의 값이라면 해당 발전기가 켜져 있는 시간을 의미하고, 음(-)의 값이라면 해당 발전기가 꺼져 있는 시간을 의미한다¹⁰⁸). 아래 [그림 5-2]에 최소 운전시간 3시간 및 최소 정지시간 5시간인 발전기를 가정하여 동적 계획상태 및 SUDP 알고리즘 수행 과정을 나타내보았다.

[그림 5-2] SUDP 알고리즘 수행 과정(최소 운전시간 3시간, 최소 정지시간 5시간)



자료: 장인의 공간(2019), p.14 그림 재인용

그렇다면 전력계통 SUDP 알고리즘 분석을 위한 세부 데이터베이스(DB)는 어떻게 구성되어야 할까? 발전기별 발전비용 극소화를 위한 경로와 최적해 도출을 목표로, 전력계통 모의에 필요한 M-Core 세부 DB는 크게 기준정보, 공급정보, 수요정보, 계통정보로 구분해 볼 수 있다.

108) 예컨대 어떤 발전기의 상태가 +1이라고 가정하면, 이는 1시간 동안 해당 발전기가 켜져 있는 상태를 의미한다. 즉 최소 운전시간이 3시간인 발전기라면 +1~+3 사이의 상태를 유지할 수 있는 것이다(전원이 켜진 후 3시간 이상 운전 상태에 있는 발전기는 +3으로 계속 표시).

먼저 **기준정보**는 발전회사 및 발전소 종류, 자원별 진입페지 일정, 발전기 투입 연료 종류, 발전연료별 CO₂ 코드 등의 정보로 구성된다. M-Core는 발전기 수준에서부터 상향식 전력계통 모의를 특징으로 한다. 따라서 기준정보는 발전기별 운영기간과 발전연료의 종류, CO₂ 배출계수 등을 구분하는 기초정보로 이해할 수 있다. **공급정보**의 경우 발전기별 특성정보¹⁰⁹⁾, 복합화력설비의 자원구성(CC/GT/ST), 송전손실 계수(Transmission Loss Factor, TLF), 원전 기동정지 증발 및 감발률, 신재생 발전원 정보 및 월별/시간대별 이용률, 발전연료별 열량단가, 열제약 등의 정보가 포함된다. 즉 발전비용 및 급전순위를 결정짓는 주요 정보들이 공급정보로 분류되어 있으며, 발전연료별 열량단가는 <표 5-9>의 제9차 전력수급기본계획(이하 제9차 수급계획) 수립 당시 열량단가 정보를 준용한다¹¹⁰⁾.

<표 5-9> M-Core 전력계통 모의 DB의 기준 열량단가

(단위: 천원/Gcal)

연료	열량단가
원자력	2.4
유연탄	24.3
LNG	40.9~49.6

자료: 한국전력거래소 전력통계정보시스템(EPSS) 열량단가 실적치(2019.5~2020.4) 등을 참고해 저자가 직접 작성하였으며, 박우영·이상람·김재엽(2021). p.54의 표 내용과 동일

수요정보는 분석 연도의 일/시간대별(8,760시간) 수요전망 자료를 의미한다. 미래의 일/시간대별 수요를 전망하는 데 있어 다양한 방법론이 존재하고 총 수요량은 제9차 수급계획의 목표수요에서 송배전 손실율(약 3.6%)을 보정해 산정 가능하다. 이렇게 산정된 송전단 기준 연간 총 전력수요와 최대부하를 바탕으로, 전력거래 실적 등으로부터 추정된 일/시간대별 부하패턴과 일정한 부하율을 결합하면 시간대별 전력수요량 전망이 가능하다. 마지막으로 **계통정보**에는 송전제약, 정산관련 정보¹¹¹⁾ 등이 해당된다. 발전 과정에서 송전망 운영과 정산 측면에 정책적 또는 기술적 제약이 필요한 경우 관련정보를 입력한다.

109) 발전기 설비용량, 최소 운전시간 및 정지시간, 투입연료, 비용계수, 발전연료별 CO₂ 배출계수 등이 포함되어 있다.

110) 2022년 10월 현재, 글로벌 에너지 공급망이 교란되고 고유가 현상이 지속되고 있다. 이러한 상황에서 본 연구 전력계통 모의 DB의 열량단가 전제는 다소 현실과 괴리된 측면이 있는 것이 사실이다. 그러나 현재의 고유가 현상이 유가변동의 장기 추세에 얼마나 영향을 줄 것인지는 전문가들마다 의견이 상이하다. 한편 2020년 열량단가 실적치의 반영비율을 높이면 COVID-19 충격 등으로 인한 이례적 저유가 현상의 영향이 커질 수 있어 SMP 장기추세와 괴리될 우려가 있다. 이에 본 연구는 제9차 수급계획 수립 당시에 이용되었을 것으로 추정되는 발전연료별 열량단가 전제(2019년 5월~2020년 4월 열량단가 실적치 혼합)를 준용한다.

111) 용량가격 정보, 정산 조정계수, 발전연료별 CO₂ 단가 등이 해당된다.

② 제10차 전력수급기본계획 총괄분과 실무안

2030년 지열냉난방 시스템 보급을 가정한 시나리오를 설계하였으므로 M-Core를 이용한 전력계통 모의의 DB 구축 방향을 설정해야 한다. 가장 먼저 고려해야 할 사항은 2022년 8월에 발표된 '제10차 전력수급기본계획(이하 제10차 수급계획) 총괄분과위 실무안'이다. 해당 자료에는 2030년에 대한 목표수요(565.6TWh) 및 최대 전력수요(전력시장 기준 103.4GW) 전망¹¹²⁾, 2030년 설비믹스 전망(가용한 모든 원전의 계속운전 반영)¹¹³⁾, 그리고 2030년 전원별 발전비중 전망(원전 32.8%, 신재생 21.5%)¹¹⁴⁾과 관련된 내용이 포함되어 있다.

특히 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안에 따르면 제10차 수급계획의 2030년 발전믹스는 2030 NDC 상향안의 전환 부문 온실가스 배출 목표(약 1.5억 CO₂ton) 달성을 목표로 구성되었다. 원전 계속운전 및 신규 원전 반영을 통한 원전 역할 확대, 무탄소 발전(수소암모니아 혼소 발전) 진입, 2030년 신재생에너지 발전비중 21.5% 달성(NDC 상향안 30.2%, 제9차 수급계획 20.8%), 탈석탄 기조 유지 등이 2030년 발전믹스의 핵심적 특징이다¹¹⁵⁾.

현재 제10차 수급계획이 공식적으로 발표되지 않은 상황이라 정격설비용량 기준 발전원별 신규 발전소들의 구체적 진입계획을 알 수 없다. 따라서 2030년 계속운전 여부가 비교적 명확하게 파악되는 원전을 제외하고, 나머지 발전원들의 2030년 정보(발전설비용량 등)는 제9차 수급계획의 전제를 일부 준용할 수밖에 없는 상황이다. 다만 2030년 일/시간대별(8,760시간) 전력수요 전망은 제10차 수급계획의 2030년 목표수요와 최대전력 전망치를 바탕으로 새롭게 작성할 필요가 있다. 본 연구는 10차 수급계획 총괄분과 실무안의 2030년 목표수요(565.6TWh)를 2010~2021년 송배전손실을 평균값(약 3.63%¹¹⁶⁾)으로 보정하여 송전단 발전량(약 586.9TWh)을 먼저 추정하였다. 여기에 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안의 2030년 최대전력수요(전력시장 기준)인 103.4GW와 2021년 일/시간대별 전력거래실적(발전실적)¹¹⁷⁾ 패턴 등을 종합적으로 고려해 2030년 일/시간대별 전력수요를 새롭게 전망하였다.

112) 산업통상자원부(2022.8.30). p.2 내용 참조

113) 산업통상자원부(2022.8.30). p.4 내용 참조

114) 산업통상자원부(2022.8.30). p.5 내용 참조

115) 산업통상자원부(2022.8.30). p.5 내용 참조

116) 2011~2022년 한국전력통계 각호 송배전 손실을 실적 참조

117) 한국전력거래소 2017~2021년 시간대별 발전실적 자료(공공데이터포털, <https://www.data.go.kr/data/15065387/fileData.do>, 자료 추출일: 2022.10.3)

③ 2030년 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따른 전력소비 증가량

2030년 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따라 시나리오별로 전력소비 증가량은 상이하게 나타난다. 감전동 아파트 277세대에 대해 지열냉난방을 적용했을 때 전통 냉난방 대비 연간 전력소비가 약 86,695kWh 증가하므로(〈표 5-1〉 참조) 2030년 지열냉난방 시스템 보급 환경에 따라 연간 69~689GWh의 전력소비가 증가한다(〈표 5-10〉 참조). 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따라 증가한 전력소비량을 각각 2030년 송전단 발전량에¹¹⁸⁾ 가산하여 일/시간대별 전력수요를 재조정된 후 전력계통 모의를 진행하면 지열냉난방 시스템 도입에 따른 발전 부문의 온실가스 간접 배출량 변화를 구체적으로 추정할 수 있을 것이다.

〈표 5-10〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급에 따른 전력소비 증가

시나리오	지열냉난방 보급률	지열냉난방 보급량 (호)	전력소비 증가량 (GWh)
Red	10%	220,080	69
	20%	440,160	138
Yellow	30%	660,240	207
	40%	880,320	276
Green	100%	2,200,800	689

자료: 저자 직접 작성

2.2.2. 2030년 전력계통 모의 시나리오 분석 결과

① 2030년 시나리오별 발전믹스

M-Core 전력계통 모의를 위해 지금까지 설명한 방법론과 전제를 모두 반영해 2030년 전력계통 모의를 진행하였다. 전력계통 모의 시 염두에 두어야 할 첫 번째 원칙은 2030년 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안의 2030년 발전믹스 전제(원전 계속운영)를 최대한 따르되 원전 외 설비는 아직까지 정보의 불비(不備) 상태이므로 제9차 수급계획의 전제를 준용하는 것이다. 두 번째 원칙은 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안의 2030년 목표수요와 최대전력수요, 발전원별 발전비중¹¹⁹⁾을 토대

118) 제10차 수급계획 총괄분과 실무안에서 추정된 송전단 발전량 약 586.9TWh를 기준으로 가산한다.

119) 다만 수소 및 암모니아 발전에 해당하는 무탄소 전원은 본 연구의 전력시장 모의에서 고려하지 않는다. 제10차 수급계획이 발표되지 않은 시점에서 수소 및 암모니아 혼소를 적용할 발전기를 특정하는 것이 쉽지 않고, 모든 석탄화력에 암모니아를 20% 이상 혼소한다고 가정하더라도 국내 석탄화력 발전기에 투입될 암모니아 연료의 열량당가 기준이 없어 국내의 혼소 실증사업 등에서 적용한 비현실적 가격 전제를 무리하게 적용해야하기 때문이다.

로 도출한 일/시간대별 전력수요 전망을 사용한다는 점이다. 마지막 세 번째는 지열 냉난방 보급 수준별로 상이하게 나타난 전력소비 증가분(〈표 5-10〉 참조)을 제10차 수급계획 총괄분과위 실무안의 2030년 송전단 발전량에 더해 전력계통 모의를 진행한다는 점이다. 이러한 원칙에 따라 2030년 지열냉난방 보급 시나리오에 대해 전력계통 모의를 진행한 결과 발전믹스는 〈표 5-11〉과 같이 추정되었다. 2030년 지열 냉난방 보급 수준에 따라 시나리오별로 최소 69GWh에서 최대 689GWh까지 연간 전력소비량이 증가하고 발전믹스에 근소한 변화를 보였다.

〈표 5-11〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급 시나리오별 발전믹스

(단위: GWh)

시나리오	보급률	전력소비 증가량	발전량 (발전단 기준)						
			원자력	석탄	LNG	유류	신재생	기타	합계
보급 전	-	-	214,051	126,168	139,001	229	132,295	3,543	615,287
Red	10%	69	214,060	126,177	139,054	229	132,295	3,543	615,358
	20%	138	214,069	126,187	139,102	229	132,295	3,543	615,426
Yellow	30%	207	214,073	126,194	139,159	229	132,295	3,543	615,494
	40%	276	214,094	126,197	139,210	229	132,295	3,543	615,570
Green	100%	689	214,100	126,278	139,508	229	132,295	3,543	615,954

주: 전력소비 증가량은 2030년 누적치에 해당
 자료: 저자 직접 작성

② 2030년 시나리오별 발전단 온실가스 배출량

2030년 지열냉난방 시스템 보급 환경에 따라 전력소비가 69~689GWh 증가하고 〈표 5-11〉과 같은 발전믹스가 도출되었다. 이에 따른 시나리오별 온실가스 배출량은 〈표 5-12〉와 같이 추정되었는데, 지열냉난방 보급 규모가 확대될수록 히트펌프 전력소비량 증가에 따라 발전 부문의 온실가스 배출량도 빠르게 증가하였다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 가장 열악한 지열냉난방 보급 환경을 가정한 ‘시나리오 Red’에서는 지열냉난방 보급 전 대비 석탄, LNG, 유류 등 화력발전 부문 전력생산량이 약 61.9GWh 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 2030년 발전 부문 온실가스 배출량은 지열냉난방 보급 전 대비 총 25,676CO₂ton 가량 증가하였다. 또한 ‘시나리오 Yellow’와 ‘시나리오 Green’에서는 지열냉난방 시스템 이용에 따른 연간 전력소비 증가폭이 확대되면서 화력발전 부문의 전력생산량이 더욱 증가하였다. 그 결과

‘시나리오 Yellow’에서는 약 50,580~94,234CO₂ton의 온실가스 간접 배출이, ‘시나리오 Green’에서는 약 263,455CO₂ton의 온실가스 간접 배출이 발생하였다.

2030년 220만 호의 신축 임대아파트에 대해 지열냉난방 시스템 보급비율이 10%p씩 확대될 때마다 평균 22,853CO₂ton의 온실가스가 발전 부문에서 추가 배출되는 양상을 보였다. 결국 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방 시스템 보급이 건물 부문의 탈탄소화에는 직접적으로 기여하지만 발전 부문에서의 탄소중립 목표 달성에 부정적 영향을 미칠 수 있다는 점이 명확해졌다. 아울러 건물 부문 냉난방의 탈탄소화가 발전 부문에서의 온실가스 배출 증가로 이어지는 수준을 완화하려면 지열냉난방의 전력소비 절감 방안을 마련하는 등 발전 부문의 온실가스 배출량 증가를 최소화할 수 있는 별도의 수단이 필요해 보인다.

〈표 5-12〉 2030년 지열냉난방 시스템 보급 시 발전원별 온실가스 배출량 변화

(단위: CO₂ton)

시나리오	지열냉난방 보급률	석탄	LNG	유류	합계
Red	10%	8,139	17,536	0.7	25,676
	20%	16,325	34,255	0.7	50,580
Yellow	30%	20,940	53,035	0.7	73,975
	40%	23,056	71,177	0.7	94,234
Green	100%	91,337	172,117	1.8	263,455

주: 지열냉난방 시스템 보급 전 대비 발전원별 온실가스 배출 변화량을 표시

자료: 저자 직접 작성

3. 소결 - 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익 평가

지금까지 2030년 지열냉난방 시스템이 220만 호의 임대주택에 대해 보급되었을 때 건물 부문에서 전통냉난방(도시가스 보일러 + 에어컨) 시스템 대비 ‘직접적으로 감축되는 온실가스 배출량’과 히트펌프 이용에 따른 냉난방 전력소비 증가로 발전 부문에서 ‘간접적으로 증가하는 온실가스 배출량’을 나누어 살펴보았다. 2030 NDC 상황안은 각 부문의 온실가스 배출 목표를 직접 배출 기준으로 작성하고 있지만¹²⁰⁾ 탄소중립 사회로의 이행은 사회 전 부문에 걸친 탄소저감 효과를 동시에 고려하지 않을 수 없을 것이다.

120) 관계부처 합동(2021.10.18). p.11 내용 참조

2030년 기준으로 220만 호 임대주택에 지열냉난방 시스템을 도입할 경우, 주택 난방용 도시가스의 전력대체에 따라 58,870~588,697CO₂ton의 온실가스 직접 배출량 감축이 발생한다. 이에 반해 지열원 히트펌프 이용에 따라 난방 기간에는 전통난방 시스템에서 발생하지 않았던 전력소비가 유발되고, 냉매를 이용한 에어컨보다 냉방효율이 상대적으로 높아 냉방 기간 전력소비 절감을 보이면서 연간 약 69~689GWh의 전력소비 증가가 발생한다. 이렇게 증가한 연간 전력소비는 발전 부문의 전력생산 확대와 온실가스 배출 증가로(건물 부문 온실가스 간접 배출량) 이어진다. 결국 집단 주거용 건물에 대한 지열냉난방 시스템 보급의 온실가스 작간접 배출효과를 모두 고려하면 2030년 사회 전체적인 온실가스 배출량은 최소 33,194CO₂ton에서 최대 325,241CO₂ton까지¹²¹⁾ 감소할 것으로 예상된다(〈표 5-13〉 및 [그림 5-3]).

한편 220만 호 전체 임대주택에 대해 지역냉난방을 적용했을 때(시나리오 Green) 온실가스 직접배출 감축량(588,697CO₂ton)과 온실가스 간접배출 증가량(263,455CO₂ton)의 비율은 약 2:1 수준이므로 발전 부문에서의 온실가스 간접배출 증가를 이유로 지열냉난방 시스템 보급의 환경편익을 전면적으로 부정하는 것은 쉽지 않아 보인다. 지열냉난방 시스템 도입으로 건물 냉난방의 탈탄소화의 직접적 환경편익은 확보하되 발전 부문에서 유발되는 온실가스 간접배출 증가를 억제할 수 있는 정책을 추가적으로 고민해야 할 부분이라 생각된다.

이미 언급한 사항이지만 2030 NDC 상향안의 부문별 온실가스 배출목표 작성 기준에 의거할 때 지열냉난방 시스템 보급이 2030년 건물 부문 온실가스 배출목표(직접 배출량 기준) 달성에 직접적으로 기여하는 정도는 최대 1.7% 수준이며, 이는 2018년 대비 2030년 건물 부문 온실가스 배출목표 달성에 필요한 감축량의 3.4% 수준이다. 지열에너지 이용에 대한 수용성이 저하된 시점에서 임대주택에 대한 보급으로 한정하였음에도 불구하고 단일 온실가스 감축 수단으로 지열냉난방 도입의 효과가 작다고 볼 수는 없다. 비록 중단기적으로는 임대주택에 대한 지열냉난방 보급을 고려하였지만 장기적 관점에서 민간 영역으로의 지열냉난방 보급이 가능하다면 지열 등 신재생에너지원에 기반한 주택용 냉난방 사업의 사회적 환경편익은 크게 확대될 것으로 예상된다.

121) 신승진·허성호·박지영(2021)에 따르면 1톤 이하 용달 차량의 2001~2019년 평균 연료사용량을 기준으로 측정된 연간 온실가스 배출량은 약 18.09CO₂ton 수준이다(자세한 내용은 신승진·허성호·박지영(2021), pp.10~11 내용 참조). 2030년 지열 냉난방 시스템 보급이 사회 전체적으로 유발하는 온실가스 순 감축량을 기준으로 할 때, 220만 호 임대주택의 10%에만 지열 냉난방이 보급되더라도 연간 약 33,194CO₂ton의 온실가스 감축이 발생한다. 이는 1톤 이하 용달차량 약 1,835대의 연간 온실가스 배출량에 해당한다.

〈표 5-13〉 2030년 지열냉난방 보급 시나리오별 온실가스 배출 순 변화

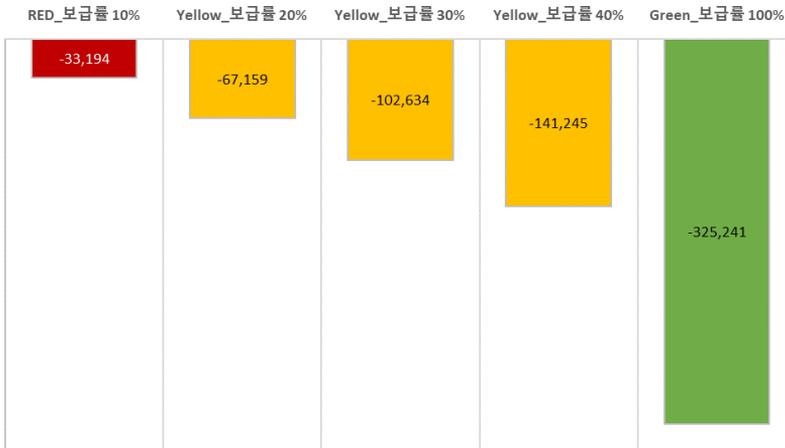
(단위: CO₂ton)

시나리오	지열냉난방 보급률	발전단			소비단	온실가스 배출 순 변화량 (e)
		석탄 (a)	LNG (b)	유류 (c)	가스난방 (d)	
Red	10%	8,139	17,536	0.7	-58,870	-33,194
Yellow	20%	16,325	34,255	0.7	-117,739	-67,159
	30%	20,940	53,035	0.7	-176,609	-102,634
	40%	23,056	71,177	0.7	-235,479	-141,245
Green	100%	91,337	172,117	1.8	-588,697	-325,241

주: CO₂ 순 변화량(e) = (a) + (b) + (c) + (d)

자료: 저자 직접 작성

[그림 5-3] 2030년 지열냉난방 시스템 보급 수준에 따른 온실가스 배출 순 변화

(단위: CO₂ton)

자료: 저자 직접 작성

제6장

국내 지열냉난방 시스템 보급을 위한 정책제언

집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템의 이용에 대해 제2장부터 제5장의 주요 결과를 짚어보면 다음과 같다. 먼저 제2장 및 제3장에서 지열원 히트펌프를 이용한 지열냉난방 시스템은 연중 일정하게 유지되는 상온의 지하수를 이용하므로 천부지열원 이용에 해당하며, 안전성과 냉난방 효율이 높은 기술이라는 사실을 확인할 수 있었다¹²²⁾. 한편 해외 주요국에서는 주택 냉난방에 히트펌프와 지열에너지를 적용하는 방안에 대해 오래전부터 관심을 기울여 왔고, 미국과 프랑스 등에서는 냉난방 뿐 아니라 급탕에까지 지열을 이용하려는 움직임이 있다. 그러나 기술적 성숙단계에 이르기까지는 아직 많은 R&D가 필요한 상황이다. 국내의 경우 2017년 포항지진 이전까지만 해도 지열원 직접이용 히트펌프의 활용에 대해 적극적인 R&D가 진행되었으나 지진이 발생한 이후부터는 지열원 이용과 관련된 연구가 거의 중단된 상태다.

제4장에서는 지진이라는 천재지변의 영향으로 국내에서 재정 지원이 거의 중단된 지열냉난방 사업의 경제성을 살펴보았다. 본 연구에서는 5년 이상 안정적으로 운영된 지열냉난방 세대적용 사례(부산 감전동 277세대 아파트)를 선정해 실(實) 계측된 데이터에 기반한 경제성 분석을 진행하였고, 도시가스 보일러와 에어컨을 적용한 전통냉난방 방식 대비 지열냉난방 시스템이 에너지비용 측면에서 나름의 강점이 있다는 점을 확인할 수 있었다. 그러나 총 비용 측면에서 지열냉난방 시스템은 2022년 10

122) 여름철엔 지하수 온도가 대기 온도보다 낮아 냉방효율이 높고 겨울철엔 지하수 온도가 대기 온도보다 높아 난방효율이 높다.

월의 높은 에너지가격 체계에서조차 도입 20년차 이후부터 비로소 전통난방에 대한 비용 우위를 겨우 접하는 것으로 평가되어 경제성이 확보되기 어려운 한계점이 노정(露呈)되었다. 아울러 동일한 에너지소비에 있어 지열난방이 전통난방보다 비용을 절감하는 장점은 최종 소비자(입주자 및 세입자)의 편익에 해당한다. 결국 지열난방 시스템 구축에 투입되는 비용은 사업자가 부담하게 되므로 경제적 편익 관점에서 국내 지열난방 보급 환경은 실로 척박하다. 유럽, 미국 등 해외 선진국에서 건물 난방에 지열원을 이용하는 연구를 활발히 진행하고 있는 만큼, 적어도 정부가 국내 지열난방 연구와 사업을 지원할 명분을 확보하려면 경제적 편익이 아닌 사회적 편익에서 그 답을 찾아야 할 것으로 보인다.

제5장에서는 본 정책연구의 궁극적 목표인 지열난방 시스템 보급의 환경편익을 분석하였다. 환경편익은 사회적 편익(social benefit)의 일종이므로 만약 지열난방 시스템 보급이 일정 수준의 환경편익을 확보할 수 있다면 보급을 위한 정책을 지속적으로 추진할 수 있는 공적(公的) 기반을 확보하는 셈이다. 본 연구에서는 지열에너지 이용 사업에 대한 지원이 크게 축소된 상황에서 지열난방 시스템 보급을 위한 단계적 접근이 필요하다고 판단하였다. 따라서 주거안정 등 공공성을 바탕으로 공급되며 제로에너지건물 효율등급 달성에 보다 적극적일 유인이 있는 국민 임대주택 등을 중심으로 지열난방 시스템을 보급하는 상황을 가정하였다.

신정부 주택보급 정책을 바탕으로 2030년 임대주택 보급량을 추산하고 이에 대해 지열난방을 적용하는 시나리오 분석을 진행한 결과는 다음과 같다. 임대주택 220만 호에 대해 지열난방 시스템 적용 범위를 단계적(Red, Yellow, Green)으로 확대할 경우 주택난방용 도시가스를 전기와 지열에너지로 대체하면서 건물 부문 온실가스 직접 배출량이 약 58,870~588,697CO₂ton 감축되었다. 반면 지열을 이용한 난방에서는 도시가스 난방에서 발생하지 않았던 전력소비가 지열 히트펌프 이용으로 증가한다. 그에 따라 발전 부문에서 간접적으로 증가한 온실가스 배출량은 약 25,676~263,455CO₂ton 수준으로 추정되었다. 따라서 사회 전체적으로 감축되는 온실가스 순 배출량은 약 33,194~325,241CO₂ton 수준으로 산정되었다. 2030년 지열난방 시스템 보급이 크게 활성화된다면 단일 온실가스 감축 수단으로 건물 부문 2030 NDC 달성에 적지 않은 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 2030년 임대주택에 한 정된 보급을 가정한 상황에서 직접 감축량 최대치(588,697CO₂ton)를 달성할 경우

2018년 대비 건물부문 온실가스 필요 감축량(17.1백만CO₂ton)에서 차지하는 비중은 약 3.4% 수준이며, 건물 에너지효율향상 및 화석연료 기반 난방의 전력화를 통한 감축량(11.2백만CO₂ton)에서 차지하는 비중은 약 5.3% 수준으로 추정되었다¹²³⁾. 이렇듯 아파트 등 집단 주거시설 세대에 대해 지열냉난방 시스템을 보급하는 것은 온실가스 감축이라는 환경편익이 명백해 사회적 편익 제고에 기여할 뿐 아니라 정책적 지원을 위한 공적 기반도 확보할 수 있을 것으로 예상된다. 다만 최근 수년간은 국내에서 지열냉난방 시스템을 보급할 나름의 정책적 근거가 충분하더라도 주민 수용성 문제 등으로 인해 정책 당국이 지열에너지 직접이용 관련 정책을 적극적으로 제시하는 것이 현실적으로 어려운 상황이다. 본 장에서는 이러한 정책적 어려움을 고려해 지열냉난방 보급을 위한 정책방향 및 정책과제를 구체적으로 제시해보고자 한다.

1. 지열냉난방 시스템 경제성 측면

1.1. 에너지비용 절감 효과의 지속가능성

본 연구의 집단 주거시설에 대한 지열냉난방 시스템의 경제성 분석 결과에 따르면, 전통냉난방 시스템 대비 초기투자비용이 높은 지열냉난방 시스템이 비용 측면에서 그나마 강점을 보이는 부문은 에너지비용 부문이다. 그러나 전통냉난방에 대한 지열냉난방의 에너지비용 우위로 초기투자비용 등 고정비에서의 열위를 극복하는 정도는 에너지가격 수준에 따라 달라진다. 즉 에너지가격이 낮게 유지된다면 지열냉난방의 전통냉난방에 대한 에너지비용 절감폭은 줄어들 것이며, 이는 곧 지열냉난방의 에너지비용 측면에서의 상대적 우위가 항구적으로 유지될 수 없다는 의미기도 하다.

규제요금제 성격을 지닌 국내 전기요금 체계는 경직적인 측면이 있어 국제 에너지가격 변동을 즉각적으로 반영하지는 못한다. 그러나 2020년 12월 정부는 원가연계형 요금제 등 합리적 전기요금으로의 체계개편¹²⁴⁾을 단행하는 등 전기요금이 적기에 조정되지 못해 가격신호가 왜곡되어버린 국내 전기요금 체계의 고질적 문제점을 해결하고자 노력 중이다. 한편 올해 초에는 러-우크라이나 사태로 글로벌 에너지 공급망 교란이 발생하면서 초고유가 현상이 지속되었고, 그 결과 발전비용 정산 과

123) 관계부처 합동(2021.10.18). p.18 내용 참조

124) 산업통상자원부(2020.12.17). pp.1~3 내용 참조

정에서 한전의 적자가 큰 폭으로 확대되기도 하였다¹²⁵⁾. 이에 정부는 전기요금 인상폭을 고심하고 있는 상황이다¹²⁶⁾. 도시가스 요금 역시 LNG 수입가격 변동에 영향을 받아 2019~2022년 9월 기준으로 각 년도 전년 동월 대비 평균 7.8%의 변동성을 보였다(〈표 6-1〉 참조).

〈표 6-1〉 2018~2022년 9월 주택난방용 도시가스 소매요금 전국 평균값

연도	2018	2019	2020	2021	2022
원/MJ	16.6596	17.2332	15.4956	15.4947	18.2597

자료: 도시가스협회 연도별 도시가스 요금표(<http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp>, 자료출처일: 2022.10.5)

이렇듯 에너지가격은 외생변수로 그 변화를 예측하는 것이 쉽지 않다. 반대로 생각해 보면 경제성 분석 시점에 따라 지열난방과 전통난방의 초기투자비용 격차를 에너지비용 우위로 상쇄하지 못해 경제성 확보가 요원해질 수도 있다. NREL(2021)¹²⁷⁾에서도 미국 내 가스 등 경쟁 난방연료와의 상대가격 체계가 지열난방 시스템 보급의 성패를 좌우할 수 있다는 점에 대해 언급하고 있는 점을 감안해 보면 에너지 가격 수준에 따라 지열난방의 경제성 평가가 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

지열난방 시스템은 전통난방 시스템보다 더 많은 초기투자비용을 필요로 한다. 설비 투자비에서 발생하는 근본적인 비용 열위는 에너지비용 절감으로 일부 상쇄할 수 있지만, 전통난방에 대한 전체적인 경제성을 확보하기에는 미흡한 수준이다. 따라서 중장기적으로 지열난방 시스템의 고유 특성을 선별·강화해 지속가능한 비용우위를 보일 수 있는 기반을 마련할 필요가 있다. 이와 관련해 지열난방 시스템 세부 설비별로 초기투자비를 살펴보고, 비용이 많이 소요되는 부품에 대해 혁신적·지속적 R&D를 진행하는 것은 기본이 되어야만 한다. 특히 지열난방 시설 공사에서 비용을 많이 차지하는 부품은 지열우물공 공사(7.2억 원)와 히트펌프(3억 원)다(〈표 4-1〉 참조). 지열우물공 시공은 상온의 지하수가 나올 때까지 땅을 파야하고 경우에 따라서는 지하 400~500m 근처까지도 천공이 필요할 수 있다. 이 경우 천공비가 크게 인상될 수 있으므로 보다 합리적 수준의 초기투자비를 보장하려면 천

125) 한겨레(2022.8.12). '한전 상반기 대규모 영업적자...전기요금 인상 또 논란일 듯'. https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/1054531.html (검색일: 2022.10.2)

126) 연합뉴스(2022.9.1). '한전 올 적자 매우려면 가구당 전기요금 월 8만원 인상 불가피'. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20220920162600003> (검색일: 2022.10.1)

127) NREL(2021). p.38 내용 참조

공기기술의 개발이 중요해진다. 또한 지열냉난방 시스템의 핵심 설비중 하나인 히트펌프의 가격도 가성비 부품으로 대체할 수 있는 부분과 에너지소비효율을 제고할 수 있는 방안 등을 동시에 검토할 필요가 있다. 이러한 일련의 기술적 R&D들이 지열냉난방 고유의 비용경쟁력을 강화하고, 나아가 지속가능한 비용우위를 확보하는 근본적 방편이 될 것이다.

2017년 포항 지진 이후 한국에너지기술평가원을 중심으로 지원되던 지열에너지 관련 신규 R&D 투자가 눈에 띄게 축소된 것으로 파악되었다([그림 2-7] 및 [그림 2-8]). 포항 지진의 원인이 지열 발전이라는 것은 주지(周知)의 사실이지만, 본 연구 제2장에서 살펴보았듯, 심부지열을 이용하는 지열발전과 천부지열을 이용하는 지열냉난방은 지열에너지를 이용하는 방법에 큰 차이가 있고 안전관리 수준과 방법 역시 상이하다. 그러나 공교롭게도 과거 지열을 주제로 연평균 3~4개 이상은 수행되던 지열 관련 연구가 1개로 축소되었고, 특히 지열 히트펌프에 대한 추가적인 연구는 확인하기 어려운 실정이다(<표 2-1> 참조). 지열발전이 원인이 되어 지진이 일어났다고 해서 지열에너지 이용 활성화와 관련된 모든 연구지원을 중단하다시피 하는 것은 장기적 관점의 에너지정책으로 보기 힘들 것이다. 지열에너지를 다루기 어렵다는 이유로 대책 없이 방치하기보다 다룰 수 있는 부분, 특히 지열냉난방과 같이 지반 안전성에 큰 영향을 미치지 않으면서 탄소저감에 기여할 수 있는 기술에 대해서는 객관적이고 장기적인 시각에서 정부의 R&D 투자가 지속될 필요가 있다. 다만 ‘지열냉난방 시스템 고유의 가격경쟁력 확보를 위한 기술 R&D 확대’는 지열 이용에 대한 국민들의 부정적 인식을 극복하려는 정부와 공공기관의 노력이 반드시 병행되어야만 한다는 점을 간과해서는 안 된다. 정부의 정책적·재정적 지원은 국민의 세금에서 비롯되므로 지열에 대한 국민들의 인식이 개선되지 않는다면 지열에 대한 정부와 공공기관의 R&D 지원은 지속적 추진 동력을 확보하기 어려울 것이다.

따라서 정부와 공공기관을 중심으로 천부지열의 특성과 지열냉난방 이용과 관련, 객관적 사실에 기반한 지열냉난방의 장단점, 탄소중립 등 국가비전 차원에서 기술개발을 진행해야 하는 이유, 기대효과에 대한 전문적이고 체계적인 홍보를 제언한다. 해외에서 지열냉난방을 이용하는 사례와 기술적 특성에 대해 시각적이고 직관적인 홍보를 통해 지열 이용에 대한 국민들의 이해도를 제고하는 것은 기본적 조치일 것이며, 2017년 포항 지진 이후 국내 지열 이용에 대한 주민 수용성 현황 파악을 위한

전문적이고 계량화된 연구(AHP, CVM 기반 연구 등)가 우선적으로 진행될 필요가 있다. 현재까지는 포항지진으로 지열 이용에 대한 주민 수용성이 낮아져 연구개발 투자 등이 위축되었다는 의견이 현상에 대한 정성적 해석 수준에서 분출되고 있으나, 이제는 지열 이용에 대한 국민들의 공감을 실질적으로 확보하기 위한 전문성 있는 한 걸음이 중요할 것이다.

1.2. 지열냉난방 시스템 구축의 비용 부담과 편익 향유

본 연구에서 진행한 지열냉난방 시스템의 경제성 분석은 전통냉난방 방식으로 지열냉난방 시스템과 동일한 냉난방 소비량 및 패턴을 충족시켰을 때 지열냉난방 시스템이 비용을 얼마나 절감할 수 있는지가 핵심 내용이었다. 전술한 바와 같이 이러한 경제성 분석 방식에서 발생하는 경제적 편익은 에너지비용 절감에서 비롯된 편익으로, 결국 최종 소비자인 입주자 및 세입자의 편익에 해당한다.

물론 건설사 입장에서도 지열냉난방 구축에 투입되는 비용을 건설비에 포함시켜 분양단가로 어느 정도 회수할 수 있을 것이다. 그러나 경제주체의 현시선호(revealed preference) 경향에 비추어 볼 때 건설사 입장에서 21.8억 수준의 지열냉난방 시스템 초기투자비용은 전통냉난방 시스템의 초기투자비용인 15.2억 대비 적지 않은 비용 부담일 것이며, 시공난이도에 따른 안전관리 비용까지 포함되면 지열냉난방 시스템 구축 시 건설사들이 체감하는 비용 부담은 더 커질 것으로 예상된다.

경제성 분석 결과에서도 확인하였듯, 초기투자비용에 있어 지열냉난방 시스템의 전통냉난방 시스템에 대한 열위는 에너지비용의 우위로부터 일부 만회된다. 다시 말해 초기투자비용과 유지관리비용 등 건설사에 귀속된 비용은 지열냉난방 시스템이 항상 열위에 있을 수밖에 없다. 중요한 점은 전통냉난방 대비 발생하는 에너지비용 편익은 최종 소비자인 입주자 또는 세입자의 경제적 편익이므로 지열냉난방시스템 구축에 소요되는 비용은 일차적으로 건설사의 온전한 부담이 된다는 점이다.

이와 같이 비용 부담 주체와 편익 향유 주체가 다른 구조는 건설사들이 지열냉난방 시스템을 채택하는 데 있어 부정적 요소로 작용한다. 따라서 정부가 환경적 편익 제고와 탄소중립 목표 달성이라는 정책적 대의 하에 대규모 아파트 단지에 대한 지열냉난방 시스템 보급을 확대하고자 한다면 최종 소비자들(입주자 및 세입자)에게 동일한 냉난방 에너지 소비 시 에너지비용 부담이 낮은 것을 강조하는 것과 별개로,

건설사에 대해 친환경 탈탄소 냉난방 시스템 구축에 대한 설비 보조금을 지원하거나 전통냉난방 시스템 대비 감축된 탄소배출량에 대한 보상¹²⁸⁾ 등을 추가적으로 고려할 필요가 있다. 즉 탈탄소 사회 이행이라는 정책적 관점에서 지열냉난방 보급을 확대하려면 사업자 입장에서 보조금과 같은 재정적 지원 없이 지열냉난방을 선택할 경제적 인센티브가 전혀 없는 현실을 직시해야만 하는 것이다.

1.3. 냉난방 시스템 경제성 비교를 위한 정보 공유의 필요성

본 연구는 개별 도시가스 난방을 지열난방의 비교군으로 설정해 경제성을 비교하였다. 분석 대상인 감전동 아파트 건설계획 당시 지역난방이 아닌 개별 도시가스 난방을 고려했다가 지열냉난방 시스템을 채택했으므로 개별 도시가스 난방을 가정하여 경제성 분석을 진행하였다. 그러나 앞으로 보급될 신도시에는 지역난방이 적용될 가능성이 높으므로 향후 기회가 된다면 지역난방을 적용했을 때의 경제성을 함께 비교해 보는 것도 의미가 있을 것이다.

문제는 지역난방을 적용했을 때의 설비비용 정보를 확보하는 것이 쉽지 않다는 점이다. 직관적으로 생각했을 때 중앙난방 배관은 지열냉난방 시스템과 동일할 것이고 지하 기계실에 공급된 지역난방 온수를 각 세대가 이용할 수 있도록 열교환기를 설치해야 한다. 그러나 지역난방을 위한 열교환기 한 대의 비용 등 기초적인 비용정보 자체를 확보하는 것이 어려운 실정이다.

일반적으로 지역난방이 개별 도시가스 난방보다 경제성이 높다는 평이 있다¹²⁹⁾. 이러한 전제들을 반영해 지열냉난방 시스템을 지역난방 및 에어컨을 적용한 경우와 경제성 비교를 수행한다면, 지열냉난방 시스템은 최근 고유가 시점의 에너지가격(2022.10)을 적용하더라도 전통냉난방 시스템에 대한 경제성을 전혀 확보하지 못할 가능성이 높다. 이 모든 것을 검증하려면 비용과 관련된 데이터들이 일정 수준 확보되어야 할 것이다.

본 연구에서 확보한 지열냉난방 시스템 경제성 분석 관련 비용정보만 해도 현장 별로 확보하는 것이 결코 용이하지는 않다. 도시가스 난방 또는 지역난방 설비와 관

128) 이 때 전통냉난방 시스템 대비 감축된 탄소배출량은 유관 기관들의 엄격한 검증을 통해 결정되는 일련의 체계가 반드시 구축되어야 한다.

129) 평택에너지서비스(2013). p.5 내용 참조

련된 정보도 건설사나 주택 관련 공공기관(LH, SH 등)의 협조를 받아야 확보할 수 있겠지만 대체로 대외비 처리된 경우가 많다. 결국 경제성 분석은 데이터 확보가 가능한 비용요소 내에서 이루어질 수밖에 없고, 지열냉난방 등 신재생에너지 이용을 효과적으로 활성화하려면 이를 검증할 수 있는 비용 정보와 분석 틀의 공유가 적어도 연구 목적 하에서는 활성화의무화될 필요가 있다.

미국 NREL의 경우 수전해 등 신재생에너지 이용 신기술의 경제성 분석과 관련된 분석 틀을 주기적으로 업데이트 및 공유하고 있다¹³⁰⁾. 이에 본 연구는 지열냉난방 시스템의 적절한 이용과 보급 활성화를 위해 에너지 부문 전문가를 중심으로 실증 운영 현장별 설비비용 정보와 신뢰성 있는 운영성과 데이터 등을 주기적으로 공유 가능한 플랫폼 구축을 제안한다. NREL 수준은 쉽지 않겠지만 주택 관련 공공기관(LH 등)-에너지공단-에너지기술평가원의 삼각 공조 하에 지열냉난방 관련 정부주도 실증사업이나 민간 주도 프로젝트 지원사업의 진행 경과와 성과, 설비 특성, 투입비용, 에너지소비 관련 데이터 등을 플랫폼을 통해 에너지 부문 전문가들에게 공유할 필요가 있을 것이다. 이 때 민간 사업자가 대외비 성격의 투자비용 공유에 적극적인 경우 정보공개 투명성 제고에 기여한 점을 근거로 한 세제 혜택 등을 고려해 볼 수 있을 것이다¹³¹⁾.

2. 지열냉난방 시스템 환경성 측면

2.1. 건물 부문 온실가스 직접감축 효과의 확대

난방의 전력화는 건물 및 가정 부문의 탄소중립 이행의 대표적 전략으로 평가된다. 지열원 기반 히트펌프를 적용한 지열냉난방 역시 건물 냉난방 부문의 탈탄소화에 해당하며, 주택난방용 도시가스 소비를 전기 소비로 대체하고 지열원 난방 전력소비의 효율을 에어컨보다 높이면서 건물 부문 온실가스 감축에 기여한다. 이 중 도시가스 보일러 난방에 투입된 주택난방용 도시가스 소비를 전력 및 지열에너지로 대체하는 것이 건물 부문 온실가스 직접 배출량 감축의 주요 경로다. 본 연구 제5장의

130) NREL Energy Analysis(<https://www.nrel.gov/analysis/data-tools.html>, 접속일자: 2022.10.2)

131) 민간 사업자의 지열냉난방 투자 정보 공유를 법적으로 강제하는 것은 다른 분야 민간 사업자들의 형평성 문제가 발생할 수 있고 정보공개와 에너지 관련 법제 개정을 동시에 추진해야 하는 문제도 있으므로 실현 가능성이 극히 떨어진다.

결과에 따르면 2030년 기준 약 220만 호의 임대주택에 한해 지열냉난방 시스템을 보급할 경우 보급 환경에 따라 전통냉난방 시스템 운영 대비 약 58,870~ 588,697 CO₂ton의 온실가스 직접 배출량이 감소하는 것으로 나타났다.

기축 건물의 냉난방 시스템을 지열냉난방 시스템으로 교체하는 것이 현실적으로 불가능한 대안임을 감안할 때, 지열냉난방 시스템의 건물 부문 온실가스 직접감축 효과는 얼마나 많은 신축 건물에 지열냉난방을 보급하느냐에 따라 근본적인 성과가 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 정부의 주택공급 계획에 의거해 넓은 의미의 임대주택 보급(44% 수준)을 가정해도 과반 이상의 신축 아파트가 민간 건설사로부터 공급되는 점을 고려하면, 지열냉난방 시스템의 온실가스 직접배출 감축 효과는 민간 아파트 영역으로 확장될 때 그 효과가 더욱 커질 것이다.

따라서 신축건물에 대해서는 임대를 넘어 민간 영역으로까지 지열냉난방을 확대할 수 있는 정책 지원이 절실하며, 공공성 및 정책적 목적이 강한 임대주택을 대상으로 지열에너지 냉난방을 보급하는 것은 중단기적으로 지열냉난방사업의 트랙 레코드를 확보하는 측면에서 유의미할 것이다. 만약 주거지로 인기가 많고 주변 생활 인프라가 잘 구축되어 있는 서울 특정 지역의 민간분양 아파트에 지열냉난방이 도입되고 좋은 평가를 받는다면 지열냉난방 시스템 확산에 필요한 홍보효과는 훨씬 클 것이다. 이에 본 연구는 냉난방 시스템의 최종 소비자인 민간분양 아파트 입주자들에 대해 경제성 중심의 연구성과 확산을 유도하는 한편, 민간아파트 건설사에 대해서는 지열냉난방 도입으로 2030년 기준 3~4등급 이상의 제로에너지건물 효율등급을 받게 될 경우¹³²⁾ 세제 혜택을 부여하는 등의 정책 인센티브 설계를 제언해본다.

2.2. 발전 부문 온실가스 배출량 증가 대응

제5장에서 우리는 지열냉난방 시스템이 확산될수록 히트펌프 전력소비량 증가에 따른 발전 부문 온실가스 배출 증가가 동시에 수반되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 전통냉난방 방식을 대체해 건물 부문에서 직접적으로 감축할 수 있는 온실가스 배출량이 발전 부문에서 발생하는 간접적인 온실가스 배출 증가량보다 약 2배 가량 많고¹³³⁾, 건물 부문 및 사회 전체의 탄소저감이라는 정책적 대의를 고려할 때

132) 국토교통 2050 탄소중립 로드맵에 따른 때 2030년 기준 500㎡ 규모 이상의 민간건물에 대해 제로에너지건물 효율등급 5등급(에너지자립률 20~40% 미만)이 의무화 된다. 따라서 이보다는 1~2등급 상향한 기준을 제시함으로써 태양광 외 신재생에너지 자원인 지열냉난방 시스템 도입을 유도해보려는 것이다.

발전 부문에서의 온실가스 간접 배출량이 증가하는 문제가 지열냉난방 시스템 확대에 심각한 장애요소가 될 것으로 보이지 않는다.

지열원 기반 히트펌프를 이용, 건물 부문 냉난방의 탈탄소화로 발전 부문의 온실가스 배출량이 다소 증가하는 문제는 발전 부문에서의 온실가스 배출 비용을 최종 소비자(입주자)에 적절히 전가(pass-through)하는 방식으로 어느 정도 해소할 수 있을 것이다. 즉 냉난방 수요의 증가로 발전량이 늘어나고 이것이 발전 부문의 탄소배출 증가로 이어졌다면 그로 인해 증가한 발전 부문 온실가스 배출비용이 전기요금에 적기(適期) 반영될 필요가 있다는 의미다. 이렇게 된다면 지열냉난방 최종 소비자들의 냉난방 수요 절감을 효과적으로 유도할 수 있을 것이다.

최종 소비자(입주자 및 세입자)가 전통냉난방으로 유발되는 온실가스 배출비용(발전 부문과 건물 부문 모두 해당)을 전기요금이나 가스요금 인상 등의 형태로 체감하면 소비자가 에너지비용을 증시하는 경향이 강화될 여지가 커지고¹³⁴⁾, 이는 건물주가 건물 신축 시 지열냉난방을 채택하는 유인으로 작용해 지열냉난방 확산의 기반이 된다. 또한 지열냉난방 도입 이후부터는 발전 부문에서의 온실가스 배출비용이 전기요금을 통해 입주자 및 세입자에게 전가될 것이고 이는 냉난방 소비 절감으로 이어져 발전 부문에서의 온실가스 배출 증가현상을 완화하는 선순환 체계가 확립되는 것이다.

제10차 수급계획 총괄분과위 실무안에서는 원전 계속운전을 통해 비용효율적으로 2030 NDC 상향안 목표를 달성하려는 의도가 엿보인다. 그러나 2030년 기준 가용한 모든 원전을 계속운전 하더라도 현행 낮은 전기요금 수준에서 지열냉난방 보급 규모가 점점 확대되어 갈 때의 전력소비 증가 및 발전 부문 온실가스 배출 증가에 충분히 대처할 수 있을지는 의문이다. 따라서 지열냉난방의 최종 소비자가 발전 부문의 온실가스 배출비용을 통감해 지열냉난방 에너지소비량(전력소비량)을 절감하는 체계가 확립되면 '타 부문(발전 부문) 온실가스 영향을 최소화하는 건물 부문 탄소배출 저감 수단'으로서 지열냉난방 시스템의 친환경적 가치를 제고할 수 있다. 이는 정부가 지열냉난방 시스템 보급 및 지원을 확대할 수 있는 하나의 공적(公的) 명분이 될 수 있을 것이다.

133) 본 연구의 제5장 소결 부문 내용 참조(pp.94~96)

134) 계약종별로 다소 차이는 있겠지만 조성진(2022)에 따르면 전력소비 전반에 대한 평균적인 가격탄력성은 대략 0.11 수준으로 음(-)의 값을 보인다(자세한 내용은 조성진(2022), pp.84~87 참조). 따라서 본 연구는 전기요금 등 에너지가격이 상승하면 전력수요는 감소하는 것으로 간주하였다.

제7장

결론

1. 주요 결론 및 시사점

본 연구를 기획하면서 일반인들에게 태양광과 풍력을 제외하고 익숙한 신재생에너지원이 무엇이나고 질문을 한다면 어떤 답을 기대할 수 있을지 생각해보았다. 다양한 답을 얻을 수 있겠지만 적어도 태양광과 풍력만큼 인지도가 있는 신재생에너지원이 무엇인지 특정할 수 없었다. 사실 지열에너지는 필자에게도 일반 대중에게도 결코 익숙한 신재생에너지원이 아니다. 더군다나 2017년 포항 지진의 원인으로 지열발전이 지목되면서 국내에서는 다루기 어렵고 위험한 에너지원이라는 인식이 적지 않게 퍼져있는 듯하다.

이에 필자는 지열에너지의 냉난방 부문 이용에 대한 연구를 진행하면서 일반 대중이 궁금해할만한 요소를 단계적으로, 직관적으로 풀어나가하고자 하였다. 먼저 지열 냉난방 시스템의 안전성에 대해 정확한 사실을 전달할 필요가 있었다. 지열냉난방이 지열발전과 동일하게 다루기 어렵고 위험하게 인식된다면 지열냉난방의 이용을 설득할 명분이 없기 때문이다. 제2장의 조사 결과로부터 우리는 지열냉난방 시스템이 상온 상태의 지하수와 히트펌프를 결합한 신재생에너지 기반 냉난방 시스템이라는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 보다 깊은 곳의 심부지열원을 이용하는 지열발전과는 개념적으로, 기술적으로 전혀 다르다는 것을 의미하며, 국내외에서 지열원 기반

히트펌프를 이용한 기술연구와 실증사업이 활발히 진행되었다는 사실은 지열냉난방이 우리의 일상에 생각보다 가까이 있는 기술이라는 점을 방증(傍證)하는 것이었다.

제3장의 해외 사례로부터 미국은 지열을 이용한 지역난방에 오래전부터 관심이 있었고 관련된 프로젝트를 20개 이상 진행하고 있었다. 그러나 경쟁 난방연료인 LNG의 가격이 저렴해 가격경쟁력이 더 높은 시기에는 전력으로 히트펌프를 가동해 난방을 하는 지열난방을 선택할 유인이 없다는 점과 미국처럼 열원 공급지(서부)와 수요지(동부) 간 거리가 먼 경우 지열 지역난방의 경제성 확보가 쉽지 않은 한계점을 확인할 수 있었다. 프랑스에서는 IEA의 지열 전담 부서의 주도로 노인요양시설과 주택에 대해 지열을 냉난방과 급탕에 모두 이용하는 프로젝트를 진행하고 있었다. 이들 국가가 우리나라와 다른 점은 지열에너지 이용의 필요성을 인정하고 다양한 깊이에서 지열에너지원을 안전하게 이용하는 방법을 꾸준히 연구하고 있다는 점이었다. 특정한 사건이나 문제가 발생했다고 해서 에너지원 자체에 대한 지원을 중단하는 사례는 찾아볼 수 없었다.

다음으로 국민들이 지열냉난방을 이용할만한 구체적 유인이 무엇인지, 국가 전체적으로 지열냉난방을 장려할만한 가치는 있을지에 대한 검토가 필요하다고 판단하였다. 사업자는 지열냉난방 시스템 공급자며 입주자나 세입자는 지열냉난방 시스템의 수요자다. 경제성 분석에 필요한 비용과 편익을 구분해보면 지열냉난방 구축에 소요되는 비용은 사업자에 귀속되고, 전통냉난방 대비 에너지비용 절감분은 입주자 및 세입자에 귀속된다. 즉 최종 소비자인 입주자 또는 세입자에게는 경제적 편익이 존재하지만 사업자의 경우 초기투자비용을 적절히 회수할 수 없다면 지열냉난방을 선택할 유인이 없을 것이라 생각했다. 이러한 판단 하에 본 연구는 국내에서 아파트 세대 냉난방에 지열냉난방 시스템을 안정적으로 적용·운영 중인 사례(감전동 277세대 아파트)를 찾았고, 해당 아파트의 지열냉난방 시스템 시공 및 관리업체로부터 운영 및 부하 실측 데이터, 설비비용 데이터 등을 확보하여 경제성 분석을 진행해보았다.

경제성 분석 결과 국내 아파트 지열냉난방 시스템은 30년 운영기간 동안 에너지 가격이 특별히 높았을 경우에 한해 도입 후 최소 20년이 지나서야 전통냉난방에 대한 비용 우위를 겨우 보였다. 상대적으로 낮은 에너지가격을 가정할 경우 지열냉난방은 전통냉난방에 대해 도입 후 26년차 이후부터 경제성을 확보하는 것으로 나타났다. 즉 현재 기술 수준과 고정비용 구조 하에서 지열냉난방이 전통냉난방을 대체할 경

제적 유인은 전혀 없다고 봐도 무방하다. 2017년 포항지진 이후 국내 지열원 이용에 대한 연구와 투자가 크게 위축된 상황에서 5년여간 안정적으로 운영 중인 지열냉난방 시스템조차 전통냉난방에 대한 경제성을 확보하지 못한 현실은 정책적 의지 없이 지열냉난방 보급이 확대될 시장환경이 아직 조성되지 못했다는 것을 의미한다.

경제적 편익 측면에서 지열냉난방 보급이 어렵다면 지열냉난방을 보급할 가치가 없다고 보아야 할 것인가? 이에 대해서는 다양한 의견이 있을 수 있고, 만약 경제성 원칙으로만 보급이 이루어져야 한다면 국내외 어느 곳에서도 지열냉난방을 이용할 방안을 고민하고 있지 않을 것이다. 하지만 우리는 제3장에서 유럽, 미국 등에서 지열의 냉난방 부문 이용을 위한 노력이 오래전부터 추진되어 온 것을 알게 되었다. 따라서 본 연구는 지열냉난방이 경제적 편익 측면에서 가진 한계를 넘어 사회적 편익, 즉 환경적 편익 측면에서 보급 가치를 찾을 수 있을지 고민해보았다.

환경적 편익 측면에서 지열냉난방 도입을 추진할만한 가치가 있을지에 대해, 본 연구는 신정부 주택공급 정책을 바탕으로 2030년 임대주택 규모를 산정 후 시나리오별 온실가스 배출량 변화를 살펴보았다. 지열냉난방이 전통냉난방 방식을 대체하면서 주택난방용 도시가스 소비가 사라진다. 대신 난방용(급탕 제외) 전력소비가 새롭게 발생하고 냉방철에는 상온 지하수 이용에 따른 냉방효율 제고로 같은 냉방부하에 대해 전력소비량이 감소한다. 이러한 관계를 종합하면 지열냉난방이 건물 부문에 온실가스 직접 감축을 유발하는 규모가 2030년 기준 58,870~588,697CO₂ton으로 추정되었고, 발전 부문에 대해 온실가스 배출을 간접적으로 발생시키는 규모는 25,676~263,455CO₂ton 수준임을 알 수 있다. 온실가스 직접 감축량과 및 간접 배출량을 종합하면 사회 전체적으로 2030년 기준 CO₂ton의 온실가스 감축효과가 발생한다. 비록 본 연구는 2017년 포항지진 이후 국내 지열원 이용에 대한 부정적 인식이 높아졌고 지열냉난방 시스템 도입 및 운영에 대한 정보가 충분히 확산되지 못한 현실을 감안해 중단기적 관점의 임대주택 보급만을 대상으로 했지만, 지열냉난방 보급대상 범위가 민간 분양분까지 확대된다면 사회적 편익인 환경편익은 더욱 크게 발생할 것이다.

제5장까지의 논의를 통해 본 연구는 지열냉난방이 경제적 편익 관점에서는 전통냉난방을 대체할 유인이 없지만 탈탄소 사회로의 이행을 위한 사회적·환경적 편익 관점에서는 충분히 도입가치가 있는 냉난방 방식이라는 점을 확인하였다. 아직 민간

의 자발적 투자를 이끌어내기엔 기술적, 경제적 성숙도가 미진한 냉난방 시스템이지만 건물 냉난방 부문의 탄소중립을 위한 몇 안 되는 신재생열 기반 냉난방 방식이라는 점에 초점을 맞추어 본 연구는 국내에서 지열냉난방 시스템 보급을 활성화하기 위한 다섯 가지 정책을 제안하였다.

첫 번째 정책제언은 에너지비용 절감이 지열냉난방 시스템 자체의 경제성을 개선하는 항구적 요소로 생각해서는 안 되며, 지열공과 히트펌프 등 지열냉난방 시스템의 주요 기술에 대한 R&D를 적극 지원해 지열냉난방만의 고유한 비용 경쟁력을 확보할 수 있도록 유도해야 한다는 것이다. 이 때 지열냉난방 관련 R&D 확대의 추진 동력을 확보하기 위해서는 현재 저하되어 있는 지열 관련 국내 주민 수용성을 개선하는 노력이 반드시 병행되어야만 한다. 두 번째 정책제언은 지열냉난방 시스템 구축의 비용 부담 주체와 편익 향유 주체가 다른 점에 착안하였다. 환경적 편익이 있어 정책적 대의는 확보할 수 있지만, 경제적 편익이 없는 지열냉난방에 대해 설비 보조금 등을 지원해 건설사의 초기투자비용 및 운영유지비 부담을 완화할 필요가 있다. 이를 통해 신축 아파트 건설 시 사업자가 지열냉난방을 선택할 인센티브 구조를 설계하는 것이다. 세 번째 정책제언은 지열냉난방 연구 목적 하에 시스템 실증 및 운영 정보 공유를 위한 플랫폼을 구축·운영해보자는 것이었다. 최소한 에너지 부문 전문가들에게는 관련 정부주도 혹은 민간지원 지열냉난방 프로젝트와 관련된 세부 투자비, 기술 정보, 에너지소비 데이터는 공유할 필요가 있다. 네 번째 정책제언은 지열냉난방 보급을 임대 건물에만 국한하지 말고 민간 건물 영역으로도 확대할 수 있는 세제 혜택과 정책 인센티브를 설계하자는 것이었으며, 마지막 다섯 번째 정책제언은 지열냉난방 시스템 확대로 발전 부문 온실가스 간접 배출량이 증가하는 현상을 완화하기 위해 지열냉난방 확대에 따른 발전 부문 온실가스 배출 비용 증가분을 최종 소비자(입주자 및 세입자)에 전가함으로써, 지열냉난방의 전력소비 절감을 유도하는 것이 골자였다.

본 연구의 결과에 따를 때 국내 지열냉난방 시스템은 경제성 측면에서 전통냉난방에 비해 경쟁력을 갖추지 못한 상황이다. 그러나 지하수 열원을 이용하는 기술적 특성 및 국내외 이용 현황, 그리고 환경편익 등에 있어서는 국내 보급을 확대할만한 긍정적 요소들이 분명 존재한다. 다만 현 시점에서는 지열이용 자체에 대한 수용성과 초기투자비 문제 등의 요인으로 공공성과 정책적 판단을 토대로 공급되는 임대

주택에 한해 지열냉난방 적용을 고려할 수밖에 없는 실정이다. 사실 난방의 전력화를 통해 건물 냉난방의 탈탄소화를 추진할 때 가장 우려스러운 요소들 중 하나는 과도한 전력소비의 증가다. 히트펌프를 세대 난방에 적용한다면 목표 온도에 도달하기까지 전력 소모가 발생할 수밖에 없고, 히트펌프 난방 보급이 확대될수록 총 전력소비와 발전량도 증가하면서 부하관리와 친환경 전력조달 방안에 대한 문제가 대두될 것이다. 그럼에도 불구하고 건물 냉난방의 친환경화, 건물의 에너지자립도 제고 등 건물 부문의 탄소중립이 건실히 추진되어야 한다면 전기를 이용한 난방과 신재생에너지원의 결합이 자연스러운 대안이라 판단된다. 지열냉난방처럼 상온의 지하수를 히트펌프와 연계해 목표 난방온도 달성에 소요되는 전력소비량을 절감하는 것이 신재생에너지와 전력화된 난방 방식이 결합된 대표적인 사례일 것이다. 이러한 측면에서 본 연구의 지열냉난방의 비용구조 및 환경편익 분석 결과가 건물 냉난방의 탈탄소화를 추진해야 하는 정책 당국, 제로에너지건물 보급 의무에 직면한 건설사, 그리고 냉난방비 절감으로 규모 있는 가계운영이 필요한 국민들에게 유의미한 정보와 시사점을 제공할 수 있으리라 판단된다. 본 연구가 급격히 위축된 국내 지열 이용 연구와 산업 활성화에 작은 기여를 할 수 있기를 기대해 본다.

2. 한계점 및 향후 과제

본 연구는 아파트 세대 냉난방에 지열냉난방 시스템을 실제 적용·운영하고 있는 현장에서, 비록 2021년 1년에 대한 자료기는 하나 10분 단위의 에너지소비 실측자료를 추출하였다. 그리고 분석 대상 지열냉난방 시스템이 에너지비용과 환경적 측면에서 장점이 있다는 점을 정량적으로 증명해보았다.

연구를 설계할 당시 지열냉난방 시스템 보급 및 운용에 대한 투자비와 에너지소비량 등의 정보를 가감 없이 안정적으로 제공해줄 수 있는 현장을 찾지 못한 불가능에 가까운 일이었다. 다행스럽게도 급탕은 제외되었지만 순수 냉난방에 대해서만큼은 지열냉난방 시스템을 안정적으로 활용하고 있는 현장을 확보할 수 있었고, 연구에 필요한 데이터를 협조 받아 경제적·환경적 편익을 최대한 상세히 분석해 보았다.

다만 지열냉난방 시스템 운영 및 유지 과정에서 계량기 계측 데이터의 세분화가 다소 부족한 점은 아쉬웠다. 당초 에너지기술평가원과 조성한·김현재(2019) 등의 선

행연구 수행 시에는 연구 목적의 계량기를 별도로 설치해 필요한 실증 데이터를 충분히 확보할 수 있었지만 본 연구에서 데이터를 수집할 때에는 연구용 계량기가 이미 철거된 상태였다. 이에 따라 가구용 냉난방 부하를 산정할 때 2018년 가구에너지 상설표본조사의 33~66㎡의 도시가스 소비량과 에어컨 전력소비량 등의 정보를 참고해 이론적으로 재추정하는 과정이 필요했고, 그 결과 연간 냉방 부하가 약 334kWh로 추정돼 가구에너지 상설표본조사의 33~66㎡ 가구당 연간 에어컨 전력 소비량(약 239kWh)보다 다소 과다하게 나타났다. 현실성 있는 데이터 구축을 위해 노력을 기울였으나 결과적 측면에서의 데이터 신뢰성 부족은 본 연구와 같은 현장 기반(on-site) 상향식 데이터 수집형 연구가 필연적으로 직면하는 어려움이다. 한편 계측 데이터의 부족한 부분을 채워나가는 과정에서 과거 선행연구가 동일 건물의 공용 부문을 포함, 건물 전체의 최대 냉난방 부하를 대상으로 경제성 분석을 진행했다는 차이점을 발견할 수 있었는데, 이는 본 연구만의 현실성 있는 가구용 냉난방 부하를 작성하는 데에 도움이 되었다.

본 연구를 기획할 당시 국내 지열냉난방 이용에 대한 정부와 산학연의 대체적인 의견은 2017년 포항지진 이후 국내 지열 이용 자체에 대한 주민 수용성이 크게 저하되었고, 그 결과 관련 R&D와 투자가 여의치 않다는 점이었다. 이에 본 연구에서 국내 아파트 지열냉난방에 대한 낮은 주민 수용성은 일종의 대전제로 자리 잡고 있다. 그러나 지열 등 신재생에너지원 이용에 대한 주민 수용성은 AHP나 CVM 등 전문적 설문기법 등을 동원해 별도의 연구를 진행해야 비로소 정확한 현황을 파악할 수 있으며, 수용성이 실제로 현저하게 낮게 나타날 경우에 대해 구체적 대안 제시도 가능하다.

지열냉난방 시스템 보급의 경제성과 환경편익을 중점적으로 살펴보는 것이 본 연구의 주요 목적인 바, 지열냉난방의 수용성 연구까지는 별도로 진행하지 못한 것이 아쉽다. 국내 지열냉난방의 주민 수용성 수준과 수용성 개선을 위한 구체적인 대안을 제시하는 것은 지열냉난방에 대한 정책적 지원과 이용 확대를 위한 중요한 동력이 될 것이며, 이는 후속 연구의 과업으로 남겨둔다.

참고문헌

〈국내 문헌〉

- GGK. 2020. 「신기술특허공법 설계 적용을 위한 공법 비교」. (주)GGK 지열 기술비교 자료
- KDI. 2021. 「공기업 준정부기관 사업 예비타당성조사 수행을 위한 일반지침 수정보완 연구(제3판)」. 『2021년도 공공기관 사업 예비타당성 조사 연구보고서』. KDI 공공투자관리센터
- LG전자. 2022.2.8. 『휘센 시스템에어컨 제품 안내』. LG전자 제품 카탈로그
- 강경우·신지현·김상현·조영흠. 2017. 「지열히트펌프 시스템 효율 향상을 위한 설계 개선방안에 관한 연구」. 『한국생활환경학회지』, 제24권, 제2호. 한국생활환경학회
- 관계부처 합동. 2021.10.18. 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안」. 관계부처 합동 NDC 상향안 발표 별첨자료
- _____. 2022.8.16. 「국민 주거안정 실현방안」. 관계부처 합동 국민 주거안정 실현방안 발표 별첨자료
- 국민의힘. 2022. 「공정과 상식으로 만들어가는 새로운 대한민국」. 제20대 대통령선거 국민의힘 정책공약집
- 국토교통부. 2021.12. 「국토교통 탄소중립 로드맵」. 국토교통부 보도 별첨자료
- _____. 2021.6.2. 「2050년 탄소중립 달성을 위한 녹색건축 활성화 방안 발표」. 국토교통부 보도자료
- _____. 2021.6.21. 「국토교통부, 제로에너지건축 보급 확산 방안 발표」. 국토교통부 보도자료
- 김진성·송성호·정교철·차장환. 2015. 「지하수를 이용한 지열 냉난방 시스템의 경제성 및 이산화탄소 저감량 분석」 『The Journal of Engineering Geology』, 제25권, 제4호. 대한지질공학회
- 나선익·강은철·이익준. 2014. 「국제 호환형 지열히트펌프 시스템 경제성 평가 연구」. 『한국지열 에너지학회논문집』, 제10권, 제1호. 한국지열에너지학회

- 박성룡. 2006. 「지열시스템 설치사례 분석」, 『한국설비기술협회지』, 제23권 제3호 한국설비기술협회
- 박우영·이상람·김재엽. 2021. 『전원구성을 고려한 연료가격 충격의 전력 도매가격 안정성 영향 분석』, 에너지경제연구원 기본연구보고서, 에너지경제연구원
- 산업통상자원부. 2020.12.17. 「원가연계형 요금제 등 합리적 전기요금 체계개편안 확정」, 산업부 보도자료
- _____. 2022.8.30. 「제10차 전력수급기본계획 총괄분과위 실무안 공개」, 산업통상자원부 보도자료
- _____. 2022.9.23. 「산업부 2차관, “전기요금 인상 더 이상 미룰 수 없어」, 산업통상자원부 보도자료
- 심병완·김성균·최한나·이수형·하규철·김용철. 2021. 「암반 대수층에서 개방형 지열 시스템의 개발 및 적용」, 『산·재생에너지』, 제17권 제3호, 한국산·재생에너지학회
- 신승진·허성호·박지영. 2021. 「화물자동차 개별 특성을 고려한 무공해 차량 전환의 환경성 분석」, 『교통연구』, 제28권 제2호, 한국교통연구원
- 임효재·송윤석·공형진·박성구. 2004. 「지열 냉난방 시스템의 성능 및 경제성 평가」, 『한국에너지공학학회지』, 제13권 제4호, 한국에너지공학회
- 장인의 공간. 2019. 『M-Core 매뉴얼』
- 조성진. 2022. 『전환부문의 탄소가격 부과체계 개편방안 연구』, 한국조세재정연구원 연구용역 보고서, 에너지경제연구원 수행
- 조성한·김현재. 2019. 「집단거주지에 적용한 지열냉난방시스템의 경제성 분석」, 『한국자원공학회지』, 제56권 제3호, 한국자원공학회
- 조성한·김현재. 2020. 「집단거주지에 사용된 지열냉난방시스템의 신재생에너지 산출량 연구」, 『한국자원공학회지』, 제57권 제6호, 한국자원공학회
- 조정식·손병후. 2009. 「지열원 열펌프 이용 학교건물 냉난방시스템의 경제성 고찰」, 『지열에너지저널』 제5호, 제4권, 한국지열에너지학회
- 조정흙·남유진. 2017. 「복수정을 이용한 개방형 지열 시스템의 초기투자비 회수기간 분석」, 『설비공학논문집』, 제29권 제3호, 대한설비공학회

- 최창호. 2012. 「공공도서관에 지열시스템 적용 시 경제성에 관한 연구」. 『한국태양에너지학회논문집』. 제32권. 제1호. 한국태양에너지학회
- 평택에너지서비스. 2013. 『지역난방 상식 사전』. 지역난방 관련 Q&A 사례집
- 한국에너지공단. 2020. 『2020 신재생에너지 백서』. 산업통상자원부 · 한국에너지공단
- 한국전력공사. 2011~2022. 『한국전력통계 각 호』
- _____. 2022.10.1. 『기본공급약관』. 한국전력공사 마케팅기획처
- _____. 2022.10. 『선택공급약관』. 한국전력공사 마케팅기획처
- _____. 2016.12.1. 『2016년 전기요금 원가정보』. 한국전력공사 영업처
- _____. 2021.12.28. 『2021년 전기요금 원가정보』. 한국전력공사 영업처

〈외국 문헌〉

- GeoDH. 2014. “Developing Geothermal District Heating in Europe.” GeoDH Report
- IEA. 2021a. “Case Study: EHPAD the Champgarnier.” IEA Geothermal
- _____. 2021b. “Case Study: Detached house - Westhoffen.” IEA Geothermal
- Kevin, M., Koenraad, B., Katherine, R.Y., Nate, B. 2019. “GeoVision Analysis Supporting Task Force Report: Thermal Applications.” NREL Technical Report
- Lund, J.W., and Toth A.N. 2020. “Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review.” Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik. Iceland. April 26 - May 2. Paper No.01018
- NREL. 2021. “2021 U.S. Geothermal Power Production and District Heating Market Report.” NREL Market Report

〈웹사이트 및 자료〉

- kharn(칸). 2022.2.11. 노원 이지하우스, 4년간 E모니터링 결과 공개. <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=18627> (검색일: 2022.10.1)
- kharn(칸). 2020.2.10. [오해와 진실] 지열냉난방 시스템 분야. <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=11947> (검색일: 2022.10.1)
- MK 뉴스. 2020.5.26. 보일러 시장 점유율 1위는...경동·귀뚜라미 “내가 최고”. <https://www.mk.co.kr/news/business/view/2020/05/534587> (검색일: 2022.10.1)
- NREL Energy Analysis. <https://www.nrel.gov/analysis/data-tools.html> (접속일자: 2022.10.2)
- The Science Times. 2021.2.16. 아파트는 언제 늙고 어떻게 변해가나?. <https://www.sciencetimes.co.kr/news/%EC%95%84%ED%8C%8C%ED%8A%B8%EB%8A%94-%EC%96%B8%EC%A0%9C-%EB%8A%99%EA%B3%A0-%EC%96%B4%EB%96%BB%EA%B2%8C-%EB%B3%80%ED%95%B4%EA%B0%80%EB%82%98> (검색일: 2022.10.2)
- 2018년 가구에너지 상설표본조사. http://www.kesis.net/sub/sub_0001_04.jsp?CATEGORY_ID=C_078&SEQ=11&LOW_SEQ=&M_MENU_ID=M_M_001&S_MENU_ID=S_M_008 (접속일자: 2022.10.3)
- 경동나비엔 공식 쇼핑몰. <https://navienmall.co.kr> (접속일자: 2022.10.2)
- 귀뚜라미 온라인 스토어. http://krstore.co.kr/shop/list.php?ca_id=10 (접속일자: 2022.10.2)
- 대성셀틱 본사몰. <http://minishop.gmarket.co.kr/celticmall> (접속일자: 2022.10.2)
- 도시가스협회 연도별 도시가스 요금표. <http://www.citygas.or.kr/info/charge.jsp> (자료추출일: 2022.10.5)
- 린나이 공식제품몰. <http://www.rinnaimall.com/mall/index.asp> (접속일자: 2022.10.2)
- 사이언스올 홈페이지. <https://www.scienceall.com/%EC%A1%B0%EC%82%B0%EC%9A%B4%EB%8F%99orogeny> (접속일자: 2022.10.14)
- 연합뉴스. 2022.9.1. 한전 올 적자 메우려면 가구당 전기요금 월 8만원 인상 불가피. <https://www.yna.co.kr/view/AKR20220920162600003> (검색일: 2022.10.1)

- 장인의 공간 홈페이지. http://www.masterspace.co.kr/renewal/product/product01_01.asp# (접속일자: 2021.10.15)
- 통계청 아파트주거환경통계. https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=116&tblId=DT_MLTM_756&vw_cd=MT_ZTIT_LE&list_id=I1_4&scrId=&seqNo=&lang_mode=k&o&obj_var_id=&itm_id=&conn_path=MT_ZTTITLE&path=%252FstatisticsList%252FstatisticsListIndex.do (자료추출일: 2022.10.7)
- 한겨레. 2022.8.12. 한전 상반기 대규모 영업적자…전기요금 인상 또 논란일 듯. https://www.hani.co.kr/arti/economy/economy_general/1054531.html (검색일 : 2022.10.2)
- 한겨레. 2022.9.30. 전가도시가스요금 10월부터 가구당 2,270원5,500원 인상. <https://www.hani.co.kr/arti/society/environment/1060851.html> (검색일 : 2022.10.3)
- 한국에너지공단 홈페이지. https://zeb.energy.or.kr/BC/BC02/BC02_02_001.do (접속일자: 2022.10.3)
- 한국에너지공단 효율등급제도 가정용 가스보일러 자료. https://eep.energy.or.kr/certification/certi_list_149.aspx (자료추출일: 2022.9.15)
- 한국에너지공단 효율등급제도 홈페이지. https://eep.energy.or.kr/certification/certi_intro.aspx (접속일자: 2022.10.15)
- 한국전력거래소 2017~2021년 시간대별 발전실적 자료(공공데이터포털). <https://www.data.go.kr/data/15065387/fileData.do> (자료추출일: 2022.10.3)
- 한국전력거래소 전력통계정보시스템(EPsis) 열량단가 실적치(2019.5~2020.4) 자료. <https://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaFucUpfChart.do?menuId=040100> (자료추출일: 2022.10.4)
- 한전 사이버지점 홈페이지. <https://cyber.kepco.co.kr/ckepco/front/jsp/CY/E/E/CYEEH/P00107.jsp> (접속일자: 2022.9.20)
- (※)TEN 내부자료. 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 지열초기투자비용 자료 (자료취득일: 2022.4.2)
- _____. 부산 감전동 아파트 지열냉난방 시스템 한국에너지공단 보고자료(기준일보) (자료취득일: 2022.4.5)

〈법령〉

- 「도시 및 주거환경정비법 시행령」(시행 2022.1.21. 대통령령 제32352호. 2022.1.21. 타법개정). 제2조(노후-불량건축물의 범위) 제2조 제3항. <https://www.law.go.kr/LSW//lsInfoP.do?lsiSeq=239669&ancYd=20220121&ancNo=32352&efYd=20220121&nwJoYnInfo=Y&efGubun=Y&chrClsCd=010202&ancYnChk=0#0000> (검색일: 2022.10.13)
- 「에너지법 시행규칙」(시행 2022.1.21. 산업통상자원부령 제448. 2022.1.21. 타법개정). 제5조 제1항. [별표] 에너지열량 환산기준. <https://www.law.go.kr/lsBylInfoPLinkR.do?lsiSeq=200561&lsNm=%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%EB%B2%95+%EC%8B%9C%ED%96%89%EA%B7%9C%EC%B9%99&bylNo=0000&bylBrNo=00&bylCls=BE&bylEfYd=20171228&bylEfYdYn=Y> (검색일: 2022.10.12)
- 「서울특별시 녹색건축물 설계기준」(제정 2017.9.28. 서울특별시고시 제2017-352호. 2017.9.28. 타법개정). 마. 신재생에너지 부문. https://event.seoul.go.kr/seoulsibo/detailview.do?cn_seq=MTM2MDI=&tr_code=snews&tr_code=tcontents (검색일: 2022.10.11)

김재엽 | 現 에너지경제연구원 부연구위원

〈주요저서 및 논문〉

『An Analysis of the Effects of Fuel-transition in Transportation Sector: Focusing on Business Cars』, Environmental and Resource Economics Review, 2020

『Estimating Effects of Electrification in Transportation Sector on Energy Imports』, Korean Energy Economic Review, 2021

『An Analysis of the Environmental Benefits of the Price Signal Recovery under the Current Electricity Tariff in Korea』, Environmental and Resource Economics Review, 2022

김현제 | 現 에너지경제연구원 선임연구위원

〈주요저서 및 논문〉

『아세안 지역의 저탄소 에너지기반 구축을 위한 한-아세안 협력 방향』, 대외경제정책연구원 세계지역전략연구, 2022

『에너지전환 정책의 성과 및 향후 추진방향 연구』, 에너지경제연구원 기본연구, 2021

기본연구보고서 2022-12

지열냉난방 시스템 보급을 통한 환경편익 개선효과 분석

인 쇄 2022년 10월 30일

발 행 2022년 10월 31일

저 자 김재엽 · 김현제

발행인 임 춘 택

발행처 에너지경제연구원

주 소 44543 울산광역시 중구 종가로 405-11

연락처 (052)714-2114(대) FAX (052)714-2028

등 록 제 369-2016-000001호(2016년 1월 22일)

인 쇄 (사)한국척수장애인협회 디지털 인쇄사업소
(053)965-7277

©에너지경제연구원 2022 ISBN 978-89-5504-871-1 93320

* 파본은 교환해 드립니다.

값 7,000원



KOREA
ENERGY
ECONOMICS
INSTITUTE



ISBN 978-89-5504-871-1

www.keei.re.kr
울산광역시 중구 중가로 405-11
TEL | 052. 714. 2114
ZIP | 44543