

P2H를 고려한 집단에너지사업자의 최적운영 알고리즘 개발

김용하¹ · 김유리² · 한규림^{2†}

¹인천대학교 전기공학과, 교수

²인천대학교 전기공학과, 석사과정

Development of Optimal Operation for District Heating and Cooling Facility Considering P2H

Kim Yong-Ha¹ · Kim Yu-ri² · Han Gyu-Rim^{2†}

¹Professor, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

²MS Candidate, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

[†]Corresponding author: one1grim@naver.com

Abstract

As the supply of renewable energy increases, instability problems in power systems arise because of the output volatility and intermittency of renewable energy. Sector coupling has recently emerged as a solution to renewable energy problems. Therefore, in this study, P2H, which converts power into heat during sector coupling, was considered. Considering P2H in district cooling and heating systems, an optimal operation algorithm for district heating and cooling facilities was developed. The operating characteristics of district energy heat source facilities were considered to maximize profits, and economical heat storage tank operation was also considered for P2H. In addition, useful information for introducing P2H was derived through a sensitivity analysis to ensure economic feasibility for district cooling and heating business operators when P2H was implemented.

Keywords: 재생에너지(Renewable energy), P2H(Power to heat), 집단에너지 열원설비(District heating and cooling facility), 최적운영(Optimal operation)

기호 및 약어 설명

$H_{P2HLoad}^t$: t 시간대 P2H 고려한 집단에너지 열원설비 담당 열부하[Gcal]
H_{Load}^t	: t 시간대의 수용가 열부하[Gcal]
H_{P2H}^t	: t 시간대의 P2H 전환열[Gcal]
$P_{surplus}^t$: t 시간대의 잉여전력[MW]
t	: 시물레이션 시간대[h]
HC^t	: t 시간대의 열 판매비용[원]



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.6, pp.51-65, December 2023
<https://doi.org/10.7836/kSES.2023.43.6.051>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 23 August 2023

Revised: 18 October 2023

Accepted: 13 November 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

PC^t	: t 시간대의 전력 판매비용[원]
FC_{CHP}^t	: t 시간대의 CHP 연료비용[원]
FC_{PLB}^t	: t 시간대의 PLB 연료비용[원]
N_C	: CHP의 대수[대]
N_P	: PLB의 대수[대]
$H_{CHP,i}^t$: t 시간대 i 번째 CHP의 열출력[Gcal]
$H_{PLB,i}^t$: t 시간대 i 번째 PLB의 열출력[Gcal]
$H_{ACC,i}^t$: t 시간대 i 번째 ACC의 축·방열량[Gcal]
N_A	: ACC의 대수[대]
$H_{CHP,i}^{Min}, H_{CHP,i}^{Max}$: i 번째 CHP의 최소/최대 열출력[Gcal]
$H_{PLB,i}^{Min}, H_{PLB,i}^{Max}$: i 번째 PLB의 최소/최대 열출력[Gcal]
$\Delta H_{ACC,i}^{Max}$: i 번째 ACC의 단위 시간당 최대 축·방열량[Gcal]
$H_{ACC,i}^{Initial}, H_{ACC,i}^{Final}$: i 번째 ACC의 최초/최종 열 수위[Gcal]
$H_{Load}(2, st)$: $(2, st)$ 상태의 열부하[Gcal]
ΔH_{ACC}	: 등가축열조의 시간당 축·방열량[Gcal]

1. 서론

전 세계적으로 탈탄소 사회로의 전환을 위해 재생에너지 비중을 늘리고 있으나, 재생에너지의 특징인 간헐성과 변동성, 특히 전력계통에 접속한 재생에너지의 경우 생산과 동시에 소비되어야 한다는 동시성 때문에 전력 수급에는 안정성 문제가 제기되고 있다¹⁾. 그러므로 재생에너지의 변동성이 전력계통에 미치는 영향을 최소화하기 위한 기술의 필요성이 증대되고 있다. 재생에너지 변동성 문제에 대응하기 위한 방법으로는 에너지저장기술을 활용하여 잉여전력을 저장해두었다가 전력이 부족할 때 사용하거나, 발전부문에만 국한하지 않고 난방 및 수송과 같은 다른 에너지 부문에 활용하는 섹터커플링(sector coupling)이 있다²⁾. 잉여전력을 저장하는 기술인 에너지저장장치는 아직도 규모와 비용이 문제되는 상황이므로 부문 간을 통합하는 섹터커플링의 중요성이 주목받고 있으며, 섹터커플링을 통해 잉여전력을 활용함으로써 재생에너지 출력제한을 방지하고 계통 보강에 투입될 자원을 절약할 수 있어 경제적인 편익을 가져다줄 수 있다¹⁾. 현재 집단에너지 사업자간 최적운전에 대한 연구^{3,4)}와 최적운업을 통한 집단에너지설비의 최적용량을 산정하는 연구⁵⁾와 같이 열부하를 만족시키는 집단에너지 열원설비의 최적운영에 대한 연구는 진행되고 있으나, 부문 간을 통합하는 섹터커플링까지 고려하였을 때 열원설비의 최적운영에 대한 연구는 진행되고 있지 않다. 그러므로 잉여전력이 발생하여 각 집단에너지사업자가 담당해야 하는 잉여전력이 결

정된다면, P2H를 고려한 집단에너지 열원설비의 최적운영에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 섹터커플링 중 에서 전력을 열로 변환하는 P2H (Power-to-Heat)를 고려하였으며, 이를 집단에너지사업자가 활용할 경우 집단 에너지사업자의 최적운영을 위한 알고리즘을 개발했다. 뿐만 아니라, P2H가 이루어졌을 때 집단에너지사업자의 경제성 확보를 위해 민감도 분석을 통하여 P2H를 도입하기 위한 유용한 정보를 도출하였다.

2. P2H를 고려한 집단에너지설비의 최적운영 알고리즘

Fig. 1은 P2H를 고려한 집단에너지설비의 최적운영 흐름도이다. P2H 전환열은 재생에너지로 발생한 잉여전 력을 열로 전환한 것이므로 잉여전력을 해소시킬 수 있을 뿐만 아니라 재생에너지 사용률을 높일 수 있다. 그러 므로 계통에서 이에 대한 보상이 이루어질 것으로 보아 집단에너지사업자는 P2H 전환열을 저렴한 비용에 사용 하는 것으로 하였다. 즉, 집단에너지사업자가 폐열과 같이 저렴한 외부수열을 우선 사용하는 것과 같은 방식으 로 P2H 전환열을 우선적으로 사용하는 것으로 하였다. 따라서, P2H를 고려한 집단에너지설비의 최적운영을 위해서는 P2H 전환열 사용 후 집단에너지 열원설비가 담당해야 하는 열부하를 산정해야 한다. 집단에너지 열 원설비가 담당하게 될 열부하는 식(1)과 같이 수송가 열부하에서 P2H 전환열을 뺀 값이다. 만약, P2H 전환열이 열부하보다 커서 열원설비 담당 열부하가 음수인 경우에는 2장 2절의 P2H 전환열의 대체운전에서 축열조에 저 장하였다가 사용하는 것으로 하였다.

$$H_{P2HLoad}^t = H_{Load}^t - H_{P2H}^t \quad (1)$$

이때, 덴마크 에너지청(Danish Energy Agency, DEA)에 따르면 P2H 설비인 전기보일러의 효율은 98%에서 100% 사이에 존재하기⁶⁾ 때문에 본 논문에서는 P2H 전환열(H_{P2H}^t)을 구하기 위해서 식(2)와 같이 전력을 열로 전환하기 위한 효율을 98%로 하였다.

$$H_{P2H}^t = P_{surplus}^t \times 860 \times 0.98 \quad (2)$$

집단에너지 열원설비가 담당해야 할 열부하는 식(1)과 같으며, 해당 열부하에 대해 경제열부하급전(Economic Heat Load Dispatch, EHLD) 수행 가능 여부를 판단한다. EHLD 수행이 불가능할 경우에 한해서 열부하가 열병합 발전(CHP, Combined Heat & Power) 및 첨두부하보일러(Peak-time Load Boiler, PLB)의 하한치보다 작은 경우 에는 역송비용과 연료비용을 비교하여 CHP의 운전 여부를 결정한다. 연료비용보다 역송비용이 클 경우에는 전기 부하추종운전인 MODE 3으로 운전하여 전기를 최대로 판매하는 것이 집단에너지사업자의 수익을 최대화할 수 있 으며, 이때의 열부하는 축열조(Accumulator, ACC)의 방열운전으로 만족시킨다. 연료비용이 역송비용보다 클 경 우에는 CHP를 출력하지 않고 ACC를 통해 열부하를 만족시킨다. 또한, 열부하가 CHP 및 PLB의 상한치보다 큰 경

우에는 열부하추종운전인 MODE 1로 운전하며, CHP와 PLB로 열부하를 모두 만족시키지 못할 경우에는 ACC 방열을 통해 열부하를 만족시킨다. 이외의 경우는 모두 EHLD가 가능한 상태이므로 EHLD를 통해 수익을 최대화하도록 CHP 및 PLB의 출력을 결정한다. EHLD 수행을 위한 목적함수 및 제약조건은 2장 1절에 기술하였다.

앞서 도출한 CHP, PLB 및 ACC의 출력은 축열조의 최적운전을 고려하지 않은 결과이다. 축열조의 최적운전을 고려하기 위하여 동적계획법(Dynamic Programming, DP)을 통해 축열조의 경제운전을 결정하였고, 경제운전에 따라 CHP 및 PLB가 담당해야할 열부하 크기가 변동되어 열부하가 너무 작거나 큰 경우에 한하여 축열조 강제운전을 하였으며, 축열조 수위를 맞추기 위하여 축열조 보상운전을 수행하였다. 또한, P2H 전환열이 수용가 열부하보다 커서 $H_{P2HLoad}^t$ 가 음수가 되는 경우에는 P2H 전환열의 대체운전에서 (-)열부하만큼을 축열조에 저장하였다가 사용하도록 하였다. 이와 같이 축열조의 최적운전 과정은 2장 2절에 기술하였다.

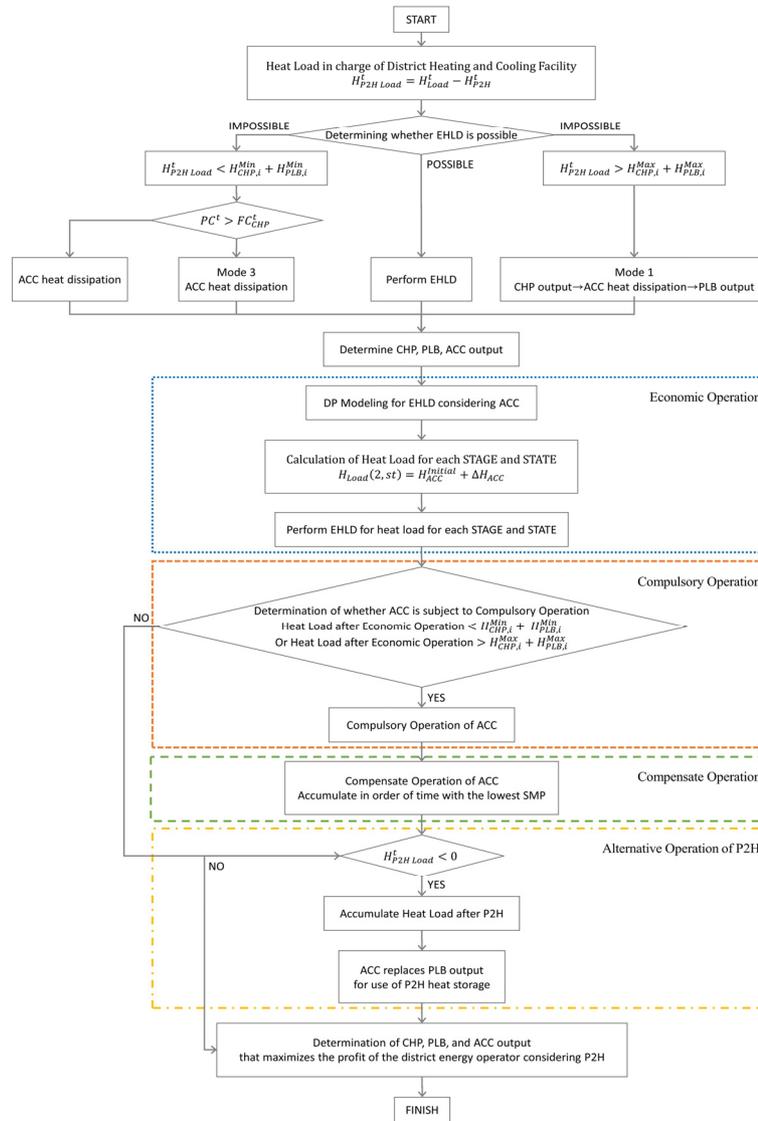


Fig. 1 Flow chart for optimal operation considering P2H

2.1 EHLD 수행을 위한 목적함수 및 제약조건

집단에너지 설비의 최적운영의 목적은 집단에너지 열원설비를 통해 사업자의 수익을 최대화하는 것이다. 그러므로 목적함수는 집단에너지 설비를 통해 사업자가 수익을 최대로 얻기 위해 식(3)과 같다.

$$Max Profit = Max \left(\sum_{t=1}^{24} HC^t + \sum_{t=1}^{24} PC^t - \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{t=1}^{24} FC_{CHP}^t - \sum_{i=1}^{N_P} \sum_{t=1}^{24} FC_{PLB}^t \right) \quad (3)$$

등호 제약조건과 부등호 제약조건은 다음과 같다. 등호 제약조건에는 열수급 제약조건이 있으며, 부등호 제약조건으로는 CHP와 PLB 제약조건으로 구성된다.

• 열수급 제약조건

시시각각 변하는 열부하를 만족시키기 위해서 수용가에서 요구하는 열부하와 집단에너지 열원설비에서 생산한 열의 양은 항상 같아야 한다. 열수급 제약조건은 식(4)와 같다.

$$H_{P2HLoad}^t = \sum_{i=1}^{N_C} H_{CHP,i}^t + \sum_{i=1}^{N_P} H_{PLB,i}^t + \sum_{i=1}^{N_A} H_{ACC,i}^t \quad (4)$$

• CHP 제약조건

CHP는 CHP 설비의 상한치와 하한치 범위 이내에서만 열출력을 낼 수 있다. 즉, 식(5)와 같이 상·하한치 제약조건에서만 CHP 열출력이 가능하다.

$$H_{CHP,i}^{Min} \leq H_{CHP,i}^t \leq H_{CHP,i}^{Max} \quad (5)$$

• PLB 제약조건

PLB도 CHP와 마찬가지로 열출력을 낼 수 있는 범위는 PLB 상한치와 하한치 범위 이내에서만 가능하다. 그러므로 식(6)과 같이 PLB의 상·하한치 범위 이내에서만 출력할 수 있다.

$$H_{PLB,i}^{Min} \leq H_{PLB,i}^t \leq H_{PLB,i}^{Max} \quad (6)$$

2.2 축열조의 최적운전

축열조 운전을 위해서는 2가지 제약조건을 만족해야 한다. 식(7)과 같이 축열조는 단위 시간당 일정한 열출력 범위 이내에서만 축열 또는 방열할 수 있다.

$$H_{ACC,i}^{t-1} - \Delta H_{ACC,i}^{Max} \leq H_{ACC,i}^t \leq H_{ACC,i}^{t-1} + \Delta H_{ACC,i}^{Max} \quad (7)$$

또한, 축열조는 비상열원으로 사용되기 때문에 일정한 열수위가 유지되어야 한다. 그러므로 축열조의 열이 모두 방열되는 현상을 막기 위하여 식(8)과 같이 최초 시간대의 ACC 열수위와 최종 시간대의 ACC 열수위를 같도록 한다.

$$H_{ACC,i}^{Initial} = H_{ACC,i}^{Final} \quad (8)$$

축열조의 최적운전을 위하여 N_A 개의 축열조를 하나의 축열조(등가축열조)로 가정하였다. 즉, N_A 개의 축열조의 총합은 등가축열조와 같다. 또한, 축열조의 최적운전을 위하여 총 네 가지의 축열조 운전으로 분류하였다. 축열조의 경제운전은 집단에너지사업자의 수익을 최대화하기 위한 운전이며, 축열조의 강제운전은 집단에너지 열원설비로 열부하를 만족시키지 못하는 경우에 강제로 방열이 이루어지는 운전이다. 또한, 축열조의 보상운전은 축열조의 열수위를 맞추기 위하여 강제운전량에 대한 축열량이며, P2H 전환열의 대체운전은 P2H 전환열 사용 후 남은 열을 축열하였다가 비교적 값비싼 PLB 출력을 대체하는 운전이다.

• 축열조의 경제운전

축열조의 경제운전(Economic Operation)은 집단에너지사업자의 수익 극대화를 위하여 고려 대상기간 동안 축열조의 축·방열량 및 시간대를 결정하는 것이다. 본 논문에서는 축열조 경제운전을 위하여 동적계획법을 사용하였다. 우선, 축열조 운전은 주간운전을 기준으로 하므로 168시간을 시뮬레이션 운전기간으로 설정하였다. 이에 따라 DP의 STAGE는 시뮬레이션 시간대인 168시간으로 구성하였으며, STATE는 축열조의 시간당 축·방열량으로 발생할 수 있는 모든 경우를 모델링하였다. DP의 시단부터 종단에 이르기까지 축열조는 축열, 방열, 미운용으로 3가지 운용만이 가능하다.

각 STAGE의 STATE는 ACC의 축·방열로 인하여 CHP 및 PLB 설비가 담당해야 할 열부하가 변경되므로 변경된 열부하에 대해 최적운정을 수행하기 위해서는 변동하는 열부하를 구해야 한다. $t = 1$ 시간대의 ACC의 최초 열수위에서 $t = 2$ 시간대로 변동하는 열부하는 식(9)와 같이 계산하였다.

$$H_{Load}(2, st) = H_{ACC}^{Initial} + \Delta H_{ACC} \quad (9)$$

식(9)와 같은 방식으로 도출한 각 STAGE, STATE의 열부하에 대하여 EHLD를 통해 CHP 및 PLB의 열출력을 결정하고, ACC의 최초 열수위와 최종 열수위가 일치하는 시점으로부터 수익을 최대화할 수 있는 경로를 Backward로 탐색하여 가장 경제적인 경로를 구한다.

• 축열조의 강제운전

축열조의 강제운전(Compulsory Operation)은 CHP 및 PLB의 열출력 제약조건에 따라 열출력을 낼 수 없는 경우에 경제성과 관계없이 축열조의 방열 운전으로 열부하를 만족시키는 것을 의미한다. CHP 및 PLB가 열출력을 낼 수 없는 경우는 두 가지가 있다. 우선, CHP 및 PLB의 하한치보다 열부하가 작은 경우이다. 이러한 경우에는 CHP 및 PLB가 운전할 수 없으므로 열부하만큼을 ACC가 모두 담당하는 것으로 하였다. 또한, CHP 및 PLB의 상한치보다 열부하가 큰 경우에는 CHP와 PLB가 상한치로 운전을 함에도 불구하고 열수급을 만족시킬 수 없는 경우이다. 그러므로 이러한 경우에는 열부하에서 CHP와 PLB의 상한치 합만큼 뺀 값을 ACC가 담당하도록 하였다.

• 축열조의 보상운전

축열조의 보상운전(Compensate Operation)은 ACC의 최초 열수위와 최종 열수위를 동일하게 하기 위해서 축열하는 것을 의미한다. 축열조의 강제운전으로 인해 방열이 이루어졌으므로 강제운전의 방열량에 대해 축열이 이루어져야 한다. 그러므로 강제운전의 방열량과 같은 양을 축열하는 것으로 하며 이를 축열조의 보상운전으로 하였다. 축열조의 보상운전을 위해서는 집단에너지 열원설비 중 PLB에 비해 연료비가 저렴한 CHP가 추가적으로 열출력을 내야한다. 이때, 집단에너지사업자의 수익을 최대화하기 위해서 계통한계가격(System Marginal Price, SMP)을 비교하여 추가적인 열출력 시간대를 결정하였다. 시뮬레이션 기간인 168시간 중 MODE 3 시간대를 제외한 열출력을 추가로 낼 수 있는 시간대 가운데 수익을 최대화하기 위하여 SMP가 작은 시간대 순서대로 CHP의 열출력을 증가시켜 축열조의 보상운전을 하였다.

• P2H 전환열의 대체운전

식(1)을 통해 P2H 전환열은 열부하를 만족시키는 데에 우선 사용하였으나, P2H 전환열이 수용가 열부하보다 커서 (-)열부하가 발생하는 경우, 이를 축열조에 축열하였다가 사용하는 것으로 하였다. 따라서, P2H 전환열의 축열량은 상대적으로 연료비가 비싼 PLB의 출력을 대체하게 된다.

3. 사례연구

3.1 입력데이터 구성

(1) 설비입력 데이터

집단에너지 설비는 CHP 1대, PLB 1대, ACC 1대로 구성하였으나, 본 논문에서 제시한 알고리즘은 P2H를 고려한 일반적인 최적운영 알고리즘이므로 다른 집단에너지 열원설비 구성에도 동일한 알고리즘을 적용할 수 있다. CHP는 5가지의 운전모드 중 가스터빈 단독운전(MODE 2)을 제외한 4가지 운전모드를 고려하였으며, Table 1은 CHP의 열 및 전력을 생산하기 위한 특성을 나타낸 것이다. 또한, Table 2는 PLB의 열 생산 특성을 나타낸 것이며, Table 3은 ACC의 축·방열 특성을 나타낸 것이다.

Table 1 CHP input data

Facility	Mode	Heat output [Gcal/h]		Power output [MW/h]	
		Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
CHP	1	76.40	142.50	117.40	134.53
	3	-	-	0.00	305.87
	4	0.00	178.70	95.00	126.12
	5	56.20	109.80	111.54	139.64

Table 2 PLB input data

Facility	Minimum [Gcal/h]	Maximum [Gcal/h]
PLB	0.00	65.00

Table 3 ACC input data

ACC capacity [Gcal/h]	Accumulation and heat dissipation per hour [Gcal/h]	Initial heat level [Gcal/h]
1170.00	10.00	585.00

(2) 열부하 입력데이터

본 논문에서는 잉여전력이 발생하여 각 집단에너지사업자가 담당해야 하는 잉여전력이 결정되었을 때 P2H를 고려한 집단에너지 열원설비의 최적운영에 대한 연구를 진행하였으므로 Fig. 2와 같이 집단에너지사업자가 담당해야 하는 잉여전력을 가정하였다. 잉여전력은 중앙급전 발전기의 최소출력 운전에도 불구하고 변동성이 큰 재생에너지 발전량이 증가하여 수요보다 공급이 커져 잉여전력이 발생하게 된다. 그러므로 시뮬레이션을 위해 잉여전력을 가정하기 위한 데이터로 전력수요는 한국전력거래소에서 제공하는 전력수요량을 기반으로 하였으며, 열부하가 큰 1월 중 전력부하가 가장 작은 주인 2021년 1월 18일 ~ 1월 24일(월요일 ~ 일요일)을 연구 기간으로 하였다. 이는 집단에너지 열원설비의 운영특성을 보기 위해 열부하가 큰 1월을 기준으로 하였으며, P2H를 고려하였을 때의 집단에너지 열원설비의 운영을 보기 위하여 P2H를 고려한 효과가 가장 잘 나타나도록 잉여전력이 비교적 발생하기 쉬운 전력수요가 가장 작은 날을 기준으로 하였다. 잉여전력은 중앙급전 발전기의 최소발전량 운전에도 재생에너지의 갑작스러운 출력 변동에 의해 발생하므로 중앙급전 발전기의 출력을 최소발전량으로 고정하며 태양광 용량을 조절하여 변동성이 큰 재생에너지의 출력이 급격히 증가해 전력수요보다 발전량이 커지는 경우를 가정하여 168시간의 잉여전력을 가정하였다. 또한, 이를 통해 구한 잉여전력은 전체 시스템에 대한 잉여전력이므로 시뮬레이션을 진행하기 위한 집단에너지사업자는 Fig. 2만큼의 잉여전력을 할당받는 것으로 하였다. 재생에너지의 급격한 출력변동 상황을 위해 사용한 재생에너지는 태양광 발전으로 하였으며, 태양광 발전량은 선행연구⁷⁾의 연중 대표 24시간대별 태양광 발전량을 사용하였다.

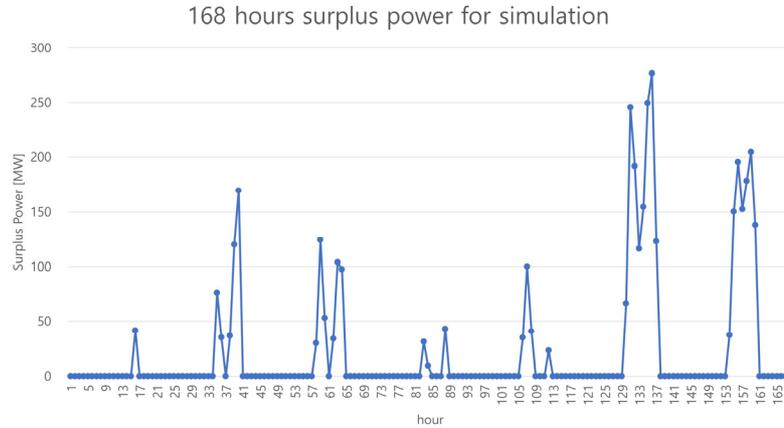


Fig. 2 168 hours surplus power for simulation

본 논문에서 사용한 수용가의 열부하 데이터는 한국지역난방공사에서 제공하는 시간대별 열공급량 데이터를 사용하였으며, 동일한 패턴을 사용하여 시뮬레이션 계통에 적용하였다. Fig. 3(a)는 시뮬레이션에서 사용한 시간대별 열부하를 나타낸 것이며, 이는 집단에너지사업자가 공급대상지역에 반드시 공급해야 하는 열부하 양이다.

P2H 전환열은 열부하를 만족시키는 데에 우선적으로 사용하므로 식(1)에 따라 기존 열부하에서 P2H 전환열을 차감하는 것으로 한다. Fig. 3(b)는 기존 열부하에서 P2H 전환열을 차감한 것으로 집단에너지 열원설비는 차감된 열부하만큼 열출력을 내야 한다. P2H 전환열이 기존 열부하보다 커서 (-)열부하가 발생하는 경우에는 이를 P2H 전환열의 대체운전에서 축열하여 사용하는 것으로 하였다.

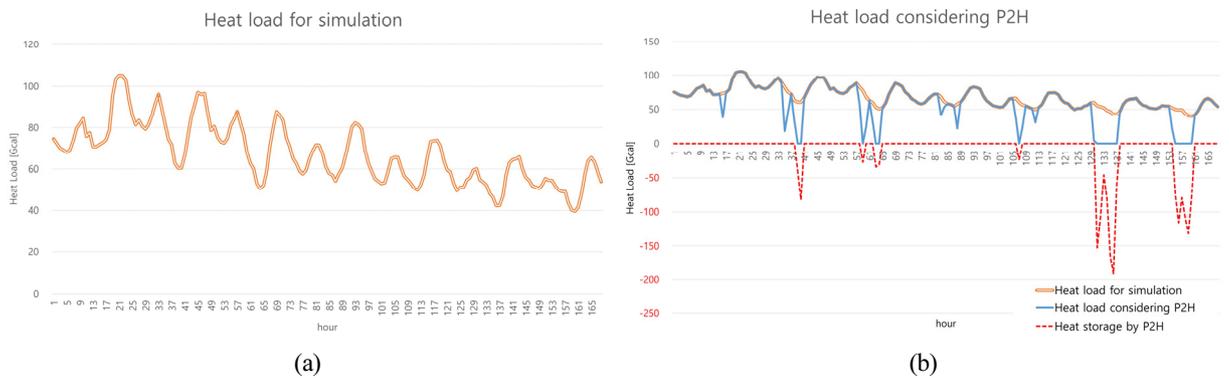


Fig. 3 (a) Heat load for simulation, (b) Heat load considering P2H

(3) 계통한계가격

Fig. 4는 Simulation 기간 동안(2021년 1월 18일 ~ 24일)의 시간대별 SMP를 나타낸 것이다. 연구에서 사용한 SMP는 전력통계시스템(Electric Power Information System, EPSIS)에서 제공하는 2015년 ~ 2022년의 SMP

평균값을 사용하였다. 또한, 잉여전력이 발생하는 시간대는 기저 발전기의 출력이 감소하여 계통한계가격이 감소하게 되므로 잉여전력이 발생하는 시간대의 SMP는 잉여전력 발생량에 비례하게 감소하는 것으로 하였다.

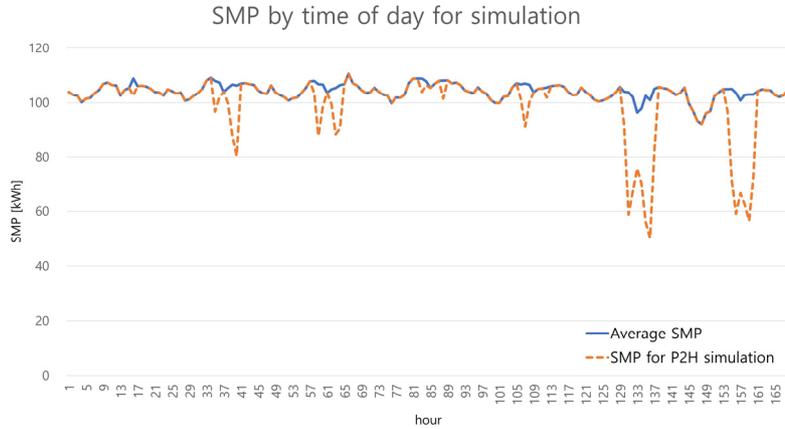


Fig. 4 SMP by time of day for simulation

3.2 P2H를 고려한 집단에너지사업자 최적운영 결과

(1) 집단에너지사업자 최적운영 결과

Fig. 5는 P2H를 고려한 집단에너지 열원설비의 최적운영 결과를 나타낸 것이다. (a)는 P2H 전환열과 집단에너지 열원설비의 열출력을 통해 열부하를 만족시킨 결과이며, 열부하를 초과한 부분은 축열조의 최적운전에 따라 축열하거나 P2H 전환열이 많이 발생하여 축열운전이 이루어진 경우이다. CHP는 열과 전기를 동시에 생산하는 시스템이므로 CHP의 최적운전에 따라 (b)와 같이 전기출력이 발생하였다. 대표적으로 130 ~ 137시간대에 P2H 전환열이 많이 발생하기 때문에 P2H 전환열로 열부하를 만족시키고도 남은 양을 축열조에 저장하였다. 또한, 이때에는 열부하를 모두 만족하였기 때문에 기존의 집단에너지 열원설비가 열출력을 낼 필요가 없으므로 CHP는 Mode 3으로 운전하여 전기를 최대 생산하였다.

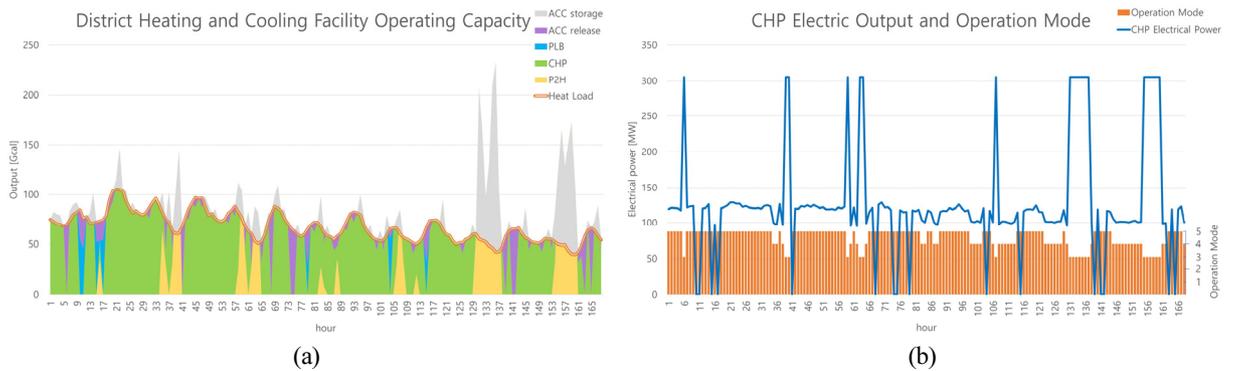


Fig. 5 (a) District heating and cooling facility operation capacity, (b) CHP electric and operation mode

Fig. 6은 집단에너지사업자가 P2H를 고려하지 않고 열부하를 모두 열원설비로 충족시키는 경우의 집단에너지사업자의 최적운영 결과와 P2H를 고려하였을 경우의 집단에너지사업자의 최적운영 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 집단에너지사업자가 P2H 고려 여부에 따라 집단에너지 열원설비가 담당해야할 열부하가 달라진다. 그러므로 P2H를 고려할 경우에는 열원설비가 담당해야할 열부하가 작아 CHP와 PLB의 출력이 P2H를 고려하지 않았을 때에 비해 작아진다. 또한, P2H 전환열이 많이 발생하여 열부하보다 클 경우에는 축열조에 저장하였다가 사용하므로 P2H를 고려하였을 경우에 축열조 운전이 더욱 활발한 것을 확인할 수 있다.

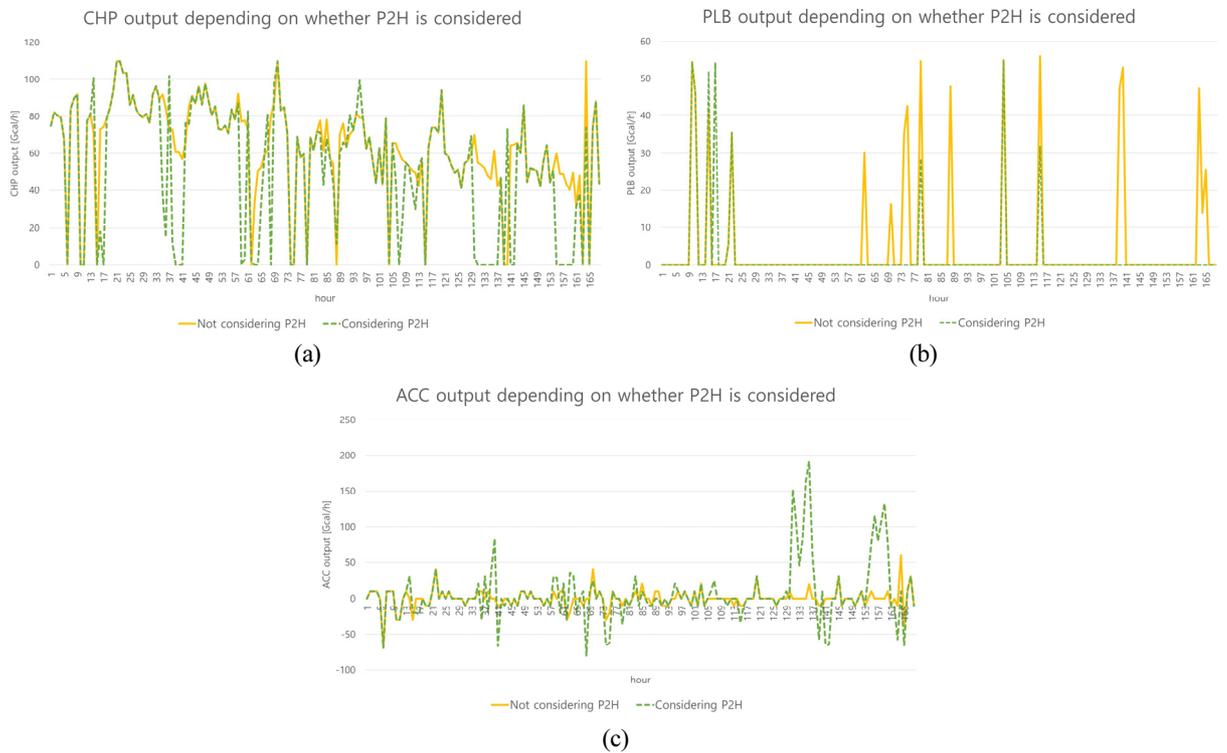


Fig. 6 (a) CHP output depending on whether P2H is considered, (b) PLB output depending on whether P2H is considered, (c) ACC output depending on whether P2H is considered

Table 4는 집단에너지사업자가 P2H 미고려 및 고려 시의 집단에너지 열원설비의 최적운영 결과를 나타낸 결과이다. P2H 전환열은 수용가 열부하를 만족시키기 위해 즉시 사용하는 것으로 하였으므로 P2H 고려 여부에 따라 집단에너지사업자의 최적운영 결과에는 차이가 있다. P2H를 고려하지 않았을 때에 비하여 P2H를 고려할 경우에 CHP의 출력은 약 84%, PLB는 약 51% 정도로 출력이 감소한다. P2H 전환열을 즉시 사용 후 남은 P2H 전환열을 축열조에 저장하였다가 상대적으로 연료비가 비싼 PLB 출력을 대체함으로써 PLB의 출력이 현저히 감소하였다. 또한, 본 시뮬레이션 기간은 1주일(168시간)이기 때문에 잉여전력이 많이 발생하는 토, 일요일의 P2H 전환열은 축열조에 저장한 뒤 시뮬레이션 기간 내에 사용하지 못하므로 P2H 전환열이 축열조에 1,064 [Gcal]만큼 저장되었다.

Table 4 Optimal operation results depending on whether P2H is considered

	Not considering P2H	Considering P2H
CHP output [Gcal]	10,583.6	8,888.6
PLB output [Gcal]	708.5	363.2
Heat storage by P2H [Gcal]	-	1,064.0

(2) 집단에너지사업자 최적운영의 경제성 분석

Table 5는 집단에너지사업자의 최적운영 결과에 따라 P2H를 고려할 경우 집단에너지사업자의 경제성을 분석한 결과이다. 이때, 축열량 수익은 Table 4에서 나타난 P2H 축열량을 이후 시간대에서 사용할 것으로 보아 열 판매수익으로 고려하였다. 또한, P2H를 사용할 경우에 전기요금이 발생하기 때문에 이는 현 전기요금 제도의 산업용(을) 고압 A 선택 I의 겨울철 전력량요금을 사용하였다.

현 제도의 전기요금을 적용하면 P2H를 고려하지 않을 경우 집단에너지사업자 수익은 1,447,626,268[원]이지만, P2H를 고려할 경우에는 1,253,486,793[원]으로 집단에너지사업자가 P2H를 고려할 경우에 194,139,476[원]의 손해가 발생하게 된다.

Table 5 Profits of District heating and Cooling depending on whether P2H is considered

	Not considering P2H	Considering P2H
CHP fuel cost [won]	145,414,691	121,607,674
PLB fuel cost [won]	191,759,144	98,367,016
Reversal of power cost [won]	1,784,800,103	2,011,596,897
Heat storage revenue by P2H [won]	-	103,112,240
Energy charge [won]	-	641,247,655
Total revenue [won]	1,447,626,268	1,253,486,793
Revenue by P2H [won]		-194,139,476

(3) 경제성 확보를 위한 민감도 분석

현재의 전기요금의 산업용(을) 고압 A 선택(I)의 겨울철 전력량요금을 P2H를 적용한다면 집단에너지사업자는 P2H를 사용하지 않았을 때에 비하여 P2H를 고려할 경우 손해가 발생하게 된다. 그러므로 전기요금 변동에 따른 P2H 고려 시 집단에너지사업자의 경제성을 분석하였다. 전기요금 변화율은 현재의 전기요금에서 -100%에서 +100%로 설정하였다.

전기요금이 증가할수록 집단에너지사업자는 P2H를 고려하지 않았을 때 대비 P2H를 고려할 경우의 수익은 감소하며, 반대로 전기요금이 감소할수록 P2H를 고려할 경우에 집단에너지사업자의 수익은 증가하였다. 그러므로 Fig. 7과 같이 집단에너지사업자는 최소 약 35% 이상으로 전기요금이 감소하여야 P2H를 고려하였을 때 수익이 발생한다.

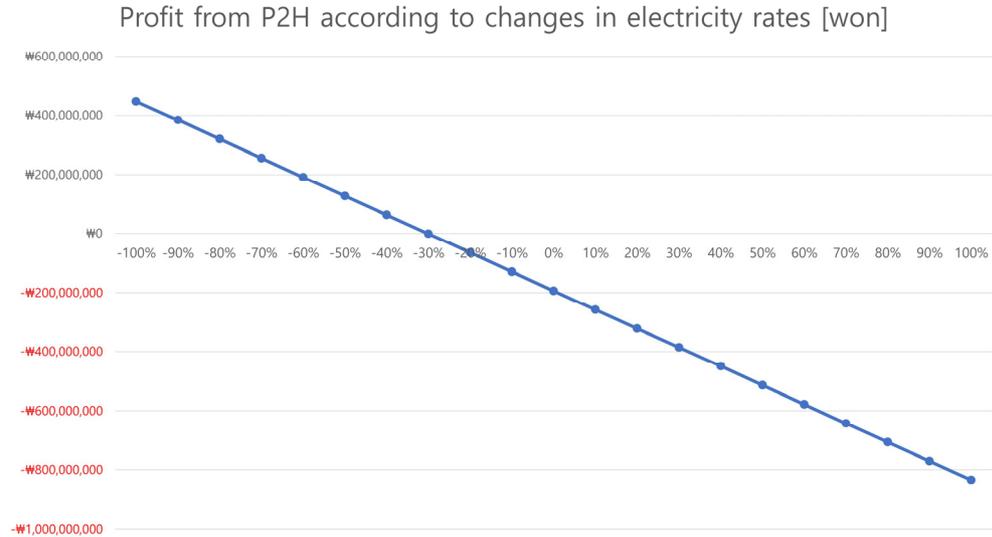


Fig. 7 Profit from P2H according to changes in electricity rates

4. 결론

본 논문에서는 출력 변동성이 큰 재생에너지로 인해 발생하는 잉여전력을 해소 및 활용 방안으로 P2H를 제안하였다. P2H를 집단에너지사업자가 활용함에 따라 집단에너지사업자의 최적운영 알고리즘을 개발하였으며, P2H를 도입하기 위하여 민감도 분석을 통해 집단에너지사업자의 경제성을 분석하였다.

- (1) 변동성이 큰 재생에너지의 보급확대에 따라 수요와 공급의 불일치로 인하여 잉여전력이 발생하는 현상은 불가피하다. 잉여전력이 발생하는 경우 전력계통에 악영향을 미치며 전력품질이 떨어지기 때문에 이를 해소하기 위한 방안이 필요하다. 그러므로 잉여전력을 해소할 뿐만 아니라 활용할 수 있는 방안으로 P2H를 제안하였다.
- (2) 집단에너지사업자가 P2H를 활용할 경우에 대하여 집단에너지사업자의 최적운영을 위한 알고리즘을 개발하였다. 개발한 알고리즘은 집단에너지사업자의 수익을 최대화하도록 최적운영하였으며, P2H 전환열을 활용하기 위해서는 열부하를 만족시키는 데에 우선적으로 사용하고 남은 열은 축열조에 저장하였다가 최적운영 결과에 의해 결정된 PLB의 출력을 대체하는 것으로 하였다.
- (3) 집단에너지사업자가 P2H를 고려하여 최적운영할 경우, 집단에너지 열원설비의 열출력은 CHP가 84%, PLB가 51% 정도로 감소하였다. 이는 대부분 P2H 전환열이 집단에너지 열원설비 중 비교적 값비싼 PLB의 열출력을 대체하였기 때문이다.
- (4) 하지만, P2H 적용 시 전기요금으로 현재 전기요금 제도의 전력량요금을 사용할 경우에는 집단에너지사업자가 P2H를 고려하지 않았을 때 대비 P2H를 고려할 경우에 194,139,476[원]의 손해가 발생하게 된다. 그러므로 전기요금의 변동에 따른 집단에너지사업자의 수익 변화를 분석하였다.

전기요금이 작아질수록 P2H를 고려하였을 때 집단에너지사업자의 수익은 증가하는 형태로 전기요금과

P2H 고려 시의 집단에너지사업자 수익은 반비례 관계를 가진다. 전기요금의 변동폭을 $-100\% \sim +100\%$ 로 설정하였을 때, 전기요금은 대략 35% 정도 감소하여야 P2H를 고려하였을 경우 집단에너지사업자 수익이 발생하게 된다.

P2H는 재생에너지의 변동성으로 발생하는 잉여전력을 활용함으로써 전력계통에서 재생에너지의 수용성을 확대시킬 수 있는 기술이다. 그러므로 P2H를 활성화하기 위해서는 전기요금 할인과 같은 P2H 지원제도가 마련되어야 한다⁸⁻¹⁰. P2H 적용 설비에 대한 전기요금 인하는 가장 현실적이며, 집단에너지사업자의 수익과도 직접적인 영향을 미친다. 또한, P2H를 적용할 경우에는 전력계통 측면의 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 집단에너지 열원설비의 출력 비중이 줄일 수 있으며 잉여전력을 사용함으로써 열 측면에서도 재생에너지 사용량을 증가시킬 수 있다. 이와 같이 P2H의 지원제도가 마련된다면 P2H가 활성화될 것으로 판단된다.

본 논문에서는 1주(168시간)의 시뮬레이션의 결과를 통해 P2H 전기요금 인하에 대한 민감도 분석을 진행하였다. 하지만, 이는 시뮬레이션 시점인 열부하가 큰 1월의 결과를 통해 도출된 결과이기 때문에 본 논문에서 제안한 방법론을 통해 52주의 시뮬레이션을 진행하여 전기요금 인하를 위한 민감도 분석을 진행할 필요가 있으며, 잉여전력의 변동은 집단에너지 열원설비의 운영에 영향을 미치므로 향후 잉여전력과 열부하의 변동에 따른 시나리오를 구성하여 연구를 추가적으로 진행할 예정이다.

또한, 본 논문에서는 P2H 전환열을 CHP보다 저렴한 것으로 보아 외부수열과 같은 방식으로 P2H 전환열을 우선적으로 사용하는 방식으로 하였다. 그러나, 재생에너지의 변동성으로 인해 집단에너지사업자가 담당해야 하는 잉여전력이 급격하게 증가하는 구간이 발생한다면, 설비의 시동/정지가 반복되어 장기적인 운전을 고려하였을 때 설비에 무리를 줄 수 있다. 그러므로 장기간 운영을 고려하여 상황에 따라 P2H 전환열을 일부 사용하고 저장하거나, 즉시 저장하는 등에 관한 연구가 추가적으로 진행될 필요가 있다.

REFERENCES

1. Jin, T. Y., Current status and Utilization of Power-to-Heat (P2H) technology, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 71, No. 4, pp. 16-22, 2022.
2. Yun, S. G. and Im, H. J., A Study for Sector Coupling Based on Renewable Energy to Respond to Climate Change, Journal of Climate Change Research, Vol. 10, No. 2, pp. 153-159, 2019, <https://doi.org/10.15531/KSCCR.2019.10.2.153>.
3. Kim, Y. H., Woo, S. M., Back, B. M., Lee, P. H., and Kim, Y. G., A Study on the Optimal Bilateral Heat Transaction of CHP considering the Operation Modes, Journal of Energy Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 37-48, 2009.
4. Kim, Y. H., Kim, U. G., Yoo, J. H., Park, J. M., Moon, J. C., and Lee, H. S., Development of the Algorithm for Optimal Operation of Connected System between the District Heating Energy Systems (I), Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 30, No. 7, pp. 47-59, 2016, <http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2016.30.7.047>
5. Kim, C. S., Song, M. H., Yeom, J. H., and Shin, J. Y., A Study on the Development of the Optimal Capacity Estimation Algorithm of Intergrated Energy Facilities Based on Operating Conditions, Journal of Energy

- Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 94-102, 2019, <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2019.28.4.094>.
6. Jin, T. Y., Domestic P2H (Power-to-Heat) Activation Plan, Energy Focus, Vol. 85, No. 3, pp.48-62, 2022.
 7. Kim, Y. H., Kim, Y. R., Han, S. H., Lee, H. S., Park, J. M., and Han, G. R., A Methodology for Calculating Representative Regional Photovoltaic Power Generation in 24 Hours of the Year for Expanding Renewable Energy Cloud Platform Functionality, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 42, No. 5, pp. 25-36, 2022, <https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.5.0>.
 8. Today Energy, Renewable E Surplus Power Is Used as Heat, 2021. <http://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=233016>. last accessed on the 20th July 2023.
 9. Korea Heating Air-conditioning Refrigeration & Renewable Energy News (KARN), [Interview] Dr. Jang Dong-hwan, Korea District Heating Corporation, 2021. <http://www.kharn.kr/news/article.html?no=18061>. last accessed on the 20th July 2023.
 10. Electric Newspaper, Energy Transition to Lead to Carbon Neutrality... Will P2H Play a Key Role?, 2021. <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=225240>. last accessed on the 20th July 2023.