

외기 온도 변화에 따른 액화 공기 발전소 저온 공기를 활용한 냉방시스템 성능분석

Performance Analysis of Cooling System Using Liquefied Air according to Outdoor Air Temperature

손창효* · 윤정인* · 설성훈** · 이준혁*** · 최재원**** · 차승윤*****
Chang-Hyo Son*, Jung-In Yoon*, Sung-Hoon Seol**, Jun-Hyuk Lee***, Jae-Won Choi**** and Seung-Yun Cha*****†

(Received 27 February 2023, Revision received 26 April 2023, Accepted 26 April 2023)

초록 : 최근 정부는 신재생에너지를 활용하는 계획이 진행되고 있으며, 생산된 전력의 저장 및 안정화를 위해 ESS에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 여러 ESS 사이에서 LAES에 대한 연구가 진행되고 있으며, 본 논문은 LAES와 연계된 냉방시스템에 대한 연구를 진행하였다. 액화 공기를 활용한 발전 후 토출되는 저온 공기를 실내로 급기하는 냉방방식으로 Hysys를 통한 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 5RT의 열 부하에서 약 75~94%의 에너지 절감률을 보였으며, 저온 공기의 소모량을 늘릴수록 에너지 절감률이 높아지는 결과를 얻었다. 본 논문의 자료는 LAES를 활용한 냉방시스템 설계의 기초 자료로 제공된다.

키워드 : 액화 공기, 에너지 절감, ESS, 냉방시스템

Abstract : Recently, the government is planning to utilize new and renewable energy, and research on ESS is being conducted for the storage and stabilization of generated electricity. In particular, research on LAES is being conducted among several ESSs, and this paper conducted a study on the cooling system associated with LAES. A simulation was conducted using Hysys as a cooling method in which low-temperature air discharged after power generation using liquefied air is supplied to the room. As a result, an energy saving rate of about 75 to 94% was shown at a heat load of 5RT, and the energy saving rate increased as the consumption of low-temperature air increased. The data in this paper are provided as basic data for cooling system design using LAES.

Key Words : Liquified Air, Energy Saving, ESS, Cooling System

***** 차승윤(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과
E-mail : cktmddb1@naver.com, Tel : ██████████
*손창효(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>),
*윤정인(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 부경대학교 냉동공조공학과
**설성훈(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : 조교수, 부경대학교 냉동공조공학과
***이준혁(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : 박사수료, 부경대학교 냉동공조공학과
****최재원(<https://orcid.org/0000-0003-4028-4020>) : 대학원생, 부경대학교 냉동공조공학과

*****† Seung-Yun Cha(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
E-mail : joonhyukcap3@naver.com, Tel : ██████████
*Chang-Hyo Son(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>),
*Jung-In Yoon(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
**Sung-Hoon Seol(<https://orcid.org/0000-0001-9724-9707>) : Assistant professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
***Joon-Hyuk Lee(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : Ph.D. Candidate, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.
****Jae-Won Choi(<https://orcid.org/0000-0003-4028-4020>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

- E : 에너지 소비량 [kW]
 ESR : 에너지 절감률 [%]
 h : 엔탈피 [kJ/kg]
 m : 질량 유량 [kg/s]
 Q : 실내부하 [kW]

하첨자

- i : 실내 공기
 l : 저온 공기 냉방
 o : 외기 냉방
 s : 급기

1. 서 론

최근 정부는 2050 탄소중립을 목표로 화력발전소와 같은 탄소배출 원인 감축을 위해 신재생에너지를 활용한 발전을 확대하는 상황이다. 그러나 신재생에너지를 통한 발전은 환경의 영향을 크게 받아 화력 발전과 원자력 발전 대비 에너지 수급의 변화가 크다. 이러한 문제로 신재생에너지를 통한 발전의 비중을 확대하는 경우 특정 시간에 집중된 발전으로 인해 과도한 전력이 공급되거나 공급되는 전력이 부족하여 정전의 문제가 발생한다.

앞선 설명과 같이 신재생에너지의 큰 문제로는 발전시간의 제어와 일정하지 않은 전력의 공급이 있다. 따라서 일정하지 않은 전력 공급의 문제를 해결하며, 잉여전력의 저장을 위해 다양한 ESS(Energy Storage System)에 대한 연구가 진행되고 있다.¹⁾ 이러한 ESS로는 양수발전, 리튬이온전지, 바나듐 레독스 흐름 전지, 플라이휠, 압축 공기 저장등의 방식이 존재한다. 그러나 양수발전의 경우 에너지 저장을 위한 댐의 설치가 필요하여 설치장소가 한정적이며, 리튬이온전지는 화재 및 폭발의 위험성이 높다. 바나듐 레독스 흐름 전지는 대용량의 전력 저장이 가능하지만 가격이 높고 독성이 있다는 단점이 존재하며, 플라이휠의 경우 베어링의 성능에 따라 에너지 저장의 효율

이 변화한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 압축 공기 저장은 주변에 많이 분포된 공기를 압축 저장하며, 필요한 순간에 공기를 터빈으로 방출하여 전기를 생산하는 방식이다. 그러나 고압으로 공기를 저장할 필요가 존재하며, 기체의 비체적이 크므로 넓은 공간과 압력을 견디기 위한 고압용기 제작의 단점이 존재한다. 따라서 압축 공기 저장 방식의 단점을 해결하기 위해 제안된 ESS가 액화 공기 저장 방식(Liquified Air Energy Storage : LAES)이다. 액화 공기 저장 방식의 경우 고압의 공기를 J-T 밸브를 활용하여 저온 저압의 액화 공기로 저장하는 방식으로 대기압 액체 상태로 공기를 저장하여 작은 공간에서 고압용기의 사용이 불필요하다. 따라서 여러 장점으로 인해 액화 공기 저장과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

Smith 등²⁾은 1970년대에 에너지 회수율이 72%인 20 MW급 용량의 액화 공기 저장 시스템을 세계 최초로 연구하였다. Lu 등³⁾은 축열조를 사용하여 액화 공정에서 발생한 고온의 열을 저장하여 발전 공정에서 액화 공기가 증발하는데 필요한 가열에 사용함으로써 발전의 효율을 높이는 연구를 진행하였다. Cui 등⁴⁾은 발전기 회전자의 기동 시간과 회전자의 회전 속도의 균형을 조절하기 위한 새로운 운전 방식에 관한 연구를 진행하였다. Adedeji 등⁵⁾은 액화 공정에서 공기의 제습과 냉각을 통해 압축에서의 소비전력을 감소시키는 연구를 진행하였다. Sciacovelli 등⁶⁾은 공기의 액화와 발전과정에서 열저장 장치를 설치해 시스템의 효율을 향상시키는 연구를 진행하였다. Park 등⁷⁾은 액화 공기 저장 시스템에서의 액화 공정과 LNG 기화 과정을 연계하여 냉각열량의 절감에 대한 연구를 진행하였다.

앞선 종래연구를 분석한 결과, 발전기에서 토출된 저온 공기를 활용하여 실내 냉방을 진행하는 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 발전기에서 토출되어 버려지는 저온 공기를 냉방 시스템에 적용한 연구를 진행하며, 액화 공기 발전소와 연계된 냉방시스템 설계의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 시뮬레이션 조건 및 데이터 해석

2.1 시뮬레이션 조건

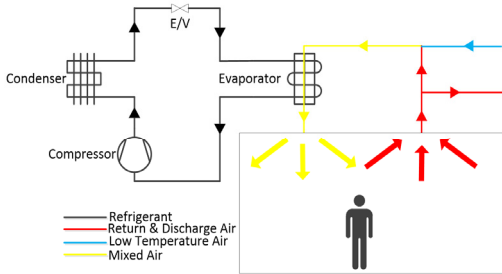


Fig. 1 Schematic diagram of low temperature air cooling system

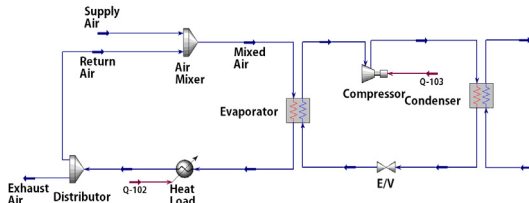


Fig. 2 Simulation model of low temperature air cooling system

Fig. 1은 발전기에서 토출된 저온 공기를 활용한 냉방시스템의 개략도로 발전기에서 토출된 저온 공기와 실내의 리턴 공기를 활용하여 냉방을 진행한다. 저온 공기를 활용한 냉방에서 실내부하를 저온 공기만으로 감당하지 못하는 경우, 개략도에 나타난 냉각장치를 활용하여 추가적인 냉각을 진행한다.

시뮬레이션은 Aspen Hysys⁸⁾ 프로그램을 통해 진행하였으며, Fig. 2는 저온 공기를 활용한 냉방의 시뮬레이션 모델이다. 저온 공기 및 리턴 공기를 혼합한 경우와 외기 및 리턴 공기를 혼합한 경우의 소비전력과 저온 공기의 소비량을 비교하였다. 저온 공기를 활용한 냉방에서 급기는 저온 공기를 Supply Air측으로 공급하여 Return Air와 혼합시켜 Mixed Air가 되며, 이때의 비율은 혼합 후 공기의 온도가 16°C로 유지되도록 공급한다. 외기를 통한 냉방은 저온 공기 대신 외기를 Supply

Air측으로 공급하며, Mixed Air의 온도가 목표 실내 취출 온도보다 높은 경우, 냉방기를 통해 냉각을 진행한 후 실내로 취출된다. 냉방기의 경우, R-410A를 사용하여 냉방을 진행하였다. 저온 공기와 Return Air를 7:3 비율로 혼합하는 경우, Mixed Air의 온도가 목표 실내 급기 온도인 16°C보다 높으므로 냉방기를 통해 추가적인 냉방을 진행한다.

외기 온도의 경우, 기상청 출처의 자료⁹⁾에서 전주시 기준 2011~2020년의 최대 외기 온도 평균값을 사용하였으며, 냉방 기간은 6~9월로 선정하였다. 일별 외기 온도는 가장 온도가 높은 8월을 기준으로 선정하였다. 선정된 월별과 일별 온도 분포는 Fig. 3에 나타내었다.

발전기에서 토출된 저온의 공기 온도는 15°C이며, 실내온도는 26°C로 가정하였다. 실내로 공급하는 온도는 16°C, 실내부하는 5 RT로 가정하였다. 외기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하여 급기하는 경우와 저온 공기 및 리턴 공기를 7:3 비율

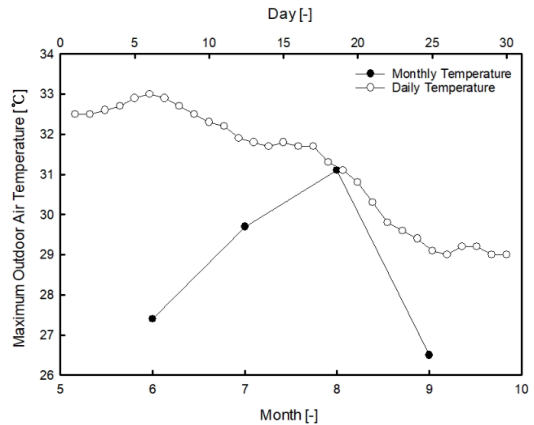


Fig. 3 Maximum outdoor air temperature by month and day

Table 1 Simulation conditions

Parameter	Value	Unit
Heat load	5	RT
Discharged air temperature	15	°C
Indoor air temperature	26	°C
Return air ratio	30	%

로 혼합하여 급기하는 경우, 저온 공기만을 주로 사용하여 급기하는 경우로 진행하였다. 시뮬레이션의 조건은 위의 Table 1과 같다.

2.2 데이터 해석

데이터 해석에 필요한 물성치는 Aspen Hysys 프로그램을 활용하여 계산하였으며, 실내부하를 기준으로 냉방에 필요한 공기의 급기량은 아래의 식 (1)을 활용하였다.

$$m = \frac{h_i - h_s}{Q} \quad (1)$$

냉방에서의 소비전력 절감률은 아래의 식 (2)를 사용하여 계산하였으며, 에너지 소비량의 경우 Hysys에서의 소비전력을 기준으로 사용하였다.

$$ESR = \frac{E_o - E_l}{E_o} \times 100 \quad (2)$$

3. 시뮬레이션 결과

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 월별과 일별 외기 온도에 따른 3가지 냉방시스템의 소비전력과 저온 공기의 사용량을 나타내었다. 3가지 냉방시스템에서 외기를 통한 냉방, 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하는 냉방, 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방의 순서대로 소비전력이 높은 경향을 보였다. 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방에서의 소비전력은 실내 급기를 위한 송풍기의 소비전력만을 사용하지만 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하는 냉방과 외기를 통한 냉방에서는 냉방기의 운전을 필요하여 추가적인 전력 소비가 발생한 것으로 판단된다. 외기를 통한 냉방이 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하는 냉방보다 소비전력이 높으며, 이는 증발기 입구에서 리턴 공기와 외기의 혼합 공기 온도가 저온 공기보다 높아 추가적인 냉각이 필요하여 소비전력이 증가한 것으로 판단된다.

소비전력은 외기 온도가 높아질수록 외기를 통한 냉방과 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로

혼합하는 냉방의 소비전력은 높아지는 경향을 보였으며, 이는 외기 온도가 높아져 실외기의 응축 압력이 높아지며, 압축기의 소비전력이 높아진 것으로 판단된다. 소비전력의 변화폭은 외기를 통한 냉방의 변화가 3가지 냉방시스템 사이에서 가장 큰 경향을 보였으며, 이는 3가지 냉방시스템 사이에서 외기를 통한 냉방을 제외한 2가지 냉방은 실내 급기로 외기를 사용하지 않아 외기 온도의 영향을 적게 받은 것으로 판단된다. 소비되는 저온 공기의 경우, 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하는 냉방이 저온 공기만을 주로 사용하는 경우의 냉방보다 적었다. 그러나 저온 공기만을 사용하는 냉방에서의 소비전력이 작았으며, 이는 다량의 저온 공기 사용으로 급기의 필요 냉각량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 2가지 냉방은 모든 범위에서 소비되는 저온 공기의 양이 일정한 모습을 보였으며, 이는 일정한 실내부하와 급

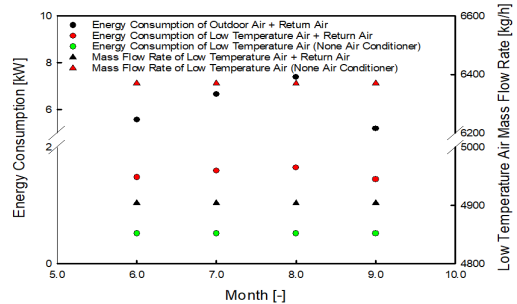


Fig. 4 Monthly energy consumption and low temperature air mass flow rate of three cooling modes

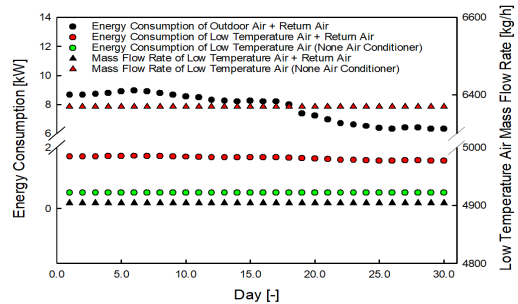


Fig. 5 Daily energy consumption and low temperature air mass flow rate of three cooling modes

기 온도로 냉방에 필요한 저온 공기의 양이 외기 온도의 영향을 받지 않은 것으로 판단된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 외기를 통한 냉방대비 저온 공기를 사용한 경우의 소비전력 절감률을 나타내었다. 저온 공기와 리턴 공기를 혼합하여 급기하는 냉방은 외기를 통한 냉방대비 72~80%의 절감률을 보였다. 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방은 외기를 통한 냉방대비 89~94%의 절감률을 보였다. 절감률은 외기 온도가 가장 높았던 8월달과 8월 6일자에서 가장 높은 값을 보였으며, 외기 온도가 높아질수록 높아지는 경향을 보였다. 이는

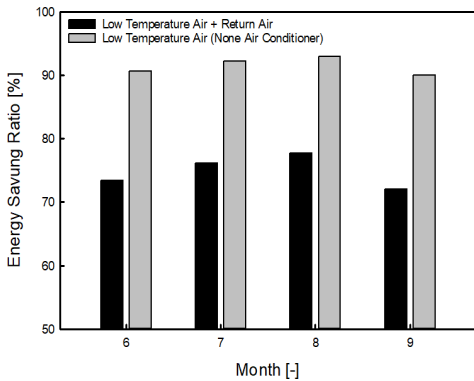


Fig. 6 Monthly energy saving ratio comparison of outdoor air cooling mode and two low temperature air cooling modes

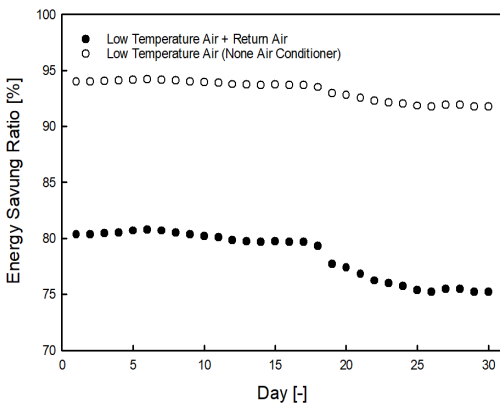


Fig. 7 Daily energy saving ratio comparison of outdoor air cooling mode and two low temperature air cooling modes

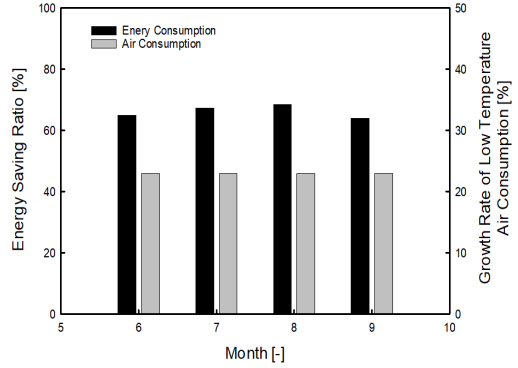


Fig. 8 Monthly comparison between low temperature air cooling modes

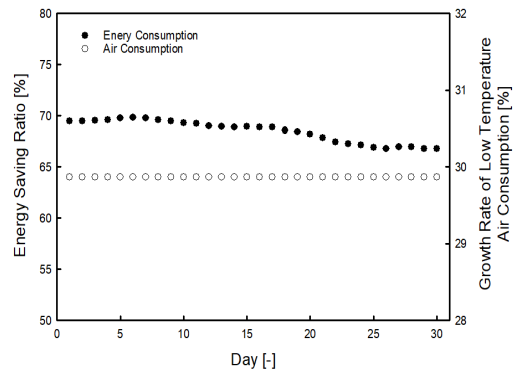


Fig. 9 Daily Monthly comparison between low temperature air cooling modes

높은 외기 온도로 인해 외기를 통한 냉방에서 냉방기의 소비전력이 타 냉방방식대비 크게 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9는 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하여 급기하는 냉방과 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방의 소비전력 절감률과 저온 공기 소비량 증가율을 나타내었다. 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방에서의 소비전력은 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하여 급기하는 냉방대비 64~69% 감소하였다. 저온 공기의 소비량은 저온 공기만을 주로 사용하는 냉방에서 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하여 급기하는 냉방대비 23% 증가하는 경향을 보였다. 저온 공기를 주로 사용하는 경우 소비되는 저온 공기

의 양은 증가하지만 저온 공기 사용량의 증가로 급기의 필요 냉각량이 감소하며, 소비전력은 감소한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문은 외기 온도에 따른 액화 공기 발전기 활용 냉방시스템에 관한 시뮬레이션을 진행하였으며, 시뮬레이션의 결론은 아래와 같다.

외기 온도가 높아질수록 외기를 통한 냉방과 저온 공기와 리턴 공기를 7:3 비율로 혼합하는 냉방의 소비전력은 증가하는 경향을 보였으며, 이는 외기 온도의 상승으로 급기의 필요 냉각량이 증가하여 소비전력이 증가한 것으로 판단된다. 발전기에서 토출된 저온 공기를 사용하는 경우, 8월 기준 75~94%의 소비전력 절감률을 보였으며, 이는 저온 공기로 인해 급기에 필요한 냉각량이 감소한 것으로 판단된다. 또한 저온 공기의 소비량이 높아질수록 소비전력은 감소하는 경향을 보였다. 8월 5 RT의 실내부하에서 저온 공기 소비량을 23% 증가시키면 66~69% 소비전력이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 액화 공기 발전소와 연계된 냉방 진행에서 액화 공기의 소비량이 많아지며, 외기 온도가 높아질수록 소비전력은 절감된다.

본 논문은 액화 공기 발전소와 연계된 냉방시스템 설계의 기초 설계 자료를 제공한다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (RS-2022-00143652). 본 연구는 ‘차승윤’의 ‘액화 공기 발전소의 폐열을 활용한 냉방시스템의 에너지 절감 분석’ 석사 논문의 일부입니다.

Author contributions

J. H. Lee; Conceptualization. S. Y. Cha; Investigation. J. I. Yoon; Visualization. C. H. Son; Project administration. S. H. Seol; Formal analysis. J.

W. Choi; Writing-original draft.

References

1. Y. H. Kang, J. H. Lee and J. K. Lee, 2020, “An Analytical Study on Thermal Management of Battery for Air Flow in ESS Cooling Rack”, *Journal of Power System Engineering*, 24(2), 37-44. (DOI:10.9726/kspse.2020.24.2.037)
2. E. M. Smith, 1977, “Storage of Electrical Energy Using Supercritical Liquid Air”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 191(1), 289-298. (https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1977_191_035_02)
3. C. Lu et al., 2021, “Evaluation of operation safety of energy release process of liquefied air energy storage system”, *Energy*, 235(15), 1-11. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121403>)
4. S. Cui et al., 2021, “Dynamic characteristics analysis for energy release process of liquid air energy storage system”, *Renewable Energy*, 180, 744-755. (<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.115>)
5. M. Adedeji et al., 2022, “Improvement of a liquid air energy storage system: Investigation of performance analysis for novel ambient air conditioning”, *Journal of Energy Storage*, 50, 1-12. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104294>)
6. A. Sciacovelli, A. Vecchi and Y. Ding, 2017, “Liquid air energy storage (LAES) with packed bed cold thermal storage - From component to system level performance through dynamic modelling”, *Applied Energy*, 190(15), 84-98. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.118>)
7. J. W. Park et al., 2021, “Liquid air energy storage coupled with liquefied natural gas cold energy: Focus on efficiency, energy capacity, and flexibility”, *Energy*, 216(1), 1-15. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119308>)
8. Aspen HYSYS. Version 12.1, Aspen Technology Inc, 2022.
9. Korea Meteorological Administration, 2020, Automated Synoptic Observing System Data.