

액화 공기 플랜트 발전기 토출 건조 공기를 활용한 부분 부하 운전 냉방 시스템의 냉각량 성능분석

Cooling Performance Analysis of a Partial Load Operation Cooling System Using the Discharge Dry Air of a Liquid Air Plant Generator

차승윤* · 윤정인* · 이준혁* · 손창효* †

Seung-Yun Cha*, Jung-In Yoon*, Jun-Hyuk Lee* and Chang-Hyo Son* †

(Received 28 November 2024, Revision received 23 December 2024, Accepted 23 December 2024)

초록 : 현대사회에서 신재생 에너지원은 환경보전에 매우 필수적인 요소지만 다양한 문제점이 존재한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 ESS에 관한 연구가 진행되며, LAES는 다양한 장점으로 활발히 연구되고 있다. 그러나 해당 연구의 경우 주로 발전과 액화에서의 효율만을 연구하며, 버려지는 건조 공기를 활용하는 연구는 미미하다. 본 논문에서는 해당 건조 공기를 냉방에 활용하는 연구를 진행하였다. 건조 공기는 단열 가습을 진행하여 냉방에 사용하며, 이때 1일 중 부분 부하 운전에서의 대체 냉각량에 대해 연구를 진행하였다. 그 결과, 급기 온도가 낮고 외기의 온도와 습도가 높을수록 대체 냉각량의 크기는 커지는 경향을 보였다. 따라서 건조 공기를 활용한 냉방 시스템의 경우 외기의 온도와 습도가 높으며, 급기 온도가 낮은 조건에서 효율적인 운전이 가능하다.

키워드 : 액화 공기 에너지 저장, 냉방 시스템, 건조 공기, 부분 부하 운전

Abstract : In the modern society, new and renewable energy sources are very essential elements for environmental conservation, but there are various problems. In order to compensate for these shortcomings, research on ESS is being conducted, and LAES is being actively studied due to various advantages. However, in the case of this study, only the efficiency of power generation and liquefaction is mainly studied, and studies using discarded dry air are insignificant. In this paper, a study was conducted to use the dry air for cooling. Dry air is used for cooling by conducting adiabatic humidification, and at this time, a study was conducted on the alternative cooling amount in the partial load operation during the day. As a result, as the air supply temperature was low and the temperature and humidity of the outside air increased, the amount of the alternative cooling amount tended to

* † 손창효(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : 교수, 국립부경대학교 냉동공조공학과

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

* 차승윤(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : 대학원생, 국립부경대학교 냉동공조공학과

* 윤정인(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 국립부경대학교 냉동공조공학과

* 이준혁(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : 박사, 국립부경대학교 냉동공조공학과

* † Chang-Hyo Son(<https://orcid.org/0000-0002-2143-0515>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

E-mail : sonch@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6183

* Seung-Yun Cha(<https://orcid.org/0000-0002-5733-1957>) : Graduate student, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

* Jung-In Yoon(<http://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : Professor, Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

* Joon-Hyuk Lee(<https://orcid.org/0000-0002-4575-8099>) : Ph.D., Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

increase. Therefore, in the case of a cooling system using dry air, efficient operation is possible under conditions where the temperature and humidity of the outside air are high and the air supply temperature is low.

Key Words : LAES, Cooling System, Dry Air, Part Load Operation

— 기 호 설 명 —

- C : 냉각량 [kW]
- RCR : 대체 냉각 비율 [%]
- h : 엔탈피 [kJ/kg]
- m : 질량 유량 [kg/s]
- Q : 실내부하 [kW]

하첨자

- d : 발전기 토출 건조 공기
- o : 외기
- r : 실내 공기
- s : 급기

1. 서 론

현대사회에서 신재생 에너지원은 환경보전에 매우 필수적인 요소이며, 다양한 국가에서 연구를 진행하고 있다. 그러나 신재생 에너지원을 통해 발전을 진행하는 경우 주변 환경의 영향을 크게 받아 발생하는 전력의 증감 폭이 큰 편이다. 따라서 신재생 에너지원을 통한 발전은 전력의 수급이 안정적이지 않아 전력 부족 및 과다로 인한 블랙 아웃 등의 문제가 있다.

이러한 문제의 해결 및 과다한 잉여전력을 저장하기 위해 에너지 저장 시스템(ESS, Energy Storage System)에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다. 다양한 ESS 중에서도 액화 공기 에너지 저장(LAES, Liquid Air Energy Storage)의 경우, 에너지의 저장 매체가 공기이므로 타 저장 방식(바나듐 레독스 및 리튬이온배터리 등) 대비 오염물질의 발생량이 적으며, 양수발전 등과 비교해서 설치에 제약이 적다. 또한 비슷한 발전 방식인 압축

공기 에너지 저장(CAES, Compressed Air Energy Storage)와 비교하여 저압에서 공기의 저장이 가능하므로 비교적 위험도가 낮다. 이러한 장점으로 LAES와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

Ansrinasab 등¹⁾은 예냉 공정을 통해 액화에서의 효율을 높이는 연구를 진행하였다. Kim 등²⁾은 액화 공정에서의 에너지 소비를 절감하기 위해 열 에너지 저장 장치에 대한 연구를 수행하였다. Yang 등³⁾은 액화 공정에서 압축기의 소비 전력을 절감하기 위해 태양 에너지를 연계한 LAES 시스템 설계 최적화와 관련하여 연구를 진행하였다. Sciacovelli 등⁴⁾은 LAES에서 저온 열저장 장치에 대한 동적 모델링에 대해 연구를 수행하였다. Hüttermann 등⁵⁾은 LAES의 액화 공정에서 효율적인 냉열 저장 매체에 대한 조사를 진행하였으며, Borri 등⁶⁾은 LAES에서 흡수식 열교환기와 폐열회수 열교환기를 적용한 경우에 대하여 연구를 진행하였다. 비슷하게 LNG의 기화 공정을 이용한 폐열회수의 경우도 LNG의 기화 공정에서 직접적인 냉열을 회수하여 사용하며, 발전 및 연료로 사용 후 버려지는 LNG를 직접적으로 활용하지 않는다.^{7,8)}

기존의 연구는 액화 공정에서의 효율 향상을 위해 연구를 진행하였으며, 발전기에서 토출되는 공기를 활용한 연구는 미미한 실정이다. 또한 발전기에서 토출되는 공기의 경우, 액화 공정에서 수분이 제거되어 매우 건조한 공기로 단열 가습을 진행하는 경우, 비교적 고온의 공기를 활용하여 냉방을 진행할 수 있다. 이와 유사한 냉방 방식의 경우, 춘천의 데이터 센터(네이버)가 있다. 춘천의 경우, 여름철 평균온도가 25℃ 이하로 연중 90% 기간 동안 외기를 통해 냉방을 진행한다. 해당 방식의 경우 AMU(Air Misting Unit)를 사용하여 미세한 물 입자를 분사해 공기를 냉각하여 실내를 냉방하는 방식이다. 그 밖에도 다양하게

폐열을 활용하는 공조 방식이 있으나 대부분은 발생한 폐열을 난방으로 이용하거나 폐열회수 환기장치를 이용하는 등의 방식을 사용한다.⁹⁾

따라서 본 논문에서는 토출된 건조하며, 고온의 공기를 단일 가습하여 부분 부하 운전을 진행한 경우, 대체 가능한 냉각량에 대하여 연구를 진행하였다.

2. 데이터 해석 조건

2.1 데이터 해석 조건

본 논문의 경우, LAES 발전기에서 토출된 건조 공기를 활용한 냉방 시스템에 대하여 해석을 진행하였으며, 해당 방식의 개략도는 Fig. 1과 같다.

냉방 시스템의 경우, 건조 공기를 단일 가습한 냉방과 외기를 통한 냉방으로 비교하였다. 외기를 통한 냉방의 경우, 고온, 다습한 공기에 냉방기를 활용하여 냉각, 제습하여 실내의 급기 조건으로 냉방하는 시스템이며, 건조 공기를 활용한 냉방의 경우, 단일 가습을 진행하여 실내로 급기하는 방식이다. 외기 조건의 경우, 2020~2023년의 기상자료¹⁰⁾를 참고하여 가장 기온이 높았던 일자를 선택하여 해석에 사용하였다.

해석에는 습공기 선도 프로그램(Psy-Chart¹¹⁾)을 사용하여 진행하였으며, Fig. 2는 해당 해석에서의 냉방별 과정을 나타내었다. Fig. 3~5의 경우, 해석에 사용된 외기 온도와 습도를 나타내었다. 해석에 사용된 건조 공기의 양은 국내에 설치 예정된 액화 플랜트를 기준으로 하여 15,000 kg/h로 가정하였다. 먼저 각 월별과 일별 냉방에 대하여 분석을 진행한 후 부분 부하 운전에서 전체 냉방의 경우, 9~18시까지를 기준으로 가정하였으며, 건조 공기를 통한 냉방 시간은 플랜트의 발전 시간과 동일하게 12~15시로 가정하였다. 실내의 유지 조건은 건축설계기준에서 사무실을 참고하여 실내 온도 26℃, 상대습도 50%로 가정하였다. 해당 조건에서 급기 온도는 13~16℃로 변화시키며, 해석을 진행하였다. 실내 부하의 경우, 해당 조건에서 최대 부하량을 기준으로 작성하였으며, 냉방에서의 현열비(SHF, Sensible Heat Factor)는 구조물의

형태에 따라 달라지므로 0.7로 가정하였다. 해석의 조건은 아래의 Table 1에 나타내었다.

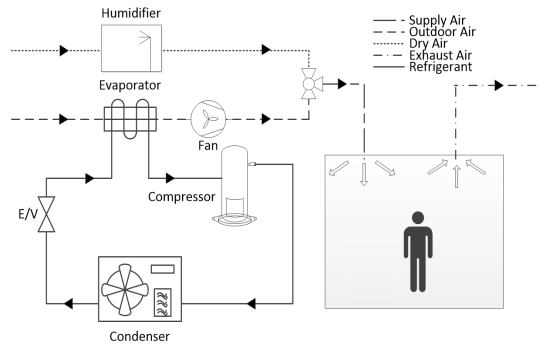


Fig. 1 Schematic diagram of dry air cooling system

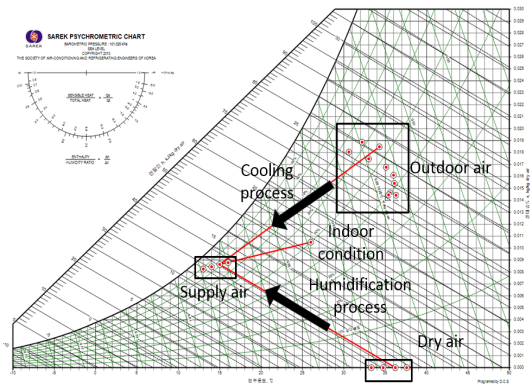


Fig. 2 Cooling system process on psychrometric chart

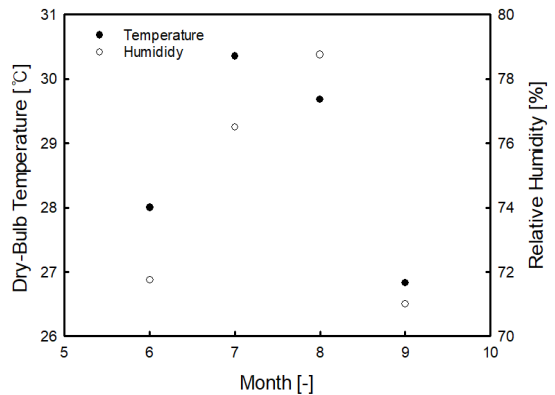


Fig. 3 Dry-bulb temperature and relative humidity according to month

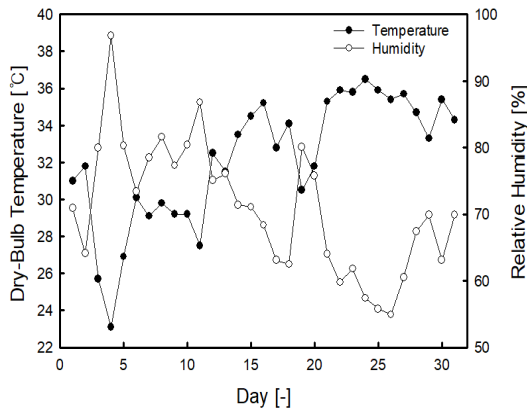


Fig. 4 Dry-bulb temperature and relative humidity according to month

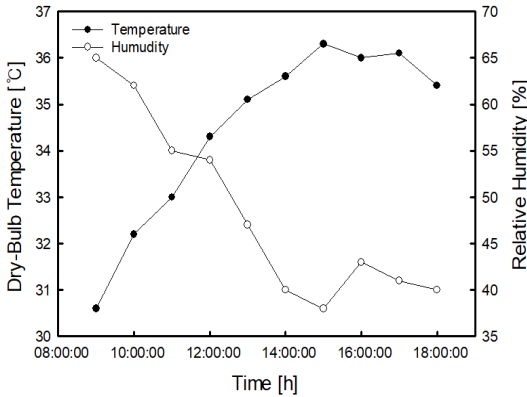


Fig. 5 Dry-bulb temperature and relative humidity at cooling time

Table 1 Analysis Condition

Parameter	Value
Supply air temperature (°C)	13 ~ 16
Indoor air temperature (°C)	26
Indoor air relative humidity (%)	50
SHF (-)	0.7
Dry air mass flow rate (kg/h)	15,000

2.1 데이터 해석 방법

데이터 해석에 필요한 자료는 습공기선도 프로 그래를 참고하였다. 해당 유량에서의 최대 실내 부하는 아래의 식 (1)을 기준으로 사용하였다.

$$Q = m_d \times (h_r - h_s) \quad (1)$$

부분 부하 운전에서 대체 냉각량의 비율은 아래의 식 (2)를 사용하였다. C_o 는 외기 냉방만을 사용하는 경우의 1일 총 냉각기의 냉각량, C_d 는 건조 공기를 냉방에 사용한 경우 1일 총 냉각기의 냉각량이다.

$$RCR = \frac{C_o - C_d}{C_o} \times 100 \quad (2)$$

3. 해석 결과

3.1 월별 냉방시스템의 대체 열량 분석

Fig. 6은 고정된 유량에서 냉방을 최대한 진행하는 경우의 실내 부하와 필요 냉방 능력을 급기 온도와 월에 따라 나타내었다. 필요한 냉방 능력의 경우 7월까지 상승하는 경향을 보이다 이후 점차 감소하는 경향을 보였다. 이는 외기 온도와 절대습도에 의한 영향이며, 특히 그래프의 경향이 절대습도와 유사한 것을 보아 외기 냉방을 진행하는 경우 습도의 영향이 큰 것으로 판단된다. 또한 급기 온도에 따른 실내 부하는 유량이 고정된 상태에서 해석을 진행하였으므로 모든 월에서 같은 경향을 보였다. 이는 발전기에서 토출되는 건조 공기의 경우, 외기의 영향을 받지 않고 실내로 일정하게 급기 할 수 있으므로 월에 관계없이 일정한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 외기를 통한 냉방을 진행하는 경우, 실내 부하 대비 냉방 능력의 증가율을 나타내었다. 월별 증가율을 비교한 결과, 월별 필요 냉방 능력과 같은 경향을 보였다. 이는 외기 온도가 높을수록 추가적인 냉방 능력을 필요로 하며, 증가율이 높아진 것으로 판단된다. 급기 온도에 따른 증가율을 비교한 결과 필요 냉방 능력과 반대되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 급기 온도가 높아지며, 필요 냉방 능력과 실내 부하 모두 동일하게 감소하였으나 실내 부하에서의 감소량이 비율적으로 컸으므로 경향이 반대의 형상으로 나타났다고 판단된다.

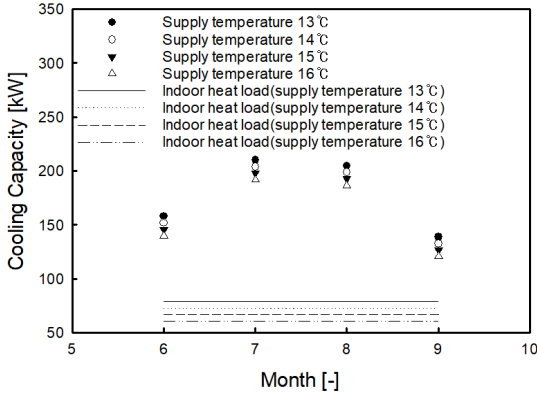


Fig. 6 Cooling capacity and indoor heat load according to monthly supply air temperature

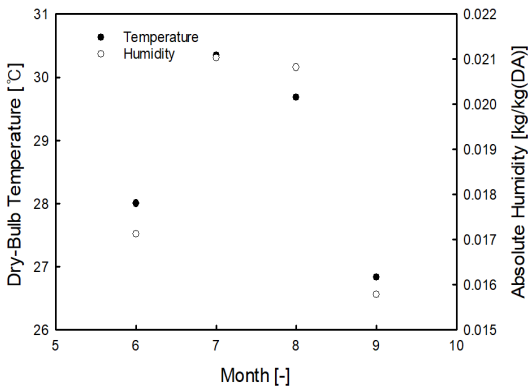


Fig. 7 Dry-bulb temperature and absolute humidity according to month

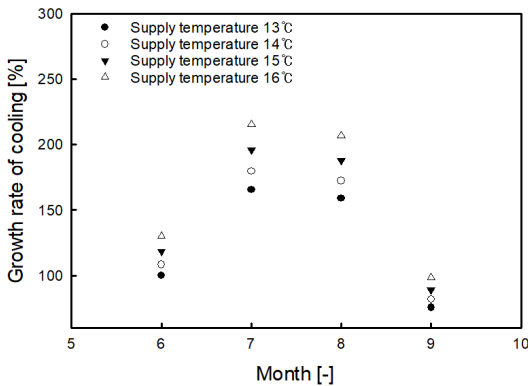


Fig. 8 Growth rate of cooling according to monthly supply temperature

3.2 일별 냉방시스템의 대체 열량 분석

Fig. 9는 고정된 유량에서 일별 급기 온도에 따른 필요 냉방 능력과 실내 부하를 나타내었다. 필요한 냉방 능력은 월별 냉방 능력과 비슷하게 Fig. 10의 절대습도와 유사한 경향을 보였으나, 4일과 같이 외기온도가 크게 변화하는 경우는 경향에 영향을 받는 것을 확인하였다. 이는 4일에 Fig. 4에 나타난 바와 같이 강수로 인한 영향으로 판단된다. 급기 온도에 따른 실내 부하의 경우, 월별과 같이 외기온도에 영향을 받지 않으므로 일정한 경향을 보였으며, 이는 액화 공기를 활용한 발전 과정의 경우, 날씨에 영향을 받지 않기 때문이다.

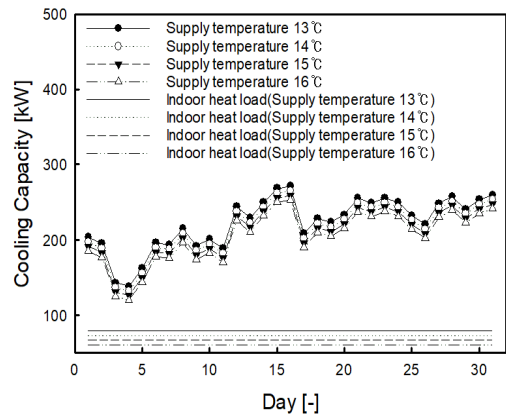


Fig. 9 Cooling capacity and indoor heat load according to daily supply air temperature

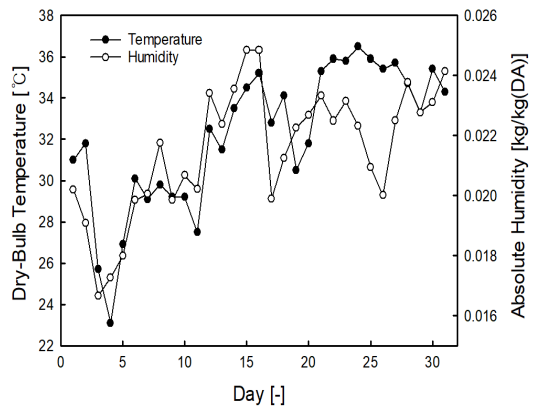


Fig. 10 Dry-bulb temperature and absolute humidity according to day

Fig. 11은 외기를 통한 냉방을 적용한 경우, 일별 급기 온도에 따른 실내 부하 대비 냉방 능력의 증가율을 나타내었다. 일별 증가율을 비교한 결과, 일별 필요 냉방 능력과 같은 경향을 보였다. 이는 월별 증가율을 비교한 것과 마찬가지로 외기온도가 높을수록 추가적인 냉방 능력을 필요로 하며, 증가율이 높아진 것으로 판단된다. 급기 온도에 따른 증가율을 비교한 결과도 월별 해석 결과와 같이 필요 냉방 능력과 실내 부하 모두 동일하게 감소하였으나 실내 부하에서의 감소량이 비율적으로 컸으므로 경향이 반대의 형상으로 나타났다고 판단된다.

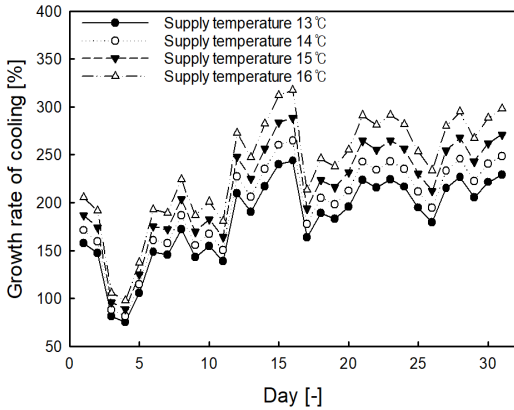


Fig. 11 Growth rate of cooling according to daily supply temperature

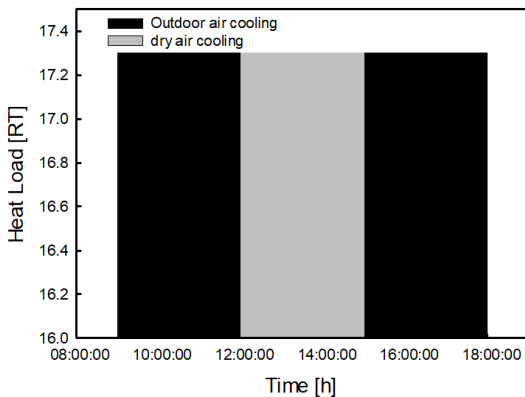


Fig. 12 Part Load operation at 17.3 RT indoor load

3.3 부분 부하 운전에 따른 대체 열량 분석

Fig. 12는 제한된 유량에서 최대 부하로 17.3 RT인 실내 부하에서 시간에 따른 부분 부하 운전을 나타내었다. Fig. 12에 나타난 바와 같이 9~12시와 15~18시인 검은색 범위에서는 외기 공조기를 사용하여 외기를 통한 냉방을 진행하였다. 12~15시까지는 외기 공조기를 사용하지 않고 건조 공기를 단열 가습하여 실내 냉방을 진행하였다.

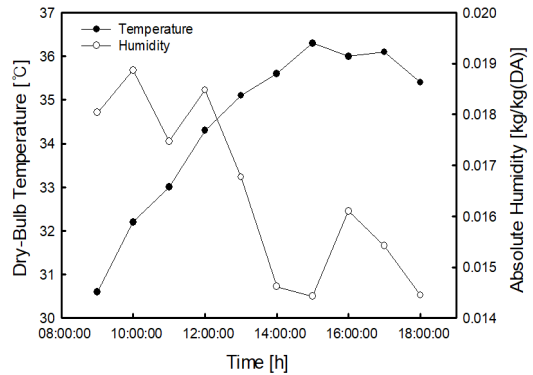


Fig. 14 Dry-bulb temperature and absolute humidity at cooling time

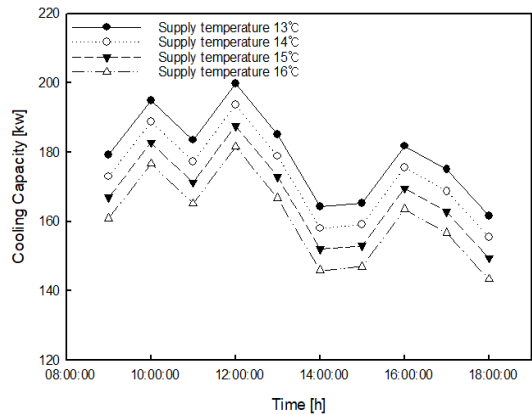


Fig. 13 Cooling capacity according to supply air temperature at cooling time

3.3.1 시간에 따른 필요 냉각량 비교

Fig. 13은 시간에 따른 필요 냉각량을 나타내었으며, Fig. 14는 시간에 따른 외기 온도와 절대 습도를 나타내었다. 해당 그래프를 확인한 결과, 가

장 높은 냉각량이 필요한 시간은 12시이며, 외기 온도가 가장 높은 시간은 15시로 나타났다. 외기 온도와 필요 냉각량을 비교한 결과, 비슷한 경향을 보이지 않았으나 절대 습도의 그래프와 필요 냉각량을 비교한 결과, 비슷한 경향을 보였다. 이는 습공기 상태에서 순수한 건공기보다 수증기가 더 큰 비열을 가져 공기의 온도보다 습도가 냉각량에 더 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

3.3.2 시간에 따른 필요 가습량 비교

Fig. 15는 시간에 따른 필요 가습량과 냉각 열량을 나타내었다. 필요 가습량의 경우, 시간에 관계 없이 일정한 값을 보였다. 이는 발전기에서 토출되어 공급받는 건조 공기가 외기 조건과는 관계없이 공급되므로 일정한 온도를 가져 일정한 부하에서 일정한 값이 나타난 것으로 판단된다. 또한 급기 온도가 높아짐에 따라 필요한 가습량은 증가하는 경향을 보였다. 이는 급기 온도의 증가에 따라 일정한 현열비에서 급기에 필요한 절대 습도가 높아지며, 필요 가습량이 증가한 것으로 판단된다.

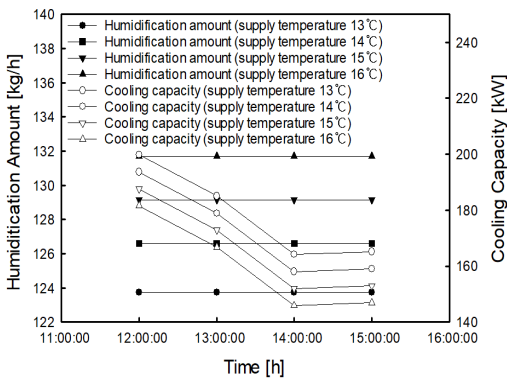


Fig. 15 Humidification amount and cooling capacity at dry air cooling time

3.3.3 1일 중 총 냉각량 비교

Fig. 16은 냉방 방식에 따른 1일 중 총 냉각량을 나타내었다. 1일 총 냉각량의 경우, 급기 온도가 낮으면 낮을수록 커지는 경향을 보였으며, 이는 2가지 방식 모두 같은 경향을 보였다. 이는 부

분 부하 운전으로 12~15시까지 건조 공기로 냉방을 진행하더라도 급기 온도가 낮아질수록 냉각기의 필요 냉각량이 커진 것으로 판단된다.

Fig. 17은 건조 공기를 사용한 경우, 대체 냉각량의 비율과 1일 총 대체 냉각량을 나타내었다. 그 결과, 1일 총 33%의 냉각량을 대체할 수 있다는 결과가 나타났으며, 대체 냉각량의 비율은 급기 온도가 높아질수록 커지는 경향을 보였다. 1일 총 대체 냉각량은 급기 온도가 높아짐에 따라 낮아지는 경향을 보였다. 즉, 대체 냉각 비율과 반대되는 결과로 나타났으며, 급기 온도의 상승에 따라 냉각기의 필요 냉각량이 감소하여 절대적인 냉각량은 감소하였지만 1일 중의 사용량도 함께 감소하며, 비율의 측면에서는 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

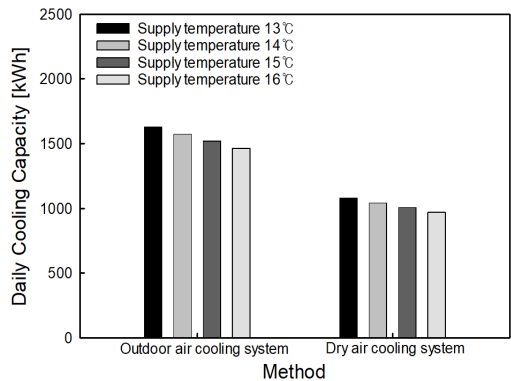


Fig. 16 Daily cooling capacity according to cooling system

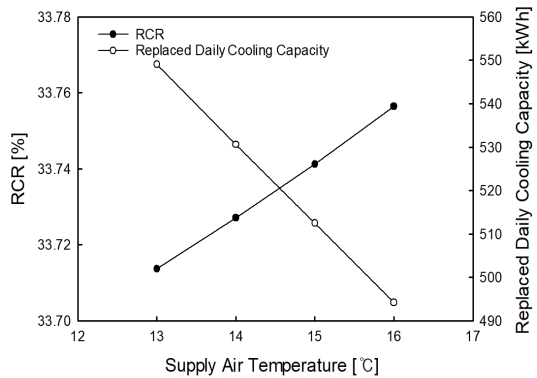


Fig. 17 Replaced cooling capacity and ratio according to supply air temperature

4. 결 론

본 논문은 액화 공기 발전기에서 토출된 건조 공기를 활용한 부분 부하 운전에 대해 연구를 진행하였으며, 결론은 아래와 같다.

외기 온도와 습도에 따른 결과를 분석한 결과, 대체 냉각량의 경우 외기 온도와 습도가 높을수록 더 큰 결과를 보인다. 이 중에서도 특히 습도의 영향이 더 큰 경향을 보였으므로 건조 공기를 통한 냉방의 경우, 고온 다습한 환경에 적합하다고 판단할 수 있다. 외기 온도와 습도에 따른 냉방 능력 증가율을 확인한 결과, 냉방 능력과 같은 경향을 보였으며, 급기 온도를 기준으로 비교한 결과, 필요 냉방 능력과 반대되는 결과를 보였다. 이를 바탕으로 비교한 결과, 외기 냉방 시스템의 효율을 고려하면 급기 온도가 높은 것이 좋으나 건조 공기를 사용하는 시간의 열량이 큰 경우에는 급기 온도가 낮은 편이 좋다고 판단된다.

또한 외기 온도와 습도에 따른 가습량을 확인한 결과, 급기 온도가 낮을수록 건조 공기에 필요한 가습량이 감소하는 경향을 보였으며, 대체 냉각량도 커지는 경향을 보였다. 이를 바탕으로 건조 공기를 활용한 냉방 시스템의 경우, 급기 조건이 낮을수록 적합하다고 판단된다. 1일 총 에너지 절감율을 확인한 결과, 급기 온도가 높아짐에 따라 대체 냉각량은 감소하였으며, 전체 냉각량에서 대체 냉각량의 비율은 증가하는 경향을 보였다. 그러나 대체 냉각량의 비율은 약 33.71~33.76%로 변화가 미미하였다. 따라서 종합적으로 판단하였을 때 건조 공기를 활용한 냉방 시스템은 급기 온도가 낮으며, 외기가 고온, 다습한 환경에 설치하는 것이 적합하다고 판단된다.

본 논문은 액화 공기 플랜트와 연계한 건조 공기 단열 가습형 냉방 시스템 설계의 기초 자료로 제공한다.

후 기

연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(RS-2022-00143652).

Author contributions

S. Y. Cha; Conceptualization. J. I. Yoon; Visualization. J. H. Lee; Writing-original draft. C. H. Son; Project administration.

References

1. H. Ansarinassab, M. Fatimah and Y. Khojasteh-Salkuyeh, 2023, "Performance improvement of air liquefaction processes for liquid air energy storage (LAES) using magnetic refrigeration system", *Journal of Energy Storage*, 65, 107304. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107304>)
2. K. J. Kim et al., 2022, "Thermal energy storage unit (TESU) design for high round-trip efficiency of liquid air energy storage (LAES)", *Cryogenics*, 128, 103570. (DOI:<https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2022.103570>)
3. M. Yang et al., 2022, "Study on design optimization of new liquified air energy storage (LAES) system coupled with solar energy", *Journal of Energy Storage*, 51, 104365. (<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104365>)
4. 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, 84-98. (<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.118>)
5. L. Hüttermann and R. Span, 2017, "Investigation of storage materials for packed bed cold storages in liquid air energy storage (LAES) systems", *Energy Procedia*, 143, 693-698. (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.748>)
6. E. Borri et al., 2017, "Improving liquefaction process of microgrid scale Liquid Air Energy Storage (LAES) through waste heat recovery (WHR) and absorption chiller", *Energy Procedia*, 143, 699-704.

- (<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.749>)
7. K. H. Kim, J. M. Ha and K. C. Kim, 2014, “Thermodynamic Performance Characteristics of Organic Rankine Cycle (ORC) using LNG Cold Energy”, Journal of the Korean Institute of Gas, 18(2), 41-47.
(<http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2014.18.2.41>)
8. J. H. Moon, H. S. Lee and J. B. Seo, 2021, “Performance Analysis of ORC Cycle Using Waste Heat”, Journal of Power System Engineering, 25(5), 43-50.
- (<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.5.043>)
9. J. R. Park et al., 2022, “Current and Prospects of Waste Heat Utilization and Cooling Technology in Data Centers”, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 44(11), 493-503.
(<https://doi.org/10.4491/KSEE.2022.44.11.493>)
10. Korea Meteorological Administration, 2024, Automated Synoptic Observing System Data.
11. PsyChart-SAREK. Version 2.0, DCS Co., Ltd., 2024.