

Enhancement of the round-trip efficiency of liquid air energy storage (LAES) system using cascade cold storage units

Jhngkwon Kim, Byeongchang Byeon, Kyoung Joong Kim*, and Sangkwon Jeong

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

(Received 15 November 2020; revised or reviewed 11 December 2020; accepted 12 December 2020)

Abstract

In this research, the variation of round-trip efficiency in a liquid air energy storage system (LAES) is calculated and an optimal configuration is found. The multiple stages of cold energy storage are simulated with several materials that process latent heat at different temperature ranges. The effectiveness in the charging and discharging processes of LAES is newly defined, and its relationship with the round-trip efficiency is examined. According to defined correlation, the effectiveness of the discharging process significantly affects the overall system performance. The round-trip efficiency is calculated for the combined cold energy storage materials of aqueous dimethyl sulfoxide (DMSO) solution, ethanol, and pentane theoretically. The performance of LAES varies depending on the freezing point of the cold storage materials. In particular, when the LAES uses several cold storage materials, those materials whose freezing points are close to room temperature and liquid air temperature should be included in the cold storage materials. In this paper, it is assumed that only latent heat is used for cold energy storage, but for more realistic analyzes, the additional consideration of the transient thermal situation to utilize sensible heat is required. In the case of such a dynamic system, since there is certainly more increased heat capacity of the entire storage system, the volume of the cold energy storage system will be greatly reduced.

Keywords: liquid air energy storage, cold storage, cold energy, renewable energy

NOMENCLATURE.

문자	의미
ϵ	유효도 (effectiveness)
A	열교환 면적
E	총 에너지 (total energy)
H	열전달계수
h	엔탈피 (enthalpy)
w	비 소모 일 (specific work)
s	엔트로피 (entropy)
T	온도 (temperature)
U	총 열전달계수 (overall heat transfer)
Y	수득율 (liquid yield)
c	충전 과정 (charging process)
d	방출 과정 (discharging process)
com	압축기 (compressor)
turb	터빈 (turbine)
other1	충전 과정에서 추가적인 냉각에 필요한 구간
other2	방출 과정에서 추가적인 가열에 필요한 구간

1. 서 론

1.1. 신재생에너지의 수요 증가

전 세계적으로 태양광, 풍력 등 신재생 에너지를 활용한

전력 생산의 비중이 커지고 있다. 실제로 대한민국에서는 국내에서 생산되는 발전량의 20%를 신재생 에너지로 대체하겠다는 재생에너지 3020 정책을 발표하였다 [1]. 이에 따라 2030년까지 도입될 신재생 에너지의 전체 설비용량이 대략 64 GW에 이를 것으로 예상된다. 그러나 신재생 에너지는 입지환경이나 자연조건에 크게 영향을 받아 간헐적으로 생산된다는 문제점이 존재한다 [2]. 또한 전력 생산과 소비의 시점에 차이가 존재하여 전력 사용의 수요와 공급의 균형이 맞지 않기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 잉여전력을 저장 및 활용하는 에너지 저장 시스템 기술에 대한 관심이 집중이 되고 있다. 한편, 전체 전력 생산 중 신재생 에너지 발전의 비중이 커질수록 공급의 불확실성에 의한 영향은 더욱 커질 것으로 예상되며, 이러한 불확실성을 극복하기 위해 대규모 신재생 에너지 발전 설비에는 반드시 에너지 저장 시스템이 필요하다.

대용량의 에너지 저장 시스템들로서 많이 비교되는 양수 발전 에너지 저장 시스템, 압축 공기 에너지 저장 시스템 그리고 액체 공기 에너지 저장 시스템은 각각의 장단점이 존재한다 [3]. 먼저 양수 발전 에너지 저장 시스템은 경제적이고 높은 신뢰도를 갖지만 댐 건설 등의 엄격한 지리적 제약이 따르고 뿐만 아니라 시설 건설에 의한 녹지 파괴 같은 환경 파괴를 야기한다. 압축 공기 에너지 저장 시스템도 경제적이고 높은 신뢰도를 갖지만 압축 공기 자체의 위험성이 존재하고 압축 공기를 저장할 지하 동굴이 있어야 하는 지리적 제약, 그리고 동굴에 존재하는 천연 가스를 연소함에 따라 발생하는 배출가스 문제 등 환경 문제도 내포하고 있다. 반면 액체 공기 에너지 저장 시스템은 단위 부피 당 높은 에너지 밀도를 갖고, 수 kW ~ 수 GW에 이르는 대용량 전력 생산이 가능하다. 또한,

* Corresponding author:kkjkorea2@kaist.ac.kr

TABLE 1
FREEZING POINT AND HEAT OF FUSION FOR EACH COLD STORAGE MATERIAL.

냉열 저장 물질	Freezing point at 1bar	Latent heat of fusion
프로판	85 K	44 kJ/kg
부탄	135 K	45 kJ/kg
펜탄	143 K	116 kJ/kg
에탄올	159 K	109 kJ/kg
이산화황	200 K	164 kJ/kg
클로로포름	209 K	80 kJ/kg
DMSO (Dimethyl sulfoxide) 20% 수용액	220 K	304 kJ/kg
RC-318 (옥타플루오로사이클로부탄)	231 K	14 kJ/kg
1,3 - 프로판디올	246 K	150 kJ/kg
물	273 K	334 kJ/kg

공기를 담아둘 저장 탱크만 있으면 되므로 지리적 제약 또한 없으며 공기 액화 과정에서 공기를 정화하기 때문에 환경적으로도 긍정적인 효과를 가진다.

1.2. 액체 공기 에너지 저장 시스템

액체 공기 에너지 저장 시스템은 크게 세 가지의 공정으로 구성되어 있으며, 그것은 대기 중의 공기를 압축하여 액화하는 액화 공정, 액화된 공기를 가압하고 기화시킨 후 팽창시켜서 전기를 얻는 발전 공정 그리고 발전 공정에서 액체 공기를 기화시킬 때의 냉열을 열저장장치에 저장하였다가 액화 공정에서 활용하여 시스템의 효율을 높이는 냉열 재활용 공정으로 구성된다.

액체 공기 에너지 저장 시스템은 영국의 뉴캐슬 대학에서 압축 공기 에너지 저장 시스템의 대안으로 제안된 후 1998년 미쓰비시에 의해서 액체 공기로부터 압축 공기를 생성하여 가스터빈에 공급하여 발전하는 형태로 구현되어 시험 되었다. 이후 2005년부터 영국의 리즈 대학과 Highview Power 사에 의해서 현재의 액체 공기 에너지 저장 시스템의 공정과 주요 기자재의 개발이 이루어졌다. 이를 통하여 2011년부터 2014년까지 런던 인근 슬라우 지역에서 350 kW/2.5 MWh 파일럿 플랜트가 건설되었고 근처 바이오매스 발전소와 연계하여 성능 시험이 시행되었다 [4]. 하지만 이 파일럿 플랜트의 경우 액화 및 발전 공정에서 소모되는 많은 액서지 손실로 인해 파일럿 플랜트의 실제 효율은 8%에 이르고 단독 공정 실증 플랜트의 실제 효율도 8~10% 내외로 보고되고 있다.

한편, 냉열 재활용 공정은 액체 공기 에너지 저장 시스템의 효율을 높이는 데 필요한 핵심공정이다. 냉열 재활용 공정은 열저장장치로 냉열을 공급하고 회수하도록 구성되어 있다. 에너지 저장 시스템의 특성상 에너지를 저장하는 시점과 이를 활용하는 시점 간 시간차가 발생하기 때문에 일반적인 액화나 냉동 공정에 사용되는 복열식 (recuperative) 열교환기 아닌, 재생식 (regenerative) 열교환 방식의 열저장 장치를 적용해야 한다. 전력 공급이 필요할 때 액체 공기를 기화시켜 발전하면서 냉열 재활용 공정을 통하여 냉열을 열저장장치에 저장하게 되고, 전력 저장에 필요할 때 저장된 냉열을 액화 공정에 활용하는 방식이다. 따라서 냉열을 저장하기 위한 물질, 즉, 열저장 매체에 대한 기술개발이 매우 중요하다.

열저장 매체를 활용하는 방식에는 물질의 상변화에 필요한 잠열을 이용하는 방식과 물질의 온도변화에 필요한 현열을 이용하는 방식이 있다. 두 방식 중 잠열을 이용하면

현열 또한 필연적으로 이용하게 되므로, 잠열을 이용하는 방식이 현열을 이용하는 방식보다 그 성능이 더 우수하다. 그러나 잠열을 사용하는 냉열 저장소를 냉열 재활용 공정에 활용할 경우, 한 개의 저장 탱크 내부에 전체 냉열 저장 매체를 보관할 때, 냉열 저장소 내부의 온도 성층화에 따른 자체 전도 열전달을 막기 힘들 것으로 분석된다. 그러므로, 다단의 탱크를 설치하여 각 온도 대역에서 강점을 갖는 냉열 저장 매체를 분리하여 이용함으로써, 자체 전도 열전달을 차단하고 냉열 재활용 효율을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 액체 공기 온도와 상온 사이에서, 다양한 어는 점을 가지는 냉열 저장 물질들로 다단의 형태의 냉열 저장소를 구성하였을 때 기대되는 에너지 효율 상승의 효과들을 계산하였다.

2. 냉열 저장 물질

본 연구에서는 냉열 저장소 내부를 흐르는 공기의 압력은 충전 과정의 경우 60 bar, 방출 과정의 경우 75 bar 로 설정하였다. 설정한 압력은 이상 유동 구간이 없는 초임계 압력 구간이며, 선행논문을 참고하여 설정하였다 [4]. 그리고 별도의 냉동장치 없이 냉열 저장소 단독으로 공기의 냉각과 가열을 모두 담당하는 것으로 가정하였다. 냉열 저장소는 많은 냉열을 저장하기 위해 높은 열용량이 요구된다. 하지만, 현열만으로는 모든 온도 구간에서 냉열을 저장하는 데 한계가 있으므로, 용해 잠열을 이용하는 것이 유리하다. 액체 공기 충전 과정은 상온부터 액체 공기 온도까지의 온도 범위에서 이루어지므로 냉열 저장 물질로는 이 온도 범위 내에서 어는 점을 가지면서 잠열이 높은 물질들을 선정했고, 이를 Table 1에 나타냈다. 잠열은 어는 점 부근 온도 범위에서만 방출되므로 한 가지 물질로 모든 온도 범위의 열부하를 감당하게 되면 매우 비효율적이다. 따라서 다양한 물질을 사용하여 여러 온도 구간에서 잠열을 활용하는 방법을 적용하였고, 이를 통해 냉열 저장소의 효율을 증가시킬 수 있다. 이 후보들 중 최종 냉열 저장 물질의 결정 기준은 두가지로 정했고, 그것은 다음과 같다. 첫째, 공기 액화 과정의 대부분의 온도 범위에서 잠열을 활용할 수 있도록 가능한 각 물질 간의 어는 점의 온도 간격이 일정하도록 선정한다. 둘째, 냉열 저장 물질은 누설 시 안전을 대비해 상온, 상압에서 액체상태여야 한다. 최종적으로 다단의 냉열 저장소에 사용될 물질을 펜탄(pentane), 에탄올(Ethanol), DMSO (dimethyl sulfoxide) 20% solution, 물로 선택했고, 그 정보는 Table 2에 나타냈다. 특히 DMSO 20% 수용액은 응고하는 과정에서 물의 잠열을 넓은 온도 범위에 걸쳐서 서서히 방출하므로 결과적으로는 비열이 커지는 효과를 볼 수 있다. Kim et al.에 의하면 DMSO 20% 수용액의 경우에 220 K 부근에서 혼합물 내부의 물이 전부 응고한다 [5]. 따라서 DMSO 20% 수용액의 작동 온도인 160 K ~ 270 K 사이에서 어는 점을 대표하는 온도로 220 K를 선정하였다. 또한 온도가 내려감에 따라 현열과 함께 서서히 방출되는 잠열은 대표 어는점인 220 K에서 한꺼번에 모두 방출된다고 가정하였다.

3. 계산 제반 조건

3.1. 총 효율(RTE; Round-trip efficiency)

LAES 시스템의 개략도는 Fig. 1 과 같다. 액체 공기 충전 과정은 주황색 선과 같다. 압축기는 공기를 등온압축

TABLE 2
MATERIAL AND FREEZING POINT BY COLD STORAGE STAGE.

Cold storage stage	Material	Freezing point
1	펜탄	143 K
2	에탄올	159 K
3	DMSO 20% 수용액	220 K
4	물	273 K

시킨다고 가정한다. 압축공기는 다단의 냉열 저장소를 지나 냉각되고 추가적인 냉각 사이클을 지난 후 팽창밸브를 통해 액화된다. 저장해 둔 액체 공기는 펌프로 가압이 된 후 냉열 저장소를 지나면서 냉열을 저장한다. 가열된 공기는 추가적인 열을 공급받아 상온에 다다르고 터빈에 들어가 등은 팽창하여 발전을 한다. LAES 시스템에서 냉열 저장소는 일종의 열 재생기(regenerator)와 같으므로, 성능의 지표로 유용도(effectiveness)를 꼽을 수 있다. 단, 극저온 재생식 냉동기에서 핵심적인 부품으로 냉열을 저장 및 재활용하는 주기가 매우 길다. 극저온 냉동기에 사용되는 재생기는 작동주기가 수 초 이하이지만 LAES 시스템의 냉열 저장소는 그 주기가 8시간 이상에 이른다.

그러므로 열교환기에 사용되는 유용도로 열 재생기의 성능을 대표하는 것보다 액체 공기 충전 과정(charging process)과 액체 공기 방출 과정(discharging process)의 이 두 과정에서 각각을 대표할 수 있는 성능 지표를 통해 냉열 저장소의 성능을 대표하는 것이 좋을 것이다. 실제로도 액체 공기 에너지 저장 시스템은 열기관이 아니라 에너지 저장 시스템으로 충전 과정과 방출 과정이 각각 분리되어 독립된 사건 아래에 작동하기 때문이다. 유체의 충전 과정과 방출 과정에서의 열역학적 상태를 보기 위해 각 과정에서의 온도-엔트로피 그래프를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2 (a)는 충전 과정을 나타낸 것이며, 작동 유체는 초기 0 지점에서 압축기에 의해 등은 압축되어 상온 (298K으로 고정) 의 c_1 에 도달한 후 등압 열교환과정을 거쳐서 c_2 에 도달 후 팽창한다. 이 과정에서 작동 유체의 액화를 위해 $0 \sim c_2$ 과정에서 압축일인 $E_{charging}$ 와 온도를 낮추기 위한 일인 E_{other1} 이 요구된다.

반대로 Fig. 2 (b)에서 볼 수 있듯이, 방출 과정에서는 액체 공기가 d_2 에서 d_1 으로 냉열 저장소에 냉열을 반납하며 온도가 상승하여 상온의 d_1 에 도달한 후 0으로 팽창하며 압력이 낮아진다. 이 과정에서 냉열 저장소에 E_{other1} 만큼 열을 반납하고 터빈 작동 등의 팽창과정을 통해 $E_{discharging}$ 를 생산한다. 이에 대한 수식적인 이해를 위해 총 효율을 구하기 위한 과정을 식 (1)~(6)에 나타냈다.

$$RTE = \frac{E_{discharging} - E_{other2}}{E_{charging} + E_{other1}} = Y \frac{W_{turb} - Q_{other2}}{W_{comp} + W_{other1}} \quad (1)$$

$$W_{comp} = h_{c1} - h_0 - T_0(s_{c1} - s_0) \quad (2)$$

$$W_{other1} = (h_c - h_{c2})/COP_R \quad (3)$$

$$W_{turb} = h_{d1} - h_0 - T_0(s_{d1} - s_0) \quad (4)$$

$$Q_{other2} = (h_{d1} - h_d) \quad (5)$$

$$RTE = Y \frac{h_{d1} - h_0 - T_0(s_{d1} - s_0) - (h_{d1} - h_d)}{h_{c1} - h_0 - T_0(s_{c1} - s_0) + (h_c - h_{c2})/COP_R} \quad (6)$$

$$\varepsilon_c = \frac{h_{c1} - h_c}{h_{c1} - h_{d2}} \Big|_{P=P_c}, \varepsilon_d = \frac{h_d - h_{d2}}{h_{c1} - h_{d2}} \Big|_{P=P_d} \quad (7)$$

$$RTE = Y \frac{h_{d1} - h_0 - T_0(s_{d1} - s_0) - \varepsilon_d(h_{d1} - h_d)}{h_{c1} - h_0 - T_0(s_{c1} - s_0) + \varepsilon_c(h_c - h_{c2})/COP_R} \quad (8)$$

식 (1)은 총 효율을 나타내는 식이며, 앞서 설명했던 $E_{charging}$, E_{other1} , E_{other2} , 그리고 $E_{discharging}$ 가 각각 압축기, 냉동기, 열저장물질, 그리고 터빈에 의한 에너지 출입을 나타낸다. 이를 액체 공기의 수득율인 Y에 대해 표현할 수 있고, 그 때 압축기, 냉동기, 그리고 터빈에서 요구 및 생성되는 일과 냉열 저장소에서의 열교환량으로 나타낼 수 있다. 여기서 수득율이란 액화시키기 위해 투입된 공기와 실제 액화된 공기의 질량비이다. 식 (2)는 압축기에 의한 압축일, 식 (3)은 냉동기 작동에 요구되는 일이다. 이 때 사용한 COP_R 은 냉열 저장 물질의 어는점(여러 냉열 저장 물질을 사용할 때에는 가장 어는점이 낮은 물질의 어는 점)과 공기가 밸브를 통해 팽창을 시작하는 온도인 80K 사이의 카르노 효율이다. 식 (4)는 터빈 작동으로 생산되는 일, 그리고 식 (5)는 냉열 저장소에서의 열교환량을 나타낸다. 식 (1)에 식 (2)~(5)를 대입하면 총 효율은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 각 과정에서의 작동 유체의 상태량으로 총 효율을 구할 수 있다. 충전 과정에서의 유용도인 ε_c 와 방출 과정에서의 유용도인 ε_d 는 식 (7)과 같으며, 이렇게 표현한 근거는 다음과 같다.

유용도의 정의는 유체의 출입구 온도 혹은 엔탈피에 따라 수행되어야 한다. 하지만 냉열 저장 물질은 흐르는 유체가 아니고 풀(pool) 형태로 고여 있기 때문에, 유체의 출입구 온도를 정의하기가 어렵다. 하지만 유용도의 물리적 정의가 실제 열교환량을 최대 가능 열교환량으로 나눈 것에서 착안하여, 유용도를 식 (7)과 같이 새롭게 정의하였다. P_c 와 P_d 는 충전 및 방출 과정에서 공기의 압력이며, 각각 6000 kPa 및 7500 kPa로 설정하였는데, 이는 압축 공기가 열교환하는 과정에서 단상(single phase)의 기체 혹은 액체 상태를 유지하기 위한 조건이다. (7)을 h_c 와 h_d 에 의한 식으로 정리한 후, 이를 다시 (6)에 대입한 후 RTE를 ε_c 와 ε_d 로 표현하면 식 (8)이 도출된다. 2장에서 설명한 조건으로 식 (8)을 이용하여 충전 과정과 방출 과정의 유용도에 따른 총 효율의 계산 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 이것을 통해 총 효율은 충전 과정의 유용도보다 방출 과정의 유용도에 더 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 냉열 저장소의 열교환 형상 설계 시, 상대적으로 더 저온이면서 유체가 액체상태로 존재하는 방출공정을 좀 더 섬세하게, 즉 보수적으로 설계해야 한다. 다시 말하자면, 충전 공정과 방출 공정에서 유체의 유동이 같은 통로를 통해 방향만 반대로 흐른다고 생각해보면, 상대적으로 고온인 충전 과정에서의 열교환부 열전달 면적보다는 상대적으로 저온인 방출 과정의 열교환부 열전달 면적을 기준으로 설계해야 한다는 것이다. 이 이유를 식 (8)을 통해 해석해보면, 충전 과정에서 추가적인 냉동기에 요구되는 일은 분모에서 등온압축일과 합산하는 반면에 방출 과정에서 추가적인 가열과정은 분자에서의 등은 팽창 일에서 감산하기 때문이다. 식 (1)에서 E_{other1} 이 커지면 총 효율 식에서 분모가 커지므로 총 효율 자체는 작아지는 효과가 나지만 방출 과정에서의 변화에 완충작용을 하는 것으로 해석할 수 있다.

물리적인 해석은 다음과 같다. 본 연구에서는 냉열 저장소에서 냉열 저장 물질의 잠열만 이용하기 때문에 충전 과정에서는 냉열 저장소에 압축 공기가 들어가는 입구인 고온 부(hot side)에서는 온도 차가 크게 발생한다. 따라서 압축 공기가 냉열 저장소와 열교환 한 후 나오는 출구 쪽인

저온 부(cold side)에서 온도 차이를 줄여 유용도를 증가시켜야 한다. 이 과정은 공기가 냉열을 재활용하여 공급받는 과정이므로 유용도를 변화시키는 곳은 상대적으로 저온이다. 반대로 방출 과정에서는, 냉열 저장소에 액체 공기가 들어가는 저온 부에서는 온도 차가 많이 나므로 고온 부의 온도 차이를 줄여서 유용도를 증가시켜야 한다. 공기의 경우, 유용도에 영향을 미치는 엔탈피는 압력보다는 온도에 더 민감하게 변화하고, 상온 부근보다 저온에서 변화가 크다. 그러므로 ϵ_c 와 ϵ_d 가 같은 값을 가지기 위해서는, 충전 과정의 저온 부 온도 차가 방출 과정의 고온 부 온도 차보다 더 작아야 가능하다.

정리하면, 충전 과정과 방출 과정에서 공기의 엔탈피 차이가 같을 때 ϵ_c 의 변화가 ϵ_d 의 변화보다 크다. 즉, ϵ_c 와 ϵ_d 의 변화가 같다면 방출 과정의 엔탈피 변화가 충전 과정의 엔탈피 변화보다 크다고 결론지을 수 있다. 그러므로 ϵ_d 의 변화에 방출 과정의 엔탈피가 더 민감하게 반응하므로, 이 민감한 엔탈피 변화는 총 효율에도 더 큰 영향을 미친다.

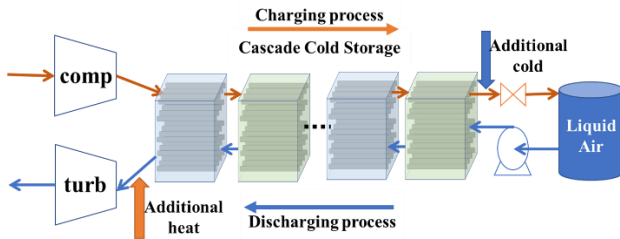


Fig. 1. Schematic diagram of a LAES system using cascade cold storage units.

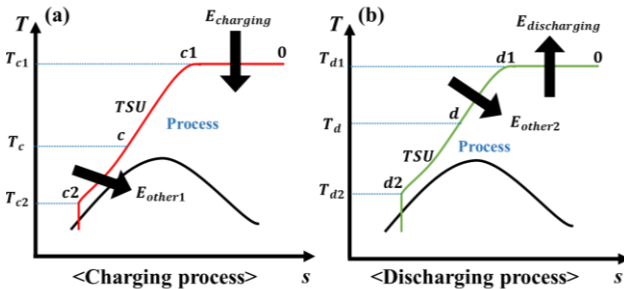


Fig. 2. T-s diagram of processes of liquid air energy storage system of charging process (a) and discharging process (b).

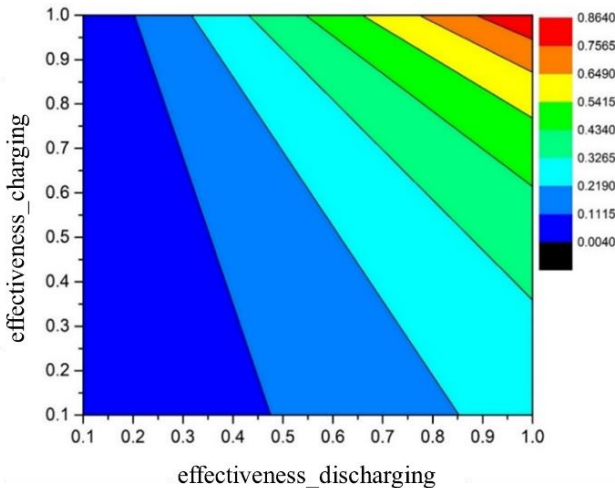


Fig. 3. RTE value by effectiveness of charging and discharging process.

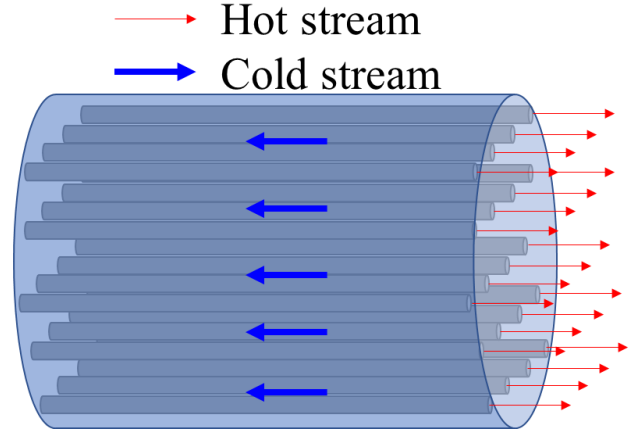


Fig. 4. Schematic of simple shell and tube heat exchanger.

3.2. 냉열 저장소 계산 조건

액체 공기 충전 과정의 경우 압축 공기가 냉열 저장 물질의 잠열에 의해 냉각이 되므로 냉열 저장소의 온도는 어느 점에서 일정하게 유지될 것이다. 본 논문에서는 충분한 열교환 면적 확보를 위해 Fig. 4와 같은 쉘앤튜브(Shell and tube) 형식의 열교환기 형태로 냉열 저장소를 선택한다. 쉘 안쪽에 냉열 저장 물질을 넣고 그 안에 공기가 흐르는 관을 여러 개 설치하면, 작동 유체는 일정한 온도의 관을 지나가는 상황에서 대류 열전달의 영향을 받게 된다. 그리고 배관 내의 유체의 유동은 레이놀즈 수(Reynolds number)에 따라 층류 또는 난류 유동으로 결정된다. 본 연구의 경우 선행연구에서의 100 MW급 발전 조건을 인용하여 액체 공기 충전 과정에서 유체의 질량유량을 100 kg/s으로 가정하였고, 유체의 압력을 고려하여 100 kg/s의 질량유량이 700개의 관에 나뉘어 통과하도록 하였다 [4]. 한편, 충전 과정의 6000 kPa, 방출 과정의 압력은 7500 kPa로 설정하였다.

4. 총 효율의 변화

앞선 가정의 쉘앤튜브 열교환기에서, 각 튜브의 내경은 1 inch의 직경을 갖고, 냉열 저장소의 탱크인 쉘은 5.81 m²의 단면적을 갖는다. 구체적인 계산 과정은 다음과 같다.

- 1) 관내 유동 관계식으로 총 열전달 계수(overall heat transfer coefficient) 도출은 각 냉열 저장 물질의 고체상태의 열전도에 대한 항과 속이 빈 튜브에서의 열전도도 공식을 사용하였다. 그 때 틸름은 각 튜브 사이의 거리의 절반을 사용한 식 (9)를 이용했다. 여기서 튜브의 내경과 외경의 비율(D/d)은 다음과 같은 과정으로 계산한다. 냉열 저장소의 튜브 다발의 단면적과 튜브 다발을 제외한 쉘의 단면적의 비가 본 계산 조건에서는 4가 나왔고, 단면적의 비는 직경의 비의 제곱과 같으므로 2로 결정했다.

$$\frac{1}{UA} = \left(\frac{1}{HA}\right)_{tube} + \left(\frac{1}{HA}\right)_{shell} + \frac{\ln(D/d)}{2\pi kL} \quad (9)$$

- 2) 총 열전달 계수까지 계산한 후 식 (10)에 대입하여 공기가 냉열 저장소를 지난 후 온도를 계산한다.

여기서 T_w 는 냉열 저장 물질의 온도를, T_0 는 냉열 저장소에 투입되는 공기의 온도를, \dot{m} 은 공기의 질량유량을, c_p 는 공기의 비열을, d 는 파이프의 지름을, x 는 냉열 저장소의 길이를 나타낸다.

$$T = T_w + (T_0 - T_w) \exp\left(\frac{\pi H d x}{\dot{m} c_p}\right) \quad (10)$$

- 3) 위의 계산으로 첫번째 냉열 저장소를 지나서 출구온도가 도출되고 그것은 두번째 냉열 저장소의 입구온도가 된다.

앞선 계산 순서를 통해 100 MW/200 MWh 규모의 LAES를 설계하기 위해서는 액체 공기의 방출 시간은 최소 2시간이어야 한다. 계산에 사용된 4개의 냉열 저장 물질들 중, 열교환 상황에서 잠열을 방출하는 상변화 시간이 가장 짧은 물질은 펜탄이며, 펜탄이 2시간의 상변화 시간을 가질 수 있게 하는 열교환기의 총 길이는 1066 m로 계산되었다. 여기서 상변화 시간은, 액체(혹은 고체)인 냉열 저장 물질이 모두 고체(혹은 액체)로 변화하는 데 소요되는 시간을 뜻한다. 따라서 최소한 이 이상의 길이를 가져야 2시간 이상의 상변화 시간을 확보할 수 있다. 냉열 저장소의 길이를 이 수치보다 더 여유롭게 설정하고자 하여, 총 길이를 1200 m로 가정하고 계산을 진행하였다. 그때의 냉열 저장소 설비의 전체 부피는 6359 m³이다. 이는 선행 연구인 Sciacovelli et al.이 명시한 냉열 저장소 설비의 부피 9200 m³에 비해 31% 감소한 수치로 더 밀도있고 경제적인 설계가 가능하다 [4].

5. 계산 결과

본 연구에서 계산한 계산 결과들은 여러 종류의 냉열 저장 물질을 이용한 조합을 다루며 각각의 경우에서 냉열 저장소의 길이와 부피는 동일하다.

5.1. 냉열 저장 물질 종류의 영향

5.1.1. 한 개의 냉열 저장 물질 이용

냉열 저장 물질의 종류를 1개 사용할 경우에 대한 ϵ_c , ϵ_d , 그리고 총 효율에 대한 계산 결과를 Table 3에 나타냈다. 선택한 종류와 그 조합이 총 효율에 영향을 미친다. 3.1 절에서 설명한 바와 같이 총 효율은 ϵ_d 에 더 민감하게 영향을 더 받으므로 조합 1, 2, 3, 4 순으로 ϵ_c 는 증가함에도 ϵ_d 는 감소하기 때문에 총 효율의 감소를 초래한다.

5.1.2. 두 개의 냉열 저장 물질 이용

냉열 저장 물질의 종류를 2개를 사용할 경우, 선택한 종류와 그 조합에 따라 총 효율이 변하고, 그 결과를 Table 4에서 확인할 수 있다. 총 효율은 각 과정의 유용도가 높을수록 커지는 경향이 있다. 그것으로 미루어 볼 때, 조합 5번이 가장 높은 이유는 다음과 같다. 냉열 저장소의 고온 부와 저온 부에서 한 곳이라도 고온 유체와 저온 유체의 온도 차이가 작게 나면 유용도가 커진다. 그러므로 어는점이 상온과 가까운 물을 사용한 경우 고온 부의 고온 유체와 저온 유체의 온도차이가 작아지므로 ϵ_d 가 커지게 되고, 결과적으로 총 효율이 높아진다.

5.1.3. 세 개 이상의 냉열 저장 물질 이용

냉열 저장 물질을 3개를 사용한 경우에서도 같은 경향인

TABLE 3
CALCULATION RESULTS OF SINGLE COMPONENT OF COLD STORAGE MATERIALS.

조합	1	2	3	4
물	O	X	X	X
DMSO 수용액	X	O	X	X
에탄올	X	X	O	X
펜탄	X	X	X	O
ϵ_c	0.070	0.225	0.452	0.569
ϵ_d	0.921	0.759	0.471	0.348
총 효율	0.248	0.230	0.171	0.139

TABLE 4
CALCULATION RESULTS OF TWO COMPONENTS OF COLD STORAGE MATERIALS.

조합	5	6	7	8	9	10
물	O	O	O	X	X	X
DMSO 수용액	X	X	O	O	O	X
에탄올	X	O	X	X	O	O
펜탄	O	X	X	O	X	O
ϵ_c	0.55	0.44	0.22	0.55	0.44	0.55
ϵ_d	0.90	0.88	0.92	0.75	0.75	0.42
총 효율	0.39	0.34	0.28	0.33	0.28	0.17

TABLE 5
CALCULATION RESULTS OF THREE AND FOUR COMPONENTS OF COLD STORAGE MATERIALS.

조합	11	12	13	14	15
물	O	O	O	X	O
DMSO 수용액	O	O	X	O	O
에탄올	O	X	O	O	O
펜탄	X	O	O	O	O
ϵ_c	0.426	0.525	0.535	0.536	0.516
ϵ_d	0.919	0.919	0.836	0.757	0.914
총 효율	0.348	0.391	0.358	0.322	0.385

것을 Table 5에서 확인할 수 있다. 다른 계산과 마찬가지로 각 냉열 저장 물질이 담당하는 길이는 동일한 환경이다. 조합 12와 조합 13, 조합 15는 냉열 저장 물질의 어는 점이 가장 높은 물과 가장 낮은 펜탄을 사용하므로, ϵ_c 또는 ϵ_d 가 큰 값을 갖게 되어 총 효율이 높아진다. 같은 이유로 조합 11이과 조합 14는 총 효율이 작게 나타났다. 즉, 우수한 성능의 냉열 저장소를 설계하기 위해서는 냉열 저장 물질을 선정할 때 그 어는점이 상온과 목표하는 저온에 가까운 두 물질을 선택하는 것이 총 효율을 높일 수 있는 중요한 사항이다. 물과 펜탄을 포함하여 세가지 냉열 저장 물질을 사용했을 때의 총 효율이 물과 펜탄만을 사용한 총 효율보다 낮은 값을 보인다. 이는 세가지 냉열 저장 물질을 고려할 때, 각 400 m씩 동일한 열교환기 길이를 갖는 상황에서 도출된 결과이기 때문이다. 본 연구에서는 냉열

TABLE 6
DETAILED CALCULATION RESULTS OF WATER AND PENTANE FOR COLD STORAGE MATERIALS.

조합	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
물 부분 길이 [m]	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
펜탄 부분 길이 [m]	1100	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
ϵ_c	0.5690	0.5684	0.5677	0.5661	0.5627	0.5557	0.5414	0.5146	0.4690	0.3964	0.2784
ϵ_d	0.6241	0.7359	0.8052	0.8512	0.8815	0.9004	0.9113	0.9168	0.9194	0.9204	0.9208
총 효율	0.2719	0.3258	0.3590	0.3804	0.3932	0.3985	0.3962	0.3854	0.3656	0.3370	0.2986

저장 물질의 어는점과 LAES 시스템의 총 효율의 관계에 대해 초점을 두었고, 각 냉열 저장 물질의 분율에 대한 영향은 다루지 않았다. 만약 세가지 이상의 냉열 저장 물질을 이용하고 각 냉열 저장 물질의 분율까지 심도 있게 고려한다면 두가지의 냉열 저장 물질을 사용할 때보다 더 높은 총 효율이 도출될 수 있다. 하지만 이 부분은 분명한 본 연구의 한계이며, 따라서 본 연구는 이 부분에 대한 연구가 필요하다고 주장한다.

5.2. 냉열 저장 물질들의 분율 영향: 물과 펜탄만 사용

냉열 저장 물질의 후보 중 가장 어는 점이 높은 물과 가장 낮은 펜탄만 사용한 경우, 각 물질이 냉열 저장소 내에서 차지하는 길이에 따른 총 효율과 ϵ_c , ϵ_d 의 변화를 Table 6에 기록하였다. 이 경우 총 부피 6359 m³인 상황 (총 길이 = 1200 m)에서 각 유체가 담당하는 길이를 100 m 단위로 분배하였을 때, 총 11가지 조합이 생긴다. Table 6의 조합 16부터 조합 26이 그 11가지 조합들이며, 이중 조합 21이 가장 큰 총 효율을 나타내었다. 물 부분의 길이가 길어지면서 ϵ_c 는 감소하고 ϵ_d 가 증가하여, 길이 배분의 중간 지점인 조합 21의 총 효율이 가장 크게 나타났다. 전체적으로 물과 펜탄의 조합이 다른 조합들에 비해서 ϵ_c 및 ϵ_d 가 높게 나타나는데, 이것은 Table 1에서 볼 수 있듯이, 계산에 사용된 다른 물질들에 비해서 물과 펜탄의 어는점이 각각 상온과 액화공기의 온도와 비슷하기 때문이다. 작동 유체인 공기가 충전 과정에서 고체 펜탄과, 방출 과정에서 얼음과 열교환을 하는 데, Table 2의 다른 물질들을 사용할 때보다 충전 과정에서 가장 낮은 온도까지 예냉되고, 방출 과정에서 가장 높은 온도까지 예열되므로 이러한 결과가 도출된다. 이러한 논리를 확장하여 만약 펜탄 대신 펜탄보다 어는점이 더 낮은 프로판을 사용한다면 충전 과정에서 더 낮은 온도를 보장하므로 ϵ_c 를 더 크게 만들 수 있어, 더 높은 총 효율을 도출할 수 있다.

6. 결 론

액화 공기 에너지 저장 시스템에 사용되는 냉열 저장소는 충전 과정과 방출 과정에서의 유용도 모두가 에너지 저장 시스템의 총 효율에 영향을 미친다. 특히 방출 과정에서의 유용도가 결정적으로 총 효율에 영향을 미치는 것을 확인했다. 따라서 냉열 저장소를 설계할 때, 방출 과정에서 원활한 성능을 낼 수 있도록 설계한다면, 충전 과정에서도 목표하는 성능을 낼 수 있다.

냉열 저장소에서 각 과정의 유용도를 증가시키기 위해, 여러 어는점을 갖는 냉열 저장 물질로 다단의 냉열 저장소를

운용할 시, 유용도와 RTE의 변화를 계산하였다. 냉열 저장 물질로는 물, DMSO 20% 수용액, 에탄올, 그리고 펜탄을 이용했다. 냉열 저장 물질의 용해 잠열만을 이용한다는 가정과 함께, 냉열 저장소의 성능을 계산했다. 그 결과 하나의 냉열 저장 물질보다 여러 개의 냉열 저장 물질로 냉열 저장소를 운용할 때 공통적으로 더 높은 총 효율을 가지는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 복수의 냉열 저장 물질을 이용할 때, 각 물질마다 같은 부피를 차지한다는 가정을 세웠는데, 이는 물질들의 각기 다른 용해 잠열의 크기를 고려하지 않고 부피 배분을 하였다는 점에서 그 한계가 있다. 각 냉열 저장 물질들의 최적 분율에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것이다. 한편, 냉열 저장 물질이 현열을 이용하지 않고 용해 잠열만 이용한다는 가정 또한 개선이 필요할 것이다. 이러한 한계점에도 불구하고, 복수의 냉열 저장 물질을 활용하는 것이 단수의 냉열 저장 물질을 활용하는 것보다 더 효율적이라는 것을 계산적으로 확인한 것에 연구의 의의가 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by a grant (19IHTP-B151617-01) from a development program of core technologies for commercial hydrogen liquefaction plant funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government.

REFERENCES

- [1] 산업통상자원부. 재생에너지 3020 이행계획 발표 2017.
- [2] Dodds PE, Garvey SD. The Role of Energy Storage in Low-Carbon Energy Systems. Elsevier Inc.; 2016. doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00001-4.
- [3] Qinghua Yu, Tongtong Zhang, Xiaodong Peng, Lin Cong, Lige Tong, Li Wang, Xiaohui She, Xiaosong Zhang, Xinjing Zhang, Yongliang Li, Haisheng Chen, Yulong Ding, Cryogenic Energy Storage and Its Integration with Nuclear Power Generation for Load Shift; 2019. doi.org/10.1016/B978-0-12-813975-2.00008-9
- [4] Morgan R, Nemes S, Gibson E, Brett G. Liquid air energy storage - Analysis and first results from a pilot scale demonstration plant. Applied Energy; 2015. doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.109.
- [5] Jhongwon Kim, Hyunjun Park, Junhyuk Bae, Sangkwon Jeong, Daejun Chang, Investigation of amorphous material with ice for cold thermal storage. Progress in superconductivity and cryogenics; 2019. doi.org/10.9714/psac.2019.21.1.040