

Characteristic analysis and condenser design of gas helium circulation system for zero-boil-off storage tank

Jangdon Kim^a, Youngjun Choi^b, Keuntae Lee^c, Jiho Park^d, Dongmin Kim^c, and Seokho Kim^{*,a}

^a Mechanical Engineering, Changwon National University, Republic of Korea

^b Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, Republic of Korea

^c LNG and cryogenic technology Center, Korea institute of Machinery & Materials, Republic of Korea

^d Energy Systems Research Division, Korea institute of Machinery & Materials, Republic of Korea

(Received 6 November 2023; revised or reviewed 13 December 2023; accepted 14 December 2023)

Abstract

Hydrogen is an eco-friendly energy source and is being actively researched in various fields around the world, including mobility and aerospace. In order to effectively utilize hydrogen energy, it should be used in a liquid state with high energy storage density, but when hydrogen is stored in a liquid state, BOG (boil-off gas) is generated due to the temperature difference with the atmosphere. This should be re-condensed when considering storage efficiency and economy. In particular, large-capacity liquid hydrogen storage tank is required a gaseous helium circulation cooling system that cools by circulating cryogenic refrigerant due to the increase in heat intrusion from external air as the heat transfer area increases and the wide distribution of the gas layer inside the tank. In order to effectively apply the system, thermo-hydraulic analysis through process analysis is required. In this study, the condenser design and system characteristics of a gaseous helium circulation cooling system for BOG recondensation of a liquefied hydrogen storage tank were compared.

Keywords: gas helium circulation system, liquid hydrogen, process analysis, zero boil-off(ZBO)

1. 서 론

수소는 기존 연료와는 달리 탄소를 전혀 포함하지 않아 친환경 미래 에너지원으로서 주목받고 있다. 세계적으로 다양한 에너지 응용 분야에서 활발히 연구되고 있으며, 우리나라 역시 2050년까지 탄소 중립을 선언하고 저탄소 정책을 통해 지속가능하고 풍부한 친환경 수소에너지 개발에 주력하고 있다. 수소를 효과적으로 활용하기 위해서는 기체 수소 대비 약 800분의 1의 부피를 갖는 액체 상태로 사용되어야 하며, 이를 안정적으로 저장하기 위해 별도의 단열 저장 용기가 필요하다 [1].

그러나 극저온의 액체 수소를 저장할 경우 외기와 온도의 차이에 의해 저장 용기로의 열침입으로 BOG(Boil-Off Gas)가 발생하게 되며, 이는 경제성과 안전을 고려하여 재응축되어야 한다. 특히, 대용량의 액체 수소 저장 용기는 전열 면적이 넓어짐에 따라 열 침입이 증가하며, 탱크 내부 가스층이 넓어 극저온 냉동기를 이용한 직접 재응축 방식 대신, 외부 냉각 시스템을 이용한 간접 재응축 기술의 검토가 필요하다. 액체수소를 단열 용기에 안정적으로 저장하고 효율적으로 사용하기 위해 저장 용기 내부에서 발생하는 BOG를 모두 응축하는 ZBO(Zero boil-off) 저장 탱크를 개발해야 하지만 국내외의 ZBO 저장 탱크 관련 연구가 미흡한 실정이다 [2].

본 논문에서는 7 m³ 액체 수소 ZBO 저장 탱크의 BOG 재응축용 기체 헬륨 순환 시스템의 응축기를 설계하고 상용

공정해석 프로그램인 HYSYS를 활용하여 ZBO 저장 탱크에서 발생하는 BOG 응축 과정의 기본 모델 정립 및 응축기 형상에 따른 시스템의 특성 비교를 수행하였다.

2. ZBO 저장 탱크용 기체 헬륨 순환 시스템 설계

2.1. ZBO 저장 탱크용 냉각 시스템 구성

극저온 냉각 시스템은 일반적으로 극저온 냉동기를 통한 직결 전도 냉각 방식과 극저온 냉매를 순환시켜 냉각하는 순환 냉각 방식으로 구분된다. 본 연구에서는 대용량 탱크 내부에 넓게 분포한 가스층을 고려하였을 때, 전열 면적이 넓어 상대적으로 열전달에 유리한 장점을 가진 기체 헬륨 순환 시스템을 사용한 간접 냉각 방식을 채용하였다. 냉각 대상인 ZBO 저장 탱크의 체적은 7 m³, 내부의 압력은 1 bar, 자연적으로 증발하는 비율인 BOR(boil-off rate)은 단열 액체 수소 저장 탱크 관련 선행 연구 자료를 참고하여 1 %/day로 가정하였다 [3]. ZBO 저장 탱크 내부 수소의 증발유량은 0.06 g/s이고, 증발기체를 응축시키기 위한 냉각 용량은 26 W이다. Fig. 1은 ZBO 저장 탱크용 기체 헬륨 순환 시스템의 구성도이며, Table 1은 ZBO 저장 탱크의 사양을 나타낸다.

별도로 설치되는 기체 헬륨 순환 시스템은 헬륨의 순환을 위해 필요한 압력을 형성시켜주는 블로워, 냉각을 위한 냉동기, 이를 연결하기 위한 진공 배관 및 유량을 조절하기 위한 밸브 등으로 구성된다.

적절한 블로워를 선정하기 위해 배관의 길이 및 직경에 따른 압력강하를 계산해야 한다. 특히, 기체 헬륨 순환 시스템에

* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

적용되는 블로잉은 순환 유량에 따른 동적 손실로 인해 부가적인 열부하가 가해지므로 이에 대한 검토가 필수적이다.

2.2. 응축 배관 설계

응축 배관의 경우 단일 유로, 다중 유로 등 다양한 유로 형태가 있을 수 있으나, 본 연구에서는 응축을 위한 최소 배관 길이 산출을 위해 먼저 단일 유로에 대한 설계를 진행하였다. 액체 수소 저장 탱크 내부 응축기 입구의 기체 헬륨 온도는 수소의 어는점보다 높아야 하고 응축기 출구의 기체 헬륨 온도는 수소의 끓는점보다 낮아야 한다.

응축기 입구 기체 헬륨의 온도는 18 K, 응축기 출구 기체 헬륨의 온도는 19 K, 기체 헬륨 순환 시스템의 작동 압력은 10 bar로 가정하였으며, 상세 설계 조건은 Table 2에 나타내었다.

냉각 용량과 허용 온도 차를 기준으로 식 (1)에 의해 필요 기체 헬륨 유량을 산출한다. BOG 재응축에 요구되는 응축기 길이를 도출하기 위해 매끈한 관내를 흐르는 완전 발달된 난류 유동에서의 관계식 (2)를 통해 기체 헬륨 배관 내의 열전달계수를 산출한다.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (1)$$

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} = \frac{h_i \times D}{k} \quad (2)$$

여기에서 \dot{m} 은 질량유량(kg/s), C_p 는 헬륨의 비열(J/kg·K), ΔT 는 응축기 입출구의 온도 차(K), Nu 는 누셀 수, Re 는 레이놀즈 수, Pr 은 프란틀 수, h_i 는 배관 내의 열전달계수(W/m²·K), D 는 관의 내경(m), k 는 기체 헬륨의 열전도도(W/m·K)이다. 기체 헬륨의 물성은 응축기 입구와 출구의 평균 온도인 18.5 K에서의 값을 사용하였다. 식 (1)을 통해 산출된 냉각 대상을 위한 필요 질량 유량은 약 4.5 g/s이며, 이때의 부피 유량은 약 0.61 m³/h이다.

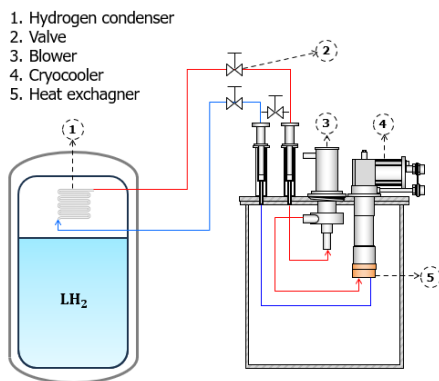


Fig. 1. Schematic of gas helium circulation system.

TABLE 1
SPECIFICATION OF ZBO STORAGE TANK.

Parameter	Value
Volume of storage tank [m ³]	7
Boil-off rate [%/day]	1
Hydrogen evaporation [g/s]	0.06
Required cooling capacity [W]	26
Pressure inside the storage tank [bar]	1

또한, 관 바깥 표면에서의 평균 열전달 계수는 수정 증발 잠열 식 (3), 수평관 바깥 표면 위의 막 응축에 대한 평균 열전달 계수 식 (4)를 사용하여 계산하였다.

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68C_{p,l}(T_{sat} - T_s) \quad (3)$$

$$h_o = 0.729 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}^*k_l^3}{\mu_l(T_{sat} - T_s)D} \right] \quad (4)$$

식 (3)에서 h_{fg}^* 는 수정 증발 잠열(J/kg), h_{fg} 는 증발 잠열(J/kg), $C_{p,l}$ 은 평균 막 온도에서 액체의 비열(J/kg·K), $9843T_{sat}$ 은 수소 포화 온도(K), T_s 은 응축기 평균 온도(K)이다.

식 (4)에서의 h_o 는 관 바깥 표면의 열전달 계수(W/m²·K), ρ_v 는 포화 기체 수소의 밀도(kg/m³), ρ_l , k_l , μ_l 은 각 포화 액체 수소의 밀도(kg/m³), 열전도도(W/m·K), 점성계수(Pa·s), D 는 관의 외경(m)이다.

식 (2)과 (4)에서 계산된 관 내외부의 열전달 계수와 열전달 표면적을 활용하고 구리관 자체의 전도 열저항을 무시하여 식 (5)와 같이 열관류율을 계산한다.

$$\frac{1}{UA_s} = R_{tot} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (5)$$

여기서 U 는 열관류율(W/m²·K), A_s 는 관의 열전달 면적(m²), R_{tot} 는 관의 총 열저항(K/W), A_i 는 관내의 면적(m²), A_o 는 관외의 면적(m²)이다.

앞서 열저항의 관계로써 도출된 열관류율을 바탕으로 대수 평균 온도 차 방법(LMTD)과 열관류율의 관계식(6)으로써 ZBO 저장 탱크 내 BOG 재응축에 요구되는 길이를 계산한다.

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} = U(\pi D_o L) \Delta T_{lm} \quad (6)$$

여기에서 ΔT_{lm} 은 관의 입 출구 온도차를 이용한 대수 평균 온도 차(K), ΔT_1 은 응축기 입구에서의 셸 측과 튜브 측의 온도 차(K), ΔT_2 는 응축기 출구에서의 셸 측과 튜브 측의 온도 차(K), L 은 응축 길이(m)이다.

파이프 크기 별 압력강하를 도출하기 위해 매끄러운 관의 난류 유동에서 적용가능한 마찰계수 관계식(7)으로 계산된 마찰계수와 열관류율의 관계식으로 계산된 응축 길이로 압력강하를 계산한다.

$$f = 0.3164 \times Re^{-0.25} \quad (4,000 < Re < 10^5) \quad (7)$$

$$\Delta P = f \frac{L}{D_h} \frac{\dot{m}^2}{2\rho A^2} \quad (8)$$

TABLE 2
REFERENCE DESIGN CONDITIONS OF CONDENSER.

Parameter	Value
Freezing point of hydrogen [K]	13.8
Boiling point of hydrogen [K]	20.324
Condenser inlet helium temperature [K]	18
Condenser outlet helium temperature [K]	19
Operating pressure of gas helium circulation system [bar]	10

여기에서 f 는 마찰계수, ΔP 는 압력강하(Pa), D_k 는 수력 직경(m)을 의미한다.

2.3. 기체 헬륨 유량 별 필요 응축기 길이 및 차압 특성

Table 2의 설계 기준 값에 의하면 시스템의 필요유량은 약 4.5 g/s 이나, 기타 손실로 인해 시스템에 필요한 유량을 증가시켜야 할 필요가 있다. 유량을 증가시키에 따라 응축기 입 출구에서의 온도 차이가 감소하며, 관 내부의 열전달 및 차압 특성이 변화하게 된다. Fig. 2는 배관 직경 별 유량에 따른 필요 응축 길이를 나타내며 Fig. 3은 이때의 차압 특성을 보여준다.

Fig. 2는 필요 냉각 용량인 26 W에 대한 배관 직경 별 유량에 따른 필요 응축 길이의 계산 값이며, Fig. 3은 배관 직경 별 압력 수두를 나타낸다. 유량을 증가시키에 따라 열전달 계수의 증가로 요구 응축 길이는 짧아지고 압력 수두는 증가하는 경향을 보인다.

2.4. ZBO 저장탱크용 기체 헬륨 순환 시스템 설계

응축기를 포함한 ZBO 저장 탱크용 기체 헬륨 순환 시스템의 전체 차압 특성을 고려하기 위해 응축기를 제외한 추가적인 배관 길이는 5 m로 가정하였다.

극저온 냉동기에 의해 기체 헬륨을 냉각하기 위해서는 극저온 냉동기에 설치되는 극저온 열교환기가 필요하며 이에 따른 압력강하 또한 고려해야 한다. 열교환기의 모델은 선행 연구된 기체 헬륨 순환 시스템을 참고하여 상용 열교환기 모델인 ULVAC사의 RSC40T 모델로 가정하였다 [4]. Fig. 4는 열교환기 내부를 흐르는 헬륨 유량에 따른 압력 수두 곡선이다.

액체 수소 저장 탱크 내의 응축기 배관 및 열교환기의 차압 특성을 고려하였을 때, 블로워 모델은 CRYOZONE사의 Noordenwind CryoFan 모델이 적절하다고 판단하였다 [5].

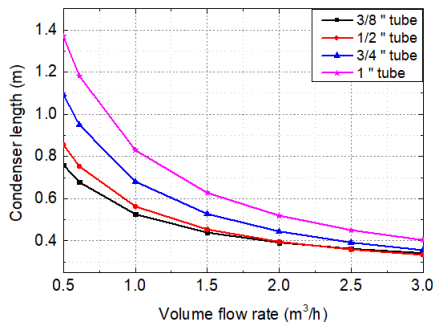


Fig. 2. Required condenser length by volume flow rate.

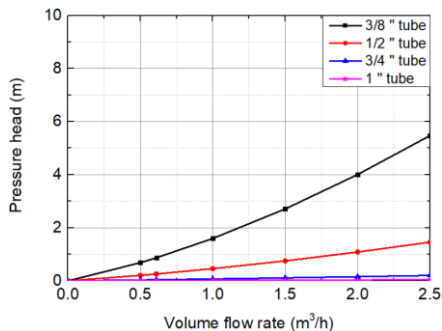


Fig. 3. Pressure head by volume flow rate.

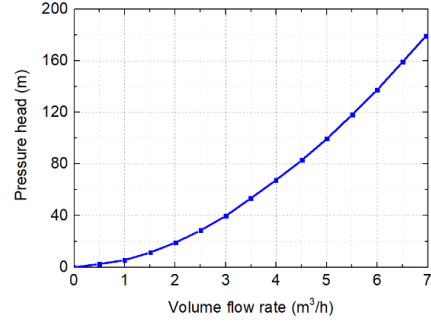


Fig. 4. Heat exchanger pressure head.

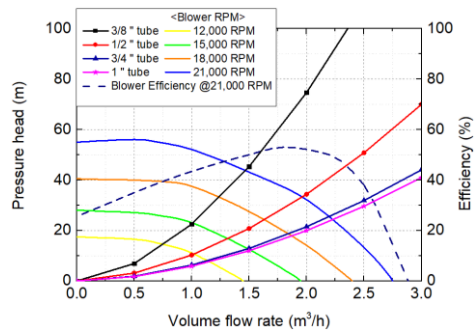


Fig. 5. Blower performance curve by volume flow rate.

Fig. 5는 배관 직경 별 유량에 따른 시스템 전체 차압 특성과 블로워의 성능 및 효율 곡선을 나타낸 것이다. 시스템의 목표 유량 범위인 기준 설계온도에서 필요 유량은 0.61 m³/h 이나, 시스템의 설계 여유 및 추가적인 열 손실 발생 경우를 대비한 유량 범위 0.5 m³/h ~ 1.9 m³/h에서 블로워의 성능 곡선을 고려하여 응축 배관의 크기는 1/2 inch를 선정하였다.

냉동기를 선정하기 위해서는 응축에 필요한 냉각 용량이외에 배관 열 손실, 블로워 손실 등을 모두 포함한 시스템의 전체 열 손실을 고려해야 한다. 블로워의 정적 손실은

TABLE 3
GAS HELIUM CIRCULATION SYSTEM HEAT LOSS.

Parameter	Value [W]
BOR of ZBO tank	26
Blower static loss	9
Blower dynamic loss @ 12,000 RPM	2
Heat loss in the connecting pipes	3
Heat loss in the circulation system	5
Total heat loss	45

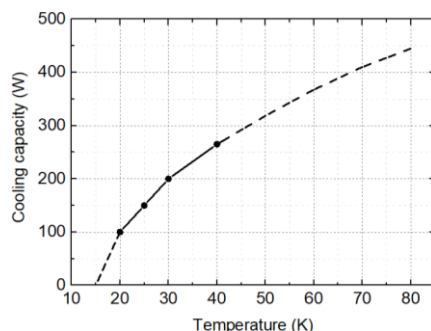


Fig. 6. AL630 cryocooler performance curve.

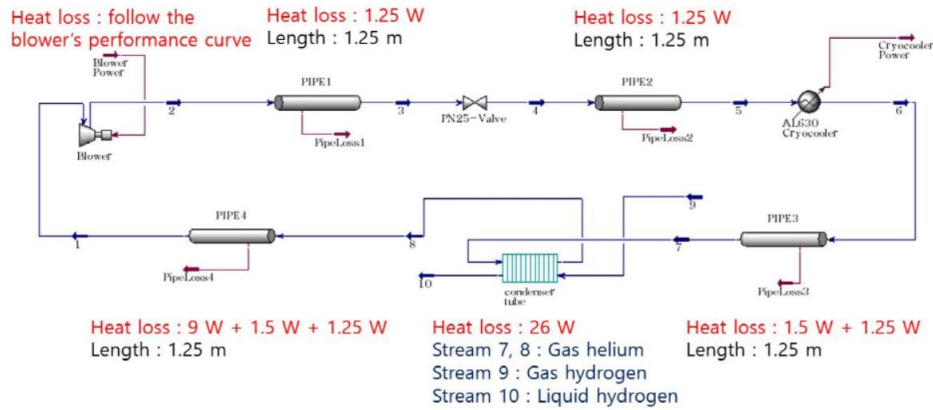


Fig. 7. HYSYS process analysis model.

Noordenwind CryoFan의 카탈로그를 참고하였고 동적 손실은 블로워가 12,000 RPM의 회전속도로 회전했을 때를 가정하여 계산하였다. 전도 열전달에 의한 열 손실을 산정하기 위해 시스템 외부의 헬륨 순환 배관의 길이는 총 3 m를 가정하였고 시스템의 연결배관 총 길이 5 m 및 베이오넷에서의 총 열손실은 5 W로 가정하였다. Table 3는 기체 헬륨 순환 시스템의 열 부하이다. 18 K에서 시스템 전체 열부하인 45 W를 냉각하기 위해 CRYOMECH 사의 AL630 모델을 선정하였고 Fig. 6은 선정한 냉동기의 저온부 온도에 따른 냉각 성능 곡선을 나타낸다 [6].

기체 헬륨 순환 시스템을 냉각하기 위해 냉동기 저온부의 온도는 18 K으로 가정한 응축기 입구의 온도보다 낮아야 하며, 그 때의 냉각 가능 용량은 시스템의 전체 열 부하인 45 W를 충분히 냉각할 수 있기에 선정된 극저온 냉동기는 기체 헬륨 순환 시스템에 적절한 것으로 판단하였다.

2.5. 기체 헬륨 순환 시스템 공정해석 기본 모델

블로워의 회전속도에 따라 시스템의 운전 특성인 필요 유량, 차압 특성, 블로워의 손실, 냉동기의 냉각 성능이 변화할 수 있다. 따라서, 기체 헬륨 순환 시스템의 열수력학적 특성 해석을 위해 공정 해석 프로그램인 HYSYS를 사용하였으며, 유량에 따른 블로워의 손실 등 여러 열 부하에 의한 응축기 입출구의 헬륨 온도를 분석하였다. Fig. 7은 기체 헬륨 순환 시스템의 구성도이다.

앞서 도출한 열관류율과 재응축에 요구되는 응축 배관의 길이를 응축기의 특성으로서 적용하였고 시스템의 열 손실을 고려하기 위해 5 m로 가정한 시스템의 전체 배관 길이, 전도 및 복사열 침입은 파이프의 열 손실로서 고려하였다. 또한, 블로워의 동적 손실은 RPM별 유량에 따른 성능 곡선을 Blower의 performance curve에 적용하고 정적 손실은 블로워 입구 측의 파이프 열 손실로 가정함으로 시스템 기본 모델을 구성하였다.

2.6. 응축 배관의 구성에 따른 특성 비교

설계된 응축기는 열전달 관계식을 통해 직선 길이를 도출한 것이므로 실제 탱크 내의 응축을 위한 배관으로서 구성하기에는 적합하지 않다. 따라서 꼬인 형태의 응축기와 병렬형 응축기를 가정하여 응축 배관의 구성에 따른 시스템의

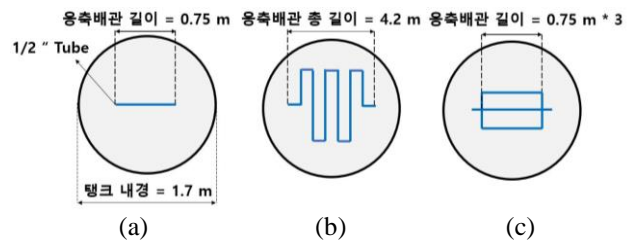


Fig. 8. Schematic diagram of condenser type (a) single condenser, (b) twisted condenser, (c) parallel condenser.

특성 변화를 비교하였다.

꼬인 형태의 응축기는 ZBO 저장 탱크의 외경인 1.7 m를 고려하여 약 4.2 m의 길이를 갖도록 가정하였고 응축 길이가 커짐에 따라, 열 관류율은 작아지고 압력 수두는 커진다.

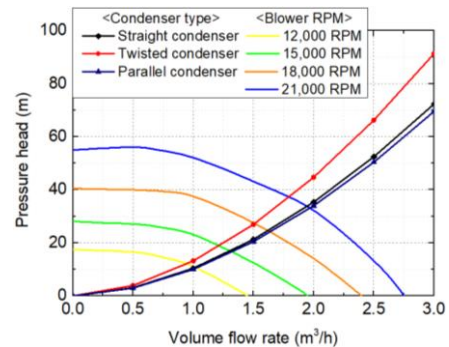


Fig. 9. Blower performance curve by condenser type.

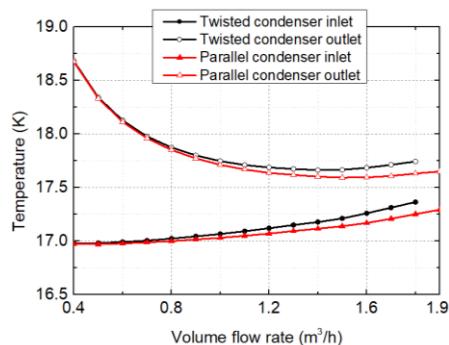


Fig. 10. Condenser temperature by volume flow rate.

병렬형 응축기는 기존의 단일 패스 배관에서 3중 병렬 배관으로 변경하고 길이는 동일하되 배관을 흐르는 유량은 3등분으로 분할되어 흐르는 것으로 가정하였다. 응축기를 흐르는 유량이 감소함에 따라 필요 응축 길이는 감소하며 압력 수두는 감소한다.

병렬형 응축기를 적용할 경우, 시스템 전체 압력 수두가 감소하였기 때문에 블로워의 운전 조건 관점에서 유리하다. 하지만 배관의 분할이 너무 많아질 경우 흐르는 유량이 감소함에 따라 열전달 특성이 저하된다. Fig. 8은 응축 배관 구성의 개략도를 나타내며, Fig. 9는 응축 배관의 직경으로 선정된 1/2inch tube 기준 응축 배관의 구성에 따른 블로워의 운전 성능을 나타낸다.

블로워 성능 곡선을 만족하도록 유량에 따라 회전수를 변화시키며 각 응축기 별 입구와 출구의 온도 변화를 확인하였다. Fig. 10은 유량에 따른 응축기 입구와 출구의 온도 그래프이다.

유량이 증가함에 따라 입출구의 온도 차이는 감소하지만, 요구되는 블로워 회전수는 증가하여 시스템의 전체 열 손실이 증가하게 되어 응축기의 평균 온도는 증가한다. 응축기의 구성을 달리 하였음에도 시스템 전체 압력 수두에는 큰 차이가 없다. 이는, 시스템 전체 압력 수두에 RSC40T 열교환기의 차압이 지배적이기 때문이다. 따라서, 응축기 구성에 따른 시스템의 특성 차이를 면밀하게 검토하기 위해서는 차압 특성이 우수한 열교환기 모델을 사용하여야 한다.

결과적으로, 병렬형 응축기를 적용할 경우 시스템 전체 압력 수두가 감소하여 블로워의 운전 속도를 낮게 함에 장점이 있고 꼬인 형태의 응축기를 적용할 경우 전열 면적이 넓어짐에 있어 열전달 특성은 좋아질 수 있으나 길이가 길어짐에 따라 압력강하가 증가하고 시스템의 압력 수두가 커지면서 블로워의 동적 손실이 증가하는 특징이 있다.

시스템의 전체 압력 수두에서 열교환기의 차압 특성이 시스템에 지배적이라 응축기의 길이가 길어짐에 따라 발생하는 압력 수두가 시스템 전체에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 열전달 관점에서 전열 면적을 크게 가져가는 것이 좋다.

시스템 전체의 열손실인 45 W에 비하여 냉동기의 냉각 용량이 더 클 경우, 시스템의 과냉 및 ZBO 용기의 압력이 낮아질 가능성이 있다. 따라서 본 해석 모델의 응축기 입출구에서의 헬륨의 온도에 따른 수소의 과냉 특성 결과는 향후, 과냉 방지를 위한 히터 제어 등에 활용될 수 있을 것이다.

3. 결론

본 연구에서는 7 m³ ZBO 액체 수소 저장 탱크의 BOG를 응축하기 위한 기체 헬륨 순환 시스템의 응축기를 설계하고

상용 공정 해석 프로그램인 HYSYS를 이용하여 블로워의 운전 조건에 따른 열수력학적 해석을 수행하였다.

단일 유로의 응축기를 가정하여 액체 수소 저장 탱크에서 발생하는 BOG 재응축에 필요한 응축 길이를 도출하고, 시스템의 차압 특성을 고려하여 열교환기, 블로워 등의 주요 컴포넌트를 선정하였다. 그에 따른 시스템 전체 열 부하를 도출하고 약 45 W의 열 부하를 냉각하는 냉동기 모델을 선정함으로써 기체 헬륨 순환 시스템을 설계하였으며, 이 때의 시스템 필요 유량은 약 4.5 g/s이다.

운전조건의 변화에 따른 해석을 수행하기 위해 공정 해석 프로그램을 사용하여 기체 헬륨 순환 시스템을 모사하였다.

실제 탱크 내의 배치를 고려하여 꼬인 형태의 응축기와 병렬형 응축기를 구성하고 시스템 특성 변화를 확인한 결과, 블로워의 운전 조건에 따른 응축기의 압력 수두는 시스템 전체 압력 수두에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 전열 면적을 넓게 하여 열전달 특성을 좋게 가져가는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

본 연구는 향후 연구될 대용량의 ZBO 저장 탱크 냉각을 위한 연구 및 액체 수소의 과냉 방지를 위한 히터 제어 연구 등에 기여할 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials (grant number : NK243B).

REFERENCES

- [1] Hyungna Oh, Inkee Hong, and Ilyoung Oh, "South Korea's 2050 Carbon Neutrality Policy," *East Asian Policy*, vol. 13, no. 01, pp. 33-46, 2021.
- [2] D. Deserranno, M. Zagarola, X. Li, and S. Mustafi, "Optimization of a Brayton cryocooler for ZBO liquid hydrogen storage in space," *Cryogenics*, vol. 64, pp. 172-181, 2014.
- [3] S. K. Kochunni and K. Chowdhury, "LNG boil-off gas reliquefaction by Brayton refrigeration system - Part 1: Exergy analysis and design of the basic configuration," *Energy*, vol. 176, pp. 753-764, 2019.
- [4] Yunus A. Cengel and J. Ghajar Afshin, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 6th ed. New York, NY: McGraw-Hill Professional, pp. 438-602, 2021.
- [5] H. Park, et al., "Cryogenic cooling system for 5 kA, 200 μH class HTS DC reactor," *Phys. Procedia*, vol. 65, pp. 282-285, 2015.
- [6] The CryoFan range. Available online : <https://5.imimg.com/data5/CC/LM/MY-3985500/closed-loop-helium-gas-cooling-systems.pdf> (accessed on 3 Nov 2023).
- [7] C. Wang, T. Hanrahan, and J. Cosco, "A Large Single-Stage GM Cryocooler for Operating Temperatures of 13-30K," *Cryomech. Inc.* Syracuse, NY 13211, pp. 223-229, 2018.