

Vacuum system design of a 10 ton/day class air liquefaction cold box for liquid air energy storage

Sehwan In, Juwon Kim, Junyoung Park, Seong-Je Park, Jiho Park, Junseok Ko, Hankil Yeom,
Hyobong Kim, Sangyoon Chu, Jongwoo Kim, and Yong-Ju Hong*

Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Korea

(Received 11 November 2022; revised or reviewed 9 December 2022; accepted 10 December 2022)

Abstract

A vacuum system is designed for thermal insulation of a 10 ton/day class air liquefaction cold box for liquid air energy storage. The vacuum system is composed of a turbomolecular pump, a backing pump and vacuum piping for the vacuum pumps. The turbomolecular pump is in combination with the backing pump for pumping capacity. The vacuum piping is designed with system installation conditions, such as distance from the cold box, connections to vacuum pumps and installation space. The capacity of the vacuum pump combination, namely pumping speed, is determined by analysis of the vacuum system, and pump-down time to 1×10^{-5} mbar is estimated. Vacuum piping conductance, system pumping speed and outgassing rate are calculated for the pump-down time with the ultimate pumping speed range of the vacuum pump combination of 1400 – 2300 l/s. Although the pump-down time gets shorter by larger capacity vacuum pumps, it mainly depends on target vacuum degree and outgassing rate in the cold box. The pump-down time is estimated as 3 – 6 hours appropriate for cold box operation for the pumping speed range. Considering the outgassing rate has uncertainty, the vacuum pump combination with pumping speed of 1900 l/s is chosen for the vacuum system, which is middle value of the pumping speed range.

Keywords: vacuum system, vacuum pump capacity, pump-down time, cold box, liquid air energy storage

1. 서 론

지구 온난화를 유발하는 온실가스 감축을 위해서 전세계적으로 석유, 석탄, 천연가스로부터 풍력, 태양광 등과 같은 재생에너지로의 에너지 전환이 빠르게 진행되고 있다. 유럽의 경우 이미 전력 생산의 1/3이 재생에너지에 의해 이루어지고 있다. 그러나 재생에너지는 시간과 날씨에 따라서 생산량이 변하기 때문에 재생에너지의 비중이 증가할수록 안정적인 전력공급을 위해서는 대용량 에너지저장이 필수적이다. 이를 위해 대용량 에너지저장을 위한 다양한 에너지저장 기술이 연구되고 있다. 그 중에서 액체공기 에너지저장 시스템은 재생에너지 또는 잉여전력을 활용하여 공기를 액화하여 저장하였다가 전력이 필요할 때 액체공기를 기화 및 발전하여 전력을 공급하는 에너지저장 시스템이다. 액체공기 에너지저장 시스템은 공기를 에너지 저장매체로 활용하기 때문에 안전하며 친환경적이다. 또한 대용량화가 용이하고 에너지 밀도가 높으며, 양수발전이나 압축공기 에너지저장과는 달리 설치지역의 제한이 없다는 장점이 있다. 그리고 발전 과정에서 액체공기가 기화할 때 부가적으로 발생하는 냉열은 냉동, 냉방, 공조 등에 추가 활용 가능하다 [1-3].

액체공기 에너지저장 시스템은 공기를 80 K 부근의 극저온으로 액화하여 저장하고 이를 활용하여 발전하기 때문에, 상온으로부터의 열유입을 줄이는 것이 시스템 효율 향상을 위해서 중요하다. 특히 공기액화 공정이 상시 운전이 아닌 전력을 저장하는 기간에만 운전되기 때문에, 적절한

단열이 제공되지 않으면 외부 열유입에 의해서 콜드박스 내부의 온도가 올라가고 이는 액화공정의 기동시간에 영향을 준다. 따라서 외부 열유입을 최소화할 수 있는 콜드박스 단열 설계가 필요하다. 액체질소(77 K) 온도에서 사용 가능한 단열방법으로는 발포 단열재 단열, 진공 또는 상압의 필라이트 단열, 진공단열, MLI(Multi-Layer Insulation) 진공단열 등이 있다 [4]. 그 중에서 가장 단열 성능이 뛰어난 것은 MLI 진공단열로, 본 연구의 10 ton/day급 공기액화 콜드박스는 MLI 진공단열을 채택하였다. MLI 진공단열은 진공도에 따라서 유효 열전도 계수가 600 배 이상 차이가 나며, 안정된 성능을 나타내기 위해서는 10^{-4} mbar 이하의 진공도가 요구된다 [5]. 따라서 이를 위해서는 콜드박스를 고진공으로 유지하기 위한 진공시스템이 필요하다.

본 연구에서는 액체공기 에너지저장 시스템을 위한 10 ton/day급 공기액화 콜드박스의 진공시스템 설계를 수행하였다. 진공시스템을 위한 진공펌프와 진공배관을 구성하였고, 진공배기 시간을 예측하고 적절한 진공펌프 용량을 선정하기 위해서 진공시스템 해석을 수행하였다. 진공펌프 용량을 변화시켜 가면서 진공시스템 배기량 및 진공배기 시간을 계산하였고 이를 토대로 적절한 진공펌프 용량을 선정하였다.

2. 진공시스템 구성 및 해석 방법

공기액화용 콜드박스는 진공챔버와 진공챔버 내부의 극저온 열교환기, 상분리장치, 극저온 팽창기, 극저온 밸브 및

* Corresponding author: yjhong@kimm.re.kr

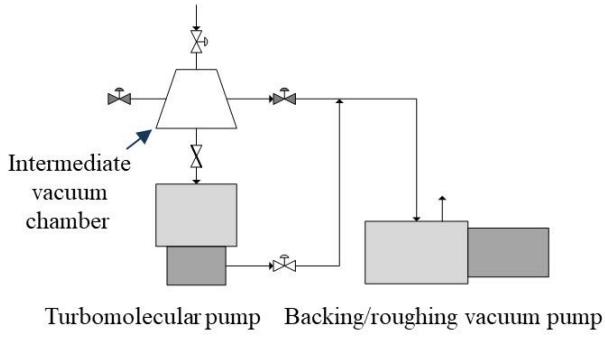


Fig. 1. Vacuum pump system configuration consisting of a turbomolecular pump and a backing/roughing pump.

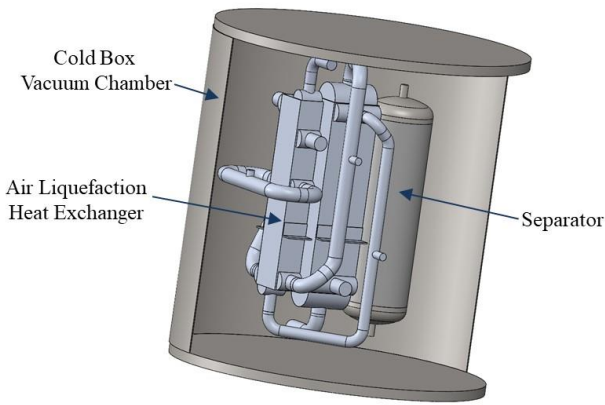


Fig. 2. Simplified geometric model of a cold box for vacuum calculation.

배관 등으로 구성된다. 진공시스템은 콜드박스 진공챔버와 연결되어 콜드박스의 진공을 생성하고 유지한다. 진공시스템은 진공배기를 위한 진공펌프와 진공배관을 구성된다. MLI 진공단열을 위해서는 진공챔버에서 10^{-4} mbar 이하의 진공도를 유지해야 하기 때문에 10^{-4} mbar 이하의 진공도를 생성할 수 있는 고진공 펌프가 필요하다. 10^{-4} mbar 이하의 고진공을 생성할 수 있는 진공펌프로는 터보 분자 펌프(Turbomolecular pump), 크라이오 펌프(Cryo pump), 이온 펌프(Ion pump), 확산 펌프(Diffusion pump) 등이 있다 [4]. 큰 배기용량, 운전 편의성 등을 고려하여 현재의 시스템에서는 터보 분자 펌프를 진공펌프로 선정하였다. 그림 1은 터보 분자 펌프로 구성된 진공배기 시스템의 개략도를 나타낸다. 그림 1에서 보조 진공펌프(Backing/roughing vacuum pump)는 대기압에서 터보 분자 펌프가 가동 가능한 진공도까지는 단독으로 작동하다가 터보 분자 펌프가 가동되면 터보 분자 펌프의 배기를 보조하는 역할을 한다. 그리고 콜드박스과 터보 분자 펌프 사이에는 중간의 버퍼 역할을 수행할 수 있도록 진공챔버(Intermediate vacuum chamber)를 두었다. 표 1은 진공시스템의 배관 구성을 나타낸다. 터보 분자 펌프와 보조 진공펌프에 연결되는 진공배관은 진공펌프의 입구/출구 플랜지와 진공펌프의 설치 공간을 고려하여 직경과 길이를 결정하였다. 또한 진공시스템이 콜드박스 진공챔버에 인접하여(2 m 이내) 설치되도록 진공배기 시스템과 콜드박스 진공챔버 사이의 진공배관 길이를 결정하였다. 연결 진공배관의 직경은 동급의

TABLE I. VACUUM PIPING SPECIFICATION

No	Type	Inner Diameter (mm)	Length (mm)	Pieces	Connection for
1	Pipe	102	2500	1	Cold box
2	Chamber	102/261	200	1	Turbomolecular pump
3	Valve	102	-	1	Turbomolecular pump
4	Pipe	40.5	1000	1	Backing pump
5	Elbow	40.5	-	3	Backing pump
6	Valve	40.5	-	1	Backing pump

TABLE II. COLD BOX SPECIFICATION

No	Category	Volume(m ³) or Area(m ²)	Note
1	Cold box evacuation volume	11.302	-
2	Cold box inner surface area	29.123	STS304
3	Separator outer surface area	3.880	STS304
4	Heat exchanger outer surface area	9.013	A93003

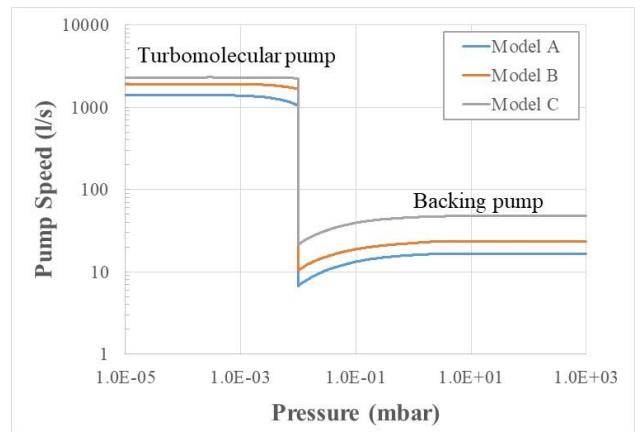


Fig. 3. Pumping speed of turbomolecular pump and baking pump combinations according to pressure

콜드박스 진공챔버의 연결 플랜지 직경을 참조하고 배관 설치를 고려하여 결정하였다.

진공시스템의 진공배기 시간 예측과 적절한 진공펌프 용량을 선정하기 위해서 진공시스템 해석을 수행하였다. 콜드박스 진공챔버 내의 진공도는 식(1)과 식(2)에 의해서 결정된다[4].

$$\frac{dP}{dt} = \frac{Q_i}{V} - \frac{S_s P}{V} \tag{1}$$

$$\frac{1}{S_s} = \frac{1}{S_p} + \frac{1}{C_0} \tag{2}$$

여기서 P는 콜드박스 진공챔버의 내부압력, t는 진공배기 시간, Q_i는 콜드박스 내부에 흡착된 기체의 기체방출량(Outgassing rate), V는 콜드박스의 진공배기 부피, S_s는 진공시스템의 배기속도, S_p는 진공펌프의 배기속도, C₀는 진공펌프에서 콜드박스까지의 배관 컨덕턴스(Conductance)를 나타낸다.

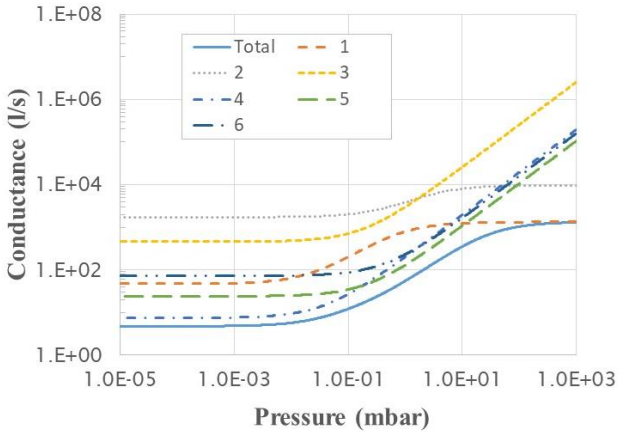


Fig. 4. Vacuum piping conductance according to pressure.

배관의 컨덕턴스는 배관의 형상과 진공도에 따라서 결정된다 [6-9]. 진공시스템 해석에는 상용소프트웨어 VacTran [10]을 사용하였다. 그림 2는 진공시스템 해석을 위한 콜드박스의 형상모델을 나타내고 표 2는 콜드박스의 사양을 나타낸다. 진공시스템 해석에서는 콜드박스에 들어가는 내부 기자재 중 가장 부피와 표면적이 넓은 공기액화용 열교환기와 상분리장치만을 고려하였다. 적절한 진공펌프 용량을 선정하기 위해서 상용 진공펌프의 용량을 참고하여 배기속도를 변화시켜 가면서 해석을 수행하였다. 해석에 필요한 진공펌프의 배기속도 성능곡선은 해당하는 상용제품의 성능곡선을 활용하였다. 그림 3은 해석에 사용된 진공펌프의 성능곡선을 나타낸다. 터보 분자 펌프는 10^{-2} mbar 이하의 압력에서 작동한다고 가정하였다. 그래서 그림 3의 압력 10^{-2} mbar 이상은 보조 진공펌프의 성능곡선을 나타내고 10^{-2} mbar 이하는 터보 분자 펌프와 보조 진공펌프가 같이 운전될 때의 성능곡선을 나타낸다. 보조 진공펌프의 용량은 터보 분자 펌프의 용량에 맞춰서 결정되기 때문에 터보 분자 펌프와 보조 진공펌프는 하나의 조합을 이룬다. 터보 분자 펌프의 최종 배기속도를 기준으로 1400 l/s(모델A 조합), 1900 l/s(모델B 조합), 2300 l/s(모델C 조합)으로 진공펌프의 배기속도를 변경하면서 해석을 수행하였다.

3. 진공시스템 해석결과

먼저 진공시스템 해석에 필요한 배관 컨덕턴스를 계산하였다. 그림 4는 표 1에 따라 구성된 진공시스템의 각 부품 및 전체 배관의 압력에 따른 배관 컨덕턴스를 나타낸다. 배관 컨덕턴스는 단위 압력차에서 배관을 통해 배기할 수 있는 진공 배기량을 나타내며, 배관 컨덕턴스의 값이 클수록 진공배기가 원활하게 이루어진다. 현재의 시스템에서 배관 컨덕턴스는 압력에 따라 1,300 l/s에서 점차 감소하여 10^{-3} mbar에서 5 l/s로 수렴하였다. 그림 5는 배관 컨덕턴스를 고려한 진공시스템의 배기속도를 원래의 진공펌프의 배기속도와 비교한 그래프이다. 압력이 낮아질수록 배관 컨덕턴스가 감소하기 때문에 두 배기속도의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7은 진공펌프 조합에 따른 진공시스템의 배기속도와 배기량을 나타낸다. 보조

진공펌프가 작동하는 10^{-2} mbar 이상의 영역에서는 펌프 조합에 따른 배기속도와 배기량의 차이가 뚜렷이 나타나는 반면 터보 분자 펌프가 작동하는 영역에서는 낮은 배관 컨덕턴스의 영향으로 펌프 조합에 따른 차이가 크지 않았다. 배관 컨덕턴스 외에 진공배기 시간에 큰 영향을 미치는 요소는 진공챔버 내벽 또는 진공챔버 내 기자재 표면에서 발생하는 기체방출(Outgassing)이다. 기체방출은 물체가 진공에 노출되었을 때 물체의 표면 또는 내부에 흡착되었던 기체가 방출되는 현상이다. 기체방출률은 재료의 종류, 표면상태, 온도, 대기에 노출된 정도 등에 따라 달라지는데 기체방출의 초기에는 주로 표면에 흡착되었던 수증기가 방출되었다가

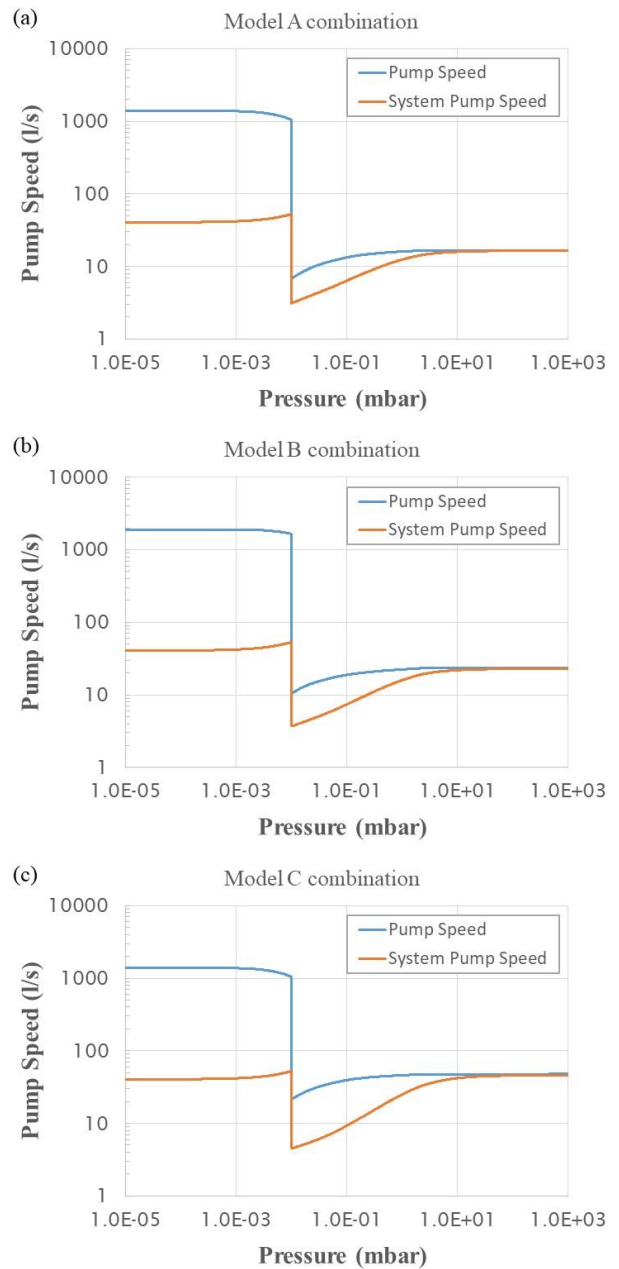


Fig. 5. Comparison of pump speed given by vacuum pump itself with system pump speed reflecting piping resistance according to pressure: (a) Model A pump combination, (b) Model B pump combination, (c) Model C pump combination.

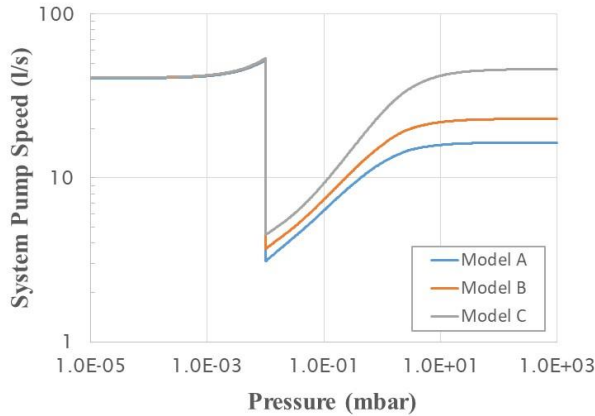


Fig. 6. System pump speed of the vacuum system with pressure according to pump combinations.

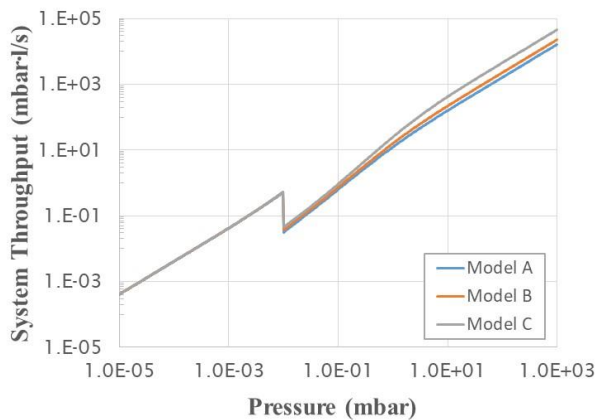


Fig. 7. System throughput of the vacuum system with pressure according to pump combinations.

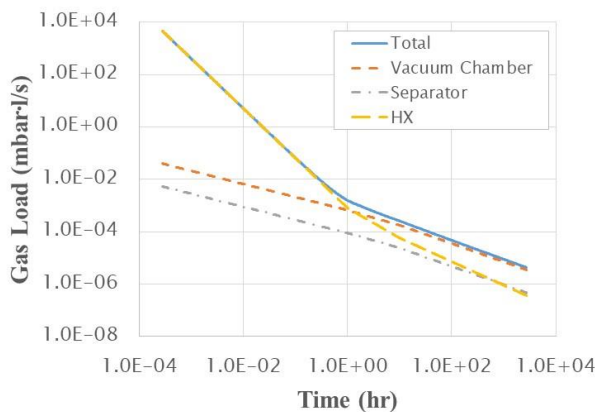


Fig. 8. Gas load by outgassing for each component and entire cold box.

점차 감소하고 이후 물체 내부로부터의 기체방출이 일어난다. 현재의 해석에서 콜드박스 진공챔버와 기자재 표면에서의 기체방출률은 스테인리스 스틸과 알루미늄에 대한 문헌데이터 [11]를 활용하였다. 표 3은 문헌데이터의 스테인리스 스틸과 알루미늄에 대한 단위면적 당 기체방출률을 나타낸다. 표에서 q_1 과 q_{10} 은 진공노출 1시간과 10시간 후의 단위면적 당 기체방출률을 나타내고, α_1 과 α_{10} 은 이 때 시간과의 로그-로그 그래프에서 기체방출률의 감소 기울기를 나타낸다. 본

TABLE III
OUTGASSING RATE.

Material	q_1 (10^{-7} Pa- m/s)	α_1	q_{10} (10^{-7} Pa- m/s)	α_{10}
Aluminum (3h in air)	88.6	1.9	6.33	0.9
Stainless steel NS22S (mechanically polished)	22.8	0.5	6.1	0.7

TABLE IV
PUMP DOWN TIME.

Case	(Unit: hour)		
	Model A	Model B	Model C
Without gas load and pipe resistance	2.57	1.80	0.88
Without gas load and with pipe resistance	4.44	3.67	2.75
With gas load and pipe resistance	5.31	5.26	5.23

해석에서는 문헌데이터를 곡선 맞춤 하여 사용하였다.

그림 8은 콜드박스과 기자재에서의 기체방출에 의한 진공시스템의 기체부하(Gas load)를 나타낸다. 진공배기 초기에는 열교환기의 기체방출이 지배적이고 이후에는 표면적이 가장 넓은 진공챔버가 지배적인 영향을 나타낸다. 초기에 표면적이 넓지 않음에도 열교환기의 기체방출이 지배적인 것은 표 3의 단위면적당 기체방출률과 감소 기울기로부터 알 수 있듯이, 진공배기 초기에 열교환기를 구성하는 알루미늄의 단위면적당 기체방출률이 매우 크기 때문이다.

진공시스템의 배관 컨덕턴스와 기체방출을 고려하여 진공펌프 조합에 따른 진공배기 시간을 계산하였다. 표 4은 기체부하 및 배관 컨덕턴스를 고려하였을 때와 그렇지 않을 때에 콜드박스가 1×10^{-5} mbar에 도달하기까지 걸리는 시간을 비교한 것이다. 또한 그림 9는 시간에 따른 콜드박스 진공도의 변화를 진공펌프 조합에 따라서 보여준다. 배관 컨덕턴스 유무와 진공펌프 조합의 배기속도 차이가 진공배기 시간에 큰 영향을 나타내었다. 또한 기체방출을 고려한 경우에도 상당히 낮은 진공도까지는 진공펌프의 배기량이 기체방출량에 비해 월등히 크기 때문에 기체방출을 고려하지 않은 경우와 거의 유사한 결과를 나타내었다. 다만 기체방출을 고려한 경우에는 목표 진공도 1×10^{-5} mbar까지 도달하는데 걸리는 시간이 진공펌프 조합에 따라서 큰 차이가 없었다. 이것은 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 진공시스템의 배기량이 압력에 따라서 점차 감소하여 1×10^{-5} mbar 부근에서 기체방출량과 비슷한 수준에 도달하게 되기 때문이다. 또한 이 영역에서는 진공배관의 낮은 컨덕턴스 때문에 진공펌프 조합에 따른 시스템 배기량의 차이가 크지 않다. 그러나 목표 진공도보다 약간 높은 2×10^{-5} mbar까지 도달하는데 걸리는 시간은 진공펌프 조합에 따라서 각각 4.38 시간(모델A 조합), 3.62(모델B 조합) 시간, 2.70 시간(모델C 조합)으로 큰 차이를 나타내었다. 따라서 진공펌프 조합의 진공 배기속도가 클수록 진공배기 시간이 단축될 수 있지만, 목표 진공도와 기체방출량의 크기에 따라서 진공배기 시간이 결정됨을 알 수

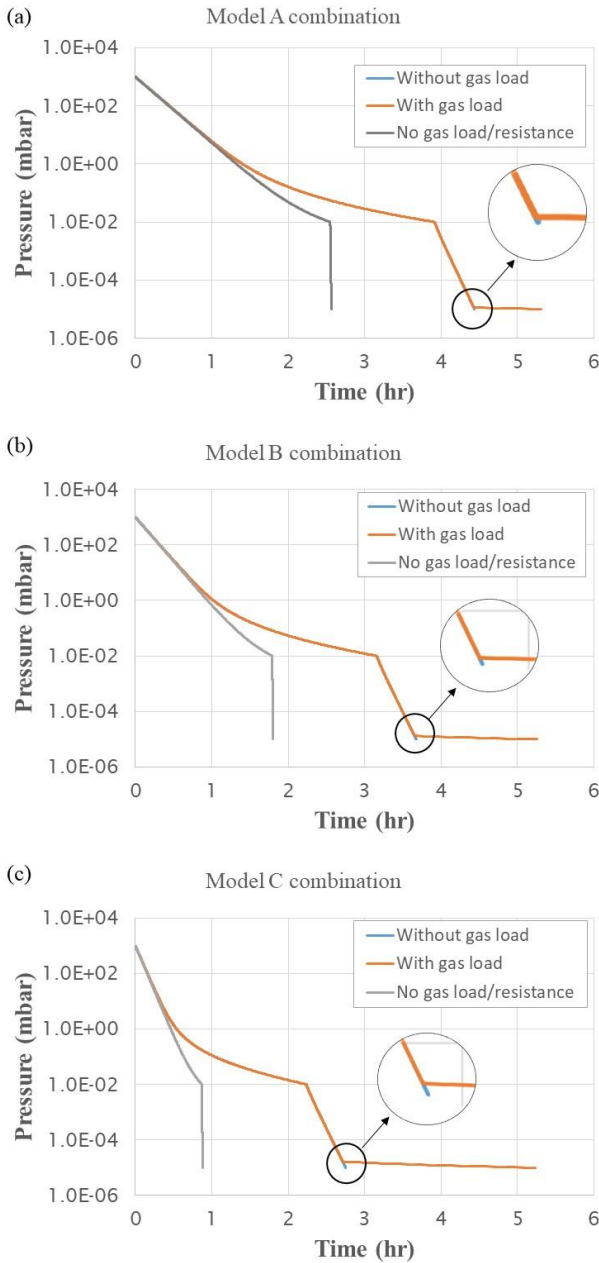


Fig. 9. Pressure variation in the cold box with time by vacuum pump combinations according to conditions of outgassing and piping resistance: (a) Model A pump combination, (b) Model B pump combination, (c) Model C pump combination.

있다. 기체방출량의 영향을 살펴보기 위해서 기체방출량에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 표 5는 기체방출량이 그림 8의 조건일 때와 2배, 5배가 되었을 때의 해석결과를 비교한 것이다. 각 기체방출량 조건에 대해서 기체방출량의 영향이 커지기 전의 진공도와 해당 진공배기 시간, 그리고 현재의 목표 진공도인 1×10^{-5} mbar에 도달하는데 필요한 진공배기 시간을 진공펌프 조합에 따라서 계산하였다. 각 기체방출량 조건에 대해서 목표 진공도에 도달하기 위한 진공배기 시간과 기체방출량의 영향이 커지기 전까지의 진공배기 시간은 앞선 결과와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉 기체방출량의 영향이 커지기 전까지는 진공펌프 조합의 진공 배기량이 커질수록

TABLE V.
PUMP DOWN TIME AND VACUUM PRESSURE ACCORDING TO
OUTGASSING RATES.

(Unit: hour; mbar)

Outgassing rate ratio	Category	Model A	Model B	Model C
1	Vacuum pressure	1.14×10^{-5}	1.30×10^{-5}	1.64×10^{-5}
	Pump-down time	4.44	3.68	2.73
	Vacuum pressure	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
	Pump-down time	5.31	5.26	5.23
2	Vacuum pressure	2.26×10^{-5}	2.64×10^{-5}	3.32×10^{-5}
	Pump-down time	4.47	3.62	2.68
	Vacuum pressure	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
	Pump-down time	13.81	13.67	13.60
5	Vacuum pressure	5.77×10^{-5}	6.60×10^{-5}	8.46×10^{-5}
	Pump-down time	4.34	3.60	2.60
	Vacuum pressure	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
	Pump-down time	47.77	47.28	47.03

진공배기 시간이 크게 단축되었으나, 진공도가 더 낮아져서 기체방출량의 영향이 커지면 그 차이가 줄어들었다. 기체방출량의 영향을 살펴보면, 기체방출량이 커질수록 목표 진공도에 도달하는데 필요한 시간이 급격히 증가하였다. 이와 함께 기체방출량의 영향이 커지기 전의 진공도 값도 같이 증가하였다. 다만 진공배기 전에 콜드박스의 베이킹-아웃(bake-out) 과정을 통해서 이러한 기체방출량의 영향과 진공배기 시간은 크게 감소시킬 수 있다. 기체방출량의 불확실성에도 불구하고 진공배기에 앞서 콜드박스의 충분한 베이킹-아웃이 수행된다고 가정하면 해석결과로부터 현재의 진공시스템에서는 진공펌프 조합에 따라서 대략 3 - 6시간 정도 진공배기 시간이 소요될 것으로 예측된다. 이는 콜드박스의 운전을 고려할 때 적절한 수준이다. 다만 앞서 설명한 바와 같이 기체방출량은 재료의 조건 그리고 베이킹-아웃 정도에 따라서 불확실성이 있기 때문에 현재의 진공시스템에서는 중간 정도의 배기속도를 갖는 모델 B 진공펌프 조합을 선택하였다.

4. 결론

액체공기 에너지저장 시스템을 위한 10 ton/day급 공기액화 콜드박스의 진공시스템 설계를 수행하였다. 설치조건에 따라 진공배관을 구성하였고, 진공시스템 해석을 통해서 진공펌프 용량을 결정하고 진공배기 시간을 예측하였다. 또한 콜드박스 내부 표면에서의 기체방출량에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 진공펌프의 배기속도가 클수록 진공배기 시간이 단축될 가능성이 높지만, 최종적으로 진공배기 시간은 목표 진공도와 콜드박스 내부의 기체방출량에 따라서 결정되었다. 다만 기체방출량은 재료의 종류, 표면상태, 온도, 대기에 노출된 정도, 베이킹-아웃 정도 등에 따라서 불확실성이 존재한다. 진공배기에 앞서

콜드박스의 충분한 베이크 아웃이 수행된다고 가정하면 현재의 진공시스템에서는 최종 배기속도 1400 l/s, 1900 l/s, 2300 l/s의 진공펌프 조합에 대해서 콜드박스가 1×10^{-5} mbar까지 도달하는데 대략 3 - 6시간이 소요될 것으로 예측되었다. 이는 콜드박스 운전을 위해 적정한 수준이다. 다만 기체방출량의 불확실성이 있기 때문에 현재의 시스템에서는 중간 정도인 최종 배기속도 1900 l/s를 나타내는 진공펌프 조합을 시스템 진공펌프로 선정하였다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a grant of the Basic Research Program funded by the Korea Institute of Machinery and Materials (grant number : NK237F).

REFERENCES

- [1] G. Comodi, F. Carducci, J. Y. Sze, N. Balamurugan, and A. Romagnoli, "Storing energy for cooling demand management in tropical climates: A techno-economic comparison between different energy storage technologies," *Energy*, vol. 121, pp. 676-694, 2017.
- [2] C. Damak, D. Leducq, H. M. Hoang, D. Negro, and A. Delahaye, "Liquid Air Energy Storage (LAES) as a large-scale storage technology for renewable energy integration - A review of investigation studies and near perspectives of LAES," *Int. J. Refrig.*, vol. 110, pp. 208-218, 2020.
- [3] A. Vecchi, Y. Li, Y. Ding, P. Mancarella, and A. Sciacovelli, "Liquid air energy storage (LAES): A review on technology state-of-the-art, integration pathways and future perspectives," *Adv. Appl. Energy*, vol. 3, pp. 100047, 2021.
- [4] R. F. Barron, "Cryogenic systems," *Oxford University Press*, pp. 356-468, 1985.
- [5] J. E. Fesmire, "Standardization in cryogenic insulation systems testing and performance data," *Physics Proc*, vol. 67, pp. 1089-1097, 2015.
- [6] A. Roth, "Vacuum technology," *North-Holland*, 1990.
- [7] D. J. Santeler, "New concepts in molecular gas flow," *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 4, no. 3, pp. 338-343, 1998.
- [8] A. Berman, "Vacuum engineering calculations, formulas, and solved exercises," *Academic Press*, 2012.
- [9] D. J. Santeler, "Exit loss in viscous tube flow," *J. Vac. Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 4, no. 3, pp. 348-352, 1998.
- [10] VacTran, PEC, www.vactran.com
- [11] A. Schram, "La Desorption Sous Vide," *Le Vide*, no 103, pp. 55-68, 1963.

[1] G. Comodi, F. Carducci, J. Y. Sze, N. Balamurugan, and A. Romagnoli, "Storing energy for cooling demand management in