

2단 GM냉동기를 이용한 수소액화 시스템의 운전조건

박대종, 장호명, 강병하

*홍익대학교 대학원, **홍익대학교 기계공학과, ***KIST 열유동제어 연구센터

Operating Conditions of Hydrogen Liquefaction Systems Using Two-Stage GM Refrigerator

D. J. Park, H. M. Chang, B. H. Kang

*Hong Ik University, Graduate School, **Hong Ik University, Department of Mechanic

***Thermal/Flow Control Research Center, KIST

hmchang@wow.hongik.ac.kr

Abstract Thermodynamic cycle analysis has been performed to maximize the liquid amount for two hydrogen liquefaction systems using two-stage GM(Gifford-McMahon) refrigerator. The optimal operating conditions have been analytically sought with real properties of normal hydrogen for the two-stage GM direct contact system and the two-stage GM precooled L-H (Linde-Hampson) system. In the precooled system, there existed optimal values for compressed mass flow and compressed pressure to maximize the liquefied mass, for a given heat exchanger effectiveness. It was recommended to use a cryocooler, which had a large precooling capacity between 70 and 100 K.

1. 서론

수소를 연료로 이용하기 위한 저장 방법중 무게나 체적당 저장에너지의 크기면에서 볼 때 극저온 액체수소가 가장 우수하다고 알려져 있다. [1] 수소를 액화하기 위한 가장 고전적인 형태의 액화방식으로는 캐스케이드(cascade) 액화시스템을 들 수 있으나 이 방식은 시스템이 복잡하고 시설 비용이 많이 들며 또한 액화효율이 낮아 상업용으로는 적절하지 못하였다. 20세기 중반에서 현재에 이르기까지 로켓이나 우주선의 연료용 수소액화기는 모두 Claude액화방식 [2] 을 사용하고 있다.

Claude시스템은 기체가 외부로 일을하며 팽창하는 왕복동식이나 터보식 팽창기(turbo expander)가 가장 중요한 부품이다. 극저온용 팽창기는 고도의 설계 및 제작기술이 요구되어 선진일부 국가에서만 그 기술을 보유하고 있는 실정이다. [3,4] 이러한 기술들의 국내 개발이 단기간에 이루어지기는 거의 불가능하므로, 국내에서 극저온 액체수소를 에너지로 사용하기 위해서는 극저

온용 팽창기를 사용하지 않는 다양한 수소액화 장치가 요구된다. 또한, 자동차의 연료로서 액체수소를 사용하기 위해서는 보다 폭넓은 장소에서 연료를 충전할 수 있어야 하므로, 지역적인 액화가 가능하고 운송에 의한 에너지 손실을 줄일 수 있는 소형의 수소액화기가 필요하다. [5]

소형 수소액화기를 만들 수 있는 방법으로는 기체상태인 수소를 액체수소보다 낮은 온도로 유지되는 냉동기와 직접 접촉시켜서 액화시키는 냉동기 직접액화방식 [6] 과 냉동기 예냉 L-H (Linde-Hampson) 액화방식을 들 수 있다. 국내서도 최근 이러한 수소액화 시스템에 대한 기초 연구가 수행되어 김승현등 [7,8] 은 냉동기 예냉 시스템에 대한 최적조건과 상용화된 GM(Gifford-McMahon) 1단 냉동기 모델에 대해 수소액화량 예측에 대한 연구를 수행하였다. 백중훈등 [9] 은 하나의 2단식 GM냉동기를 이용한 직접접촉 액화방식의 실험으로 수소액화에 성공한바 있다.

본 논문에서는 극저온 팽창기를 사용하지 않으며 수소액화가 가능한 상용 2단 GM냉동기를 이용한 액화시스템에 대해 열역학 해석을 수행하여, 최적의 운전조건을 도출하고, 냉동기별 성능을 비교, 분석하였다. 이를 위하여 CTI사의 1020CP와 10 CP를 모델로 최적의 운전 조건과 액화 가능한 수소 액화량을 계산하였다.

2. 해석모델

2.1 직접접촉 액화시스템

수소를 액화하는 가장 간단한 방법으로 냉동온도가 수소의 끓는 온도인 20 K 이하의 냉동기를 이용하여 Fig. 1.(a)에서와 같이 상온상압의 상태에서 기체상태의 수소를 냉동기에 직접 접촉시킴으로서 액화하는 방법이다. 2단(two-stage)냉동기의 각 단에서의 냉동용량들은 냉동기 1단과 2단 온도의 함수로 다음과 같이 표현되며

$$\dot{Q}_{2ref} = g(T_{PC1}, T_{PC2}) = \dot{m}_f(h_1 - h_2) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{1ref} = f(T_{PC1}, T_{PC2}) = \dot{m}_f(h_0 - h_1) \quad (2)$$

HX1, HX2의 열교환기 유용도는 엔탈피를 이용하여 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\epsilon_1 = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h(T_{PC2}, P_L)} \quad (3)$$

$$\epsilon_2 = \frac{h_0 - h_1}{h_0 - h(T_{PC1}, P_L)} \quad (4)$$

이 시스템에서 미지수는 각 단의 냉동기 온도, 냉동용량, 상태1의 온도, 수소의 질량유량 등으로 모두 6개이며, 6개의 식인 식 (1)-(4)를 연립하여 액화되는 수소의 질량유량을 구한다. [10]

2.2 예냉 L-H 액화시스템

2단(two-stage) 냉동기 예냉 L-H 액화시스템은 Fig. 1. (b)와 같은 구성으로, 1단 예냉 L-H 액화시스템과 유사한 구성이나 압축된 수소기체를 냉동기 1단 및 2단에서 예냉하여 JT밸브를 통해 팽창시키는 방식이다.

열교환기에 대한 에너지 균형식을 각 위치에서의 엔탈피로 표시해 보면 HX5과 HX4(냉동기)에 대해 각각,

$$h_1 - h_2 = (1 - y) \cdot (h_{11} - h_{10}) \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{1ref} = \dot{m}(h_2 - h_3) \quad (6)$$

와 같다. 여기에서 y 는 액화율이며, \dot{m} 은 압축되는 수소의 질량유량이다. JT밸브에서는 일과 열이 없다고 가정하므로

$$h_6 = h_7 \quad (7)$$

이 된다. 하단부의 플래시실에서 에너지 균형식을 적용하면 엔탈피와 액화유량(\dot{m}_f)은 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$y = \frac{(h_8 - h_6)}{(h_8 - h_f)} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}} \quad (8)$$

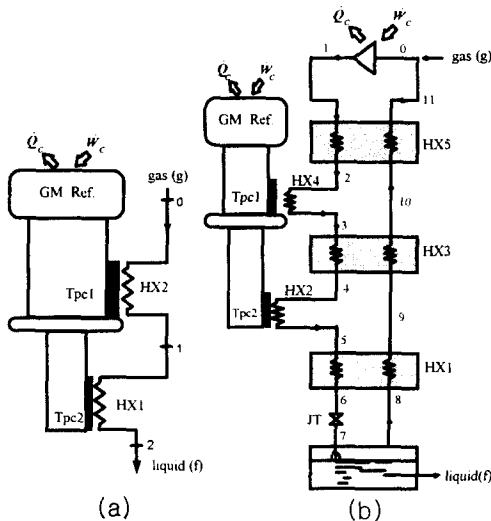


Fig. 1. Schematic diagram of hydrogen liquefaction system using GM refrigerator Two-stage GM direct contact system (b) Two-stage GM precooled L-H system.

극저온에서 유체의 비열은 온도에 따라 크게 변화하므로 엔탈피로 나타내어야 한다. 열교환기 유용도는 열교환기 HX5의 경우를 예로 들어보면, 유용도의 정의에 의해 고압측의 열용량이 저압측보다 클 때, 즉

$$h_1 - h(T_{10}, P_H) \geq (1 - y) \cdot [h(T_1, P_L) - h_{10}] \quad (9)$$

이면, HX5의 유용도는

$$\epsilon_5 = \frac{h_{11} - h_{10}}{h(T_1, P_L) - h_{10}} \quad (10)$$

$$\epsilon_5 = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h(T_{10}, P_H)} \quad (11)$$

으로 표현된다. 열교환기 HX4의 경우에는 냉동기와 접하고 있으므로 유용도에 대한 식은 식(3), (4)와 같고, 냉동기의 냉동용량은 식(1), (2)와 같 표현된다.

HX1, HX2 및 HX3의 해석은 HX5, HX4와는 방법으로한다. 이 시스템에서 미지수는 $T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{PC1}, T_{PC2}, \dot{Q}_{1ref}, \dot{Q}_{2ref}, y$ 들로 모두 14개이며, 열교환기 유용도식 5개, 에너지 균형식 7개, 냉동성능식 2개 등의 연립으로부터 구해지며, 각 상태량이 결정되면 식(8)로부터 액화량을 예측 할 수 있다. [10]

3. 결과 및 고찰

3.1 직접접촉 액화시스템

현재 일반적으로 상용화되고 있는 2단냉동기로는 CTI사의 1020CP, 1050CP, Cryomech GB07, GB37, APD사의 DE 208R, DE 208 있으나 대부분의 냉동기 제조사들이 냉동성능에 대한 자료로 77 K, 20 K 부근 온도에서의 냉동용량만을 제시하고 있어서 최적의 조건과 액화량 예측을 위한 냉동성능함수를 구할 수 없었다. 따라서 본 논문에서는 냉동성능함수를 구할 수 있는 CTI사의 1020CP와 1050CP를 모델로 하여 최적조건 그 조건에서의 최대 액화유량을 계산하였다. 모든 열역학 상태량은 미국 NIST에서 개발한 전산화된 열역학 상태량 계산 프로그램 [11] 을 이용하였으며, 계산에 사용된 수소의 물성은 n-수소(normal-hydrogen)에 대하여 계산하였다. 냉동기 단 및 2단의 냉동용량은 1단과 2단의 냉동온도의 함수로 표현되므로 냉동용량 Q_1, Q_2 를 T_1, T_2 의 함수로 나타낸다. [10]

2단냉동기를 이용한 직접접촉 액화방식은 냉동기 성능의 한계와 열교환기 유용도에 따라 최대의 액화유량을 얻을 수 있는 질량유량이 존재하게 된다. Fig. 2.는 계산된 CTI 1020CP 모델의 성능

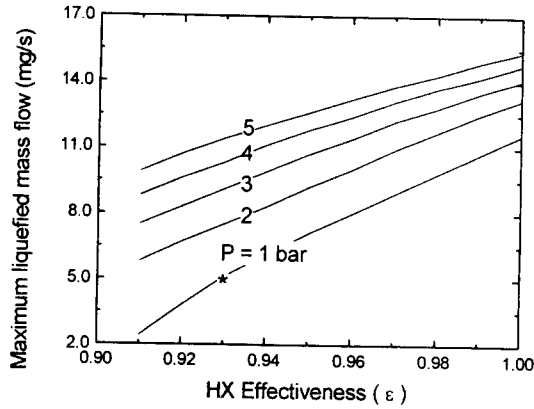


Fig. 2. Maximum liquefied mass flow vs HX effectiveness at 1020CP for various pressures in system of Fig. 1.(a) (★:In a good agreement with experimental study [9,10])

합수에 따라 열교환기의 유용도와 수소의 압력에 따른 최적질량유량을 나타낸다. 최적질량유량은 열교환기 유용도가 크고, 압력이 높을수록 증가함을 알 수 있다. 압력이 높을수록 최적질량유량이 증가하는 것은 압력이 증가할수록 수소의 포화온도가 증가하기 때문이다.

열교환기 유용도가 0.93일때 1기압에서 최대의 액화유량은 1020CP의 경우 5.1 mg/s, 1050 C 3.7 mg/s로 계산되었고 열교환기 유용도 1.0인 우 각각 11.6 mg/s와 11.4 mg/s로 계산되었 CTI사의 1020CP 모델의 계산 결과는 이전의 실험치와 유사한 결과이다. [9,10] 열교환기의 유용도가 증가할수록 1020CP와 1050CP 냉동기의 액화에 차이가 없는 것은 두 모델의 냉동용량이 1단이 77 K일 때 1020CP는 35 W, 1050CP는 65 W, 1050CP 모델이 크나 2단의 냉동용량은 20 K에 1020CP가 12 W, 1050 CP가 7 W로 1020CP서 열교환기 유용도가 낮은 경우, 즉 2단의 온도가 20 K 이하인 경우 직접접촉 액화방식에서는 2단의 냉동용량이 큰 냉동기가 유리한 것으로 나타났다.

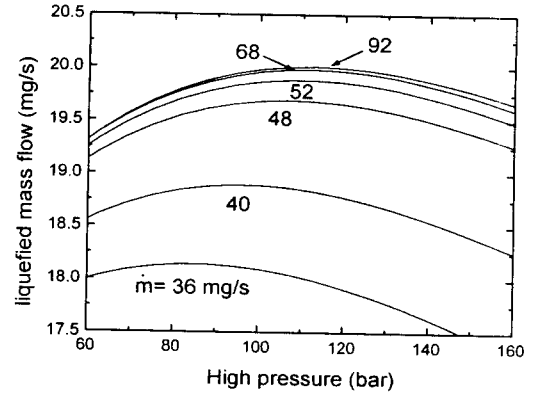
3.2 예냉 L-H액화시스템

2단냉동기 예냉 L-H액화시스템은 액화유량이 최대가 되는 최적의 압축압력과 최적의 압축유량이 존재함을 알 수 있다. 이러한 결과 역시 냉동기의 성능이 정해진 것에 따른 결과이다.

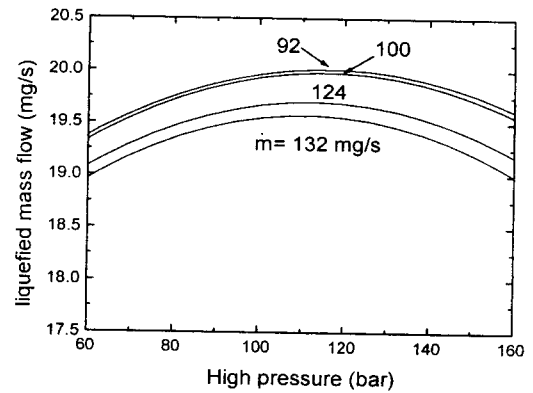
Fig. 3. (a), (b)는 CTI사의 1020CP 모델에 한 계산결과로 최적의 압축압력과 최적의 압축유량을 보여준다. Fig. 4.은 열교환기 유용도에 따른 최적 질량유량과 최대 액화량을 나타낸다.

1020CP와 1050CP의 2단냉동기 직접접촉 액화시스템과 2단냉동기 예냉 L-H액화시스템에 대해 최대 액화유량과 최적 압축압력 등을 Table 1.에 나타내었다. 2단냉동기 예냉 L-H액화시스템이 직접접촉 방식에 비해 1020CP의 경우는 열교환기 유용도에 따라 2~5배, 1050CP는 3~9배 가량 증

함을 알 수 있다. 또한, 직접접촉 액화방식의 경우 수소액화 온도인 20 K 부근에서 냉동용량이 큰 냉동기가 적합한 반면 2단냉동기 예냉 L-H액화시스템의 경우는 1단의 온도가 100 K 이상, 2단이 70K 정도에서 냉동용량이 큰 냉동기가 적합한 것으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 3. Effect of high pressure on the hydrogen liquefaction rate for various compressed mass flow rates in system of Fig. 1 when $\epsilon=0.93$ for heat exchangers.

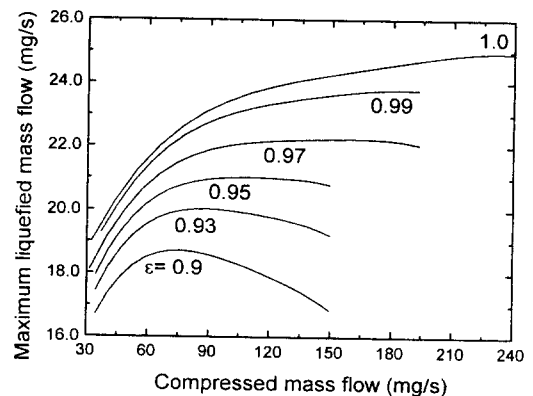


Fig. 4. Maximum liquefied mass flow vs compressed mass flow at the optimal high pressure for various ϵ 's. in system of Fig.

Table 1. Optimal conditions and maximum liquefied mass flow for two different cryoco two different HX ϵ 's in system of Fig. 1(a) and Fig. 1(b)

		Direct liquefaction(Fig. 1(a))				L-H liquefaction(Fig. 1(b))				
		CTI 1020CP		CTI 1050CP		CTI 1020CP		CTI 1050CP		
HX Effectiveness: ϵ		0.93	0.99	0.93	0.99	0.93	0.99	0.93	0.99	
Optimal conditions	Precooling temperature (K)	T_{PC1}	51.07	69.51	37.24	49.97	131.4	146.8	115.0	139.3
		T_{PC2}	12.41	19.18	13.47	19.39	69.37	96.73	71.47	106.6
	Precooling load (W)	Q_{1ref}	16.08	31.97	12.34	33.0	63.54	69.14	97.97	112.5
		Q_{2ref}	5.45	10.85	3.45	8.35	34.74	41.36	34.14	42.87
	High pressure (bar)	.	.	.	.	135	128	141	123
Compressed mass flow (mg/s)	.	.	.	.	110	278	153	539	
Maximum liquefied mass flow (mg/s)		5.1*	10.7	3.7	10.3	20.73	26.14	27.22	35.88	
Liquid yield : y		.	.	.	.	0.188	0.094	0.178	0.067

* In a good agreement with experimental study [9,10]

4. 결론

[참고 문헌]

2단 GM냉동기를 이용하는 직접접촉 액화방식과 예냉 L-H 액화시스템에 대하여 상용화된 2단 냉동기들에 대해 수소의 상태량을 이용한 성능계산 프로그램을 작성하였다. 중요한 설계변수들을 변화시켜가며 프로그램을 실행하여 액화유량의 최대값과 이를위한 액화시스템의 최적 운전조건을 찾았다.

냉동기에 대한 모델로 현재 상용되고 있는 2단식(two-stage) 냉동기들을 선정하여 실제로 액화할 수 있는 액화유량을 압축기로 유입되는 압축유량, 압축압력 및 열교환기의 유용도에 대하여 계산하였다.

모델로 선정된 냉동기들 중 CTI사의 1020C 냉동기의 경우 직접접촉 액화방식에 의한 수소의 액화량은 열교환기의 유용도와 수소의 압력에 따라 최적의 질량유량이 존재하며, 열교환기 유용도와 압력이 증가하면 최대 액화유량도 증가한다.

예냉 L-H액화시스템의 최적압축압력은 100~150 bar 사이로 나타났으며 열교환기 유용도가 증가하면 냉동기 예냉온도와 최적질량유량은 증가한다.

모델로 선정된 냉동기들 외에 기준에 상용되고 있는 2단 GM냉동기들은 2단의 냉동용량이 20 K에서 약 10~20 W 내외, 1단의 최대 냉동용량은 77 K에서 80 W 이하이므로 1, 2단의 냉동용량 모두 고려하여볼 때 액화할 수 있는 최대 수소의 액화량은 약 30~40 mg/s 정도가 한계일 것이다.

냉동기의 선정에 있어서는 사이클의 구성에 따라 2단 냉동기 직접접촉의 경우는 1단의 냉동능력보다는 2단이 20 K 이하에서 냉동능력이 큰 경우가 적합하다. 2단 냉동기 예냉 L-H 액화시스템은 1단의 냉동능력이 120~150 K 사이에서 크고 2단은 70~100 K 사이에서 냉동능력이 큰 것이 유리하므로 사이클의 구성과 원하는 목적에 따라 냉동기의 성능을 고려하여 선정하여야 할 것이다.

[1] D. E. Dancy, F. J. Edeskuty, M. A. D. herty, F. C. Prenger, and D. D. Hill, "Hy Vehicle Fueling Station", Advances in Cryo Engineering, Vol.41, pp. 1041- 1048, 1995.

[2] R. F. Barron, Cryogenic System, 2nd Oxford Univ. Press, New York, 1985.

[3] E. K. White, Experimental Techni- qu Low-Temperature Physics, Oxford Unive Press, Oxford, England, pp. 14- 17, 1979.

[4] E. Thomas, "Development of a Few Bearing Helium Expander", Advances Cryogenic Engineering, Vol.41, pp. 927- 1995.

[5] K. D. Timmerhaus and T. M. Fl Cryogenic Process Engineering, Plenum P New York, 1989.

[6] R. N. Richardson and A. C. R. Ta "Neon liquefaction system for high Experiments", Cryogenics, Vol.35, No.3 195-198, 1995.

[7] 김승현, 장호명, 강병하, "극저온냉동기 예냉 수소액화기의 기초설계", 공기조화·냉동공학회는 문집, 제9권, 제3호, pp. 389-400, 1997.

[8] 김승현, 장호명, 강병하, "상용 극저온 냉동기를 예냉기로 채택한 수소액화 시스템의 성능해석", 한국수소에너지학회지, 제9권, 제2호, pp. 53- 1998.

[9] 백종훈, 강병하, 장호명, "직접냉각에 의한 수소액화장치의 성능실험", 공기조화·냉동공학회는 문집, 제9권, 제3호, pp. 284-291, 1997.

[10] 강병하, 장호명, "수소액화 및 저장 시스템 개발", 통상산업부 보고서, 1998.

[11] D. G. Friend, NIST Thermophy Properties of Pure Fluids, Version 3.0, Standard Reference Database 12, U.S. De Commerse, NIST, 1992.