Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 3, 2019, pp. 282~288
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.3.282

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

LNG 냉열활용을 위한 열교환기의 배열 형태가 냉동창고 성능에 미치는 연구

한단비 · 김윤지 · 변현승 · 백영순†

수원대학교 환경에너지공학과

Effect of the Array Type of Heat Exchangers on Performance of Refrigerated Warehouse for Utilization of LNG Cold Energy

DANBEE HAN, YUNJI KIM, HYUNSEUNG BYUN, YOUNGSOON BAEK†

Department of Environment and Energy Engineering, The University of Suwon, 17 Wowan-gil, Bongdam-eup, Hwaseng 18323, Korea

†Corresponding author : ysbaek@suwon.ac.kr

Received 4 June, 2019
Revised 17 June, 2019
Accepted 30 June, 2019

Abstract >> >> When liquefied natural gas (LNG) is vaporized to form natural gas for industrial and household consumption, a tremendous amount of cold energy is transferred from LNG to seawater as a part of the phase-change process. This heat exchange loop is not only a waste of cold energy, but causes thermal pollution to coastal fishery areas by dumping the cold energy into the sea. This project describes an innovative new design for reclaiming cold energy for use by cold storage warehouses (operating in the 35 to 62℃ range). Conventionally, warehouse cooling is done by mechanical refrigeration systems that consume large amounts of electricity for the maintenance of low temperatures. Here, a closed loop LNG heat exchange system was designed (by simulator) to replace mechanical or vapor-compression refrigeration systems. The software PRO II with PROVISION V9.4 was used to simulate LNG cold energy, gas re-liquefaction, and the vaporized process under various conditions. The effects on sensible and latent heats from changes to the array type of heat exchangers have been investigated, as well as an examination of the optimum.

Key words : Modeling(모델링), Refrigeration warehouse(냉동창고), Cold heat(냉열), Simulation(모사)

Nomenclature

LNG: Liquified Natural Gas
NG: Natural gas
F: Freezing
SF: Super-freezing
E: Difference of Required and Cold energy
HX: Heat exchange

2019 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

Liquified natural gas (액화천연가스, LNG)는 기체인 천연가스를 질소와 이산화탄소, 불순물 등을 제거한 후 저온 고압으로 액화한 것으로 메탄, 에탄, 프로판 부탄 등으로 구성되어 있다. LNG의 저장밀도는 약 430-470 kg/m^{3}로 표준상태의 기체에 비해 625배 이상이고[1], 약 −162℃ 온도를 지닌 초저온 액체 상태이다. 해외가스전에서 LNG 선박을 통해 우리나라 한국가스공사에서 수입하여 인천, 평택, 통영, 삼척 LNG 터미널의 LNG 저장탱크에 하역하게 되어 저장된다. 가정으로 공급하기 위해 LNG는 기화기(open rack vaporizer [ORV])에서 상온의 바닷물과 열교환되어 약 70기압, 상온의 기체 상태로 각 지역의 공급기지에서 보내진다. 이와 같이 −165℃ LNG가 기화하기 위해서 바닷물과의 열교환하는 과정에서 버려지는 냉열은 약 830-860 kJ/kg[2], 우리나라 LNG 사용량이 연간 약 3,800만 톤(2013년 현재)으로 약 7.6×10^{12} kcal (200 kcal/kg 계산)가 된다. 바다나 공기 중으로 버려지는 냉열은 거대한 에너지이며, 바다와 대기를 오염시킨다[3]. 세계적으로 LNG 냉열 이용한 냉동물류 시스템은 1986년 일본 후쿠오카 세이부가스의 LNG 5 ton/hr로 −30℃ 냉동창고 27,600톤 규모를 서부가스엔지니어링과 요코하마 동경가스의 33,260톤 규모 냉동창고를 일본초저온(주)에서 운영되고 있다[4]. 국내는 최근 유진초저온(주)에서 LNG 탱크로리로부터 공급되어 LNG 이용 냉동냉장창고를 완공하였다. 유진초저온의 평택오성물류센터는 LNG 냉열 이용, 연료전지 발전, 태양광 발전, ESS(에너지저장시스템)가 적용된 최첨단 신재생 열원 융·복합 에너지 기술 활용한 에너지 완전 자립형 물류센터로 운영되고 있다[5]. 이어 인천항만공사에서 인천가스인수기지 인근에서 직공급 방식으로 LNG를 공급받아 냉열을 활용하는 인천 신항 콜드체인 클러스터를 조성하고 있다[6]. 현재 우리나라의 전기식 냉동·냉장시스템은 약 780개가 운영되고 있으며, 에너지를 절감할 수 있는 냉열이용 시스템으로 대체한다면 우리나라의 LNG 냉동·냉장 시스템에 연간 최대 3.3×10^{12} kcal 냉열을 사용할 것으로 전망된다. 기존에너지원(전력 등)에 의해 전기냉동기로부터 −100℃ 이상 저온 냉동·냉장기기를 LNG 냉열로 대체 활용할 뿐 아니라 LNG 냉열을 이용할 경우 운전 전력 절감률이 약 50-70% 정도이므로 국가 물류산업의 활성화에 기여할 것이다. LNG 냉열을 기지 부근이나 LNG 탱크로리에 의한 운송으로 LNG 냉열을 활용 후 나온 천연가스를 가스엔진과 발전에 의한 분산형 전력생산으로의 활용으로 획기적인 CO_2 저감과 함께 에너지 문제에 크게 기여가 가능한 기술이므로 매우 필요하다.

본 연구에서는 기존 전기냉동시스템을 LNG 냉열을 이용한 냉동시스템으로 모델링하였으며, 2, 4, 6 ton/hr으로 LNG 냉열 증가로 인하여 3개의 열교환기가 사용되므로 인한 열교환기의 최적 배열 조건을 찾기 위해 직렬, 병렬, 혼합형 열교환기를 시뮬레이 션하여 냉열에너지와 소요에너지에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, LNG 냉동·냉장시스템의 창고 저장용량‘ LNG 사용량에 따른 냉열에너지와 소비에너지에 미치는 영향을 분석하였다.

2. LNG 냉열시스템의 모델링 이론 및 시뮬레이션

2.1 LNG 냉열시스템 이론

본 연구는 LNG 냉열을 사용하여 냉동·냉장창고를 구동하는 시스템의 modeling하여 상업용 화학공정 모사기인 Schneider Electric사의 PRO/II with PROVISION V10.1 (PRO II)을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1과 같은 탄화수소 혼합들의 물성 계산은 Soave-Redlich-Kwong (SRK) 상태방정식인 식 (1)을 사용하였다. 식 (1)에서 a는 에너지 매개변수이며, b는 크기 매개변수이다. 이는 임계온도 및 임계압력의 함수로 식 (2), 식 (3)과 같이 나타낸다[7-9].

$$P=\frac{RT}{v-b}-\frac{a\alpha}{v(v+b)} \quad (1)$$

$$a=0.45724\frac{R^2T_c^2}{P_c} \quad (2)$$

$$a=0.07780\frac{RT_c}{P_c} \quad (3)$$

또한 α값은 식 (4), 식 (5)와 같이 표현한다.

$$\alpha=[1+m(1-T_r^{0.5})]^2 \quad (4)$$

$$m=0.37464+1.54226w-0.26692w^2 \quad (5)$$

Fig. 1은 -45℃ 이하의 저온의 SF급 냉동창고에 적용되는 1차 열교환기와 -35~25℃의 F급 냉동창고에 적용되는 2, 3차 열교환기를 직렬, 병렬, 직렬과 병렬이 합쳐진 혼합형에 대해 분석하였다.

열교환기를 거쳐서 나온 공급 LNG의 85%는 기화기를 통해 5℃ 이상 NG 가스로 되어서 도시가스배관으로 보내지거나 연료전지 등에 사용되며, 남은 15%의 NG 가스는 재액화기에서 액화되어 재순환하는 것으로 가정하여 분석하였다. LNG는 -147℃, 10기압 하에서 6,000 kg/h 유량으로 공급하였으며, 열교환기에서 LNG와의 열교환 냉매는 R407C를 이용하였다. R407C 냉매는 1차 열교환기에서 LNG에 의해 -62℃에서 -85℃까지 냉각되고, 2, 3차 열교환기에서는 -35℃에서 -62℃까지 냉각하였다.

Table 1. The components of various LNG

Component	Lean (%)	Rich (%)	Typical
Nitrogen	0.00	0.00	0.32
Methane	96.74	85.12	90.0
Ethane	1.89	8.63	6.26
Propane	0.68	4.13	2.3
i-Butane	0.34	1.10	0.63
n-Butane	0.34	0.90	0.49
i-Pentane	0.01	0.10	0.00
n-Pentane	0.00	0.01	0.00
Total (%)	100	100	100

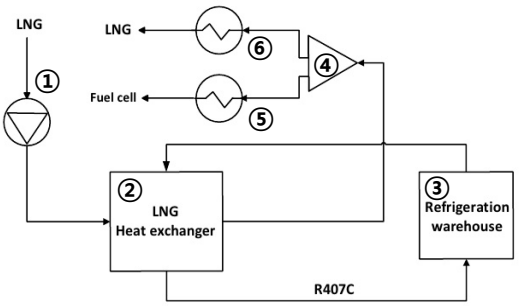

Fig. 1. Modeling of refrigeration warehouse using cold energy of LNG. 1. LNG pump, 2. LNG heat exchanger, 3. refrigeration ware house, 4. mixer, 5. vaporizer, 6. re-liquefaction

2.2 LNG 냉열시스템 시뮬레이션

앞에서 언급한 Fig. 1 공정을 바탕으로 LNG 6 ton/hr이 직렬로 1, 2, 3차 열교환기로 들어가는 직렬 열교환기, 3개의 열교환기가 각각 2 ton/hr씩 병렬로 분배되어 들어가는 병렬 열교환기, 1차와 2, 3차 열교환

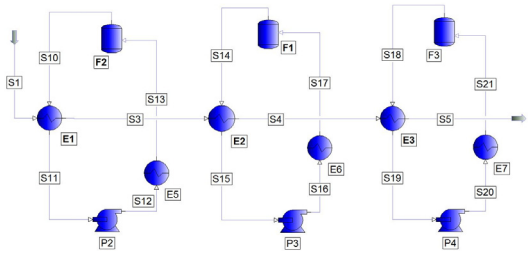

Fig. 2. LNG cold energy system model (serial type)

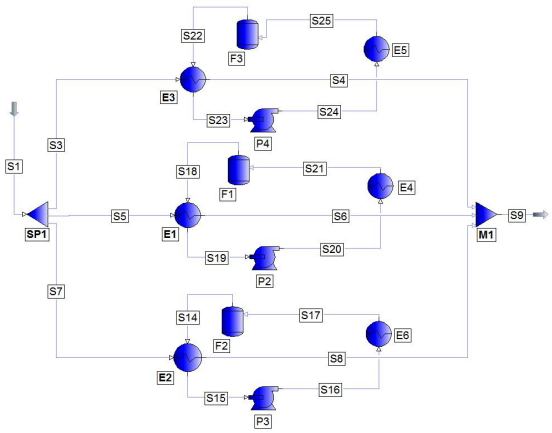

Fig. 3. LNG cold energy mixed system model (parallel)

기가 직렬로 배열되어 3 ton/hr씩 들어가는 혼합형 열교환기에 대하여 heat/mass를 시뮬레이션 하여 Figs. 2-4에 나타냈다.

각각의 열교환기 배열에 따라 기화기와 재액화기에 들어가는 소요에너지와 냉열에너지를 계산하여 비교 분석하였다. 각각의 열교환기 배열에서 동일한 LNG 유량을 가지는 시스템에서 냉동창고의 용량이 감소하는 경우에 따른 영향과 LNG 유량이 변화하는 조건에 대해 분석하였다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 열교환기 배열 형태에 따른 입출구의 온도영향

LNG 냉열이용 시스템의 1, 2, 3차 열교환기 배열을 직렬, 병렬, 혼합형 모델로 하여 냉열에너지 337,000 kcal/hr로 일정하게 열교환한 후, 3개 배열의 열교환기 출구온도를 Table 2과 같이 나타냈다. 직렬형 열교환기의 3차 열교환기 출구온도가 가장 높게 나타났다. 이는 LNG가 열교환기를 지나면서 배관 내의 압력이 열교환기 1개당 약 0.5 bar가 감소하여 전체 압력강하가 10 bar에서 약 8.5 bar까지 감소하였기 때문이다. 다시 말해서 압력이 감소하면 동일한 온도에서 vapor율이 높아서 잠열이용률이 감소되기 때문에 동일한 열교환량에서 가장 큰 ΔT를 지닌 직렬 열교환기의 잠열이 약 7,420 kcal가 감소하였다 (Fig. 5 참조).

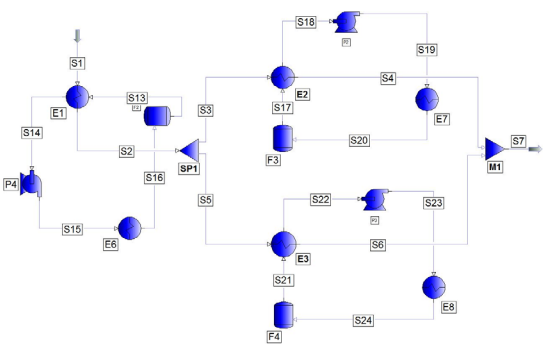

Fig. 4. LNG cold energy mixed system model (serial+parallel)

3.2 NG 활용량에 따른 냉열 및 소요에너지 영향

냉동창고로부터 냉열을 활용한 후 나온 NG를 연료전지나 도시가스로 직접 활용하는 양에 따라 기화기와 재액화기에서의 소요에너지가 다르게 나타난다. 시스템을 나온 NG의 85%는 기화기, 15%는 재액화기 처리한다는 기준 하에서 열교환기의 배열 형태에 따른 소요에너지 분석한 결과는 Table 3에서 보듯이 직렬 열교환기의 경우, NG로 기화되어 나가는 온도가 다른 열교환기에 비해 높기 때문에 기화기에서 소요되는 에너지는 약간 감소하며, 재액화기에서는 거의 비슷하여 총 소요에너지는 작게 나타났다. 병렬과 혼합형의 경우, Fig. 6에서와 같이 직렬에 비해 소요에너지가 증가하지만 그 차이가 크게 나타나지 않

Table 2. Exit temperature for LNG heat exchangers

Items		Series	Parallel	Mixed
1st HX (SF)	Inlet	-147℃	-147℃	-147℃
	Outlet	-122.0℃ (vapor 39.9%)	-39.6℃	-121.8℃ (vapor 37.6%)
2nd HX (F)	Inlet		-147℃	
	Outlet	-104.8℃ (vapor 89%)	-39.6℃	-40.0℃
3rd HX (F)	Inlet		-147℃	-121.8℃
	Outlet	-32.6℃	-39.6℃	-40.0℃

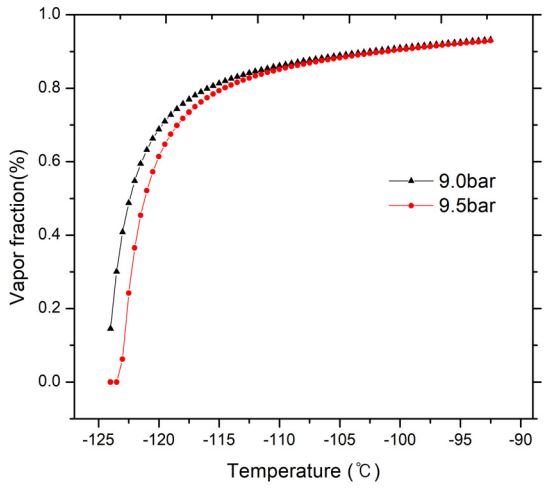

Fig. 5. The relationship between vapor fraction and LNG temperature

았다. NG를 최대로 활용할 때 ΔE (냉열에너지량과 소요에너지의 차이)가 증가하며 최대 874,800 kcal을 활용할 수 있다.

3.3 냉동창고 용량에 따른 냉열 및 소요에너지 영향

냉동창고 용량에 따른 소요에너지에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타났다. 그림에 보듯이 냉동창고의 용량을 168,500 kcal/hr, 252,750 kcal/hr, 337,000 kcal/hr로 증가하면 활용되는 냉열에너지가 증가하고, 소요에너지는 감소한다. 바꿔 말해서 창고용량이 작아지면 활용되는 냉열에너지량이 줄어들기 때문에 1, 2, 3차 열교환기를 지난 후에 저온의 액체 상태로 기화기에 들어가기 때문에 기화기에서 소요되는 에너지양이 크다. 그러므로 냉동창고의 활용성 낮아지면 소요에너지의 양을 줄이기 위해서 LNG 공급하는 양을 줄여한다. 창고용량이 168,500 kcal/hr과 같이 낮은 경우에는 LNG 사용량이 소요에너지량에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타냈다. 약 5 ton/hr에서 냉열에너지량과 소요에너지량이 비슷하게 나타났고, 3 ton/hr에서는 ΔE값이 약 376,200 kcal/hr를 얻을 수 있었다.

LNG 공급량을 6톤에서 3톤까지 줄여서 공급해도 냉동창고의 운영에 문제가 없을 뿐 아니라 에너지 측면에서 경제적이기 때문에 계절별 냉동창고의 활용 여건에 따라 LNG 사용량을 조절하여 소요에너지를 줄일 필요가 있다.

Table 3. Cold and required energy with HX type

Items	Series	Parallel	Mixed
LNG cold energy			
- Warehouse Cap' - Total cold energy	33.7 Mcal/hr 101.1 Mcal/hr		
Required energy			
- Vaporizer (Mcal/hr)	9.77	11.57	11.65
- Reliquefier (Mcal/hr)	16.07	16.13	16.65
- Total energy (Mcal/hr)	25.84	27.70	27.79

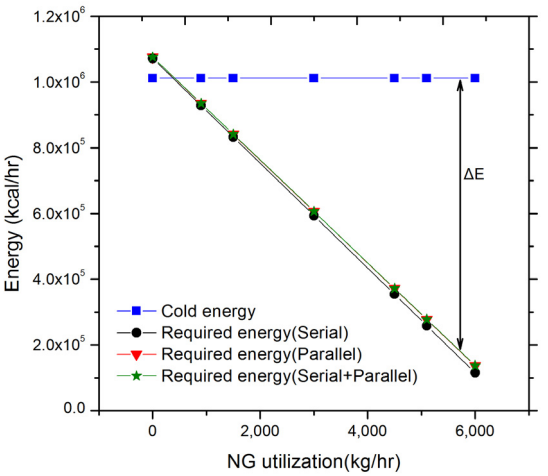

Fig. 6. Energy of main unit required with the amount of NG consumption

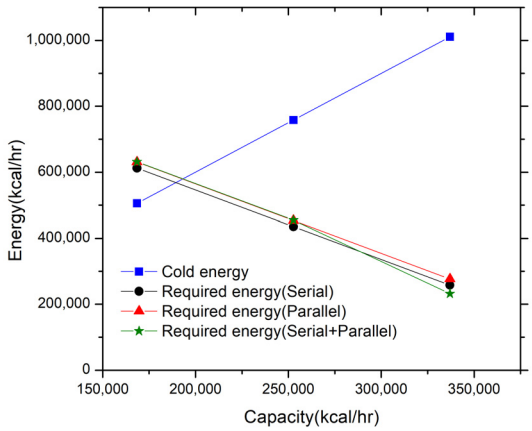

Fig. 7. Cold and required energy with warehouse capacity

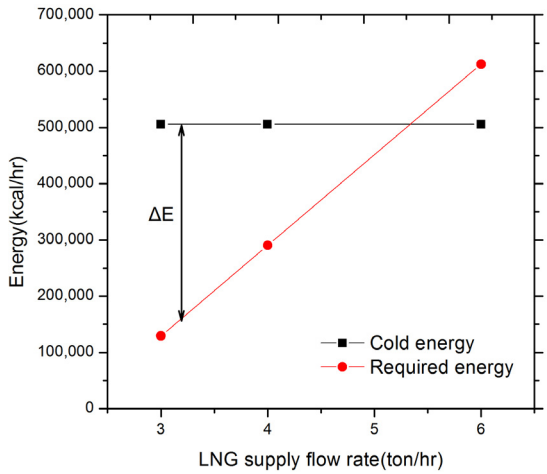

Fig. 8. Cold and required energy with LNG supply

3.4 LNG 공급유량에 따른 냉열 및 소요에너지 영향

LNG 공급유량에 따른 냉열에너지와 소요에너지에 미치는 영향에 대해 Fig. 9에 나타냈다. LNG 공급유량이 2, 4, 6 ton/hr로 용량이 증가할 때 열교환기의 배열에 무관하게 이용 가능한 창고용량과 냉열에너지의 양은 증가한다. 특히 2 ton/hr이 공급조건에서는 1, 2, 3차의 열교환기가 각각 112,300 kcal/hr씩 열교환하도록 하였으며, 4 ton/hr에서 224,600 kcal/hr, 6 ton/hr에서 337,000 kcal/hr의 열교환량을 가지도록 시뮬레이션하였다. 2 ton/hr에서 244,200 kcal, 6 ton/hr에서는 734,000 kcal/hr의 에너지를 이용할 수 있으며, 공급유량이 증가하면서 냉열에너지의 증가량이 소요에너지 증가에 비해 더 큰 폭으로 증가하였다.

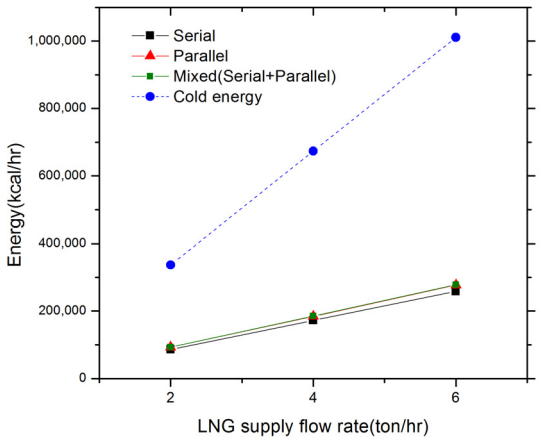

Fig. 9. Cold and required energy with LNG supply amount

Table 4. Vapor fraction of LNG with SF-grade warehouse capacity at series-type HX

Cold energy (kcal/hr)			Exit vapor fraction (%)	
1st HX	2nd, 3rd HX	Total	1st HX	2nd HX
337,000	337,000	1,011,000	40%	89%
168,500	337,000	842,500	9.6%	69%
112,300	337,000	786,300	0%	60%
52,900	337,000	726,900	0%	50%

Table 5. Vapor fraction of LNG with SF-grade warehouse capacity at Mix-type HX

Cold energy (kcal/hr)			1st HX exit vapor fraction (%)
1st HX	2nd, 3rd HX	Total	
120,400	337,000	794,400	0%
236,500	337,00	967,300	20%
337,000	337,000	337,000	37.6%
408,900	337000	1,082,900	50%

3.5 LNG 냉열이용 열교환기 배열의 최적 조건

Tables 2, 3에서 보듯이 열교환기의 배열 조건에 따라 배출되는 LNG 온도가 다르게 나타났다. LNG가 1, 2차 열교환기를 지나면서 NG로 많이 기화되면 LNG 배관 내의 유동흐름에 방해가 될 수 있기 때문에 이들의 영향을 찾기 위해서 Tables 4, 5와 같이 2차 열교환기 출구에서 50% vapor가 유지되도록 조건을 설정하였고, F급 창고의 용량은 337,000 kcal/hr로 일정하게 유지하는 조건에서는 SF급 냉동창고의 최대 냉열에너지 사용량은 52,900 kcal/hr이기 때문에 SF급에서 큰 용량을 필요로 하는 경우 직렬형 열교환기의 사용이 곤란하다. 상기와 같은 조건하에서 혼합형의 경우 SF급 열교환기에서 최대 408,900 kcal/hr의 용량까지 LNG 냉열을 이용할 수 있기 때문에 직렬형 열교환기에 비해 8배 많이 활용할 수 있어서 SF급 냉동창고 활용에 장점을 가지고 있다. 병렬형 열교환기의 경우는 약 136,300 kcal을 활용 가능하며, LNG 유량이 병렬로 분배되어 들어가기 때문에 SF급과 F급 창고 필요 양에 따라 부하조절이 용이하다. 또한 동일한 조건에서 3가지 열교환기 배열 형태 중에서 압력강하가 가장 적기 때문에 vapor 양이 가장 적게 발생하므로 인해 냉열에너지량을 최대로 이용할 수 있을 뿐 아니라 배관 내의 유동 흐름에도 유리하다.

4. 결 론

LNG 냉열을 이용하는 시스템에서 3개의 열교환기를 직렬, 병렬, 혼합형의 모델을 시뮬레이션 하여

LNG 냉열에너지와 소요에너지를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 직렬 열교환기는 3차 열교환기 출구온도가 가장 높게 나타나서 vapor율이 높아 동일한 열교환량의 조건에서 잠열이 약 7,420 kcal이 감소한다. 이는 LNG가 3개의 열교환기를 지나면서 약 1.5 bar의 압력강하로 인한 것으로 사료된다. 또한 기화기에서 소요되는 에너지는 약간 감소하며, 재액화기에서는 거의 비슷하여 총 소요에너지는 작게 나타났다. 병렬과 혼합형의 경우 직렬에 비해 소요에너지가 증가하지만 그 차이가 크게 나타나지 않았다. NG를 최대로 활용할 때 ΔE(냉열에너지량과 소요에너지의 차이)가 증가하여 최대 874,800 kcal을 활용할 수 있다.

2) 냉동 창고용량과 LNG 공급유량이 증가할 때 열교환기의 배열에 관계없이 ΔE값은 2 ton/hr에서 244,200 kcal, 6 ton/hr에서는 734,000 kcal/hr 의 에너지를 이용할 수 있으며, LNG 공급 유량이 2, 4, 6 ton/hr로 증가하면서 냉열에너지량의 증가가 소요에너지의 증가에 비해 더 큰 폭으로 증가하게 나타났다.

3) LNG가 1, 2차 열교환기를 지나면서 NG 기화로 인해 LNG 배관내의 유동흐름에 영향을 주지 않는 조건에서 2차 열교환기 출구에서의 vapor가 50%로 유지되도록 할 때 직렬형 열교환기의 경우 SF급 냉동창고의 최대 냉열에너지 사용량은 52,900 kcal/hr이고, 병렬의 경우 136,300 kcal, 혼합형의 경우 최대 408,900 kcal/hr의 용량까지 LNG 냉열 이용이 가능하기 때문에 직렬형 열교환기에 비해 약 8배 활용할 수 있다.

후 기

본 연구는 에너지기술개발사업 실증형 과제(2001820110106370) 일환으로 수행되었다.

References

1. T. Shizhang, C. Shuai, and Y. Bo, “Design of Liquefied Natural Gas Properties Calculation Software”, Chemical Engineering of Oil and Gas / Shi You Yu Tian Ran Qi Hua Gong, Vol. 43, No. 3, 2014, pp. 254-261. Retrieved from https://web.b.ebscohost.com/abstract?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=10073426&AN=97062023&h=oH%2fg71q%2byQaWEGOdOaiKOfwG0Dj1WG8h8xPk%2bLix6b1aMSdITNKhTzPV0iTJyG2oqjDitz7KbyzNlwI0269cAw%3d%3d&crl=c&resultNs=AdminWebAuth&resultLocal=ErrCrlNotAuth&crlhashurl=login.aspx%3fdirect%3dtrue%26profile%3dehost%26scope%3dsite%26authtype%3dcrawler%26jrnl%3d10073426%26AN%3d97062023.
2. J. Wu, Y. Ma, and S. Chen, “System Design and Analysis of Applying LNG Cold Energy to Refrigerated Warehouses”, Journal of Jimei University (National Science), Vol. 15, 2010, pp. 44-47. Retrieved from http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTotal-JMWY201001010.htm.
3. Q. F. Liu and T. Lv, “Application and Research of LNG Cold Energy”, Guangdong Chemical Industry, Vol. 41, 2014, pp. 133-134. Retrieved from https://download.atlantis-press.com/article/25839576.pdf.
4. S. K. Yoon, “Utilization Technology of LNG cold energy”, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 1997, pp. 604-609. Retrieved from http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00691079.
5. Y. S. Baek, “Status and prospect of using LNG cold energy technology development”, Korea Gas News, Korea, 2018. Retrieved from https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=81201.
6. S. H. Lee, “Distribution Center Construction using LNG Cold energy at Backyard of Incheon New Port”, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers, Vol. 44, 2015, pp. 16-23. Retrieved from http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06217861.
7. J. H. Cho, “PRO II with PROVISION Practice for Process Engineer”, AJIN Express, Korea, 2005.
8. J. H. Cho and R. H. Kim, “The Design of Chemical Process for Energy Saving”, AJIN Express, Korea, 2007.
9. D. B. Han, Y. K. Kim, G. I. Yeom, J. R. Shin, and Y. S. Baek, “A Study of Simulation on the Refrigerated Warehouse System Based on the Cold Energy of Lng Using the Pro-II Simulator”, Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 4, 2017, pp. 401-406, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.4.401.