Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 30, No. 5, 2019, pp. 473~477
DOI: https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.5.473

KHNES
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

전기식 냉동기에서 냉매의 공급온도에 따른 액화천연가스의 톤당 냉열 가격 산출에 대한 연구

김영우[1] · 박일수[2] · 조정호[2†]

[1]호서대학교 기계공학부 , [2]공주대학교 화학공학부

A Study on the Price Evaluation Per 1 Ton of Liquefied Natural Gas According to the Refrigerants Supply Temperature in the Electric Refrigerator

YONUNGWOO KIM[1], ILSOO PARK[2], JUNGHO CHO[2†]

[1]Division of Mechanical Engineering, Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea
[2]Department of Chemical Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-Daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

Corresponding author:
jhcho@kongju.ac.kr

Received 16 September, 2019
Revised 23 October, 2019
Accepted 31 October, 2019

Abstract >> In this paper, cold heat price contained in the 1 ton/h of LNG has been evaluated using PRO/II with PROVISION release 10.2 from Aveva company when LNG is used to liquefy several refrigerants instead of using vapor recompression refrigeration cycle. Normal butane, R134a, NH3, R22, propane and propylene refrigerants were selected for the modeling of refrigeration cycle. It was concluded that LNG cold heat price was inversely proportional to the refrigerant supply temperature, even though LNG supply flow rate is not varied according to the refrigerant supply temperature.

Key words: LNG cold heat price (LNG 냉열가격), Liquefied natural gas(액화천연가스), Refrigeration cycle(냉동 사이클), Computer simulation(전산 모사)

1. 서 론

증기 재압축을 이용한 전기식 냉동 사이클은 압축, 응축, 팽창 및 증발의 4개의 순환공정으로 구성되어 있다. Fig. 1에는 냉매를 활용한 냉동 사이클에 대한 개념도를 나타내었다[1-4]. 한편 팽창밸브 후단에서는 냉매는 일반적으로 증기상과 액상의 이상계가 되는데 증기상의 냉매는 온도는 낮으나 열량가가 거의 없기 때문에 액상 냉매만 냉매 증발기로 주입하고 증기상은 곧바로 냉매 압축기 전단으로 주입한다. 따라서 Fig. 2에는 좀 더 실제적인 전기식 냉동 사이클의 개요도를 나타내었다[5,6]. Fig. 2에 의하면 압축기 전단에서는 대기압보다 약간 높은 압력의 냉매가 압축기를 통해서 고압으로 가압된다. 이때 압축기 후단에서 응축기 후단까지의 압력강하를 무시한다면 압축기 후단에서는 응축기 후단에서 냉매가 액화가 이

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

루어지는 압력까지 가압하게 된다. 일반적으로 냉매로써 냉각수를 사용하게 된다면 응축기 후단의 온도를 45°C까지 냉각한다고 가정하였을 경우 압축기 후단의 압력은 45°C에서 냉매의 기포점 압력과 같다.

냉매를 통해서 저온을 얻기 위해서는 Joule-Thomson 팽창밸브를 통과시키면 된다. 고압의 포화액체 상태의 냉매는 압력을 낮추면 증기가 발생하고 등엔탈피 과정이므로 외부로부터 열원을 공급받지 못하므로 증발이 일어나게 되면 온도는 급격하게 떨어지게 된다. 팽창밸브 후단에서 증기상과 액상은 모두 플래쉬 드럼으로 주입된다. 플래쉬 드럼에서 기상류는 증발기를 거치지 않고 곧바로 압축기 전단으로 보내고 액상류의 냉매만을 냉매 증발기로 보낸다. 이렇게 하는 이유는 냉매 증발기의 크기를 줄일 수 있기 때문이다. Joule-Thomson 팽창밸브 후단의 압력은 상압보다 조금 더 높게 유지하는데, 그 이유는 외부 공기가 냉동 사이클 내부로 유입되는 것을 방지하기 위해서이다.

Table 1에는 냉매별 공급온도와 임계온도 및 녹는점을 나타내었다.[7)]

본 연구에서는 다양한 온도로 공급되는 냉매를 이용한 전기식 증기 재압축 냉동 사이클의 압축기에서 소모되는 전기 에너지를 절감하기 위해서 액화천연가스(이하 LNG)의 냉열을 이용하여 냉매와의 열교환에 의해서 액화시켰을 경우 절감되는 전기료를 LNG 1 ton의 냉열에 포함되어 있는 냉열의 가격을 냉매의 공급온도 별로 산출하였다[8-12)].

Fig. 3에는 본 연구에서 적용한 6가지 냉매의 온도에 따른 증기압 곡선을 나타내었다. 45°C에서의 증기압은 냉매 압축기 후단온도를 나타내며, 대기압보다 약간 높은 압력에서의 냉매의 온도가 냉매의 공

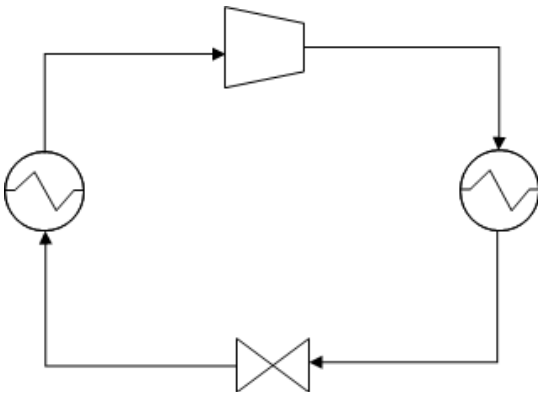

Fig. 1. Schematic diagram for a vapor recompression refrigeration cycle

Table 1. Refrigerant supply temperature and properties[7)]

Refrigerant	Temperature, °C	T_c, °C	Melting point, °C
n-C4H10	2	151.97	-138.29
R134a	-25	101.15	-101.00
NH_3	-30	132.50	-77.74
R22	-35	96.15	-157.42
C_3H_8	-40	96.18	-187.68
C_3H_6	-45	92.42	-185.26

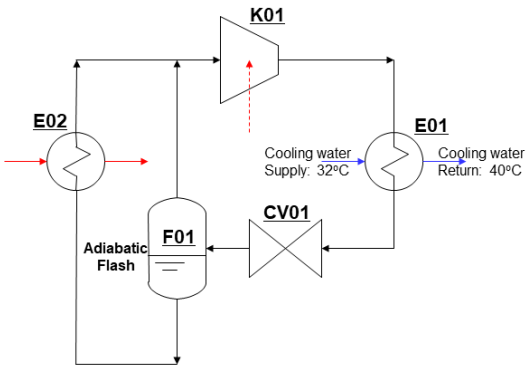

Fig. 2. Flow sheet diagram for an actual refrigeration cycle

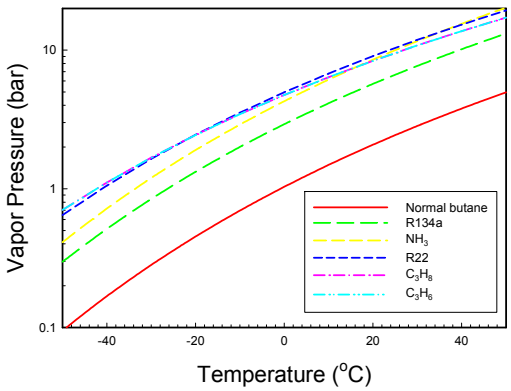

Fig. 3. Vapor pressure curves for several refrigerants

급온도가 된다. 팽창밸브 후단에서 압력이 대기압 보다 낮으면 더욱 낮은 온도를 얻을 수는 있지만 외부 공기와 습기가 냉동 사이클 내부로 유입될 수 있기 때문에 팽창밸브 후단의 압력은 대기압보다 약간 높게 유지한다.

Table 2에는 상기 6가지 냉매에 대한 변형된 Antoine 추산식의 계수들과 적용 가능한 최소 및 최대 온도를 나타내었다. 그리고 식 (1)에는 변형된 Antoine 증기압 추산식을 나타내었다.

$$\ln P^{vap} = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \ln T + C_4 T^{C_5} \qquad (1)$$

한편 Table 3에는 주어진 각각의 냉매를 응축시키는데 사용한 LNG의 조성을 나타내었다. LNG의 조성을 한국가스공사에서 제공받는 typical한 조성으로 적용하였다.

공급 가능한 냉매의 온도가 낮을수록 동일한 냉매 증발기의 heat duty에 대해서도 냉매 압축기 소요동력이 많이 소요되고 그렇게 되면 동일한 LNG의 공급 질량 유량에 대해서 냉열 가격은 공급온도가 낮은 냉매에 대해서 더 높을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 1 kWh 당 전기료를 100원으로 가정하고 LNG 1톤의 냉열 가격을 산출하였다.

Table 2. Coefficients in a modified Antoine equation[7)]

Item	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
n-C_4H_{10}	66.343	-4,363.2	-7.046	9.4509×10^{-6}	2
R134a	49.741	-3,781.6	-4.1615	8.5693×10^{-17}	6
NH_3	90.483	-4,669.7	-11.607	0.017194×10^{-6}	1
R22	116.06	-4,888.4	-16.486	0.027234	1
C_3H_8	59.078	-3,492.6	-6.0669	1.0919×10^{-5}	2
C_3H_6	57.263	-3,382.4	-5.7707	1.0431×10^{-5}	2

Table 3. LNG compositions

Component	mol%
N_2	0.04
CH_4	89.26
C_2H_6	8.64
C_3H_8	1.44
I-C_4H_{10}	0.27
N-C_4H_{10}	0.35
M.W.	17.924
Temperature	-163°C
Pump outlet pressure	8.5 bar

2. 전산모사

2.1 노말 부탄을 냉매로 사용한 냉동사이클의 전산모사

Fig. 4에는 노말 부탄을 냉매로 사용한 전기식 냉동 사이클에 대한 PRO/II flow sheet를 나타내었다.

스트림 1은 냉매의 공급온도인 2°C의 포화증기 상태에서 노말 부탄을 공급하도록 하였다. 컨트롤러 CN1에서는 냉매 응축기인 E1 후단에서의 온도가 냉각수로 냉각 및 액화가 가능한 온도인 45°C에서 완전 응축이 일어날 수 있도록 압축기 후단압력을 조절하였다. 그리고 컨트롤러 CN2에서는 팽창밸브 V1 후단의 온도가 노말 부탄 냉매의 공급온도인 2°C가 되도록 후단압력을 조절변수로 사용하였다. 마지막 컨트롤러 CN3의 역할은 냉매 증발기, E2의 heat duty가 500,000 kcal/h가 되도록 냉매의 총 순환 유량을 조절하였다.

Table 4에는 Fig. 4의 노말 부탄을 냉매로 사용한 전산모사 결과를 요약하여 정리하였다. Table 4에 의

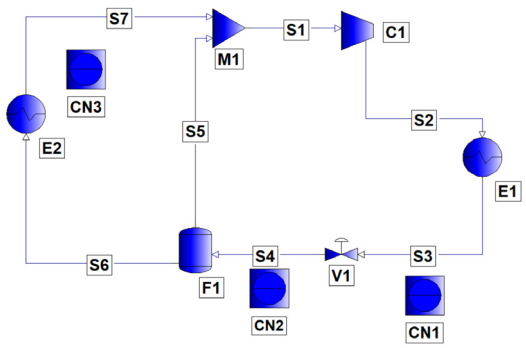

Fig. 4. PRO/II flow sheet diagram for a refrigeration cycle using normal butane as a refrigerant

하면 압축기의 소요동력은 157.3 kW이며, LNG의 공급유량은 2,506 kg/h이며 노말 부탄 냉매에 적용한 LNG 1 ton에 함유되어 있는 냉열 가격은 6,277원임을 알 수 있다.

2.2 LNG의 질량유량을 결정하기 위한 전산모사

Fig. 5에는 냉매 증발기 E2의 heat duty인 500,000 kcal/h의 열량이 가능하도록 LNG의 공급 유량을 조절할 수 있도록 전산모사를 수행한 PRO/II flow sheet를 나타내었다. 컨트롤러 CN1의 역할은 LNG를 이용한 냉매 증발기의 heat duty가 500,000 kcal/h가 되도록 LNG의 질량유량을 조절하는 것이며, 냉매 증발기에서의 사양은 냉매와의 온도 차를 3°C로 두는 것이다. P1 펌프 후단에서의 압력은 8.5 bar를 가정하였다. 다른 냉매에 대해서도 Table 4와 같은 방법으로 전산모사를 수행하였다.

Table 4. Summary for a refrigeration cycle using normal butane as a refrigerant

Item	Value
Refrigerant	n-C_4H_{10}
Heat duty of evaporator	500,000 kcal/h
Refrigerant supply temperature	2°C
Compressor power	157.3 kW
Compressor efficiency	70%
Overall refrigerant circulation rate	7,458 kg/h
Compressor suction pressure	1.113 bar
Compressor discharge pressure	4.335 bar
LNG supply rate	2,506 kg/h
LNG cold heat price for 1 ton	6,277 Won

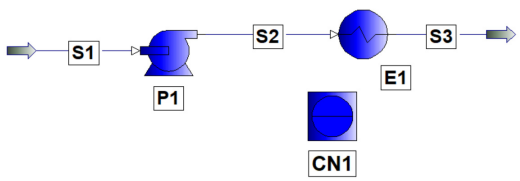

Fig. 5. PRO/II flow sheet diagram to determine LNG mass flow rate

3. 결과

Table 5와 Table 6에는 본 연구에서 사용한 6가지 냉매에 대해서 LNG 1톤 당 냉열 가격을 산출한 결과를 정리하여 나타내었다. 모든 냉매에 대해서 냉매 증발기의 heat duty는 500,000 kcal/h로 동일하게 두었으며 냉매 압축기의 효율 또한 70%로 동일하게 가정하였다. 한편 1 kWh당 전기료는 100원으로 가정하였다.

Table 5와 Table 6에 의하면 동일한 냉매 증발기의 heat duty인 500,000 kcal/h에 대해서 냉매의 공급

Table 5. Melting point and critical pressure of propane

Item	n-C_4H_{10}	R134a	NH_3
Refrigerant temperature	2	-25	-30
Compressor power	157.3 kW	350.8 kW	356.1 kW
Compressor efficiency	70%	70%	70%
Overall refrigerant circulation rate	7,458 kg/h	17,585 kg/h	2,054 kg/h
Compressor suction pressure	1.113 bar	1.062 bar	1.183 bar
Compressor discharge pressure	3.895 bar	11.604 bar	17.739 bar
LNG supply rate	2,506 kg/h	2,689 kg/h	2,726 kg/h
LNG cold heat price for 1 ton	6,277 Won	13,046 Won	13.063 Won

Table 6. Melting point and critical pressure of propane

Item	R22	C_3H_8	C_3H_6
Refrigerant temperature	-35	-40	-45
Compressor power	421.1 kW	506.4 kW	555.4 kW
Compressor efficiency	70%	70%	70%
Overall refrigerant circulation rate	15,884 kg/h	10,265 kg/h	9,973 kg/h
Compressor suction pressure	1.323 bar	1.114 bar	1.155 bar
Compressor discharge pressure	17.242 bar	15.385 bar	18.523 bar
LNG supply rate	2,763 kg/h	2,802 kg/h	2,842 kg/h
LNG cold heat price for 1 ton	15,241 Won	18,073 Won	19,543 Won

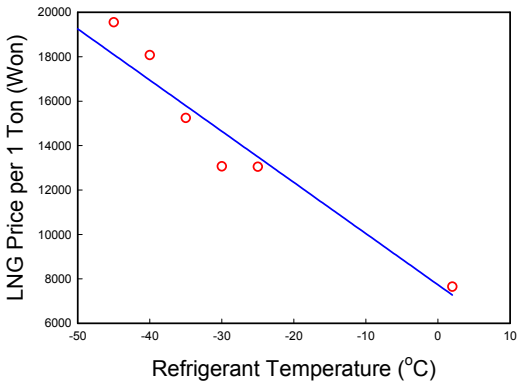

Fig. 6. LNG cold heat price per 1 Ton/h (Won) versus refrigerant supply temperature

온도에 따라서 LNG의 공급 유량은 최소 2,056 kg/h에서 최대 2,842 kg/h로 비교적 차이가 작게 나지만, 압축기의 소요동력은 최소 157.3 KW에서 최대 555.4 kW로 다소 차이가 남을 알 수 있다. 이것은 LNG를 시간당 1톤당 공급할 경우 냉매 온도별 냉열 가격 또한 냉매의 공급온도에 따라서 차이가 남을 알 수 있다. Fig. 6에는 냉매 공급온도에 따른 LNG를 시간당 1톤씩 공급할 경우 냉열 가격을 산출한 것을 도시하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 증기 재압축을 활용한 냉동 사이클에서 냉매의 액화를 전기식 압축기 대신에 LNG의 냉열을 활용할 경우에 냉매의 공급온도에 따른 LNG의 1 ton/h에 함유되어 있는 냉열 가격을 산출하였다.

첫째, 동일한 냉매 증발기 heat duty에 대해서 냉매와의 온도차를 3°C로 동일하게 두었을 때, LNG의 공급 유량은 최소 2,506 kg/h에서 최대 2,842 kg/h로 대체로 크게 변화하지 않는 것을 알 수 있었다.

둘째, 동일한 냉매 증발기 heat duty에 대해서 냉매와의 온도차를 3°C로 동일하게 두었을 때, 압축기 소요동력은 효율을 70%로 동일하게 가정하였을 때 최소 157.3 kW에서 최대 555.4 kW로 차이가 많이 나는 것을 알 수 있었다.

셋째, LNG 1 ton/h가 가지는 냉열가격은 Fig. 7에서 알 수 있듯이 냉매의 공급온도에 따라서 선형적으로 반비례하는 것을 알 수 있었다.

넷째, 냉매의 공급 온도가 매우 낮은 다중 냉매를 사용하는 2단 또는 3단과 같은 캐스케이드 냉동 사이클의 경우에 공급온도가 낮아질수록 LNG 1 ton/h가 가지는 냉열 가격은 더욱 증가할 것임을 예측할 수 있다.

References

1. J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott and M. T. Swihart, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", McGraw-Hill, 2018, pp. 327-343.
2. S. I. Sandler, "Chemical, Biochemical, and Engineering Thermodynamics", John Wiley and Sons Inc. Publication, 2017, pp. 152-184.
3. Fundamentals of Refrigeration Thermodynamics, Free download books, 2014, pp. 119-135.
4. Refrigeration System and Application, John Wiley and Sons, 2010, pp. 63-99. Retrieved from http://sv.20file.org/up1/1102_0.pdf.
5. R. Schefflan. "Teach Yourself the Basics of Aspen Plus", John Wiley and Sons Inc. Publication, 2011, pp. 175-185.
6. K. I. M. Al-Malah. "Aspen Plus®, Chemical Engineering Applications", John Wiley and Sons Inc. Publication, 2017, pp. 49-69.
7. SimSci PRO/II http://software.schneider-electric.com/products/simsci/design/pro-ii.
8. J. H. Cho and D.M. Kim, "A comparative study between one - and two-stage refrigeration system for the natural gas cooling process", J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc., Vol. 11, No. 8, 2010, pp. 3106-3111, doi: https://doi.org/10.5762/KAIS.2010.11.8.3106.
9. S. H. Kim and J. H. Cho, "A simulation study on the cascade refrigeration cycle for the liquefaction of natural gas [1]", J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc., Vol. 12, No. 1, 2011, pp. 552-558, doi: https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.1.552.
10. J. H. Cho and Y. M. Kim, "A simulation study on the cascade refrigeration cycle for the liquefaction of natural gas [2]: An application to the multistage cascade refrigeration cycle", J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc., Vol. 12, No. 2, 2011, pp. 1013-1019, doi: https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.2.1013.
11. S. G. Lee, "Natural gas liquefaction process design using HYSYS", A-JIN, Korea, 2017, pp. 29-88.
12. G. V. Narasimham, "Cryogenic mixed refrigerant processes", Springer, USA, 2008, pp. 149-220.