

액화천연가스를 활용한 개방형 랭킨 사이클에 적용한 냉열 발전의 최적화에 대한 연구

김영우¹ · 이중성² · 이종집³ · 김동선³ · 조정호^{3,†}

¹호서대학교 기계공학부, ²한국가스공사 가스연구원, ³공주대학교 화학공학부

Optimization Study on the Open-Loop Rankine Cycle for Cold Heat Power Generation Using Liquefied Natural Gas

YOUNGWOON KIM¹, JOONGSUNG LEE², JONGJIP LEE³, DONG SUN KIM³, JUNGHO CHO^{3,†}

¹School of Mech. Eng., Hoseo University, 20 Hoseo-ro 79beon-gil, Baebang-eup, Asan 31499, Korea

²KOGAS Research Institute, 1248 Suin-ro, Sangnok-du, Ansan 15328, Korea

³Department of Chem. Eng., Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

†Corresponding author :
jhcho@kongju.ac.kr

Received 19 May, 2017

Revised 6 June, 2017

Accepted 30 June, 2017

Abstract >> In this study, computer simulation and optimization works have been performed for an open-loop Rankine cycle to generate power using five cases of liquefied natural gas compositions. PRO/II with PROVISION V9.4 from Schneider electric company was used, and the Soave-Redlich-Kwong equation of the state model was utilized for the design of the power generation cycle. It was concluded that more power was obtained from less molecular weight liquefied natural gas since there was more volumetric flow rate with less molecular weight.

Key words : Cold heat(냉열), Liquefied natural gas(액화천연가스), Power generation(동력 생산), Rankine cycle(랭킨 사이클), Optimization(최적화)

1. 서 론

천연가스의 주성분은 메탄이며 에탄 함량에 따라서 lean 가스와 rich 가스로 구분할 수 있다. 천연가스는 상압 조건에서 -162°C 가량의 저온에서 액화천연가스(LNG) 상태로 저장한다¹⁾. 천연가스를 액화하는 이유는 액화 시에는 기체상태에 비해서 약 600분의 1로 감소하기 때문에 동일한 부피에서 많은 양의 천연가스를 저장할 수 있으며, 수송에도

용이하기 때문이다²⁾.

천연가스를 액화시키는 방법은 캐스케이드 냉동 사이클, 다단 캐스케이드 냉동 사이클, 단일 혼합냉매 냉동 사이클, 상온 및 중온부는 프로판을 냉매로 이용한 다단 냉동 사이클을 적용하고, 저온부는 혼합 냉매를 이용한 냉동 사이클을 예로 들 수 있다^{3,6)}. 천연가스를 액화시키기 위해서 각각의 냉동 사이클에서 사용되는 압축기에 의해서 LNG 1 kg/h 당 대략 0.3 kW에서 0.7 kW의 동력이 소요된다⁷⁾.

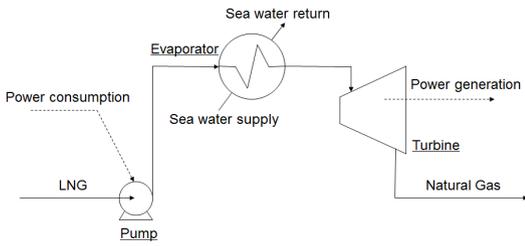


Fig. 1. Schematic diagram for an open-loop Rankine cycle for power generation

LNG를 연료로 사용하기 위해서는 펌프로 가압한 후에 해수를 이용해서 기화시킨 후 주 배관을 통해서 공급한다. LNG를 해수에 의해서 곧바로 기화하면 천연가스로부터 LNG를 만들기 위해서 소요된 전기에너지를 전혀 회수하지 못하는 셈이 된다. 따라서 본 연구에서는 개방형 랭킨 사이클을 적용하여 LNG로부터 냉열을 회수해 내는 공정에 대해서 상용성 화학공정 모사기인 Schneider Electric 사의 PRO/II with PROVISION V9.4 (PRO/II)를 활용하여 전산모사 수행을 통하여 공정에 대한 최적화 작업을 수행하였다. 개방형 랭킨 사이클은 Fig. 1에 공정을 나타내었다⁷⁾.

Fig. 1에 의하면 저온과 저압 상태의 LNG는 펌프에 의해서 50 kg/cm² 이상의 고압으로 가압한 후에 해수와의 열교환을 통해서 기화시킨다. 고압상태의 천연가스는 터보팽창기에 의해서 동력을 생산한다.

최근까지 LNG 냉열발전의 전산모사를 다루는 많은 논문들은 순수한 메탄을 기준으로 계산되었다⁸⁻¹⁰⁾. 본 연구에서는 국내 도입되고 있는 실제 LNG의 조성 4가지에 대해서 각각 전산모사와 공정 최적화를 수행하였으며 그 결과를 LNG를 순수한 메탄으로 가정한 경우와 비교하였다.

2. 열역학 이론

LNG는 대부분의 성분이 메탄, 에탄 등과 같은 탄화수소로 구성되어 있으며 불순물로는 질소 성분이 존재할 수 있다. 질소를 포함하는 탄화수소

혼합물의 상평형 및 물성 계산에는 상태방정식 모델식을 주로 사용한다. 상태방정식 모델식으로는 주로 Soave-Redlich-Kwong (SRK) 상태방정식과 Peng-Robinson (PR) 상태방정식을 주로 사용하는 데 각각의 모델식은 다음의 식 (1)과 식 (2)에 각각 나타내었다^{11,12)}.

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

$$P = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha}{v(v+b)+b(v-b)} \tag{2}$$

천연가스 혼합물의 상평형 계산과 물성 추산에 주로 사용되는 삼차형 상태방정식은 SRK와 PR식인데 본 연구에서는 SRK 상태방정식을 적용하였다. 그 이유는 두 모델식의 정확도는 유사하며 다만 액상밀도 추산에 있어서 정확성이 떨어지는 것으로 알려져 있으나 PRO/II에서는 모델식을 SRK와 PR을 선택한다 하더라도 액상밀도 추산으로 API 모델식을 사용한다¹³⁾. 한편 식 (1)에서 a 는 에너지 매개변수이며 b 는 크기 매개변수이다. 이는 임계온도 및 임계압력의 함수로 식 (3) 및 식 (4)와 같이 표현된다.

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \tag{3}$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \tag{4}$$

또한 α 는 알파 함수로써 식 (5)와 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2 \tag{5}$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \tag{6}$$

한편 다음의 Table 1에는 본 연구에서 적용한 LNG의 조성을 나타내었다. Table 1에 주어진 LNG

Table 1. LNG compositions

Composition	A lean	B rich	C max N ₂	D typical	E pure CH ₄
N ₂	0.00	0.00	1.00	0.04	
CH ₄	96.74	85.12	94.33	89.26	100.00
C ₂ H ₆	1.89	8.63	1.97	8.64	
C ₃ H ₈	0.68	4.14	2.50	1.44	
I-C ₄ H ₁₀	0.34	1.10	0.10	0.27	
N-C ₄ H ₁₀	0.34	0.90	0.10	0.35	
I-C ₅ H ₁₂	0.01	0.10	0.00	0.00	
N-C ₅ H ₁₂	0.00	0.01	0.00	0.00	
M.W.	16.791	19.320	17.189	17.924	16.043

의 조성은 국내 도시가스 열량변동에 의한 영향 검토 연구에서 도입가스를 대상으로 하는 대표 조성이다. Table 1에 의하면 에탄 함량에 따라서 case A와 B는 lean과 rich를 case C는 질소 함량이 가장 많은 경우를 그리고 case D는 통상적인 LNG 원료 case에 대해서 각각 전산모사와 최적화를 수행하였으며 그 결과를 순수한 메탄을 이용한 case와 비교하였다.

3. 전산모사

3.1 개방형 랭킨 사이클의 전산모사

Fig. 2에는 Fig. 1에 나타난 개방형 랭킨 사이클에 대한 공정도를 PRO/II를 사용하여 구현한 것을 나타내었다. Fig. 2에 의하면 LNG는 P1 펌프에 의해서 충분히 가압되어진다. 이때 펌프의 효율은 56%를 가정하였다. 펌프에 의해서 가압되어진 고압의 LNG는 E1 열교환기에 의해서 해수와 열교환되어진 후 완전한 기화가 일어난다. 해수 열교환기에 의해서 기화된 천연가스는 EX1 터보 팽창기에 의해서 동력을 생산한다. 이때 터보 팽창기의 효율은 80%를 가정하였다. CA1은 Calculator로써 터보 팽창기에 의해서 생산되는 동력과 펌프에 의해서 소요되는 동력 및 그 차이 값을 도출하도록 하였다. 또한 OP1은 Optimizer로써 P1 펌프 후단의 압

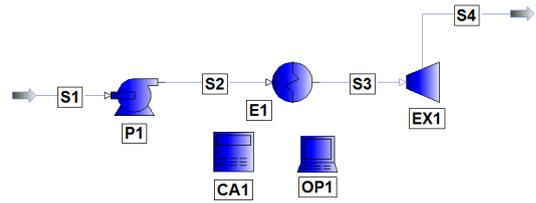


Fig. 2. Flow sheet diagram for an open-loop Rankine cycle using PRO/II simulator

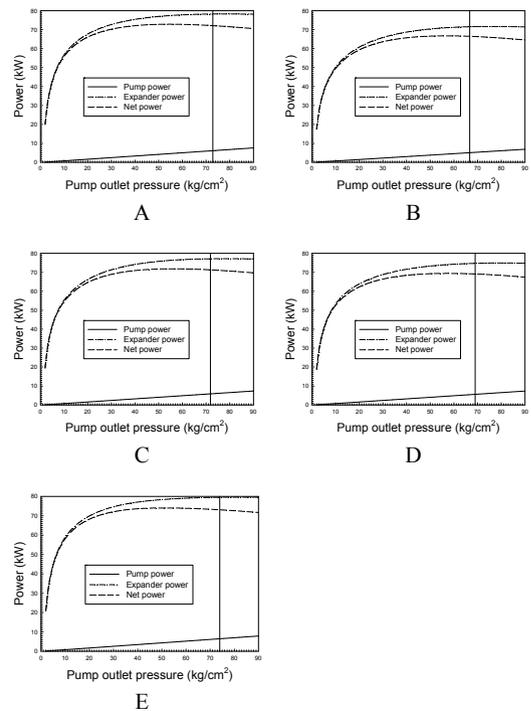


Fig. 3. Optimization of an open-loop Rankine cycle using PRO/II simulator

A: lean, B: rich, C: max N₂, D: typical, E: pure methane case

력을 2 kg/cm²에서 90 kg/cm² 사이로 변화시켜 가면서 터보 팽창기에 의해서 생산되는 동력과 펌프에 의해서 소요되는 동력의 차이가 최대가 되는 최적의 펌프 후단의 동력을 구하였다.

3.2 개방형 랭킨 사이클에 대한 최적화

Fig. 3에는 Table 1에 나타난 5가지 LNG 원료 조

성에 대해서 각각의 전산모사 및 최적화 결과를 나타내었다.

위의 Fig. 3에서는 생산되는 동력을 최대화하기 위해서 목적함수, F는 다음의 식 (7)을 적용하였다. 한편 목적함수를 최대화시키기 위한 조절변수로는 펌프의 도출압력을 변화시켰다.

$$F = \dot{W}_{\text{expander}} - \dot{W}_{\text{pump}} \quad (7)$$

Table 2에는 Fig. 3에서 수행한 4가지 LNG 원료 조성의 순수한 메탄으로 간주한 경우에 대해서 최적화 작업을 수행한 결과를 정리하였다. Table 2에 의하면 LNG의 원료 유량은 1,000 kg/h로 동일유량으로 고정하였다. LNG의 공급온도는 Max N₂ case를 제외한 나머지 case에 대해서 -162°C로 지정하였으며, Max N₂ case의 액화를 위해서는 -163.8°C로 지정하였다. 순 동력생산량은 LNG를 순수한 메탄으로 간주하였을 경우가 74.05 kW로 가장 큰 값을 나타내었으며 에탄 함량이 가장 적은 case A가 72.84 kW로 두 번째 큰 값을 나타내었으며, 에탄 함량이 가장 많은 case B가 66.70 kW로 가장 작은 값을 나타내었다. 그 이유는 동일한 질량 유량에서 상대적으로 분자량이 가장 적은 순수한 메탄이 기화되었을 때, 몰수가 가장 크기 때문에 부피 유량

도 커지게 되어 터보 팽창기에서 생산되는 동력이 커지기 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 LNG에 개방형 랭킨 사이클을 적용하여 국내 도입가스를 대상으로 대표되는 4가지 조성의 LNG를 순수한 메탄으로 간주한 경우에 대해서 냉열발전 공정에 대한 전산모사와 최적화를 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 천연가스를 액화하는데 소요되는 동력의 일부를 다시 동력으로 회수하기 위해서 LNG로부터 동력 생산공정으로 본 연구에서는 개방형 랭킨 사이클을 사용하였다. 랭킨 사이클에 대한 전산모사를 위해서 Schneider electric사의 PRO/II 상용성 화학공정 모사기를 활용하였으며, 열역학 모델식은 SRK 상태방정식을 이용하였다. 한국가스공사에서 수입하는 4가지 전형적인 LNG 조성의 순수한 메탄에 적용하였다. 해수와의 열교환을 통해서 기화하기 전에 LNG를 펌프를 통해서 가압한 후에 열교환기를 통해서 증발시킨 후 고압의 천연가스를 터보 팽창기를 사용하여 냉열을 회수하는 공정에 대한 모델링 및 최적화 작업을 수행하였다.
- 2) 얻어진 순 동력은 LNG를 메탄으로 간주하였을 경우가 74.05 kW로 가장 높았으며, 평균 분자량이 작은 case A가 72.84 kW로 두 번째로 높았으며 평균 분자량이 가장 큰 case B의 경우가 66.70 kW로 가장 적은 동력을 얻었다. 그 이유는 동일한 질량 유량에 대해서 분자량의 적을수록 얻어지는 부피 유량이 증가하기 때문에 터보 팽창기에서 많은 동력을 생산할 수 있기 때문인 것을 알 수 있었다.

References

1. A. J. Kidnay and W. R. Parrish, "Fundamentals of natural gas processing", Taylor and Francis, England, 2006, pp. 265-310.
2. A. Bahadori, "Natural gas processing: technology and engineering design", Gulf professional publishing, USA,

Table 2. Summary for optimization results

Item	A	B	C	D	E
Feed flow, kg/h	1,000				
Pump efficiency, %	56				
Pump power, kW	4.60	4.32	4.54	4.70	4.42
Feed temp. °C	-162.0	-162.0	-163.8	-162.0	-162
Feed press. kg/cm ²	1.033				
HX duty, 10 ⁶ kcal/h	0.2007	0.1919	0.1988	0.1948	0.2038
Expander efficiency, %	80				
Expander power, kW	77.44	71.02	76.39	74.11	78.47
Optimal pump pressure, kg/cm ²	55	57	56	58	51
Net power, kW	72.84	66.70	71.85	69.41	74.05

A: lean, B: rich, C: max N₂, D: typical, E: pure CH₄

- 2014, pp. 596-632.
3. 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.
 4. 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.
 5. Y. M. Kim and J. H. Cho, "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.
 6. S. G. Lee, "Natural gas liquefaction process design using HYSYS", A-JIN, Korea, 2017, pp. 29-88.
 7. G. V. Narasimham, "Cryogenic mixed refrigerant processes", Springer, USA, 2008, pp. 149-220.
 8. J. S. Kim, D. Y. Kim, Y. T. Kim, and H. K. Kang, "Performance analysis of an organic Rankine cycle for ocean thermal energy conversion system according to the working fluid and the cycle", *J. Korean Soc. Mar. Eng.*, Vol. 39, No. 9, 2015, pp. 881-888.
 9. H. Liu and L. You, "Characteristics and applications of the cold heat exergy of liquefied natural gas", *Energ. Convers. Manage.*, Vol. 40, 1999, pp. 1515-1525.
 10. H. Y. Lee and K. H. Kim, "Energy and exergy analysis of a combined power cycle using the organic Rankine cycle and the cold energy of liquefied natural gas", *Entropy*, Vol. 17, 2015, pp. 6412-6432.
 11. G. Soave, "Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state", *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 27, 1972, pp. 1197-1203.
 12. D. Y. Peng and D. B. Robinson, "A new two-constant equation of state", *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, Vol. 15, No. 1, 1976, pp. 59-64.
 13. American Petroleum Institute, "Technical Data Book - Petroleum Refining", American Petroleum Institute, Washington, 1997, pp. 6-45-6-46.