

메탄, 에틸렌, 에탄 및 프로판으로 구성된 새로운 작동 유체와 액화 천연가스의 냉열을 활용한 발전 공정의 효율 향상에 대한 연구

조정호[†]

국립공주대학교 천안공과대학 화학공학부

A Study on the Efficiency Improvement of the Power Generation Process Using New Working Fluids Composed of Methane, Ethylene, Ethane, and Propane and the Cold Heat Contained in the Liquefied Natural Gas

JUNGHO CHO[†]

Department of Chemical Engineering, Cheonan College of Engineering, Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero, Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea

[†]Corresponding author:
jhcho@kongju.ac.kr

Received 17 May, 2024
Revised 4 June, 2024
Accepted 10 June, 2024

Abstract >> In this paper, computer modeling works have been performed for the power generation Rankine cycle using new working fluids and liquefied natural gas (LNG) cold heat. PRO/II with PROVISION released January 2023 from AVEVA company was used, and Peng-Robinson equation of the state model with Twu's alpha function was selected for the modeling of the power generation cycle. Optimal working fluid composition was determined to maximize LNG cold heat to increase power generation efficiency and net power production.

Key words: Working fluid(작동 유체), Rankine cycle(랭킨 사이클), Power generation(동력 생산), Liquefied natural gas(액화 천연가스), Cold heat(냉열)

1. 서론

국내의 모든 화력 발전소에서는 발전 연료가 석탄 이든 천연가스이든 혹은 원자력 발전이든 간에 스팀 또는 물을 작동 유체로 사용한 폐쇄형 Rankine 사이클¹⁻⁴⁾에 기반하여 동력을 생산한다.

전통적으로 발전을 위한 작동 유체로 사용해 온 스팀은 다음과 같은 점에서 사용이 매우 제한적이라고 할 수 있다. 첫 번째는 -163°C로 공급되는 초저온 액화 천연가스(liquefied natural gas, LNG)의 냉열에

적용하기에는 물의 어는점이 0°C로 매우 높은 편에 속하므로 불가능하다는 점이다. 두 번째는 고압 상태에서 증발한 후 스팀은 매우 고온이 되므로 증발기에 사용할 열원으로 고온의 연소 배가스를 사용해야 하고 물의 높은 증발 잠열로 인하여 연료의 소모가 크기 때문에 발전 효율의 저하가 일어난다는 점이다.

본 연구에서는 물 대신에 새로운 작동 유체를 사용해서 LNG의 냉열을 사용한 발전 공정의 효율을 높이는 방안에 대한 연구를 수행하였다⁵⁻⁷⁾.

본 연구에서 적용한 새로운 혼합 작동 유체는 메

탄, 에탄 및 프로판의 삼성분계 혼합물이다. 새로운 작동 유체의 장점은 세 성분 모두 녹는점이 매우 낮아서 LNG의 냉열을 충분히 활용할 수 있다는 것이다. 또한 증발기를 2기로 나누어서 첫 번째 증발기 후단의 온도를 충분히 낮추면 스팀이나 고온의 연소가스를 적용하는 대신에 40°C 정도의 비교적 고온의 냉각수를 열원으로 사용하여 냉각탑에서의 동력을 절감할 수 있다는 장점이 있다. 이렇게 되면 증발기에서 사용되는 스팀의 양을 충분히 절감할 수 있다.

작동 유체를 사용한 발전 공정의 전산 모사를 위해서 PRO/II with PROVISION V2023.1 (AVEVA, Cambridge, UK)을 사용하였으며 LNG의 조성은 한국가스공사(주) (Daegu, Korea)에서 도입하는 typical LNG의 조성을 적용하였다. 그리고 시간당 10톤의 LNG에 대한 냉열 이용률(LNG 증발기 후단에서의 스팀 물분율)과 발전량 및 발전 효율을 추산하였다.

2. 적합한 열역학 모델식의 선정

Rankine 사이클에 적용한 발전 공정의 전산 모사에서 사용되는 성분들은 물과 새로운 작동 유체인 메탄, 에틸렌, 에탄 및 프로판과 LNG의 구성 성분인 질소와 메탄에서 노말 부탄까지의 탄화수소 성분들이다. 따라서 본 공정에 적합한 열역학 모델식으로는 상태방정식 모델식 중에서 Peng-Robinson (PR)이 제안한 모델식을 사용하였다⁸⁾.

PR 상태방정식 모델식은 식 (1)과 같다.

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

한편 식 (1)에서 R 은 기체 상수이고 T 는 절대온도이며 v 는 몰당 부피이다. a 는 에너지 매개변수이며 b 는 크기 매개변수이다. 이는 임계온도 및 임계압력에 대한 함수로 식 (2) 및 식 (3)과 같이 표현된다.

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

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

또한 α 는 알파 함수로 식 (4)와 식 (5)와 같이 표현된다.

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

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (5)$$

식 (6)에는 순수 성분의 온도에 따른 증기압을 좀더 정확하게 추산하기 위해서 Twu가 제안한 새로운 alpha function⁹⁾을 나타내었다.

$$\alpha = T_r^{C_3(C_2-1)} \exp [C_1(1 - T_r^{C_2C_3})] \quad (6)$$

한편 Table 1에는 본 연구에서 사용한 각각의 순수 성분들의 새로운 alpha function 앞의 계수들을 나타내었다.

3. 전산 모사

3.1 전통적인 Rankine 사이클의 전산 모사

스팀을 작동 유체로 사용한 폐쇄형 Rankine 사이클의 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에 의하면 스트림 1에서 액체 상태의 물은 펌프에 의해서 가압된다. 이때 동력의 소모가 일어난

Table 1. Coefficients in Twu's alpha function¹⁰⁾

Composition	C_1	C_2	C_3
N ₂	0.576421	0.909345	0.676502
CH ₄	0.119488	0.904017	0
C ₂ H ₄	0.512046	-0.0875883	0.349821
C ₂ H ₆	0.526261	-0.0178246	0.12642
C ₃ H ₈	0.595095	0.0348924	0.095946
I-C ₄ H ₁₀	0.648491	-0.11527	0.532363
N-C ₄ H ₁₀	0.67287	-0.0414722	0.219121

다. 그 다음에는 증발기에 의해서 물의 증발이 일어나며 고온 및 고압의 스팀을 얻을 수 있다. 그 다음에는 터빈에 의해서 압력이 저압으로 떨어지면서 동력이 생산된다. 터빈 후단에서 압력이 낮아져 부분적으로 응축이 일어난 스팀/물 혼상류는 응축기에 의하여 완전히 응축된다. Fig. 2에는 Fig. 1의 Rankine 사이클을 PRO/II를 사용하여 전산 모사를 수행한 플로시트를 나타내었다.

Table 2에는 Fig. 2의 물을 작동 유체로 사용한

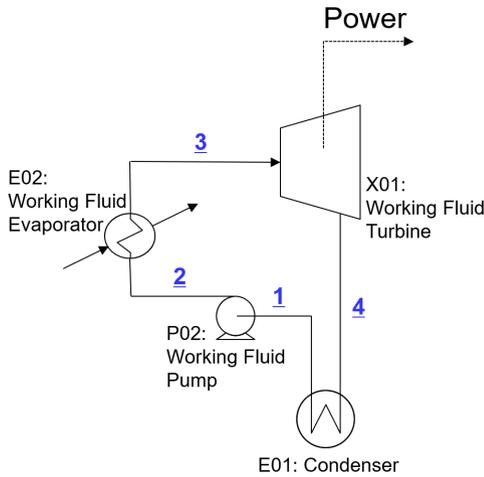


Fig. 1. Schematic diagram for a typical Rankine cycle to generate power using steam as a working fluid

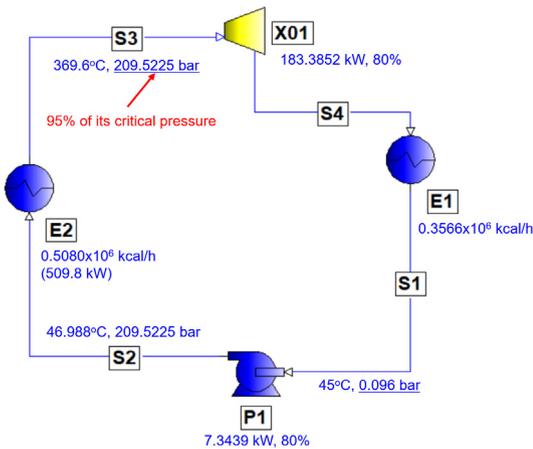


Fig. 2. PRO/II flow sheet diagram for a cryogenic distillation process to obtain highly pure CO₂

Rankine 사이클에 대한 동력 생산 공정에 대한 전산 모사 결과를 요약하여 정리하였다.

아래의 식 (7)에는 Rankine 사이클에 대한 발전 효율을 정의하였다. Fig. 2에서 터빈 X01이 노란색으로 표시된 것은 팽창 후에 작동 유체의 일부가 액화된 것을 표시한 것이다. 터빈 후단에서 액화가 일어나지 않게 하기 위해서는 작동 유체 증발기인 E2에서 스팀의 과열도를 증가시키면 된다. 다만 여기에서는 작동 유체로 스팀을 사용한 전통적인 Rankine 사이클에 대한 예시를 나타낸 것이므로 이에 대한 수정은 가하지 않았다.

$$\epsilon = \frac{Power}{Evaporator\ duty} \times 100(\%) \quad (7)$$

Table 2에서 얻어진 net power와 증발기의 heat duty를 식 (7)에 대입하면 발전 효율은 34.5%로 계산할 수 있다.

3.2 새로운 혼합 작동 유체를 이용한 발전 공정의 전산 모사

본 연구에서 사용한 혼합 작동 유체의 조성구성과 순수 성분의 물성은 Table 3에 나타내었다. 새로운 혼합 작동 유체의 특징은 어는점이 충분히 낮아서 LNG의 냉열을 활용할 수 있으며 응축기 후단의 온도를 냉각수로 낮추는 것에 비해서 획기적으로 낮출 수 있다는 점이다. 응축기 후단의 온도가 낮아지게

Table 2. Simulation results summary for Fig. 2

Item	Result
Compressor power	183.3852 kW
Compressor outlet pressure	0.096 bar
Condenser heat duty	0.3566×10 ⁶ kcal/h
Pump power	7.3439 kW
Net power	176.0413 kW
Evaporator heat duty	0.5080×10 ⁶ kcal/h (509.8 kW)
Evaporator outlet temperature	369.6°C

되면 터빈 후단의 압력을 낮출 수 있으므로 더 많은 동력을 얻을 수 있다.

Table 4에는 한국가스공사(주)에서 수입하는 typical LNG의 조성을 나타내었다.

Fig. 3에는 새로운 혼합 작동 유체와 LNG 냉열을 활용한 발전 공정에 대한 개요도를 나타내었다. Fig. 3에 의하면 LNG 냉열에 의해서 -95.43°C까지 냉각 및 응축된 작동 유체는 펌프에 의해서 45 bar까지 가

Table 3. Composition and pure component physical properties for new working fluids

Component	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Composition (wt%)	1.0	39.0	60.0
Molecular weight	16.0428	28.0538	30.0696
NBP (°C)	-161.49	-103.74	-88.60
P _c (bar)	45.99	50.40	48.72
T _c (°C)	-82.59	9.19	32.17
NMP (°C)	-182.46	-169.15	-185.80
Heat of vaporization (kcal/kg)	125.281	116.383	117.373

Table 4. Composition of typical LNG

Component	Mole %
Nitrogen	0.04
Methane	89.26
Ethane	8.64
Propane	1.44
Iso-butane	0.27
N-butane	0.35

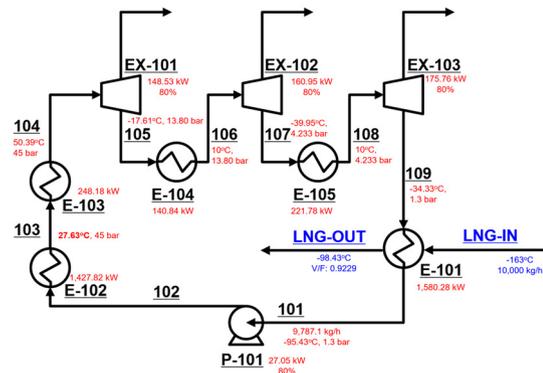


Fig. 3. Schematic diagram for a power generation cycle using new working fluids and LNG cold heat

압된다. LNG의 질량 유량은 10,000 kg/h를 기준으로 전산 모사를 수행하였다. 그 다음에는 E-102 증발기에서 27.63°C까지 가열된다. 이때 E-102 후단에서의 온도가 낮기 때문에 열원으로 고온의 연소 가스나 스팀을 사용하지 않고 공정 내에서 사용한 40°C의 냉각수를 사용하는 것으로 가정하였다. 그렇게 되면 냉각탑에서 소모되는 동력을 낮출 수 있다. 그리고 E-103 증발기에서 130°C 저압 스팀으로 50.39°C까지 가열하였다. 이 온도는 EX-101 터빈 후단에서 응축이 일어나지 않는 최소 온도로 결정하였다. 그리고 압력을 45 bar에서 1.3 bar까지 떨어뜨리기 위해서 중간에 heater를 거치는 3단 팽창으로 구성하였으며 팽창비는 식 (8)에 의해 동일한 팽창비가 되도록 설정하였다.

$$\text{팽창비} = \left(\frac{P_{discharge}}{P_{suction}} \right)^{1/3} \quad (8)$$

한편 Fig. 4의 전산 모사 결과를 요약하여 Table 5에 정리하였다. 여기에서 3기의 터빈과 1기의 펌프 효율은 각각 80%로 동일하게 가정하였다. 3기의 터빈으로부터 얻은 동력의 총합은 485.24 kW이며 펌프에서 소요된 동력은 27.05 kW이다. 따라서 본 동력 생산 공정에서 생산된 순 동력은 458.19 kW인 것을 알 수 있다. E-103 증발기의 heat duty는 248.18 kW이므로 본 공정의 발전 효율은 184.22%이다.

여기에서 발전 효율이 100%를 넘어서는 것은 열역학 제1법칙에 어긋나는 것처럼 보일 수도 있다. 하

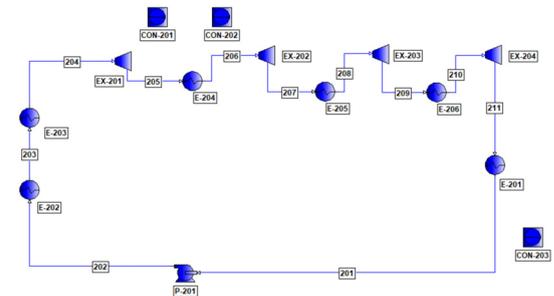


Fig. 4. PRO/II flow sheet drawing for a power generation cycle using new working fluids and LNG cold heat

지만 Fig. 3에서 첫 번째 작동 유체 증발기인 E-102 후단의 온도는 27.63°C에 불과하기 때문에 스팀이나 고온의 연소 가스를 열원으로 사용하지 않고 사용한 냉각수를 열원으로 사용해도 된다. 따라서 식 (7)의 발전 효율 정의에서 해당 값을 분모에 넣지 않아도 되기 때문에 이러한 현상이 발생하는 것이다. 또한 E-101 작동 유체 응축기에서 heat duty는 1,580.28 kW이고 이는 1.3559×10^6 kcal/h에 해당하는 열량이다. 이는 LNG와의 열 교환에 의해서 회수된 열량이라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 메탄, 에틸렌 및 프로판의 삼성분계 혼합 작동 유체와 LNG 냉열을 적용하여 동력 생

Table 5. Simulation results summary for Vapor recycle process simulation results summary

Item	value
EX-101 power	148.53 kW
EX-102 power	160.95 kW
EX-103 power	175.76 kW
EX-103 outlet pressure	1.3 bar
P-101 power	27.05 kW
E-101 heat duty	1,580.28 kW
E-101 outlet temperature	-95.43°C
E-102 heat duty	1,427.82 kW
Cooling water consumption in E-102	37.63 ton/h
E-102 outlet temperature	27.63°C
E-103 heat duty	248.18 kW
E-103 outlet temperature	50.39°C
Power generation efficiency	184.22%
Steam consumption in E-103	411 kg/h
E-104 heat duty	140.84 kW
Cooling water consumption in E-104	12.08 ton/h
E-105 heat duty	221.78 kW
LNG flow rate	10,000 kW
LNG supply and return temperature	-163°C/-98.43°C
LNG vapor percent at E-101 outlet	92.29%
Working fluid circulation rate	9,787.1 kg/h

산 공정에 대한 전산 모사 연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 새로운 혼합 작동 유체와 LNG 냉열을 이용한 발전 사이클에서 LNG는 작동 유체 응축기와의 열 교환에 의해서 -163°C로 공급되어 -98.43°C로 나가며 92.29 mole%의 LNG가 증발하므로 냉열의 92.29%를 이용한 셈이 된다.

2) LNG는 10 ton/h의 질량 유량으로 공급되어 냉열 열교환기의 heat duty는 1.3559×10^6 kcal/h의 열량이 회수되었다.

3) 3기의 터빈을 통해서 얻어진 총 동력은 484.31 kW이며 펌프에서 소요된 동력은 27.05 kW이므로 생산된 순 동력은 458.19 kW이다.

4) E-103 열교환기의 heat duty는 248.18 kW이므로 동력 생산 효율은 184.22%이다. 이것은 열역학 제1법칙을 위배하는 것이 아니라 또 다른 작동 유체 증발기에서 필요한 열원을 스팀이나 고온의 연소 가스를 사용하지 않고 공정 중에서 사용한 고온의 냉각수를 열원으로 사용하기 때문에 가능한 것이다.

References

1. J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbott, and M. T. Swihart, "Introduction to chemical engineering thermodynamics", 9th ed, McGraw-Hill, USA, 2022, pp. 307-329.
2. C. Borgnakke and R. E. Sonntag, "Fundamentals of thermodynamics", 10th ed, John Wiley & Sons, USA, 2020, pp. 256-288.
3. I. Granet, M. Bluestein, "Thermodynamics and heat power", 8th ed, CRC Press, USA, 2015, pp. 317-365.
4. Y. Kim, J. Lee, J. Lee, D. S. Kim, and J. Cho, "Optimization study on the open-loop rankine cycle for cold heat power generation using liquefied natural gas", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 28, No. 3, 2017, pp. 295-299, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.3.295>.
5. S. Noh, "A study on the power generation using supercritical carbon dioxide", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 30, No. 4, 2019, pp. 297-302, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.4.297>.
6. S. Noh, "Comparative study between single-stage and two-stage expansion using LNG cold heat", Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 30, No. 2, 2019, pp. 188-192, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.2.188>.

7. S. Noh, "Estimation of the ammonia refrigeration cycle using LNG cold heat", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 29, No. 4, 2018, pp. 357-362, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.4.357>.
8. D. Y. Peng and D. B. Robinson, "A new two-constant equation of state", *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 15, No. 1, 1976, pp. 59-64, doi: <https://doi.org/10.1021/i160057a011>.
9. C. H. Twu, D. Bluck, J. R. Cunningham, and J. E. Coon, "A cubic equation of state with a new alpha function and a new mixing rule", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 69, 1991, pp. 33-50, doi: [https://doi.org/10.1016/0378-3812\(91\)90024-2](https://doi.org/10.1016/0378-3812(91)90024-2).
10. AVEVA, "AVEVA™ PRO/II™: design and engineering simulation program", AVEVA, 2020. Retrieved from <https://www.aveva.com/ko-kr/products/pro-ii-simulation/>.