

LNG냉열발전시스템에 있어서 직접팽창 및 유기랭킨사이클의 운전성능평가

조은비* · 정 문** · 황인주** · 강춘형*
* 전남대학교 응용화학공학부, ** 한국건설기술연구원

Performance Analysis of Direct Expansion and Organic Rankine Cycle for a LNG Cold Power Generation System

Eun-Bi Cho*, Moon Jeong**, In-Ju Hwang** and Choon-Hyoung Kang*
* School of Applied Chemical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.,
** Korea Institute of Construction Technology

(Received October 16, 2014 ; Revised January 16, 2015 ; Accepted January 20, 2015)

Key Words: Organic Rankine Cycle(유기랭킨사이클), Direct Expansion(직접팽창), Liquefied Natural Gas(액화천연가스), Low-Temperature Heat Source(저온 열원), Power Generation System(동력발전시스템)

초록: 국내에서는 천연가스 공급국가와 수입국가의 거리, 공급시설 투자, 국가 간 협력 등 여러 가지 제약에 따라 액화천연가스를 수입하고 있다. 수입한 액화천연가스를 수요처로 공급하기 위해 해수를 이용한 기화과정에서 냉열이 낭비되고 있다. 본 연구에서는 이러한 냉열을 효율적으로 활용하는 냉열발전시스템에서 직접팽창과 유기랭킨사이클 방식의 운전성능을 비교 연구하였다. 시뮬레이션은 Aspen HYSYS를 이용하여 수행하였으며, 운전성능 분석은 T-S 선도 및 시스템 성능 해석을 토대로 비교분석하였다. 시뮬레이션 결과로부터 발전시스템의 운전 측면에서는 유기랭킨사이클 방식이 유리한 것을 확인하였다.

Abstract: The liquefaction to produce LNG (liquefied natural gas) is the only practical way for mass transportation of natural gas across oceans, which accompanies considerable energy consumption in LNG plants. Power generation is one of the effective utilization ways of LNG cold energy which evolves during the vaporization process of LNG with sea water. In this work, performance analysis of two cold energy generation processes, direct expansion and organic Rankine cycles, were carried out by using Aspen HYSYS simulation. The results show that the performance of the organic Rankine cycle is superior to the direct expansion.

1. 서론

천연가스는 상대적인 환경 친화성과 발전연료로서의 역할이 증대함에 따라 수요가 급격히 증가하고 있다. 더욱이 천연가스에 대한 소비처의 수입의존도가 증가하는 가운데, 과거 70% 이상 PNG(pipe-line natural gas)에 의존해왔던 국가들이 기술 발전에 따라 LNG플랜트 및 수송 건설이 가능해지면서 지리적 유연성을 갖는 LNG(liquefied natural gas) 도입을 추진하고 있다. 국내에서는 천연가스 공급국가와 수입국가간의 거리, 공급시설 투자, 국가 간 협력 등 여러 가지 제약에 따라 액화천연가스를 수입하고 있다.⁽¹⁾ 액화천연가스는 천연가스를 -162°C 초저온으로 저장한 것으로, 사용하기 위해 기화하는 과정에서 약 200 kcal/kg의 냉열 에너지를 발생한다. 수입한 액화천연가스를 수요처로 공급하기 위해 해수를 이용한 기화과정에서 발생하는 냉열이 낭비되고 있는 것이다. 이러한 냉열을 활용하는 방안으로 냉방, 냉동저

† Corresponding Author, E-mail: chkang@jnu.ac.kr, TEL: 062-530-0769

장, 냉열발전 등이 있지만, 대부분의 나라는 공급기지와 수요처의 거리, 경제성 문제로 인하여 효율적인 활용에 어려움을 겪고 있다.⁽²⁾

최근 기술 발전에 따라 냉열발전의 타당성이 새롭게 부각되면서 액화천연가스의 냉열을 효율적으로 활용하여 유용한 동력을 효과적으로 생산하기 위한 연구가 이루어지고 있다.⁽³⁻⁷⁾ Zhang와 Tang⁽⁸⁾은 기액 분리가 있는 직접팽창식과 랭킨사이클의 복합 발전 사이클에 대해 연구하였으며 Choi 등⁽⁹⁾은 액화천연가스의 냉열을 효과적으로 회수하기 위해 다단 랭킨 사이클을 분석하고 최적화하였다. Gomez 등⁽¹⁰⁾은 브레이튼 사이클과 랭킨사이클의 복합 발전 사이클을 제안하고 열역학적으로 해석하였으며 Wang 등⁽¹¹⁾은 LNG 냉열을 이용하여 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 하는 재생 랭킨 사이클의 시스템을 분석하고 최적화하였다. Kim 등⁽¹²⁾은 LNG 냉열을 이용한 유기랭킨사이클의 열역학적 성능을 분석하였다.

본 연구에서는 냉열을 활용하여 유용한 동력을 효과적으로 생산하기 위한 직접팽창 방식과 유기랭킨 사이클에 기반한 LNG 냉열발전시스템을 대상으로 공정 모델링하였고 성능 특성을 비교 분석하였다.

2. 해석 모델

2.1 냉열발전시스템

냉열발전시스템은 LNG 기화과정에서 발생하는 냉열을 열원으로 하는 발전으로 발전방식에 따라 LNG 송출압력의 영향, 발전출력, 작동매체, 발전 시 과생하는 냉각효과 등의 특성에 차이가 많다.⁽¹³⁻¹⁵⁾ 최적의 방법을 선정하기 위해 몇 가지 문제점을 극복하여 냉열에너지의 이용효율과 발전 출력을 향상시킬 수 있는 방법을 모색하였다. 냉열발전은 여러 가지 방식이 있으며 본 연구에서는 직접팽창방식과 Rankine 사이클을 대상으로 공정 모델링하였다. LNG의 압력 엑서지를 이용한 직접팽창방식은 발전출력이 작지만 발전 비용이 낮고 구성이 간단하여 차지하는 공간도 작다. 탄화수소계열을 작동유체로 하여 LNG 저온 엑서지를 이용한 유기랭킨사이클은 출력이 크지만 매체의 특성이 복잡하여 운전에 대한 검토가 필요하다.

2.2 공정모사

냉열발전시스템을 모델링하기 위해 공정 모델링 도구인 Aspen HYSYS를 사용하였다. 이 공정 모델링 도구는 15,000개 이상의 화합물에 대한 물성 데이터베이스를 포함하고 있으며, 70여개의 열역학 모델식과 50여개의 장치를 모델링할 수 있는 라이브러리가 내장되어 있어 모델링 결과에 대한 신뢰성을 확보하고 있다.⁽¹⁶⁾

천연가스의 열역학적 특성은 식 (1)의 Peng-Robinson 상태방정식으로 나타내었다. Peng-Robinson 식은 van der Waals 상태방정식을 발전시킨 것으로, 탄화수소 계열의 상평형 계산에 가장 많이 사용되는 식이

Table 1 Composition of natural gas and mixed refrigerant

Component name	Formula	Natural Gas (mol%)	Mixed Refrigerant (mol%)
Nitrogen	N_2	4.98	-
Methane	CH_4	87.06	20
Ethane	C_2H_6	5.07	42
Propane	C_3H_8	1.98	30
Butane	C_4H_{10}	0.89	8
Pentane	C_5H_{12}	0.02	-

다. 모든 온도와 압력 조건에서 적용가능하며, 기체 입자의 부피를 조정하는 항이 2차 항까지 설정되어 있기 때문에 고압의 기체나 분자량이 큰 기체에서 다른 모델 식에 비해 조금 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{[V(V+b)+b(V-b)]} \tag{1}$$

$$a = \frac{0.45724(RT_c)^2}{P_c} [1 + m(1 - \sqrt{(T_r)^2})] \tag{2}$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \tag{3}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \tag{4}$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \tag{5}$$

액화천연가스 유량(20 ton/h)은 평택 인수기지에서 냉동 창고 및 공기액화 분리로 활용되고 있는 것을 적용하였으며, 가정 한 액화천연가스와 혼합냉매의 조성비는 Table 1과 같다.

2.2.1 직접팽창 방식(Direct expansion)

직접팽창방식은 작동매체인 LNG를 해수를 이용하여 LNG 기화기에서 기화시킨 후, 터빈에서 고압의 천연가스로 팽창시켜서 터빈발전기를 구동한다. 유형별 직접팽창 방식 발전시스템의 공정도가 Fig. 1~3에 나타나 있다.

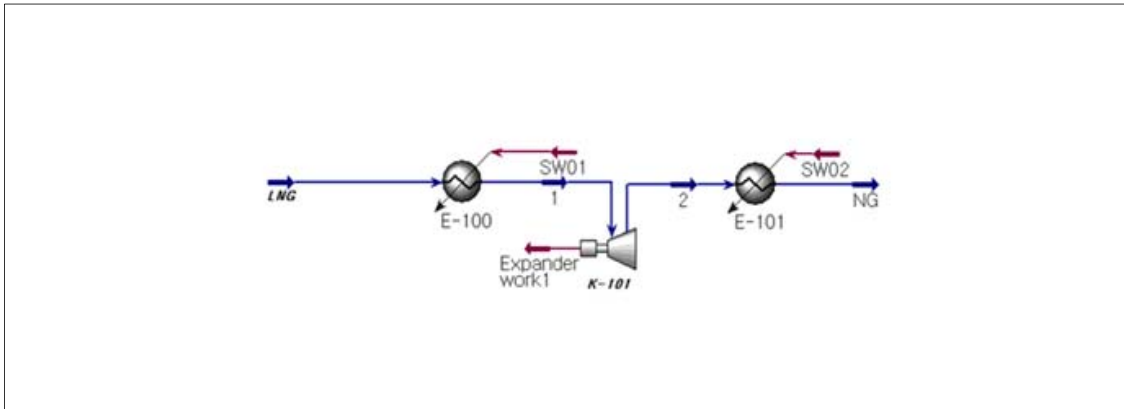


Fig. 1 Single-stage direct expansion

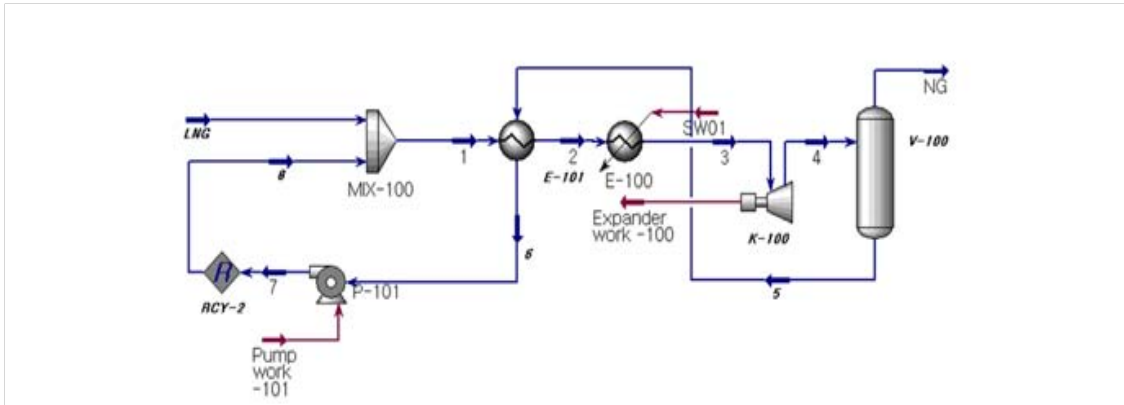


Fig. 2 Single stage direct expansion with a vapor-liquid separator

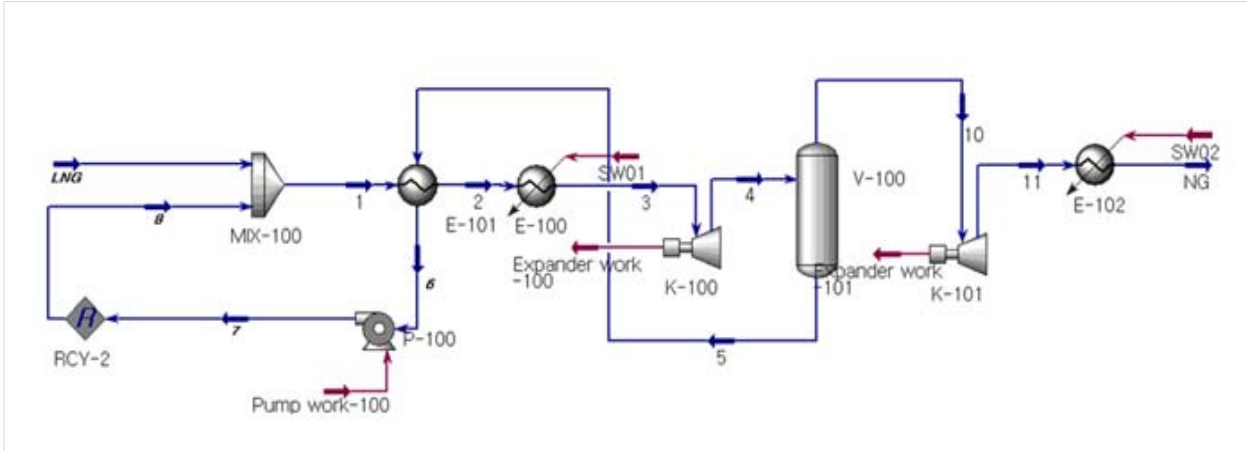


Fig. 3 Two-stage direct expansion with a vapor-liquid separator

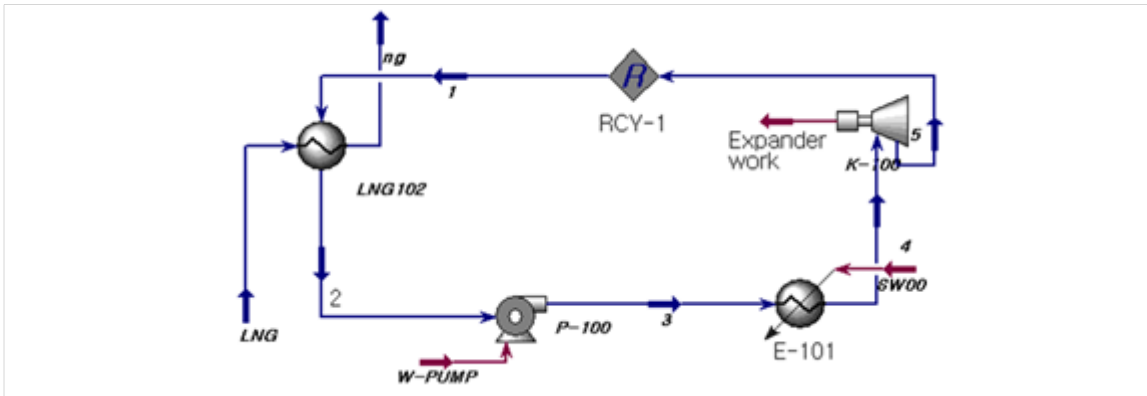


Fig. 4 Single-stage organic Rankine cycle

Case 1(Fig. 1)은 저장탱크로부터 나온 LNG를 펌프로 가압하고 해수를 이용하여 기화/팽창시켜 발생한 고압의 가스로 터빈발전기를 구동한다. Case 2(Fig. 2)는 냉열에너지 이용효율을 높이기 위해 기액분리기를 사용하는 직접팽창방식이다. 분리된 액상의 작동매체가 재순환하여 해수와 함께 열원으로 사용되어 기화/팽창시켜 발생한 고압의 천연가스로 터빈발전기를 구동한다. Case 3(Fig. 3)은 다단 터빈이 설치된 직접팽창 방식이며 발전출력을 높이기 위해 Case 2에 터빈을 추가하였다.

2.2.2 유기랭킨사이클 방식(Organic Rankine cycle)

유기랭킨사이클 방식은 작동매체인 탄화수소계열 혼합냉매를 LNG 기화기에서 LNG냉열을 이용하여 응축시키고 해수를 이용하여 냉매를 기화시킨 후, 터빈에서 팽창시켜 발생한 고압의 냉매가스로 터빈에서 구동력으로 변환된다. 유기 탄화수소 혼합물을 냉매로 사용하는 랭킨 사이클을 이용한 발전시스템의 유형별 공정도가 Fig. 4~6에 제시되어 있다.

Case 4(Fig. 4)는 LNG의 냉열을 이용하여 냉매를 응축시키고 해수를 이용하여 냉매를 기화/팽창시켜 발생한 고압의 냉매가스로 터빈발전기를 구동한다. Case 5(Fig. 5)에서는 냉열에너지 이용효율을 높이기 위해 LNG 기화기에서 혼합냉매가 응축/증발되고 해수를 이용하여 냉매를 기화/팽창시켜 발생한 터빈발전기를 구동한다. Case 6(Fig. 6)는 발전출력을 높이기 위해 Case 5에 터빈이 추가된 다단 터빈을 가진 유기랭킨사이클이다.

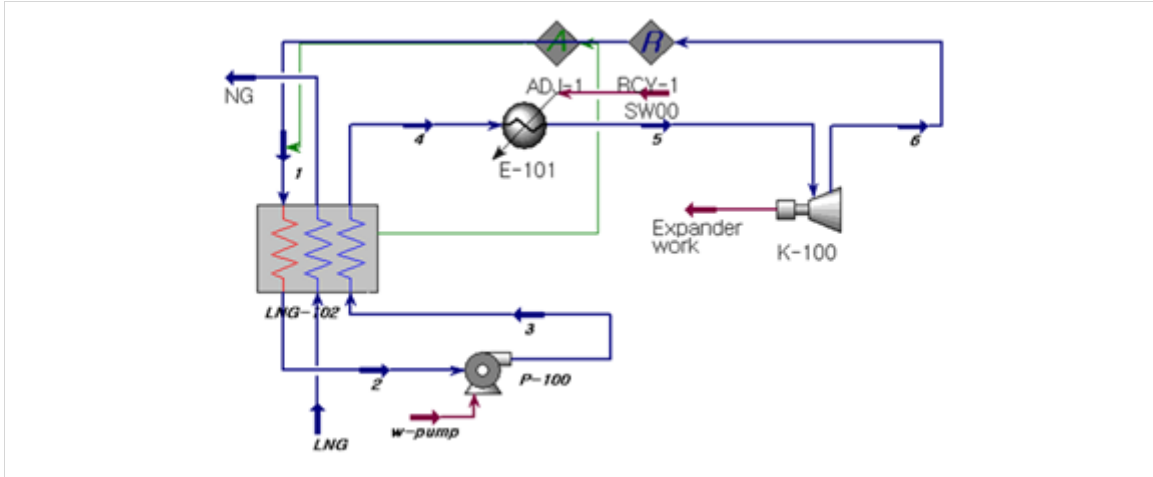


Fig. 5 Single-stage organic Rankine cycle using multistream heat exchanger

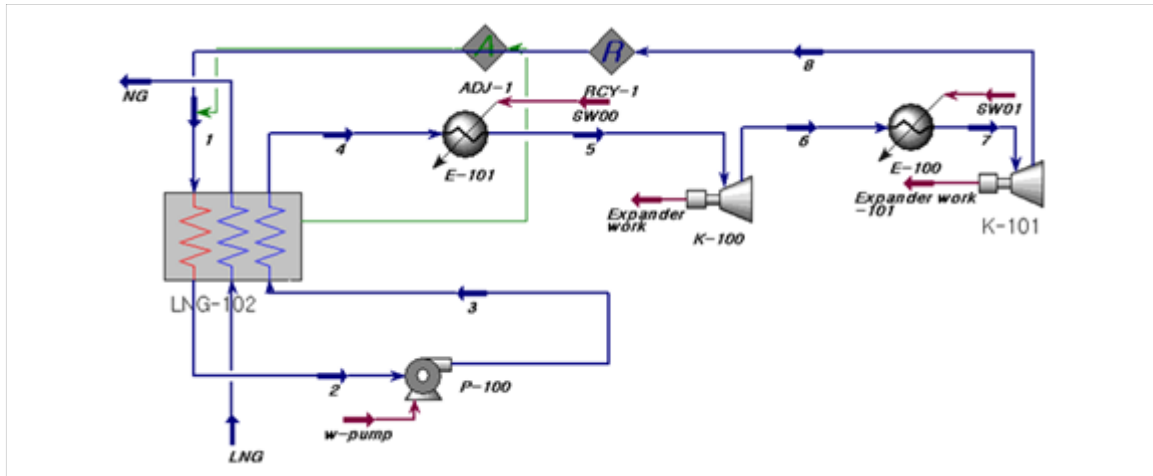


Fig. 6 Two-stage organic Rankine cycle

3. 결과

본 연구에서는 두 가지 발전방식에 대해 열역학 해석을 수행하였고 회수한 냉열 에너지와 터빈의 수가 각 사이클의 성능에 어떠한 영향을 미치는가를 확인하였다. LNG흐름은 저장탱크로부터 나온 후, 펌프로 가압된 과냉각 액체상태로 일반적으로 사용되는 운전조건은 -150°C , $3,700\text{ kPa}$ 이고, LNG냉열을 이용하여 생산할 수 있는 동력을 계산하기 위해 나머지 상태를 각각 결정하였다. 발전시스템은 초저온공정이므로 열교환기 내 고온과 저온 유체의 최소온도차가 5°C , 압력강하는 50 kPa 가 되도록 간주하였고, 펌프와 터빈에서는 열전달이 없다고 가정하였다. 발전시스템의 시뮬레이션 결과로부터 계산된 작동매체에 공급된 열, 생산동력 및 소비동력의 결과는 Table 2에 정리하였다.

Fig. 7에서는 발전방식에 따른 시스템의 순생산일, 공급된 열 그리고 열효율을 보여준다. 발전 시스템에서 가역성을 높이기 위해 직접팽창 방식(Case 1)에서 기액분리기 및 열교환기를 추가하고(Case 2) 유기랭킨사이클 방식(Case 4)에서 열교환 유체를 더하면(Case 5), 시스템의 순생산일 및 열효율이 증가한다. 열효율은 시스템에 공급한 열전달에 대한 순생산일로 정의되며, 터빈에 의하여 생성된 동력은 펌프에서 소요되는 동력보다 훨씬 크고 얻을 수 있는 순수한 동력은 시스템에 가해지는 열의 유입량과 시스템에서의 열의 방출량과의 차이와 같다.

Table 2 Simulation results of LNG cold power generation in Aspen HYSYS

	Case 1	Case 2	Case 3
Heat exchanger/ Heat Flow (kJ/h)			
E-100	2,460,719	13,170,855	13,170,922
E-101	671,076	129,324	129,028
E-102	-	-	745,579
Total Heat flow	13,131,795	13,300,179	14,045,529
Pump/ Power consumption (kJ/h)			
P-100		1,394	1,391
Turbine/ Production power (kJ/h)			
K-100	-	453,306	453,336
K-101	411,878	-	645,081
Total production power	411,878	453,306	1,098,417
	Case 4	Case 5	Case 6
Heat exchanger/ Heat Flow (kJ/h)			
E-100	6,011,430	14,290,678	14,238,536
E-101	-	-	419,267
LNG-102	5,846,915	11,385,144	7,694,406
Total Heat flow	11,858,345	25,675,823	22,352,209
Pump/ Power consumption (kJ/h)			
P-100	20,476	113,745	176,919
Turbine/ Production power (kJ/h)			
K-100	185,016	1,928,448	728,570
K-101	-	-	1,630,165
Total production power	185,016	1,928,448	2,358,735

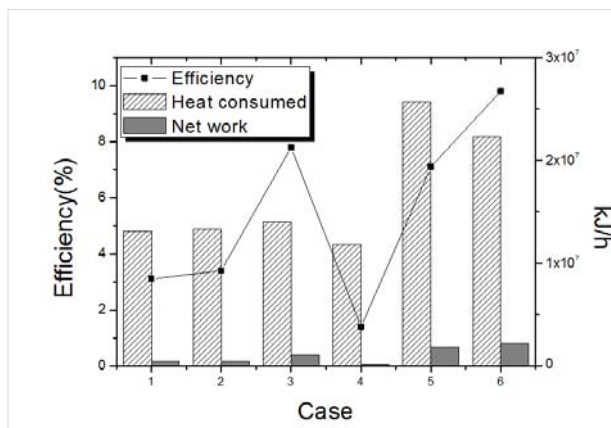


Fig. 7 Efficiency, heat input and net-work for each case

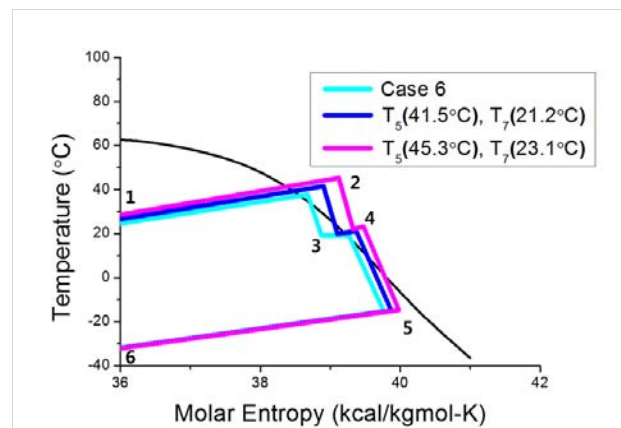


Fig. 8 Organic Rankine cycle for different evaporation temperature in T-S diagram

Case 2 는 터빈의 출구에서 분리된 액상의 작동매체가 재순환하여 해수와 함께 열원으로 회수되고, Case 5는 LNG 기화기에서 혼합냉매 증발열을 더하여 냉매를 기화시켜 발생한 터시시스템에서 방출되는 열을 회수하여 시스템에 더 많은 열을 공급한다. 즉 시스템에서의 열의 유입량과 방출량과의 차이가 커지기 때문에, Case 2(453,306 kJ/h)는 Case 1(411,878 kJ/h)의 1.1배로 발전출력이 증가하였고 Case

5(1,928,448 kJ/h)는 Case 4(185,016 kJ/h)의 10.4배로 보다 높은 발전출력으로 열효율이 증가한다.

더욱이 Case 3과 Case 6은 시스템에 공급된 열을 이용하여 더 많은 동력을 생산하기 위해 터빈을 추가함으로써 유효에너지의 활용도를 높였다. Case 3(1,098,417 kJ/h)의 경우, Case 2보다 645,111 kJ/h 더 높은 발전출력을 생산하였고, Case 6(2,358,735 kJ/h)의 경우, Case 5보다 430,287 kJ/h 더 높은 발전출력으로 시스템의 순생산일 및 열효율이 증가함을 보여준다.

Fig. 8에서는 터빈 입구온도 증가가 발전출력을 높이는 요인임을 나타내는 T-S 선도이다. 터빈의 입구온도를 독립변수로 설정하고 작동매체의 질량유량, 발전출력, 소비동력, 공급된 열을 종속변수로 설정하였다. 터빈으로 들어가는 흐름의 기화온도 경계조건을 터빈의 안정성 및 해수 가열기 성능을 감안하여 0~20%로 설정하고, 온도변화에 따른 명료한 결과를 나타내기 위해 10% 변화폭인 $T_5(41.5^\circ\text{C})$ 와 $T_7(21.2^\circ\text{C})$, $T_6(45.3^\circ\text{C})$ 와 $T_7(23.1^\circ\text{C})$ 으로 설정하였다. 여기에서 1-2 구간은 압축된 작동매체가 기화하는 과정으로 포화온도 이상의 온도로 작동매체를 가열한다. 2-3 구간은 작동매체를 팽창시켜 고압의 냉매가스로 터빈발전기를 구동하는 과정으로 포화곡선을 가로질러 액상을 포함하는 상태로 배출시킨다. 3-4 구간은 작동매체가 기화하는 과정으로 다시 포화온도 이상의 온도로 작동매체를 가열한 후, 4-5 구간에서 작동매체를 응축기의 압력으로 팽창시키는 과정으로 포화곡선을 가로질러 액상을 포함하는 상태로 배출시킨다. 5-6 구간은 응축기내에서 포화액체를 생산하는 과정이다. 면적은 가역변화에 대한 열량을 나타내므로 열역학 제 1법칙에 따라 발전출력을 의미하는데, 기화온도가 증가함에 따라 발전출력이 증가한다.

4. 결 론

냉열발전시스템은 발전방식에 따라 발전출력, 작동매체, 발전 시 파생하는 냉각효과, 등의 특성에 차이가 많다. 본 연구에서는 직접팽창방식과 유기랭킨사이클을 대상공정으로 하여 Aspen HYSYS로 모델링하였으며, 시뮬레이션을 통해 냉열에너지 이용효율을 높이고 발전출력을 최대로 하는 방법을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

직접팽창방식(Case 1)은 유기랭킨사이클방식(Case 4)보다 생산동력이 낮지만 장치를 추가로 활용하여 가역성을 높일 수 있는데, 기액분리기와 열교환기를 더하면 생산동력 및 효율이 증가한다. 특히, 다단터빈을 사용하고 중간에 해수 가열기를 설치하여 생산동력 및 열효율이 개선된다. 유기랭킨사이클(Case 4)은 냉열 이용효율을 높이기 위해 다단터빈을 사용하여 발전출력을 높이기보다는 LNG 기화기에서 세 유체를 열교환시키고 열을 회수하여 가역성을 높이는 것이 더 효과적이다. 더욱이 터빈의 입구온도를 증가시켜 생산동력 및 열효율을 개선할 수 있다.

후 기

이 논문은 2014년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) U.S. EIA, 2013, Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040, [http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf)
- (2) U.S. EIA, 2013, South Korea, http://www.eia.gov/countries/analysisbriefs/South_Korea/south_korea.pdf
- (3) Morisaki, T. and Ikegami, Y., 2014, "Maximum Power of a Multistage Rankine Cycle in Low Grade Thermal Energy Conversion," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 69, pp. 78~85.
- (4) Qiang, W., Li Y. and Jiang, W., 2004, "Analysis of Power Cycle Based on Cold Energy of Liquefied Natural Gas and Low-Grade Heat Source," *Applied Thermal Engineering*, 24, pp. 539~548.
- (5) Yun, E. K., Kim, H. D., Yoon, S. Y. and Kim, K. C., 2013, "Development of Small-Scale Organic Rankine Cycle System and Study on its Operating Characteristics," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 10, pp. 919~926.

- (6) Gao, H. Liu, C., He, Chao, Xu, X. Wo, S. and Li, Y., 2012, "Performance Analysis and Working Fluid Selection of a Supercritical Organic Rankine Cycle for Low Grade Waste Heat Recovery," *Energies*, 5, pp. 3233~3247.
- (7) Sun, H. Zhu, H., Liu, and Ding, H., 2014, "Simulation and Optimization of a Novel Rankine Power Cycle for Recovering Cold Energy from Liquefied Natural Gas Using a Mixed Working Fluid," *Energy*, 70, pp. 317~324.
- (8) Zhang, L. and Tnag, Q., 2012, "Comparison of Different Power Generation Processes by LNG Cold Energy," *AASRI Procedia*, 2, pp. 31~38.
- (9) Choi, I. H., Lee, S., Seo, Y. and Chang, D., 2013, "Analysis and Optimization of Cascade Rankine Cycle for Liquefied Natural Gas Cold Energy Recovery," *Energy*, 61, pp. 179~195.
- (10) Gomez, M. R., Garcia, R. F. and Gomez, J. R., 2014, "Thermodynamic Analysis of a Braton Cycle and Rankine Cycle Arranged in Series Exploiting the Cold Exergy of LNG (Liquefied Natural Gas), *Energy*, 66, pp. 927~937.
- (11) Wang, J., Yan, Z., Wang, M. and Dai, Y., 2013 "Thermodynamic Analysis and Optimization of an Ammonia-Water Power System with LNG (Liquefied Natural Gas) as Its Heat Sink," *Energy*, 50, pp. 513~522.
- (12) Kim, K. H., Ha, J. M. and Kim, K. C., 2014, " Thermodynamic Performance Characteristics of Organic Rankine Cycle (ORC) Using LNG Cold Energy," *KIGAS*, Vol. 18, No. 2, pp. 41~47.
- (13) Streit, J. and Razani, A., 2013, "Thermodynamic Optimization of Reverse Brayton Cycles of Different Configurations for Cryogenic Applications," *International Journal Of Refrigeration*, 36, pp. 1529~1544.
- (14) Wang, H., Shi, X. and Che, D., 2013, "Thermodynamic Optimization of the Operating Parameters for a Combined Power Cycle Utilizing Low-Temperature Waste Heat and LNG Cold Energy," *Applied Thermal Engineering*, 59, 490~497.
- (15) Xu, X., Liu, J. Cao, L. and Pang, W., 2014, "Automatically Varying the Composition of a Mixed Refrigerant Solution for Single Mixed Refrigerant LNG (Liquefied Natural Gas) Process at Changing Working Conditions," *Energy*, 64, pp. 931~941.
- (16) Yeo, G. C., 2010, "Plant Modeling, Applications of an Engineering Model Under an Operating Environment," *NICE*, Vol. 28, No. 1, pp. 32~36.
- (17) Nasri, Z. and Binous, H., 2009, "Applications of the Peng-Robinson Equation of State Using Matlab," *Chemical Engineering Education*, Vol. 43, No. 2, pp.1~10.