

LNG 냉열을 이용하는 암모니아-물 랭킨 사이클과 유기 랭킨 사이클의 열역학적 성능 특성 해석

김경훈[†]

금오공과대학교 기계공학과

Thermodynamic Performance Analysis of Ammonia-Water Rankine Cycle and Organic Rankine Cycle Using Cold Energy of LNG

KYOUNG HOON KIM[†]

Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

[†]Corresponding author :
khkim@kumoh.ac.kr

Received 6 July, 2020
Revised 10 August, 2020
Accepted 30 August, 2020

Abstract >> Recently, the technologies to utilize the cold energy of liquefied natural gas (LNG) have attracted significant attention. In this paper, thermodynamic performance analysis of combined cycles consisting of ammonia Rankine cycle (AWR) and organic Rankine cycle (ORC) with LNG Rankine cycle to recover low-grade heat source and the cold energy of LNG. The mathematical models are developed and the effects of the important system parameters such as turbine inlet pressure, ammonia mass fraction, working fluid on the system performance are systematically investigated. The results show that the thermal efficiency of AWR-LNG cycle is higher but the total power production of ORC-LNG cycle is higher.

Key words : Ammonia-water Rankine cycle(암모니아-물 랭킨 사이클), Organic Rankine cycle(유기 랭킨 사이클, ORC), LNG(액화 천연가스), Cold energy(냉열 에너지), Low grade heat source(저등급 열원)

1. 서론

오늘날 천연가스(natural gas, NG)는 수송성, 연소 효율, 온실가스 배출 등에 있어서의 장점 때문에 수요가 급증하고 있으며, 전통적인 화석연료와 미래의 신재생 에너지를 이어주는 다리 역할을 하고 있는 것으로 평가받고 있다¹⁾. 액화천연가스(liquefied natural

gas, LNG)는 천연가스를 대기압에서 -162°C 의 온도로 냉각시켜 얻어진다. 1 m^3 의 LNG는 625 m^3 의 천연가스를 담고 있기 때문에 수송성이 뛰어나며 LNG의 공급은 가스 생산, 액화, 수송, 저장 및 재기화(regasification) 과정으로 구성된다. -162°C 의 LNG는 25°C 의 가스로 기화하는 과정에서 약 830 kJ/kg 의 냉열 에너지(cold energy)가 발생한다^{2,3)}. 2017년도 전

세계 LNG의 냉열 에너지는 20.9 GW (6.598×10^{14} kJ/yr)에 달하며 국가나 지역별로는 일본 5.21 GW, 유럽 3.98 GW, 미국 3.39 GW, 대한민국 2.65 GW, 중국 1.85 GW 등이다⁴⁾. 이렇게 막대한 LNG의 냉열을 효과적으로 이용한다면 LNG 공급 과정의 효율을 높이고 온실가스 배출을 크게 줄일 수 있다⁵⁾.

LNG의 기화 과정에서 냉열 에너지를 저등급 열원을 사용하는 열동력 사이클의 열싱크로 활용하면 응축기에서의 압력 감소로 인해 열역학적 사이클의 효율을 높이고 시스템의 출력을 증대시킬 수 있으며, 기화된 LNG 가스를 이용해서 추가적인 동력을 생산할 수도 있다^{6,7)}. Liu 등⁸⁾은 연소 폐열과 LNG 냉열 에너지를 이용하는 동력, 열 및 냉동의 삼중 열병합 복합 사이클을 제안하고 해석하였다. Park 등⁹⁾은 LNG 냉열 에너지 회수를 위한 새로운 저장 시스템을 제안하고 해석하였다. Chang 등¹⁰⁾은 LNG 냉열 에너지와 브레이튼 냉동 사이클을 이용하는 수소액화 공정을 제안하고 해석하였다.

저등급 열원과 LNG 냉열 에너지를 이용하는 열동력 사이클은 암모니아·물 혼합물을 작동유체로 사용하는 랭킨 사이클(ammonia-water Rankine cycle,

AWR)과 유기 랭킨 사이클(organic Rankine cycle, ORC)이 경쟁력 있는 시스템들로 평가되고 있다^{11,12)}. Lim과 Choi¹³⁾는 LNG를 연료로 하는 선박에서 LNG 냉열 에너지를 이용하는 ORC 시스템을 제안하고 해석하였다. Choi 등¹⁴⁾은 다단 ORC와 LNG 냉열 에너지를 이용하는 복합 사이클을 제안하고 해석하였다. Rao 등¹⁵⁾은 태양 에너지를 저온 열원으로 사용하는 ORC-LNG 복합 사이클에 대해 연구하였다. Lee 등¹⁶⁾은 ORC-LNG 복합 사이클에서 22종류의 작동유체에 대한 성능 해석을 통해 R170, R134a 및 R290의 경우가 성능이 우수함을 보고하였다. Lee와 Kim¹⁷⁾은 AWR-LNG 복합 사이클에 대해 연구하였으며, Kim 등^{18,19)}은 ORC-LNG 복합 사이클의 열역학적 성능 특성을 연구하였다.

본 논문에서는 현열 형태의 저등급 열원을 이용하고 LNG의 냉열 에너지를 이용하는 AWR-LNG 복합 사이클과 ORC-LNG 복합 사이클의 열역학적 성능 특성을 비교 해석한다. 터빈 입구 압력의 변화에 따라 AWR에서는 40%, 50%, 60%, 70%, 80%의 암모니아 농도를 그리고 ORC에서는 R123, R600, R290, R134a 및 R22의 다섯 가지 작동유체를 고려하여

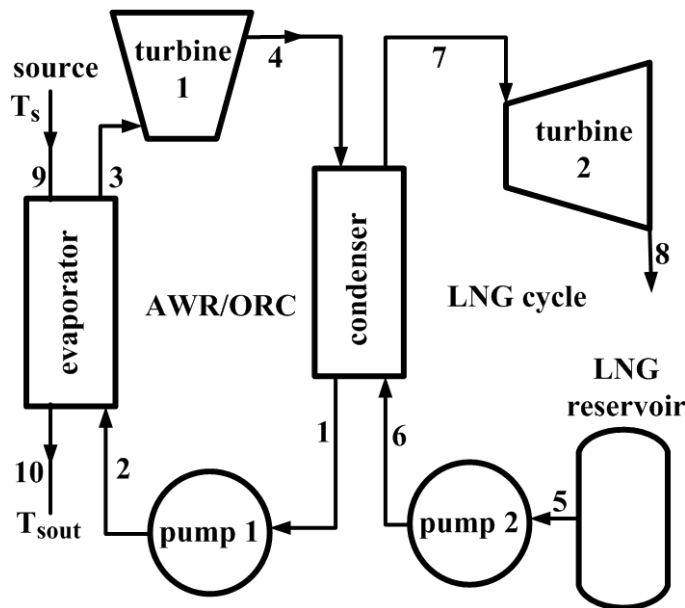


Fig. 1. Schematic diagram of the system

AWR-LNG 복합 사이클과 ORC-LNG 복합 사이클의 성능 변화에 미치는 영향을 분석한다.

2. 시스템 해석

본 논문 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. 저원 열원으로 동작하는 AWR이나 ORC의 동력 사이클은 증발기, 터빈 1, 펌프 1 및 응축기 등으로 구성되어 있고, LNG 사이클은 펌프 2와 터빈 2로 구성되어 있으며 동력 사이클에서 응축기는 LNG 사이클에서 증발기로 기능한다.

본 연구에서는 해석을 위해 다음과 같은 가정을 한다^{18,19}. 1) 터빈 입구 압력은 작동유체의 임계압력보다 낮은 아임계 사이클이다. 2) LNG는 순수 메탄(CH₄)이다. 3) 열원은 입구 온도 T_s로 유입되는 표준 공기이다. 4) 터빈 입구에서 작동유체는 순수 증기 상태이다. 5) 시스템에서 열교환기를 제외한 열손실은 무시한다. 6) 터빈과 펌프 이외에서의 압력 변화는 무시한다. 7) 펌프와 터빈에서의 등엔트로피 효율은 각각 η_p와 η_t로 일정하다. 8) 열교환기에서는 고온과 저온 유체의 최소 온도차는 미리 설정한 핀치 포인트와 같다.

열원유체의 질량유량이 m_s일 때 동력 사이클과 LNG 사이클의 질량유량 m_w 및 m_L은 열교환기에서의 에너지 균형으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_w = \frac{m_s(h_9 - h_{10})}{h_3 - h_2} \quad (1)$$

$$m_L = \frac{m_w(h_4 - h_1)}{h_7 - h_6} \quad (2)$$

여기에서 h는 비엔탈피를 나타낸다.

증발기 및 응축기에서의 열전달, 동력 및 LNG 사이클의 출력, 시스템의 총출력 및 열효율을 각각 Q₁, Q₂, W_{ORC}, W₁, W₂, W_{tot} 및 η_{th}라 하면 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_1 = m_w(h_3 - h_2) \quad (3)$$

$$Q_2 = m_w(h_4 - h_1) \quad (4)$$

$$W_1 = m_w(h_3 - h_4) - m_w(h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$W_2 = m_L(h_7 - h_8) - m_L(h_6 - h_5) \quad (6)$$

$$W_{tot} = W_1 + W_2 \quad (7)$$

$$\eta_{th} = W_{net}/Q_1 \quad (8)$$

열교환기에서 열전달용량(heat transfer capability) UA는 열전달계수가 극심하게 변하지 않는다는 전제 하에 어느 정도까지는 근사적으로 열교환기의 열전달 면적을 반영한다고 할 수 있다. 시스템의 총 열전달용량 UA_{tot}은 동력 사이클과 LNG 사이클의 열전달용량의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다^{18,19}.

$$UA_{tot} = \frac{Q_1}{\Delta T_{m, evp}} + \frac{Q_2}{\Delta T_{m, con}} \quad (9)$$

여기에서 ΔT_m은 로그 평균 온도차로서 다음과 같이 정의된다¹⁹.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln(\Delta T_{max}/\Delta T_{min})} \quad (10)$$

ORC의 작동유체는 임계온도가 높은 순으로 R123, R600, R290, R134a 및 R22의 다섯 종류를 고려하며 작동유체의 분자량 M, 임계온도 T_{cr}, 임계압력 P_{cr}, global warming potential (GWP), ozone depletion potential (ODP) 등 기본적인 데이터들을 Table 1에서 보여주며 온도에 따른 증기압의 변화를 Fig. 2에 보여준다. 본 논문에서 암모니아-물 혼합물의 열역학 상태량은 Xu와 Goswami²⁰의 방법을 따랐으며, ORC 작동유체의 열역학 상태량은 Patel-Teja 방정식을 이용하여 계산하였다^{21,22}.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 열원 유체는 1 kg/s의 표준 공기로 가정하며 시뮬레이션을 위한 기본적인 시스템 데이터

Table 1. Basic thermodynamic data of working fluids

Substance	M (kg/kmol)	T _{cr} (K)	P _{cr} (bar)	Global warming potential	Ozone depletion potential
R123	136.467	456.90	36.74	79	0.02
R600	58.123	425.18	37.97	4	0
R290	44.096	396.82	42.49	3.3	0
R134a	102.031	380.00	36.90	1,300	0
R22	86.468	369.30	49.71	1,760	0.05

는 다음과 같다. 열원 온도 $T_s=200^\circ\text{C}$, 터빈 입구 온도 $T_H=190^\circ\text{C}$, 응축 온도 $T_c=-10^\circ\text{C}$, 핀치 포인트 온도차 $\Delta T_{pp}=8^\circ\text{C}$, LNG 터빈 입구 압력 $P_{H2}=10\text{ bar}$, LNG 터빈 출구 압력 $P_{L2}=1.014\text{ bar}$, 펌프 효율 $\eta_p=0.7$, 터빈 효율 $\eta=0.7^{19}$. Fig. 3에서는 AWR-LNG에서 터빈 입구 압력이 20 bar일 때 암모니아 분율이 40%, 50%, 60%, 70% 및 80%인 경우에 대한 T-S 선도를 보여주며, Fig. 4에서는 ORC-LNG에서 터빈 입구 압력이 20 bar일 때 작동유체가 R123, R600, R290, R134a 및 R22인 경우에 대한 T-S 선도를 보여준다.

Fig. 5는 AWR나 ORC의 동력 사이클에서 터빈 입구 압력, AWR의 암모니아 질량 분율 그리고 ORC의 작동유체가 변할 때 작동유체의 질량유량 m_w 에 미치는 영향을 보여준다. AWR에서 작동유체의 질량유량은 터빈 입구 압력이 높아지거나 주어진 터빈 입구 압력에서 암모니아 분율이 낮아짐에 따라 감소한다. 또한 터빈 입구 압력의 증가에 따른 질량유량의 감소율은 암모니아 분율이 높아질수록 낮아진다. ORC에서 작동유체의 질량유량은 터빈 입구 압력의 증가에 따라 R123이나 R600의 경우처럼 작동유체의 임계온도가 상대적으로 높은 경우에는 감소하지만

R290, R134a 및 R22의 경우에는 감소하다가 증가하여 작동유체의 질량유량은 터빈 입구 압력에 대해 극소값을 갖는다. 그러나 R123의 경우를 제외하고 터빈 입구 압력의 증가에 따른 작동유체의 변화는 매우 작다. 그리고 주어진 터빈 입구 압력에서 AWR에서의 질량유량은 작동유체의 임계온도가 낮아질수

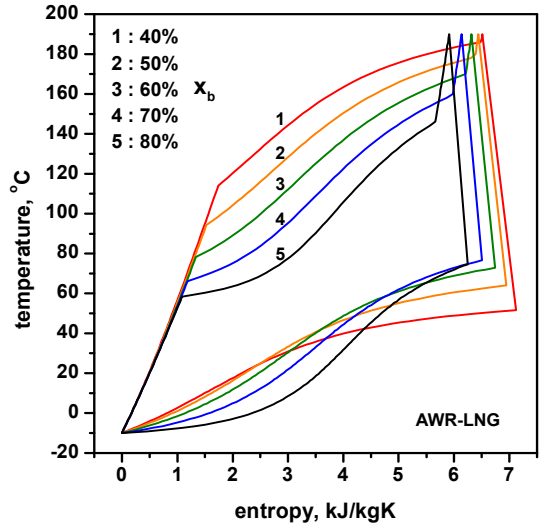


Fig. 3. Effects of turbine inlet pressure on the mass flow rate of AWR/ORC

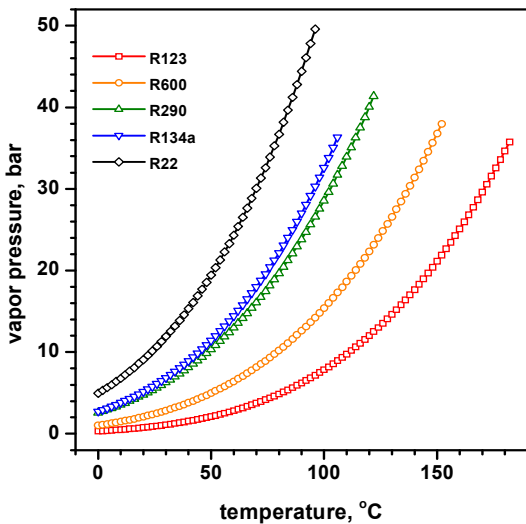


Fig. 2. Effects of turbine inlet pressure on the mass flow rate of AWR/ORC

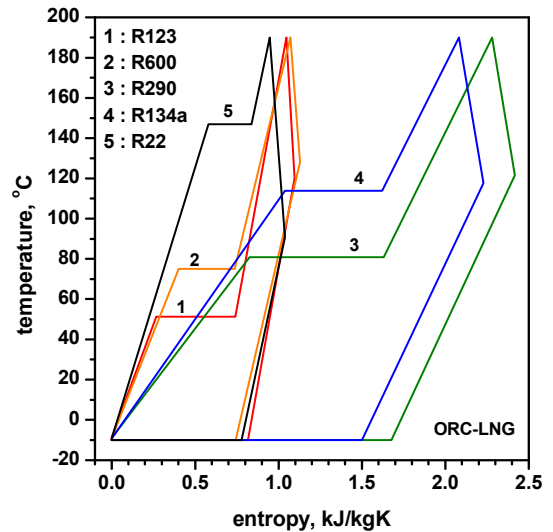


Fig. 4. Effects of turbine inlet pressure on the mass flow rate of AWR/ORC

록 커져서 R22의 경우에 가장 크고 R123의 경우에 가장 작다. 또한 작동유체의 질량유량은 AWR의 경우가 ORC의 경우에 비해 현저하게 작으며, 이는 암모니아-물의 증발잠열이 ORC의 경우에 비해 훨씬 크기 때문이다.

Fig. 6은 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 LNG의 질량유량 m_L 에 미치는 영향을 보여준다. AWR에서 LNG의 질량유량도 터빈 입구 압력이 높아지거나 암모니아 분율이 낮아질수록 감소한다. ORC에서 LNG의 질량유량은 터빈 입구 압력의 증가에 따라 감소하다가 증가하여 극소값을 가지며, 질량유량이 극소가 되는 터빈 입구 압력은 작동유체의 임계온도가 높아질수록 커지다가 R123의 경우에는는 조사 범위에서 단소 감소하게 된다.

Fig. 7과 Fig. 8에서는 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 증발기와 응축기에서의 열전달에 미치는 영향을 보여준다. AWR의 경우에 증발기에서의 열전달과 응축기에서의 열전달 모두 터빈 입구 압력이 증가할수록 감소하고 암모니아 분율이 증가할수록 증가한다. 또한 ORC의 경우에 증발기에서의 열전달과 응축기에서의 열전달 모두 터빈 입구 압력이 증가할수록 감소하고 또 작

동유체의 임계압력이 낮아질수록 증가해서 주어진 터빈 입구 압력에서 R123의 경우에 가장 작고 R22의 경우에 가장 크다. 또한 시스템의 에너지 보존법칙으로부터 증발기에서의 열전달은 응축기에서의 열전달보다 AWR이나 ORC에서의 순 출력만큼 작다.

Fig. 9는 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고

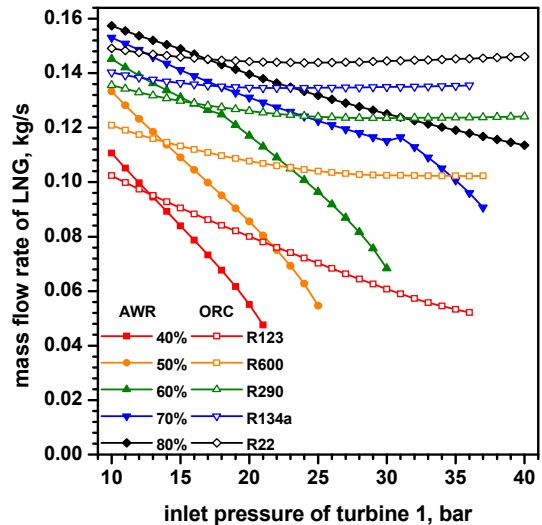


Fig. 6. Effects of turbine inlet pressure on the mass flow rate of LNG

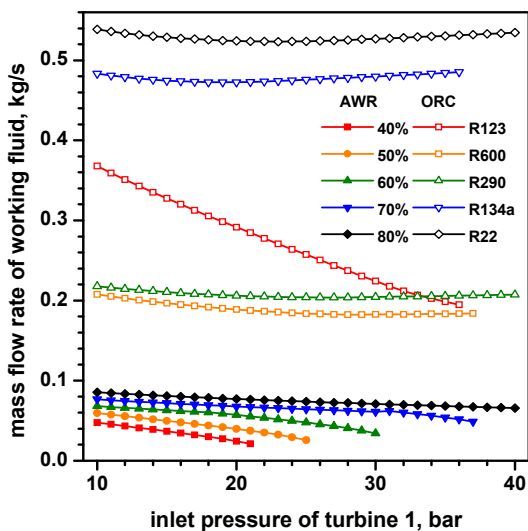


Fig. 5. Effects of turbine inlet pressure on the mass flow rate of AWR/ORC

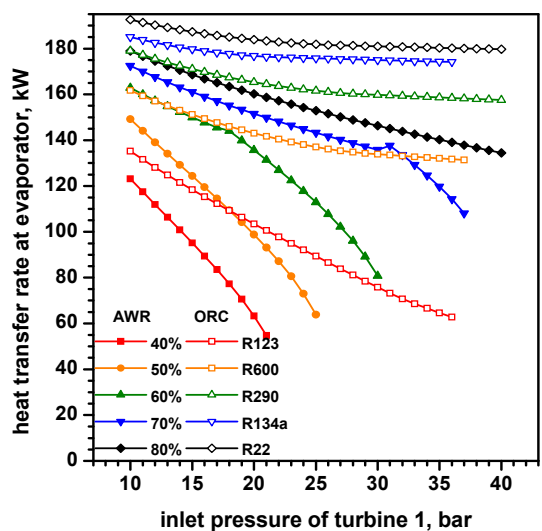


Fig. 7. Effects of turbine inlet pressure on the heat transfer rate of evaporator

고 작동유체의 변화가 시스템의 열전달 용량에 미치는 영향을 보여준다. AWR에서 시스템의 열전달 용량은 터빈 입구 압력이 높아질수록 감소하고 작동유체의 암모니아 분율이 낮아질수록 증가한다. ORC에서 열전달 용량은 터빈 입구 압력이 증가할수록 감소하고 작동유체의 임계온도가 낮아질수록 증가하여, R123의 경우에 가장 작고 R22의 경우에 가장 크다.

Fig. 10은 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 동력 사이클의 출력에 미치는 영향을 보여준다. AWR에서 동력 사이클의 출력은 터빈 입구 압력이 높아질수록 감소하고 작동유체의 암모니아 분율이 낮아질수록 증가한다. ORC에서 터빈 입구 압력이 증가함에 따라 출력은 R123의 경우에는 감소하나 나머지 작동유체의 경우에는 증가한다. 또한 ORC 출력은 터빈 입구 압력이 12 bar 이하에서는 R123, 16 bar 이하에서 R600, 24 bar 이하에서 R290 그리고 30 bar 이하에서는 R22의 경우에 출력이 최대로 된다.

Fig. 11은 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 LNG 사이클의 출력에 미치는 영향을 보여준다. AWR 시스템에서 LNG 사이클

의 출력은 터빈 입구 압력이 높아질수록 감소하고 작동유체의 암모니아 분율이 높아질수록 증가한다. 또한 ORC 시스템에서 LNG 사이클의 출력은 터빈 입구 압력이 높아질수록 감소하고 작동유체의 임계온도가 높아질수록 감소하여, R123의 경우에 가장 작고 R22의 경우에 가장 크다.

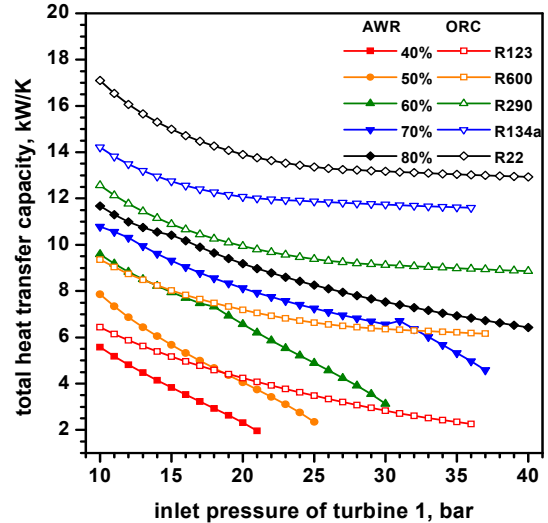


Fig. 9. Effects of turbine inlet pressure on the total heat transfer capacity

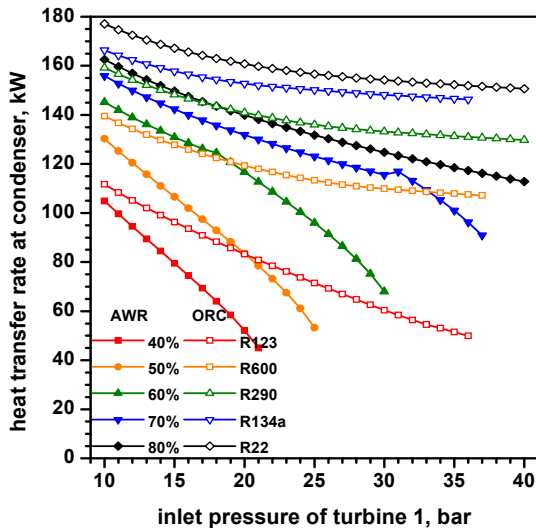


Fig. 8. Effects of turbine inlet pressure on the heat transfer rate of condenser

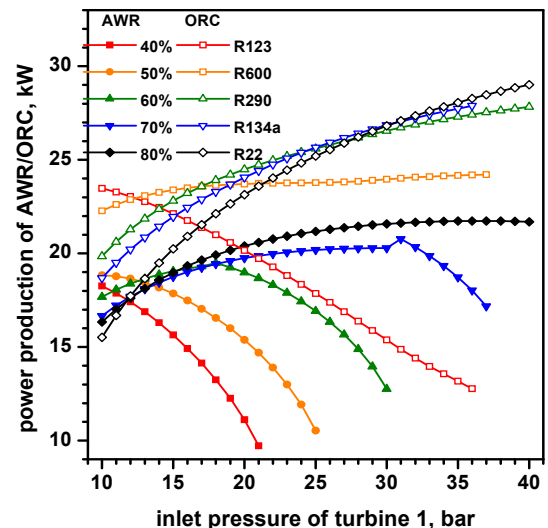


Fig. 10. Effects of turbine inlet pressure on the power production of AWR/ORC

Fig. 12는 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 동력 사이클의 출력과 LNG 사이클 출력의 합인 복합 사이클의 총출력에 미치는 영향을 보여준다. AWR 시스템에서 총출력은 터빈 입구 압력이 높아질수록 감소하고 작동유체의 암모니아 분율이 높아질수록 증가한다. ORC 시스템에서

터빈 입구 압력이 증가할 때 총 출력은 R123과 R600 처럼 작동유체의 임계온도가 상대적으로 높은 경우에는 감소하고 작동유체가 R290의 경우에는 거의 일정한 값을 유지하며 작동유체가 R134a와 R22처럼 작동유체의 임계온도가 상대적으로 낮은 경우에는 증가한다. 그리고 주어진 터빈 입구 압력에서 총출력은

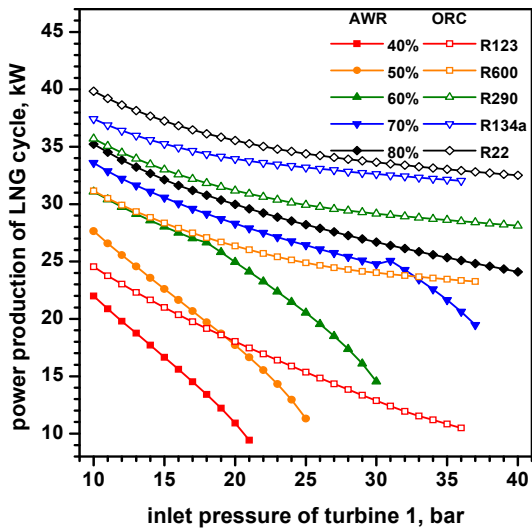


Fig. 11. Effects of turbine inlet pressure on the power production of LNG cycle

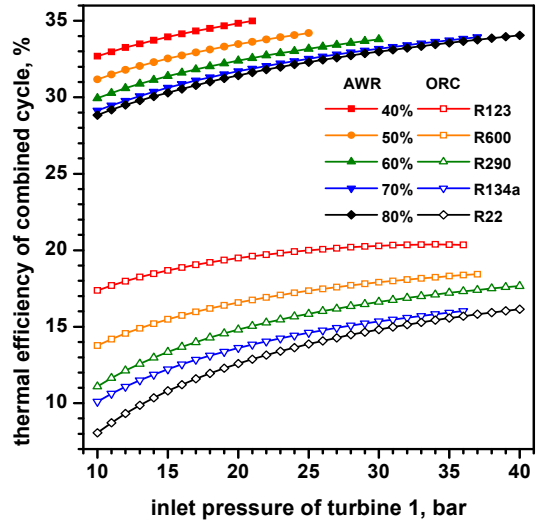


Fig. 13. Effects of turbine inlet pressure on the thermal efficiency of the combined cycle

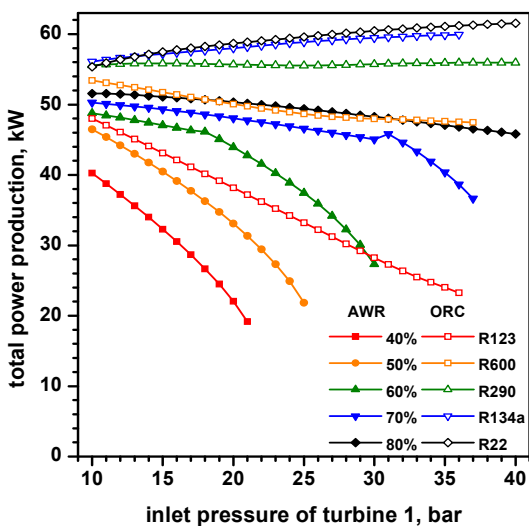


Fig. 12. Effects of turbine inlet pressure on the total power production of the combined cycle

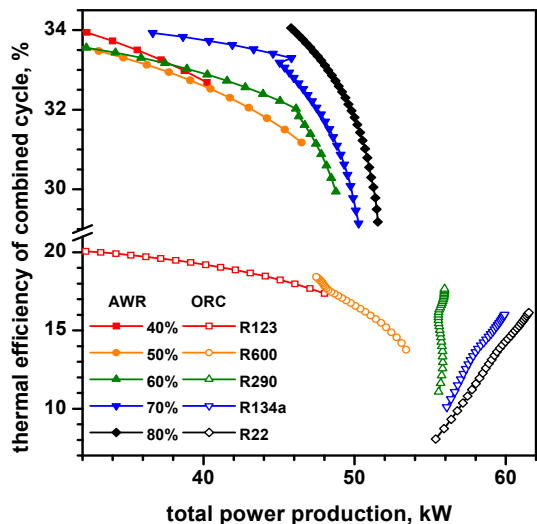


Fig. 14. Effects of turbine inlet pressure on the thermal efficiency and total power production of the combined cycle

작동유체의 임계온도가 높을수록 작아져서 R123의 경우에 가장 작고 R22의 경우에 가장 크다.

Fig. 13은 터빈 입구 압력, 암모니아 질량 분율 그리고 작동유체의 변화가 복합 사이클의 열효율에 미치는 영향을 보여준다. AWR에서 열효율은 터빈 입구 압력이 높아짐에 따라 증가한다. 이는 시스템의 열효율은 열원유체에 의한 시스템의 총출력의 비로서 정의되는데, Fig. 8과 Fig. 4에서 보듯이 터빈 입구 압력이 증가함에 따라 시스템의 총출력이 감소하지만 시스템의 유입열은 더 빠른 속도로 감소하기 때문이다. 주어진 터빈 입구 압력에서 시스템의 열효율은 암모니아 분율이 높아질수록 감소하는데, 이는 암모니아 분율이 높아질수록 시스템의 총출력이 증가하나 시스템의 유입열이 더 빠른 속도로 증가하기 때문이다. ORC 시스템에서 터빈 입구 압력의 증가함에 따라 열효율이 증가하는데, 이는 작동유체가 R123의 경우에 총출력이 감소해도 시스템 유입열이 더 빠르게 감소하기 때문이다. 또한 시스템 열효율은 작동유체의 임계온도가 높아짐에 따라 증가하여 R123의 경우가 가장 높고 R22의 경우가 가장 낮다.

Fig. 12과 Fig. 13에서의 총출력과 열효율의 관계를 보여주었는데, Fig. 14는 총출력을 수평축으로 하고 열효율을 수직축으로 한 특성화 관계를 보여주며 이로부터 AWR-LNG 시스템은 열효율 측면에서 유리하고 ORC-LNG 시스템은 총출력 측면에서 유리한 사실을 보다 더 명확히 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 저등급 열원 및 LNG 냉열 에너지를 회수하기 위한 AWR-LNG 복합 사이클과 ORC-LNG 복합 사이클의 열역학적 성능 특성을 비교 분석하였다. 해석에서 열원은 200℃, 1 kg/s의 표준 공기로 가정하며, AWR에서는 40%, 50%, 60%, 70% 및 80%의 암모니아 질량 분율을 고려하였으며 ORC에서는 R123, R600, R290, R134a 및 R22의 다섯 종류의 작동유체를 고려하였다. 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

1) AWR-LNG 시스템은 ORC-LNG 시스템에 비해 작동유체의 질량유량은 현저하게 작지만 LNG의 질량유량은 같은 정도의 크기를 갖는다.

2) AWR-LNG 시스템과 ORC-LNG 시스템 모두 증발기와 응축기에서의 열전달은 터빈 입구 압력이 낮아질수록, 암모니아 질량분율이 높아질수록 그리고 작동유체의 임계온도가 낮아질수록 증가한다.

3) ORC-LNG 시스템에서 터빈 입구 압력이 증가함에 따라 총출력은 R22, R134a는 증가하고 R290은 일정하게 유지하며 R600, R123은 감소하는 반면에 열효율은 모든 경우에 증가한다. 작동유체의 임계온도가 높아질수록 총출력은 증가하고 열효율은 떨어진다.

4) AWR-LNG 시스템은 ORC-LNG 시스템에 비해 열효율은 높고 총출력은 낮다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(NRF-2018R1D1A1B07048866).

References

1. V. Smil, "Natural gas: fuel for the 21st century", John Wiley & Sons, USA, 2015.
2. T. He, I. A. Karimi, and Y. Ju, "Review on the design and optimization of natural gas liquefaction processes for onshore and offshore applications", Chem. Eng. Res. Des., Vol. 132, 2018, pp. 89-114, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.002>.
3. K. H. Kim, J. H. Oh, and H. J. Ko, "Performance analysis of a combined power cycle utilizing low-temperature heat source and LNG cold energy", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 382-389, doi: <http://dx.doi.org/10.7316/KHNES.2012.23.4.382>.
4. International Gas Union (IGU), "IGU world LNG report — 2017 edition", IGU, 2017. Retrieved from https://www.igu.org/app/uploads-wp/2017/04/103419-World_IGU_Report_FINAL_LR.pdf.
5. T. He, Z. R. Chong, J. Zheng, Y. Ju, and P. Linga, "LNG cold energy utilization: prospects and challenges", Energy, Vol. 170,

- 2019, pp. 557-568, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>.
6. M. R. Gómez, R. F. Garcia, J. R. Gómez, and J. C. Carril, "Review of thermal cycles exploiting the exergy of liquefied natural gas in the regasification process". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 38, 2014, pp. 781-795, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.029>.
 7. K. H. Kim, J. M. Ha, and K. C. Kim, "Effects of working fluids on the performance characteristics of organic rankine cycle (ORC) using lng cold energy as heat sink", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 25, No. 2, 2014, pp. 200-208, doi: <https://doi.org/10.7316/khnes.2014.25.2.200>.
 8. Y. Liu, J. Han, and H. You, "Exergoeconomic analysis and multi-objective optimization of a CCHP system based on LNG cold energy utilization and flue gas waste heat recovery with CO₂ capture", *Energy*, Vol. 190, 2020, pp. 116201, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116201>.
 9. J. Park, F. You, H. Cho, I. Lee, and I. Moon, "Novel massive thermal energy storage system for liquefied natural gas cold energy recovery", *Energy*, Vol. 195, 2020, pp. 117022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117022>.
 10. H. M. Chang, B. H. Kim, and B. Choi, "Hydrogen liquefaction process with Brayton refrigeration cycle to utilize the cold energy of LNG", *Cryogenics*, Vol. 108, 2020, pp. 103093, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2020.103093>.
 11. Y. Liu, J. Han, and H. You, "Performance analysis of a CCHP system based on SOFC/GT/CO₂ cycle and ORC with LNG cold energy utilization", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 56, 2019, pp. 29700-29700, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.201>.
 12. H. Habibi, M. Zoghi, A. Chitsaz, K. Javaher, and M. Ayazpour, "Thermo-economic analysis and optimization of combined PERC - ORC - LNG power system for diesel engine waste heat recovery", *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 173, 2018, pp. 613-625, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.005>.
 13. T. W. Lim and Y. S. Choi, "Thermal design and performance evaluation of a shell-and-tube heat exchanger using LNG cold energy in LNG fuelled ship", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 171, 2020, pp. 115120, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115120>.
 14. I. H. Choi, S. I. Lee, Y. T. Seo, D. J. Chang, "Analysis and optimization of cascade Rankine cycle for liquefied natural gas cold energy recovery", *Energy*, Vol. 61, 2013, pp. 179-195, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.08.047>.
 15. W. J. Rao, L. J. Zhao, C. Liu, and M. G. Zhang, "A combined cycle utilizing LNG and low-temperature solar energy", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 60, No. 1-2, 2013, pp. 51-60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.06.043>.
 16. Y. Lee, J. Kim, U. Ahmed, C. Kim, and Y. W. Lee, "Multi-objective optimization of organic Rankine cycle (ORC) design considering exergy efficiency and inherent safety for LNG cold energy utilization", *J. Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 58, 2019, pp. 90-101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.01.006>.
 17. H. Y. Lee and K. H. Kim, "Energy and exergy analyses of a combined power cycle using the organic rankine cycle and the cold energy of liquefied natural gas", *Entropy*, Vol. 17, No. 9, 2015, pp. 6412-6432, doi: <https://doi.org/10.3390/e17096412>.
 18. K. H. Kim and K. C. Kim, "Thermodynamic performance analysis of a combined power cycle using low grade heat source and LNG cold energy", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 70, No. 1, 2014, pp. 50-60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.04.064>.
 19. K. H. Kim, Y. G. Jung, and C. H. Han, "Performance characteristics analysis of combined cycle using regenerative organic rankine cycle and LNG cold energy", *Trans. Korean Hydrogen New Energy Society*, Vol. 31, No. 2, 2020, pp. 234-241, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.2.234>.
 20. F. Xu and D. Y. Goswami, "Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power-cycle applications", *Energy*, Vol. 24, No. 6, 1999, pp. 525-536, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(99\)00007-9](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(99)00007-9).
 21. T. Yang, G. J. Chen, and T. M. Guo, "Extension of the Wong-Sandler mixing rule to the three-parameter Patel-Teja equation of state: application up to the near-critical region", *Chem. Eng. J.*, Vol. 67, No. 1, 1997, pp. 27-36, doi: [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(97\)00012-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(97)00012-0).
 22. J. Gao, L. D. Li, Z. Y. Zhu, and S. G. Ru, "Vapor-liquid equilibria calculation for asymmetric systems using Patel-Teja equation of state with a new mixing rule", *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 224, No. 2, 2004, pp. 213-219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2004.05.007>.