

신재생에너지로 구동되는 칼리나 사이클 기반 삼중 병합 생산 시스템의 열역학적 성능 특성

한철호¹ · 김경훈² · 정영관^{2,†}

¹금오공과대학교 기계시스템공학과, ²금오공과대학교 기계공학과

Thermodynamic Performance Characteristics of a Tri-Cogeneration System Based on Kalina Cycle Driven by Renewable Energy

CHUL HO HAN¹, KYOUNG HOON KIM², YOUNG GUAN JUNG^{2,†}

¹Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 39177, Korea

†Corresponding author :
jyg_kr@kumoh.ac.kr

Received 3 November, 2021
Revised 23 November, 2021
Accepted 14 December, 2021

Abstract >> The recently proposed Kalina based power and cooling cogeneration cycles (KPCCCs) have shown improvement in the energy utilization of the system compared to the basic Kalina cycle. This paper suggests a combined tri-cogeneration system for power, heating and cooling based on the Kalina cycle. And thermodynamic performances of the suggested system based on the first and second thermodynamic laws are parametrically investigated with respect to the ammonia mass fraction and the boiler pressure. Results showed that the thermodynamic performance of the system could be greatly improved compared to the former KPCCCs.

Key words : Tri-cogeneration system(삼중 병합생산 시스템), Process heat(공정열), Kalina cycle(칼리나 사이클), Low-grade heat source(저등급 열원), Ammonia fraction(암모니아 분율)

1. 서론

열동력 시스템에서 전기나 기계 동력의 생산뿐 아니라 공정열이나 냉열 등을 병합 생산하면 시스템의 효율을 획기적으로 높이고 에너지를 효율적으로 사용할 수 있으며, 신재생 에너지로 구동되는 열동력 시스템에서도 병합생산에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^{1,2)}. 암모니아-물 비공비 혼합물을 작동 유체로 사용하는 칼리나 사이클 시스템(Kalina cycle

system, KCS)은 유기랭킨 사이클(organic rankine cycle, ORC)과 함께 현열 형태의 신재생 에너지로 구동되는 저등급 열원의 동력 변환 시스템 중에서 가장 경쟁력 있는 시스템 중 하나로 평가받고 있다^{3,4)}. 최근 들어 칼리나 사이클을 기반으로 하는 병합 생산 사이클이 주목받고 있다^{5,6)}.

신재생 에너지를 열원으로 하고 칼리나 사이클을 기반으로 하는 병합 생산 시스템으로서 저등급 폐열로 구동되는 칼리나 사이클과 LiBr/H₂O 흡수냉동 사

이클의 병합 생산 시스템⁷⁾, 칼리나 사이클과 집중형 태양전지의 복합 시스템을 이용한 동력, 공정열 및 냉동 그리고 수소 병합 생산 시스템⁸⁾, 태양뚫(solar pond)에너지를 열원으로 하고 칼리나 및 ORC의 복합 시스템을 이용한 동력 및 담수 병합 생산 시스템⁹⁾ 등이 제안되고 시스템의 성능 특성 연구결과들이 보고되었다.

또한 최근 들어 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력 및 냉동 병합 생산 사이클로서 정류기와 리보일터를 채용해서 효율을 높인 시스템¹⁰⁾, 증발기와 과냉기가 추가된 수정 칼리나 사이클을 이용한 시스템¹¹⁾, 칼리나 사이클과 이젝터 냉각 시스템의 복합 시스템¹²⁾, 발전과 냉동 사이클이 케스케이드로 결합된 복합 시스템¹³⁾, 칼리나 사이클에서 터빈과 흡수기 사이에 응축기와 증발기를 직렬로 추가한 복합 시스템^{14,15)} 등이 제안되고 연구되었다.

그러나 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력 및 냉동의 병합 생산 시스템은 재생 열교환기로 인한 열원 유체의 출구 온도 상승으로 비효율적인 요소가 남아 있다. 본 연구에서는 최근에 제안된 KCS-11 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력 및 흡수 냉동의 병합 생산 시스템^{14,15)}에 공정열을 추가한 삼중 병합 생산 시스템을 제시하고 시스템의 열역학적 성능 특성을 분석한다.

2. 시스템 해석

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 KCS-11 칼리나 사이클을 기본으로 하여 터빈 뒤에 응축기와 증발기가 결합된 흡수냉동 부분과 보일러를 나온 열원유체에 의한 공정열 공급 부분이 복합된 동력, 흡수 냉동 및 공정열의 삼중 병합 생산 시스템에 대해 해석한다. 해석을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다^{14,16)}: 시스템은 온도 T_s 와 질량유량 m_s 인 현열 에너지 형태의 저등급 열원에 의해 구동되며 분리기에서의 온도와 압력은 각각 T_H 및 P_H 라 설정한다. 시스템의 칼리나 사이클 부분과 흡수냉동 부분은 유사한 연구보고¹⁶⁾와 공통이 되며, 보일러를 나온 열원유체(상태

15)으로 공정열 열교환기에서 열을 공급하여 공정열 회수온도 T_{PR} (상태 17)에서 공급온도 T_{PS} (상태 18)로 가열한다. 펌프와 터빈에서의 등엔트로피 효율은 각각 η_p 와 η_t 로 일정하며 이들과 팽창밸브를 제외한 곳에서 압력변화는 무시한다. 각 열교환기에서 고온과 저온 유체의 최소 온도차는 설정한 핀치 포인트 온도차 ΔT_{PP} 에 도달하는 조건으로 운전되나¹⁴⁻¹⁶⁾, 이 조건으로 운전 시 열원유체의 보일러 출구온도가 공정열 공급온도 조건보다 낮을 경우에 출구온도는 $T_{15} = T_{18} + \Delta T_{PP}$ 로 운전된다고 설정한다. 본 연구에서 암모니아-물 혼합물의 열역학적 상태량은 타 연구보고의 방법^{17,18)}을 따른다.

열원 유체의 질량유량이 m_s 라 할 때 보일러에서 작동유체 m_w , 터빈에서 작동유체 m_t 및 재생기에서 작동유체 m_r , 증발기에서의 냉수 m_c 와 공정열 열교환기의 공급수의 질량유량 m_p 는 다음과 같이 구한다.

$$\frac{m_w}{m_s} = \frac{h_{14} - h_{15}}{h_4 - h_3} \tag{1}$$

$$\frac{m_v}{m_w} = \frac{h_4 - h_{10}}{h_5 - h_{10}} \tag{2}$$

$$m_r = m_w - m_t \tag{3}$$

$$\frac{m_c}{m_t} = \frac{h_9 - h_8}{h_{23} - h_{24}} \tag{4}$$

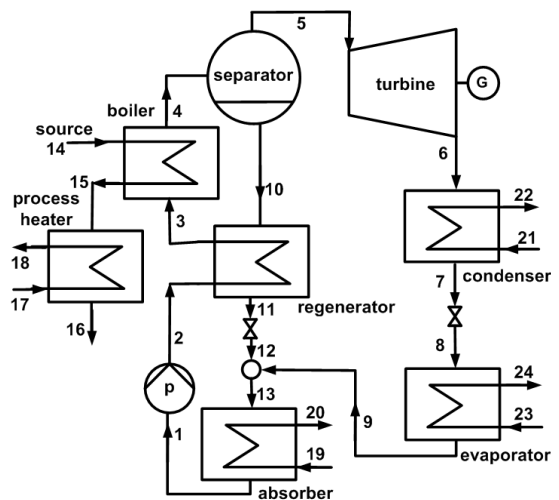


Fig. 1. Schematic diagram of the system

$$\frac{m_p}{m_s} = \frac{h_{15} - h_{16}}{h_{18} - h_{17}} \quad (5)$$

여기에서 h 는 비엔탈피이며 엔탈피 H 와 엑서지 X 는 다음과 같이 정의한다.

$$H = m(h - h_0) \quad (6)$$

$$X = m\{(h - h_0) - T_0(s - s_0)\} \quad (7)$$

여기에서 하첨자 0은 주위 조건을 의미한다. 보일러, 재생기, 응축기 및 흡수기에서의 열전달 Q_s , Q_r , Q_c 및 Q_a 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q_s = H_4 - H_3 \quad (8)$$

$$Q_r = H_3 - H_2 \quad (9)$$

$$Q_c = H_6 - H_7 \quad (10)$$

$$Q_a = H_{13} - H_{14} \quad (11)$$

시스템의 동력, 냉동, 공정열 및 총 에너지 효율 η_{w1} , η_{e1} , η_{p1} 및 η_{t1} 은 열원 유체의 에너지 $E_s=H_{14}$ 에 대한 시스템의 출력 W_n , 냉동용량 Q_c , 공정열 Q_p 및 유용 에너지 E_n 의 비율로서 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{w1} = \frac{W_n}{E_s} = \frac{(H_6 - H_7) - (H_2 - H_1)}{E_s} \quad (12)$$

$$\eta_{e1} = \frac{Q_c}{E_s} = \frac{H_{23} - H_{24}}{E_s} \quad (13)$$

$$\eta_{p1} = \frac{Q_p}{E_s} = \frac{H_{18} - H_{17}}{E_s} \quad (14)$$

$$\eta_{t1} = E_n/E_s = \eta_{w1} + \eta_{e1} + \eta_{p1} \quad (15)$$

마찬가지로 열역학 제2법칙에 의한 시스템의 동력, 냉동, 공정열 및 총 엑서지 효율 η_{w2} , η_{e2} , η_{p2} 및 η_{t2} 는 열원 유체의 유입엑서지 $X_s=X_{14}$ 에 대한 시스템의 출력 W_n , 냉동 엑서지 X_c , 공정열 엑서지 X_p 및 유용 엑서지 X_n 의 비율로서 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{w2} = \frac{W_n}{X_s} \quad (16)$$

$$\eta_{e2} = \frac{X_c}{X_s} = \frac{X_{23} - X_{24}}{X_s} \quad (17)$$

$$\eta_{p2} = \frac{X_p}{X_s} = \frac{X_{18} - X_{17}}{X_s} \quad (18)$$

$$\eta_{t2} = X_n/X_s = \eta_{w2} + \eta_{e2} + \eta_{p2} \quad (19)$$

3. 결과 및 고찰

열원유체는 온도 $T_s=150^\circ\text{C}$, 질량유량 $m_s=1 \text{ kg/s}$ 의 물이라고 가정하고 시스템의 주요 기본 변수 값들은 다음과 같이 설정한다^{15,16}: 분리기 온도 $T_H=140^\circ\text{C}$, 응축온도 $T_L=30^\circ\text{C}$, 주위온도 $T_0=20^\circ\text{C}$, 냉각수 온도 $T_C=20^\circ\text{C}$, 냉수 입구온도 $T_{wi}=20^\circ\text{C}$, 냉수 출구온도 $T_{cw}=15^\circ\text{C}$, 공정열 회수온도 $T_{pr}=20^\circ\text{C}$, 공급온도 $T_{pi}=75^\circ\text{C}$, 핀치 온도차 $\Delta T_{pp}=5^\circ\text{C}$, 펌프효율 $\eta_p=80\%$, 터빈효율 $\eta_t=80\%$ 이다.

Fig. 2에는 암모니아 분율 x_b 와 보일러 압력 P_H 의 변화가 보일러와 터빈에서의 질량유량 m_w 와 m_v 에 미치는 영향을 보여준다. 동일한 압력에서 암모니아 분율이 감소하면 작동유체의 질량유량은 보일러에서

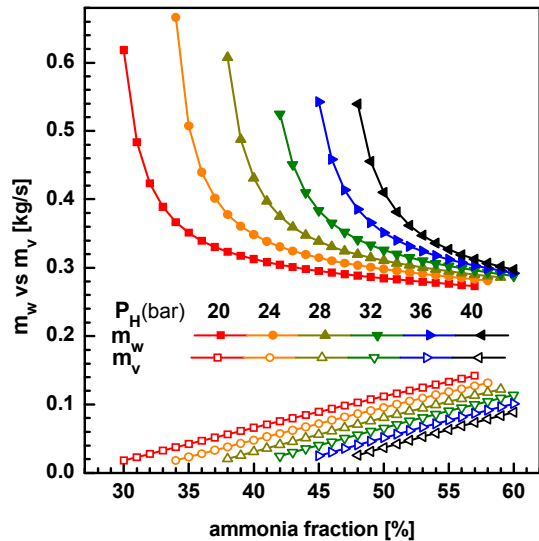


Fig. 2. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on mass flow rates at boiler and turbine

는 증가하며 그 증가율도 높아지지만, 기액 혼합물의 질량에 대한 증기 질량의 비인 건도가 낮아지면서 보일러에서의 질량유량이 증가함에도 불구하고 터빈에서의 질량유량은 감소한다. 따라서 암모니아 질량 분율이 어느 한도보다 낮아지면 증기발생이 되지 않는 암모니아 질량 분율의 하한 값이 존재한다. 이 하한 값은 보일러의 압력이 증가함에 따라 높아진다. 한편 동일한 암모니아 질량 분율에서 보일러의 압력이 증가하면 작동유체의 질량유량은 보일러에서는 감소하나 터빈에서는 증가한다.

Fig. 3에서는 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 공정열과 증발기에서의 질량유량 m_p 와 m_e 에 미치는 영향을 보여준다. 동일한 압력에서 암모니아 분율이 증가하면 작동유체의 질량유량은 공정열에서는 감소하나 증발기에서 증가하다 감소하여 극대 값을 갖는다. 동일한 암모니아 질량 분율에서 보일러의 압력이 증가하면 작동유체의 질량유량은 공정열에서는 증가하나 증발기에서는 낮은 암모니아 질량 분율 영역에서는 감소하나 높은 영역에서는 증가한다.

Fig. 4에는 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 보일러와 재생기에서의 열전달 Q_s 와 Q_r 에 미치는 영향을 보여준다. 동일한 압력에서 암모니아 분율이

증가하면 보일러에서의 열전달은 증가하나 재생기에서의 열전달은 감소하며, 동일한 암모니아 분율에서 보일러의 압력이 증가하면 보일러에서의 열전달은 감소하나 재생기에서의 열전달은 증가한다.

Fig. 5에는 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 응축기와 흡수기의 열전달에 미치는 영향을 보여

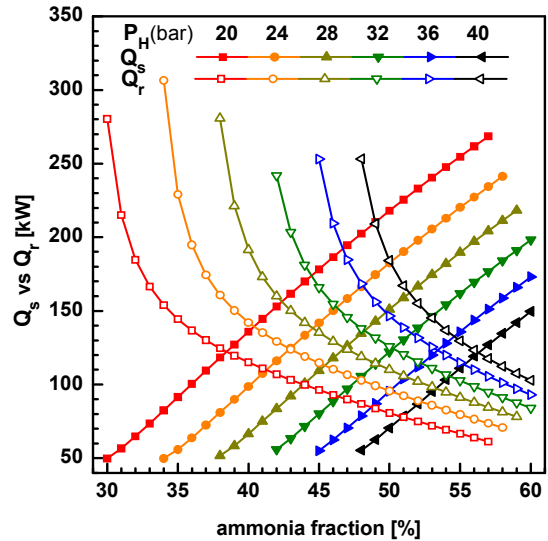


Fig. 4. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the heat transfers at boiler and regenerator

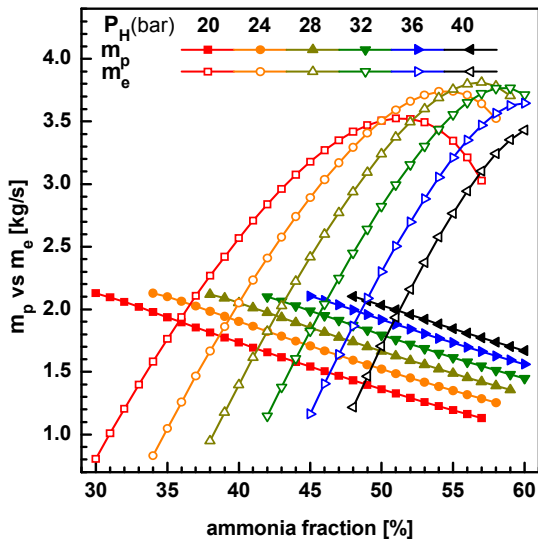


Fig. 3. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the mass flow rates at process heat and evaporator

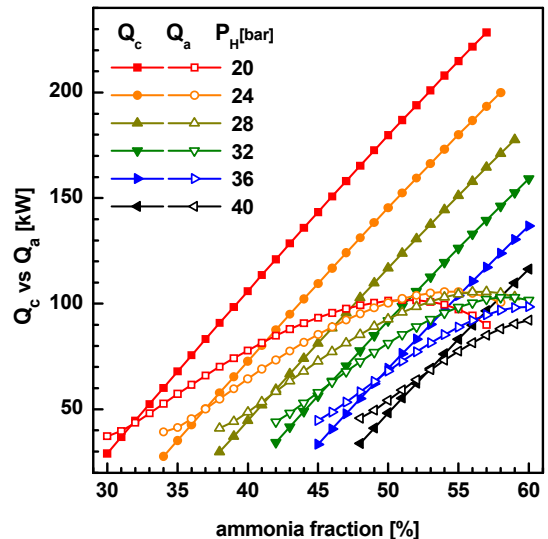


Fig. 5. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the heat transfers at condenser and absorber

준다. 동일한 압력에서 암모니아 분율이 증가하면 응축기에서의 열전달은 감소하며, 흡수기의 열전달은 증가하다가 감소하여 극대 값을 갖는다. 동일한 암모니아 분율에서 보일러 압력이 증가하면 응축기에서의 열전달은 감소하고, 흡수기의 열전달은 낮은 암모니아 분율 영역에서는 감소하고 높은 암모니아 분율 영역에서는 증가한다.

Fig. 6에서는 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 열역학 1법칙과 2법칙에 의한 동력 효율 η_{w1} 과 η_{w2} 에 미치는 영향을 보여준다. 본 연구에서 열원공급온도는 일정하게 설정되었기 때문에 1법칙과 2법칙 동력 효율은 시스템의 출력이 비례한다. 1법칙과 2법칙 동력 효율은 모두 동일한 압력에서 암모니아 분율이 증가함에 따라 증가하고 일정한 암모니아 분율에서 보일러 압력이 증가함에 따라 감소하나, 2법칙 동력 효율이 1법칙 동력 효율에 비해 훨씬 크다.

Fig. 7은 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 열역학 1법칙과 2법칙에 의한 냉동 효율 η_{e1} 과 η_{e2} 에 미치는 영향을 보여준다. 1법칙과 2법칙 냉동 효율은 시스템의 냉동에너지와 엑서지에 각각 비례하며, 동일한 압력에서 암모니아 분율이 증가함에 따라 증가하다 감소하여 극대 값을 갖는다. 1법칙과 2법칙 냉동

효율은 암모니아 분율이 낮은 영역에서는 보일러 압력이 증가함에 따라 감소하나, 암모니아 분율이 높은 영역에서는 반대가 된다. 모든 영역에서 1법칙 냉동 효율은 2법칙 냉동 효율에 비해 훨씬 높다.

Fig. 8은 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 열

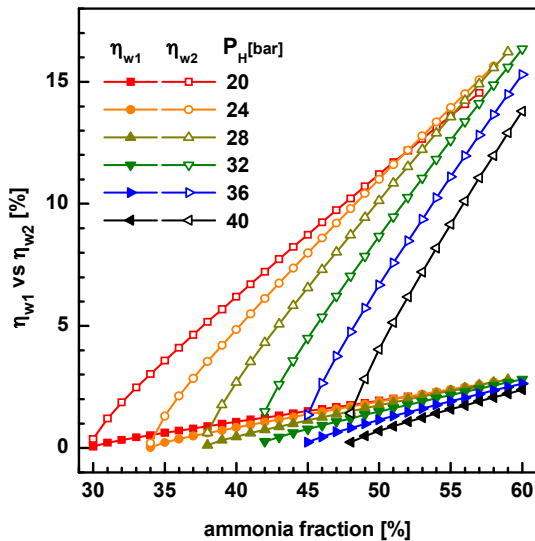


Fig. 6. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the first and second law efficiencies of power production

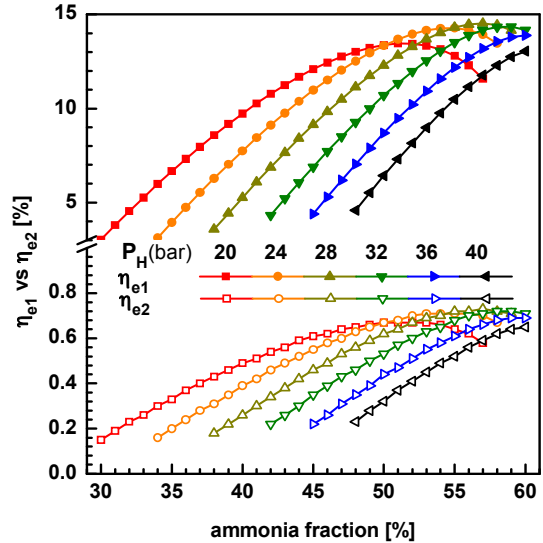


Fig. 7. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the first and second law efficiencies of refrigeration

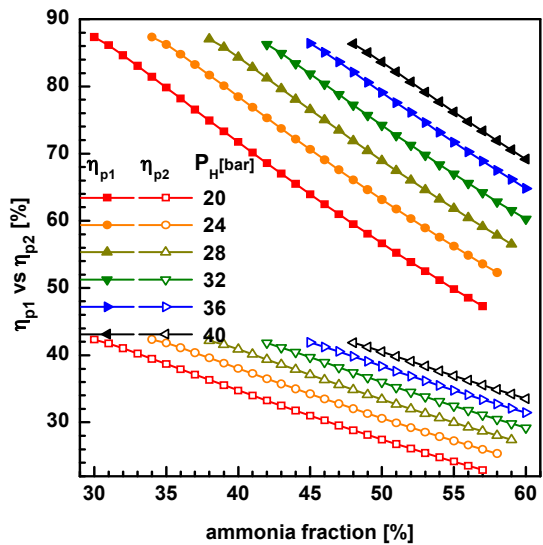


Fig. 8. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the first and second law efficiencies of process heat

역학 1법칙과 2법칙에 의한 공정열 효율 η_{p1} 과 η_{p2} 에 미치는 영향을 보여준다. 1법칙과 2법칙 공정열 효율은 공정열 에너지와 엑서지에 각각 비례하며, 암모니아 분율이 감소하거나 보일러 압력이 증가함에 따라 증가하며, 1법칙 공정열 효율이 2법칙 동력 효율에 비해 훨씬 높다.

Fig. 9는 암모니아 분율과 보일러 압력의 변화가 열역학 1법칙과 2법칙에 의한 총 효율 η_{t1} 과 η_{t2} 에 미치는 영향을 보여준다. 1법칙과 2법칙 총 효율은 시스템의 출력, 냉동 용량 및 공정열의 에너지 및 엑서지 합에 각각 비례하며, 동력 효율, 냉동 효율 및 공정열 효율의 합이다. 1법칙 총 효율은 동일한 보일러 압력에서 암모니아 분율이 증가함에 따라 동력, 냉동 및 공정열 효율은 각각 증가, 극대 값 또는 증가, 감소했는데, 총 효율은 공정열의 영향이 가장 커서 감소한다. 또한 동일한 암모니아 질량 분율에서 보일러 압력이 증가함에 따라 동력, 냉동 및 공정열 효율은 각각 감소, 감소하거나 증가, 증가했는데, 총 효율은 공정열의 영향이 가장 커서 증가한다. 2법칙 총 효율은 동일한 보일러 압력에서 암모니아 분율이 증가함에 따라 동력, 냉동 및 공정열 효율은 각각 증가, 극

대 값 또는 증가, 감소했는데, 총 효율은 보일러 압력이 28 bar 이하의 낮은 압력에서는 극대 값을 가지나 그 이상에서는 단조 증가한다. 해석 결과들은 열역학 1법칙 및 2법칙 효율 모두 단순 동력 생산시 보다 흡수냉동을 병합 생산하면 상당히 개선되었으며, 공정열까지 삼중 병합생산하면 획기적으로 개선됨을 보여준다. 예를 들어 암모니아 질량 분율이 50%이고 보일러 압력이 32 bar인 경우에 1법칙에 의한 동력 효율, 냉동 효율, 공정열효율 및 총 효율은 각각 1.5%, 10.7%, 74.2% 및 86.4%가 된다.

4. 결론

본 연구에서는 150°C의 저온 열원을 이용하고 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력, 흡수 냉동 및 공정열의 삼중 병합생산 사이클의 열역학적 성능 특성을 해석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) 암모니아 질량 분율이 증가하면 터빈에서 작동 유체의 질량유량은 증가하고 제조 냉수의 유량은 감소한다. 보일러의 압력이 증가하면 터빈에서 작동 유체의 질량유량은 감소하고 공정열수의 유량은 증가한다.

2) 1법칙과 2법칙에 의한 동력 효율은 암모니아 질량 분율의 증가에 따라 증가하고 보일러 압력의 증가에 따라 감소한다.

3) 1법칙과 2법칙에 의한 냉동 효율은 암모니아 질량 분율의 증가에 따라 극대 값을 가진다.

4) 1법칙과 2법칙에 의한 공정열효율은 암모니아 질량 분율의 증가에 따라 감소하고 보일러 압력의 증가에 따라 증가한다.

3) 1법칙 총 효율은 암모니아 질량 분율의 증가에 따라 감소하고 보일러 압력의 증가에 따라 감소하며, 2법칙 총 효율은 암모니아 질량분류의 증가에 따라 낮은 보일러 압력에서는 극대 값을 지나 높은 압력에서는 단조 증가한다.

4) 칼리나 사이클 기반의 삼중 병합생산 시스템은 동력이나 동력 및 냉동 병합생산 시스템에 비해 총 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다.

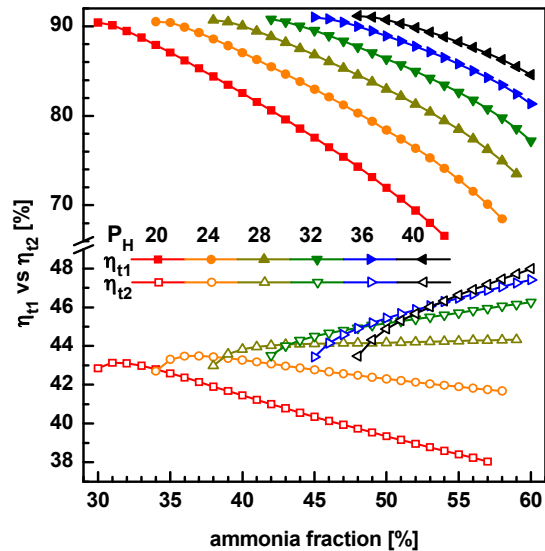


Fig. 9. Effects of ammonia mass fraction and boiler pressure on the first and second law efficiencies

후 기

본 연구는 금오공과대학교 교수연구년제에 의하여 연구된 실적물입니다.

References

1. J. S. Pereira, J. B. Ribeiro, R. Mendes, G. C. Vaz, and V. André, "ORC based micro-cogeneration systems for residential application - a state of the art review and current challenges", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 92, 2018, pp. 728-743, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.039>.
2. M. Santos, J. André, E. Costa, R. Mendes, and J. Ribeiro, "Design strategy for component and working fluid selection in a domestic micro-CHP ORC boiler", *Appl. Therm. Eng.* Vol. 169, 2020, pp. 114945, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114945>.
3. A.I. Kalina, "Combined cycle system with novel bottoming cycle", *ASME J. Eng. Turb. Power*, Vol. 106, No. 4, 1984, pp. 737-742, doi: <https://doi.org/10.1115/1.3239632>.
4. X. Zhang, M. He, and Y. Zhang, "A review of research on the Kalina cycle", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, 2012, pp. 5309-5318, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.040>.
5. S. Ogrisek, "Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study", *Appl Therm Eng.* Vol. 29, No. 14-15, 2009, pp. 2843-2848, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.02.006>.
6. R. Long, Z. Kuang, B. Li, Z. Liu, and W. Liu, "Exergy analysis and performance optimization of Kalina cycle system 11 (KCS-11) for low grade waste heat recovery", *Energy Procedia*, Vol. 158, 2019, pp. 1354-1359, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.333>.
7. Z. Liu, N. Xie, and S. Yang, "Thermodynamic and parametric analysis of a coupled LiBr/H₂O absorption chiller/Kalina cycle for cascade utilization of low-grade waste heat", *Energy Convers. Management*, Vol. 205, 2020, pp. 112370, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112370>.
8. O. Bamisile, Q. Huang, Q. Huang, M. Dagbasi, V. Adebayo, E. C. Okonkwo, P. N. Ayambire, T. Al-Ansari, and T. A. Ratlamwala, "Thermo-environ study of a concentrated photovoltaic thermal system integrated with Kalina cycle for multigeneration and hydrogen production", *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 45, No. 51, 2020, pp. 26716-26732, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.029>.
9. H. Ghaebi and H. Rostamzadeh, "Performance comparison of two new cogeneration systems for freshwater and power production based on organic Rankine and Kalina cycles driven by salinity-gradient solar pond", *Renewable Energy*, Vol. 156, 2020, pp. 748-767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.043>.
10. D. X. Zheng, B. Chen, Y. Qi, and H. G. Jin, "Thermodynamic analysis of a novel absorption power/cooling combined cycle", *Appl Energy*, Vol. 83, No. 4, 2006, pp. 311-323, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.02.006>.
11. J. Y. Hua, Y. P. Chen, Y. D. Wang, and A. P. Roskilly, "Thermodynamic analysis of ammonia-water power/chilling cogeneration cycle with low-grade waste heat", *Appl Therm Eng.* Vol. 64, 2014, pp. 483-490, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2013.12.043>.
12. J. Rashidi and C. K. Yoo, "A novel Kalina power-cooling cycle with an ejector absorption refrigeration cycle: thermodynamic modelling and pinch analysis", *Energy Converse Manage.* Vol. 162, 2018, pp. 225-238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.040>.
13. S. Zhang, Y. Chen, J. Wu, and Z. Zhu, "Thermodynamic analysis on a modified Kalina cycle with parallel cogeneration of power and refrigeration", *Energy Converse Manage.* Vol. 163, 2018, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.035>.
14. K. H. Kim, "Thermodynamic analysis of kalina based power and cooling cogeneration cycle employed once through configuration", *Energies*, Vol. 12, No. 8, 2019, pp. 1536, doi: <https://doi.org/10.3390/en12081536>.
15. K. H. Kim, H. J. Ko, and Y. G. Jung, "Performance analysis of a combined cycle of Kalina and absorption refrigeration for recovery of low-temperature heat source", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 5, 2018, pp. 490-496, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.5.490>.
16. K. H. Kim and Y. G. Jung, "Exergy and entransy performance characteristics of cogeneration system in series circuit using low-grade heat source", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 637-645, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.637>.
17. F. Xu and D. Y. Goswami, "Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power-cycle application", *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).
18. K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", *Thermochimica Acta*, Vol. 530, 2012, pp. 7-16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.028>.