

# 칼리나 사이클을 기반으로 하는 동력 및 냉동 복합 사이클의 에너지 및 엑서지 성능 해석

김경훈 · 정영관 · 고흥중<sup>†</sup>

금오공과대학교 기계공학과

## Energy and Exergy Analysis of Kalina Based Power and Cooling Combined Cycle

KYOUNG HOON KIM, YOUNG GUAN JUNG, HYUNG JONG KO<sup>†</sup>

Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehakro, Gumi 39177, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author :  
kohj@kumoh.ac.kr

Received 31 March, 2020

Revised 15 April, 2020

Accepted 30 April, 2020

**Abstract >>** The Kalina cycle (KC) is considered as one of the most efficient systems for recovery of low grade heat. Recently, Kalina based power and cooling cogeneration cycles (KPCCCs) have been suggested and attracted much attention. This paper presents an energy and exergy analysis of a recently suggested KPCCC with flexible loads. The cycle consists of a KC (KCS-11) and an aqua-ammonia absorption refrigeration cycle. By adjusting the splitting ratios, the cycle can be operated with four modes of pure Kalina cycle, pure absorption cooling cycle, Kalina-cooling parallel cycle, and Kalina-cooling series cycle. The effects of system variables and the operating modes on the energetic and exergetic performances of the system are parametrically investigated. Results show that the system has great potential for efficient utilization of low-grade heat source by adjusting loads of power and cooling.

**Key words :** Kalina cycle(칼리나 사이클), Power and cooling cogeneration(동력 및 냉동 병합생산), Low-grade heat source(저등급 열원), Ammonia fraction(암모니아 분율), Exergy(엑서지)

## 1. 서론

최근 들어 냉동 및 냉방용 에너지 수요가 크게 증가함에 따라 동력 및 냉동 병합생산 시스템이 많은 관심을 끌고 있다<sup>1)</sup>. Kim과 Perez-Blanco<sup>2)</sup>는 유기랭킨사이클(organic Rankine cycle, ORC)과 증기압축

냉동 사이클을 결합한 동력 및 냉동 병합생산 시스템의 성능 특성을 보고하였다. Goswami<sup>3)</sup>, Sadrameli와 Goswami<sup>4)</sup>는 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 사용하면서 터빈과 흡수기 사이에 증발기를 배치한 동력 및 냉동 복합 사이클을 제안하고 분석하였는데, 이 사이클을 Goswami 사이클이라고 한다. 그러나 이

방식은 터빈 출구에서의 작동 유체의 건도가 높기 때문에 냉동 성능이 제한적인 문제를 안고 있다. Zheng 등<sup>5)</sup>은 정류기(rectifier)와 기액 분리를 위한 열을 공급하는 리보일러(reboiler)를 채용한 삼중 압력의 냉동 및 발전 복합 사이클을 제안하였다. Zhang과 Lior<sup>6)</sup>은 암모니아 흡수냉동-동력 복합 사이클을 연구하였으며, 냉동 루프와 발전 루프의 캐스케이드 결합으로 인한 냉동 용량과 발전 용량의 관계를 분석하였다. Liu와 Zhang<sup>7)</sup>은 산업 폐열이나 가스터빈 배기가스에 의해 구동되고 정류기와 리보일러를 채용한 흡수냉동-동력 복합 사이클에 대해 연구하였다. Jawahar 등<sup>8)</sup>은 GAX 사이클에 기반한 흡수냉동-동력 병합생산 사이클을 제안하고 성능을 해석하였다.

최근에는 저등급 열원으로 구동되는 칼리나 사이클<sup>9,10)</sup>을 기반으로 하는 동력 및 냉동 복합 사이클(Kalina based power and cooling cogeneration cycle, KPCCC)에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. Yu 등<sup>11)</sup>, Zhang 등<sup>12)</sup>은 혼합기, 분배기, 흡수기, 과열기, 과냉기 등으로 구성된 KPCCC를 제안하고 주요 설계변수의 변화에 따른 시스템의 성능을 분석하였다. Hua 등<sup>13)</sup>은 중저온 폐열로 구동되고 증발기와 과냉각기를 추가한 수정된 KPCCC를 제안하고 연구하였다. Ghaebi 등<sup>14)</sup>과 Rashidi와 Yoo<sup>15)</sup>는 분사식 냉각과 칼리나 사이클을 결합한 KPCCC를 제안하고 분석하였다. Shokati 등<sup>16)</sup>은 단효용과 이중효용 흡수식 냉동과 칼리나 사이클의 복합 사이클을 제안하고 분석하였다. Kim<sup>17)</sup>은 칼리나 사이클과 암모니아 흡수냉동이 직렬로 연결된 KPCCC를 제안하고 성능 특성을 분석하였다.

Shankar와 Srinivas<sup>18)</sup>, Kim<sup>19)</sup>은 칼리나-흡수냉동 복합 사이클에서 작동유체의 분배비를 조정함으로써 순수 발전, 순수 흡수냉동, 발전과 흡수냉동의 직렬 연결 및 발전과 흡수냉동의 병렬 연결의 네 가지 모드의 운전이 가능한 KPCCC를 제안하고 성능 특성을 연구하였다.

엑서지(exergy)는 시스템이 주어진 상태에서 가장 상태까지 가역과정으로 이행하는 동안 얻을 수 있는 최대 일이다. 열역학 제2법칙에 기초한 시스템

의 엑서지 해석은 에너지 해석을 보완해서 시스템의 각 위치에서 파괴되거나 손실되는 유용 에너지의 크기와 원인에 대한 정보를 제공함으로써 열역학적 비효율성의 위치, 크기, 원인을 식별할 수 있으며 복잡한 시스템에서 에너지 변환 과정에 대한 이해를 높일 수 있다<sup>20)</sup>. 본 논문에서는 KCS-11 칼리나 사이클을 기반으로 하는 가변 용량의 동력 및 흡수냉동 병합생산 사이클의 에너지 및 엑서지 성능 특성을 해석하고자 한다. 이를 위해 순수 칼리나 사이클(KCS-11), 순수 암모니아 흡수냉동 사이클, 칼리나-흡수냉동 직렬 사이클, 칼리나-흡수냉동 병렬 사이클 등 네 가지 운전모드와 암모니아 분율 및 터빈입구압력의 변화에 따라 시스템의 에너지 및 엑서지 성능 특성이 어떻게 변하는지 비교 해석한다.

## 2. 시스템 해석

본 논문에서 해석하는 시스템은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 흡수기, 재생기, 보일러, 분리기, 터빈, 응축기 및 증발기로 구성된다. 시스템은 온도와 질량유량이 각각  $T_s$ 와  $m_s$ 인 현열 에너지 형태의 저등급 열원에 의해 구동되며 분리기에서의 온도와 압력은 각각  $T_H$ 와  $P_H$ 로 설정한다. 흡수기 출구에서의 작동유

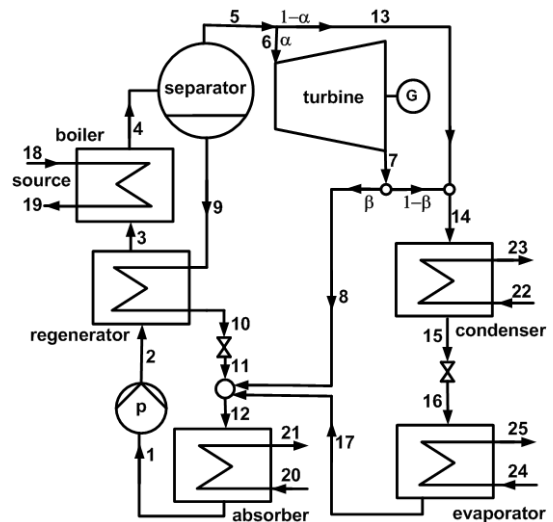


Fig. 1. Schematic diagram of the system

체는 온도  $T_L$ , 암모니아 질량분율  $x_b$ 의 포화액(상태 1)이라 가정하며 이때 유체압력  $P_L$ 은 시스템의 저압이 된다. 펌프와 터빈의 등엔트로피 효율은 각각  $\eta_p$ 와  $\eta_t$ 로 일정하며 각 열교환기에서 고온 유체와 저온 유체 사이의 최소 온도차는 설정한 핀치포인트 온도차  $\Delta T_{pp}$ 와 같다는 조건을 사용하여 해석한다<sup>17,19</sup>. 본 연구에서 암모니아-물 혼합물의 열역학적 상태량의 계산은 참고문헌 21과 22의 방법을 따른다. 터빈 입구와 출구에서 작동유체의 질량유량 분배비  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각  $\alpha = m_6/m_5$ ,  $\beta = m_8/m_7$ 과 같이 정의한다.

시스템의 네 가지 운전모드는 다음과 같다<sup>19</sup>: 모드 1 ( $\alpha=1, \beta=1$ )은 순수 칼리나 사이클 모드로서 분리기를 나온 상태 5의 고농도 포화증기는 모두 터빈으로 들어가 동력을 생산한 다음 응축기나 증발기를 거치지 않고 하고 상태 11의 저농도 액체와 혼합되어 (8+11→12) 상태 12로 흡수기에 들어간다. 모드 2 ( $0<\alpha<1, \beta=1$ )는 칼리나-흡수냉동 병렬 사이클로서 분리기를 나온 상태 5의 포화증기의 일부는 칼리나 사이클을 돌고, 나머지는 흡수냉동 사이클을 돌아 상태 11의 저농도 액체와 혼합되어(8+17+11→12) 상태 12로 흡수기에 들어간다. 모드 3 ( $\alpha=0, \beta=0$ )은 순수 암모니아 흡수냉동 사이클로서 분리기를 나온 상태 5의 고농도 포화증기는 터빈을 거치지 않고 모두 응축기로 들어가서 냉각수에 의해 상태 15의 포화액으로 냉각된다. 모드 4 ( $\alpha=1, \beta=0$ )는 칼리나-흡수냉동 직렬 사이클로 작동된다.

시스템 유입열, 시스템 출력, 증발기에서의 냉동률 그리고 동력 효율, 냉동 효율, 시스템 열효율을  $Q_{in}$ ,  $W_{net}$ ,  $Q_c$ 와  $\eta_{thp}$ ,  $\eta_{thc}$ ,  $\eta_{th}$ 라 하면 각각 다음과 같이 구할 수 있다<sup>19</sup>. 이 효율들은 1 법칙 효율에 해당한다.

$$Q_{in} = m_3(h_4 - h_3) \quad (1)$$

$$W_{net} = m_6(h_6 - h_7) - m_1(h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$Q_c = m_{16}(h_{16} - h_{17}) \quad (3)$$

$$\eta_{thp} = W_{net}/Q_{in} \quad (4)$$

$$\eta_{thc} = Q_c/Q_{in} \quad (5)$$

$$\eta_{th} = \eta_{thp} + \eta_{thc} \quad (6)$$

여기에서  $m$ 은 질량유량,  $h$ 는 비엔탈피를 나타낸다.

절대온도를  $T$ , 비엔트로피를  $s$ , 가장상태를 하첨

자 0로 나타낼 때, 엑서지유량  $E$ 는

$$E = m[h - h_0 - T_0(s - s_0)] \quad (7)$$

와 같이 쓸 수 있다. 따라서 열원의 엑서지유량  $E_s$ , 시스템 유입 엑서지유량  $E_{in}$ , 냉동 엑서지유량  $E_c$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_s = E_{18} \quad (8)$$

$$E_{in} = E_{18} - E_{19} \quad (9)$$

$$E_c = E_{25} - E_{24} \quad (10)$$

또 동력 엑서지 효율  $\eta_{exp}$ , 냉동 엑서지 효율  $\eta_{exc}$ , 시스템 엑서지 효율  $\eta_{ex}$  등 엑서지 효율과 동력 2법칙 효율  $\eta_{2p}$ , 냉동 2법칙 효율  $\eta_{2c}$ , 시스템 2법칙 효율  $\eta_2$  등 2법칙 효율은 다음과 같이 정의한다.

$$\eta_{exp} = W_{net}/E_s \quad (11)$$

$$\eta_{exc} = E_c/E_s \quad (12)$$

$$\eta_{ex} = \eta_{exp} + \eta_{exc} \quad (13)$$

$$\eta_{2p} = W_{net}/E_{in} \quad (14)$$

$$\eta_{2c} = E_c/E_{in} \quad (15)$$

$$\eta_2 = \eta_{2p} + \eta_{2c} \quad (16)$$

보일러, 재생기, 흡수기, 응축기, 증발기, 터빈과 펌프, 혼합기, 교축밸브, 흡수기 출구, 응축기 출구, 열원 출구에서의 엑서지 파괴율  $D_s, D_r, D_a, D_c, D_e, D_w, D_m, D_{te}, D_{ao}, D_{co}, D_{so}$ 는 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D_s = (E_3 + E_{18} - E_4 - E_{19})/E_s \quad (17)$$

$$D_r = (E_2 + E_9 - E_3 - E_{10})/E_s \quad (18)$$

$$D_a = (E_{12} + E_{20} - E_1 - E_{21})/E_s \quad (19)$$

$$D_c = (E_{14} + E_{22} - E_{15} - E_{23})/E_s \quad (20)$$

$$D_e = (E_{16} + E_{24} - E_{17} - E_{25})/E_s \quad (21)$$

$$D_w = (E_1 + E_6 - E_2 - E_7 - W_{net})/E_s \quad (22)$$

$$D_m = (E_8 + E_{11} + E_{17} - E_{12})/E_s \quad (23)$$

$$D_{te} = (E_{10} + E_{15} - E_{11} - E_{16})/E_s \quad (24)$$

$$D_{ao} = (E_{21} - E_{20})/E_s \quad (25)$$

$$D_{co} = (E_{23} - E_{22})/E_s \quad (26)$$

$$D_{so} = E_{19}/E_s \quad (27)$$

엑서지 균형의 원리에 의해 동력 엑서지 효율과 냉동 엑서지 효율과 모든 엑서지 파괴율들의 합은 다음과 같이 1이 된다.

$$\eta_{exp} + \eta_{exc} + D_s + D_r + D_a + D_e + D_e + D_w + D_m + D_{te} + D_{ao} + D_{co} + D_{so} = 1 \quad (28)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서 열원 유체는 150°C의 물이며 흡수기, 응축기 및 증발기의 유체도 물이라고 가정한다. 시뮬레이션을 위한 기본적인 시스템 데이터는 다음과 같다. 분리기 온도  $T_H = 135^\circ\text{C}$ , 응축 온도  $T_L = 30^\circ\text{C}$ , 냉각수 온도  $T_c = 20^\circ\text{C}$ , 증발기 출구 냉수 온도  $T_{ev} = 15^\circ\text{C}$ , 핀치포인트 온도차  $\Delta T_{pp} = 5^\circ\text{C}$ , 사장상태 온도  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ , 사장상태 압력  $P_0 = 1 \text{ atm}$ , 펌프 효율  $\eta_p = 0.8$ , 터빈 효율  $\eta_t = 0.8^{19}$ .

Figs. 2-6에서는 칼리나-흡수냉동 병렬 사이클(모드 2,  $\alpha = 0.5$  &  $\beta = 1$ )에서 암모니아 분율과 터빈입구압력  $P_H$ 의 변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 보여준다. Fig. 2에서는 암모니아 분율과 터빈입구압력의 변화가 보일러의 열원 측 출구와 응축기의 냉각수 측 출구 유체들에 의해 손실되는 엑서지 파괴율  $D_{so}$ 와  $D_{co}$ 에 미치는 영향을 보여준다. 출구 열원 유체의 엑서지 파괴율( $D_{so}$ )은 암모니아 분율이 증가할수록 감소하고 터빈입구압력이 증가할수록 증가한

다. 이것은 암모니아 분율이 증가하거나 터빈입구압력이 감소하면 재생기에서의 열전달이 감소하면서 보일러 입구에서 작동유체의 온도가 낮아지고, 이에 따라 열원유체의 보일러 출구 온도도 낮아지기 때문이다. 반면에 응축기 출구에서 냉각수의 엑서지 파괴율( $D_{co}$ )은 출구 열원유체의 엑서지 파괴율과 반대로 암모니아 분율이 증가하거나 터빈입구압력이 낮아질수록 증가한다. 암모니아 분율에 따른, 출구 유체들의 엑서지 파괴율의 변화는 열원유체 쪽이 더 큰데, 예를 들어  $D_{so}$ 는 터빈입구압력이 12 bar인 경우 암모니아 분율이 21%일 때 77.9%에서 암모니아 분율이 51%일 때 20.6%까지 감소한다.

Fig. 3에서는 터빈입구압력이 12 bar일 때 암모니아 분율의 변화가 출구 열원유체의 엑서지 파괴율  $D_{so}$ 를 제외한 시스템의 각 요소에서의 엑서지율(엑서지 효율 또는 엑서지 파괴율)에 미치는 영향을 보여준다. 암모니아 분율의 증가에 따라 동력 엑서지 효율( $\eta_{exp}$ )과 냉동 엑서지 효율( $\eta_{exc}$ )은 증가하다가 극대값에 도달한 다음 감소한다. 둘 중에서 냉동 엑서지 효율은 동력 엑서지 효율에 비해 현저하게 작아 변화가 미미한데, 이것은 흡수냉동에 의해 냉수를 제조하는 과정에서 냉수의 입구 온도가 20°C, 출구 온

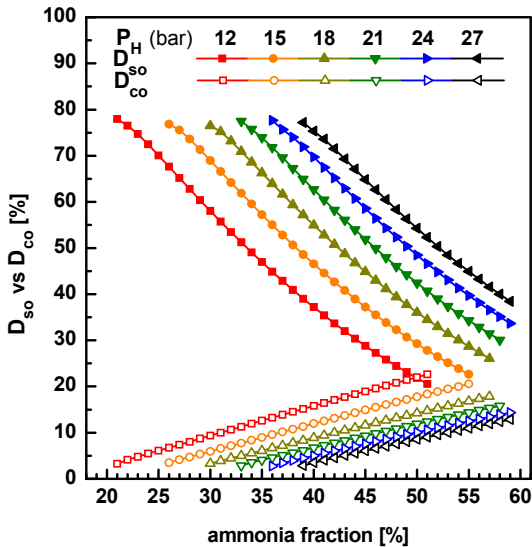


Fig. 2. Effects of ammonia fraction on the exergy ratios of source and condenser exhausts for varying values of  $P_H$

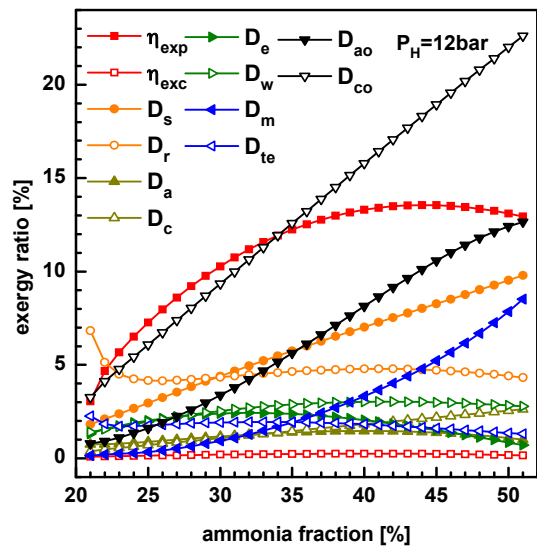


Fig. 3. Effects of ammonia fraction on the exergy ratios for  $P_H = 12 \text{ bar}$

도가 15°C로 그 차이가 작기 때문이다. 암모니아 분율이 증가함에 따라 흡수기(D<sub>a</sub>), 증발기(D<sub>e</sub>), 터빈과 펌프(D<sub>w</sub>)의 엑서지 파괴율 또한 극대값을 갖지만 보일러(D<sub>s</sub>), 응축기(D<sub>c</sub>), 혼합기(D<sub>m</sub>)의 엑서지 파괴율은 단순 증가한다. 시스템 요소별 엑서지 파괴율은 Fig. 2에서 본 것처럼 출구 열원유체의 엑서지 파괴율(D<sub>so</sub>)이

가장 크고, 그 다음으로는 암모니아 분율이 22% 이하인 경우에는 재생기(D<sub>r</sub>)에서 최대가 되고 그 이상의 분율에서는 응축기 출구에서 냉각수의 엑서지 파괴율(D<sub>co</sub>)이 최대가 된다.

Fig. 4에서는 암모니아 분율과 터빈입구압력의 변화가 1법칙 효율인 동력 효율( $\eta_{thp}$ )과 냉동 효율( $\eta_{thc}$ )에 미치는 영향을 보여준다. 동력 효율은 암모니아 분율이 증가함에 따라 증가하다가 극대값을 가진 후 감소한다. 동력 효율의 극대값은 터빈입구압력이 높을수록 조금씩 낮아지고 극대값에 대응하는 암모니아 분율은 높아진다. 냉동 효율도 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지며, 극대값은 터빈입구압력이 높을수록 높아지고 극대값에 대응하는 암모니아 분율도 높아진다. 한편 냉동 효율은 동력 효율에 비해 훨씬 높은 값을 갖는다는 것이 그림에서 한눈에 들어온다.

Fig. 5는 암모니아 분율과 터빈입구압력의 변화가 동력 2법칙 효율( $\eta_{2p}$ )과 냉동 2법칙 효율( $\eta_{2c}$ )에 미치는 영향을 보여준다. 앞에서 본 1법칙 효율과 유사하게 동력 2법칙 효율과 냉동 2법칙 효율도 암모니아 분율에 대해서 극대값을 가지며, 터빈입구압력이 높아짐에 따라 극대값에 대응하는 암모니아 분율은 중

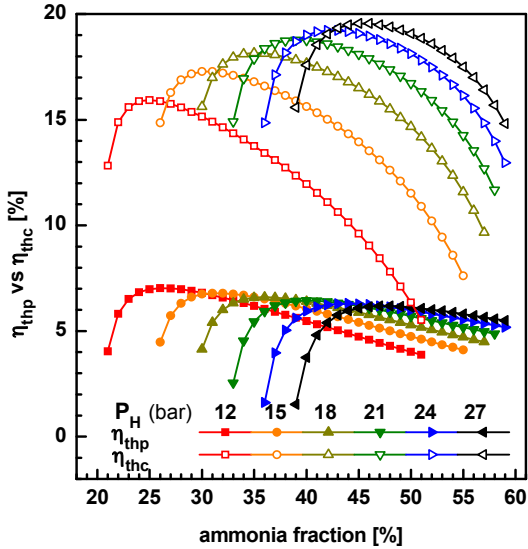


Fig. 4. Effects of ammonia fraction and turbine inlet pressure on the power and absorption efficiencies

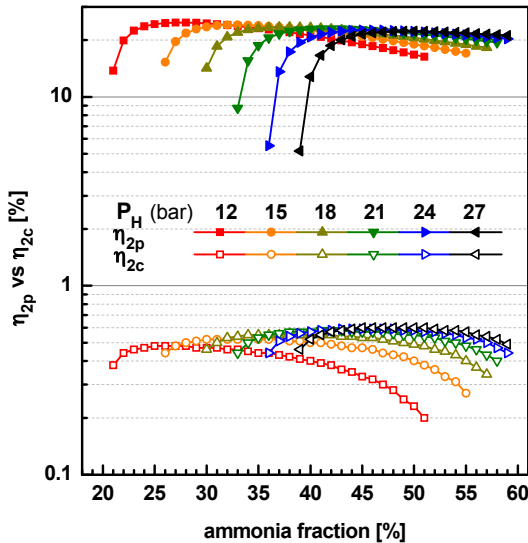


Fig. 5. Effects of ammonia fraction and turbine inlet pressure on the second-law power and absorption efficiencies

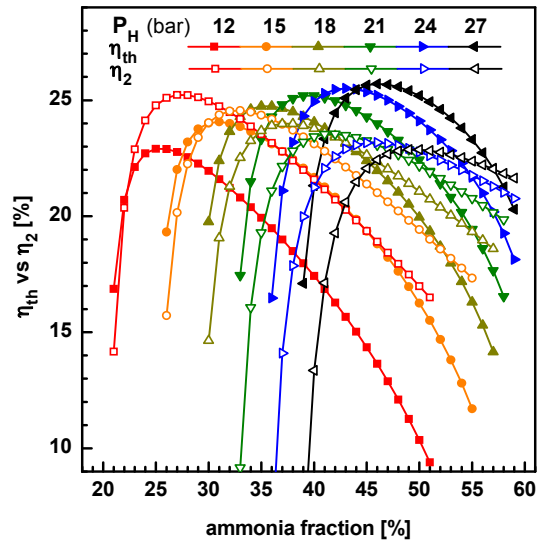


Fig. 6. Effects of ammonia fraction and turbine inlet pressure on the thermal and second-law efficiencies

가하며, 동력 2법칙 효율의 극대값은 감소하나 냉동 2법칙 효율의 극대값은 증가한다. 그림에서, 1법칙 효율과는 반대로 냉동 2법칙 효율이 동력 2법칙 효율에 비해 훨씬 낮음을 알 수 있다.

Fig. 6에서는 암모니아 분율과 터빈입구압력의 변화가 시스템의 열효율( $\eta_{th}$ )과 시스템의 2법칙 효율( $\eta_2$ )에 미치는 영향을 보여준다. 시스템의 열효율 및 2법칙 효율은 식 (6)과 (16)에서 보는 바와 같이 각각 동력 효율과 냉동 효율의 합 및 동력 2법칙 효율과 냉동 2법칙 효율의 합으로 정의되는데, 둘 다 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지며, 극대값에 대응하는 암모니아 분율은 터빈입구압력이 높아질수록 증가한다. 터빈입구압력이 증가할수록 시스템 열효율의 극대값은 높아지나 시스템의 2법칙 효율은 낮아져서, 터빈입구압력이 낮은 경우에는 2법칙 효율의 극대값이 열효율의 극대값보다 높지만 터빈입구압력이 높아지면 그 반대가 된다.

Figs. 7-9에서는 터빈입구압력( $P_H$ )이 21 bar인 경우에 암모니아 분율과 시스템의 운전모드가 시스템의 성능에 미치는 영향을 보여준다. 시스템의 운전모드는 네 가지인데, 모드 1은 칼리나 사이클(KCS,  $\alpha = \beta = 1$ ), 모드 2는 칼리나-흡수냉동 병렬 사이클

(parallel path,  $\alpha = 0.5, \beta = 1$ ), 모드 3은 흡수냉동 사이클(vapor absorption refrigeration,  $\alpha = \beta = 0$ ), 모드 4는 칼리나-흡수냉동 직렬 사이클(series path,  $\alpha = 1, \beta = 0$ )이다<sup>19)</sup>.

Fig. 7은 암모니아 분율과 운전모드가 동력 1법칙

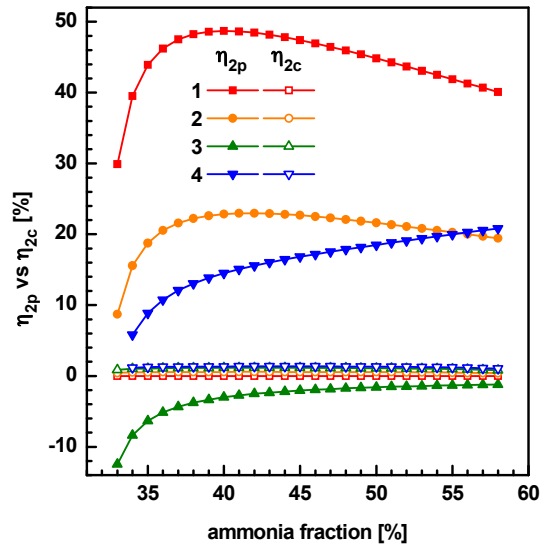


Fig. 8. Effects of operation mode and ammonia fraction on the second-law power and refrigeration efficiencies for  $P_H = 21$  bar

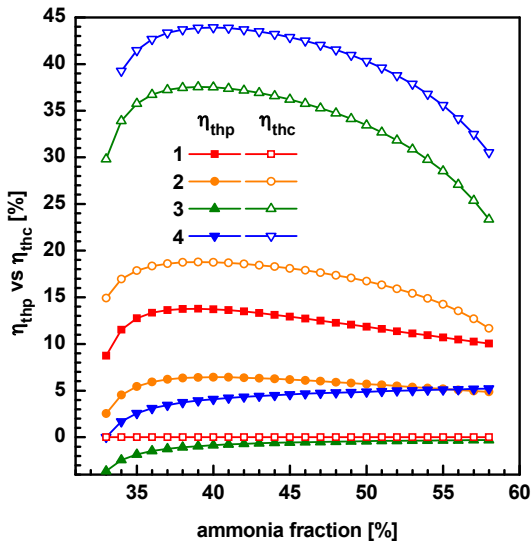


Fig. 7. Effects of operation mode and ammonia fraction on the power and refrigeration efficiencies for  $P_H = 21$  bar

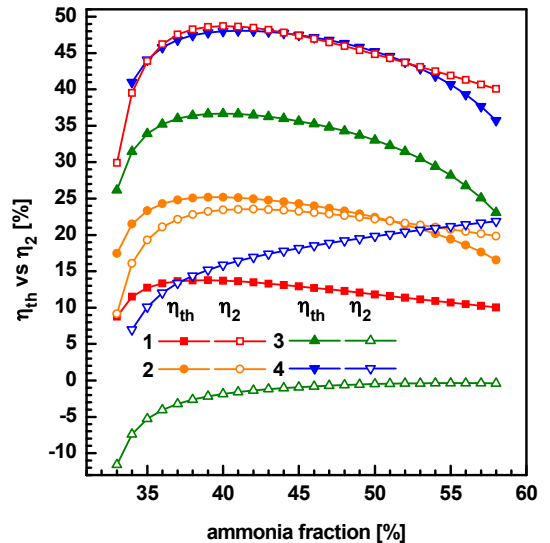


Fig. 9. Effects of operation mode and ammonia fraction on the thermal and second-law efficiencies for  $P_H = 21$  bar



효율( $\eta_{hp}$ )과 냉동 1법칙 효율( $\eta_{tc}$ )에 미치는 영향을 보여준다. 동력 효율은 모드 1과 모드 2의 경우는 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지나 모드 3과 모드 4의 경우에는 암모니아 분율이 높아짐에 따라 단순 증가한다. 모드 3의 경우에는 순수 흡수냉동 사이클이 되어 동력 생산이 없기 때문에 펌프 소요 동력으로 인해 동력 효율이 음의 값을 갖는다. 동력 효율은 암모니아 분율이 55% 이하에서는 모드 1, 모드 2, 모드 4, 모드 3 순으로 높으며, 암모니아 분율이 55% 이상에서는 모드 4가 모드 2의 순위가 뒤바뀐다. 냉동 효율은 칼리나 사이클인 모드 1의 경우에 0이 되며 나머지 경우에는 모두 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지며, 모드 4, 모드 3, 모드 2의 순으로 높다.

Fig. 8은 암모니아 분율과 운전모드가 동력 2법칙 효율( $\eta_{2p}$ )과 냉동 2법칙 효율( $\eta_{2c}$ )에 미치는 영향을 보여준다. 동력 2법칙 효율도 동력 1법칙 효율의 경우와 같이 모드 1과 모드 2의 경우는 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지나 모드 3과 모드 4의 경우에는 암모니아 분율이 높아짐에 따라 단순 증가하며, 모드 3의 경우에는 음의 값을 가진다. 또 동력 2법칙 효율은 암모니아 분율이 55% 이하에서는 모드 1, 모드 2, 모드 4, 모드 3 순으로 높으며, 암모니아 분율이 55% 이상에서는 모드 4가 모드 2에 비해 높다. 냉동 2법칙 효율은 냉동 1법칙 효율과 마찬가지로 모드 1의 경우 0이 되고, 나머지 경우에 모두 암모니아 분율에 대해 극대값을 가지며, 모드 4, 모드 3, 모드 2의 순으로 높지만 동력 2법칙 효율에 비해 크기가 매우 작다.

Fig. 9는 암모니아 분율과 운전모드가 시스템의 열효율( $\eta_{th}$ )과 시스템의 2법칙 효율( $\eta_2$ )에 미치는 영향을 보여준다. 시스템의 열효율은 모든 운전모드에서 암모니아 분율에 대해 극대값을 갖는다. 시스템의 2법칙 효율은 모드 1과 모드 2의 경우에 암모니아 분율에 대해 극대값을 갖고, 모드 3과 모드 4의 경우에는 암모니아 분율이 높아짐에 따라 단순 증가하며, 모드 3의 경우에는 음의 값을 가진다. 또 시스템의 열효율은 모드 4, 모드 3, 모드 2, 모드 1의 순으로

높은 반면에 시스템의 2법칙 효율은 암모니아 분율이 53% 이하에서는 모드 1, 모드 2, 모드 4, 모드 3 순으로 높고, 암모니아 분율이 53% 이상에서는 모드 4가 모드 2에 비해 높다.

## 4. 결론

본 연구에서는 150°C의 저등급 열원으로 구동되는 칼리나 사이클을 기반으로 하고 용량을 조절할 수 있는 동력-흡수냉동 병합생산 시스템의 에너지 및 엑서지 성능 특성을 해석하였다. 암모니아 분율, 터빈입구압력, 운전모드의 변화에 따른 시스템 성능의 변화에 대한 주요 해석 결과는 다음과 같다.

- 1) 칼리나-흡수냉동 병렬 사이클(모드 2)에서 1법칙 관점에서는 동력 효율이 냉동 효율보다 낮고, 2법칙 관점에서는 동력 효율이 냉동 효율보다 높다.
- 2) 1법칙 효율은 모든 모드에서 암모니아 분율에 대해 극대값을 갖지만, 2법칙 효율은 모드 1과 2에서 암모니아 분율에 대해 극대값을 갖고 모드 3과 4에서는 암모니아 분율이 높아짐에 따라 단순 증가한다.
- 3) 1법칙 효율은 모드 4가 가장 높고 모드 1이 가장 낮지만, 2법칙 효율은 모드 1이 가장 높고 모드 3이 가장 낮다.

## 후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었습니다(2018-104-016).

## References

1. R. Shankar and T. Srinivas, "Cooling cogeneration cycle", Appl. Sol. Energy, Vol. 53, 2017, pp. 61-71, doi: <https://doi.org/10.3103/S0003701X17010145>.
2. K. H. Kim and H. Perez-Blanco, "Performance analysis of a combined organic Rankine cycle and vapor compression cycle for power and refrigeration cogeneration", Appl. Therm. Eng., Vol. 91, 2015, pp. 964-974, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.062>.
3. D. Y. Goswami, "Solar thermal power technology: present

- status and ideas for the future”, *Energy Sources*, Vol. 20, No. 2, 1998, pp. 137-145, doi: <https://doi.org/10.1080/00908319808970052>.
4. S. M. Sadrameli and D. Y. Goswami, “Optimum operating conditions for a combined power and cooling thermodynamic cycle”, *Appl. Energy*, Vol. 84, No. 3, 2007, pp. 254-265, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.08.003>.
  5. D. 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>.
  6. N. Zhang and N. Lior, “Development of a novel combined absorption cycle for power generation and refrigeration”, *J. Energ. Res. Technol.*, Vol. 129, No. 3, 2007, pp. 254-265, doi: <https://doi.org/10.1115/1.2751506>.
  7. M. Liu and N. Zhang, “Proposal and analysis of a novel ammonia-water cycle for power and refrigeration cogeneration”, *Energy*, Vol. 32, No. 6, 2007, pp. 961-970, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.012>.
  8. C. P. Jawahar, R. Saravanan, J. C. Bruno, and A. Coronas, “Simulation studies on gas based Kalina cycle for both power and cooling applications”, *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 50, No. 2, 2013, pp. 1522-1529, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.004>.
  9. K. H. Kim, Y. G. Bae, Y. G. Jung, and S. W. Kim, “Comparative performance analysis of ammonia-water Rankine cycle and Kalina cycle for recovery of low-temperature heat source”, *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 148-154, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.148>.
  10. K. H. Kim, Y. G. Jung, and H. J. Ko, “Comparative exergy analysis of Kalina and organic Rankine cycles for conversion of low-grade heat source”, *Trans. of Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 1, 2020, pp. 105-111, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.1.105>.
  11. Z. Yu, J. Han, H. Liu, and H. Zhao, “Theoretical study on a novel ammonia-water cogeneration system with adjustable cooling to power ratios”, *Appl. Energy*, Vol. 122, 2014, pp. 53-61, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.010>.
  12. S. Zhang, Y. Chen, J. Wu, and Z. Zhu, “Thermodynamic analysis on a modified Kalina cycle with parallel cogeneration of power and refrigeration”, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 163, 2018, pp. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.035>.
  13. 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. Eng.*, Vol. 64, No. 1-2, 2014, pp. 483-490, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.043>.
  14. H. Ghaebi, T. Parikhani, H. Rostamzadeh, and B. Farhang, “Thermodynamic and thermoeconomic analysis and optimization of a novel combined cooling and power (CCP) cycle by integrating of ejector refrigeration and Kalina cycles”, *Energy*, Vol. 139, 2017, pp. 262-276, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.154>.
  15. J. Rashidi and C. K. Yoo, “A novel Kalina power-cooling cycle with an ejector absorption refrigeration cycle: thermodynamic modelling and pinch analysis”, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 162, 2018, pp. 225-238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.040>.
  16. N. Shokati, F. Ranjbar, and M. Yari, “A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, part 1: simulation”, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 158, 2018, pp. 437-459, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.086>.
  17. 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>.
  18. R. Shankar and T. Srinivas, “Performance investigation of Kalina cooling cogeneration cycles”, *Int. J. Refrig.*, Vol. 86, 2018, pp. 163-185, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.019>.
  19. K. H. Kim, “A study on performance characteristics of an adjustable absorption cooling and power cogeneration cycle based on Kalina”, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 43, No. 1, 2019, pp. 35-43, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2019.43.1.035>.
  20. A. Bejan, “Advanced engineering thermodynamics”, 3rd ed, John Wiley & Sons, USA, 2006.
  21. 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).
  22. 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>.