

# 암모니아-물 랭킨사이클의 증발기에서의 엑서지 및 엔트랜시 성능 특성 해석

김경훈 · 정영관<sup>†</sup>

금오공과대학교 기계공학과

## Performance Characteristics Analysis of Evaporator in Ammonia-Water Rankine Cycle Based on Exergy and Entransy

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

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

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

Received 29 September, 2019

Revised 2 December, 2019

Accepted 30 December, 2019

**Abstract >>** The use of the ammonia-water zeotropic mixture as a working fluid in the power generating system has been considered as a proven technology for efficient recovery of low-grade heat sources. This paper presents a thermodynamic performance analysis for ammonia-water evaporator using low-grade heat source, based on the exergy and entransy which has been recently introduced as a physical quantity to describe the heat transfer ability of an object. In the analysis, effects of the ammonia mass fraction and source temperature of the binary mixture are investigated on the system performance such as heat transfer, effectiveness, exergy destruction, entransy dissipation, and entransy dissipation based thermal resistance. The results show that the ammonia mass concentration and the source temperature have significant effects on the thermodynamic system performance of the ammonia-water evaporator.

**Key words :** Low-grade heat source(저등급 열원), Ammonia-water mixture(암모니아-물 혼합물), Evaporator(증발기), Exergy(엑서지), Entransy(엔트랜시)

## 1. 서론

전 세계적인 에너지 수요의 증가와 환경 문제로 인하여 지열 에너지, 태양 에너지, 바이오매스 연소 또는 다양한 산업 폐열과 같은 저등급 신재생 에너지 지원으로부터 전기 등 보다 유용한 에너지 형태로의 효율적인 변환이 더욱 중요해지고 있다. 저등급 열원

을 이용하는 열동력 사이클 중에 유기랭킨사이클 (organic rankine cycle, ORC)과 함께 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 사용하는 열동력 사이클은 가장 경쟁력 있는 시스템으로 인식되고 있다<sup>1,2)</sup>. 현열 에너지 형태의 저온 열원을 사용하는 발전 사이클의 증발기와 응축기에서 순수 물질의 작동유체는 등압 조건에서 일정한 온도에서 증발과 응축이 일어나기

때문에 유체 간 온도 불균형이 커지고 열적 성능이 떨어지게 된다. 그러나 암모니아-물 혼합물은 비공비 혼합물(zeotropic mixture)로서 등압 하에서도 온도가 변하면서 상변화가 일어나기 때문에 저등급 열원을 사용하는 발전 사이클의 증발기나 응축기에서 유체 간 온도 불균형을 줄이고 시스템의 열적 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 암모니아와 물은 비등 온도가 낮고 열용량이 크며 물과 유사한 분자량을 가지기 때문에 전통적인 증기 터빈을 약간의 설계 수정을 통해 암모니아-물 사이클에서도 사용할 수 있는 장점들을 가지고 있다<sup>3,4)</sup>.

Jonsson and Yan<sup>5)</sup>은 디젤엔진의 하부 사이클로 사용한 암모니아-물 기반 랭킨 사이클에서 출력 증가는 작동유체의 낮은 비등 온도와 가변 온도 열전달에 기인한다고 분석하였다. Roy 등<sup>6)</sup>은 암모니아-물 기반 랭킨 사이클에서 증발기 압력과 작동유체의 암모니아 농도 변화가 시스템의 열적 성능에 미치는 영향을 보고하였다. Wagar 등<sup>7)</sup>은 암모니아-물 기반 랭킨 사이클에 대한 열역학적 분석 연구에서 작동유체의 비선형 거동이 시스템의 성능에 큰 영향을 미치며 시스템의 주요 파라미터에 따른 최적화가 중요하다고 보고하였다. Kim 등<sup>8-10)</sup>은 저등급 열원을 사용하는 암모니아-물 기반 발전 사이클에서 증발기 압력이나 작동유체의 암모니아 농도 등 시스템의 주요 설계변수의 변화에 따라 시스템의 열교환기에서 온도 분포의 특성이 상당히 복잡하고 민감하게 비선형적으로 변화하며 시스템의 열적 성능에 큰 영향을 미친다는 사실을 보여주었다. Prananto 등<sup>11)</sup>은 인도네시아 외양 원두 지열발전소의 예로 하여서 칼리나 사이클을 통해 지열 발전소의 출력 증대와 효율 향상을 이룰 수 있음을 보였다.

최근 들어 축전기의 전기 포텐셜 에너지에 대한 열전달의 대응 개념으로서 새로운 물리량인 엔트랜시(entransy)가 제안되었으며 열교환기나 열시스템의 해석이나 최적설계에 사용될 수 있다<sup>12)</sup>. 엔트랜시 소산(entransy dissipation)은 열전달로 인한 엔트랜시의 손실로서 정의되며 고립계에서 엔트랜시는 항상 감소한다는 사실이 증명되었다<sup>13)</sup>. 열이 전달되는 과정

에서 에너지는 보존되지만 엔트랜시는 감소되므로 엔트랜시 소산은 열전달의 비가역성에 대한 또 하나의 척도가 될 수 있다. Xu<sup>14)</sup>는 엔트랜시 개념, 엔트랜시 소산, 다양한 열전달 모드에서 최적화를 위한 판별조건과 정리 등 엔트랜시 개념에 관련된 173편의 출판 문헌들을 리뷰하였다. 엔트랜시는 열역학 상태량이며 열역학 제2법칙을 다른 방식으로 설명하고 엔트로피 생성에 의한 최적설계를 보완하여 사용할 수 있다<sup>15-17)</sup>. 다양한 유형의 열교환기 분석을 위해 엔트랜시 소산 기반 열저항(entransy-dissipation based thermal resistance, EDTR)이 도입되었으며<sup>18)</sup>, 엔트랜시 소산 이론 및 유전자 알고리즘이 열교환기 설계의 최적화를 위해 사용되었다<sup>19)</sup>.

Xu와 Goswami<sup>20)</sup>는 저등급 열원을 사용하는 암모니아-물 열회수 증기발생기(HRVG)에서 증발기 압력이나 암모니아 농도 변화에 따른 에너지 및 엔트로피 생성 특성에 대해 분석하였다. 본 연구에서는 저등급 열원을 사용하는 암모니아-물 증발기에서 열원 온도나 암모니아 농도 변화에 따라 열전달, 열교환기 유용도, 엑서지 파괴, 엑서지 효율, 엔트랜시 소산, 엔트랜시 소산 기반 온도차 및 열저항, 그리고 엔트랜시 효율 등에너지, 엑서지 및 엔트랜시의 특성에 대해 비교 분석한다.

## 2. 시스템 해석

본 논문에서 고려하는 암모니아-물 증발기는 현열 에너지 형태의 저등급 열원을 이용하여 액체상태의 암모니아-물 혼합물을 기화시키며 Fig. 1에 도식적으로 표시하였다.

시스템 해석에서 주요 가정들은 다음과 같다<sup>20)</sup>.

- 1) 유체 흐름과 열전달은 시간에 대해 일정하다.
- 2) 증발기는 열적으로 절연되어 있다.
- 3) 내부유동에 의한 압력강하는 무시할 수 있어 증발기 내부 압력은 일정하게 유지된다.
- 4) 증발기 내 유체의 운동과 위치 에너지의 변화는 무시할 수 있다.
- 5) 증발기의 세로 방향 열전달은 무시할 수 있다.
- 6) 증발기 출구에서 혼합물의 온도는 기포점보다 높다(즉, 혼합물은

액체-기체 혼합이거나 과열증기 상태이다.

본 논문에서 암모니아-물 혼합물의 열역학 상태량은 참고문헌 (8)과 (20)의 방법을 따랐으며, 열원유체의 엔탈피  $H_s$ 와 엔트로피  $S_s$ 는 근사적으로 다음과 같이 구하였다<sup>19)</sup>.

$$H_s = C_s(T_s - T_0) \quad (1)$$

$$S_s = C_s \ln(T_s/T_0) \quad (2)$$

열원유체의 열용량 및 입구온도는 각각  $C_s$  kW/°C 및  $T_{s1}$ °C이고 혼합물의 압력, 질량 유량, 암모니아 질량 농도, 입구 및 출구 온도는 각각  $P$  bar,  $m$  kg/s,  $x_b$ ,  $T_{aw1}$ °C 및  $T_{aw2}$ °C라 한다. 그러면 열전달  $Q$  W 및 열원유체 출구온도  $T_{s2}$ °C는 증발기 내 에너지 균형으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = m(h_{aw2} - h_{aw1}) \quad (3)$$

$$T_{s2} = T_{s1} - \frac{Q}{C_s} \quad (4)$$

물질의 엑서지  $E$ 와 엔트랜시  $G$ 는 다음과 같이 정의하였다<sup>12,13)</sup>.

$$E = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad (5)$$

$$G = \frac{1}{2}HT \quad (6)$$

증발기 내 엑서지 파괴  $\Delta E$ , 엔트랜시 소산  $G_d$ , 엔트랜시 소산 기반 온도차  $\Delta T_g$  및 열저항  $R_g$ 는 다음

과 같이 구한다<sup>18,19)</sup>.

$$\Delta E = E_{s1} - E_{s2} + E_{aw1} - E_{s2} \quad (7)$$

$$G_d = G_{s1} - G_{s2} + G_{aw1} - G_{s2} \quad (8)$$

$$\Delta T_g = \frac{G_d}{Q} \quad (9)$$

$$R_g = \frac{G_d}{Q^2} \quad (10)$$

증발기의 유용도  $\epsilon$ 는 열교환 면적이 무한히 큰 경우의 열전달에 대한 실제 열전달의 비율, 엑서지 효율  $\eta_{ex}$ 는 고온유체의 엑서지 감소에 대한 저온유체의 엑서지 증가 비율 그리고 엔트랜시 효율  $\eta_g$ 는 고온유체의 엔트랜시 감소에 대한 저온유체의 엔트랜시 증가 비율로서 다음과 같이 정의하였다<sup>16)</sup>.

$$\epsilon = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{T_{s1} - T_{aw1}} \quad (11)$$

$$\eta_{ex} = \frac{E_{aw2} - E_{aw1}}{E_{s1} - E_{aw1}} \quad (12)$$

$$\eta_g = \frac{G_{aw2} - G_{aw1}}{G_{s1} - G_{s2}} \quad (13)$$

### 3. 결과 및 고찰

본 논문에서 해석을 위한 기본 데이터로서 열원유체 열용량  $C_s = 10$  kW/K, 암모니아-물 혼합물의 질량유량  $m = 0.2$  kg/s, 압력  $P = 20$  bar, 입구온도  $T_{aw1} = 30$ °C 그리고 사장상태는 1 atm, 298.15 K로 설정한다. 암모니아 질량농도는 1%에서 99%까지 그리고 열원온도는 125°부터 250°까지 25° 간격으로 고려하며, 열원온도와 혼합물의 출구온도의 온도차는 10°로 설정하였다<sup>19)</sup>.

Fig. 2와 3에서는 증발기에서 엔탈피비에 대한 암모니아-물 혼합물의 온도분포의 변화를 보여준다. 여기에서 엔탈피비(enthalpy ratio)  $H$ 는 다음과 같이 정의하였다.

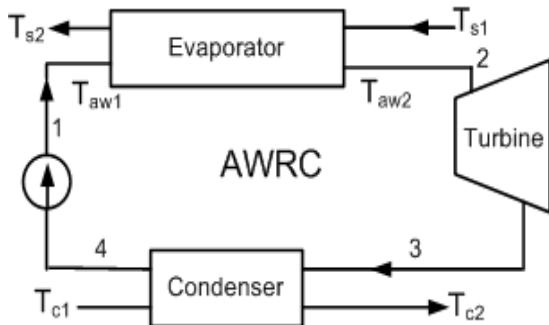


Fig. 1. Schematic diagram of the system

$$H = \frac{h - h_{aw1}}{h_{aw2} - h_{aw1}} \quad (14)$$

Fig. 2에서는 열원온도가 200°C일 때 다양한 암모니아 농도에 대한 증발기 내의 온도분포를 보여준다. 그림에서 혼합물의 상변화는 온도가 변하면서 일어나며 암모니아 농도가 높아질수록 상변화 온도는 낮아지고 과냉액 부분의 비율이 감소하는 반면에 과열증기의 비중이 높아짐을 알 수 있다. Fig. 3에서는 암모니아 농도가 70%일 때 다양한 열원온도에 대한 증발기 내의 온도분포를 보여준다. 그림에서 증발기 출구에서 혼합물은 열원온도가 높아짐에 증발기 출구에서 혼합물의 건도가 높아지다가 과열증기로 바뀌어 알 수 있다.

Fig. 4와 5에서는 다양한 열원온도에 대해 암모니아 농도의 변화가 증발기 내 열전달과 유용도에 미치는 영향을 각각 보여준다. 열원온도가 200°C 이하인 경우에 열전달은 암모니아 농도가 높아짐에 따라 거의 선형적으로 증가하다가 최고값에 도달하면 다시 감소하며 주된 이유는 다음과 같다. 증발기 열전달은 일정한 압력 조건에서 암모니아 농도가 높아지면 기포점의 온도가 낮아지면서 혼합물 단위질량당

입출구 엔탈피차가 늘어나기 때문에 증가하며 이때 출구에서 혼합물의 건도(dryness)도 함께 증가한다.

출구에서 혼합물이 건도 100%의 기포점에 도달할 때 열전달은 최대가 되며, 이보다 암모니아 농도가 높아지면 출구에서 혼합물은 과열증기 상태가 되며 농도 증가에 따라 증발잠열이 감소하는 효과에 따라 증발기 열전달도 감소하게 된다. 주어진 열원온도에

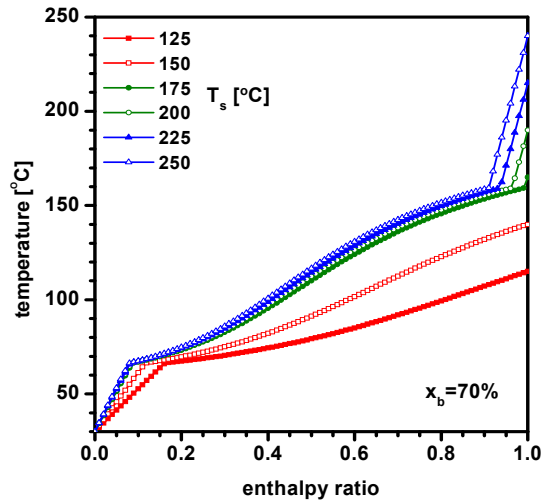


Fig. 3. Temperature distributions for various source temperatures

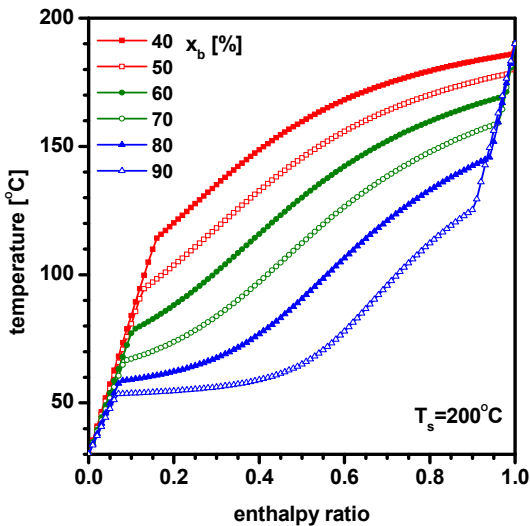


Fig. 2. Temperature distributions for various ammonia fractions

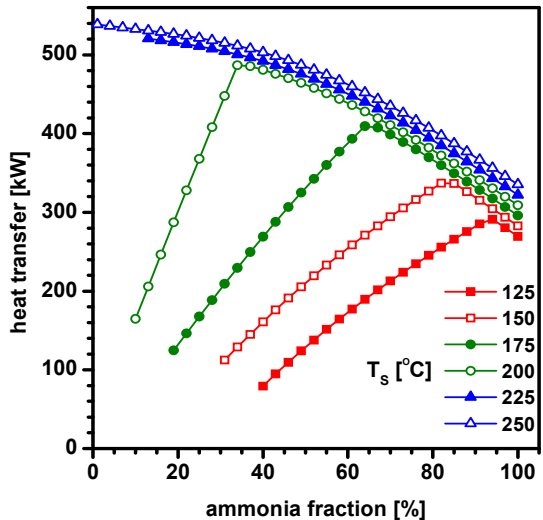


Fig. 4. Effects of ammonia fraction and source temperature on the heat transfer

서 암모니아 농도의 하한값이 존재하는데, 이는 이보다 낮은 암모니아 농도로는 증발기 출구에서 혼합물이 액체상태가 되기 때문이다. 열원온도가 상승하면 혼합물이 출구에서 기액 혼합 상태 또는 순수 증기가 되기 위한 암모니아 농도의 하한값이 낮아지며 출구에서 이슬점, 즉 포화증기가 되는 암모니아 농도 값도 낮아진다. 같은 암모니아 농도 조건에서 열전달은 열원온도에 따라 증가한다.

열교환기 유용도는 Eq. (11)에서 보는 바와 같이 증발기 열전달에 비례하고 열원유체와 혼합물의 입구 온도차에 반비례한다. 따라서 고정된 열원온도에 대해서 암모니아 농도에 대한 유용도의 변화 특성은 같지만 고정된 암모니아 농도에 대해서 유용도는 열원온도가 높아짐에 따라 열원유체와 혼합물의 입구 온도차가 커지면서 감소한다.

Fig. 6과 7에서는 다양한 열원온도에 대해 암모니아 농도의 변화가 증발기 내 엑서지 파괴와 엑서지 효율에 미치는 영향을 각각 보여준다.

주어진 열원온도 조건에서 엑서지 파괴는 암모니아 농도가 증가할수록 단조 감소하는데 주된 이유는 다음과 같다. 고온과 저온 유체의 입구온도가 일정할 때 시스템에 들어오는 엑서지는 암모니아 농도에 무

관하게 거의 일정하다. 암모니아 농도가 높아짐에 따라 열전달이 증가하면 열원유체의 출구온도가 낮아지면서 열원유체의 출구 엑서지가 감소하는 영향으로 엑서지 파괴가 감소하게 된다. 한편 열전달이 감소하게 되면 열원유체의 출구 엑서지는 증가하지만 혼합물의 출구 엑서지가 증가하는 영향이 더 커지게

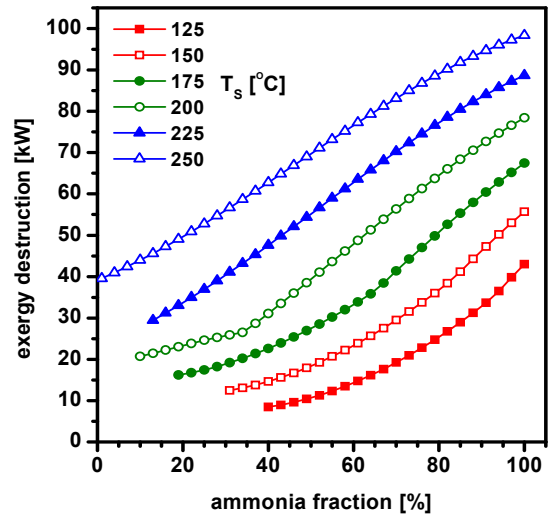


Fig. 6. Effects of ammonia fraction and source temperature on the exergy destruction

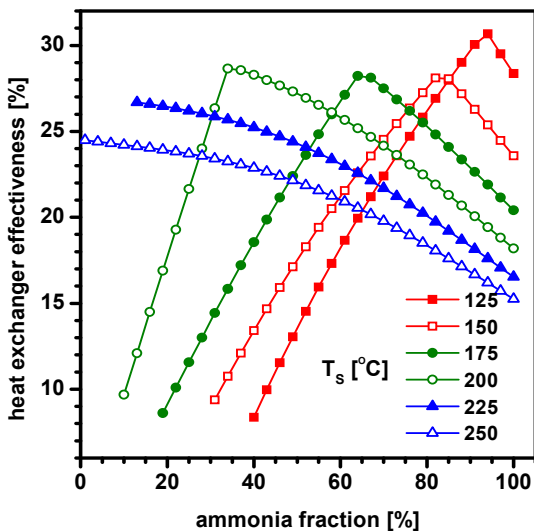


Fig. 5. Effects of ammonia fraction and source temperature on the effectiveness

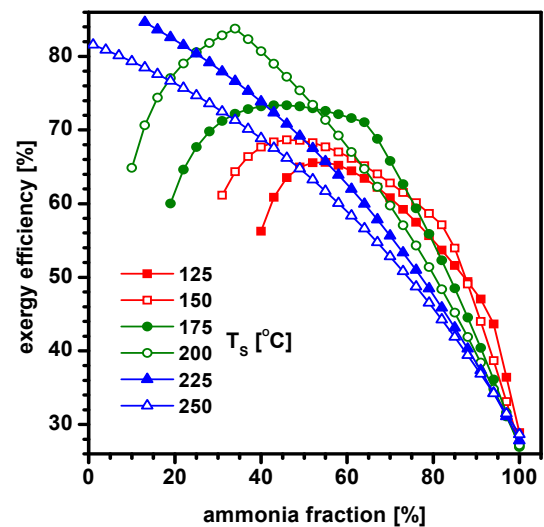


Fig. 7. Effects of ammonia fraction and source temperature on the exergy efficiency

되어 엑서지 파괴가 감소한다. 한편 주어진 암모니아 농도 조건에서 열원유체의 온도가 높아지면 열원유체의 입구온도와 저온유체의 입구온도의 차이가 커지면서 엑서지 파괴가 증가하게 된다.

Fig. 8과 Fig. 9에서는 다양한 열원온도에 대해 암모니아 농도의 변화가 증발기내 엔트랜시 소산과 엔

트랜시 소산에 기반한 열저항, EDTR에 미치는 영향을 각각 보여준다. 엔트랜시 소산은 모든 열원온도에 대해 암모니아 농도가 증가함에 따라 증가하다가 극대값을 가진 후 다시 감소한다. 열원온도가 200°C 이하로서 증발기 출구에서 혼합물이 부분증발 상태인 경우에는 엔트랜시 소산이 극대값이 되는 암모니아

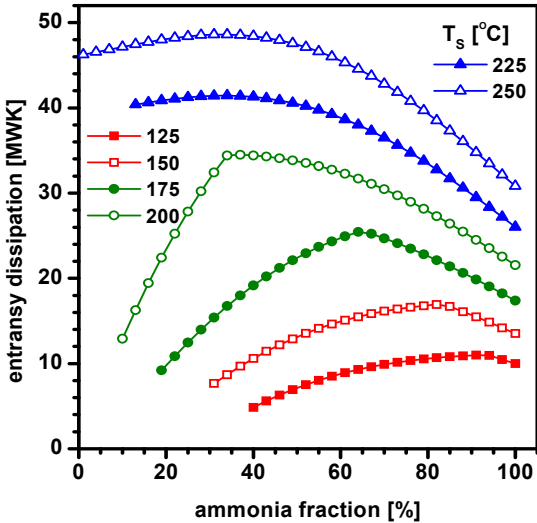


Fig. 8. Effects of ammonia fraction and source temperature on the entransy dissipation

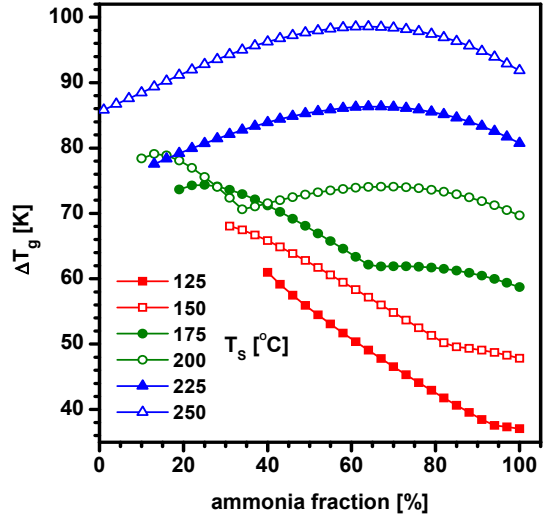


Fig. 10. Effects of ammonia fraction and source temperature on the  $\Delta T_g$

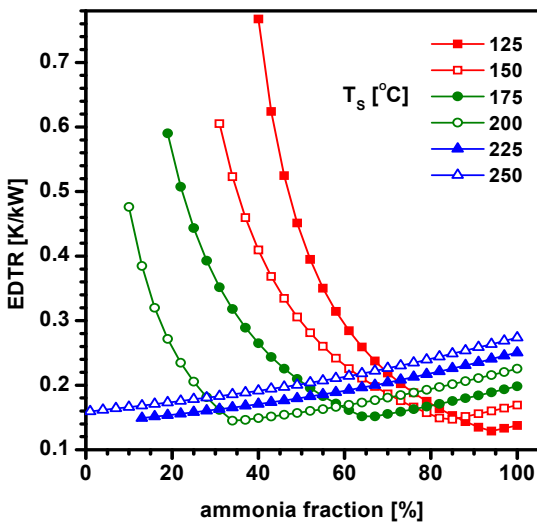


Fig. 9. Effects of ammonia fraction and source temperature on the EDTR

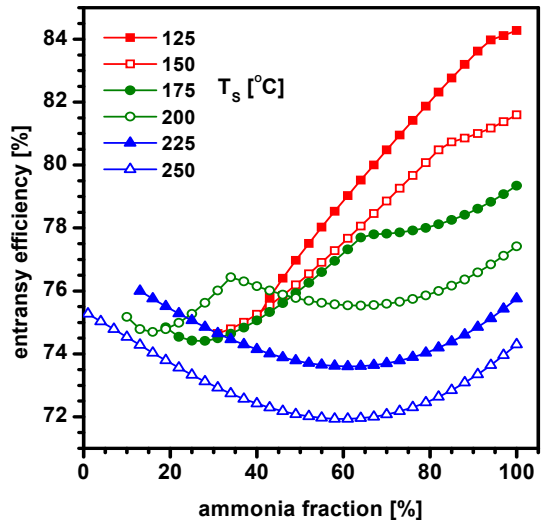


Fig. 11. Effects of ammonia fraction and source temperature on the entransy efficiency

농도가 감소하지만 열원온도가 200°C를 초과하는 경우에는 증발기 출구에서 혼합물이 과열증기 상태로 서 극대값에 대응하는 암모니아 농도가 증가한다. 고정된 암모니아 농도 조건에서 엔트랜시 소산은 열원온도가 높아짐에 따라 증가한다. 엔트랜시 소산 기반 열저항은 증발기 출구에서 혼합물이 부분증발 상태인 경우에는 암모니아 농도 증가에 따라 감소하지만 출구에서 혼합물이 과열증기 상태인 경우에는 증가하게 된다. 따라서 열저항은 암모니아 농도에 대해 열원온도가 200°C 이하인 경우에는 극소값을 갖지만 열원온도가 200°C를 초과하는 경우에는 단조 증가한다. 열원온도가 높아질수록 열저항은 암모니아 농도가 낮은 경우에는 감소하지만 암모니아 농도가 높은 경우에는 증가한다.

Fig. 10과 Fig. 11에서는 다양한 열원온도에 대해 암모니아 농도의 변화가 증발기 안에서 엔트랜시 소산에 기반한 온도차  $\Delta T_g$ 와 열교환기 효율에 미치는 영향을 각각 보여준다.

엔트랜시 온도차는 엔트랜시 소산을 열전달로 나눈 값으로 정의되며 열원온도에 따라 다른 경향을 보여준다. 암모니아 농도가 증가함에 따라 증발기 출구에서 혼합물이 부분 증발 상태인 열원온도 125°C와 150°C 경우에는 단조 감소하고 175°C와 200°C 경우에는 두 차례의 극대값을 갖는다. 그러나 증발기 출구에서 혼합물이 완전 증발 상태인 열원온도 225°C와 250°C의 경우에는 증가하다가 감소하여 암모니아 농도에 대해 하나의 극대값을 갖는다. 엔트랜시 효율은 고온유체의 엔트랜시 감소에 대한 저온유체의 엔트랜시 증가에 대한 비율로 정의되며, 암모니아 농도에 대해 대체적으로 반대되는 거동을 보여준다. 즉 암모니아 농도가 증가함에 따라 효율은 열원온도 125°C와 150°C 경우에는 단조 증가하고 175°C와 200°C 경우에는 두 차례의 극소값을 갖지만 열원온도 225°C와 250°C의 경우에는 감소하다 증가하여 암모니아 농도에 대해 하나의 극소값을 갖는다. 암모니아 농도가 50% 이상인 경우에 효율은 열원온도가 높아질수록 증가한다.

## 4. 결론

본 연구에서는 현열 에너지 형태의 비공비 암모니아-물 혼합물의 증발기에서 암모니아 농도와 열원온도의 변화에 대한 시스템의 에너지, 엑서지 및 엔트랜시 성능 특성을 해석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 열원온도에 따라 혼합물이 증발기 출구에서 부분증발 상태가 되기 위한 암모니아 농도의 하한값이 존재하며 그 하한값은 열원온도의 상승에 따라 감소한다. 증발기 출구에서 혼합물의 상태가 포화증기(이슬점)를 경계로 하여 부분증발인지 과열증기인지에 따라 시스템의 성능 특성이 매우 달라진다.

(2) 증발기의 열전달과 유용도는 암모니아 농도가 높아짐에 따라 증발기 출구에서 혼합물이 부분증발 상태이면 증가하지만 과열증기 상태이면 감소하여 극대값을 갖는다. 극대값에 대응하는 암모니아 농도는 열원온도 상승에 따라 감소하다가 열원온도가 225°C 이상이면 암모니아 농도에 대하여 단순 감소한다.

(3) 증발기 내 엑서지 파괴는 암모니아 농도나 열원온도 상승에 따라 증가한다. 엑서지 효율은 암모니아 농도에 대해 극대값을 가지며, 열원온도 상승에 따라 엑서지 효율의 극대값은 증가하고 대응하는 암모니아 농도는 감소하다가 열원온도가 225°C 이상이면 암모니아 농도에 대해 단순 감소한다.

(4) 열원온도나 암모니아 농도의 변화에 따른 엔트랜시 소산, 엔트랜시 소산 기반 열저항과 온도차, 엔트랜시 효율 등의 거동 특성은 에너지나 엑서지의 거동 특성과 매우 다르며, 새로이 도입된 엔트랜시 개념의 성능 특성에 대한 해석과 에너지나 엑서지와 의 차이에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요하다.

## 후 기

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었습니다(2019-104-003).

## References

- O. M. Ibrahim, "Design consideration for ammonia-water Rankine cycle", *Energy*, Vol. 21, No. 10, 1996, pp. 835-841, doi: [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(96\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0360-5442(96)00046-1).
- V. A. Prisyazhniuk, "Alternative trends in development of thermal power plant", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 28, No. 2-3, 2008, pp. 190-194, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.025>.
- 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>.
- P. A. Lolos and E. D. Rogdakis, "A Kalina power cycle driven by renewable energy sources", *Energy*, Vol. 34, No. 4, pp. 457-464, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.12.011>.
- M. Jonsson and J. Yan, "Ammonia-water bottoming cycles: a comparison between gas engines and gas diesel engines as prime movers", *Energy*, Vol. 26, No. 1, 2001, pp. 31-44, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(00\)00043-8](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(00)00043-8).
- P. Roy, M. Désilets, N. Galanis, H. Nesreddine, and E. Cayer, "Thermodynamic analysis of a power cycle using a low-temperature source and a binary NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O mixture as working fluid", *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 49, No. 1, 2010, pp. 48-58, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.05.014>.
- W. R. Wagar, C. Zamfirescu, and I. Dincer, "Thermodynamic performance assessment of an ammonia-water Rankine cycle for power and heat production", *Energ. Convers. Manage.*, Vol. 51, No. 12, 2010, pp. 2501-2509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.05.014>.
- K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", *Thermochim. Acta*, Vol. 530, 2012, pp. 7-16, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.11.028>.
- K. H. Kim, H. J. Ko, and K. Kim, "Assessment of pinch point characteristics in heat exchangers and condensers of ammonia-water based power cycles", *Appl. Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 970-981, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.08.055>.
- 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>.
- L. A. Prananto, I. N. Zaini, B. I. Mahendranata, F. B. Juangsa, M. Aziz, and T. A. F. Soelaiman, "Use of the Kalina cycle as a bottoming cycle in a geothermal power plant: Case study of the Wayang Windu geothermal power plant", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 132, 2018, pp. 686-696, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.003>.
- Z. Y. Guo, Z. Y. Zhu, and X. G. Liang, "Entransy—a physical quantity describing heat transfer ability", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 50, No. 13-14, 2007, pp. 2545-2556, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.034>.
- X. T. Cheng and X. G. Liang, "From thermomass to entransy", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 62, 2013, pp. 174-177, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.063>.
- M. Xu, "The thermodynamic basis of entransy and entransy dissipation", *Energy*, Vol. 36, No. 7, 2011, pp. 4272-4277, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.016>.
- K. H. Kim and K. Kim, "Comparative analyses of energy-exergy-entransy for the optimization of heat-work conversion in power generation systems", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 84, 2015, pp. 80-90, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.002>.
- K. H. Kim, "Optimal Analysis of Irreversible Carnot Cycle Based on Entransy Dissipation", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 41, No. 2, 2017, pp. 87-95, doi: <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.2.087>.
- X. Cheng, Q. Zhang, and X. Liang, "Analyses of entransy dissipation, entropy generation and entransy-dissipation-based thermal resistance on heat exchanger optimization", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 38, 2012, pp. 31-39, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.01.017>.
- J. Guo and M. Xu, "The application of entransy dissipation theory in optimization design of heat exchanger", *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 36, 2012, pp. 227-235, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.043>.
- K. H. Kim, K. Kim, and H. J. Ko, "Entropy and Exergy Analysis of a Heat Recovery Vapor Generator for Ammonia-Water Mixtures", *Entropy*, Vol. 16, No. 4, 2014, pp. 2056-2070, doi: <https://doi.org/10.3390/e16042056>.
- 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).