

LNG 냉열을 이용하는 암모니아-물 복합 재생 동력 사이클의 성능 특성

김경훈¹ · 오재형² · 정영관^{1†}

¹금오공과대학교 기계공학과, ²금오공과대학교 대학원

Performance Characteristics of a Combined Regenerative Ammonia-Water Based Power Generation Cycle Using LNG Cold Energy

KYOUNGHOON KIM¹, JAEHYEONG OH², YOUNGGUAN JEONG^{1†}

¹Department of Mechanical Engineering Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi,
Gyeongbuk, 730-701, Korea

²Graduate School, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk, 730-701, Korea

Abstract >> The ammonia-water based power generation cycle utilizing liquefied natural gas (LNG) as its heat sink has attracted much attention, since the ammonia-water cycle has many thermodynamic advantages in conversion of low-grade heat source in the form of sensible energy and LNG has a great cold energy. In this paper, we carry out thermodynamic performance analysis of a combined power generation cycle which is consisted of an ammonia-water regenerative Rankine cycle and LNG power generation cycle. LNG is able to condense the ammonia-water mixture at a very low condensing temperature in a heat exchanger, which leads to an increased power output. Based on the thermodynamic models, the effects of the key parameters such as source temperature, ammonia concentration and turbine inlet pressure on the characteristics of system are thoroughly investigated. The results show that the thermodynamic performance of the ammonia-water power generation cycle can be improved by the LNG cold energy and there exist an optimum ammonia concentration to reach the maximum system net work production.

Key words : Ammonia-water regenerative Rankine cycle(암모니아-물 재생 랭킨 사이클), LNG(액화 천연가스), Low-temperature heat source(저온 열원), Cold energy(냉열)

Nomenclature

h : specific enthalpy, kJ/kg

HX : heat exchanger

P : pressure, bar

P_H : turbine inlet pressure, bar

P_L : condensing pressure, bar

T : temperature, K or $^{\circ}\text{C}$

T_c : condenser outlet temperature, K or $^{\circ}\text{C}$

T_H : turbine inlet temperature, K or $^{\circ}\text{C}$

T_s : source temperature, K or $^{\circ}\text{C}$

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

[접수일 : 2013.9.30 수정일 : 2013.11.05 게재확정일 : 2013.12.31]

Copyright © 2013 KHNES

x_b : mass fraction of ammonia

y_{te} : quality at turbine exit

η : isentropic efficiency

Subscripts

1 : ammonia-water cycle

2 : LNG cycle

p : pump

s : source

t : turbine

1. 서 론

석탄이나 석유와 같은 화석 연료의 소비는 기술의 발전과 산업화로 인하여 빠르게 증가하고 있으나 기존 자원의 매장량에는 한계가 있기 때문에 태양열이나 지열, 산업 공정으로부터 배출된 폐열 등과 같은 저등급의 열원들을 활용하여 동력을 생산하는 시스템에 대한 연구가 주목받고 있다¹⁾.

폐열을 활용하여 동력을 생산하는 경우에는 폐열의 온도가 낮아질수록 시스템의 열효율이 떨어지기 때문에 증기를 사용하는 랭킨 사이클과 같은 기존의 시스템을 이용하는 것은 경제성을 잃게 된다. 따라서 폐열과 같은 현열 형태의 저등급 열원을 효율적으로 활용하기 위해서는, 일정한 압력에서도 온도가 변하면서 상변화가 진행되어 열교환기 내에서 고온 및 저온 유체 사이의 온도 불균형과 액서지 파괴를 줄일 수 있는 비공비 혼합물(Zeotropic mixture)을 사용하는 것이 유리하다¹⁾. 특히 암모니아와 물의 혼합물은 열용량이 크고 비등점이 낮은 등 열역학적 성질이 우수하고, 순수 물과 분자량이 비슷하여 증기 터빈을 그대로 사용할 수 있는 등 많은 장점이 있기 때문에 저온 열원을 활용하는 동력 생산 분야에서 활발히 연구되고 있다²⁻⁴⁾.

Ibrahim과 Klein⁵⁾은 특정 압력이나 농도 조건에서 열교환기의 용량을 변화시키면서 칼리나 사이클을 해석하였으며, Wagar 등⁶⁾은 스크롤 팽창기를 이용하여 암모니아-물을 작동 유체로 한 열병합 사이클을 연구하였다. Kim 등⁷⁻⁹⁾은 저온 폐열의 활용을 위한 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 하는 랭킨 사이클에 대한 연구와 단순 랭킨 사이클과 재생 랭킨 사이클을 비교 해석 그리고 암모니아-물 혼합물을 작동 유체로 하는 랭킨 사이클과 재생 사이클에 대하여 암모니아의 농도가 시스템의 열역학적 성능에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

액화 천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)는 청정 에너지원으로 최근에 각광을 받고 있으며 국내에서도 가정 및 산업용 연료로 널리 사용되고 있다. 메탄(CH_4)이 주성분인 LNG는 대기압 하에서 약 $-162^\circ C$ 의 극저온 액체 상태로 저장되며 LNG의 기화 과정에서 약 $840kJ/kg$ 의 냉열을 방출한다. 냉열을 활용하는 방안에 대한 최근 연구 결과들이 보고되고 있으며 일부는 실용 단계에 있다¹⁰⁻¹⁴⁾.

Deng 등¹⁵⁾은 화학 연료 에너지와 LNG 극저온 에너지의 두 에너지원을 갖는 새로운 열병합 발전 동력 시스템을 제안하였으며, 이때의 LNG는 동력 시스템의 열 싱크로 사용되었다. Lee¹⁶⁾는 LNG의 냉열과 발열량을 함께 이용하는 복합사이클을 설계하였으며 Kim 등¹⁷⁾은 LNG의 냉열을 개방형 가스터빈의 입구 온도를 낮추는데 활용하여 외기온도의 상승에 따른 가스터빈 출력의 저하를 개선하는 연구를 수행하였다. Wang 등¹⁸⁾은 저등급 열원과 LNG 냉열을 사용하는 몇몇의 동력생산 사이클을 제시하였고, Miyazaki 등¹⁹⁾은 기존의 쓰레기 소각 열을 이용한 사이클과 LNG 냉열을 활용한 복합사이클을 비교 분석하였다. Wang 등²⁰⁾은 LNG를 동력 사이클의 열 싱크로 사용하여 전기를 생산하는 암모니아-물 동력 시스템을 제안하였으며 Kim 등²¹⁾은 저온 열원 활용을 위하여 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 사용한 랭

킨 사이클에 LNG의 냉열을 활용한 복합 사이클에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 현열 형태의 저등급의 열원을 활용해서 효과적으로 동력을 생산하기 위하여 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 하는 재생 랭킨 사이클과 LNG 사이클의 복합사이클의 성능 특성에 대한 연구를 수행하였다. LNG는 암모니아-물 혼합물의 응축 온도를 낮출 뿐만 아니라 도시가스로 공급하기 전에 동력 생산을 위해 사용되었다. 시스템의 주요 설계변수인 암모니아-물 혼합물의 암모니아 농도, 열원의 온도 및 터빈입구 압력의 변화가 시스템에 미치는 영향에 대해 조사하였다.

2. 시스템 해석

본 연구에서는 현열 형태의 저온 폐열을 유용한 일로 변환하기 위하여, 암모니아-물 혼합물을 작동유체로 사용한 재생 랭킨 사이클과 LNG 사이클로 구성된 복합 발전 사이클에 대한 열역학적 성능 해석을 수행한다. LNG는 극저온에서 공급되며 계산의 편의성을 위해 메탄으로 가정한다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 재생 랭킨 사이클에서 열교환기 2를 나온 온도 T_c , 포화액 상태 1의 작동유체는 펌프 1에서 펌핑 과정을 통해 압력 P_{H1} 의 상태 2가 된다. 이후 재생기에서 상태 3으로 예열되고, 열교환기 1을 통해 터

빈입구 온도 T_{H1} 까지 상태 4로 더 가열된다. 이어서 작동유체는 터빈 1로 들어가 상태 5로 팽창되고, 재생기에서 예열되어 상태 6으로 나오며, 열교환기 2로 들어가 LNG와 열교환 후 다시 상태 1이 된다. 한편, LNG 사이클에서 LNG 저장조로부터 공급된 상태 7의 LNG는 펌프 2에서 증발되고, 압축되어 상태 8로 펌프 2를 나오며 열교환기 2로 들어가서 암모니아-물 혼합물을 응축하기 위해 냉열을 방출하고 가열되어 상태 9로 나온다. 이후 터빈 2로 들어가 동력을 생산한 후 상태 10으로 나오게 된다.

본 연구에서 해석할 복합 사이클에서 고온부 열원은 입구온도 T_s 로 유입되는 표준 공기로 가정하고, 시스템에서 열교환기를 제외한 열손실은 무시하며, 터빈과 펌프 이외에서의 압력변화 또한 무시한다. 펌프와 터빈에서의 등엔트로피 효율은 각각 η_{p1} , η_{p2} 와 η_{t1} , η_{t2} 로 일정하다고 가정한다. 현열형태의 저온 열원을 이용하여 동력을 생산하는 경우에 공급되는 에너지로부터 최대의 동력을 생산하는 것이 중요하기 때문에 본 연구에서는 주어진 공급 열원으로부터 최대의 동력을 생산하기 위한 최대 작동유체 유량으로 운전하는 것으로 해석한다. 그러므로 열교환기 1과 2, 그리고 재생기 등 각 열교환기에서 고온과 저온 유체의 최소 온도차는 미리 설정한 핀치포인트에 도달하는 조건으로 해석을 수행 한다^{8,25)}.

암모니아-물 혼합물의 열역학적 상태량들 중 액체와 기체 상태는 Xu와 Goswami²²⁾의 과잉김스에너지 생성함수 방법에 의해, 기체와 액체의 평형상태는 화학에너지 포텐셜 평형조건²³⁾에 의해, LNG의 열역학적 상태량들은 Patel-Teja 상태방정식²⁴⁾에 의해 계산한다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 시스템의 주요 변수들의 기본 값으로 $T_s = 200^\circ\text{C}$ 와 300°C , $\Delta T_{H1} = T_s - T_{H1} = 20^\circ\text{C}$, T_c

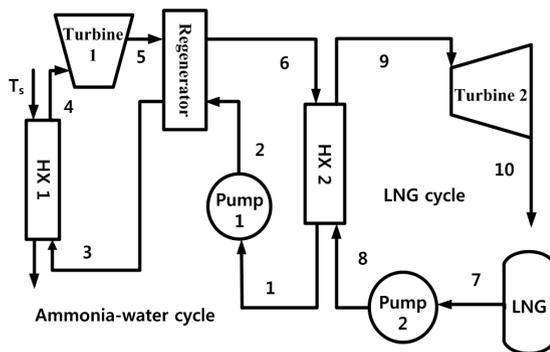


Fig. 1 Schematic diagram of the system

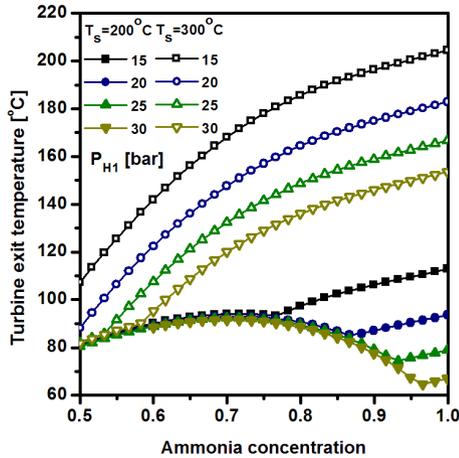


Fig. 2 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on turbine exit temperature

= 5°C, $P_{H2} = 40$ bar, $\Delta T_{H2} = T_6 - T_8 = 20^\circ\text{C}$, $P_{L2} = 4$ bar, $\eta_{p1} = \eta_{p2} = 0.70$, $\eta_{t1} = \eta_{t2} = 0.80$, $y_{te} = 0.90$ 을 사용한다. 또한 열교환기 1과 재생기에서는 열교환기 내 고온과 저온 유체의 최소 온도차가 핀치 포인트 $\Delta T_{pp} = 10^\circ\text{C}$ 가 되도록 운전한다고 설정한다. 즉 열교환기 1에서는 주어진 열원유체에 대해 암모니아-물 작동유체가 최대 유량 조건으로 운전되며, 재생기에서는 열교환기 용량이 최대가 된다고 설정한다.

열원온도가 200°C 와 300°C 인 경우에 대해서 Fig. 2에서는 15bar에서 30bar까지 터빈 1의 입구 압력이 변할 때 암모니아 농도의 변화에 따른 터빈 1의 출구 온도의 특성을 보여준다. 열원 온도가 높은 경우가 터빈 출구온도도 높게 되며, 동일한 열원 온도 즉 동일한 터빈 입구온도에서 터빈 입구압력이 높아질수록 터빈 출구온도가 낮아진다. 이는 같은 터빈 입구온도에서는 터빈 입구압력이 높을수록 작동유체의 엔트로피가 낮아서 같은 터빈 출구압력까지 팽창했을 때 작동유체의 온도도 낮아지기 때문이다. 동일한 터빈 입구온도 및 입구압력에서 터빈 출구온도는 작동유체의 암모니아 농도가 높아질수록 대체적으로 상승하는데 이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 동일한 터빈 입구압력 및 입구온도 조건에서 암모니아

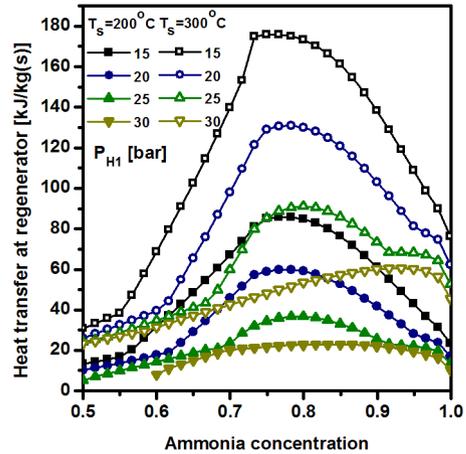


Fig. 3 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on heat transfer at regenerator

농도가 높아지면 터빈 입구에서 작동유체의 엔트로피가 낮아져서 터빈 출구온도의 감소 요인이 된다. 하지만 동일한 응축 온도에서 작동유체의 암모니아 농도가 높아지면 터빈 출구압력이 낮아지기 때문에 터빈에서의 압력비가 높아져서 결국 터빈 출구온도가 낮아지게 된다. 하지만 열원온도가 낮은 경우에는 터빈 출구에서 작동유체는 포화 혼합물이 될 수 있는데 이 경우에 터빈 출구온도는 그림에서 보는 바와 같이 터빈 입구압력에 따른 변화가 미미하게 된다.

Fig. 3에서는 터빈 입구압력이나 작동유체의 암모니아 농도 변화에 따른 재생기에서의 열전달 특성을 보여준다. 고정된 암모니아 농도에 대해 터빈 입구온도가 높아지거나 터빈 입구압력이 낮아지면 터빈 출구에 작동유체의 온도가 올라가므로 재생기에서의 열전달도 증가하게 된다. 한편 고정된 터빈 입구압력 및 입구온도에서 재생기에서의 열전달은 작동유체의 암모니아 농도에 대해 최대값이 존재하는데, 이는 작동유체의 농도가 높아질수록 터빈 출구온도가 높아져서 열전달의 증가요인이 있는 반면, 암모니아 농도가 높아질수록 터빈 출구에서 작동유체의 엔탈피가 감소해서 재생기에서의 열전달의 감소 요인이 동시에 존재하기 때문이다.

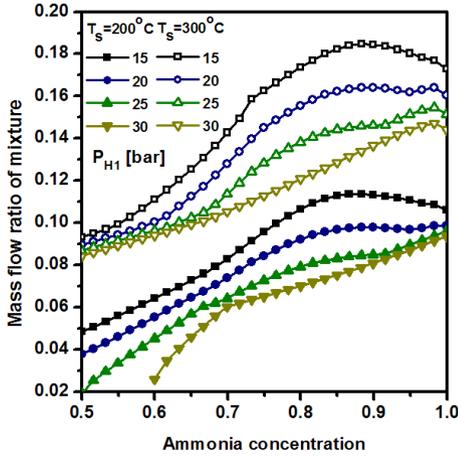


Fig. 4 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on mass flow ratio of mixture

Fig. 4에서는 터빈 입구압력이나 작동유체의 암모니아 농도의 변화에 따른 작동유체의 질량유량비의 특성을 보여준다. 이 질량유량비는 열원유체의 질량유량에 대한 작동유체의 질량유량의 비로 정의되고, 열원유체의 열교환기 입출구에서의 온도차에 비례하며 작동유체의 열교환기 입출구에서의 엔탈피 차이에 반비례한다. 열원유체의 출구온도는 핀치 포인트 발생 위치, 즉 열교환기 내에서 고온과 저온 유체의 온도차가 최소가 되는 위치와 밀접한 관련이 있다. 이 질량유량비는 대체적으로 열원의 온도가 높고 터빈 입구압력이 낮을수록 높다. 또한 이 질량유량비는 작동유체의 암모니아 농도에 따라 대체로 증가하나 터빈 입구압력이 낮아지면 암모니아 농도가 높은 영역에서 최대값을 가지는데, 이는 재생기에서의 열전달이 작동유체의 암모니아 농도의 증가에 따라 증가하다 감소하고 이에 따라 열교환기 입구에서 작동유체의 온도가 역시 암모니아 농도의 증가에 따라 증가하다 감소하는 영향 때문이다.

Fig. 5에서는 터빈 입구압력이나 작동유체의 암모니아 농도의 변화에 따른 열원유체 단위질량당 열교환기 1에서의 열전달의 특성을 보여준다. 이 열전달은 작동유체 단위질량당 열전달, 즉, 열교환기 입구

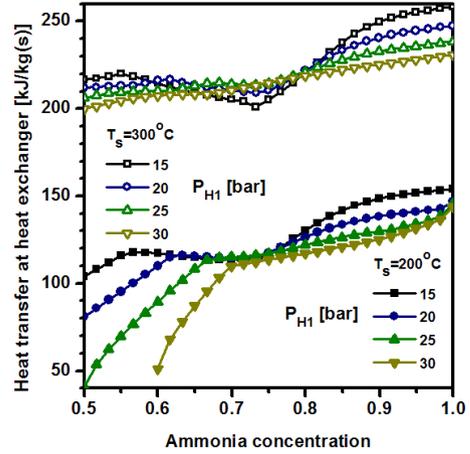


Fig. 5 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on heat addition at heat exchanger

및 출구에서 작동유체의 비엔탈피 차이와 작동유체의 질량유량비로 구할 수 있다. 열원온도가 높을수록 비엔탈피차와 질량유량비 모두 증가하므로 열교환기 내 열전달도 증가한다. 그러나 터빈 입구압력이 증가할수록 비엔탈피 차는 증가하지만 질량유량비는 감소하므로 열교환기 내 열전달은 터빈 입구압력에 따라 복잡한 거동을 보인다. 작동유체의 암모니아 농도가 증가함에 따라 비엔탈피 차는 대체로 감소하나 질량유량비가 증가하므로 열교환기 내 열전달은 암모니아 농도에 따라 대체적으로 증가한다.

Fig. 6-8에서는 터빈 입구압력이나 작동유체의 암모니아 농도의 변화에 따른 암모니아-물 사이클, LNG 사이클 및 이들의 복합 사이클에서의 열원유체 단위질량당 순 생산일, 여기서는 터빈 생산일에서 펌프 소요일을 뺀 순생산일의 특성을 각각 보여준다. 각 사이클에서 순 생산일은 열원유체에 대한 작동유체의 질량유량비와 작동유체 단위질량당 순생산의 곱으로 구해진다. 암모니아-물 사이클에서 작동유체 단위질량당 순생산일은 열원온도가 높을수록, 터빈 입구압력이 높을수록, 그리고 작동유체의 암모니아의 농도가 낮을수록 증가한다. 그러나 열원유체에 대한 작동유체의 질량유량비는 열원온도가 높을수록,

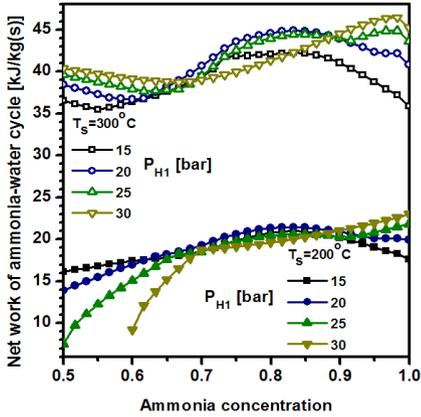


Fig. 6 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on ammonia-water cycle

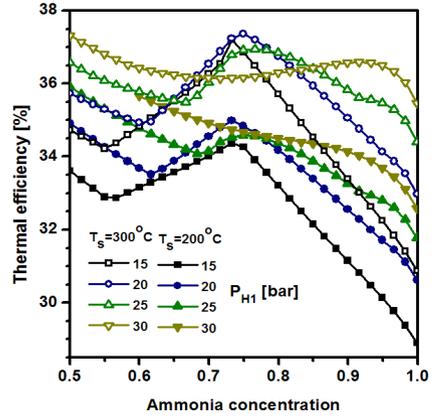


Fig. 9 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on thermal efficiency

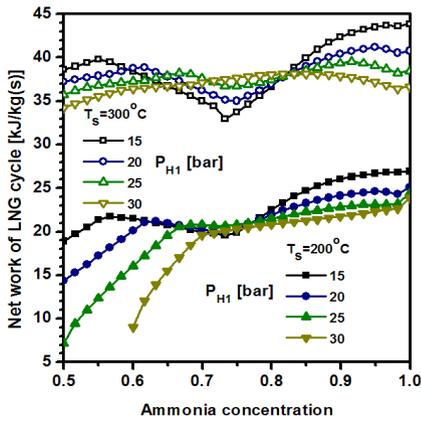


Fig. 7 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on LNG cycle

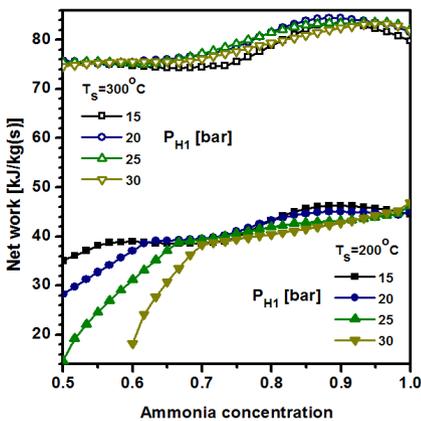


Fig. 8 Effects of ammonia concentration and turbine inlet pressure on net work of combined system

터빈 입구압력이 낮을수록, 그리고 암모니아 농도가 높을수록 증가한다. 따라서 열원유체 단위질량당 순생산일은 터빈 입구압력이나 암모니아 농도의 변화에 대해 복잡한 특성을 보이고 있다.

LNG 사이클에서 열원유체 단위질량당 순생산일도 작동유체인 LNG의 단위질량당 순생산일과 열원유체에 대한 작동유체의 질량유량비의 곱으로 구해지며 암모니아 사이클의 순생산일과 크기 정도가 비슷하며, 또한 터빈 입구압력이나 암모니아 농도에 대해서도 복잡한 영향을 보여준다. 이들의 합인 열원유체 단위질량당 복합시스템의 순생산일은 열원온도가 높은 경우에 더 크며, 터빈 입구압력의 영향은 상대적으로 작으며, 암모니아 농도의 증가에 따라 대체적으로 증가하여 암모니아 농도 90% 근방에서 대체로 최고값을 갖는다.

시스템의 열효율은 시스템에 공급한 열전달에 대한 순생산일로 정의된다. Fig. 9에서는 터빈 입구압력이나 작동유체의 암모니아 농도에 대한 열효율의 특성을 보여준다. 그림에서 LNG 냉에너지를 활용하는 복합시스템의 열효율은 저온 열원을 사용하는 보통의 동력 사이클에 비해 열효율이 훨씬 높다는 사실을 알 수 있다. 열원온도가 높으면 시스템에 공급하는 열전달과 시스템의 순생산일이 모두 증가하여

열효율은 열원온도가 높은 쪽이 약간 높음을 알 수 있다. 작동유체의 암모니아 농도가 증가함에 따라 열효율이 증가하다 감소하여 최대값을 가질 수 있는데 이 효과는 터빈 입구압력이 높아짐에 따라 감소한다. 따라서 터빈 입구압력이나 암모니아 농도의 변화에 따른 시스템의 열효율은 매우 복잡한 경향을 보인다. 한편 현열 형태의 저온 열원을 이용하여 시스템에 열을 공급한 다음 난방 등 추가로 활용하면 열효율이 더 중요하고 추가로 활용하지 않으면 열효율보다는 시스템의 순생산일이 더 중요하다고 할 수 있다.

4. 결 론

저온 열원을 활용하기 위한 암모니아-물 재생 랭킨 사이클과 LNG의 냉열을 활용하기 위한 LNG 사이클의 복합사이클에 대한 열역학적 특성들을 다양한 관점에서 해석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 터빈 입구온도가 높아지거나 터빈 입구압력이 낮아지면 터빈 출구에 작동유체의 온도가 상승하고 재생기에서의 열전달이 증가한다.
- 2) 작동유체의 암모니아 농도가 증가함에 따라 재생기에서의 열전달은 증가하다 최대값을 갖고 다시 감소한다.
- 3) 복합시스템의 순생산일은 열원온도가 높을수록 증가하나 터빈 입구압력에 의한 영향은 상대적으로 미미하다.
- 4) 복합시스템의 순생산일은 암모니아의 농도가 증가함에 따라 대체적으로 90% 근방에서 최대값을 갖는다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. O. M. Ibrahim, "Design considerations for ammonia-water Rankine cycle", *Energy*, Vol. 21, 1996, pp. 835-841.
2. V. A. Prisyazhniuk, "Alternative trends in development of thermal power plant", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 190-194.
3. B. Kiani, A. Akisawa, and T. Kashiwagi, "Thermodynamic analysis of load-leveling hyper energy converting and utilization system", *Energy*, Vol. 33, 2008, pp. 400-409.
4. W. Nowak, A. A. Stachel, and A. Borsukiewicz Gozdur, "Possibilities of implementation of absorption heat pump in realization of the Clausius-Rankine cycle in geothermal power station", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, 2008, pp. 335-340.
5. O. M. Ibrahim, and S. A. Klein, "Absorption power cycles", *Energy*, Vol. 21, 1996, pp. 21-27.
6. W. R. Wagar, C. Zamfirescu, and I. Dincer, "Thermodynamic performance assessment of an ammonia-water Rankine cycle for power and heat production", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, 2010, pp. 2501-2509.
7. K. H. Kim, S. W. Kim, and H. J. Ko, "Study on the Rankine cycle using ammonia-water mixture as working fluid for use of low-temperature waste heat", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 21, No. 6, 2010, pp. 570-579.
8. K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Effects of ammonia concentration on the thermodynamic performances of ammonia-water based power cycles", *Thermochemica Acta*, Vol. 530, No. 20, 2012, pp. 7-16.
9. K. H. Kim, C. H. Han, and K. Kim, "Comparative exergy analysis of ammonia-water based Rankine cycles with and without regeneration", *Int. J. Exergy*, Vol. 12, No. 6, 2013, pp. 344-361.
10. H. J. Song, "A study on the power generation

- technology utilizing LNG cold energy”, Korea Electric Power Research Institute, 1985.
11. C. W. Kim, “Performance analysis of power generation cycle using LNG cold energy”, Ph.D. thesis, Seoul National University, Korea, 1993.
 12. G. S. Lee, Y. S. Chang, M. S. Kim, and S. T. Ro, “Thermodynamic analysis of extraction process for the utilization of the LNG cold energy”, *Cryogenics*, Vol. 36, 1996, pp. 35-40.
 13. G. S. Lee, and S. T. Ro, “Analysis of the liquefaction process of exhaust gases from an underwater engine”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 18, 1998, pp. 1243-1262.
 14. T. S. Kim, S. T. Ro, W. I. Lee, and S. K. Kauh, “Performance enhancement of a gas turbine using LNG cold energy”, *Journal of KSME(B)*, Vol. 25, 1999, pp. 653-660.
 15. S. M. Deng, H. G. Jin, R. X. Cai, and R. M. Lin, “Novel cogeneration power system with liquefied natural gas (LNG) cryogenic exergy utilization”, *Energy*, Vol. 29, 2004, pp. 497-512.
 16. G. S. Lee, “Design and exergy analysis for a combined cycle using LNG cold/hot energy”, *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration engineering*, Vol. 17, No. 4, 2005, pp. 285-296.
 17. S. T. Kim, S. T. Ro, W. I. Lee, and M. S. Choi, “Improvement of Gas Turbine Performance Using LNG Cold Energy”, *Transactions of the Korean society of mechanical engineers. B*, Vol. 23, No. 164, 1999, pp. 653-660.
 18. Q. Wang, Y. Z. Li, and J. Wang, “Analysis of power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, 2004, pp. 539-548.
 19. T. Miyazaki, Y. T. Kang, A. Akisawa, and T. Kashiwagi, “A combined power cycle using refuse incineration and LNG cold energy”, *Energy*, Vol. 25, 2000, pp. 639-655.
 20. J. Wang, Z. Yan, and M. Wang, “Thermodynamic analysis and optimization of an ammonia-water power system with LNG (liquefied natural gas) as its heat sink”, *Energy*, Vol. 50, 2013, pp. 513-522.
 21. 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.
 22. F. Xu, and D. Y. Goswami, “Thermodynamic properties of ammonia-water mixtures for power cycle application”, *Energy*, Vol. 24, 1999, pp. 525-536.
 23. K. H. Kim, and C. H. Han, “Analysis of transcritical organic Rankine cycles for low-grade heat conversion”, *Advanced Science Letters*, Vol. 8, No. 15, 2012, pp. 216-221.
 24. 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, 1997, pp. 27-36.
 25. 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”, *Applied Energy*, Vol. 113, 2014, pp. 970-981