

선박폐열을 이용한 100 kW급 유기랭킨사이클의 성능특성 Performance Characteristics of 100 kW Organic Rankine Cycle Using Ship Waste Heat

윤정인* · 손창효* · 설성훈* · 박상찬* · 임승택** · 이호생***†

Jung-In Yoon*, Chang-Hyo Son*, Sung-Hoon Seol*, Sang-Chan Park*,
Seung-Taek Lim** and Ho-Saeng Lee***†

(Received 17 October 2022, Revision received 22 November 2022, Accepted 23 November 2022)

Abstract : This study aims to investigate the performance characteristics of the 100 kW Organic Rankine Cycle (ORC) using ship waste heat. The heat source of ORC was steam generated by economizer, and the heat sink was seawater. Three cycles including the basic cycle, preheating cycle, and I.H.X (Internal heat exchanger) cycle were investigated. The results show that applying I.H.X can increase the efficiency of the cycle, and applying preheater can reduce the required mass flow rate of steam which is the heat source. Furthermore, it is recommended to lower the evaporation temperature and enhance the superheating degree to reduce the high expansion ratio, without system efficiencies decreased.

Key Words : Organic Rankine Cycle (ORC), Ship Waste Heat, Cycle Type of ORC

— 기호 설명 —

Q : 열전달율 [kW]

W : 발전량 [kW]

T : 온도 [°C]

I.H.X: 중간 열교환기

*** 이호생(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) :
책임연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021

*윤정인(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

*손창효(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) :
교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

*설성훈(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707) :
조교수, 부경대학교 냉동공조공학전공

*박상찬(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793) :
대학원생, 부경대학교 냉동공조공학전공

**임승택(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6889-9698) :
연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터

***† Ho-Saeng Lee(ORCID:https://orcid.org/0000-0003-3042-5889)
: Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research
Center/Korea Research Institute of Ship & Ocean Engineering
E-mail : hslee@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5021

*Jung-In Yoon(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-1099-3435) :
Professor, Major of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.

*Chang-Hyo Son(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-2143-0515)
: Professor, Major of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.

*Sung-Hoon Seol(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-9724-9707)
: Assistant Professor, Major of Refrigeration and Air-
Conditioning Engineering, Pukyong National University.

*Sang-Chan Park(ORCID:https://orcid.org/0000-0002-6153-9793) :
Graduate student, Major of Refrigeration and Air-Conditioning
Engineering, Pukyong National University.

**Seung-Taek Lim(ORCID:https://orcid.org/0000-0001-6889-9698)
: Researcher, Seawater Energy Plant Research Center/Korea
Research Institute of Ship & Ocean Engineering.

P : 압력 [kPa]
 h : 비엔탈피 [kJ/kg]

그리스 문자

η : 효율 [%]

하첨자

t : 터빈
 p : 펌프
 e : 증발기
 c : 응축기
 s : 스팀
 i : 입구
 o : 출구
 net : 순수
 sub : 과냉각도
 sup : 과열도

1. 서 론

오늘날 전 지구적으로 환경과피와 온실가스 배출로 인한 지구온난화 문제가 대두되고 있다. 이에 대응하여 세계 각국에서는 2050년 탄소중립을 목표로 정책을 추진하고 있으며, 대한민국 정부 또한 화력 발전량을 감축시키고 탄소 포집 기술을 이용하는 등 탄소중립에 박차를 가하고 있다.¹⁾

한편, 선박에서 발생하는 탄소 발생량을 저감하기 위하여 국제적인 노력이 지속되고 있다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 선박에서 배출되는 온실가스인 질소 산화물(NO_x) 및 황 산화물(SO_x)에 대한 규제를 강화함과 동시에 ‘선박 온실가스 감축전략’을 통하여 선박에서 배출되는 온실가스 감축을 2030년에 2008년 대비 40% 감축하며, 2050년에 온실가스 배출량을 50% 감축하는 것을 목표로 하고 있다.²⁾ 이에 대한 대응으로 선박에서 발생하는 탄소를 저감하기 위하여 선박에서 발생하는 폐열을 이용한 발전 시스템이 관심을 받고 있는 상황이다. Fig. 1은 선

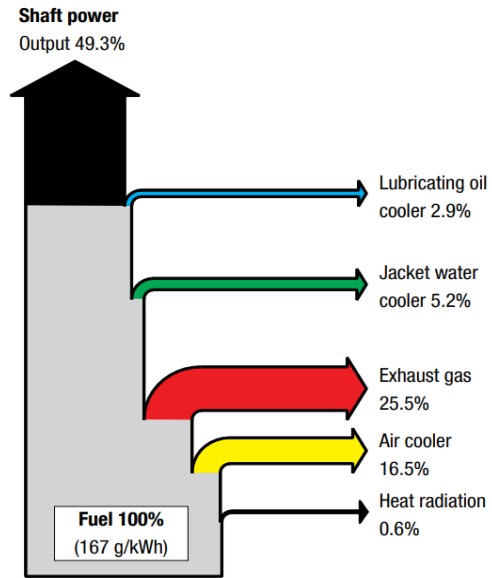


Fig. 1 Heat balance for MAN B&W engine³⁾

박의 엔진에서 발생하는 에너지의 변환 과정을 나타내고 있다.

한편, 선박 폐열을 이용한 발전 시스템에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. Moon⁴⁾ 등은 소기 냉각기(Scavenge air cooler)에서 나오는 냉각수를 열원으로, 표층 해수를 열침으로 사용한 선박 폐열 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)에 대한 연구를 진행하였다. 작동유체는 R-134a를 이용하였으며, 터빈 입구 온도가 ORC에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Cho⁵⁾ 등은 계절적, 환경적 변화에 의하여 열원이나 열침의 온도 변화가 발생하는 경우에 대해 탈설계 성능해석을 수행하였으며 그 결과, 열원과 열침의 온도 변화가 사이클에 미치는 영향력은 비슷하다고 보고하였다. Yang⁶⁾ 등은 친환경 작동유체인 R-1234ze(Z), R-1233zd(E), R-1336mzz(E)를 적용한 ORC에 대해 분석하였으며 작동유체의 등온선과 등엔트로피선의 형상 또한 사이클의 효율에 영향을 미치는 요소라고 보고하였다. Sung⁷⁾ 등은 LNG선에서 엔진의 배기가스와 엔진 냉각수, 해수를 열원으로, LNG와 해수를 열침으로 사용한 ORC에 대해 추가적인 부속기기가 사이클에 미치는 영향에 대해 분석하였다. Kim⁸⁾ 등은 중간 열교환기와 예열기

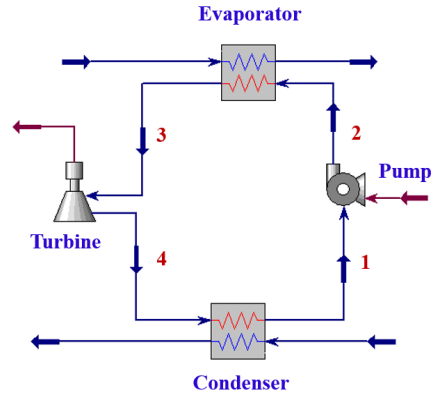
를 적용한 네 가지 사이클에서 팽창기 입구온도가 사이클에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

현재까지 선박폐열 발전에 대해 다양한 사이클이 연구되어져 왔다. 그러나 발전 사이클이 적용되는 상황에 따라 각 사이클을 통해 얻을 수 있는 장점은 차이가 있을 것으로 판단되며 개별적인 상황에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 고려된다. 따라서 본 연구에서는 이코노마이저에서 생성되는 스팀과 엔진 냉각수를 열원으로, 해수를 열침으로 하여 발전량 100 kW를 목표로 하는 ORC에서 운전변수와 사이클의 종류가 발전 사이클에 미치는 영향을 분석하였다.

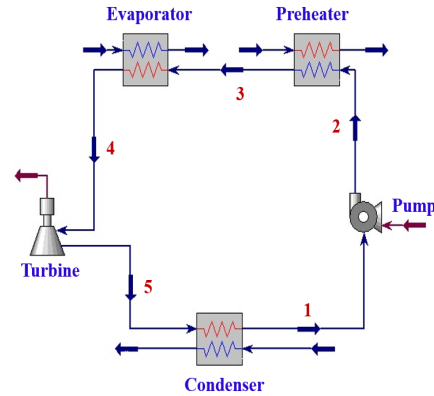
2. 시뮬레이션 방법

2.1 유기랭킨사이클

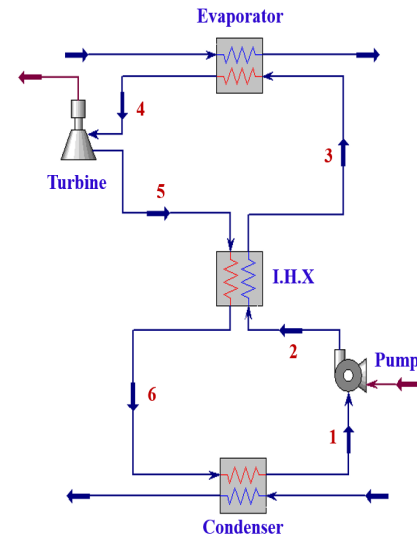
ORC는 발전 사이클의 일종으로 물보다 비점이 낮은 유기 작동유체를 사용하는 발전 사이클이다. 일반적인 랭킨사이클과 달리 비점이 낮은 작동유체를 사용하기 때문에 중저온의 폐열을 회수하여 발전하기에 용이하다는 장점이 있다.⁹⁾ Fig. 2는 기본 ORC의 P-h 선도를 나타내고 있다. 펌프에서 가압된 고압의 액이 증발기에서 열원과 열교환을 통해 증발하여 고온 고압의 증기가 된다. 이 증기가 터빈을 통과하여 일을 하면서 전기를 생성하고 저온, 저압이 된 증기는 응축기에서 열침으로 열을 방열하여 응축되며 사이클을 완성한다. 본 연구에서는 총 세 가지의 사이클에 대해 분석을 수행하였으며, Fig. 3은 사이클의 종류에 대해 나



(a) Basic cycle



(b) Pre heating cycle



(c) I.H.X cycle

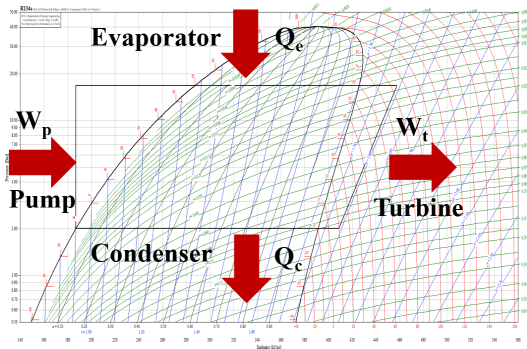


Fig. 2 P-h diagram of basic ORC

Fig. 3 Schematic diagram of simulation cycles

타내고 있다. 사이클의 종류는 일반적인 ORC(a), 예열기 적용 사이클(b), 중간 열교환기 적용 사이클(c)로 구성하였다. 중간 적용 열교환기 사이클은 터빈 출구에서 나오는 증기가 펌프에서 나오는 액을 가열하는 형태이며, 예열기 적용 사이클은 펌프에서 나오는 액을 가열한다는 점에서는 중간 열교환기 적용 사이클과 같지만 엔진 냉각수 등 추가적으로 가용한 다른 열원으로 하여 열에너지를 얻는다는 점에서 차이가 있다.

2.2 시뮬레이션 조건

Table 1은 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 조건을 나타내고 있다. 시뮬레이션은 Aspen사의 Hysys를 이용하였다. 열원인 스팀의 입구 온도와 압력은 각각 170℃, 700 kPa이며, 출구 온도는 150℃로 고정하였다. 열침은 해수를 사용하는 것으로 가정하였으며, 해수의 입구 온도는 30℃, 출구 온도는 35℃로 가정하였다. 예열기 사이클에서 사용되는 엔진 냉각수의 입구 온도는 90℃, 출구 온도는 80℃로 설정하였다. 터빈의 효율은 터빈의 열역학적인 효율(80), 축이나 베어링에서 발생하는 마찰로 인한 기계적인 효율(90), 발전기에서의 손실로 인한 효율(90)을 모두 감안하여 64.8%로 가정하였으며, 펌프 효율을 80%로 가정하였다. 과냉각도는 응축기 출구에서 작동유체(액체)의 온도와 포화온도의 차이를 의미하며, 과열도는 증발기 출구에서 작동유체(기체)의 온도와 포화온도의 차이를 의미한다. 사이클의 과냉각도와 과열도는 펌프와 터빈의 안전을 고려하여 5℃로 가정하였다.

Table 1 Summary of operating conditions

Parameter	Value	Unit
Turbine η	64.8	%
Pump η	80	%
$T_{s,i}$	170	℃
$T_{s,o}$	150	℃
$P_{s,i}$	700	kPa
W_{net}	120	kW
T_{sup}, T_{sub}	5	℃

열교환기 압력강하는 상변화가 있는 열교환기는 50 kPa, 기타 열교환기는 10 kPa로 가정하였다. 목표 발전량은 100 kW이나 안전율을 고려하여 120 kW의 발전량을 얻을 수 있는 유량으로 설정하였다.

2.3 작동유체

작동유체는 열원과 열침의 온도를 고려하여 원활한 응축과 증발이 일어날 수 있도록 선정하였으며 지구온난화 지수(Global warming potential, GWP)와 오존층 파괴 지수(Ozone depletion potential, ODP)를 고려하여 R-600a, R-245fa, R-1233zd(E)를 후보군으로 하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 작동유체의 표준비점(Normal boiling point, NBP), ODP, GWP, ASHRAE 안전그룹을 표시하였다.

Table 2 Property of working fluid in analysis

Working fluid	NBP [℃]	ODP	GWP	Safety group
R-245fa	15	0	858	B1
R-1233zd(E)	19	0	6	A1
R-600a	-11.7	0	3	A3

3. 결과 및 고찰

3.1 작동유체 선정

Fig. 5는 기본 사이클에서 R-600a, R-245fa, R-1233zd(E)를 작동유체로 적용하였을 때 증발온도 변화에 따른 효율 변화를 나타내고 있다. 증발온도는 열원의 온도를 고려하여 100℃에서 150℃의 범위에서 변화시켰다. R-600a는 비교적 낮은 임계온도와 임계압력 때문에 140℃ 이상의 증발온도에서는 아임계 상태로 운전되지 못하였으며, R-245fa와 R-1233zd(E)는 모든 증발온도 범위에서 아임계 상태로 운전이 가능하였다. 모든 온도 범위에서 R-1233zd(E)가 가장 좋은 효율을 보였으며, 150℃의 증발온도에서 약 11.5%의 효율을 보였다.

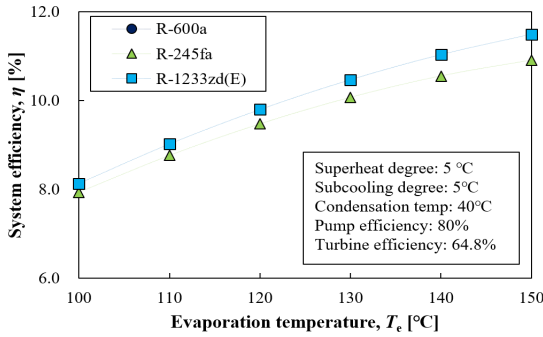


Fig. 5 System efficiency according to the working fluid

R-1233zd(E)는 또한 낮은 GWP와 ODP를 가진 친환경 작동유체이며 독성과 가연성이 없는 유체이다. 따라서 이어지는 분석에서는 R-1233zd(E)를 작동유체로 선정하였다.

3.2 사이클의 종류에 따른 영향

Fig. 6은 작동유체를 R-1233zd(E)로 설정한 뒤 세 가지 종류의 사이클에 대하여 증발온도를 변화시킨 상황에서 효율의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 7은 각 사이클에서 증발기, 예열기, 중간 열교환기의 용량을 나타내고 있다. 중간 열교환기를 적용한 사이클이 모든 증발온도 범위에서 다른 사이클에 비해 높은 효율을 나타내고 있다. 이는 터빈 출구에서 나오는 증기가 펌프 출구에서 증발기 입구로 가는 액을 가열하기 때문이다. 이로 인해 증발기의 용량이 줄어들어 입력 에너지가 감소하기 때문에 사이클의 효율이 개선되는 것으

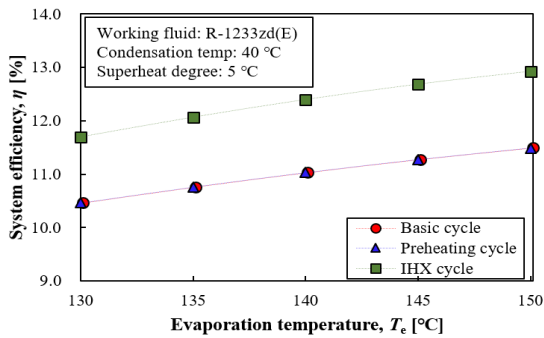


Fig. 6 System efficiency according to the cycle types

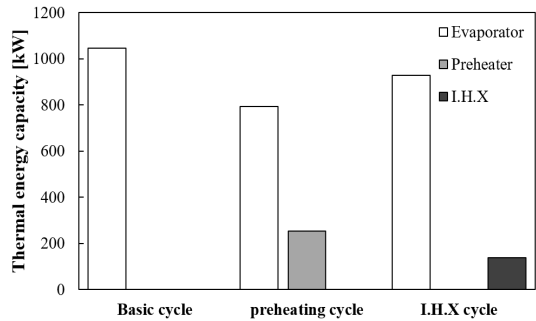


Fig. 7 Effect of applying I.H.X preheater

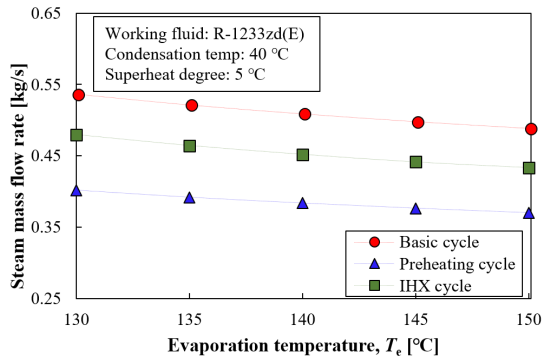


Fig. 8 Steam mass flow rate according to the cycle types

로 판단된다. 기본 사이클과 예열기 사이클의 효율은 동일한 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 7에서 나타나듯 예열기의 적용을 통해 증발기의 용량을 줄일 수 있지만 줄어든 증발기의 용량과 예열기의 용량이 같기 때문에 입력 에너지의 합이 일정하기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 증발온도 변화에 따라 각 사이클에서 필요로 하는 스팀의 유량을 나타내고 있다. 120 kW의 동일한 발전량을 얻을 때 예열기 적용 사이클, 중간 열교환기 적용 사이클, 기본 사이클 순서대로 필요한 스팀의 양이 적은 것을 확인할 수 있다. 예열기 적용 사이클의 효율이 중간 열교환기 적용 사이클의 효율보다 낮음에도 불구하고 필요로 하는 스팀의 양이 더 적은 경향을 보였다. 이는 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 예열기를 통해 감소된 증발기의 열량이 중간 열교환기를 통해 감소된 열량보다 비교적 크기 때문에 예열기 적용

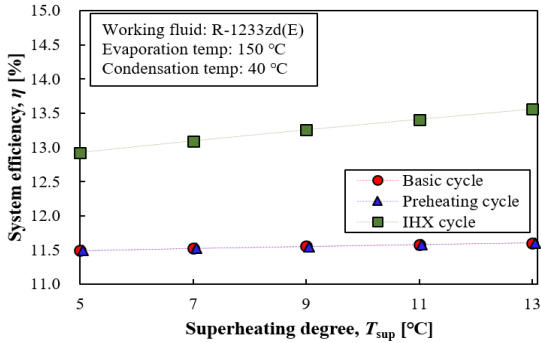


Fig. 9 System efficiency according to the superheating degree

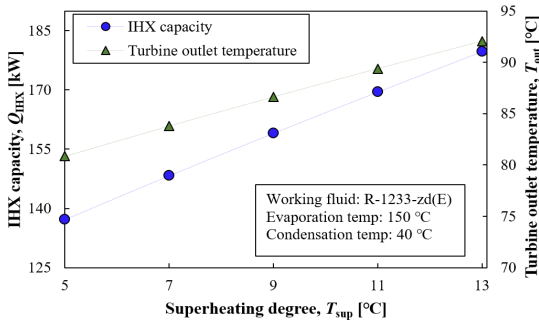


Fig. 10 I.H.X capacity and turbine outlet temperature according to the superheating degree

사이클의 증발기 용량이 비교적 크게 감소하기 때문으로 사료된다. 예열기 적용 사이클은 주 열원인 스팀의 열량이 제한적인 상황에서 발전량을 확보하고자 하는 경우에 적용이 유리할 것으로 판단된다. Fig. 9는 과열도를 5~13°C 사이에서 변화시켰을 때 각 사이클의 효율 변화를 나타내고 있다. 기본 사이클과 예열기 적용 사이클은 과열도의 증가가 효율에 미치는 영향이 미미하였으나 중간 열교환기 적용 사이클은 과열도가 13°C일 때 5°C인 경우에 비해 효율이 약 5% 상승하는 모습을 보였다. 이는 동일한 증발온도에서 과열도가 상승하면 터빈 입구 온도가 증가하게 되고 이에 따라 터빈 출구의 온도 또한 증가하기 때문으로 사료된다. 다시 말하자면 사이클의 응축온도가 고정된 상태에서 터빈 출구 온도(중간 열교환기 입구 온도)가 상승하기 때문에 중간 열교환기에서

열교환량이 증가하게 된다. 따라서 증발기가 열원으로부터 얻는 열량이 감소하기 때문에 효율이 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 10은 과열도 증가에 따른 터빈 출구 온도와 중간 열교환기의 용량 변화를 나타내고 있다.

3.3 터빈 팽창비에 대한 고찰

Fig. 11은 기본 사이클에서 증발온도가 변화할 때 터빈 입출구의 팽창비를 나타내고 있다. 터빈이 1개인 경우(Single-stage)와 2개의 터빈을 직렬로 연결한 경우(Two-stage)에 대하여 각각 표시하였으며, 2단 터빈에서 중간 압력은 각 터빈의 팽창비를 동일하게 맞추는 압력으로 설정하였다. 단일 터빈을 사용하는 경우, 8 이상의 팽창비를 필요로 하는 모습을 확인할 수 있다. 터빈의 팽창비가 높은 경우, 유동 가속으로 인하여 노즐 혹은 로터의 목에서 마하수가 1.0이 되는 초킹(choking) 현상이 발생하게 되는데, 이는 유량의 변화 없이 팽창비만 증가하게 되는 현상을 의미한다.¹⁰⁾ 약 3.0 정도의 팽창비에서 초킹 현상을 피할 수 있는 것으로 알려져 있다.¹¹⁾ 그러나 Fig. 11에서 나타나듯 2단 터빈을 적용한 경우에도 증발온도가 135°C 이상으로 증가하면 각 터빈의 팽창비가 3.0 이상 되는 모습을 확인할 수 있다. 따라서 2단 터빈을 적용한 경우에도 각 터빈의 팽창비를 낮추기 위해 사이클의 증발온도를 감소시켜야 한다고 판단된다. 그러나 증발온도를 감소시키면 Fig. 6에서 나타나듯 사이클의 효율이 감소하게 되는데,

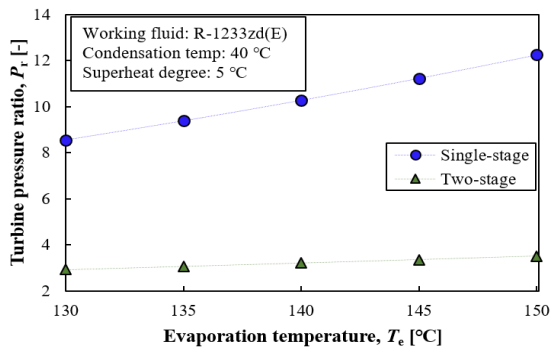


Fig. 11 Expansion ratio according to the evaporation temperature

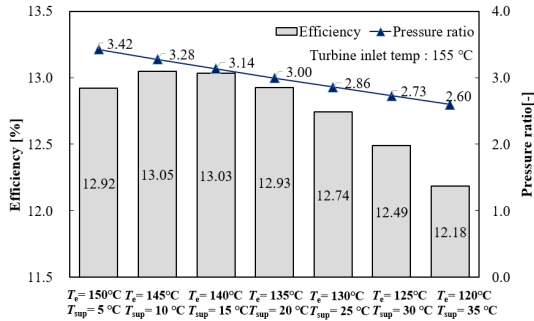


Fig. 12 Change of efficiency varying pressure ratio

이러한 경우, 중간 열교환기 사이클에서 과열도의 증가를 통해 팽창비의 감소로 인한 효율 감소를 보상할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 터빈의 팽창비를 감소시키면서 낮아지는 사이클의 효율이 보상되는 정도를 분석하기 위해 2단 터빈에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 증발온도를 감소시키고 과열도를 증가시켜 가며 터빈 입구 온도를 일정하게 유지시킨 상태로 효율과 팽창비의 변화를 분석하였다.

Fig. 12는 증발온도 감소, 과열도 증가에 따라 사이클의 효율과 팽창비 변화를 나타내고 있다. 팽창비가 감소하여도 과열도의 증가로 인해 효율은 증가하는 경향을 보였다. 팽창비 3.28에서 가장 높은 효율을 가진 뒤 이후 감소하는 경향을 보였다. 증발온도가 150°C인 경우와 135°C인 경우를 비교하면 터빈 팽창비를 3.42에서 3.0으로 감소시키면서 효율의 변화는 거의 없는 모습을 확인할 수 있었다. 따라서 중간 열교환기 사이클에서는 과열도의 증가를 통해 터빈 팽창비를 감소시키면서 일정 이상의 효율을 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

본 연구에서는 선박에서 발생하는 스팀을 이용한 100 kW급 발전 시스템에 대해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1) 친환경 작동유체인 R-1233zd(E)는 100~150°C의 증발온도 범위에서 R-600a와 R-245fa에 비해

높은 효율을 가지는 것으로 파악된다.

2) 중간 열교환기의 적용은 기본사이클에 비해 효율 향상을 불러일으킬 수 있는 것으로 판단된다. 예열기의 적용은 동일한 발전량에서 필요로 하는 열원의 양을 감소시킬 수 있는 것으로 파악된다.

3) 기본 사이클과 예열기 적용 사이클은 과열도 증가가 효율에 미치는 영향이 미미하였으나 중간 열교환기 사이클에서는 효율의 증가를 가져올 수 있었다.

4) 2단 터빈을 적용한 중간 열교환기 사이클에서 증발온도를 감소시키면서 과열도를 증가시키면 터빈의 각 팽창비가 3.42에서 3.0으로 감소하여도 거의 동일한 효율을 얻을 수 있었다.

후 기

이 논문은 2022년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(20220634, 친환경선박 전주기 혁신기술개발사업).

Author contributions

J. I. Yoon; Writing-original draft, Project administration, C. H. Son; Investigation, Formal analysis, S. H. Seol; Methodology, Investigation, S. C. Park; Software, Data curation, S. T. Lim; Writing-review & editing, Visualization. H. S. Lee; Writing-review & editing, Supervision.

References

- 2050 Carbon Neutrality Commission, 2021, 2050 Carbon neutrality scenarios.
- Korea Maritime Institute, 2020, A study on Policy Directions for Responding IMO's Regulation on GHG Emission.
- MAN, 2014, Waste Heat Recovery System(WHRS) for Reduction of Fuel

- Consumption, Emission, and EEDI; MAN Diesel & Turbo.
4. J. H. Moon, H. S. Lee and J. B. Seo, 2021, "Performance Analysis of ORC Cycle Using Waste Heat", *Journal of Power system Engineering*, Vol. 25, No. 5, pp. 43-50. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.5.043>)
 5. S. Y. Cho and C. H. Cho, 2022, "Effect of Temperature Change of Cooling Water and Heat source on Organic Rankine Cycle", *Journal of Power system Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 41-52. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.4.041>)
 6. J. Yang, Z. Ye, B. Yu, H. Ouyang and J. Chen, 2019, "Simultaneous experimental comparison of low-GWP refrigerants as drop-in replacements to R245fa for Organic Rankine cycle application: R1234ze(Z), R1233zd(E), and R1336mzz(E)", *Energy*, Vol. 173, pp. 721-731. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.054>)
 7. T. H. Sung and K. C. Kim, 2016, "Thermodynamic analysis of a novel dual-loop organic Rankine cycle for engine waste heat and LNG cold", *Applied thermal engineering*, Vol. 100, pp. 1031-1041. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.102>)
 8. Y. M. Kim, D. G. Shin, C. G. Kim and G. B. Cho, 2016, "Single-loop organic Rankine cycles for engine waste heat recovery using both low-and high-temperature heat sources", *Energy*, Vol. 96, pp. 482-494. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.092>)
 9. C. M. Invernizzi, 2013, *Closed Power Cycles*, Lecture Notes in Energy 11. (DOI:10.1007/978-1-4471-5140-1)
 10. S. J. Kim, 2018, "Menline Analysis Method for Performance Analysis of a Multi-stage Axial Turbine in Choking Region", *Journal of Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 22, No. 2, pp. 20-28. (DOI:<https://doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.2.020>)
 11. S. J. Han, J. B. Seo, 2014, "Design and Configuration of 200kW Organic Rankine Cycle Turbine", *The Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 38, No. 12, pp. 1057-1064. (<http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.12.1057>)