

선박폐열 발전시스템의 유량변화에 따른 동특성

Dynamic of a Ship Waste Heat Recovery System under Flow Rate Variations

안유민* · 박상찬* · 윤정인* †

Yu-Min An*, Sang-Chan Park* and Jung-In Yoon* †

(Received 25 November 2024, Revision received 20 December 2024, Accepted 20 December 2024)

초록 : IMO의 온실가스 배출 규제에 대응하기 위해 유기 랭킨 사이클(ORC) 시스템의 동적 해석을 수행하였다. 친환경 냉매인 R-1233zd(E)를 작동유체로 사용하였으며, 펌프, 열교환기, 터빈의 성능 곡선을 반영하여 시뮬레이션을 진행하였다. 중간 열교환기를 적용한 2단 터빈 ORC 시스템을 적용하였으며 열원은 이코노마이저에서 생성된 증기를 사용하여 유량 변화에 따른 동특성을 분석하였다. 유량 변화는 선형 응답, 정현파 응답 패턴을 이용하였으며, 터빈으로의 액체 유입을 방지하기 위해 펌프의 RPM을 제어하여 과열도를 20℃로 유지하였다. 해석 결과, 선형 응답에서는 과열도가 점진적으로 변화하며 PID 제어 시스템이 유량 변동에 안정적으로 대응할 수 있었다. 정현파 응답에서는 과열도가 안정적으로 유지되었고 발전량과 효율이 범위 내에서 진동하면서 PID 제어가 주기적 유량 변동에 강인함을 보임을 확인하였다.

키워드 : 유기랭킨사이클, 온실가스 배출, R-1233zd(E), 동적 해석, 유량 변화

Abstract : This study conducted a dynamic analysis of a Organic Rankine Cycle (ORC) system to comply with IMO greenhouse gas emission regulations. The environmentally friendly refrigerant R-1233zd (E) was selected as the working fluid, and the simulations incorporated the performance curves of the pump, heat exchanger, and turbine. A two-stage turbine ORC system with an internal heat exchanger was applied, using economizer steam as the heat source to analyze dynamic characteristics under varying flow rates. Flow rate variations were tested with linear and sinusoidal response patterns, and the pump RPM was controlled to maintain a superheat of 20℃ and to prevent liquid inflow into the turbine. The results showed that in the linear response, superheat changed gradually, demonstrating that the PID control system could respond effectively to flow fluctuations. In the sinusoidal response, superheat remained stable, and power output and efficiency oscillated within a safe range, confirming the robustness of the PID controller against periodic flow rate variations.

Key Words : ORC, Greenhouse Gas Emission, R-1233zd (E), Dynamic Analysis, Flow Rate Variation

* † 윤정인(<https://orcid.org/0000-0002-1099-3435>) : 교수, 국립부경대학교 냉동공조공학전공

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*안유민(<https://orcid.org/0009-0004-3980-6818>), 박상찬(<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>) : 대학원생, 국립부경대학교 냉동공조공학전공

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

E-mail : yoonji@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6180

*Yu-Min An(<https://orcid.org/0009-0004-3980-6818>), Sang-Chan Park(<https://orcid.org/0000-0002-6153-9793>) : Graduate student, Major of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

— 기 호 설 명 —

- W : 발전량 [kW]
- U : 총괄열전달계수 [$\text{kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$]
- A : 면적 [m^2]
- T : 온도 [$^\circ\text{C}$]
- P : 압력 [bar]
- Q : 체적 유량 [m^3/s]
- F : 질량 유량 [kg/s]
- H : 양정 [m]
- P : 압력 [bar]
- SO_x : 황 산화물
- NO_x : 질소 산화물
- GWP : 지구 온난화 지수
- ODP : 오존 파괴 지수
- NBP : 표준 비점
- $I.H.X$: 중간 열교환기
- $LMTD$: 대수평균 온도차

그리스 문자

- ε : 효율

하첨자

- t : 터빈
- p : 펌프
- e : 증발기
- c : 응축기
- s : 스팀
- i : 입구
- o : 출구
- f : 최종
- r : 냉매
- hs : 열침
- net : 순 출력
- sup : 과열도

1. 서 론

2050년까지 탄소중립을 달성하려는 목표하에

각국 정부는 화석연료 사용을 줄이고 신재생 에너지와 같은 대체 에너지원에 대한 투자를 늘리고 있다.¹⁾ 대한민국 정부 또한 화석연료 발전 축소와 탄소 포집 및 저장(Carbon Capture and Storage, CCS) 기술 도입을 통해 이 과정에 적극 동참하고 있다. 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 선박 운항 중 배출되는 오염 물질을 줄이기 위한 규제를 단계적으로 강화하고 있다. 특히 2012년부터 시행된 MARPOL 협약의 부속서 VI 개정은 선박에서 발생하는 황 산화물(SO_x) 및 질소 산화물(NO_x)의 배출을 제한하는 규정을 포함하며, 2020년부터는 황 함유량 0.5% 이하의 연료 사용이 의무화되었다.²⁾ 이러한 규제는 선박의 배기가스를 대폭 줄이고 해양 환경을 보호하는데 중요한 역할을 하고 있다. 이에 따라 선박 운항 중 발생하는 폐열을 활용하는 ORC (Organic Rankine Cycle)가 선박 배기가스를 저감할 수 있다는 점에서 주목받고 있다.

선박 폐열을 열원으로 활용한 발전 사이클에 대한 다양한 연구가 진행되었다. Song⁴⁾ 등은 배기가스와 엔진 냉각수를 열원으로 사용하는 전통적인 회수 시스템에 대해 단일 사이클과 이중 ORC 시스템을 통한 열역학적 및 경제적 분석을 수행하였다. Sung⁵⁾ 등은 액화천연가스(LNG) 선박을 대상으로 배기가스를 열원으로 해수를 열 싱크로 활용하는 고온 유기랭킨사이클에 대해 연구를 진행하였다. Yoon⁶⁾ 등은 I.H.X(Internal heat exchanger)를 적용한 사이클을 연구하여 사이클의 효율성을 향상시키고 시스템의 전반적인 성능을 개선하는 방법을 제시했다. Yoon⁷⁾ 등은 R1233zd, R1234ze, R1336mzz(Z)와 같은 다양한 작동 유체를 적용하여 엔진 부하에 따른 발전 출력과 효율 변화를 연구하였다.

대부분의 기존 연구는 고정된 운전 조건에서 ORC 시스템의 성능을 평가하는 데 중점을 두었으며, 실제 운항 중 발생하는 열원 유량 변동과 같은 동적 변화에 따른 시스템의 성능 변화에 관한 연구는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 선박 운항 중 발생할 수 있는 다양한 열원 유량 변화 패턴에 따른 유기 랭킨 사이클의 성능 및 제어 안

정성을 평가하고자 한다.

2. 시뮬레이션 방법

2.1 유기랭킨사이클(ORC)

ORC는 폐열을 활용해 전기를 생산하는 에너지 변환 시스템이다. 기존의 증기 랭킨 사이클과 비교해 비점이 낮은 작동 유체를 사용하여 중·저온 열원을 더욱 효과적으로 활용할 수 있다. 이를 통해 중·저온의 선박 폐열을 에너지원으로 활용할 수 있다는 장점이 있다. ORC의 작동 원리는 다음과 같다.

열원이 증발기에 공급되어 작동 유체를 가열해 고온의 증기로 변환되며, 이 증기는 터빈으로 유입되어 팽창하면서 일을 수행하여 전기를 생산한다. 터빈을 통과한 증기는 응축기를 거쳐 액체 상태로 변환된 후 펌프를 통해 다시 증발기로 순환되며 사이클이 반복된다.

본 연구에서는 I.H.X(Internal heat exchanger)를 적용한 2단 터빈 사이클을 사용하였으며, Fig. 1은 실제 동적 분석 진행에 사용된 사이클을 나타낸다.

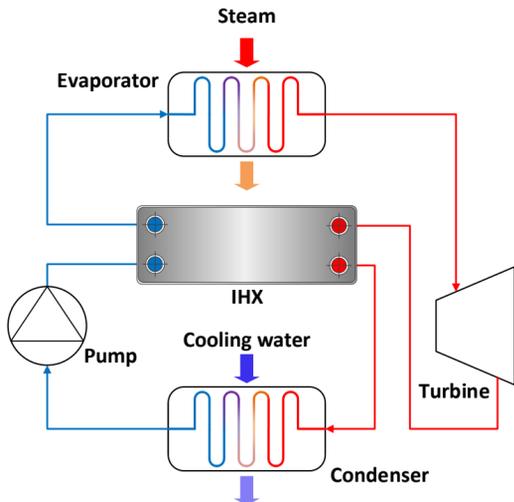


Fig. 1 Schematic diagram of simulation cycle

2.2 시뮬레이션 조건

작동 유체로는 ASHRAE 표준 Safety Group A1 (비가연성, 비독성)에 속하며, 저온 열원에서 높은 효율을 보이는 친환경 냉매 R-1233zd(E)를 선택하였다.

Table 1은 R-1233zd(E)의 환경적 특성과 열역학적 특성⁸⁾을, Table 2는 시뮬레이션에 사용된 주요 조건을 나타내고 있다. 열원 온도는 170℃로 고정하였고, 터빈 팽창 과정에서 액체 유입을 방지하기 위해 증발기 출구에서 과열도를 20℃로 설정하였다. 또한 열 싱크 온도는 30℃, 열원 압력은 700 kPa로 설정하였다.

Table 1 Property of working fluid in analysis

Working fluid	ODP	GWP	NBP [°C]	Safety group
R-1233zd (E)	0	1	18	A1

Table 2 Analysis condition

Parameter	Value	Unit
$T_{s,i}$	170	°C
T_{sup}	20	°C
T_{hs}	30	°C
$P_{s,i}$	700	kPa
UA_e	87,760	kJ/°C·h
UA_c	536,300	kJ/°C·h
$W_{net,t}$	120	kW

2.3 ORC 시스템의 동적 모델링

본 연구에서는 ORC 시스템의 주요 기기인 펌프, 터빈 그리고 열교환기의 성능을 모델링하였다. 기존에 정적 설계를 통해 시스템 성능을 평가한 후 실제 선박 운전 중 발생하는 변동에 따른 시스템 성능을 해석하고자 하였다.

2.3.1 펌프

펌프는 ORC 시스템에서 작동 유체를 순환시키는 장비로 유량(Q), 양정(H), 그리고 효율(η)은

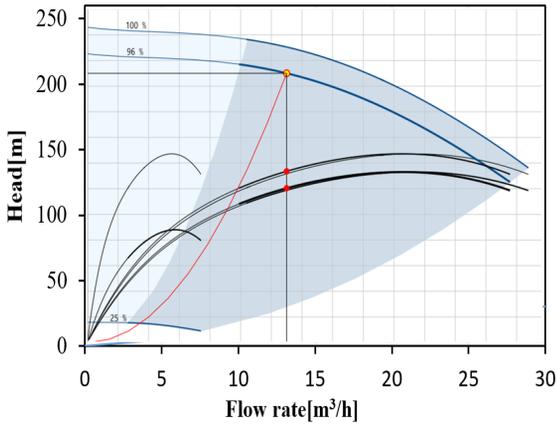


Fig. 2 Pump performance curve of the ORC model

성능곡선 상에서 비선형적으로 변동한다. 펌프의 성능 곡선은 Graunfoss 사의 카탈로그⁹⁾에서 제공된 데이터를 기반으로 하였으며, 이를 통해 유량 변화에 따른 압력 및 효율 변화를 모델링하였다. Fig. 2는 ORC 모델에 적용된 펌프 성능 곡선을 나타낸다.

2.3.2 터빈

터빈은 고온·고압의 증기를 이용해 기계적 에너지를 생산한다. 이 기계적 에너지는 발전기를 통해 전력으로 변환된다. 터빈의 성능은 압력비가 증가할수록 출력이 증가하지만, 초킹(choking) 현상으로 인해 일정 압력비를 초과하면 유량이 증가하지 않는 한계에 도달하게 된다. 초킹 현상은 터빈의 효율과 출력에 영향을 미치므로 이를 고려하여 압력비 범위를 설정하고 최적 운전 조건을 도출하였다. 또한 종래 연구¹⁰⁾의 성능 곡선을 참고하여 압력비 변화에 따른 출력 및 효율 변화를 모델링하여 터빈의 동적 특성을 반영하였다.

2.3.3 열교환기

본 논문에서 적용한 열교환기는 셸앤튜브 타입이며, 열교환 방식은 대향류로 설정하였다. 이때 열교환기에서 발생하는 압력강하는 시스템 사이클 내에서 동적 변화를 유발한다. 이를 프로그램의 동적 모델링 환경에서 초기 설정을 위해 식

(1)에 따라 conductance k 값을 적용하여 참조 압력강하를 설정한다. 여기서 F 는 질량 유량을 ΔP 는 열교환기 전 후단 압력 차를 의미한다. 질량 유량이 변할 경우, 열교환기의 압력강하도 변하게 되므로 식 (2)를 통해 이를 보정한다.

또한 압력 강하 외에도 ORC의 열원 조건 변화에 따른 열부하는 시간에 따라 변동해야 한다. 초기 열부하는 정상 상태에서 식 (3)을 이용하여 결정되며, 이때 U 는 총괄 열전달계수, A 는 열교환기 면적을 나타낸다. 동적 분석을 수행할 때는 식 (4)를 통해 UA 값을 보정하도록 하였다.¹¹⁾

$$k = \frac{F}{\sqrt{\Delta P} \sqrt{\rho}} \tag{1}$$

$$k_{cur} = k_{ref} \times \left(\frac{F_{cur}}{F_{ref}} + 0.001 \right)^{0.5} \tag{2}$$

$$Q = UA \times LMTD \tag{3}$$

$$UA_f = UA_{old} \times 0.1 + UA_r \cdot (100 + F_{ratio}^{0.01})^{0.8} \tag{4}$$

2.4 과열도 제어 알고리즘

열원 부하 변동 시 ORC 시스템의 안정적 운영을 유지하기 위해 터빈으로 액체 상태의 유체가 유입되지 않도록 하는 것이 매우 중요하다. 열원 유량이 감소하면 증발기의 열전달이 감소하여 증발이 충분히 이루어지지 않을 수 있다. 이는 액체 상태의 유체가 터빈으로 유입될 위험을 증가시키며 터빈의 손상이나 시스템 성능 저하를 초래할 수 있다. 이를 방지하기 위해 적절한 과열도를 유지하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 터빈 입구에서 목표 과열도를 20°C로 유지하기 위해 펌프의 RPM을 조절하는 과열도 제어 알고리즘을 구성하였다. 과열도 제어에는 PID(Proportional Integral Derivative) 제어 알고리즘을 적용하였으며, 과열도 변화를 실시간으로 감지하고 펌프 RPM을 조정하여 목표값을 유지하도록 설계되었다. PID 제어는 0.1초 간격으로 과열도 신호를 수집하고 이를 기반으로 펌프

RPM을 범위 내에서 제어하며, 프로그램의 자동 튜닝 기능을 활용하여 PID 계수를 최적화하였다. 이러한 알고리즘은 열원 유량 변동 조건에서도 과열도를 효과적으로 유지하여 터빈 보호와 시스템 안정성을 달성할 수 있도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 ORC 시스템에서 기준 유량 0.4276 kg/s를 0.3 kg/s, 0.35 kg/s, 0.4 kg/s로 변화시켰다. 이러한 유량 변화를 선형 응답(Linear response) 및 정현파 응답(Sinusoidal wave response)을 적용하여 시스템의 반응을 분석하였다. 각 유량 변화 방식이 과열도, 발전 효율, 발전량에 미치는 영향을 비교한 결과는 다음과 같다.

3.1 선형응답에 의한 영향

Fig. 3은 선형 응답에 따른 과열도 변화를 나타내고 있다. 유량은 15분 동안 선형적으로 감소하였으며, 그 이후에는 일정한 유량이 흐르도록 설정하였다. 유량이 선형적으로 증가하거나 감소함에 따라 과열도 또한 점진적으로 변화하는 경향을 확인할 수 있었다. 유량이 변화하는 15분 동안 과열도는 10.4% 범위에서 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 과열도를 신호로 하는 PID 제어 시스템이 일정 시간 동안 선형적으로 발생하는 부하 변동에 효과적으로 대응할 수 있음을 확인할 수 있었다.

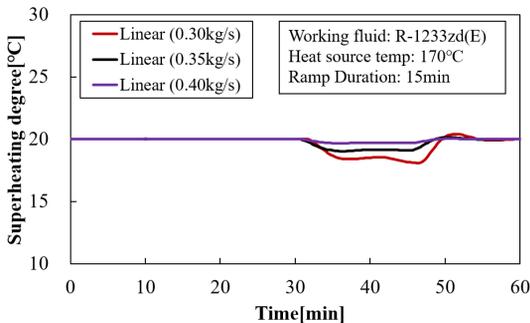


Fig. 3 Superheating degree change with respect to Linear response

Fig. 4는 선형 응답에 따른 발전량의 변화를 나타내고 있다. 유량이 선형적으로 감소함에 따라 발전량도 동일한 경향으로 감소하였다. 이는 과열도를 일정하게 유지하기 위해 펌프의 RPM이 조정된 결과로 판단된다. 유량이 클수록 발전량 감소 폭이 상대적으로 적게 나타난 점은 기준 유량 대비 변동 폭이 발전량에 더 큰 영향을 미쳤기 때문으로 해석된다. 기준 유량에서 변동 폭이 클수록 과열도 제어를 위한 펌프의 RPM 조정이 더욱 중요해지며, 이에 따른 시스템 성능 변화도 더 뚜렷하게 나타난 것으로 보인다.

Fig. 5는 선형 응답에 따른 사이클의 효율 변화를 나타내고 있다. 발전 효율은 Net Power의 경우와 같이 시간에 따라 감소하는 경향을 보이다가 응답이 끝난 이후에는 수렴하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 앞선 계단 응답과 선형 응답을 통해서 과열도를 제어신호로 받아 펌프의 RPM을

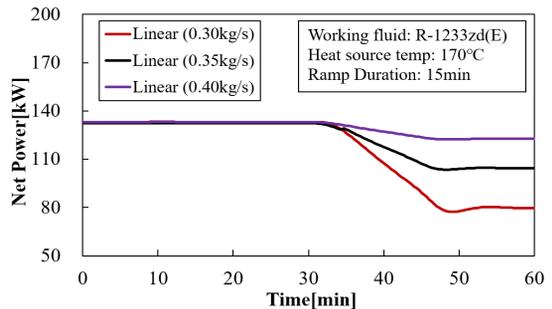


Fig. 4 Net power change with respect to Linear response

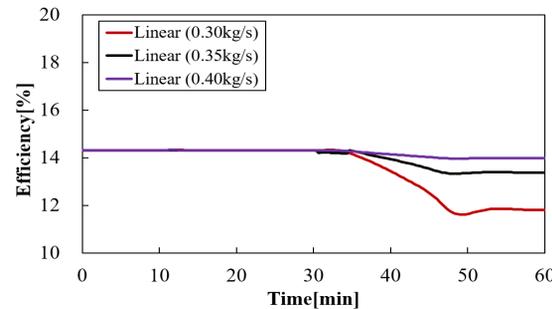


Fig. 5 Efficiency change with respect to Linear response

조절하는 ORC 시스템에서는 열원의 유량이 발전량과 효율에 영향을 미칠 수 있는 인자임을 확인할 수 있었다.

3.2 정현파 응답에 의한 영향

Fig. 6은 정현파 응답에 따른 과열도 변화를 나타내고 있다. 0.4276 kg/s의 유량을 기준으로 진폭을 각각 7.5%, 9.25%, 26%로 변화시키고, 주기는 15분으로 설정하였다. 열원의 유량이 26% 변동하는 상황에서 시스템의 과열도는 35.5% 내에서 유지되는 모습을 확인할 수 있었다. 정현파 응답을 통해 시간에 따른 열원의 유량의 변화율이 지속적으로 진동하여도 터빈으로 액체가 유입되지 않음을 확인하였다. 이를 통해 과열도를 신호로 하는 PID 제어기의 강인성을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 정현파 응답에 따른 사이클의 발전량

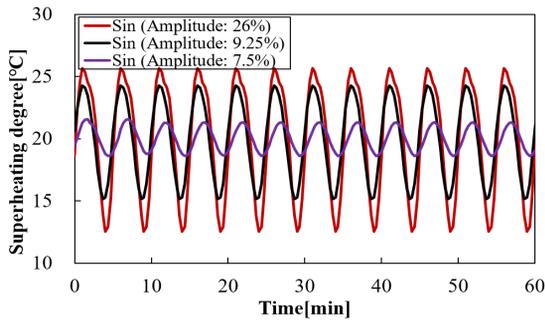


Fig. 6 Superheating degree change with respect to Sinusoidal wave response

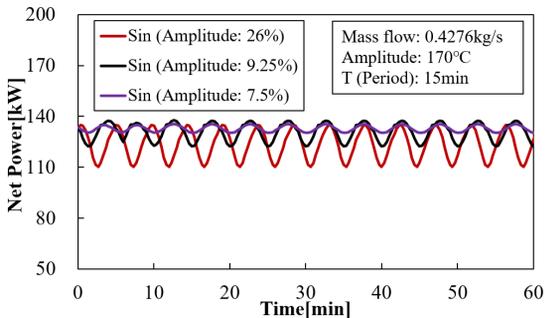


Fig. 7 Net power change with respect to Sinusoidal wave response

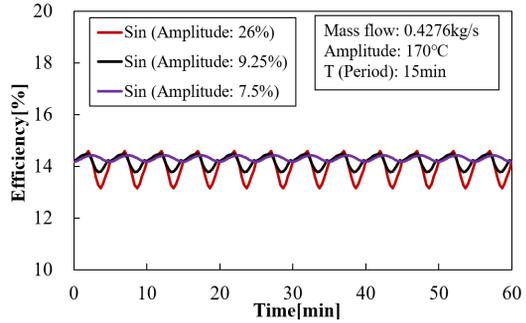


Fig. 8 Efficiency change with respect to Sinusoidal wave response

변화를 나타내고 있다. 발전량 또한 과열도와 같이 정현파 모양으로 진동하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 열원의 유량이 정현파 모양으로 변화할 때 일정 과열도를 유지하기 위해 펌프의 RPM 또한 지속적으로 진동하기 때문으로 판단된다. Fig. 8은 정현파 응답에 따른 사이클의 발전 효율을 나타내고 있다. 앞서 발전량의 경우와 마찬가지로 시간에 따라 정현파 모양으로 진동하는 경향을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 선박의 스팀을 활용한 100 kW급 발전 시스템의 열원 유량 변화를 계단 응답, 선형 응답, 정현파 응답으로 구분하여 적용하였으며, 각 응답 방식이 시스템의 과열도, 발전량, 효율에 미치는 영향을 분석하였다.

1) 선형 응답에서는 유량이 변동할 경우, 과열도가 점진적으로 변화하며 안정적으로 수렴하는 모습을 보였다. 유량 변화 동안 과열도가 일정한 범위에서 유지되었으며, 이를 통해 PID 제어 시스템이 일정한 부하 변동에 효과적으로 대응할 수 있음을 확인하였다.

2) 정현파 응답에서는 열원 유량이 주기적으로 진동하였음에도 불구하고, 과열도가 일정 범위 내에서 안정적으로 유지되어 터빈으로의 액체 유입이 발생하지 않았다. 발전량과 효율도 정현파 형태로 진동하며 안전성을 유지하였으며, PID 제어

기가 주기적인 유량 변동에도 강인하게 대응할 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2023~2024년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

J. I. Yoon; Writing-review & editing, Supervision. Y. M. An; Writing-Original draft. S. C. Park; Data curation.

References

1. 2050 Carbon Neutrality Commission, 2021, 2050 Carbon Neutrality Senarios.
2. Korea Maritime Institute, 2020, A study on Policy Directions for Responding IMO's Regulation on GHG Emission.
3. MAN Diesel & Turbo, 2014, Waste Heat Recovery System (WHRS).
4. J. Song, Y. Song and wei Gu C, 2015, "Thermodynamic analysis and performance optimization of an Organic Rankine Cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel", Energy, 82, 976-985. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.108>)
5. 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, 100, 1031-1041. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.102>)
6. J. I. Yoon et al., 2022, "Performance Characteristics of 100kW Organic Rankine Cycle Using Ship Waste Heat", Journal of Power System Engineering, 26(6), 40-47. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2022.26.6.040>)
7. J. W. Yoon et al., 2022, "Analysis of Ship's Waste Heat Recovery System and CO₂ Emission Reduction according to Engine Loads", Journal of Power System Engineering, 28(1), 34-43. (<https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.1.034>)
8. Climalife, 2015, R-1233zd Physical Properties.
9. Grundfos, 2024, CRNE15-12 A-FGJ-A-E-HQQE catalog.
10. S. C. Park et al., 2023, "Performance analysis of an organic Rankine cycle with an internal heat exchanger considering turbine pressure ratio and efficiency", Energy, 285, 129507. (<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129507>)
11. F. Fazlollahi et al., 2016, "Transient natural gas liquefaction process comparison-dynamic heat exchanger under transient changes in flow", Applied Thermal Engineering, 109, 775-788. (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.082>)