

동력시스템공학회지 제28권 제1호 pp. 34-43 2024년 2월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online) Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.1.034 Vol. 28, No. 1, pp. 34-43, February 2024

선박 엔진 부하에 따른 폐열회수 발전시스템의 성능해석 및 CO₂ 배출량 감축 효과 분석 Analysis of Ship's Waste Heat Recovery System and CO₂ Emission

Reduction according to Engine Loads

윤지원* · 이호생** · 임승택** · 손창효*** · 설성훈***† Ji-Won Yoon*, Ho-Saeng Lee**, Seung-Taek Lim**, Chang-Hyo Son*** and Sung-Hoon Seol***†

(Received 20 November 2023, Revision received 22 February 2024, Accepted 23 February 2024)

초록: 본 논문은 IMO의 선박 환경오염 물질 배출규제에 대응하기 위해 다양한 출력의 선박용 디젤엔 진 조사를 통해 열원 온도 및 유량 특성 분석 후 엔진을 선정하고, 엔진 배기가스를 회수하여 재활용 하는 유기랭킨사이클 성능해석을 수행하였다. 이때 작동유체는 R1233zd, R1234ze, R1336mzz(Z)를 적용 하여 엔진 부하에 따른 발전출력 및 효율 변화를 도출하였다. 이후 임의의 선박 운항 및 운전 조건을 제시하고, 해당 항로 운항 시 얻을 수 있는 연료 절감량 및 CO₂ 감축량을 도출하였다. 해석 결과, 엔진 부하 변동에 따른 발전 사이클 순 출력은 70~302 kW, 11.22~12.12% 효율을 나타냈으며, 부하에 따라 배기가스 열량의 1.72~4.73% 수준의 폐열 회수율을 도출하였다. 이를 다양한 선박 운항 경로 적용 시 202~2,550 kg의 연료 소모량, 0.54-6.78 ton 이산화탄소 배출 저감이 가능함을 확인하였다.

키워드: 선박폐열계수, 유기랭킨사이클, 배기가스활용, 선박제조 연비지수, 선박탄소집약도지수

Abstract : In response to IMO regulations on shipborne environmental pollutants, this paper investigates the adjustment of organic rankine cycle in ships. Various marine diesel engines were analyzed to figure out the exhaust gas characteristics of ships. Among the data, a 25,000 kW two stroke engine is taken into account for cycle simulation. The cycle simulation used R1233zd, R1234ze and R1336mzz as working fluid to compare the net power and efficiency. Additionally, various navigating routes and operating conditions were presented to derive the potential CO_2 reduction and fuel oil saving rate achieved by using the organic

***†설성훈(https://orcid.org/0000-0001-1266-4202) : 조교수,	*** \dagger Sung-Hoon Seol(https://orcid.org/0000-0001-1266-4202) :
부경대학교 냉동공조공학과	Assistant Professor, Refrigeration and Air-conditioning
E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184 *윤지원(https://orcid.org/0000-0001-7153-4796) : 박사과정, 부경대학교 기계시스템공학과	Engineering, Pukyong University. E-mail : seolsh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6184 *Ji-Won Yoon(https://orcid.org/0000-0001-7153-4796) : Ph.D student, Mechanical System Engineering, Pukyong University.
**이호생(https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) : 센터장, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터	**Ho-Saeng Lee(https://orcid.org/0000-0003-3042-5889) : Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering.
**임승택(https://orcid.org/0000-0001-6889-9698) : 연구원, 선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터	**Seung-Taek Lim(https://orcid.org/0000-0001-6889-9698) : Researcher Seawater Energy Plant Research Center Korea
***손창효(https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) : 교수, 부경	Research Institute of Ships and Ocean Engineering.
대학교 냉동공조공학과	***Chang-Hyo Son(https://orcid.org/0000-0002-2143-0515) : Professor, Refrigeration and Air-conditioning Engineering, Pukyong University.

rankine cycle. Results showed that net power output of the cycle showed 70 to 302 kW with respect to engine operating load, and 11.22 to 12.12% thermal efficiency. Moreover, the system recovered approximately 1.72 to 4.73% of the main engine waste heat. The system was then applied to some assumed ship navigating routes to figure out fuel saving and CO_2 depletion rate. Results showed that 202 to 2,550 kg of fuel saving and 0.54 to 6.78 ton of CO_2 was depleted by applying the waste heat recovery system.

Key Words : Ship Waste Heat Recovery, Organic Rankine Cycle, Exhaust Gas Utilization, Energy Efficiency Design Index, Performance Evaluation

- 기호설명-

m	: 질량유량 [kg/s]
Q	: 열량 [kW]
Р	: 엔진 출력 [kW]
h	: 비엔탈피 [kcal/kg]
W	: 발전량, 소비전력 [kW]

그리스 문자

η	: 효율 [-]
ζ	: 발전출력 변동 무차원수 [-]

하첨자

eg	:	배기가스
e	:	증발(증발기)
c	:	응축(응축기)
r	:	냉매
th	:	열(thermal)
fs	:	연료 절감량(fuel saving)
net, i	:	엔진 부하 상승에 따른 ORC출력 상승
ship, i	:	엔진 부하 상승에 따른 엔진출력 상승

1. 서 론

세계적으로 대두되는 환경오염 문제에 대응하 기 위해 IMO(International Maritime Organization)의 선박 환경오염 물질 배출규제가 단계적으로 강화 되고 있다.¹⁾ 그 중 온실가스 배출 규제의 일환인 EEDI(Energy Efficiency Design Index)는 2013년 이 후 신조선만을 대상으로 적용되었으나, 2023년을 기점으로 400 GT(Gross Tonnage) 이상 모든 선박 을 대상으로 확대하는 EEXI(Engine Efficiency Existing Ship Index) 규정이 시행되었다.²⁾ 또한 2023년 운항 데이터를 기반으로 선박의 온실가스 배출량에 따른 등급을 평가하고 규제하는 CII (Carbon Intensity Indicator) 또한 2024년 시행을 앞 두고 있다.

이러한 CII는 1년을 주기로 선박의 운항 데이터 를 기반으로 A부터 E등급으로 평가하며 EEXI, EEDI 대비 실선 에너지 운항효율을 긴밀하게 고 려하는 규제적 지표이다. A~C등급을 취득한 선박 은 운항에 별다른 제약이 없으나, 3년 연속 D등급 을 받은 선박 혹은 E등급을 받은 선박의 경우 주 관청에서 SEEMP(See Energy Efficiency Management Plan)를 제출, 승인받기 전까지 운항 자격을 상실한다.

이에 기존 연료추진선은 HFO(Heavy Fuel Oil) 에서 고비용의 디젤연료로 전환, 선박 운항 속도 제한 등의 방안으로 대비하고 있으나, 현재 국내 해운사 선박 중 약 72%가 EEXI 규제 미충족 상 태로 부가적인 규제 대응 방안 마련이 시급한 실 정이다.³⁾ 이러한 규제 대응 기술의 일환으로 Fig. 1과 같이 연료 발열량의 20~25% 수준을 차지하는 배기가스 열을 회수하여 재활용하는 폐열회수시 스템(Waste Heat Recovery System)의 선박 적용이 관련 연구가 다양하게 수행되고 있다.⁴⁾ 이러한 폐 열 회수 시스템은 선박에서 발생하는 중저온 (70~400℃) 폐열원과 작동유체를 열교환 후 터빈을 회전시켜 전력을 생산하는 ORC(Organic Rankine Cycle) 형태로 제시될 수 있으며, 선박의 다양한

폐열원 사용 ORC 적용 선행연구가 수행된 바 있 다.⁵⁻⁶⁾ 또한 ORC를 선박에 적용함으로써 얻을 수 있는 온실가스 저감 및 연료 절감, 경제성 등을 정량적으로 제시하는 연구 또한 다양하게 수행되 었다. Chen 등은 22,000 kW급 선박에 ORC 설치 시 발전 출력 및 초기 투자비용, 비용 회수 기간 (payback period)를 도출하였으며,⁷⁾ Kan 등은 실제 선박 항로에 ORC를 적용할 경우 얻을 수 있는 연 료소모량 절감, CO₂ 감축량을 도출하였다.⁸⁾ 선박 용 엔진 제조사인 MAN B&W 또한 자사 엔진 매 뉴얼에서 배기가스를 이용한 WHRS 기술을 다루고 있으며, 이코노마이저로부터 나오는 스팀을 활용한 STG(Steam Turbine Generator), 25,000 kW급 이상 대형 엔진에서 배기가스 리시버로부터 배기가스를 전달받아 발전하는 PTG(Power Turbine Generator) 의 형태로 제시하고 있다.⁹⁾ 그러나 이러한 PTG는 초대형 엔진을 필요로 한다는 점과, 높은 팽창비 로 인한 터빈 크기 대형화, 저부하 구간에서 저유 량으로 인한 발전효율 저하 등 선박의 적용성 측 면의 해결과제가 존재한다.

이에 본 논문에서는 다양한 선박 엔진 및 냉각 수 온도, 유량 조사를 통해 엔진 용량별 가용 배 기가스 열량을 파악하고, ORC 발전 사이클 성능 해석을 수행하였다. ORC 사이클의 작동유체는 친 환경 냉매로 GWP가 2 이하인 차세대 냉매로 주 목받는 HFO계 냉매를 후보로 선정하여, 작동유체 별 사이클 성능을 비교하였다.



Fig. 1 Heat balance diagram of conventional MAN diesel engine¹⁾

해석 결과를 기반으로 엔진 부하 변화에 따른 발전량 및 사이클 효율을 도출하고, 이를 다양한 운항 항로에 적용하여 실제 선박 운항 시 ORC로 부터 얻을 수 있는 에너지 회수율, 연료 소모량 절감 및 CO₂ 감축 효과를 정량적으로 도출하였다.

2. 선박폐열 발전시스템 설계

2.1 선박 열원 데이터베이스 분석

본 논문에서는 엔진 배기가스를 열원으로 사용 하는 발전시스템을 설계를 위해 1,000~70,000 kW 급의 다양한 선박용 디젤엔진 용량에 따른 배기 가스 온도 및 유량 특성을 확인하였다. 이때 선박 엔진 데이터베이스는 MAN B&W, Wartsila, Caterpiller 사의 상용 2행정 엔진을 기반으로 구성 하였다. 엔진 용량에 따른 배기가스 온도 분포는 Fig. 2와 같으며, 유량 분포는 Fig. 3과 같이 나타 내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 배기가스 열원 은 엔진 크기에 따라 약 0~200 kg/s로 선형적으로 증가함을 파악하였다. Fig. 3의 배기가스 온도는 엔진 크기와 비례관계는 없으며, 엔진 크기와 무 관하게 배기가스 온도는 200~400℃ 범위로 분포 하였다.

도출한 배기가스 열원을 실제 선박 ORC에 적 용하기 위해서는 선박에 탑재된 배기가스 순환 장치인 과급기(turbocharger), 절탄기(economizer) 등에 필요한 배기가스량을 반드시 고려해야 한다.



Fig. 2 Mass flow rate of exhaust gas with respect to engine power (at 100% load)



Fig. 3 Exhaust gas temperature with respect to engine power (at 100% load)

Table	1	Specification of MAN B&W 2 stroke diese	l
		engine 7G80ME-C ¹¹⁾	

M/E load [%]	SFOC [g/kWh]	Exh. gas mass flow [kg/s]	Exh. gas temperature [°C]	Engine power [kW]
100	160.1	49.1	269	25,000
90	153.9	46.8	225	22,500
80	151	43.7	203	20,000
70	149.4	39	202	17,500
60	149.1	33.9	207	15,000
50	151.6	29	219	12,500

이는 엔진 크기, 운전 부하, 배기가스 활용 장 치 특성 등에 따라 달라질 수 있으며, 본 논문에 서는 Tian 등의 연구에서 제시된 터보차저의 배기 가스 질량비를 참고하였다.¹⁰⁾ 이때 터보차저로 가 는 배기가스 질량비는 부하에 따라 약 10~25% 수 준이며, 이를 통해 75~90% 수준의 배기가스가 활 용 가능함을 파악하였다. 이를 기반으로 본 논문 은 배기가스 유량 중 50%를 ORC 열원으로 사용 한다고 가정하였다.

본 논문에서는 조사한 엔진 데이터베이스 중 MAN B&W사의 25,000 kW급 디젤엔진 7G80ME-C를 해석 대상으로 선정하고, 선박의 운 항 조건 변화에 따른 ORC 발전성능을 파악하였 다. 선정한 엔진의 제원은 Table 1과 같다.

2.2 선박폐열 발전시스템 구성

선박폐열 발전시스템의 기본적인 유기랭킨사이



Fig. 4 Schematic and p-h diagram of ORC cycle

클 구조는 Fig. 4와 같다. 냉매는 작동유체 펌프로 부터 증발기로 유입되고 증발기 내부에서 배기가 스와 열교환을 통해 증발한다. 이후 터빈발전기를 통해 팽창한 후 해수와 열교환을 거쳐 응축 과정 을 거치는 밀폐계로 구성된다. 이때 발전시스템의 증발 및 응축 열량은 각각 식 (1) 및 (2)로 도출하 며, 펌프 소비 전력 및 터빈 발전출력은 각각 식 (3) 및 (4)와 같다. 도출한 터빈 일과 펌프 일을 통 해 사이클의 Net power를 식 (5), 시스템의 발전 효율은 식 (6)과 같이 도출할 수 있다.

$$Q_{e} = m_{r} (h_{e_{in}} - h_{e_{out}})$$
⁽¹⁾

$$Q_c = m_r \left(h_{c_{in}} - h_{c_{out}} \right) \tag{2}$$

$$W_{t} = \eta_{t} m_{r} \left(h_{t_{in}} - h_{t_{out}} \right)$$
(3)

$$W_{p} = \eta_{p} m_{r} \left(h_{p_{in}} - h_{p_{out}} \right)$$
(4)

$$W_{net} = W_t - W_p \tag{5}$$

$$\eta_{th} = W_{net} / Q_e \tag{6}$$

2.3 선박폐열 발전시스템 해석조건

ORC 작동유체는 친환경성, 높은 사이클 효율 을 고려하여 선정이 필요하다. 또한 작동유체가 초임계 영역에서 순환할 경우, 초임계 유체의 특 성을 고려한 터빈 설계가 필요하며, 이는 설계 난 이도 및 비용 상승으로 이어진다. 따라서 본 논문 에서는 Table 2와 같이 Kaseian¹²⁾, Chen¹³⁾ 등에 의 해 선박폐열발전 사이클에 대한 적용성이 검토된 GWP가 2 이하인 HFO계 냉매 R1233zd, R1234ze, R1233mzz(Z)를 작동유체로 선정하였다.

본 논문에서는 계 내부에서 일어나는 열손실 및 관 마찰손실은 고려하지 않았으며, ORC 해석 에서 열교환기의 압력손실은 20 kPa, 펌프 및 터 빈 효율은 75%로 가정하였다. 열원 온도 및 유량 은 Table 1의 배기가스 온도, 유량 값을 기반으로 설정하였으며, 표준 증발온도 150℃, 과열도 10℃, 응축기 후단 과냉각도는 5℃로 설정하였다. 열침 으로는 선박에서 가장 접근성이 뛰어난 28℃ 표 층 해수를 사용하였으며, 열교환 후 33℃ 온도로 배출된다고 가정하였다. 성능해석은 상용 공정해석

Table 2 Refrigerants specification of on-ship ORC

Refrigerant	R1233zd	R1234ze	R1336mzz (Z)
Туре	HFO	HFO	HFO
Critical temperature [°C]	166.5	150.1	171.3
Critical pressure [MPa]	3.62	3.53	2.9
Safety class	A1	A2L	A1
ODP	0.00034	0	0
GWP	1	<1	2

Table 3 Specifications of ORC simulation

Parameter	Value
Engine load [%]	50~100
Exhaust gas inlet temperature [$^{\circ}$ C]	202~269
Superheating/subcooling degree [°C]	10/5
Seawater inlet temperature [°C]	28
Seawater outlet temperature [°C]	33
Evaporation temperature [°C]	150
Heat exchanger pressure loss [kPa]	20
Turbine, pump efficiency [%]	75

프로그램 Aspen HYSYS v12.0으로 수행하였으며, 상세 해석조건은 Table 3과 같다.

2.4 선박폐열 발전시스템 환경 성능 평가

선박 ORC 적용을 통한 CO₂ 저감 효과는 두 가 지 측면으로 볼 수 있다. 첫 번째는 ORC를 통해 얻는 발전량을 엔진으로 생산 시 나오는 배기가 스만큼을 CO₂ 저감량으로 평가하는 것이며, 두 번 째는 ORC 발전출력만큼을 선박 발전기에서 생산 시 발생하는 CO₂ 저감량으로 평가하는 것이다. 본 논문에서는 첫 번째 방법을 사용하여 CO₂ 저감 효과를 도출하였으며, 폐열 회수 성능은 엔진 배 기가스 열량 대비 ORC의 순 출력 비교를 통해 도 출될 수 있다. 이는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으 며, 이때 Recovery ratio(R_{rc})는 에너지 회수율을 의 미한다.

$$R_{rc} = \frac{W_{net}}{Q_{exhaust gas}} \times 100 \tag{7}$$

선박에서 ORC의 발전출력은 엔진 부하에 따라 변동하게 된다. 이에 본 논문에서는 Kan 등의 연 구에서 제시된 운한 경로를 기반으로 가상의 선 박 운항 경로를 Table 4와 같이 설정하고 ORC 적 용에 따라 얻을 수 있는 연료 절감량을 식 (8)과 같이 도출하였다.⁸⁾ 이때 M_{fs}는 연료 절감량, SFOC(Specific Fuel Oil Consumption)는 1 kWh 출 력을 얻을 때 엔진의 연료 소모량, H는 ORC 가동 시간을 의미한다. 또한 선박 운항 중 ORC 가동률 은 100%로 가정하였다.

식 (9)를 통해 도출한 연료 절감량은 IMO (International Maritime Organization)에서 제시하는 선박 연료 단위 질량당 이산화탄소 배출량 환산 계수(C_F, C_F value of diesel oil : 2.66 kg CO₂/L))를 식 (9)와 같이 활용하여 ORC 가동을 통한 CO₂ 감

Table 4 Navigating route of ships

Route	Α	В	C	D	Е
Voyage time [h]	29	15	104	55	82
Engine load [%]	100	80	90	75	50

축량을 도출하였다.²⁾

$$M_{fs} = W_{net} \times SFOC \times H \tag{8}$$

$$M_{eqCO_o} = M_{fs} \times C_F \tag{9}$$

3. 시뮬레이션 해석 결과

3.1 선박폐열 발전시스템 발전성능 해석

발전시스템의 성능해석은 냉매 각각에 대한 발 전효율 및 net power의 정량적 비교를 통해 수행 하였으며, 이 중 가장 적합한 냉매를 선정하였다. 이에 앞서 선박의 제약된 공간 내 시스템 크기 최 소화를 고려하고자 Fig. 5와 같이 엔진 부하에 따 른 냉매 순환량을 비교하였다.

냉매 순환량은 전체 부하 조건에서 R1336mzz(Z), R1233zd, R1234ze 순으로 나타났으며, 엔진 부하 100% 조건에서 각각 9.65, 9.24, 9.7 kg/s로 냉매 간 최대 5% 수준의 질량유량 차이를 확인하였다. 이는 본 논문의 사이클 규모로 볼 때 약 0.5kg/s 차이는 배관 및 요소기기 크기에 큰 영향은 없을 것으로 판단하였다.

질량유량 변화의 또 다른 특징으로써, 엔진 부 하 50~80% 구간에서는 변동이 거의 없거나 일부 구간에서는 오히려 감소하며, 85% 부하 이후로는 질량유량이 가파르게 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 엔진 및 엔진 배기가스를 활용하



Fig. 5 Refrigerant mass flow rate with respect to engine load

는 터보차저 특성과 연관된다.¹⁴⁾

부연설명을 하자면, 저부하 운전 구간에서는 엔 진의 흡기량이 작으므로 터보차저의 역할이 미미 하다. 따라서 터보차저 전후단 배기가스 온도 차 가 크게 나타나지 않아 배기가스 온도가 높게 나 타난다. 반면, 중부하 구간에서는 흡기량 및 배기 가스 유량이 증가함에 따라 터보차저 전후단 온 도 차가 크게 나타나므로, 저부하 구간 대비 배기 가스 온도는 낮아지나 유량은 선형적으로 증가하 기 때문에 열량 측면에서는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 고부하 구간에서도 터보차저는 큰 역할 을 하나 엔진에서 발생하는 배기가스 온도 자체가 높아지므로, 터보차저 후단의 배기가스 온도 또한 증가함을 확인할 수 있다. 이를 통해 중부하 구간 에서는 ORC의 열원량이 거의 변화하지 않으므로 냉매 질량유량 또한 변화가 적음을 알 수 있다.

발전 사이클의 높은 net power를 위해서는 터빈 발전출력 대비 펌프 동력을 최소화하는 것이 이상 적이다. 펌프 동력은 냉매 순환량, 냉매 밀도, 증발 압력, 펌프 효율을 통해 계산되며, 냉매별 펌프 동 력은 Fig. 6과 같이 비교하였다. 펌프 동력은 전체 부하 조건에서 R1234ze, R1233zd, R1336mzz(Z) 순 으로, 100% 부하에서 각각 26.6, 33.5, 18.6 kW로 최대 80% 차이를 보였다. 이는 단순 냉매 순환량 의 대소관계로 비교했을 때와 상반되는 경향성으 로, Table 5를 통해 각 냉매의 밀도 및 양정에 의 한 결과임을 확인할 수 있다. 그러나 펌프 동력 또한 발전성능을 확인하는 절대적 지표로 사용할 수 없으며, 터빈출력 및 발전효율의 비교가 필요 하므로 이어지는 분석에서 다루고자 한다.

Table 5 Refrigerant properties and pump head at 100% load

Refrigerant	R1233zd	R1234ze	R1336mzz (Z)
Density [kg/m ³]	1,228	1,188	1,304
Head [m]	210.7	277	146.5
Refrigerant flow rate [kg/s]	9.65	9.24	9.7
Pump power [kW]	26.58	33.47	18.58



Fig. 6 Pump power consumption with respect to engine load



Fig. 7 ORC net power and cycle efficiency with multiple evaporation temperature conditions

ORC의 사이클 효율은 증발온도에 비례하여 증 가하는 작동유체의 p-h 선도를 통해 유추할 수 있 다. 하지만 선박에서는 한정적인 공간적 특성상 적절한 증발온도 범위 선정에 따른 열교환기 및 시스템의 Compact sizing이 설계 이점으로 작용할 수 있다.

따라서 본 논문은 NCR(Normal Continuous Rating) 조건인 75% 부하에서 비교하였으며, 증발 온도를 130~150°C를 5°C 단위로 변경하며 사이클 효율, Net power를 도출, 증발온도에 따른 열교환 기 성능 및 크기 변화를 총괄 열전달계수(UA), 식 (10)의 열교환기 유용도(ε)을 통해 비교하였으며, 식 (10)에서 사용된 질량유량 및 비열은 단상열교 환을 하는 배기가스의 정보를 대입하였다.

$$\epsilon = 1 - \exp\left(\frac{-UA}{\dot{m}C_p}\right) \tag{10}$$

발전출력 및 효율은 Fig. 7과 같이 모든 증발 온도 구간에서 R1233zd, R1234ze, R1336mzz(Z) 순으로 나타났으며, 발전출력은 약 68~82 kW, 발 전 효율은 10.03~12.12%로 증발온도 상승에 비례 하여 증가하였다. 동일 증발온도 조건에서 냉매 별 발전량 차이는 R1233zd와 R1234ze는 최대 2.7%, R1233zd와 R1336mzz(Z)는 최대 7.5%를 나 타냈으며, 발전량 차는 증발온도에 비례하여 증 가하였다.

증발온도에 따른 열교환기 성능 및 sizing은 사 이클 출력이 가장 높은 R1233zd에 대해 Fig. 8과 같이 도출하였다. 증발온도의 변화에 따른 총괄 열전달계수의 변화를 무시하였을 때, 증발온도를 20℃ 가량 낮게 설정함으로써 열교환기의 전열 면적을 약 20% 가량 줄일 수 있을 것으로 사료 된다. 반면에, 열교환기의 유용도 값은 증발온도 에 비례하여 증가하는 경향을 보였기 때문에 발 전효율 및 효율적인 요소기기의 사용 측면에서 는 증발온도를 낮게 설정하는 것이 불리함을 확 인할 수 있었다. 이를 통해 실제 설계 시, 증발온 도의 설정은 발전효율과 요소기기의 최소화를 고려할 필요가 있으며, 나아가 열전달 성능의 개 선을 통해 열교환기의 유용도 향상이 필요하다 고 판단된다.



Fig. 8 UA and Effectiveness of the ORC evaporator with respect to evaporation temperature

3.2 선박폐열 발전시스템 환경 성능 평가 결과

환경 성능 평가는 3.1절에서 가장 우수한 발전 성능을 보인 R1233zd 냉매를 사용하는 ORC를 운 항 중인 선박 적용 시 엔진 출력 대비 회수할 수 있는 에너지 비율, CO₂ 저감효과를 확인하였다.

식 (7)을 기반으로 도출한 엔진 부하별 에너지 회수율(Recovery ratio)은 Fig. 9과 같으며, 부하에 따라 배기가스 열량의 1.72~4.73% 수준의 에너지 회수가 가능함을 확인하였다. 이때 부하 50~75% 구간에서는 에너지 회수율이 감소하였으며, 85% 부하를 기점으로 에너지 회수율이 큰 폭으로 상 승하였다. 이는 열원 온도가 55~85% 구간에서 200°C 근처로 유지되고, 90~100% 구간에서 온도 의 급격한 상승으로 인해 에너지 회수율이 증가 함을 확인하였다.

앞서 도출한 에너지 회수율과 별개로 엔진 출 력 상승 대비 ORC net power의 변화를 확인하기 위한 값 ζ 를 설정하였으며, 식 (11)과 같이 도입 하였다. 이때 W_{net, i}, W_{ship, i}는 각각 엔진 부하 5% 변동에 따른 ORC net power 상승량, 엔진 출력 상 승량을 의미하며, ζ 값의 변화는 Fig. 10과 같다.

엔진 부하 55~65% 구간에서는 부하 상승 대비 net power가 감소하여 ζ 값이 음수로 나타나며, 70% 이상일 때 양수로 전환됨을 확인할 수 있다. 또한 부하 90% 구간에서 약 4.7~6% 상승률을 보 이며 ORC net power가 큰 폭으로 상승함을 확인 하였다.

ζ 값의 변동 추세는 Fig. 9의 recovery ratio 변



Fig. 9 Energy recovery ratio of ORC with respect to engine load

동 양상과 다소 상이하며, 이는 부하 75~85% 구 간 net power 상승률이 낮아 ζ 값은 상승하는 반 면 R_{rc} 값은 감소함으로 인한 것임을 확인할 수 있다.

$$\zeta = \frac{W_{net,\,i}}{W_{ship,\,i}} \times 100 \tag{11}$$

ORC를 통해 얻을 수 있는 발전출력은 다양한 선박 항해 시간, 운항 부하 조건에서 ORC 적용을 통한 연료 및 CO₂ 감축량은 Fig. 11과 같이 나타 내었다. 최대 연료 및 CO₂ 감축량은 항해 시간이 가장 긴 C 항로였으며, 약 2,550 kg의 연료 절감, 6.78 ton eqCO₂가 저감 되는 것으로 나타났다. 또 한 가장 짧은 B 항로에서는 약 202 kg의 연료, 0.54 ton eqCO₂로 확인하였다.



Fig. 10 ORC net power increase over engine power increase with respect to engine load



Fig. 11 Fuel saving and CO₂ depletion performance of ORC at various navigating routes

동력시스템공학회지 제28권 제1호, 2024년 2월 41

5. 결 론

본 논문은 IMO 선박 온실가스 배출규제 대응 기술의 일환으로 선박 배기가스를 열원으로 하는 ORC 발전시스템 연구를 수행하였다. 이에 25,000 kW급 선박용 디젤엔진을 대상으로 발전성능 분 석 및 환경 성능 평가를 수행하였으며, 결론은 아 래와 같다.

 비 냉매 변경에 따른 발전성능은 R1233zd, R1234ze, R1336mzz(Z) 순으로 나타났으며, 시스템 설치 공간 최소화를 고려하기 위한 냉매 순환량 은 약 5% 수준의 작은 차이를 보였다.

 2) ORC 발전출력은 88~302 kW로 엔진 부하에 비례하여 상승하였으며, 발전 효율은 11.22에서 최대 12.12%로 변화하였다.

 3) 증발온도 상승에 따라 발전량 변화는 비례하여 증가하였으며, R1233zd와 R1234ze는 최대
 2.7%, R1233zd와 R1336mzz(Z)는 최대 7.5% 발전 출력 차이를 보였다.

4) 선박용 ORC 설계 시 중요 요소인 발전출력 과 시스템의 compact sizing을 증발온도 변화에 따 른 총괄열전달계수 및 열교환기 유용도 도출을 통해 분석하였다.

5) 본 논문에서 해석한 ORC 사이클을 선박 적 용 시 엔진 부하에 비례하여 배기가스 열량의 1.72~4.73% 수준의 에너지 회수율을 확인하였다.

부하 상승 대비 ORC net power 변화는 55~65% 구간에서 감소, 75%~85% 구간에서 0.1~1% 수준 으로 소폭 상승, 90% 이상에서는 4.7~6%로 큰 폭 으로 상승하였다.

5) Table 4의 다양한 항해 조건에서 ORC 적용 시 약 0.2~2.5 ton의 연료, 0.54~6.8 ton의 CO₂ 저 감을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2023 년도 해양수산부 재원으로 해 양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지 원을 받아 수행된 연구임(20220634, 친환경전주기 핵심 기술 기술 개발사업).

Author contributions

J. W. Yoon; Writing-original draft, Formal analysis. H. S. Lee; Conceptualization, Project administration. S. T. Lim; Resources, Software supervision. C. H. Son; Investigation, Engine Data Analysis. S. H. Seol; Data curation, Methodology, Supervision.

References

 S. T. Lim, H. J. Kim, J. H. Moon and H. S. Lee, 2019, "Performance simulation of a waste heat recovery – desalination system using jacket cooling water from a main engine", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 43(9), 667-673.

(https://doi.org/10.5916/jkosme.2019.43.9.667)

- International Maritime Organization, "Marine environment protection committee 78/17/Add.1 Annex 13".
- Nippon Kziji Kyokal, 2021, Outlines of EEXI Regulation, EEDI Section of Marine GHG Certification Department
- J. K. Kim, Y. T. Kim and H. K. Kang, 2013, "An analysis on the characteristics of superheater organization of ORC system for marine waste heat recovery system", Journal of the Korean Society of Marnie Engineering, 38(1), 8-14. (https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.1.8)
- P. K. Boateng, J. I. Yoon, C. H. Son, K. L. Hui and H. U. Kim, 2014, "Performance analysis of WHR-ORC using hydrocarbon mixtures for 20kW gross power at low temperature", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, 18(6), 140-145.

(http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2014.18.6.140)

 J. H. Moon, H. S. Lee and J. B. Seo, 2021, "Performance analysis of ORC cycle using waste heat", Journal of the Korean Society of Power System Engineering, 25(5), 43-50.
 (https://doi.org/10.073/(https://doi.073/(htttps://doi.073/(https://doi.073/(https://doi.org/10.07

(https://doi.org/10.9726/kspse.2021.25.5.043)

 W. Chen, B. Fu, J. Zeng and W. Luo, 2023, "Research on the operational performance of organic rankine cycle system for waste heat recovery from large ship main engine", Applied sciences, 13, 8543.

(https://doi.org/10.3390/app13148543)

- L. Lyu, A. Kan, W. Chen, Y. Zhang and B. Fu, 2023, "Energy, exergy and environmental analysis of ORC waste heat recovery from container ship exhaust gases based on voyage cycle", Journal of Marine Science and Engineering, 11, 2029. (https://doi.org/10.3390/jmse11102029)
- 9. MAN Energy Solutions, https://www.man-es.com/
- G. Shu, G. Yu, H. Tian, H. Wei, X. Liang and Z. Huang, 2016, "Multi-approach evaluations of a cascade-ORC system driven by diesel engine waste heat : Part A – thermodynamic evaluations", Energy Conversion and Management, 108, 579-595. (https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.084)

- CEAS Engine Calculations, https://www.man-es.com/ marine/products/planning-tools-and-downloads/cea s-engine-calculations
- M. Bahrami, F. Pourfayaz and A. Kaseian, 2022, "Low global warming potential(GWP) working fluids for ORC applications", Energy Reports, 8, 2976-2988. (https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.222)
- 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 ORC application : R1234ze(Z), R1233zd(E), R1336mzz(E)", Energy, 173, 721-731.

(https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.054)

 John Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", Chapter 6, gas exchange processes, 361-487.