

ORC 기반 선박용 폐열회수 시스템의 고급 엑서지 분석 Advanced Exergy Analysis of an ORC-based Waste Heat Recovery System for Ships

최용석* · 임태우** · 임승택*** †

Yong-Seok Choi*, Tae-Woo Lim** and Seung-Taek Lim*** †

(Received 15 October 2025, Revised 22 December 2025, Accepted 22 December 2025)

초록 : 선박에서 배출하는 탄소를 감축하기 위해서 친환경 연료의 도입 및 친환경 기술의 도입이 점차 증가하고 있다. 이러한 친환경 기술 중 폐열회수 시스템은 선박의 에너지 효율을 증가시켜 연료 소비량과 탄소 배출을 감축하는 기술이다. 본 연구에서는 선박용 폐열회수 시스템을 설계하고, 엑서지 분석을 진행하였다. 기존의 엑서지 분석은 전체적인 엑서지 파괴율에 집중하였다면, 고급 엑서지 분석은 개선 가능성까지 확인할 수 있다. 기존 엑서지 분석 결과, 응축기와 증발기에서의 엑서지 효율은 각각 34.2%와 58.1%로 가장 낮게 나타났다. 그리고 고급 엑서지 분석 결과, 터빈에서 회피 가능한 내재적 엑서지 파괴는 62.1%, 예열기에서는 회피 가능한 외재적 엑서지 파괴 41.0%가 발생하여, 터빈과 예열기가 실제 개선 가능성이 큰 장비로 확인되었다.

키워드 : 고급 엑서지 분석, 엑서지 파괴, 유기랭킨사이클, 선박, 폐열회수 시스템

Abstract : To reduce carbon emissions from ships, eco-friendly fuels and technologies are increasingly being adopted. Among them, waste heat recovery systems enhance energy efficiency, thereby reducing both fuel consumption and emissions. In this study, a shipboard waste heat recovery system was designed and analyzed through exergy analysis. While conventional exergy analysis focuses on the overall exergy destruction rate, advanced exergy analysis can additionally identify potential improvements. Based on the current exergy analysis findings, the exergy efficiencies of the condenser and evaporator were determined to be the lowest, at 34.2% and 58.1%, respectively. Furthermore, the advanced exergy analysis revealed that the avoidable endogenous exergy destruction in the turbine was 62.1%, while the avoidable exogenous exergy destruction in the preheater was 41.0%. These results indicate that the turbine and preheater are the components with the most significant potential for practical enhancement.

Key Words : Advanced Exergy Analysis, Exergy Destruction, Organic Rankine Cycle, Ship, Waste Heat Recovery System

*** † 임승택(<https://orcid.org/0000-0001-6889-9698>) : 연구원,
선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터
E-mail : limst@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5023

*최용석(<https://orcid.org/0000-0002-3420-519X>) : 교수, 국
립한국해양대학교 해양경찰학부

**임태우(<https://orcid.org/0000-0002-3925-0731>) : 교수, 국
립한국해양대학교 기관시스템공학부

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

E-mail : limst@kriso.re.kr, Tel : 033-630-5023

*Yong-Seok Choi(<https://orcid.org/0000-0002-3420-519X>) : Professor,
Division of Coast Guard Studies, Korea Maritime & Ocean
University.

**Tae-Woo Lim(<https://orcid.org/0000-0002-3925-0731>) : Professor,
Division of Marine System Engineering, Korea Maritime &
Ocean University.

— 기 호 설 명 —

$\dot{E}$	: exergy rate [kW]
e	: specific exergy [kJ/kg]
h	: specific enthalpy [kJ/kg]
Q	: heat transfer rate [kW]
W	: power [kW]
y	: exergy loss ratio

그리스 문자

ε	: exergy efficiency
---------------	---------------------

상첨자

AV	: avoidable
EN	: endogenous
EX	: exogenous
UN	: unavoidable

하첨자

ch	: chemical
D	: destruction
e	: exit
F	: fuel
i	: inlet
k	: k th component
ki	: kinetic
P	: product
p	: potential
ph	: physical
pp	: pinch point
Q	: heat
tot	: total
W	: work

1. 서 론

지구온난화와 관련하여 온실가스 감축 노력은 전 국가적, 산업별로 적극적으로 진행되고 있다.

특히 해양, 조선산업에서는 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서 주도적으로 진행하고 있다. IMO에서는 선박에서 배출하는 온실가스를 2050년 최종적으로 100%까지 감축하는 것으로 목표로 하고 있다. 즉, 최종단계에서는 무탄소 연료를 기반으로 하는 친환경선박을 지향하고 있지만, 현 단계에서는 많은 난관이 존재한다.

따라서 2050년까지 단계적 CO₂ 감축 목표를 설정하였다. EEDI(Energy Efficiency Design Index)와 EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index) 등의 기술적 조치와 그리고 CII(Carbon Intensity Indicator)와 같은 운항적 조치들이 그 예이다. EEDI와 EEXI는 사전적으로 계산되는 값인 반면, CII는 실제 운항데이터를 기반으로 하기 때문에 CII 달성을 위해서는 선박의 운항 효율성을 증가시키고, 친환경기술 등의 적용이 필요하다.¹⁾

다양한 친환경 기술이 존재하지만, 직접적으로 선박의 에너지 효율을 향상하는 기술로서는 촉발전기, 폐열회수 시스템 등이 실현가능한 기술로 거론되고 있다.²⁾

선박 폐열회수 시스템에서 주로 거론되는 열원으로는 엔진의 배기가스와 엔진 자켓 냉각수가 있다. 열원의 온도 범위대에서 따라서 적절한 작동유체를 선정하여 유기랭킨사이클(Organic Rankine Cycle, ORC)을 적용하는 연구가 주를 이룬다.³⁾

선박의 폐열회수 시스템의 적용과 관련된 연구는 이미 상당 부분 진행되었으며, 이를 고도화하기 위한 연구 또한 현재까지 진행 중이다. 최적화, 경제성분석 그리고 엑서지 분석 등이 이러한 분야에 속한다.

엑서지는 이용 가능한 최대 잠재일을 의미한다. 엑서지 분석을 통해서 엑서지 파괴를 계산하고, 전체 시스템의 전반적인 성능과 개선 가능성을 파악하는 것이 기존의 엑서지 분석의 목적이었다면, 고급 엑서지 분석에서는 한 단계 나아가서 엑서지 파괴를 4가지 요소로 구분하고, 실제로 개선 가능한 부분과 개선 불가능한 부분으로 자세하게 계산한다. 따라서 보다 세밀한 시스템의 성능 개선 가능성을 확인 할 수 있다.⁴⁾⁻⁶⁾

Galindo et al.⁷⁾은 내연기관의 배기가스 폐열로

작동하는 ORC를 대상으로 고급 엑서지 분석을 수행하였다. ORC의 작동유체는 에탄올을 선정하였으며, 기존 엑서지 분석 결과는 보일러, 터빈에서 엑서지 파괴가 높게 나타났으나, 고급 엑서지 분석 결과에서는 팽창기와 펌프에서 개선 가능성이 높게 나타났다. Dibazar et al.⁸⁾은 기본 ORC를 비롯하여 단일재생 ORC, 이중 재생 ORC 등 3개의 사이클을 대상으로 엑서지 분석에 대한 연구를 진행하였다. 이때 작동유체는 R11을 사용하였으며, 각 사이클에 따라서 엑서지 파괴가 높은 장비는 다르게 나타났으며, 기본 ORC에 비해서 재생 ORC가 비가역성의 감소 여지가 큰 것으로 나타났다. 또한 고급 엑서지 분석을 통해서 손실의 정량적 평가를 넘어서 개선 가능한 손실 정도를 파악하였다.

기존의 연구들에서는 ORC의 설계와 고급 엑서지 분석 등 각각에 대해서 집중하여 분석하였다면, 본 연구에서는 선박의 적용성을 고려한 시뮬레이션을 통해서 선박 폐열회수 시스템의 적용, 최적화 그리고 기존 엑서지 분석과 고급 엑서지 분석을 수행하였다. 그리고 이를 통해서 선박용 폐열회수 발전시스템의 종합적인 성능을 분석하고자 한다.

2. 폐열회수 시스템 모델링

본 연구에서는 저온부식의 문제를 피하기 위해 LNG 연료 추진 선박을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 폐열회수 시스템을 적용하기 위한 열적 조건은 Table 1에서 정리하였다. 폐열회수 시스템의 열원으로는 배기가스로 선정하였으며, 열침은 냉각수로 선정하였다.

본 연구에서 배기가스 온도는 선박의 실제 운전조건을 토대로 설정한 고정된 경계조건이며, 사이클 설계 및 최적화 과정에서는 작동유체의 핀치 포인트 온도차를 통해서 증발온도를 제한하는 역할을 한다. 또한 본 연구에서는 과열도로 인한 비가역성 및 엑서지 파괴에 대한 요인을 배제하기 위해서 작동유체의 과열도를 별도의 설계 변수로 설정하지 않았다. 대신 열교환 조건과 증발

Table 1 Thermal conditions for the simulations

Parameter	Value
Temperature of exhaust gas [°C]	180
Mass flow rate of exhaust gas [kg/s]	36.65
Temperature of cooling water [°C]	30
Pinch point temperature difference of evaporator [°C]	30
Pinch point temperature difference of condenser [°C]	10
Efficiency of pump [%]	70
Efficiency of turbine [%]	80
Pressure drop of heat exchangers [%]	2

온도에 따라서 증발기 출구에서는 포화증기 상태에서 경미한 과열상태로 제한하였다.

열사이클은 Fig. 1과 같이 펌프, 예열기, 증발기, 터빈 그리고 응축기로 구성된 기본 ORC를 채택하였다. 차후 연구에서 진행 예정인 열교환기 기본설계의 편의성을 위해서 예열기와 증발기를 나누어 구성하였다. 예열기는 펌프를 지난 작동유체를 포화액 상태까지 온도를 상승시키는 역할을 하며, 증발기는 포화액 상태에서 포화증기 상태까지 작동유체의 상변화 구간의 열전달을 담당한다.

작동유체는 선박용 폐열회수 시스템에서 대표적으로 적용되는 R245fa⁹⁾를 비롯해 본 연구의 온도 범위에서 높은 성능을 낼 수 있는 R245ca, R123 그리고 R141, 4가지 종류로 선정하였으며, 각 작동유체의 특성은 Table 2에서 정리하였다. ORC 특성상 폐회로로 작동되며, 설계와 관리 측면에서 독성으로 인한 위험성은 충분히 제어 가능하다고 판단하였다. 그리고 본 연구에서는 작동 조건에 따른 열역학적 성능을 우선하였으므로 상기 언급한 작동유체들을 선정하였다. GWP(Global Warming Potential)는 지구 온난화 지수를 의미하며, ASHRAE safety group에서 A는 낮은 독성 B는 높은 독성 그리고 숫자는 인화성을 나타낸다. 따라서 B1은 높은 독성과 인화성 없음을 의미한다.

질량 평형과 에너지 평형식을 토대로 MATLAB R2025a를 이용하여 열시스템 설계 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 작동유체 및 열원, 열침의 물성치는 NIST의 REFPROP v9.1을 사용하였다.

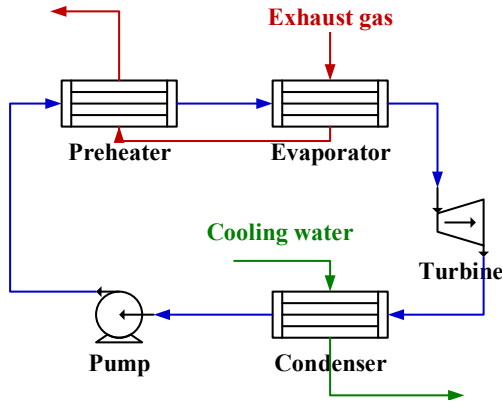


Fig. 1 Schematic diagram of the ORC

Table 2 Properties of working fluids

Working fluid	Critical temperature [°C]	Critical pressure [MPa]	GWP	ASHRAE safety group
R245fa	154.01	3.651	1030	B1
R245ca	174.42	3.941	693	-
R123	183.68	3.662	77	B1
R141b	204.35	4.212	725	-

증발압력과 응축압력을 입력변수로 하여 입자 군집 최적화(Particle Swarm Optimization, PSO) 알고리즘을 적용하였다. PSO는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)과 함께 대표적인 전역 최적화 알고리즘으로서 GA와 비교하여 빠른 수렴이 가능하며, 구현이 용이한 장점이 있다.^{10,11)} 본 연구에서는 입자 수 80개, 최대 반복 횟수 200회로 설정하였으며, 정미출력의 최대화를 목적함수로 정의하였다. 이때 반복 과정에서 목적함수의 변화가 10^{-6} 이하가 될 경우, 수렴한 것으로 판단하였다.

3. 엑서지 분석

3.1 기존 엑서지 분석

작동시스템 및 검사체적에 대해서 질량 평형, 에너지 평형 그리고 엑서지 평형식을 적용하면, 다음 식 (1)~(3)과 같이 정리된다.

mass balance

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (1)$$

energy balance

$$\sum Q + \sum \dot{m}_i h_i = \sum W + \sum \dot{m}_e h_e \quad (2)$$

exergy balance

$$\sum \dot{E}_Q + \sum \dot{m}_i e_i = \sum \dot{E}_W + \sum \dot{m}_e e_e + \dot{E}_D \quad (3)$$

$\dot{m}$ 은 질량유량, 그리고 하첨자 i, e 는 각각 입출구를 의미하며, Q 과 W 은 에너지와 일의 전달률, 그리고 h 는 엔탈피를 의미한다. $\dot{E}_Q$ 와 $\dot{E}_W$ 는 각각 열과 일에 의해 전달되는 엑서지율, $\dot{E}_D$ 는 파괴된 엑서지율을 나타낸다. 비엑서지(specific exergy) e 는 식 (4), (5)와 같이 운동 엑서지 e_k , 위치엑서지 e_p , 물리적 엑서지 e_{ph} 그리고 화학적 엑서지 e_{ch} 로 계산되지만, 일반적으로 운동 엑서지와 위치 엑서지는 다른 엑서지에 비해서 작으므로 무시할 수 있다.

$$e = e_k + e_p + e_{ph} + e_{ch} \quad (4)$$

$$e_{ph} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

하첨자 0은 사장상태(dead state)를 의미하며, T 는 온도 그리고 s 는 엔트로피를 뜻한다.

k번째 요소에서 엑서지 분석은 다음과 같이 진행된다.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{F,k} - \dot{E}_{P,k} \quad (6)$$

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{D,k}} = 1 - \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (7)$$

$$y_k = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (8)$$

$\dot{E}_D$, $\dot{E}_F$ 그리고 $\dot{E}_P$ 는 각각 엑서지 파괴율, 연료의 엑서지 그리고 생성된 엑서지를 의미한다. ε 와 y 는 각각 엑서지 효율과 엑서지 손실율을 나타낸다.

3.2 고급 엑서지 분석

고급엑서지 분석에서는 각 구성요소의 엑서지 파괴율 $\dot{E}_D$ 를 두가지 기준에 따라서 구분한다. 1) 내재적(Endogenous)/외재적(Exogenous) 엑서지 파괴, 2) 회피 가능한(Avoidable)/불가능한(Unavoidable) 엑서지 파괴. 여기서 각각의 엑서지 파괴는 구성요소 내부의 비가역성에 의한 내재적 엑서지 파괴율 $\dot{E}_{D,k}^{EN}$, 시스템의 다른 요소와 연관된 비효율성에 의한 외재적 엑서지 파괴율 $\dot{E}_{D,k}^{EX}$, 현재의 기술적 한계로 인해 줄일 수 없는 엑서지 파괴율 $\dot{E}_{D,k}^{UN}$ 그리고 설계 개선 등을 통해서 줄일 수 있는 엑서지 파괴율 $\dot{E}_{D,k}^{AV}$ 로 설명되며, 식 (9), (10)과 같이 표현된다.

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX} \quad (9)$$

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (10)$$

그리고 각 요소에서의 엑서지 파괴를 계산하기 위한 현실조건, 이상적인 조건, 회피할 수 없는 조건(최적의 운전조건)은 선행연구를 참고하여^{5,8)} Table 3에 정리하였다.

Table 3 Assumed conditions for advanced exergy analysis

Component	Real	Ideal	Unavoidable
Preheater	$\Delta T_{pp} = 30^\circ\text{C}$	0.01°C	10°C
Evaporator	$\Delta P = 2\%$	0%	$\%$
Turbine	$\eta = 80\%$	100%	95%
Condenser	$\Delta T_{pp} = 10^\circ\text{C}$ $\Delta P = 2\%$	0.01°C 2%	5°C 1%
Pump	$\eta = 80\%$	100%	90%

또한 엑서지 파괴에 대한 각 구성요소의 기여도를 명확하게 이해하기 위해서 앞서 언급한 분류를 조합하여 사용할 수 있다. 가령 $\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$ 은 내재적, 회피 불가능한 엑서지 파괴율을 의미하며, 다음 식 (11)과 같이 계산된다.

$$\dot{E}_{D,k}^{UN,EN} = \dot{E}_{P,k}^{EN} \left(\frac{\dot{E}_D}{\dot{E}_P} \right)_k^{UN} \quad (11)$$

외재적, 회피 불가능한 엑서지 파괴율, 내재적, 회피 가능한 엑서지 파괴율 그리고 외재적, 회피 가능한 엑서지 파괴율은 각각 식 (12)~(14)와 같이 계산된다.

$$\dot{E}_{D,k}^{UN,EX} = \dot{E}_{D,k}^{UN} - \dot{E}_{D,k}^{UN,EN} \quad (12)$$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV,EN} = \dot{E}_{D,k}^{EN} - \dot{E}_{D,k}^{UN,EN} \quad (13)$$

$$\dot{E}_{D,k}^{AV,EX} = \dot{E}_{D,k}^{EX} - \dot{E}_{D,k}^{UN,EN} \quad (14)$$

4. 결과 및 고찰

4.1 기존 엑서지 분석

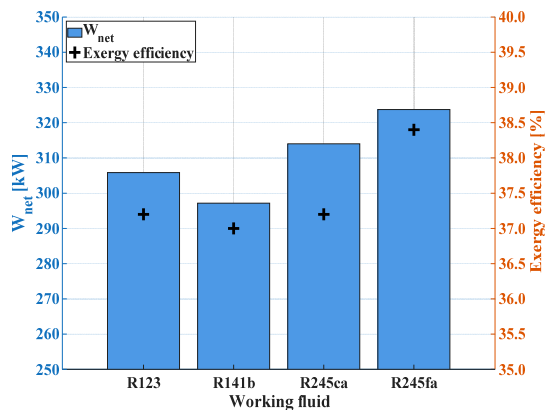


Fig. 2 Comparison of net power output and exergy efficiency for different working fluids

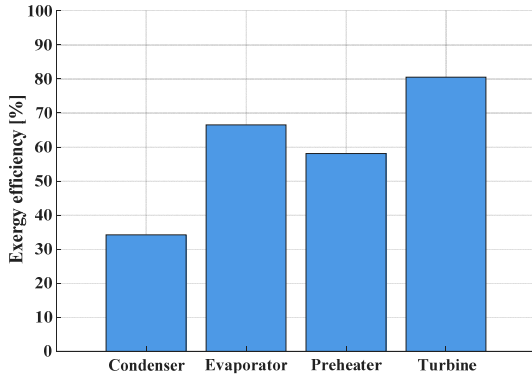


Fig. 3 Comparison of exergy efficiency among the ORC components

Fig. 2는 PSO를 통해서 최적화된 작동조건에서의 정미출력과 엑서지 효율(ε_k)을 나타낸 것이다. 작동유체 중 R245fa가 정미출력 323.7 kW, 엑서지 효율 38.4%로 두 성능 모두 가장 높게 나타났다. R245ca는 정미출력 314.0 kW 엑서지 효율 37.2%

로 두 번째로 높은 출력이 나타났으며, R123은 정미출력과 엑서지 효율 각각 305.8 kW, 37.2%로 나타났다. 마지막으로 R141b가 정미출력, 엑서지 효율 각각 297.2 kW, 37.0%로 가장 낮은 성능을 보였다. 본 연구의 ORC 작동조건에서는 기존 에너지 및 엑서지 분석을 통해서 R245fa가 가장 적합한 작동유체임을 확인 할 수 있다.

R245fa의 각 요소 장비별 엑서지 분석을 진행한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 터빈의 엑서지 효율이 80.5%로 가장 높게 나타났으며, 증발기, 예열기가 각각 66.5%, 58.1%로 나타났다. 그리고 마지막으로 응축기가 34.2%로 가장 낮게 나타났다. 일반적으로 응축기는 저온 열침으로 열을 방출하며, 상변화를 수반하는 비가역성으로 인해서 엑서지 파괴가 상대적으로 크게 발생할 수 있는 장치이다. 따라서 기존 엑서지 분석만 수행할 경우, 응축기의 개선이 최우선 과제로 식별될 수 있다.

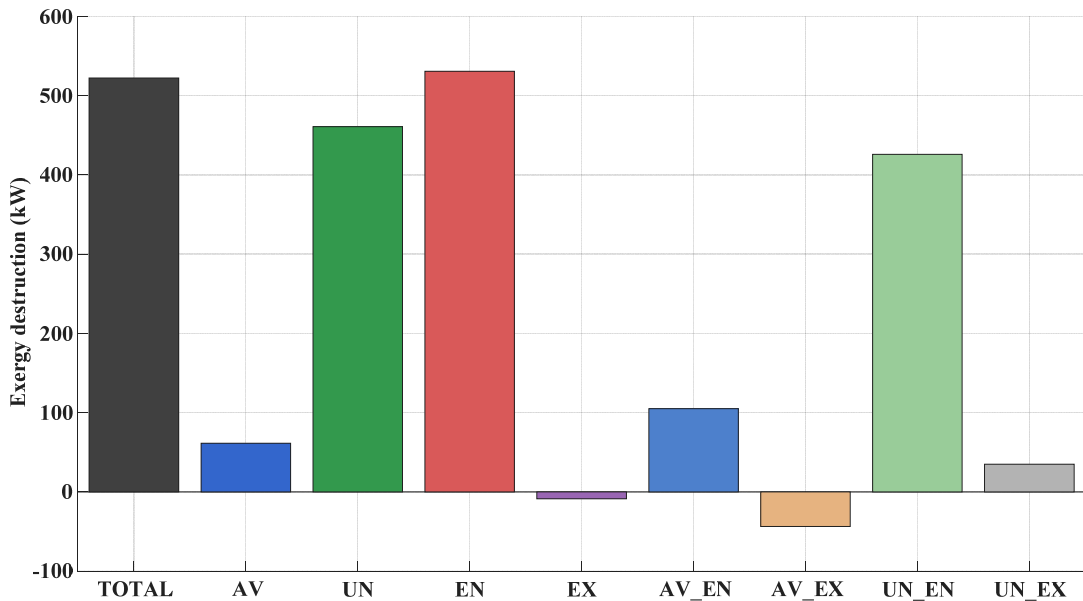


Fig. 4 Total exergy destruction rate in ORC*

* Fig. 4의 외재적 엑서지 파괴(EX)와 회피 가능한 외재적 엑서지 파괴(AV_EX)는 음수로 계산되었지만, Fig. 5의 산에서는 통상적인 방법에 따라 0으로 처리하였음

4.2 고급 엑서지 분석

Fig. 4는 전체 시스템에 대한 고급 엑서지 분석 결과를 나타낸 것이다. 총 엑서지 파괴율과 각 항목별 엑서지 파괴율을 구분하여 정리하였다. 전체적으로 보면, 회피 가능한 엑서지 파괴율에 비해서 회피 불가능한 엑서지 파괴율이 높게 나타났으며, 외재적 엑서지 파괴율은 음수로 계산되었다. 고급 엑서지 분석과정에서 일부 구성요소의 외재적 엑서지 파괴가 음수 값으로 계산되는 경우가 보고되었는데, 이것은 외재적 엑서지 파괴가 물리적으로 음의 값을 가진다는 의미가 아니라, 고급엑서지 분석에서 외재적 엑서지 파괴가 구성요소 간 상호작용에 따른 비가역성의 영향을 수치적으로 분리하여 평가하는 지표이기 때문이다. 또한 외재적 엑서지 파괴는 실제(real), 회피 불가능(unavoidable) 등의 사이클 간의 계산을 통해서 산정되므로, 구성요소 간의 상호의존성이 미미하거나 수치적으로 상쇄되는 경우, 음수 값이 도출될 수 있다는 것이 기존 연구에서 보고된 바 있다. 이러한 음수 값은 물리적인 엑서지 파괴를 의미하지 않으며, 시스템의 실제 개선 가능성을 나

타내지는 않는다.^{6)~8)}

따라서 선행연구들에서 제안된 해석 방법에 따라 본 연구에서도 이러한 음의 외재적 엑서지 파괴를 물리적 의미가 없는 수치적 산물로 판단하여 0으로 처리하였다. 회피 불가능한 엑서지 파괴율은 대부분 내재적인 엑서지 파괴율로 계산되었다.

Fig. 5는 R245fa의 각 요소 장비별 고급 엑서지 분석을 진행한 결과를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 음수로 나타난 엑서지 파괴율은 0으로 처리하였다. 다른 구성요소에 의해서 발생하는 외재적 엑서지 파괴(EX)는 예열기에서만 나타났다. 그중 회피 가능한 외재적 엑서지 파괴는 41.3%, 회피불가능한 엑서지 파괴는 44.0%로 나타났으며, 회피 불가능한 내재적 엑서지 파괴는 14.7%로 나타났다.

펌프, 증발기 그리고 응축기의 경우, 엑서지 파괴율은 모두 외재적, 회피불가능한 엑서지 파괴율로 나타났다. 터빈의 경우, 회피가능한 내재적 엑서지 파괴와 회피 불가능한 엑서지 파괴는 각각 62.1%, 37.9%로 나타났다. 기존 엑서지 분석과 고급 엑서지 분석 결과는 Table 4에 요약하여 정리

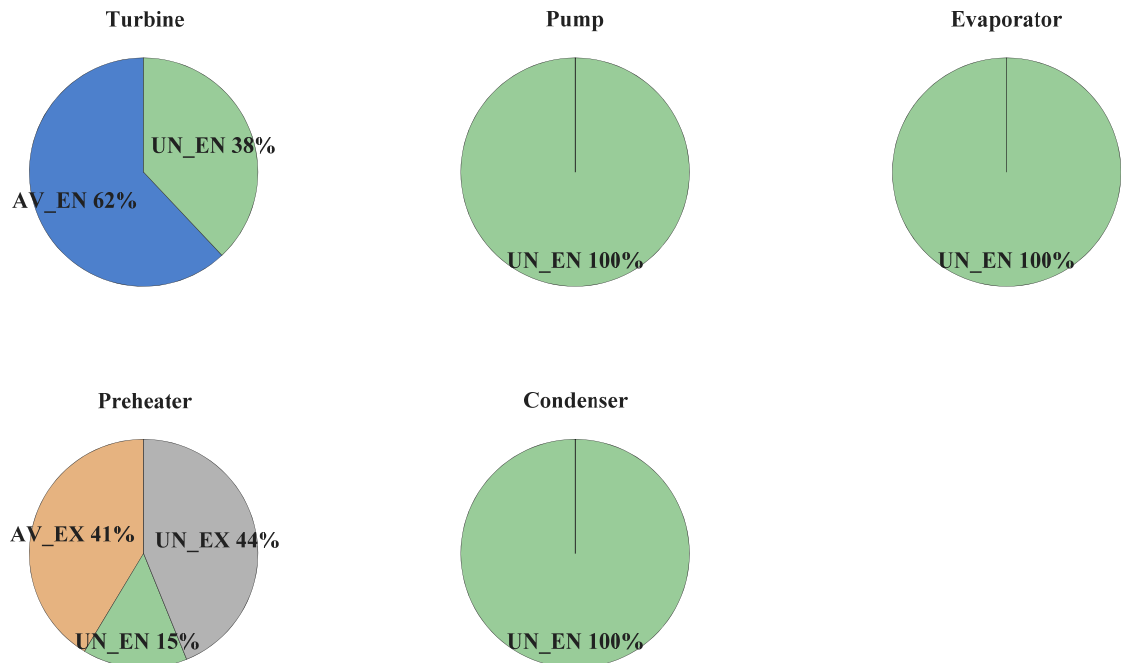


Fig. 5 Exergy destruction rate of components

하였으며, 기존 엑서지 분석에서는 응축기가 개선 우선순위로 식별된 반면, 고급 엑서지 분석에서는 실제 개선 가능성이 높은 장비는 터빈과 예열기로 확인된다.

Table 4 Comparison of conventional and advanced exergy analysis

Component	Conventional exergy analysis	Advanced exergy analysis
	Exergy efficiency	Avoidable exergy destruction
Preheater	58.1%	41.0%
Evaporator	66.5%	0%
Turbine	80.5%	62.1%
Condenser	34.2%	0%
Priority for improvement	Condenser	Turbine

5. 결 론

본 연구에서는 선박의 배기가스를 열원으로 사용하는 폐열회수 시스템을 설계하고, 기존 엑서지 분석과 고급 엑서지 분석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 적용된 ORC의 운전조건에서 4 종류의 작동유체 R245fa, R245ca, R123, R141를 대상으로 시뮬레이션을 수행한 결과, R245fa에서 정미출력 323.7 kW와 엑서지 효율 38.4%로 가장 높게 나타났으며, 현재의 조건에서는 최적의 작동유체로 판단된다.

2) 기존 엑서지 분석 결과, 엑서지 효율은 응축기가 34.2%로 가장 낮게 나타났으며, 그 다음으로 예열기가 58.1%로 낮게 나타났다. 이것은 응축기와 예열기의 개선이 필요함을 의미한다.

3) 고급 엑서지 분석 결과, 시스템 전체적으로 회피 가능한 엑서지 파괴율에 비해 회피 불가능한 엑서지 파괴율이 높게 나타났으며, 회피 불가능한 엑서지 파괴율은 대부분 내재적인 엑서지 파괴율로 확인되었다.

4) 각 요소 장비별 회피 가능한 엑서지 파괴는 터빈에서 회피 가능한 내재적 엑서지 파괴 62.1%, 예열기에서 회피 가능한 외재적 엑서지 파괴

41.0%가 발생하였다. 이는 터빈과 예열기가 실제 개선 가능성이 큰 장비로 분석된다.

후 기

이 논문은 2025년도 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(RS-2025-00256331, 선박배출온실가스(GHG) 통합관리 기술개발)과 선박해양플랜트연구소의 기본사업인 “대형선박 이산화탄소 포집 시스템 설계기술 개발 및 파일럿 실증”(1525014867)에 의해 수행되었습니다.

Author contributions

Y. S. Choi; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Simulation, Writing-original draft, T. W. Lim ; Methodology, Validation, Software, Writing-review & editing, S. T. Lim; Project administration, Supervision, Writing-review & editing.

References

1. A. Sardar, R. Islam, M. Anantharaman and V. Garaniya, 2025, “Advancements and Obstacles in Improving the Energy Efficiency of Maritime Vessels: A Systematic Review”, Marine Pollution Bulletin, 214, 117688. (<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117688>)
2. D. V. Singh and E. Pedersen, 2016, “A Review of Waste Heat Recovery Technologies for Maritime Applications”, Energy Conversion and Management, 111, 315-328. (<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.073>)
3. T. W. Lim and C. K. Lee, 2018, “Thermodynamic Analysis of ORC to Recover waste Heat of Jacket Cooling Water in Diesel Engine”, Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education, 30(3), 1032-1039. (<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.06.30.3.1032>)

4. T. Koroglu and O. S. Sogut, 2017, “Advanced exergy analysis of an organic Rankine cycle waste heat recovery system of a marine power plant”, *Journal of Thermal Engineering*, 3, 1136-1148.
(<https://doi.org/10.18186/thermal.298614>)
5. H. Nami, A. Nemati and F. J. Fard, 2017, “Conventional and advanced exergy analyses of a geothermal driven dual fluid organic Rankine cycle (ORC)”, *Applied Thermal Engineering*, 122, 59-70.
(<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.011>)
6. Y. Wang, G. Qin, Y. Zhang, S. Yang, C. Liu, C. Jia and Q. Cui, 2021, “Conventional and advanced exergy analyses of an organic Rankine cycle by using the thermodynamic cycle approach”, *Energy Science & Engineering*, 9, 2474-2492.
(<https://doi.org/10.1002/ese3.980>)
7. J. Galindo, S. Ruiz, V. Dolz and L. Royo-Pascual, 2016, “Advanced exergy analysis for a bottoming organic Rankine cycle coupled to an internal combustion engine”, *Energy Conversion and Management*, 126, 217-227.
(<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.080>)
8. S. Y. Dibazar, G. Salehi and A. Davarpanah, 2020, “Comparison of exergy and advanced exergy analysis in three different organic Rankine cycles”, *Processes*, 8(5), 586.
(<https://doi.org/10.3390/pr8050586>)
9. H. K. Lee, D. K. Lee and G. I. Park, 2013, “Feasibility study and optimization of organic Rankine cycle to recover waste heat of marine diesel engine”, *The Society of Naval Architects of Korea, Special Issue*, 103-109.
10. J. Kennedy and R. Eberhart, 1995, “Particle swarm optimization”, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
(<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>)
11. R. Zhao, H. Zhang, S. Song, F. Yang, X. Hou and Y. Yang, 2018, “Global optimization of the diesel engine-organic Rankine cycle (ORC) combined system based on particle swarm optimizer (PSO)”, *Energy Conversion and Management*, 174, 248-259.
(<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.040>)