

선박 탑재형 LNG 냉열 기반 CO₂ 액화 공정의 작동 유체 비교 및 최적화

정민경* · 황성원***,***,***,***†

*인하대학교 화학·화학공학융합학과
22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

**인하대학교 에너지공정혁신융합전공
22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

***인하대학교 스마트 에너지 소재 및 공정 연구단
22212 인천광역시 미추홀구 인하로 100

(2025년 6월 25일 접수, 2025년 7월 30일 수정본 접수, 2025년 8월 11일 채택)

Optimization and Comparison of Working Fluids for an Onboard CO₂ Liquefaction Process Utilizing LNG Cold Energy

Minkyung Jung* and Sungwon Hwang***,***,***,***†

*Department of Chemical Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Korea

**Program in Energy Process Innovation and convergence, Inha University, Incheon, 22212, Korea

***Education and Research Center for Smart Energy Materials and Process, Inha University, Incheon, 22212, Korea

(Received 25 June 2025; Received in revised from 30 July 2025; Accepted 11 August 2025)

요 약

본 연구는 LNG(Liquefied Natural Gas) 연료 추진 선박에 적용 가능한 ORC(Organic Rankine Cycle) 기반 CO₂ 액화 시스템을 제안하고, LNG 재기화 과정에서 발생하는 냉열을 효율적으로 활용하여 에너지 소비를 최소화하는 방안을 제시하였다. Aspen HYSYS를 활용해 2 TPH(tonne per hour) 규모 공정을 시뮬레이션하였으며, 다양한 단일 및 혼합 냉매 조합에 대해 열역학적 특성을 분석하고, GA(Genetic Algorithm)를 통해 작동 유체 조성 및 유량을 최적화하였다. 분석 결과, 혼합 냉매는 LNG의 비등온 증발 특성과 효과적으로 매칭되어 단일 냉매 대비 낮은 비에너지 소비와 높은 팽창기 출력을 나타냈고, 특히 본 시스템에서는 R14-R290 조합이 우수한 성능을 보였다. 제안된 시스템은 CO₂ 액화를 위한 에너지 자립적 운전을 가능하게 하여, 선박의 에너지 효율성과 환경 대응력을 동시에 향상시킬 수 있다.

Abstract – This study proposes an ORC (Organic Rankine Cycle)-based CO₂ liquefaction system applicable to LNG (Liquefied Natural Gas)-fueled ships, aiming to minimize energy consumption by efficiently utilizing the cold energy released during the LNG regasification process. A 2 TPH (tonne per hour) scale process was simulated using Aspen HYSYS, and various single and mixed refrigerant combinations were analyzed in terms of their thermodynamic properties. A GA (Genetic Algorithm) was employed to optimize the composition and flow rate of the working fluids. The results show that mixed refrigerants more effectively match the non-isothermal evaporation characteristics of LNG, achieving lower specific energy consumption and higher expander output compared to single refrigerants. In particular, the R14–R290 mixtures demonstrated superior performance. The proposed system enables energy self-sufficient CO₂ liquefaction, thereby improving both the energy efficiency and environmental responsiveness of ships.

Key words: Onboard carbon capture and storage (OCCS), CO₂ liquefaction, LNG regasification energy utilization, Organic rankine cycle (ORC), Genetic algorithm-based optimization

1. 서 론

2050년 넷제로(Net-Zero) 목표 달성을 위한 전 세계적인 노력은 기후 변화 대응의 핵심 전략으로서 탄소 포집 기술의 중요성을 지속적으로 부각시키고 있다. 포집된 CO₂를 효과적으로 수송하고 저장하는 방법 중 CO₂ 액화 방식은 높은 효율성과 경제성으로 인해 널리 활용되고 있다. 특히 해양 운송 부문은 전 세계 탄소 배출량의

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sungwon.hwang@inha.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상당 부분을 차지하고 있어, 선박에서 발생하는 배기가스를 처리하기 위한 혁신적인 기술 개발이 시급한 상황이다[1].

이러한 배경에서 선박 탑재형 탄소 포집 시스템(Onboard Carbon Capture System, OCCS)은 핵심적인 해결책으로 주목받고 있다[2]. 특히 연소 후 포집 기술은 기존 선박 엔진이나 출력 시스템을 변경하지 않고도 적용이 가능하다는 실용적인 이점을 가진다.

아울러 기존 해양 연료인 해양 디젤유 및 중유의 경우 높은 탄소 함량을 가지고 있어, 저탄소 연료인 LNG (Liquified Natural Gas), 수소, 암모니아 등의 대체 연료에 대한 관심도 빠르게 증가하고 있다[3]. LNG를 연료로 사용하는 선박은 LNG 재기화 과정에서 발생하는 약 860 kJ/kg의 냉열을 활용해[4] CO₂를 효율적으로 액화할 수 있으며, 이를 통해 전력까지 생산하는 방안을 고려할 수 있다. 이러한 시스템은 CO₂ 액화에 필요한 에너지를 상쇄하고 선박의 전반적인 에너지 효율을 향상시켜, OCCS 기술을 환경 규제 대응 수단을 넘어, 운영비용 부담을 완화할 수 있는 경제적 대안으로 평가될 수 있다.

LNG 연료 추진 선박은 천연가스를 연료로 사용하는 선박을 의미하며, 이들 선박에 적용되는 LNG 연료 가스 공급 시스템(Fuel Gas Supply System, FGSS)에는 두 가지 고압 연료 공급 방식이 존재한다.

첫 번째는 가스 압축식 연료 공급 시스템으로, LNG 탱크 내에서 자연적으로 발생하는 증발가스(BOG, Boil-off Gas)를 연료로 사용하며, 탱크 내부의 과도한 압력 상승을 방지하기 위해 개발되었다. 시스템 구성은 비교적 단순하지만, 기체 상태의 천연가스를 엔진에 공급하기 위해 대형 압축기가 필요하므로 선박 내 공간을 많이 차지하고 전력 소비가 크다는 단점이 있다. 두 번째는 LNG 압축식 시스템으로, 가스 압축식 시스템의 단점을 보완하기 위해 제안된 방식이다. 이 시스템은 액체 상태의 LNG를 펌프를 이용해 고압으로 압송한 뒤, 기화시켜 엔진으로 공급한다. 액체를 압축하는 방식이기 때문에 장비 크기를 줄일 수 있으며, 전력 소모가 적어 선박에 탑재하기에 유리하다[5]. 이러한 특성은 제한된 공간에서 에너지 효율을 극대화해야 하는 OCCS 시스템에 적합한 연료 공급 방식임을

보여준다.

특히, 선박 내에서 배기가스를 포집하는 경우 CO₂에는 필연적으로 수분이 포함되어 있으며, 이는 CO₂ 액화 및 수송 시스템의 안정성과 안전성을 저해하는 주요 요인으로 작용한다[6]. 수분이 포함된 CO₂는 부식, 결빙, 가스 수화물 형성 및 막힘을 유발할 수 있으며, 이는 장비 손상, 효율 저하, 심지어 안전 사고로 이어질 수 있다. 따라서 CO₂ 액화 및 수송 시스템은 특정 탈수 요건을 충족해야 한다[7].

CO₂의 수분 함량을 제어하는 범위에 대한 명확한 정의는 아직 부족하지만, CO₂ 액화 및 수송 조건(7 bar)에서 수분 함량을 100 ppm 미만으로 유지하는 것이 권장된다[8].

이후 탈수된 이산화탄소(CO₂)는 삼중점(5.18 bar, -56.6°C)과 임계점(73.8 bar, 31.1°C) 사이의 다양한 압력 및 온도 조건에서 액화될 수 있다[9]. 이 범위 내에서 CO₂는 액체, 고체, 기체 상태로 존재하며, 액화 공정은 이러한 상전이 특성을 활용한다. 삼중점 근처의 저온 및 저압 조건에서 CO₂를 액화하려면 매우 낮은 온도를 유지하기 위한 높은 냉각 부하가 요구된다. 반면, 임계점 근처의 고온 및 고압 조건에서는 CO₂를 임계 압력 이상으로 압축하기 위한 거대한 압축 시스템이 필요하다. 해상 운송을 위한 CO₂는 액화를 통해 부피를 최소화하며, 안정적인 액상 상태 유지를 위해 운송 압력은 삼중점 이상(≥5.2 bar)으로 설정된다. 특히 하역 중 압력 강하로 인한 드라이아이스 형성을 방지하기 위해 고체화는 피해야 하며, 이에 따라 -30°C에서 -50°C, 6-15 bar 범위의 조건이 권장된다[10].

이러한 조건을 보다 에너지 효율적으로 만족시키기 위해서는 외부 저온원을 활용한 냉각이 유리하며, 이때 활용될 수 있는 에너지가 바로 LNG 재기화 에너지이다. LNG는 약 -160°C의 극저온 상태에서 저장 및 운송되며, 이때 발생하는 냉열은 높은 엑서지를 지닌 유용한 에너지원으로 간주된다. 이러한 LNG 냉열의 효과적인 활용을 위해 다양한 에너지 회수 방식이 제안되어 왔다[11-13]. 그 중 직접 확장 사이클(Direct Expansion Cycle, DEC)은 LNG를 고압 상태에서 직접 기화시켜 가스 상태로 터빈에 팽창시킴으로써 압력 에너지를 회수하는 방식으로, 시스템 구성이 단순하고 운전이 용이하나, 전반적인 사이클 효율과 냉열 활용도에 제한이 있다. 칼리나 사이클

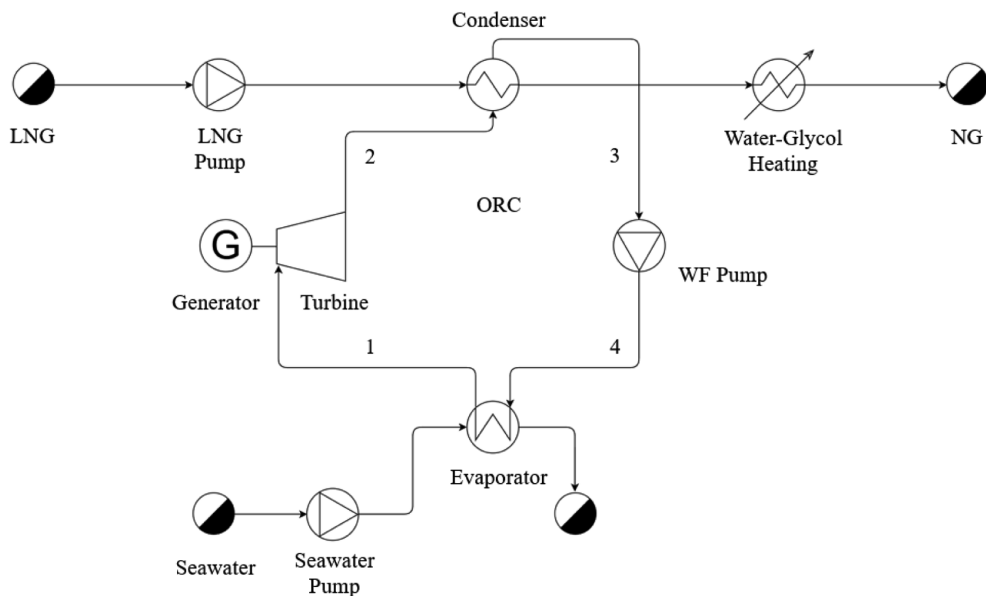


Fig. 1. Process flow diagram of Organic Rankine Cycle.

(Kalina Cycle)은 암모니아-물 혼합물을 작동 유체로 사용하며, 혼합물의 가변 비등점을 이용하여 열전달 성능을 향상시키는 특징이 있다[14]. 유기 랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle)은 유기 작동 유체를 사용하며, LNG 기화 온도 범위에 적합한 비등점을 갖는 냉매를 선택함으로써 냉열을 효율적으로 회수할 수 있다.

2. 연구 방법

2-1. Single-stage Cryogenic ORC System

본 연구에서는 ORC를 활용하여 CO₂ 액화를 위한 에너지 회수 기반 시스템 개념을 제안하고자 한다. ORC는 구성의 단순성, 운전의 용이성, 다양한 작동 유체의 선택 가능성으로 인해 LNG 냉에너지를 회수하기 위한 가장 유망한 열역학적 사이클로 평가되고 있다[15].

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 LNG 활용 ORC 공정 흐름도를 보여준다. 이 시스템은 주로 펌프, 증발기, 터빈, 응축기로 구성되어 있으며[16], 유기 냉매를 작동 유체로 사용한다. 유기 작동 유체는 응축 압력에서 증발 압력으로 가압되며(3→4), 이후 증발기에서 기화된다(4→1). 고온-고압의 증기는 터빈을 통해 팽창되어 전력을 생성하며(1→2), 마지막으로 작동 유체는 응축기에서 응축된다(2→3) [17].

2-2. CO₂ Liquefaction Using Cryogenic Organic Rankine Cycle (CO₂-CORC)

선박 내 극저온 ORC 시스템에 대한 연구가 진행 중이지만, 대부분의 열원은 해수이다[18]. 그러나 본 연구에서는 배기가스로부터 포집된 이산화탄소를 열원으로 활용하고, 이를 냉열원과 연계하여 액화할 수 있다면, ORC는 전력 생산과 CO₂ 액화를 동시에 수행할 수 있는 효율적인 사이클이 될 수 있다. 이에 따라, 본 연구에서는

기존 ORC 기술을 기반으로 CO₂ 액화 공정을 통합한 다단계 에너지 활용 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 1차적으로 ORC를 통해 LNG 냉열을 전력 생산에 이용하고, 이후 잔여 냉열을 2차적으로 CO₂ 액화 공정에 활용함으로써 에너지 자원의 효율적 활용을 극대화한다. 이러한 통합적 접근은 냉열의 단계적 회수를 통해 높은 종합 에너지 효율을 달성할 수 있는 효과를 창출할 수 있다.

본 연구에서 고려한 대상 선박은 LNG (Dual Fuel)를 연료로 사용하는 20,000 m³급 액화 CO₂ 운반선(20k LCO₂ carrier)이다. 해당 선박의 운전 조건 및 배기가스 정보는 산업 협력기관인 UNION Co. Ltd. (Korea)로부터 제공받았다.

선박의 특성과 엔진 관련 세부 사항은 Table 1에 요약되어 있다.

본 연구에서는 2 TPH (Tonne Per Hour) 규모의 CO₂ 액화 공정이 Aspen HYSYS (V14.0) 모델을 사용하여 시뮬레이션되었다. 열역학적 물성 계산 방법으로는 탄화수소 및 냉매의 열역학적 거동을 잘 설명하고 ORC 시스템의 시뮬레이션에 널리 사용되는 Peng-Robinson 상태 방정식을 선택하였다[19].

추진 엔진으로는 MAN 6G50ME-C10.7-GI-HPSCR가 사용되었으며, 본 설계에서는 이 엔진의 SMCR (Specified Maximum Continuous Rating)인 10,320 kW를 기준으로 약 85% 부하 조건에서 운전하는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션 및 최적화를 단순화하기 위해 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 각 열교환기의 압력 강하는 10 kPa로 설정하였다.
- 펌프, 압축기, 팽창기의 단열 효율은 모두 80%로 가정하였다.
- 팽창기 후단의 압력은 1.1 bar로 설정하였다.
- 극저온 공정에서 열교환기의 MTA (Minimum Temperature Approach)는 일반적으로 2~5°C 범위로 설정되므로, 본 연구에서는 3°C로 적용하였다[20].

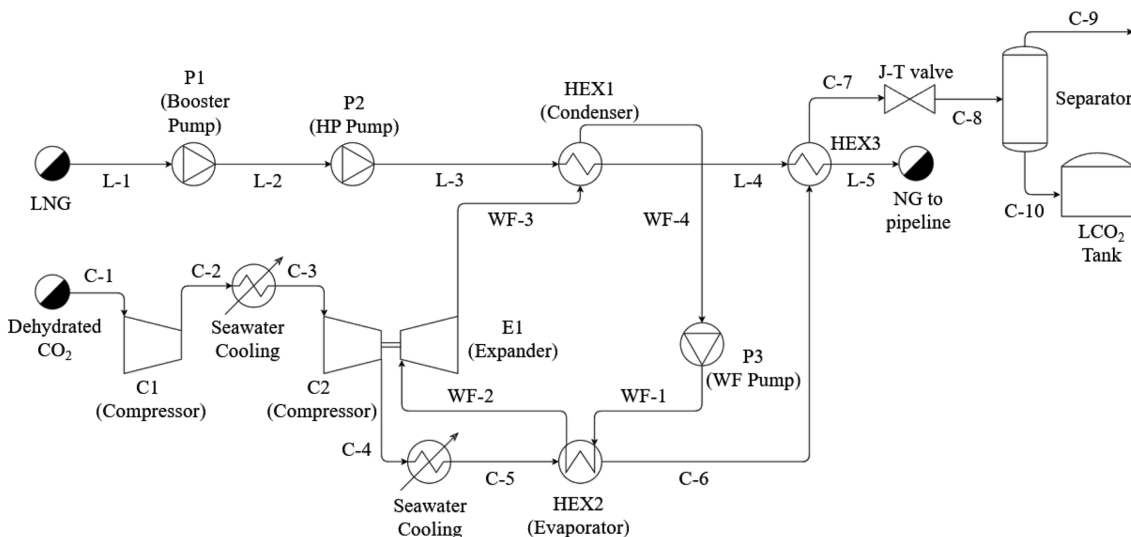


Fig. 2. Process Flow Diagram of the proposed CO₂ liquefaction system integrated with the Organic Rankine Cycle (CO₂-CORC).

Table 1. Specifications of the ship engine

Ship characteristics	
Engine type	MAN B&W 6G50ME-C10.7-GI-HPSCR
SMCR power (Specified Maximum Continuous Rating power) (kW)	10,320
Engine operating pressure-max set point (bar(g))	380

본 공정에서 LNG는 1 bar, -162°C의 초기상태에서 1445.3 kg/h의 유량으로 공급되며, 300 bar, 45°C의 최종상태로 압축, 열교환 후 엔진으로 투입된다. 한편, CO₂는 7 bar, -48.84°C 조건에서 액화된다. 팽창기에서 생성된 일을 CO₂ 압축기의 동력으로 사용하는 에너지 회수 시스템을 채택하여 전체 공정의 효율을 높였다. 또한, 극저온 ORC에서 회수되지 않은 LNG 잔여 냉열은 CO₂ 액화에 2차적으로 활용되어 에너지 활용의 극대화를 도모한다.

각 스트림의 상세한 흐름은 다음과 같다. LNG의 경우, 연료 가스 공급 시스템의 변형된 구조를 가진다. LNG 공급(부스터) 펌프를 이용하여 고압 펌프에서 압축되기 전, 충분한 공급 흐름과 압력을 유지한다. 이후 고압 펌프를 이용하여 엔진에 필요한 300 bar까지 LNG의 압력을 증가시킨다. 이 펌프는 연료 가스 부하의 최소에서 최대치까지의 전체 압력을 커버한다. 기존의 물과 글리콜 브라인을 가열 매체로 사용한 기화기 대신, LNG의 일부는 약 -150°C에서 응축기로 들어가 ORC의 냉열원이 된다. 작동 유체와 열교환 이후, 냉각된 CO₂와 만나 추가적으로 -14°C까지 열교환되며, 엔진에 필요한 온도 수준인 45°C에서 방출된다.

CO₂의 경우, 탈수 과정을 마친 후 압축기를 이용하여 가압된다. 이는 줄-튐슨 밸브 후단의 온도를 액화 온도인 -48.84°C로 냉각시키기 위함이다. 압축 후 상승된 온도를 낮추기 위해 해수와 열교환을 거친 후, CO₂는 유기 랭킨 사이클 증발기의 열원으로 사용되어 냉각된다. 이후 LNG와 추가적인 열교환이 진행되고, 줄-튐슨 밸브 이후 액화되게 된다. 공정 시뮬레이션에 사용된 LNG 및 CO₂의 초기 스트림 조건은 Table 2에 제시되며, 이는 시뮬레이션의 입력 데이터를 나타낸다. 이때 CO₂는 탈수 공정을 거친 이후의 조건을 적용하였다.

2-3. 에너지 분석

본 연구에서 제안하는 CO₂-CORC 시스템에서 주요 장비는 펌프, 열교환기, 팽창기로 구성된다. 본 절에서는 각 구성 요소들의 에너

Table 2. Initial stream conditions of LNG and CO₂

Stream	LNG	CO ₂
Temperature (°C)	-163	63.11
Pressure (bar)	1	11
Flow rate (kg/h)	1445.3	1962
Composition		
CH ₄	0.8877	-
C ₂ H ₆	0.0754	-
C ₃ H ₈	0.0259	-
C ₄ H ₁₀	0.0101	-
C ₅ H ₁₂	0.0002	-
N ₂	0.0007	0.0003
O ₂	-	0.0001
CO ₂	-	0.9994
H ₂ O	-	0.0001

Table 3. CO₂-CORC Energy balance models of different equipment of ORC system [21]

Component	Energy balance model
Evaporator	$Q_{CO_2} = Q_{evap} = m_{CO_2}(h_{c,5} - h_{c,6}) = m_{wf}(h_{wf,2} - h_{wf,1})$ (1)
Turbine	$W_{Tb} = m_{wf}(h_{wf,2} - h_{wf,3}) = m_{wf}(h_{wf,2} - h_{wf,3,s})\eta_{Tb}$ (2)
Condenser	$Q_{cond} = Q_{LNG} = m_{wf}(h_{wf,3} - h_{wf,4}) = m_{LNG}(h_{L,4} - h_{L,3})$ (3)
Pump	$W_P = m_{wf}(h_{wf,1} - h_{wf,4}) = m_{wf}(h_{wf,1,s} - h_{wf,4})/\eta_P$ (4)

지 보존 방정식을 분석하고, 시스템의 성능 지표를 제시한다.

2-3-1. ORC 내 에너지 모델 분석

Table 3은 ORC 시스템 내 주요 장치에 대한 에너지 보존 방정식을 나타낸다. 여기서 Q와 W는 각각 열전달률(heat transfer rate)과 전력(power)을 의미하며, m과 h는 질량 유량(mass flow rate)과 비엔탈피(specific enthalpy)를 나타낸다. 증발기에서는 CO₂의 열이 작동 유체로 전달되며, 양측의 열 전달량은 질량 유량과 엔탈피 차를 통해 계산된다. 터빈에서는 작동 유체의 엔탈피 차로부터 발생하는 일을 터빈 효율을 고려하여 계산하며, 응축기에서는 LNG의 극저온 냉열을 이용해 작동 유체를 응축시키며 이 과정에서 LNG의 온도 상승에 따른 엔탈피 증가가 반영된다. 펌프는 작동 유체를 고압으로 압축하며, 실제 소요 동력은 이상적인 펌프 작업에 펌프 효율을 고려하여 산정된다.

2-3-2. 성능 지표

CO₂-CORC 시스템의 성능을 평가하기 위해 몇 가지 프로세스 성능 지표를 도입하였다.

일반적으로 LNG 냉열을 이용한 극저온 발전 시스템 성능 평가에는 순 전력 출력(net power output)이 사용된다. 이에 따라 첫째 성능지표로 W_{net} 이 선정되었고 식 (5)과 같이 정의된다.

$$W_{net} = \sum_{i=1}^l W_{Tb,i} - \sum_{j=1}^l W_{P,j} \tag{5}$$

일반적인 액화공정에서는 액화시키기 위한 에너지 소모량을 줄이는 것이 중요하다. 따라서 두 번째 지표는 CO₂-CORC 시스템에서 CO₂를 액화시키는 데 드는 단위 에너지 소모량(Specific Energy Consumption)으로, 식 (6)과 같이 정의된다.

$$SEC = \frac{\sum_{i=1}^l W_{C,i} + \sum_{j=1}^l W_{P,j} - \sum_{k=1}^l W_{TP,k}}{m_{LCO_2}} \tag{6}$$

세 번째 지표는 열 효율로, 열기관이 열을 전력으로 변환하는 능력(Thermal Efficiency)을 반영하며, 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\eta_{en} = \frac{W_{net}}{Q_{evap}} \tag{7}$$

2-4. ORC에서의 냉매 선택

냉열 발전 시스템, 특히 ORC의 성능은 작동 유체의 특성에 크게 영향을 받는다. LNG는 순수 물질이 아니기 때문에 기화 과정에서 온도가 변하며, 이러한 비등점 특성으로 인해 응축기에서 가장 많은 액서지 손실이 발생할 수 있다. 따라서 작동 유체의 응축 프로세스 온도 프로필이 LNG 기화 온도와 일치할수록 액서지 손실을 최소화하고 시스템 효율을 극대화할 수 있다.

작동 유체 선택 시에는 끓는점, 녹는점, 주변 온도, 안전성, 환경

Table 4. Properties of ORC working fluids

Working fluid	Chemical formula	Molecular weight (g/mol)	Boiling point (°C)	Melting point (°C)	Toxicity	Flammability [23]	GWP-100 [21,22]
R14	CF ₄	88.0043	-127.8	-183.6	X	X	7380
R170	C ₂ H ₆	30.07	-89	-182.8	X	O	5.5
R23	CHF ₃	70.01	-82.0	-155.13	X	X	14600
R290	C ₃ H ₈	44.097	-42.1	-187.7	X	O	3.3
R601	C ₅ H ₁₂	72.15	36.1	-129.8	X	O	~20
R717	NH ₃	17.031	-33.34	-77.73	O	O	<1

적 영향 등 다양한 요소를 종합적으로 고려해야 한다. 이상적인 작동 유체는 무독성, 비가연성, 비부식성 특성을 가져야 한다. 본 연구에 활용된 주요 냉매의 특성은 아래 Table 4와 같다.

Table 4에서는 각 냉매의 끓는점과 녹는점을 정리하였다. 이 두 물성은 냉매의 증발 및 응축 특성뿐 아니라 운전 조건과 안정성에 직접적인 영향을 미치므로, 본 데이터를 통해 결과 해석의 이해를 높일 수 있다.

순수 냉매는 일정한 끓는점에서 급격히 증발하거나, 일정한 녹는점에서 고체-액체 상변화를 겪는다. 반면, 혼합 냉매는 여러 성분의 끓는점이 서로 달라 각 성분이 서로 다른 온도에서 순차적으로 증발하거나 응축된다. 이때 성분 간 끓는점 차이가 클 경우, 냉매의 증발 및 응축 구간이 넓어지고 온도 변화가 급격해질 수 있으나, 적절히 조성된 혼합물은 온도 변화가 고르게 분포되어 열교환 과정에서 LNG의 냉열과 효과적으로 맞물리며 시스템 효율 향상에 기여한다[23].

본 연구에서 온도 변화가 고르게 분포된다는 것은 냉매가 증발하거나 응축할 때 특정 온도 구간에 집중되지 않고 전체 온도 범위에 걸쳐 점진적으로 변화하여 엑서지 손실을 줄이고 열교환 효율을 높일 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 사용한 순수 냉매, 2성분 및 3성분 혼합 냉매는 Table 5에 정리하였다.

Table 5는 본 연구에서 어떤 냉매 조합들이 성능 평가에 사용되었는지를 보여주며, 각 조합의 성능 비교에 활용되었다. ORC 설계를 위해서는 작동 유체의 열역학적 특성과 LNG의 비등온 응축 특성을 모두 고려하여 적절한 작동 유체를 고려해야 한다. 기존 연구 [24]를 바탕으로, 본 연구에서는 순물질, 2성분 혼합물, 3성분 혼합물 각각 두 종씩 총 여섯 개의 작동 유체를 선정하였다. 순물질 유체로는 R170과 R23, 2성분 혼합물로는 R14-R290 및 R14-R717, 3성분 혼합물로는 R14-R23-R30과 R14-R23-R601이 포함된다. 이들 유체는 기존 LNG 냉열 기반 ORC 연구에서 신뢰성과 효율성을 인정받은 유체들로, 각 분류별 대표 후보로 선정되었다.

2-5. Genetic Algorithm을 활용한 CO₂-CORC 공정 냉매 최적화

선상에 탑재된 ORC를 활용한 CO₂-CORC 공정의 목적은 다음과 같다.

- CO₂ 액화 시 드는 에너지 소비(SEC) 최소화
- 단위 작동 유체별 터빈이 생산할 수 있는 전력(W_{net}) 극대화

Table 5. Pure, binary, and ternary working fluids used in this study

Pure working fluid	Binary mixture	Ternary mixture
R170	R14-R290	R14-R23-R30
R23	R14-R717	R14-R23-R601

- 시스템의 열 효율(η_{en})극대화
- 시스템 크기 최소화(OCCS 시스템 도입의 핵심 요소 중 하나로, 선박이라는 제한된 공간에서의 기술 적용 시 물리적 제약이 매우 중요함을 반영한다).

하지만 네 가지 최적화 목적은 서로 상충될 수 있는 경우가 많다. 예를 들어, 특정 조건에서 에너지 소비를 최소화하는 것이 항상 시스템 크기를 최소화하는 것과 일치하지 않을 수 있으며, 터빈 전력 생산 극대화가 항상 최고의 열 효율로 이어지지 않을 수도 있다. 따라서 실제 선박 적용 시에는 에너지 효율뿐만 아니라 공간 제약, 초기 투자 비용 등 다양한 요소를 종합적으로 고려하는 다목적 최적화 접근 방식이 필요하며, 이는 향후 연구의 중요한 방향이 될 수 있다.

본 연구에서는 3중 혼합 작동 유체의 조성 및 유량에 집중하기 위해 CO₂-CORC 구성에서 CO₂ 액화 전력 최소화만을 고려하였다. 이러한 단일 목적 최적화는 복잡한 다목적 문제를 단순화하여 계산 효율성을 높이는 장점이 있지만, 최적화된 결과가 다른 중요한 설계 목표에 대해서는 최적이지 않을 수 있다는 한계를 가진다.

작동 유체 유량 및 조성 최적화는 MATLAB R2022a의 Genetic Algorithm을 활용하여 진행되었다.

설정된 최적화 목적 함수는 다음과 같다.

- CO₂ 액화 시 전력 소비(SEC) 최소화

이를 위한 최적화 변수는 ORC의 작동 유체와 관련된 다음 세 가지 요소로 구성된다.

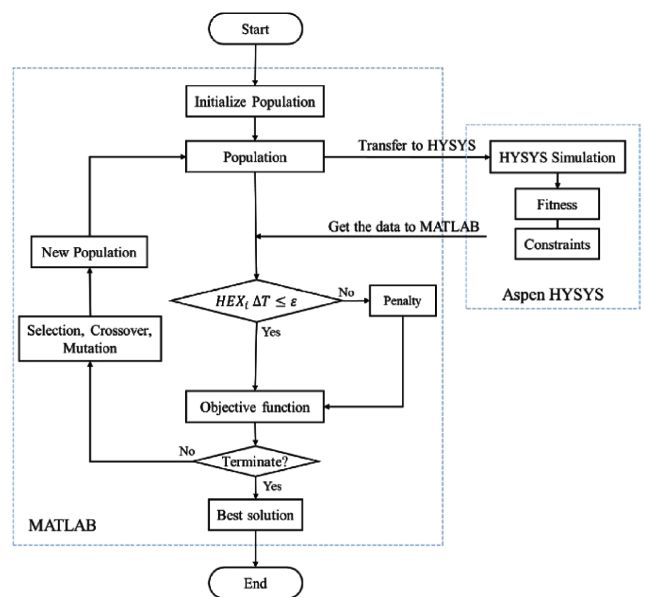


Fig. 3. Matlab and Hysys interface flowsheet [25].

Table 6. Boundary conditions for mass flow rate of working fluids

Working fluid	Flow rate range
R14 (CF ₄)	10~800 kg/hr
R23 (CHF ₃)	10~800 kg/hr
R30 (CH ₂ Cl ₂) / R601 (C ₅ H ₁₂)	10~80 kg/hr

- 작동 유체 조성
 - 작동 유체 펌프 후단 압력
 - 작동 유체 질량 유량
- 따라서 GA 기반 최적화에서 사용된 주요 설계 변수는 다음과 같다.
- ORC 3중 혼합 작동 유체 각각의 유량
- 제약조건과 경계조건은 다음과 같다.
- ORC 내 증발기 및 응축기의 MTA (minimum approach temperature) $\geq 3^\circ\text{C}$

3. 결과 및 고찰

3-1. 단일 냉매 성능

본 연구에서는 R170, R23 두 가지 단일 냉매의 성능을 평가하였다. 단일 냉매는 특정 비등점을 가지기 때문에, LNG와 같이 넓은

온도 범위에서 기화가 진행되는 유체와 열교환할 경우 온도 매칭에 한계가 있을 수 있다. 이는 열교환 과정에서 상당한 엑서지 손실을 야기할 수 있으며, 시스템의 전반적인 효율을 저하시키는 요인이 된다.

Fig. 4와 5에서 확인할 수 있듯이 에탄의 경우 펌프의 배출 압력이 38 bar일 때 12.96 kWh/tonCO₂로 가장 낮은 CO₂ 액화 에너지 소모가 들었고, R23의 경우 40 bar에서 12.78 kWh/tonCO₂로 가장 낮은 CO₂ 액화 에너지를 보였다. 하지만 에탄은 587.7 kg/hr, R23은 1377 kg/hr를 사용해야 하므로 같은 유량 대비 에탄이 더 높은 효율을 보인다. 단일 냉매를 사용하는 CO₂-CORC 시스템에서, 작동 유체에 따라 열효율은 펌프 배출 압력이 증가함에 따라 상승하다가 일정 압력 이상에서 감소하는 경향을 보였다. 에탄 사용 시 최대 효율은 38 bar에서, R23 사용 시에는 41 bar에서 각각 나타났다.

3-2. 2성분 혼합 냉매 성능

단일 냉매와 비교했을 때, 2성분 혼합 냉매 중 R14-R290을 사용했을 때 전력 생산 측면에서 전반적으로 우수한 성능을 보였다. 개별 혼합물에 대한 분석 결과는 다음과 같다.

R14-R290 혼합물은 ORC 펌프 배출 압력이 31 bar일 때 9.142 kWh/tonCO₂로 가장 낮은 CO₂ 액화 에너지 소모를 보여준다. 1529

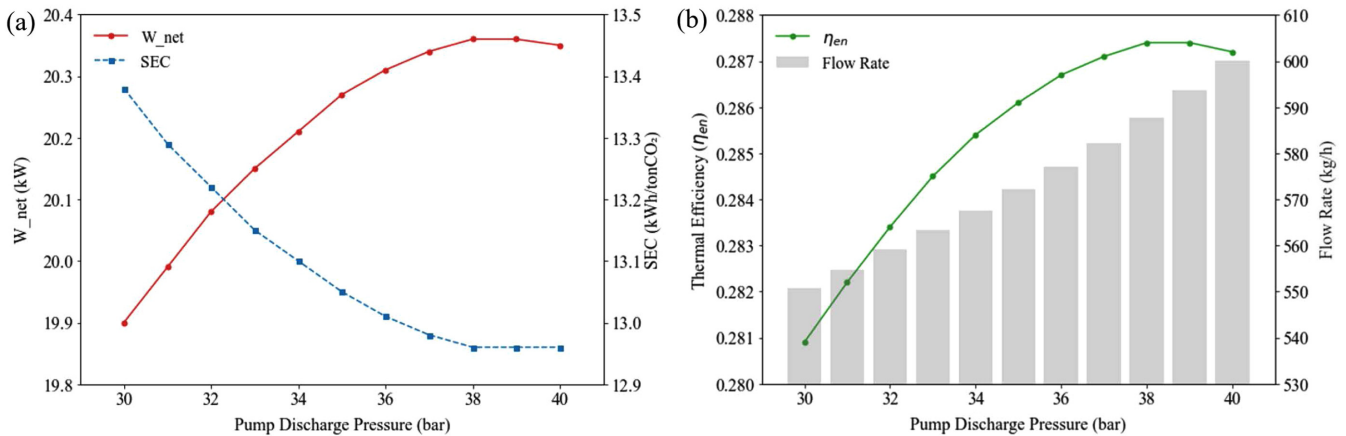


Fig. 4. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R170 as the working fluid. (a) Net Power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

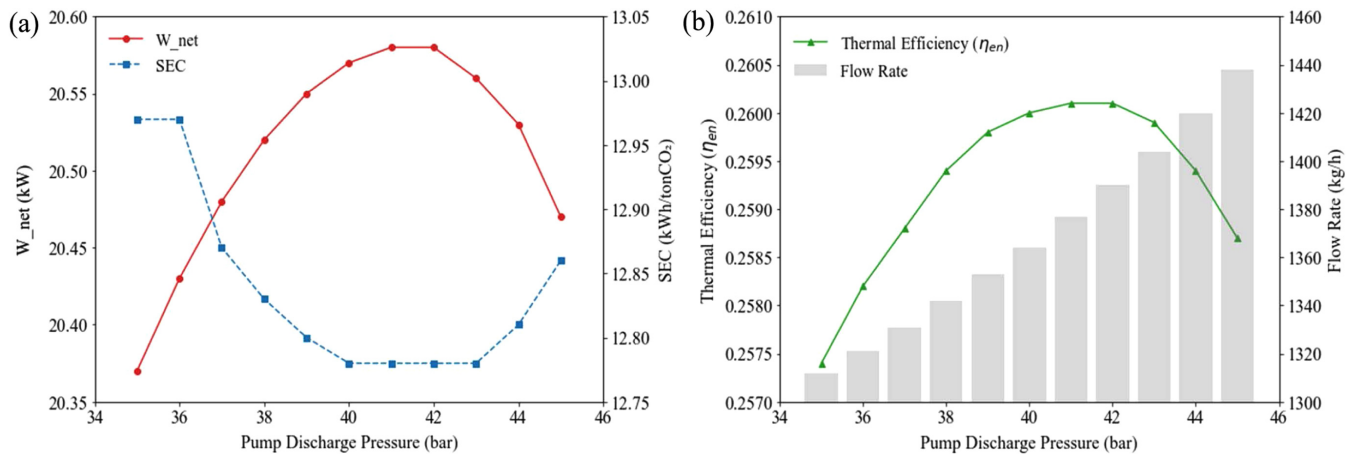


Fig. 5. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R23 as the working fluid. (a) Net Power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

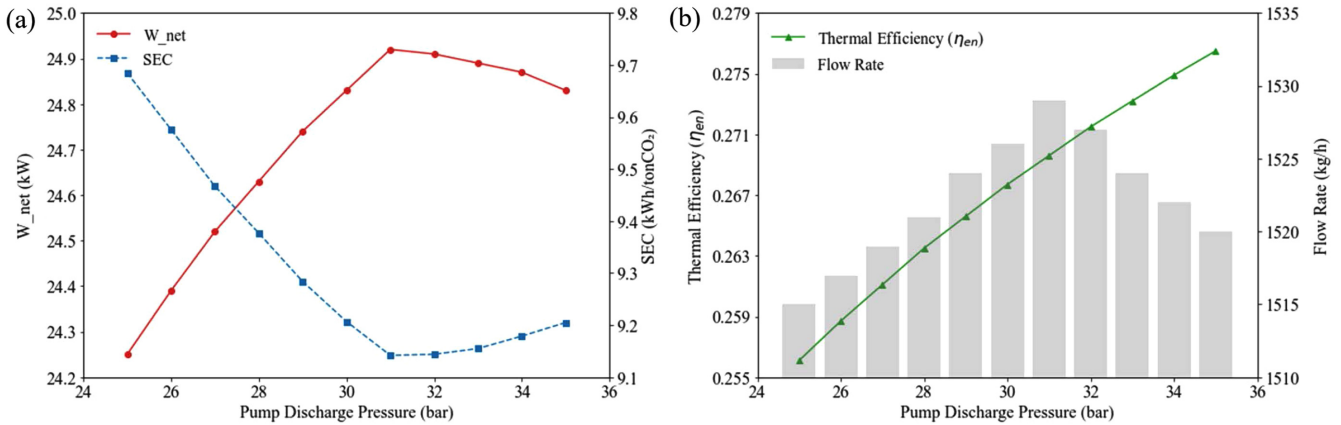


Fig. 6. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R14-R290 as the binary working fluid. (a) Net power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

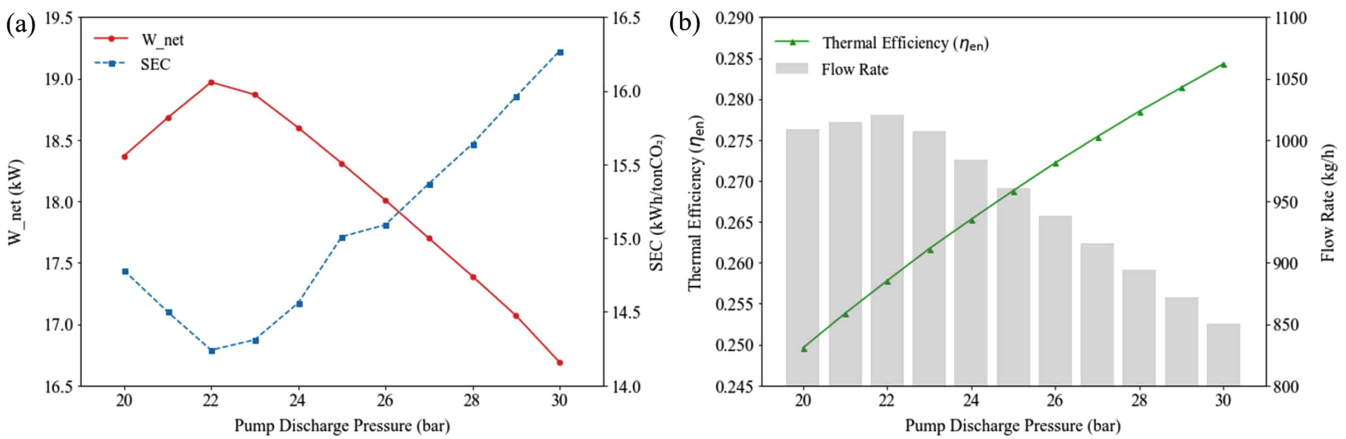


Fig. 7. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R14-R717 as the binary working fluid. (a) Net power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

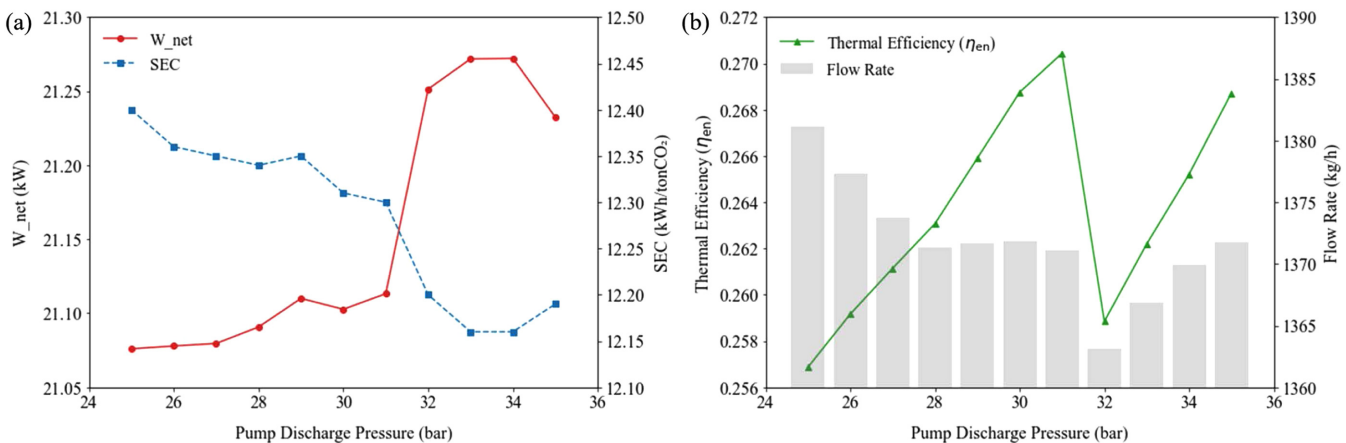


Fig. 8. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R30-R23-R14 as the ternary working fluid. (a) Net power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

kg/h의 유량에서 높은 열효율(26.96%)을 기록하여, ORC의 전력 변환 능력을 중시하는 설계에 적합한 냉매로 평가되었다.

R14-R717 혼합물은 ORC 펌프 배출 압력이 22 bar일 때 14.24 kWh/tonCO₂로 최적의 운전조건을 나타냈다. 1021 kg/h의 비교적 낮은 유량으로도 18.97 kW의 뛰어난 팽창기 출력을 보여주었다. 이는 시스템의 전체 규모를 줄이는 데 매우 유리하게 작용하며, “시

스템 크기 최소화”라는 최적화 목적에 부합하는 중요한 결과이다. 선박과 같이 공간 제약이 심한 환경에서는 이러한 특성이 기술 채택의 핵심 요소가 될 수 있다.

이러한 결과는 혼합 냉매의 성능 차이가 단순히 효율 수치뿐만 아니라, 시스템의 물리적 크기(유량과 연관), 운영 비용(과도한 유량은 펌핑 동력 증가), 그리고 특정 설계 우선순위(예: 공간 제약이

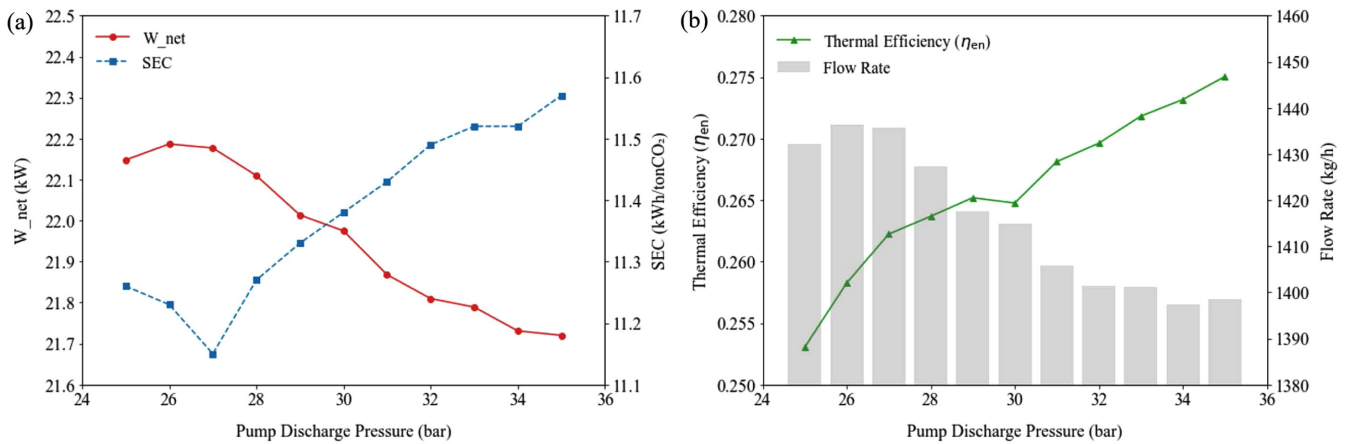


Fig. 9. Effect of pump discharge pressure on performance indicators using R601-R23-R14 as the ternary working fluid. (a) Net power output (W_{net}) and specific energy consumption for CO₂ liquefaction (SEC), (b) thermal efficiency (η_{en}) and working fluid flow rate.

심한 선박)에 따라 냉매 선택이 달라질 수 있음을 보여준다. 이는 엔지니어링 설계에서 항상 존재하는 다양한 성능 지표 간의 균형점 (trade-off) 관계를 명확히 드러낸다. 즉, ‘최고의’ 냉매는 존재하지 않으며, ‘최적의’ 냉매는 시스템의 특정 요구사항과 제약 조건에 따라 달라진다는 결과를 제공한다. 예를 들어, 에너지 소비를 최소화 하는 것이 가장 중요한 목표라면 R14-R290이 선호될 수 있지만, 시스템의 소형화가 더 중요하다면 R170이 더 적합한 선택이 될 수 있다.

단일 냉매와 2성분 혼합 냉매를 비교한 결과, 단일 냉매는 고정된 비등점을 가지므로 비등온 특성을 지닌 LNG와의 열교환에서 큰 온도 차이를 초래하게 된다. 이는 열전달 과정에서 비가역성을 증가시켜 엑서지 손실이 커지는 열역학적 원리를 잘 보여준다. 열역학 제2법칙에 따르면 유한한 온도 차이를 통한 열전달은 본질적으로 비가역적이며, 그 결과 엑서지 파괴가 발생한다. 따라서 LNG와 같은 비등온 열원을 활용할 때는 작동 유체의 온도 변화 프로파일이 열원의 온도 변화와 최대한 일치할수록 엑서지 손실을 줄이고 시스템 효율을 극대화할 수 있다.

3-3. 3성분 혼합 냉매 성능

R30-R23-R14의 경우 작동 유체의 펌프 후단 압력이 증가함에 따라 팽창기 동력이 증가하며 전체적인 SEC가 감소하는 추세를 보인다. 펌프 후단 압력이 34 bar이고, R14, R23, R30이 각각 588.1 kg/hr, 736 kg/hr, 45.8 kg/hr의 유량을 가질 때 가장 낮은 전력을 소모할 수 있음을 확인했다. 또한 열 효율 측면에서는 펌프의 배출압력이 증가함에 따라 열 효율이 증가하다가 32 bar에서 감소한 후 다시 증가하는 형태를 보인다.

R601-R23-R14의 경우 작동 유체의 펌프 후단 압력이 27 bar이고, R14, R23, R601이 각각 787.8 kg/hr, 596.8 kg/hr, 51.03 kg/hr의 유량을 가질 때 가장 낮은 전력을 소모한다. 열 효율은 펌프의 배출 압력이 증가함에 따라 증가함을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 다성분 혼합 냉매의 열역학적 거동이 조성 및 작동 압력에 매우 민감하게 반응한다는 것을 보여준다. 최적의 성능을 달성하기 위한 압력과 조성은 냉매 조합마다 다르며, 이는 복잡한 다차원 파라미터 공간에서 정밀한 최적화가 필요함을 의미한다. 유

전 알고리즘과 같은 고급 계산 최적화 기법이 이러한 복잡한 상호 작용을 탐색하고 최적점을 찾아내는 데 필수적인 도구임을 입증한다. 이처럼 다양한 최적 조건의 존재는 ORC 시스템 설계가 단일한 해법으로 귀결되지 않으며, 특정 운전 조건과 설계 목표에 따라 맞춤형 냉매 조합 및 운전 파라미터가 요구됨을 시사한다.

3-4. LNG composite curve 분석

Fig. 10은 (a) 단일 냉매 (b) 2성분 혼합 냉매 (c) 3성분 혼합 냉매를 사용한 경우 LNG가 연료로 공급되기까지의 composite curve를 보여준다. 이는 열교환기 내에서 뜨거운 유체와 차가운 유체의 열전달 프로파일을 온도-열량(T-Q) 다이어그램에 나타낸 것으로, 열교환 효율과 엑서지 손실을 시각적으로 평가하는 데 유용하다. 그래프에서 LNG의 곡선과 가장 가까운 점이 바로 핀치 포인트 온도 차이 (pinch point temperature difference, 3 °C)임을 확인할 수 있다. 핀치 포인트는 열교환기 내에서 뜨거운 유체와 차가운 유체 간의 최소 온도 차이를 나타내며, 이 값이 작을수록 열전달이 효율적이고 비가역성이 낮음을 의미한다.

저온의 LNG는 ORC의 응축기에서 열교환 후 추가적인 CO₂ 냉각에 사용된다. ORC 작동 유체 중 각각 (a) R23, (b) R14-R290, (c) R601-R23-R14일 때 작동 유체의 열 곡선은 LNG 증발 열 곡선과 가장 비슷하게 일치하여 비가역성이 낮은 것을 확인할 수 있다. 특히, 2성분 혼합물의 경우 LNG 증발 온도 선과 가장 잘 일치하여 엑서지 손실이 줄어들게 됨을 그래프로 확인할 수 있다.

이 복합 곡선 분석은 혼합 냉매가 단일 냉매보다 LNG의 비등온 증발 특성과 더 잘 매칭되어 열전달 과정에서 발생하는 엑서지 손실을 효과적으로 줄일 수 있음을 시각적으로 증명한다. T-Q 다이어그램에서 두 유체의 곡선 사이의 면적은 해당 열교환 과정에서 파괴되는 엑서지의 양에 비례한다. 단일 냉매(R23)의 경우, LNG 곡선과 작동 유체 곡선 사이에 큰 온도 차이가 발생하여 넓은 면적을 형성하고, 이는 높은 엑서지 파괴를 의미한다. 반면, 2성분 및 3성분 혼합 냉매는 비등점 분포를 통해 LNG의 온도 변화를 따라가며 곡선 사이의 면적을 최소화하여 비가역성을 줄이고 전반적인 시스템 효율을 향상시킨다. 이러한 시각적 분석은 열역학적 효율성을 극대화하기 위한 작동 유체 선택의 중요성을 강조하며, 실제 공정 설계에서 최적의 열교환기 성능을 달성하는 데 필수적이다.

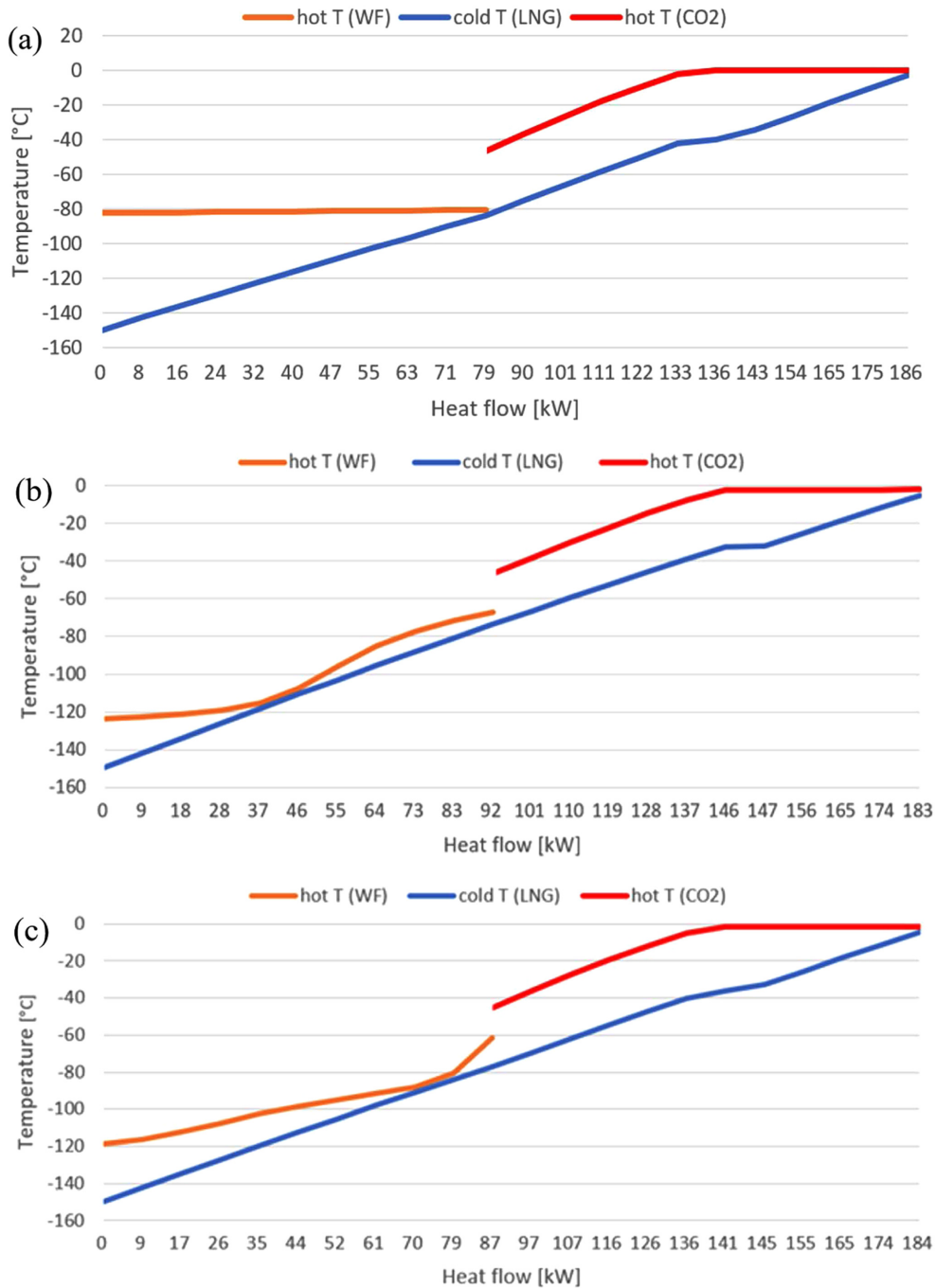


Fig. 10. LNG composite curves using (a) pure working fluid (R23), (b) binary mixture (R14-R290), and (c) ternary mixture (R601-R23-R14).

4. 결 론

본 연구에서는 LNG 냉열과 CO₂ 열원을 동시에 활용하는 변형된 극저온 ORC 시스템(CO₂-CORC)을 제안하고, 작동 유체 조성에 따른 시스템 성능을 분석하였다. 분석 결과, 2성분 혼합 냉매(R14-R290)가 단일 냉매 및 3성분 혼합 냉매 대비 전반적으로 우수한 성능을 보였다. R14-R290은 펌프 배출 압력 31 bar에서 9.142 kWh/tonCO₂로 가장 낮은 액화 에너지 소비를 기록하였으며, 에탄은 적은 유량(587.7 kg/h)으로도 20.36 kW의 높은 순 전력 출력을 보이며 시스템 소형화에 유리한 것으로 나타났다. 3성분 혼합 냉매 중

R601-R23-R14는 펌프 배출 압력 27 bar 조건에서 가장 낮은 전력 소비(11.15 kWh/tonCO₂)를 기록하며 열역학적 성능 측면에서 우수한 가능성을 보였으나, 전체적으로는 2성분 냉매의 효율성이 더 뛰어났다. 또한 LNG composite curve 분석을 통해 R14-R290 혼합 냉매가 LNG 증발 그래프와 가장 이상적으로 매칭됨을 시각적으로 확인하였다.

3성분 냉매는 조성 조절의 자유도가 높아 다양한 조건에서의 최적 설계 가능성을 제공하나, 특정 기화 온도 프로파일에서는 오히려 단순한 2성분 조합이 더 효과적인 온도 매칭을 제공할 수 있다. 이는 냉매 성분 수의 증가만으로 시스템 성능이 향상되지 않음을

의미하며, 냉매 간 상호작용의 복잡성과 열역학적 특성의 정밀한 고려가 중요함을 시사한다.

제안된 시스템은 선박 내에서 발생하는 LNG 냉열을 효과적으로 활용함으로써 에너지 효율을 높이고, 강화되는 국제 해양환경 규제에 대응할 수 있는 실용적이고 현실적인 대안이 될 수 있다. 아울러, 에너지 자원의 재활용을 통해 운영 비용을 절감하고 선박 경제성을 향상시키는 이점도 갖는다.

본 연구는 작동 유체 조성의 최적화에 중점을 두었지만, 향후 실질적인 상용화를 위해서는 CO₂ 탈수 기술의 고도화, 수분 허용 기준의 정립, 선박 운항 조건을 반영한 실증 기반의 성능 검증, 시스템의 동적 거동 분석, 그리고 이를 기반으로 한 정밀한 제어 전략의 수립이 필수적이다. 이러한 후속 연구를 통해 시스템의 기술적 신뢰성과 경제성을 동시에 확보하고, 해운 산업 내 탄소 저감 기술로서의 실질적 적용 가능성을 높일 수 있을 것이다.

사용기호

LNG	: Liquefied Natural Gas
NG	: Natural Gas
OCCS	: Onboard Carbon Capture and Storage
ORC	: Organic Rankine Cycle
CO ₂ -CORC	: CO ₂ liquefaction process using Cryogenic Organic Rankine Cycle
MTA	: Minimum Temperature Approach
GA	: Genetic algorithm
TPH	: Tonne Per Hour
WF	: Working Fluid
HEX	: Heat Exchanger
SEC	: Specific Energy Consumption
R14	: Tetrafluoromethane [CF ₄]
R170	: Ethane [C ₂ H ₆]
R23	: Fluoroform or Trifluoromethane [CHF ₃]
R290	: Propane [C ₃ H ₈]
R601	: n-Pentane [C ₅ H ₁₂]
R717	: Ammonia [NH ₃]

Nomenclature

Q_{CO_2}	: heat transfer rate of CO ₂ (kW)
Q_{evap}	: heat transfer rate in the evaporator (kW)
Q_{cond}	: heat transfer rate in the condenser (kW)
Q_{LNG}	: heat transfer rate of LNG (kW)
W_{Tb}	: power generated by the turbine (kW)
W_P	: power consumed by the pump (kW)
W_{net}	: net power output of the system (kW)
W_C	: power consumed by the compressor (kW)
m_{CO_2}	: mass flow rate of CO ₂ (kg/s)
m_{LCO_2}	: mass flow rate of Liquefied CO ₂ (kg/s)
m_{wf}	: mass flow rate of working fluid (kg/s)
m_{LNG}	: mass flow rate of liquefied natural gas (kg/s)
h_i	: specific enthalpy at stream i (kJ/kg)
$h_{i,s}$: isentropic specific enthalpy at stream i (kJ/kg)

η_{Tb}	: efficiency of turbine
η_P	: efficiency of pump
η_{en}	: thermal efficiency of the heat engine converting heat to power

감 사

이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2022-KP002473, 에너지국제공동연구사업). 이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(RS-2023-00243974, 디지털기반 지속가능 에너지 공정혁신 융합대학원).

References

- Kim, E., "Current Status and Implications of Greenhouse Gas Reduction in the Global Transport Sector: Focusing on the Shipping Industry," *KIEP Basic Materials* **22**(2), (2022).
- Risso, R., Cardona, L., Archetti, M., Lossani, F., Bosio, B. and Bove, D., "A Review of On-Board Carbon Capture and Storage Techniques: Solutions to the 2030 IMO Regulations," *Energies*, **16**, 6748(2023).
- Ahmed, Y. A., Lazakis, I. and Mallouppas, G., "Advancements and Challenges of Onboard Carbon Capture And Storage Technologies for the Maritime Industry: A Comprehensive Review," *Marine Systems and Ocean Technology*, **20**(1), 1-52(2025).
- He, T., Chong, Z. R., Zheng, J., Ju, Y. and Linga, P., "LNG Cold Energy Utilization: Prospects and Challenges," *Energy*, **170**, 557-568(2019).
- Kim, K. and Jeong, J., "LNG Fuel Gas Supply System (FGSS)," *J. Soc. Nav. Archit. Korea*, **50**(4), 40-43(2013).
- Kemper, J., Sutherland, L., Watt, J. and Santos, S., "Evaluation and Analysis of the Performance of Dehydration Units for CO₂ Capture," *Energy Procedia*, **63**, 7568-7584(2014).
- Burgass, R. and Chapoy, A., "Dehydration Requirements for CO₂ and Impure CO₂ for Ship Transport," *Fluid Phase Equilib*, **572**, 113830(2023).
- Delic, A. *et al.*, "Experimental Investigation of Solid Formation under CO₂ Liquefaction Conditions for Ship Transport at 7 and 16 Bar with Water Content up to 300 ppm," *Ind Eng Chem Res*, **64**, 887(2024).
- Seo, Y., Huh, C., Lee, S. and Chang, D., "Comparison of CO₂ Liquefaction Pressures for Ship-based Carbon Capture and Storage (CCS) Chain," *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **52**, 1-12(2016).
- Chen, F. and Morosuk, T., "Exergetic and Economic Evaluation of CO₂ Liquefaction Processes," *Energies* **14**, 7174(2021).
- He, S., Chang, H., Zhang, X., Shu, S. and Duan, C., "Working Fluid Selection for an Organic Rankine Cycle Utilizing High and Low Temperature Energy of an LNG Engine," *Appl. Therm. Eng.*, **90**, 579-589(2015).
- Sung, T. and Kim, K. C., "Thermodynamic Analysis of a Novel Dual-loop Organic Rankine Cycle for Engine Waste Heat and LNG Cold," *Appl. Therm. Eng.*, **100**, 1031-1041(2016).
- Tian, Z., Zeng, W., Gu, B., Zhang, Y. and Yuan, X., "Energy, Exergy, and Economic (3E) Analysis of An Organic Rankine Cycle Using

- Zeotropic Mixtures Based on Marine Engine Waste Heat and LNG Cold Energy," *Energy Convers Manag*, **228**, 113657(2021).
14. Shingan, B., Pandiyan, K. and Gupta, D. K., "Enhancing Energy Efficiency: Design and Simulation of Air Fractionation Unit Integrated Through LNG Cold Energy and Two-stage Organic Rankine Cycles," *Canadian Journal of Chemical Engineering*, **103**(5), 2018-2038(2024).
 15. He, T., Ma, H., Ma, J., Mao, N. and Liu, Z., "Effects of Cooling and Heating Sources Properties and Working Fluid Selection on Cryogenic Organic Rankine Cycle for LNG Cold Energy Utilization," *Energy Convers Manag*, **247**, 114706(2021).
 16. He, T., Ma, H., Ma, J., Mao, N. and Liu, Z., "Effects of Cooling and Heating Sources Properties and Working Fluid Selection on Cryogenic Organic Rankine Cycle for LNG Cold Energy Utilization," *Energy Convers Manag*, **247**, 114706(2021).
 17. Shingan, B. and Parthasarthy, V., "Recent Progress in Cold Utilization of Liquefied Natural Gas," *Chem Eng Technol*, **46**(9), 1823-1837(2023).
 18. Lee, S. W., Kwon, J. G., Kim, M. H. and Jo, H. J., "Cycle Analysis and Economic Evaluation for Seawater-LNG Organic Rankine Cycles," *Energy*, **234**, 121259(2021).
 19. Peng, D. Y. and Robinson, D. B., "A New Two-Constant Equation of State," *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, **15**(1), 59-64(1976).
 20. He, T., Ma, H., Ma, J., Mao, N. and Liu, Z., "Effects of Cooling and Heating Sources Properties and Working Fluid Selection on Cryogenic Organic Rankine Cycle for LNG Cold Energy Utilization," *Energy Convers Manag*, **247**, 114706(2021).
 21. Wang, S., Liu, C., Zhang, S., Li, Q. and Huo, E., "Multi-objective Optimization and Fluid Selection of Organic Rankine Cycle (ORC) System Based on Economic-environmental-sustainable Analysis," *Energy Convers Manag*, **254**, 115238(2022).
 22. Smith, C. *et al.*, "The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material Lead Authors: Contributing Authors".
 23. Lee, U., Kim, K. and Han, C., "Design and Optimization of Multi-component Organic Rankine Cycle Using Liquefied Natural Gas Cryogenic Exergy," *Energy*, **77**, 520-532(2014).
 24. Lee, Y., Kim, J., Ahmed, U., Kim, C. and Lee, Y. W., "Multi-objective Optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) Design Considering Exergy Efficiency and Inherent Safety for LNG Cold Energy Utilization," *J. Loss. Prev. Process Ind.*, **58**, 90-101(2019).
 25. Park, M., Gbadago, D. Q., Jung, H. and Hwang, S., "Achieving Optimal Energy Efficiency, Enhanced Exergy Performance, and Comprehensive Economic Analysis in Hydrogen Refrigeration Systems," *Energy*, **316**, 134541(2025).

Authors

Minkyung Jung: Researcher, Department of Chemical Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Republic of Korea; minkyung.jung@inha.edu

Sungwon Hwang: Professor, Department of Chemical Engineering, Inha University, Incheon, 22212, Republic of Korea; sungwon.hwang@inha.ac.kr