

LNG 냉열과 폐열 회수를 위한 다단 열사이클 설계

최용석 · 임태우[†]
한국해양대학교(교수)

Design of Multi-stage Thermal cycle for Recovery of LNG Cold Energy and Waste Heat

Yong-Seok CHOI · Tae-Woo LIM[†]
Korea Maritime and Ocean University(professor)

Abstract

In this study, a multi-stage thermal cycle was designed to recover the LNG cold energy and the waste heat from the LNG fuelled ship. In the low temperature cycle, the LNG cold energy was used as the heat sink and the jacket cooling water of the main engine was used as the heat source. And in the high temperature cycle, the LNG cold energy and the exhaust gas were used as the heat sink and the heat sources, respectively. Seven types of working fluids were used for constituting the multi-stage thermal cycle. The multi-stage thermal cycle was analyzed by calculating the net power, thermal efficiency, exergy efficiency, and cold thermal efficiency. It was found that the R152a-hexane combination had the highest net power of 626.3kW, thermal efficiency of 20.5%, exergy efficiency of 29.1% and cold thermal efficiency of 23.3%.

Key words : Cold energy, Efficiency, Exergy, LNG, Organic Rankine cycle

I. 서론

2020년 1월 1일부터 시행된 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)의 SOx 규제와 추후 시행될 선박에서 배출되는 온실가스 배출량 감소 규제에 따라서 LNG 추진선박의 관심이 높아지고 있다(Li et al., 2020; Deng et al., 2021). 특히, LNG 연료 추진 선박은 SOx 규제를 만족하는 것으로 나타났으나, CO₂는 일반 내연기관 대비 20% 감소되는 것으로 보고되었다. IMO는 선박에서 배출되는 온실가스를 2008년 대비 2050년까지 50%까지 감축하는 것을 목표로 하고

있다. 이를 위해서 선박을 건조 시 EEDI(Energy Efficiency Design Index)를 도입하여 EEDI를 충족하지 못 할 경우 운항을 금지하도록 하였다. EEDI는 신조선이 화물 1톤을 싣고 1마일을 항해하는데 발생하는 CO₂ 발생량으로 정의되며, 메인엔진과 발전기 등에서 사용한 연료 소비량을 기반으로 발생된 동력을 계산하고, 연료를 절감하기 위한 기술 및 추진 효율 향상 등의 기술이 적용되어 감소된 CO₂ 발생량을 계산한다(Attah and Bucknall, 2015).

결국 LNG 연료 추진 선박의 EEDI를 감소시키기 위해서는 기존의 화석연료가 아닌 다른 방법

[†] Corresponding author : 051-410-4256, kyunlim@kmou.ac.kr

* 이 논문은 2019학년도 한국해양대학교 학술연구지원사업 신진교수정착연구비 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2020R1G1A1010620).

으로 에너지원의 일부를 확보해야 된다. 따라서 LNG 냉열을 이용한 발전은 LNG 연료 추진 선박에서 EEDI를 감소시키기 위한 적절한 방법이다.

LNG(Liquefied Natural Gas)는 약 -161°C 의 비등점을 가지며, 운송의 용이성 등의 이유로 비등점 이하의 온도로 냉각시켜 액화된다. LNG는 산지에 따라서 조성이 다소 다르나, 대부분 메탄(CH_4) 성분으로 구성된다. 메탄은 상온의 기체상태에서 비등점 이하로 액화하기 위해서는 단위 질량 당 약 900kJ 이상의 에너지를 방출하여야 한다. 각종 손실 등을 고려하면 액화 장치를 통해서 소모되는 에너지는 메탄이 방출해야 하는 에너지 이상이 요구된다. 따라서 LNG는 저온 열침으로서 잠재적 일을 생산할 수 있는 유용성을 가진다(He et al., 2019). 하지만 현재까지는 LNG 연료 추진 선박에서 LNG의 냉열을 활용하는 시도는 육상에 비해서 활발하게 이루어지지 않고 있다. 육상에서는 LNG의 냉열을 이용한 발전뿐만 아니라, 극저온 유체를 이용하여 다양한 분야에서 활용하고 있다(Mehrpooya et al., 2015; He et al., 2018; Mehrpooya et al., 2017).

Lee(2019)는 LNG의 냉열을 활용하여 LNG 연료 추진 냉동운반선의 냉동시스템에 적용하여 기존의 냉동사이클을 대체하여 간접냉각 시스템을 구성하였다. Choi et al.(2018)은 LNG 연료 추진 선박의 LNG 냉열을 이용한 유기랭킨사이클의 성능을 분석하였다. 하지만 다른 연구들과 마찬가지로 LNG 연료 추진 선박의 소형엔진 조건에 맞추어 연구되었으며, 대형엔진 운항 조건에서 연구되지 못하였다. Sung and Kim(2016)은 소형 LNG 연료 추진 선박에서 냉열을 회수하기 위한 다단 사이클을 구성하였다. 그들의 연구에서 저온 사이클의 열원과 열침은 각각 자켓냉각수와 LNG의 냉열을 사용하였으며, 고온사이클에서는 열원과 열침을 각각 배기가스와 해수를 이용하였다.

Lim and Choi(2020)는 12S90ME-GI 엔진의 데이터를 기반으로 ORC 성능평가 및 열교환기의

최적 설계를 수행하였다. 본 연구는 Lim and Choi(2020)의 ORC의 성능평가 부분에 대한 후속 연구로서 LNG 냉열 활용에 적용할 수 있는 냉매를 추가하여 분석하였다. 다만 사이클에 적용할 수 있는 다양한 냉매를 선정하여 적용하였으며, 특히 엑서지 효율을 비롯하여 서로 다르게 정의된 여러 효율을 소개하였다. 엑서지는 이용 가능한 최대 잠재일을 나타내므로, 얼마나 효율적으로 에너지가 사용되는지를 확인할 수 있다. 따라서 본 연구를 통해서 실제 LNG 연료 추진 선박에서 LNG 냉열을 활용할 시, 그 효율을 확인할 수 있는 기초자료로 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

II. 시스템 모델링

1. 냉열회수 사이클

본 연구에서는 LNG 연료 추진 선박의 12S90ME-GI 엔진의 운영 데이터(Lim and Choi, 2020; Lim and Choi, 2020)를 토대로 냉열 회수 사이클을 설계하였으며, 사이클을 설계하기 위해서 사용한 주요 작동 조건과 추가적으로 가정한 조건은 <Table 1> 및 <Table 2>와 같이 정리하였다.

<Table 1> Operating conditions of 12S90ME-GI engine

Parameter	value
Pressure of LNG [MPa]	30
Inlet temperature of LNG [$^{\circ}\text{C}$]	-148.1
Mass flow rate of LNG [kg/s]	4
Inlet temperature of jacket cooling water [$^{\circ}\text{C}$]	85
Mass flow rate of exhaust gas [kg/s]	109.3
Inlet temperature of exhaust gas [$^{\circ}\text{C}$]	251

LNG 냉열과 폐열을 회수하기 위한 열사이클은 2단의 유기랭킨사이클(organic Rankine cycle, ORC)로 구성되며, 각 유기랭킨사이클은 펌프, 증

LNG 냉열과 폐열 회수를 위한 다단 열사이클 설계

발전기, 터빈 그리고 응축기로 구성된다. LNG의 냉열은 1차로 저온 유기랭킨사이클(LT-ORC)에서 회수되어 약 $-100 \sim 0^{\circ}\text{C}$ 의 온도로 2차로 고온 유기랭킨사이클(HT-ORC)에서 회수되어 NG는 최종으로 엔진에 공급될 수 있는 온도까지 상승된다.

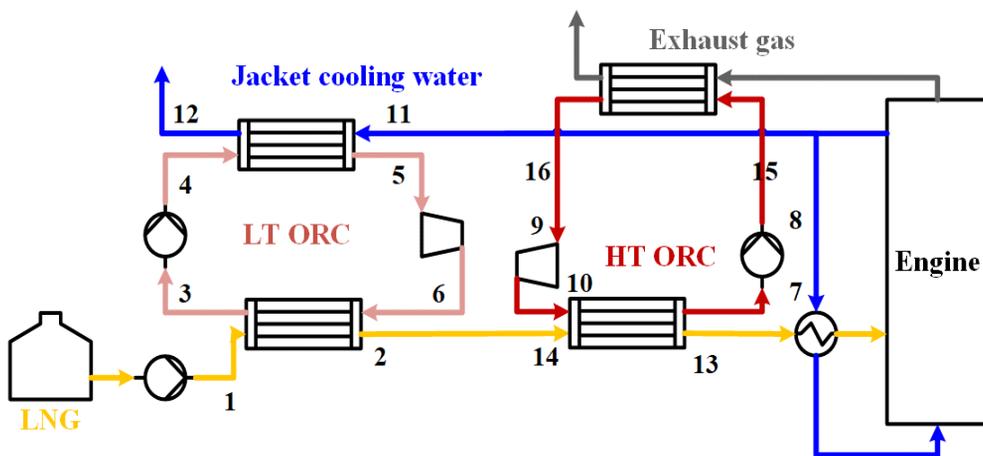
이때, 열원은 LT-ORC에서는 온도 약 85°C 자켓냉각수(jacket cooling water)가 사용되며, HT-ORC에서는 251°C 의 배기가스가 사용된다. LT-ORC와 HT-ORC의 조합으로 이루어진 다단 열사이클의 개략도는 [Fig. 1]에 나타내었다.

<Table 2> Initial conditions assumed for the ORC system

Parameter	value
Condensing temperature of LT-ORC [$^{\circ}\text{C}$]	-100~0
Condensing temperature of HT-ORC [$^{\circ}\text{C}$]	10
Evaporation temperature of LT-ORC [$^{\circ}\text{C}$]	50
Evaporation temperature of HT-ORC [$^{\circ}\text{C}$]	120
Pinch point temperature difference of heat exchanger [$^{\circ}\text{C}$]	5
pump isentropic efficiency [%]	80
Turbine isentropic efficiency [%]	80

<Table 3> Properties of the working fluids

Cycle	Working fluid	Boiling temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Critical temperature [$^{\circ}\text{C}$]	Critical Pressure [MPa]	GWP	ASHRAE safety group
LT-ORC	R152a	-24.02	113.26	4.5168	124	A2
	R134a	-26.07	101.06	4.0593	1430	A1
	R245fa	15.14	154.01	3.6510	1030	A1
	propane	-42.114	96.74	4.2512	n/a	n/a
HT-ORC	R245fa	15.14	154.01	3.6510	1030	A1
	R123	27.82	183.68	3.6618	77	B1
	HFE 7000 (RE347mcc)	34.20	164.55	2.4762	370	n/a
	hexane	68.71	234.67	3.0340	n/a	n/a



[Fig. 1] Schematic of the multi-stage ORC system.

사이클을 구성하기 위해서 시스템은 정상상태로 가정하였으며, 작동유체의 물성치의 경우 LNG는 순수 메탄 (CH₄), 배기가스는 공기로 가정하였다. 그리고 시스템 내에서의 압력강하 및 열손실은 무시하였다.

일반적으로 폐열 회수를 위한 사이클을 설계할 때 열원에서 확보할 수 있는 열량을 기준으로 작동유체의 유량과 열침에서의 열량을 산정하지만 (Lim and Lee, 2018), 본 연구의 경우 LNG의 냉열을 회수하는 것을 1차 목표로 하므로 LNG의 냉열에서 열침으로 사용할 수 있는 열량을 기준으로 작동유체의 유량을 역으로 산정하였다. 만약, 열원에서 확보할 수 있는 열량을 모두 사용하여 사이클을 설계할 경우, NG의 출구온도는 엔진에서 사용할 수 있는 온도 이상으로 증가하게 된다.

작동유체는 LT-ORC와 HT-ORC의 운전조건을 고려하여 <Table 3>과 같이 선정하였으며, 작동유체의 물성치는 NIST의 REFPROP 9.1을 사용하였다. 사이클 설계 및 분석은 MATLAB 2018을 이용하였다. GWP(global warming potential)는 지구온난화지수로서 유럽연합은 F-gas Regulation을 적용하여 GWP 2,500 이상 HFC 냉매 사용을 금하고 있다. ASHRAE safety group에서 A는 낮은 독성 B는 높은 독성을 의미하며, 숫자는 인화성을 나타낸다. A1은 낮은 독성과 인화성이 없음, A2는 낮은 독성과 낮은 인화성 그리고 A3는 낮은 독성과 높은 인화성을 나타낸다.

2. 에너지 및 엑서지 해석

일반적으로 폐열 회수 열사이클의 성능을 평가하기 위해서는 식 (1)과 같이 정의되는 열효율 (η_{th})을 사용한다.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{evap}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 W_{net} 은 정미 출력으로서 식 (2)와 같이

계산되며, Q_{evap} 는 증발기에서 얻어지는 열량을 의미한다.

$$W_{net} = W_{turbine} - W_{pump} \dots\dots\dots (2)$$

엑서지는 이용 가능한 최대 잠재일을 의미하며, 엑서지 효율(exergy efficiency)은 식 (1)과 같이 정의한 열효율과 비교하여 제 2법칙 효율 (the second law efficiency)라고도 불린다. 엑서지 효율은 에너지 변환의 측면에서 열침과 열원에서의 에너지를 효과적으로 회수할 수 있는 정도를 의미한다. 운동 엑서지와 위치 엑서지를 무시할 수 있을 때, 비 엑서지 (specific exergy, ex)와 엑서지 유량 (exergy flow rate, Ex)는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$ex = h - h_0 - T_0(S - S_0) \dots\dots\dots (3)$$

$$Ex = \dot{m} \times ex \dots\dots\dots (4)$$

하첨자 0는 사장상태 (dead state, 25°C, 1atm)에서의 상태량을 의미하며, h 는 엔탈피, T 는 온도, S 는 엔트로피 그리고 \dot{m} 은 질량유량을 뜻한다.

열침(heat sink)과 열원(heat source)의 엑서지 유량은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$Ex_{heat\ sink} = Ex_{heat\ sink, in} - Ex_{heat\ sink, out} \dots\dots\dots (5)$$

$$Ex_{heat\ source} = Ex_{heat\ source, in} - Ex_{heat\ source, out} \dots\dots\dots (6)$$

엑서지 효율 η_{ex} 은 다음 식과 같이 계산된다.

$$\eta_{ex} = \frac{W_{net}}{Ex_{total}} = \frac{W_{net}}{Ex_{heat\ sink} + Ex_{heat\ source}} \dots\dots\dots (7)$$

냉열효율(η_{cth})은 열효율과 비교하여 증발기에서 얻어지는 열량이 아니라, 응축기에서 방출하는 열량 즉, 회수하는 LNG의 냉열에 대한 정미 출력의 비로서 식 (8)과 같이 정의된다.

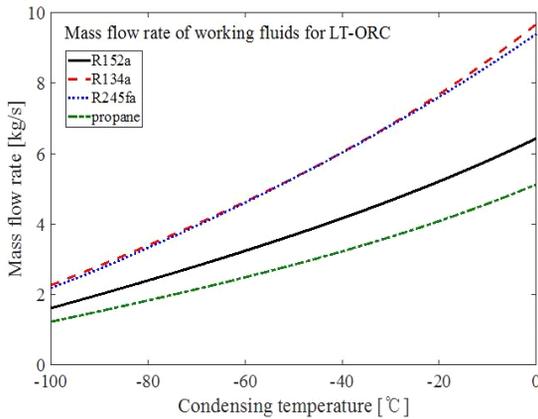
$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{cond}} \dots\dots\dots (8)$$

III. 결과 및 고찰

본 연구에서 설계한 다단 열사이클은 LNG의 냉열 회수를 1차 목표로 하므로 식 (9)와 같이 열침인 LNG의 냉열 회수 열량을 기준으로 작동유체의 질량유량을 결정하였다.

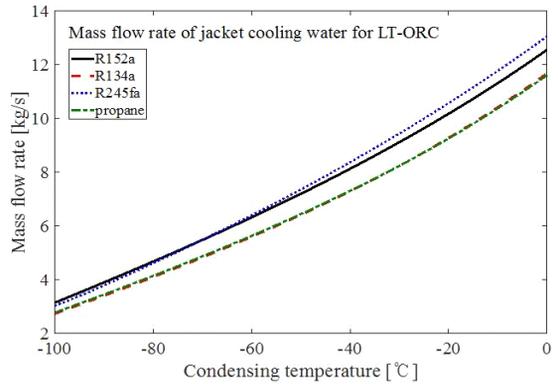
$$Q_{cond} = \dot{m}_{LT}(h_6 - h_3) = \dot{m}_{LNG}(h_2 - h_1) \dots\dots\dots (9)$$

LT-ORC의 작동유체 유량이 결정되면 앞서 가정한 핀치 포인트 온도차(Yu et al., 2015; Kim et al., 2015)를 이용하여 열원인 자켓냉각수의 유량과 출구온도를 결정하였다. 이와 유사하게 HT-ORC의 작동유체 유량이 결정되면 열원인 배기가스의 출구온도를 결정하였다. 배기가스의 경우 선박에서 발생하는 배기가스의 유량을 모두 사용할 수 있도록 하였다.



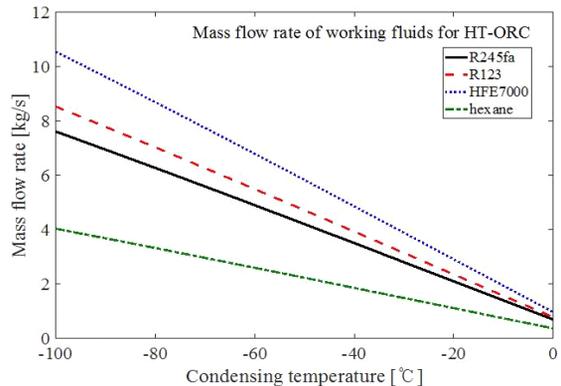
[Fig. 2] Variation in the mass flow rate of the working fluid of LT-ORC with the condensing temperature of LT-ORC.

[Fig. 2]는 작동유체 별 LT-ORC의 질량유량을 나타낸 것이다. LNG의 냉열을 1차 회수하기 위한 질량유량은 R134a, R245fa, R152a, propane 순으로 크게 나타났다. 그리고 LT-ORC의 응축온도가 증가할수록 작동유체의 질량유량 또한 증가하는데, 이것은 LT-ORC의 응축온도가 증가할수록 회수하는 LNG의 열량이 증가함을 의미한다.

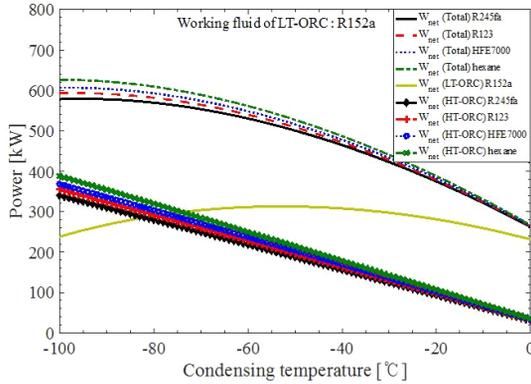


[Fig. 3] Variation in the mass flow rate of the jacket cooling water with the condensing temperature of LT-ORC.

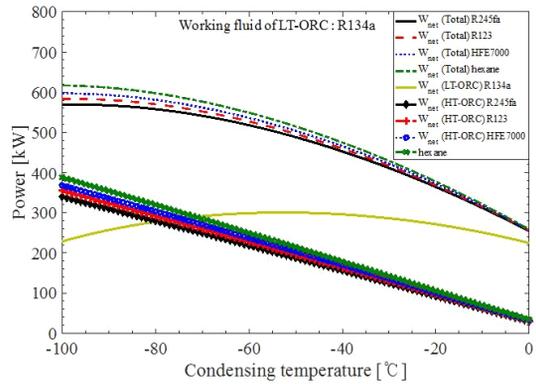
[Fig. 3]은 LT-ORC의 열원인 자켓냉각수의 질량유량을 나타낸 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 LT-ORC의 응축온도가 증가할수록 작동유체의 질량유량이 증가하며, 따라서 자켓냉각수의 질량유량도 증가한다. [Fig. 4]는 LT-ORC의 응축온도 변화에 따른 HT-ORC의 작동유체의 질량유량을 나타낸 것이다. 응축온도가 증가할수록 HT-ORC의 작동유체의 질량유량은 선형적으로 감소한다. 이것은 LT-ORC에서 회수하는 LNG 냉열이 증가하면 상대적으로 HT-ORC에서 회수할 수 있는 냉열이 감소하기 때문이다.



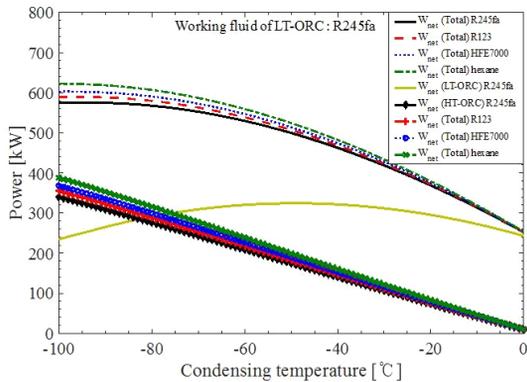
[Fig. 4] Variation in the mass flow rate of the working fluid of HT-ORC with the condensing temperature of LT-ORC.



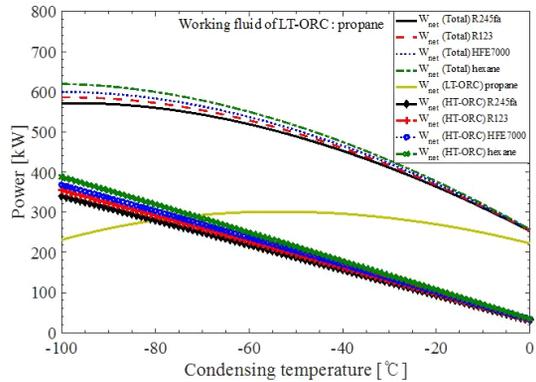
(a) Working fluid of LT-ORC : R152a.



(b) Working fluid of LT-ORC : R134a.



(c) Working fluid of LT-ORC : R245fa.



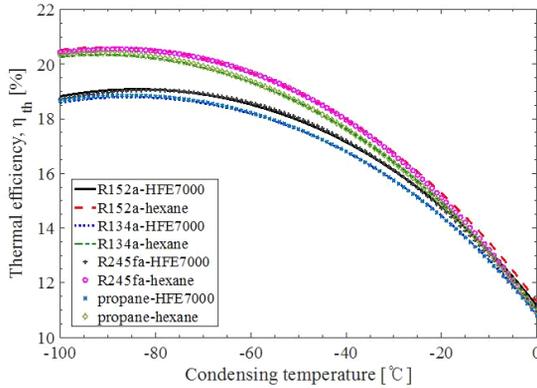
(d) Working fluid of LT-ORC : propane.

[Fig. 5] Variation in the net power with the condensing temperature of LT-ORC for different working fluid.

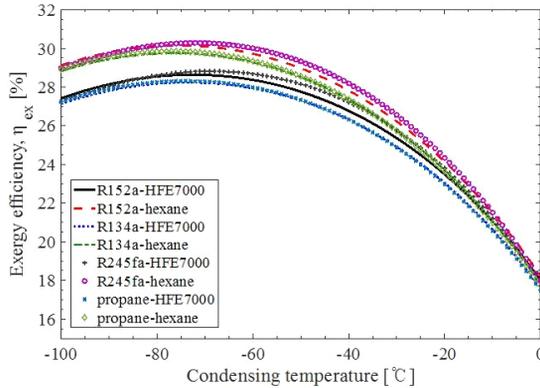
[Fig. 5]는 냉매별 정미 출력을 나타낸 것이다. LT-ORC의 냉매를 고정하고 HT-ORC의 냉매를 변경하며 정미 출력 변화를 확인하였으며, 사이클 전체 정미 출력, $W_{net}(Total)$ 과 LT-ORC의 정미 출력, $W_{net}(LT-ORC)$ 그리고 HT-ORC의 정미 출력, $W_{net}(HT-ORC)$ 을 각각 나타내었다. LT-ORC의 경우 LT-ORC의 응축온도 $-60 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 범위에서 가장 높은 출력이 나타났으며, 응축온도의 변화에 따른 출력의 변화는 HT-ORC의 경우와 비교해서 상대적으로 크지 않다. 반면에 LT-ORC의 응축온도가 증가함에 따라서 HT-ORC의 정미 출력은 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 전체 정미 출력은 LT-ORC에 비해서 HT-ORC에 상대적으로 크게 의존하며, 낮은

LT-ORC의 응축온도에서 높은 전체 정미 출력이 나타났다. LT-ORC의 응축온도가 증가할수록 LT-ORC에서 충분한 LNG의 냉열 회수가 이루어지므로 HT-ORC에서는 정미 출력은 감소한다.

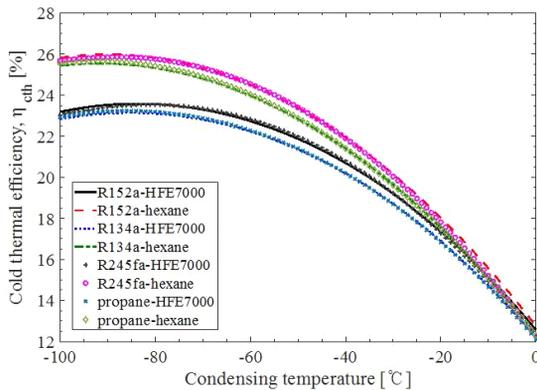
[Fig. 6] ~ [Fig. 8]은 각각 열효율, 엑서지 효율, 냉열효율을 나타낸 것이다. 열효율과 냉열효율의 경우 대체로 낮은 응축온도 $-100 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 에서 가장 높게 나타났으며, 엑서지 효율의 경우 $-70 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 범위에서 가장 높게 나타났다. 따라서 이 범위에서 LNG 냉열과 폐열을 회수하여 유용한 에너지 형태로 변환하는 효율이 높다고 판단할 수 있다. 전체적인 경향은 응축온도가 증가할수록 각 효율은 감소하였다. 이것은 식 (1), (7), (8)에서 정의한 것과 같이 각 효율은 정미 출력에



[Fig. 6] Variation in the thermal efficiency with the condensing temperature of LT-ORC.



[Fig. 7] Variation in the exergy efficiency with the condensing temperature of LT-ORC.



[Fig. 8] Variation in the cold thermal efficiency with the condensing temperature of LT-ORC.

관한 함수이므로 정미 출력은 응축온도의 증가에 따라서 감소하므로 효율 역시 유사한 경향으로 나타났다. 앞서 분석한 바와 같이 출력과 효율은 낮은 LT-ORC 응축온도에서 높게 나타났다. 본 연구에서 열사이클을 설계하기 위해 사용한 조건 하에서 가장 높은 출력이 발생할 때 각종 효율, 응축온도 그리고 NG의 출구온도를 <Table. 4>와 같이 정리하였다. HT-ORC의 작동유체로서 hexane와 HFE7000을 사용하였을 경우 가장 높은 출력이 나타났으며, LT-ORC의 경우 R152a와 R245fa에서 가장 높은 출력이 나타났다. 효율과 출력 측면에서 R152a-hexane 조합이 가장 우수한 것으로 나타났다. 열사이클을 지난 최종 NG의 온도 (T_{13})는 LT-ORC의 작동유체의 종류보다는 HT-ORC의 작동유체의 종류에 따라서 다르게 나타났으며, HFE7000은 약 45°C, hexane은 약 31°C, R245fa는 약 19°C 그리고 R123은 약 17°C이다. 엔진에 투입되는 가스연료의 온도가 $\pm 45^\circ\text{C}$ 임을 감안하면, HFE7000을 제외하고는 다른 작동유체를 사용할 경우 가스연료의 추가적인 온도상승이 필요하거나, HT-ORC의 응축온도를 증가시킴으로 NG의 출구온도를 증가시킬 필요가 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 LNG 연료 추진 선박의 냉열과 폐열을 효과적으로 회수할 수 있는 다단 열사이클을 구성하였으며, 시뮬레이션을 통하여 여러 작동유체에 대해서 정미 출력, 열효율, 엑서지 효율, 냉열효율 등을 분석하였다. 그리고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LNG의 냉열을 회수하기 위한 다단 열사이클의 정미 출력은 고온 사이클의 정미 출력에 상대적으로 많은 영향을 받으며, 고온 사이클의 정미 출력은 저온 사이클의 응축온도, 즉 고온 사이클의 열침 입구 온도에 크게 의존한다.

<Table 4> Thermodynamic results of the multi-stage thermal cycle.

Working fluid of LT-ORC	Working fluid of HT-ORC	Total net work output	Thermal efficiency	Exergy efficiency	Cold thermal efficiency	Condensing temperature	NG Outlet temperature
R152a	R245fa	579.1	20.4	28.4	25.6	-98	19.0
	R123	593.4	21.0	29.1	26.6	-97	16.9
	HFE7000 (RE347mcc)	606.5	18.9	27.6	23.3	-98	44.8
	hexane	626.3	20.5	29.1	25.8	-100	31.2
R134a	R245fa	569.2	20.1	27.9	25.1	-97	19.2
	R123	583.7	20.7	28.7	26.1	-98	17.0
	HFE7000 (RE347mcc)	597.0	18.6	27.1	22.8	-100	45.5
	hexane	616.9	20.3	28.8	25.4	-100	31.2
R245fa	R245fa	575.5	20.3	28.3	25.5	-95	19.0
	R123	589.8	20.9	28.9	26.4	-97	16.9
	HFE7000 (RE347mcc)	602.9	18.8	27.5	23.1	-98	44.8
	hexane	622.7	20.4	29.0	25.7	-100	31.2
propane	R245fa	571.7	20.2	28.0	25.3	-97	19.2
	R123	586.2	20.8	28.8	26.2	-98	17.0
	HFE7000 (RE347mcc)	599.5	18.6	27.2	22.9	-100	45.5
	hexane	619.5	20.3	28.9	25.5	-100	31.2

2. 다단 사이클에서 저온 사이클의 응축온도를 낮게 설정하는 것이 전체 정미 출력과 효율 측면에서 유리하게 나타났다. 열효율과 냉열효율은 저온 사이클의 응축온도 $-100 \sim -80^{\circ}\text{C}$ 범위에서 가장 높게 나타났으며, 엑서지 효율의 경우 $-70 \sim -50^{\circ}\text{C}$ 범위에서 가장 높게 나타났다.

3. 본 연구에서 선정한 작동유체 중 저온 사이클의 작동유체로서 R152a와 고온 사이클의 작동유체로서 hexane를 조합한 경우 정미 출력 626.3kW, 열효율 20.5%, 엑서지 효율 29.1% 그리고 냉열효율 23.3%로 가장 우수한 것으로 나타났다.

4. 추후의 연구에서는 본 연구 결과를 기초자료로 활용하여 LNG 냉열 회수 사이클의 열교환기의 설계 및 수치해석 그리고 엑서지 기반 경제성 평가 등의 연구를 진행하고자 한다.

References

Attah EE and Bucknall R(2015). An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI. Ocean Eng. 110, 62~74.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.09.040>

Choi YS, Lee YH, Kang HK and Lim TW(2018). Performance analysis of the organic Rankine cycle using LNG cold energy in LNG-fueled ships, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 42(7), 524~530.
<https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.7.524>

Deng J, Wang X, Wei Z, Wang C and Chen Z(2021). A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marinediesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels. Sci. Total Environ. 766, 144319.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144319>

He T, Chong ZR, Zheng J, Ju Y and Linga P(2019). LNG cold energy utilization: Prospects and

- challenges, *Energy* 170(1), 557~568.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>
- He T, Nair SK, Babu P, Linga P and Karimi IA(2018). A novel conceptual design of hydrate based desalination (HyDesal) process by utilizing LNG cold energy. *Appl. Energy* 222(15), 13~24.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.006>
- Kim KY, Jung YG and Park SH(2015). Characteristics of Thermodynamic Performance of Heat Exchanger in Organic Rankine Cycle Depending on Pinch Temperature Difference, *Trans. Korean Hydrog. New Energy Soc.* 26(6), 590~599.
<https://doi.org/10.7316/KHNES.2015.26.6.590>
- Lee YH(2019). Study on Refrigeration and Power Generation System for LNG Fuelled Refrigerated Cargo Carrier using LNG Cold Energy, M.S. thesis, Korea Maritime and Ocean University.
- Li K, Wu M, Gu X, Yuen KF and Xiao Y(2020). Determinants of ship operators' options for compliance with IMO 2020. *Transp Res D Transp Environ* 86, 102459.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102459>
- Lim TW and Choi YS(2020). Heat Exchanger Design of an Organic Rankine Cycle for the Recovery of LNG Cold Energy with Jacket Cooling Water as Heat Source, *JFMSE*, 32(6), 935~943.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.8.32.4.935>
- Lim TW and Choi YS(2020). Thermal design and performance evaluation of a shell-and-tube heat exchanger using LNG cold energy in LNG fuelled ship, *Appl. Therm. Eng.* 171(5), 115120.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115120>
- Lim TW and Lee CK(2018). Thermodynamic Analysis of ORC to Recover waste Heat of Jacket Cooling Water in Diesel Engine, *JFMSE*, 30(3), 1032~1039.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.06.30.3.1032>
- Mehrpooya M, Esfilar R and Moosavian SMA(2017). Introducing a novel air separation process based on cold energy recovery of LNG integrated with coal gasification, transcritical carbon dioxide power cycle and cryogenic CO₂ capture, *J. Clean. Prod.* 142, 1749~1764.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.112>
- Mehrpooya M, Sharifzadeh MMM and Rosen M(2015). Optimum design and exergy analysis of a novel cryogenic air separation process with LNG (liquefied natural gas) cold energy utilization, *Energy* 90, 2047~2069.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.101>
- Sung T and Kim KC(2016). Thermodynamic analysis of a novel dual-loop organic Rankine cycle for engine waste heat and LNG cold, *Appl. Therm. Eng.* 100(5), 1031~1041.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.02.102>
- Yu H, Feng X and Wang Y(2015). A new pinch based method for simultaneous selection of working fluid and operating conditions in an ORC (Organic Rankine Cycle) recovering waste heat, *Energy*, 90, 36~46.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.059>

-
- Received : 09 February, 2021
 - Revised : 17 March, 2021
 - Accepted : 25 March, 2021