

선박메인엔진 냉각수를 활용한 선박폐열발전-담수화 시스템 성능평가 시뮬레이션

임승택¹ · 김현주² · 문정현³ · 이호생[†]

(Received July 8, 2019 ; Revised September 25, 2019 ; Accepted October 19, 2019)

Performance simulation of a waste heat recovery - Desalination system using jacket cooling water from a ship main engine

Seung-Taek Lim¹ · Hyeon-Ju Kim² · Jung-Hyeon Moon³ · Ho-Seang Lee[†]

요약: 국제적 해양 환경문제와 선박유의 가격상승으로 고효율 선박의 수요가 증가하고 있으며, 선박에서 발생하는 폐열을 활용한 발전 방식의 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 58MW급 선박의 엔진 냉각수를 활용하여 ORC를 기반으로 한 폐열발전을 시뮬레이션을 통해 설계하였으며, 폐열발전을 통과한 80℃의 냉각수를 활용한 담수화 설비의 담수생산량을 비교하였다. 선박폐열발전의 작동유체의 선정에 위한 다양한 냉매를 적용하여 발전출력과 열전달 성능을 비교하였으며, 저 GWP 냉매를 적용하기 위하여 신냉매의 성능을 비교하였다. 다양한 선종의 엔진타입과 냉각수 유량을 적용하여 선박폐열발전의 출력과 바다로 배출되는 폐열 발생을 비교하였으며, 엔진 냉각수 온도가 80℃, 85℃, 90℃로 공급될 때 발전 출력과 폐열량을 비교하였다. 또한, 선박 담수화 설비의 증발압력의 변화에 따른 담수 생산량과 증발 온도를 비교하여 선박폐열발전-담수화 시스템의 최적 운전조건을 도출하였다. 10S90ME의 58MW급 선박의 90℃ 열원을 활용한 폐열발전-담수화 시스템은 R245fa 작동유체를 적용하여 564.4kW의 순수 발전출력과 1.278kg/s의 담수생산량을 확인하였으며, 기존 폐열 발생량 대비 35%의 감소량을 확인하였다.

주제어: 선박폐열발전, 엔진 냉각수, 조수기, 해수담수화

Abstract: The demand for high efficiency vessels is increasing due to the problems of international marine environments and rising ship oil prices. As a result, research on power generation methods that utilize waste heat from ships has begun. In this study, organic Rankine cycle (ORC)-based waste heat power is designed using engine cooling water of a 58MW ship and is compared through simulation with the desalination capacity of a desalination plant that uses cooling water of 80 °C passed through a waste heat power. The power output and heat transfer performance are assessed by applying various refrigerants to select the working fluid for ship waste heat recovery, and then the performances of new refrigerants are compared to identify one with a low global warming potential. The study also compared the output of a ship waste heat recovery system with generated waste heat discharged to the sea by applying various types of engine types and cooling water flow rates. The power output and thermal power are compared when engine coolant is supplied at temperatures of 80 °C, 85 °C, and 90 °C. Finally, the optimal operating conditions of the ship waste heat-desalination system are determined by comparing the evaporation temperature and fresh water production rate based on the evaporation pressure of the ship desalination plant. The waste heat recovery-desalination system using a 90 °C heat source from the 10S90ME 58MW ship confirmed a pure water output of 564.4 kW and fresh water production of 1.278 kg/s when the R245fa working fluid was applied, and a reduction of 35%.

Keywords: Waste heat recovery system, Jacket cooling water, Fresh water generator, Desalination

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3042-5889>): Senior Researcher, Seawater Energy Plant Research Center (SEPRC), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, 32, Yuseong-daero 1312beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea, E-mail: hslee@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5021

1 Researcher, Seawater Energy Plant Research Center (SEPRC), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: limst@kriso.re.kr, Tel: 033-630-5023

2 Senior Researcher, Offshore Plant Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Goseong-gun, Daejeon, Korea E-mail: hyeonju@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3700

3 Researcher, Seawater Energy Plant Research Center (SEPRC), Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, E-mail: moonjh@kriso.re.kr, Tel: 042-866-3677

1. 서론

최근 IMO(International Maritime Organization)에서는 해양 환경 오염의 이유로 기존 선박유(Heavy Fuel Oil)의 사용이 제한되고 있으며, 일부해역에서는 디젤유와 같은 고비용, 친환경 선박연료의 사용이 증가하고 있다. 뿐만 아니라 좀 더 환경적인 LNG를 연료로 사용하는 선박의 건조도 증가하는 추세이다. 따라서 선박회사들은 높아진 운항 비용을 감소하고자 고효율 메인엔진의 개발 또는 에너지를 재활용하는 기술의 도입을 추진하고 있다.

기존 선박 메인엔진의 냉각수열을 조수기 열원으로 활용한 담수화 방식은 담수 생산량이 많으나 대부분의 열이 해수로 배출되며, 이를 대체하기 위한 방안으로서 냉각수를 활용하여 폐열발전 열원으로 사용하는 경우 선용 청수의 생산이 제한되어 보조 담수화 설비가 요구 된다. 이와 같이 발전과 담수의 최적 생산 비율의 선정이 필요하며 적용 가능성이 높은 발전-담수 복합시스템의 개발이 필요하다.

기존 조수기(Fresh Water Generator)의 담수 생산량은 선박의 규격에 따라 다소 차이가 있으나 일일 약 30톤 규모 가량이며, 선박에 근무하는 승무원의 평균 물 소비량은 일일 500리터 이하이다. 최대 20명의 승무원을 포함하는 선박의 일일 담수소비량은 작업 용수와 보일러 공급수를 고려해도 20톤 미만으로 예상된다. 뿐만 아니라 선박에서 식수로 이용하는 청수는 대부분 육상에서 공급하여 저장하므로 담수사용량은 감소할 것으로 예상된다. 반면 컨테이너 선박의 대형화에 따라 10S90ME급 이상의 대용량 메인엔진이 개발 및 운전되고 있으며, 이와 같은 메인엔진은 대량의 냉각수를 사용하므로 소요되는 담수와 비교하여 대량의 담수 생산이 가능하게 되었다[1].

선박의 승무 인원은 선박개발과 함께 감소되어 현재 IMO에서는 만톤 이상의 선박에서는 최소인원을 15명으로 제한되어 있다[2]. 따라서 메인엔진의 냉각수 폐열을 활용한 담수 생산은 생산량의 기준에서 벗어나 효율 가치가 높은 전력 생산으로의 대체가 필요할 것으로 예상된다.

운항 중 대형 컨테이너선박의 전력 사용량은 평균 약 2,000kW 이며, 경유를 연료로 사용할 경우 일일 약 14.5m³에 달한다. 또한, 발전과 메인엔진 동력에 소요되는 연료의 약 40%는 폐열의 형태로 외부로 방출되어 폐열의 활용과 전력량 감소가 절실하다[3]. Figure 1은 선박 연료의 에너지 활용과 폐열 발생을 나타내며, 약 5.2%의 연료가 메인엔진 냉각 후 배출되고 있다.

선박 냉각수를 활용한 폐열 발전은 이미 Min-Hsiung Yang 등에 의해서 작동유체별 활용 방안에 대한 연구가 진행되어 왔으며, 본 연구에서는 폐열발전-담수화 시스템을 통해 좀 더 선박의 활용성을 높이고 기존 담수생산방식과의 영향을 평가하고자 한다[4].

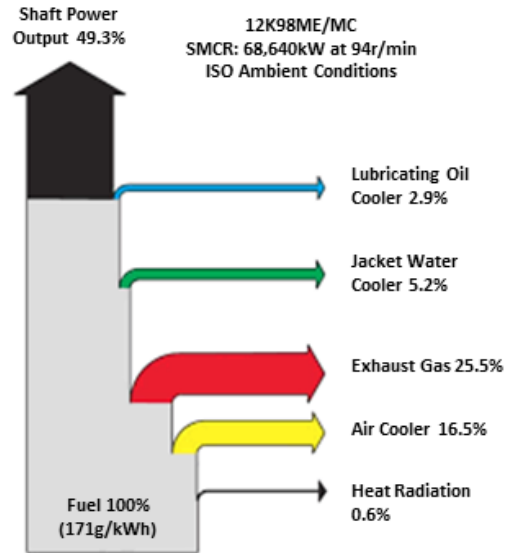


Figure 1: Heat balance diagram for MAN 12K98ME/MC marine diesel engine operating at 100 SMCR under ISO conditions [5]

2. 선박폐열발전-담수화 설계 방안

2.1 선박 폐열 발생량

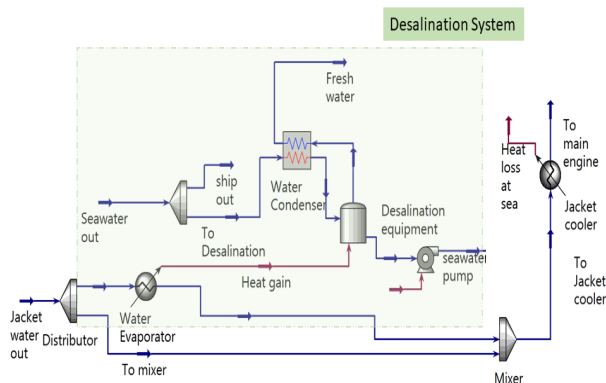
선박의 대형화가 진행됨에 따라 메인엔진의 규모도 지속적으로 증가하였으며, 최근 14,500TEU급 컨테이너 선박의 경우 10S90ME 규모의 메인엔진이 적용되어 58MW급 추진력을 보이고 있다. 이때 메인엔진 냉각 이후 발생하는 냉각수(Jacket cooling water)는 최대 90℃에 달하며, 순환하는 유량은 490m³/h에 달한다. 메인엔진 냉각수는 조수기를 이용한 담수화를 통해 미활용열이 일부 재활용되나 메인엔진 출력이 증가할수록 재활용열 대비 버려지는 폐열이 증가하게 된다.

메인엔진의 유형은 총 다섯 종류를 적용하였으며, 320,000dwt급 VLCCs 유조선박에 적용된 6S90ME급 엔진부터 14,500TEU 컨테이너 선박에서 사용되는 10S90ME급 엔진까지 기통이 증가에 따른 냉각수 유량을 적용하였다. Table 1은 메인엔진의 기통변화에 따른 출력 및 냉각수 유량을 나타낸다.

선박의 냉각수는 메인엔진의 연소로 인한 과열을 방지하기 위하여 표면을 냉각 및 순환하며, 80℃에서 최대 90℃까지 온도를 유지한다. 최대 온도가 상승함에 따라 순환되는 냉각수의 유량은 감소하나 일반적으로 90℃를 초과하는 온도에서는 메인엔진의 마모를 유발하며, 스케일 발생이 증가하게 된다. 반면, 공급되는 냉각수 온도가 60℃ 이하로 내려갈 경우 열 충격 현상이 발생하여 메인엔진에 손상을 일으키므로 60℃에서 90℃까지 약 30℃의 온도차만큼 열을 제거할 필요가 있다.

Table 1: Engine power and Jacket cooling water flow rate according to Engine type

Engine Type	Power [MW]	Speed [rpm/min]	Exh. Gas [kg/s]	Jacket water flow [m ³ /h]	Jacket temp' (MAX)[°C]	Heat dissipation [kW]	Ship Model
6S90ME	34.9	84	78	260	80 (90)	4890	Oil Tanker (ULCC:300,000DWT)
7S90ME	40.7	84	91	300		5710	
8S90ME	46.5	84	104	350		6520	Container Ship (12,000TEU)
9S90ME	52.3	84	117	390		7340	
10S90ME	58.1	84	130	490		9130	

**Figure 2:** Current ship waste heat utilization model and cooling system

본 연구에서는 현재 국제 선박에서 적용되고 있는 메인엔진의 용량과 냉각수의 온도 변화에 따라 선박폐열 발전-담수화 설비의 성능과 해수로 배출되는 폐열량을 비교하였다.

2.2 선박 폐열 발전-담수 사이클

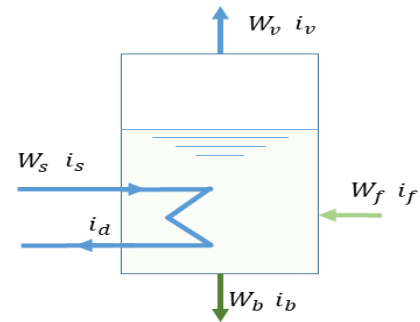
현재 선박에서 이용되는 담수화 장치는 **Figure 2**와 같이 약 90℃의 메인엔진 냉각수의 일부 또는 전체 유량을 공급받아 75℃의 상대적 고온으로 배출되며 냉각기(Jacket water cooler)를 통과 후 60℃로 공급된다. 대부분의 냉각수 폐열을 담수화에 활용가능하나 선박 사용량에 비교하여 다량의 담수가 생산되어 현재는 약 30~40m³/day로 담수를 생산하고 있다. 이때 소요되는 냉각수 유량은 총 50m³/h이며, 담수화를 위해 공급되는 해수는 약 5m³/h이다.

적용된 침관형 담수화 장치의 작동원리는 가열관을 증발기 내에 넣어 해수를 가열 증발시켜, 발생증기를 증류기에 공급 후 냉각 및 응축시키는 것이며, 증발기 내부의 압력은 진공식을 적용하였다[6].

침관형의 열평형식은 식 (1)과 같으며, 증기발생율은 식 (2)와 같다. **Figure 3**는 침관식 증발 담수화의 증발 원리를 나타낸다.

$$W_{s,in}i_{s,in} + W_{t_f}C_f = W_{s,in}i_{s,out} + W_{t_b}C_b + W_v i_v \quad (1)$$

$$Steam\ economy = \frac{W_v}{W_s} \quad (2)$$

**Figure 3:** Inner-tube evaporative desalination principle [6]

여기서 W_s 는 가열증기량, W_f 는 급수(Feed water)량, W_b 는 브라인수(Brine water)의 유량, W_v 는 발생증기량을 나타내며, t_f 와 t_b 는 가열기 입구급수온도와 브라인수 온도를 나타낸다. 또한, i_s 와 i_d 는 증기의 엔탈피와 배출수(Drain water) 엔탈피를 나타내며, C_f 와 C_b 는 급수 및 브라인수의 비열을 나타낸다.

반면 선박폐열발전-담수화 시스템의 성능을 비교하기 위하여 현재 대양에서 운항하고 있는 선박의 메인엔진 용량에 따른 냉각수 활용 ORC(Organic Rankine Cycle) 발전을 적용하여 전력을 생산하고 ORC 발전 이후 배출된 냉각수와 ORC 발전의 응축 열원으로 활용한 해수를 활용하여 저압 증발식 담수화를 통한 생산 사이클을 설계하였다.

선박폐열발전-담수화 시스템은 **Figure 4**와 같이 냉각수를 ORC 발전의 열원으로 활용하여 10℃의 온도변화가 발생하며, 80℃의 냉각수가 저압 담수화 장치로 공급되어 65℃로 배출되도록 설계하였다. 현재 국내외 해양을 순항하는 선박의 메인엔진 냉각수는 약 80℃~95℃로 유지하며, 메인엔진에 공급되는 에너지의 약 5%는 냉각수를 해수로 열교환하는데 사용된다. 따라서 스팀을 이용한 SRC(Steam Rankine Cycle)를 이용하기에는 온도가 매우 낮다[7]. 열원의 온도는 발전의 방식과 효율에 영향을 미치며, 메인엔진 냉각수는 운항방식과 유형에 따라 80℃, 85℃, 90℃로 다양하게 적용된다. 최근 선박 저온부식의 발생 증가로 냉각수 시스템 개선 전에는 냉각수 제어온도를 80℃, 흡입구 압력을 3.5~4.5bar 적용하였으나, 추후 저온부식 대응책으로 2012년에 온도를 90℃로 변경하고 끓는점을 높이기 위해서

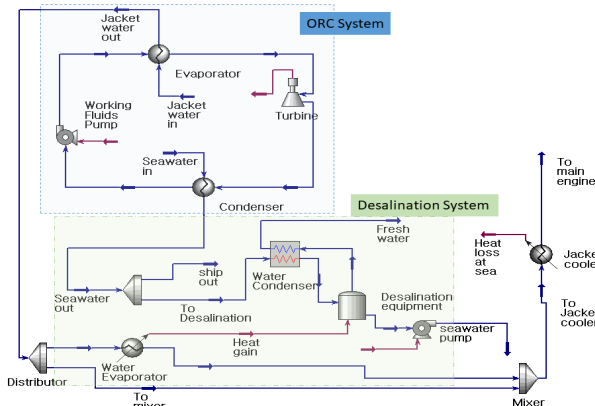


Figure 4: Ship wasted heat recovery-desalination Model and Cooling System

압력을 4.0-5.0bar 증가시켰다[8]. 저압 증발을 위한 담수화 설비의 내부 압력은 60℃의 물의 증발압력인 20kPa를 적용하였으며, 최대 24kPa에서 최소 16kPa까지 증발압력이 변화하면서 생산되는 유량변화를 비교하였다. 저압 증발을 이용한 담수화 설비는 내부 압력의 변화에 따라 증발량과 증발온도가 변화하며, 담수생산량에 영향을 미친다. 현재 선박에서 사용하고 있는 담수화 설비는 내부 진공을 형성하기 위하여 이젝터를 활용하며, 증발된 해수를 응축하기 위한 냉각 해수를 펌프를 통해 순환하고 펌프 출구에 이젝터를 연결하여 증발기 내부에 진공을 형성한다[9]. Table 2

는 선박폐열 발전-담수화 설비의 운전 특성을 나타낸다. 선박폐열온도차발전의 증발열량과 응축열량은 식 (3)과 식 (4)와 같으며, 발생된 발전출력은 식 (5)와 같고, 선박폐열온도차발전에 소요되는 자체 소비전력인 작동유체 펌프와 담수펌프는 각각 식 (6)과 식 (7)과 같다.

$$Q_{eva} = m_r (i_{eva,in} - i_{eva,out}) \quad (3)$$

$$Q_{con} = m_r (i_{con,in} - i_{con,out}) \quad (4)$$

$$W_{tur} = m_r (i_{tur,in} - i_{tur,out}) \eta_t \quad (5)$$

$$W_{pump} = m_r (i_{pump,in} - i_{pump,out}) \eta_{pump} \quad (6)$$

Table 2: Operational characteristics of wasted heat recovery-desalination system (10S90ME class ship)

System	Parameter	Value	Unit
ORC	Cooling water temperature	90	℃
	Cooling water temperature difference	10	℃
	Seawater temperature	28	℃
	Seawater temperature difference	5	℃
	Evaporating pressure	820	kPa
	Condensing pressure	200	kPa
	Turbine efficiency	85	%
	Refrigerants pump efficiency	75	%
Desalination	Heat exchanger Pinch temperature	1.5	℃
	Outlet cooling water temperature	80	℃
	Seawater temperature	33	℃
	Evaporating pressure	20	kPa
	Condensing pressure	60	℃
	Ship in cooling water temperature	65	℃
	Used cooling water flow rate	50	m ³ /h
	Supplied seawater flow rate	5	m ³ /h

$$W_{desal,pump} = m_r (i_{desal,pump,in} - i_{desal,pump,out}) \eta_{desal,pump} \quad (7)$$

여기서 W_{tur} 는 터빈출력이며, W_{pump} 는 작동유체펌프, $W_{desal,pump}$ 는 담수화펌프 출력량을 나타내며, m_r 는 작동유체의 유량을 나타낸다. 또한, Q_{eva} 는 증발기 열량 Q_{con} 는 응축기에서의 열량을 나타내며, $i_{eva,in}$ 와 $i_{eva,out}$ 는 증발기 입출구의 엔탈피를 나타낸다. η_t , η_{pump} 와 $\eta_{desal,pump}$ 는 터빈, 작동유체펌프 및 담수펌프의 출력을 나타낸다.

선박폐열발전에서 얻어진 순수 출력은 식 (8)과 같으며, 이때 효율은 식 (9)와 같다.

$$W_{net} = W_{tur} - W_{pump} - W_{desal,pump} \quad (8)$$

$$\eta_{th} = W_{net} / Q_{eva} \quad (9)$$

Table 3: The properties of working fluids

Item	R245fa	R1233zd	R1234yf	R1234ze	R600a	Ammonia
T _{cri} (℃)	154.01	165.6	94.7	109.36	134.66	133.0
P _{cri} (kPa)	3651	3570.9	3382.2	3634.9	3269	10642
ODP	0	0	0	0	0	0
GWP	1030	7	4	6	20	0
SAFE	A1	A1	A2	A2	A3	B2

Note: ODP: Ozone depletion potential, GWP: Global warming potential.

1: No flame propagation; 2: Lower flammability; 3: Higher flammability; / A: Lower toxicity; B: Higher toxicity.

Table 4: Performance change by working fluid (10S90ME class ship)

working fluids	Evaporator			Condenser			Turbine			Working fluid flow rate (kg/s)
	UA (kJ/°C-s)	LMTD (°C)	Duty (kW)	UA (kJ/°C-s)	LMTD (°C)	Duty (kW)	High pres' (kPa)	Low Pres' (kPa)	power (kW)	
R245fa	1597.8	3.7	5931.4	1756.3	3.1	5366.8	816	206.3	581.3	26.6
R1233zd	1300.7	4.3	5697.6	1619.0	3.2	5148.9	684.1	180.1	563.2	25.75
R1234yf	1414.8	4.0	5699.2	1509.2	3.4	5209.2	2800	880.9	582.7	37.98
R1234ze	1533.6	3.7	5699.2	1557.3	3.3	5177.3	2189	651.2	578.2	30.88
R600a	1175.5	5.0	5932.9	1587.0	3.4	5378.0	1403	456.0	591.6	15.68
Ammonia	1167.0	5.1	5933.2	1642.4	3.2	5348.7	4187	1317	618.0	5.06

시뮬레이션 해석 방법으로는 기본적인 유기랭킨사이클을 해석하기 위해 공정설계프로그램인 AspenTech HYSYS (V11)을 사용하여 설계 하였다.

2.3 폐열발전 작동유체 선정

작동유체(Working Fluid)는 적용하고자 하는 ORC의 운전 조건에 따라서 그 선택이 다양하며, 또한 발전 성능에 영향을 미친다. 폐열발전에 적용하고자 하는 작동유체는 최근 환경문제를 통해 저 GWP 냉매를 적용하기 위하여 R1233zd, R1234yf, R1234ze, R600a, Ammonia를 비교하였으며, 기존 80-90°C의 열원에 주로 사용되는 R245fa 작동유체를 비교하였다.

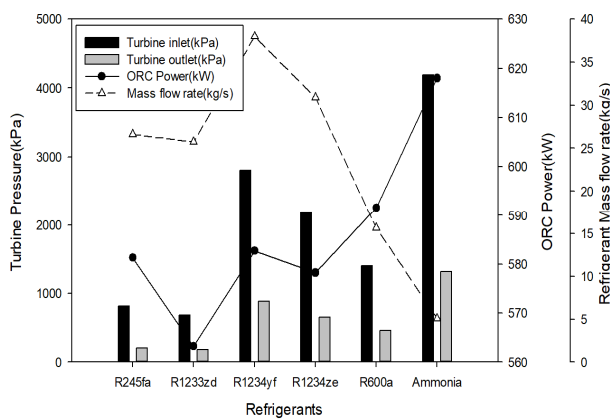
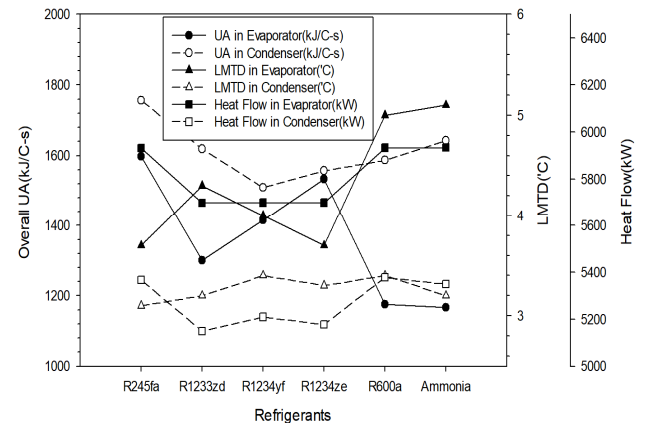
작동유체별 성능변화를 비교하기 위하여 10S90ME급 선박의 냉각수 유량과 온도를 적용하였으며, 증발기와 응축기, 터빈 등에서 발전량, 최고압력, 최저압력, 증발열량과 응축열량 등의 항목을 비교하였다.

Table 3과 Table 4는 각각 작동유체 비교를 위한 물리적 특성과 10S90ME급 선박의 선박폐열발전 성능특성을 나타낸다. 각 냉매별 선박폐열발전의 터빈 성능을 비교한 결과 자연냉매인 Ammonia에서 최대 출력인 618.0kW를 보이는

반면, 순환 냉매량은 5.06 kg/s로 가장 적은 수치를 보였다. 암모니아 및 R600a는 각각 B2와 A3로 독성과 폭발성의 이유로 안전성이 낮다. 이를 고려한 대체 냉매로서 R245fa와 R1234yf가 각각 581.3kW와 582.7kW로 7% 미만의 차이를 보였으며, 그 중 Low GWP 신냉매로 분류되는 R1234yf은 증발압력이 2,800kPa으로 높고 냉매순환량이 37.98kg/s로 타 냉매와 비교하여 많아 R245fa가 높은 안정성과 발전 성능을 보유한 선박폐열 발전에 적합한 것으로 예상되었다.

또한, 증발기와 응축기에서의 성능을 비교한 결과 열교환기의 열전달 성능 지표인 총괄 열전달계수에서 R245fa가 가장 높은 1,597.8 kJ/°C-s과 1,756.3 kJ/°C-s를 보이며, R600a 및 Ammonia, R245fa는 신냉매인 R1233zd, R1234yf, R1234ze와 비교하여 총 발열량이 약 4%가량 높게 발생하는 것을 확인하였다. 또한, LMTD 비교에서는 R245fa가 가장 낮은 응축기와 증발기 온도인 3.1°C와 3.7°C를 나타내고 있다. 각 냉매별 성능 비교는 Figure 5와 Figure 6과 같다.

선행 냉매별 비교를 바탕으로 선박폐열발전-담수화 시뮬레이션에 적용된 작동유체(Working Fluid)는 중저온 열원에 적합한 R245fa를 적용하였으며, 메인엔진의 유형과 냉각수 유량에 따른 발전 출력과 폐열 발생량을 비교하였다.

**Figure 5:** Performance characteristics of turbine of Ship wasted heat recovery by Refrigerant**Figure 6:** Performance characteristics of heat exchanger of Ship wasted heat recovery by Refrigerant

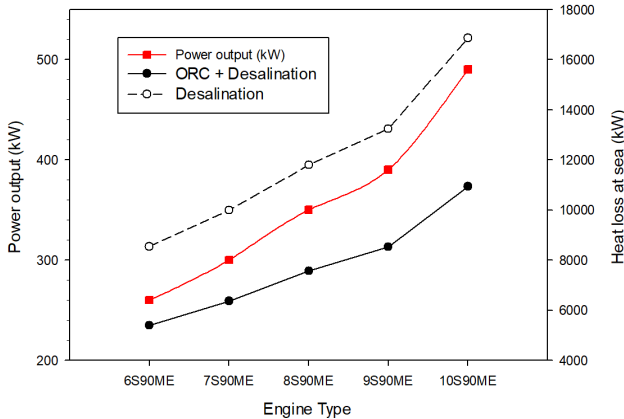


Figure 7: Changes in power output and heat loss at sea according to engine power

3. 선박폐열발전-담수화 시뮬레이션 결과

3.1 선박의 메인엔진 출력에 따른 성능평가

10S90ME급 선박의 메인엔진 냉각수 이용하여 발전 시스템을 구성할 경우 490M³/h 유량에서 581.6kW급 발전량을 확인하였다. 또한 메인엔진의 모델 변화에 따라 6S90ME급 엔진을 보유한 선박에서는 260M³/h 유량에서 308.6kW급 발전량을 확인하였다. 각 엔진의 용량에 따른 발전 효율은 9.8%로서 동일하며, 10S90ME 메인엔진의 ORC 발전량은 2,000kW를 소요 전력으로 사용하는 14,500TEU급 컨테이너 선박의 약 30%를 차지하는 수준이다. 이때 소요되는 전력은 냉매를 순환하는 순환펌프와 담수를 공급하는 담수펌프가 있으나 10S90ME급 선박에서 각각 16.7kW와 0.17kW로 이를 적용하여도 순수출력은 총 564.4kW이며 순수 효율은 9.5%를 보인다. 선박 메인엔진에 따른 발전량 변화는 Figure 7과 같다.

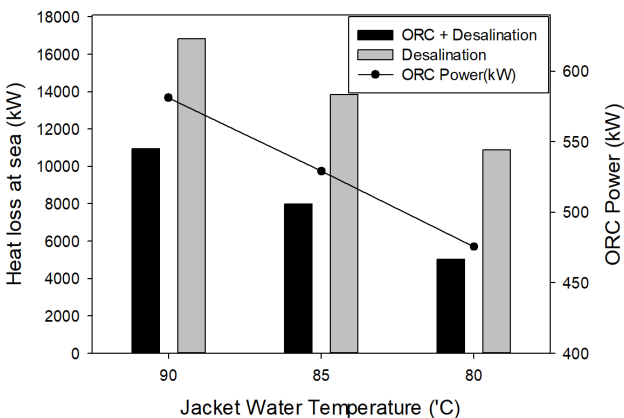


Figure 8: Change of heat loss at sea and ORC power according to ship jacket cooling water temperature change

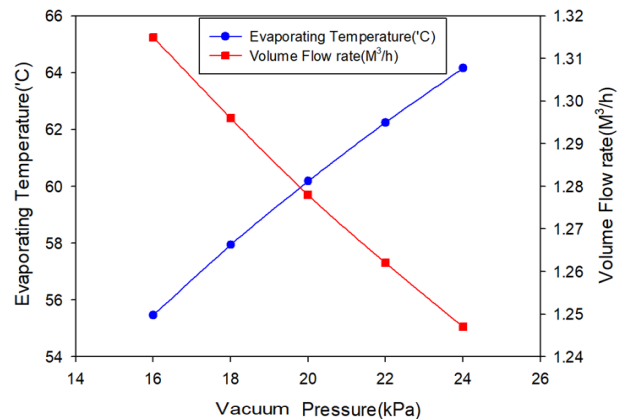


Figure 9: Evaporation temperature and freshwater production change with vacuum pressure change

이때 생산되는 담수의 유량은 1.278M³/h로 기존 선박담수화 장치의 담수 생산량과 유사하며, 이와 같은 결과는 6S90ME급 선박의 전체 선박폐열 유량의 19.2%만을 열원으로 사용하므로 최대 5배의 담수생산 증가가 가능할 것으로 보인다. 또한, 기존 10S90ME급 선박에서 해수로 배출되는 폐열의 양이 16,860kW에서 10,940kW로 35%가량 감소하며, 6S90ME급 선박에서도 기존 8,541kW에서 5,411kW로 감소량을 확인하였다.

3.2 메인엔진 냉각수 온도에 따른 발전 및 담수 변화량

냉각수 온도에 따른 ORC 발전량의 변화와 해수로 배출되는 폐열의 열량을 비교하였으며, 10S60ME 메인엔진의 냉각수 유량과 담수화 장치의 용량을 적용하였다. 기존 저압 담수화 설비를 운용하는 선박에서 80°C의 냉각수 열원을 사용하는 경우 10,890kW의 버려지는 폐열이 발생하며, 90°C의 열원대비 35%의 감소량을 보인다. 하지만 ORC를 추가로 적용한 선박에서는 90°C 열원에서 10,940kW를 보이며 80°C열원에서 5,030kW까지 폐열량을 감소할 수 있게 되었다. 그러나 ORC 발전 출력은 기존 90°C의 냉각수 열원에서 581.3kW인 반면 80°C의 열원은 475.6kW로 18.2%의 감소를 보였다. Figure 8은 선박 냉각수 온도변화에 따른 폐열량 변화와 ORC 출력 변화를 나타내고 있다.

3.3 증발 압력에 따른 증발량 및 온도 변화

저압 증발 담수화 설비의 내부 압력을 24kPa에서 운전할 경우 증발을 위한 열원이 최소 64.2°C로 공급돼야 하며, 생산되는 담수량도 1.247M³/h를 보였다. 반면 압력을 점차 감소하여 16kPa에 이르면 증발온도가 55.5°C로 약 9.7°C가 감소하며, 생산되는 담수량도 1.315M³/h로 약 5.5% 증가하였다. 증발압력에 따른 증발온도와 담수량의 변화는 Figure 9와 같다.

4. 결 론

본 논문을 통하여 선박의 냉각수 폐열을 활용한 발전과 담수 시스템을 설계하였으며, 선박의 대형화에 따른 메인엔진 출력 증가와 냉각수 온도 변화, 담수화 설비의 증발압력 변화를 적용한 선박폐열발전-담수화 시스템의 성능을 비교하였다.

- 1) 선박폐열발전 시스템의 설계를 위한 작동유체 선정은 상용 작동유체인 R245fa에서 발전 출력이 581.3kW로 상대적으로 높으며 UA값도 적어 증발기와 응축기의 체적이 적을 것으로 예상된다. 또한, 구동 압력이 낮고 냉매 유량도 26.6kg/s로 적어 기술적 적용이 용이하다.
- 2) 메인엔진 출력 증가에 따른 선박폐열발전량은 10S90ME 모델에서 최대 발전량을 보이며, 선박 소요 전력량의 30%를 공급 가능할 것으로 확인하였다. 또한, 바다로 버려지는 폐열의 경우 선박폐열발전-담수화를 통해 35%의 감소량을 보이며, 폐열 감소를 통한 메인엔진 냉각수 냉각기(Cooler)의 체적 감소와 냉각 해수의 유량 감소가 가능할 것으로 예상된다.
- 3) 냉각수 온도에 따른 선박폐열발전-담수화 설비의 성능 변화는 10℃가량 냉각수 온도가 감소할 경우 발전량이 18.2% 감소하며, 폐열량은 35% 감소하게 된다. 낮은 냉각수 온도에서 폐열 발생량이 감소하지만 저온 부식의 이유로 냉각수 온도가 증가하는 추세에서는 선박폐열발전-담수화 기술을 통해 폐열 감소와 추가 전력 생산이 필요하다.
- 4) 진공 증발식 담수화 설비는 증발압력의 변화를 통해 담수 생산량을 예측하였다. 20kPa의 증발압력에서 60.2℃의 증발온도와 1.278kg/s의 담수량을 확인하였다. 이젝터 펌프와 이젝터를 활용한 진공 압력 제어를 통해 증발압력을 조절할 경우 냉각수 온도가 감소해도 동일한 담수 생산을 얻을 것으로 예상된다.

향후 유가 상승과 LNG 선박의 도입을 통해 고효율 선박 기술개발의 일환으로 선박폐열을 활용한 선박폐열발전-담수화 시스템이 그 대안이 될 것으로 예상되며, 친환경 작동유체의 적용과 시스템 고도화 연구를 통해 성능개선이 수반되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “미활용 열 이용 신형식 해수담수-냉방 복합플랜트 핵심기술 개발 (1/5)” 에 의해 수행되었습니다(PES3070).

Author Contributions

Conceptualization, S. T. Lim and H. S. Lee; Methodology, S. T. Lim; Software, J. H. Moon; Validation, S. T. Lim and

H. J. Kim; Formal Analysis, S. T. Lim; Data Curation, H. S. Lee; Writing-Original Draft Preparation, H. J. Kim; Writing-Review & Editing, Visualization, S. T. Lim; Supervision, H. J. Kim; Project Administration, H. S. Lee; Funding Acquisition H. S. Lee;

References

- [1] H. J. Jun and D. C. Lee, “Developments and prospects of Korean marine diesel engine industry (1st report : Two stroke low speed diesel engine),” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 30, no. 8, pp. 827-836, 2006 (in Korean).
- [2] H. J. Choi and I. S. No, “A study on the characteristic and design of maritime labor convention in 2006,” BULLETIN OF THE SOCIETY OF NAVAL ARCHITECTS OF KOREA, vol. 46. no. 4, pp. 33-41, 2009 (in Korean).
- [3] S. J. Lee, S. K. Guak, H. J. Jeon, and J. H. Jung, “Methodology of reducing maximum capacity of diesel generator for ship’s power network by using ESS(Energy Storage System),” Proceedings of the Korean Institute of Power Electronics Conference, pp. 133-134, 2016 (in Korean).
- [4] M. H. Yang and R. H. Yeh, “Analyzing the optimization of an organic Rankine cycle system for recovering waste heat from a large marine engine containing a cooling water system,” Energy Conversion and Management, vol. 88, pp. 999-1010, 2014.
- [5] MAN Diesel and Turbo, Thermo efficiency system for reduction of fuel consumption and CO₂; 2014.
- [6] C. S. Song, S. D. Kang, J. S. Choi, “Marine fresh water generator,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 17, no. 3, pp. 137-147, 1993 (in Korean).
- [7] C. Sellers, “Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water,” Energy Procedia, vol. 129, pp. 495-502, 2017.
- [8] D. K. Kim, J. H. Lee, and K. H. Cho, “A study on performance comparison of jacket cooling fresh water system for marine diesel engine,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 41, no. 1 pp. 8-14, 2017 (in Korean).
- [9] B. D. Kim, C. S. Song, K. K. Kim, J. H. Kim, and Y. M. Kim, “A development study on the evaporation type large fresh water generator,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 18, no. 4, pp. 355-366, 1994 (in Korean).