

# 선박 주 추진 엔진폐열을 이용하는 고온도차발전시스템의 냉매특성에 관한 연구

송영욱\* · 지재훈\*\* · 박상균\*\*\* · 오철\*\*\*\*

\* Value-max Maritime Technology, \*\* 목포해양대학교 해양경찰학부 교수, \*\*\* 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수

## A Study on the Refrigerant Characteristics of the Organic Rankine Cycle Power System Using the Waste Heat of the Main Propulsion Engine

Young-uk Song\* · Jae-hoon Jee\*\* · Sang-kyun Park\*\*\* · Cheol Oh\*\*\*\*

\* CEO, Value-max Maritime Technology, Busan 48059, Korea

\*\* Professor, Division of Korea Coast Guard, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\*\* Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 가스 배출 저감 및 선박 폐열 회수 증대를 목적으로 선박 배기로 버려지는 폐열을 전기로 변환하는 ORC(Organic Rankine Cycle) 발전에 대해 시뮬레이션을 통한 냉매별 효율을 보여주고 있다. 상대적으로 고온인 배기가스의 폐열과 상대적으로 저온인 냉각해수를 이용하여 Aspen HYSYS 11을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 해수냉각 ORC 발전시스템의 시뮬레이션 결과, 작동유체 효율은 R717 냉매가 2.86%로 가장 높았고, 다음 순으로 R152a, R134a, R143a, R125a로 나타났다.

**핵심용어 :** CO<sub>2</sub>배출, ORC, 냉매, 작동유체, 폐열에너지

**Abstract :** In this study, it shows the efficiency of each refrigerant through simulation method for ORC (Organic Rankine Cycle) power generation that converts waste heat discarded by ship exhaust into electricity for the purpose of reducing CO<sub>2</sub> emission and increasing ship waste heat recovery. by Simulation was performed with waste heat from the exhaust gas which is relatively high temperature and cooling sea water which is relatively low temperature from ships. As a result of the sea water cooling ORC power generating system, efficiency of the working fluid with R717 is highest as a 2.86% and the next working fluid is R152a, R134a, R143a and R125a.

**Key Words :** CO<sub>2</sub> Emission, Organic Rankine Cycle, Refrigerant, Waste Heat Energy, Working Fluid

### 1. 서 론

국제사회에서 온실가스 배출규제에 관한 문제는 선진국에 국한되는 감축의무를 부여하는 합의를 통해 지난 1992년 기후변화에 관한 기본협약(UN Framework Convention on Climate Change)이 체결되었다.

그로부터 5년 후 일본 교토에서 구체적인 감축량과 이행 메커니즘을 규정하고 교토의정서(Kyoto Protocol to UN Framework Convention on Climate Change)가 체결됨으로써 기후변화에 대한 국제 환경법의 서막이 열리게 되었다(Jung, 2011).

교토의정서는 한시적으로 선진국으로 분류된 부속서 I 국가들에게 2012년까지의 감축의무를 규정하고 있으며, 영해를 향해하는 국제항해 선박에 사용하는 연료유에 관한 온실가스 규제는 그 특성을 고려하여 국제 해사 기구(IMO: International Maritime Organization)가 규제하도록 위임하고 있다.

선박에 있어서의 온실가스 배출규제는 2003년도 국제해사기구의 23회 총회를 통하여 「선박에서 발생하는 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 저감에 관한 IMO 정책 및 실행」이 채택되면서 논의가 본격적으로 시작되었다.

국제해사기구의 해양환경보호위원회에서 CO<sub>2</sub> 배출량 감축의 지구적 노력에 동참하기 위해 최근 선박에서 대기로 방출하는 CO<sub>2</sub>의 양을 지수화 하여 선박을 설계·건조 시부터

\* First Author : bts@vmtmarine.com, 070-7770-9001

† Corresponding Author : ohcheol@kmou.ac.kr, 051-410-4268

각 선박당 CO<sub>2</sub>의 배출값을 산정하고 운항 시에도 CO<sub>2</sub> 배출을 개량하고 이를 감축하는 방안을 모색하도록 유도하는 조치 및 논의가 활발히 진행 중이다(Jung, 2011).

MEPC 70차(2016년 10월)에서는 선박의 온실가스 감축에 대한 Comprehensive IMO Strategy 개발에 대한 Roadmap을 승인하였으며, 단기, 중기 및 장기 조치를 포함한 전략을 2023년에 채택하기 위한 작업 일정을 포함하고 있다.

이와 함께 MEPC 70차에서는 선박 온실가스 배출량 감축에 대한 회기간 작업반을 개최하는 것에 합의를 하였고 ISWG-GHG.1(2017년 6월), ISWG-GHG.2(2017년 10월) 및 ISWG-GHG.3(2018년 4월)을 거쳐 Roadmap의 첫 번째 단계인 IMO 선박 온실가스 감축을 위한 초기 전략(Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships) 초안개발이 완료되었고, MEPC 72차(2018년 4월)에서 Res.MEPC.304(72)로 채택되었다(Kim et al., 2018).

MEPC 76차(2021. 6)에서는 아래의 두 가지 사항에 대한 규정을 MARPOL Annex VI에 새로 도입하는 개정안을 채택하였다(KR, 2021).

1) EEXI(Energy Efficiency Existing Index)에 관한 요건으로 Attained 및 Required EEXI에 관한 새로운 규정들을 현존 운항선박들에게 에너지 효율을 개선토록 요구

2) CII(Carbon Intensity Indicator)에 관한 요건으로 운항적 탄소집약도에 관한 새로운 요건들은 2008년 대비 2030년까지 최소 40%의 선단 평균감축을 달성하기 위하여 2023년에서 2030년 사이 선박들의 탄소집약도에 대하여 3단계 연속으로 구성된 비선형의 감축 요구

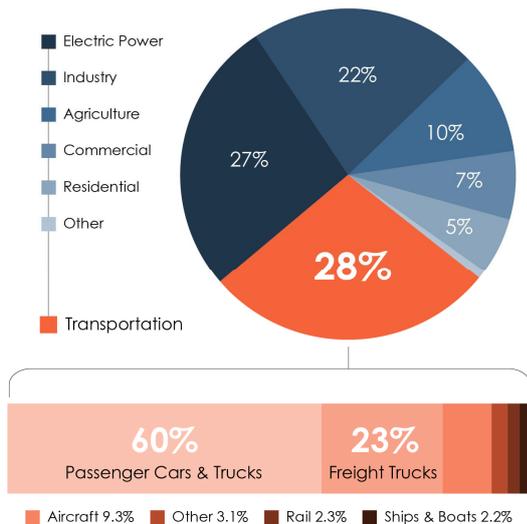


Fig. 1. Transportation Sector Now the Largest Contributor of Greenhouse Gases (source: Environmental Protection Agency, 2020).

Fig. 1에서 보면 전 세계 총 CO<sub>2</sub> 배출량을 100%로 보았을 때, 운송 부분에서 28%를 차지하고 있으며, 이중 선박에 해당되는 배출량은 2.2%를 차지하고 있다(EPA, 2020).

산업발전에 따른 지구 온난화의 영향은 인류의 미래에 심각한 문제를 초래할 수 있으며, 해상에서의 물동량 증가로 인한 선박기인 온실가스의 배출은 앞으로도 계속 증가할 것이 예상되어지므로 지구 온난화에 상당한 영향을 미칠 수 있다.

선박으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출을 최소화하기 위해 선박에서 배출되는 열에너지 회수율을 극대화시킬 수 있는 방안이 강구될 필요가 있다. 배기가스로 배출되는 폐열을 이용한 ORC(Organic Rankine Cycle) 발전의 선박용 온도차발전장치를 구동하여 선박의 에너지 효율을 높이면서 선박에 사용되는 탄소기반의 연료유 사용을 줄이게 되어 CO<sub>2</sub> 배출을 최소화할 수 있다(EIA, 2017).

따라서 본 연구에서는 선박용 온도차발전장치의 작동유체로 사용되는 다양한 냉매의 특성에 대한 연구를 진행하고 발전장치의 출력과 효율에 대해 알아보하고자 한다(Lee et al., 2011).

## 2. 선박 열원의 해석

### 2.1 ORC(Organic Rankine Cycle; 유기랭킨 사이클)

일반적인 유기 랭킨 사이클 시스템은 중·저온(70~400°C) 범위의 열원에서 높은 에너지 변환 효율을 얻기 위한 저온 증기 열 동력 사이클이다(Sidiqi and Atakan, 2011).

물보다 더 낮은 온도범위에서 증발이 일어나는 냉동기에 사용되는 냉매나 탄화수소 계통의 유기매체를 작동유체로 사용한다. 상대적으로 저온에서 고압의 증기가 얻어지므로 저온 열원을 이용하여 고효율의 동력을 발생시킬 수 있다.

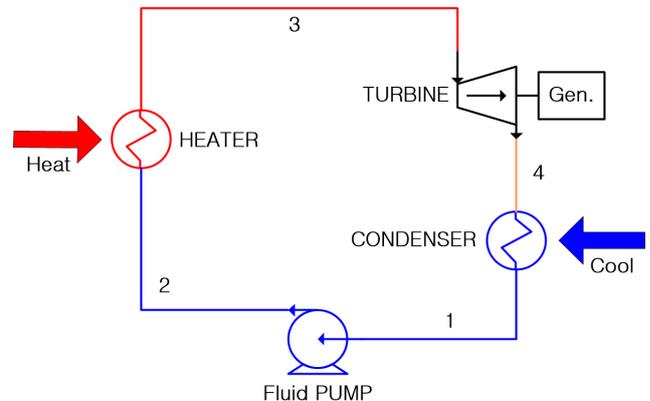


Fig. 2. ORC System.

증기 동력 사이클 시스템은 작동유체의 일부 또는 전부가 액상(Liquid phase)과 기상(Vapour phase)으로 상이 변하면서 터빈을 구동하여 열에너지를 기계적 에너지로 변환시키는 열 동력 기관이다. 다른 열 동력 기관과 달리 열전달 특성이 이상적인 열기관인 카르노 사이클과 유사하다.

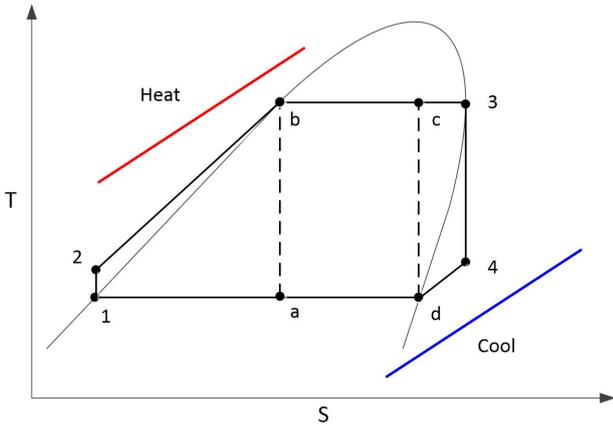


Fig. 3. T-S Diagram of ORC System.

유기 랭킨 사이클 시스템과 기존의 랭킨 사이클 시스템의 차이는 작동 유체에 있으며 그 밖의 원리와 시스템 구성은 차이가 없다.

Fig. 2는 이상적인 기본 랭킨 사이클 시스템의 구성도를 보여주고 있고 Fig. 3에서는 온도 엔트로피(T-S) 곡선을 나타낸 것이다. T-S 곡선에서 카르노 사이클은 a-b-c-d로 순환하는 반면에 랭킨사이클의 경우 1-2-3-4 순으로 열 교환과 압축 팽창 과정을 구성하고 있다(Lee et al., 2011).

유기 랭킨 사이클에서 응축기와 증발기의 온도 그리고 작동유체가 결정되면 작동 유체의 열역학적 물성 값표나 방정식에 의해 각 점의 엔탈피를 구할 수 있다. 사이클의 입력 열량, 출력 및 시스템 성능은 다음과 같이 계산된다(Oh and Song, 2012).

$$\text{입력 열량 } Q_{in} = h_3 - h_2 \quad (1)$$

$$\text{터빈 출력 } W_{out} = h_3 - h_4 \quad (2)$$

$$\text{배출 열량 } Q_{out} = h_4 - h_1 \quad (3)$$

$$\text{펌프 일량 } W_{in} = h_2 - h_1 \quad (4)$$

$$\text{순수 일량 } W_{net} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{효율 } \eta_{th} &= \frac{W_{net}}{Q_{in}} \quad (6) \\ &= \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{(h_3 - h_2)} \quad (7) \end{aligned}$$

## 2.2 시스템 시뮬레이션 소개

시스템 시뮬레이션은 Aspen HYSYS 11로 수행 하였으며, 적용된 상태 방정식은 Peng-Robinson를 기본으로 사용하였다. 냉매 R125는 해석 프로그램에 물성치에 대한 정보가 누락되어 있기에 이 냉매는 알코올 및 비 이상기체에 적용 가능한 PRSV(Peng-Robinson Stryjek-Vera) EOS를 적용하였다.

Aspen HYSYS 프로그램은 Oil & Gas 산업에서 각종 플랜트 설계에 실제 적용하는 프로그램으로, 기본적인 화학 프로세스 및 시스템 설계를 수행하고 다이내믹 시뮬레이션으로 검증할 수 있는 프로그램이다(Aspen Tech. 2020).

실제 사례로 예를 들면, 현재 국내 대형 조선소에서 건조 중인 LNG FPSO의 Topside의 공정 프로세스 설계는 프랑스 엔지니어링 회사인 Technip사에서 수행하는데, 공정의 기본 설계를 Aspen HYSYS를 이용하여 수행하고 있다.

물론 상용프로그램이므로 시스템의 설계 조건에 따라 오차가 있을 수 있으나, 엔지니어링 회사마다 보유하고 있는 경험치를 반영하여 오차범위를 줄여 설계의 신뢰도를 높이고 있다.

## 2.3 선박의 열원

선박에서 발생하는 폐열은 크게 배기가스와 냉각수로 분류할 수 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 선박에서 발생하는 주요 열원이 되는 장비를 보면 주기관과 보일러, 냉각수 등이다.

상대적으로 고온인 배기가스는 약 200℃ 이상이며, 상대적으로 저온인 주기관 및 발전기 엔진의 냉각수의 경우 자켓 냉각수(Jacket cooling water)는 약 80~90℃의 청수로 냉각되며, 해수 열교환기의 온도는 약 40~50℃ 정도로 운전되어 진다.

대형 컨테이너선에 탑재되는 3,000 kW급 발전기의 연료 소비량을 보면 약 577 kg/h로 연간 365일 운전을 한다고 가정하면, 5,056 ton/year의 MDO(Marine Diesel Oil)가 소비된다.

2021년 1월 기준 MDO 단가는 대략 톤당 \$500이므로 연간 사용 연료비를 동일한 가격인 \$500로 고려하였을 때 발전기의 연료비는 연간 \$2,528,000이 된다. Table 1은 발전기 엔진의 사양, Table 2에서는 발전기 엔진 부하에 따른 연료 소비량을 나타내고 있다(Han and Wang, 2021).

Table 1. Engine Specification

Item	Value
Engine Maximum Continuous Output [kW]	3,000
Engine Speed (rpm)	750
Cylinder bore (mm)	320
Stroke (mm)	400
Cylinder configuration	6, in-line

Table 2. Fuel oil consumption of 3,000kW marine diesel engine generator

Load [%]	25	50	75	100
Engine Load [kW]	7,50	1,500	2,250	3,000
Fuel Oil Consumption [kg/h]	170.4	311.4	444.6	577.2

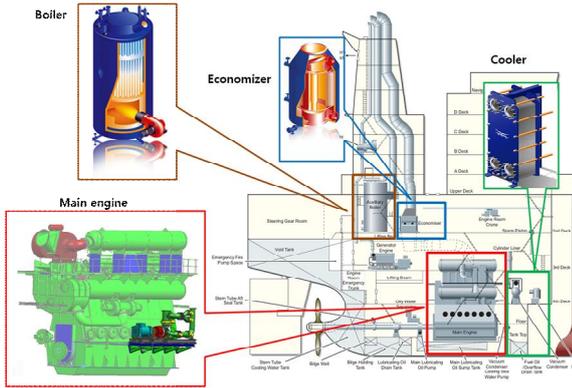


Fig. 4. Major heat source of the ship.

## 2.4 운항선의 열수지 분석

현재 운항 중인 8,500 TEU급의 초대형 컨테이너선에 적용된 주기관의 출력과 소모되는 냉각수의 용량을 분석하여 선박의 연료로부터 얼마만큼의 열에너지가 소비되는지 확인하였다.

엔진은 MAN B&W사의 12K98ME-C7 모델로 샤프트(Shaft)에서 연속최대출력(Maximum Continues Rating, MCR)은 72,240 kW이다. 시운전 시 실제 계측된 연료 소비량(Fuel of Consumption, FOC)은 약 13,250 kg/h이다. 4.0% 황함유량을 포함한 벵커C유의 발열량이 약 42,500 kJ/kg이므로 연료로부터 발생하는 총 열량을 대략 156,424 kW가 된다. 이 연료로부터 공급되는 총 열량으로부터 엔진의 축마력과 냉각수 등으로 배출되는 열량을 빼면 배출되는 배기가스의 열량도 확인할 수 있을 것이다(Lim et al., 2018).

MCR조건에서 공기냉각기(Air Cooler)의 성능데이터를 확인하여 보면 Table 3과 같다. 이때 발생하는 열량은 29,750 kW가 된다.

Table 3. Performance data & heat dissipations of air cooler

Air amount total [kg/h]	Scavenge air pressure [kPa]	Air temp. [°C]	Scavenge air temp. [°C]	Air cooler heat total [kW]
686,000	375	192.0	37.0	29,750

## 3. 배기가스 ORC 발전시스템

### 3.1 ORC(Organic Rankine Cycle; 유기랭킨 사이클)

Fig 5에서는 선박의 엔진 또는 발전기 등의 배기구로 배출되는 고온의 배기가스 열을 회수하여 발전하는 시스템으로 전형적인 유기냉매 랭킨사이클의 발전장치를 보여주고 있다. 시스템은 크게 개회로(Open loop)인 해수 냉각계통과 폐회로(Closed loop)로 구성되어지는 작동유체 계통으로 나누어질 수 있다.

작동유체는 펌프에 의해 가압되어 고온부의 열교환기인 절탄기로 이동되어진다. 엔진으로 부터 발생한 고온의 배기가스는 약 200°C이므로 이와 열 교환되는 작동유체는 약 100°C의 포화상태의 기체로 기화될 수 있다.

작동 유체 시스템의 운전 환경을 고려하면 100°C 이상의 증발 온도는 바람직하지 않다. 절탄기에서 증발된 기체는 포화 증기압의 압력으로 터빈을 구동하게 된다. 이때의 구동 압력은 작동유체의 물성값에 따라 차이가 있게 된다.

터빈을 구동하고 나온 기체는 온도와 압력이 떨어지고 응축기에서 응축되어 다시 작동유체 펌프에 의해 가압되어 순환되는 사이클을 구성하게 된다.

해수 냉각 계통은 선박의 해수유입구(Sea chest)로 부터 유입되는 해수는 운항 환경에 따라 차이가 있을 수 있으나, 적도대를 운항하는 경우 일반적으로 30°C이나 동절기나 극 지역을 운항하는 선박에서는 약 5°C도 가량의 저온의 냉각수를 얻을 수 있다.

일반적으로 해수 펌프를 운전하게 되나 운항하는 선박의 경우 응축기를 선저에 충분히 낮은 구역에 배치한다. 선외 밸브와 연결된 스쿠프(Scoop)배관을 선체 외판에 부착하여 설치하게 되면 선박의 운항하는 속도에 의하여 자연적으로 해수의 유입이 발생하게 되어 발전 효율을 높일 수 있을 것이다.

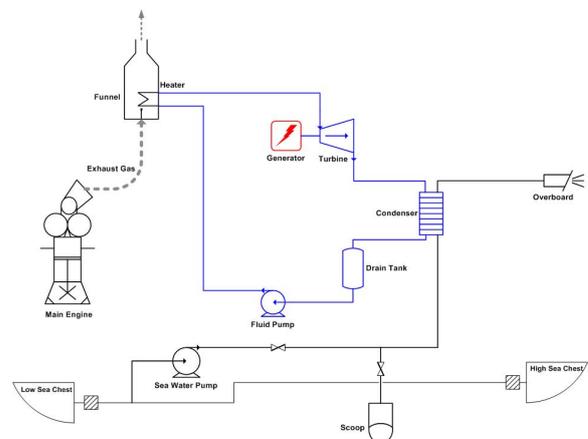


Fig. 5. Concept of exhaust gas ORC generating system.

### 3.2 작동냉매의 종류 및 선정

온도차 발전시스템에서의 작동 유체로서의 냉매는 냉동 장치와 반대의 역할로 고온부에서 열을 흡수하여 증발 기체가 터빈을 구동하여 열에너지를 운동에너지로 변환하게 되고, 저온부에서 열을 방출하여 액화되는 상변화 과정을 거치게 된다. 여러 가지 환경규제 및 대체 냉매로서의 조건을 고려하였을 때 선박의 온도차 발전에 적용 가능한 냉매로 R717 암모니아와 혼합냉매를 제외한 R125, R134a, R143a, R152a 등의 적용을 그 시스템의 온도 및 압력에 따라 검토하였다.

또한, 최근에는 육상 공장의 폐열을 회수하는 ORC의 작동유체로서 TFEA와 R-365(1,1,1,3,3- Pentafluorobutane) 65% 및 Galden HT55(Perfluoropolyether) 35%로 혼합한 SES36이라는 유기 냉매를 SOLVAY 업체에서 주요하게 연구 및 개발되고 있으므로 관련 내용을 검토하였다(SOLVY Chemical).

## 4. ORC 시스템에서 냉매특성 분석

### 4.1 ORC시스템에 적용되는 냉매의 특성

Fig. 6은 각 작동유체의 포화증기압 곡선을 나타내고 있다. 암모니아와 HFC계열의 냉매를 보면 0~50°C 범위에서 약 500~2,500 kPa의 압력 분포를 확인할 수 있고, 알코올 계통의 SES36과 TFEA는 100~170°C의 범위에서 약 500~2,500 kPa의 압력분포를 확인할 수 있다.

따라서 배기가스의 저온부식 우려가 없는 시스템에서는 온도 범위에 따라 고온과 저온에서 다단계로 배기가스 폐열을 회수하는 시스템을 구성할 수도 있을 것이다.

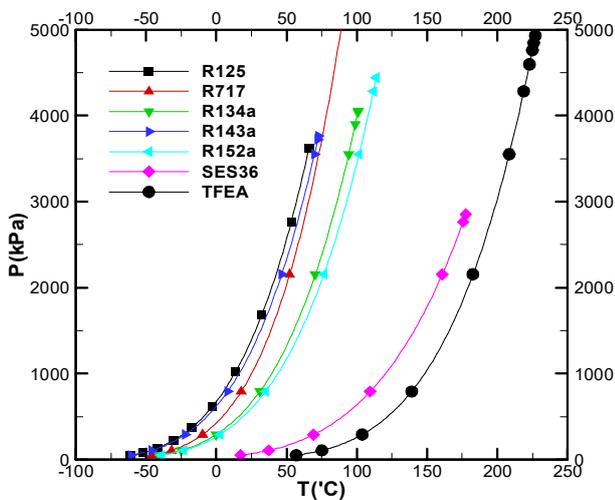


Fig. 6. Saturated pressure of fluid at the boiling temperature.

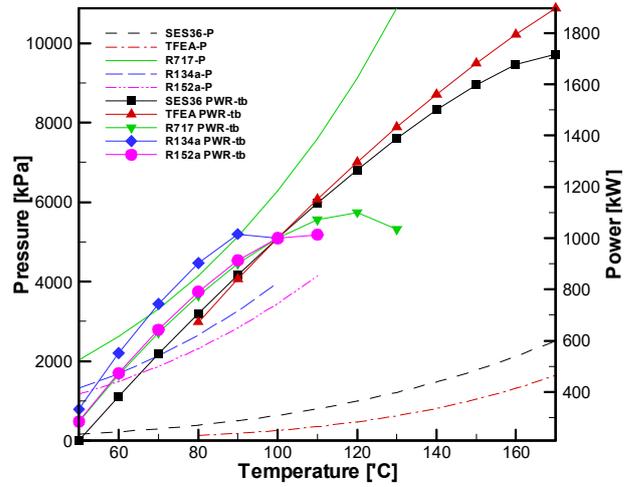


Fig. 7. Distribution of turbine power by working fluid.

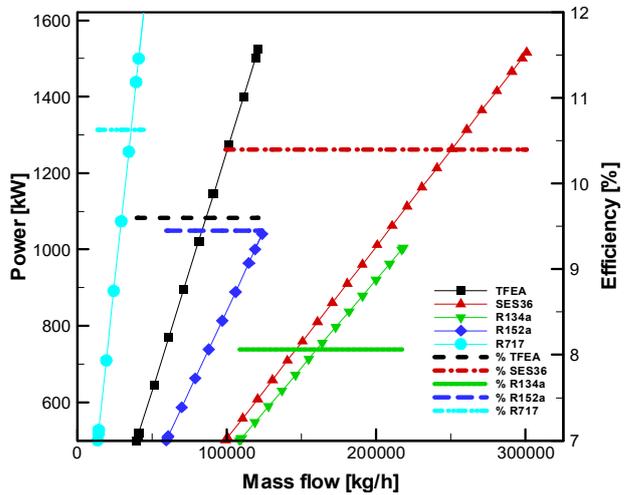


Fig. 8. Distribution of turbine power & efficiency against mass flow.

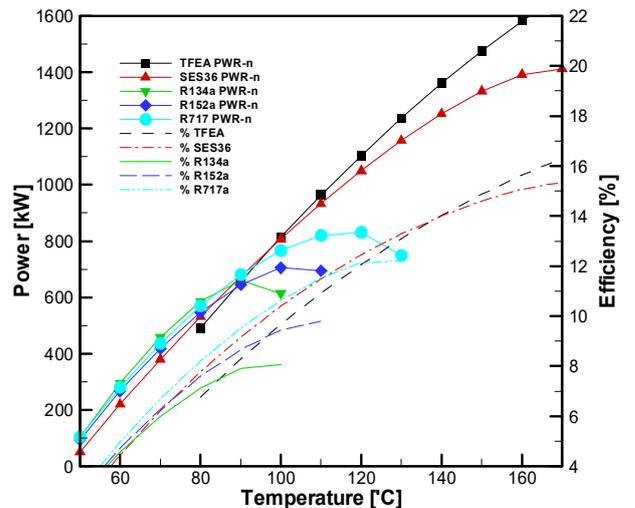


Fig. 9. Distribution of turbine efficiency by working fluid.

실제로 LNG를 연료로 사용하는 발전소나 보일러에서는 배기가스 온도를 약 80℃까지 낮추어 운전하여 폐열을 회수하고 있다. 이러한 경우에도 유기랭킨 사이클을 추가로 구성하면 에너지 회수율을 보다 높일 수 있을 것이다.

Fig. 7에서는 각 작동유체 별 온도 조건에 따른 터빈의 구동압력의 분포와 터빈에서의 정미 출력을 확인할 수 있다. R717이 100℃에서 약 6279 kPa로 SES36의 약 638 kPa, TFEA의 약 257 kPa와 비교하면 상대적으로 시스템이 고압으로 운전되어야 하며, 임계온도 근처인 130℃에서는 기하급수적으로 압력이 상승하여 10,000 kPa를 넘게 되는 것을 알 수 있다.

그 이유는 R717의 포화증기압이 다른 작동유체보다 상당히 높기 때문이며 이러한 고압은 터빈에서 압력차(Δp)를 증가시켜 출력은 증강시킬 수 있으나 이러한 시스템의 설계 압력 증가는 비용 상승의 주요 요인이 되므로 작동유체의 선정 시에 불리한 조건이 될 수 있다.

Fig. 8에서 온도에 따른 출력 곡선을 보면, 온도 범위에 따른 작동유체의 적용 범위를 확인할 수 있다. 시스템의 운전 온도가 약 100℃를 기준으로 TFEA와 SES36의 최적 적용 범위를 확인할 수 있는데 100℃ 이상 120~170℃의 운전 범위에서는 TFEA의 출력효율이 높은 것을 알 수 있다. 100℃이하 60~90℃ 운전 범위에서는 SES36의 출력 효율이 높은 것으로 나타내고 있다.

R134a는 상대적으로 낮은 온도범위인 50~90℃의 범위에서 운전이 되었고, R152는 100℃까지, R717은 120℃의 범위에서 운전될 수 있을 것이다.

Fig. 9는 동일한 온도 조건 상태(100℃)에서 각 작동 유체 별 시스템의 효율( $\eta_{th}$ )과 시스템의 출력 변수인 작동유체의 질량유량의 변화에 따른 터빈의 정미출력(kW) 변화량을 비교하여 나타내었다.

시스템의 효율( $\eta_{th}$ )은 R717이 10.63%, SES36이 10.40%, TFEA가 9.67%, R152a가 9.45%, R134a가 8.07%의 순으로 확인 되었고, 질량 유량은 R134a > SES36 > R152a > TFEA > R717 순으로 많이 소모되는 것으로 확인 되었다. R717의 질량유량이 가장 적게 소모되는 이유는 Fig. 6에서 확인한 바와 같이 시스템의 압력이 증가하므로 터빈에서의 압력차(Δp)가 높아 효율이 증가하게 된다.

또한 동일 온도 조건에서 작동 유체의 증기 체적이 높아 용적유량(Volume flow)이 높고 터빈의 입출 구에서의 엔탈피(열량)차이가 많이 나기 때문이다. 이러한 작동유체의 질량 유량은 시스템의 중량 및 크기에 영향을 주므로 선박 등의 운송 목적 및 중량 감소의 최적화를 고려하면 상반되는 변수가 된다.

컴팩트한 시스템의 설계를 위하여서는 질량유량이 적은

작동유체를 선정해야 할 것이며 열 물리학적 특성이 높은 작동유체의 개발은 최적화된 유기랭킨 사이클의 개발에 필수적인 요소가 될 것이다.

Fig. 9에서는 시스템의 운전 온도에 따른 순수유효출력(Net power)과 시스템의 효율을 비교하였다. 마찬가지로 시스템의 설계 온도에 따른 그때의 포화증기압의 분포와 작동유체의 열 물리학적 특성에 따라 시스템의 효율도 약 140℃ 이상의 고온에서는 TFEA가 SES36보다 높은 것을 확인할 수 있고, 약 110~140℃ 범위에서는 SES36의 효율이 높은 것을 알 수 있다.

상대적으로 저온 영역인 60~110℃ 사이에서는 R717이 가장 높은 것을 확인할 수 있으며, R134a의 효율이 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. TFEA는 최대 170℃에서 약 1,897 kW를 얻을 수 있었고 SES36은 1,718 kW를 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 선박에서 배출되는 CO2 배출을 최소화하기 위한 노력의 일환으로 선박으로부터 배출되는 열에너지를 회수하고 재활용 하는 방안으로 유기랭킨사이클(ORC) 발전장치를 구동함으로써 선박의 에너지 효율을 높이고 온실가스 배출을 최소화할 수 있는 방안을 연구를 하여 작동유체인 냉매특성에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 작동유체별 온도 조건에 따른 터빈의 구동압력의 분포와 터빈에서의 정미출력을 확인할 수 있다. R717이 100℃에서 약 6279 kPa로 SES36의 약 638 kPa, TFEA의 약 257 kPa와 비교하면 상대적으로 시스템이 고압으로 운전되어야 하며, 임계온도 근처인 130℃에서는 기하급수적으로 압력이 상승하여 10,000 kPa를 넘게 되는 것을 알 수 있다.

(2) 터빈의 정미출력(kW) 변화량을 비교하여 나타내었다. 시스템의 효율( $\eta_{th}$ )은 R717이 10.63%, SES36이 10.40%, TFEA가 9.67%, R152a가 9.45%, R134a가 8.07%의 순으로 확인되었고, 질량 유량은 R134a > SES36 > R152a > TFEA > R717순으로 많이 소모되는 것으로 확인되었다.

(3) 시스템의 운전 온도에 따른 순수유효출력(Net power)과 시스템의 효율을 비교하였다. 마찬가지로 시스템의 설계 온도에 따른 그때의 포화증기압의 분포와 작동유체의 열 물리학적 특성에 따라 시스템의 효율도 약 140℃ 이상의 고온에서는 TFEA가 SES36보다 높은 것을 확인할 수 있고, 약 110~140℃ 범위에서는 SES36의 효율이 높은 것을 알 수 있다.

(4) 본 연구에서는 ORC 선박용 발전장치에 사용되는 냉매 특성별 온도 조건에 따른 터빈의 구동압력 분포 및 정미 출력을 확인하였고, 시스템의 운전 온도에 따른 순수유효출력과 시스템의 효율을 비교할 수 있었다. 이번 연구 결과가 ORC 선박용 발전장치 개발 시 적용되는 냉매시스템 선정에 도움이 될 것으로 판단되며, 향후에는 이러한 냉매특성을 고려한 ORC 선박용 발전장치 설계에 적용할 수 있는 연구를 진행해 보고자 한다.

## 사 사

이 논문은 2021년도 연구개발특구진흥재단의 재원으로 기술사업화 역량강화사업(후속고도화, 2021-BS-RD0115)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## References

- [1] Aspen HYSYS Thermodynamics COM Interface(2020), Aspen Technology, Inc,
- [2] EPA(2020), Environmental Protection Agency, Inventory of U.S. Greenhouse Gas emissions and Sinks. 13. Apr. 2020.
- [3] Han, T. C. and C. M. Wang(2021), Shipping Bunker Cost Risk Assessment and Management during the coronavirus oil shock, MDPI, Sustainability, 13, 4998. <https://doi.org/10.3390/su13094998>.
- [4] International Energy Outlook(2017), EIA (U.S. Energy Information Administration), [www.eia.gov/ieo](http://www.eia.gov/ieo).
- [5] Jung, R. T.(2011), Recent International Development on the Technical and Operational Measures of IMO's CO<sub>2</sub> Emission Control From Ships, The Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 14, No. 1, pp. 65-71.
- [6] Kim, J. H., J. H. Kim, and J. Y. Lee(2018), International Maritime Technology Law Trends-IMO for reducing ship's greenhouse gas initial strategy, BSNAC, Vol. 55, No. 2, pp. 24-27.
- [7] KR(2021), Korean Register, News Flash of MEPC 76 and ISWG-GHG 8, 2021.
- [8] Lee, H. S., D. H. Jung, S. W. Hong, and H. J. Kim(2011), Performance Analysis of Closed-type OTEC Cycle using Waste Heat, The Korean Society for Marine Environment and Energy, Vol. 25, No. 1, pp. 80-84
- [9] Lim, W. G., J. W. Do, and E. S. Yim(2018), Characteristics of Calorific Values for Bunker C Fuel Oil by Sulfur Contents, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, Vol. 21, No. 4, pp. 328-333.
- [10] Oh, C. and Y. U. Song(2012), A study on the ship's ORC power system using seawater temperature difference, Journal of e-navigation, Vol. 36, No. 5, pp. 349-355.
- [11] Sidiqi, A. and B. Atakan(2011), Investigation of the Criteria for Fluid Selection in Rankine Cycles for Waste Heat Recovery, International Journal of Thermodynamics (IJoT), Vol. 14, No. 3.
- [12] Solkatherm SES36 User manual & Data sheet, SOLVY CHEMICAL, <http://www.solvaychemicals.com>.

Received : 2021. 06. 09.

Revised : 2021. 08. 23. (1st)

: 2021. 09. 16. (2nd)

Accepted : 2021. 10. 28.