

## 지역난방용 증온수 열원 유기랭킨사이클 성능 특성

박우진, 유호선\*

한국지역난방공사(주), \*승실대학교 기계공학과

# Performance Characteristics of Organic Rankine Cycles Using Medium Temperature District Heating Water as Heat Source

Woo-Jin Park, Hoseon Yoo\*

Korea District Heating Corp., Seongnam 463-908, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea

(Received Feb. 15, 2016; Revised Feb. 29, 2016)

**ABSTRACT** : It is becoming increasingly important to make use of alternative energy source, because It is not able to rely on only fossil fuel for the recent increasing demand of energy consumption. With this situation, lots of studies for utilizing low grade energy such as industrial waste heat, solar energy, and geothermal energy have been conducted. The aim of this study is to predict the operation characteristics of working fluid by using performance analysis program (ThermoFlex) through the system analysis which is not mixing district return water but using ORC(Organic Rankine Cycle, hereinafter ORC) as a downstream cycle when accumulating district heating (hereinafter DH). In this study, We conducted the performance analysis for the case which has the district heating water temperature(120°C) and Flow rate of 163m<sup>3</sup>/h (including District Heating return water flow), and examined several working fluid which is proper to this temperature. The case using R245fa (which is the best-case) showed 269.2kW power output, 6.37% efficiency. Additionally, Cut down on fuel was expected because of the boiler inlet temperature increase by being Formed 57.3~85°C in a temperature of district heating return water , depending on a pressure change of a condenser in ORC system,

**초록** : 최근 늘어가는 에너지 수요를 화석연료에만 의존 할 수 없게 되면서 대체 에너지의 중요성이 대두되고 있으며, 이러한 상황에서 유기랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, 이하 ORC)등 산업체 폐열, 태양열, 지열, 해수 온도차 등의 저등급 에너지를 효과적으로 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 지역난방 축열시 회수수를 혼합하지 않고 ORC를 이용하여 하부사이클을 구성하여 성능해석 상용프로그램으로 작동유체 및 운전특성을 예측하였다. 지역난방수 운전 조건인 열원 온도 120°C, 열원 유량 163m<sup>3</sup>/h(회수수 유량을 고려한 값)로 하고 이 온도에 적합한 다수의 작동유체를 선정하여 성능해석을 수행하였으며, 최고의 성능이 나타난 R245fa의 경우 269.2kW출력과 6.37%효율을 얻을 수 있었다. 또한 ORC 시스템의 응축기 압력변화에 따라 지역난방 회수수 온도가 57.3~85°C범위에 형성됨으로서 보일러 입구온도상승에 따른 연료 절감 효과가 예상되었다.

**Key words** : Medium Temperature Water(증온수) District Heating(지역난방), Organic Rankine Cycle(유기랭킨 사이클), Analysis of Characteristic(특성 분석)

† Corresponding author

E-mail address: hsyoo@ssu.ac.kr

**기호설명**

- $\dot{m}$  : 질량유량 [kg/s]
- $\dot{W}$  : 동력 [kW]
- $\dot{Q}$  : 열전달률 [kW]
- $T$  : 온도 [°C]

- $P$  : 유기랭킨사이클 출력 [kW]
- $\eta$  : 유기랭킨사이클 효율 [%]
- $h$  : 엔탈피 [kJ/kg]
- $s$  : 엔트로피 [kJ/kg · K]
- $PPT$  : Pinch Point Temperature [°C]

**1. 서론**

지역난방은 약 120°C의 중온수를 생산함으로써 수용가(공동주택, 빌딩등)에 열을 공급하여 난방과 냉방을 공급하는 시스템을 구축하고 있다. 지역난방 시스템에서 난방은 수용가의 기계실에 설치된 판형열교환기를 통한 간접 열교환을 시행하여 열을 공급하고 있으며, 냉방은 일반적으로 수용가의 기계실에 설치된 흡수식 냉동기에 중온수를 공급하여 냉수를 생산함으로써 수용가에 냉방을 공급하고 있다.

이때, 공급온도는 열생산시설에서 약 120°C로 생산되나 열부하를 지역부하별, 계절별, 시간대별로 분석하여 약 98°C~120°C의 온도범위에서 온도중심, 유량중심으로 분리하여 지역에 필요한 열을 공급하고 있다. 지역에 열을 공급하고(수용가의 열교환기 및 흡수식 냉동기 출구를 통과하고) 열생산시설에 회수되는 회수수(이하 지역난방 회수수)온도는 약 55°C로 형성되고 있다. 일반적으로 열생산시설은 보일러 및 열병합발전을 이용하고 있으나 이 논문에서는 열병합발전을 제외하고 오직 보일러만이 설치된 시설을 기준으로 하고자 한다.

지역난방에는 축열이라는 모드가 있는데 이는 열을 생산하여 지역에 공급하는 과정에서 열 생산량대비 지역의 열 소비량이 적을 때, 잉여열이 발생하게 되는데 이때 남은 잉여열을 축열조(중온수를 축열하는 탱크류의 구축물)를 이용하여 축열을 하게 된다. 이와 같이 축열조에 축열된 열을 사용함으로써 열 부하가 많이 걸리는 시간대에 Peak 값을 담당하게 되거나 또는 열생산시설을 가동하지 않고 축열조의 열만을 이용하여 부하별, 시간대별 경제적 운전이 가능한 운전모드를 선택 할 수 있으므로 지역난방 열생산설비에 있어 중요한 역할을 한다고 할 수 있다.

그런데 축열조는 완전 밀폐시스템이 아닌 쉘링 시스템을 갖춘 개방시스템으로 대기와의 압력차에 의한 출입이 있으나 일반적으로 정상운전하에서는 탱크 상부가 500Pa을 유지함으로써 약98°C의 중온수를 축열하게 된다.

본 연구에서는 보일러만을 갖춘 지역난방 설비의 이와같은 축열과정에서 지역난방 회수수를 혼입하지 않고 유기랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, 이하 ORC) 발전시스템을 구성함으로써 열만이 생산되는 보일러 설비에서 전력을 생산할 수 있으며, 또한 지역난방 회수수를 응축기를 통과하게 하여 회수온도를 상승시킴으로써 보일러 입구 온도를 높일수 있어 에너지 절감 등 많은 장점이 예상됨에 따라 ORC를 지역난방 축열과정과 연결하여 연구하고자 한다.

**2. 유기랭킨사이클 해석**

**2.1 지역난방 축열 운전**

지역난방의 축열운전이란 열생산시설에서 생산된 120°C의 중온수를 지역 열소요처에 공급하고 회수되는 55°C의 회수수와 혼합하여 98°C로 만들어 축열하는 것을 말한다. 이 연구에서는 축열시 120°C의 중온수를 회수수를 사용하지 않고 ORC의 증발기를 이용하여 98°C로 만들어 축열조

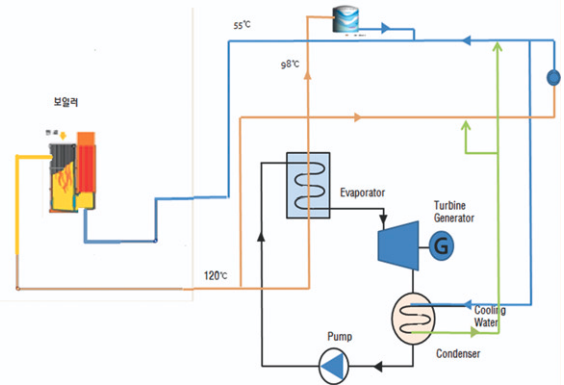


Fig. 1 Accumulator and ORC system Process configuration

## 지역난방용 중온수 열원 유기랭킨사이클 성능 특성

에 저장하는 시스템을 구성하여 연구하고자 한다.

Fig. 1은 보일러만 설치된 지역난방 시스템에 본 연구대상인 ORC 시스템을 구성한 개략도를 나타낸다. 보일러에서 생산되는 약120℃의 중온수를 축열하기 알맞은 온도(98℃)로 낮추기 위해 약 55℃의 회수수를 사용하지 않고 ORC 발전시스템을 사이클로 구성하며 중온수와 작동유체 사이의 열교환방법은 직접열교환방식을 사용하지 않고 안전성, 부하제어 및 설비운영의 편리성을 위해 중간매개체로서 열매체유를 이용하는 간접열교환 방식을 채택하였다.

### 2.2 유기랭킨 사이클

#### 2.2.1 원리

유기랭킨사이클 발전시스템은 스팀터빈을 이용한 발전시스템과 기본구성은 동일하지만 작동유체를 물이 아닌 유기혼합물을 사용하는 발전시스템으로 정의할 수 있다. 유기랭킨사이클은 기존의 랭킨 사이클과는 달리 비교적 액서지가 낮은 저열원을 이용하여 전력을 생산해 내는 시스템으로 낮은 에너지 열원에서 작동해야 하기 때문에 작동유체로는 비등점이 낮고, 증기압이 높아야 하며, 터빈의 입구 질량유량을 증가시키기 위해 잠열이 작고, 밀도가 큰 것이 상대적으로 유리하다. 유기혼합물은 비등점이 낮아 저온에서도 기화하기 때문에 중저온의 배열, 태양열, 지열 등을 이용하여 랭킨 사이클 시스템을 운용할 수 있으며, 주로 사용되는 유기혼합물은 프레온 계열의 냉매와 프로판 등의 탄화수소계 물질 등이 적용되고 있다.<sup>[1]</sup>

Fig. 2은 일반적인 ORC 시스템의 구성도와 운전선도를 나타낸다. 시스템 구성은 펌프, 증발기, 터빈 그리고 응축기로 구성되어 있으며, 각 사이클은 펌프에서의 압축 과정(1-2과정)에 의해 유기물이 압축되고, 증발기에서의 흡열 과정(2-3과정)에 의해 증발되며, 터빈에서의 팽창과정(3-4과정)에 의해 팽창일이 기계적 에너지로 변환되고, 응축기에서의 방열 과정(4-1과정)에 의해 응축기에서 응축되는 반복 시스템으로 구성된다.<sup>[1]</sup>

기존 랭킨시스템의 작동유체인 물이 포화증기점에서 터빈을 통해 팽창되는 경우에 터빈 출구에서 두 개의 상이 존재하는 습증기상태로 유지되는 것과는 달리, 작동유체로 유기혼합물을 사용하는 ORC 발전시스템은 터빈 내에서는 액적이 발생되지 않으므로 터빈 회전익에 스트레스가 발

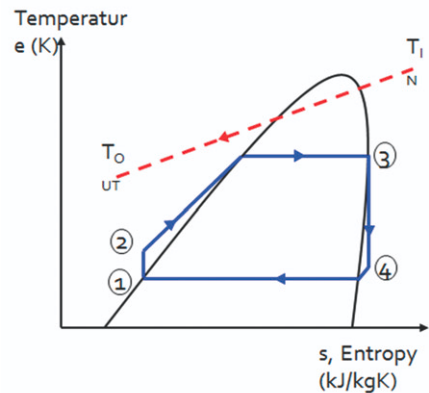
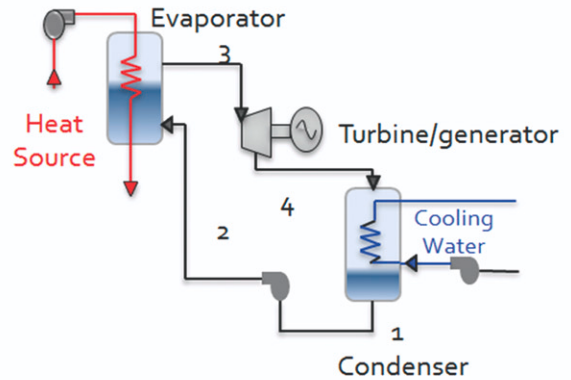


Fig. 2 Organic Rankine Cycle system and T-S Diagram

생되지 않고, 증발기 출구에서 과열영역이 필요 없는 포화 사이클 시스템을 구성할 수 있다. 지역난방수를 이용한 ORC 시스템에서는 열원 쪽 증발기 출구온도가 98℃로 일정하므로 터빈 입구 온도 또한 일정하다. 그러나 응축기를 통과하는 지역난방 회수수의 온도는 터빈에서 팽창된 유체가 포화 상태에 도달하지 않고 과열상태를 유지하기 때문에 높은 온도로 유지될 수 있어 응축기에서 나가는 지역난방 회수수 온도를 상승시킴으로써 전체 시스템 효율을 향상시킬 수 있다.

Fig. 3은 ORC 발전시스템 해석을 위한 각 구성품에 관련된 방정식 설명을 위한 온도와 엔트로피 선도를 나타낸다.

펌프의 등엔트로피 효율 ( $\eta_p$ )은

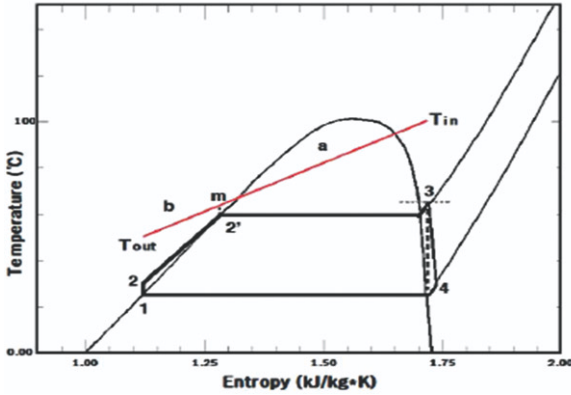


Fig. 3 T-S Diagram of ORC working fluid

$$\eta_p = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (1)$$

여기서 하첨자 s는 등엔트로피 상태를,  $h_1$ ,  $h_2$ 는 펌프 전단 엔탈피와 실제 증발기 전단 엔탈피를 각각 나타낸다.

펌프에 소요되는 동력 ( $W_p$ )은

$$\dot{W}_p = \dot{m}_r(h_2 - h_1) \quad (2)$$

여기서  $m_r$ 은 냉매의 질량유량을 나타낸다.

팽창터빈의 등엔트로피 효율 ( $\eta_E$ )은

$$\eta_E = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} \quad (3)$$

여기서  $h_3$ ,  $h_4$ 는 팽창터빈의 전단 엔탈피와 실제 응축기 전단의 엔탈피를 나타낸다.

팽창터빈에서 발생되는 동력 ( $W_E$ )은

$$\dot{W}_E = \dot{m}_r(h_3 - h_4) \quad (4)$$

증발기에 공급되는 열전달율 ( $Q_H$ )은

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_r(h_3 - h_2) \quad (5)$$

응축기에서 방출되는 열전달율 ( $Q_L$ )은

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_r(h_4 - h_1) \quad (6)$$

사이클의 열효율 ( $\eta_{th}$ ) 다음과 같다

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_E - \dot{W}_p}{\dot{Q}_H} \quad (7)$$

### 2.1.2 작동유체의 종류

지역난방 증온수를 이용한 유기랭킨사이클은 일반적인 유기랭킨사이클보다 훨씬 낮은 에너지 열원에서 작동해야 하기 때문에 작동유체로는 비등점이 낮고, 증기압이 높으며, 잠열이 작고, 밀도가 큰 것을 사용하는 것이 상대적으로 유리하므로 프레온 계열의 냉매를 일반적으로 사용하고 있다.<sup>[1]</sup>

프레온 계열의 작동유체에는 CFC (Chloro Fluorine Carbon, 염화불화탄소) 계열, HCFC (Hydro Chloro Fluorine Carbon, 수소화 염불화탄소) 계열, HFC (Hydro Fluorine Carbon, 수소화불화탄소) 계열, 자연냉매(Natural Working Fluid) 계열이 있다.

CFC 계열의 작동유체는 염소(Cl), 불소(F), 탄소(C)로 조합된 냉매로, R-11, R-12, R-113, R-114, R-115로 구성된다.

HCFC 계열의 작동유체는 수소(H), 염소(Cl), 불소(F), 탄소(C)로 구성된 냉매로 염소가 포함되어 있어도 수소원자가 포함되어 공기 중에서 쉽게 분해되지 않아 오존층에 대한 영향이 적으므로 대체냉매로 쓰이지만 염소가 포함되어 있어 완전한 대체냉매는 아니며, 종류에는 R-22, R-123, R-124, R-141b 등으로 구성된다.

HFC 계열의 작동유체는 수소(H), 불소(F), 탄소(C)로 구성된 냉매로 염소나 브롬이 화합물에 포함되어 있지 않아 몬트리올 의정서에 의해 규제되는 CFC 대체냉매로 각광 받는 신 냉매이며 종류에는 R-134a, R-125, R-31, R-143a, R-245fa, R-227ea, R-236fa 등으로 구성된다.<sup>[2]</sup>

유기랭킨사이클의 작동유체를 선정할 때는 적용하고자 하는 시스템과 작동유체와의 정확한 특성을 고려하여야만 시스템의 효율을 최적화시킬 수 있다. 유기랭킨사이클용 작동유체의 선정기준으로는 시스템의 구성기기가 증발과 정에서 초고압이나 응축과정에서 초진공이 되지 않도록 하기 위하여 사용온도 범위 내에서 적절한 증기압을 유지하여야 하며, 터빈, 배관 등의 컴팩트한 설계를 위해 작동유체의 밀도가 커야 하고 증발기나 응축기에서의 열전달 성능 향상과 크기 감소를 위해 열전달 특성이 좋아야 하며 사용온도 범위 내에서 화학적인 안정성을 가지면 열분해

## 지역난방용 증온수 열원 유기랭킨사이클 성능 특성

가 일어나지 않고 독성이나 위험성이 없어야 한다. 또한, 시스템 전체의 제작 원가의 절감과 함께 유지관리 편의성 및 비용 감소를 위해서는 작동유체의 구입이 쉽고 가격이 저렴하여야 한다.<sup>[1]</sup>

### 2.1.3 해석 프로그램

증온수 이용 유기랭킨사이클 성능해석을 위해서 발전 플랜트 설계 및 성능진단용으로 설계사 및 건설사에서 많이 사용되는 상용프로그램인 THERMOFLEX를 사용하였다.

## 3. 해석 결과 및 고찰

### 3.1 해석조건

열원 측 증발기 전, 후단 온도는 (99~120°C)/98°C로 하고, 냉각수 측 응축기 전, 후단 온도는 55°C/(56°C이상 터빈 출구 압력에 따라 가변)을 기본 조건으로 하며, Table. 1은 성능해석 기준사이클의 여러 가지 전제 조건을 나타낸다.

Table 1 Basic conditions of performance analysis

Item	Conditions
Site Conditions	Temperature : -12°C/32°C Relative moisture : 60%
Heat Source	Temperature : 99~120°C Mass flow : 163 m <sup>3</sup> /h
Evaporator	Design pinch point temperature : 3°C
Turbine Generator	Inlet Pressure : 11.3 bar Isentropic efficiency:75% Mechanical efficiency: 90%
Condenser	Inlet Water Temperature : 55°C Minimum pinch temperature : 2.5°C Return Water Flow : below 2,500m <sup>3</sup> /h
Pumps	Isentropic efficiency : 75%
Pipe	Pressure loss : 0%, Heat loss : 0%

### 3.2 세부 사이클 구성

Fig. 4는 ORC 발전시스템의 프로세스 구성을 위한 열원

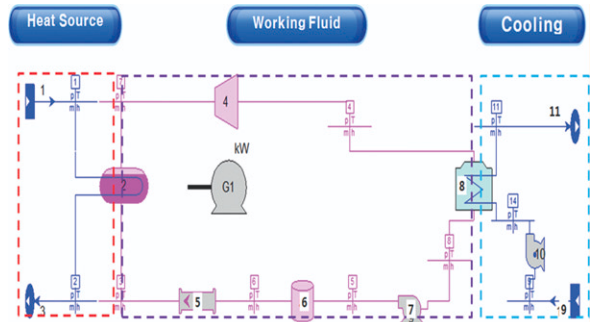


Fig. 4 Process configuration of organic rankine cycle

계통(Heat source system), 작동유체계통(Working fluid system), 냉각계통(Cooling water system)으로 구분하여 구성한 프로세스를 나타낸다. 각 구성품에서 1번은 열원 입구계통, 2번은 증발기, 3번은 열원 출구계통, 4번은 터빈, 5번은 작동유체 배관계통, 6번은 작동유체, 7번은 열매체 유 이송펌프, 8번은 응축기, 9번은 지역난방 회수수(냉각수) 입구계통, 10번은 지역난방 회수수(냉각수) 출구계통을 나타내며, 6번 작동유체에서는 각종 작동유체에 대한 데이터가 내장되어 있어 원하는 작동유체를 선택하여 성능을 비교할 수 있다.

열원계통(Heat source system)은 증온수 열원을 기준으로 실제 설계 Data를 기준으로 하였다. 증온수열원과 작동유체와의 열교환은 안전성, 부하 제어 및 안정적인 운전을 위하여 통상 사용하는 열 매체유를 활용한 간접열교환 방식으로 시스템을 구성 하였으며, 열원온도 99°C~120°C에서 증발이 용이한 작동유체를 선정하였고 열원 온도 120°C, 지역난방 회수수 온도 55°C, 증발기 PPT 3°C, 응축기 PPT 2.5°C에서 작동유체의 성능변화를 분석 하였다.

작동유체계통(Working Fluid system)은 터빈, 응축기, 작동유체이송펌프, 증발기로 구성되고, 터빈 후단 팽창 후 응축기 입구 압력 변화에따른 지역난방 회수수 온도 변화 및 유량변화를 분석하였다.

냉각수 계통(Cooling water system)에 있어서 냉각탑을 이용한 방식이 아닌 지역난방 회수수를 이용한 냉각방식으로 하였으며 지역난방 회수(냉각수)펌프 등으로 시스템을 구성하여 성능해석을 수행하였다.



Table 2 Properties of working fluids

Working Fluid	R-227ea	R-236fa	R-134a	R-245fa
Classification	HFC	HFC	HFC	HFC
Chemical Formula	CF <sub>2</sub> CHFCF <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	CH <sub>2</sub> ClCF <sub>3</sub>	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>
Molecular Weight [kg/kmol]	170	152	102	134
Boiling Point [°C@1atm]	-15.61	-1	-26.3	15.3
Critical Temperature [°C]	101.74	124.92	101.1	154.1
Critical Pressure [kPa]	29.3	2.72	46	36.4
Evaporation latent heat [101.3 kPa]	131.9		215.9	196.8
Toxicity	a little	a little	a little	a little
ODP	0		0	0
GWP	3,220	9,810	0.29	0.24

### 3.3 작동유체 선정

본 연구에서는 THERMOFLEX 프로그램을 사용하여 그 안에 내장된 냉매 약 40여가지중 Trial & Error를 통해 지역난방 증온수 온도 영역대 99~120°C에서 시스템 가동이 가능한 4가지 작동유체(R-227ea, R-236fa, R-134a, R-245fa)를 선별하였으며, Table 2는 적용된 작동유체의 종류별 특징을 나타낸다.

Fig. 5는 지역난방 축열시 증온수를 이용한 ORC 발전시스템에서 기준 조건을 (열원 입·출구온도 120/98°C, 응축수 입구 온도 55°C, 열원 유량(163m<sup>3</sup>/h))로 하고 응축기 입구 압력을 변화시켜작동유체 4가지 종류별 시뮬레이션 결과로서 출력, 효율 및 지역난방 회수수 출구 온도를 각각 나타낸다. 냉각탑을 이용하지 않고 응축기를 활용한 지역난방수(약 55°C)를 냉각수로 이용하여 사이클이 구성되는 지를 확인하였고, 작동유체 종류별 Table 1 기준조건에 의한 성능해석에서 작동유체 R-245fa는 269.2kW의 출력과 6.37%의 효율을, 작동유체 R-134a은 204.5kW의 출력과 4.83%의 효율을, R-227ea는 206.6kW의 출력과 4.89%의 효율을, R-236fa은 204.8kW의 출력과 4.85%의 효율을 얻었다. 상기의 결과를 토대로 효율과 출력면에서 R-245fa의 성능이 가장 우수하였으며, 또한 지구온난화지수

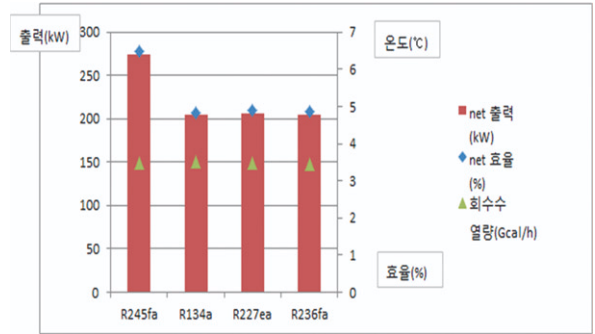


Fig. 5 Performance characteristic by working fluids

(GWP)와 오존계수(ODP)등 환경적인 측면에서도 성능이 우수하였다. 그런데 지역난방 회수수 열량(회수수 유량×응축기 전후단 온도차 × 비열)을 고려했을 때는 작동유체 별 거의 차이가 나지 않음에 따라 열량은 작동유체 선정에 크게 영향을 끼치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 지역난방 증온수를 적용한 ORC 발전시스템에 가장 적합한 작동유체는 R-245fa임을 알 수 있었다.

### 3.4 열원 온도 변화에 따른 성능특성

Fig. 6은 지역난방 증온수를 이용한 ORC 발전시스템에서 성능이 가장 우수한 작동유체인 R-245fa의 열원 온도 변화에 따른 출력, 효율 및 지역난방 회수수 유량을 나타내고 있다. 지역난방 공급 조건(열원온도 120°C, 지역난방 회수수 55°C)에서 유기랭킨사이클을 구성하였을 때를 기준으로 열원 온도 99°C에서 120°C사이의 온도변화에 따른 성능 해석을 수행하였다. 이때 작동유체의 터빈입구 압력은 11.3bar, 온도는 95°C로 하였으며 터빈 출구압력은 4.6bar, 응축기 PPT는 2.5°C를 기준으로 하였다.

열원온도 99°C일때 11.95kW의 출력과 6.09%의 효율을, 중간 온도인 111°C에서는 158.2kW의 출력과 6.34%의 효율을, 120°C에서는 269.2kW의 출력과 6.37%의 효율을 나타내었다.

출력 증감비율은 열원 온도 1°C 상승시 12.15kW씩 출력이 증가하였으나 효율은 큰 변화가 없었다. 이는 열원의 온도에 비례하여 증발기에서 열교환량도 증감하기 때문인 것으로 분석된다. 즉, 증발기에서 열원 출구온도와 작동유체 출구온도는 PPT(Pinch Point Temperature) 3°C만큼 일정하므로 열원의 입구 온도가 높을수록 열교환량이 증가

## 지역난방용 증온수 열원 유기랭킨사이클 성능 특성

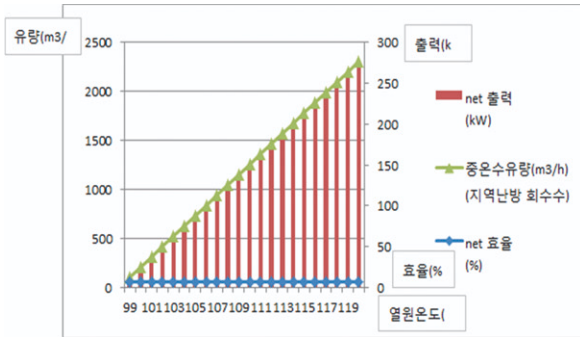


Fig. 6 Performance characteristic by medium temperature

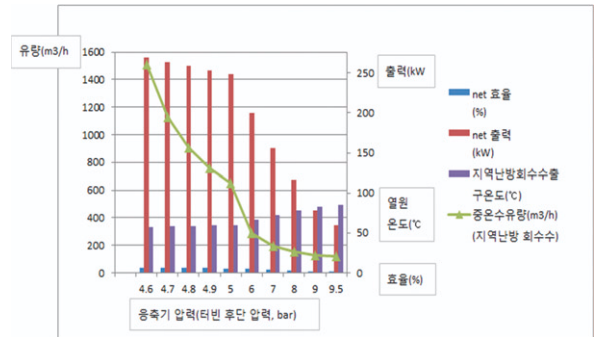


Fig. 7 Performance characteristic by turbine outlet pressure

하여 출력이 증가하고 열원의 온도가 낮을 경우에는 열교환량이 작아져서 출력이 감소하였다. 즉 효율은 입력 열원 증감에 비례하여 출력이 증감하므로 큰 변화가 없었으며, 단지 열원의 온도가 높을 경우 출력만이 증가하였다.

### 3.5 터빈 출구 압력 변화에 따른 성능특성

Fig. 7은 ORC 발전시스템에서 터빈 출구 배압의 변화에 따른 R-245fa의 출력, 효율, 지역난방 회수수 온도 및 유량을 나타내고 있다. 지역난방 공급 조건(열원온도 120℃, 지역난방 회수수 55℃)에서 유기랭킨사이클을 구성하였을 때를 기준으로 터빈출구 배압 4.6 bar에서 9.5 bar사이에서 성능해석을 수행하였다. 이때, 터빈입구 압력은 11.3bar, 열원 입구 온도 120℃, 응축기 입구 회수수 온도 55℃를 기준으로 하였고 응축기 PPT는 2.5℃로 하였다.

일반적인 랭킨사이클에서는 터빈출구 배압의 변화에 따라 출력과 효율도 변화며 배압이 상승할수록 출력과 효율이 낮아진다. 유기랭킨사이클에서도 4.6 bar에서 9.5 bar까지 배압이 증가함에 따라 출력과 효율이 비례하여 낮아짐을 확인할 수 있었다.

터빈 출구 응축기 배압 4.5 bar 이하의 배압에서는 작동유체의 포화온도가 냉각수 온도보다 낮아 응축이 불가능하여 4.6 bar에서부터 성능을 해석하였다. 터빈출구 압력 4.6 bar에서 269.2 kW의 출력과 6.37%의 효율, 57.3℃ 지역난방 회수수 출구온도, 1,512m³/h의 유량을, 6bar에서 199.7 kW의 출력과 4.73%의 효율, 66.91℃ 지역난방 회수수 출구온도, 288m³/h의 유량을, 9.5bar인 경우에

59.89 kW의 출력과 1.42%의 효율, 85℃ 지역난방 회수수 출구온도, 118m³/h의 유량을 나타내었다. 그리고 배압 1 bar 감소에 따라 출력이 평균적으로 42.5 kW가 증가하였으나 증가세는 감소되었으며, 효율 또한 평균적으로 1% 증가하였으나 증가세는 감소되었다.

즉, 유기랭킨사이클의 작동유체는 터빈 팽창 후에도 고온의 기체상태 이므로 원활한 응축을 위해서는 냉각 부하가 증가할 것으로 예상되며, 증기압이 높은 작동유체의 경우 배압이 낮을 경우에는 냉각수 온도가 포화온도 이상이어서 응축이 불가능 할 수도 있으므로 설계시 작동유체의 배압과 응축기 냉각부하와의 관계를 특별히 고려하여야 할 것으로 분석된다.

### 3.6 응축기 PPT 변화에 따른 성능특성

Fig. 8은 ORC 발전시스템에서 터빈 출구 압력별(응축기 입구 압력별) 응축기 PPT 변화에 따른 R-245fa의 출력, 효율, 지역난방 회수수 출구온도 및 유량을 나타내고 있다. 지역난방 공급 조건(열원온도 120℃, 지역난방 회수수 55℃)에서 유기랭킨사이클을 구성하였을 때를 기준으로 터빈출구 배압 4.5 bar에서 9.5 bar사이에서 응축기 PPT 변화에 따른 성능해석을 수행하였다.

터빈출구 배압의 변화에 따른 출력과 효율은 3.5에서 언급한 내용과 동일하며, 터빈 출구 압력별 응축기 PPT가 증가함에 따라 지역난방 회수수 출구 온도는 감소하였으며, 지역난방 회수수 유량은 증가하는 걸 알 수 있었다.

즉, 유기랭킨사이클의 작동유체는 터빈 팽창 후에도 고온의 기체상태 이므로 응축기의 PPT가 증가할수록 응축

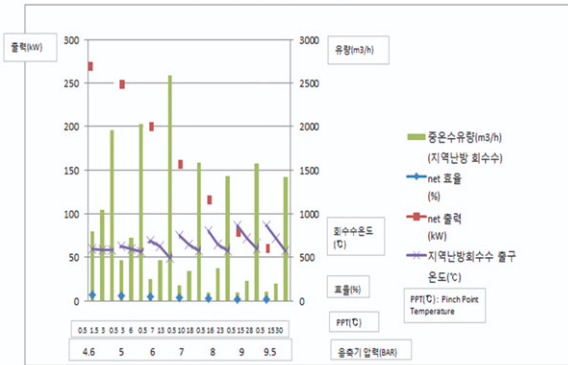


Fig. 8 Performance characteristic by PPT

기 작동유체의 출구온도는 일정함에 따라 지역난방 회수수 출구온도가 낮아지며 출구온도를 낮추기 위해 유량은 증가하게 된다. 따라서 설계시 작동유체의 배압과 응축기 PPT의 관계를 특별히 고려하여야 할 것으로 분석된다.

## 6. 결론

열원온도 120°C 온도에서 사이클에 냉각탑을 구성하지 않고 작동유체 응축을 위한 응축기를 구성하여 Trial & Error를 통해 시스템 작동 가능여부를 확인하였으며, 약 40개의 작동유체 중 4개의 작동유체(R-245fa, R-134a, R-227ea, R-236fa)가 가능한 것을 알 수 있었다. 또한 이 작동유체 중 R-245fa가 효율, 출력, 지역난방 회수수 열량등 성능측면 뿐만아니라, 지구온난화 및 오존계수등 환경 측면에서도 가장 적절한 작동유체인 것을 확인할 수 있었다.

R-245fa의 열원온도와 터빈출구 압력 변화에 따른 효율, 출력, 지역난방 회수수 유량, 회수수 출구 온도를 보았을 때, 120°C, 4.6bar에서 출력 269.2kW, 효율 6.37%, 유량 1,512m³/h등 최대치를 나타내었고 1°C 상승에 대한 출력변화량은 12.15kW인 것을 알 수 있었다.

터빈출구 압력 변화별 응축기 PPT 변화에 따른 지역난방 회수수 온도와 유량을 보았을 때 PPT가 증가함에 따라 지역난방 회수수 출구온도는 감소하였으며 그에 따라 유량은 증가하는 것을 알 수 있었다.

상기 결과를 바탕으로 지역난방 중온수를 이용한 유기랭킨사이클에서 작동유체는 R-245fa가 가장 적합하며, 지역난방수 유량, 효율, 출력을 고려했을 때 터빈입구 압력 11.3bar, 응축기 입구 압력 4.6bar에서 응축수를 통과하는 적절한 지역난방 회수수의 유량은 1,512m³/h이고 그때의 출력은 269.2kW이다. 또한, 응축기 출구 보일러 입구 온도는 4.6bar에서 57.3°C 9.5bar에서 85°C로서, ORC 터빈 출구압력이 상승함에 따라 지역난방 회수수의 출구온도 동반 상승함으로서 보일러 입구 온도 상승효과를 예상할 수 있었다. 그러므로 온도 상승분에대한 연료절감 효과가 예상됨에 따라, 앞으로 히트펌프 대응으로 지역난방 분야에서 연구해볼 만한 가치가 충분 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Kang Hoon, Journal of the KSME 9, Vol.49, No.9, pp. 47~50.
2. Kwon Dong Wook, 2014, "Performance Characteristics of Organic Rankine Cycles Using Medium Temperature Waste Heat with Different Working Fluids"
3. Hong Sun Eom, Cheon Seog Yoon, Young Min Kim, Dong Kil Shin, Chang Gi, 2012, "저온열원의 특성에 따른 ORC 성능해석최적화연구", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. vol.24, No 1, pp51-60.
4. Hong Sun Eom, Cheon Seog Yoon, Young Min Kim, Dong Kil Shin, Chang Gi "저온 열원의 특성에 따른 ORC 성능해석 최적화 연구", 2012, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering. vol.24, No 1, pp51-60.
5. Donghong Wei, Xuesheng Lu, Zhen Lu, Jianming Gu "Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle for waste heat recovery", April 2007, ENERGY CONVERSION & MANAGEMENT. vol 48, Issue 4 pages 1113-1119. (KPECC)